

**Forschung zur
Untersuchung des
Weiterentwicklungsbedarfs
der Blitzschutzauslegung
von Kernkraftwerken**

Forschung zur Untersuchung des Weiterentwicklungsbedarfs der Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken

Henriette Gatz
Oliver Rest
Dagmar Sommer
Jan Stiller

Juni 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4719R01373 durchgeführt.

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

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

Deskriptoren

Blitzschutz, Blitzschutzanforderung, Blitzschutzauslegung, Blitzschutzklasse, Blitzstrom, Gewitter, KTA 2206, SPD, Überspannung, Überspannungsschutz

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht umfasst Ergebnisse, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz geförderten Forschungsvorhabens „Forschung zur Untersuchung des Weiterentwicklungsbedarfs der Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken“ (Forschungskennzahl 4719R01373) erarbeitet wurden. Die Zielsetzung dieses Vorhabens lag darin zu erforschen, ob das kern-technische Regelwerk in Bezug auf die Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken Überarbeitungsbedarf aufweist. Zu diesem Zweck wurden die theoretischen Grundlagen zu Blitzen und deren Entstehung, das bestehende Regelwerk in Bezug auf die Blitzschutz- auslegung von Kernkraftwerken sowie die der GRS vorliegenden Informationen zur Be- triebserfahrung von in- und ausländischen Kernkraftwerken betrachtet. Einen weiteren Bestandteil dieser Arbeiten stellen Analysen von Daten von in Deutschland und an deut- schen Kernkraftwerkstandorten indirekt gemessenen, d. h. aus gemessenen Feldstär- ken berechneten, Blitzscheitelströmen und der Beziehung zwischen tatsächlich aufge- tretenen und berechneten Blitzströmen, dar. Mithilfe dieser Daten werden die Unsicherheiten bezüglich der Einhaltung der in der Regel 2206 des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) für die Auslegung von Kernkraftwerken angegebenen Stromschei- telwerte¹ bestimmt.

Abstract

This report contains the results of a research project funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (Research code 4719R01373). The objective of this project was to investigate whether there is a need for revision of the nuclear rules and regulations with regard to the lightning protection design of nuclear power plants. For this purpose, the theoretical fundamentals of lightning and its occurrence, the rules and regulations with regard to the lightning protection design of nuclear power plants as well as the information available to GRS on the operating experience of domestic and foreign nuclear power plants were considered. Another part of this work is the analysis of data of lightning peak currents indirectly measured, i.e., calculated from measured field strengths in Germany in general, as well as at specific German nuclear power plant sites.

¹ Der Begriff „Scheitelwert“ bezeichnet bei einem Wechsel-Signal den größten Betrag des Augenblickwertes.

Additionally, data regarding the relationship between measured and calculated lightning currents are included in this research. By analyzing these data, the uncertainties regarding the compliance with the current peak values specified in the Nuclear Safety Standards Commissions (in German: "Kerntechnischer Ausschuss" [KTA]) KTA Rule 2206 for the design are determined.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract.....	I
1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen der Blitzforschung	3
2.1	Entstehung und Eigenschaften von Blitzen.....	3
2.2	Methoden der Blitzscheitelstrombestimmung.....	8
2.2.1	Direkte Strommessung.....	8
2.2.2	Blitzortung	10
3	Blitzschutzmaßnahmen	15
3.1.1	Innerer und äußerer Blitzschutz	15
3.1.2	Überspannungsschutzgeräte	17
3.2	Schutzvorrichtungen gegen den Eintrag von Störungen aus dem Übertragungsnetz.....	21
3.3	Blitzschutzanforderungen für kerntechnische Anlagen	27
3.3.1	„Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf).....	27
3.3.2	KTA 2206 – „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“	28
3.3.3	DIN-Normen zum Thema Blitzschutz	39
3.3.4	SSG-34 „Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants“	48
3.3.5	Blitzschutzanforderungen kerntechnische Anlagen in der Schweiz.....	51
3.3.6	Anforderungen an Kernkraftwerke bezüglich des netzseitigen Eintrags von Überspannungen.....	54
4	Betriebserfahrung	59
4.1	Ereignisse in deutschen Anlagen	59
4.1.1	Einschlag (vermutlich) auf dem Anlagengelände.....	60
4.1.2	Einschlag außerhalb des Anlagengeländes	65

4.1.3	Sonstige Ereignisse	66
4.2	Ereignisse in ausländischen Anlagen	69
5	Auswertungen und Analysen.....	79
5.1	Probabilistische Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Einwirkungen von außen.....	79
5.2	Berechnung der Rate auslegungsüberschreitender Blitzsicherheitstromstärken und dazu verwendete Daten und Informationen	80
5.2.1	Abweichungen bei der indirekten Bestimmung der Stromsicherheitswerte aus den gemessenen Feldstärken	84
5.2.2	Auslegungsstromsicherheitswert	84
5.2.3	BLIDS-Daten Deutschland	84
5.2.4	Blitzrate am Anlagenstandort	85
5.2.5	DIN EN 62305-2.....	88
5.2.6	BLIDS-Daten Umkreis um Anlagenstandorte.....	88
5.2.7	Effektivität der Blitzerkennung und Klassifikation in BLIDS	89
5.2.8	Einfangfläche	89
5.2.9	Informationen über Anlagengebäude und -gelände	99
5.2.10	Maximalwert der Blitzstromstärke	99
5.2.11	Ortsabhängigkeit der Verteilung der Stromsicherheitswerte	101
5.2.12	Rate auslegungsüberschreitender Blitze	106
5.2.13	Stromsicherheitswertbezogene Rate pro Fläche am Anlagenort.....	108
5.2.14	Vergleichsdaten Stromsicherheitswerte direkt/indirekt gemessen	108
5.2.15	Verteilung der indirekt gemessenen Stromsicherheitswerte in Deutschland	118
5.2.16	Verteilung der Stromsicherheitswerte am Anlagenort.....	121
5.2.17	Verteilung der Stromsicherheitswerte in Deutschland.....	121
5.3	Ergebnisse	122
5.3.1	Generische Ergebnisse.....	122
5.3.2	Anlagenspezifische Ergebnisse	125
5.4	Einordnung der Ergebnisse.....	128
6	Zusammenfassung	129

	Literaturverzeichnis	131
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	141
A	Anhang	143
A.1	Berechnung der Einfangfläche des Reaktorgebäudes nach DIN EN 62305-2	143
A.2	Berechnung von scheinbarstromabhängigen Einfangflächen mit dem elektro-geometrischen Modell	144
B	Anhang	147
B.1	Ordnung nach Messdatum und -zeitpunkt	147
B.2	Zufällige Ordnung.....	150

1 Einleitung

Blitze stellen ein imposantes Naturschauspiel dar, bei dem innerhalb eines kurzen Zeitraums eine Funkenentladung erfolgt oder ein Lichtbogen entsteht, in dem große elektrische Ströme fließen. Während dieser „atmosphärischen Kurzschlüsse“ entladen sich hohe Spannungen, was als helles Leuchten sichtbar ist. Aufgrund dieser hohen Spannungen und großen Ströme können die Auswirkungen von Blitzschlägen eine ernstzunehmende Gefahr darstellen. Dies betrifft sowohl Lebewesen als auch Sachgüter wie beispielsweise bauliche Anlagen und elektronische Geräte. So wurden beispielsweise im Jahr 2019 über 200.000 durch Blitze verursachte Schäden gemeldet /GDV 22/. Mit Hilfe von Blitzschutzanlagen lassen sich die schädlichen Auswirkungen, die durch Blitzauswirkungen in einem zu schützenden Objekt verursacht werden können, verhindern oder verringern. Dies dient dem Personen- und Brandschutz sowie dem Schutz vor wirtschaftlichen Schäden /OBO 19/. In Deutschland existieren zu diesem Zweck verschiedene Normen, die sich mit der technischen Ausführung der notwendigen Schutzmaßnahmen befassen /OBO 19/. Auch für Kernkraftwerke ist die Auslegung gegen Blitzeinwirkungen ein elementarer Teil ihres Schutzes vor unzulässigen Beeinträchtigungen durch naturbedingte Einwirkungen.

Eine zentrale Aufgabe der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) ist die Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie die Entwicklung neuer Methoden auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit, um den hohen Sicherheitsstand deutscher Kernkraftwerke weiter zu verbessern. Sie liefert durch wissenschaftlich abgesicherte Analysen und Bewertungen einen Beitrag, um den Stand von Wissenschaft und Technik weiterzuentwickeln sowie laut § 1 Abs. 2 AtG.² „[...] Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen [...]“ /BUN 22/. Forschung und Entwicklung gehören zu den Grundvoraussetzungen für die ständige Verbesserung der Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen. Der sichere Betrieb der deutschen Kernkraftwerke erfordert deshalb eine kontinuierliche, an sicherheitstechnischen Zielen ausgerichtete, qualitativ hochwertige und effiziente Reaktorsicherheitsforschung, die sich an internationalen Maßstäben orientiert und diese setzt. Daher gehört zu den grundlegenden Zielen der GRS, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht nur zu kennen und jederzeit darstellen zu können, sondern auch die

² „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ (sogen. „Atomgesetz“, kurz AtG)

Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) aktiv zu betreiben. Hierzu gehören auch Untersuchungen, ob potenzieller Weiterentwicklungsbedarf des kerntechnischen Regelwerkes erkannt werden kann.

In dem hier vorliegenden Bericht wird die Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken umfassend betrachtet. Zu diesem Zweck werden zunächst die Grundlagen der Blitzforschung erläutert, um aufbauend auf diesem Wissen die Grundlagen der Blitzschutzauslegung darzustellen. Anschließend werden die Anforderungen an die Blitzschutzauslegung kerntechnischer Anlagen betrachtet. Des Weiteren wird eine Auswertung der GRS vorliegenden Informationen zur Betriebserfahrung von in- und ausländischen kerntechnischen Anlagen mit Blitzeinwirkungen dargestellt. Abschließend werden ausführliche Auswertungen und Analysen zu Blitzstatistiken durchgeführt.

In Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt gilt unserer Dank Dr. Gerhard Dendorfer vom Austrian Lightning and Detection System ALDIS für die Bereitstellung eines Datensatzes der von ihm mitverfassten Paper /BIR 17/ und /SCH 16/, sowie Prof. Stephan Pack und Dr. Lucas Schwalt der Technischen Universität Graz für den regen Erfahrungsaustausch. Zudem danken wir besonders dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) für die Förderung des Projektes und die anregenden Diskussionen.

2 Grundlagen der Blitzforschung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zur Entstehung und zu den Eigenschaften von Blitzen und zu verschiedenen Methoden der Blitzsichelstrombestimmung dargelegt.

2.1 Entstehung und Eigenschaften von Blitzen

Blitze stellen ein natürliches Phänomen dar, das sich auch künstlich im Labor erzeugen lässt. In der Natur entstehen sie innerhalb von Gewitterwolken durch eine Ansammlung von Raumladungen. Diese Raumladungen entstehen durch die Bewegung von Eiskristallen, Graupelteilchen und/oder Wassertropfen in den Wolken. Die schwereren Graupelteilchen sinken zu Boden und kollidieren mit leichteren Eiskristallen, die sich aufwärtsbewegen. Während dieser Kollisionen laden sich die Eiskristalle im Allgemeinen positiv und die Graupelteilchen negativ auf. Dies führt zu einer Ansammlung von positiven Ladungen im oberen Teil der Wolke, sowie von negativen Ladungen im unteren Teil der Wolke. Die physikalischen Vorgänge zur Blitzauslösung sind bis heute nicht vollständig erforscht. Bekannt ist, dass durch die Ladungsansammlung ein hinreichend starkes Grundfeld von mindestens einigen Metern Ausdehnung erzeugt wird. Dieses wird benötigt, um den sogenannten Leitblitz-Mechanismus in Gang zu setzen und zu erhalten. Als Leitblitz (engl. Leader) wird dabei die dem Blitzschlag vorangehende Teilentladung, die am Beginn des Entwicklungsprozesses eines Blitzes steht und den Blitzkanal aufbaut, bezeichnet. Bei diesem handelt es sich um einen hochleitenden, thermoionisierten Plasmakanal, durch den Ladungen in Form eines Blitzstroms abgeführt werden. Die Potentialdifferenz zwischen dem Leitblitz und der Erde beträgt einige 10 MV, sodass sich eine sogenannte Fangentladung von der Erde zum Kopf des Leitblitzes hin bildet. Diese Fangentladung startet bevorzugt von exponierten Stellen wie Bäumen oder Dächern aus. In der Regel kommt es zur Ausbildung mehrerer Fangentladungen, wobei nur die erste den Leitblitz erreichende eine durchgehende Verbindung zur Erde herstellt. Dadurch kommt es zum Hauptblitz, bei dem der Blitzstrom zur Erde abfließt. Es können dabei sowohl vergleichsweise kurze Stoßströme mit einer Dauer bis ca. 2 ms als auch vergleichsweise langanhaltende Ströme bis etwa 1 s auftreten. Obwohl auf Grund von Laborversuchen ein Grundfeld von mindestens einigen 100 kV/m plausibel erscheint, wurden in der Natur durch Messungen bisher lediglich Feldstärken im Bereich von 10 kV/m beobachtet. Nach Kenntnis der GRS sind die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene, die zu dieser Diskrepanz führen, von der Wissenschaft noch nicht

abschließend verstanden worden. Messungen von elektrischen Feldern lassen sich beispielsweise mithilfe von Feldmetern vornehmen. Diese Messgeräte bestehen aus einem Flügelrad, das über zwei elektrisch voneinander getrennten Sektorflächen angebracht ist. Das geerdete Flügelrad dreht sich über den Sektorflächen, so dass sich der jeweils abgedeckte Teil der Flächen, und somit die Abschirmung vor dem elektrischen Feld der Erde, zeitlich permanent ändert. Somit schwankt die Ladungsdichte in den Sektorflächen zwischen Null (komplett vom Flügelrad abgedeckte Fläche) und dem Maximalwert der Ladungsdichte. Aus diesen Änderungen der influenzierten Ladungsdichten auf den Sektorflächen lässt sich das elektrische Feld am jeweiligen Ort berechnen.

Bereits bei der Ausbildung des Leitblitzes sind charakteristische Eigenschaften des Blitzes festgelegt, wie beispielsweise die Polarität, das Erscheinungsbild und die Richtung. Die Polarität richtet sich dabei nach der Polarität der in Richtung Erde abgeführten Ladung, die entweder positiv oder negativ sein kann. Ändert sich die Polarität während einer Blitzentladung handelt es sich um einen bipolaren Blitz. Bei diesen Blitzen stammt der erste negative Strom aus dem unteren Teil einer Gewitterwolke. Im weiteren Verlauf des Wachstums des Leitblitzes werden positive Ladungen erfasst, die sich schräg oder senkrecht über den negativen Ladungen befinden /BER 78/. Unabhängig davon kann die Blitzrichtung entweder abwärts- oder aufwärtsgerichtet sein. Das Erscheinungsbild des Blitzes enthält neben dem Hauptkanal oftmals weitere kleine Verästelungen, die sogenannten Streamer. Dabei handelt es sich um vom Leitblitzkopf ausgehende Plasmakanäle, die im Vergleich zur Temperatur des Plasmakerns (ca. 5000 °C) des Leitblitzes relativ kalt sind. Durch den Stromfluss erfahren sie eine Energiezufuhr, bis ein Streamer die erforderliche Temperatur erreicht, die zur Unterdrückung einer Abnahme der Leitfähigkeit durch Elektronenanlagerung nötig ist /LOT 02/. Dadurch kann sich der Streamer zu einem Leitblitz entwickeln, so dass die anderen Streamer erkalten. Dieser Mechanismus wiederholt sich um immer neue Leitblitzabschnitte, wobei es auch zur parallelen Entwicklung mehrerer Streamer zu einem Leitblitz kommen kann. Diese Gabelungen und Verzweigungen ergeben das typische Erscheinungsbild eines verästelten Blitzkanals und sind abhängig vom Blitztyp. So weisen negativ geladene Leitblitze in der Regel wenige bis keine Verästelungen auf. Das Erhitzen der relativ kalten Streamer auf die erforderliche Temperatur, um zu einem Leitblitz zu werden, nimmt einige Mikrosekunden in Anspruch. In dieser Zeit scheint der Blitzkanal stillzustehen, bevor er sich schlagartig verlängert. Darum wird von einem „Stepped Leader“ gesprochen.

Grundsätzlich wird abhängig von Ursprung und Richtung des Blitzes zwischen drei Arten von Blitzen unterschieden. Beim Wolke-Erde-Blitz entwickelt sich der Leitblitz in Abwärtsrichtung aus dem Ladungszentrum der Gewitterwolke zur Erde hinab. Obwohl prinzipiell bei Wolke-Erde-Blitzen beide Polaritäten auftreten können, dominiert der negative Anteil mit etwa 90 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Leitblitze aus dem positiven Teil der Gewitterwolke, der sich in dem oberen Bereich befindet, auf dem Weg durch die Wolke auf ein negatives geladenes Ladungszentrum treffen können, sodass es zu einem Ladungsaustausch der beiden Zentren kommt. Dies wird als Wolke-Wolke-Blitz bezeichnet. Schließlich kann das zur Ausbildung eines Leitblitzes nötige Grundfeld auch auf der Erde erreicht werden, insbesondere wenn das elektrische Feld durch die Spitzenwirkung eines hohen Objektes überhöht ist. Von der Spitze exponierter Orte bzw. Objekten kann der Start eines Leitblitzes erfolgen, der sich zur Gewitterwolke empor entwickelt. Dieser aufwärtsgerichtete Blitz wird als Erde-Wolke-Blitz bezeichnet und kann in beiden Polaritäten auftreten. Es wird vermutet, dass Aufwärtsblitze nur an hohen Objekten (höher als 100 m) oder an Objekten mittlerer Höhe, die auf Bergspitzen gelegen sind, vorkommen /HEI 09a/, /CIG 09/.

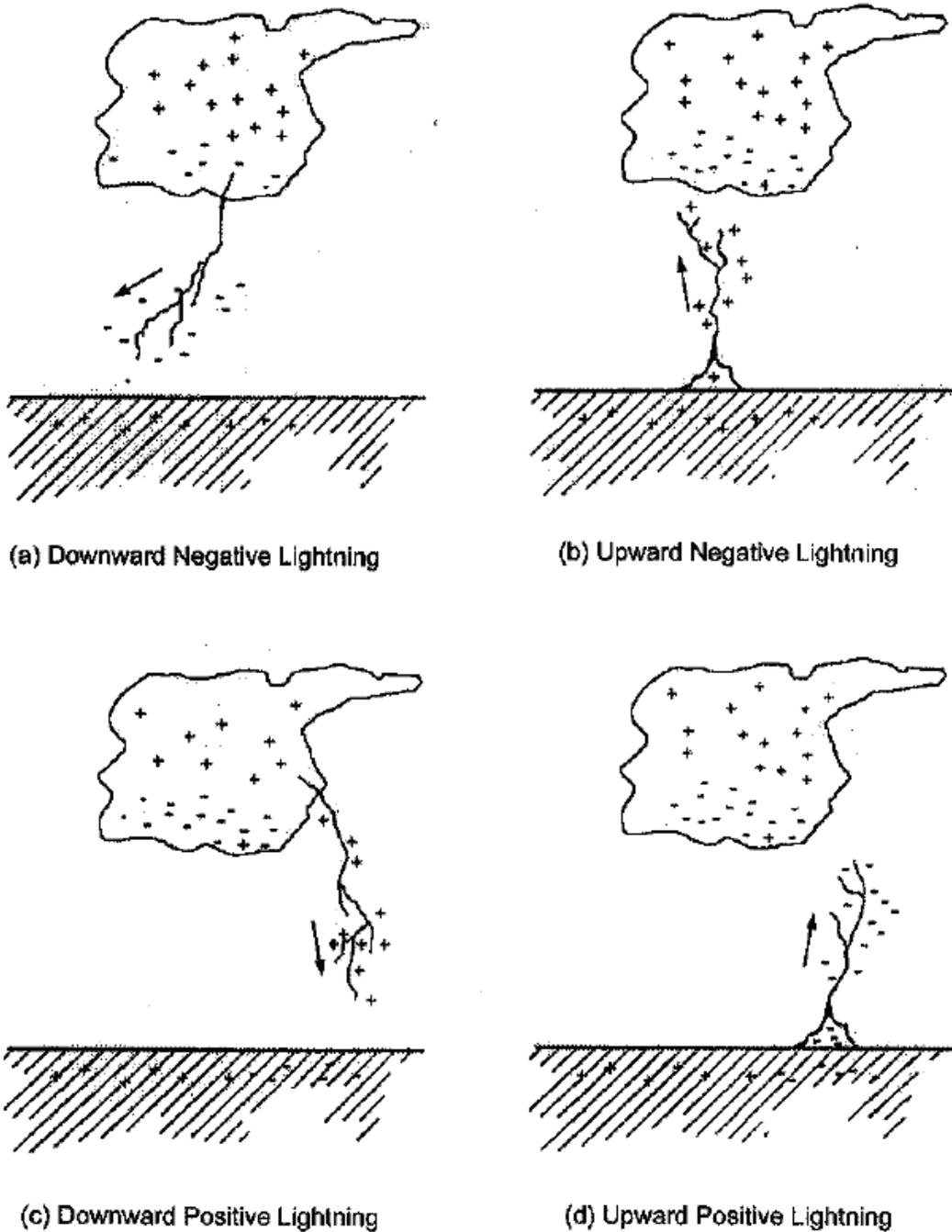


Abb. 2.1 Schematische Darstellung der vier verschiedenen Blitztypen

Es ist jeweils nur der initiale Leitblitz (leader) dargestellt: a) negativer Abwärtsblitz, b) negativer Aufwärtsblitz, c) positiver Abwärtsblitz, d) positiver Aufwärtsblitz. Die Benennung der Polarität der Blitze richtet sich nach der zur Erde abgeführten Ladung. Bipolare Blitze sind in dieser Darstellung nicht aufgeführt. /CIG 09/

Die beiden Blitztypen Wolke-Erde-Blitz und Erde-Wolke-Blitz werden als „Erdblitze“ bezeichnet (siehe Abb. 2.1).

Für den Schutz von baulichen Einrichtungen sind lediglich diese Art Blitze relevant /DIE 03/ /RSK 16/. Dabei haben positiv abwärts gerichtete Erdblitzte eine besondere Bedeutung, da diese tendenziell aufgrund des längeren Blitzkanals zwischen oberer (positiver) Wolkenschicht und der Erde höhere Blitzstromscheitelwerte aufweisen /HEI 09/ /RSK 16/. Aufgrund hoher Bauwerke wie beispielsweise der Fortluftkamine sind für Kernkraftwerke Erde-Wolke-Blitze zu berücksichtigen. Laut /HEI 09/ haben Messungen jedoch ergeben, dass die dabei auftretenden Stromparameter diejenigen von abwärts gerichteten Wolke-Erde-Blitzen nicht überschreiten, sodass den Aufwärtsblitzen keine zusätzliche sicherheitsrelevante Bedeutung zukommt.

Einer der Pioniere der Blitzforschung war K. Berger. So beruht beispielsweise die häufig genutzte sogenannte CIGRE³-Statistik auf 26 von ihm vor 1982 vermessenen Blitzentladungen am Monte San Salvatore in der Schweiz /BIR 17/, /CIG 13/, /FUN 22/. Hierbei gilt es zu bedenken, dass Aussagen, die auf einer Statistik von 26 Messwerten beruhen, je nach Fragestellung eine sehr große statistische Unsicherheit haben können.

Die Blitzforschung ist generell ein interessantes Forschungsgebiet. Für einen groben Überblick sei dem Leser /BIR 17/ empfohlen. In Kap. 5.2 wird zudem weiter auf dieses Thema eingegangen.

Laut Angaben des Deutschen Wetterdienstes ergab sich für die Jahre 1981 bis 2010 abhängig von der Region in Deutschland ein Durchschnitt von 20 bis 35 Gewittertagen pro Jahr. Dabei wurde als Gewittertag eines Gebietes (z. B. in Deutschland) ein Tag gewertet, an dem innerhalb dieses Gebietes mindestens ein Gewitter beobachtet wurde. Das Beobachtungskriterium im klassischen meteorologischen Messnetzwerk war dabei die Aufnahme des charakteristischen Donnergeräusches. Dieses Verfahren leidet jedoch unter systematischen Schwächen wie beispielsweise der Abhängigkeit von Windrichtungen, sodass das System in Zukunft komplett von automatisierten Blitzortungssystemen (welche in Kap. 2.2 erläutert werden) abgelöst wird. So detektierte das Blitzortungssystem des Blitz Informationsdienstes von Siemens (BLIDS) im Jahr 2018 insgesamt etwa 446.000 Blitzeinschläge in Deutschland. Abgesehen von exponierten Orten, wie beispielweise dem Brocken im Harz, ist die Gewitterhäufigkeit in Süddeutschland in der Regel signifikant höher als in Norddeutschland.

³ Cigré: Conseil International des Grands Réseaux Électriques (franz. Internationaler Rat für große elektrische Netze), eine internationale technisch-wissenschaftliche Organisation im Bereich elektrische Energieübertragung und -Versorgung

In Bayern wurden durch den BLITZ Informationsdienst 2018 insgesamt 106.251 Blitze detektiert.

Insgesamt weisen die südlichen Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und das Saarland normiert auf die Fläche mit einem Durchschnitt von jährlich etwa 2 pro Quadratkilometer die höchsten Blitzeinschlagsdichten auf. Lokal können dabei deutlich höhere Werte im Bereich von jährlich 5-6 pro Quadratkilometer auftreten. Bei den nördlichen Bundesländern mit Küstenlinien Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern beträgt dieser Faktor lediglich 0,6 pro Quadratkilometer und Jahr. Dies kann mit der Nähe zum Meer erklärt werden, da die sich nur langsam aufheizenden Wassermassen die Gewitterbildung hemmen. Im Gegensatz dazu begünstigen Gebirge dadurch, dass Luftmassen zum Aufstieg gezwungen werden, die Gewitterbildung. Der bundesweite Durchschnitt liegt bei etwa 1,2 registrierten Blitzeinschlägen pro Quadratkilometer für das Jahr 2018. Bezüglich des Jahresverlaufs treten in Deutschland Gewitter am häufigsten in den Sommermonaten auf, wobei regional leichte Unterschiede bezüglich der absoluten Häufigkeit zu beachten sind. /DEU 22/, /SIE 19/

Die höchste an einem Kernkraftwerksstandort beobachtete durchschnittliche jährliche Blitzdichte beträgt 3,6 pro Quadratkilometer. /KER 16/

In Kap. 5.2.10 wird näher auf das Thema Maximalwert der Blitzstromstärke eingegangen.

2.2 Methoden der Blitzsichelstrombestimmung

Zur Bestimmung von Blitzströmen werden in der Literatur verschiedene Verfahren beschrieben, die in diesem Kapitel diskutiert werden. Hierzu zählen direkte Messungen des Blitzsichelstroms, sowie Blitzortungssysteme.

2.2.1 Direkte Strommessung

Zur direkten Messung eines Blitzsichelstroms kann sowohl das Verfahren der Turmmessung als auch die Methode der Blitztriggerung genutzt werden. Die Turmmessung nutzt für die Messung natürlicher Blitze die exponierte Stellung von (insbesondere auf einem Berg gelegenen) Türmen und anderen hohen Bauwerken.

Die messtechnische Ausstattung besteht in der Regel aus Sensoren (beispielsweise zur direkten Messung des Blitzscheidenstroms) an der Spitze des Turms und einer damit verbundenen Station am Boden, wo die aufgenommenen Daten gespeichert und weiterverarbeitet werden.

Bei diesem Verfahren muss sich aufgrund des fixen Standorts eine Gewitterwolke allerdings über dem Turm befinden. Dies bedeutet üblicherweise verglichen mit den anderen Methoden eine begrenzte Ereignisanzahl sowie die Beschränkung auf einen Ort mit festen lokalen Kenngrößen. Außerdem treten aufgrund der exponierten Stellung überwiegend Aufwärtsblitze auf, sodass die Untersuchungen der (wie in Kap. 2.1 beschrieben) in der Natur sowie auf flacher Ebene ansonsten überwiegend vorkommenden Abwärtsblitze nur eingeschränkt möglich ist. Weltweit gibt es nur wenige Messstationen an denen Blitzeinschläge direkt gemessen werden können. Hierzu zählen u. a. Messstationen an den folgenden baulichen Strukturen /ALD 20/, /BER 72/, /FUN 22/:

- der Canadian National Tower (CN Tower) in Toronto, Kanada (Höhe: 500 m),
- der Sender Säntis in der Schweiz (Höhe 124 m),
- der Messturm in Morro do Cachimbo in Brasilien (Höhe 60 m),
- der Sender Hohenpeißenberg in Deutschland (Höhe 160 m, vgl. Abb. 2.2) und
- der Messturm auf dem Monte San Salvatore in der Schweiz (Höhe 912 m); seit 1983 nicht mehr in Betrieb.

Eine Messung einer größeren Anzahl an Blitzen lässt sich mit der Blitztriggerung leichter erreichen. Dabei wird ein Blitz direkt aus einer Gewitterwolke an einem gewünschten Ort ausgelöst (getriggert). Dies wird in der Regel durch den Start einer kleinen Rakete, an der ein etwa 0,2 mm dünner /BEZ 09/, klassischerweise geerdeter Stahl- oder Kupferdraht befestigt ist, unterhalb einer Gewitterwolke erreicht. Durch den Start der Rakete wird dieser am Boden (oder beispielsweise auf einem Schiff) befestigte Draht in die Höhe gezogen. Bei den durch dieses Verfahren ausgelösten Blitzen handelt es sich im Allgemeinen um Aufwärtsblitze, die zum Teil mit den Aufwärtsblitzen, welche von hohen Bauwerken ausgehen, vergleichbar sind. Obwohl die Blitzscheidenstrommessung mit diesem Verfahren im Gegensatz zur Turmmessung an den Ort des Gewitters angepasst werden kann, gibt es auch hier eine lokale Begrenzung. Zudem wird ein Blitz untersucht, den es ohne die Triggerung nicht gegeben hätte. Die im vorigen Kapitel beschriebenen Prozesse der Blitzentstehung unterscheiden sich somit teilweise von natürlich auftretenden Blitzen ohne Triggerung.

So kommt es bei diesem Verfahren nicht zur beschriebenen Bildung eines Erstblitzes, und bei den folgenden Blitzen ist der Grad der Übereinstimmung mit natürlichen Folgeblitzen zwar in weiten Teilen vergleichbar, aber mit Unsicherheiten behaftet. Da Turmmessungen für die Fragestellung dieses Forschungsvorhabens jedoch nicht von Relevanz sind, wurde sich nicht weitergehend mit ihren Eigenheiten und Vergleichbarkeiten zu anderen Messmethoden befasst.



Abb. 2.2 Messstation „Hoher Peißenberg“

Messsensoren zur Bestimmung des magnetischen Feldes, der zeitlichen Änderung des elektrischen Feldes und der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes auf der o. g. Messtation /MAN 13/

2.2.2 Blitzortung

Bei Blitzen werden meist nicht die tatsächlich auftretenden Stromstärken gemessen, sondern die Stromamplituden aus den Maxima der gemessenen Feldstärken berechnet. Hierfür wird ein atmosphärisches Modell zu Grunde gelegt, das die Abhängigkeit zwischen Stromstärke und gemessener Feldstärke modelliert.

Im Folgenden wird beispielhaft auf das häufig verwendete Ortungssystem mit dem Markennamen „Lightning Location and Tracking System“ (LPATS) eingegangen. Das LPATS beruht auf dem „Time of Arrival“ (TOA)-Verfahren. Mithilfe von richtungsempfindlichen Antennen werden die von einem Blitz hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen von mehreren Empfängern 1, 2, ..., n an verschiedenen Standorten s_1, s_2, \dots, s_n aufgenommen. Dieser Blitz hat zu dem Zeitpunkt t_0 , der zunächst noch unbekannt ist, am Ort s_0 , der ebenfalls unbekannt ist, eingeschlagen. Die Empfänger sind mit hochgenauen, untereinander synchronisierten Uhren ausgestattet, so dass die Eintreffzeiten (t_1, t_2, \dots, t_n) der elektromagnetischen Wellen an den jeweiligen Standorten (s_1, s_2, \dots, s_n) genau registriert und korreliert werden können. Unter der Voraussetzung gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen lässt sich aus den Zeitdifferenzen ($t_1-t_2, t_1-t_3, \dots, t_2-t_3, \dots, t_{n-1}-t_n$) und den entsprechenden Ortsdifferenzen⁴ ($s_1-s_2, s_1-s_3, \dots, s_2-s_3, \dots, s_{n-1}-s_n$) der Einschlagsort s_0 und die Einschlagszeit t_0 errechnen. /TER 00/

In der Realität hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen von verschiedenen Variablen, wie beispielsweise der Bodenbeschaffenheit ab, so dass die oben dargestellte Auswertungsweise eine vereinfachte Darstellung ist. Erfahrungswerte, die sich z. B. auf die einzelnen Aufstellungsorte der Empfängergeräte beziehen, werden in aufwendigen Rechenverfahren einbezogen, um diese Abhängigkeit mit abzubilden. Die genauen Details werden von den meist kommerziellen Anbietern der Ortungsdienste jedoch nicht veröffentlicht.

Bei richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen lässt sich am Standort der Empfänger nicht mehr unterscheiden, ob die Zeitdifferenz von entfernungsabhängigen Laufzeiten oder von Tiefpassverzögerungen⁵ herrührt. Um den Einschlagsort berechnen zu können, müssen die elektromagnetischen Wellen an mindestens drei Empfängerpositionen detektiert werden. Allerdings stellt die Detektion der elektromagnetischen Wellen an lediglich drei Empfängerpositionen die ungünstigsten Voraussetzungen zum genauen Berechnen des Einschlagsortes dar, da Fehler aufgrund richtungsabhängiger Ausbreitungsgeschwindigkeiten nicht kompensiert werden

⁴ Eine Ortsdifferenz ist die räumliche Differenz zwischen zwei Orten.

⁵ Als „Tiefpass“ wird in der Elektrotechnik ein Filter bezeichnet, der Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz des Filters fast ungedämpft passieren lässt, höhere Frequenzen jedoch abschwächt. Mit dem Wort „Tiefpassverzögerung“ wird die Tatsache, dass die Ausgangsspannung eines Tiefpassfilters dem Verlauf der Eingangsspannung des Filters verzögert folgt, bezeichnet.

können und somit zu einer Ortsungenauigkeit führen. Beim Vorhandensein von Signalen von mehr als drei Empfängern ist es möglich die Ortung aufgrund der Redundanz der Signale zu verbessern. In diesem Fall liegt ein überbestimmtes Gleichungssystem vor, welches sich optimieren lässt, um möglichst kleine Fehler zu erhalten. /TER 00/

Nicht alle gemessenen Signale können zur Blitzortung herangezogen werden. Für ein unbrauchbares Signal der Messstationen liegen im Allgemeinen einer oder mehrere der folgenden Gründe vor: /TER 00/

- Der Empfänger ist nicht funktionsfähig (beispielsweise aufgrund eines Defektes).
- Die Entfernung zwischen Empfänger und Blitzereignis ist zu groß. Aufgrund des daraus entstehenden sehr schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses geht das schwache empfangene Signal verloren oder die Triggerschwelle der Messstation wird unterschritten.
- Aufgrund einer starken Entladung in der Nähe der Station kommt es zu einer Übersteuerung der Anlage.

Eines der Hauptanwendungsgebiete von Blitzortungssystemen ist das Überprüfen von Versicherungsschäden. Hierfür spielt vor allem die Genauigkeit der Lokalisation der Blitzschläge eine große Rolle. Diese wird von Siemens für den Blitz Informationsdienst je nach Quelle mit „bis zu 50 m genau“ /SIE 22/ oder „wenige hundert Meter genau“ /SIE 16/ angegeben. Die Berechnung der Blitzparameter aus den Messwerten der Blitzortungssysteme ist mit großen Unsicherheiten behaftet, worauf in Kap. 5.2 weiter eingegangen wird.

Neben der Bestimmung des Ortes wird mithilfe von Blitzortungssystemen auch der Stromscheitelwert der georteten Blitze berechnet. Hierbei wird das sogenannte „transmission-line model“ von Uman und McLain genutzt. Hiernach lässt sich die magnetische Flussdichte B bestimmen als

$$B\left(D, t + \frac{D}{c}\right) = \frac{\mu VI(D, t)}{2\pi Dc} \quad (2.1)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit, μ die magnetische Feldkonstante, V die Geschwindigkeit des Hauptblitzes und B die magnetische Flussdichte, die sich in einer Entfernung

D zum Zeitpunkt $t + \frac{D}{c}$ beobachten lässt und die durch die Scheitelstromstärke I erzeugt wurde. /UMA 75/ /WEE 01/

In Kap. 5.2 werden die verschiedenen Einflussgrößen auf die Genauigkeit dieser Berechnungen betrachtet.

3 **Blitzschutzmaßnahmen**

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen von Maßnahmen des Blitzschutzes allgemein erläutert, um darauf aufbauend die Blitzschutzanforderungen von kerntechnischen Anlagen zu betrachten.

3.1.1 **Innerer und äußerer Blitzschutz**

Ziel des Einsatzes von Blitzschutzmaßnahmen ist das Verhindern von Personen- und Sachschäden aufgrund von Stromschlägen, Bränden oder Überspannungen durch Blitzeinschlag. Dabei wird zwischen innerem und äußerem Blitzschutz, dem mehrere aufeinander abgestimmte Systeme zugrunde liegen, unterschieden. Der innere Blitzschutz befasst sich im Wesentlichen mit dem Überspannungsschutz, während für den äußeren Blitzschutz primär Fangeinrichtungen, Ableitungen und Erdungen relevant sind.

Bevor die entsprechenden Verfahren zur Blitzschutzauslegung diskutiert werden, muss der Begriff der Enddurchschlagstrecke definiert werden. Diese bezeichnet die minimale Entfernung bis zu der sich der Leitblitz einem Objekt nähern kann, bevor eine Fangentladung entsteht und den Leitblitzkopf erreicht. Je nach Menge der in einem Leitblitz gespeicherten elektrischen Ladung kann die Enddurchschlagstrecke im Bereich von ca. 10 m bis zu ca. 100 m liegen, wobei stromschwache Blitze eine kleinere Strecke aufweisen als stromstarke. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Blitze mit einer hohen Ladungsmenge mehr dieser Ladung im Leitblitzkopf aufweisen, sodass die Durchschlagfeldstärke schon bei größeren Entfernungen erreicht wird. An dem Punkt, dessen Fangentladung den Leitblitzkopf zuerst erreicht, kommt es zum Enddurchschlag.

Da sich ein Leitblitzkopf einer möglichen Einschlagstelle nur bis zur Enddurchschlagstrecke nähern kann, bevor sich eine Fangentladung ausbildet, müssen alle Punkte auf der Oberfläche einer Kugel mit dem Leitblitzkopf als Mittelpunkt und der von der im Leitblitz gespeicherten Ladungsmenge abhängigen Enddurchschlagstrecke als Radius vor direktem Blitzeinschlag geschützt werden. Diese imaginäre Kugel wird als **Blitzkugelverfahren** bezeichnet und zur Bestimmung des Schutzraumes im sogenannten **Blitzkugelverfahren** verwendet. Dabei wird die Blitzkugel im Rahmen eines Modells oder in einer Simulation in allen Raumrichtungen um und über das zu schützende Objekt gerollt, sodass mögliche Einschlagstellen leicht identifiziert werden können.

Solche möglichen Einschlagstellen sind alle Stellen, die von der Blitzkugel beim Rollen über das Modell oder bei der Simulation berührt werden. Durch das Platzieren von Fangeinrichtungen, die über Ableitungen mit der Erde verbundenen sind, können gefährdete Bereiche entsprechend reduziert werden, bis das zu schützende Objekt nicht mehr von der Blitzkugel berührt wird. In diesem Zusammenhang bildet das sogenannte elektrogeometrische Modell⁶ (EGM) das einzige anerkannte physikalische Basismodell zur Erstellung des Blitzschutzkonzeptes nach DIN-Norm (DIN EN 62305-1 „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“ /DIN 15/). In dieser Norm werden je nach Schutzwürdigkeit des entsprechenden Objekts vier Gefährdungsstufen bzw. Schutzklassen („Lightning Protection Level“, LPL) definiert. Die innerhalb dieser Stufen festgelegten Bemessungswerte orientieren sich an den Wahrscheinlichkeiten, mit der sie bei einem Blitzeinschlag unterschritten bzw. übertroffen werden. Für jede Gefährdungsstufe sind außerdem Parameter für den Radius der Blitzkugel und Stromsichelwerte definiert.

Für weniger komplexe Strukturen, wie zum Beispiel kleine Gebäude oder Gebäudeteile, können nach DIN-Norm /DIN 15/ auch weniger aufwändige Verfahren verwendet werden. Beim sogenannten **Schutzwinkelverfahren** wird die beim Blitzkugelverfahren rotationssymmetrische Umrandung des Schutzraums mit Hilfe eines Kegels angenähert, welcher durch die Höhe der Fangeinrichtung und den Öffnungswinkel hinsichtlich der Schutzklasse parametrisiert ist. Dieser Öffnungswinkel ist abgeleitet von Tangenten, die an einen Kreis mit dem im Blitzkugelverfahren genutzten Radius, angelegt werden. Somit hängt der Öffnungswinkel von der Höhe der Fangeinrichtung ab. Das **Maschenverfahren** nutzt ein maschenförmig verlegtes Netz aus Fangleitungen zum Schutz von ebenen Flächen. Die Maschenweite ist dabei universell abhängig von der Schutzklasse definiert. Je nach Struktur des schutzbedürftigen Objektes kann das Maschenverfahren zum Schutz von exponierten Objekten durch Fangeinrichtungen ergänzt werden. Abhängig von der Höhe eines Objektes müssen neben Einschlägen an der Spitze bzw. auf dem Dach ggf. auch mögliche seitliche Blitzeinschläge berücksichtigt werden. Sofern keine Elemente über die Gebäudemaße hinausragen, können seitliche Einschläge bei Gebäuden kleiner 60 m Höhe vernachlässigt werden. Ab einer Höhe von 60 m bietet eine Ringleitung, installiert auf 80 % der Gebäudehöhe, effektiven Schutz unter der Einhaltung der entsprechenden Maschenweite, die sich wie zuvor nach der Gefährdungsstufe richtet.

⁶ Die Grundlagen dieses Modells werden in Kap. 5.2.8 näher erläutert.

Insgesamt gilt, dass das Blitzkugelverfahren universell anwendbar ist und insbesondere berücksichtigt werden sollte, wenn beim Schutzwinkel- oder Maschenverfahren Unsicherheiten auftreten. /DIN 15/

Verteilung des Blitzstroms bei einem Einschlag in ein Gebäude

Wenn ein Blitz in die Fangeinrichtung eines Gebäudes einschlägt, verteilt sich der Blitzstrom auf die Erdungsanlage, auf äußere leitende Teile und auf Leitungen, welche in die bauliche Anlage eingeführt sind. DIN EN 62305-1 „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“ /DIN 15/ enthält in Anhang E ein detailliertes Verfahren, mit dem die Berechnung der Blitzstromaufteilung durchgeführt werden kann. In erster Näherung kann abgeschätzt werden, dass sich ungefähr die Hälfte des Blitzstroms auf die Erdungsanlagen und die andere Hälfte auf die äußeren leitenden Teile und die in die Anlage eingeführten Leitungen aufteilt. /PHO 17/

3.1.2 Überspannungsschutzgeräte

Überspannungsschutzgeräte (engl.: surge protection device, SPD) sind Geräte oder Bauteile zum Schutz vor Schäden, die aufgrund von Überspannungen in elektrischen Leitungen und Geräten beispielsweise durch Blitzeinwirkungen hervorgerufen werden können. Sie werden als Teil des Blitzschutzkonzeptes auch in Wohnhäusern und industriellen Anlagen in den elektrischen Einrichtungen eingesetzt. Ihre wesentlichen Komponenten sind Varistoren⁷, Suppressordioden⁸ oder Funkenstrecken⁹. Überspannungsschutzgeräte dienen dem Schutz von anderen elektrischen Betriebsmitteln und elektrischen Anlagen gegen unzulässig hohe Spannungen. Sie funktionieren dabei wie Schalter, die bei dem Auftreten der Überspannung einen kurzzeitigen Kurzschluss zwischen den angeschlossenen Leitern herstellen. So wird die Überspannung über eine Parallelschaltung an dem zu schützenden Bauteil vorbeigeleitet und damit unzulässig

⁷ Varistoren sind elektrische Bauelemente, deren differentieller Widerstand oberhalb einer Schwellspannung abrupt kleiner wird.

⁸ Suppressordioden sind Dioden, mit deren Hilfe elektronische Schaltungen vor kurzzeitigen Spannungsimpulsen geschützt werden können. Sie werden oberhalb einer Schwellspannung leiten, so dass der Impuls über eine Parallelschaltung an dem zu schützenden Bauteil vorbeigeleitet wird.

⁹ Funkenstrecken sind gasgefüllte Ladungsräume zwischen zwei elektrischen Leitern (Elektroden). Beim Erreichen der Überschlagspannung der beiden Elektroden entsteht eine durch einen Funken kurzgeschlossene leitfähige Strecke.

hohe Spannungen in Geräten und Leitern unterbunden, wodurch sich Schäden verhindern lassen. /VDE 21/, /PHO 17/

Je nach Anwendung und Schutzfunktion werden Überspannungsschutzgeräte in verschiedene Klassen unterteilt. In Niederspannungseinrichtungen bis 1.000 V Nennspannung wird zwischen Überspannungsschutzgeräten Typ 1 (sogen. Blitzstromableiter), die zum Schutz vor Blitzströmen eingesetzt werden, und Überspannungsschutzgeräten Typ 2 [sogen. Überspannungsableiter, engl.: surge protective measures, (SPM)] und Typ 3 (sogen. Geräteschutz), die dem Schutz vor Überspannungen dienen, unterschieden. In den folgenden Abschnitten werden detaillierte Informationen zu diesen drei verschiedenen Typen der Überspannungsschutzgeräte gegeben. Normative Informationen zum Einsatz von Überspannungsschutzgeräten für den Blitzschutzpotentialausgleich¹⁰ aktiver Leiter können Teil 3 der Blitzschutznorm DIN EN 62305-3 entnommen werden, wobei hier vorrangig die Vermeidung von Personengefährdung und Funkenbildung betrachtet wird. Durch ein Blitzschutzsystem nach Teil 4 der Blitzschutznorm DIN EN 62305-3 wird ein umfassender Schutz von elektronischen und elektrischen Geräten und Installationen erreicht. /VDE 21/, /VDE 21a/, /PHO 17/

Tab. 3.1 Übersicht der verschiedenen Überspannungsschutzgerätetypen und ihre typischen Einsatzorte, nach /PHO 17/

Ableitertyp	Beschreibung	Typischer Installationsort
Typ 1	Blitzstromableiter/ Grobschutz	Gebäudeeintritt, spätestens in der Hauptverteilung, z. T. auch vor dem Stromzähler
Typ 2	Überspannungsableiter/ Mittelschutz	Hauptverteilung nach dem Stromzähler oder Unterverteilung
Typ 3	Geräteschutz/ Feinschutz	Unmittelbar vor dem Endgerät

Tab. 3.1 zeigt eine Kurzübersicht der drei Klassen der Überspannungsschutzgeräte für Niederspannungseinrichtungen bis 1000 V Nennspannung.

¹⁰ Unter Potentialausgleich versteht man eine elektrisch leitfähige Verbindung, die dazu dient die Differenz verschiedener elektrischer Potenziale zu verringern. Dies wird im Rahmen des Blitzschutzes „[...] durch Verbindung der Blitzschutzanlage, mit den metallenen Installationen, den geerdeten Teilen von Starkstrom- und Fernmeldeanlagen sowie aktiven Leitern von Starkstromanlagen und sonstigen geerdeten Teilen [erreicht].“ /ELE 22a/

Im Folgenden werden die drei Typen von Überspannungsschutzgeräten detaillierter betrachtet.

Überspannungsschutzgeräte Typ 1: Blitzstromableiter

Blitzstromableiter dienen dem Schutz vor der Beeinflussung durch Blitzströme aufgrund von Direkt- oder Naheinschlägen. Sie werden benötigt, um Auswirkungen des Einkopplens von hohen Blitzströmen in den Potentialausgleich der Niederspannungsanlage über die Ableitungseinrichtungen des äußeren Blitzschutzes oder über die Erde zu verhindern. Im Moment des Blitzeinschlages stellen die Blitzstromableiter den Potentialausgleich zwischen dem Schutzleiter, den Außenleitern und dem Neutraleiter her. Dadurch schützen sie die Installation und Betriebsmittel an der Schnittstelle zwischen den Blitzschutz-zonen LPZ 0A und LPZ 1. Eine Übersicht der verschiedenen Blitzschutz-zonen (engl.: Lightning Protection Zones, LPZ) kann Tab. 3.2 entnommen werden. /PHO 17/, /VDE 21a/

Tab. 3.2 Übersicht der verschiedenen Blitzschutz-zonen, nach /OBO 22a/, /WEK 21/

LPZ	Beschreibung
LPZ 0A	Ungeschützter Bereich außerhalb des Gebäudes. Direkte Blitzeinwirkung ist möglich. Keine Abschirmung gegen elektromagnetische Störimpulse LEMP (engl.: Lightning Electromagnetic Pulse).
LPZ 0B	Durch äußere Blitzschutzanlage geschützter Bereich. Direkter Blitzschlag ist ausgeschlossen. Keine Abschirmung gegen LEMP.
LPZ 1	Bereich innerhalb des Gebäudes. Stromstöße werden durch Überspannungsschutzgeräte begrenzt (geringe Teilblitzenergien möglich).
LPZ 2	Bereich innerhalb des Gebäudes. Überspannungen werden durch die jeweiligen Überspannungsableiter weiter reduziert (geringe Überspannungen möglich).
LPZ 3	Bereich innerhalb des Gebäudes (kann auch das metallische Gehäuse eines Verbrauchers sein). Keine Störimpulse durch LEMP sowie Überspannungen vorhanden.

Der Einsatzort von Blitzstromableitern liegt in der Hauptstromversorgung möglichst vor dem Zähler. Dies verhindert ein Fließen des Blitzstroms in die Gebäudeinstallation. Ein

Teil des Blitzstroms wird durch sie in die Netzzuleitung abgeführt. Zudem löschen sie den Netzfolgestrom¹¹ und isolieren daraufhin wieder vollständig.

Somit werden durch Blitzstromableiter unkontrollierte Überschläge in der Installation verhindert und Schädigungen der Isolation vermieden. Ein gesamter Schutz der Niederspannungsinstallation bis zu den Endgeräten ist durch Blitzstromableiter jedoch nicht möglich. Dies ist in der z. T. weiteren Entfernung der Geräte und einer niedrigen Bemessungs-Stoßspannung begründet und erfordert Überspannungsschutzgeräte des Typs 2 und 3. /VDE 21a/

Überspannungsschutzgeräte Typ 2: Überspannungsableiter

Überspannungsableiter dienen dem Schutz von Installationen, Endgeräten und anderen Betriebsmitteln vor Eintrag von Überspannungen und vor induktiven oder kapazitiven Einkopplungen und Schaltüberspannungen. Überspannungsableiter schützen an den Schnittstellen zwischen den Blitzschutzonen LPZ 0B und LPZ 1 sowie zwischen den Blitzschutzonen LPZ 1 und LPZ 2. Sie sind nach den Blitzstromableitern als zweite Schutzstufe eingebaut. Üblicherweise werden Varistoren als Überspannungsableiter eingesetzt und lassen keinen Netzfolgestrom zu. Es ist erforderlich diese auf eine thermische Überlastung zu überwachen, so dass das Überspannungsschutzgerät ggf. vom Netz getrennt werden kann. /PHO 17/, /VDE 21a/

Überspannungsableiter sind in den festen Installationen wie beispielsweise der Unterverteilung eingesetzt und werden koordiniert¹² zu Blitzstromableitern verwendet. /VDE 21a/

Überspannungsschutzgeräte Typ 3: Geräteschutz

Der Geräteschutz dient dem Schutz von besonders empfindlichen Geräten in den Blitzschutzonen LPZ 1 und 2. Durch den Geräteschutz wird der Spannungspegel, der diese

¹¹ Ein sog. „Netzfolgestrom“ kann entstehen, wenn ein Ableiter nicht schnell genug in seinen hochohmigen Zustand zurückkehrt. Der Netzfolgestrom kann zu einer starken Erhitzung und somit zu potenziellen Bränden führen. /PKC 22/

¹² Bei einem „energetisch koordinierten“ Überspannungsschutzkonzept leiten die Überspannungsschutzgeräte jeder Schutzstufe nur die Störenergie ab, für die sie ausgelegt sind. /DEH 22/

Geräte erreicht, weiter reduziert. Die Schutzgeräte werden nahe vor dem zu schützenden Gerät verbaut und können in den Verteilungen fest installiert sein oder ortsveränderlich im Bereich der Steckdose direkt vor dem zu schützenden Endgerät angebracht sein. /PHO 17/, /VDE 21a/

3.2 Schutzvorrichtungen gegen den Eintrag von Störungen aus dem Übertragungsnetz

Zur Verhinderung des Eintrags von Störungen aus dem Übertragungsnetz in Kernkraftwerke steht eine Vielzahl von Schutzeinrichtungen zur Verfügung. Hierzu zählen Netzschutzeinrichtungen im Verantwortungsbereich der Übertragungsnetzbetreiber, sowie Blockschutzeinrichtungen auf Seiten der Kernkraftwerke. Zudem sieht die Regel des KTA 2206 Schutzeinrichtungen gegen blitzbedingte Überspannungen vor. Im Folgenden werden Netzschutzeinrichtungen (Einrichtungen auf Seite der Übertragungsnetzbetreiber) und Blockschutzeinrichtungen (Einrichtungen auf Seite der Kernkraftwerke), die zum Schutz vor Überspannungen eingesetzt werden, betrachtet. Daraufhin werden Abschnitte, verschiedene Regeln des KTA, die sich mit blitzbedingten Überspannungen oder netzseitigen Störungseinträgen befassen, diskutiert und abschließend weitere Anforderungen an Kernkraftwerke in Bezug auf den Überspannungsschutz dargelegt.

3.2.1.1 Netzschutzeinrichtungen in der Höchstspannungsebene

Einrichtungen des Netzschutzes sind die ersten Einrichtungen, die bei Auftreten eines elektrischen Fehlers im Übertragungsnetz greifen. Der Schutz von Netzen für die Versorgung mit elektrischer Energie (im Folgenden kurz als Versorgungsnetz bezeichnet) erfolgt als Selektivschutz. Im Kurzschlussfall wird ein möglichst kleines Netzgebiet fehlerart- und fehlerortselektiv allseitig und allpolig vom Versorgungsnetz getrennt. In der Regel umfasst diese Abschaltung nur das kurzschlussbetroffene Betriebsmittel wie beispielsweise eine Leitung. In Deutschland wird der Schutz einer Leitung auf Höchstspannungsebene in der Regel durch eine Kombination aus Distanzschutz^{13]} und Leitungsdifferentialschutz realisiert. Dies ist in Abb. 3.1 dargestellt. Dem Schutzkonzept des Differentialschutzes liegt die Kirchhoff'sche Knotenregel zugrunde. Dies bedeutet, dass sich die Summe aller auf einen Knoten zu- und abfließenden Ströme im fehlerfreien

¹³ Unter dem Begriff „Distanzschutz“ versteht man ein Relais, das als widerstands- als auch energieunabhängiger Zeitstaffelschutz eingesetzt wird. Die Kommandozeit des Distanzschutzes steigt mit wachsender Entfernung zwischen dem Einbauort des Relais und der Fehlerstelle stufig an.

Netzzustand zu Null ergibt. Für den Differenzstrom I_{Diff} gilt somit $I_{\text{Diff}}=0$. Sollte ein Differenzstrom $I_{\text{Diff}}>0$ erkannt werden, deutet dies auf einen Kurzschluss innerhalb der Überwachungszone hin. /IZE 11/

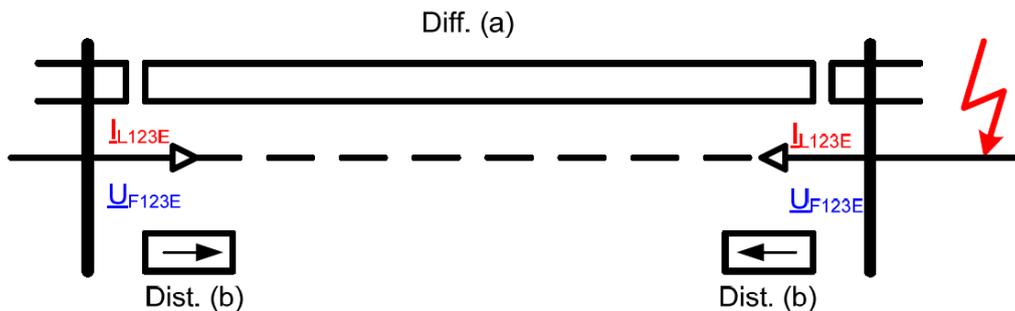


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Schutzes einer Höchstspannungsleitungsstrecke mithilfe des Leistungsdifferenzschutzes (a) und des Distanzschutzes (b) /IZE 11/

Der Differenzschutz bietet den Vorteil absolut selektiv zu arbeiten und nur auf Fehler innerhalb der Schutzzone, die durch die Schutz-Stromwandler^{14]} begrenzt ist, anzusprechen. Somit lässt sich durch den Differentialschutz ein unverzögertes AUS-Kommando realisieren. Diese absolute Selektivität birgt jedoch den Nachteil, dass mit dem Differentialschutz keine Reserveschutzfunktionen für andere Betriebsmittel oder Netzgruppen realisiert werden können. Ein Reserveschutz wird jedoch benötigt, um einen Kurzschluss im Falle des Versagens der Hauptschutzeinrichtung selektiv zu erkennen und abzuschalten. Zur Realisierung eines Differentialschutzes werden an den Strommessorten Stromwandler (Primärwandler), eine Signalverbindung zur Übermittlung der Messwerte zwischen den beiden Schutzgeräten und eine Hilfsstromversorgung benötigt. /IZE 11/

Der Differentialschutz wird als Hauptschutz eingesetzt und weist typische Kommandozeiten¹⁵ von 10-20 ms auf /IZE 11/. Dieser Zeitraum ist im Verhältnis zu den Zeiträumen von Spannungsspitzen der verschiedenen in der Regel des KTA 2206 /KTA 19/ betrachteten Auslegungsblitze vergleichsweise lang.

¹⁴ Schutzstromwandler werden zur Ansteuerung von Schutzrelais genutzt, wobei die Schutzrelais im Anforderungsfall nachgeschaltete Schaltungen im Überstromfall trennen. /DHA 22/

¹⁵ Als „Kommandozeit“ wird die Reaktionszeit des Netzschutzes zwischen dem Eintreten des Kurzschlusses, bezeichnet. Dabei wird die Öffnungszeit des zugeordneten Leistungsschalters und die Lichtbogenlöschzeit nicht mitgerechnet. /BMU 11/

Freileitungsnetze werden im Allgemeinen als dreipolige Drehstromnetze betrieben. Blitzeinschläge können in diesen Netzen selbstlöschende Lichtbögen verursachen. In diesem Fall muss der Kurzschlussstrom von einer Netzschutzeinrichtung selektiv abgeschaltet werden. Dazu wird der Stromfluss durch die betroffene Leitung durch die Netzschutzeinrichtung unterbrochen. Nach einer Pausenzeit wird eine automatische Wiedereinschaltung durchgeführt, so dass die abgeschaltete Leitung wieder in Betrieb genommen wird. Die Pausenzeit beträgt dabei etwa 1-1,5 s. Falls das Automatische Wiederauffahren erfolglos sein sollte, kommt es zu einem 3-poligen, definitiven AUS-Kommando. Hierdurch wird das Schutzobjekt allpolig und allseitig vom Netz getrennt. Ca. 85 % aller Netzstörungen in Höchstspannungsnetzen sind auf Blitzschläge zurückzuführen. /IZE 11/

Das Einsetzen der automatischen Wiedereinschaltung bei Freileitungsnetzen ist möglich, da Fehler hier im Allgemeinen nur kurzzeitig auftreten und durch das Selbstlöschen des Lichtbogens beseitigt werden. Die Isolierung der Freileitung erfolgt durch die Luft, von der die Freileitung umgeben ist. Bei großen Spannungsdifferenzen kommt es zu einer Ionisierung der Luft, wodurch sich ein Lichtbogen ausbildet durch den ein Ladungsausgleich stattfindet. Dieser Ladungsausgleich führt zu einer Verringerung der Spannungsdifferenz, wodurch die Ionisierung der Luft zurückgeht. Der Lichtbogen (und die Ionisierung) halten dabei nur kurze Zeit an, so dass es in der Regel zu keiner dauerhaften Unterbrechung der Energieübertragung kommt. /IZE 11/

Netzschutzeinrichtungen sollten einen Fehler im Netz innerhalb von maximal 150 ms beseitigt haben /GRS 17/. Wie sich aus den verschiedenen in der Regel des KTA 2206 /KTA 19/ betrachteten Auslegungsblitzen zeigt, sind bei diesen die Zeiträume von Spannungsspitzen im Bereich von Mikrosekunden, so dass die Mitigation der Auswirkungen von Blitzeinwirkungen auf das Übertragungsnetz vornehmlich durch passive Einrichtungen vorgenommen werden müssen, da andere Schutzeinrichtungen wie z. B. der Distanzschutz entsprechend längere Kommandozeiten als die Dauer der Spannungsspitzen aufweisen.

3.2.1.2 Blockschutzeinrichtungen

Blockschutzeinrichtungen sind kein Teil der Blitzschutzauslegung. Zusammen mit den Schutzeinrichtungen für den Reservenetztransformator haben sie in Kernkraftwerken die Aufgabe elektrische Fehler an folgenden Bereichen zu erkennen und deren Auswirkungen durch geeignete Schutzmaßnahmen zu minimieren: /VGB 12/

- „vom Sternpunkt des Generators bis zu den Stromwandlern auf der Oberspannungsseite des/der Maschinentransformators/en und der Unterspannungsseite der Eigenbedarfstransformatoren und
- zwischen den ober- und unterspannungsseitigen Stromwandlern des Reservenetztransformators
- sowie Fehler im Netz, die eine Gefährdung des Generators und der Eigenbedarfsversorgung bedeuten.“

Im Folgenden wird analysiert, ob Blockschutzeinrichtungen einen Schutz vor blitzbedingten Überspannungen im Übertragungsnetz bieten können.

Blockschutzeinrichtungen haben die Aufgabe die weitere Ausbreitung von elektrischen Fehlern in den Bereichen der Transformatoren des Eigenbedarfs, der Maschinen und des Reservenetzes, sowie im Bereich des Generators zu verhindern, indem sie diese Fehler erkennen, ihre weitere Ausbreitung verhindern und die Auswirkungen auf Komponenten der Kraftwerke möglichst minimieren. Zudem können einige der Blockschutzeinrichtungen als Reserveschutzeinrichtung für den Netzschutz dienen. Zur Erfüllung ihrer Schutzfunktion können sie Schalthandlungen in den Kernkraftwerken auslösen und auf Leistungsschalter des Hauptnetzes, Leistungsschalter des Reservenetzes, Generatorschalter und 10-kV-Einspeiseschalter (Eigenbedarfsumstellung) einwirken. Häufig werden mehrere Blockschutzeinrichtungen im Rahmen eines gestaffelten Blockschutzkonzeptes eingesetzt. /GRS 17/

Folgende Auflistung von Blockschutzeinrichtungen, die in Kernkraftwerken zum Schutz vor Störungen des Übertragungsnetzes genutzt werden bzw. ggf. die Anlage mithilfe einer Öffnung der Netzleistungsschalter vom Übertragungsnetz trennen, ist /GRS 17/ entnommen (inhaltliche Ergänzungen wurden in eckigen Klammern in nicht-kursiver Schriftform vorgenommen):

1. **„U/f-Schutz:** *Misst Spannung und Frequenz auf der 27-kV-Ebene und setzt diese ins Verhältnis; kann auch Fehler aus dem Netz, z. B. Überfrequenz, erkennen; Auslösezeit: einige Sekunden.*
2. **Spannungssteigerungsschutz:** *Schaltet den Generator bei Spannungserhöhungen ab; kann auch Fehler aus dem Netz erkennen. [Auslösezeit: zweistufig aufgebaut, erste Stufe ab einer Spannung von 1,14 mal der Nennspannung: Auslösezeit 12 s; zweite Stufe ab einer Spannung von 1,4 mal der Nennspannung: Auslösezeit 400 ms /VGB 12/]*
3. **Differentialschutz Maschinentransformator:** *Unter- und überspannungsseitige Transformatorströme werden verglichen; kann einpolige Kurzschlüsse auf Überspannungsseite des Maschinentransformators erkennen; Auslösezeit: ca. 30 ms.*
4. **Unterfrequenzschutz:** *Trennt die Anlage bei Unterschreiten von 47,5 Hz Netzfrequenz im Übertragungsnetz nach ca. 500 ms /VGB 12/ durch Öffnen der Leistungsschalter vom Netz.*
5. **KraftwerkSENTKUPPLUNGSSCHUTZ:** *Kann kraftwerksnahe mehrpolige Kurzschlüsse erkennen und trennt die Anlage vom Netz, wenn durch den Fehler am Generator ein erheblicher Leistungssprung erfolgt oder der Netzschutz den Fehler nicht umgehend klärt (der Netzschutz sollte den Fehler innerhalb von 150 ms klären).*
6. **400-kV-Distanzschutz:** *Trennt die Anlage vom Netz, falls der Netzschutz einen kraftwerksnahen Fehler im 400-kV-Netz nicht rechtzeitig klärt (Berechnung der Fehlerimpedanz aus Strom und Spannung an der jeweiligen Ausleitung des Maschinentransformators, Öffnen des 400-kV-Schalters nach ca. 300 ms /VGB 12/).*
7. **Sternpunktdistanzschutz:** *Berechnet aus Generatorspannung und [...]strom die Fehlerimpedanz; kann auch bei Fehlern auf der Überspannungsseite des Maschinentransformators die Anlage vom Netz trennen. [Auslösezeit Sternpunktdistanzschutz: ein- oder mehrstufig aufgebaut; erste Stufe bei Fehler in Generator oder Unterspannungswicklung Blocktrafo, Auslösezeit: 100 ms; nächste Stufen bei Fehler*

auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators, Auslösezeit: 7 s (Öffnen des Leistungsschalters) bzw. 8 s (Gesamtabschaltung) /VGB 12/]

8. **Schiefastschutz:** *Schützt den Generator vor unsymmetrischen Belastungen, die zu unzulässiger Erwärmung führen können; kann unsymmetrische Kurzschlüsse im Netz erkennen und die Anlage ggf. vom Netz trennen; Ansprechwert und Auslösezeit unterschiedlich.*
9. **Überstrom-Zeitschutz am Sternpunkt des Generators:** *Kann auch außenliegende Fehler^{16]} erkennen und ggf. die Anlage vom Netz trennen; Ansprechwert: INenn /VGB 06/; Auslösezeit: mehrere Sekunden.*
10. **Überstrom-Zeitschutz der Eigenbedarfsschienen:** *Misst die Ströme auf der Unterspannungsseite der Eigenbedarfstransformatoren und erfasst zwei- und dreipolige Kurzschlüsse; kann neben den 10-kV-Einspeiseschaltern auch den Generator und Netzleistungsschalter öffnen und so die Anlage vom Netz trennen.*
11. **Generator-Distanzschutz:** *Kann bei Fehlern auf der Oberspannungsseite des Maschinentransformators die Anlage vom Netz trennen (Berechnung der Fehlerimpedanz), Einsatz als verzögerter Überstrom-Zeitschutz möglich (d. h. er kann den Überstrom-Zeitschutz ergänzen oder auch ersetzen).*
12. **220-kV-Distanzschutz:** *Trennt die Anlage vom Netz, falls der Netzschutz einen kraftwerksnahen Fehler im 220-kV-Netz nicht rechtzeitig klärt (siehe 400-kV-Distanzschutz)*

Wie anhand dieser Auflistung ersichtlich, liegen typische Auslösezeiten für Einrichtungen des Blockschutzes zwischen ca. 30 ms und einigen Sekunden. Im Bereich von Spannungseinwirkungen durch Blitzeinwirkungen sind derartige Auslösezeiten vergleichsweise lang, so dass nicht davon auszugehen ist, dass die Einrichtungen des Blockschutzes vorrangig zur Verhinderung des Eintrags von durch Blitzeinschläge ausgelösten Spannungsspitzen beitragen können.

Nach der GRS vorliegenden Erkenntnissen können im Freien stehende Transformatoren zusätzlich zum Blockschutz über einen sogenannten Hochspannungsblitzschutz (engl.: „lightning arrester“) verfügen. Diese passiven Überspannungsschutzeinrichtungen sind

¹⁶ Als „Fehler“ werden in diesem Zusammenhang zwei- und dreipolige Kurzschlüsse auf der Unterspannungsseite der Eigenbedarfstransformatoren bezeichnet. /VGB 12/

parallel zu dem zu schützenden Bauteil installiert. Bei hohen Strömen werden sie leitend, so dass sie blitzinduzierte Überspannungen an dem zu schützenden Bauteil vorbei zur Erde ableiten.

3.3 Blitzschutzanforderungen für kerntechnische Anlagen

In den folgenden Kapiteln werden Anforderungen von nationalen und internationalen Normen und Regelwerken in Bezug auf die Blitzschutzauslegung von kerntechnischen Anlagen betrachtet. Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden hierbei herausgearbeitet. Der Fokus liegt bei diesen Betrachtungen auf deutschen Anlagen, ausländische Anlagen werden exemplarisch am Beispiel solcher in der Schweiz untersucht. Im Anschluss werden Auslegungen gegen einen Spannungseintrag aus dem Hochspannungsnetz in kerntechnische Anlagen aufgrund von Blitzeinschlägen dargelegt.

3.3.1 „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf)

Die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) /BMU 13/ enthalten Leitlinien und Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke. „Sie enthalten grundsätzliche und übergeordnete sicherheitstechnische Anforderungen im Rahmen des untergesetzlichen Regelwerks.“ /BMU 13/ Hierbei wird auch die Blitzschutzauslegung betrachtet. Im Folgenden sind die Abschnitte der SiAnf, die sich mit diesem Themengebiet befassen zusammengestellt: /BMU 13/

- „3. Technische Anforderungen – 3.5 Anforderungen an bauliche Anlagenteile“
 - „3.5 (1) Die baulichen Anlagenteile sind so auszulegen und in einem solchen Zustand zu halten, dass sie [...] zum Brand- und Blitzschutz der Anlage im jeweils erforderlichen Umfang beitragen.“
- „4. Anforderungen zur Beherrschung von Einwirkungen von außen sowie von Notstandsfällen - 4.2.1.3 Extreme meteorologische Bedingungen“
 - „4.2.1.3 (7) Es ein Blitzschutz vorzusehen, der sicherstellt, dass sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen durch Blitzeinwirkung nicht unzulässig beeinträchtigt werden.“
 - „4.2.1.3 (8) Der Blitzschutz muss entsprechend den anlagentechnischen Erfordernissen aus Maßnahmen zum Einfangen und Ableiten des Blitzes und aus

anlageninternen Maßnahmen zur Reduzierung und Begrenzung von Überspannungen bestehen.“

- „4.2.1.3 (9) Die Blitzschutzeinrichtungen sind soweit wie möglich regelmäßig zu überprüfen.“

Wie ersichtlich sind diese obig aufgelisteten Anforderungen relativ kurz gefasst und allgemein gehalten ohne konkrete Angaben zu Zeitabständen, Auslegungswerten oder Ähnlichem anzugeben. Für diese exakteren Ausführungen baut das sicherheitstechnische Regelwerk der KTA auf die Anforderungen der SiAnf auf.

3.3.2 KTA 2206 – „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“

Für deutsche kerntechnische Anlagen gelten verbindliche sicherheitstechnische Regeln, die vom Kerntechnischen Ausschuss (KTA) herausgegeben werden. Zum Thema Blitzschutzauslegung existiert die Sicherheitstechnische Regel des KTA 2206¹⁷ „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“ /KTA 19/. Sie „[...] ist auf den Schutz der elektrischen Einrichtungen in ortsfesten Kernkraftwerken gegen unzulässige Beeinträchtigungen durch Blitzeinwirkungen anzuwenden.“ /KTA 19/. In ihr werden zunächst die Grundlagen dieser Regel, der soeben zitierte Anwendungsbereich und die benutzten Begriffe erläutert. Danach werden die Bereiche Bemessungsgrundlagen, Ausführung, Nachweis des Schutzes gegen blitzbedingte Überspannungen, Prüfungen sowie in jeweils einem kurzen Abschnitt die Anwendungsbereiche, Anforderungen bei Änderungen sowie der Umfang der Dokumentation betrachtet. Zudem enthält die Regel des KTA 2206 mehrere Anhänge, in denen Beispiele zur Berechnung der auftretenden Spannungen, Beispiele für Messungen bestimmter Isolationswiderstände, ein Verfahren zur Robustheitsbetrachtung sowie Verweise auf weitere Bestimmungen, relevante Normen und Literatur aufgeführt sind. Im Folgenden werden die Inhalte der Regel des KTA 2206 dargestellt.

¹⁷ Um den Lesefluss zu erleichtern, werden die Sicherheitstechnischen Regeln des KTA im Folgenden dieses Berichtes als „Regel des KTA xxx“ (wobei „xxx“ die jeweilige Nummer der Regel angibt) abgekürzt.

Grundlagen

Der Abschnitt zum Thema Grundlagen der Regel des KTA 2206 erläutert die sich aus den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) /BMU 15/ ergebende Forderung nach Schutzmaßnahmen gegen naturbedingte Einwirkungen, sowie die generellen Aufgaben der Regeln des KTA. Zudem informiert sie über die Voraussetzung der Erfüllung konventioneller Vorschriften und Normen wie beispielsweise DIN-Normen und Bauverordnungen der Länder. Des Weiteren definiert sie die Aufgabe der Regel des KTA 2206 als die Festlegung von „[...] zusätzlichen Anforderungen an das Äußere und Innere Blitzschutzsystem so [...], dass Einwirkungen auf elektrische Einrichtungen infolge Blitzschlags zu keiner unzulässigen Beeinträchtigung der Anlagensicherheit führen.“. Die Grundlagen der Regel, die sich unter anderem aus Messungen bestimmter Blitzkenndaten, Auswertung von Versuchen mit Stoßgeneratoren und verschiedenen Berechnungsverfahren zusammensetzen, werden aufgeführt. Es wird auf die Regel des KTA 1401 zur Qualitätssicherung und die Regel des KTA 3501 /KTA 15/ zum Reaktor-schutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems verwiesen. Zudem wird erläutert, dass es kein einheitlich handhabbares Rechenverfahren für die Einkopplung von Spannungen durch Blitzeinwirkung in die Leitungen der Leittechnik gibt.

Begriffe

Da die in diesem Kapitel aufgeführten Begriffsdefinitionen das Verständnis der in diesem Bericht folgenden Ausführungen zur Regel des KTA 2206 erleichtern werden sie im Folgenden als Zitate aufgeführt:

- *„Blitzschutz*
Blitzschutz ist die Gesamtheit aller Maßnahmen und Einrichtungen zur Vermeidung der schädlichen Auswirkungen des Blitzes.
- *Blitzschutzsystem*
Das Blitzschutzsystem besteht aus dem Äußeren Blitzschutzsystem und dem Inneren Blitzschutzsystem.
- *Blitzschutzsystem, äußeres*
Äußeres Blitzschutzsystem ist die Gesamtheit aller Maßnahmen und Einrichtungen zum Auffangen und Ableiten des Blitzstromes.
- *Blitzschutzsystem, inneres*
Inneres Blitzschutzsystem ist die Gesamtheit aller Maßnahmen und Einrichtungen

gegen die Auswirkungen des Blitzes auf leitfähige Installationen und elektrische Einrichtungen innerhalb der baulichen Anlagen. Dies schließt alle Maßnahmen zur Reduzierung und Begrenzung von Überspannungen ein.

- *Erdung, dezentrale*

Dezentrale Erdung ist der vielfache, niederimpedante Anschluss des Bezugsleiters leittechnischer Systeme an das Potentialausgleichsystem.

- *Erdung, zentrale*

Zentrale Erdung ist der sternförmige Anschluss des Bezugsleiters leittechnischer Systeme an den zentralen Erdungspunkt.

- *Robustheit*

Robustheit ist die Fähigkeit eines Systems, über die Auslegungsanforderungen hinausgehende Einwirkungen zu ertragen, ohne dabei seine Funktionalität zu verlieren. Im Sinne dieser Regel ist Robustheit die Fähigkeit der elektrischen Einrichtungen mit sicherheitstechnischer Bedeutung in Verbindung mit dem Blitzschutzsystem über die Auslegungsanforderungen hinausgehende Blitzeinwirkungen zu ertragen.“
/KTA 19/

Es wird darauf hingewiesen, dass die in der Regel des KTA 2206 verwendeten Begriffe sich teilweise von denen der DIN EN 62305 unterscheiden.

Bemessungsgrundlagen

Im Abschnitt zu Bemessungsgrundlagen wird gefordert, dass Blitzeinwirkungen elektrische Anlagen nicht unzulässig beeinträchtigen. Zudem wird zwischen baulichen Anlagen mit elektrischen Einrichtungen die sicherheitstechnische Bedeutung haben (Schutzgrad 1) sowie allen weiteren baulichen Anlagen (Schutzgrad 2) unterschieden, wobei unzulässige Rückwirkungen von Schutzgrad 2 auf Schutzgrad 1 zu verhindern sind.

Für einschlaggeschützte Bereiche von baulichen Anlagen des Schutzgrades 1 soll das in DIN EN 62305-1 „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“ beschriebene Blitzkugelverfahren mit einem Radius von 20 m angewandt werden, um die Einschlagpunkte und einschlaggeschützten Bereiche zu bestimmen. Zudem darf für diese baulichen Einrichtungen zur Dimensionierung der Stromtragfähigkeit von Schutzmaßnahmen folgende Gleichung genutzt werden, um die an der jeweiligen Stelle auftretenden höchsten Stromscheitelwerte des Erstblitzes zu ermitteln:

$$R = 10 \cdot I^{0,65}, \quad (3.1)$$

wobei R den Blitzkugelradius in Meter angibt und I den Stromscheitelwert in kA. Hierbei wird für den Blitzkugelradius nicht 20 m angesetzt, sondern der Radius der an der jeweiligen Stelle berührenden Blitzkugel. Für Berechnungen zum Schutz vor blitzbedingter Überspannung sollen die in Tab. 3.3 und Tab. 3.4 aufgeführten Blitzstromparameter verwendet werden.

Tab. 3.3 Blitzstromparameter der Langzeitströme. /KTA 19/

Bauwerkshöhe (Blitztyp)	Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wert
h ≥ 60 m	Ladung des Langzeitstroms	Q _l	C	400
	Dauer des Langzeitstroms	T	s	0,5
h < 60 m	Ladung des Langzeitstroms	Q _l	C	200
	Dauer des Langzeitstroms	T	s	0,5

Tab. 3.4 Blitzstromparameter der Stromstöße. /KTA 19/

Blitztyp	Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wert
positiver Erstblitz	Stromscheitelwert	I _B	kA	200
	mittlere Stromsteilheit	I _B /T ₁	kA/μs	20
	Stirnzeit	T ₁	μs	10
	Rückenhalfwertzeit	T ₂	μs	350
	Impulsladung	Q _i	C	100
	spezifische Energie	W/R	MJ/Ω	10
negativer Erstblitz	Stromscheitelwert	I _B	kA	100
	mittlere Stromsteilheit	I _B /T ₁	kA/μs	100
	Stirnzeit	T ₁	μs	1
	Rückenhalfwertzeit	T ₂	μs	200
negativer Folgeblitz	Stromscheitelwert	I _B	kA	50
	mittlere Stromsteilheit	I _B /T ₁	kA/μs	200
	Stirnzeit	T ₁	μs	0,25
	Rückenhalfwertzeit	T ₂	μs	100

Ausführung

Der Abschnitt zu den Ausführungen des Blitzschutzsystems befasst sich hauptsächlich mit dem inneren und äußeren Blitzschutzsystem und enthält zudem eine kurze Passage über Planungs- und Ausführungsunterlagen. In dieser Passage wird das Erfüllen der

Anforderungen der Regel des KTA 2206 durch das Blitzschutzsystem vor Errichtung der Erdungsanlage gefordert. Zudem wird eine Unterteilung der zu schützenden baulichen Anlagen in Blitzschutzzonen, wie sie in DIN EN 62305-2 erläutert wird, gestattet.

Die weiteren in dem Abschnitt zur Ausführung gemachten Vorgaben beziehen sich häufig auf Abstände oder Maschenweiten, Verbindungsarten (z. B. verschweißen, verrödeln¹⁸, Klemm- oder Schraubverbindungen, ...) und Ähnliches.

Äußeres Blitzschutzsystem

Für das äußere Blitzschutzsystem wird gefordert, dass alle Dachflächen- und Wandteile, die vom Blitz getroffen werden können, durch Fangeinrichtungen zu schützen sind. Die Positionierung dieser Fangeinrichtungen soll mit dem bereits erwähnten Blitzkugelverfahren mit einem Radius von 20 m ermittelt werden. Fangmaschen, die direkt auf dem Gebäudedach aufliegen, dürfen eine Maschenweite von 5 m nicht überschreiten. Bei Gebäuden ohne Metallfassaden ist zum Ableiten von Blitzströmen ein Maschennetz in oder auf den Wänden dieser Gebäude anzubringen. Dabei werden genauere Vorgaben zu der Beschaffenheit der Stäbe des Maschennetzes sowie seiner Verbindungen gemacht. Auch der Anschluss an die äußere Erdungsanlage und der Korrosionsschutz werden betrachtet. Bei Gebäuden mit Metallfassaden dürfen diese unter Einhaltung bestimmter Vorgaben als Schirmung und Ableitung verwendet werden.

In Bezug auf die Gebäudeschirmung wird gefordert, dass alle leitfähigen Teile der Gebäudekonstruktion verbunden werden und, falls vorhanden, auch die Bewehrung zur Schirmung herangezogen wird. Zudem werden Angaben zur Umsetzung eines Maschennetzes aus der Bewehrung gemacht. Falls sich aufgrund der Bauausführung keine ausreichende Schirmwirkung ergibt, kann dies durch eine geeignete Schirmung der untergebrachten elektrischen Geräte kompensiert werden. Eventuell sind jedoch zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Leitende elektrische Teile, die in das Gebäude eingeführt werden, sollten mit dem Gebäudeschirm verbunden werden.

Bei Gebäuden ohne außen liegende Bauwerksabdichtung (nicht isoliertes Fundament) kann die Bewehrung der Fundamente als Erdung genutzt werden. In diesem Fall muss

¹⁸ Als „rödeln“ wird eine spezielle Art der Verbindung von beispielsweise verschiedenen Lagen einer Beton-Stahlbewehrung mithilfe eines Drahtes (sogen. Rödeldraht) bezeichnet.

jedoch unterhalb des Erdungsanschlusses ein zusätzliches Netz mit 10 m Maschenweite angebracht werden. In diesem Bezug werden Vorgaben zur Verbindung der Knotenpunkte des Netzes sowie der Verbindungen des Netzes mit der Bewehrung und den Ableitern gemacht. Auch der Anschluss der Außenerdung und der Korrosionsschutz werden erwähnt. Bei Gebäuden mit außenliegender Bauwerksabdichtung (isoliertes Fundament) wird ein Erdungsnetz mit Maschenweite von 10 m erdseitig außerhalb der Bauwerksabdichtung gefordert. Für die Ausführung des Netzes werden genauere Vorgaben gemacht. In Bezug auf Außenerdungen zwischen den Gebäuden wird zwischen Schutzgrad 1 und 2 unterschieden. Für Schutzgrad 1 wird ein eng vermaschtes Erdungsnetz aus Oberflächenerdern (Ring- und Maschenerdern) gefordert.

Um blitzschutztechnisch zusammengehörende Gebäudeeinheiten ist ein Ringerder zu verlegen, zu dessen Ausführung genauere Angaben gemacht werden. Ausgehend von diesen Ringerdern sind Oberflächenerder zu verlegen und an diese anzuschließen. Auch hierzu werden genauere Angaben, u. a. in Bezug auf die Maschennetze, gemacht. Die Ringerder von Gebäuden mit dem Schutzgrad 2 sind ebenfalls an das Erdungsnetz anzuschließen und bei Mehrblockanlagen sind Verbindungen der Erdungsnetze der einzelnen Anlagen und der blockgemeinsamen Gebäude zu schaffen.

In Bezug auf Verbindungen zwischen den Gebäuden sind Vorgaben zur Ausführung von Kabelkanälen und -brücken aufgeführt, wobei beispielsweise Dehnfugen und Bewehrungen zu berücksichtigen sind. Für erd- und außenverlegte Kabel werden Vorgaben in Bezug auf den Schutz am Gebäudeeingang und Schirmungen gemacht.

Erdverlegte Kabel müssen durch Begleiterder (hier als „Erdseile“ bezeichnet) geschützt werden. Zudem sind mehrere erläuternde Zeichnungen, in denen beispielsweise der Anschluss des Fundamenterdens oder die Anordnung der Außenerdung zwischen Bauwerken dargestellt sind, enthalten. Die darin angegebenen Maße für die jeweiligen Abstände sind dabei Ungefährmaße, wobei Abweichungen aus Gründen der baulichen Geometrie in begrenztem Rahmen zulässig sind.

Inneres Blitzschutzsystem

Der Abschnitt zum inneren Blitzschutzsystem befasst sich neben Allgemeinem mit dem Potentialausgleich (Innenerdung), der Erdung des Bezugsleiters der Stromversorgung, Kabelschirmen, der Verlegung von Kabeln, sowie mit Überspannungsschutzgeräten. Dabei werden mit Maßnahmen innerhalb des Gebäudes jene vorgegeben, durch die zu

Schutzgrad 1 gehörige elektrische Einrichtungen zu schützen sind. Zudem sind auch elektrische Einrichtungen, deren zulässige Spannung bei einem Blitzeinschlag überschritten würde, oder die Verbindungen zur Erdungsanlage oder zu elektrischen Einrichtungen außerhalb der Gebäude haben (und nicht bereits durch andere Maßnahmen geschützt sind), durch das innere Blitzschutzsystem zu schützen. Anders als im Abschnitt zum äußeren Blitzschutzsystem, werden für das innere Blitzschutzsystem keine Vorgaben zu Abständen, Durchmessern oder Ähnlichem gegeben. Stattdessen werden Anforderungen gegeben, die sich z. B. darauf beziehen, welche Komponenten oder baulichen Elemente leitend zu verbinden oder zu schirmen sind.

Nachweis des Schutzes gegen blitzbedingte Überspannungen

Der Abschnitt zum Nachweis gegen blitzbedingte Überspannungen behandelt neben allgemeinen Informationen die Berechnung der auftretenden Spannungen, die Überprüfung der zulässigen Spannungen und den Nachweis bei abweichenden Ausführungen. Dabei werden verschiedene Formeln und Tabellen mit zugehörigen Parametern aufgeführt, wobei allgemein die in Tab. 3.4 besprochenen Blitzstromparameter zugrunde gelegt werden. Die Anwendung der Berechnungsformeln benötigt häufig kraftwerksspezifische Informationen, wie beispielsweise die Länge eines Kabelkanals, die Anzahl aller betrachteten parallel leitfähigen Anlagenteile oder die Anzahl der zu berücksichtigenden Dehnfugen.

Prüfungen

Der Abschnitt zu Prüfungen befasst sich mit Vorprüfungen, Prüfungen während der Errichtung, Abnahmeprüfungen, wiederkehrenden Prüfungen (WKP) sowie den Prüfnachweisen. Vorprüfungen, Prüfungen während der Errichtung und Abnahmeprüfungen sind vor der nuklearen Inbetriebsetzung des Kraftwerks durchzuführen, weshalb auf sie im Weiteren dieses Berichtes nicht weiter eingegangen wird.

Es wird gefordert, dass die WKP des inneren Blitzschutzsystems jährlich und die WKP des äußeren Blitzschutzsystems alle drei Jahre (z. B. jährlich mit einem Drittel des Prüfumfanges) durchgeführt werden. Des Weiteren werden, sofern möglich, Sichtprüfungen gefordert und Vorgaben zu Prüfungen von Leitungs- und Isolationswiderständen gemacht. Für Überspannungsschutzgeräte werden jährliche Prüfungen gefordert.

Anforderungen bei Änderungen

Der kurze Abschnitt zu Anforderungen bei Änderungen fordert, dass Änderungen der Elektro-, Leit- oder Bautechnik keine unzulässigen Auswirkungen auf den Blitzschutz haben dürfen. Zudem sind nach Änderungsmaßnahmen Prüfungen nach dem zuvor beschriebenen Absatz durchzuführen, wobei der Prüfumfang vom jeweiligen Einzelfall abhängt. Zudem solle nach Arbeiten an leittechnischen Systemen mit zentralem Erdungspunkt die Isolierung des Bezugsleiters sowie ggf. der Kabelschirme überprüft werden.

Anhänge

Die Regel des KTA 2206 enthält insgesamt sechs Anhänge. Zwei dieser Anhänge befassen sich mit Beispielen zur Berechnung von auftretenden Spannungen und der Messung der Isolationswiderstände vom Bezugsleiter und statischem Schirm gegen Erde am zentralen Erdungspunkt. Die weiteren Anhänge beinhalten eine Robustheitsbetrachtung gegenüber Blitzeinwirkungen mit erhöhten Stromparametern, Bestimmungen, auf die in der Regel des KTA 2206 verwiesen wird, sowie weitere relevante Normen und ein Literaturverzeichnis.

Robustheitsbetrachtung gegenüber Blitzeinwirkungen mit erhöhten Stromparametern

In Bezug auf die zugrunde zulegenden Blitzstromparameter ist Anhang C „Verfahren zur Robustheitsbetrachtung gegenüber Blitzeinwirkungen mit erhöhten Stromparametern“ von besonderer Relevanz. In Anhang C wird die Durchführung einer anlagenspezifischen Robustheitsbetrachtung für Anlagen des Schutzgrades 1 gefordert. Diese soll nachvollziehbar dokumentiert werden. Zugrunde gelegt werden für diese Robustheitsbetrachtung folgende erhöhte Blitzstromparameter, die von den im sonstigen Teil der Regel des KTA 2206 vorgegebenen Auslegungsblitzen abweichen:

- Positiver Erstblitz: Stromscheidenwert 300 kA,
- Negativer Erstblitz: Stromscheidenwert 150 kA und
- Negativer Folgeblitz: mittlere Stromsteilheit 300 kA/μs.

Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) erläutert in ihrer Stellungnahme „Blitze mit Parametern oberhalb der genormten Blitzstromparameter“ /RSK 16/ das Zustandekommen der Werte der Robustheitsbetrachtung folgendermaßen:

„Nach Ansicht der RSK kann aufgrund der vorliegenden Messungen, Beobachtungen in gemäßigten Breitengraden und theoretischen Untersuchungen von einer natürlichen Obergrenze eines Blitzstromscheitelwerts von 300 kA in gemäßigten Breitengraden ausgegangen werden. Dies entspricht dem 1,5-fachen Wert des in der KTA 2206 festgelegten Stromscheitelwerts. Eine solche natürliche Obergrenze ist für die mittlere Stromsteilheit nicht bekannt. Für die weitere Betrachtung wurde in Analogie zum Stromscheitelwert die mittlere Stromsteilheit um 50 % gegenüber dem Wert der KTA angehoben, d. h. ein Wert von 300 kA/μs angesetzt.“

Diese Aussage deckt sich mit dem in der Regel des KTA 2206 gegebenen Hinweis zu den Werten der angegebenen Blitzparameter.

Der maximale Blitzstromscheitelwert bei einem Blitzeinschlag in ein Gebäude soll mithilfe des elektro-geometrischen Modells und der Formel

$$I_{\max} = 28,9 \cdot 10^{-3} \cdot R^{1,54}$$

berechnet werden. Hierbei gibt I_{\max} den Blitzscheitelstrom in kA und R den Blitzkugelradius (d. h. die Länge der Enddurchschlagstrecke) in m an.

Die Berechnung von Überspannungen, die an elektrischen Einrichtungen mit sicherheitstechnischer Bedeutung auftreten können, ist mit denselben Verfahren, die in zwei vorherigen Abschnitten zum „Nachweis des Schutzes gegen blitzbedingte Überspannungen“ für „Kabel in Kabelkanälen“ und für „Erdverlegte Kabel“ aufgeführt sind, durchzuführen. Dabei sollen „repräsentative, konservativ abdeckende Kabelstrecken in Kabelkanälen und Erdkabeltrassen“ berücksichtigt werden. /KTA 19/

Sollte eine Berechnung der Einkopplung von Spannungen durch Blitzeinwirkungen in Leittechnikabel erforderlich sein, sind auch hierbei die erhöhten Blitzstromparameter zugrunde zu legen.

Verweise auf andere Normen und Regeln

Die Regel des KTA 2206 setzt die Einhaltung von konventionellen Bestimmungen, wie beispielsweise der Bauordnung der Länder, Unfallverhütungsvorschriften, DIN-, IEC- und EN-Normen, sowie VDE-Bestimmungen, voraus.

Zudem wird auf die folgenden Normen verwiesen, wobei in der untenstehend aufgeführten Liste zunächst der spezifische Grund des Verweises und danach die jeweilige Norm aufgelistet ist:

- Blitzkugelverfahren und elektro-geometrisches Modell: DIN EN 62305-1,
- Grundlagen und Details zum Blitzschutzkonzept: DIN EN 62305-4,
- Anforderungen an die Werkstoffe und die zugehörigen Querschnitte von Fangeinrichtungen, Ableitungen und Erdungsanlagen: DIN EN 62305-3,
- Aussagen zum Verschweißen von Bewehrungsstäben: DIN EN ISO 17660,
- Zusätzliche Anforderungen an die Erdungsanlagen außerhalb der Gebäude: z. B. in
 - DIN VDE 0100-410,
 - DIN VDE 0100-540,
 - DIN EN 61936-1 VDE 0101-1,
 - DIN EN 50522 VDE 0101-2,
- Angaben über die erforderliche Mindestüberdeckung für Betonstahl: DIN EN 1992-1,
- Prüfung der Erdung: DIN EN 61000-4-4 und
- Beschreibung eines Hybridgenerators zur Prüfung der Stör- und Zerstörfestigkeit der Geräte oder Systeme gegen blitzbedingte Stoßspannungen: DIN EN 61000-4-5.
- Des Weiteren wird in den Anhängen D und E der Regel des KTA 2206 auf insgesamt 24 relevante DIN-Normen verwiesen.

Erwähnung des Blitzschutzes in weiteren Sicherheitstechnischen Regeln des KTA

Zusätzlich zur Sicherheitstechnischen Regel des KTA 2206 wird der Blitzschutz in der Sicherheitstechnischen Regel des KTA 3705 "Schaltanlagen, Transformatoren und Verteilungsnetze zur elektrischen Energieversorgung des Sicherheitssystems in Kernkraftwerken" /KTA 13/ unter Abschnitt 3.4 „Spannungsfall, Spannungseinbruch und Spannungserhöhung“ in Wickel 8 erwähnt:

„(8) Werden Überspannungen aufgrund von Blitzeinschlägen, Isolationsfehlern oder Schaltüberspannungen, z. B. durch Erdungsanlagen, Blitzschutzanlagen, Einrichtungen zum Potentialausgleich und Abschirmungen, nicht auf Werte begrenzt, die unter der

Spannungsfestigkeit der angeschlossenen Verbraucher liegen, müssen diese Überspannungen durch Überspannungsschutzeinrichtungen begrenzt werden.“ /KTA 13/

Darüber hinaus werden, wie bereits erwähnt, in der Regel des KTA 3501 „Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems“ /KTA 15/ Anforderungen an den Blitzschutz gestellt.

Diese sind allgemein gefasst und belaufen sich auf folgende Aussagen:

- *„4.2.2 Versagensauslösende Ereignisse
Es sind folgende versagensauslösende Ereignisse in Betracht zu ziehen: [...] anlagenextern: z. B. [...] Blitz [...]. Für diese Ereignisse sind Vorsorgemaßnahmen nachzuweisen, so dass durch diese Ereignisse die Sicherheit der Anlage nicht unzulässig beeinträchtigt wird.“*
- *„4.1.2.3 Auslegung gegen versagensauslösende Ereignisse außerhalb der Reaktoranlage gegen Ereignisse durch Einwirkungen von außen wie [...] Blitz [...], sind ausreichende Vorsorgemaßnahmen gemäß SiAnf Abschnitt 2.4 „Schutzkonzept gegen Einwirkungen von innen und außen sowie gegen Notstandsfälle“ nachzuweisen, so dass durch diese Ereignisse die Funktion der A-Funktions-Einrichtungen nicht unzulässig beeinträchtigt wird.“ /KTA 15/*

3.3.3 DIN-Normen zum Thema Blitzschutz

Die Normenreihe DIN-Norm 62305 „Blitzschutz“ stellt ein Blitzschutzgesamtkonzept dar /VDE 22/ und befasst sich in verschiedenen Teilen und Beiblättern mit allgemeinen Aspekten des Blitz- und Überspannungsschutzes. Behandelt werden allgemeine Grundsätze, Risikomanagement, elektrische und elektronische Systeme, sowie der Schutz von Personen und baulichen Anlagen /DKE 21/. Die eigentlichen Schutznormen bilden Teil 3 und Teil 4 dieser Reihe, während Teil 1 und Teil 2 zwei vorangestellte allgemeingültige Normen darstellen /VDE 22/. Abb. 3.2 zeigt eine Übersicht des strukturellen Aufbaus dieser Normenreihe.

Im Folgenden werden die einzelnen Teile und Beiblätter der Normenreihe, soweit relevant, aufgelistet und kurz beschrieben:

- DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1): 20011-10
„Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“

Dieser Teil der Blitzschutznorm behandelt die Gefährdung durch Blitze sowie mögliche Schäden eines Blitzschlags. Informationen über die Schadensarten, die Notwendigkeiten von Blitzschutzmaßnahmen sowie generell über die Gefährdung durch Blitze und mögliche Auswirkungen werden dargestellt. Die Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen und ergänzenden Schutzmaßnahmen (wie beispielsweise den Überspannungsschutz der Gebäudeelektrik) werden betrachtet.

Zudem werden die Vorgehensweisen und Schutzprinzipien, die den folgenden Teilen der Normenreihe zugrunde liegen, vorgestellt und ein genereller Überblick über die Normenreihe gegeben. Darüber hinaus sind Anhänge enthalten, in denen die Parameter für verschiedene Blitzschutzklassen, sowie Informationen und Parameter für Prüfzwecke bereitgestellt werden. /DKE 21/, /VDE 22/

Aufbau der Normenreihe DIN EN 62305

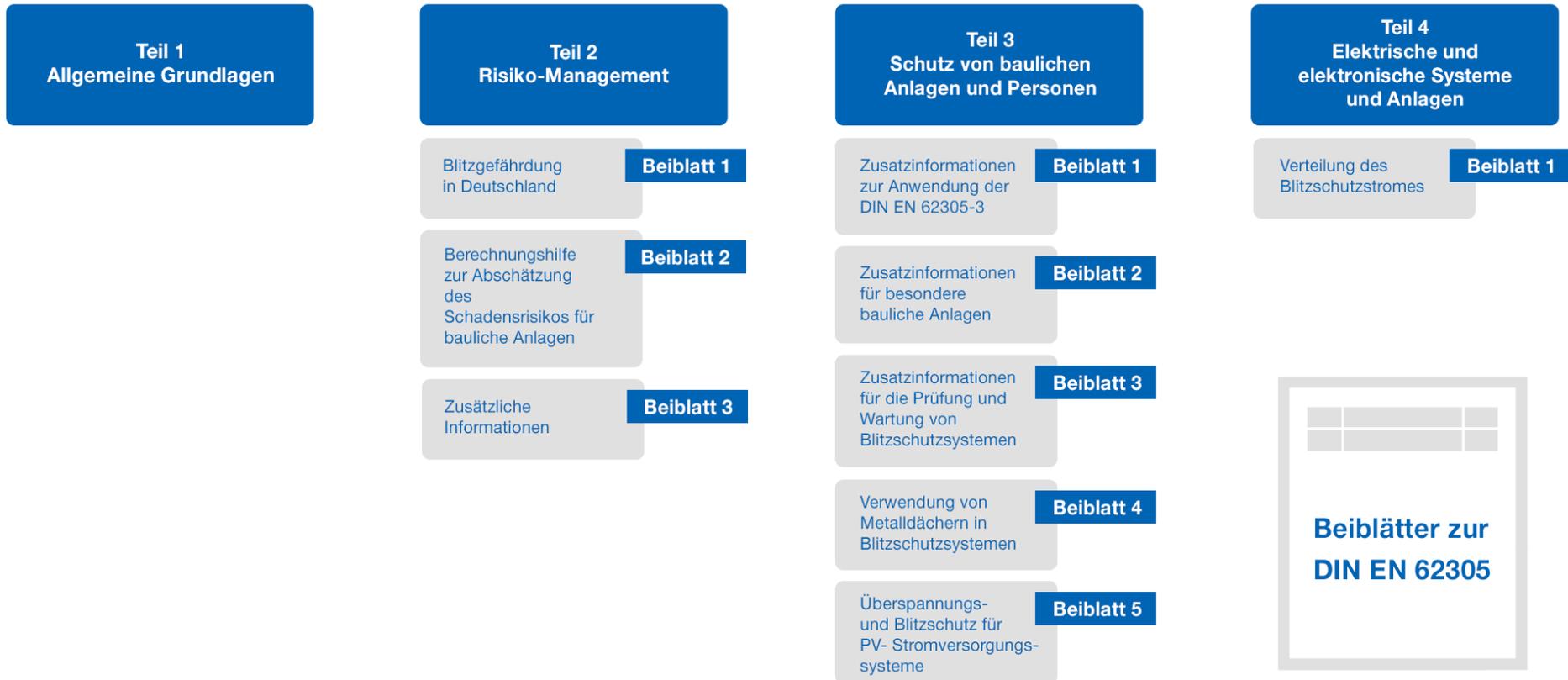


Abb. 3.2 Übersicht über den Aufbau der Normenreihe DIN EN 62305. /DKE 21/

- DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2012-02
„Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management“

Im zweiten Teil der Normungsreihe wird die Notwendigkeit des Blitzschutzes der jeweiligen baulichen Anlagen mithilfe einer Risikoanalyse dargestellt. Darauf aufbauend werden die optimalen Schutzmaßnahmen zum Begrenzen technischer und wirtschaftlicher Schäden ausgewiesen, die in den eigentlichen Schutznormen näher erläutert sind. Auch das verbleibende Risiko wird bestimmt. Aus der Risikoabschätzung für die baulichen Anlagen ergibt sich ein Modell mit den folgenden vier Blitzschutzklassen:

- Blitzschutzklasse 1: Diese Blitzschutzklasse beinhaltet höchste Anforderungen an das jeweilige Blitzschutzsystem. Diese Blitzschutzklasse findet beispielsweise bei Gebäuden, die explosionsgefährdete Bereiche beinhalten, Anwendung.
- Blitzschutzklasse 2: In dieser Blitzschutzklasse finden sich Gebäude mit erhöhtem Schutzbedarf in Bezug auf die Blitzgefährdung. Hierzu zählen beispielsweise Anlagen mit brennbaren Gasen. Ein Blitzschutzsystem und regelmäßige Prüfungen und Wartungen durch geschulte Blitzschutzfachleute sind zwingend vorgeschrieben.
- Blitzschutzklasse 3: Die ist die niedrigste in Deutschland genutzte Blitzschutzklasse. Zu ihr befinden sich beispielsweise vor Blitzgefährdung zu schützende Gebäude mit normalem¹⁹ Brandrisiko. Die Empfehlungen zum Errichten eines Blitzschutzsystem mit innerem und äußerem Blitzschutzsystem, sowie einer Sichtprüfung alle zwei Jahre und einer Detailprüfung alle vier Jahre, gelten für diese Klasse.
- Blitzschutzklasse 4: Diese niedrigste Blitzschutzklasse findet in Deutschland keine Anwendung. /DKE 21/, /VDE 22/

¹⁹ Anlagen wird ein „normales“ Brandrisiko zugeschrieben, wenn sie eine Brandlast zwischen 800 MJ/m² und 400MJ/m² aufweisen, wobei die sogenannte „Brandlast“ die Wärme angibt, die bei der Verbrennung des jeweiligen Gegenstandes auftreten würde.

- DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) Beiblatt 1: 2013-02

„Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management –
Beiblatt 1: Blitzgefährdung in Deutschland“

In diesem Beiblatt sind Einschätzungen über die Blitzgefahren verschiedener deutscher Landstriche aufgeführt. Zudem ist eine kartographische Darstellung der Erdblitzdichte²¹ Deutschlands enthalten. /DKE 21/

- DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) Beiblatt 2: 2013-02

„Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management –
Beiblatt 2: Berechnungshilfe zur Abschätzung des Schadensrisikos für bauliche Anlagen“

In diesem Beiblatt geht es um die Kalkulation des Risikos und der Durchführung einer Risikoanalyse. Da sich dies ohne geeignete Software aufwändig gestaltet, ist eine Software zur Durchführungshilfe der Berechnungen verfügbar. /DKE 21/

- DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) Beiblatt 3: 2013-12

„Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management –
Beiblatt 3: Zusätzliche Informationen zur Anwendung der DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2)“

In diesem Beiblatt sind zusätzliche Informationen und Parameterwerte für die Risikoberechnung enthalten /DKE 21/. Das Beiblatt befasst sich unter anderem mit der Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitzschlag neben einer eingeführten Versorgungsleitung den Ausfall innerer Systeme verursacht. Folgende Komponenten sind laut dieser Norm bei der Betrachtung zu berücksichtigen:

„Die Werte der Wahrscheinlichkeit P_z , dass ein Blitzeinschlag neben einer Versorgungsleitung, die in eine bauliche Anlage eingeführt ist, einen Ausfall innerer Systeme verursacht, hängen von den Eigenschaften der Schirmung der Versorgungsleitung, der Stehstoßspannungsfestigkeit²² der an die Versorgungsleitung

²⁰ In einem Beiblatt sind zusätzliche Informationen zur Anwendung einer Norm enthalten (beispielsweise Anwendungsbeispiele). Diese Informationen sind kein Norminhalt, ein Beiblatt enthält grundsätzlich keine zusätzlichen normativen Anforderungen. /DKE 21/

²¹ Die Erdblitzdichte gibt die mittlere Anzahl der in den letzten Jahren pro Quadratkilometer und Jahr niedergegangenen Blitze an /DKE 21/.

²² Die Stehstoßspannung ist „der größte Wert der höchsten Stoßspannung von vorgeschriebener Form und Polarität, welcher unter vorgegebenen Prüfbedingungen zu keinem Durchschlag führt.“ /PHO 17/

angeschlossenen inneren Systeme und den vorgesehenen isolierenden Trennschichten oder dem koordinierten SPD-System ab.“

- DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3): 2011-10

„Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen“

Der dritte Teil der Blitzschutznorm beschäftigt sich mit dem durch ein Blitzschutzsystem möglichen Schutz von baulichen Anlagen gegen Lebensgefahr und materielle Schäden infolge von Direkteinschlägen. Der Schutz vor Verletzungen von Menschen und Tieren durch Berührungs-²³ und Schrittspannungen²⁴ in baulichen Anlagen und ihrem näheren Umkreis wird dabei ebenfalls berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden der äußere und innere Blitzschutz behandelt. Die Ausführung von Fangeinrichtungen, Ableitungseinrichtungen und Erdungsanlagen wird ausführlich betrachtet. Durch die jeweilige Blitzschutzklasse werden die Kennwerte des Blitzschutzsystems festgelegt. /DKE 11/, /VDE 22/

- DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Beiblatt 1: 2012-10

„Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 1: Zusätzliche Informationen zur Anwendung der DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3)“

Dieses Beiblatt stellt Informationen und grafische Darstellungen bereit, mit deren Hilfe die Umsetzung und Zielerreichung des dritten Teils dieser Normungsreihe erleichtert werden soll. Die Abstimmung des Blitzschutzsystems mit dem allgemeinen Bauplan soll hierdurch gefördert werden. Zu diesem Zweck wird beispielsweise erläutert, wie metallene Elemente der Gebäudestruktur bei der Planung als Teil des Blitzschutzsystems integriert werden können. /DKE 21/

- DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Beiblatt 2: 2012-10

„Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 2: Zusätzliche Informationen für besondere bauliche Anlagen“

²³ Als Berührungsspannung wird die elektrische Spannung zwischen leitfähigen Teilen, die gleichzeitig von einem Menschen (oder Tier) berührt werden, bezeichnet.

²⁴ Die Schrittspannung ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines Bodenbereiches (beispielsweise zwischen den beiden Füßen eines auf dem Boden stehenden Menschen).

In diesem Beiblatt werden besondere bauliche Anlagen, die durch ein erhöhtes Brandrisiko gekennzeichnet sind, betrachtet. Berücksichtigt werden sollte es beispielsweise bei Krankenhäusern, Anlagen mit explosionsgefährdeten Bereichen, Schornsteinen, Fernmelde- oder Kirchtürmen, Rohrbrücken und moderneren baulichen Anlagen wie z. B. Biogasanlagen. /DKE 21/

- DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Beiblatt 3: 2012-10
„Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 3: Zusätzliche Informationen für die Prüfung und Wartung von Blitzschutzsystemen“

Dieses Beiblatt enthält Informationen über Wartungen und regelmäßige Prüfungen durch Blitzschutz-Fachkräfte. Diese Fachkräfte sollten über eine mindestens fünfjährige Berufserfahrung und aktuelle Berufspraxis im Bereich des Blitzschutzes verfügen. Zudem müssen sie über die relevanten bauaufsichtlichen Vorschriften und allgemein anerkannten Regeln der Technik informiert sein. /DKE 21/

- DIN EN 62305-3 (VDE 0185-205-3) Beiblatt 4: 2008-01:
„Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 4: Verwendung von Metalldächern in Blitzschutzsystemen“

In diesem Beiblatt werden Informationen und grafische Darstellungen, wodurch das Verständnis und die Anwendung der Norm verbessert werden sollen, aufgeführt. /DKE 21/

- DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4): 2011-10
„Blitzschutz – Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen“

Der vierte Teil der Blitzschutz-Normenreihe befasst sich mit dem Schutz von baulichen Anlagen mit elektronischen oder elektrischen Systemen gegen die Auswirkungen eines elektromagnetischen Blitzimpulses mithilfe von Überspannungsableitern. Genutzt werden hierfür individuelle Kombinationen aus Erdung und Potentialausgleich, räumlicher Schirmung, einem koordinierten System aus Überspannungsschutzgeräten, sowie Leitungsführungen und Schirmungen. Dies baut auf dem Blitzschutzkonzept auf. /VDE 22/

- DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4)
Beiblatt 1: 2012-10, „Blitzschutz – Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen – Beiblatt 1: Verteilung des Blitzstroms“

Dieses Beiblatt zeigt anhand von grundlegenden Beispielen den Einfluss von unterschiedlichen Installationsbedingungen der Niederspannungs-Isolation auf die Blitzstromverteilung und Blitzstrombelastung der genutzten Überspannungsschutzgeräte. Die in diesem Beiblatt enthaltenen Informationen ermöglichen es im Rahmen der Planung von Blitzschutzsystemen die Blitzstromverteilung auch für komplexe Anlagen zu bestimmen. Die hierfür zugrundeliegenden Informationen dieses Beiblattes ergänzen die Informationen aus Teil 1 dieser Normenreihe. Für ein besseres Verständnis wird die Blitzstromverteilung beispielhaft für besondere bauliche Anlagen dargestellt. /DKE 21/

Zusätzlich zur soeben betrachteten Normenreihe DIN 62305 existieren weitere spezifische DIN-Normen zu relevanten Prüfungen, zu Beeinflussungs-, Blitz- und Überspannungsschutz von Einrichtungen der Informationstechnik, zu relevanten Einrichtungsbestimmungen, zur informationstechnischen Verkabelung und weiterem. Eine Auflistung kann /DIN 10/ entnommen werden. Beispielhaft seien hier zwei dieser Normen erwähnt:

- DIN EN 60987 (VDE 0491-3-1)
„Kernkraftwerke – Leittechnische Systeme mit sicherheitstechnischer Bedeutung – Anforderungen an die Hardware-Auslegung rechnerbasierter Systeme“
(IEC 60987:2007 A1:2013);
Deutsche Fassung EN 60987:2015

In dieser Norm wird der Blitzschutz unter dem Abschnitt „Umgebungsanforderungen“ in einem Satz dahin gehend erwähnt, dass das elektromagnetische betriebliche Umfeld durch eine Vielfalt an Quellen mit elektrischen Wechselwirkungen geprägt sein kann, wobei Blitze als eine dieser möglichen Quellen aufgezählt werden.

- DIN VDE 0845 Beiblatt 1 (VDE 0845 Beiblatt 1)
„Überspannungsschutz von Einrichtungen der Informationstechnik (IT-Anlagen)“
In diesem Beiblatt werden Graphen zur Verteilung der Blitzstromstärken und Blitzstromentladungen sowie Karten zu den Gewittertagen pro Jahr und der Erdblitzdichte dargestellt. Des Weiteren sind Erläuterungen zum Maschen- Blitzkugel- und Schutzwinkelverfahren enthalten und Anforderungen an den Schutz von Einrichtungen der Informationstechnik gegen Überspannungen werden aufgezeigt.

Eine detaillierte Auswertung der einzelnen Normen dieser Normungsreihe übersteigt den Rahmen dieses Forschungsprojektes. In Kap. 5 wird jedoch auf die für die Auswertungen und Analysen relevanten Teile verschiedener Normen näher eingegangen.

Relevanz der Normenreihe 62305 für die Blitzschutzauslegung deutscher Kernkraftwerke

Wie in Kap. 3.3.2 besprochen, setzt die Regel des KTA 2206 die Einhaltung konventioneller Vorschriften und Normen voraus, wobei DIN-Normen dabei explizit als Beispiel erwähnt werden. Daraus ergibt sich, dass die Normenreihe 62305 zum Themengebiet Blitzschutz von genereller Relevanz für die Blitzschutzauslegung von deutschen Kernkraftwerken ist. In der Regel des KTA 2206 (neben anderen DIN-Normen) wird explizit auf folgende Teile der Normenreihe 62305 verwiesen:

- DIN EN 62305-1 „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“
- DIN EN 62305-2 „Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management“
sowie die zugehörigen Beiblätter:
 - „Beiblatt 1: Blitzgefährdung in Deutschland“
 - "Beiblatt 2: Berechnungshilfe zur Abschätzung des Schadensrisikos für bauliche Anlagen“
- DIN EN 62305-3 „Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen“
sowie die zugehörigen Beiblätter:
 - „Beiblatt 1: Zusätzliche Informationen zur Anwendung der DIN EN 62305-3“
 - „Beiblatt 2: Zusätzliche Informationen für besondere bauliche Anlagen“
 - „Beiblatt 3: Zusätzliche Informationen für die Prüfung und Wartung von Blitzschutzsystemen“
- DIN EN 62305-4 „Blitzschutz – Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen“

Für die Auslegung eines Gebäudes nach DIN 62305 erfolgt eine Einteilung in vier verschiedene Blitzschutzklassen, für die unterschiedliche Auslegungsblitze zugrunde gelegt werden. Die Zuordnung eines Gebäudes zur adäquaten Blitzschutzklasse erfolgt anhand der Abschätzung des Schadenrisikos nach Teil 2 der Normenreihe. Kernkraftwerke werden hierbei der Blitzschutzklasse 1 (höchste Anforderungen) zugeordnet und müssen

laut DIN 62305 für einen maximalen Blitzstromscheitelwert von 200 kA ausgelegt werden. /OBO 22/

Dies entspricht dem in der Regel des KTA 2206 angegebenen Stromscheitelwert des positiven Erstblitzes. Die Anforderungen der Regel des KTA 2206 gehen im Rahmen der Robustheitsbetrachtung, der ein positiver Erstblitz mit 300 kA zugrunde gelegt wird, über diese Anforderungen der DIN 62305 hinaus.

3.3.4 SSG-34 „Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants”

Ein spezifischer Standard zum Themengebiet der Blitzschutzauslegung wurde von der IAEA bisher nicht veröffentlicht. Informationen zur Blitzschutzauslegung sind im Specific Safety Guide “Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants” der IAEA Safety Standards Series No. SSG-34 /IAE 16/ enthalten. In diesem Dokument werden Blitze an verschiedenen Stellen in einzelnen Sätzen erwähnt, deren Inhalt im Folgenden sinngemäß übersetzt und aufgelistet ist (gekennzeichnet durch die kursive Schriftform): /IAE 16/

- Die Auslegung des Kernkraftwerks sollte alle Betriebsarten abdecken und alle möglichen Ereignisse berücksichtigen, die sich auf die elektrischen Energiesysteme des Kernkraftwerks auswirken können. Hierzu gehören auch kurzzeitige Störungen im Netzsystem, wie z. B. Schaltüberspannungen oder Blitzeinschläge.
- Die Auslegung des Kernkraftwerks sollte für jedes Teilsystem der Energieversorgungssysteme der Anlage beschrieben werden. Hierzu zählen auch stationäre, kurzfristige Betriebs- und Übergangsbedingungen, denen die Systeme ausgesetzt sein können, wie beispielsweise transiente Bedingungen aufgrund von durch Blitzeinwirkungen induzierte Überspannungen.
- Anhand von Analysen der Systemstabilität für Netztransienten soll gezeigt werden, dass das Kernkraftwerk in der Lage ist auch bei Störeinflüssen, die nicht dazu führen, dass der Generator die Synchronisation mit der Übertragungsnetzspannung verliert, diese Störungen zu überstehen und mit dem Netz verbunden zu bleiben.
- In jeder Stromerzeugungsanlage gibt es im Allgemeinen vier konzeptionell unterschiedliche, aber nicht unbedingt physisch getrennte Erdungssysteme, um folgende Aspekte abzudecken: die Sicherheit des Personals, den Blitzschutz, den Schutz von

elektrische Energiesystemen und den Schutz von Mess- und Steuersystemen, einschließlich der Signalerdung.

- Der Erdungswiderstandswert sollte u. A. die elektrische Sicherheit berücksichtigen (d. h. die zulässige Schritt- und Berührungsspannung bei angenommener Blitzentladung oder Fehlerstrom zur Erde). /IAEA 16/

Zusätzlich zu diesen Erwähnungen in einzelnen Sätzen widmet der SSG-34 der Blitzschutzauslegung das zweiseitige Unterkapitel „Blitz- und Überspannungsschutz“. Um dem Leser eine bessere Einsicht in den SSG-34 zu geben ist dieses Unterkapitel im Folgenden in übersetzter Form aufgeführt ist (gekennzeichnet durch die kursive Schriftform):

- Es sollten Vorkehrungen getroffen werden, um zu verhindern, dass die Sicherheitsfunktionen der Stromversorgungssysteme und der Mess-, Steuer- und Regelsysteme durch Blitzschläge beeinträchtigt werden.
- Die Systeme, mit denen dieses Ziel erreicht wird, können aus externen oder internen Schutzmaßnahmen bestehen. In der Regel wird eine Kombination beider Methoden erforderlich sein.
- Die äußeren Vorkehrungen beinhalten normalerweise entweder Blitzableiter oder einen Faraday'schen Käfig, der die Metallteile des Gebäudes umfasst, die das Gebäude und seine Ausrüstung vor den Auswirkungen eines Blitzeinschlags schützen. Innere Vorkehrungen können spezifische elektromagnetische Abschirmungen für Räume umfassen, um eine vor elektromagnetischen Gefahren geschützte Umgebung zu schaffen.
- Der innere Blitzschutz umfasst normalerweise eine Abschirmung und Überspannungsableiter zum Schutz gegen die durch den Blitzstrom induzierte Hochspannung sowie gegen hohe Spannungseinträge. Diese hohen Spannungen werden durch Spannungsdifferenzen zwischen der Erde und Teilen des äußeren Blitzschutzsystems und den zugehörigen Erdungsanschlüssen verursacht.
- Um das Notstromsystem vor induzierten Spannungen zu schützen, sollten als sicherheitsrelevant klassifizierte Leitungen und Kabel nicht in der Nähe von Außenwänden von Gebäuden verlegt werden.
- Der äußere Blitzschutz sollte so geerdet werden, dass der Blitzstrom zur Erde außerhalb des Gebäudes abgeleitet wird.

- Die innere Schutzerdung sollte mit der übrigen Blitzschutzerdung so verbunden sein, dass sie Personen und Einrichtungen vor hohen übertragenen Potentialen schützt.
- Die Verbindungen der Blitzschutzsysteme mit der Erde sollten so geführt werden, dass die Auswirkungen von Blitzentladungen weder die Sicherheitsfunktionen der Notstromsysteme noch die Erdung des Blitzschutzsystems gefährden.
- Die Anlagenerdung kann durch spezielle Erdverbindungen ergänzt werden.
- Bauten, die nicht fester Bestandteil der Anlage sind, wie z. B. Lagerhallen, Büros und Werkstätten für das Wartungs- und Hilfspersonal, sollten generell nicht von den Energieverteilungssystemen der Anlage versorgt werden.
- Werden zur Stromversorgung von Nebengebäuden Stromschienen der Anlage verwendet, so sollten geeignete Maßnahmen getroffen werden, um sicherzustellen, dass elektrisches Rauschen und Störspannungen, die von den Geräten in diesen Gebäuden erzeugt werden, die Stromversorgungssysteme der Anlage nicht nachteilig beeinflussen.
- Stromversorgungssysteme zur Steuerung und Überwachung sollten nicht außerhalb der Anlage verteilt sein, um das Risiko von Störungen durch Induktion oder andere Einflüsse zu minimieren.
- Verbindungen zu anderen Gebäuden – mit angemessenem Schutz, wie geerdete Stahlwände, gegen induzierte Spannungen und blitzbedingte Erdpotentialerhöhungen durch Blitzschlag – können gerechtfertigt sein, wenn die Kabeltrasse in ähnlicher Weise geschützt ist.
- Es sollten Überspannungsschutzgeräte oder Überspannungsableiter vorgesehen werden, um zu verhindern, dass Überspannungen die für die Geräte oder ihre Isolierung festgelegten zulässigen Spannungsgrenzen überschreiten.
- Überspannungen können durch Blitzeinschläge, elektrische Fehler oder Schaltvorgänge verursacht werden. Auf verschiedenen Spannungsebenen können Entstörmittel erforderlich sein.
- Schaltvorgänge, Gleichrichter, Wechselrichter und rotierende Geräte können Oberschwingungen und elektrisches Rauschen erzeugen, die für Geräte, die für den Betrieb bei Nennfrequenz und -spannung ausgelegt sind, schädlich sein können. Zusätzliche Geräte zur Filterung oder Unterdrückung von elektrischem Rauschen

können für den zuverlässigen Betrieb von Geräten, die empfindlich auf elektrisches Rauschen im Stromnetz reagieren, erforderlich sein. /IAEA 16/

Vergleich zu den Anforderungen an die Blitzschutzauslegung deutscher Kernkraftwerke

Aus den vorhergehenden Texten ist ersichtlich, dass der SSG-34 allgemeine Hinweise wie beispielsweise die Empfehlung Vorkehrungen zu treffen, die verhindern das Systeme der Energieversorgung oder Leittechnik durch Blitzschläge an der Erfüllung Ihrer Sicherheitsfunktion gehindert werden, enthält. Spezifische Angaben zu Höchstwerten, Grenzwerten, Maschenweite oder Ähnlichem beinhaltet dieses Dokument nicht. Die Empfehlungen des SSG-34 sind sehr allgemein gehalten, und in ihrem Ansatz vergleichbar mit den SiAnf /BMU 13/. Jedoch ist der SSG-34 im Vergleich zu den vier Wickeln der SiAnf, die sich mit der Blitzschutzauslegung befassen, ausführlich und detailreicher. So wird in der SSG-34 beispielsweise kurz auf den inneren und äußeren Blitzschutz eingegangen, wohingegen die SiAnf auf diese Unterscheidung nicht eingeht. Für deutsche kerntechnische Anlagen gelten wie bereits erläutert jedoch nicht nur die SiAnf, sondern auch die sicherheitstechnischen Regeln des KTA. Die Regel des KTA 2206 enthält direkte Vorgaben zu Blitzstromparametern und Ähnlichem, so dass diese Regel wiederum sehr viel ausführlicher als der SSG-34 ist.

3.3.5 Blitzschutzanforderungen kerntechnische Anlagen in der Schweiz

Für schweizerische kerntechnische Anlagen gilt die Richtlinie ENSI-G02/d „Auslegungsgrundsätze für in Betrieb stehende Kernkraftwerke, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen“ /EID 19/, die sich auch mit der Blitzschutzauslegung dieser Anlagen befasst. Die Existenz einer spezifischen Richtlinie zum Themengebiet der Blitzschutzauslegung von kerntechnischen Anlagen ist der GRS nicht bekannt. Kap. 6.4 „Blitz“ der ENSI-G02/d enthält jedoch relevante Informationen zur Blitzschutzauslegung. Dieses relativ kurze Kapitel wird im Folgenden wörtlich wiedergegeben, wobei in der zugehörigen Tabelle abweichend vom Originaltext farbig markiert in Klammern zum Vergleich Werte der sicherheitstechnischen Regel des KTA 2206 ergänzt wurden (vgl. Tab. 3.4). Danach wird auf die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur Regel des KTA 2206 eingegangen.

„Grundlegende Vorgaben

- Die Anlage muss die Blitzschutzanforderungen für industrielle Anlagen gemäß den Vorgaben der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) erfüllen.
- Zur Umsetzung der Blitzschutz-Vorgaben sind unter anderem folgende Vorsorgemaßnahmen notwendig:
 - Der äußere und innere Blitzschutz ist durch bauliche und technische Maßnahmen zu erfüllen.
 - Die klassierten Gebäude sind unter Anwendung des Prinzips eines faradayschen Käfigs zu schützen. Bei bestehenden Gebäuden ist dieses Prinzip soweit möglich und angemessen umzusetzen.
 - Blitzschutzmaßnahmen müssen Potenzialausgleich und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) berücksichtigen.
 - Blitzeinschläge sind überall auf der äußeren Hülle der Anlage zu unterstellen.
 - Die Ziele des Blitzschutzes und die Maßnahmen zur Erreichung der Ziele sind in einem Konzept festzulegen. Das Blitzschutzkonzept muss bauliche, technische und organisatorische Maßnahmen umfassen.

Zusätzliche Vorgaben für zu schützende Einrichtungen

- a) Die blitzschutztechnisch speziell zu schützenden 1E^[25]-Ausrüstungen sind gegen Blitze mit folgenden Blitzstromparametern auszulegen:

Blitzstromparameter	Auslegungs- blitz 1	Auslegungs- blitz 2	Auslegungs- blitz 3
<i>Stromscheitelwert I_{max}</i>	50 kA [50 kA] ²⁶	100 kA [100 kA]	300 kA [200 kA]
<i>Stromsteilheit Stirn</i>	200 kA/μs [200 kA/μs]	100 kA/μs [100 kA/μs]	7,5 kA/μs [20 kA/μs]
<i>Halbwertszeit der Rückflanke</i>	50 μs [100 μs]	1000 μs [200 μs]	200 μs [350 μs]

- b) Notstandssysteme sind gegen die Auslegungsblitze gemäß Bst. a auszulegen.
- c) Die zur Beherrschung der Auslegungsblitze gemäß Bst. a notwendigen Ausrüstungen sind so zu schützen, dass die Reaktoranlage in einen sicheren Zustand überführt und in diesem gehalten werden kann.“

Vergleich zu den Anforderungen an die Blitzschutzauslegung deutscher Kernkraftwerke

Wie in Kap. 3.3.2 beschrieben, gibt es in Deutschland mit der Regel des KTA 2206 eine eigene sicherheitstechnische Regel, die sich mit der Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken befasst. Diese ist ausführlicher als die aufgeführten Anforderungen, welche die schweizerische Richtlinie ENSI G02/d an die Blitzschutzauslegung der dortigen Kernkraftwerke stellt. Während die Regel des KTA 2206 eine Vielzahl an detaillierten Anforderungen stellt (z. B. an die Maschenweite oder die Art der Verbindungsstellen der Erdung) und eine Reihe von Formeln für verschiedene Berechnungen und zugehörige

²⁵ „Elektrische und leittechnische Systeme und Ausrüstungen sind als 1E zu klassieren, wenn:
a. deren Funktionen zur Einhaltung eines Schutzzieles unbedingt erforderlich sind,
b. sie zur Ausführung und Überwachung einer Sicherheitsfunktion erforderlich sind,
c. sie benötigt werden, um die elektrische Energieversorgung von anderen 1E-klassierten elektrischen und leittechnischen Systemen und Ausrüstungen sicherzustellen.“ /EID 11/

²⁶ Die in Klammern gesetzten roten Zahlen geben Werte der KTA 2206 wieder und sind nicht in der ENSI-G02/d enthalten.

Parametertabellen enthält, sind die Anforderungen in der schweizerischen Richtlinie eher allgemein gehalten.

Sowohl in der Regel des KTA 2206, als auch in der ENSI-G02/d werden drei verschiedene Auslegungsblitze genannt, wobei sich der Detailgrad der Parameter auch hierbei zwischen der Regel des KTA 2206 und der ENSI-G02/d stark unterscheidet (vgl. Tab. 3.4 und die Tabelle auf S.51). Es fällt auf, dass der Stromscheitelwert des Auslegungsblitzes 3 für schweizerische kerntechnische Anlagen mit 300 kA größer ist als der in der Regel des KTA 2206 angegebene Werte von 200 kA. Die schweizerischen kerntechnischen Anlagen müssen somit eine höhere Anforderung an die Auslegung ihrer 1E-Systeme in Bezug auf die Blitzstromscheitelstärken erfüllen (300 kA) als die deutschen kerntechnischen Anlagen. Dem gegenüber fordert die Regel des KTA 2206 eine Robustheitsbetrachtung für einen Wert von 300 kA. Die Robustheitsbetrachtung fordert, dass die elektrischen Einrichtungen mit sicherheitstechnischer Bedeutung in Verbindung mit dem Blitzschutzsystem Einwirkungen eines Blitzes mit 300 kA Scheitelstrom ertragen können, ohne ihre Funktionalität zu verlieren (siehe Kap. 3.2.1). Es handelt sich dabei also nicht um eine Auslegungsanforderung wie im schweizerischen Regelwerk, sondern lediglich um eine zusätzliche anlagenspezifische Analyse. Die Auslegungsanforderungen der KTA 2206 für den Stromscheitelwert sind demnach in Bezug auf den Auslegungsblitz mit dem größten Stromscheitelwert niedriger als in dem schweizerischen ENSI-G02/d.

3.3.6 Anforderungen an Kernkraftwerke bezüglich des netzseitigen Eintrags von Überspannungen

In den folgenden Abschnitten findet sich eine Zusammenstellung von verschiedenen Anforderungen und Empfehlungen mit Relevanz für netzseitigen Eintrag von Überspannungen, die Regeln des KTA und Weiterleitungsnachrichten entnommen sind.

Anforderungen aus Regeln des KTA bezüglich des netzseitigen Eintrags von Überspannungen

Regel des KTA 2206 zu blitzbedingten Überspannungen

Die Regel des KTA 2206 befasst sich in Abschnitt 4.3.6 „Überspannungsschutzgeräte“ und Abschnitt 5 „Nachweis des Schutzes gegen blitzbedingte Überspannungen“ mit dem Schutz vor Überspannungen.

Abschnitt 4.3.6 fordert den Schutz von elektro- und leittechnischen Systemen gegen blitzbedingte Überspannungen. Falls dafür Überspannungsschutzgeräte erforderlich sind, müssen diese niederimpedant geerdet sein. Als Beispiele für solche Schutzgeräte sind Funkenstrecken, Zenerdioden, Varistoren, sowie Kombinationen aus diesen Komponenten aufgeführt. Dabei wird angemerkt, dass ein (nach Ableitvermögen und Ansprechverhalten) gestaffelter, koordinierter Einsatz dieser Überspannungsschutzgeräte nötig sein kann. Zudem kann die Eingangsfestigkeit durch optoelektrische Signalverbindungen, Trennverstärker und Koppelrelais oder Koppelschütze erhöht werden. Die Art der einzusetzenden Überspannungsschutzgeräte ist dabei von der Art der jeweils zu schützenden leittechnischen Einrichtungen, also der Art der Nutzsignalübertragung- und -verarbeitung, abhängig.

Abschnitt 5 der Regel des KTA 2206 beschäftigt sich mit dem Nachweis des Schutzes vor blitzbedingten Überspannungen. Dabei ist „[...] nachzuweisen, dass die zulässigen Spannungen der eingesetzten leittechnischen Geräte und Systeme infolge von Blitzeinschlägen nicht überschritten werden.“ /KTA 19/ Hierzu werden verschiedene Formeln angegeben, mit deren Hilfe sich beispielsweise die Impulsströme anhand einer analytischen Blitzstromfunktion nachbilden lassen. Zugrunde gelegt werden Parameter der in Tab. 3.4 dieses Berichts aufgeführten Auslegungsblitze. Des Weiteren finden sich u. a. Formeln zur Berechnung der Verteilung des Blitzstromes, der eingekoppelten Längsspannung, und des Scheitelwertes des Blitzstroms in verschiedenen Zusammenhängen.

In Bezug auf Leittechnikkabel ist angemerkt: „In dieser Regel werden Berechnungsverfahren für die Einkopplung von Spannungen durch Blitzeinwirkungen in Leittechnik-Kabel innerhalb von Kraftwerksgebäuden nicht betrachtet. Nach Schirmung der Gebäude sowie Verlegung und Schirmung der Kabel nach diesen Regeln ist eine unzulässig hohe blitzbedingte Spannungseinkopplung auf den Kabelstrecken innerhalb der Gebäude nicht zu besorgen.“ /KTA 19/

In der Regel des KTA 2206 werden keine genauen Vorgaben zu der Art der jeweiligen einzusetzenden Überspannungsschutzgeräte gemacht.

Regel des KTA 3701 zu netzseitigen Einwirkungen

Die Regel des KTA 3701 „Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken“ /KTA 14/ fordert in Abschnitt 4 „Netzanschlüsse und Eigenbedarfsanlage“ unter 4.1.1 „Anforderungen an Schaltungskonzepte“ Wickel (1) „Die

Schaltung und die räumliche Anordnung der Netzanschlüsse und der Eigenbedarfsanlage sind so auszuführen, dass durch ein einzelnes versagensauslösendes Ereignis [...] im Bereich der Netzanschlüsse nicht alle netzseitigen Versorgungsmöglichkeiten längerfristig ausfallen können.“ Zudem wird unter Abschnitt 4.1.2 „Verbindungen der Netzanschlüsse oder der Eigenbedarfsanlage mit dem Notstromsystem“ unter Wickel 3 gefordert: „Extern und intern verursachte störungsbedingte elektrische Transienten oder Fehlerzustände (z. B. [...] Blitzeinwirkungen auf Freileitungen) dürfen keine unzulässige Beeinträchtigung der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen zur Folge haben.“

In der Regel des KTA 3701 werden keine genauen Vorgaben zu der Art der jeweiligen einzusetzenden Überspannungsschutzgeräte gemacht.

Empfehlungen der GRS in Bezug auf Spannungstransienten

Die GRS hat in mehreren Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in deutschen und ausländischen Kernkraftwerken (WLN) Empfehlungen in Bezug auf Spannungstransienten oder Spannungserhöhungen gegeben. Im Folgenden werden die in Bezug auf die Möglichkeit von durch Blitzeinwirkungen auf Freileitungen hervorgerufenen Spannungstransienten relevanten Empfehlungen dargestellt.

WLN 1982/08 „Blitzeinschlag in den 220 kV Hauptnetzanschluss“

In dieser Weiterleitungsnachricht wird empfohlen zu prüfen, ob von außen in die Anlage führende Signalkabel derart gegen Blitzeinwirkungen geschützt sind, dass unzulässige Spannungserhöhungen in der elektronischen Signalverarbeitung verhindert werden. /GRS 82/

WLN 1993/05 „Unkorrekter Einsatz von Analog-Trennwandlerbaugruppen im Gemeinschaftskernkraftwerk Grohnde (KWG)“

In dieser Weiterleitungsnachricht wird erläutert, dass die sicherheitstechnisch wichtige 24 V Leittechnik bei Störfällen sowie im normalen Betrieb von Überspannungen > 30 V geschützt werden muss. Insbesondere muss durch geeignete Maßnahmen zuverlässig verhindert werden, dass eingekoppelte Überspannungen zu unzulässigen Auswirkungen in mehreren leittechnischen Teilsystemen führen. Daher wird eine Aufnahme von durchgehenden wiederkehrenden Prüfungen des Überspannungsschutzes (in dem für die vorhandenen Baugruppen möglichen Umfang) in die Prüfprogramme empfohlen.

„Soweit nicht vorhanden sollte aber mittelfristig, ggf. in Verbindung mit einer entsprechenden Weiterentwicklung der betreffenden Baugruppen und Prüfeinrichtungen ein Konzept für die wiederkehrende Prüfung der wesentlichen Eigenschaften des Überspannungsschutzes für die sicherheitstechnisch wichtige Leittechnik entwickelt und umgesetzt werden.“ /GRS 93/

WLN 2003/14 „Durch Netzstörungen verursachte Abschaltungen von Gleichrichtern‘ im Kernkraftwerk Brokdorf (KBR) am 23.02.2002“

Diese Weiterleitungsnachricht empfiehlt zu überprüfen, ob die in der Notstromerzeugungsanlage eingesetzten gleichstromseitigen Überwachungseinrichtungen der Gleichrichter zu einer dauerhaften Abschaltung dieser Gleichrichter führen können, falls einmalig ungünstige betriebliche Spannungstransienten auftreten. Eine Umrüstung auf eine Überwachung, die die Gleichrichter erst nach mehrmaligem Auftreten der Überspannung abschaltet, sollte erfolgen, vorausgesetzt dies ist für die zu versorgenden Komponenten zulässig. /GRS 03/

WLN 2006/07, „Ereignis im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark, Block 1 am 25.07.2006: „Nichtzuschalten von zwei Notstromdieseln nach Ausfall der 400-kV-Netzanbindung“

Diese Weiterleitungsnachricht befasst sich mit der Möglichkeit von durch Blitzeinwirkungen auf Freileitungen oder die Anlage hervorgerufenen Spannungstransienten. Es wird gefordert sicherzustellen, dass diese extern oder intern verursachten störungsbedingten Spannungstransienten sowie aus ihnen resultierende elektromagnetische Einwirkungen keine unzulässigen Beeinträchtigungen von sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen zur Folge haben.

Um dies zu gewährleisten, soll zunächst die Auslegung gegen die zugrunde gelegten Einwirkungen, sowie Betriebserfahrung mit solchen Einwirkungen (auch auf konventionelle Anlagen) erfasst werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollen abdeckende elektrische Transienten bestimmt werden. Die auf diese Art bestimmten Auswirkungen auf die elektrische Versorgung sollen mit den aktuellen Schutzmaßnahmen der Anlage verglichen werden. Dabei soll der aktuelle Kenntnisstand und die Anforderungen des Regelwerks berücksichtigt werden. Auf die Betrachtung der Selektivität der Schutzeinrichtungen wird dabei explizit hingewiesen.

Auch Betriebserfahrung mit der Beherrschung von tatsächlich aufgetretenen Spannungstransienten soll für diese Untersuchung herangezogen werden. Neben der Notstromversorgung soll auch die Netzanbindung in diese Betrachtung einbezogen werden. Sowohl analytische Methoden, also auch experimentelle Untersuchungen und ggf. Simulationen zur Ermittlung möglicher Auswirkungen auf verfahrenstechnische Einrichtungen sind für diese Betrachtung zugelassen. Betriebliche und störfallbedingte unterschiedliche Belastungen der Schienen sowie die Einstelltoleranzen der Schutzeinrichtungen sind zu berücksichtigen. Ein Versagen von einzelnen Schutzeinrichtungen (beispielsweise im Bereich des Generators, der Netzanbindung oder des Eigenbedarfs) sind bei den Untersuchungen zu betrachten. Sollten bei den Untersuchungen Abweichungen festgestellt werden, so müssen diese bewertet werden. Im Falle von sicherheitsrelevanten Abweichungen sollten Ertüchtigungen vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für Abweichungen, die zu redundanzübergreifenden Ausfällen führen können. /GRS 06/

Anhand der aufgeführten Weiterleitungsnachrichten ist erkennbar, dass sich die Blitzschutzauslegung deutscher Kernkraftwerke im Laufe der Zeit weiterentwickelt hat und inzwischen vermehrt die Möglichkeit von eingekoppelten Überspannungen bedacht wird. Vor allem sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen sollen vor störungsbedingten Spannungstransienten und daraus resultierenden Einwirkungen in dem Maße geschützt werden, dass unzulässige Beeinträchtigungen sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen unterbunden werden.

In diesem Kapitel wurden die Blitzschutzanforderungen an kerntechnische Anlagen in Deutschland anhand der sicherheitstechnischen Regel des KTA 2206 und der SiAnf betrachtet und exemplarisch mit Anforderungen des SSG-34 der IAEA und den Blitzschutzanforderungen für schweizerische kerntechnische Anlagen verglichen. Dabei hat sich herausgestellt, dass die SiAnf im Vergleich zu der SSG-34 vergleichsweise wenig auf Aspekte des Blitzschutzes eingehen. Dies wird jedoch durch den Umfang der sicherheitstechnischen Regel KTA 2206, die sich ausschließlich mit der Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken befasst kompensiert. Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass die in der sicherheitstechnischen Regel KTA 2206 enthaltenen Forderungen detaillierter sind als die des schweizerischen Regelwerks.

4 Betriebserfahrung

Im Rahmen des diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsprojektes wurde in- und ausländische Betriebserfahrung von Kernkraftwerken mit Blitzeinwirkungen betrachtet. Da sich die anlagenspezifische Situation im Ausland häufig von der Situation der Anlagen in Deutschland unterscheidet, und zudem für Ereignisse in deutschen Anlagen zum Teil weitreichendere und detailliertere Informationen vorliegen, wird in diesem Bericht ein besonderes Augenmerk auf Ereignisse deutscher Anlagen gelegt.

Für die Auswertung wurden folgende Datenbanken betrachtet:

- „Vertiefte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse“ (VERA), eine Wissensbasis über meldepflichtige Ereignisse der Bundesrepublik Deutschland der GRS,
- „International Reporting Systems for Operational Experience“ (IRS), eine Wissensbasis über von den Mitgliedsstaaten der IAEA veröffentlichte Erfahrungen mit Ereignissen aus Kernkraftwerken,
- „TRANS“ (Transienten), eine Wissensbasis über Abschaltungen oder Leistungsreduktionen größer als ca. 4 Vollaststunden in deutschen Kernkraftwerken mit Leistungsreaktoren der GRS.

Im Folgenden werden zunächst die identifizierten Ereignisse in deutschen Anlagen dargestellt, anschließend werden die Ereignisse in ausländischen Anlagen besprochen.

4.1 Ereignisse in deutschen Anlagen

Die Identifizierung von relevanten Ereignissen in deutschen Anlagen erfolgte mithilfe der TRANS- und der VERA-Datenbanken der GRS. Es ist zu diesem Thema anzumerken, dass jedes Kraftwerk jährlich mehrere Blitzeinschläge ohne Folgen für die Infrastruktur erleidet /VGB 12/.

Die Einträge in der TRANS-Datenbank sind mit Schlagworten versehen. Es wurden Ereignisse, welche mit den Schlagworten „Unwetter (Sturm, Vereisung, ...)“, „Blitzschlag“, „Externe Einwirkungen“, „Einfluss aus Netzanbindung“ und „Besondere Ereignisse“ versehen sind betrachtet. Die TRANS-Datenbank umfasst insgesamt 84 Ereignisse seit dem Jahr 1973, denen mindestens eins dieser Schlagwörter zugeordnet ist. Von diesen 84 Ereignissen standen 19 in Zusammenhang mit Blitzeinwirkungen oder Gewittern.

Von diesen 19 Ereignissen, erfolgte die Blitz- oder Gewittereinwirkung bei 18 der Ereignisse auf Seiten des Netzbetreibers, z. B. in Form von Blitz- oder Gewittereinwirkungen auf Freileitungen oder Umspannwerke. Bei einem zusätzlichen Ereignis waren nicht näher spezifizierte Witterungseinflüsse ursächlich für Netzstörungen der 400 kV Freileitung. Es besteht die Möglichkeit, dass es sich dabei um eine Blitzeinwirkung handelt – es könnten aber auch andere Einflüsse wie beispielsweise starker Wind für dieses Ereignis verantwortlich sein.

Die in der VERA-Datenbank erfassten Ereignisse werden ebenfalls mit Schlagworten versehen. Es wurden Ereignisse, welchen die Schlagwörter „Blitz“, „Einschlag“, „Gewitter“, „Witterung“ und „Unwetter“, sowie fehlerhafte Schreibweisen dieser Wörter zugeordnete wurden, betrachtet. Die VERA-Datenbank umfasst insgesamt 50 Ereignisse seit dem Jahr 1967, denen mindestens eins dieser Schlagwörter zugeordnet ist. Von diesen 50 Ereignissen weisen 19 Ereignisse einen direkten oder indirekten Bezug zu Blitzeinwirkungen oder Gewittern auf.

Drei der betrachteten Ereignisse wurden sowohl in der TRANS- als auch in der VERA-Datenbank aufgeführt (bei zwei dieser Ereignisse fand die Blitz- oder Gewittereinwirkung auf Seiten des Netzbetreibers statt, bei dem dritten Ereignis erfolgte ein Blitzeinschlag auf dem Anlagengelände).

4.1.1 Einschlag (vermutlich) auf dem Anlagengelände

Bei den folgenden Ereignissen fand der Blitzeinschlag vermutlich direkt auf dem Gelände der Anlage statt.

RESA aufgrund eines Blitzeinschlages (1983)

Während des Leistungsbetriebs kam es in dem betroffenen Kraftwerk durch einen Blitzeinschlag zu einer Reaktorschnellabschaltung (RESA), einer Turbinenschnellabschaltung (TUSA) und zur Auslösung weiterer Reaktorschutzaktionen. Der genaue Einschlagspunkt konnte laut den der GRS vorliegenden Informationen auch unter Berücksichtigung der aufgetretenen Schäden nicht eindeutig bestimmt werden. In der Meldung des Kraftwerkes ist angegeben, dass der Einschlag optisch und akustisch durch das Schichtpersonal wahrgenommen wurde. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Blitzeinschlag außerhalb der Kraftwerksumzäunung aufgetreten ist.

Die unmittelbaren Auswirkungen und Schäden des Einschlags umfassen beschädigte Geräte, Fehlmeldungen und Fehlsignale. Insgesamt wurden neun analoge Messgeräte beschädigt, davon acht im Außen- (z. B. Kamin) und eins im Innenbereich. Dabei war nur der betriebliche Bereich betroffen und die Schäden hatten keine direkte Auswirkung auf die Funktion der Gesamtanlage. Bezüglich der Steuerungs- und Regelungstechnik wurden insgesamt 17 Geräte beschädigt, wobei es sich bei drei betroffenen Geräten um digitale Messtechnik im Außenbereich handelte. Auch hier betrafen die Schäden ausschließlich den betrieblichen bzw. Signalisierungsbereich, wodurch keine direkten Auswirkungen auf die Funktion der Gesamtanlage auftraten. Neben vier beschädigten Geräten der Kommunikationstechnik, die alle eine Verbindung nach außen hatten, waren außerdem zwei Objektschutzanlagen zur Türüberwachung, neun Kameras der Fernseh-anlage und neun Radarstecken zur Zaunüberwachung betroffen.

Die Mehrzahl der beschädigten Einrichtungen liegt demnach im Außenbereich bzw. bei außerhalb von Gebäuden installierten Geräten. Es wurden jedoch auch leittechnische Einrichtungen innerhalb von Gebäuden, insbesondere im Schaltanlagegebäude, beschädigt. Es waren keine direkten Wirkungen von Blitzteilströmen feststellbar, sodass die Schäden und Störungen auf Potenzialdifferenzen im Erdungsnetz und auf induzierte Überspannungen auf Kabeln zurückzuführen sind.

Mit dem Ziel, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten blitzbedingter Überspannungen zu reduzieren und Überspannungen in der Leittechnik zu begrenzen hat der Betreiber einige Verbesserungsmaßnahmen formuliert. Im Bereich des äußeren Blitzschutzes soll die Maschenweite für die Blitzauffang- und Ableitungseinrichtungen beim zusammenhängenden Gebäudekomplex bestehend aus Reaktorgebäude, Maschinenhaus, Schaltanlagegebäude, Werkstätte und Dieselgebäude auf 5 m verringert werden²⁷. Weiterhin sollen die Einbindung von Kabelpitschen in das Erdungsnetz verbessert werden und Erdseile (Begleiterder), die über Kabeltrassen im Boden verlegt sind, sollen zusätzlich mit dem außerhalb von Gebäuden verlegten Erdungsring verbunden werden.

Im Rahmen des inneren Blitzschutzes wurden zusätzliche Überspannungsbeschaltungen bei Geräten im Außenbereich im Signal- und Stromversorgungspfad genannt. In Anlagen, die nach der betroffenen Anlage errichtet wurden, waren laut GRS vorliegenden Informationen bereits umfassendere Maßnahmen getroffen, wie zum Beispiel die

²⁷ Dies erfüllt die Anforderungen der Regel des KTA 2206.

Verwendung von Kabeln mit zusätzlichem stromtragfähigem Schirm.

Ausfall mehrerer Messeinrichtungen aufgrund eines Blitzeinschlags (1984)

Während des Leistungsbetriebs des betroffenen Kernkraftwerks kam es durch einen Blitzeinschlag zum Ausfall mehrerer Messeinrichtungen. Der Einschlag wurde vom Betriebspersonal weder beobachtet noch akustisch wahrgenommen. Ein sich zu dem Zeitpunkt auf einem Rundgang auf dem Kraftwerksgelände befindliches Mitglied des Wachpersonals beobachtete den Blitzeinschlag, konnte den genauen Einschlagspunkt jedoch nicht lokalisieren. Unter Berücksichtigung der aufgelaufenen betrieblichen Fehlmeldungen und Fehlanregungen und der Aussage des Mitglieds des Wachpersonals, wird von einem Einschlag am bzw. im Bereich des Abluftkamins ausgegangen. Mechanische oder thermische Spuren einer Blitzeinwirkung waren nicht erkennbar.

Die unmittelbaren Auswirkungen und Schäden des Einschlags umfassten Ausfälle der hauptsächlich meteorologischen Instrumentierung im Bereich des Kaminmessraums und außerhalb von Gebäuden auf dem Gelände der Anlage, sowie Fehlmeldungen und kurzzeitigen Fehlanregungen in einem Kanal des Reaktorschutzsystems.

Direkt betroffen von den Auswirkungen der Überspannungstransiente infolge der Blitzeinwirkung waren insgesamt 20 Geräte, darunter zahlreiche Messumformer im Bereich des Kaminmessraums. Betroffen war dabei ausschließlich Instrumentierung, deren Messwertgeber sich innerhalb des Kamininnenraums befinden. Der Kaminmessraum befindet sich auf dem Dach des Reaktorgebäudes auf 72 m Höhe und ist um den Kamin herumgebaut. Der Kaminfuß selbst befindet sich auf 52 m Höhe im Reaktorgebäude, wobei die Bewehrung des Kamins dort mit der Gebäudeerde verbunden ist. Zwischen dem Kaminmessraum und dem Reaktorgebäude verlaufen innerhalb des Gebäudes in der Nähe der Kaminwand zwei Kabeltrassen. Die Schäden und Beeinträchtigungen im Bereich des Kaminmessraums sind auf zu große Erdpotentialunterschiede und durch in der Kaminwandbewehrung fließende Blitzteilströme erzeugte Magnetfelder zurückzuführen. Durch den Blitzeinschlag (vermutlich) im Abluftkamin kam es gemäß der GRS vorliegenden Informationen zu einer kurzzeitigen Erhöhung des Gebäudeerdepotentials. Dadurch wurde weiterhin eine zu große Erdpotentialdifferenz zwischen dem Gebäudeerdepotential und dem Erdpotential von Geräten, die mit einiger Entfernung, außerhalb vom Gebäude auf dem Gelände angeordnet waren, verursacht. Somit konnte

eine Überspannung vom Gebäude auf den ungeschützten elektronischen Teil der betroffenen Messeinrichtungen übertragen werden, was gemäß den der GRS vorliegenden Informationen die aufgetretenen Schäden verursachte.

Es wurden außerdem einige Taktüberwachungsstufen des Reaktorschutzsystems kurzzeitig (20 ms) beeinflusst. Dies wird auf eine Signaleinkopplung auf einer 6 m langen Teilstrecke des Signalwegs zurückgeführt, wobei innerhalb der zugehörigen Kabelpritschen ein systemfremdes, zum Objektschutz gehörendes Kabel verlegt war, das sich in unmittelbarer Nähe zu den Pulsleitungen des Reaktorschutzsystems befand. Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Folienschutzschirm dieses Kabels entgegen der im Reaktorschutzsystem gängigen einseitigen Erdung an beiden Enden in einer größeren Entfernung zueinander geerdet worden war und die Systemerde des Objektschutzes an einem anderen Punkt im Schaltanlagegebäude, abseits des zentralen Erdungspunkts des Reaktorschutzsystems, vorgenommen wurde.

Insgesamt wurden daher zunächst Abhilfemaßnahmen in Form einer Verbesserung des Potentialausgleichs zwischen den verschiedenen Systemerden (Reaktorschutz, Objektschutz) ergriffen. Das Schirmerdungsprinzip des Objektschutzes wurde dem des Reaktorschutzes angepasst. Das betroffene Kabel des Objektschutzes, welches parallel zur Pulsleitung des Reaktorschutzsystems verläuft, wurde außerdem zur Abschirmung innerhalb einer Vollblechwanne verlegt. Außerdem wurde durch den Betreiber eine Verbesserung und Verstärkung des Potentialausgleichs der betroffenen Komponenten des Kamins bzw. zur Anbindung an das Reaktorgebäude vorgesehen und umgesetzt. Schließlich wurde vorgesehen, die vorhandenen Überspannungsschutzbeschaltungen insbesondere der Komponenten außerhalb von Gebäuden zu erweitern.

Zusammengefasst wurde durch den Blitzeinschlag keine Einrichtung des Sicherheitssystems zerstört, es kam zu keiner Fehlanregung eines Schutzsignals des Reaktorschutzes und eine Schutzaktion wäre im Anforderungsfall nicht blockiert worden.

Teilausfall der Brandmeldeanlage aufgrund eines Blitzeinschlags (2001)

In der im Rückbau befindlichen Anlage kam es durch einen Blitzeinschlag zu einem partiellen Ausfall der Brandmeldeanlage. Der Blitzeinschlag wurde vom Betriebspersonal als Knall wahrgenommen, wobei der genaue Einschlagspunkt nicht bekannt ist. Der Betreiber geht von einem Einschlag in der Nähe des Aufbereitungsgebäudes (Höhe des Gebäudes ca. 17 m) aus, vermutlich im Bereich einer Bürocontainerstellfläche in

etwa 10 m Entfernung zum Aufbereitungsgebäude. Der zugehörige Container war zwei Wochen zuvor von der Fläche entfernt worden, die elektrischen Leitungen (Stromversorgung und Leittechnik) waren unterirdisch noch vorhanden. Laut der GRS vorliegenden Informationen liegt die Bürocontainerstellfläche im Schutzkegel des mit äußerem Blitzschutz ausgestatteten Aufbereitungsgebäudes, jedoch wird davon ausgegangen, dass der Blitzeinschlag nicht in das Aufbereitungsgebäude erfolgte. Somit ist von einer Blitzeinwirkung auf Leitungen der Bürocontainerstellfläche durch einen nahen, nicht genau lokalisierten Blitzeinschlag auszugehen. Mechanische oder thermische Spuren einer Blitzeinwirkung waren nicht erkennbar.

Die unmittelbaren Auswirkungen des Einschlags umfassten durch Überspannung bedingte Ausfälle von Komponenten der Brandmeldeanlage. Insgesamt waren 48 Brandmeldelinien betroffen. Die Brandmeldezentrale befindet sich in der obersten Etage des Aufbereitungsgebäudes in unmittelbarer Nähe zum Bürocontainerstellplatz. Die Schäden wurden laut Betreiber durch Einkopplungen der durch die Blitzeinwirkung erzeugten Überspannung auf noch bestehende Leitungen des zuvor entfernten Bürocontainers hervorgerufen. Die Leitungen zur Energieversorgung waren freigeschaltet. Die Brandmeldeleitung war noch mit der Brandmeldezentrale im Aufbereitungsgebäude verbunden. Es gab keine Auswirkungen für den Teil der Brandmeldeanlage, der innerhalb des Anlagenbereichs angeordnet ist, in dem die stillgelegten Primärkreisbauteile eingeschlossen sind. Nach Informationen des Betreibers gibt es keinen Überspannungsschutz für die Brandmeldeanlage, die bereits nach der Stilllegung der Anlage installiert und danach durch weitere Meldeschleifen von 15 auf ca. 60 Meldelinien erweitert wurde. Außerdem gelangte die Überspannung über parallelverlegte Leitungen im Erdreich auch zu Brandmeldeschleifen in den benachbarten Erdgasblöcken.

Konkret verursachte die Überspannung den Ausfall von Bedienfeldern, verschiedenen Baugruppen, Schnittstellenmodulen und Meldern.

Als Vorkehrungen gegen eine Wiederholung gibt der Betreiber eine nicht näher spezifizierte Optimierung des Überspannungsschutzes an. Nachdem die Anlage stillgelegt worden war, minimierte der Betreiber die Brandlasten der Anlage, um für möglichst viele Anlagenbereiche einen Brandausschluss zu erreichen. Mit dem Beginn der Entsorgungsmaßnahmen wurden teilweise neue Komponenten (z. B. Bürocontainer, Abwassersammelanlagen usw.) eingerichtet und das Konzept des Brandausschlusses wurde nicht weiterverfolgt. Es wurden weitere Brandmeldelinien installiert. Außerdem wurde an den Gebäuden nur noch ein äußerer Blitzschutz in Form von Blitzfangeinrichtungen und

Ableitungen zur Erde vorgesehen, sodass es keinen inneren Blitzschutz, beispielsweise in Form eines Überspannungsschutzes einzelner Leitungen, gibt.

4.1.2 Einschlag außerhalb des Anlagengeländes

Abschaltung von Hauptnetzanschluss, Generator und Reaktor aufgrund eines Blitzeinschlags (1982)

Während des Leistungsbetriebs der Anlage kam es durch einen Blitzeinschlag zur Abschaltung des Hauptnetzanschlusses, des Generators und Reaktors. Der Einschlag erfolgte im 220-kV-Netz zwischen der Anlage und der einige Kilometer entfernten Netzschaltanlage. Infolgedessen kam es durch das Ansprechen des Leistungsdifferential-schutzes zur Öffnung des Netzschalters in der Netzschaltanlage und im Kraftwerk und weiterhin zum Lastabwurf auf Eigenbedarf. Die Schalterstellung des Leistungsschalters in der Netzschaltanlage wurde über ein Signalkabel an die Anlage übermittelt. Auf diesem Signalkabel wurde als Folge des Blitzeinschlags eine Überspannung induziert, die dazu führte, dass mehrere Elektronikarten der betrieblichen Steuerung zerstört wurden. Die Überspannung auf dem Signalkabel zerstörte Sicherungen, zur Begrenzung von Überspannungen eingebaute Zenerdioden, die das Signal verarbeitende Baugruppe, drei benachbarte Steuerungsbaugruppen in der gleichen Zeile des Geberschranks, sowie vier Baugruppen in einem weiteren Elektronikschrank. Die Zerstörungen hatten eine nicht vorgesehene Umschaltung des Generatorspannungsreglers von Automatik auf Handbetrieb zur Folge. Durch die Entlastung des Blockgenerators und die für Volllast ausgerichtete Einstellung der Spannungsregelung, die aufgrund der Umschaltung des Generatorspannungsreglers auf Handbetrieb vorlag, kam es zum Ansprechen des Generatorspannungssteigerungsschutzes und somit zum Öffnen des Generatorschalters. Durch das Reaktorschutzsystem wurde aufgrund des Einbruchs der Spannung auf den Notstromschienen, der Notstromfall erkannt und alle Notstromdieselgeneratoren auslegungsgemäß gestartet. Weiterhin wurde RESA und TUSA angeregt.

Die Auswirkungen des Blitzeinschlags beschränkten sich auf die betriebliche Steuerung bzw. die Spannungsregelung des Generators. Sicherheitstechnisch relevante leittechnische Einrichtungen waren nicht betroffen.

Da bis zum Ereignis kein ausreichender Schutz der betrieblichen Steuerung gegen Spannungsüberhöhungen auf Signalkabeln bestand, die von externen Schalt- und Ver-

teilungsanlagen auf das Anlagengelände der betroffenen Anlage führen, wurde als Vorkehrung gegen die Wiederholung eines solchen Vorfalls die Ertüchtigung des Überspannungsschutzes im Bereich der Signalkabel vorgesehen. Außerdem wurde bezüglich der Umschaltung auf das Reservenetz vorgesehen, als Anregekriterium für eine Schnellabschaltung, die gemessene Unterspannung auf der Eigenbedarfsschiene zu verwenden, sodass bei einem Ausfall des Netzanschlusses und gleichzeitigem Misslingen des Lastabwurfs auf Eigenbedarf, durch die rechtzeitige Schnellumschaltung auf das ggf. vorhandene Reservenetz, eine Anforderung der Notstromdiesel vermieden werden kann.

4.1.3 Sonstige Ereignisse

Bei den folgenden Ereignissen fand der Blitzeinschlag entweder außerhalb des Anlagengeländes statt oder konnte nicht genau ermittelt werden. Darüber hinaus liegen für die jeweiligen Ereignisse nur wenige Informationen vor. Insgesamt führten die durch die Blitzeinwirkungen erfolgten Auswirkungen, zu auslegungsbedingt abgedeckten Maßnahmen in Bezug auf die sicherheitstechnisch relevanten Systeme der Anlage, sofern diese betroffen waren. Die Ereignisse werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

Bei einem Ereignis kam es im Jahr 1980 infolge eines Blitzeinschlags an einem unbekanntem Ort zur Auslösung eines 20-kV-Leistungsschalters durch einen Überstrom und anschließend zur TUSA durch einen damit einhergehenden Einbruch der Netzspannung in einem Kernkraftwerk. Acht Sekunden später erfolgte über das Kriterium „Neutronenfluss hoch“ eine RESA. Vorkehrungen gegen eine Wiederholung wurden nicht abgeleitet.

Bei einem weiteren Ereignis kam es im Jahr 1986 zu einem Blitzeinschlag in eine der Phasen des 220-kV-Reservenetzanschlusses einer Anlage. Die Anlage befand sich in Revision und aufgrund von Wartungsarbeiten war der Hauptnetzanschluss außer Betrieb. Da zwei der Notstromdieselaggregate wegen Wartungsarbeiten freigeschaltet waren, erfolgte die Versorgung auslegungsgemäß über die restlichen Notstromdieselaggregate. Nach der automatischen Zuschaltung durch das Dieselizehschaltprogramm gingen zwei Kältekompressoren über eine Störabschaltung außer Betrieb. Nach Angaben des Betreibers kam es durch den Blitzeinschlag zu einem Erdschluss und einem Spannungseinbruch, der sich auf die 10-kV-Anlagen des Blocks übertrug und somit auch die 10-kV-Motoren der Kältekompressoren beeinträchtigte, was zu einer Beschädigung

an Kupplung und Getriebe der Kältekompressoren führte. Zur Vorkehrung gegen Wiederholung sollten die Kupplungen der notstromversorgten Kältekompressoren modifiziert werden, um zukünftig ähnliche Ausfälle auszuschließen.

Bei einem weiteren Ereignis kam es 1989 mutmaßlich durch eine Überspannung infolge eines Gewitters bei der Anlage zu einer Störung an einer Erdbebenmessstelle im Freifeld. Die Meldung der Erbebenmessstelle ist nicht auf ein Erdbeben zurückzuführen, sondern auf defekte Transistoren eines Beschleunigungsmessers, was auf eine Überspannung infolge eines Gewitters zurückgeführt wurde. Als Vorkehrung gegen Wiederholung sollten bei den entsprechenden Erdbebenmessstellen Überspannungsableiter eingebaut werden.

Ein weiteres Ereignis betrifft ebenfalls eine Erdbebenmessstelle im Freifeld der Anlage. Auch in diesem Fall wurden Überspannungen infolge von Gewittern als Ursache für die fehlerhafte Anregung der Meldung der Erdbebenmessstelle angenommen und die Ausrüstung mit Überspannungsableitern als Maßnahme gegen Wiederholung vorgesehen.

Bei einem Ereignis wurde 1998 durch einen Blitzeinschlag in die zur Anlage führende 220-kV-Freileitung ausgelöst. Die dadurch verursachte Überspannung verursachte das Ansprechen des Generatorschutzes, eine Schnellumschaltung auf das 110-kV-Reservenetz und eine TUSA. Auslegungsgemäß wurden dabei zur Entlastung des Eigenbedarfs einige große Verbraucher (u. a. Hauptkühlmittelpumpe und Kühlturmventilatoren) abgeschaltet. Da sich die Anlage kühlwasserseitig vor der Störung im geschlossenen Kühlturm-Kreislaufbetrieb befand, erhöhte sich fortlaufend die Temperatur des Hauptkühlmittels aufgrund der durch die Abschaltung der Kühlturmventilatoren anfallenden Wärme. Durch das Schichtpersonal wurde im weiteren Verlauf eine RESA ausgelöst, jedoch kam es durch den erhöhten Druck zum Abblasen des Dampfes über das Dach. Nach der Stabilisierung der Anlage, kam es bei der Rückschaltung der Eigenbedarfsversorgung vom Reservenetz auf das Hauptnetz, aufgrund einer temporären Unterspannung zum Start von zwei Notstromdieselaggregaten. Dies wurde dadurch verursacht, dass der Spannungsregler des Blocktransformators zwischenzeitlich unbemerkt auf Handbetrieb gewechselt war, wofür im Nachhinein keine Ursache festgestellt werden konnte. Da das Verhalten der Anlage auslegungsgemäß verlief und alle Sicherheitseinrichtungen fehlerfrei funktionierten, wurden neben der genauen Analyse des Ereignisses keine direkten Maßnahmen gegen eine Wiederholung abgeleitet.

Die restlichen identifizierten Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung weisen nur eine geringe Signifikanz für das Projekt auf, da hier zwar Blitzeinwirkungen genannt sind, diese aber keine wesentlichen Folgen für den Betrieb hatten und/oder keine weiteren Informationen verfügbar sind. Es kam bei dem Großteil dieser restlichen Ereignisse (vermutlich) aufgrund von Blitz- oder Gewittereinwirkungen zu Störungen wie beispielsweise Erdschlüssen oder Ausfällen im 20-kV-, 110-kV-, 220-kV-, 380-kV- oder 400-kV-Netz, sowie generell zu netzseitigen Spannungseinbrüchen oder Störungen in der Umspann- oder Schaltanlage des Netzbetreibers.

Blitzeinschläge in der Nähe von Freileitungen

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Frage gelegt, ob es Betriebserfahrung zu Auswirkungen auf Kernkraftwerke infolge von Blitzeinschlägen in der Nähe von Freileitungen gibt. Im Rahmen der Recherche stellten sich die Angaben zu den Einschlagsorten der Blitze für eine derartige Untersuchung als zu ungenau heraus. Wie in den vorherigen Kapiteln aufgeführt wurde bei einem Teil der Ereignisse der Einschlagsort eines Blitzes explizit genannt (z. B. „Blitzeinschlag in das 110-kV-Netz“), diese Ereignisse konnten für eine Untersuchung möglicher Blitzeinschläge in der Nähe von Freileitungen somit ausgeschlossen werden. Bei weiteren Ereignissen wurden allgemeine Aussagen wie „Gewittereinwirkung“, „infolge Gewitter“ oder „Blitzeinwirkung vom Netz“ getroffen, die keinen Schluss auf den genauen Einschlagsort eines Blitzes zulassen. Teilweise wird zudem explizit aufgeführt, dass der genaue Einschlagsort des Blitzes nicht bekannt ist.

Es ist ersichtlich, dass sich die Mehrheit der meldepflichtigen Ereignisse, die in Zusammenhang mit Blitzeinwirkungen stehen, bereits vor mehreren Jahrzehnten ereignet haben. Die aus diesen meldepflichtigen Ereignissen erlangten Erfahrungen sind zum Teil in die Überarbeitung der einschlägigen Regeln des KTA eingeflossen. Wie bereits in Kap. 3.3.6 in Bezug auf den netzseitigen Eintrag von Überspannungen besprochen, haben sich die Anforderungen an die Blitzschutzauslegung von deutschen Kernkraftwerken im Laufe der Jahre geändert. Als weiteres Beispiel für eine Anpassung der Blitzschutzauslegung aufgrund gewonnener Erkenntnisse sind Vorgaben an die Maschenweite der Fangmaschen zu nennen. So wird beispielsweise in der aktuellen Fassung (2017) der Regel des KTA 2206 für direkt auf dem Gebäudedach aufliegende Fangmaschen (Abschnitt 4.2.2 „Fangeinrichtungen“, Wickel (2)) sowie für die Ableitungen und Querverbindungen von Gebäuden ohne Metallfassaden (Abschnitt 4.2.3.1 „Ableitungen – Gebäude ohne Metallfassaden“, Wickel (1)) eine Maschenweite von 5 m vorgeschrieben.

Im Vergleich dazu war in älteren Fassungen der Regel des KTA 2206 (z. B. aus dem Jahr 1992 /KTA 92/) eine Maschenweite von 10 m für die Fangeinrichtungen zulässig. Weitergehende Erkenntnisse für Anforderungen an die Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken lassen sich aus der durchgeführten Auswertung von Betriebserfahrung in deutschen Kernkraftwerken nicht ableiten.

4.2 Ereignisse in ausländischen Anlagen

Die Analyse der IRS-Datenbank lieferte 32 als potenziell relevant identifizierte Meldungen. Bei 15 der Meldungen war die Verbindung zum Stromnetz aufgrund von Blitz- oder Gewittereinwirkungen außerhalb des Kraftwerkgeländes gestört. Dies betraf z. B. 225-kV-, 345-kV-, 400-kV- oder 500-kV-Leitungen. In 14 der Meldungen wird von einem Blitzschlag innerhalb des Anlagengeländes berichtet. Dabei tragen drei Meldungen dieselbe Ereignisnummer, betreffen aber verschiedene Anlagen. Dasselbe gilt für zwei weitere zusammengehörige Meldungen, die zudem zwei Ereignisse in deutschen Kernkraftwerken betreffen und bereits in Kap. 4.1 betrachtet wurden. Die übrigen zwei Meldungen beinhalten Ereignisse, bei denen Blitzschläge in Übertragungsleitungen stattfanden, wobei aus dem Meldetext nicht ersichtlich ist, ob diese Einschläge auf dem Anlagengelände oder außerhalb des Anlagengeländes stattfanden. Bei einem weiteren Ereignis kam es zu einer Spannungstransiente im 70-kV-Netz, deren Auslöser vermutlich ein Blitzschlag war.

Anders als bei Meldungen zu Ereignissen in deutschen Kernkraftwerken, liegen der GRS zu ausländischen Ereignissen oft nur begrenzte Informationen vor. Im Folgenden ist eine repräsentative Auswahl der betrachteten Ereignisse dargestellt.

Blitzeinschlag in Hauptnetzleitung führt zu teilweisem Verlust der Netzanbindung

Im betroffenen Kraftwerksblock führte im Jahr 2014 ein Blitzeinschlag in der 500-kV-Hauptnetzleitung zu einem teilweisen Verlust der Netzanbindung. Hohe Kurzschlussströme an einer unsachgemäß hergestellten Verbindung eines Leistungsschalters regten Differentialschutzeinrichtungen an, führten zur Abschaltung des Eigenbedarfstransformators und damit zum teilweisen Verlust der externen Spannungsversorgung. Bei der Installation des Leistungsschalters durch den Netzbetreiber wurde eine Mutter fehlerhaft nicht eingebaut. Eine unsachgemäße Verifizierung sorgte dafür, dass das Fehlen der Mutter nicht entdeckt wurde.

Im Rahmen der Ursachenbehebung wurde die fehlende Mutter installiert und die primären und sekundären Schutzfunktionen des Transformators durch Tests verifiziert. Zudem wurde von Betreiberseite gegenüber der eingesetzten Fremdfirma die Bedeutung des Verifizierungsprozesses der Arbeit deutlich gemacht.

In Deutschland besitzen alle im Leistungsbetrieb befindlichen Anlagen zwei voneinander unabhängige externe Netzanbindungen sowie einen erdverlegten Notstrom-Netzanchluss. Fällt die Hauptnetzanbindung aus und befindet sich die Anlage im Leistungsbetrieb, erfolgt zunächst ein Lastabwurf auf Eigenbedarf. Damit liefert der Turbogenerator weiterhin den benötigten Eigenbedarf. Ist der Lastabwurf nicht erfolgreich, erfolgt die Umschaltung auf das Reservenetz. Ist auch das Reservenetz unverfügbar, werden vom Reaktorschutz automatisch die Notstromdieselaggregate gestartet.

Aus diesem Ereignis lassen sich keine neuen Erkenntnisse in Bezug auf die Blitzschutzauslegung gewinnen, da die Hauptursache fehlerhaft durchgeführte Arbeiten ist.

Ausfall der Zwangsumwälzpumpen mit Schwungradgeneratoren

Die betroffene Anlage wurde mit Volllast betrieben, als es im Jahr 2008 durch einen Blitzeinschlag 80 km vom Anlagengelände entfernt in einer 400-kV-Hochspannungseitung zu einem 3-phasigen Kurzschluss mit einer Dauer von 90 ms kam. Dadurch entstand eine kurze Unterspannung im 400-kV-Netz, die sich in die Eigenbedarfsversorgung der Anlage ausbreitete. Alle Einspeisegleichrichter zur Stromversorgung der Zwangsumwälzpumpen (ZUP) wurden als Folge der Netzstörung vom Gleichrichterschutz abgeschaltet. Die Gleichrichter der rotierenden Energiespeicher (Schwungrad mit Motorgenerator), die nach einem Ausfall der Stromversorgung die ZUPs für ca. 7 s mit Strom versorgen sollen, um den Auslauf der ZUPs zu verlängern, wurden durch den Gleichrichterschutz für die Energiespeicher ebenfalls abgeschaltet. Die ZUPs liefen deshalb schneller als vorgesehen aus. Die Reaktorleistung fiel auf ca. 40 % der Nennleistung. Aufgrund auftretender Reaktorleistungsschwingungen wurde ca. 3 min nach Ereigniseintritt eine RESA von Hand ausgelöst.

Die Abschaltung der Einspeisegleichrichter und der Gleichrichter für die Energiespeicher durch den Komponentenschutz der Gleichrichter entsprach zwar der Auslegung, aber die hier aufgetretene Spannungstransiente war in den Anforderungen zur Auslegung nicht berücksichtigt.

In Bezug auf die störungsbedingte Spannungstransiente ist das Ereignis auf deutsche Anlagen übertragbar. Im Rahmen der in Kap. 3.3.6 erwähnten Weiterleitungsnachricht 2006/07 wurden im Vorfeld zu diesem Ereignis bereits Empfehlungen zu extern und intern verursachten störungsbedingten Spannungstransienten gegeben und eine Untersuchung des VGB durchgeführt. Seit dem der WLN 2006/07 zugrundeliegenden Ereignis sind in deutschen Kernkraftwerken zum Teil Nachrüstungen, wie beispielsweise zusätzliche Schutzeinrichtungen zur Erfassung transienter Überspannungen auf den Eigenbedarfsschienen des Hauptnetz- und des Fremdnetzanschlusses eingebaut und in Betrieb genommen worden.

RESA und HD-Sicherheitseinspeisung hervorgerufen durch Blitzeinschlag

In der betroffenen Anlage trat im Jahr 2008 aufgrund eines Blitzeinschlags in eine Phase einer Übertragungsleitung eine Spannungstransiente auf. Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Anlage im Leistungsbetrieb. Die Transiente führte zum Ausfall von einer der zwei Hauptkühlmittelpumpen, wodurch eine RESA ausgelöst wurde. Des Weiteren kam es zu einer kurzzeitigen Unterbrechung der Spannungsversorgung von zwei Redundanzen der unterbrechungslosen 120-V-Wechselstromversorgung, wodurch eine HD-Sicherheitseinspeisung ausgelöst wurde. Der Ausfall der Hauptkühlmittelpumpe war auf eine Abschaltung durch Anregung des elektrischen Differentialschutzrelais für die Pumpe zurückzuführen.

Die kurzzeitige Unterbrechung der unterbrechungslosen 120-V-Wechselstromversorgung wird auf das Ansprechen eines Überspannungsschutzrelais in der Schutzeinrichtung für die Gleich- und Wechselrichter durch den Blitzeinschlag oder auf den Umschaltvorgang der Wechselrichter, der durch die Spannungstransiente ausgelöst wurde, zurückgeführt. Zur Versorgung der unterbrechungslosen 120-V-Wechselstromversorgung waren in der Anlage unterschiedliche Wechselrichter eingebaut. Durch das unterschiedliche Verhalten dieser Wechselrichter waren nur zwei der vier Redundanzen kurzzeitig spannungslos.

Wie in Kap. 3.3.6 bereits erläutert, wurden nach dem Ereignis am 25. Juli 2006 in der schwedischen Anlage Forsmark-1 im Rahmen der Weiterleitungsnachricht 2006/07 Empfehlungen zu extern und intern verursachten störungsbedingten Spannungstransienten gegeben. Zudem wurden vertiefte Untersuchungen des VGB durchgeführt.

Während eines Gewitters führen Spannungsspitzen im elektrischen Netz zu einer RESA aufgrund von nicht erfolgter Umschaltung auf Fremdnetz

Zum Zeitpunkt eines Gewitters im Jahr 2017 befand sich ein Block der betroffenen Anlage im Volllastbetrieb, als auf der Warte nicht näher spezifizierte Anzeichen für Spannungsspitzen im elektrischen Netz festgestellt wurden. Auf der Warte liefen diverse Meldungen der Schaltanlage auf. Zur Überprüfung der Transformatoren entsandte Operateure beobachteten eine orange leuchtende Stromschiene der Generatorableitung zu einem Maschinentransformator sowie Lichtbogen- und Funkenbildung. Es wurde eine manuelle TUSA ausgelöst, um den betroffenen Maschinentransformator vom Netz zu trennen. Die damit einhergehende automatische Umschaltung des Eigenbedarfs von den generatorversorgten Eigenbedarfs- auf die Anfahrtransformatoren funktionierte nicht. Dies führte zu einem Ausfall aller vier Hauptkühlmittelpumpen, was automatisch zu einer RESA-Anregung führte. Die Notstromdieselgeneratoren starteten auslegungsgemäß und versorgten die zugehörigen Notstromschienen. Alle sicherheitsrelevanten Systeme reagierten auslegungsgemäß.

Auf Grund von Verschleiß an einer flexiblen Verbindung in einer Phase der Generatorableitung, waren die laminierten Kontaktflächen stark erodiert. Dies führte zu erhöhtem Innenwiderstand und durch auftretende dielektrische Entladungen zu einer fortschreitenden Schwächung der Verbindung. Bei der beobachteten Netztransiente war es dann zur Trennung dieser Verbindung gekommen. Ursächlich für die nicht erfolgte Eigenbedarfsumschaltung war ein Versagen von Zeitrelais. Im Vorfeld des Ereignisses sind elektro-mechanische Relais des Herstellers Allen Bradley gegen elektronische Zeitverzögerungsrelais der Serie 237 des Herstellers Struthers Dunn ausgetauscht worden. Diese neuen Relais wiesen keinen Überspannungsschutz auf. Eine Spannungsspitze eines anderen Relais führte aufgrund des fehlenden Überspannungsschutzes zu einer induktiven Spannungstransiente in den betroffenen Zeitrelais und zu deren Ausfall. Als ursächlich für den Einbau der ungeeigneten Relais werden unzureichende Anweisungen für Änderungen am Schaltkreis der Eigenbedarfsumschaltung angegeben, die keine Hinweise auf eine höhere Anfälligkeit von elektronischen Bauteilen für induktive Spannungstransienten im Vergleich zu elektro-mechanischen Bauteilen enthalten. Hinzu kommen unzureichende Inbetriebnahmeprüfungen nach Einbau der Relais.

Die betroffene Phase der Generatorableitung wurde repariert. Es war geplant, die Instandhaltungs- und Inspektionsanweisungen der Generatorableitung und der Kabelkanäle zu überarbeiten. Die Relais des Hersteller Struthers Dunn wurden gegen Relais des

Herstellers Allen Bradley ausgetauscht. Als zusätzliche vorbeugende Maßnahme wurden Suppressions-/Freilaufdioden installiert. Diese sollen auch in die Schaltpläne eingetragen werden, um sicherzustellen, dass sie bei zukünftigen Arbeiten nicht entfernt werden.

Ein Notstromfall bedingt durch das erfolglose Umschalten des Eigenbedarfs auf die Anfahrtransformatoren ist aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus der elektrischen Energieversorgung nicht auf deutsche Anlagen übertragbar. Spezielle Anfahrtransformatoren gibt es in deutschen Anlagen nicht. Fällt der Maschinentransformator für die Versorgung des elektrischen Eigenbedarfs aus, erfolgt die Umschaltung kurz- oder langfristig auf das Reservenetz. Erst wenn auch das Reservenetz unverfügbar ist, werden vom Reaktorschutz auch in deutschen Anlagen automatisch die Notstromdieselgeneratoren gestartet.

Der Ausfall eines Relais der Firma Struthers Dunn aufgrund des fehlenden Überspannungsschutzes ist auf deutsche Anlagen nicht übertragbar, da nach Informationen der GRS in deutschen Anlagen keine Relais der Firma Struthers Dunn verwendet werden. Darüber hinaus fordert die Regel des KTA 3503 „Typprüfung von elektrischen Baugruppen der Sicherheitsleittechnik“ im Abschnitt 5.6 „Elektromagnetische- Verträglichkeits-Prüfungen (EMV)“ u. a., „dass der Prüfling durch die nach Datenblatt zulässigen leitungsgebundenen und feldgebundenen elektromagnetischen Beanspruchungen nicht in seiner Funktion unzulässig beeinträchtigt wird.“

Blitzeinschlag in Hochspannungsleitung führt zu manueller Schnellabschaltung und fehlerhaft offen gebliebenem Umleitstellventil

Durch einen anlagennahen Blitzeinschlag in die Hochspannungsleitungen kam es im Jahr 1991 zu einer Turbinenabschaltung und auslegungsgemäßen Reduktion der Reaktorleistung auf 35 %. Aufgrund von Ausfällen in der Leittechnik, die auf den Blitzeinschlag zurückgeführt wurden, blieben ein Umleitstellventil und ein Speisewasser-Schwachlastregelventil fälschlicherweise offen. Beide Ventile konnten auch manuell von der Warte aus nicht mehr angesteuert werden. Das offene Regelventil verursachte beim weiteren Absenken der Reaktorleistung eine Überfüllung des zugehörigen Dampferzeugers. Die Operateure beendeten die Transiente mit einer RESA. Bei der darauffolgenden starken Abkühlung des Primärkreises durch das offene Umleitstellventil lösten die Operateure das Frischdampf-Isolations-Signal aus. Danach konnten sie die Anlage in einen stabilen Zustand überführen.

Die Ausfälle in der Leittechnik wurden auf Blitzeinwirkungen zurückgeführt. Durch eine Blitzschutzauslegung gemäß der Regel des KTA 2206 sollen vergleichbare Schäden in deutschen Anlagen verhindert werden. Es lassen sich keine neuen Erkenntnisse für deutsche Anlagen ableiten.

Vermutlich durch Blitzschlag induzierte Überspannung in einer Hochspannungs-Überlandleitung führt zum Ausfall von sicherheitsrelevanter Elektronik

Die Anlage befand sich in Revision, wobei das 400-kV-Hauptnetz wegen Wartungsarbeiten abgekoppelt war und der Eigenbedarf der Anlage durch das 70-kV-Reservenetz gedeckt wurde. Während eines Gewitters kam es (vermutlich durch einen Blitzeinschlag) zu einer Spannungstransiente im 70-kV-Netz, die trotz vorhandener Überspannungsableiter durch die Anlage propagierte und auf zwei der unterbrechungsfrei versorgten 220/380-V-Schienen zu Komponentenausfällen führte. Das betroffene 70-kV-Netz verfügt im kraftwerksnahen Bereich, in dem sich der Blitzeinschlag wahrscheinlich ereignet hat, über kein Erdseil als Blitzschutz.

Die beiden betroffenen unterbrechungsfreien 220/380-V-Schienen wurden aufgrund von Wartungsarbeiten zum Ereigniszeitpunkt durch die Batterien versorgt. Sowohl die Einspeisemöglichkeit der Schienen über Thyristoren wie auch über mechanische Schalter waren geöffnet. Durch die Spannungsspitze kam es zu einer Beschädigung der Thyristoren, infolge derer diese zumindest teilweise durchschalteten. Dies führte dazu, dass nun „rückwärts“ d. h. von der Gleichstromschiene über den Wechselrichter und durch den Transformator Leistung auf die 660-V-Notstromschiene floss. Daraufhin kam es zum Einbruch der Spannung auf der betroffenen unterbrechungsfreien 380/220-V-Schiene und nach einiger Zeit zur Überlastung der 660/380-V-Transformatoren in den Bypass-Leitungen in zwei Redundanzen. Nachdem diesbezügliche Meldungen aufgelaufen waren, wurde die Umschalteinrichtung von Hand außer Betrieb genommen. Durch die Unterspannung auf der 220-V-Schiene kam es zu kurzfristigen Fehlfunktionen bei mehreren sicherheitstechnisch wichtigen Verbrauchern, u. a. bei Meldeeinrichtungen auf der Warte, Kommunikationssystemen und Notfallbeleuchtungen.

Das Ereignis stellt einen gemeinsam verursachten Ausfall (GVA) dar, bei dem es zu gleichzeitigen Fehlfunktionen in 2 Strängen der Notstromversorgung und entsprechenden Folgeausfällen von sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten und Einrichtungen gekommen ist. Auch bei den beiden nicht betroffenen Strängen bestand das gleiche

GVA-Potenzial, das aber wahrscheinlich aufgrund der unterschiedlichen Schienenbelastungen zu keinen Auswirkungen führte.

Aufgrund der unterschiedlichen anlagenspezifischen Situation in Bezug auf den Aufbau der Eigenbedarfsversorgung ist das vorliegende Ereignis bzw. dessen Ursache nicht auf deutsche Anlagen übertragbar. Auch eine unmittelbare Übertragbarkeit des Fehlermechanismus auf deutsche Anlagen ist nicht gegeben, da vergleichbare elektronische Schalter zwischen notstromgesicherter und unterbrechungsfreier Drehstromversorgung nicht verwendet werden. Wie in Kap. 3.3.6 erläutert, fordert die Regel des KTA 3701 „Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken“ /KTA 14/, dass „Extern und intern verursachte störungsbedingte elektrische Transienten oder Fehlerzustände (z. B. [...] Blitzeinwirkungen auf Freileitungen) [...] keine unzulässige Beeinträchtigung der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen zur Folge haben [dürfen].“.

Blitzeinschlag in eine Anlagensirene führt zu Ausfall von 28 Sirenen der Anlage

Während einer automatischen Abfrage der Frühwarnsirene der betroffenen Anlage stellte sich im Jahr 2007 heraus, dass nicht alle Sirenen auf das automatische Signal reagierten. Eine manuelle Überprüfung ergab, dass 28 Sirenen nicht reagiert hatten. Die Außerbetriebnahme des Radio-Transponders²⁸ einer defekten Sirene stellte die Betriebsfähigkeit der anderen 27 Sirenen wieder her.

Es stellte sich heraus, dass die defekte Sirene am Tag zuvor von einem Blitzschlag getroffen worden war. Dies führte dazu, dass ihr Transponder in einen Dauersendemodus gewechselt war. Das hierdurch gesendete Radiowellen-Signal blockierte die automatischen Signale der anderen 27 betroffenen Sirenen.

Die Ursache des hier betrachteten Ereignisses ist ein Blitzeinschlag in eine Sirene auf dem Anlagengelände. Es liegen keine Informationen über die Blitzschutzauslegung und im Nachgang durchgeführte Arbeiten an der Blitzschutzanlage vor. Daher kann das Ereignis in Bezug auf den Blitzschutz nicht abschließend bewertet werden.

²⁸ Ein Transponder ist ein Gerät, das eingehende Signale empfängt und automatisch beantwortet oder weiterleitet.

Vermuteter Blitzeinschlag in Kamin führt zu RESA

Der betroffene Kraftwerksblock befand sich in Vollast, als ein Alarm folgende Meldungen anzeigte:

- Hoher Neutronenfluss,
- Neutronenfluss in drei APRM29-Kanälen hoch – hoch/Equipment inoperabel,
- Neutronenfluss in drei weiteren APRM-Kanälen hoch – hoch/Equipment inoperabel und
- Automatische RESA.

Eine automatische RESA wurde ausgelöst. Zum Ereigniszeitpunkt gab es ein anlagennahes Gewitter. Als ursächlich für das Ereignis wird ein Blitzeinschlag in den gemeinsamen Kamin von zwei Blöcken des Kraftwerks vermutet. Im Falle eines Blitzeinschlags in die Fangstange des gemeinsamen Kamins, fließt der größte Teil des Blitzstroms über den Kamin in die Abschirmung. Ein Teil des Blitzstroms fließt jedoch über den Abluftkanal durch Bewehrungsstäbe und Ähnliches in die Außenwände des Turbinen- und Reaktorgebäudes der beiden betroffenen Blöcke. Es wird vermutet, dass in dem vorliegenden Ereignis durch den Strom in den Außenwänden ein Strom in dem Messkabel des Neutronenfluss-Messsystems in einem der betroffenen Blöcke induziert wurde. Die betroffenen Messkabel von drei APRM-Kanälen sind in räumlicher Nähe zur Wand des Turbinengebäudes verlegt. Die Überlagerung des tatsächlichen Signalstroms des Messsystems (ca. einige hundert μA) mit dem durch den Blitzstrom induzierten Strom, führte zur Anregung eines Signals für hohen Neutronenfluss ($> 120\%$) in den drei betroffenen APRM-Kanälen. Die Kabel der drei anderen betroffenen APRM-Kanäle befinden sich in räumlicher Entfernung zu den betroffenen Kabeln an der gegenüberliegenden Wand.

Durch Untersuchungen wurde in der Vergangenheit gezeigt, dass Blitzströme einen Strom in den Messkabeln der Neutronenflussmesssystems induzieren und somit ein falsches Signal hervorrufen können.

²⁹ APRM - Average Power Ramp Monitor: ein Anzeigesystem für die kontinuierliche Anzeige der durchschnittlichen Reaktorleistung.

Untersuchungen weiterer Kabel der Messinstrumentierung von einem der beiden betroffenen Blöcke ergaben, dass lediglich die Kabel des Neutronenflussmesssystems anfällig für Fehlfunktionen aufgrund von durch Blitzströmen induzierten Strömen sind.

Als Vorkehrung gegen Wiederholung des Ereignisses sollen die Kabel des Neutronenflussmesssystems durch ein Aluminiumschild geschützt werden, um die Auswirkungen von Blitzschlägen auf das Messsystem zu minimieren.

In dem hier vorliegenden Ereignis führte vermutlich das Abfließen des Blitzstroms durch Bewehrungsstäbe u. Ä. nach einem in die Fangstange des Abluftkamins eingeschlagenen Blitz zur Induktion von Strömen in einem Messkabel des Neutronenflussmesssystems und somit zu einem fehlerhaften Messsignal, wodurch eine RESA ausgelöst wurde. Blitzeinschläge in die Blitzschutzanlage sind ein erwarteter Vorgang.

In Deutschland ist es laut der Regel des KTA 2206 zulässig die Bewehrung (sofern sie leitfähig verbunden ist und weitere Anforderungen, wie beispielsweise an ihre Verschweißung, erfüllt) als Teil der Ableitung zu nutzen. Somit wäre auch in deutschen Kernkraftwerken eine Ableitung des Blitzstroms durch die Bewehrungsstäbe möglich. Bei Bauteilen aus bewehrtem Beton ist diese Bewehrung zudem als Schirmung heranzuziehen und entsprechend auszulegen. In Bezug auf Kabel der Leittechnik führt die Regel des KTA 2206 unter Abschnitt 5 „Nachweis des Schutzes gegen blitzbedingte Überspannungen“ aus: „Nach Schirmung der Gebäude sowie Verlegung und Schirmung der Kabel nach dieser Regel ist eine unzulässig hohe blitzbedingte Spannungseinkopplung auf den Kabelstrecken innerhalb der Gebäude nicht zu besorgen.“

Blitzeinschlag in einen 24-kV Leiter führt zu RESA

Der betroffene Block der Anlage befand sich im Vollastbetrieb, als ein Blitz in eine Phase eines 24-kV-Leiters einschlug. Dies führte zu einem Kurzschluss der Abschirmung des Leiters mit den stromführenden Teilen. Aufgrund der Überspannung, die durch diesen einfachen Kurzschluss entstand, bildete sich ein zweiphasiger Kurzschluss des Leiters heraus. Die 24-kV-Zuleitung eines Hilfsstromtransformators wurde beschädigt und das Schutzsystem schaltete den Betrieb der Zuleitungen zweier Sammelschienen ab. Das automatische Anfahren einer 6-kV-Sammelschiene im Standby-Betrieb wurde erfolgreich durchgeführt. Die Schutzeinrichtung für einphasige Erdschlüsse am Turbogenerator wurde erfolgreich ausgelöst. Ein Leistungseinbruch an einem Antrieb des Kühl- und Reinigungssystems der Neutronen-Reflektoren (RCPS) führte zum Auslösen einer

RESA. Im weiteren Verlauf des Ereignisses löste das Schutzsystem aufgrund eines Druckabfalls im Zulauf eine Abschaltung der Pumpen des Speisewassersystems des Primärkreises aus. Die Pumpen des RCPS wurden wieder in Betrieb genommen und der Reaktor in den Zustand heiß unterkritisch überführt.

Ursächlich für das Ereignis war die Beschädigung eines Leiters durch einen Blitzschlag, in Kombination mit der Durchfeuchtung der Isolierung des Leiters aufgrund von Wasserdurchlässigkeit der Abschirmung. Zudem war das Blitzschutzsystem unzureichend. Ursächlich für die Unterbrechung der Stromversorgung der RCPS-Pumpen und die darauffolgende RESA war das Öffnen der Leistungsschalter aufgrund von Stromspitzen in Kombination mit Designfehlern der Platinen der RCPS-Stromversorgung. Die Fehlabschaltung des Speisewassersystems des Primärkreises wurde durch einen Defekt in den Drucksensoren am Pumpeneingang ausgelöst. Hinzu kam eine unzureichende Überwachung der Betriebsparameter des betroffenen Systems.

Nach dem Ereignis hat der Betreiber ein modernes System zur Fehlererkennung an elektrischen Geräten implementiert. Zudem wurden der Hersteller des Leiters und die Designfirma der Blitzschutzanlage kontaktiert (wobei der Meldetext des Ereignisses keine Informationen über daraus folgende Maßnahmen enthält). Des Weiteren sollen die WKPs des Speisewassersystems des Primärkreises überarbeitet werden. Darüber hinaus sollen auch Arbeitsanweisungen und Dokumentationen überarbeitet werden.

In dem hier vorliegenden Ereignis hat ein Blitzeinschlag in einen Leiter der Anlage aufgrund eines unzureichenden Blitzschutzsystems in Kombination mit dem unzureichend designten Leiter zu einem Kurzschluss geführt. In Kombination mit anderen Fehlern hat dies zu einer RESA geführt. In deutschen Kernkraftwerken sollen die Einhaltung der Anforderungen der Regel des KTA 2206 in Bezug auf Planung, Auslegung und Prüfung der Blitzschutzauslegung das Vorhandensein eines unzureichenden Blitzschutzsystems verhindern.

Die Auswertung der IRS-Meldungen im Zusammenhang mit Blitzeinschlägen haben gezeigt, dass es durch unzureichende Blitzschutzauslegung zu Fehlfunktionen von sowie Schäden an Komponenten oder Systemen gekommen ist. Ein auslegungsgemäßer Blitzschutz soll derartige Schäden und Fehlfunktionen verhindern. Die Ereignisse zeigen die Bedeutung eines auslegungsgemäßen Blitzschutzes für den sicheren Anlagenbetrieb. Weitergehende Erkenntnisse für Anforderungen an die Blitzschutzauslegung von Kernkraftwerken lassen sich nicht ableiten.

5 Auswertungen und Analysen

Ziel dieses Arbeitspunktes ist es zu untersuchen, inwieweit sich aus Daten über in Deutschland und an Kraftwerkstandorten indirekt gemessenen, d. h. aus gemessenen Feldstärken berechneten Blitzsichelströmen und der Beziehung zwischen tatsächlich aufgetretenen und berechneten Blitzströmen, Aussagen bezüglich der Einhaltung der in der Regel des KTA 2206 für die Auslegung angegebenen Stromsichelwerte ableiten lassen. Hierzu werden zunächst die relevanten probabilistischen Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen bestimmt. Dann wird untersucht, inwieweit sich aus den Daten Aussagen über die Einhaltung dieser Kriterien ableiten lassen.

5.1 Probabilistische Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Einwirkungen von außen

Sowohl im deutschen als auch im internationalen Regelwerk sind probabilistische Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Einwirkungen von außen (EVA) genannt.

Im deutschen Regelwerk existieren keine einheitlichen Kriterien für alle möglichen Einwirkungen von außen. Für bestimmte Einwirkungen von außen (Überflutung, Wind) sind speziell Kriterien festgelegt. Für Blitzeinwirkung sind keine quantitativen Kriterien im deutschen Regelwerk enthalten.

Im relevanten internationalen Regelwerk existieren quantitative Anforderungen der Western European Nuclear Regulators Association (WENRA). Im Guidance Document Issue T: Natural Hazards – Head Document /WEN 15/ wird in T4.2 allgemein gefordert:

“The exceedance frequencies of design basis events shall be low enough to ensure a high degree of protection with respect to natural hazards. A common target value of frequency, not higher than 10^{-4} per annum, shall be used for each design basis event....”

Dies wird im Folgenden weiter erläutert:

“It is recognised that the quality and quantity of available data for different hazards will mean that a different approach will be required for each design basis event. Where there

is a probabilistic model to define the relationship between the hazard severity and frequency the design basis parameters shall be selected from an event with an exceedance frequency not higher than 10^{-4} /annum with due consideration of uncertainties. The use of a confidence level higher than the median of the hazard curve is expected. ...”

Somit wird eine Rate von nicht höher als 10^{-4} pro Jahr pro äußere Einwirkung unter Berücksichtigung der Unsicherheit gefordert. Es ist nicht konkretisiert, wie die Unsicherheit genau zu berücksichtigen ist. Es wird eine konservative Betrachtung verlangt, wobei der Grad der Konservativität jedoch nicht näher spezifiziert wird.

Dies lässt sich dahingehend zusammenfassen, dass eine Auslegung, die – bezogen auf eine einzelne Einwirkung – mit einer Rate von weniger als 10^{-4} pro Jahr bei eindeutig konservativer Rechnung überschritten wird, in Übereinstimmung mit dem WENRA-Regelwerk ist. Somit ist zu untersuchen, ob die Rate auslegungsüberschreitender Blitze, die ein Kraftwerk betreffen, bei eindeutig konservativer Schätzung weniger als 10^{-4} pro Jahr beträgt.

5.2 Berechnung der Rate auslegungsüberschreitender Blitzscheitelstromstärken und dazu verwendete Daten und Informationen

Im Folgenden ist die grundsätzliche Berechnungsweise dargestellt, um aus den zur Verfügung stehenden Daten und Informationen die Rate auslegungsüberschreitender Blitze auf ein Kernkraftwerk abzuschätzen. Es ist zu betonen, dass dies keine Berechnung ist, die für eine konkrete Anlage als Grundlage zur Bewertung des Risikos der Einwirkung von Blitzen bzw. der Auslegung des Blitzschutzes dienen kann.

Die zu ermittelnde Kenngröße, die abschließend mit Referenzgrößen zu vergleichen ist, ist die Rate des Einwirkens auslegungsüberschreitender Blitze auf die Anlage.

Diese ergibt sich aus dem Auslegungsscheitelstromwert und der scheitelstrombezogenen Blitzrate auf die Anlage.

Die scheitelstrombezogene Blitzrate auf die Anlage ergibt sich aus der scheitelstrombezogenen Blitzrate pro Fläche am Anlageort und der so genannten Einfangfläche. Die Einfangfläche setzt sich zusammen aus der Grundfläche der Anlagengebäude und – für direkte Einwirkungen – derjenigen Umgebungsfläche, in die Blitze aufgrund der

Gebäudehöhe nicht, sondern stattdessen in das Gebäude einschlagen bzw. – für indirekte Einwirkungen – bei der dort einschlagende Blitze (z. B. durch magnetische Felder) zu erheblichen Einwirkungen auf die Anlage führen.

Die scheinbarstrombezogene Blitzrate pro Fläche am Anlagenort ergibt sich aus der Verteilung der Stromscheitelwerte am Anlagenort und der Blitzrate am Anlagenort.

Die Rate der Blitze pro Fläche vor Ort lässt sich aus den Daten des Blitz Informationsdienst von Siemens (BLIDS) abschätzen. Alternativ enthält DIN EN 62305-2 Informationen zur Bestimmung dieser Rate.

Die Einfangfläche kann ebenfalls nach DIN EN 62305-2 unter Verwendung von Informationen über die Anlagengebäude abgeschätzt werden. Alternativ kann eine genauere Betrachtung durchgeführt werden, die berücksichtigt, dass die Einfangfläche von Scheitelstrom abhängig ist.

Die Verteilung der Stromscheitelwerte kann mithilfe der Daten aus der Datenbank des Blitz Informationsdienst bestimmt werden. Hierbei ist einerseits zu beachten, dass diese Verteilung grundsätzlich vom Anlagenort abhängig sein kann. Informationen hierzu lassen sich den Verteilungen der Blitzscheitelstromstärken an Anlagenorten und in Deutschland insgesamt entnehmen.

Andererseits beruhen die in der Datenbank des Blitz Informationsdienst enthaltenen Daten auf indirekten Messungen. Somit ist die Abweichung zwischen den Ergebnissen der indirekten Messung und der tatsächlichen Blitzscheitelstromstärken, wie sie bei einer direkten Messung gemessen würden, zu berücksichtigen. Die Auswirkung dieser Messunsicherheit kann mithilfe verfügbarer Vergleichsdaten der Stromscheitelwerte bei direkter und indirekter Messung untersucht werden (vgl. /BIR 17/).

In Abb. 5.1 sind die verschiedenen in die Berechnung einfließenden Einflussgrößen, Unsicherheitsquellen und Informationsquellen in der Übersicht dargestellt. In den folgenden Kapiteln (5.2.1 – 5.2.17) werden die einzelnen Einflussgrößen, Unsicherheitsquellen und Informationsquellen zur Bestimmung der Rate auslegungsüberschreitender Blitze ausführlich betrachtet. Hierbei ist jedem „Kästchen“ aus Abb. 5.1 ein eigenes Kapitel gewidmet. Die in Abb. 5.1 dargestellte Abhängigkeitsstruktur ist komplex und lässt sich nicht in eine lineare Struktur überführen. Da es somit keine aus der Abhängigkeitsstruktur fol-

gende Reihenfolge der Erläuterungen der Einflussgrößen, Unsicherheitsquellen und Informationsquellen gibt, existiert keine Reihenfolge, die ein aufeinander aufbauen der verschiedenen Inhalte beim Lesen ermöglichen würde. Vielmehr ist es erforderlich, die Abhängigkeiten anhand von Abb. 5.1 nachzuverfolgen. Um dies leicht zu ermöglichen, werden die folgenden Abschnitte alphabetisch gegliedert.

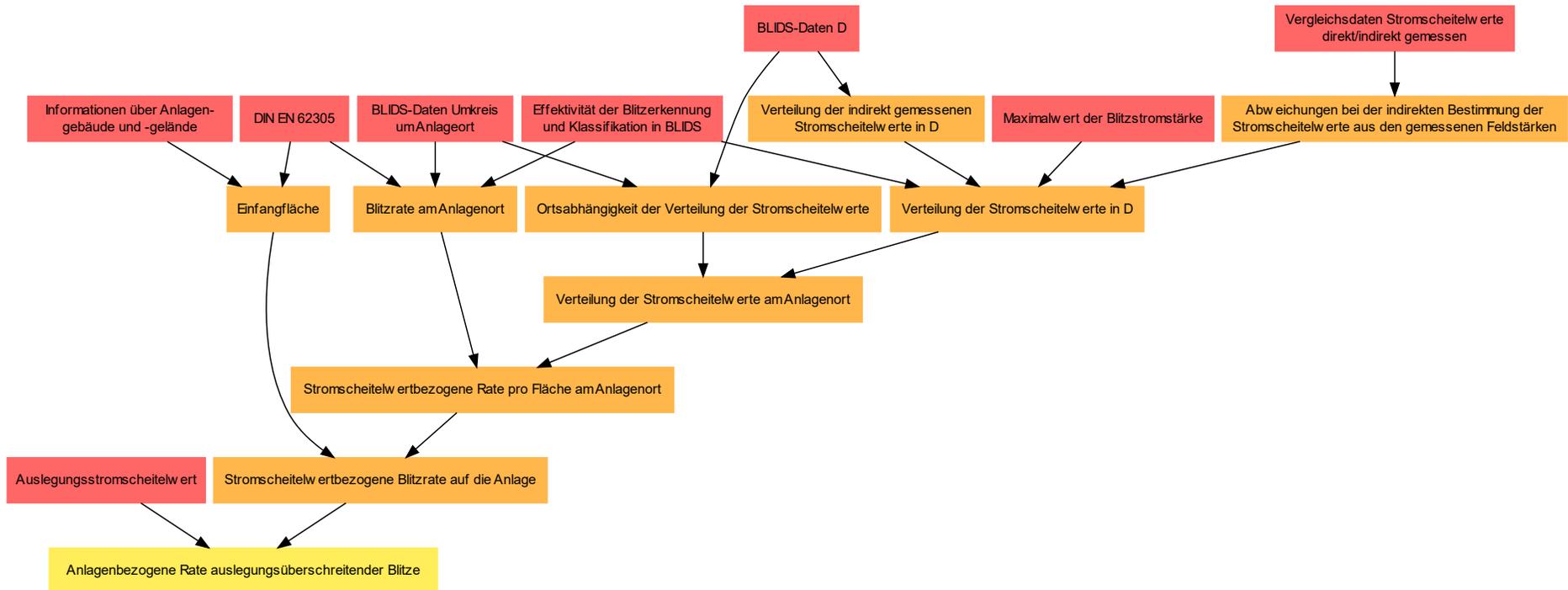


Abb. 5.1 Betrachtete Einflussgrößen, Unsicherheitsquellen und Informationsquellen zur Bestimmung der Rate auslegungsüberschreitender Blitze

Informationsquellen sind rot, hieraus bestimmte abgeleitete Größen orange und die Zielgröße gelb dargestellt.

5.2.1 Abweichungen bei der indirekten Bestimmung der Stromscheitelwerte aus den gemessenen Feldstärken

Die grundsätzliche Verfahrensweise zur direkten Messung der Blitzstärken ist in Kap. 2.2.1 dargestellt, während die Vorgehensweise zur indirekten Messung der Blitzstärken in Kap. 2.2.2 dargestellt ist. Es besteht eine theoretisch herleitbare Proportionalität zwischen gemessenen Feldstärken und Blitzscheitelstromstärken /URM 75/, auf der die indirekte Messung der Blitzscheitelstromstärken basiert. Trotzdem sind die individuellen (d. h. auf einen Blitz bezogenen) Abweichungen zwischen direkt und indirekt gemessenen Scheitelstromstärken relativ groß. Dies wird in Kap. 5.2.14 anhand von Vergleichsdaten, die direkt und indirekt gemessene Blitzscheitelstromstärken beinhalten, diskutiert. Anhand der Daten wird auch ein Verfahren entwickelt, wie diese Messunsicherheit berücksichtigt werden kann (Kap. 5.2.14.2).

5.2.2 Auslegungsstromscheitelwert

Der Auslegungsstromscheitelwert ist in der Regel des KTA 2206 mit 200 kA für positive und 100 kA für negative Erstblitze festgelegt.

Darüber hinaus ist ein kleinerer Scheitelwert für negative Folgeblitze von 50 kA angegeben. Somit wäre auch ein negativer Blitz, der aus zwei Schlägen mit Stromscheitelwert von 90 kA und 51 kA besteht, auslegungsüberschreitend, während ein Erstblitz mit 51 kA innerhalb der Auslegung ist. Um dieses Detail zu analysieren, müssten Daten für die Zuordnung der einzelnen Schläge zu Blitzen vorliegen, d. h. genaue Orts- und Zeitinformationen und somit im Wesentlichen der gesamte Dateninhalt des BLIDS-Systems. Bei den zur Verfügung stehenden Daten sind nur die Anzahlen der Einzelblitze in Bereichen von 10 kA Scheitelstromstärken in verschiedenen Jahren angegeben.

In Anhang C der Regel des KTA 2206 sind erhöhte Werte für eine dort beschriebene Robustheitsbetrachtung angegeben. Diese sind jeweils gegenüber den Auslegungswerten um 50 % erhöht. Somit ist der Robustheitswert für negative Blitze 150 kA und für positive Blitze 300 kA.

5.2.3 BLIDS-Daten Deutschland

Beim Blitz Informationsdienst von Siemens (BLIDS) /SIE 16/ wurden Daten zu den Verteilungen der Scheitelstromwerten erworben. Diese Daten beinhalten sämtliche in

Deutschland von BLIDS detektierten Blitze vom 1. Januar 2014 bis zum 12. September 2019. Es sind, jeweils nach Kalenderjahren differenziert, die Anzahl der Blitze mit Scheitelstromwerten (jeweils in positiv und negativ unterschieden) in 10 kA-Intervallen angegeben. Die erworbenen Daten enthalten keine Ortsangabe. Um detailliertere Untersuchung zu ermöglichen, wurden (zusätzlich zu den für ganz Deutschland akkumulierten Daten) standortspezifische Daten für sieben verschiedene Kraftwerksstandorte in Deutschland erworben. Diese Daten enthalten die oben genannten Informationen für alle in den jeweiligen Kalenderjahren in einem Umkreis von 10 km oder direkt auf dem Kraftwerksgelände detektierten Blitze. Auf die standortspezifischen Daten wird in Kap. 5.2.6 eingegangen.

Insgesamt wurden vom Blitz Informationsdienst von Siemens im oben genannten Zeitraum 2.866.841 Einzelblitze beobachtet. Davon waren 380.335 positive und 2.486.506 negativ. Somit war der Anteil der positiven 12,5 % Einzelblitze und der negativen 87,5 %.

5.2.4 Blitzrate am Anlagenstandort

An verschiedenen Orten in Deutschland treten Blitze unterschiedlich häufig auf. D. h., die Blitzrate ist ortsabhängig. Hierzu enthält zum einen die DIN EN 62305-2 Informationen. Die von der GRS erworbenen Daten des Blitzinformationsdienstes von Siemens beinhalten auch kraftwerksstandortspezifische Daten, so dass eine Analyse für Standorte von Kernkraftwerken in Deutschland vorgenommen werden kann (siehe Kap. 5.2.5).

Laut Beiblatt 1 der DIN EN 62305-2 /DIN 15b/ variieren – bezogen auf Stadt- und Landkreise – die Erdblitzdichten zwischen kleiner gleich 0,6 und kleiner gleich 3,0 pro Quadratkilometer und Jahr, also um einen Faktor von ca. 5. Diese Angaben beziehen sich auf Gesamtblitze, d. h. Erstblitze und Folgeblitze werden nur als ein Ereignis gezählt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Rate von Einzelblitzen eine ähnliche Schwankungsbreite aufweist.

Genauere Informationen über die verschiedenen Blitzraten an den betrachteten Anlagenstandorten lassen sich den jeweiligen BLIDS-Daten für den Umkreis um den Anlagenstandort entnehmen (siehe Kap. 5.2.6). Die sich aus diesen Daten ergebenden Blitzraten sind – getrennt für positive und negative Blitze – in Tab. 5.1 aufgeführt.

Tab. 5.1 Anzahlen und Raten von Einzelblitzen für Deutschland und Anlagenstandorte

	Anzahl positiver Einzelblitze	Rate positiver Einzelblitze [Anzahl pro km² und Jahr]	Verhältnis der Blitzraten zwischen Anlagenstandort und ganz Deutschland	Anzahl negativer Einzelblitze	Rate negativer Einzelblitze [Anzahl pro km² und Jahr]	Verhältnis der Blitzraten zwischen Anlagenstandort und ganz Deutschland
Deutschland	338.207	0,19		2.192.401	1,23	
Anlage 1	192	0,12	0,65	949	0,60	0,49
Anlage 2	358	0,23	1,20	1.376	0,88	0,71
Anlage 3	281	0,18	0,95	1.947	1,24	1,01
Anlage 4	370	0,24	1,24	1.572	1,00	0,82
Anlage 5	314	0,20	1,06	1.609	1,02	0,83
Anlage 6	157	0,10	0,53	1.172	0,75	0,61
Anlage 7	451	0,29	1,52	2.626	1,67	1,36

Die Rate positiver und negativer Blitze schwankt um einen Faktor von ca. 2. Da die Gesamtzahl, der in den Anlagen jeweils beobachteten positiven bzw. negativen Blitze 157 bzw. 949 ist, scheiden statistische Fluktuationen einzelner Blitze als Erklärung aus. Die hier berechneten Raten positiver und negativer Blitze werden für die anlagen-spezifischen Berechnungen der Raten auslegungsüberschreitender Blitze in diesem Vorhaben verwendet.

5.2.4.1 Unsicherheit der Blitzrate an Anlagenstandorten, für die keine standortspezifischen Daten vorliegen

Im Folgenden wird eine Analyse vorgenommen, die es erlaubt Aussagen für Standorte zu treffen, zu denen uns keine Daten aus der BLIDS-Datenbank vorliegen.

Tab. 5.2 Anzahlen von Einzelblitzen für Deutschland und Anlagenstandorte

	Anzahl positiver Einzelblitze	Anzahl negativer Einzelblitze
Deutschland	338.207	2.192.401
Anlage 1	192	949
Anlage 2	358	1.376
Anlage 3	281	1.947
Anlage 4	370	1.572
Anlage 5	314	1.609
Anlage 6	157	1.172
Anlage 7	451	2.626

Um zu einer wohlbegründeten Schätzung zu gelangen, welche Abweichungen für weitere Standorte von der mittleren Blitzrate in Deutschland zu erwarten sind, wird angenommen, dass sich die Rate am Anlagenstandort r_x als Produkt der Rate für Deutschland r_D mit einem ortsspezifischen unbekanntem (zufälligen) Faktor β_x darstellen lässt, wobei der Faktor β_x einer Lognormalverteilung mit Median 0 genügt.

$$r_x = \beta_x r_D \quad (5.1)$$

Dies bedeutet, dass eine Abweichung zu höheren und niedrigeren Raten gleich wahrscheinlich ist. Der zweite Parameter (Formparameter) σ der Verteilung wird aus den in der Tab. 5.2 aufgeführten Verhältnissen $v_i = r_x/r_D$ zwischen den Raten der positiven bzw. negativen Einzelblitze an den Anlagenstandorten und in Deutschland geschätzt:

$$\sigma^* := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{14} (\text{Log}(v_i))^2}{14}} \quad (5.2)$$

Es ergibt sich für den Formparameter σ als Schätzwert σ^* : $\sigma^* = 0,37$.

Hieraus ergeben sich für den 90 %-Vertrauensbereich von β_x , der als Intervall des 5 % und 95 %-Quantils definiert wird, Werte zwischen 0,55 und 1,83. Dies lässt sich so interpretieren, dass für einen Standort mit unbekannter lokaler Blitzrate mit einer Sicherheit von 90 % erwartet werden kann, dass der Faktor β_x zwischen 0,55 und 1,83 liegt. Für den 95 %-Vertrauensbereich von β_x , der als Intervall des 2,5 % und 97,5 %-Quantils definiert wird, ergibt sich ein Wertebereich zwischen 0,37 und 2,74. Dies heißt, dass mit einer Sicherheit von 95 % erwartet werden kann, dass die Blitzrate um höchstens einen Faktor 2,74 höher ist und höchstens um einen Faktor $1/0,37=2,7$ höher ist als im Mittel.

5.2.5 DIN EN 62305-2

In den folgenden Abschnitten wurden Verfahren der Norm DIN EN 62305 verwendet, die Anforderungen zum Blitzschutz beinhaltet. Teil 2 mit dem Titel „Blitzschutz – Risiko-Management“ /DIN 15a/ behandelt die Abschätzung des Risikos für bauliche Anlagen durch Wolke-Erde-Blitze. Insbesondere werden Rechenverfahren angegeben, mit denen die Rate von Blitzen, deren direkte und indirekte Wirkung Gebäude betreffen kann, angegeben (siehe auch Kap. 5.2.8). Weiterhin enthält Beiblatt 1 eine Karte, die die Raten von Erdblitzen (Gesamtblitzen) in den deutschen Stadt- und Landkreisen in 8 Stufen darstellt (siehe auch Kap. 5.2.4).

5.2.6 BLIDS-Daten Umkreis um Anlagenstandorte

Zusätzlich zu den Daten für ganz Deutschland wurden noch analoge Daten für einen Radius von 10 km um sieben Anlagenstandorte erworben. Diese Daten liegen für die Jahre 2014 – 2018, d. h. für einen Beobachtungszeitraum von 5 Jahren, vor.

In den Kraftwerksumgebungen wurden im Beobachtungszeitraum zwischen 1.141 und 3.077 Einzelblitze detektiert.

5.2.7 Effektivität der Blitzerkennung und Klassifikation in BLIDS

Die Detektion und Auswertung der Signale der elektromagnetischen Felder durch das Messnetz unterliegt möglichen Fehlern, die zu Detektionsfehlern (z. B. Nichtdetektion eines Erdblitzes) führen können. Laut Angaben des Datenanbieters liegt die Detektionsquote für Erdblitze bei bis zu 98 % /SIE 18/. In /KER 08/ wird diese zu etwas geringer als 98 % für Blitze mit einer Amplitude größer 10 kA abgeschätzt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Blitzerkennung mit steigender Scheitelstromstärke immer besser wird, da die Messsignale stärker werden und eine höhere Anzahl von Detektoren Signale aufnimmt. Somit ist für die hier interessierenden hohen Ströme von einer sehr guten Effektivität der Blitzerkennung von mehr als 98 % auszugehen. Da die Effektivität der Blitzerkennung sehr hoch ist und somit die Unsicherheit, ob ein Blitz erkannt wird im Vergleich zu den sonstigen Unsicherheiten sehr gering ist, wird die nicht vollständige Effektivität der Blitzerkennung und Klassifikation durch den Blitz Informationsdienst von Siemens in den Rechnungen nicht weiter berücksichtigt.

5.2.8 Einfangfläche

Um die Rate der Blitze, die für die Anlage relevant sind, mithilfe einer Blitzrate pro Fläche zu berechnen, ist es erforderlich, diejenige Fläche zu bestimmen, für die die Blitze als relevant für die Anlage angesehen werden. Diese Fläche wird in der Norm DIN EN 62305 als „Einfangfläche“ bezeichnet.

Bezüglich der Blitzwirkung kann unterschieden werden zwischen:

1. Einschlag in die zu betrachtende Struktur (im Allgemeinen Gebäude):

Hier können Schäden sowohl direkt aufgrund von durch die Struktur fließende Ströme als auch indirekt durch die hierdurch verursachten elektromagnetischen Felder entstehen.

2. Einschlag in den Boden neben der Struktur (bzw. in dort befindliche andere Strukturen):

Hier können Schäden durch die durch den Blitzstrom verursachten elektromagnetischen Felder entstehen (indirekte Schäden).

3. Einschlag in oder neben Versorgungsleitungen, die mit der Struktur verbunden sind:
Hier können Spannungen über die Versorgungsleitungen in die Struktur eingetragen werden und somit entsprechende Ströme entstehen, die zu direkten oder indirekten Schäden führen.

Im Folgenden werden zunächst die direkten Einschläge in relevante Gebäude betrachtet.

5.2.8.1 Direkte Blitzeinschläge

In Bezug auf direkte Blitzeinschläge beschreibt die Einfangfläche eines Gebäudes zusätzlich zur Grundfläche des Gebäudes diejenige umliegende Bodenfläche, in der ein Blitz nicht, sondern stattdessen ins Gebäude einschlagen kann. Mit seiner Hilfe kann die Rate von direkten Blitzeinschlägen r_d bestimmt werden als Einfangfläche A_D mal Rate pro Bodenfläche n_g .

$$r_d = A_D n_g \quad (5.3)$$

In Anhang A.2 der DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) /DIN 15a/ ist ein Verfahren beschrieben, die Einfangfläche A_d zu bestimmen. Hierbei wird für eine Struktur der Höhe h eine kreisförmige Fläche des Radius $m \cdot h$ der Einfangfläche zugerechnet. Für den Faktor m gilt für Strukturen, die höher als 45 m sind³⁰, $m = 3$.

Um die Einfangfläche approximativ zu bestimmen, werden für eine Referenzanlage zunächst das Reaktorgebäude inkl. Hilfsanlagegebäude betrachtet. Es zeigt sich, dass das Hilfsanlagegebäude inkl. seiner Einfangfläche vollständig in der Einfangfläche des Reaktorgebäudes enthalten ist (siehe Anhang A.1). Andere relevante Gebäude sind wesentlich kleiner und niedriger, so dass sie im Rahmen dieser Abschätzung nicht berücksichtigt werden müssen. Es ergibt sich für die betrachtete Referenzanlage eine Einfangfläche in Bezug auf den direkten Einfang zu $A_D = 0,089 \text{ km}^2$.

³⁰ Für niedrigere Bauten gilt $m = (h/1\text{m})^{-0,4}$.

Gemäß DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) /DIN 15a/ wird die relative Lage der baulichen Anlage, bestimmt durch umgebende Objekte oder eine exponierte Lage, über einen Standortfaktor C_D berücksichtigt. Für eine bauliche Anlage umgeben von höheren Objekten gilt $C_D = 0,25$, wobei Umgebung als mit einem Abstand kleiner $m \cdot h$ definiert ist. Für eine freistehende bauliche Anlage gilt $C_D = 1$. Bei der Referenzanlage und den weiteren betrachteten Anlagen gibt es genau eine solche höhere Struktur, den Fortluftkamin. Somit ist als Standortfaktor $C_D = 0,25$ bei der Bestimmung der Einfangfläche A_D anzuwenden.

5.2.8.2 Indirekte Einschläge

Um die Rate der für die Anlage relevanten Ereignisse durch Einschlag in den Boden neben der baulichen Anlage abschätzen zu können, ist eine Kenntnis über die dazugehörige Einfangfläche A_M nötig. In DIN EN 62305-2 /DIN 15a/ wird A_M als Fläche innerhalb eines Radius von maximal 350 m um das betrachtete Gebäude angegeben. Die relevanten Gebäude in der Referenzanlage sind innerhalb einer Grundfläche von etwa 220 m mal 130 m angeordnet. Die Gesamtfläche für direkte und indirekte Einschläge wird als A_{D+M} bezeichnet. A_{D+M} bestimmt sich somit als Fläche, deren Außenseiten einen Abstand von höchstens 350 m zu einem Rechteck mit der Seitenlängen 220 m x 130 m hat. Dies ist in Abb. 5.2 schematisch dargestellt.

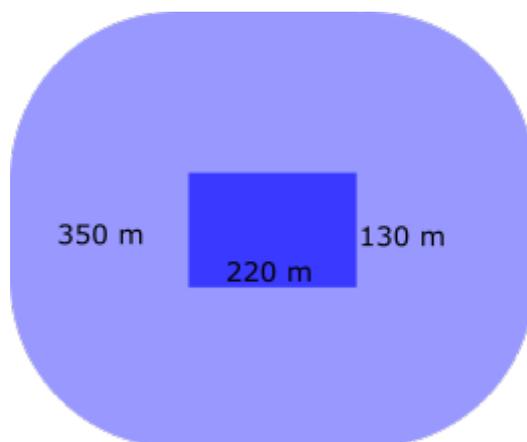


Abb. 5.2 Schematische Darstellung der Berechnung der Einfangfläche für indirekte Einschläge nach DIN EN 62305-2

Die Anlagenfläche ist dunkelblau, die umgebende Fläche, die der Einfangfläche für indirekte Einschläge ebenfalls zugerechnet wird, ist hellblau dargestellt. Die Zeichnung ist nicht maßstäblich.

$$\begin{aligned}
 A_{D+M} &= 220 \text{ m} \cdot 130 \text{ m} + (220 \text{ m} + 130 \text{ m}) \cdot 350 \text{ m} + \pi (350 \text{ m})^2 \\
 &= 0,54 \text{ km}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

5.2.8.2.1 Indirekte Einwirkung durch direkten Einschlag in den Fortluftkamin

Der Fortluftkamin befindet sich in der Referenzanlage in unmittelbarer Nähe zu Reaktor-gebäude und Hilfsanlagegebäude. Daher sind beim Einschlag von Blitzen mit hohen Scheitelstromstärken in den Fortluftkamin indirekte Auswirkungen auf in diesen Gebäuden befindliche Einrichtungen zu besorgen. Deshalb wird im Folgenden die Einfangfläche in Bezug auf direkte Einschläge des Fortluftkamins bestimmt. Der Fortluftkamin der Referenzanlage hat eine Höhe ca. $h = 160 \text{ m}$. Aufgrund der großen Höhe und des vergleichsweise geringen Durchmessers des Kamins an der oberen Öffnung spielt der Durchmesser des Kamins an der oberen Öffnung keine erhebliche Rolle und wird im Folgenden vernachlässigt. Nach DIN EN 62305-2 beträgt, wie oben dargestellt, wenn der Durchmesser des Fortluftkamins vernachlässigt wird, die direkte Einfangfläche

$$A_D = \pi (3h)^2 = 0,72 \text{ km}^2
 \tag{5.5}$$

Der Kreis von $3h = 480 \text{ m}$ um den Fortluftkamin deckt auch die oben beschriebene Fläche für indirekte und direkte Einschläge (Gleichung 5.4) ab.

Da der Fortluftkamin als abdeckend für die gesamte Anlage betrachtet wird und sich die Anlage nicht auf einer Bergkuppe befindet, wird der Standortfaktor für eine freistehende bauliche Anlage $C_D = 1$ angewandt.

Bei den in DIN EN 62305-2 genannten Verfahren zur Bestimmung der Rate von relevanten Blitzen für eine Struktur werden, wie oben beschrieben, feste Einfangflächen verwendet. Das elektro-geometrische Modell, auf dem die DIN EN 62305-2 basiert, impliziert jedoch, dass die Umgebung, die für direkte Blitzeinwirkung auf eine Struktur relevant ist, von der Stärke des Scheitelstromes abhängig ist. Dies wird im Folgenden näher untersucht.

5.2.8.3 Bestimmung der Einfangfläche mit dem elektro-geometrischen Modell

Die DIN EN 62305-2 basiert grundsätzlich auf dem elektro-geometrischen Modell. Dieses Modell beschreibt, wie oben dargestellt, die möglichen Durchschlagstrecken in Form von Kugeln (so genannten Blitzkugeln) und stellt einen Zusammenhang zwischen Scheitelstrom I und Radius r der Blitzkugel dar. Es gilt demnach

$$r = \rho \left(\frac{I}{i} \right)^{0,65} \quad \text{mit} \quad \rho = 10\text{m} \quad \text{und} \quad i = 1\text{kA} \quad (5.6)$$

Aus diesem Modell ergibt sich, dass diejenige um eine Struktur liegende Bodenfläche, in die ein Blitz nicht, sondern stattdessen in die Struktur einschlägt, von dem Scheitelstrom abhängig ist. Somit ist die Einfangfläche vom Scheitelstrom abhängig. Sie wächst mit steigendem Scheitelstrom an. Dies wird in den Berechnungsverfahren der DIN EN 62305-2 nicht berücksichtigt. Da die Einfangfläche nach dem elektro-geometrischen Modell anwächst und in dieser Untersuchung der Fokus auf Blitzen mit großen Scheitelströmen liegt, wird diese Abhängigkeit im Folgenden näher untersucht.

Auf diese Weise kann der Zusammenhang zwischen Einfangfläche und Blitzstromstärke, der in der DIN nicht explizit angegeben wird – insbesondere in Bezug auf Blitzstromstärken, welche die Auslegungswerte überschreiten – berücksichtigt werden.

Das Blitzkugelverfahren wird direkt angewandt, um die Einfangfläche zu bestimmen. Auf diese Weise kann nach verschiedenen Blitzstromstärken differenziert werden:

$$n_d(I) = A_d(I) n_g(I) \quad (5.7)$$

Hierbei bezeichnet $n_g(I)$ die scheinbarstromabhängige Rate pro Bodenfläche und $n_d(I)$ die scheinbarstromabhängige Rate auf das Gebäude. Die Einfangfläche $A_d(I)$ wird durch geometrische Überlegungen bestimmt. Zunächst wird ein sehr dünner Stab der Höhe h betrachtet. Es sind zwei Möglichkeiten zu betrachten:

1) Die Blitzkugel hat einen Durchmesser größer h . Dies ist in Abb. 5.3 dargestellt.

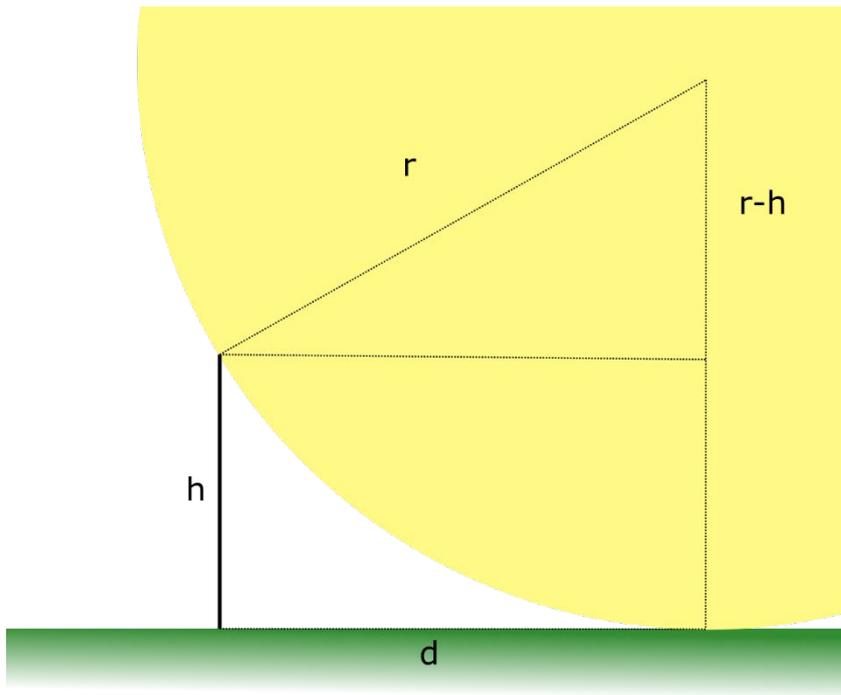


Abb. 5.3 Blitzkugel mit einem Radius r größer der Stabhöhe h

Im Abstand d um den Stab können keine Blitze einschlagen; stattdessen schlagen sie in den Stab ein. Es gilt nach dem Satz von Pythagoras

$$d = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} = \sqrt{2rh - h^2} \quad (5.8)$$

2) Die Blitzkugel hat einen Durchmesser kleiner oder gleich h . Dies ist in Abb. 5.4 dargestellt.

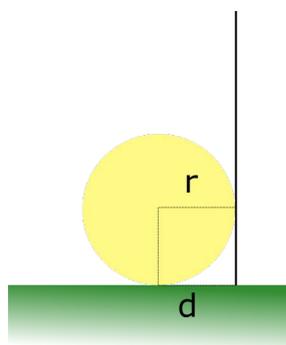


Abb. 5.4 Blitzkugel mit einem Radius kleiner der Stabhöhe

Im Abstand $d = r$ um den Stab können keine Blitze einschlagen. Stattdessen schlagen sie in den Stab ein.

Somit ist die Einfangfläche ein Kreis mit Radius

$$d = \begin{cases} \sqrt{2rh - h^2} & \text{wenn } r \geq h \\ r & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.9)$$

wobei die Abhängigkeit von r vom Scheitelstrom durch Gleichung 5.6 gegeben ist.

Für die Größe der Einfangfläche $A_d(I) = \pi d^2$ folgt somit

$$A_d(I) = \pi \begin{cases} 2\rho \left(\frac{I}{l}\right)^{0,65} h - h^2 & \text{wenn } h < \rho \left(\frac{I}{l}\right)^{0,65} \\ \rho^2 \left(\frac{I}{l}\right)^{1,3} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.10)$$

Also wächst die Einfangfläche für große Stromstärken I gemäß

$$A_d(I) \propto I^{0,65} \quad (5.11)$$

Die Größe der Einfangfläche ist am Beispiel eines $h = 100$ m hohen Stabes in Abb. 5.5 dargestellt.

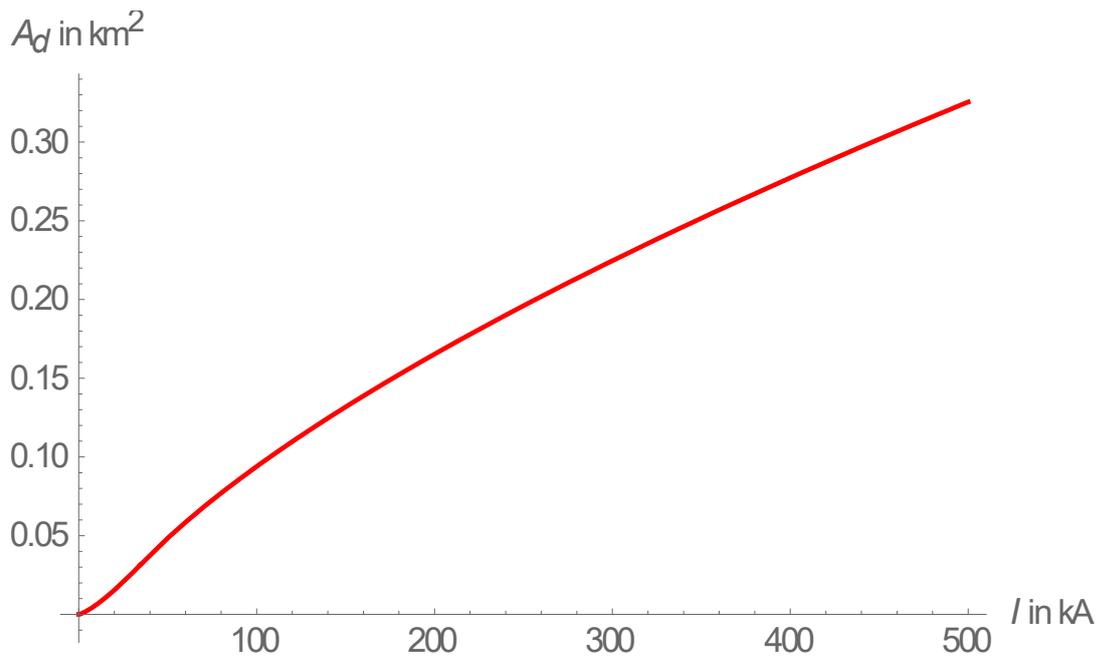


Abb. 5.5 Einfangfläche A_d in Abhängigkeit von der Blitzstromstärke für einen 100 m hohen Stab

Das heißt, dass die Einfangflächen mit den Blitzscheitelstromstärken stark ansteigen. Dies führt gemäß des Blitzkugelmodells somit dazu, dass der Anteil von Blitzen mit hohen Blitzstromstärken an den gesamten Blitzen, die ein Objekt treffen, bei hohen Objekten größer ist als bei niedrigen Objekten. Anders ausgedrückt: Blitzen mit hohen Blitzstromstärken schlagen bevorzugt in hohe Objekte ein.

Der Fortluftkamin eines Kernkraftwerkes lässt sich in sehr guter Näherung durch einen oben beschriebenen Stab darstellen. /DIN 15/

In der DIN EN 62305-2 wird, wie oben erwähnt, zur Berechnung der Rate von Blitzen, die eine Struktur der Höhe h treffen, unabhängig von der Blitzstromstärke eine Einfangfläche mit Radius $d = m \cdot h$ zugrunde gelegt, wobei der Faktor m für Strukturen, die höher als 45 m sind, $m = 3$ ist.

Um zu untersuchen, für welche Fälle dies konservativ ist, wird derjenige Scheitelstrom I_K bestimmt, für den

$$d(I_K) = 3h \tag{5.12}$$

ist. Hier ist nur ein Radius der Blitzkugel $r \geq h$ interessant, da andernfalls $d = 3h > h$ immer konservativ ist. Es ergibt sich

$$I_K = I \left(5 \frac{h}{\rho} \right)^{\frac{100}{65}} \quad (5.13)$$

Somit ergibt sich, dass die postulierte Einfangfläche mit Radius $3h$ z. B. für Strukturen der Höhe 50 m für Blitze bis 141,47 kA und für Strukturen der Höhe 100 m für Blitze bis 410,96 kA konservativ ist in dem Sinne, dass sie größer ist als die nach dem Kugelverfahren bestimmte (siehe Abb. 5.6). Für Strukturen der Höhe 160 m (Fortluftkamin der Referenzanlage) ist sie bis 887 kA und damit für sämtliche gemessenen Blitze konservativ. Somit kann das Verfahren der DIN EN 62305-2 als für den Fortluftkamin für alle gemessenen Blitze konservativ und damit anwendbar bewertet werden. Demgegenüber kann das Verfahren für niedrigere Strukturen (z. B. das Reaktorgebäude) nicht als für alle gemessenen Blitze konservativ und anwendbar bewertet werden.

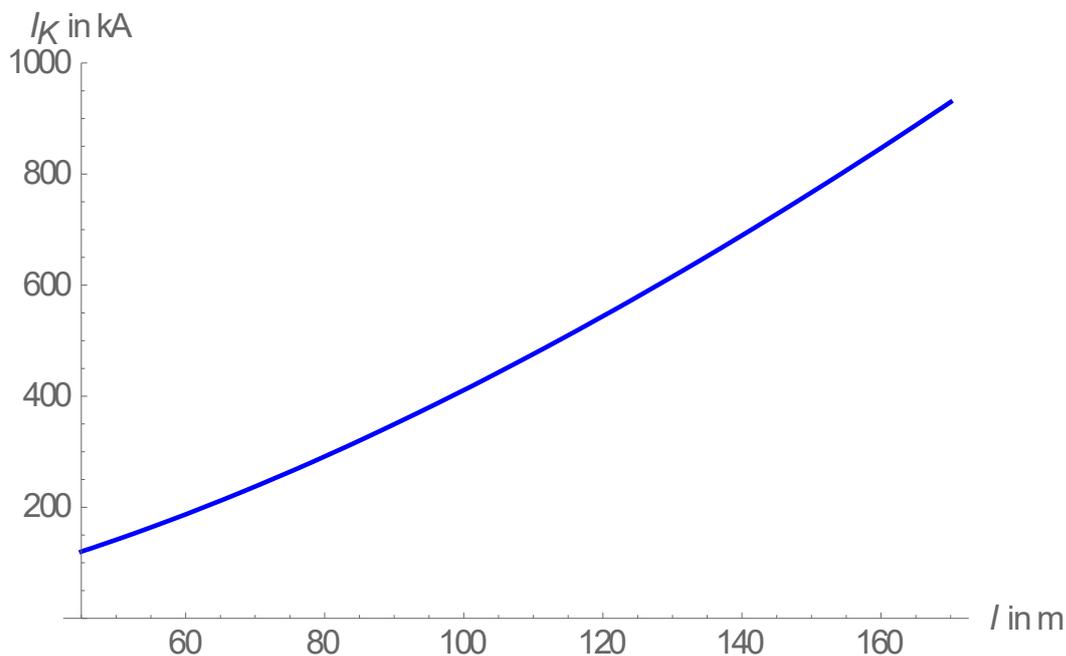


Abb. 5.6 Blitzsichelstrom, unterhalb dessen die in der DIN EN 62305-2 angegebene Einfangfläche konservativer ist als die nach dem Kugelverfahren ermittelte, in Abhängigkeit von der Höhe einer Struktur

Analog der oben beschriebenen Vorgehensweise kann für weitere Strukturen, wie für beim DWR typische Form des Reaktorgebäudes vorgegangen werden. Dies ist in Anhang A.2 aufgeführt.

5.2.8.4 Weitere Einwirkungen

Als weitere Einwirkungen nennt DIN EN 62305-2 wie oben erwähnt Einschläge in oder neben Versorgungsleitungen (siehe Anhänge A.4 und A.5 dieser Norm).

Kabelkanäle, welche die verschiedenen Gebäude verbinden, liegen innerhalb der Einfangfläche des Fortluftkamins und sind von den Rändern der Gebäude weit entfernt. Somit sind Einschläge in oder neben Kabelkanäle durch die Einfangfläche des Fortluftkamins abgedeckt.

Freileitungen führen vom Anlagengelände weg. Hier sind zur Ermittlung der Rate von Überspannungen, die durch Blitze verursacht werden, nach DIN EN 62305-2 jeweils bis zu 5 km Leitungsabschnitte und ihre Umgebung einzubeziehen.

Sie lassen sich nach DIN EN 62305-2 wie folgt abschätzen: Für die Einfangfläche A_L bezüglich des direkten Einschlags in die Freileitungen gilt:

$$A_L = 2 \cdot 40 \text{ m} \cdot 5 \text{ km} = 0,4 \text{ km}^2 \quad (5.14)$$

Für die Einfangfläche A_I bezüglich des Einschlags neben die Freileitungen gilt näherungsweise³¹:

$$A_I \approx 2 \cdot 4 \text{ km} \cdot 5 \text{ km} = 40 \text{ km}^2 \quad (5.15)$$

Diese Flächen werden nur teilweise durch die Einfangfläche des Fortluftkamins abgedeckt. A_L ist jedoch kleiner als die Einfangfläche des Fortluftkamins.

³¹ Für diese grobe Abschätzung wurde die genaue Anordnung der Freileitungen nicht untersucht, so dass ein Überlapp von Flächen nicht berücksichtigt ist.

In Kap. 3.2 wurden Schutzvorrichtungen gegen den Eintrag von Störungen aus dem Übertragungsnetz diskutiert. In der Regel des KTA 2206 werden Überspannungen durch Blitze in Freileitungen nicht behandelt. Wie erläutert enthält jedoch die Regel des KTA 3701 zu netzseitigen Einwirkungen die allgemeine Anforderung, dass Blitzeinwirkungen auf Freileitungen nicht zu unzulässigen Beeinträchtigungen von sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen führen dürfen.

5.2.8.5 Fazit

Laut /KER 16/ können auf dem Gelände deutscher Kernkraftwerke mehrere Gebäude von Blitzen mit Scheitelstromstärken über 200 kA getroffen werden. Zur Berechnung der Rate der auslegungsüberschreitenden Blitze ist jedoch lediglich die Einfangfläche der Fortluftkamine der Kernkraftwerke von wesentlicher Bedeutung. Wenn relevante elektro- oder leittechnische Einrichtungen im oder am Fortluftkamin installiert sind, ist hier die direkte Blitzeinwirkung zu berücksichtigen. Auf jeden Fall kann ein Blitzeinschlag in den Fortluftkamin mit hohen Scheitelstromamplituden in der Referenzanlage eine indirekte Blitzeinwirkung für Reaktorgebäude und Hilfsanlagegebäude verursachen, da er unmittelbar neben diesen steht, sowie für weitere benachbarte Gebäude.

Somit wird als Einfangfläche für diese Untersuchung die Einfangfläche des Fortluftkamins verwendet. Die festen Werte $A_D = 0,72 \text{ km}^2$ bzw. $A_M = 0,72 \text{ km}^2$ sind wie oben erläutert im Vergleich zum Blitzkugelmodell konservativ.

5.2.9 Informationen über Anlagengebäude und -gelände

Informationen über Anlagengebäude und -gelände wurden der GRS vorliegenden Anlagendokumentation der Referenzanlage bzw. der weiteren betrachteten Anlagen entnommen. Die Referenzanlage ist ein deutscher moderner Druckwasserreaktor der Baureihe Konvoi. Die weiteren betrachteten Anlagen sind deutsche Anlagen mit Siedewasser- und Druckwasserreaktoren bzw. Forschungsreaktoren.

5.2.10 Maximalwert der Blitzstromstärke

Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten, insbesondere der Begrenztheit der horizontalen Ausdehnung des Bereiches der Atmosphäre, in der ein Erdblitz stattfinden kann, in Verbindung mit der maximalen Spannung pro Längeneinheit, die sich ausbilden kann, bevor ein Durchschlag auftritt, ist davon auszugehen, dass die Blitzstromstärke

von Erdblitzen nicht unbegrenzt hoch sein kann. Hierzu gibt es verschiedene Abschätzungen. In /RAK 12/ werden die maximalen Scheitelströme des ersten Hauptblitzes zu etwa 300 kA in gemäßigten Regionen und 450 kA bis 500 kA in den Tropen abgeschätzt.

In /SMO 18/ werden die maximal direkt gemessenen Scheitelstromstärken als 340 kA für positive Blitze und 100 kA für negative Blitze angegeben, während die maximalen indirekt gemessenen Scheitelstromstärken 580 kA für positive Blitze und 957 kA für negative Blitze sind. Die indirekten Messungen sind wie bereits diskutiert mit erheblicher Messunsicherheit behaftet.

In /BIR 17/ wird in Bezug auf die indirekte Messung sehr großer Scheitelströme ausgeführt: „Die Bestimmung von Blitzströmen > 200 kA durch Blitzortungssysteme ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da die dabei zu Grunde gelegten Modelle bzw. Korrelationen zwischen dem gemessenen Feldmaximum und dem daraus abgeleiteten Strommaximum bei diesen extremen Werten nicht notwendigerweise stimmen müssen. Eine Validierung dieser Zusammenhänge liegt derzeit nur bis ca. 40 kA vor [...]“. Es wird darauf hingewiesen, dass eine nicht konstante Geschwindigkeit der Hauptentladung (die bei der Herleitung der Beziehung zwischen Blitzstromstärke und gemessener Stärke des elektromagnetischen Feldes als konstant und unabhängig von der Scheitelstromstärke angenommen wird, siehe Kap. 5.1) als Ursache für systematische Messabweichungen in Frage komme. Wenn eine systematische Abhängigkeit zwischen Blitzstromstärke und Geschwindigkeit der Hauptentladung besteht, kann es zu systematischen Abweichungen der Ergebnisse der indirekten Blitzmessung kommen, insbesondere möglicherweise zu einer Überschätzung der Blitzstromstärken. Eine solche Abhängigkeit ist für Blitzstromstärken von weniger, als 40 kA nicht erkennbar, aber ist für Blitzströme von mehr, als 40 kA nicht auszuschließen, da der Bereich, für den sowohl indirekte als auch direkte Messungen einzelner Blitze vorliegen, nur negative Blitze mit einer Stärke bis ca. 40 kA umfasst (siehe auch Kap. 5.2.1 und 5.2.14).

In /BIR 17/ wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass „Feldimpulse, die von einer Fülle von Sensoren über ganz Europa gleichzeitig registriert werden, nur von einer Blitzentladung mit entsprechend hoher Stromamplitude herrühren können.“ Es wird das Fazit gezogen, dass Blitzströme von mehr, als 300 kA daher zwar nicht gänzlich auszuschließen seien, sich allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Stromamplituden aus den elektromagnetischen Felddaten im Einzelfall erklären ließen.

Da somit keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, dass Blitzströme in Deutschland auf 300 kA beschränkt sind, jedoch in der Fachöffentlichkeit weitgehend die Meinung vertreten wird, dass die Existenz von Blitzen mit solch großen Blitzstromstärken unwahrscheinlich ist, werden in Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen zwei Fälle betrachtet:

- Optimistische Annahme: In Deutschland treten keine Blitze mit Blitzstromstärken von mehr als 300 kA auf.
- Konservative Annahme: Es gibt keine (bekannte) Obergrenze der Blitzstromstärken.

5.2.11 Ortsabhängigkeit der Verteilung der Stromscheitelwerte

Messungen von Stromscheitelwerten legen nahe, dass nicht nur die Blitzrate, sondern auch die Verteilung der Stromscheitelwerte der Blitze ortsabhängig ist. Zumindest wurden die höchsten Stromscheitelwerte z. B. in tropische Klimazonen gemessen. Inwieweit diese Abhängigkeit auch für die verschiedenen Kernkraftwerksstandorte in Deutschland relevant ist, d. h. ob sich die Verteilung auch für Kernkraftwerksstandorte von der Verteilung für ganz Deutschland erheblich unterscheidet, wird im Folgenden untersucht.

Als Basis hierfür dient ein Vergleich der Daten aus der BLIDS-Datenbank für Deutschland (siehe Kap. 5.2.3) mit den Daten aus der BLIDS-Datenbank von sieben Anlagenstandorten in Deutschland (siehe Kap. 5.2.6). Diese Daten beinhalten jedoch jeweils nur eine relativ geringe Anzahl Blitze pro Anlagenstandort (minimal 157 und maximal 451 positive und minimal 949 und maximal 2626 negative Blitze).

In Abb. 5.7 sind die Verteilungsfunktionen für die Scheitelstromwerte positiver Blitze in einem 10 km-Umkreis um die sieben Kernkraftwerksstandorte und für Deutschland dargestellt. Abb. 5.8 zeigt entsprechend die Verteilungsfunktionen für die Scheitelstromwerte negativer Blitze. In den Graphen ist auf der x-Achse der Stromscheitelwert in kA aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Verteilungsfunktion der Blitzstromstärken aufgetragen, d. h. der Anteil der Blitze, die maximal diesen Stromscheitelwert besitzen.

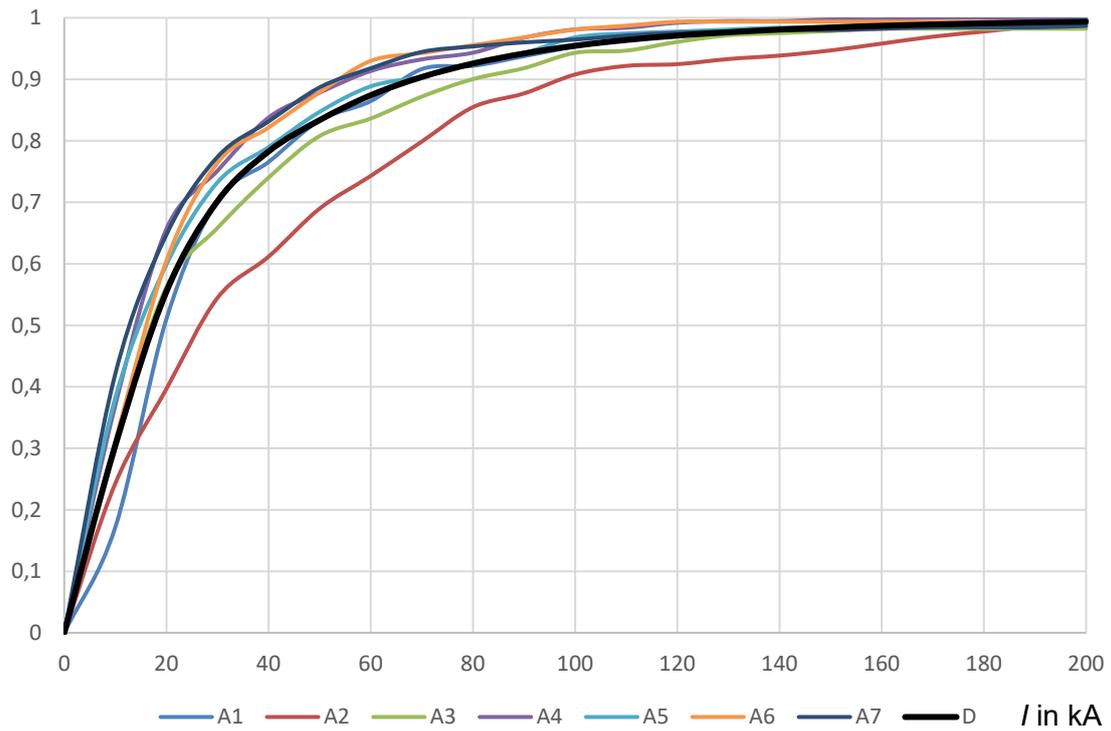


Abb. 5.7 Verteilungsfunktionen der Scheitelstromstärken positiver Einzelblitze im Umkreis der 7 Anlagestandorte und in Deutschland

Die Verteilungsfunktionen für die Anlagenstandorte sind als farbige Linien, die für ganz Deutschland als breite schwarze Linie dargestellt.

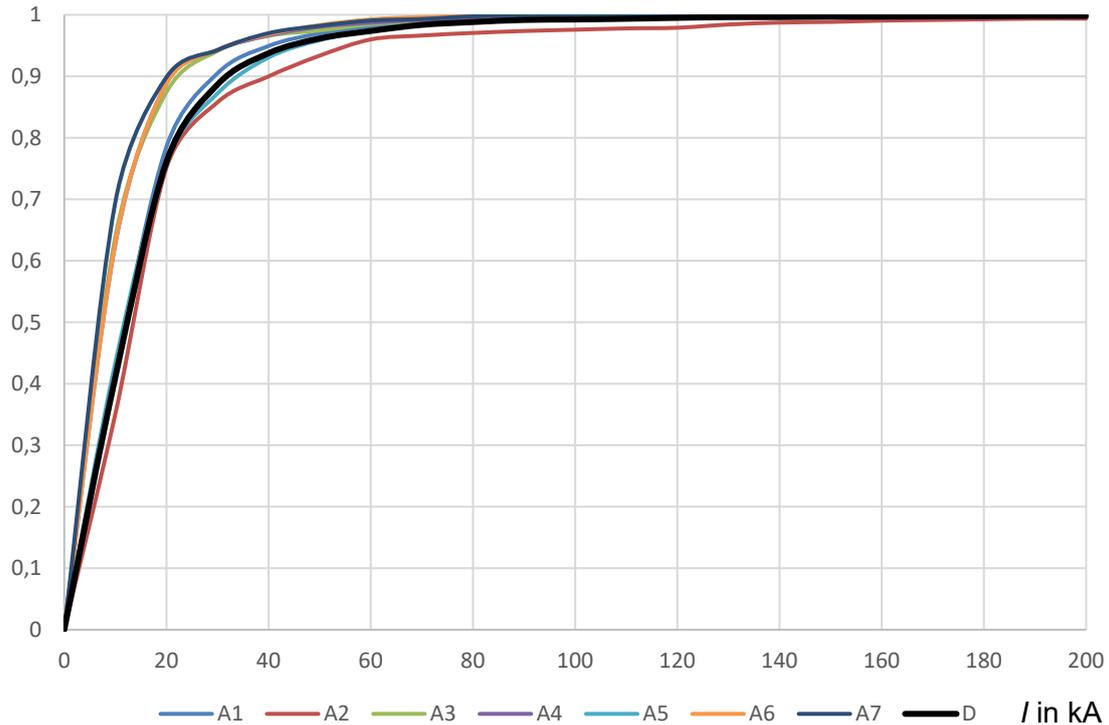


Abb. 5.8 Verteilungsfunktion der Scheitelstromstärken negativer Einzelblitze im Umkreis der Anlagestandorte und in Deutschland

Die Verteilungsfunktionen für die Anlagenstandorte sind als farbige Linien, die für ganz Deutschland als breite schwarze Linie dargestellt.

Sowohl bei den Verteilungsfunktionen der positiven als auch der negativen Blitzen treten deutliche Unterschiede auf. Z. B. sind für die Anlage 6 sowohl bei den positiven als auch den negativen Blitzen die Verteilungen deutlich hin zu kleineren Scheitelstromstärken verschoben. Es sind somit deutliche Anhaltspunkte vorhanden, dass auch innerhalb Deutschlands die Verteilungen der Scheitelstromstärken eine erhebliche Ortsabhängigkeit aufweisen. Allerdings lässt sich aus den Daten dies nicht sicher schließen, da die Beobachtungszeit relativ kurz ist. Abweichungen könnten sich möglicherweise auch dadurch erklären lassen, dass die Gebiete im Beobachtungszeitraum bestimmten zufälligen (Groß-)Wetterlagen ausgesetzt waren, die zu einer Häufung relativ kleinerer oder größerer Blitzstromstärken führten, so dass die Unterschiede über einen längeren Zeitraum vollständig oder teilweise verschwinden. Um die Ortsabhängigkeit der Verteilungen der Scheitelstromstärken genauer zu untersuchen, wäre eine detaillierte Analyse erforderlich, für die eine umfangreichere Datenbasis nötig wäre.

Da jedoch grundsätzlich davon auszugehen ist, dass eine Ortsabhängigkeit der Verteilungen der Scheitelstromstärken existiert, wird die damit verknüpfte Unsicherheit hier wie folgt einbezogen:

Es wird angenommen, dass die Form der Verteilungsfunktion konstant (für positive und negative Blitze im Allgemeinen jedoch verschieden) ist, jedoch verschieden skaliert sein kann, d. h. sich mehr oder weniger zu großen Scheitelstromstärken erstreckt. Es gilt für die Verteilung $P_x(I)$ der Scheitelströme I am Ort der Anlage x :

$$P_x(I) = P_0(\alpha_x I) \quad (5.16)$$

$P_0(I)$ ist die generische Form der Verteilung der Scheitelstromstärken. Ein Faktor $\alpha_x < 1$ heißt, dass am Ort x größere Scheitelströme, ein Faktor $\alpha_x > 1$ heißt, dass am Ort x kleinere Scheitelströme auftreten.

$P_0(I)$ wird im Folgenden als bekannt und identisch zu den beobachteten Verteilungen der Scheitelstromstärken an den Kernkraftwerksstandorten in Deutschland angenommen.

Aussagen über die Verteilung der Faktoren α_x werden aus dem Vergleich der Verteilungen der Scheitelstromstärken sieben KKW-Standorte und von ganz Deutschland gewonnen. Hierzu werden charakteristische Größen der Verteilungen betrachtet, die linear in α_x sind. Dies sind insbesondere Quantile und der Mittelwert.

Einige solcher Größen sind in Tab. 5.3 dargestellt. Es sind hier neben dem Mittelwert das 90 %-und 95 %-Quantil (Q90 und Q95) aufgeführt, da

- der „Schwanz“ der Verteilung hin zu hohen Werten von besonderem Interesse ist,
- niedrige Quantile (z. B. der Median) eine sehr hohe relative Ungenauigkeit aufweisen, da die Daten nur mit 10 kA Genauigkeit zur Verfügung stehen und
- zur Bestimmung größerer Quantile mit ausreichender Genauigkeit die Anzahl der Blitze nicht groß genug ist.

Tab. 5.3 Charakteristika der Verteilung der Blitzsicherheitströme in Deutschland und an sieben Kernkraftwerksstandorten

	positive Blitze			negative Blitze		
	Q90	Q95	Mittelwert	Q90	Q95	Mittelwert
Deutschland	65	95	29,28	25	45	15,33
Anlage 1	65	95	31,72	45	55	20,05
Anlage 2	95	155	43,60	25	35	11,63
Anlage 3	75	115	33,47	25	35	11,35
Anlage 4	55	85	23,08	35	45	16,13
Anlage 5	65	95	26,56	25	35	11,02
Anlage 6	55	75	24,24	25	35	10,35
Anlage 7	55	75	24,36	35	45	16,54

Tab. 5.4 Verhältnisse der Charakteristika der Verteilung der Blitzsicherheitströme an sieben Kernkraftwerksstandorten in Bezug zu ganz Deutschland

	positive Blitze			
	Q90	Q95	Mittelwert	im Mittel
Anlage 1	1	1	1,08	1,03
Anlage 2	1,46	1,63	1,49	1,53
Anlage 3	1,15	1,21	1,14	1,17
Anlage 4	0,85	0,89	0,79	0,84
Anlage 5	1	1	0,91	0,97
Anlage 6	0,85	0,79	0,83	0,82
Anlage 7	0,85	0,79	0,83	0,82
	negative Blitze			
	Q90	Q95	Mittelwert	im Mittel
Anlage 1	1,80	1,22	1,31	1,44
Anlage 2	1	0,78	0,76	0,85
Anlage 3	1	0,78	0,74	0,84
Anlage 4	1,4	1	1,05	1,15
Anlage 5	1,00	0,78	0,72	0,83
Anlage 6	1,00	0,78	0,67	0,82
Anlage 7	1,4	1	1,08	1,16

Die mittleren Verhältnisse zwischen den anlagenspezifischen Charakteristika und denen für Deutschland liegen zwischen 0,82 und 1,53, d. h. unterscheiden sich um maximal etwa 50 %.

Im Folgenden wird die Unsicherheit für weitere, hier nicht analysierte Orte aufgrund der beobachteten ortsabhängigen Schwankungen quantifiziert.

Um zu einer wohlbegründeten Schätzung zu gelangen, welche Abweichungen für weitere Standorte zu erwarten sind, wird angenommen, dass α_x einer Lognormalverteilung mit Median 0 genügt. Dies bedeutet, dass eine Abweichung zu kleineren und größeren Scheitelströmen gleich wahrscheinlich ist. Der zweite Parameter σ der Verteilung wird aus den in der Tab. 5.4 aufgeführten Verhältnissen v_i zwischen den Charakteristika der Verteilungen der Blitzsichelstromstärken in Deutschland und an den Kernkraftwerkstandorten geschätzt:

$$\sigma^* := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{42} (\text{Log}(v_i))^2}{42}} \quad (5.17)$$

Es ergibt sich als Schätzwert $\sigma^* = 0,236$. Für eine andere Wahl der verwendeten Eingangsgrößen ergeben sich sehr ähnliche Werte (z. B., wenn nur die Mittelwerte verwendet werden, $\sigma^* = 0,243$).

Hieraus ergeben sich für den 90 %-Vertrauensbereich von α_x , der als Intervall des 5 % und 95 %-Quantils definiert wird Werte zwischen 0,679 und 1,473. Somit ist der Skalierungsfaktor α_x mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % kleiner als 0,679 (dies entspricht um 47 % höheren Blitzsichelstromstärken). Dies bedeutet, dass mit 95 % Wahrscheinlichkeit die standortspezifische Blitzsichelstromstärke um höchstens 47 % höher als der Durchschnitt für Deutschland ist.

5.2.12 Rate auslegungsüberschreitender Blitze

Die Rate auslegungsüberschreitender Blitze ergibt sich, wie in Kap. 5.2.8 dargestellt, gemäß DIN 62305 (d. h., wenn die Einfangfläche als nicht sichelstromabhängig angenommen wird), als Produkt des Anteils auslegungsüberschreitender Blitze an den Gesamtblitzen am Anlagenort a_a , der Einfangfläche A und der Blitzrate am Anlagenort r .

$$r_{>I_a} = r a_a A \quad (5.18)$$

Der Anteil a_a der auslegungsüberschreitenden positiven Blitze am Anlagenort ist

$$a_a = \int_{I_a}^{\infty} p_d(I) dI \quad (5.19)$$

wobei $p_d(I)$ die Verteilung der wahren Blitzstromscheitelstärken positiver Blitze und I_a der Auslegungsscheitelstrom ist. Dieselbe Formel gilt für negative Blitze, wobei $p_a(I)$ dann die Verteilung der wahren Blitzstromscheitelstärken (Beträge) negativer Blitze und I_a der Auslegungsscheitelstrom in Bezug auf negative Blitze ist.

Dies kann nach dem in 5.2.14.1 gesagten zu

$$a_a = k_{id} \int_{I_a}^{\infty} p_i(I) dI \quad (5.20)$$

abgeschätzt werden, wobei $p_i(I)$ die Verteilung der indirekt gemessenen Blitzstromscheitelstärken und k_{id} der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Messgenauigkeit der indirekten Messung der Blitzstromscheitelstärken (siehe 5.2.14.2) ist. Hierbei ist die mögliche Ortsabhängigkeit der Verteilung der Blitzstromscheitelstärken (siehe 5.2.11) noch nicht berücksichtigt ($\alpha_x = 1$). Wird dies einbezogen, so gilt:

$$a_a = k_{id} \int_{\frac{I_a}{\alpha_x}}^{\infty} p_i(I) dI \quad (5.21)$$

Um die Scheitelstromabhängigkeit der Einfangfläche zu berücksichtigen, kann die Rate auslegungsüberschreitender Blitze berechnet werden als

$$r_{>I_a} = r \int_{I_a}^{\infty} p_d(I) A(I) dI \quad (5.22)$$

Analog oben kann dies abgeschätzt werden zu

$$r_{>I_a} = r k_{id} \int_{\frac{I_a}{\alpha_x}}^{\infty} p_i(I) A\left(\frac{I}{\alpha_x}\right) dI \quad (5.23)$$

5.2.13 Stromscheitelwertbezogene Rate pro Fläche am Anlagenort

Die Stromscheitelwertbezogene Rate pro Fläche am Anlagenort ergibt sich aus der Blitzrate am Anlagenort und der Verteilung der Stromscheitelwerte am Anlagenort

$$r_d(I) = r p_d(I) \quad (5.24)$$

5.2.14 Vergleichsdaten Stromscheitelwerte direkt/indirekt gemessen

Die grundsätzliche Verfahrensweise zur direkten Messung der Blitzstärken ist in Kap. 2.2.1 dargestellt, während die Vorgehensweise zur indirekten Messung der Blitzstärken in Kap. 2.2.2 dargestellt ist. Es besteht eine theoretisch herleitbare Proportionalität zwischen gemessenen Feldstärken und Blitzstromscheitelstärken /URM 75/, auf der die indirekte Messung der Blitzstromscheitelstärken basiert.

Diese Beziehung wurde durch gleichzeitige direkte und indirekte Messung von Blitzstromstärken validiert. Der GRS wurde ein Datensatz zur Verfügung gestellt, der Messungen auf dem Gaisberg in Österreich /BIR 17/, /SCH 16/ beinhaltet. Die Messungen umfassen 464 Blitze. Es sind nur negative Blitze enthalten.

Die Daten sind in Abb. 5.9 dargestellt, wobei der Betrag der direkt gemessenen Blitzströme auf der Abszisse und der Betrag der indirekt gemessenen Blitzscheidenströme auf der Ordinate aufgetragen sind.

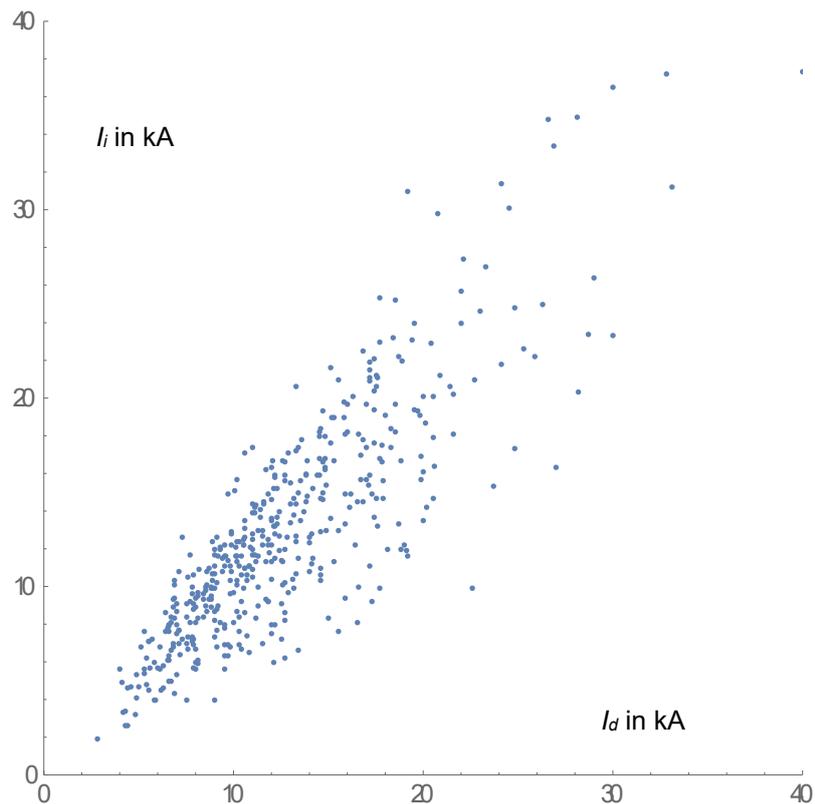


Abb. 5.9 Vergleich der direkt und indirekt gemessenen Blitzströme

Der Betrag der direkt gemessenen Blitzströme in kA ist auf der Abszisse, der der indirekt gemessenen Blitzströme ist auf der Ordinate aufgetragen.

Die beiden Größen sind im Mittel ungefähr gleichgroß, jedoch weichen die indirekt gemessenen Ströme einzelner Blitze erheblich von den direkt gemessenen Werten ab. Diese Abweichungen wachsen mit der Größe der Blitzströme an. Um dies näher zu untersuchen, werden die Logarithmen der Ströme in Abb. 5.10 aufgetragen.

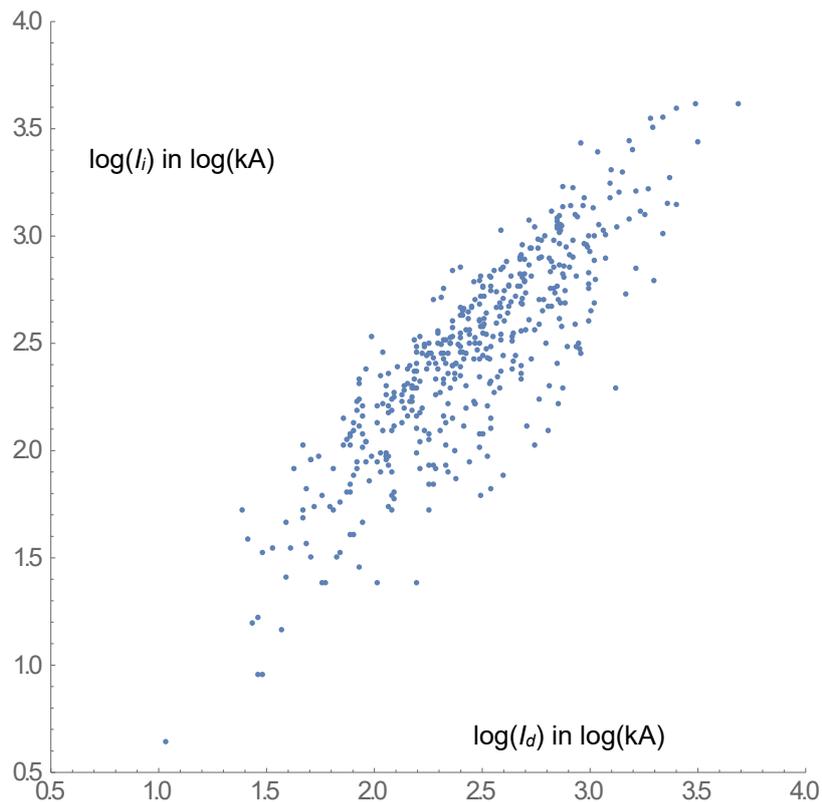


Abb. 5.10 Vergleich der Logarithmen der direkt und indirekt gemessenen Blitzströme

Der Logarithmus des Betrages der direkt gemessenen Blitzströme in kA ist auf der Abszisse und der Logarithmus des Betrages der indirekt gemessenen Blitzströme in kA ist auf der Ordinate aufgetragen.

Die Darstellung in Abb. 5.10 legt nahe, dass der Logarithmus des berechneten Stromes $\log I_i$ dem Logarithmus des gemessenen Stromes $\log I_d$ entspricht plus eines für jeden Blitz individuellen Wertes ξ , der als stochastischer Messfehler oder Rauschen aufgefasst werden kann, und dessen Verteilung nicht von dem direkt gemessenen Strom abhängt, also folgendes gilt:

$$\log I_i = \log I_d + \xi. \quad (5.25)$$

Somit gilt für die Ströme:

$$I_i = I_d \xi. \quad (5.26)$$

D. h. die Messwerte I_i sind mit einem multiplikativen Rauschen ξ behaftet. In Abb. 5.11 sind die Werte der relativen Abweichung $\xi = I_i/I_d$ der indirekt gemessenen Blitzsichelstromstärken von der direkt gemessenen Blitzsichelstromstärken der einzelnen Blitze dargestellt.

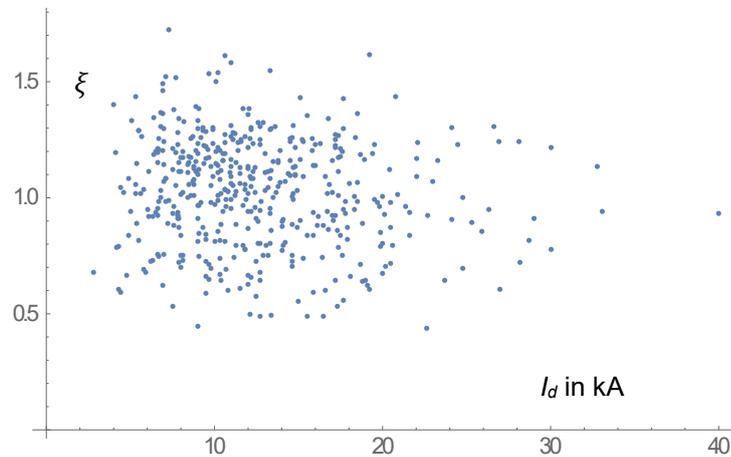


Abb. 5.11 Relative Abweichungen der indirekt gemessenen Blitzsichelstromstärken von der direkt gemessenen Blitzsichelstromstärke der einzelnen Blitze

Die relative Abweichung ξ der indirekt gemessenen Blitzsichelstromstärke von der direkt gemessenen Blitzsichelstromstärke der einzelnen Blitze (Ordinate) ist gegen den Betrag der direkt gemessenen Blitzströme in kA (Abszisse) aufgetragen.

Die Breite der Verteilung der relativen Abweichungen ξ beträgt ca. $\pm 50\%$. In Abb. 5.12 ist die Verteilung der Abweichungen ξ in Form eines Histogramms dargestellt.

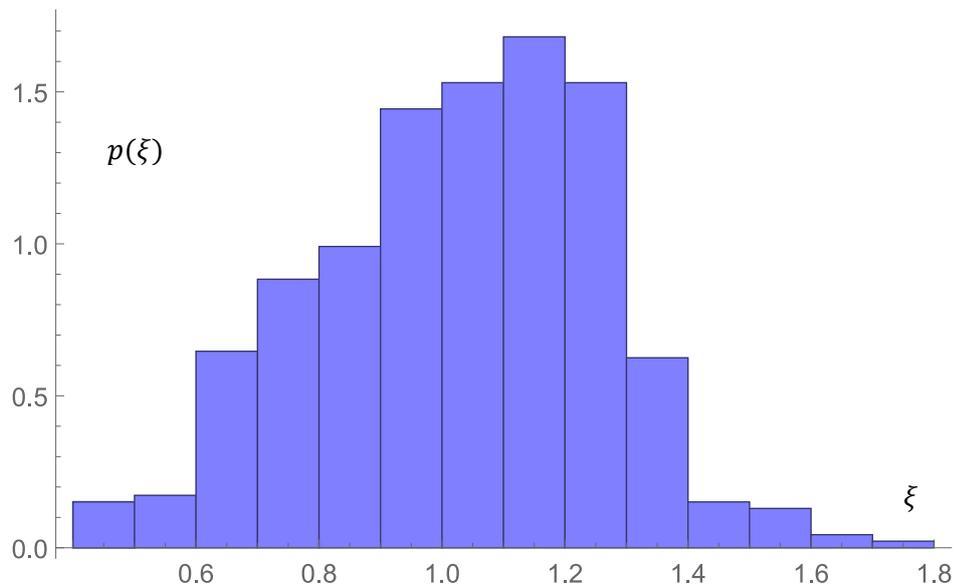


Abb. 5.12 Histogramm der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzscheidenstromstärken von den direkt gemessenen Blitzscheidenstromstärken.

Die relative Abweichung ξ ist auf der Abszisse, die Dichte (d. h. die Anzahl der Blitze im Bin geteilt durch die Gesamtzahl und die Breite des Bins) auf der Ordinate aufgetragen.

Eine Abhängigkeit von der direkt gemessenen Blitzscheidenstromstärke ist Abb. 5.11 nicht zu entnehmen. Dies wird im Folgenden näher untersucht. Hierzu werden die Verteilungen von ξ für verschiedene Werte der direkt gemessenen Blitzscheidenstromstärke näher betrachtet. Dazu werden zunächst die Blitze in zwei gleich große Mengen von jeweils 232 Blitze aufgeteilt, indem alle Blitze mit direkt gemessener Blitzscheidenstromstärke von weniger, als 11,7 kA der einen und alle von 11,7 kA oder mehr der anderen Menge zugeordnet werden. In Abb. 5.13 ist die Verteilung der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzscheidenstromstärken von den direkt gemessenen Blitzscheidenstromstärken der einzelnen Blitze in Form von Histogrammen für die beiden Mengen dargestellt.

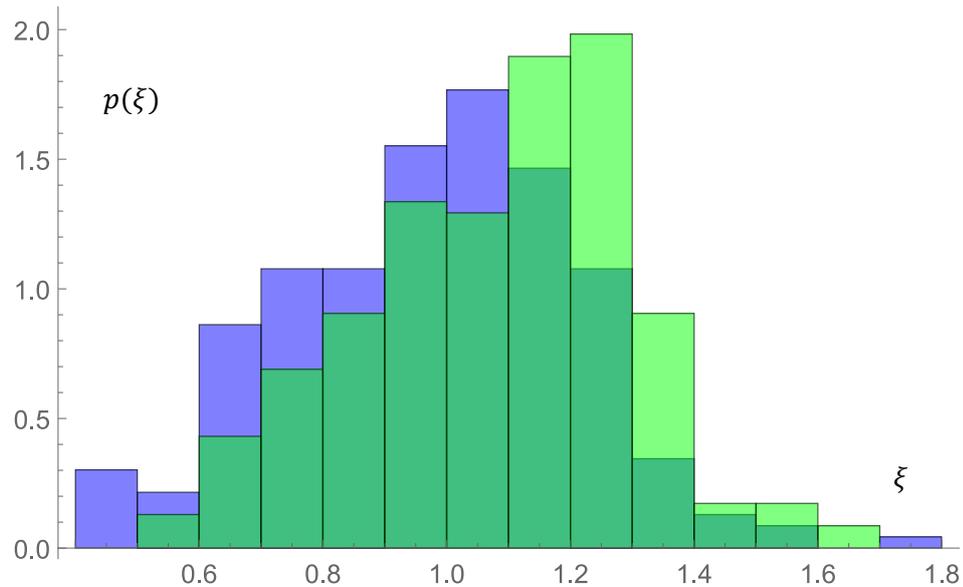


Abb. 5.13 Histogramme der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzsicherheitstärken von der direkt gemessenen Blitzsicherheitstärken für Blitze mit kleinen bzw. großen direkt gemessenen Blitzsicherheitstärken.

Das blaue Histogramm beinhaltet 232 Blitze mit direkt gemessenen Blitzsicherheitstärken kleiner als 11,7 kA, das grüne Histogramm die 232 Blitze mit direkt gemessenen Blitzsicherheitstärken größer als oder gleich 11,7 kA. Die relative Abweichung ξ ist auf der Abszisse, die Dichte (d. h. die Anzahl der Blitze im Bin geteilt durch die Gesamtzahl und die Breite des Bins) auf der Ordinate aufgetragen. Aufgrund des Überlapps des blauen und hellgrünen Histogramms erscheinen Werte, die in beiden Histogrammen enthalten sind, in dieser Darstellung dunkelgrün.

In Abb. 5.13 sind Unterschiede der Verteilungen erkennbar: Blitze mit Sicherheitstärken von mehr als 11,7 kA haben systematisch eine geringere relative Abweichung als Blitze mit kleinerer Sicherheitstärke, d. h. für Blitze mit Sicherheitstärken von mehr als 11,7 kA wird die Blitzsicherheitstärke durch die indirekte Messung eher überschätzt. Charakteristika der Verteilungen sind in Tab. 5.5 aufgeführt. Der Berechnung der Konfidenzintervalle³² ist die Annahme zugrunde gelegt, dass die ξ einer Gaußverteilung unterliegen. Diese Annahme ist näherungsweise erfüllt (siehe Abb. 5.12 und 5.13).

³² Bei N Proben $x_1 \dots x_N$ einer gaußverteilten Zufallsgröße wird das symmetrische Konfidenzintervall zum Irrtumsniveau ι zu $[\langle x \rangle - t(1 - \iota/2, N - 1)\sqrt{v/N}, \langle x \rangle + t(1 - \iota/2, N - 1)\sqrt{v/N}]$ geschätzt, wobei $\langle x \rangle$ den Stichprobenmittelwert, $v = 1/(N - 1) \sum_{j=1}^N x_j^2$ die korrigierten Stichprobenvarianz und $t(\alpha, n)$ das α -Quantil der t-Verteilung mit n Freiheitsgraden bezeichnet.

Tab. 5.5 Charakteristika der Verteilung von ξ für Blitze mit kleinen bzw. großen direkt gemessenen Blitzsichelstromstärken.

Direkt gemessene Blitzsichelstromstärke [kA]	Anzahl der Blitze	Mittlere direkt gemessene Blitzsichelstromstärke $\langle I_d \rangle$	Mittelwert $\langle \xi \rangle$	Standardabweichung $\sqrt{\langle (\xi - \langle \xi \rangle)^2 \rangle}$	95 %-Konfidenzintervall des Mittelwertes $\langle \xi \rangle$
< 11,7 kA	232	8,525	1,060	0,229	[1,031; 1,090]
\geq 11,7 kA	232	16,79	0,994	0,230	[0,964; 1,024]

Die mittleren Werte $\langle \xi \rangle$ weichen für beide Teilmengen signifikant ab – die beiden geschätzten 95 %-Konfidenzintervalle des Mittelwertes für Blitze mit Stromstärken von weniger bzw. mehr oder gleich 11,7 kA überlappen nicht.

Es wurde auch untersucht, ob sich diese Abhängigkeit in den Daten nicht anhand anderer Charakteristika erklären lässt. Dies ist in Anhang A dargestellt. Es stellte sich heraus, dass dies nicht der Fall ist. Allerdings wurde auch ein anderer weiterer systematischer Einflussfaktor – der Zeitpunkt der Messung – identifiziert, der nicht direkt (da sich die Physik nicht geändert hat) sondern nur indirekt über Änderungen der Messeinrichtungen und -verfahren der direkten oder indirekten Messungen wirksam geworden sein kann.

Demnach ist davon auszugehen, dass die Berechnung der Blitzsichelstromstärken bei großen Blitzen im Mittel zu einer leichten Überschätzung führt. Allerdings sind die beobachteten Abweichungen im Vergleich zu anderen Unsicherheitsquellen klein und auch vergleichbar mit den Änderungen, die mit dem Zeitpunkt der Messung verknüpft sind.

Eine – grundsätzlich mögliche – Extrapolation der gefundenen systematischen Abweichungen zu zehnmal höheren Werten und zu positiven Blitzen wäre mit erheblicher Unsicherheit verknüpft. Daher wird hier darauf verzichtet.

Grundsätzlich bleibt die Unsicherheit, ob die gefundene relativ gute Übereinstimmung im Mittel auch gilt

- für andere Werte der Blitzsichelstromstärke, insbesondere wesentlich größere, und
- für positive Blitze

Aufgrund der physikalischen Grundlage der indirekten Messung der Blitzscheidenstromstärken besteht eine theoretisch herleitbare Proportionalität zwischen gemessenen Feldstärken und Blitzscheidenstromstärken /URM 75/. Daher wird davon ausgegangen, dass dies mit ausreichender Genauigkeit gegeben ist und keine erheblichen systematischen Abweichungen durch die indirekte Messung verursacht werden.

5.2.14.1 Erklärbarkeit der Blitze mit indirekt gemessenen hohen Scheitelstrom durch die Unsicherheit der indirekten Messung

Wie oben bereits dargestellt, sind die indirekten Messungen der Scheitelstromstärke individuell mit einer hohen Unsicherheit $p_{i|d}(I_i|I_d)$ behaftet. Im Mittel ist die Abweichung jedoch gering. Im Folgenden wird untersucht, ob diese hohe Unsicherheit die Ursache für die gemessenen Werte von Blitzscheidenstromstärken von mehr als 200 kA bzw. weniger, als -100 kA sein kann.

Die Verteilungsdichte $p_i(I_i)$ des indirekt gemessenen Stromes, ergibt sich, wenn $p_d(I_d)$ die Verteilungsdichte des direkt gemessenen Stromes ist, zu

$$p_i(I_i) = \int p_{i|d}(I_i|I_d)p_d(I_d) dI_d. \quad (5.27)$$

$p_i(I_i)$ und $p_{i|d}(I_i|I_d)$ sind näherungsweise bekannt; hieraus ist $p_i(I_i)$ zu schätzen. Wegen des mit der Unsicherheit $p_{i|d}(I_i|I_d)$ verbundenen Informationsverlustes ist es im Allgemeinen nicht möglich $p_i(I_i)$ eindeutig zu bestimmen. Es müssen zusätzliche Informationen und Annahmen, z. B. im Rahmen einer Bayesschen Analyse, in welcher die a posteriori-Wahrscheinlichkeit der Verteilung aller möglichen Verläufe $p_i(I_i)$ mithilfe von a priori-Informationen bestimmt wird, einfließen. Hierzu sind aufwendigere Überlegungen und numerische Rechenmethoden erforderlich /MEI 09/, die über den Umfang des Vorhabens hinausführen.

Um aber trotzdem die Frage beantworten zu können, ob die Messfehler bei der Messung der Parameter einzelner Blitze die Ursache, der bei indirekter Messung gefundenen sehr hohen Scheitelstromstärken sein können, wird wie folgt vorgegangen: Zunächst wird eine einfache approximative Schätzung der Verteilung der tatsächlichen Blitzscheidenstromstärken durchgeführt. Hierzu werden alle Messungen verworfen, die einen Blitz-

scheitelstrom von mehr als 200 kA bzw. weniger, als -100 kA aufweisen. Diese Schätzung ist pessimistisch, da sie ausschließlich widerspiegelt, dass Werte von mehr als 200 kA bzw. weniger als -100 kA nicht auftreten. Sie berücksichtigt nicht, dass auch hohe Blitzströme von weniger als 200 kA bzw. mehr als -100 kA tatsächlich weniger wahrscheinlich auftreten, da diese durch Messabweichungen von Blitzscheitelstromstärken schwächerer Blitze zustande kommen können. Somit ist davon auszugehen, dass große Blitzscheitelstromstärken auch in dieser Verteilung überrepräsentiert sind.

Basierend auf diesem approximativen Schätzen der Verteilung der tatsächlichen Blitzscheitelstromstärken wird untersucht, wie sich die Messgenauigkeit der indirekten Messung auf die Verteilung auswirkt. Diese Messgenauigkeit wird in Form der empirischen Verteilung der relativen Abweichungen der direkt und indirekt gemessenen Blitzscheitelstromstärken (siehe Gleichung 5.26 und folgende Abbildungen) berücksichtigt. Durch Anwendung eines Monte-Carlo-Verfahrens wird die Verteilung der indirekten Messwerte bestimmt. Hierbei wird angenommen, dass die Messwerte der indirekten Messung innerhalb der 10 kA-Intervalle gleichverteilt sind. In Abb. 5.14 sind als Beispiel für positive Blitze die Verteilungsfunktionen der indirekt gemessenen Scheitelströme, die wie oben beschriebenen approximativ geschätzte Verteilungsfunktion der wahren Scheitelströme und die daraus berechnete Verteilungsfunktion nach Berücksichtigung der Messfehler dargestellt.

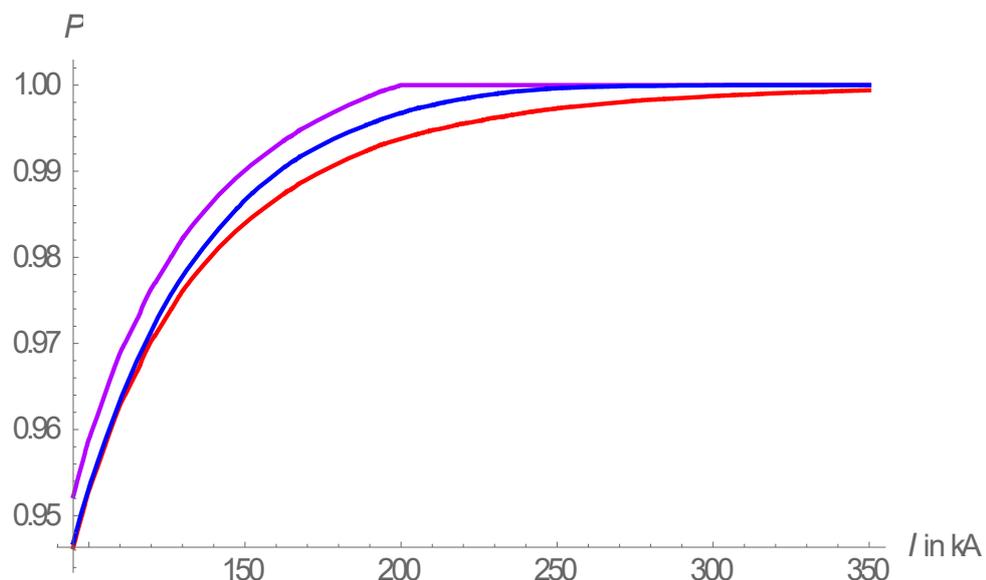


Abb. 5.14 Verteilungsfunktionen der indirekt gemessenen Scheitelströme positiver Blitze

Verteilungsfunktion der indirekt gemessenen Scheitelströme, approximativ geschätzter Verteilungsfunktion der wahren Scheitelströme und daraus berechnete Verteilungsfunktion nach Berücksichtigung der Messfehler der indirekten Messung

Die Verteilungsfunktion der indirekt gemessenen Scheitelströme ist rot, die approximativ geschätzte Verteilungsfunktion der wahren Scheitelströme violett und die daraus berechnete Verteilungsfunktion nach Berücksichtigung der Messfehler der indirekten Messung blau dargestellt. Die approximativ geschätzte Verteilungsfunktion der wahren Scheitelströme ist bis zum Wert 200 kA proportional zur Verteilungsfunktion der indirekt gemessenen Scheitelströme, danach Eins. Die Verteilungsfunktion nach Berücksichtigung der Messfehler liegt für Scheitelstromstärken über 200 kA oberhalb der Verteilungsfunktion der indirekt gemessenen Scheitelstromstärken. Insbesondere für Scheitelstromstärken über 250 kA ist sie nahe Eins. Dies heißt, große Scheitelstromstärken sind gemäß dieser Verteilung deutlich weniger wahrscheinlich als tatsächlich gemessen.

Eine analoge Untersuchung wurde in Bezug auf die Werte der Robustheitsbetrachtung der Regel des KTA 2206 von 300 kA bzw. -150 kA durchgeführt.

In folgender Tabelle sind die empirische Originalverteilung und die wie oben beschrieben erzeugte Verteilung verglichen für positive und negative Blitze dargestellt. Es sind jeweils die Wahrscheinlichkeiten, dass Blitze Scheitelstromstärken von mehr als 200 kA bzw. weniger als -100 kA aufweisen, als Werte der Verteilungsfunktion für positive Blitze $1 - P_+(200 \text{ kA})$ bzw. negative Blitze $P_-(-100 \text{ kA})$ angegeben.

Tab. 5.6 Anteil der positiven und negativen Blitze mit indirekt gemessenen Scheitelstromstärken

Hier Scheitelstromstärken von mehr als 200 kA bzw. 300 kA und weniger als -100 kA bzw. -150 kA für tatsächlich beobachtete und mit dem Monte-Carlo-Verfahren zur Berücksichtigung der Messungenauigkeit ermittelte Verteilungen

	Positive Blitze		Negative Blitze	
	$1 - P_+(200 \text{ kA})$	$1 - P_+(300 \text{ kA})$	$P_-(-100 \text{ kA})$	$P_-(-150 \text{ kA})$
Beobachtung	0,620 %	0,130 %	0,400 %	0,120 %
Monte-Carlo-Verfahren	0,320 %	0,085 %	0,190 %	0,055 %
Verhältnis	51,500 %	66,700 %	46,400 %	57,100 %

Der Anteil der positiven und negativen Blitze mit Scheitelstromstärken von mehr als 200 kA bzw. weniger als -100 kA für tatsächliche und simulierte Messverteilung

unterscheidet sich jeweils um einen Faktor von etwa Zwei im Fall der Auslegungsscheitelstromstärken bzw. Anderthalb im Fall der Scheitelstromstärken für die Robustheitsbetrachtungen. Es ist zu betonen, dass diese Untersuchung wie oben beschrieben eher pessimistisch ist in dem Sinne, dass zu erwarten ist, dass der tatsächliche Effekt der Messunsicherheit durch die indirekte Messung kleiner ist. Statistische Unsicherheiten spielen wegen der großen Anzahl der gemessenen Blitze mit sehr hohen Scheitelstromstärken (2.364 mit Scheitelstromstärken von mehr als 200 kA, 485 mit Scheitelstromstärken von mehr als 300 kA, 9.938 mit Scheitelstromstärken von weniger als 100 kA, 2.377 mit Scheitelstromstärken von weniger als 150 kA) hier keine Rolle.

Somit kann geschlossen werden, dass die Existenz von Messergebnissen der indirekten Blitzscheidenstrommessungen mit Scheitelstromstärken von mehr als 200 kA bzw. und weniger als 100 kA bzw. mit Scheitelstromstärken von mehr als 300 kA und weniger als 150 kA nicht vollständig aus der hohen Messunsicherheit des Messverfahrens in Bezug auf die Scheitelstromstärken einzelner Blitze erklärbar ist.

5.2.14.2 Korrekturfaktor

Der oben diskutierte Effekt, dass die Unsicherheit der indirekten Blitzparameterbestimmung in zu hohen Scheitelstrommesswerten resultieren, kann durch einen Korrekturfaktor beschrieben werden, der den Anteil der nicht durch diesen Effekt verursachten (d. h. echten) Blitze oberhalb des Auslegungswertes beschreibt. Dieser Korrekturfaktor wird nach obiger Diskussion in Bezug auf die Auslegungswerte zu $k_{id} = 1/2$ und in Bezug auf die der Robustheitsbetrachtung werden zu $k_{id} = 1/3$ angesetzt. Konservativ ist es, diese Korrektur nicht vorzunehmen, d. h. $k_{id} = 1$ zu verwenden.

5.2.15 Verteilung der indirekt gemessenen Stromscheidenwerte in Deutschland

Die Verteilungen der Stromscheidenwerte in Deutschland basieren auf den Daten des Blitzinformationsdienst von Siemens (siehe Kap. 5.2.3). Im Folgenden wird die Analyse der für ganz Deutschland akkumulierten Daten dargestellt. In Abb. 5.15 ist die Verteilung der indirekt gemessenen Scheitelstromstärken der positiven Blitze aus den von der GRS erworbenen Daten des Blitz Informationsdienstes von Siemens für den Zeitraum vom 1. Januar 2014 bis zum 12. September 2019 dargestellt. Der Anteil von Blitzen mit einer Scheitelstromstärke von mehr als 200 kA ist sehr gering (0,62 %). Trotzdem ist die absolute Anzahl solcher in den Messdaten enthaltenen Blitze in Deutschland mit 2.364

relativ groß (siehe Abb. 5.16), so dass nicht zu erwarten ist, dass statistische Unsicherheiten eine erhebliche Rolle spielen, selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Blitze keine statistisch unabhängigen Ereignisse darstellen.

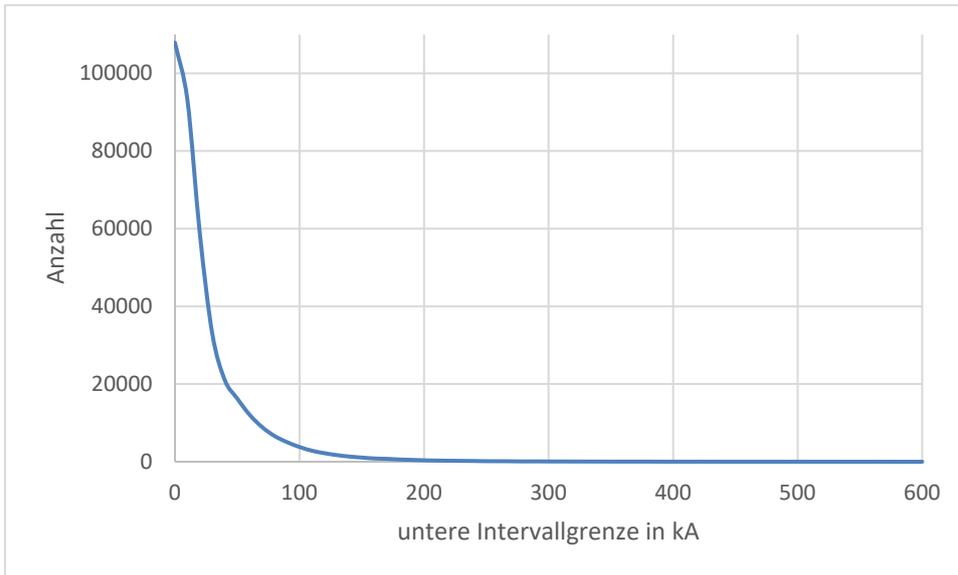


Abb. 5.15 Anzahl der positiven Blitze in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls

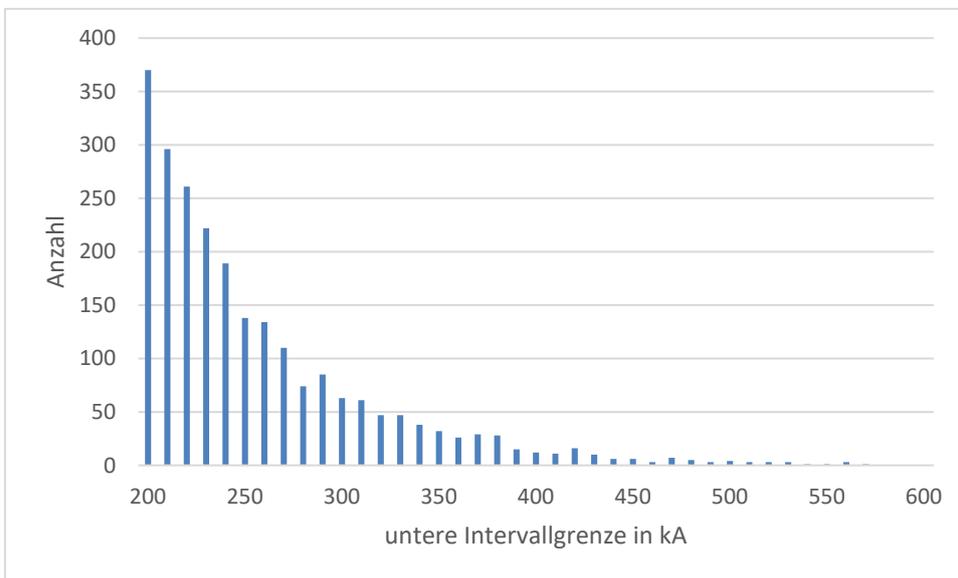


Abb. 5.16 Anzahl der positiven Blitze mit Scheitelstromstärken größer 200 kA in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls

Analog sind in Abb. 5.17 und Abb. 5.18 die Verteilungen für die negativen Blitze dargestellt. Hier ist der Anteil der in den Messdaten enthaltener Blitze in Deutschland mit

Scheitelstromstärken von mehr als 100 kA ebenfalls sehr gering, die Anzahl mit 9.938 jedoch groß.

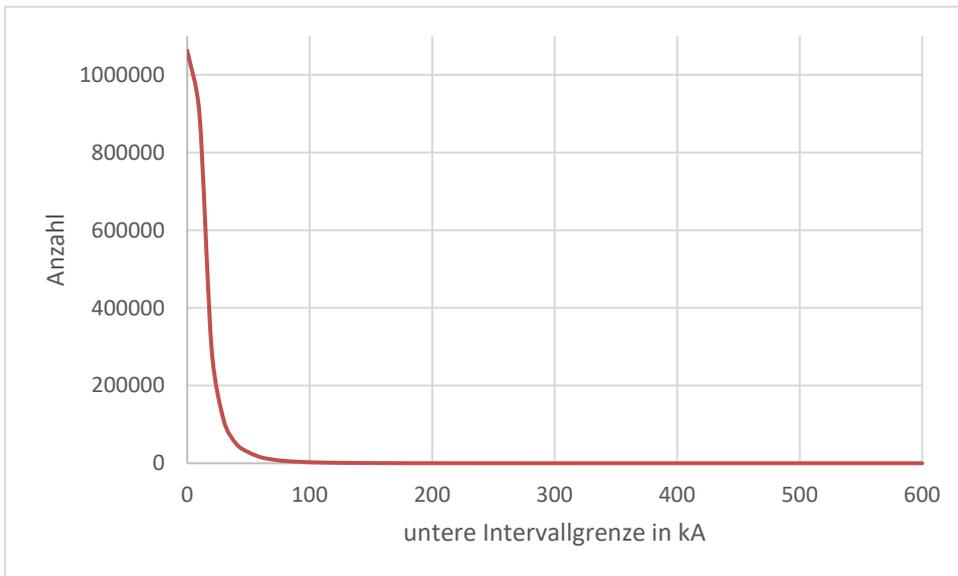


Abb. 5.17 Anzahl der negativen Blitze in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls

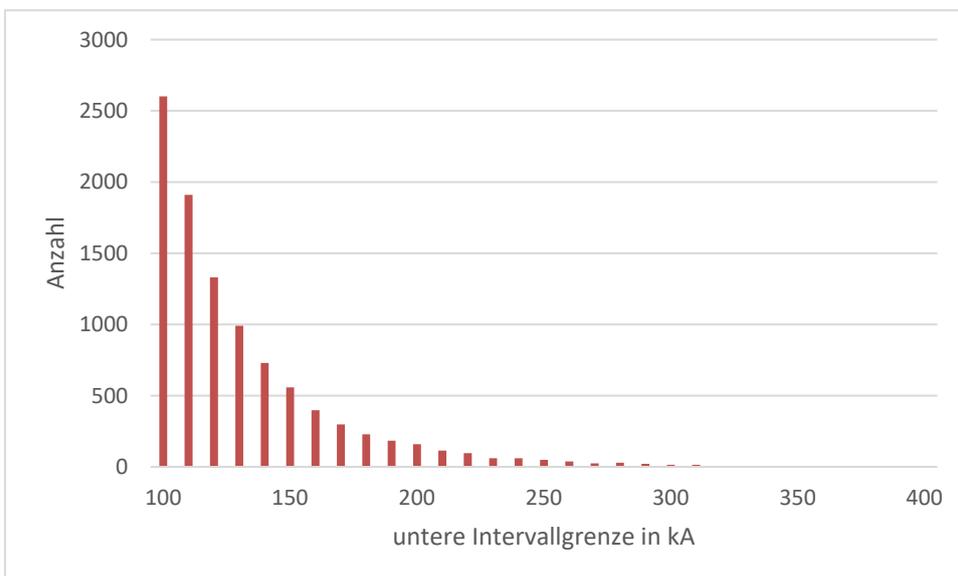


Abb. 5.18 Anzahl der negativen Blitze mit Scheitelstromstärken größer 100 kA in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls

In folgender Tab. 5.7 sind die Anzahlen der Blitze mit hohen indirekt gemessenen Scheitelstromstärken dargestellt.

Tab. 5.7 Anzahlen und Anteile von Blitzen mit indirekt gemessenen Scheitelstromstärken

Hier betreffend welche Auslegungswerte bzw. Robustheitswerte überschreiten. 1Der Auslegungswert von 50 kA bezieht sich auf Folgeblitze und der Auslegungswert von 100 kA auf Erstblitze. In den vorliegenden Daten wird jedoch nicht nach Erst- und Folgeblitzen differenziert.

		positive Blitze		negative Blitze		
		Anzahl	Anteil in %		Anzahl	Anteil in %
Auslegungs- überschreitend	> 200 kA	2.364	0,62	> 50 kA	73.104	2,94
				> 100 kA	9.938	0,40
Robustheits- überschreitend	> 300 kA	485	0,13	> 150 kA	3.106	0,12

Es ist zu betonen, dass die Messungen der Scheitelstromstärken individueller Einzelblitze mit einer hohen Messunsicherheit behaftet sind (siehe Kap. 5.2.1). Die Folgen der Messabweichungen für die Verteilungen indirekt gemessener Scheitelstromstärken werden in Kap. 5.2.14.1 diskutiert.

5.2.16 Verteilung der Stromscheitelwerte am Anlagenort

Die Verteilung der Stromscheitelwerte am Anlagenort wird aus der Verteilung der Stromscheitelwerte in Deutschland (siehe 5.2.17) unter Berücksichtigung einer möglichen Ortsabhängigkeit der Verteilung der Stromscheitelwerte bestimmt. Diese wird, wie in Kap. 5.2.11 dargestellt, als „Stauchung“ der Verteilung modelliert. Dies entspricht der Modellvorstellung, dass am Anlagenort die Form der Verteilung gleich ist, aber schmaler oder breiter sein kann, d. h. der mittlere Stromscheitelwert abweichen kann. Abschätzungen über den Faktor, um den die mittleren Stromscheitelwerte abweichen können, sind in Kap. 5.2.11 angegeben.

5.2.17 Verteilung der Stromscheitelwerte in Deutschland

Die Verteilung der Stromscheitelwerte in Deutschland lassen sich nur indirekt bestimmen (siehe Kap. 5.2.15). Die sich aus der indirekten Messung ergebenden Schlussfolgerungen für die tatsächlichen Verteilungen der Stromscheitelwerte sind in Kap. 5.2.14, insbesondere 5.2.14.1 und folgende, diskutiert.

5.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die sich aus der Anwendung des oben dargestellten Modells ergeben. Zunächst werden generische Ergebnisse präsentiert, bei der die für Deutschland insgesamt geltenden Blitzstatistiken auf die Referenzanlage angewandt werden. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt, die sich auf die sieben verschiedenen Anlagenstandorte beziehen.

5.3.1 Generische Ergebnisse

Wenn die Verteilungen bzw. Werte, die für Deutschland insgesamt gültig sind, auf die Referenzanlage (moderner Druckwasserreaktor der Reihe Konvoi) angewendet werden, so ergeben sich die in Tab. 5.8 dargestellten Ergebnisse.

Tab. 5.8 Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromsicherheit überschreiten. (1)

Gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen von Fortluftkamin oder Reaktorgebäude.

Negative Folgeblicke mit Stromsicherheit von mehr als 50 kA sind nicht berücksichtigt.

		Auslegung		Robustheit	
Anwendung Korrekturfaktor (s. Kap. 5.2.14.2)		Nein	Ja	Nein	Ja
Fortluftkamin	Positive Blitze	8,402E-04	4,201E-04	1,724E-04	5,746E-05
	Negative Blitze	3,532E-03	1,766E-03	8,448E-04	2,816E-04
	Gesamt	4,372E-03	2,186E-03	1,017E-03	3,391E-04
Reaktorgebäude	Positive Blitze	2,601E-05	1,301E-05	5,337E-06	7,116E-06
	Negative Blitze	1,094E-04	5,468E-05	2,616E-05	3,487E-05
	Gesamt	1,354E-04	6,768E-05	3,149E-05	4,199E-05
Reaktorgebäude, konservative Abschätzung $C_D = 1$	Positive Blitze	1,041E-04	5,203E-05	2,135E-05	2,846E-05
	Negative Blitze	4,374E-04	2,187E-04	1,046E-04	1,395E-04
	Gesamt	5,415E-04	2,707E-04	1,260E-04	1,680E-04

Wie in Kap. 5.1 diskutiert, ist eine Auslegung, die bezogen auf die Einwirkung durch Blitz mit einer Rate von weniger als 10^{-4} pro Jahr bei eindeutig konservativer Rechnung nicht überschritten wird, in Übereinstimmung mit dem Regelwerk der WENRA. Die oben genannten Raten sind höher als dieser Wert. Eine Ausnahme bildet die Rate auslegungsüberschreitender Blitze direkt auf das Reaktorgebäude bei Anwendung des Korrekturfaktors zum Ausgleich der Auswirkung der Messungenauigkeit der indirekten Messungen und bei Ansatz des Standortfaktors $C_D = 0,25$. Anhand der hier durchgeführten Untersuchungen lässt sich allerdings nicht feststellen, dass diese Rechnung eindeutig konservativ ist. Da insbesondere nicht bewertbar ist, inwieweit der bei der Berechnung für das Reaktorgebäude verwendete Standortfaktor $C_D = 0,25$ konservativ ist, sind in Tab. 5.8 zusätzlich Ergebnisse für eine konservative Wahl $C_D = 1$ angegeben. Die Ergebnisse sind ebenfalls größer als 10^{-4} pro Jahr.

Es ist zu betonen, dass die hier durchgeführten Abschätzungen sowohl bezüglich ihrer Datenbasis als auch ihrer Genauigkeit der Methodik beschränkt sind. Durch aufwendigere Modellierungen und eine umfassendere detailliertere Datenbasis könnten genauere Ergebnisse erzielt werden.

Wie in Kap. 5.2.10 diskutiert, legen blitzphysikalische Überlegungen und Abschätzungen nahe, dass es eine Obergrenze von auftretenden Blitzscheitelstromstärken geben könnte. In folgender nicht konservativer Berechnung wird dies berücksichtigt, indem sämtliche Blitze mit einem indirekt gemessenen Scheitelstromwert von mehr als 300 kA verworfen werden. Darüber hinaus werden die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ungenauigkeit der Einzelmessungen der indirekten Blitzmessung angewandt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5.9 dargestellt.

Tab. 5.9 Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromsicherheit überschreiten. (2)

Unter der Maßgabe: Gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen von Fortluftkamin oder Reaktorgebäude unter der Annahme, dass Blitze mit einer Scheitelstromstärke über 300 kA nicht auftreten können.

Negative Folgeblitze mit Stromsicherheit von mehr, als 50 kA sind nicht berücksichtigt.

		Auslegung	Robustheit
Anwendung Korrekturfaktor		Ja	Ja
Fortluftkamin	Positive Blitze	3,339E-04	0
	Negative Blitze	1,755E-03	2,745E-04
	Gesamt	2,089E-03	2,745E-04
Reaktorgebäude	Positive Blitze	1,03E-05	0
	Negative Blitze	5,44E-05	8,50E-06
	Gesamt	6,47E-05	8,50E-06

Die berechneten Raten der die Auslegung überschreitenden Blitze überschreiten auch unter diesen Annahmen für die Einfangflächen des Fortluftkamins den Wert von 10^{-4} pro Jahr, während für das Reaktorgebäude der Wert von 10^{-4} pro Jahr nicht überschritten wird. In den angegebenen Werten sind die negativen Folgeblitze größer 50 kA nicht enthalten.

Diese Berechnung beinhaltet folgende nichtkonservativen (optimistischen) Elemente:

- Verwendung der Korrekturfaktoren für die Ungenauigkeit der indirekten Blitzmessung.
- Verwerfen aller Blitze mit einer Scheitelstromstärke von mehr als 300 kA. Es ist davon auszugehen, dass Blitze mit indirekt gemessener Scheitelstromstärke von mehr als 300 kA überwiegend keine vollständigen Fehlmessungen, sondern Messungen mit überschätzten Werten wären. Nach der in Kap. 5.2.1 untersuchten Verteilung der relativen Messunsicherheiten, wäre der wahre Wert der Scheitelstromstärke mit überwiegender Wahrscheinlichkeit mehr als 200 bzw. 150 kA und der Blitz würde somit die Auslegung überschreiten.

- Nichtberücksichtigung der negativen Folgeblitze mit Scheitelstromstärken von mehr als 50 kA. Die Gesamtrate der negativen Blitze mit Scheitelstromstärken zwischen 50 und 100 kA beträgt $2,245 \cdot 10^{-2}$ für die Einfangfläche des Fortluftkamins und $2,780 \cdot 10^{-3}$ für die Einfangfläche des Reaktorgebäudes. Der Anteil von Folgeblitzen hieran ist unbekannt, während es gesichert ist, dass es negative Folgeblitze mit Scheitelstromstärken von mehr als 50 kA gibt.
- Demgegenüber enthält die Berechnung – im Falle des Fortluftkamins – als konservatives Element die
- Berechnung der Einfangfläche (siehe Kap. 5.2.8.3).

Für das Reaktorgebäude ist die verwendete Einfangfläche nur bis zu einer Scheitelstromstärke von etwa 150 kA konservativ. Inwieweit der bei der Berechnung für das Reaktorgebäude verwendete Standortfaktor $C_D = 0,25$ nichtkonservativ ist, kann nicht bewertet werden. Wenn auch hier konservativ $C_D = 1$ verwendet wird, ist das Ergebnis größer als 10^{-4} pro Jahr.

In Bezug auf die oben genannten Ergebnisse ist zu betonen, dass es sich um eine generische Rechnung unter Verwendung der Blitzstatistik von ganz Deutschland handelt und es nicht erwartet werden kann, dass die ermittelten Werte für einen speziellen Standort zutreffend sein müssen. Standortspezifische Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

5.3.2 Anlagenspezifische Ergebnisse

Bei den anlagenspezifischen Ergebnissen wurden die jeweiligen Höhen der Fortluftkammine und die Höhen und Geometrien der Reaktorgebäude berücksichtigt. Die Fortluftkammine wurden als Stab vernachlässigbaren Durchmessers modelliert (siehe Kap. 5.2.8). Das Reaktorgebäude von DWR-Anlagen wurde wie in Anhang A.1 beschrieben modelliert, während die Geometrie des Reaktorgebäudes eines Forschungsreaktors als Quader und eines Siedewasserreaktors als Zylinder modelliert wurde.

Für die generischen Daten wurden die Werte der Referenzanlage verwendet.

Die Ergebnisse für den Fortluftkamin sind in der folgenden Tab. 5.10 aufgeführt.

Tab. 5.10 Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromsicherheit gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen des Fortluftkamins überschreiten

Negative Folgeblitze mit Stromsicherheit von mehr als 50 kA sind nicht berücksichtigt.

Anwendung Korrekturfaktor	Auslegung		Robustheit	
	Nein	Ja	Nein	Ja
Anlage 1	3,29E-03	1,64E-03	6,91E-04	2,30E-04
Anlage 2	5,84E-03	2,92E-03	1,02E-03	3,41E-04
Anlage 3	4,08E-04	2,04E-04	5,47E-05	1,82E-05
Anlage 4	6,62E-03	3,31E-03	1,36E-03	4,55E-04
Anlage 5	2,94E-03	1,47E-03	5,66E-04	1,89E-04
Anlage 6	1,47E-03	7,35E-04	2,74E-04	9,14E-05
Anlage 7	9,35E-03	4,67E-03	2,54E-03	8,47E-04
Generisch ³³	4,55E-03	2,28E-03	1,01E-03	3,37E-04

Die Ergebnisse für das Reaktorgebäude sind in der folgenden Tab. 5.11 aufgeführt.

³³ Die geringen Abweichungen unter „Generisch“ zu den in Tab. 5.10 dargestellten Raten resultieren daraus, dass die Datenbasis verschieden ist: Für die jetzige Tabelle wurden einheitlich nur die Daten von 2014-2018 verwandt, da für die einzelnen Anlagen nur Daten dieser Jahre vorliegen, während für ganz Deutschland Daten bis 12. September 2019 vorliegen. Diese wurden in Tab. 5.11 verwandt.

Tab. 5.11 Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromsicherheit gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen des Reaktorgebäudes überschreiten

Negative Folgeblitze mit Stromsicherheit von mehr als 50 kA sind nicht berücksichtigt.

Anwendung Korrekturfaktor	Auslegung		Robustheit	
	Nein	Ja	Nein	Ja
Anlage 1	3,47E-04	1,74E-04	7,22E-05	2,41E-05
Anlage 2	1,80E-04	9,01E-05	1,24E-05	4,14E-06
Anlage 3	7,79E-05	3,89E-05	1,02E-05	3,38E-06
Anlage 4	2,03E-04	1,02E-04	3,86E-05	1,29E-05
Anlage 5	1,19E-04	5,93E-05	1,64E-05	5,46E-06
Anlage 6	4,55E-05	2,27E-05	7,98E-06	2,66E-06
Anlage 7	3,35E-04	1,68E-04	8,73E-05	2,91E-05
Generisch	1,41E-04	7,05E-05	2,78E-05	9,25E-06

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch für die anlagenspezifischen Berechnungen die Korrekturfaktoren verwendet wurden, die auf Basis der Daten für ganz Deutschland abgeschätzt wurden. Dies stellt eine weitere erhebliche Unsicherheitsquelle dar, da die Korrekturwerte von der Verteilung der Blitzsicherheitstromstärken abhängig sind, die wiederum ortsabhängig ist. Die geringe Datenmenge reicht aber nicht für eine ortsabhängige Bestimmung der Korrekturfaktoren aus. Die konservative Berechnung ohne Anwendung der Korrekturfaktoren ist von dieser Unsicherheitsquelle nicht betroffen.

Die gewonnenen anlagenstandort- und anlagentypspezifischen Ergebnisse für die Rate von auslegungsüberschreitenden Blitzen ähneln den generischen Ergebnissen. Für den Fortluftkamin ergibt das Modell unabhängig von der Wahl konservativer oder optimistischer Annahmen eine Rate auslegungsüberschreitender Blitze $> 10^{-4}$ pro Jahr. Die Rate für eine Überschreitung der Robustheitswerte liegt teilweise ebenfalls $> 10^{-4}$ pro Jahr. Dies bedeutet, dass die Rate von auslegungsüberschreitenden Blitzen auch bei einer anlagenspezifischen Betrachtung höher ist als die von der WENRA geforderte Rate für eine Einwirkung von außen (siehe Kap 5.1). Für das Reaktorgebäude (direkte Blitzeinwirkung) ergibt sich bei den verschiedenen Kernkraftwerkstypen ein unterschiedliches Bild. Es gilt zu bedenken, dass aufgrund der wesentlich geringeren Datenbasis und der

deshalb erforderlichen zusätzlichen Modellannahmen die Unsicherheit gegenüber den generischen Ergebnissen erhöht ist.

5.4 Einordnung der Ergebnisse

Sowohl im deutschen als auch im internationalen Regelwerk sind probabilistische Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Einwirkungen von außen (EVA) genannt. Im relevanten internationalen Regelwerk existieren quantitative Anforderungen der WENRA /WEN 15/, in denen allgemein für äußere Einwirkungen eine Rate von nicht höher als 10^{-4} pro Jahr pro äußere Einwirkung unter Berücksichtigung der Unsicherheit gefordert wird. Im deutschen Regelwerk sind für bestimmte Einwirkungen von außen spezielle Kriterien in Bezug auf Einwirkungsraten festgelegt, jedoch nicht für Blitzeinwirkungen. Somit ist eine Blitzschutzauslegung, die bezogen auf die Einwirkung durch Blitz mit einer Rate von weniger als 10^{-4} pro Jahr bei eindeutig konservativer Rechnung nicht überschritten wird, in Übereinstimmung mit dem Regelwerk der WENRA.

Deshalb wurde analysiert, ob sich aus den der GRS vorliegenden Blitzdaten eine Rate auslegungsüberschreitender Blitze von höher als 10^{-4} pro Jahr unter Berücksichtigung der Unsicherheit ermitteln lässt. Es zeigt sich, dass ein sehr geringer Anteil von kleiner 1 % der indirekt gemessenen Blitzstromscheitelstärken die Auslegungswerte der Regel des KTA 2206 überschreiten. Hieraus ergeben sich Raten von über 10^{-4} pro Jahr auf die Anlagen. Allerdings weisen individuelle Messungen eine hohe Messunsicherheit auf. Zudem besteht eine Vielzahl an Unsicherheiten in Bezug auf die Genauigkeit der durch indirekte Blitzstromscheitelstärkenmessungen bestimmten Blitzstromscheitelstärken, wie beispielsweise eine Validierung der zur Berechnung der indirekten Blitzstromscheitelstärken zugrundeliegenden Formeln bis lediglich 40 kA.

Die von der GRS durchgeführten Analysen lassen auf Basis der zu Grunde gelegten Blitzdaten sowie der Recherche des momentanen Standes von Wissenschaft und Technik somit keine definitive Aussage zu, inwieweit Blitzstromscheitelstärken mit Werten oberhalb der in der KTA 2206 geforderten Auslegungswerte auftreten. Somit liegen der GRS keine ausreichenden neuen gesicherten Erkenntnisse vor, die die Änderung der Regel KTA 2206 nahelegen.

6 Zusammenfassung

Die Auswirkungen von Blitzschlägen können eine Gefahr für Menschen, Technik und bauliche Anlagen darstellen. Aus diesem Grund werden an Kernkraftwerke strenge Anforderungen in Bezug auf die Auslegung der Blitzschutzeinrichtungen angelegt. Einzuhalten sind sowohl generell gültige Normen und Vorschriften wie beispielsweise die DIN 62305 „Blitzschutz“, als auch die Regel des KTA 2206 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“. Diese Regel des KTA enthält zusätzlich zu den der Blitzschutzklasse 1 der DIN 62305 entsprechenden Vorgaben in Bezug auf Blitzparameter darüberhinausgehende Anforderungen an eine Robustheitsbetrachtung. Um eine Einschätzung in Bezug auf die Auslegung von kerntechnischen Anlagen in ähnlichen klimatischen Bedingungen zu erlangen, wurde ein exemplarischer Vergleich mit den Anforderungen der schweizerischen Richtlinie ENSI-G02/d an den Blitzschutz dortiger Kernkraftwerke vorgenommen. Es zeigt sich, dass der Robustheitswert der Scheitelstromstärke der Regel des KTA 2206 mit den Scheitelstromstärken des größten Auslegungsblitzes der ENSI-G02/d übereinstimmt. Da die Robustheitsbewertung lediglich eine anlagenspezifische Analyse und keine Forderung an die Auslegung darstellt, werden in der schweizerischen Richtlinie somit höhere Anforderungen an die Auslegung in Bezug auf Blitzstromscheitelwerte gestellt.

Sowohl im deutschen als auch im internationalen Regelwerk sind probabilistische Kriterien an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Einwirkungen von außen (EVA) genannt. Im relevanten internationalen Regelwerk existieren quantitative Anforderungen der WENRA /WEN 15/, in denen allgemein für äußere Einwirkungen eine Rate von nicht höher als 10^{-4} pro Jahr pro äußere Einwirkung unter Berücksichtigung der Unsicherheit gefordert wird. Im deutschen Regelwerk sind für bestimmte Einwirkungen von außen speziell Kriterien in Bezug auf Einwirkungsraten festgelegt, jedoch nicht für Blitzeinwirkungen. Somit ist eine Blitzschutzauslegung, die bezogen auf die Einwirkung durch Blitz mit einer Rate von weniger als 10^{-4} pro Jahr bei eindeutig konservativer Rechnung nicht überschritten wird, in Übereinstimmung mit dem Regelwerk der WENRA.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Auswertung verschiedener Daten indirekt gemessener, d. h. aus gemessenen Feldstärken berechneter, Blitzscheitelstromstärken in Deutschland und an verschiedenen Kraftwerksstandorten durchgeführt. Dabei wurden Informationen der Regel des KTA 2206 und DIN 62305 einbezogen.

Zusätzlich wurden Daten über die Beziehung zwischen tatsächlich aufgetretenen und berechneten Blitzstromscheitelwerten ausgewertet. Es zeigt sich, dass, obwohl nur ein sehr geringer Anteil kleiner 1 % der indirekt gemessenen Blitzstromscheitelwerten die Auslegungswerte der Regel des KTA 2206 überschreiten, dies Raten von über 10^{-4} pro Jahr auf die einzelnen Anlagen ergibt. Allerdings weisen individuelle Messungen eine hohe Messunsicherheit auf. Zudem besteht eine Vielzahl an Unsicherheiten in Bezug auf die Genauigkeit der durch indirekte Blitzstromscheitelwertmessungen bestimmten Blitzstromscheitelwerte, wie beispielsweise eine Validierung der zur Berechnung der indirekten Blitzstromscheitelwerten zugrundeliegenden Formeln bis lediglich 40 kA. Der momentane Stand von Wissenschaft und Technik, sowie die Auswertung von der GRS vorliegenden Blitzdaten erlauben somit keine definitive Aussage zum tatsächlichen Auftreten von Blitzstromscheitelwerten oberhalb der Auslegungswerte der Regel des KTA 2206. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen somit keine ausreichenden neuen gesicherten Erkenntnisse vor, die die Änderung der Regel des KTA 2206 nahelegen. Zukünftige neue Erkenntnisse können zu einem anderen Bewertungsergebnis führen. Der sich ständig fortentwickelnde Stand von Wissenschaft und Technik sollte sowohl in Bezug auf Neuerungen im Bereich der Blitzschutzauslegung als auch in Bezug auf Blitzforschung weiterverfolgt werden. Dabei sollte insbesondere die Theorie zur natürlichen Obergrenze der Blitzstromscheitelwerte weiter betrachtet und hinterfragt werden.

Literaturverzeichnis

- /ALD 20/ „Allgemeines“, OVE-ALDIS, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, https://www.aldis.at/forschung/blitzforschungsstation-gaisberg/allgemeines/?ADMCMDCMD_noBeUser=460, abgerufen am 03.06.2020
- /BEZ 09/ Betz, H.A., Schuman, U., Laroche, P., „Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research“, Springer Verlag, 2009
- /BER 72/ Berger, K., „Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963-1971“, Sonderdruck aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Bd. 63 (1972) Nr. 24
- /BER 78/ Berger, K., „Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen – Gemessen am Monte San Salvatore, Lugano“, Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, 69(1978)8, 29 April
- /BIR 17/ Birkl, J., Diendorfer, G., Kern, A., Thern, S., „Extrem hohe Blitzströme“ 12. VDE|ABB-Blitzschutztagung - 12.10.2017 - 13.10.2017 in Aschaffenburg, Deutschland
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bekanntmachung der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“, Bundesanzeiger, Januar 2013
- /BUN 22/ Bundesgesetz, „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ (sogen. „Atomgesetz“, kurz AtG), Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 14) geändert worden ist
- /CIG 09/ CIGRE Working Group C4.404, „Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Location Systems – The Effects of System Performance“, ISBN: 978-2-85873-063-6, April 2009

- /CIG 13/ CIGRE WG C4.407, „Lightning parameters for engineering applications“, Report No. 549, ISBN 978-2-85873-244-9, August 2013.
- /DEH 22/ DEHN SE, „Praxiswissen: Koordination“, <https://www.dehn.de/de/energetische-koordination-erklaert>, abgerufen am 25.04.2022
- /DEU 22/ Deutscher Wetterdienst, „Unwetterklimatologie: Gewitter“, https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/gewitter/gewitter_node.html, abgerufen am 21.04.2022
- /DIN 10/ DIN VDE 0845 Bbl 1; 2010-11; „Überspannungsschutz von Einrichtungen der Informationstechnik (IT-Anlagen)“
- /DIN 15/ DIN EN 62305-1 VDE 0185-305-1:2015-12 „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“ (IEC 81/472/CD:2015 Protection against lightning. Part 1. General principles)
- /DIN 15a/ Entwurf DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2045-12 „Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management“ (IEC 81/474/CD:2015 Protection against lightning. Part 2: Risk management)
- /DIN 15b/ „Beiblatt 1 zum Entwurf DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2045-12 „Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management““
- /DIE 03/ Diendorfer, G., „Austrian Lightning & Detection Information System“, https://www.univie.ac.at/pluslucis/FBWO/fbW2003/AL-DIS_LUC1S_2003.pdf Februar 2003
- /DKE 21/ DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, „Blitzschutznormen für die Sicherheit von Mensch, Tier und Technik – DIN EN 62305 in der Übersicht“, vom 02.08.2021, <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/blitzschutznormen#:~:text=Die%20wohl%20wichtigste%20und%20bekannteste,elektronische%20Systeme%20in%20baulichen%20Anlagen>, abgerufen am 22.04.2022

- /EID 11/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, „Sicherheitstechnische Klassierung für bestehende Kernkraftwerke“, Richtlinie für die schweizerischen Kernkraftwerke ENSI-G01/d, Januar 2011
- /EID 19/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, „Auslegungsgrundsätze für in Betrieb stehende Kernkraftwerke, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen“ ENSI-G02/d, August 2019
- /ELE 22a/ elektro-wissen.de, „Blitzschutz-Potentialausgleich“, <http://elektro-wissen.de/Elektroinstallation/Blitzschutz-Potentialausgleich.php>, abgerufen am 30.11.2023/FUN 22/Funicolare Monte San Salvatore SA, <https://www.montesansalvatore.ch/de/kultur/museum/>, abgerufen am 05.07.2022
- /GDV 22/ GDV – Die Deutschen Versicherer, „Blitz-Bilanz 2019 – Blitze verursachen Schäden von 200 Millionen Euro“, Medieninformatio-
nen, 22.07.2020, <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/blitzbilanz2019-61066>
- /GRS 93/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, WLN 1993/05 „Unkorrekter Einsatz von Analog-Trennwandlerbaugruppen im Gemeinschaftskernkraftwerk Grohnde (KWG)“, August 1983
- /GRS 03/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, WLN 2003/14 „Durch Netzstörungen verursachte Abschaltungen von Gleichrichtern“ im Kernkraftwerk Brokdorf (KBR) am 23.02.2002“, Sept. 2003
- /GRS 06/ WLN 2006/07, „Ereignis im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark, Block 1 am 25.07.2006: „Nichtzuschalten von zwei Notstromdieseln nach Ausfall der 400-kV-Netzanbindung““, Nov. 2006
- /GRS 17/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, R. Ari-
ans, R., Arnold, S., Brück, B., Müller, C., Quester, C., Sommer, D.,
„Rückwirkungen von Netzstörungen auf Kernkraftwerke“ GRS - 467,
ISBN 978-3-946607-50-2, Juni 2017

- /HEI 09/ Heidler, F., „Blitzstromparameter nach IEC 62305 – Hintergrund, Erfahrung und Ausblick“, etz – Elektrotechnik + Automation, Heft 1; pp. 2-10, 2009
- /HEI 09a/ Heidler, F., Stimper, K., „Blitz und Blitzschutz: Grundlagen der Normenreihe VDE 0185 / Entstehung von Gewittern / Blitzordnungssysteme / Blitzströme und ihre Wirkungen / Schutz. Anlagen / Generatoren für die Stromprüfung“, VDE Verlag GmbH, 2009
- /IAE 16/ International Atomic Energy Agency: IAEA Safety Standards Series No. SSG-34, „Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants – Specific Safety Guide“, Wien, März 2016
- /IZE 11/ IZES gGmbH, BET GmbH, PowerEngS, „Ausbau elektrischer Netze mit Kabel oder Freileitung unter besonderer Berücksichtigung der Einspeisung Erneuerbarer Energien – Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit“, 20.06.2011
- /KER 08/ Kern, A., Dikta, G., „Bewerten von Schäden durch Blitzeinwirkungen“, Elektropraktiker, Berlin 62 (2008)
- /KER 16/ Kern, A., „Blitz- und Überspannungsschutz von Kernkraftwerken – Nachweisführung der ausreichenden Sicherheit für leittechnische Einrichtungen auch bei Blitzeinschlägen mit extremen Parametern“, atw, Vol. 61, Issue 8/9, 2016
- /KTA 92/ Kerntechnische Ausschuss (KTA), Sicherheitstechnische Regel des KT 2206, „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“, Fassung: Juli 1992
- /KTA 13/ Kerntechnische Ausschuss (KTA), Sicherheitstechnische Regel des KTA 3705, „Schaltanlagen, Transformatoren und Verteilungsnetze zur elektrischen Energieversorgung des Sicherheitssystems in Kernkraftwerken“, Fassung 2013-11

- /KTA 15/ Kerntechnische Ausschuss (KTA), Sicherheitstechnische Regel des KTA 3501, „Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems“, Fassung 2015-11
- /KTA 19/ Kerntechnische Ausschuss (KTA), Sicherheitstechnische Regel des KTA 2206, „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“, Fassung: 2019-11
- /LOT 02/ Litze, K.-H., Schneider W. B., „Wege in der Physikdidaktik, Band 5, Naturphänomene und Astronomie“, Deutsche Physikalische Gesellschaft – Fachverband Didaktik der Physik, Verlag Palm & Enke, ISBN 3-7896-0666-9, 2002
- /MAN 13/ Manhardt, M., „Messung von Blitzströmen und Blitzfeldern“, Dissertation; Universität der Bundeswehr München, Dez. 2013
- /MEI 09/ Meister, A., „Deconvolution Problems in Nonparametric Statistics“, Springer, 2009.
- /OBO 19/ OBO Bettermann Holding GmbH & Co. KG, „Blitzschutz-Leitfaden – Zur Unterstützung bei der Planung von Blitz- und Überspannungsschutzsystemen“, 2. überarbeitete Auflage 2019
- /OBO 22/ OBO Bettermann Holding GmbH & Co. KG, „Blitzschutzklassen“, <https://www.obo.de/produkte/schutzinstallation/produkthighlights/planungshilfen-vds-richtlinie-blitzschutzklassen-einteilung/blitzschutzklassen/>, abgerufen am 22.04.2022
- /OBO 22a/ OBO Bettermann Holding GmbH & Co. KG, „MIT BLITZSCHUTZZONEN ÜBERSPANNUNGEN STUFENWEISE REDUZIEREN“, <https://www.obo.de/produkte/schutzinstallation/basiswissen/mit-blitzschutz-zonen-ueberspannungen-stufenweise-reduzieren/>, abgerufen am 13.02.2022
- /PHO 17/ PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH, „Basiswissen Überspannungsschutz – Grundlagen für Industrie und Handwerk“, 2. Auflage, 2017

- /PKC 22/ pk components GmbH, „Bencent: Fehlersichere Gasableiter bei Netzfolgestrom“, <https://www.pk-components.de/ressourcen/empfohlene-bau-elemente/bencent-fehlersichere-gasableiter-bei-netzfolgestrom.html>, abgerufen am 13.2.2022
- /RSK 16/ Reaktor-Sicherheitskommission, „Blitze mit Parametern oberhalb der genormten Blitzstromparameter“, RSK-Stellungnahme, 2488. Sitzung der RSK, Nov. 2016
- /SIE 16/ Siemens, „Blitz-Informationsdienst von Siemens, Industry Services“, Artikel-Nr.: DFPL-B10028-00, 2016
- /SIE 19/ Siemens, „Blitzatlas 2018: Schweinfurt ist Spitze“, Pressemitteilung vom 23. Juli 2019
- /SIE 22/ Siemens, „Genaueste Informationen über Gewitterblitze“, <https://new.siemens.com/de/de/produkte/services/blids.html#:~:text=Genaueste%20Informationen%20%C3%BCber%20Gewitterblitze&text=BLIDS%20nutzt%20%C3%BCber%20155%20verbundene,den%20Anwender-Terminals%20zur%20Verf%C3%BCgung.html>, abgerufen am 05.07.2022
- /SCH 16/ W. Schulz, G. Diendorfer, S. Pedebay, and D. R. Poelman, „The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation“, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., vol. 16, no. 2, pp. 595–605, 2016
- /TER 00/ Terbeznik R., „Der Einfluss des Ausbreitungsmediums und der Feldmesssonde auf die Ortung von Blizentladungen“, Dissertation; 2000/UMA 75/Uman, A. M., McLain, D. K., Krider, E.P., „The electromagnetic radiation of a finite antenna“, American Journal of Physics 43, 33 (1975)
- /VDE 21/ VDE Ausschuss Blitzschutz und Blitzforschung (VDE|ABB), „Schutz von Funkanlagen auf Gebäuden bei Blitzschlag (22.10.2020)“, <https://www.vde.com/de/blitzschutz/infos/leitfaden-funkanlagen>, abgerufen am 06.12.2021

- /VDE 22/ VDE Verlag GmbH, <https://www.vde-verlag.de/normen/0185046/din-en-62305-1-vde-0185-305-1-2011-10.html>, abgerufen am 20.4.22
- /VGB 06/ VGB PowerTech (Fachzeitschrift), 05/2006
- /VGB 12/ VGB PowerTech, „VGB-AG „Forsmark“, „Untersuchungsprogramm zum Einfluss von Spannungstransienten auf das Notstromsystem“, Abschlussbericht, Version 5.0, Juni 2012
- /WEE 01/ Weerasekera, A. B., Sonnadara, U., Fernandi, I. M. K., Lelwala, R., Ariyaratne, T. R., „Measurements of lightning peak currents in the first return stroke of negative cloud to ground flashes“, Singapore J. of Physics, 17 (2001) 37-45
- /WEK 21/ WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, „Elektrosicherheit - Der innere Blitzschutz – Was Sie wissen müssen“, 04/2021, abgerufen am 30.11.2022

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der vier verschiedenen Blitztypen.....	6
Abb. 2.2	Messstation „Hoher Peißenberg“	10
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Schutzes einer Höchstspannungsleitungsstrecke mithilfe des Leistungsdifferentialschutzes (a) und des Distanzschutzes (b) /IZE 11/	22
Abb. 3.2	Übersicht über den Aufbau der Normenreihe DIN EN 62305. /DKE 21/	41
Abb. 5.1	Betrachtete Einflussgrößen, Unsicherheitsquellen und Informationsquellen zur Bestimmung der Rate auslegungsüberschreitender Blitze	83
Abb. 5.2	Schematische Darstellung der Berechnung der Einfangfläche für indirekte Einschläge nach DIN EN 62305-2	91
Abb. 5.3	Blitzkugel mit einem Radius r größer der Stabhöhe h	94
Abb. 5.4	Blitzkugel mit einem Radius kleiner der Stabhöhe	94
Abb. 5.5	Einfangfläche A_d in Abhängigkeit von der Blitzstromstärke für einen 100 m hohen Stab	96
Abb. 5.6	Blitzscheitelstrom, unterhalb dessen die in der DIN EN 62305-2 angegebene Einfangfläche konservativer ist als die nach dem Kugelverfahren ermittelte, in Abhängigkeit von der Höhe einer Struktur.....	97
Abb. 5.7	Verteilungsfunktionen der Scheitelstromstärken positiver Einzelblitze im Umkreis der 7 Anlagestandorte und in Deutschland	102
Abb. 5.8	Verteilungsfunktion der Scheitelstromstärken negativer Einzelblitze im Umkreis der Anlagestandorte und in Deutschland	103
Abb. 5.9	Vergleich der direkt und indirekt gemessenen Blitzströme	109
Abb. 5.10	Vergleich der Logarithmen der direkt und indirekt gemessenen Blitzströme	110
Abb. 5.11	Relative Abweichungen der indirekt gemessenen Blitzscheitelstromstärken von der direkt gemessenen Blitzscheitelstromstärke der einzelnen Blitze	111

Abb. 5.12	Histogramm der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzsichelstromstärken von den direkt gemessenen Blitzsichelstromstärken.	112
Abb. 5.13	Histogramme der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzsichelstromstärken von der direkt gemessenen Blitzsichelstromstärken für Blitze mit kleinen bzw. großen direkt gemessenen Blitzsichelstromstärken.	113
Abb. 5.14	Verteilungsfunktionen der indirekt gemessenen Sichelströme positiver Blitze	116
Abb. 5.15	Anzahl der positiven Blitze in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls	119
Abb. 5.16	Anzahl der positiven Blitze mit Sichelstromstärken größer 200 kA in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls	119
Abb. 5.17	Anzahl der negativen Blitze in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls	120
Abb. 5.18	Anzahl der negativen Blitze mit Sichelstromstärken größer 100 kA in 10 kA-Intervallen aufgetragen gegen die untere Grenze des Intervalls	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Übersicht der verschiedenen Überspannungsschutzgerätetypen und ihre typischen Einsatzorte, nach /PHO 17/.....	18
Tab. 3.2	Übersicht der verschiedenen Blitzschutzzonen, nach /OBO 22a/, /WEK 21/	19
Tab. 3.3	Blitzstromparameter der Langzeitströme. /KTA 19/	32
Tab. 3.4	Blitzstromparameter der Stromstöße. /KTA 19/	32
Tab. 5.1	Anzahlen und Raten von Einzelblitzen für Deutschland und Anlagenstandorte	86
Tab. 5.2	Anzahlen von Einzelblitzen für Deutschland und Anlagenstandorte	87
Tab. 5.3	Charakteristika der Verteilung der Blitzscheitelstromstärken in Deutschland und an sieben Kernkraftwerksstandorten.....	105
Tab. 5.4	Verhältnisse der Charakteristika der Verteilung der Blitzscheitelstromstärken an sieben Kernkraftwerksstandorten in Bezug zu ganz Deutschland	105
Tab. 5.5	Charakteristika der Verteilung von ξ für Blitze mit kleinen bzw. großen direkt gemessenen Blitzscheitelstromstärken.....	114
Tab. 5.6	Anteil der positiven und negativen Blitze mit indirekt gemessenen Scheitelstromstärken.....	117
Tab. 5.7	Anzahlen und Anteile von Blitzen mit indirekt gemessenen Scheitelstromstärken.....	121
Tab. 5.8	Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromscheitelstärke überschreiten. (1).....	122
Tab. 5.9	Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromscheitelstärke überschreiten. (2).....	124
Tab. 5.10	Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromscheitelstärke gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen des Fortluftkamins überschreiten	126
Tab. 5.11	Raten der Blitze, welche die Auslegungs- bzw. Robustheitswerte für die Stromscheitelstärke gemäß der Regel des KTA 2206 bei Berücksichtigung der Einfangflächen des Reaktorgebäudes überschreiten	127

A Anhang

A.1 Berechnung der Einfangfläche des Reaktorgebäudes nach DIN EN 62305-2

Für die betrachtete Anlage werden zunächst das Reaktorgebäude und Hilfsanlagengebäude betrachtet. Das Reaktorgebäude der Referenzanlage wird vereinfacht als Zylinder der Höhe $z = 21,1$ m unter einer Halbkugel mit Radius $r = 33,4$ m angesehen. Die Geometrie ist in Abb. A 1 schematisch zusammen mit der relevanten Tangente, die die Einfangfläche determiniert, dargestellt.

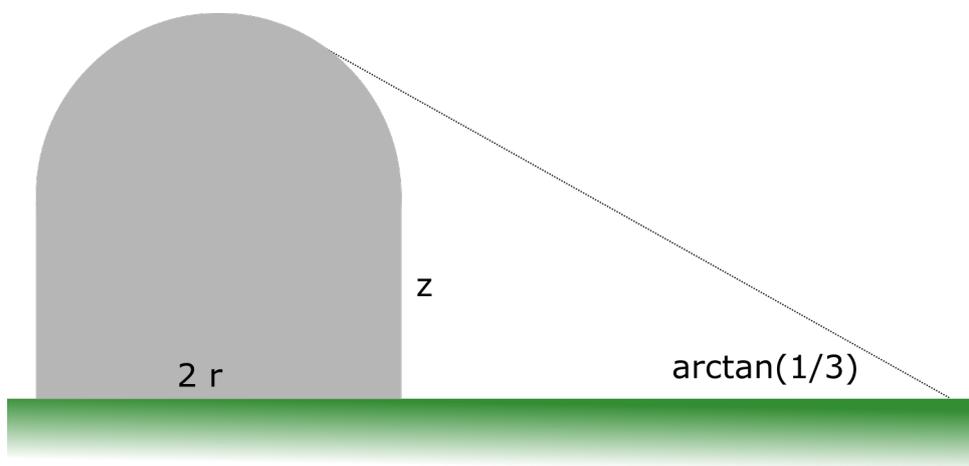


Abb. A 1 Berechnung der Einfangfläche des Reaktorgebäudes nach DIN EN 62305-2

Das Hilfsanlagengebäude sowie die zugehörige Einfangfläche ist in der Einfangfläche des Reaktorgebäudes enthalten und ist somit nicht extra zu berücksichtigen.

Die Einfangfläche stellt somit einen Kreis mit Radius

$$r_{A_D} = 3z + \frac{r}{\sin(\arctan \frac{1}{3})} = 3z + \sqrt{10}r \quad (\text{A.1})$$

dar. Hier ergibt sich $r_{A_D} = 168,92$ m und somit

$$A_D = 89642,2 \text{ m}^2 = 0,089 \text{ km}^2 \quad (\text{A.2})$$

Im Rahmen dieser Berechnung spielt die abschirmende Wirkung des Fortluftkamins eine untergeordnete Rolle, wie folgende Abschätzung zeigt: Der Fortluftkamin hat einen Radius von unter 10 m. Wird als zusätzlicher Bereich, der mit hoher Sicherheit abgeschirmt wird, die Fläche angenommen, die durch Blitzkugeln der Blitzschutzklasse I nicht bestrichen wird, so ergibt sich ein abgeschirmter Bereich in Form eines Kreises des Radius $r = 30$ m, der eine Fläche von $2236,26 \text{ m}^2$ hat und somit wesentlich kleiner als die berechnete Einfangfläche ist.

Es ist zu betonen, dass diese Rechnungen ausschließlich dafür bestimmt sind, die Rate von für die Anlage relevanten Blitzen abzuschätzen und keine darüber hinausgehenden Aussagen erlauben.

A.2 Berechnung von scheinbarstromabhängigen Einfangflächen mit dem elektro-geometrischen Modell

Für die in der DIN EN 62305-2 (Abb. A.1) beispielhaft angegebene quaderförmige Gebäudeform ergibt sich völlig analog mit dem Blitzkugelverfahren als Einfangfläche ein Rechteck mit abgerundeten Ecken, deren Radius durch Gleichung 5.9 und Gleichung 5.6. gegeben sind.

Das Reaktorgebäude eines DWR lässt sich wie oben erwähnt als Zylinder der Höhe z mit aufgesetzter Halbkugel des Radius g auffassen.

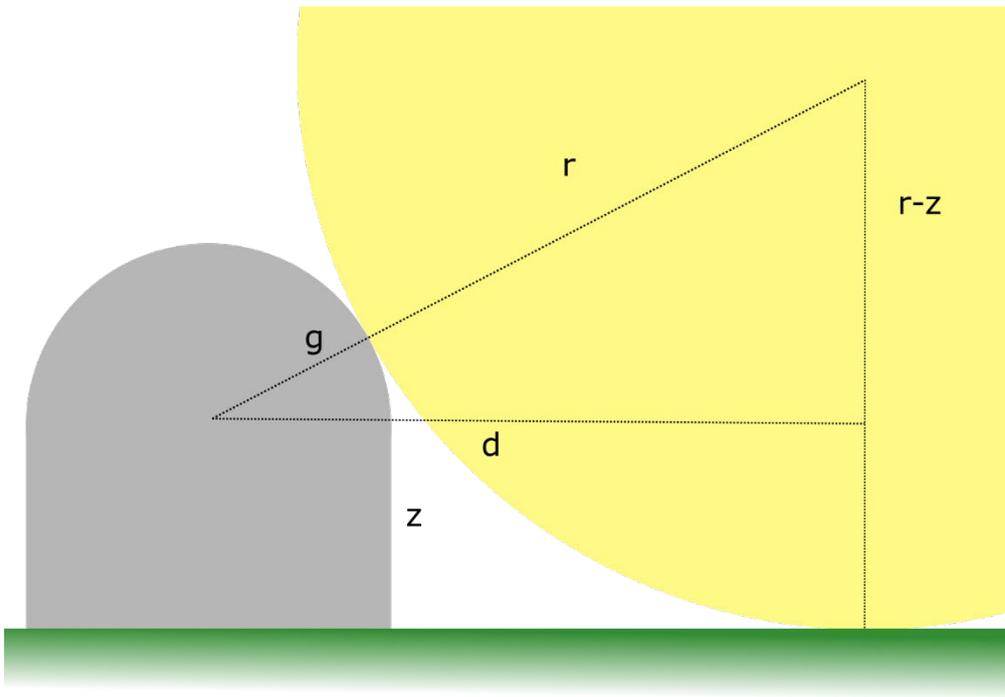


Abb. A 2 Blitzkugel mit einem Radius r größer der Zylinderhöhe z

Es gilt nach dem Satz von Pythagoras, falls der Radius der Blitzkugel $r \geq z$ erfüllt:

$$d = \sqrt{(g+r)^2 - (r-z)^2} = \sqrt{2r(g+z) + (g+z)(g-z)} \quad (\text{A.3})$$

Für $r \leq z$ gilt $d = g + r$ (siehe Abb. A 3).

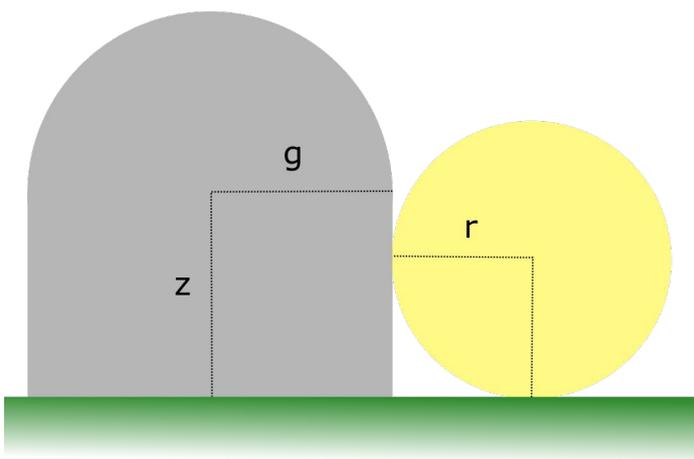


Abb. A 3 Blitzkugel mit einem Radius r kleiner der Zylinderhöhe z

Für die Größe der Einfangfläche $A_d(I) = \pi d^2$ folgt somit

$$A_d(I) = \pi \begin{cases} 2\rho \left(\frac{I}{l}\right)^{0,65} (g+z) + (g+z)(g-z) & \text{wenn } z < \rho \left(\frac{I}{l}\right)^{0,65} \\ \left(\rho \left(\frac{I}{l}\right)^{0,65} + g\right)^2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

so dass sich auch hier für große Stromstärken $A_d(I) \propto I^{0,65}$ ergibt.

Für die oben genannten Werte $z = 21,1$ m und $g = 33,4$ m überschreitet $A_d(I)$ für $I > 146,4$ kA den Wert der Einfangfläche aus DIN EN 62305-2 (siehe Gleichung A.2), d. h. unterhalb von 146,4 kA ist diese konservativ.

Es ist darauf hinzuweisen, dass hier nur das Reaktorgebäude betrachtet wurde. Für eine genauere Betrachtung müssten die anderen Bauwerke der Anlage unter Berücksichtigung ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung und der Möglichkeit, dass Blitze auf diese Bauwerke indirekt auf sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen in anderen Bauwerken einwirken, berücksichtigt werden, d. h. es müsste ein entsprechendes detailliertes anlagenspezifisches Modell entwickelt werden.

B Anhang

In diesem Anhang wird untersucht, ob sich die in den Daten über die Beziehung von direkt und indirekt gemessenen Blitzstromstärken aus Messungen auf dem Gaisberg in Österreich gefundene Abhängigkeit des multiplikativen Faktors zwischen direkt und indirekt gemessenen Blitzstromstärken (siehe Abb. 5.13 und Tab. 5.5) auch aus anderen Charakteristika der Daten erklären lässt.

Hierzu wurden Analysen analog zu denen des Kap. 5.2.1 durchgeführt, wobei jedoch die Daten nicht nach der direkt bemessenen Blitzstromstärken, sondern

- nach Messdatum und -Zeitpunkt bzw.
- zufällig

geordnet wurden.

B.1 Ordnung nach Messdatum und -zeitpunkt

In folgender Abbildung sind gleitende Mittelwerte für die relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzstromstärken von der direkt gemessenen Blitzstromstärken und der direkt gemessenen Blitzstärken I_d dargestellt.

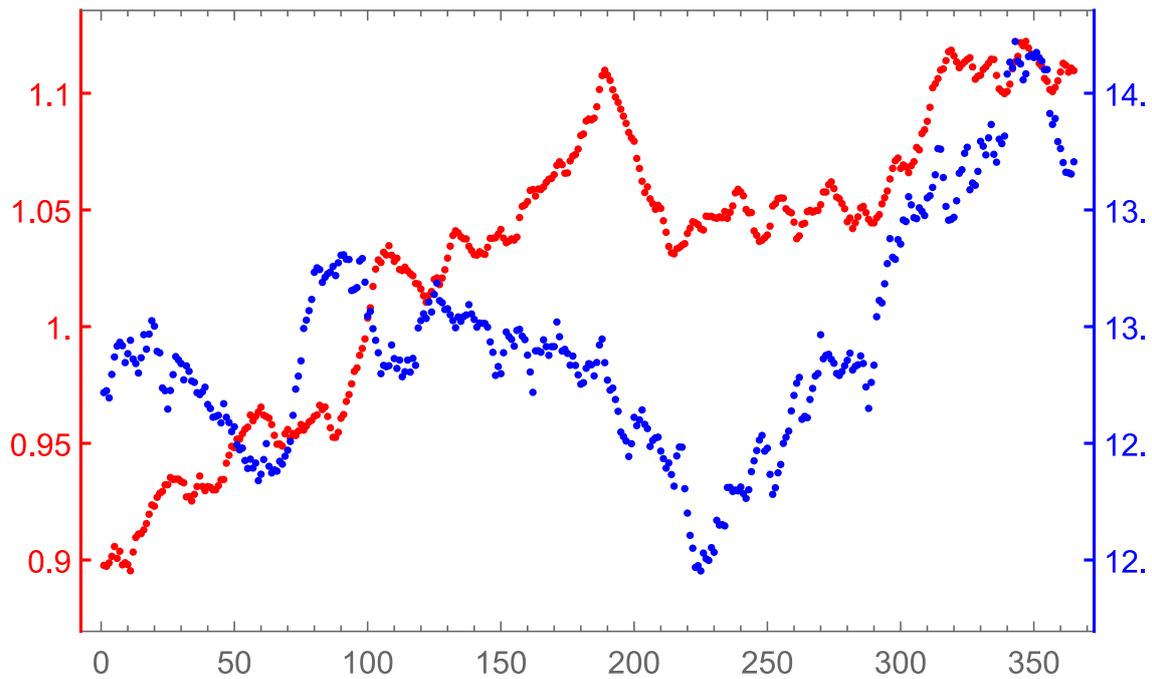


Abb. B 1 Gleitende Mittelwerte der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzstromstärken von der direkt gemessenen Blitzstromstärken und der direkt gemessenen Blitzstärken I_d

Die gleitenden Mittelwerte sind über 100 Blitze ausgeführt. Die gleitenden Mittelwerte der relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzstromstärken von der direkt gemessenen Blitzstromstärken sind auf der Ordinate (linke Achse) rot und die gleitenden Mittelwerte der direkt gemessenen Blitzstärken I_d (rechte Achse, in kA) blau dargestellt. Die Abszisse ist die Nummer des ersten Blitzes, der in den gleitenden Mittelwert einbezogen ist.

Es lässt sich erkennen, dass sowohl die mittleren relativen Abweichungen ξ der indirekt gemessenen Blitzstromstärken von der direkt gemessenen Blitzstromstärken und die direkt gemessenen Blitzstärken I_d mit der Zeit angestiegen sind. Dies wird in der folgenden Tab. B 1 genauer dargestellt, in der Charakteristika der Verteilung von ξ sowie von I_d für die zuerst gemessene ungefähre Hälfte bzw. zuletzt gemessene Hälfte der Blitze dargestellt ist.

Tab. B 1 Charakteristika der Verteilung von ξ und I_d für die zuerst gemessenen 230 bzw. zuletzt gemessenen 234 Blitze.

Zeit der Messung	Anzahl	Mittelwert $\langle \xi \rangle$	95 %-Konfidenzintervall des Mittelwertes $\langle \xi \rangle$	Mittelwert $\langle I_d \rangle$	95 %-Konfidenzintervall des Mittelwertes $\langle I_d \rangle$
Bis 20.03.2008	230	0,973	[0,942; 1,003]	12,768	[12,108;13,427]
Ab 25.03.2008	234	1,080	[1,052; 1,109]	12,548	[11,801;13,2956]

Die mittleren Werte $\langle \xi \rangle$ weichen für beide Teilmengen signifikant ab – die beiden approximativen 95 %-Konfidenzintervalle überlappen nicht. Demgegenüber überlappen die Konfidenzintervalle der Mittelwerte $\langle I_d \rangle$ und die beiden Schätzungen der Mittelwerte liegen jeweils in beiden Konfidenzintervallen. Somit ergeben sich in Bezug auf die Mittelwerte der direkt gemessenen Blitzstromstärken diesbezüglich keine signifikanten Abweichungen der Messungen bis zum 20.03.2008 und ab dem 25.03.2008. Dies bedeutet, dass aus den Daten geschlossen werden kann, dass die Hypothese, dass der Erwartungswert der Blitzstromstärken gleich sei (Nullhypothese), nicht abgelehnt werden kann.

Es stellt sich die Frage, inwieweit der unterschiedliche gemessene mittlere Wert der $\langle \xi \rangle$ durch die unterschiedlichen aufgetretenen $\langle I_d \rangle$ erklärt werden kann. Hierfür wurde ein lineares Modell der Abhängigkeit von ξ von I_d an die Daten

$$\xi(I_d) = a_0 + a_1 I_d \quad (\text{B.1})$$

angepasst. Bei Minimierung der quadratischen Abweichungen ergibt sich $a_0 = 1.091$ und $a_1 = -0.005036 \frac{1}{\text{kA}}$. Der Unterschied der mittleren Blitzstromstärken kann, da der gemäß dem Modell resultierende Unterschied $-0,219 \text{ kA} \cdot a_1 = 0,0011$ ist, den tatsächlichen Unterschied von 0,1078 in den Mittelwerten nicht erklären.

Somit kommen als Ursachen Veränderungen in der direkten oder indirekten Messung infrage. Es können dies sein:

- Veränderungen innerhalb der Messapparatur der direkten Blitzstrommessung,
- Veränderungen in der indirekten Messung (Messgeräte und/oder Auswertung)

- Es liegen keine Informationen vor, die eine genauere Untersuchung hierzu gestatten würden.

B.2 Zufällige Ordnung

Hier wurden die Werte der einzelnen Blitze für ξ zufällig (d. h. unabhängig von Messdatum und direkt gemessener Blitzstärke) zwei Mengen zugewiesen. Es ergibt sich:

Tab. B 2 Charakteristika der Verteilung von ξ und I_d für zwei Mengen der Mächtigkeit 232, denen die Blitze zufällig zugeordnet wurden.

Anzahl	Mittelwert $\langle \xi \rangle$	95 %-Konfidenzintervall des Mittelwertes $\langle \xi \rangle$	Mittelwert $\langle I_d \rangle$	95 %-Konfidenzintervall des Mittelwertes $\langle I_d \rangle$
232	1,027	[0,998;1,055]	12,425	[11,751;13,099]
232	1,027	[0,996;1,059]	12,889	[12,154;13,624]

Wie erwartet ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

**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