

**Handbuch zur
Störfallanalyse
von nuklearen Ver- und
Entsorgungseinrichtungen**

**Teil C Auswertung
der Betriebserfahrung
von Vorkommnissen**

Handbuch zur Störfallanalyse von nuklearen Ver- und Entsorgungseinrichtungen

Teil C Auswertung der Betriebserfahrung von Vorkommnissen

Florian Rowold
Fabian Sommer

Juli 2019

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 4716E03350 wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Deskriptoren

meldepflichtige Ereignisse, nukleare Sicherheit, nukleare Ver- und Entsorgung, Störfälle

Kurzfassung

Das vorliegende Handbuch wurde vornehmlich mit dem Ziel erstellt, den in Behörden oder Forschungseinrichtungen tätigen und mit Störfallanalysen befassten Personen Informationen in die Hand zu geben, die bei der Planung, der Erstellung, dem Betrieb und dem Rückbau von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung eine zutreffende und rasche Beurteilung von Störfällen erlauben. Es liegt jedoch nicht in der Absicht der Verfasser des Handbuchs, fertige Lösungen für komplexe Probleme der Störfallanalyse anzubieten. Derartige Fragen werden stets einer eingehenden Analyse und Berechnung durch Fachleute auf dem Gebiet der Störfallanalyse vorbehalten bleiben müssen.

Der sinnvolle Gebrauch der im Handbuch vorliegenden Informationen erfordert ein grundsätzliches Verständnis der Störfallproblematik und der Terminologie der nuklearen Sicherheit. In Teil A „Grundlagen der Störfallanalyse“ werden daher zunächst die wichtigsten Begriffe und Grundlagen eingeführt und erläutert, und der gesetzliche Rahmen gesteckt. In Teil B „Physikalisch-chemische Grundlagen der Störfallanalyse“ werden die Prozesse erläutert, die bei einem Störfall auftreten können. In Teil C „Auswertung der Betriebserfahrung von Vorkommnissen“ werden die bisherig aufgetretenen nationalen wie auch internationalen Vorkommnisse statistisch ausgewertet. In Teil D „Exemplarische Anwendung der Störfallanalyse auf Einrichtungen der nuklearen Ver- und Entsorgung“ werden die verschiedenen Aspekte der Störfallanalyse exemplarisch auf einen generischen Störfall angewendet.

Abstract

This handbook was prepared primarily with the aim to provide information to experts of authorities or research facilities engaged in incident analysis. It will allow an adequate and rapid assessment of incidents in the planning, preparation, operation and dismantling of nuclear supply and waste disposal facilities. However, it is not the intention of the authors of the handbook to offer ready solutions to complex problems of incident analysis. Such questions must remain subject to an in-depth analysis and assessment to be carried out by dedicated experts of incident analysis.

The expedient use of the information given in this handbook requires a fundamental understanding of incident analysis and the terminology of nuclear safety. Therefore, in part a "fundamentals of incident analysis" the most important terms and fundamentals are introduced and explained, and the legal framework is set. Part B "Physical and chemical fundamentals of incident analysis" explains the physical and chemical processes possibly involved in an incident. In Part C "Evaluation of the operational experience of events", the national and international nuclear events happened so far, are statistically evaluated. In Part D "Exemplary application of incident analysis to nuclear supply and waste disposal facilities", the various aspects of incident analysis are applied exemplary to a generic application case.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Verwendete Klassifizierungen der meldepflichtigen oder sicherheitsrelevanten Ereignisse	1
1.1.1	Auslösende Ereignisse	1
1.1.2	Vorkommnis-auslösende Ursachen	2
1.1.3	Anlagentyp.....	3
1.1.4	Radiologische Auswirkung.....	3
1.1.5	Einstufung entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung nach INES	4
1.2	Systematischer Aufbau des Störfallhandbuchs – Teil C	4
2	Absturz von Lasten	7
2.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	7
2.2	Datenbasis.....	9
2.3	Ursachen	10
2.4	Radiologische Auswirkungen.....	12
2.5	Aufschlüsselung nach INES.....	13
2.6	Zusammenfassung	14
3	Leckagen und Freisetzungen.....	17
3.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	18
3.2	Datenbasis.....	20
3.3	Ursachen	23
3.4	Radiologische Auswirkungen.....	26
3.5	Aufschlüsselung nach INES.....	31
3.6	Zusammenfassung	33
4	Brände.....	37
4.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	37
4.2	Datenbasis.....	39

4.3	Ursachen	41
4.4	Radiologische Auswirkungen	43
4.5	Aufschlüsselung nach INES.....	45
4.6	Zusammenfassung	46
5	Explosionen	49
5.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	50
5.2	Datenbasis.....	51
5.3	Ursachen	52
5.4	Radiologische Auswirkungen	55
5.5	Aufschlüsselung nach INES.....	57
5.6	Zusammenfassung	58
6	Kritikalitätsrelevante Vorkommnisse	61
6.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	62
6.2	Datenbasis.....	63
6.3	Ursachen	65
6.4	Radiologische Auswirkungen	66
6.5	Aufschlüsselung nach INES.....	68
6.6	Zusammenfassung	75
7	Ausfall von Systemen und Komponenten	77
7.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	77
7.2	Datenbasis.....	81
7.3	Ursachen	83
7.4	Radiologische Auswirkungen	86
7.5	Aufschlüsselung nach INES.....	87
7.6	Zusammenfassung	89
8	Einwirkungen von außen (EVA).....	91
8.1	Meldekriterien für deutsche Anlagen.....	92
8.2	Datenbasis.....	93
8.3	Ursachen	94

8.4	Radiologische Auswirkungen.....	97
8.5	Aufschlüsselung nach INES.....	98
8.6	Zusammenfassung	99
	Literaturverzeichnis.....	101
	Abbildungsverzeichnis.....	103
	Tabellenverzeichnis.....	105

1 Einleitung

Betriebserfahrungen sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Erlangung sicherheitsgerichteter Erkenntnisse. Die Auswertung meldepflichtiger oder sicherheitsrelevanter Ereignisse im Hinblick auf den Ereignisablauf, die Ursachen und die Auswirkungen, ermöglicht die Erkennung von Schwachstellen, die Identifizierung systematischer Fehler und die Ableitung von Tendenzen. Ebenso können einrichtungsübergreifend übertragbare Erkenntnisse für vergleichbare Anlagentypen und Prozessschritte generiert werden.

Die zugrundeliegende Datenbasis für die in diesem Kapitel durchgeführten systematischen Auswertungen ist die Datenbank VIBS („Vorkommnisse im Brennstoffkreislauf“) des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), in der meldepflichtige Ereignisse aus deutschen Anlagen des Brennstoffkreislaufs und öffentlich bekannt gemachte Vorkommnisse in internationalen Anlagen der Ver- und Entsorgung dokumentiert sind /BUN 18/, /MES 91/. Vorkommnisse in deutschen Anlagen werden vom BfE erfasst und ausgewertet, jene in ausländischen Anlagen von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag des BfE. Der Datenbestand der VIBS umfasste Ende 2018 ca. 5.100 Vorkommnisse, davon ca. 1.600 aus dem Inland und 3.500 aus dem Ausland.

1.1 Verwendete Klassifizierungen der meldepflichtigen oder sicherheitsrelevanten Ereignisse

Für die systematische Auswertung der meldepflichtigen oder sicherheitsrelevanten Ereignisse wurden mehrere Klassifizierungen verwendet, um eine bessere Übersichtlichkeit zu schaffen:

- Auslösende Ereignisse
- Vorkommnis-auslösende Ursachen
- Anlagentyp
- Radiologische Auswirkung

1.1.1 Auslösende Ereignisse

Für die Gliederung der dokumentierten Vorkommnisse wurden dabei eine Klassifizierung der auslösenden Ereignisse verwendet, die auf der Grundlage bestehender

Konventionen bei der Vorkommnisbewertung definiert ist. Dabei lehnt sie sich im Wesentlichen an die Begriffskonvention der VIBS an, einzig die Lastabstürze wurden als zusätzliche Klasse manuell identifiziert. Jede der folgenden Klassen wird in einem separaten Kapitel behandelt:

- Absturz von Lasten (Kapitel 2)
- Leckagen und Freisetzungen (Kapitel 3)
- Brände (Kapitel 4)
- Explosionen (Kapitel 5)
- Kritikalitätsrelevante Vorkommnisse (Kapitel 6)
- Ausfall von Systemen und Komponenten (Kapitel 7)
- Einwirkungen von außen (EVA, Kapitel 8)

1.1.2 Vorkommnis-auslösende Ursachen

Bedingt durch die Komplexität sowohl der Technik als auch der Prozessabläufe in Anlagen des Brennstoffkreislaufs ist eine Vielzahl von Vorkommnis-auslösenden Ursachen möglich. Diese decken technische, organisatorische, und menschliche Ursachen, sowie höhere Gewalt ab. Da in vielen Fällen die genauen Ursachen oft unbekannt sind oder nicht genau eingegrenzt werden können, wird für diese Umstände die eigene Kategorie „*Nicht klassifizierbare Ursachen*“ definiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränkte sich die Einteilung der auslösenden Ursachen auf die folgenden sechs Kategorien:

- Auslegungsmängel (Fehler in der Vorbetriebsphase bei Planung, Auslegung, Fertigung, Montage)
- Komponenten- oder Bauteilversagen (Versagen von Komponenten oder Bauteilen; Materialschäden wie z. B. Verschleiß, Korrosion, Ermüdung)
- Menschliches Fehlverhalten
- Organisatorische Mängel (z. B. unzulängliche Vorschriften, ungeeignete Betriebsbedingungen)
- Äußere Einwirkungen
- Nicht klassifizierbare Ursachen (sonstige oder unbekannte Ursachen)

Für die Vorkommnisklasse der äußeren Einwirkungen wurden die Ursachen in eine eigene Einteilung detaillierter aufgeschlüsselt.

1.1.3 Anlagentyp

Die Vorkommnis-auslösenden Ursachen werden für jede Vorkommnisklasse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt. Für jeden Anlagentyp werden die relativen Häufigkeiten für die einzelnen Ursachenkategorien angegeben, wobei diese Werte auf die Zahl der Vorkommnisse für den jeweiligen Anlagentyp normiert sind. Folgende Einteilung für Anlagentypen mit den jeweiligen Abkürzungen werden verwendet:

- Anreicherungsanlagen (AN)
- Brennelementfabriken (BE)
- Forschungszentren (FO)
- Konversionsanlagen (KO)
- Produktionsanlagen, Zwischen- und Endlager, Uranminen (PR)
- Wiederaufarbeitungsanlagen (WA)
- Sonstige Anlagen (z. B. Labore oder Einrichtungen zur Medienaufbereitung) (SO)

1.1.4 Radiologische Auswirkung

Die Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der jeweiligen Vorkommnisse orientiert sich ebenfalls an der Begriffskonvention der VIBS. Es wurden fünf Kategorien definiert:

- Keine oder vernachlässigbare, radiologische Auswirkungen
- Sachkontaminationen (Auswirkungen innerhalb der Anlage, z. B. Kontaminationen von Oberflächen)
- Inkorporationen, Personenkontaminationen oder externe Strahlenexpositionen (auch mit Todesfolge)
- Freisetzungen bzw. erhöhte Ableitungen in die Umgebung (Auswirkungen außerhalb der Anlage)
- Auswirkungen unbekannt

Um Doppelzählungen zu vermeiden, wurde, sofern ein Vorkommnis mehreren Kategorien zugeordnet werden kann, die Einordnung in die Kategorie mit den schwerwiegenderen radiologischen Auswirkungen gewählt. Dies bedeutet insbesondere, dass in der Kategorie „*Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung*“ nicht alle zugehörigen Vorkommnisse berücksichtigt werden, weil sie bereits in der als gravierender betrachteten Kategorie „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ erfasst werden. Dies trifft vor allem auf Vorkommnisse mit strahlungsbedingten Personenschäden – bis hin zur Todesfolge – zu.

1.1.5 Einstufung entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung nach INES

Meldepflichtige Ereignisse werden in der Regel vom Betreiber entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung eingestuft. Die zuständige Aufsichtsbehörde prüft die Einstufung, bestätigt diese oder nimmt eine eigene Einstufung vor. Neben den durchaus unterschiedlichen nationalen Meldekriterien findet mit der 1990 entwickelten „International Nuclear and Radiological Event Scale“ (INES) meist zusätzlich der international anerkannte Standard bei der Einstufung von Vorkommnissen Anwendung /IAE 09/, /KOT 94/. In Deutschland haben sich die Betreiber von Kernkraftwerken Anfang 1992 gegenüber dem BMU verpflichtet, die Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala anzuwenden. Seit etwa Mitte der 1990er Jahre wird sie auch für andere kerntechnische Einrichtungen, wie Forschungsreaktoren und Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs, angewandt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Kapitel 2.2.2 des Teil A dieses Handbuchs (/GRS 19/). In die Auswertung wurden alle nach INES eingestufteten Vorkommnisse einbezogen. Vorkommnisse, welche aus der Zeit vor der Einführung der INES stammten, wurden in die Stufe „*keine Einstufung*“ mit aufgenommen.

1.2 Systematischer Aufbau des Störfallhandbuchs – Teil C

Im Folgenden wird jeweils eine Klasse an Vorkommnissen in einem eigenen Kapitel behandelt, das immer nach dem folgenden Schema aufgebaut ist:

- Zuerst werden in einer Übersicht über die Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland die Bereiche hervorgehoben, in denen es potentiell zu den jeweiligen Vorkommnissen kommen kann.

- Im Unterkapitel „Meldekriterien für deutsche Anlagen“ werden die Meldekriterien für deutsche Anlagen nach der bundesdeutschen "Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV)" /BMU 18/, /GRS 19/ dargelegt.
- Im Unterkapitel „Datenbasis“ wird die für die weiteren Analysen verwendete Datenbasis graphisch dargestellt, die aus der VIBS-Datenbank entnommen wurde. Außerdem werden die Vorkommnisse tabellarisch nach In- und Ausland und nach den oben benannten Anlagentyp aufgeschlüsselt.
- Im Unterkapitel „Ursachen“ werden die Vorkommnisse nach den oben benannten Ursachen aufgeschlüsselt. Auch hier wird die prozentuale Verteilung auf die verschiedenen Anlagentypen durchgeführt.
- Im Unterkapitel „radiologische Auswirkungen“ werden die Vorkommnisse nach den oben benannten radiologische Auswirkungen aufgeschlüsselt.
- Im Unterkapitel „Aufschlüsselung nach INES“ werden die Vorkommnisse nach ihrer Ines-Einstufung aufgeschlüsselt.
- Schließlich werden die Erkenntnisse im Kapitel „Zusammenfassung“ für jede Klasse an Vorkommnissen zusammengefasst.

2 Absturz von Lasten

Eine der häufigsten Ursachen für physikalische Schäden an Behältern von radioaktivem Material oder Anlagen für dessen Verarbeitung sind Abstürze von Lasten. Die gravierendsten radiologischen Folgen einer solchen Beschädigung sind Aktivitätsfreisetzungen und eine damit verbundene Gefährdung von Mensch und Umwelt.

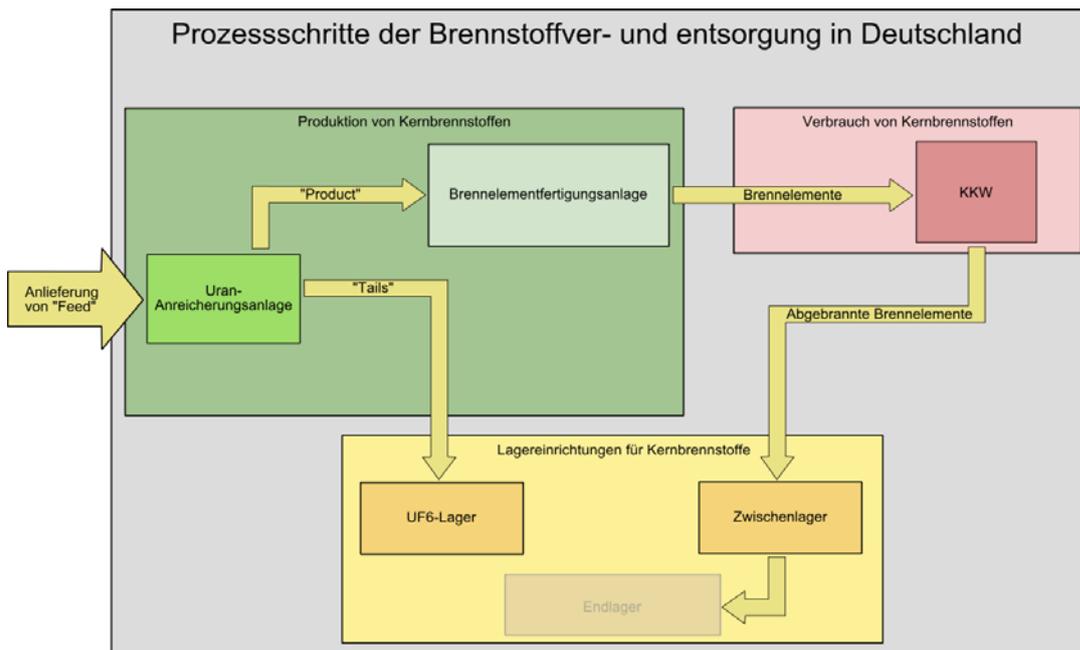


Abb. 2.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es potentiell zu Lastabstürzen kommen

2.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden Abstürze von Lasten sowohl für Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG (siehe AtSMV Anlage 2) als auch für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG wie z.B. Zwischenläger für bestrahlte Brennelemente (siehe AtSMV Anlage 5) als meldepflichtige Ereignisse aufgeführt.

Die entsprechenden Meldekriterien in AtSMV Anlage 2, Abschnitt 3.2 „Anlageninterne Ereignisse“, lauten:

- **S 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder eine sonstige Einwirkung von innen, so dass ein Anlagenzustand eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umwelt auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder eine sonstige Einwirkung von innen, sofern der Betrieb der Anlage oder der Teilanlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann.
- **N 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, Absturz einer schweren Last oder eine sonstige Einwirkung von innen, sofern die Anlage hiervon betroffen und dies nicht von den Kriterien S 3.2.1 oder E 3.2.1 erfasst ist.

Die Meldekriterien in Anlage 5 AtSMV, Abschnitt 2.2 „Absturz von Lasten; Ereignisse bei Handhabung oder Transport“, lauten:

- **E 2.2.1**
 - Absturz eines Behälters, der mit Kernbrennstoffen oder verfestigten Spaltproduktlösungen beladen ist.
 - Absturz einer schweren Last auf einen Behälter, der mit Kernbrennstoffen oder verfestigten Spaltproduktlösungen beladen ist.
- **N 2.2.1**
 - Sicherheitstechnisch bedeutsames Ereignis beim Transport oder der Handhabung eines Transport- oder Lagerbehälters.
 - Sicherheitstechnisch bedeutsames Ereignis beim Transport oder der Handhabung einer Last.
 - Sicherheitstechnisch bedeutsamer Schaden an einem Hebezeug oder einer Transport- oder Handhabungseinrichtung.

2.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von Vorkommnissen im Zusammenhang mit Lastabstürzen beruht auf insgesamt 57 Ereignissen in inländischen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/.

In Abb. 2.2 ist die zeitliche Verteilung der von Lastabstürzen ausgelösten Vorkommnisse wiedergegeben.

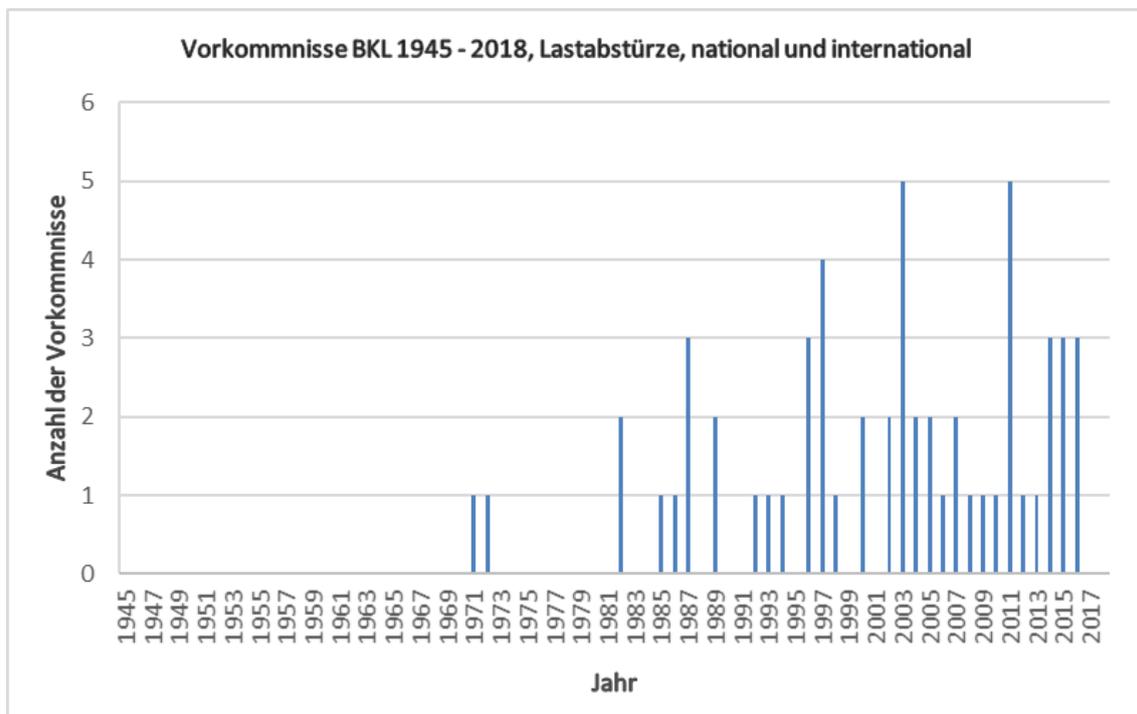


Abb. 2.2 Chronologische Aufschlüsselung der durch Abstürze von Lasten verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Gemäß Abb. 2.2 lässt sich aus den erfassten Vorkommnissen schließen, dass Lastabstürze in relativ geringer Anzahl pro Kalenderjahr auftreten. Die Anzahl schwankt zwischen keinem Vorkommnis und fünf Ereignissen pro Jahr. Bei 57 registrierten Lastabstürzen in 31 Anlagen sind Lastabstürze anlagenbezogen als Einzelfälle zu betrachten, welche sich jedoch nicht vollständig vermeiden lassen. Dies wird durch das relativ kontinuierliche Auftreten dieses Ereignistyps über die Jahre bestätigt.

Tab. 2.1 gibt die Verteilung der durch Lastabstürze verursachten Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland sowohl in absoluten Werten als auch in relativen Häufigkeiten wieder. Von den insgesamt 57 erfassten Vorkommnissen ereigneten sich 49 in ausländischen und 8 in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs.

Tab. 2.1 Verteilung der in VIBS erfassten, durch Lastabstürze ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	3	37,5	5	10,2	8	14,0
Brennelementfabriken	5	62,5	5	10,2	10	17,5
Forschungszentren	0	0,0	11	22,4	11	19,3
Konversionsanlagen	0	0,0	1	2,0	1	1,8
Sonstige Anlagen	0	0,0	3	6,1	3	5,3
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	0	0,0	10	20,4	10	17,5
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	14	28,6	14	24,6
Summe	8	100,0	49	100,0	57	100,0

Nach Tab. 2.1 zeigt sich eine relativ ausgeglichene Verteilung der Vorkommnisse im Zusammenhang mit Lastabstürzen bezogen auf die Anlagentypen. Die Beiträge der Konversions- und sonstigen Anlagen sind von untergeordneter Bedeutung. Im Ausland entfallen signifikante Vorkommniszahlen auf Wiederaufarbeitungsanlagen und Forschungszentren, sowie die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen.

2.3 Ursachen

Tab. 2.2 gibt die Zuordnung der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten an.

Tab. 2.2 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Lastabstürze zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	1	12,5	0	0,0	1	1,8
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	1	12,5	15	30,6	16	28,1
Menschliches Fehlverhalten	5	62,5	21	42,9	26	45,6
Organisatorische Mängel	1	12,5	2	4,1	3	5,3
Äußere Einwirkungen	0	0,0	1	2,0	1	1,8
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	0	0,0	10	20,4	10	17,5
Summe	8	100,0	49	100,0	57	100,0

Nach Tab. 2.2 ist „*Menschliches Fehlverhalten*“ sowohl in deutschen (62,5 %) als auch in ausländischen Anlagen (42,9 %) die häufigste Ursache für Lastabstürze. Bei den klassifizierbaren Ursachen folgen mit großem Abstand die Kategorien „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ gefolgt von „*Nicht klassifizierbaren Ursachen*“. Die Kategorie „*Organisatorische Mängel*“ ist sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen nur von geringer Bedeutung.

In Tab. 2.3 werden die Ursachen für alle durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen (ohne Wiederaufarbeitungsanlagen) aufgeschlüsselt.

Für Konversionsanlagen und Sonstige Anlagen ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt.

Tab. 2.3 Aufschlüsselung der Ursachen für die durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO
Anzahl Vorkommnisse	8	10	11	1	9	3
	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	0,0	10,0	0,0	0,0	0 0	0,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	12,5	10,0	27,3	100,0	44,4	100,0
Menschliches Fehlverhalten	25,0	70,0	63,6	0,0	44,4	0,0
Organisatorische Mängel	25,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Äußere Einwirkungen	12,5	0,0	0,0	0,0	0 0	0,0
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	25,0	0,0	9,1	0,0	11,2	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Für alle statistisch ausreichend besetzten Anlagentypen – Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken, Forschungszentren und die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen – ist „*Menschliches Fehlverhalten*“ die häufigste klassifizierbare Ereignisursache, jeweils gefolgt von „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“. Weitere relevante Ursachen sind:

- in Brennelementfabriken „*Auslegungsmängel*“
- In Anreicherungsanlagen „*Organisatorische Mängel*“

Daneben sind in Forschungsanlagen „*Auslegungsmängel*“ und „*Organisatorische Mängel*“ als Ereignisursachen bedeutungslos.

2.4 Radiologische Auswirkungen

Lastabstürze in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs können – je nach Art der beteiligten Komponenten – zu Beeinträchtigungen der Funktionalität von Rückhaltebarrieren und damit auch zur Freisetzung von Radioaktivität bzw. zur Kontamination der Anlage oder des Anlagenpersonals führen.

Tab. 2.4 gibt die Zuordnung der radiologischen Auswirkungen der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse in die oben aufgeführten Kategorien wieder. Dabei werden sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 2.4 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	4	50,0	33	67,3	37	64,9
Sachkontamination	1	12,5	5	10,2	6	10,5
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	0	6,9	4	8,2	4	7,0
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Auswirkungen unbekannt	3	37,5	7	14,3	10	17,6
Summe	8	100,0	49	100,0	57	100,0

Nach Tab. 2.4 sind die häufigsten Kategorien (geordnet nach abnehmenden Häufigkeiten) „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“, „Sachkontamination“ und „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“. Dabei stellt die Kategorie „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ sowohl bei ausländischen als auch bei deutschen Anlagen bei weitem den größten Anteil an der Häufigkeitsverteilung. Bei keinem der 57 erfassten Vorkommnisse wurde eine „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“ registriert.

2.5 Aufschlüsselung nach INES

Die radiologischen Auswirkungen von Vorkommnissen, die im Zusammenhang mit Lastabstürzen stehen, sind in den meisten Fällen weniger folgenschwer als diejenigen anderer Vorkommnisklassen (z. B. Kritikalitätsexkursionen oder Explosionen). Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES wieder. Die durch Lastabstürze verursachten Vorkommnisse sind ausnahmslos den INES-Stufen 0 und 1 zugeordnet.

Tab. 2.5 Zuordnung der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	4	50,0	19	38,8	23	40,4
INES = 1	2	25,0	19	38,8	21	36,8
Keine Einstufung	2	25,0	11	22,4	13	22,8
Summe	8	100,0	49	100,0	57	100,0

In Tab. 2.5 ist für die durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – angegeben.

Gemäß Tab. 2.5 liegt für 22,8 % aller Vorkommnisse, die im Zusammenhang mit Lastabstürzen stehen, keine INES-Einstufung vor (deutsche Anlagen: 25 %, ausländische Anlagen: 22,4 %); dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala ereigneten.

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: Die Hälfte der Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurden der niedrigsten INES-Stufe 0 und ein Viertel der INES-Stufe 1 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 39 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und ca. 39 % mit INES-Stufe 1 bewertet.

2.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 57 mit Lastabstürzen in Verbindung stehenden Vorkommnisse in in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Lastabstürze ereigneten sich mit einer relativ ausgeglichenen Verteilung auf die Anlagentypen. Im Falle ausländischer Anlagen entfallen signifikante Vorkommniszahlen auf Wiederaufarbeitungsanlagen und Forschungszentren, sowie die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen.

Als häufigste Ursachen für Lastabstürze – sowohl in ausländischen als auch in deutschen Anlagen – wurde „*Menschliches Fehlverhalten*“ und „*Komponenten- oder Bauteilversagen*“ und „*Verschleiß*“ identifiziert, gefolgt von „*Nicht klassifizierbaren Ursachen*“ und „*Auslegungsmängeln*“. Darüber hinaus zeichnen sich zwischen den einzelnen Anlagentypen Unterschiede bei der Besetzung der verschiedenen Ursachenkategorien ab.

Eine Untersuchung der radiologischen Auswirkungen von mechanischen Beschädigungen und Lastabstürzen zeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen dieser Auswirkungen in deutschen und ausländischen Anlagen weitgehend übereinstimmen. In beiden Fällen sind die häufigsten Kategorien „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“, „*Sachkontamination*“ und „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“.

Für etwa 40 % der erfassten Ereignisse liegt keine Einstufung nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES vor. Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: 50 % der Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 und 25 % der Stufe 1 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 39 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und ca. 39 % mit INES-Stufe 1 bewertet.

3 Leckagen und Freisetzungen

Bei vielen Prozessschritten zur Herstellung von Kernbrennstoffen kommen Flüssigkeiten zum Einsatz. Beispiele hierfür sind das In-situ-Auslaugverfahren zur Urangewinnung des Urans aus dem Erz, der Transport zur Anreicherung in Form von flüssigem UF_6 , das Nasskonversionsverfahren bei der Brennelementfertigung, oder die Abtrennung von Uran und Plutonium bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen. Hinzu kommen Prozessabwässer aus Filteranlagen und Spülungen kontaminierter Komponenten. Neben Leckagen und Auslaufstörfällen ist in Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung auch der Emissionspfad über die luftgetragene Verbreitung von Radioaktivität von Bedeutung. Deshalb werden in diesem Kapitel auch die durch Freisetzungen hervorgerufenen Vorkommnisse ausgewertet.

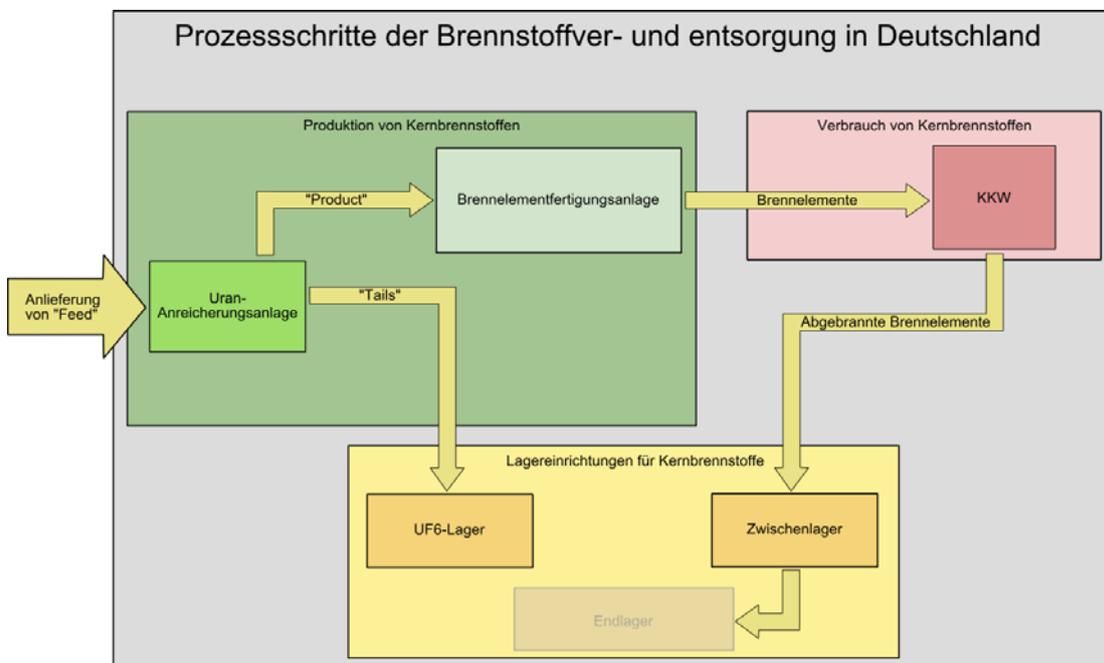


Abb. 3.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Leckagen und Freisetzungen kommen

Die in deutschen Anlagen der nuklearen Versorgung durchgeführten Verfahrensschritte mit Uranhexafluorid (UF_6) beschränken sich auf den Transport und die Anreicherung des „Feeds“, gefolgt vom Transport des angereicherten „Products“, sowie auf den Transport und die Zwischenlagerung des abgereicherten „Tails“. Das chemotoxische Gefahrenpotential von UF_6 im Falle einer Freisetzung ist als weitaus höher einzustufen als dessen Radiotoxizität. Im Unterschied zu den wasserunlöslichen Uranoxiden UO_2

und U_3O_8 wird die chemotoxische Wirkung von UF_6 nicht primär durch das darin enthaltene Schwermetall Uran verursacht, welches als akutes Gift für Lungen und Nieren wirkt. Die registrierten Todesfälle nach störfallbedingten Freisetzungen von UF_6 in zwei amerikanischen Uranverarbeitungsanlagen (Philadelphia, 02.09.1944; Gore, 04.01.1986) waren vielmehr auf die Bildung konzentrierter Aerosole von Fluorwasserstoff (HF) und Uranylfluorid (UO_2F_2) bei der chemischen Reaktion von UF_6 mit Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ($UF_6 + 2 H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4 HF$).

3.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden sowohl Leckagen als auch Freisetzungen für Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG (siehe Anlage 2 AtSMV) als meldepflichtige Ereignisse aufgeführt.

Die Meldekriterien in Anlage 2 AtSMV, Abschnitt 1.2 „Freisetzung radioaktiver Stoffe“, lauten:

- **S 1.2.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, bei der zu besorgen ist, dass die innerhalb von 24 Stunden freigesetzte Aktivität
 - zu einer Überschreitung der Grenzwerte der effektiven Dosis nach § 99 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung /STRL 18/ führt oder
 - mehr als 10 Prozent der von der zuständigen Behörde für Ableitungen festgelegten, im Kalenderjahr maximal zulässigen Aktivitätsabgaben beträgt.
- **E 1.2.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, bei der zu besorgen ist, dass die innerhalb von 24 Stunden freigesetzte Aktivität
 - zu einer effektiven Dosis führt, die mehr als 10 Prozent der Grenzwerte nach § 99 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung betragen, oder
 - mehr als 10 Prozent der von der zuständigen Behörde für Ableitungen festgelegten, im Kalenderjahr maximal zulässigen Aktivitätsabgaben beträgt.
- **N 1.2.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, die nicht unter die Kriterien S 1.2.1 oder E 1.2.1 fällt.

- **S 1.2.2** Freisetzung radioaktiver Stoffe innerhalb der Anlage, so dass außerhalb eines als Kontrollbereich gekennzeichneten Bereiches die Ortsdosisleistung den Wert von 3 Millisievert pro Stunde überschreitet.
- **E 1.2.2** Freisetzung radioaktiver Stoffe innerhalb der Anlage, so dass
 - innerhalb eines als Kontrollbereich gekennzeichneten Bereiches, soweit dieser nicht als Sperrbereich gekennzeichnet ist, die Ortsdosisleistung den Wert von 3 Millisievert pro Stunde für mehr als 24 Stunden überschreitet oder
 - die Einrichtung eines neuen Kontrollbereiches erforderlich ist.

Die Meldekriterien in Anlage 2 AtSMV, Abschnitt 2.2 „Schäden oder Leckagen an Rohrleitungen oder Behältern sicherheitstechnisch wichtiger Systeme“, lauten wie folgt:

- **S 2.2.1** Leckage in einem aktivitätsführenden System, die sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umgebung auswirkt oder wenn dies zu besorgen ist.
- **E 2.2.1** Bruch oder Riss mit Leckage in einem aktivitätsführenden System oder in einer Rohrleitung mit Sicherheitseinschluss (zum Beispiel Autoklave), der aus sicherheitstechnischen Gründen die Einstellung des Anlagenbetriebes erfordert.
- **N 2.2.1** Leckage oder Schaden, insbesondere Riss, Verformung oder Unterschreitung der Sollwanddicke an einer Rohrleitung oder einem Behälter eines sicherheitstechnisch wichtigen oder eines aktivitätsführenden Systems oder Anlagenteils. Nicht zu melden sind einzelne Tropfleckagen an
 - Dichtungen, Flanschen, Rohrleitungen oder Behältern der nicht aktivitätsführenden Systeme und Anlagenteile
 - Dichtungen und Flanschen aktivitätsführender Systeme und Anlagenteile

Bei der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG (siehe Anlage 5 AtSMV) spielen Leckageereignisse keine Rolle. Bei dem eingelagerten Inventar handelt es sich ausschließlich um feste radioaktive Abfälle bzw. verfestigte hochradioaktive Spaltproduktlösungen, und die Handhabungsabläufe in den Zwischenlagern erfordern keine Flüssigkeiten, deren Leckage zu befürchten ist.

Die Meldekriterien für Freisetzungseignisse sind in Abschnitt 1.1 „Freisetzung radioaktiver Stoffe“ der Anlage 5 AtSMV aufgeführt; sie lauten:

- **S 1.1.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, bei der zu besorgen ist, dass die innerhalb von 24 Stunden freigesetzte Aktivität zu einer Überschreitung der Grenzwerte der effektiven Dosis nach § 99 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung führt.
- **E 1.1.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, bei der zu besorgen ist, dass die freigesetzte Aktivität zu einer effektiven Dosis führt, die mehr als 10 Prozent der Grenzwerte nach § 99 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung betragen.
- **N 1.1.1** Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung, die nicht unter die Kriterien S 1.1.1 oder E 1.1.1 fällt.
- **S 1.1.2** Freisetzung radioaktiver Stoffe innerhalb der Einrichtung, so dass außerhalb eines als Kontrollbereich gekennzeichneten Bereiches die Ortsdosisleistung den Wert von 3 Millisievert pro Stunde überschreitet.
- **E 1.1.2** Freisetzung radioaktiver Stoffe innerhalb der Anlage, so dass
 - innerhalb eines als Kontrollbereich gekennzeichneten Bereiches, soweit dieser nicht als Sperrbereich gekennzeichnet ist, die Ortsdosisleistung den Wert von 3 Millisievert pro Stunde für mehr als 24 Stunden überschreitet oder
 - die Einrichtung eines neuen Kontrollbereiches erforderlich ist.

3.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von durch Freisetzungen und Leckagen initiierten Vorkommnissen stützt sich auf insgesamt 1.043 Ereignisse in inländischen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/. Dabei handelt es sich um 560 Freisetzungen und 483 Leckagen, die im Folgenden getrennt voneinander behandelt werden.

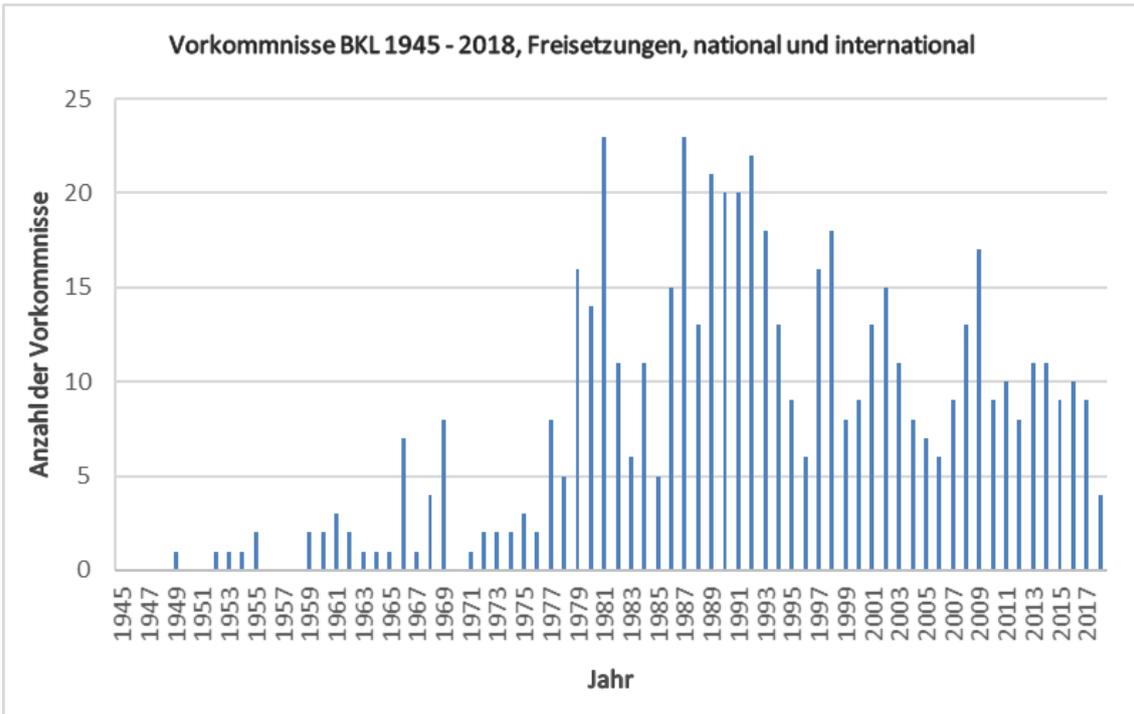


Abb. 3.2 Chronologische Aufschlüsselung der durch Freisetzungen verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

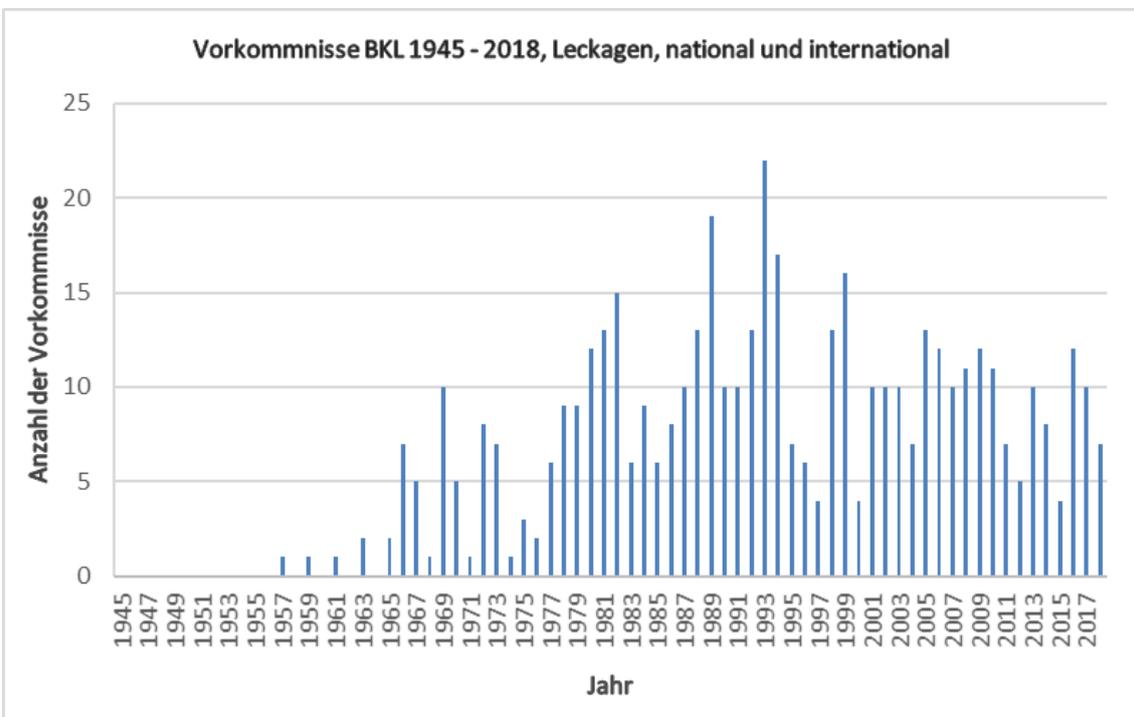


Abb. 3.3 Chronologische Aufschlüsselung der durch Leckagen verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Die Abb. 3.2 und Abb. 3.3 geben die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten Freisetzungen und Leckagen im In- und Ausland wieder. Beginnend mit dem Ende der 1970er Jahre lässt sich eine deutliche Zunahme der registrierten Freisetzungen und Leckagen erkennen; Ende der 1980er bis Mitte der 1990er Jahre stagniert die Zahl dieser Ereignisse auf hohem Niveau und fällt dann langsam auf einen mehr oder weniger stabilen Wert von jeweils knapp zehn Freisetzungen und Leckagen pro Jahr ab (Durchschnittswert der Jahre 2000 – 2018). Die meisten Freisetzungen ereigneten sich in den Jahren 1981 (23), 1987 (22), 1989 (21) und 1992 (22), die meisten Leckagen in den Jahren 1993 (22) und 1994 (17).

Als Erklärung für die Trends bei den Freisetzungen und Leckagen bietet sich das folgende Szenario an: Die Zunahme der erfassten Freisetzungen und Leckagen bis hin zu den Maxima verläuft parallel zur Zunahme der weltweiten Aktivitäten in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Die anschließende Abnahme ist auf die Einführung und kontinuierliche Weiterentwicklung von Schutzmaßnahmen und Vorkehrungen gegen Freisetzungen und Leckagen zurückzuführen.

Tab. 3.1 Verteilung der durch Freisetzungen verursachten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	4	4,6	85	17,9	89	15,9
Brennelementfabriken	81	94,2	126	26,6	207	37,0
Forschungszentren	0	0,0	78	16,5	78	13,9
Konversionsanlagen	0	0,0	65	13,7	65	11,6
Sonstige Anlagen	0	0,0	13	2,7	13	2,3
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	1	1,2	18	3,8	19	3,4
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	89	18,8	89	15,9
Summe	86	100,0	474	100,0	560	100,0

Tab. 3.1 und Tab. 3.2 geben die Verteilungen der durch Freisetzungen und Leckagen verursachten Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen im Aus- und Inland sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder. Von den 560 erfassten Freisetzungen ereigneten sich 474 in ausländischen und 86 in deutschen Anlagen. Von

den 483 erfassten Leckagen wurden 461 in ausländischen und 22 in deutschen Anlagen registriert.

Nach Tab. 3.1 ereignete sich der überwiegende Teil der Freisetzungen (rund 40 %) in Brennelementfabriken. Während im Ausland signifikante Häufigkeitsanteile auch auf Wiederaufarbeitungsanlagen, Anreicherungsanlagen, Forschungszentren und Konversionsanlagen entfallen, wurden fast alle Freisetzungen in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs (81 von 86) aus Brennelementfabriken gemeldet.

Tab. 3.2 Verteilung der durch Leckagen verursachten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	2	9,1	38	8,2	40	8,3
Brennelementfabriken	18	81,8	82	17,8	100	20,7
Forschungszentren	0	0,0	93	20,2	93	19,2
Konversionsanlagen	0	0,0	25	5,4	25	5,2
Sonstige Anlagen	0	0,0	22	4,8	22	4,6
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	2	9,1	33	7,2	35	7,2
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	168	36,4	168	34,8
Summe	22	100,0	461	100,0	483	100,0

Gemäß Tab. 3.2 ereignete sich der überwiegende Teil der Leckagen (rund 35 %) in Wiederaufarbeitungsanlagen. Während im Ausland signifikante Häufigkeitsanteile auch auf Brennelementfabriken, Forschungszentren und Anreicherungsanlagen entfallen, wurden Leckagen in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs fast ausschließlich aus Brennelementfabriken gemeldet.

3.3 Ursachen

In Tab. 3.3 und Tab. 3.4 sind die Zuordnungen der durch Freisetzungen und Leckagen ausgelösten Vorkommnisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs (ohne Wiederaufarbeitungsanlagen) sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 3.3 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Freisetzungen zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	19	22,1	24	6,2	43	9,1
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	46	53,5	172	44,7	218	46,3
Menschliches Fehlverhalten	18	20,9	74	19,2	92	19,5
Organisatorische Mängel	1	1,2	19	4,9	20	4,2
Äußere Einwirkungen	0	0,0	1	0,3	1	0,2
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	2	2,3	95	24,7	97	20,6
Summe	86	100,0	385	100,0	471	100,0

Nach Tab. 3.3 ist bei fast der Hälfte aller Freisetzungen „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ die Ursache. „Auslegungsmängel“ wurden in deutschen Anlagen prozentual (22,1 %) signifikant häufiger als in ausländischen Anlagen (6,2 %) als Vorkommnisauslösende Ursache identifiziert; umgekehrt ist der Anteil der Freisetzungen mit unbekannter oder nicht klassifizierbarer Ursache in ausländischen Anlagen (24,7 %) wesentlich höher als in deutschen Anlagen (2,3 %). „Menschliches Fehlverhalten“ ist sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen mit jeweils ca. 20 % die dritthäufigste Kategorie. „Organisatorische Mängel“ sind sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen nur von marginaler Bedeutung.

Tab. 3.4 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Leckagen zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	1	22,9	21	7,2	22	7,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	13	53,0	153	52,2	166	52,7
Menschliches Fehlverhalten	5	20,5	56	19,1	61	19,4
Organisatorische Mängel	2	1,2	6	2,0	8	2,5
Äußere Einwirkungen	0	0,0	3	1,0	3	1,0
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	1	2,4	54	18,4	55	17,5
Summe	22	100,0	293	100,0	315	100,0

Aus Tab. 3.4 geht hervor, dass jede zweite Leckage durch „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ ausgelöst wurde. Daneben ist in deutschen Anlagen nur noch „*Menschliches Fehlverhalten*“ (20,5 %) als Vorkommnis-auslösende Ursache prozentual von Bedeutung, während in ausländischen Anlagen „*Menschliches Fehlverhalten*“ und Leckagen mit unbekannter oder nicht klassifizierbarer Ursache jeweils zu etwa 19 % vertreten sind.

In Tab. 3.5 und Tab. 3.6 werden die Ursachen für alle durch Freisetzungen und Leckagen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen (ohne Wiederaufarbeitungsanlagen) aufgeschlüsselt.

Für die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen sowie für Sonstige Anlagen ist die Aussagekraft der Tab. 3.5 wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt; bei Tab. 3.6 gilt dies für Konversionsanlagen und Sonstige Anlagen.

Tab. 3.5 Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von Freisetzungen nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO
Anzahl Vorkommnisse	77	197	61	51	3	10
	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	4,5	13,5	9,0	4,6	0,0	7,7
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	55,1	49,3	38,5	35,4	57,9	23,1
Menschliches Fehlverhalten	19,1	17,4	23,1	23,1	21,1	15,4
Organisatorische Mängel	2,2	4,8	7,7	3,1	0,0	0,0
Äußere Einwirkungen	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	7,7
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	19,1	15,0	21,8	33,8	21,1	46,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Für alle statistisch ausreichend besetzten Anlagentypen – Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken, Forschungszentren und Konversionsanlagen – ist „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ die häufigste klassifizierbare Ursache für das Auftreten von Freisetzungen, wie sich aus Tab. 3.5 entnehmen lässt; mit deutlichem Abstand folgt jeweils „*Menschliches Fehlverhalten*“. Bei Brennelementfabriken spielen darüber hinaus „*Auslegungsmängel*“ eine Rolle. Die nicht eindeutig nach Ursachen

klassifizierbaren Freisetzungseignisse stellen bei allen Anlagentypen einen bedeutenden Anteil.

Tab. 3.6 Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von Leckagen nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO
Anzahl Vorkommnisse	37	91	67	16	21	16
	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	0,0	10,0	8,6	8,0	5,7	0,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	82,5	48,0	46,2	36,0	60,0	54,5
Menschliches Fehlverhalten	5,0	16,0	31,2	32,0	11,4	9,1
Organisatorische Mängel	5,0	4,0	1,1	0,0	2,9	0,0
Äußere Einwirkungen	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	4,5
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	7,5	22,0	11,8	24,0	14,3	31,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Für alle Anlagentypen ist „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ die häufigste klassifizierbare Ursache für das Auftreten von Leckagen, wie aus Tab. 3.6 hervorgeht. Bei Forschungszentren und Konversionsanlagen fällt darüber hinaus die Häufung von „*Menschlichem Fehlverhalten*“ auf. Dies ist für Forschungszentren insoweit plausibel, da hier mehr manuelle und weniger automatisierte Handhabungsvorgänge stattfinden als in den industriell betriebenen Anlagen der Kernbrennstoffversorgung. Die nicht eindeutig nach Ursachen klassifizierbaren Leckageereignisse stellen bei nahezu allen Anlagentypen – mit Ausnahme der Anreicherungsanlagen – einen bedeutenden Anteil.

3.4 Radiologische Auswirkungen

Freisetzungen und Leckagen in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs können – je nach Art, Masse oder Volumen der beteiligten Materialien – zu schwerwiegenden Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt führen. Freisetzungen von Radioaktivität innerhalb und/oder außerhalb des Anlagengeländes führen häufig auch zu Personenkontaminationen.

Tab. 3.7 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	9	10,5	47	11,8	56	11,6
Sachkontamination	35	40,7	170	42,7	205	42,4
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	34	39,5	101	25,4	135	27,9
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	8	9,3	75	18,8	83	17,1
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	5	1,3	5	1,0
Summe	86	100,0	398	100,0	484	100,0

Tab. 3.7 und Tab. 3.8 geben die Zuordnung der radiologischen Auswirkungen der durch Freisetzungen und Leckagen ausgelösten Vorkommnisse in die oben aufgeführten Kategorien wieder. Dabei werden sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten angegeben.

Aus Tab. 3.7 geht hervor, dass in deutschen Anlagen die beiden Kategorien „Sachkontamination“ (40,7 %) und „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ (39,5 %) als Folge von Freisetzungseignissen mit annähernd gleicher Häufigkeitsverteilung vertreten sind. In ausländischen Anlagen dominierte hingegen die „Sachkontamination“ (42,7 %), mit deutlichem Abstand gefolgt von „Inkorporation, Personenkontamination oder externer Strahlenexposition“ (25,4 %). Der mit einer „Freisetzung bzw. erhöhten Ableitung in die Umgebung“ verbundene Anteil der Vorkommnisse war in ausländischen Anlagen prozentual (18,8 %) fast doppelt so hoch wie in deutschen Anlagen (9,3 %). Nur etwa 12 % aller Freisetzungen – sowohl in ausländischen als auch in deutschen Anlagen – zeigten „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“.

Tab. 3.8 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	8	36,4	76	24,4	84	25,2
Sachkontamination	12	54,5	155	49,8	167	50,2
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	0	0,0	32	10,3	32	9,6
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	2	9,1	44	14,1	46	13,8
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	4	1,3	4	1,2
Summe	22	100,0	311	100,0	333	100,0

Wie Tab. 3.8 verdeutlicht, führten etwa die Hälfte aller Leckageereignisse sowohl in ausländischen als auch in deutschen Anlagen zu einer 'Sachkontamination'. Rund 36 % der Vorkommnisse in deutschen Anlagen, aber nur etwa 24 % der Vorkommnisse in ausländischen Anlagen hatten „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“. Umgekehrt war der mit einer „Freisetzung bzw. erhöhten Ableitung in die Umgebung“ verbundene Anteil der Vorkommnisse in ausländischen Anlagen (14,1 %) höher als in deutschen Anlagen (9,1 %). Bei keinem der 22 Leckageereignisse in deutschen Anlagen wurde eine „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ registriert; in ausländischen Anlagen war dies dagegen bei ca. 10 % der entsprechenden Vorkommnisse der Fall.

Ein Vergleich der Tab. 3.7 und Tab. 3.8 zeigt die folgenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Hinblick auf die radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen und Leckagen:

- Sowohl bei Freisetzungen als auch bei Leckagen stellen „Sachkontaminationen“ die häufigste Kategorie radiologischer Auswirkungen dar.
- Freisetzungen führten wesentlich häufiger als Leckagen zu einer „Inkorporation, Personenkontamination oder externen Strahlenexposition“.

- Bei Leckagen wurden deutlich häufiger als bei Freisetzungen „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ festgestellt.

In Tab. 3.9 und Tab. 3.10 sind die radiologischen Auswirkungen für alle durch Freisetzungen und Leckagen initiierten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt. Für jeden Anlagentyp werden die relativen Häufigkeiten für die einzelnen Ursachenkategorien angegeben, wobei diese Werte auf die Zahl der Vorkommnisse für den jeweiligen Anlagentyp normiert sind. Für die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen sowie für Sonstige Anlagen ist die Aussagekraft der Tab. 3.9 wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt; bei Tab. 3.10 gilt dies für Konversionsanlagen und sonstige Anlagen.

Gemäß Tab. 3.9 unterscheiden sich die radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen von Anlagentyp zu Anlagentyp. Ein Vergleich der statistisch ausreichend besetzten Anlagentypen – Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken, Forschungszentren und Konversionsanlagen – zeigt, dass „*Inkorporationen, Personenkontaminationen oder externe Strahlenexpositionen*“ in Brennelementfabriken und Forschungszentren signifikant häufiger auftraten als in Anreicherungs- und Konversionsanlagen, was auf der Handhabung radioaktiver Materialien mit zumeist höherem Aktivitätsinventar bzw. höherem Anreicherungsgrad in den zuerst genannten Anlagentypen beruht. Umgekehrt wurden „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ in Anreicherungs- und Konversionsanlagen häufiger beobachtet als in Brennelementfabriken und Forschungszentren. Bei Konversionsanlagen und Forschungszentren zeigt sich zudem eine auffällige Häufung von „*Freisetzungen bzw. erhöhten Ableitungen in die Umgebung*“. In Anreicherungsanlagen ist „*Sachkontamination*“ die zahlenmäßig dominierende radiologische Auswirkung.

Tab. 3.9 Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen

Radiologische Auswirkungen	AN	BE	FO	KO	PR	SO
	%	%	%	%	%	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	15,7	5,8	11,5	20,0	21,1	0,0
Sachkontamination	56,2	44,4	28,2	40,0	31,6	30,8
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	19,1	34,3	34,6	16,9	21,1	30,8
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	6,7	15,0	24,4	21,5	26,3	38,5
Auswirkungen unbekannt	2,2	0,5	1,3	1,5	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 3.10 Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen

Radiologische Auswirkungen	AN	BE	FO	KO	PR	SO
	%	%	%	%	%	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	55,0	27,0	6,5	28,0	34,3	22,7
Sachkontamination	40,0	49,0	65,6	44,0	37,1	31,8
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	2,5	10,0	16,1	8,0	5,7	9,1
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	2,5	12,0	9,7	20,0	22,9	36,4
Auswirkungen unbekannt	0,0	2,0	2,2	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Laut Tab. 3.10 sind „Sachkontaminationen“ die dominierende radiologische Auswirkung von Leckagen in Brennelementfabriken, Forschungszentren, Konversionsanlagen und Sonstigen Anlagen. Daneben zeigen sich einige anlagentypische Besonderheiten:

- Bei Brennelementfabriken und Konversionsanlagen sind auch noch die Kategorien „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“, „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“ sowie „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ von Bedeutung.

- Bei Sonstigen Anlagen sind noch die Kategorien „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“ sowie „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ relevant, bei Forschungszentren nur die letztgenannte.

Im Unterschied dazu finden sich bei mehr als der Hälfte aller erfassten Leckagen in Anreicherungsanlagen „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“, an zweiter Stelle folgen „Sachkontaminationen“. Die übrigen Kategorien sind ohne Bedeutung. In der zusammengefassten Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen sind „Sachkontaminationen“ und „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ gleichermaßen häufig vertreten; außerdem tragen hier „Freisetzungen bzw. erhöhte Ableitungen in die Umgebung“ einen auffallend hohen Anteil bei.

3.5 Aufschlüsselung nach INES

Die radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen und Leckagen sind in der Regel nicht so folgenschwer wie die anderer Vorkommnisklassen (z. B. Kritikalitätsexkursionen oder Explosionen). Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES wieder. Die durch Freisetzungen und Leckagen verursachten Vorkommnisse sind größtenteils den INES-Stufen 0 und 1 zugeordnet.

Tab. 3.11 und Tab. 3.12 geben für die durch Freisetzungen und Leckagen verursachten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES-Skala – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – wieder.

Tab. 3.11 Zuordnung der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	23	26,7	98	17,5	121	21,6
INES = 1	1	1,2	150	26,8	151	27,0
INES = 2	0	0,0	12	2,1	12	2,1
INES = 3	0	0,0	1	0,2	1	0,2
Keine Einstufung	62	72,1	213	38,0	275	49,1
Summe	86	100,0	474	100,0	560	100,0

Gemäß Tab. 3.11 liegt für rund 49 % aller erfassten Freisetzungseignisse keine INES-Einstufung vor (deutsche Anlagen: 72 %, ausländische Anlagen: 38 %); dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala in Deutschland ereigneten.

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Freisetzungen, ergibt sich folgendes Bild: Fast allen Vorkommnissen in deutschen Anlagen (23 von 24) wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet, einem Vorkommnis die INES-Stufe 1. In ausländischen Anlagen wurden ca. 37 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0, ca. 58 % mit INES-Stufe 1 und ca. 5 % mit INES-Stufe 2 bewertet. Insgesamt entfallen 95 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland auf die INES-Stufen 0 und 1.

Das einzige mit INES-Stufe 3 (Schwerer Störfall) bewertete Vorkommnis ereignete sich am 25.08.2008 in der belgischen Anlage IRE Fleurus, die der Produktion von Radioisotopen dient (Titel des VIBS-Eintrags: „Erhöhte Ableitung von Jod-131 in die Umgebung“). Das Vorkommnis wird in /BUN 18/ wie folgt beschrieben: Infolge einer exothermen chemischen Reaktion in einem 2.700-Liter-Sammeltank, der mit hochradioaktiven Flüssigabfällen aus verschiedenen Produktionslinien gefüllt war, kam es zu einer signifikanten Erhöhung der Ableitung von radioaktivem Jod-131 (Halbwertszeit 8.02 d) mit der Fortluft. Die Freisetzung über die Filterbatterien durch den Kamin dauerte mehrere Tage lang an. Die insgesamt abgegebene Aktivitätsmenge wird auf 45 GBq geschätzt; die daraus resultierende effektive Dosis für eine maximal strahlenexponierte Person beträgt etwa 160 µSv.

Tab. 3.12 Zuordnung der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	6	27,3	113	24,5	119	24,6
INES = 1	2	9,1	134	29,1	136	28,2
INES = 2	0,0	0,0	8	1,7	8	1,7
INES = 3	0,0	0,0	2	0,4	2	0,4
Keine Einstufung	14	63,6	204	44,3	218	45,1
Summe	22	100,0	461	100,0	483	100,0

Laut Tab. 3.12 ist für rund 45 % aller erfassten Leckageereignisse keine INES-Einstufung verfügbar (deutsche Anlagen: 64 %, ausländische Anlagen: 44 %).

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Leckagen, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Freisetzungen: Fast allen Vorkommnissen in deutschen Anlagen (6 von 8) wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet, zwei Vorkommnissen die INES-Stufe 1. In ausländischen Anlagen wurden ca. 44 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0, ca. 52 % mit INES-Stufe 1 und ca. 3 % mit INES-Stufe 2 bewertet. Insgesamt entfallen 96 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland auf die INES-Stufen 0 und 1.

Zwei Ereignisse auf dem Gelände der britischen Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield wurden mit INES-Stufe 3 (Schwerer Störfall) bewertet. Hierbei handelt es sich um eine Leckage von Plutoniumnitrat (mit ca. 28 kg Plutonium) in die Verdampferzelle am 08.09.1992, hervorgerufen durch einen Korrosionsschaden an einer Rohrleitung 60 cm oberhalb des Hauptverdampferbehälters, sowie um eine Leckage von etwa 83 m³ hochradioaktiver Brennstofflösung (mit ca. 20 t Uran und 200 kg Plutonium) im Headend-Bereich der Anlage THORP am 19.04.2005. Ursache hierfür war das Versagen einer Rohrleitung zwischen einer Zentrifuge und einem Bilanzierungstank. Die Ausbreitung blieb auf einen dafür ausgelegten Bereich beschränkt.

3.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 560 auf Freisetzungen und 483 auf Leckagen zurückführbaren Vorkommnissen in in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Der überwiegende Teil der Freisetzungen (rund 37 %) ereignete sich in Brennelementfabriken. Während im Ausland signifikante Häufigkeitsanteile auch auf Wiederaufarbeitungsanlagen, Anreicherungsanlagen, Forschungszentren und Konversionsanlagen entfallen, wurden fast alle Freisetzungen in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs aus Brennelementfabriken gemeldet.

Der überwiegende Teil der Leckagen (rund 35 %) ereignete sich in Wiederaufarbeitungsanlagen. Während im Ausland signifikante Häufigkeitsanteile auch auf Brennelementfabriken, Forschungszentren und Anreicherungsanlagen entfallen, wurden Leckagen in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs fast ausschließlich aus Brennelementfabriken gemeldet.

Bei 39 % der erfassten Freisetzungen sowie bei 48 % der erfassten Leckagen wurde „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ als Ursache identifiziert; diese Kategorie stellt damit sowohl in ausländischen als auch in deutschen Anlagen die mit Abstand häufigste Ursache für die ausgewerteten Vorkommnisse dar, gefolgt von „*Menschlichem Fehlverhalten*“ (Freisetzungen 19 %, Leckagen 19 %) und „*Nicht klassifizierbaren Ursachen*“ (Freisetzungen 21 %, Leckagen 18 %).

Die radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen unterscheiden sich von Anlagentyp zu Anlagentyp. In Brennelementfabriken und Forschungszentren traten „*Inkorporationen, Personenkontaminationen oder externe Strahlenexpositionen*“ signifikant häufiger auf als in Anreicherungs- und Konversionsanlagen. Bei Konversionsanlagen und Forschungszentren zeigt sich zudem eine auffällige Häufung von „*Freisetzungen bzw. erhöhten Ableitungen in die Umgebung*“. In Anreicherungsanlagen ist „*Sachkontamination*“ die zahlenmäßig dominierende radiologische Auswirkung.

Die dominierende radiologische Auswirkung von Leckagen in Brennelementfabriken, Forschungszentren und Konversionsanlagen ist „*Sachkontaminationen*“. Im Unterschied dazu wurden bei mehr als der Hälfte aller erfassten Leckagen in Anreicherungsanlagen „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ registriert. Darüber hinaus zeichnen sich zwischen den einzelnen Anlagentypen Unterschiede bei der Besetzung der verschiedenen Auswirkungskategorien ab.

Eine Untersuchung der radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen und Leckagen zeigt die folgenden Unterschiede und Gemeinsamkeiten auf:

- Sowohl bei Freisetzungen als auch bei Leckagen stellen „*Sachkontaminationen*“ die häufigste Kategorie radiologischer Auswirkungen dar.
- Freisetzungen führten wesentlich häufiger als Leckagen zu einer „*Inkorporation, Personenkontamination oder externen Strahlenexposition*“.
- Bei Leckagen wurden deutlich häufiger als bei Freisetzungen „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ festgestellt.

Etwa die Hälfte aller erfassten Freisetzungs- und Leckageereignisse weltweit sind nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES eingestuft, wobei der entsprechende Anteil bei den deutschen Vorkommnissen besonders gering ist

(Freisetzungen 28 %, Leckagen 37 %). Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Freisetzungen und Leckagen, ergibt sich folgendes Bild:

- Fast allen Freisetzungen in deutschen Anlagen (23 von 24) wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet, einem Vorkommnis die INES-Stufe 1. In ausländischen Anlagen wurden ca. 37 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0, ca. 58 % mit INES-Stufe 1, ca. 5 % mit INES-Stufe 2 und ca. 0,3 % mit INES-Stufe 3 bewertet. Insgesamt entfallen 95 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland auf die INES-Stufen 0 und 1.
- Einem Großteil der Leckagen in deutschen Anlagen (6 von 22) wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet, zwei Vorkommnissen die INES-Stufe 1. Die restlichen Vorkommnisse stammen aus der Zeit vor der Anwendung der INES-Einstufung. In ausländischen Anlagen wurden ca. 44 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0, ca. 52 % mit INES-Stufe 1, ca. 3 % mit INES-Stufe 2 und ca. 1 % mit INES-Stufe 3 bewertet. Insgesamt entfallen 96 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland auf die INES-Stufen 0 und 1.

4 Brände

Zum Ausbruch von Bränden kann es im gesamten Kernbrennstoffkreislauf kommen. Besondere Gefahrenquellen für die Entstehung von Bränden in Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung bilden z. B. Metallspäne aus mechanischen Verarbeitungsprozessen bei der Brennelementfertigung, entzündliche Lösungsmittel für nasschemische Auflöse- und Trennprozesse in Wiederaufarbeitungsanlagen, sowie allgemein stromführende Komponenten. Brände sind vor allem aufgrund ihrer sekundären Auswirkungen gefährlich. Infolge eines Brandes können sicherheitsrelevante Systeme zerstört oder in ihrer Funktionsfähigkeit erheblich beeinträchtigt werden. Außerdem kann es zur Freisetzung von Aktivität kommen, wenn Sicherheitsbarrieren versagen, und durch den Kamineffekt können freigesetzte Radionuklide großflächig und über weite Strecken verteilt werden.

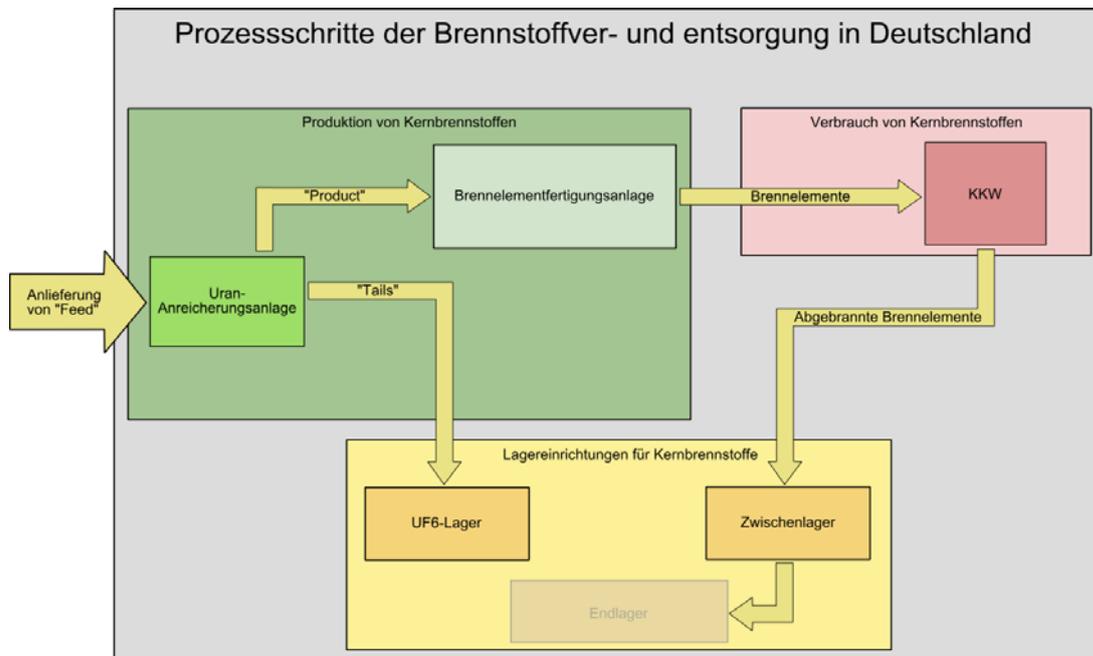


Abb. 4.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Bränden kommen

4.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden Brände sowohl für Anlagen der Kernbrennstoffver- und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG (siehe Anlage 2

AtSMV) als auch für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG (siehe Anlage 5 AtSMV) als meldepflichtige Ereignisse aufgeführt. Der Wortlaut der Meldekriterien ist in beiden Fällen nahezu identisch.

Die Meldekriterien in Anlage 2 AtSMV, Abschnitt 3.2 „Anlageninterne Ereignisse“, lauten:

- **S 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder eine sonstige Einwirkung von innen, so dass ein Anlagenzustand eingetreten ist, der sich gefährbringend auf die Bevölkerung oder die Umwelt auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder einer sonstigen Einwirkung von innen, sofern der Betrieb der Anlage oder der Teilanlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann.
- **N 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, Absturz einer schweren Last oder einer sonstigen Einwirkung von innen, sofern die Anlage hiervon betroffen und dies nicht von den Kriterien S 3.2.1 oder E 3.2.1 erfasst ist.

Die Meldekriterien in Anlage 5 AtSMV, Abschnitt 3.2 „Einrichtungsinterne Ereignisse“, lauten:

- **S 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen, so dass ein Zustand der Einrichtung eingetreten ist, der sich gefährbringend auf die Bevölkerung oder die Umwelt auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen, sofern die Aufbewahrung nach § 6 AtG nur mit einer zusätzlichen, bisher nicht in den Betriebsvorschriften festgelegten Maßnahme fortgeführt werden kann.
- **N 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen in einem Raum oder Bereich der Einrichtung, in dem radioaktive Stoffe mit einer Aktivität oberhalb der Werte nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 2 der Strahlenschutzverordnung

/STRL 18/ vorhanden sind oder in dem sich eine sicherheitstechnisch wichtige Einrichtung befindet.

Nicht zu melden sind örtlich begrenzte Kleinstbrände im Zusammenhang mit Änderungs- und Instandhaltungsarbeiten, für die vorbeugende Brandschutzmaßnahmen getroffen wurden und deren Anwendung bei der Brandbekämpfung wirksam war.

4.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von durch Brände verursachten Vorkommnissen stützt sich auf insgesamt 239 Ereignisse in inländischen- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/.

Abb. 4.2 gibt die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten und durch Brände verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland wieder. Im zeitlichen Verlauf lässt sich eine deutliche Zunahme der registrierten Ereignisse zu jüngerem Datum hin erkennen. Diese Entwicklung lässt sich vermutlich mit dem in den 1980er Jahren einsetzenden weltweiten Ausbau der zivilen Kerntechnik erklären. Des Weiteren könnten auch eine Verschärfung der Meldepflichten seitens der nationalen Aufsichtsbehörden sowie ein verbesserter Informationsaustausch der Staaten untereinander zur Bekanntmachung einer größeren Zahl von Ereignissen beigetragen haben. Die meisten Vorkommnisse (je 13) ereigneten sich in den Jahren 1990 und 1991. Eine plausible Erklärung für die Abnahme der Ereigniszahlen ab 1992 sind verbesserte aktive und passive Brandschutzmaßnahmen.

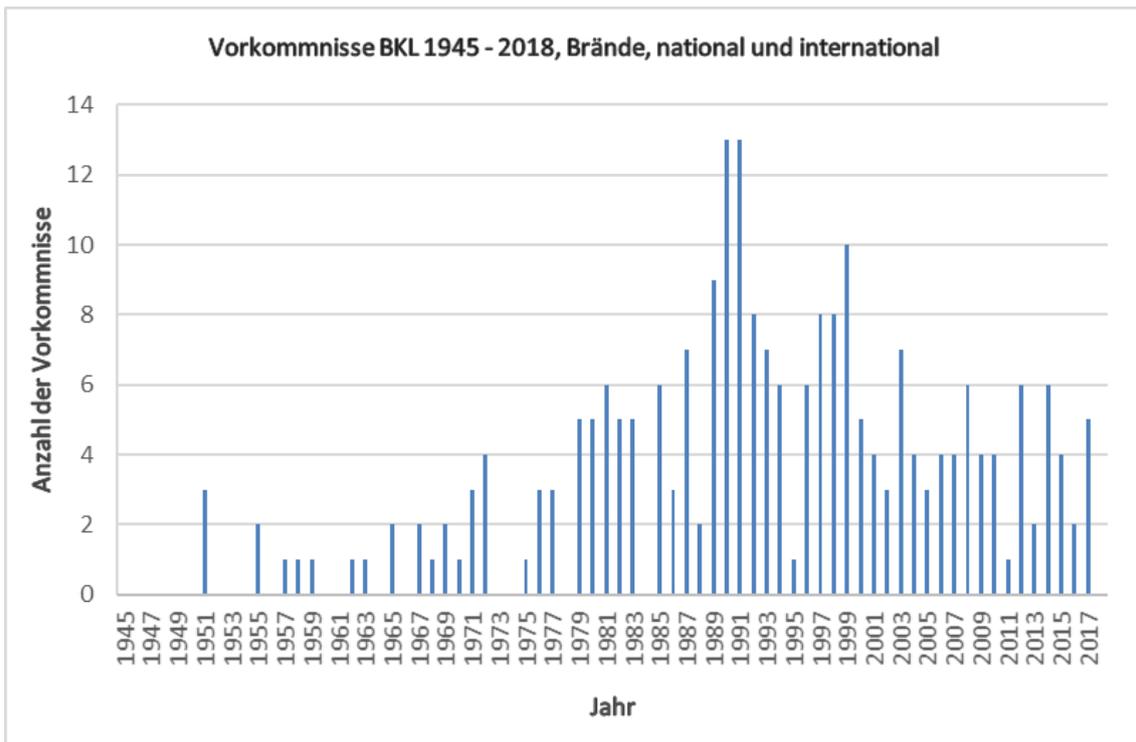


Abb. 4.2 Chronologische Aufschlüsselung der durch Brände induzierten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Tab. 4.1 gibt die Verteilung der durch Brände verursachten Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder. Von den insgesamt 239 erfassten Vorkommnissen ereigneten sich 205 in ausländischen und 34 in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs.

Aus Tab. 4.1 ist ersichtlich, dass Brände gehäuft in Brennelementfabriken, Wiederaufarbeitungsanlagen und Forschungszentren registriert wurden. Dies spiegelt das höhere Gefahrenpotential dieser Anlagentypen im Hinblick auf die durchgeführten Prozessschritte und die dabei eingesetzten Chemikalien wieder.

Mehr als 85 % aller meldepflichtigen Brände in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs ereigneten sich in Brennelementfabriken. Mit signifikant reduzierter relativer Häufigkeit (jeweils knapp 6 %) folgen Anreicherungsanlagen und Forschungszentren. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

Tab. 4.1 Verteilung der in VIBS erfassten, durch Brände ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	2	5,9	12	5,9	14	5,9
Brennelementfabriken	29	85,3	72	35,1	101	42,3
Forschungszentren	2	5,9	58	28,3	60	25,1
Konversionsanlagen	0	0,0	7	3,4	7	2,9
Sonstige Anlagen	0	0,0	14	6,8	14	5,9
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	1	2,9	10	4,9	11	4,6
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	32	15,6	32	13,4
Summe	34	100,0	205	100,0	239	100,0

4.3 Ursachen

In Tab. 4.2 ist die Zuordnung der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 4.2 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Brände zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	6	17,6	19	9,3	25	10,5
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	10	29,4	20	9,8	30	12,6
Menschliches Fehlverhalten	14	41,2	46	22,4	60	25,1
Organisatorische Mängel	1	2,9	11	5,4	12	5,0
Äußere Einwirkungen	0	0,0	3	1,5	3	1,3
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	3	8,8	106	51,7	77	33,2
Summe	34	100,0	205	100,0	239	100,0

Nach Tab. 4.2 ist bei etwas mehr als 33 % aller erfassten Brandereignisse die Ursache unbekannt oder nicht klassifizierbar; in ausländischen Anlagen (52 %) ist dieser Anteil

jedoch weitaus höher als in deutschen Anlagen (9 %). Bei den klassifizierbaren Ursachen sticht „*Menschliches Fehlverhalten*“ hervor, mit Abstand gefolgt von „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ und „*Auslegungsmängeln*“. „*Organisatorische Mängel*“ sind nur von untergeordneter Bedeutung.

In Tab. 4.3 werden die Ursachen für alle durch Brände ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt.

Für Anreicherungs- und Konversionsanlagen, Sonstige Anlagen sowie für die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt.

Tab. 4.3 Aufschlüsselung der Ursachen für brandbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO	WA
Anzahl Vorkommnisse	14	101	60	7	11	14	32
	%	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	21,4	13,9	10,0	0,0	0,0	14,3	0,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	28,6	14,9	13,3	28,6	9,1	0,0	0,0
Menschliches Fehlverhalten	21,4	32,7	30,0	0,0	45,5	7,1	0,0
Organisatorische Mängel	0,0	4,0	6,7	14,3	9,1	14,3	0,0
Äußere Einwirkungen	0,0	0,0	1,7	14,3	9,1	0,0	0,0
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	28,6	34,7	38,3	42,9	27,3	64,3	100,0
Summe	100	100	100	100	100	100	100

Für alle statistisch ausreichend besetzten Anlagentypen – Brennelementfabriken und Forschungszentren – ist „*Menschliches Fehlverhalten*“ die häufigste klassifizierbare Ereignisursache, mit deutlichem Abstand folgt jeweils „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“. Weitere relevante Ursachen sind:

- in Brennelementfabriken „*Auslegungsmängel*“
- in Forschungszentren „*Auslegungsmängel*“ und ‘*Organisatorische Mängel*‘

Bei allen Anlagentypen stellen Brände mit unbekannter oder nicht klassifizierbarer Ursache einen bedeutenden Anteil.

4.4 Radiologische Auswirkungen

Brände in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs können zu Beeinträchtigungen der Funktionalität von Rückhaltebarrieren und damit auch zur Freisetzung von Radioaktivität und zu Kontaminationen führen.

Tab. 4.4 gibt die Zuordnung der radiologischen Auswirkungen der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse in die oben aufgeführten Kategorien wieder. Dabei werden sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 4.4 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	31	91,2	109	53,2	140	58,6
Sachkontamination	1	2,9	28	13,7	29	12,1
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	2	5,9	8	3,9	10	4,2
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0	0,0	9	4,4	9	3,8
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	51	24,9	51	21,3
Summe	34	100,0	205	100,0	239	100,0

Gemäß Tab. 4.4 hatten fast 59 % aller durch Brände verursachten Vorkommnisse „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ (deutsche Anlagen: 91 %, ausländische Anlagen: 53 %). Als zweithäufigste Kategorie wurden – mit großem Abstand folgend – „Sachkontaminationen“ identifiziert, gefolgt von den Kategorien „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ und „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“.

Bei keinem der 34 erfassten Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurden zwei „Inkorporationen, Personenkontaminationen oder externe Strahlenexpositionen“ und eine „Sachkontamination“ registriert. Bei rund 21 % aller erfassten Vorkommnisse lagen

keine verwertbaren Informationen über die radiologischen Auswirkungen vor (deutsche Anlagen: 0 %, ausländische Anlagen: 25 %).

In Tab. 4.5 werden die radiologischen Auswirkungen für alle durch Brände hervorgerufenen Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt. Für jeden Anlagentyp werden die relativen Häufigkeiten für die einzelnen Ursachenkategorien angegeben, wobei diese Werte auf die Zahl der Vorkommnisse für den jeweiligen Anlagentyp normiert sind. Auch für den Aspekt der anlagenbezogenen Auswirkungen gilt, dass für Anreicherungs- und Konversionsanlagen, Sonstige Anlagen sowie für die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse eingeschränkt ist.

Tab. 4.5 Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen

Radiologische Auswirkungen	AN	BE	FO	KO	PR	SO	WA
	%	%	%	%	%	%	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	93,0	64,3	60,0	85,7	100,0	64,3	0,0
Sachkontamination	0,0	11,9	20,0	14,3	0,0	28,6	0,0
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	0,0	6,9	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0,0	6,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Auswirkungen unbekannt	7,0	10,9	11,6	0,0	0,0	7,1	100,0
Summe	100	100	100	100	100	100	100

Bei allen Anlagentypen des Kernbrennstoffkreislaufs stellt die Kategorie „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ als Folge eines Brandereignisses die absolute Mehrheit, wie aus Tab. 4.5 hervorgeht. Brände, die zu einer „Freisetzung bzw. erhöhten Ableitung in die Umgebung“ führten, wurden in Forschungseinrichtungen und Brennelementfabriken registriert. Brände, die in einer „Inkorporation, Personenkontamination oder externen Strahlenexposition“ resultierten, wurden ebenfalls nur aus Brennelementfabriken und Forschungszentren gemeldet.

4.5 **Aufschlüsselung nach INES**

Die radiologischen Auswirkungen brandbedingter Vorkommnisse sind in der Regel nicht so folgenschwer wie die anderer Vorkommnisklassen (z. B. Kritikalitätsexkursionen oder Explosionen). Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES. Die durch Brände verursachten Vorkommnisse sind fast ausschließlich den INES-Stufen 0 und 1 zugeordnet.

In Tab. 4.6 ist für die durch Brände ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES-Skala – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – angegeben.

Tab. 4.6 Zuordnung der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	9	26,5	65	31,7	74	31,0
INES = 1	0	0,0	52	25,4	52	21,8
INES = 2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
INES = 3	0	0,0	2	1,4	2	0,8
Keine Einstufung	25	73,5	86	42,0	111	46,4
Summe	34	100,0	205	100,0	239	100,0

Gemäß Tab. 4.6 liegt für etwa 46 % aller durch Brände ausgelösten Ereignisse keine INES-Einstufung vor (deutsche Anlagen: 73,5 %, ausländische Anlagen: 42 %); dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala ereigneten.

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: Sämtlichen Vorkommnissen in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 55 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und ca. 44 % mit INES-Stufe 1 bewertet.

Zwei Ereignisse in ausländischen Anlagen wurden mit INES-Stufe 3 (Schwerer Störfall) bewertet. Hierbei handelt es sich um Brände mit Freisetzung von Radioaktivität und Kontamination von Mitarbeitern aus der Enthüllung von MAGNOX-Brennelementen in den Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague/Frankreich (06.01.1981, Titel des VIBS-

Eintrags: 'Brand in einem Lagersilo für Abfälle') und Tokai/Japan (11.03.1997, Titel des VIBS-Eintrags: 'Brand und Explosion in einer Abfallbehandlungsanlage').

4.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 239 Vorkommnissen im Zusammenhang mit Bränden in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Vorkommnisse ereigneten sich überwiegend in Brennelementfabriken, Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen, gefolgt von Sonstigen Anlagen und Anreicherungsanlagen. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung. Auch von den 34 durch Brände verursachten Vorkommnissen in deutschen Anlagen sind 85 % Brennelementfabriken (29) zuzuordnen. Von den beiden übrigen Vorkommnissen in deutschen Anlagen ereigneten sich jeweils zwei in einer Anreicherungsanlage und in einem Forschungszentrum, sowie eines in einer Anlage der zusammengefassten Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen.

Bei mehr als einem Drittel (33,2 %) aller durch Brände in inländischen- und ausländischen Anlagen initiierten Vorkommnisse sind die Ursachen unbekannt oder nicht klassifizierbar. Als wichtigste klassifizierbare Vorkommnis-auslösende Ursache konnte „*Menschliches Fehlverhalten*“ (25,1 %) identifiziert werden. Mit einigem Abstand folgen „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ (12,6 %) und „*Auslegungsmängel*“ (10,5 %). „*Organisatorische Mängel*“ (5,0 %) und „*Äußere Einwirkungen*“ (1,3 %) sind von geringer Bedeutung. In deutschen Anlagen wurde am häufigsten „*Menschliches Fehlverhalten*“ (41,2 %) identifiziert. Die Kategorien „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ (29,4 %), „*Auslegungsmängel*“ (17,6 %) sowie „*Nicht klassifizierbar*“ (8,8 %) schließen sich mit geringeren relativen Häufigkeiten an. „*Organisatorische Mängel*“ (2,9 %) sind von geringerer Bedeutung und „*Äußere Einwirkungen*“ wurden in deutschen Anlagen als brandauslösende Ursachen bisher nicht registriert.

Die Aufschlüsselung der Ursachen nach Anlagentypen zeigt, dass eine bei allen Anlagentypen dominante Ursache für das Auftreten der auf Brände zurückzuführenden Vorkommnisse nicht auszumachen ist. Allerdings stellt die Kategorie

„Nicht klassifizierbar“ bei allen Anlagentypen einen bedeutenden Anteil. Bei den verbleibenden, klassifizierbaren Ursachen zeigen sich einige anlagenspezifische Unterschiede: Für Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken und Forschungszentren werden als häufigste Ursachen „*Menschliches Fehlverhalten*“, „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ und „*Auslegungsmängel*“ identifiziert, wobei im Fall der Forschungszentren zusätzlich noch „*Organisatorische Mängel*“ hinzukommen. Bei den restlichen Anlagentypen bietet sich kein einheitliches Bild: Die wichtigsten brandauslösenden Ursachen sind bei Konversionsanlagen „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“, „*Äußere Einwirkungen*“ und „*Organisatorische Mängel*“, bei der zusammengefassten Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen sind es „*Menschliches Fehlverhalten*“, „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ sowie „*Äußere Einwirkungen*“ und „*Organisatorische Mängel*“, bei den sonstigen Anlagen dominieren „*Auslegungsmängel*“ und „*Organisatorische Mängel*“ sowie „*Menschliches Fehlverhalten*“.

Eine Untersuchung der Auswirkungen aller brandbedingten Vorkommnisse ergab, dass mehr als 58 % der Vorkommnisse „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ haben. Als zweithäufigste Kategorie wurden „*Auswirkungen unbekannt*“ identifiziert, gefolgt von den Kategorien „*Sachkontaminationen*“, „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ und „*Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung*“, wobei die beiden letzteren von untergeordneter Bedeutung sind. Auch bei den Vorkommnissen in deutschen Anlagen dominiert die Kategorie „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ deutlich mit einer relativen Häufigkeit von 91,2 %. „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ (5,9 %). „*Sachkontamination*“ (2,9 %) sind von vergleichsweise geringer Bedeutung. Eine brandbedingte „*Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung*“ wurde in deutschen Anlagen bisher nicht registriert.

Die Aufschlüsselung nach Anlagentypen zeigt, dass die bestimmende, bei allen Anlagentypen hervorstechende radiologische Auswirkung als Folge der durch Brände verursachten Vorkommnisse die Kategorie „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ ist. Ansonsten unterliegen die radiologischen Auswirkungen anlagenspezifischen Besonderheiten: Bei Brennelementfabriken sind „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“, „*Sachkontamination*“ und „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ die wichtigsten

radiologischen Auswirkungen, wobei für Forschungseinrichtungen und Sonstige Einrichtungen ein zusätzlicher Schwerpunkt bei den „*Sachkontaminationen*“ liegt.

Für etwa 46 % der erfassten Ereignisse liegt keine Einstufung nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES vor. Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuftten Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: Sämtlichen Vorkommnissen in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 55 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und ca. 44 % mit INES-Stufe 1 bewertet. Zwei Ereignisse in ausländischen Anlagen wurden mit INES-Stufe 3 (Schwerer Störfall) bewertet.

5 Explosionen

Bei der Verarbeitung, Lagerung und Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen in Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung stellen Explosionen und Verpuffungen sowohl für das Betriebspersonal als auch für Menschen im näheren Umkreis der betroffenen Anlage eine erhebliche Gefahr dar, zumal neben den konventionellen Folgen einer Explosion auch die Auswirkungen explosionsbedingter Freisetzungen von Radioaktivität innerhalb und außerhalb des Anlagengeländes bedacht werden müssen. Es ist deshalb für die Handhabung von Spaltstoffen unabdingbar, dass dem Aspekt der Explosionssicherheit nicht nur bei der Planung, sondern auch beim Betrieb von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in vollem Umfang Rechnung getragen wird.

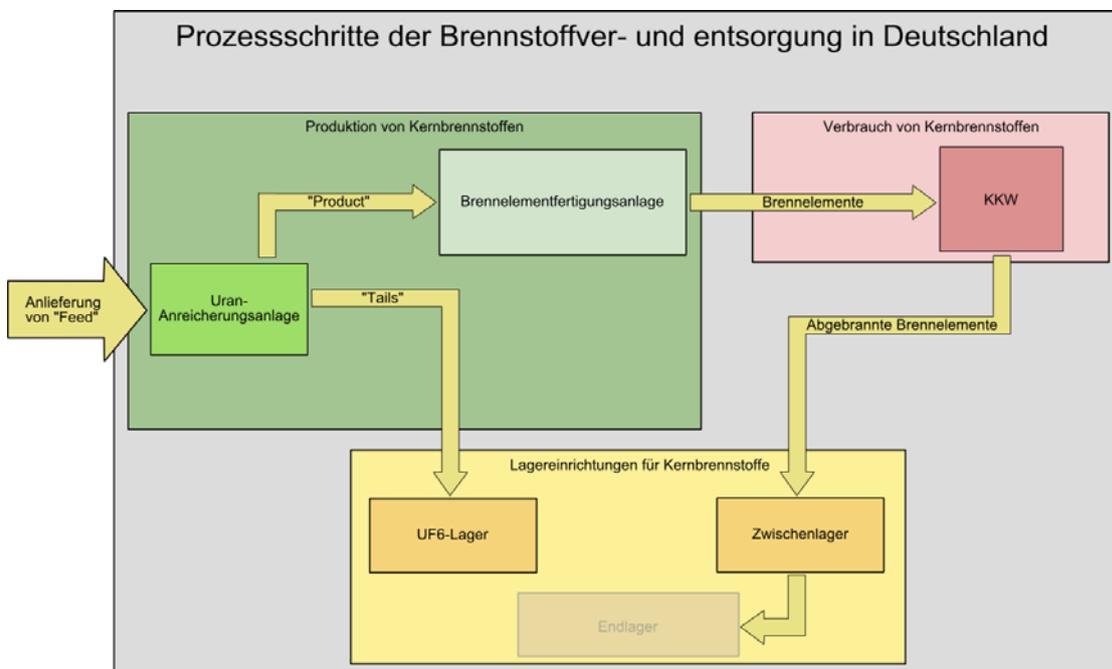


Abb. 5.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Explosionen bzw. Verpuffungen kommen

5.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden in Anlage 2 (Anlagen der Kernbrennstoffver- und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG), Abschnitt 3.2 „Anlageninterne Ereignisse“, folgende Meldekriterien mit Bezug zu Explosionen aufgeführt:

- **S 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder eine sonstige Einwirkung von innen, so dass ein Anlagenzustand eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umwelt auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, der Absturz einer schweren Last oder einer sonstigen Einwirkung von innen, sofern der Betrieb der Anlage oder der Teilanlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann.
- **N 3.2.1** Anlageninterner Brand, anlageninterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung, Absturz einer schweren Last oder einer sonstigen Einwirkung von innen, sofern die Anlage hiervon betroffen und dies nicht von den Kriterien S 3.2.1 oder E 3.2.1 erfasst ist.

Bei der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in Behältern nach § 6 AtG (siehe Anlage 5 AtSMV) sind Explosionen oder Verpuffungen, die zur Aktivitätsfreisetzung führen, nicht zu besorgen, da in diesen Einrichtungen keine Handhabungsvorgänge stattfinden, in die explosionsgefährdete Substanzen involviert sind. Dies beinhaltet jedoch nicht z. B. die Tankfüllungen von Fahrzeugen oder Motoren, die sich auf dem Anlagengelände befinden. Die Meldekriterien für Explosionen sind in Abschnitt 3.2 „Einrichtungsinterne Ereignisse“ der Anlage 5 AtSMV aufgeführt; sie lauten:

- **S 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen, so dass ein Zustand der Einrichtung eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umwelt auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen, sofern die

Aufbewahrung nach § 6 AtG nur mit einer zusätzlichen, bisher nicht in den Betriebsvorschriften festgelegten Maßnahme fortgeführt werden kann.

- **N 3.2.1** Einrichtungsinterner Brand, einrichtungsinterne Explosion, heftige chemische Reaktion, Überflutung oder sonstige Einwirkung von innen in einem Raum oder Bereich der Einrichtung, in dem radioaktive Stoffe mit einer Aktivität oberhalb der Werte nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 2 der Strahlenschutzverordnung vorhanden sind oder in dem sich eine sicherheitstechnisch wichtige Einrichtung befindet.

5.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von Vorkommnissen mit Explosionen stützt sich auf insgesamt 84 Ereignisse in inländischen- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/.

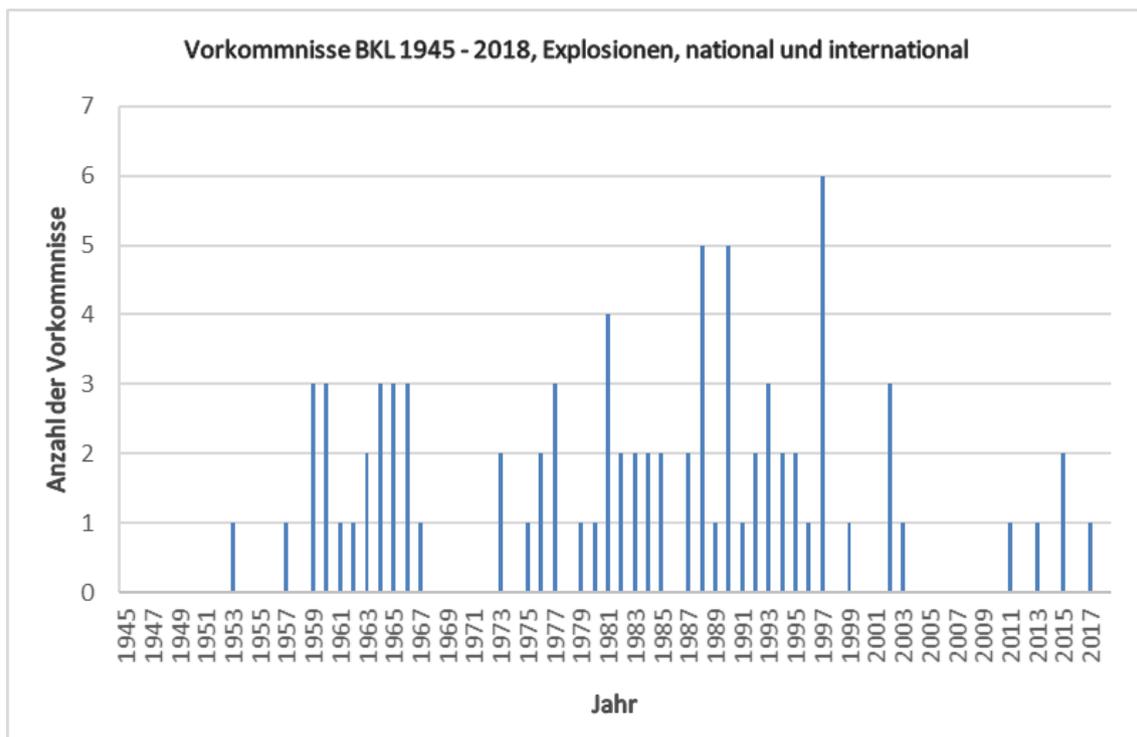


Abb. 5.2 Chronologische Aufschlüsselung der explosionsbedingten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Abb. 5.2 gibt die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten Vorkommnisse mit Explosionen im In- und Ausland wieder. Im zeitlichen Verlauf lässt sich eine deutliche Abnahme der registrierten Ereignisse zu jüngerem Datum hin erkennen. Der Rückgang der Ereigniszahlen lässt sich vermutlich mit einer Verbesserung der in den Anlagen

getroffenen Vorkehrungen und Schutzmaßnahmen gegen Explosionen und Verpuffungen erklären.

Tab. 5.1 gibt die Verteilung der Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder.

Tab. 5.1 Verteilung der in VIBS erfassten, durch Explosionen ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	0	0,0	7	9,1	7	9,0
Brennelementfabriken	6	85,7	20	26,0	26	31,0
Forschungszentren	1	14,3	29	37,7	30	35,7
Konversionsanlagen	0	0,0	2	2,6	2	2,4
Sonstige Anlagen	0	0,0	3	3,9	3	3,6
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	0	0,0	5	6,5	5	6,0
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	11	14,3	11	13,1
Summe	7	100,0	77	100,0	84	100,0

Aus Tab. 5.1 geht hervor, dass in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs insgesamt sieben auf Explosionen zurückführbare Vorkommnisse – davon sechs in Brennelementfabriken und eines in einem Forschungszentrum – registriert wurden. Die ausländischen Ereignisse ereigneten sich überwiegend in Forschungszentren, Brennelementfabriken und Wiederaufarbeitungsanlagen. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

5.3 Ursachen

Tab. 5.2 gibt die Zuordnung der Explosionsereignisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten an.

Tab. 5.2 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Explosionen zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	2	28,6	14	18,2	16	19,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	1	14,3	12	16,7	12	14,3
Menschliches Fehlverhalten	1	14,3	22	28,6	23	27,4
Organisatorische Mängel	1	14,3	1	1,3	2	2,4
Äußere Einwirkungen	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	2	28,6	29	37,7	31	36,9
Summe	7	100,0	77	100,0	84	100,0

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass bei ungefähr einem Drittel aller Explosionsereignisse die Ursache unbekannt oder nicht klassifizierbar ist. Bei den klassifizierbaren Ursachen dominiert „*Menschliches Fehlverhalten*“, mit einigem Abstand gefolgt von „*Auslegungsmängeln*“ und „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“. „*Organisatorische Mängel*“ sind nur von untergeordneter Bedeutung, „*Äußere Einwirkungen*“ wurden gar nicht registriert. Als häufigste klassifizierbare Ursache für explosionsbedingte Vorkommnisse in deutschen Anteilen (prozentual, bei sehr geringer Ereigniszahl) erwiesen sich „*Auslegungsmängel*“.

In Tab. 5.3 werden die Ursachen für alle durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt.

Tab. 5.3 Aufschlüsselung der Ursachen für explosionsbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO	WA
Anzahl Ereignisse	7	26	30	2	5	3	11
	%	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	57,1	19,2	20,0	0,0	20,0	0,0	0,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	14,3	19,2	13,3	50,0	20,0	0,0	0,0
Menschliches Fehlverhalten	14,3	23,0	40,0	50,0	20,0	66,7	0,0
Organisatorische Mängel	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0
Äußere Einwirkungen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	14,3	34,6	26,7	0,0	40,0	33,3	91,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Für Anreicherungs- und Konversionsanlagen, Sonstige Anlagen sowie die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse eingeschränkt.

Eine für alle Anlagentypen dominante Ursache für das Auftreten von Explosionsereignissen lässt sich aus Tab. 5.3 nicht entnehmen. Vielmehr stellen die nicht eindeutig nach Ursachen klassifizierbaren Vorkommnisse bei nahezu allen Anlagentypen – mit Ausnahme der Konversionsanlagen – einen bedeutenden Anteil. Bezüglich der klassifizierbaren Ursachen für explosionsbedingte Vorkommnisse lässt sich folgendes feststellen:

- In Anreicherungsanlagen dominieren „Auslegungsmängel“, mit großem Abstand gefolgt von „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ sowie „Menschlichem Fehlverhalten“;
- in Brennelementfabriken sind „Menschliches Fehlverhalten“, „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ sowie „Auslegungsmängel“ etwa gleichermaßen relevant;

- in Forschungszentren dominiert „Menschliches Fehlverhalten“, mit deutlichem Abstand gefolgt von „Auslegungsmängeln“ und „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“;
- in Wiederaufarbeitungsanlagen sind „Organisatorische Mängel“ die wichtigste Ereignisursache.

5.4 Radiologische Auswirkungen

Tab. 5.4 gibt die Zuordnung der radiologischen Auswirkungen der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse in die oben aufgeführten Kategorien wieder. Dabei werden sowohl die absoluten als auch die relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 5.4 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	5	71,4	17	22,1	22	26,2
Sachkontamination	1	14,3	26	33,8	27	32,1
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	1	14,3	15	19,5	16	19,0
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0	0,0	1	1,3	1	1,2
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	18	23,4	18	21,4
Summe	7	100,0	77	100,0	84	100,0

Gemäß Tab. 5.4 hatten nur 26 % aller durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ (deutsche Anlagen: 71 %, ausländische Anlagen: 22 %). Etwa 32 % aller derartigen Vorkommnisse resultierten in einer „Sachkontamination“, etwa 19 % in einer „Inkorporation, Personenkontamination oder externen Strahlenexposition“.

Bei keinem der sieben erfassten Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurde eine „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“ registriert. Bei fast jedem vierten

erfassten Vorkommnis in einer ausländischen Anlage lagen keine verwertbaren Informationen über die radiologischen Auswirkungen vor.

In Tab. 5.5 werden die radiologischen Auswirkungen für alle explosionsbedingten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt. Für jeden Anlagentyp werden die relativen Häufigkeiten für die einzelnen Ursachenkategorien angegeben, wobei diese Werte auf die Zahl der Vorkommnisse für den jeweiligen Anlagentyp normiert sind. Für die einzelnen Anlagentypen werden die bereits in Zusammenhang mit Tab. 5.3 erläuterten Abkürzungen verwendet. Auch für den Aspekt der anlagenbezogenen Auswirkungen gilt, dass für Anreicherungs- und Konversionsanlagen, Sonstige Anlagen sowie die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt ist.

Tab. 5.5 Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen

Radiologische Auswirkungen	AN	BE	FO	KO	PR	SO	WA
	%	%	%	%	%	%	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	14,3	34,6	20,0	0,0	60,0	66,7	9,0
Sachkontamination	57,1	30,7	36,7	100	20,0	33,3	0,0
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	28,6	19,2	26,7	0,0	20,0	0,0	0,0
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Auswirkungen unbekannt	0,0	15,3	13,3	0,0	0,0	0,0	91,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Eine bestimmte, bei allen Anlagentypen hervorstechende radiologische Auswirkung als Folge der explosionsbedingten Vorkommnisse ist aus Tab. 5.5 nicht zu erkennen. Bei Brennelementfabriken dominieren „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“, „Sachkontamination“ und „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“. Bei Anreicherungsanlagen und Forschungseinrichtungen zeigt sich außerdem eine auffällige Häufung von „Sachkontaminationen“, gefolgt von

„Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“ und „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“.

5.5 Aufschlüsselung nach INES

Explosionen in Anlagen des Brennstoffkreislaufs können zu schwerwiegenden radiologischen Folgen innerhalb und außerhalb des Anlagengeländes führen. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse auf der internationalen INES-Skala.

In Tab. 5.6 ist für die durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES-Skala – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – angegeben.

Tab. 5.6 Zuordnung der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	1	14,3	10	13,0	11	13,1
INES = 1	0	0,0	12	15,6	12	14,3
INES = 2	0	0,0	4	5,2	4	4,8
INES = 3	0	0,0	1	1,3	1	1,2
INES = 4	0	0,0	1	1,3	1	1,2
INES = 6	0	0,0	1	1,3	1	1,2
Keine Einstufung	6	85,7	48	62,3	54	64,3
Summe	7	100	77	100	84	100

Gemäß Tab. 5.6 liegt für gut zwei Drittel aller durch Explosionen ausgelösten Ereignisse keine INES-Einstufung vor (deutsche Anlagen: 86 %, ausländische Anlagen: 62 %); dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala ereigneten.

Von den INES-eingestuften Vorkommnissen in ausländischen Anlagen sind die meisten der INES-Stufe 1 zugeordnet, gefolgt von den INES-Stufen 0 und 2. Dem einzigen INES-eingestuften Vorkommnis in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet.

Unter den 84 erfassten Explosionsereignissen finden sich insgesamt drei, die mit den INES-Stufen 3 (Schwerer Störfall), 4 (Unfall) bzw. 6 (Schwerer Unfall) bewertet wurden. Sie sind allesamt ausländischen Wiederaufarbeitungsanlagen zuzuordnen. Im Einzelnen waren folgende Anlagen betroffen:

- Chelyabinsk (Russland), 29.09.1957:
Explosion in einem HAW-Tank mit massiver Freisetzung (INES-Stufe 6)
- Sellafield (Großbritannien), 26.09.1973:
Spaltprodukt/Butex-Reaktion mit Kontamination und Inhalation bei Mitarbeitern und grenzwertüberschreitender Freisetzung (INES-Stufe 4)
- Tomsk (Russland), 06.04.1993:
Schwere Explosion mit erheblicher Freisetzung (INES-Stufe 3)

Erwähnenswert ist außerdem ein mit INES-Stufe 2 (Störfall) bewertetes Vorkommnis, das sich am 29.10.1984 in der argentinischen Anreicherungsanlage Pilcaniyeu ereignete und zu einem Todesfall führte. Hierbei kam es zur Explosion einer Stahlflasche, die 1–2 kg hochreines Uranhexafluorid (UF_6) enthielt. Ursache der Explosion war in den Behälter eingedrungenes Mineralöl, welches bei der chemischen Reaktion mit UF_6 große Mengen Fluorwasserstoff (HF) bildete. Letzteres hatte einen Druckanstieg in der Stahlflasche über den Versagensdruck hinaus zur Folge.

Nur eines der sieben Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurde nach den INES-Kriterien bewertet. Hierbei handelt es sich um eine Verpuffung von Zirkaloyspänen in einem Staubsaugereimer in der Anlage der ANF in Lingen am 12.08.2002 (INES-Stufe 0). Die übrigen, nicht eingestuften Vorkommnisse datieren aus den 1980er und frühen 1990er Jahren.

5.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 84 explosionsbedingten Vorkommnissen in in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Vorkommnisse ereigneten sich überwiegend in Brennelementfabriken und Forschungszentren, gefolgt von Wiederaufarbeitungsanlagen und Anreicherungsanlagen. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung. Auch

die sieben explosionsbedingten Vorkommnisse in deutschen Anlagen sind Brennelementfabriken (6) und Forschungszentren (1) zuzuordnen.

Bei ungefähr einem Drittel aller durch Explosionen in inländischen und ausländischen Anlagen initiierten Vorkommnisse sind die Ursachen unbekannt oder nicht klassifizierbar. Als wichtigste klassifizierbare Vorkommnis-auslösende Ursache konnte „*Menschliches Fehlverhalten*“ identifiziert werden. Mit einigem Abstand folgen „*Auslegungsmängel*“ und „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“. „*Organisatorische Mängel*“ sind von geringer Bedeutung, und „*Äußere Einwirkungen*“ treten gar nicht auf. In deutschen Anlagen wurden am häufigsten „*Auslegungsmängel*“ (2) identifiziert.

Die Aufschlüsselung der Ursachen nach Anlagentypen zeigt, dass eine bei allen Anlagentypen dominante Ursache für das Auftreten von Explosionen nicht auszumachen ist. Allerdings stellt die Kategorie „*Nicht klassifizierbar (unbekannt)*“ bei nahezu allen Anlagentypen – mit Ausnahme der Anreicherungsanlagen – einen bedeutenden Anteil. Bei den verbleibenden Ursachen zeigen sich einige anlagenspezifische Unterschiede: Für Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken und Forschungszentren sind „*Auslegungsmängel*“ und „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ sowie „*Menschliches Fehlverhalten*“ relevante Ereignisursachen.

Eine Untersuchung der Auswirkungen aller explosionsbedingten Vorkommnisse ergibt, dass mehr als 32 % der Vorkommnisse zu „*Sachkontaminationen*“ führen. Als zweithäufigste Kategorie werden „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ identifiziert, gefolgt von den Kategorien „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ und „*Auswirkungen unbekannt*“. Die Kategorie „*Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung*“ ist im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung. Bei den Vorkommnissen in deutschen Anlagen dominiert die Kategorie „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ (5).

Die Aufschlüsselung nach Anlagentypen zeigt, dass eine bestimmte, bei allen Anlagentypen hervorstechende radiologische Auswirkung als Folge der Explosionsereignisse nicht auszumachen ist. Vielmehr unterliegen die radiologischen Auswirkungen anlagenspezifischen Besonderheiten: Bei Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken und Forschungszentren sind „*Sachkontamination*“, „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“ und „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“ die wichtigsten radiologischen

Auswirkungen, wobei für Anreicherungsanlagen ein auffälliger Schwerpunkt bei den „*Sachkontaminationen*“ liegt.

Nur ca. 35 % der explosionsbedingten Vorkommnisse wurden nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES eingestuft. Auf dieser Skala wurden die meisten ausländischen Vorkommnisse mit INES-Stufe 1 bewertet. Die nächsthäufigsten Bewertungen sind die INES-Stufen 0 sowie (mit großem Abstand) 2, 3, 4 und 6. Lediglich ein Vorkommnis in deutschen Anlagen wurde nach INES bewertet (INES-Stufe 0).

6 Kritikalitätsrelevante Vorkommnisse

Aufgrund einer unerwarteten und unbeabsichtigten Reaktivitätszufuhr kann in einem Spaltstoffsystem bei Versagen von Sicherheitsmaßnahmen der Zustand der Kritikalität erreicht oder überschritten werden (Multiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} \geq 1,0$). Damit kommt es zu einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, mit der ein unkontrollierter Leistungsanstieg verbunden ist, der zu einer Freisetzung von thermischer Energie (Wärme), zur Emission energiereicher Neutronen- und Gammastrahlung sowie zu einer möglichen Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte in die Umgebung des Spaltstoffsystems führt. Dieses Ereignis wird als Kritikalitätsexkursion oder kurz Exkursion bezeichnet. Bei einer verzögert kritischen Anordnung wird die Kritikalität durch verzögerte Neutronen ausgelöst und u. U. erhalten, bei einer prompt kritischen Anordnung durch prompte Neutronen. Eine Kritikalitätsexkursion kann zu einem oder mehreren kurzen Pulsen extrem hoher Leistung oder zu einem andauernden, quasistationären Zustand führen.

Die Voraussetzung für eine unkontrollierte Kettenreaktion ist in erster Linie das Vorhandensein einer hinreichend großen Masse an spaltbarem Material. Die kleinste kritische Masse hängt von der Art und der Anreicherung des Spaltstoffs ab. Des Weiteren spielt die geometrische Anordnung des Spaltstoffs, z. B. im Lagerbehälter oder in der Prozesseinrichtung, eine Rolle. Das Vorhandensein von Neutronenmoderatoren (z. B. Leichtwasser, Schwerwasser, Graphit, Kunststoff) sowie Neutronenreflektoren (z. B. Beton, Stahl, Wasser) beeinflusst die Anforderungen an die Kritikalitätssicherheit. Im Falle einer Kritikalitätsexkursion kann selbst das Betriebspersonal unter ungünstigen Umständen als Neutronenreflektor dienen (siehe hierzu Kap. 6.5).

Eine umfassende Beschreibung zu Grundlagen und Praxis gibt z. B. das „Handbuch zur Kritikalität“ Band 1 der GRS /GRS 15/.

Strahlenschutzverordnung

Hinsichtlich Kritikalitätssicherheit steht in der deutschen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /STRL 18/ in Abschnitt 5 (Sicherheit von Strahlenquellen) § 87 „Sicherheit und Lagerung radioaktiver Stoffe“ Abs. (2): „Kernbrennstoffe müssen so gelagert werden, dass während der Lagerung kein kritischer Zustand entstehen kann.“

Abb. 5.1 gibt eine Übersicht der Anlagentypen in Deutschland, für die Kritikalitätssicherheitsaspekte relevant sind.

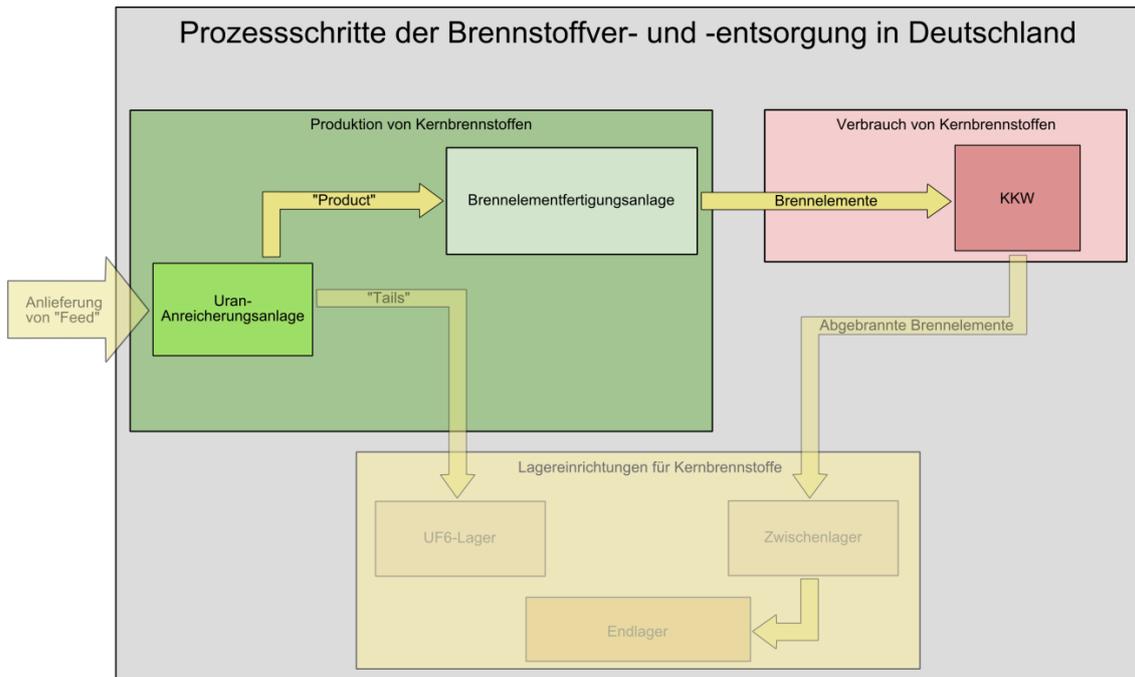


Abb. 6.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen kommen

6.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden in Anlage 2, Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG /BUN 17/, Abschnitt 2.1 „Funktionsstörungen, Schäden oder Ausfälle in sicherheitstechnisch wichtigen Systemen oder Anlagenteilen“, folgende Meldekriterien mit Bezug zur Kritikalität aufgeführt:

- **S 2.1.6** Kritikalitätsereignis.
- **E 2.1.6** Ereignis, das die Sicherheitsprinzipien der Kritikalitätssicherheit verletzt hat.
- **N 2.1.6** Ereignis, das die Kritikalitätssicherheit beeinträchtigt, jedoch nicht die Sicherheitsprinzipien der Kritikalitätssicherheit verletzt hat.

§ 7 AtG bezieht sich auf die Errichtung, den Betrieb und den Besitz von Anlagen zur Erzeugung oder zur Bearbeitung oder Verarbeitung oder zur Spaltung von Kernbrennstoffen oder zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe bzw. auf die Inhaber

einer entsprechenden Genehmigung. Ein wesentlicher Aspekt ist hier die Handhabung von Kernbrennstoffen.

Bei der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG (siehe Anlag 5 AtSMV) ist dagegen aufgrund der Auslegung der Transport- und Lagerbehälter ein Kritikalitätsereignis ausgeschlossen; der entsprechende Nachweis erfolgt in den Genehmigungsverfahren durch den Antragsteller. Infolgedessen existieren für die Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle keine spezifischen Meldekriterien mit Bezug zur Kritikalität.

6.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung kritikalitätsrelevanter Vorkommnisse stützt sich auf insgesamt 393 Ereignisse in inländischen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/. Abb. 6.2 gibt die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse im In- und Ausland bis 2018 wieder.

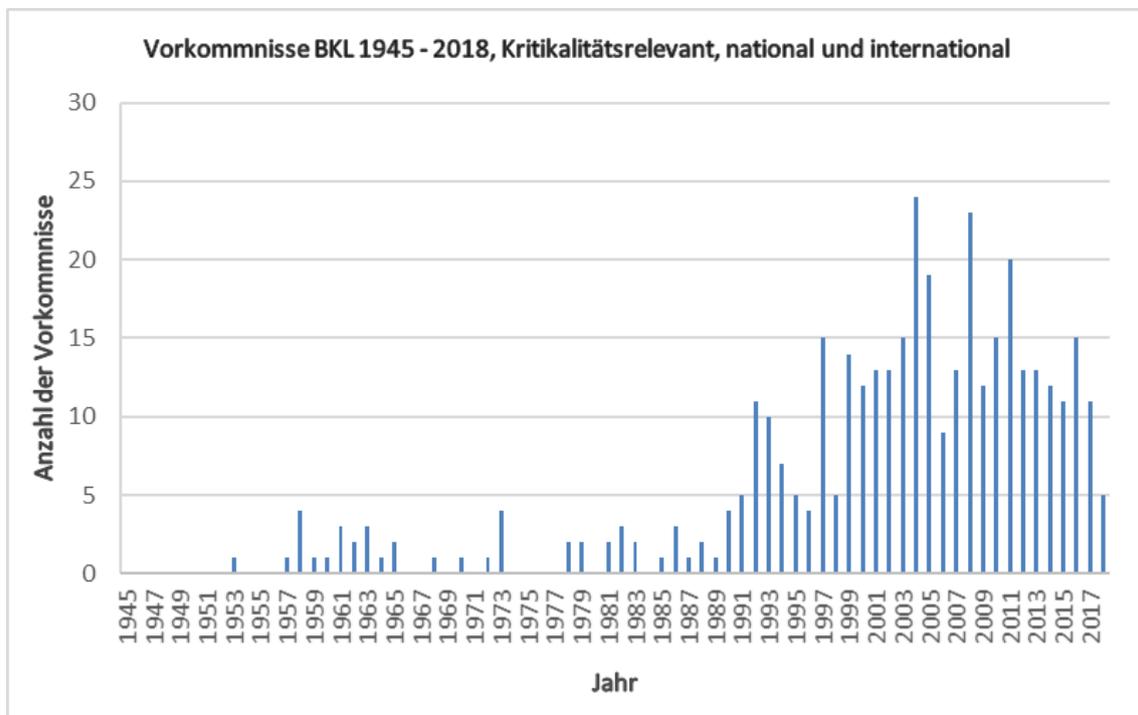


Abb. 6.2 Chronologische Aufschlüsselung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

In Abb. 6.2 lässt sich im zeitlichen Verlauf eine deutliche Zunahme der registrierten Ereignisse seit der Mitte der 1990er Jahre erkennen. Die meisten Vorkommnisse ereigneten sich in den Jahren 2004 (24) und 2008 (23). Der Anstieg der Ereigniszahlen lässt sich in erster Linie durch eine verbesserte Informationskultur, die weltweit zunehmende Anzahl der Anlagen sowie die Erhöhung des Durchsatzes der vorhandenen Anlagen erklären.

Tab. 6.1 gibt die Verteilung der Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder.

Tab. 6.1 Verteilung der kritikalitätsrelevanten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	0	0,0	65	16,7	65	16,5
Brennelementfabriken	4	100,0	233	59,9	237	60,3
Forschungszentren	0	0,0	45	11,6	45	11,5
Konversionsanlagen	0	0,0	4	1,0	4	1,0
Sonstige Anlagen	0	0,0	5	1,3	5	1,3
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	0	0,0	6	1,5	6	1,5
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	31	8,0	31	7,9
Summe	4	100,0	389	100,0	393	100,0

Aus Tab. 6.1 ist ersichtlich, dass lediglich vier kritikalitätsrelevante Vorkommnisse in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs – allesamt in Brennelementfabriken – registriert wurden. Auch die ausländischen Ereignisse ereigneten sich überwiegend in Brennelementfabriken, gefolgt von Anreicherungsanlagen, Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

6.3 Ursachen

In Tab. 6.2 ist die Zuordnung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 6.2 Ursachen für das Auftreten von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen im In- und Ausland

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	0	0,0	49	12,6	49	12,5
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	2	50,0	56	14,4	58	14,8
Menschliches Fehlverhalten	1	25,0	196	50,4	197	50,1
Äußere Einwirkungen	1	25,0	1	0,3	2	0,5
Organisatorische Mängel	0	0,0	62	15,9	62	15,8
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	0	0,0	25	6,4	25	6,4
Summe	4	100,0	389	100,0	393	100,0

Aus ihr geht hervor, dass bei kritikalitätsrelevanten ausländischen Vorkommnissen in ausländischen Anlagen die wichtigste Ursache in nahezu der Hälfte aller Fälle „*Menschliches Fehlverhalten*“ ist. „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“, „*Organisatorische Mängel*“ sowie „*Auslegungsmängel*“ folgen mit deutlichem Abstand; „*Nicht klassifizierbare Ursachen*“ und „*Äußere Einwirkungen*“ sind von untergeordneter Bedeutung. Die Hauptursache für kritikalitätsrelevante Vorkommnissen in deutschen Anlagen ist „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“, gefolgt von „*Auslegungsmängeln*“ und „*Menschlichem Fehlverhalten*“.

In Tab. 6.3 werden die Ursachen für alle kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt.

Für Konversionsanlagen und Sonstige Anlagen ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse eingeschränkt.

Tab. 6.3 Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	SO	WA
Anzahl Vorkommnisse	65	237	45	4	31	5
	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	9,2	12,6	13,3	0,0	0,0	12,9
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	17,0	16,5	4,4	0,0	0,0	16,1
Menschliches Fehlverhalten	52,3	47,7	55,6	100,0	100,0	58,0
Äußere Einwirkungen	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Organisatorische Mängel	13,8	14,8	26,7	0,0	0,0	6,5
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	7,7	7,6	0,0	0,0	0,0	6,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

„*Menschliches Fehlverhalten*“ ist nach Tab. 6.3 bei allen Anlagentypen die dominante Ursache für das Auftreten eines kritikalitätsrelevanten Vorkommnisses. Weitere relevante Ursachen sind

- für Anreicherungsanlagen und Brennelementfabriken „Auslegungsmängel“ und „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ sowie „Organisatorische Mängel“
- für Forschungszentren „Auslegungsmängel“ und „Organisatorische Mängel“
- für Wiederaufarbeitungsanlagen „Auslegungsmängel“ und „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“

6.4 Radiologische Auswirkungen

Tab. 6.4 gibt die radiologischen Auswirkungen der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder.

Danach hat der Großteil der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen. Die relativen Anteile der Kategorien „*Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition*“, „*Sachkontamination*“ und „*Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung*“ sind um

mehr als eine Größenordnung kleiner; die Kategorie „Auswirkungen unbekannt“ tritt gar nicht auf.

In der Kategorie „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ werden die kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse erfasst, bei denen es weder zu kritikalitätsbedingter Freisetzung von Radioaktivität noch zu Personenschäden kam. Dabei handelt es sich – unter anderem – um Verstöße gegen kritikalitätsrelevante Sicherheitsvorschriften, um Ausfälle sowie um Beeinträchtigungen von kritikalitätsrelevanten Einrichtungen, Systemen und Kontrollfunktionen. Diese Vorkommnisse werden auf der INES-Skala überwiegend mit den Stufen 0 und 1 bewertet.

Tab. 6.4 Klassifizierung von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach ihren radiologischen Auswirkungen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	4	100,0	362	93,1	366	93,1
Sachkontamination	0	0,0	5	1,3	5	1,3
Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition	0	0,0	21	5,4	21	5,3
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0	0,0	1	0,3	1	0,3
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Summe	5	100,0	389	100,0	393	100,0

Kritikalitätsstörfälle und -unfälle können drastische Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Häufig bleiben die Schäden auf das Betriebspersonal beschränkt. Ein Operateur, der sich in unmittelbarer Nähe einer kritischen Exkursion befindet, hat in den meisten Fällen nur geringe Überlebenschancen. Die langreichweitige Wirkung und das hohe Durchdringungsvermögen der bei einer Exkursion freigesetzten Neutronen- und Gammastrahlung erhöht jedoch auch das Gefahrenpotential in der näheren Umgebung eines solchen Ereignisses und erschwert Rettungskräften den Zugang zu eventuellen Opfern bzw. verhindert eine rasche Beendigung der nuklearen Kettenreaktion.

6.5 Aufschlüsselung nach INES

Kritikalitätsstörfälle sind in ihren radiologischen Auswirkungen oft folgenschwerer als andere Vorkommnisse. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES. In Tab. 6.5 ist die Einordnung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in die INES-Skala für in- und ausländische Anlagen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten angegeben.

Tab. 6.5 Zuordnung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	3	75,0	79	20,3	82	20,9
INES = 1	1	25,0	272	69,9	273	69,5
INES = 2	0	0,0	11	2,8	11	2,8
INES = 3	0	0,0	19	4,9	19	4,8
INES = 4	0	0,0	7	1,8	7	1,8
Keine Einstufung		20,0	1	0,3	1	0,3
Summe	4	100,0	389	100,0	393	100,0

Wie Tab. 6.5 zeigt, wurden die meisten kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in ausländischen Anlagen der INES-Stufe 1 zugeordnet. Die nächsthäufigsten Bewertungen sind die INES-Stufen 0 sowie (mit großem Abstand) 3, 2 und 4. Drei kritikalitätsrelevante Vorkommnisse in deutschen Anlagen wurden mit INES-Stufe 0 und eines mit INES-Stufe 1 bewertet. Insgesamt 90 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland entfallen auf die INES-Stufen 0 und 1.

In Tab. 6.6 werden die INES-Einstufungen für alle kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt. Für jeden Anlagentyp werden die relativen Häufigkeiten für die einzelnen INES-Bewertungen angegeben, wobei diese Werte auf die Zahl der Vorkommnisse für den jeweiligen Anlagentyp normiert sind. Die in Tab. 6.6 verwendeten Abkürzungen für die betrachteten Anlagentypen stimmen mit jenen in Tab. 6.3 überein.

Tab. 6.6 Aufschlüsselung der INES-Einstufung von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach Anlagentypen

INES-Bewertung	AN	BE	FO	KO	SO	WA
	%	%	%	%	%	%
INES = 0	23,0	24,9	8,9	0,0	20,0	0,0
INES = 1	75,5	70,4	66,6	100,0	60,0	61,3
INES = 2	0,0	3,4	4,4	0,0	0,0	0,0
INES = 3	1,5	0,8	13,3	0,0	0,0	29,0
INES = 4	0,0	0,4	4,4	0,0	20,0	9,7
Keine Einstufung	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Aus Tab. 6.6 ist ersichtlich, dass es im Hinblick auf die Verteilung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen charakteristische Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagentypen gibt. Anreicherungsanlagen und Brennelementfabriken zeigen sehr ähnliche Verteilungen mit Maxima für INES 1, gefolgt von INES 0 und geringen (Brennelementfabriken) bis gar keinen Anteilen (Anreicherungsanlagen) an den INES-Stufen 3 und 4. Demgegenüber vergrößern sich bei Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen die Anteile für die INES-Stufen 1 bis 4 bei gleichzeitiger Abnahme des Anteils von INES 0, wobei bei den Wiederaufarbeitungsanlagen ein signifikanter Anteil auf INES 3 (Schwerer Störfall) entfällt. Die INES-Bewertungen für Konversionsanlagen und Sonstige Anlagen sind wegen der geringen Anzahl der für diese Anlagentypen erfassten Ereignisse statistisch wenig aussagekräftig und wurden nur aus Gründen der Vollständigkeit in die Tabelle einbezogen.

Unter den 393 erfassten Ereignissen finden sich insgesamt 26 Kritikalitätsexkursionen, die mit den INES-Stufen 3 (Schwerer Störfall) oder 4 (Unfall) bewertet wurden. Von diesen entfallen allein 20 (77 %) auf den Zeitraum 1945 – 1968. Insgesamt 12 Kritikalitätsexkursionen ereigneten sich in Wiederaufarbeitungsanlagen, drei in Brennelementfabriken, acht in Forschungszentren und je eine in Anreicherungsanlagen, Produktionsanlagen und Sonstigen Anlagen. Diese Verteilung spiegelt näherungsweise das diesbezügliche Gefährdungspotential in den einzelnen Anlagentypen wieder. Auf die sieben mit INES-Stufe 4 bewerteten Kritikalitätsunfälle wird im Folgenden eingegangen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die meisten kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in Anreicherungsanlagen und Brennelementfabriken – unter anderem wegen der Art der verarbeiteten Kernbrennstoffe mit in der Regel niedrigen Anreicherungen von spaltbarem Material – ein signifikant geringeres Kritikalitätsrisiko bergen als jene in Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen, in denen entweder mit höher angereicherten Spaltstoffen (Forschungszentren) gearbeitet oder nasse Trennchemie mit festen und gelösten abgebrannten Kernbrennstoffen (Wiederaufarbeitungsanlagen) mit den damit verbundenen Gefahren betrieben wird.

Kurzbeschreibung einiger gravierender Kritikalitätsunfälle

Kritikalitätsexkursionen in Anlagen des Brennstoffkreislaufs können gravierende radiologische Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Aus diesem Grund werden die folgenschwersten Ereignisse – darunter sind in diesem Kontext alle sieben Ereignisse der Stufe INES 4 zu verstehen – nachfolgend noch einmal beschrieben. Die Auflistung erfolgt in chronologischer Reihenfolge der Ereignisse, wobei die recherchierten Fakten /BUN 18/ entnommen wurden. Ein umfassendes Kompendium aller 60 bisherigen Kritikalitätsunfälle (außerhalb Reaktoren), darunter neben Forschungseinrichtungen auch derjenigen in Anlagen des Brennstoffkreislaufs, findet sich in /MCL 00/.

- **Chelyabinsk/RF, 1957**

Am 21.04.1957 kam es in der Anlage B der russischen Wiederaufarbeitungsanlage Chelyabinsk (früher auch Kyshtym, heute: Mayak) zu einem Kritikalitätsunfall. Dieser ereignete sich in einem Prozessbehälter (Fassungsvermögen 100 Liter), der mit Heiz- und Rührgeräten ausgestattet war, in einer Reinigungszelle für hochangereichertes Uran. Verstöße gegen die Betriebsvorschriften führten dazu, dass sich 3,4kg Oxalat-Niederschlag¹ unbemerkt im Tank ansammeln konnten. Diese Menge war groß genug, um eine Exkursion herbeizuführen. Die Operateure in dem Raum registrierten dies zunächst nicht, da es keine Strahlenmessgeräte gab. Bemerkte wurden nur das Anschwellen von Filtermaterial und der Austritt von Gasen aus dem Oxalat-Niederschlag. Die Exkursion endete nach ca. 10 min, als ein Teil der Lösung aus dem Behälter herausgedrückt wurde. Ein Operateur verstarb nach 12 Tagen, fünf weitere erlitten hohe effektive Strahlendosen, gefolgt von Symptomen

¹ Als Oxalate werden die Salze und Ester der Oxalsäure (C₂H₂O₄) bezeichnet.

der Strahlenkrankheit. Als Ereignisursachen werden der Verstoß gegen mehrere Betriebsregelungen sowie die fehlerhafte Uranbilanzierung genannt /BUN 18/.

- Chelyabinsk/RF, 1958

In der Wiederaufarbeitungsanlage Chelyabinsk kam es am 02.01.1958 erneut zu einem Kritikalitätsunfall. Nach zwei vorangegangenen Unfällen (1953, INES 3 und 1957, INES 4, vgl. vorhergehender Spiegelstrich) war eine Versuchsanlage zur Bestimmung von Kritikalitätsparametern installiert worden. In einem Tank wurde eine Neutronenquelle mit einem Regelstab und Detektoren installiert. Nach Abschluss eines Experiments mussten die Operateure die Uranlösung aus dem Tank entleeren. Um diesen Prozess zu beschleunigen, lösten sie die dafür vorgesehenen Leitungen mit geringem Querschnitt und entleerten den Behälter in einen weiteren. Beim Kippen bildete sich jedoch eine kritische Geometrie und es kam zur Exkursion der Uranlösung. Die umstehenden Personen wirkten dabei als Neutronenreflektor. Infolge des Unfalls verstarben drei Personen wenige Tage später; eine weitere Person erlitt eine hohe Dosis, so dass sie in der Folge erblindete. Die Ursache für diese Kritikalitätsexkursion waren grobe Verstöße der Operateure gegen die Betriebsvorschriften /BUN 18/.

- Los Alamos/USA, 1958

Am 30.12.1958 kam es im Forschungszentrum Los Alamos, im Betriebsteil der Plutoniumverarbeitung zu einem schweren Kritikalitätsunfall. In dem betroffenen Betriebsteil wurden Plutonium sowie Americium in Konzentrationen um 0,1 g/l aus Prozessraffinat zurückgewonnen. Aufgrund der geringen Konzentration fand die Rückgewinnung in großen Behältern (850-Liter-Tanks) statt. Am Unfalltag wurde eine Materialbestandsaufnahme durchgeführt. Fälschlicherweise wurde davon ausgegangen, dass die Behälter geleert waren. In einem 850-Liter-Tank befanden sich jedoch Waschlösungen und Reststoffe aus vier weiteren Behältern, die sich über unkontrollierte Verbundleitungen dort angesammelt haben.

Als das Rührwerk des Tanks eingeschaltet wurde, kam es zu einer Kritikalitätsexkursion mit einem Lichtblitz. Ein Arbeiter, der den Prozess durch ein Schauglas beobachtete, erlitt eine effektive Dosis von 60-180 Sv und verstarb nach 36 Stunden. Zwei weitere Operateure, die dem Betroffenen zu Hilfe eilten, erlitten effektive Dosen von 1,35 Sv und 0,35 Sv. Durch eine spätere Analyse wurde festgestellt, dass sich eine 20,3 cm dicke, 160 l und 3,27 kg Plutonium enthaltende organische Schicht auf der wässrigen Lösung im Tank befunden hatte und durch das Einschalten des Rührgeräts in ihrer Geometrie so verändert wurde, dass es zur

Exkursion kam. Aufgrund der durch das laufende Rührgerät verursachten Vermischung wurde das Plutonium auf einem unterkritischen Niveau gehalten. Aus der Nichtberücksichtigung von Formveränderungen in Spaltstofflösungen und den unkontrollierten Zuleitungen kam es zu der erhöhten Plutoniumkonzentration im Tank /BUN 18/.

- Wood River/USA, 1964

In einer Wiedergewinnungsanlage für hochangereichertes Uran aus Altmaterialien in Wood River ereignete sich am 24.07.1964 ein Kritikalitätsunfall. Die Wiedergewinnung geschah mittels Handumwälzung von Trichlorethan (CHCl_3) mit Natriumkarbonatlösung. Dieser Prozess war wenig effektiv und führte aufgrund von Anfangsschwierigkeiten im Betrieb der Fabrik zu einer Ansammlung von Trichlorethan-Lösung mit niedriger Urankonzentration. Zur gleichen Zeit wurde in baugleichen Behältern Lösung mit einer hohen Urankonzentration gelagert, welche aus der Reinigung von Gerätschaften stammte. Zur Prozessbeschleunigung wurde das Trichlorethan in einen 75-Liter-Behälter geleitet, der mit Natriumkarbonatlösung gefüllt und mit einem Rührgerät versehen war.

Am Unfalltag wurde versehentlich eine Flasche mit hoher Urankonzentration in diesen Behälter entleert und verrührt. Daraufhin kam es zu einer Exkursion mit einem Lichtblitz. Ein Arbeiter wurde zu Boden geschleudert und erlitt eine effektive Dosis von 100 Sv, an der er 49 Stunden später verstarb. Durch die Exkursion wurde Lösung aus dem Behälter geschleudert, so dass vorübergehend die Kettenreaktion zum Erliegen kam. Zwei Stunden später wurden zwei weitere Angestellte zu dem Behälter beordert, um das Rührgerät abzustellen. Das Rühren hielt die Lösung jedoch bis dahin auf unterkritischem Niveau. Nach Abstellung des Rührwerks und dessen anschließender Wiederinbetriebnahme, um den Behälterinhalt abzulassen, kam es zu einer weiteren Exkursion. Die beiden Männer erlitten effektive Dosen von 0,6 Sv bzw. 1,0 Sv. Zunächst blieb dies unbemerkt, da noch der akustische Strahlenalarm von der ersten Exkursion ertönte. Beide Männer überlebten. Missachtung von Vorschriften, Fahrlässigkeit und eine mangelhafte Organisationsstruktur führten laut /BUN 18/ zu diesem Unfall.

- Chelyabinsk/RF, 1968

In der Wiederaufarbeitungsanlage Chelyabinsk kam es am 10.12.1968 erneut zu einem Kritikalitätsunfall bei der Erprobung eines neuen Plutoniumextraktionsverfahrens. Hierfür wurde schwachkonzentrierte Plutoniumlösung (0,4 g Pu/l) in einen großen Tank (4.000 l) geleitet. Bei einer

Probenahme wurde festgestellt, dass die Plutoniumkonzentration höher war (0,5 g Pu/l) und sich organische Rückstände (vermutlich von einer Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche) in der Lösung befanden. Der Schichtleiter ordnete an, diese zu entfernen. Dafür wurden eine geometrisch sichere 20-Liter-Glasflasche und ein geometrisch nicht sicherer 60-Liter-Behälter verwendet. Beim Befüllen der Glasflasche wurde aufgrund der dunklen Färbung der Flüssigkeit eine erhöhte Plutoniumkonzentration festgestellt. Der Inhalt der Flasche wurde in den großen Behälter entleert. Diese Prozedur wurde auf Geheiß des Schichtführers fortgeführt, der den Raum verlassen hatte.

Als die zweite Glasflaschenfüllung in den großen Behälter gekippt wurde, trat eine von einem Lichtblitz begleitete Exkursion ein. Der Operateur verließ schnellstmöglich den Arbeitsplatz; gleichzeitig sprach das Alarmsystem an, woraufhin alle Personen evakuiert wurden. Der Schichtführer kehrte zurück, um den 60-Liter-Behälter zu entleeren. Als er ihn kippte, kam es zur zweiten Exkursion. Der Schichtführer starb an den Folgen der direkten Strahlenexposition. Dem vorgenannten Operateur mussten aufgrund hoher erlittener Dosis beide Beine amputiert werden. Die Ursachen für diesen Unfall waren der leichtsinnige Umgang mit der Plutoniumlösung und die Verwendung eines geometrisch nicht sicheren Behälters /BUN 18/.

- **Arsamas/RF, 1997**

Am 17.06.1997 kam es in der russischen Nuklearforschungsanlage Arsamas-16 zu einem schweren Kritikalitätsunfall. In einem Bunker baute ein Wissenschaftler ein früheres Kritikalitätsexperiment aus dem Jahr 1972 nach. Er wählte dabei aufgrund eines Ablesefehlers versehentlich einen Kupferreflektor mit zu großer Dicke. Während des Versuchsaufbaus kam es zu einer Exkursion, verbunden mit einem Lichtblitz. Wahrscheinlich wurde die Kettenreaktion durch eine Fehlplatzierung des Kupferreflektors ausgelöst. Als der Wissenschaftler den Reflektor am Oberteil der Versuchsanordnung anbringen wollte, entglitt dieser seinen Händen und fiel auf die Versuchsanordnung. Der Wissenschaftler erlitt eine effektive Dosis von ca. 10 Sv und verstarb drei Tage später. Die Kettenreaktion ging in einen quasistationären Zustand über, der im Bunker ein Strahlungsfeld von 10 Gy verursachte. Erst am 24.06., also sieben Tage später, gelang es mit einem Roboter, den Versuchsaufbau fernhantiert so zu verändern, dass die Kettenreaktion terminiert wurde. Eine weitere mittelbare Ursache für diesen Unfall war ein Verstoß gegen bestehende Vorschriften, indem der Wissenschaftler das Experiment alleine weiterführte,

nachdem sein Mitarbeiter den Raum unerwartet verlassen musste /BUN 18/
/MCL 00/.

- Tokai-mura/Japan, 1999

In der Brennelementfabrik in Tokai-mura kam es am 30.09.1999 im Zuge einer Kampagne zur Fertigung von Brennelementen für den Brutreaktor Joyo zu einem Kritikalitätsunfall. Dieser ereignete sich nicht im regulären Fabrikationsprozess, sondern in einem Nebengebäude zur Rezyklierung von Uranoxid. Beim Rezyklierprozess wurde verunreinigtes Rücklaufmaterial in Form von Triuranoxotrid (U_3O_8) mittels Salpetersäure (HNO_3) in Uranylнитratlösung ($UO_2(NO_3)_2$) überführt. Durch Zugabe von Ammoniak (NH_3) wurde aus dieser Lösung Ammoniumdiuranat ($(NH_4)_2U_2O_7$) ausgefällt. Aus letzterem wurde durch Trocknung in Kalzinieröfen gereinigtes U_3O_8 gewonnen, welches für die Brennstoffherstellung geeignet ist. Drei Arbeiter beschäftigten sich mit diesem Prozess, um eine kleinere Menge Urandioxid mit einer Anreicherung von 18,8 % herzustellen. Hierfür wurden spezielle Behälter (Auflösetank, Extraktionskolonne, Lagertanks) vorgehalten, die geometrische Kritikalitätssicherheit gewährleisteten. Anschließend sollte die Uranylнитratlösung in einen größeren, geometrisch nicht sicheren Sedimentationsbehälter entleert werden, der aus Gründen der Kritikalitätssicherheit nur mit einer Masse von maximal 2,4 kg Uran der Anreicherung 16 – 20 % befüllt werden durfte.

Aus Zeitdruck befüllten die Arbeiter den Sedimentationsbehälter vorschriftswidrig unter Umgehung der genehmigten Vorgehensweise mit Uranylнитratlösung weit über den festgelegten Massengrenzwert hinaus. Mit 16,6 kg Uran wurde die zulässige Masse um etwa den Faktor 7 überschritten und eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion in Gang gesetzt (blauer Lichtblitz). Damit verbunden wurde eine stark erhöhte Gammastrahlung registriert. Das gesamte Betriebsgelände wurde daraufhin evakuiert. Die beiden dem Behälter am nächsten stehenden Arbeiter erlitten durch Direktstrahlung effektive Dosen im Bereich von 16–20 Gy bzw. 6–10 Gy. Beide starben einige Monate später an den Folgen ihrer hohen Strahlenexposition. Der dritte Arbeiter, der sich in einem angrenzenden Raum aufhielt, erlitt eine effektive Dosis von 1–4,5 Gy und überlebte. Zahlreiche Arbeiter auf dem Gelände und Anwohner in der näheren Umgebung der Fabrik erlitten geringe Dosen, die jedoch größtenteils unter den gesetzlichen Grenzwerten lagen und ohne gesundheitliche Folgen blieben. Die nukleare Kettenreaktion konnte erst nach etwa 18 Stunden durch Ablassen eines zur Kühlung dienenden und unabsichtlich als Neutronenreflektor dienenden Wassermantels sowie durch anschließende Injektion von Borsäure (H_3BO_3) in den Ausfälltank gestoppt werden.

Als primäre Ursache des Unfalls wird in /BUN 18/, /MCL 00/ und /IAE 99/ die Überfüllung des Sedimentationsbehälters genannt; vermutlich wurde ein Anreicherungsgrad von 5 % und nicht von knapp 20 % unterstellt. Des Weiteren haben jedoch auch die grobe Missachtung von Betriebsvorschriften, administrative Defizite sowie die unzureichende Ausbildung der Operateure im Hinblick auf die Kritikalitätssicherheit maßgeblich zum Zustandekommen dieses Unfalls beigetragen. Da ein Kritikalitätsereignis in der Betriebsgenehmigung als ausgeschlossen galt, war auf dem Anlagengelände kein Kritikalitätsdetektionssystem installiert (mangelhafte Sicherheitskultur).

Die Mehrzahl der hier einzeln beschriebenen Kritikalitätsunfälle ereignete sich in Wiederaufarbeitungsanlagen. Als Hauptursache für alle beschriebenen Vorkommnisse ist menschliches Fehlverhalten verantwortlich, dies jedoch stets mittelbar in Verbindung mit anderen Ursachen. Ein Grund dafür könnten die mangelnde Erfahrung der Operateure bzw. die Unkenntnis der zugrundeliegenden physikalischen Sachverhalte sein. Technisches Versagen und fehlerhafte Auslegungen spielen ebenfalls eine große Rolle.

6.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 393 kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen in in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Vorkommnisse ereigneten sich vorwiegend in Brennelementfabriken, gefolgt von Anreicherungsanlagen, Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung. Auch die vier kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse in deutschen Anlagen sind allesamt Brennelementfabriken zuzuordnen.

Als wichtigste Vorkommnis-auslösende Ursache konnte „*Menschliches Fehlverhalten*“ identifiziert werden. Mit deutlichem Abstand folgen „*Organisatorische Mängel*“, „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ und „*Auslegungsmängel*“. Im Vergleich dazu fallen „*Nicht klassifizierbare Ursachen*“ noch weiter ab, und „*Äußere Einwirkungen*“ sind von untergeordneter Bedeutung. In deutschen Anlagen ist

„Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ die Hauptursache, gefolgt von „Auslegungsmängeln“ und „Äußere Einwirkungen“.

Die Aufschlüsselung der Ursachen nach Anlagentypen zeigt, dass „Menschliches Fehlverhalten“ die dominante Ursache für das Auftreten eines kritikalitätsrelevanten Vorkommnisses bei allen Anlagentypen ist. Bei den verbleibenden Ursachen zeigen sich einige anlagenspezifische Unterschiede: Für Anreicherungsanlagen und Brennelementfabriken sind „Auslegungsmängel“ und „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ sowie „Organisatorische Mängel“ weitere wichtige Ursachen. Bei Forschungszentren sind „Auslegungsmängel“ und „Organisatorische Mängel“, bei Wiederaufarbeitungsanlagen „Auslegungsmängel“ und „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ von zusätzlicher Bedeutung.

Eine Untersuchung der Auswirkungen der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse ergibt, dass der Großteil der Vorkommnisse in die Kategorie „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ fällt. Die relativen Anteile der Kategorien „Inkorporation, Personenkontamination oder externe Strahlenexposition“, „Sachkontamination“ und ‘Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung‘ sind um mehr als eine Größenordnung kleiner. Die Kategorie „Auswirkungen unbekannt“ tritt gar nicht auf.

Fast alle (99,7 %) der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse wurden nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES eingestuft. Auf dieser Skala wurden die meisten ausländischen Vorkommnisse mit INES-Stufe 1 bewertet, gefolgt von INES-Stufe 0. Insgesamt 90 % aller bewerteten Vorkommnisse im In- und Ausland entfallen auf die beiden niedrigsten INES-Stufen 0 und 1. 46 % der am höchsten eingestuften Ereignisse (INES-Stufen 3 und 4; insgesamt 26) wurden in Wiederaufarbeitungsanlagen registriert.

Bei der Verteilung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen zeigen sich charakteristische Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagentypen. Anreicherungsanlagen und Brennelementfabriken zeigen sehr ähnliche Verteilungen mit Maxima für INES 1, gefolgt von INES 0 und geringen bis gar keinen Anteilen an den INES-Stufen 3 und 4. Demgegenüber vergrößern sich bei Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen die Anteile für die INES-Stufen 1 bis 4 bei gleichzeitiger Abnahme des Anteils von INES 0, wobei bei den Wiederaufarbeitungsanlagen ein signifikanter Anteil auf INES 3 (Schwerer Störfall) entfällt.

7 Ausfall von Systemen und Komponenten

Der Ausfall von Systemen und Komponenten in Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung kann z. B. Lüftungs- und Kühlsysteme, UF₆-Detektionssysteme sowie Einrichtungen zur Stromversorgung, zum Brandschutz oder zur Kritikalitätsüberwachung betreffen. Wie gravierend die Auswirkungen eines solchen Ausfalls sind, hängt maßgeblich von der sicherheitstechnischen Bedeutung des Systems bzw. der Komponente für die Anlage ab. Fällt beispielweise eine Überwachungskamera am Begrenzungszaun des Anlagengeländes aus, hat dies eine sicherheitstechnisch geringere Bedeutung als der Ausfall eines Strahlungssensors in einer Prozesslinie. Darüber hinaus spielt die Auslegung der Anlage eine wichtige Rolle, z. B. ob redundante und diversitäre Systeme vorhanden sind, die die Funktion des ausgefallenen Systems im Bedarfsfall übernehmen können.

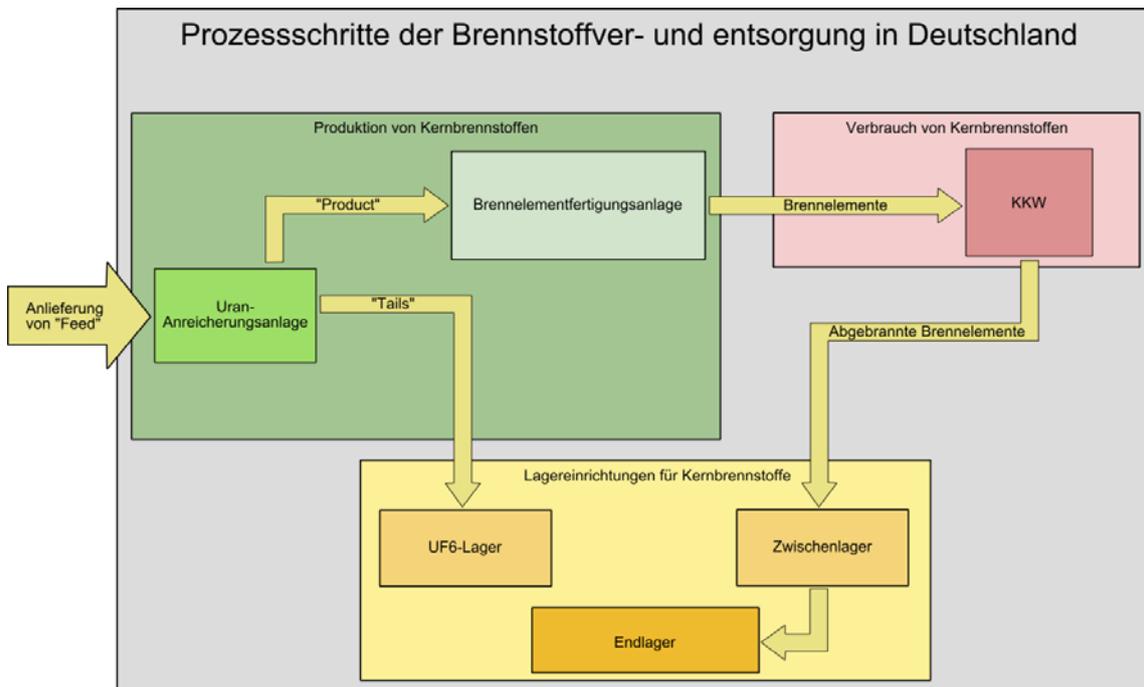


Abb. 7.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In allen Bereichen kann es zu Ausfällen von Systemen und Komponenten kommen

7.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden in Anlage 2 (Anlagen der

Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG), Abschnitt 2 „Anlagentechnik und Betrieb“, folgende Meldekriterien für den Ausfall von Systemen und Komponenten aufgeführt:

- **S 2.1.1** Funktionsstörung, Schaden oder Ausfall an einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung, so dass ein Anlagenzustand eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umgebung auswirkt oder wenn dies zu besorgen ist.
- **E 2.1.1** Funktionsstörung, Schaden oder Ausfall an einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung, wenn die Anlage hierfür auszulegen ist und bei deren Eintreten der Betrieb der Anlage oder der Teilanlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann.
- **N 2.1.1** Funktionsstörung, Schaden oder Ausfall
 - einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung oder
 - einer Komponente oder einem Bauelement in einer sonstigen Einrichtung der Anlage oder der Teilanlage, sofern eine entsprechende Komponente oder ein entsprechendes Bauelement in einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung verwendet wird.

Nicht zu melden sind Funktionsstörungen, Schäden oder Ausfälle

- einzelner leittechnischer Bauteile in den zur Störfallbeherrschung erforderlichen leittechnischen Einrichtungen der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen, sofern der Ausfall selbstmeldend ist, innerhalb von 24 Stunden behoben wird und nicht nach Kriterium N 2.1.2 zu melden ist
- in den sonstigen sicherheitstechnisch wichtigen Systemen, die in weniger als 24 Stunden oder innerhalb der in den genehmigten Betriebsvorschriften festgelegten zulässigen Reparaturzeiten behoben werden, sofern die Funktion des Systems erhalten bleibt
- eines sonstigen sicherheitstechnisch wichtigen Systems, für das in den genehmigten Betriebsvorschriften Ersatzmaßnahmen für einen begrenzten Zeitraum vorgesehen sind, sofern das Ereignis nicht nach Kriterium N 2.1.2 zu melden ist

- an einzelnen Komponenten des anlagentechnischen oder bautechnischen Brandschutzes, durch die die Brandschutzfunktionen nicht unzulässig beeinträchtigt wurden, sofern das Ereignis nicht nach Kriterium N 2.1.2 zu melden ist

Die zuständige Aufsichtsbehörde kann für das Kriterium N 2.1.1 weitere anlagenspezifische Einzelheiten festlegen.

- **N 2.1.2** Ausfall, Schaden oder Befund mit Hinweis auf einen systematischen Fehler an einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung.
- **N 2.1.3** Sicherheitstechnisch relevante Abweichung von einem behördlich festgelegten Wert der Anlagentechnik oder des Betriebes.
- **E 2.1.4 / N 2.1.4** Anforderung einer aktiven Sicherheitseinrichtung².
- **N 2.1.5** Übertritt radioaktiver Stoffe in ein System, eine Komponente oder ein Bauelement, wenn das System, die Komponente oder das Bauelement im Normalbetrieb nicht mit radioaktiven Stoffen beaufschlagt wird.
- **S 2.1.6** Kritikalitätsereignis.
- **E 2.1.6** Ereignis, das die Sicherheitsprinzipien der Kritikalitätssicherheit verletzt hat.
- **N 2.1.6** Ereignis, das die Kritikalitätssicherheit beeinträchtigt, jedoch nicht die Sicherheitsprinzipien der Kritikalitätssicherheit verletzt hat.
- **N 2.1.7** Sicherheitstechnisch relevantes Ereignis beim Transport, der Handhabung oder der Lagerung radioaktiver Stoffe auf dem Betriebsgelände.
- **N 2.1.8** Ereignis, das eine bedeutsame Änderung der Sicherheitsspezifikationen erfordert.
- **N 2.1.9** Ereignis bei der Erweiterung oder Änderung der Anlage oder der Teilanlage, das Auswirkungen auf die ordnungsgemäße Funktion eines sicherheitstechnisch wichtigen Systems oder Anlagenteils beim bestehenden Betrieb haben kann.
- **V 2.1.10** Befund an einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung vor Betrieb der Anlage oder der Teilanlage, der auf einen Auslegungsfehler oder auf eine Schwäche des Qualitätssicherungssystems hinweist.

² Die betreffende Sicherheitseinrichtung und die zugehörige Meldekategorie werden von der zuständigen Aufsichtsbehörde festgelegt.

- **V 2.1.11** Ereignis bei der Errichtung der Anlage oder der Teilanlage, das Auswirkungen auf die ordnungsgemäße Funktion eines sicherheitstechnisch wichtigen Systems oder Anlagenteils beim künftigen Betrieb haben kann (zum Beispiel Brand, Explosion, Überflutung, Absturz einer schweren Last).

Bei der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG (siehe Anlage 5 AtSMV) werden im Abschnitt 2.1 „Funktionsstörungen, Schäden oder Ausfälle in sicherheitstechnisch wichtigen Systemen oder Einrichtungen“ folgende Meldekriterien für den Ausfall von Systemen und Komponenten aufgeführt:

- **E 2.1.1** Funktionsstörung, Schaden oder Ausfall eines sicherheitstechnisch wichtigen Systems oder einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung, so dass zur weiteren Aufbewahrung nach § 6 AtG eine zusätzliche und bisher nicht in den genehmigten Handlungsanweisungen (Sicherheitsspezifikationen, Betriebs- und Prüfvorschriften) festgelegte Maßnahme ergriffen werden muss.
- **N 2.1.1** Funktionsstörung, Schaden oder Ausfall eines sicherheitstechnisch wichtigen Systems oder einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung. Nicht zu melden sind Funktionsstörungen, Schäden oder Ausfälle
 - in den sonstigen sicherheitstechnisch wichtigen Systemen, die in weniger als 24 Stunden oder innerhalb der in den genehmigten Betriebsvorschriften festgelegten zulässigen Reparaturzeiten behoben werden, sofern die Funktion des Systems erhalten bleibt
 - der sonstigen sicherheitstechnisch wichtigen Systeme, für die genehmigte Ersatzmaßnahmen für einen begrenzten Zeitraum zulässig sind, sofern das Vorkommnis nicht nach Kriterium N 2.1.2 zu melden ist
 - geringeren Ausmaßes an einzelnen Komponenten des bautechnischen Brandschutzes sowie der Ausfall einzelner Komponenten der dezentralen Brandbekämpfungs- und Brandmeldeeinrichtungen
- **N 2.1.2** Ausfall, Schaden oder Befund mit Hinweis auf einen systematischen Fehler an einem sicherheitstechnisch wichtigen System oder einer sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtung.

- **N 2.1.3**

- Auslösung eines Druckschalters der Dichtungssysteme der Transport- oder Lagerbehälter.
- Auslösung eines Druckschalters, die nicht auf Undichtigkeiten der Deckeldichtungen zurückzuführen ist, es sei denn, der Mangel an dem Druckschalter kann innerhalb der in den genehmigten Betriebsvorschriften festgelegten zulässigen Reparaturzeit behoben werden.

7.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse stützt sich auf insgesamt 299 Ereignisse in aus- und inländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/.

Abb. 7.2 gibt die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten und durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland wieder. Im zeitlichen Verlauf lässt sich eine deutliche Zunahme der registrierten Ereignisse zu jüngerem Datum hin erkennen. Diese Entwicklung lässt sich vermutlich mit dem in den 1980er Jahren einsetzenden weltweiten Ausbau der zivilen Kerntechnik erklären. Zeitversetzt treten alterungsbedingte Ausfälle von Systemen und Komponenten mit zunehmender Lebensdauer der Anlagen häufiger auf. Des Weiteren könnten auch eine Verschärfung der Meldepflichten seitens der nationalen Aufsichtsbehörden sowie ein verbesserter Informationsaustausch der Staaten untereinander zur Bekanntmachung einer größeren Zahl von Ereignissen beigetragen haben. Die meisten Vorkommnisse dieser Kategorie wurden in den Jahren 2007 (20) und 2010 (19) registriert.

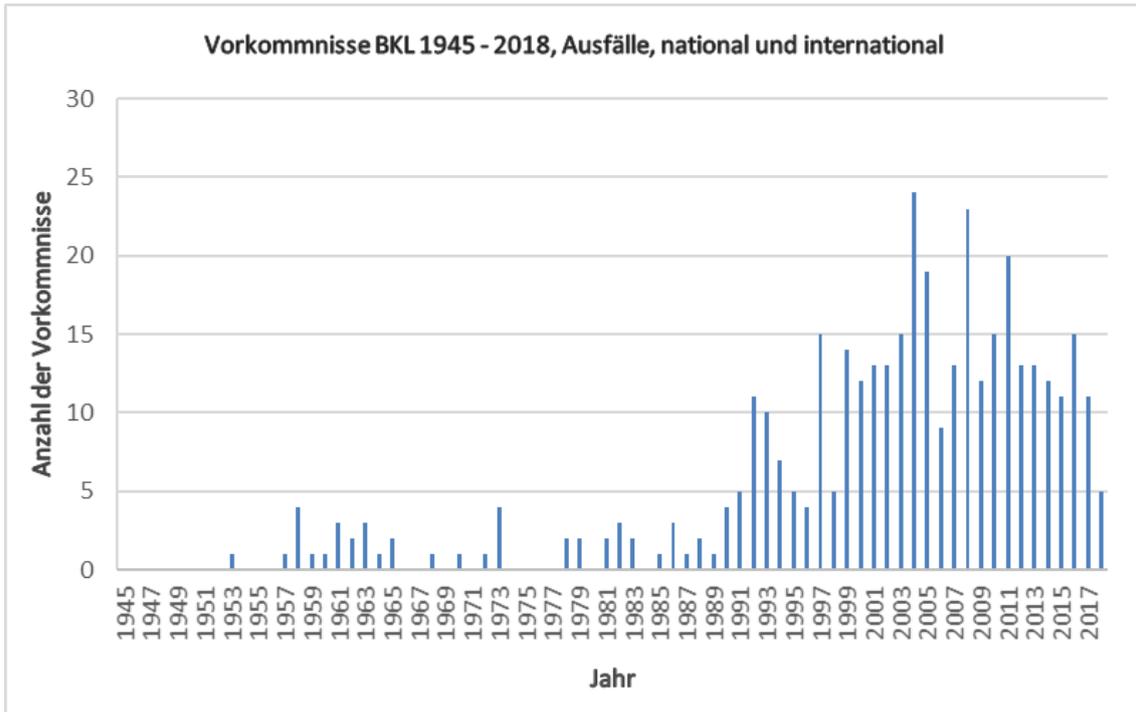


Abb. 7.2 Chronologische Aufschlüsselung der durch Ausfälle induzierten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Tab. 7.1 Verteilung der in VIBS erfassten, durch Ausfälle ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	5	10,2	52	20,8	57	19,1
Brennelementfabriken	28	57,1	60	24,0	88	29,4
Forschungszentren	4	8,2	56	22,4	60	20,1
Konversionsanlagen	0	0,0	13	5,2	13	4,3
Sonstige Anlagen	2	4,1	9	3,6	11	3,7
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	10	20,4	13	5,2	23	7,7
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	47	18,8	47	15,7
Summe	49	100	250	100	299	100

Tab. 7.1 gibt die Verteilung der Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder. Aus der Tabelle geht hervor, dass in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs insgesamt 49 auf Ausfälle zurückführbare Vorkommnisse registriert wurden. Davon ereigneten sich 57 % in

Wiederaufarbeitungsanlagen. Mit signifikant reduzierter relativer Häufigkeit folgen Zwischenlager (ca. 20 %) und Anreicherungsanlagen (ca. 10 %). Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den 250 Vorkommnissen in ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs: Knapp 86 % dieser Vorkommnisse wurden – in absteigender Reihenfolge – in Brennelementfabriken, Forschungszentren, Anreicherungsanlagen und Wiederaufarbeitungsanlagen registriert, wobei die genannten vier Anlagentypen nahezu gleichhäufig vertreten sind; die relativen Häufigkeiten liegen hier in einem schmalen Intervall zwischen 24,0 % und 18,8 %. Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

7.3 Ursachen

Tab. 7.2 gibt die Zuordnung der durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse in die einzelnen Ursachenkategorien für in- und ausländische Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs (ohne Wiederaufarbeitungsanlagen) sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten an.

Tab. 7.2 Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Ausfälle zurückgeführt werden können

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Auslegungsmängel	3	6,1	19	9,4	22	8,7
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	30	61,2	127	62,6	157	62,3
Menschliches Fehlverhalten	7	14,3	17	8,4	24	9,5
Organisatorische Mängel	1	2,0	6	3,0	7	2,8
Äußere Einwirkungen	4	8,2	24	11,8	28	11,1
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	4	8,2	10	4,9	14	5,6
Summe	49	100	203	100	252	100

Nach Tab. 7.2 ist bei gut 62 % aller ausfallbedingten Vorkommnisse „Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß“ die Ursache. Bei den klassifizierbaren Ursachen folgen mit weitem Abstand die Kategorien „Äußere Einwirkungen“, „Menschliches Fehlverhalten“ und „Auslegungsmängel“. Auch bei den Vorkommnissen in deutschen

Anlagen dominiert „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“, mit einigem Abstand gefolgt von „*Menschlichem Fehlverhalten*“, „*Äußeren Einwirkungen*“ und „*Auslegungsmängeln*“.

„*Menschliches Fehlverhalten*“ wurde in deutschen Anlagen (14,3 %) signifikant häufiger als in ausländischen Anlagen (8,4 %) als Vorkommnis-auslösende Ursache identifiziert. Gleiches gilt für den Anteil der Ausfälle mit unbekannter oder nicht klassifizierbarer Ursache, der in deutschen Anlagen (8,2 %) höher ist als in ausländischen Anlagen (4,9 %). Die Kategorie „*Organisatorische Mängel*“ ist sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen nur von marginaler Bedeutung.

In Tab. 7.3 werden die Ursachen für alle durch Ausfälle ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen (ohne Wiederaufarbeitungsanlagen) aufgeschlüsselt.

Für Konversionsanlagen, Sonstige Anlagen sowie die zusammengefasste Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt.

Tab. 7.3 Aufschlüsselung der Ursachen für ausfallbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO
Anzahl Vorkommnisse	57	88	60	13	23	11
	%	%	%	%	%	%
Auslegungsmängel	1,7	9,1	15,0	0,0	13,0	0,0
Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß	82,5	56,8	46,7	81,8	56,6	81,8
Menschliches Fehlverhalten	5,3	12,5	13,3	0,0	8,7	0,0
Organisatorische Mängel	1,7	2,3	3,3	0,0	8,7	0,0
Äußere Einwirkungen	3,5	13,6	16,7	18,2	4,3	9,1
Nicht klassifizierbar (unbekannt)	5,3	5,7	5,0	0,0	8,7	9,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die für alle Anlagentypen dominante Ursache für das Auftreten der auf Ausfälle zurückzuführenden Vorkommnisse ist nach Tab. 7.3 die Kategorie „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“.

Neben dieser dominanten Kategorie zeigen sich einige anlagentypische Besonderheiten:

- Bei Anreicherungsanlagen weisen die relativen Häufigkeiten aller verbleibenden Kategorien Werte von kleiner als 6 % auf.
- Bei Brennelementfabriken und Forschungszentren sind auch die Kategorien „Äußere Einwirkungen“, „Auslegungsmängel“ und „Menschliches Fehlverhalten“ von Bedeutung.
- Bei Konversionsanlagen sind „Äußere Einwirkungen“ relevant, bei der zusammengefassten Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen „Auslegungsmängel“, „Menschliches Fehlverhalten“ und „Organisatorische Mängel“.

Des Weiteren wurde untersucht, welche Systeme und Komponenten am häufigsten von den Ausfällen betroffen waren. Zu diesem Zweck wurden die Systeme und Komponenten in neun verschiedenen Klassen zusammengefasst. Systeme und Komponenten, die zu keiner dieser neun Klassen gehören, wurden der Klasse Sonstige Einrichtungen zugeordnet. Diese in Tab. 7.4 zusammengefasste Aufstellung beinhaltet die Daten aller Anlagentypen des Kernbrennstoffkreislaufs mit Ausnahme der Wiederaufarbeitungsanlagen.

Im Hinblick auf die von den Ausfällen betroffenen Systeme und Komponenten zeigt Tab. 7.4 sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zwischen deutschen und ausländischen Anlagen. Die am häufigsten von Ausfällen betroffenen Klassen von Systemen und Komponenten – sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen – sind elektrische Einrichtungen und Lüftungssysteme. Betrachtet man die Gesamtheit aller durch Ausfälle ausgelösten Vorkommnisse, so entfallen in deutschen Anlagen nahezu die Hälfte, in ausländischen Anlagen ein Drittel auf elektrische Einrichtungen. Dagegen sind Lüftungssysteme in deutschen und ausländischen Anlagen gleichermaßen häufig von Ausfällen betroffen.

Tab. 7.4 Auflistung der von den Ausfällen betroffenen Systemen und Komponenten sowie ihrer relativen Häufigkeiten an den erfassten Vorkommnissen im In- und Ausland

Betroffene Systeme und Komponenten	Inland	Ausland	Gesamt
	%	%	%
Elektrische Einrichtungen	49,0	32,5	35,7
Lüftungssystem	20,4	16,7	17,1
UF ₆ -Detektion	0,0	10,3	8,3
Kritikalitätsüberwachung	0,0	8,4	6,7
Brandschutzeinrichtung	6,1	7,9	7,5
Alarmeinrichtung	0,0	4,4	3,6
Autoklaven	0,0	1,5	1,2
Medienversorgung	2,1	2,5	2,4
Sonstige Überwachungssysteme	12,2	7,9	8,7
Sonstige Einrichtungen	10,2	7,9	8,7
Summe	100,0	100,0	100,0

Bei den übrigen Klassen von Systemen und Komponenten ergibt sich folgendes Bild: In ausländischen Anlagen sind die relativen Häufigkeiten für den Ausfall von UF₆-Detektionssystemen, Brandschutzeinrichtungen, Kritikalitätsüberwachung sowie Medienversorgung und Autoklaven größer und für Sonstige Überwachungssysteme sowie Sonstige Einrichtungen kleiner als in deutschen Anlagen.

7.4 Radiologische Auswirkungen

Tab. 7.5 gibt die Zuordnung der radiologischen Auswirkungen der durch Ausfälle ausgelösten Vorkommnisse in die oben aufgeführten Kategorien wieder. Dabei werden sowohl die absoluten Werte als auch die relativen Häufigkeiten angegeben.

Nach Tab. 7.5 hatten 86 % aller ausfallbedingten Vorkommnisse „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“. Lediglich vier Ereignisse in ausländischen Anlagen führten zu einer „Sachkontamination“ und eines zu „Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung“.

Tab. 7.5 Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Ausfälle von Systemen und Komponenten ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen

Radiologische Auswirkungen	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen	49	100,0	208	83,2	257	86,0
Sachkontamination	0	0,0	4	1,6	4	1,3
Inkorporation, Personenkontamination, externe Strahlenexposition	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Freisetzung bzw. erhöhte Ableitung in die Umgebung	0	0,0	1	0,4	1	0,3
Auswirkungen unbekannt	0	0,0	37	14,8	37	12,4
Summe	49	100	250	100	299	100

7.5 Aufschlüsselung nach INES

Die radiologischen Auswirkungen ausfallbedingter Vorkommnisse sind in den meisten Fällen weniger folgenschwer als diejenigen anderer Vorkommnisklassen wie z. B. Brände, Kritikalitätsexkursionen oder Explosionen. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES wieder. Die durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse sind fast ausschließlich den INES-Stufen 0 und 1 zugeordnet.

In Tab. 7.6 ist für die durch Ausfälle von Systemen und Komponenten ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES-Skala – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – angegeben.

Tab. 7.6 Zuordnung der durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	31	63,3	84	33,6	115	38,5
INES = 1	0	0,0	114	45,6	114	38,1
INES = 2	0	0,0	2	0,8	2	0,7
Keine Einstufung	18	36,7	50	20,0	68	22,7
Summe	49	100,0	250	100,0	299	100,0

Gemäß Tab. 7.6 liegt für etwa 23 % aller durch Ausfälle ausgelösten Ereignisse keine INES-Einstufung vor; dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala ereigneten.

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestufteten Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: Sämtlichen Vorkommnissen in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 42 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0, ca. 57 % mit INES-Stufe 1 bewertet und 2 % mit INES-Stufe 2 bewertet.

Zwei Ereignisse ausländischen Anlage wurde mit INES-Stufe 2 (Störfall) bewertet. Bei dem ersten handelt es sich um einen folgenschweren Stromausfall im britischen Kernforschungszentrum Dounreay am 07.05.1998. Das Vorkommnis wird in /BUN 18/ wie folgt beschrieben: Bei Aushubarbeiten durchtrennten Arbeiter unwissentlich die Stromkabel für die Energieversorgung des sog. "Fuel Cycle Area", welches drei Wiederaufarbeitungsanlagen und eine Uranrückgewinnungsanlage umfasst. Alle Prozessanlagen waren zu diesem Zeitpunkt nicht in Betrieb. Aus ungeklärten Gründen versagte die Notstromversorgung. Die Anlage war 15 Stunden lang ohne Strom, so dass auch die Lüftungssysteme nicht mehr arbeiteten. Das gesamte Betriebspersonal musste die Anlage räumen. Während des Stromausfalls kam es zu keiner erhöhten Aktivitätsfreisetzung in der Anlage. Als Ereignisursachen werden Unachtsamkeit und mangelhafte Planung angenommen.

Beim zweiten Vorkommnis kam es in der französischen Brennelementefabrik Romans durch einen Fehler in der Stromversorgung zum Ausfall des Lüftungssystems. In der Folge startete auch das Notlüftungssystem nicht. Ein manuell ausgelöster Alarm wurde nicht registriert, so dass die Anlage mehr als 4 Stunden ohne funktionsfähiges

Lüftungssystem betrieben wurde. In dieser Zeit hätten sich radioaktive Stoffe ungehindert ausbreiten können.

7.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 299 durch Ausfälle verursachten Vorkommnissen in inländischen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Knapp 86 % aller ausländischen Vorkommnisse ereigneten sich in Anreicherungsanlagen, Brennelementfabriken, Forschungszentren und Wiederaufarbeitungsanlagen, wobei diese vier Anlagentypen fast gleichhäufig vertreten sind. Fast 57 % aller deutschen Vorkommnisse ereigneten sich in Brennelementfabriken, mit großem Abstand gefolgt von Zwischenlagern (ca. 20 %). Die übrigen Anlagentypen sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung.

Bei mehr als 54 % aller ausfallbedingten Vorkommnisse wird „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ als Ursache ausgemacht. Mit abnehmenden relativen Häufigkeiten folgen die Kategorien „*Äußere Einwirkungen*“, „*Auslegungsmängel*“ und „*Menschliches Fehlverhalten*“. Die Kategorien „*Nicht klassifizierbar*“ und „*Organisatorische Mängel*“ sind nur von untergeordneter Bedeutung. Auch bei den deutschen Vorkommnissen dominiert „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“, mit einigem Abstand gefolgt von „*Menschlichem Fehlverhalten*“.

Die Aufschlüsselung der Ursachen nach Anlagentypen zeigt, dass die für alle Anlagentypen dominante Ursache für das Auftreten ausfallbedingter Vorkommnisse die Kategorie „*Komponenten- oder Bauteilversagen, Verschleiß*“ ist.

Die am häufigsten von Ausfällen betroffenen Klassen von Systemen und Komponenten – sowohl in deutschen als auch in ausländischen Anlagen – sind elektrische Einrichtungen und Lüftungssysteme.

86 % aller ausfallbedingten Vorkommnisse – sowohl in ausländischen als auch in deutschen Anlagen – hatten „*Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen*“. Die übrigen Kategorien sind von untergeordneter Bedeutung.

Für etwa 12 % der erfassten Ereignisse liegt keine Einstufung nach den Kriterien der internationalen Bewertungsskala INES vor. Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Ereignisse, ergibt sich ein differenziertes Bild: Sämtlichen Vorkommnissen in deutschen Anlagen wurde die niedrigste INES-Stufe 0 zugeordnet. In ausländischen Anlagen wurden ca. 57 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 1 und ca. 42 % mit INES-Stufe 0 bewertet. Lediglich zwei Ereignisse in ausländischen Anlagen wurden mit INES-Stufe 2 (Störfall) bewertet.

8 Einwirkungen von außen (EVA)

In den Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung wird von den zuständigen Behörden und deren Sachverständigen nicht nur die sichere Beherrschung anlageninterner Auslegungstörfälle geprüft, sondern auch die Absicherung gegen Gefahren durch äußere Einwirkungen. Letztere können natürlichen oder zivilisatorischen Ursprungs sein und entziehen sich der Kontrolle des Anlagenbetreibers. Zum Schutz gegen äußere Einwirkungen sind bei der Auslegung der Anlage standortspezifische Lastannahmen zugrunde zu legen, die dem individuellen Gefahrenpotential Rechnung tragen.

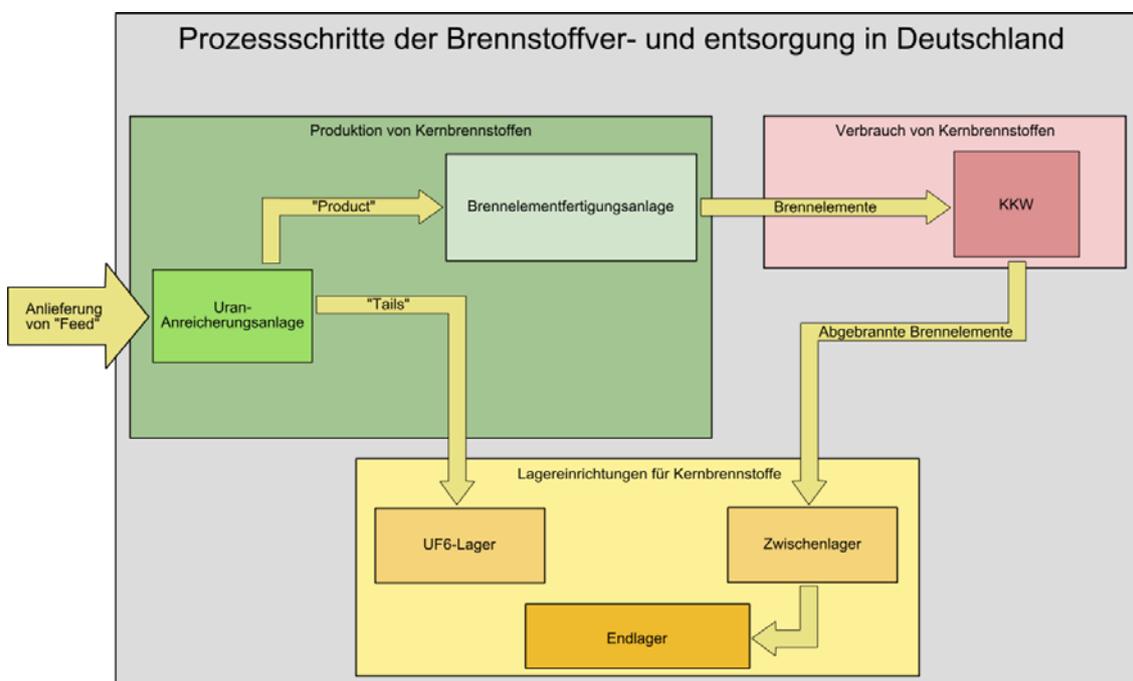


Abb. 8.1 Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. Alle Bereiche können durch Einwirkungen von außen betroffen sein.

Als potentiell verheerendste zivilisatorische Einwirkungen von außen gelten unfallbedingte oder terroristische Flugzeugabstürze auf die Anlage sowie Explosionen mit Druckwellen, z. B. von Treibstoff- oder Gefahrguttransporten (auf dem Straßen-, Schienen-, Wasser- oder Luftweg), Treibstofflagern oder Chemikalien in unmittelbarer Nähe der Anlage.

Zu den natürlichen Einwirkungen von außen, die ein enormes Gefahrenpotential in sich bergen können, gehören Erdbeben und Vulkanausbrüche sowie Extremwetterereignisse wie z. B. Wirbelstürme, Hochwasser und Gewitter.

8.1 Meldekriterien für deutsche Anlagen

In der bundesdeutschen Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) /BMU 18/ werden in Anlage 2 (Anlagen der Kernbrennstoffversorgung und -entsorgung mit Genehmigung nach § 7 AtG), Abschnitt 3.1 „Einwirkungen von außen“, nachfolgende Meldekriterien definiert:

- **S 3.1.1** Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle oder sonstige Einwirkung von außen, so dass ein Anlagenzustand eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umgebung auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.1.1** Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle oder sonstige Einwirkung von außen, sofern der Betrieb der Anlage oder der Teilanlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann.
- **N 3.1.1** Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle oder sonstige Einwirkung von außen, sofern die Anlage hiervon betroffen und dies nicht von den Kriterien S 3.1.1 oder E 3.1.1 erfasst ist.

Bei der Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 AtG (siehe Anlage 5 AtSMV) lauten die Meldekriterien im Abschnitt 3.1 „Einwirkungen von außen“ analog:

- **S 3.1.1** Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle oder sonstige Einwirkung von außen, so dass ein Zustand der Einrichtung eingetreten ist, der sich gefahrbringend auf die Bevölkerung oder die Umgebung auswirkt oder bei dem dies zu besorgen ist.
- **E 3.1.1** Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle oder sonstige Einwirkung von außen, sofern die Aufbewahrung nach § 6 AtG nur mit einer zusätzlichen, bisher nicht in den Betriebsvorschriften festgelegten Maßnahme fortgeführt werden kann.

8.2 Datenbasis

Die folgende Auswertung von Vorkommnissen im Zusammenhang mit Einwirkungen von außen (EVA) stützt sich auf insgesamt 68 Ereignisse in inländischen und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 /BUN 18/, /MES 91/.

Abb. 8.2 gibt die zeitliche Verteilung der in der Datenbank erfassten, durch Einwirkungen von außen verursachten Vorkommnissen im In- und Ausland wieder.

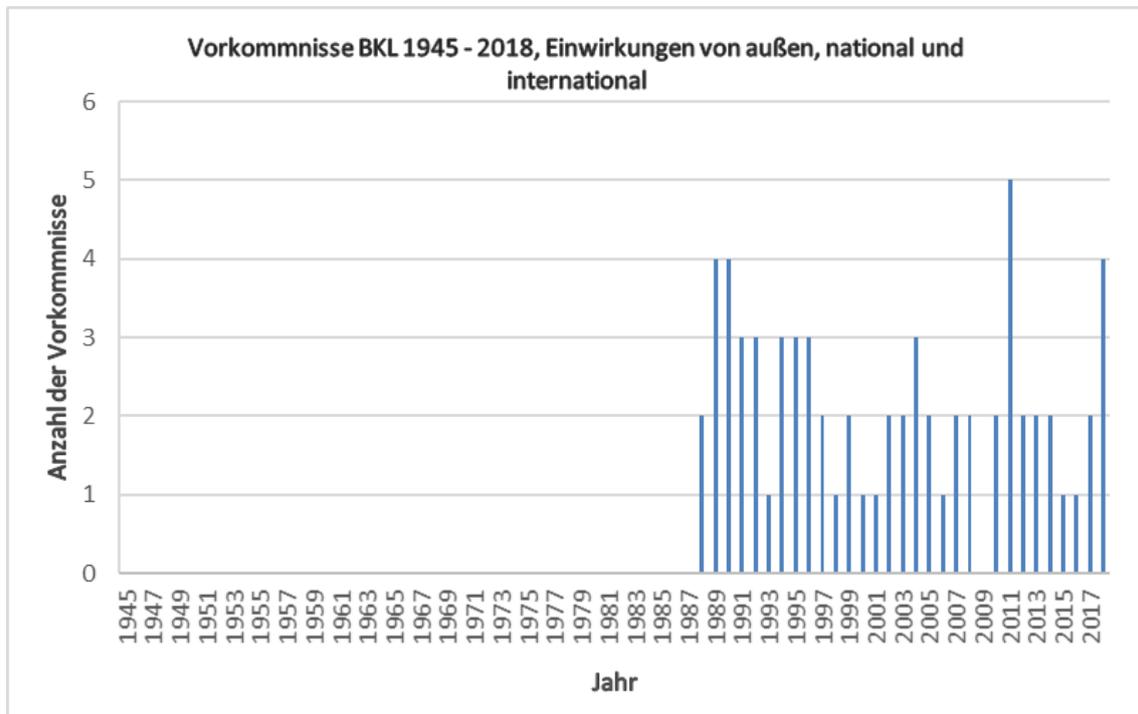


Abb. 8.2 Chronologische Aufschlüsselung der EVA-Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr

Im zeitlichen Verlauf sind registrierte Ereignisse erst ab dem Jahr 1988 zu erkennen. Eine plausible Erklärung für diesen Sachverhalt ist nicht erkennbar. Vor 1988 wurde kein einziges Ereignis gemeldet. Beginnend mit dem Jahr 1988 schwankt die Zahl der jährlich registrierten EVA-Ereignisse im Intervall zwischen 0 (2009) und 5 (2011).

Tab. 8.1 Verteilung der in VIBS erfassten, durch äußere Einwirkungen ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland

Anlagentyp	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anreicherungsanlagen	1	5,6	7	14,0	8	11,8
Brennelementfabriken	14	77,8	12	24,0	26	38,2
Forschungszentren	2	11,1	13	26,0	15	22,1
Konversionsanlagen	0	0,0	4	8,0	4	5,9
Sonstige Anlagen	0	0,0	4	8,0	4	5,9
Zwischen- und Endlager, Uranminen, Produktionsanlagen	1	5,6	9	18,0	10	14,7
Wiederaufarbeitungsanlagen	0	0,0	1	2,0	1	1,5
Summe	18	100	50	100	68	100

Tab. 8.1 gibt die Verteilung der EVA-Vorkommnisse auf die einzelnen Anlagentypen des Kernbrennstoffkreislaufs sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten wieder. Von den insgesamt 68 erfassten Vorkommnissen ereigneten sich 50 in ausländischen und 18 in deutschen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Für die meisten Anlagentypen sind die Fallzahlen sehr gering. Im Falle deutscher Anlagen waren Brennelementfabriken am häufigsten betroffen. Im Falle ausländischer Anlagen waren Brennelementfabriken und Forschungszentren am häufigsten betroffen, gefolgt von Anreicherungsanlagen sowie der zusammengefassten Kategorie der Zwischen- und Endlager, Uranminen und Produktionsanlagen.

8.3 Ursachen

Jedes der 68 untersuchten EVA-Vorkommnisse stellt im Prinzip ein singuläres Ereignis mit seiner eigenen Fallgeschichte dar. Die Vorkommnis-auslösenden Einwirkungen von außen können jedoch wie folgt kategorisiert werden:

- **Anlagenexterner Brand:** Breiten sich Brände – auch Flächenbrände – mit äußerer Entstehungsursache unkontrolliert in die unmittelbare Nachbarschaft einer Anlage aus, können sie den Anlagenbetrieb signifikant beeinträchtigen.
- **Erdbeben:** Erdbeben können – auch wenn ihr Epizentrum weit vom Anlagenstandort entfernt ist – durch die von ihnen ausgelösten seismischen Wellen das Versagen sicherheitsrelevanter Einrichtungen, Systeme oder Komponenten

verursachen. Man unterscheidet hierbei Raumwellen (P-Wellen, S-Wellen) und Oberflächenwellen. Sogenannte P-Wellen oder *Primärwellen* schwingen in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwelle); sie führen zur Kompression des Ausbreitungsmediums und können sich in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen ausbreiten. Sogenannte S-Wellen oder *Sekundärwellen* schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwelle); sie führen zur Verscherung des Ausbreitungsmediums und können sich in Festkörpern ausbreiten, nicht jedoch in Flüssigkeiten oder Gasen, da letztere keinen nennenswerten Scherwiderstand besitzen. *Oberflächenwellen* entstehen dadurch, dass P- oder S-Wellen in die Erdoberfläche hinein gebrochen werden. Sie schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, wobei die Schwingungsamplituden mit der Tiefe abnehmen. Die Energie der Oberflächenwellen nimmt mit zunehmender Entfernung r vom Epizentrum um den Faktor $1/r$ ab, die der Raumwellen um den Faktor $1/r^2$ (jeweils unter Vernachlässigung der Dämpfung).

- **Frost / Schnee:** Extremer Frost und starker Schneefall können zur Beschädigung von Einrichtungen auf dem Anlagengelände (z. B. Bruch von Rohrleitungen, mechanische Überlastung von Gebäudedächern) sowie zu Schwierigkeiten bei der Medienversorgung (z. B. Einfrieren von Kühlwasserleitungen) führen.
- **Gewitter:** Die starken elektromagnetischen Entladungen von Gewittern können sowohl durch ihre Nahwirkung (Ausfall sicherheitsrelevanter Systeme nach direktem Blitzeinschlag) als auch durch ihre Fernwirkung (Zusammenbruch der externen Spannungsversorgung) den Anlagenbetrieb erheblich gefährden.
- **Sturm:** Ein schwerer Sturm, ein Wirbelsturm oder ein Tornado kann z. B. in der Beschädigung von Gebäudedächern oder Stromversorgungsleitungen resultieren. Neben einer direkten Gefährdung der Anlagensicherheit können bereits Sturmwarnungen durch die Kette an Sicherheitsvorkehrungen, die sie auslösen, zu empfindlichen Beeinträchtigungen des Anlagenbetriebs bis hin zur vorbeugenden Anlagenabschaltung führen.
- **Überflutung:** Langanhaltender Starkregen oder ein durch ein starkes Erdbeben ausgelöster Tsunami können den Anlagenbetrieb durch direkte Einwirkung (z. B. Ausfall sicherheitsrelevanter Systeme durch Überflutung oder Wassereintrich in Anlagengebäude) zum Erliegen bringen oder erheblich beeinträchtigen.
- **Sonstige Faktoren:** Hierzu zählen auslösende Faktoren, die nicht in die bereits aufgelisteten Kategorien fallen und aufgrund ihrer geringen Eintrittshäufigkeiten auch

keine eigene Kategorie rechtfertigen (z. B. Ausfall der Luft-, Wasser- und Dampfversorgung durch einen ins Prozessgebäude eindringenden Tankcluster nach dem Riss des Druckluftschlauches der Bremsanlage – Wiederaufarbeitungsanlage West Valley, USA, 29.08.1966).

Tab. 8.2 Auslösende Faktoren für das Auftreten von EVA-Vorkommnissen im In- und Ausland

Ursache	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Anlagenexterner Brand	0	0,0	4	8,0	4	5,9
Erdbeben	0	0,0	2	4,0	2	2,9
Vulkanausbruch	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Frost / Schnee	0	0,0	4	8,0	4	5,9
Gewitter	10	68,2	17	34,0	27	39,7
Sturm	2	9,1	7	14,0	9	13,2
Überflutung	6	22,7	8	16,0	14	21,9
Sonstige Faktoren	0	0,0	8	16,0	8	11,8
Summe	18	100,0	50	100,0	68	100,0

In Tab. 8.2 sind die absoluten und relativen Häufigkeiten aller in deutschen und ausländischen Anlagen erfassten EVA-Vorkommnisse nach den auslösenden Faktoren aufgeschlüsselt. Der für deutsche Anlagen klar dominierende Faktor sind „*Gewitter*“ (10); in einigen Fällen sind „*Überflutung*“ (6) und „*Sturm*“ (2) Vorkommnis-relevant. Auch für ausländische Anlagen stellen „*Gewitter*“ den mit Abstand häufigsten auslösenden Faktor dar.

In Tab. 8.3 werden die auslösenden Faktoren für alle EVA-Vorkommnisse nach Anlagentypen aufgeschlüsselt.

Für fast alle Anlagentypen – ausgenommen Brennelementfabriken und Forschungszentren – ist die Aussagekraft der Tabelle wegen der geringen Zahl der erfassten Vorkommnisse stark eingeschränkt.

Tab. 8.3 Aufschlüsselung der auslösenden Faktoren für das Auftreten von EVA-Vorkommnissen nach Anlagentypen

Ursache	AN	BE	FO	KO	PR	SO	WA
Anzahl Vorkommnisse	8	26	15	4	10	4	1
	%	%	%	%	%	%	%
Anlagenexterner Brand	0,0	0,0	6,7	25,0	20,0	0,0	0,0
Erdbeben	12,5	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Vulkanausbruch	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Frost / Schnee	12,5	0,0	13,3	0,0	10,0	0,0	0,0
Gewitter	12,5	57,7	53,3	0,0	20,0	25,0	0,0
Sturm	37,5	11,5	0,0	25,0	20,0	0,0	0,0
Überflutung	25,0	23,1	13,3	25,0	10,0	50,0	0,0
Sonstige Faktoren	0,0	7,7	6,7	25,0	20,0	25,0	100,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Für die statistisch ausreichend besetzten Anlagentypen – Brennelementfabriken und Forschungszentren – sind „Gewitter“ jeweils die häufigste Eintrittsursache für Vorkommnisse, die im Zusammenhang mit äußeren Einwirkungen stehen.

8.4 Radiologische Auswirkungen

Die radiologischen Auswirkungen der erfassten EVA-Ereignisse sind als sehr gering zu bezeichnen. Bei 65 von 68 Vorkommnissen (96 %) wurden „Keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen“ registriert.

Lediglich ein Vorkommnis führte zu einer ‘Personenkontamination’ (Kontamination der Kleidung von Betriebspersonal durch Radongas, welches aus Lagersilos mit radioaktiven Abfällen aus der Uranverarbeitung entwich und sich infolge einer Inversionswetterlage in der Nähe des Erdbodens ansammelte – Uranverarbeitungsanlage Fernald, USA, 12.02.1991). Ein Vorkommnis resultierte in einer „Sachkontamination“ (Wasserleckage in einem Labor infolge eines Rohrleitungsbruchs durch Frost – Forschungszentrum Vinča, Serbien, 20.02.2012) und in einem Fall gab es „Freisetzungen bzw. Ableitungen in die Umwelt“ (Leckage kontaminierter Abfälle nach heftigen Regenfällen – Sonstige Anlage Port Granby, Kanada, 23.06.2017).

8.5 **Aufschlüsselung nach INES**

Wie bereits in Kapitel 8.4 dargelegt, sind die radiologischen Auswirkungen der erfassten EVA-Ereignisse in ihrer Gesamtheit relativ unbedeutend. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der Bewertung der Vorkommnisse nach INES wieder.

In Tab. 8.4 ist für die durch äußere Einwirkungen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen die Einstufung nach den Bewertungsmaßstäben der INES-Skala – sowohl in absoluten als auch in relativen Häufigkeiten – angegeben.

Tab. 8.4 Zuordnung der EVA-Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen

Bewertung	Inland		Ausland		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
INES = 0	8	44,4	29	58,0	37	54,4
INES = 1	1	5,6	16	32,0	17	25,0
Keine Einstufung	9	50,0	5	10,0	14	20,6
Summe	18	100,0	50	100,0	68	100,0

Gemäß Tab. 8.4 liegt für ein Fünftel aller durch äußere Einwirkungen ausgelösten Vorkommnisse keine INES-Einstufung vor (deutsche Anlagen: 50 %, ausländische Anlagen: 18 %); dies betrifft zum weit überwiegenden Teil Vorkommnisse, die sich vor der offiziellen Anwendung der Bewertungsmaßstäbe der INES-Skala ereigneten.

Betrachtet man nur die Teilmenge der INES-eingestuften Ereignisse, ergibt sich folgende Bilanz:

- In deutschen Anlagen wurden 89 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und 11 % mit INES-Stufe 1 bewertet.
- In ausländischen Anlagen wurden 64 % der Vorkommnisse mit INES-Stufe 0 und 36 % mit INES-Stufe 1 bewertet.
- Keines der erfassten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen wurde mit INES-Stufe > 1 bewertet.

8.6 Zusammenfassung

Die Auswertung von 68 durch äußere Einwirkungen verursachten Vorkommnissen in in- und ausländischen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs im Zeitraum von Januar 1945 bis November 2018 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die meisten EVA-Vorkommnisse in deutschen Anlagen ereigneten sich in Brennelementfabriken. Bei den ausländischen Anlagen wurden die meisten Vorkommnisse in Brennelementfabriken und Forschungszentren registriert.

Die wichtigsten auslösenden Faktoren für die Gesamtheit der erfassten EVA-Ereignisse stellen „Gewitter“, „Überflutungen“ und „Stürme“ dar. Einen für alle Anlagentypen dominanten auslösenden Faktor gibt es nicht.

Fast alle untersuchten Vorkommnisse hatten keine oder vernachlässigbare radiologische Auswirkungen. Es sind nur eine Sachkontaminationen, eine Personenkontamination und eine Ableitung in die Umwelt bekannt geworden.

Die meisten der INES-eingestuften Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen wurden mit INES-Stufe 0, die übrigen mit INES-Stufe 1 bewertet. Höhere INES-Einstufungen gibt es in dieser Kategorie an Vorkommnissen nicht.

Literaturverzeichnis

- /BMU 18/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen, Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung - AtSMV. vom 14. Oktober 1992 (BGBl. I S. 1766), zuletzt geändert durch Artikel 18 der Verordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034), 29. November 2018.
- /BUN 17/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) (AtG) in der Fassung von 23.12.1959, Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist., zuletzt geändert 27. Juni 2017.
- /BUN 18/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Datenbank VIBS – Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. 2018.
- /GRS 15/ GRS: Handbuch zur Kritikalität, Band 1: Kritikalität und nukleare Sicherheit. (GRS) gGmbH, GRS-379 (ISBN 978-3-944161-60-0): Garching b. München, April 2015.
- /GRS 19/ Sommer, F.: Handbuch zur Störfallanalyse von nuklearen Ver- und Entsorgungseinrichtungen, Teil A - Grundlagen der Störfallanalyse. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-507, ISBN 978-3-946607-92-2, April 2019.
- /IAE 99/ IAEA - International Atomic Energy Agency: Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan. IAEA-TOAC, November 1999.
- /IAE 09/ IAEA - International Atomic Energy Agency: INES – The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's Manual, 2008 Edition. Mai 2009.

- /KOT 94/ Kotthoff, K.: Internationale Bewertungsskala für bedeutsame Ereignisse in kerntechnischen Einrichtungen. Benutzerhandbuch. (GRS) gGmbH, GRS-111 (ISBN 3-923875-61-1), Juni 1994.
- /MCL 00/ McLaughlin, T. P., Frolov, V. V., et al.: A Review of Criticality Accidents, 2000 Revision. Los Alamos National Laboratory, USA, Report No. LA-13638, 2000.
- /MES 91/ Mester, W., Siegmund, K.: VIBS – Eine Datenbank für besondere Vorkommnisse in Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Hrsg.: (GRS) gGmbH, GRS-A-1781, Mai 1991.
- /STRL 18/ Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) (Ersetzt V 751-1-8 v. 20.7.2001 I 1714; 2002 I 1459 (StrlSchV 2001)) in der Fassung vom 29. November 2018 (Nr. BGBl. I S. 2034, 2036).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es potentiell zu Lastabstürzen kommen	7
Abb. 2.2	Chronologische Aufschlüsselung der durch Abstürze von Lasten verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	9
Abb. 3.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Leckagen und Freisetzungen kommen	17
Abb. 3.2	Chronologische Aufschlüsselung der durch Freisetzungen verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	21
Abb. 3.3	Chronologische Aufschlüsselung der durch Leckagen verursachten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	21
Abb. 4.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Bränden kommen	37
Abb. 4.2	Chronologische Aufschlüsselung der durch Brände induzierten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	40
Abb. 5.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu Explosionen bzw. Verpuffungen kommen	49
Abb. 5.2	Chronologische Aufschlüsselung der explosionsbedingten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	51
Abb. 6.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In den hervorgehobenen Bereichen kann es zu kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen kommen	62
Abb. 6.2	Chronologische Aufschlüsselung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	63
Abb. 7.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. In allen Bereichen kann es zu Ausfällen von Systemen und Komponenten kommen	77
Abb. 7.2	Chronologische Aufschlüsselung der durch Ausfälle induzierten Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	82

Abb. 8.1	Übersicht der Prozessschritte und Anlagentypen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland. Alle Bereiche können durch Einwirkungen von außen betroffen sein.	91
Abb. 8.2	Chronologische Aufschlüsselung der EVA-Vorkommnisse im In- und Ausland auf das Ereignisjahr	93

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Verteilung der in VIBS erfassten, durch Lastabstürze ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	10
Tab. 2.2	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Lastabstürze zurückgeführt werden können.....	11
Tab. 2.3	Aufschlüsselung der Ursachen für die durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen.....	12
Tab. 2.4	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen.....	13
Tab. 2.5	Zuordnung der durch Lastabstürze ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	14
Tab. 3.1	Verteilung der durch Freisetzungen verursachten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland.....	22
Tab. 3.2	Verteilung der durch Leckagen verursachten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	23
Tab. 3.3	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Freisetzungen zurückgeführt werden können.....	24
Tab. 3.4	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Leckagen zurückgeführt werden können.....	24
Tab. 3.5	Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von Freisetzungen nach Anlagentypen	25
Tab. 3.6	Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von Leckagen nach Anlagentypen.....	26
Tab. 3.7	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen.....	27
Tab. 3.8	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen	28
Tab. 3.9	Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen	30

Tab. 3.10	Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen	30
Tab. 3.11	Zuordnung der durch Freisetzungen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	31
Tab. 3.12	Zuordnung der durch Leckagen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	32
Tab. 4.1	Verteilung der in VIBS erfassten, durch Brände ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	41
Tab. 4.2	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Brände zurückgeführt werden können.....	41
Tab. 4.3	Aufschlüsselung der Ursachen für brandbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen	42
Tab. 4.4	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen	43
Tab. 4.5	Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen.....	44
Tab. 4.6	Zuordnung der durch Brände ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	45
Tab. 5.1	Verteilung der in VIBS erfassten, durch Explosionen ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	52
Tab. 5.2	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Explosionen zurückgeführt werden können.....	53
Tab. 5.3	Aufschlüsselung der Ursachen für explosionsbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen.....	54
Tab. 5.4	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen.....	55
Tab. 5.5	Aufschlüsselung der radiologischen Auswirkungen der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse nach Anlagentypen.....	56
Tab. 5.6	Zuordnung der durch Explosionen ausgelösten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	57
Tab. 6.1	Verteilung der kritikalitätsrelevanten VIBS-Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	64

Tab. 6.2	Ursachen für das Auftreten von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen im In- und Ausland.....	65
Tab. 6.3	Aufschlüsselung der Ursachen für das Auftreten von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach Anlagentypen.....	66
Tab. 6.4	Klassifizierung von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach ihren radiologischen Auswirkungen	67
Tab. 6.5	Zuordnung der kritikalitätsrelevanten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	68
Tab. 6.6	Aufschlüsselung der INES-Einstufung von kritikalitätsrelevanten Vorkommnissen nach Anlagentypen.....	69
Tab. 7.1	Verteilung der in VIBS erfassten, durch Ausfälle ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	82
Tab. 7.2	Ursachen für das Auftreten von in- und ausländischen Vorkommnissen, die auf Ausfälle zurückgeführt werden können	83
Tab. 7.3	Aufschlüsselung der Ursachen für ausfallbedingte Vorkommnisse nach Anlagentypen	84
Tab. 7.4	Auflistung der von den Ausfällen betroffenen Systemen und Komponenten sowie ihrer relativen Häufigkeiten an den erfassten Vorkommnissen im In- und Ausland.....	86
Tab. 7.5	Klassifizierung der radiologischen Auswirkungen der durch Ausfälle von Systemen und Komponenten ausgelösten Vorkommnisse in deutschen und ausländischen Anlagen.....	87
Tab. 7.6	Zuordnung der durch Ausfälle verursachten Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen.....	88
Tab. 8.1	Verteilung der in VIBS erfassten, durch äußere Einwirkungen ausgelösten Ereignisse auf die einzelnen Anlagentypen im In- und Ausland	94
Tab. 8.2	Auslösende Faktoren für das Auftreten von EVA-Vorkommnissen im In- und Ausland	96
Tab. 8.3	Aufschlüsselung der auslösenden Faktoren für das Auftreten von EVA-Vorkommnissen nach Anlagentypen	97
Tab. 8.4	Zuordnung der EVA-Vorkommnisse auf die einzelnen INES-Stufen	98

**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