

Scheibenübergreifende Unverfügbarkeiten aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke

INHALTSVERZEICHNIS

1	Anlass der Beratung	2
2	Beratungsverlauf	2
3	Bewertungsmaßstab	3
4	Sachverhalte zur sicherheitstechnischen Bedeutung von system- und redundanzübergreifenden Vermaschungen/Kopplungen	3
4.1	Begriffsbestimmungen	3
4.2	Merkmale der Vermaschung im Notstromsystem deutscher Anlagen und Schutzmaßnahmen zur Vermeidung systematischer Ausfallmöglichkeiten.....	4
4.3	Anforderungen des nationalen Regelwerks zur Vermeidung bzw. zur Zulässigkeit von Vermaschungen im Notstromsystem von Kernkraftwerken	5
5	Erläuterungen zur 220-V-Gleichstromversorgung	6
5.1	Aufgabe und Aufbau	6
5.2	Vorteile und Nachteile der 220-V-Doppeleinspeisung	6
6	Sachverhalt zum Ereignis im KWG (Ereignismeldung 06/2011)	6
6.1	Konzept der gesicherten Drehstromversorgung	6
6.2	Ablauf und Ursache des Ereignisses	8
6.3	Vorkehrungen gegen Wiederholung	9
7	Beantwortung der Fragen des BMU	9
7.1	Frage 1	9
7.2	Frage 2	10
7.3	Frage 3	11
7.4	Frage 4	12
7.5	Ergänzende Fragen des BMU	12
8	In Bezug genommene Unterlagen	15

1 Anlass der Beratung

Der RSK-Ausschuss ELEKTRISCHE EINRICHTUNGEN (EE) wurde in seiner 215. Sitzung am 13.12.2011 über die Ereignismeldung 06/2011 „Ausfall der gesicherten Stromschiene GD bei fehlerhafter Anregung der Drehzahlüberwachung der Umformer GZ10 bis GZ40“ des Kernkraftwerks Grohnde (KWG) am 20.11.2011 informiert. Bei dem Ereignis erfolgte bei allen 220-V-Gleichspannungsschienen des Notstromsystems (D1) gleichzeitig ein temporärer Spannungseinbruch im Ausgangssignal der Drehzahlüberwachung, das durch die nachgelagerte Auswerteelektronik als Frequenzeinbruch interpretiert wurde und in dessen Folge somit die Umformer GZ10 bis GZ40 gleichzeitig abgeschaltet wurden.

Im KWG werden Verbraucher der 220-V-Gleichspannungsschienen durch eine diodentkoppelte Einspeisung auch redundanzübergreifend versorgt. Um unzulässige Spannungsüberhöhungen zu vermeiden, die durch diese Einspeisung bei bestimmten Störungsbedingungen auftreten könnten, sind die negativen Leiter der 220-V-Gleichspannungsschienen aller Redundanzen galvanisch miteinander verbunden. Aufgrund dieser elektrischen Verbindungen war der gleichzeitige Spannungseinbruch möglich, der dann in Kombination mit entsprechenden Grenzwerteinstellungen der Drehzahlüberwachungseinrichtungen zu einem redundanzübergreifenden Ausfall der Umformer führte.

Diese Schaltungstechnik der 220-V-Gleichspannungsschienen liegt nach Kenntnis des Ausschusses EE auch in anderen deutschen Anlagen vor.

Die RSK wurde vom BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, jetzt Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)) mit einer Beratung der generischen Aspekte des Ereignisses beauftragt [2], die auftragsgemäß über den Sachverhalt des Ereignisses im KWG hinaus auch andere elektrische Kopplungen im Notstromsystem der deutschen Kernkraftwerke im Hinblick auf ein Potential für redundanzübergreifende Auswirkungen einbeziehen soll.

2 Beratungsverlauf

In der 215. Sitzung am 13.12.2011 wurde der Ausschuss EE über das Ereignis in KWG informiert.

Der Ausschuss informierte die RSK in der 443. RSK-Sitzung am 15.12.2011 über den Sachstand. Nach Vorlage des Beratungsauftrags [1] bat die RSK in der 445. RSK-Sitzung am 29.02/01.03.2012 den Ausschuss EE um Beratung und Erstellung eines Stellungnahmeentwurfs.

Nach Beratungen in der 217. EE-Sitzung am 14.03.2012 wurde der VGB um diesbezügliche Informationen zu den in Betrieb befindlichen DWR-Anlagen [2] gebeten.

In der 223. EE-Sitzung am 21.11.2012 legte der VGB seinen Bericht [3] vor und ging neben der Ursachenklärung des KWG-Ereignisses insbesondere auf die in [2] aufgeführten Fragen des Ausschusses ein.

In der 225. EE-Sitzung am 30.01.2013 berichtet die GRS zur WLN 2013/01 „Ausfall einer gesicherten

Drehstromschiene bei fehlerhafter Anregung der Drehzahlüberwachung aller rotierenden Umformer im Kernkraftwerk Grohnde“ [4], [5]. Der Ausschuss EE schloss nach Diskussionen seine Beratungen zum Ereignis im KWG ab. Hinsichtlich der generischen Aspekte im Zusammenhang mit dem BMU-Beratungsauftrag beriet der Ausschuss zu noch offenen Punkten [6].

In der 226. EE-Sitzung am 13.03.2013 ergänzte das BMU seinen Beratungsauftrag um zwei weitere Fragen [7]. Der Ausschuss beriet einen ersten Entwurf der Stellungnahme und setzte seine Diskussionen in der 228., 229. und 233. Sitzung am 15.05.2013, 18.06.2013 und 20.11.2013 fort und verabschiedete den Entwurf in der 234. Sitzung am 18.12.2013.

Der Ausschuss legte der RSK die Stellungnahme in ihrer 464. Sitzung am 20.03.2014 erstmals vor. Weitere Überarbeitungen erfolgten in der 236. und 237. EE-Sitzung am 23.04.2014 und 21.05.2014. Die RSK beriet und verabschiedete die Stellungnahme in ihrer 472. Sitzung am 14.01.2015.

3 Bewertungsmaßstab

Als Basis der Bewertungen kommt das gestaffelte Sicherheitskonzept zur Anwendung. In diesem Zusammenhang werden auch die diesbezüglichen Anforderungen des untergesetzlichen kerntechnischen Regelwerks herangezogen: wie die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ [8] und die einschlägigen Regeln des KTA (insbesondere KTA 3701 [9] und KTA 3703 [10]). In die Betrachtungen einbezogen werden ebenfalls übergeordnete internationale Regelwerke (IEC 61225 „Nuclear power plants - Instrumentation and control systems important to safety - Requirements for electrical supplies“, derzeit vom DIN als Normenentwurf veröffentlicht [11], IAEA SSR-2/1 Safety of Nuclear Power Plants: Design [12], IAEA NS-G-1.9 Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants [13] sowie die WENRA-Reference Levels [14]).

4 Sachverhalte zur sicherheitstechnischen Bedeutung von system- und redundanzübergreifenden Vermaschungen/Kopplungen

4.1 Begriffsbestimmungen

Die Begriffe „Vermaschung,“ und „Kopplung“ sind sowohl im deutschen Regelwerk als auch in der Praxis nicht eindeutig definiert. Oftmals werden sie synonym verwendet. In den Sicherheitsanforderungen [8] wird der Begriff „Entmaschung“ definiert als „Trennung von *Systemteilen* zur Vermeidung gegenseitiger Beeinträchtigungen“, wobei aber in der Begriffsdefinition unter den Systemteilen Komponenten innerhalb eines Systems verstanden werden. Kopplungen oder Vermaschungen zwischen Redundanzen können funktionelle Abhängigkeiten bewirken. Graduelle Unterschiede zwischen beiden Begriffen werden im Weiteren nicht berücksichtigt, sondern diese Begriffe werden hier synonym verwendet. Im Folgenden wird daher ausschließlich der Begriff „Vermaschung“ im Sinne von „Vermaschung von Redundanzen“ verwendet.

4.2 Merkmale der Vermaschung im Notstromsystem deutscher Anlagen und Schutzmaßnahmen zur Vermeidung systematischer Ausfallmöglichkeiten

Die nachfolgenden Darstellungen basieren auf den Ausführungen im GRS-Bericht [15]. Elektrische Verbindungen, die im Sinne einer Vermaschung von Redundanzen beim Notstromsystem zu betrachten sind, ergeben sich durch galvanische Verbindungen, ggf. über Dioden zum gerichteten Energiefluss, und sind üblicherweise durch Schalter trennbar.

Dabei ist grundsätzlich von verschiedenen Formen der Vermaschung auszugehen, nachfolgend erläutert für die Anlage KWG:

- a) Vermaschungen, die beim Ausfall einzelner Schienen des Notstromsystems automatisch zugeschaltet werden. Zum Beispiel wird in KWG bei einer Spannung unter $0,8 U_N$ für länger als 0,5 s auf einer der gesicherten 380V Drehstromschienen (GA bis GD) die Schienenversorgung auf die 380-V-Notstromschiene der Nachbarredundanz FJ bis FM geschaltet. Damit soll die Versorgung der Verbraucher der Schienen GA bis GD auch für den Fall sichergestellt sein, dass die einspeisenden Stromschienen der eigenen Redundanz stromlos sind (sog. „Netzumgehung“)¹.
- b) Vermaschungen, die permanent wirksam sind, wie z. B. eine gemeinsame Erdung, die (L-)-Verbindung der 220-V-Gleichstromanlagen EB bis EE oder Doppeleinspeisungen von Verbrauchern oder Schienen.
- c) Vermaschungen, die von Hand im Falle von Reparaturen oder anderen Instandhaltungsmaßnahmen von Hand zugeschaltet werden. Die vom Reserveumformer gespeiste Schiene GE kann jede der Schienen GA bis GD versorgen.

Neben der Möglichkeit der Überlast sind in einem vermaschten Notstromsystem prinzipiell übergreifende Störmöglichkeiten durch Kurzschlüsse, Erdschlüsse, Fehlschaltungen, Überspannung sowie äußere und innere Einwirkungen in Betracht zu ziehen und müssen bei der Auslegung berücksichtigt werden. Als besonders wichtige Maßnahmen sind die Diodenentkopplung der Doppeleinspeisung und die vielseitigen Überwachungsmaßnahmen (z. B. zur Spannungsüberwachung, Überstromüberwachung sowie die spezifischen WKP (Beschreibungen in [15])) anzusehen. Im Hinblick auf äußere und innere Einwirkungen, wie ein anlageninterner Brand, können Vermaschungen sowohl Vorteile als auch Nachteile beinhalten. Bei entsprechender bautechnischer Trennung kann bei einem nicht vermaschten System von der vollständigen Verfügbarkeit der nicht betroffenen Teilsysteme ausgegangen werden. Bei einem vermaschten System sind die möglichen Störeinflüsse, z. B. durch Fehlspannungseintrag, zu bewerten. Andererseits kann ein vermaschtes System die Verfügbarkeit der Stromversorgung von Verbrauchern, wie z. B. in der von einem anlageninternen Brand betroffenen Redundanz, und damit die Zuverlässigkeit der Störfallbeherrschung erhöhen.

¹ Diese Art der Vermaschung existiert nicht in allen Anlagen. In anderen Anlagen wird auf die 380-V-Notstromschiene der eigenen Redundanz geschaltet.

4.3 Anforderungen des nationalen Regelwerks zur Vermeidung bzw. zur Zulässigkeit von Vermaschungen im Notstromsystem von Kernkraftwerken

Zur Vermeidung redundanzübergreifender systematischer Ausfallmöglichkeiten in den Teilsystemen des Sicherheitssystems wird in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ 3.1 (3) c) [8] als Auslegungsgrundsatz die „Entmaschung von redundanten Teilsystemen, soweit dieser sicherheitstechnische Nachteile nicht entgegenstehen“ gefordert.

In Abschnitt 3.9 (2) wird speziell zu den Notstromanlagen gefordert:

Die Notstromanlagen sind redundant, räumlich getrennt, grundsätzlich unvermascht, voneinander funktionell unabhängig und gegeneinander geschützt aufzubauen. Dabei muss die Redundanz der Notstromanlagen mindestens der Redundanz der zu versorgenden verfahrenstechnischen Einrichtungen entsprechen.

Eine Vermaschung der einzelnen Stränge der Notstromanlagen ist im Einzelfall dann zulässig, wenn nachgewiesen ist, dass die Zuverlässigkeit des Notstromsystems dadurch nicht unzulässig gemindert wird. Dabei ist darauf zu achten, dass keine in Betracht zu ziehende Versagensmöglichkeit mehr als einen Strang ausfallen lassen kann.

Im Regelwerk des KTA gibt es bzgl. Vermaschung im Notstromsystem folgende Anforderungen, die teilweise wörtlich mit den oben angeführten Festlegungen der Sicherheitsanforderungen übereinstimmen:

KTA 3701 [9], Abschnitt 5.7 „Funktionelle Unabhängigkeit“:

(1) Das Notstromsystem muss aus redundanten unvermaschten Strängen bestehen, die jeweils eigene Einspeisungen sowie eigene Notstromerzeugungsanlagen, Verteilungen, Kabeltrassen und Hilfseinrichtungen haben und dadurch funktionell unabhängig sind.

(2) Als Ausnahme sind Einspeisungen für Notstromverbraucher von mehr als einem Strang einer Notstromanlage nur dann zulässig, wenn dadurch eine vom zu versorgenden System geforderte Zuverlässigkeit erreicht werden kann und im Einzelfall nachgewiesen wird, dass die Zuverlässigkeit des Notstromsystems durch diese Maßnahme nicht unzulässig gemindert wird. Diese Verbindungen sind so auszuführen, dass keine in Betracht zu ziehende Versagensmöglichkeit mehr als einen Strang ausfallen lassen kann.

Hinsichtlich systematischer Ausfallmöglichkeiten wird in der KTA 3701, Abschnitt 5.3 „Schutz gegen versagenauslösende Ereignisse innerhalb des Notstromsystems“, gefordert:

(2) Die Möglichkeit und die Auswirkungen systematischer Ausfälle im Notstromsystem sind zu analysieren. Abhängig vom Ergebnis der Analysen sind zusätzlich Maßnahmen auf Komponentenebene oder auf Systemebene zu treffen, so dass eine Verletzung der Schutzziele nicht mehr unterstellt werden muss (Robustheit gegen systematische Ausfälle).

5 Erläuterungen zur Gleichstromversorgung

5.1 Aufbau und Aufgabe

Die 220-V-Gleichstromversorgung ist aufgebaut als isoliert betriebenes System zur Gleichspannungsversorgung. Durch dieses Konzept soll erreicht werden, dass Erdschlüsse sicher detektiert und die Gefahr, die von Kurzschlüssen Leiter-Erde ausgeht, minimiert werden. Außerdem führt ein einzelner Erdschluss nicht zum Ausfall der 220-V-Gleichstromversorgung. Aus Zuverlässigkeitsanalysen heraus ist die Doppeleinspeisung von sicherheitstechnisch wichtigen Verbrauchern in deutschen Kernkraftwerken üblich. Diese Schaltungsvariante der Doppeleinspeisung aus zwei Redundanzen beinhaltet zur Vermeidung der Spannungsverdopplung bei zwei ungünstig gelegenen Erdschlüssen die elektrische Verbindung der Bezugsleiter ((L-)-Leiter). In der 24-V-Gleichstromversorgung im D1- und D2-Netz existiert eine solche Vermaschung nicht.

Die 220-V-Gleichstromversorgung dient als Energieversorgung der Umformer für die gesicherte Drehstromversorgung, zur Steuerspannungsversorgung der Schaltanlagen und zur Energieversorgung von Magnetventilen, Ölpumpen und weiteren Gleichstrom (GS) -Verbrauchern.

5.2 Vorteile und Nachteile der Doppeleinspeisung

Mit der Doppeleinspeisung soll eine höhere Zuverlässigkeit durch höhere Versorgungssicherheit bei Einzelfehler im Vergleich zur redundanzbezogenen Einzeleinspeisung erreicht werden. Dies gilt in besonderem Maße für die Steuerspannung der Schaltanlage und die Versorgung der Reaktorschutzschränke. Darüber hinaus führen Instandhaltungen an einzelnen Schienen nicht dazu, dass die zugehörigen Verbraucher unverfügbar werden.

Die Doppeleinspeisung liegt den Nachweisen zur Störfallbeherrschung in deutschen Anlagen zugrunde.

Nachteile der Doppeleinspeisung ergeben sich beim Ausfall von Dioden. Als Ausfalleffekte von Dioden kommen ein Sperren (hochohmig werden) und ein Durchlegieren (gerichtete Sperrwirkung verlieren) in Frage [15]. Im zweiten Fall entsteht eine nicht mehr rückwirkungsfreie Verbindung zwischen zwei Redundanzen, die einen Energiefluss in beide Richtungen zulässt.

Somit birgt die galvanische Kopplung von Redundanzen ein Potential für systematische Fehler (funktionelle Abhängigkeit). Sie erfordert besondere Aufmerksamkeit und ein spezielles Vorgehen bei Änderungen ggf. durch redundanzweise gestaffeltes Vorgehen und/oder erweiterte Prüfungen/Analysen.

6 Sachverhalt zum Ereignis im KWG (Ereignismeldung 06/2011)

6.1 Konzept der gesicherten Drehstromversorgung

Der Aufbau der gesicherten bzw. unterbrechungsfreien Drehstromversorgung innerhalb des Notstromsystems ergibt sich aus dem Übersichtsschaltbild [1d] des KWG.

Die von den Umformern versorgte gesicherte unterbrechungsfreie Drehstromversorgung dient der Sicherstellung der Stromversorgung für Drehstromverbraucher, die im Anforderungsfall Notstromfall auch in der Phase bis zum Hochlaufen oder beim Ausfall der Notstromdiesel zur Verfügung stehen sollen. Eine kurzzeitige Unterbrechung der Versorgung der angeschlossenen Verbraucher (z. B. GBA-Klappen der Lüftung) der gesicherten unterbrechungsfreien Drehstromversorgung beeinträchtigt die Störfallbeherrschung nicht [4].

Demzufolge verfügt die Anlage im Bereich der unterbrechungsfreien Drehstromversorgung über vier rotierende Umformer GZ10 - GZ40, die den Redundanzen 1 bis 4 zugeordnet sind, und einen Reserveumformer GZ41, der im Bedarfsfall einen der rotierenden Umformer GZ10 - GZ40 bei dessen Unverfügbarkeit ersetzen kann. Mit den Umformern werden die unterbrechungsfreien Drehstromschienen GA bis GD versorgt. Das Konzept der redundanzmäßigen Zuordnung zeigt Bild 1.

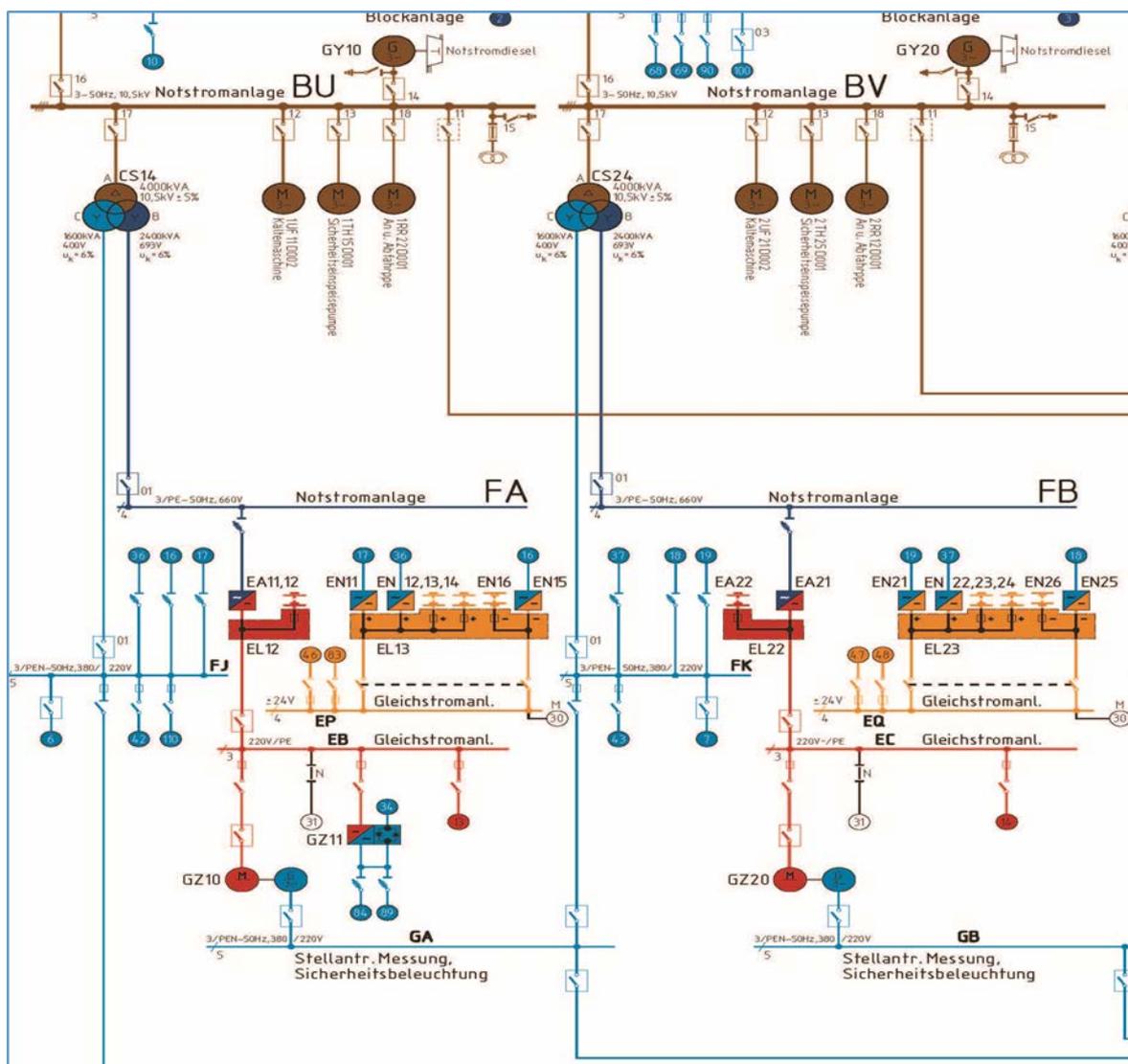


Bild 1: Aufbau der gesicherten Drehstromversorgung am Beispiel der Redundanzen 1 und 2

Die Umformer werden strangzugeordnet aus den 220-V-Gleichstromanlagen EB bis EE versorgt, die wiederum über Gleichrichter und Batterien gespeist werden. Die Gleichrichter selbst sind ebenfalls strangzugeordnet an die 660-V-Notstromschienen FA bis FD angeschlossen. Zusätzlich zu den 660-V-Notstromschienen verfügt jede Notstromredundanz über eine 380-V-Schiene (FJ bis FM). Sowohl die Einspeisung der 660-V- als auch der 380-V-Notstromschienen erfolgt strangzugeordnet über die Notstromtransformatoren CS14 - CS44 von den 10-kV-Notstromschienen BU bis BX.

Neben der strangbezogenen Einspeisung existiert für die unterbrechungsfreien Drehstromschienen eine „Netzumgehung“ (darunter wird die Umschaltung auf die unterbrechungsbehaftete Notstromversorgung verstanden) in die Nachbarredundanz. Diese Netzumgehung wird beim Ausfall eines rotierenden Umformers in Anspruch genommen, indem bei Unterschreiten einer Mindestspannung ($0,8 \times U_N$) in der gesicherten Drehstromversorgungsschaltanlage GA - GD nach 0,5 s eine automatische Umschaltung auf die zugeordnete 380-V-Notstromschiene erfolgt [1c]. Am Beispiel der Redundanz 1 stellt sich dies so dar, dass bei Ausfall des Umformers GZ10 im KWG nicht auf die eigene Notstromschiene FJ, sondern auf die der Nachbarredundanz FK umgeschaltet wird.

6.2 Ablauf und Ursache des Ereignisses in KWG

Als eine der technischen Ursachen des Ereignisses 06/2011 wurde bei im Nachgang zum Ereignis durchgeführten Laboruntersuchungen die Empfindlichkeit der an den Umformern des KWG eingesetzten Drehzahlüberwachung gegen kurzzeitige Spannungseinbrüche der 220-V-Gleichstromversorgung detektiert [1c]. Es kam zu einem kurzzeitigen Spannungseinbruch im zweistelligen Mikrosekundenbereich, welche von der Auswerteelektronik als Drehzahlabfall des Umformers interpretiert wurden. Bei einer Grenzwerteinstellung im oberen Messbereich der Drehzahlüberwachung führt dieser Effekt zu einem Ansprechen des MIN-Drehzahlgrenzwertes und nachfolgend bestimmungsgemäß zur Abschaltung des betroffenen Umformers [1c]. Die Empfindlichkeit der Drehzahlüberwachung gegen derartige Spannungseinbrüche ist im Schaltungskonzept der Einrichtung begründet.

Als mögliche Quelle des Spannungseinbruchs, der zur Abschaltung der Umformer führte, wurde im Nachgang zum Ereignis 06/2011 der Leistungsschalter (Typ 3WE der Firma Siemens) der Nachkühlpumpe der Redundanz 4 identifiziert. Es wurden auch im Steuerteil des Schalters Ablagerungen vom Kontaktabbrand der Schaltkontakte gefunden und daraus auf einen Spannungseinbruch in der Steuerspannung geschlossen [4].

Dieser Spannungseinbruch konnte sich in allen Redundanzen gleichzeitig auf die Umformer auswirken, da die (L-)Leiter der einspeisenden 220-V-Gleichstromschienen über alle Redundanzen hinweg durchverbunden sind, um eine Anforderung der KTA-Regel 3703 [10] zur Beherrschung von Doppelerdschlüssen zu erfüllen.

Der Ablauf des Ereignisses bei Ausfall aller vier rotierenden Umformer entsprach bis auf die Fehlfunktion der Netzumgehung in der Redundanz 4 aufgrund eines zusätzlich auftretenden zufälligen Fehlers der Auslegung. In den Redundanzen 1 bis 3 funktionierte die Netzumgehung, so dass die von den Schienen GA bis GC versorgten betrieblichen und sicherheitstechnisch wichtigen Verbraucher nach einer spannungslosen Pause von ca. 0,5 s wieder versorgt waren.

6.3 Vorkehrungen gegen Wiederholung

Als Vorkehrung gegen Wiederholung eines solchen Ereignisses hat der Betreiber des KWG mehrere Maßnahmen getroffen.

Zunächst wurde der Grenzwert „Tacho gestört“ der Drehzahlüberwachung wieder auf den ursprünglichen Wert 160 V (entsprechend 40 Hz) zurückgestellt [1c].

Zur Vermeidung unerwünschter Abschaltungen der Umformer aufgrund kurzzeitiger Schwankungen des Ausgangssignals der in der Drehzahlüberwachung der Umformer eingesetzten Tachogeneratoren wurden Zeitrelais im Signalpfad der entsprechenden Auslösegrenzwerte für die MIN-Drehzahl installiert, so dass es bei transienten Spannungseinbrüchen oder Störsignalen nicht zu einer Abschaltung des betroffenen Umformers kommen kann [1c].

Eine vergleichbare Maßnahme wird für die Auslösung der Überdrehzahlanregung bei 240 V (60 Hz) derzeit geprüft [1c].

Ferner wurde an den gesicherten Wechselspannungsschienen GA bis GD eine Frequenzüberwachung nachgerüstet. Diese überwacht die Sammelschienen auf Unter- und Überfrequenz und meldet Abweichungen vom Sollwert zeitlich verzögert per konventionelle Meldeanlage (KMA) und Rechnermeldeanlage (RMA) in der Warte [1c].

Die routinemäßige Wartung der 3WE-Leistungsschalter erfolgt im Gegensatz zur bislang geübten Praxis, diese durch Fachpersonal des KWG durchzuführen, zukünftig im Herstellerwerk. Integraler Bestandteil dieser Wartung sind eine komplette Demontage und Reinigung aller Schalterbaugruppen sowie der vorbeugende Austausch von Verschleißteilen [1c].

7 Beantwortung der Fragen des BMU

7.1 Frage 1

Aus welchen Gründen wurden die elektrischen Kopplungen im Notstromsystem deutscher Kernkraftwerke zwischen einzelnen Scheiben oder über mehrere Scheiben hinweg im Einzelnen vorgesehen, insbesondere in Bezug auf Doppeleinspeisungen von Verbrauchern?

Doppeleinspeisungen bestehen im Bereich der 24-V- und 220-V-GS-Versorgung und dienen dem Zweck der höheren Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit der Stromversorgung von betrieblichen und sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen (siehe 5.2). So sind diese Verbraucher auch dann stromversorgt, wenn ihre zugeordnete Notstromredundanz stromlos ist. Die gleiche Aussage gilt für die „Netzumgehung“ auf die Nachbarredundanz (siehe 6.1).

Darüber hinaus existieren Verbindungen zu benachbarten Redundanzen in Form sog. Reparaturkopplungen,

die bei Bedarf von Hand eingelegt werden, um Verbraucher auch bei der Freischaltung von Notstromschienen versorgen zu können.

7.2 Frage 2

Inwieweit entsprechen elektrische Kopplungen im Notstromsystem, im Notspeise-Notstromsystem (Vorkonvoi- und Konvoi-Anlagen) bzw. in den Notstandssystemen der deutschen Kernkraftwerke zwischen einzelnen Scheiben oder über mehrere Scheiben hinweg dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Aspektes scheibenübergreifender Unverfügbarkeiten (Vermeidung bzw. Beherrschung)?

Vermaschungen auch im Notstromsystem sind unter Anwendung des Regelwerks zulässig. Nach den Sicherheitsanforderungen [8] 3.9 (2) gilt speziell für die Notstromanlagen:

Eine Vermaschung der einzelnen Stränge der Notstromanlagen ist im Einzelfall dann zulässig, wenn nachgewiesen ist, dass die Zuverlässigkeit des Notstromsystems dadurch nicht unzulässig gemindert wird. Dabei ist darauf zu achten, dass keine in Betracht zu ziehende Versagensmöglichkeit mehr als einen Strang ausfallen lassen kann.

Gemäß KTA 3703 4.1 (3) [10] sind bei Notstromerzeugungsanlagen mit Batterien und Gleichrichtergeräten in Kernkraftwerken neben streng strangweisen Einspeisungen folgende Vermaschungen zulässig:

- a) Versorgung der Verbraucher eines Stranges aus dem zugeordneten Strang und einem benachbarten Strang der Batterieanlage mittels diodentkoppelter Doppeleinspeisungen
- b) Anschluss eines Gleichrichtergerätes an die Diesel-Notstromschaltanlage des gleichen Stranges, Anschluss des zweiten Gleichrichtergerätes an die Diesel-Notstromschaltanlage eines benachbarten Stranges.

Diesbezüglich wird in 4.1 (4) von [10] gefordert, dass bei verbraucherseitig diodentkoppelten Doppeleinspeisungen (Variante a)) oder gleichrichtergeräteseitigen Doppeleinspeisungen (Variante (b)) die Verbindungen zum benachbarten Strang so auszuführen sind, dass keine in Betracht zu ziehende Versagensmöglichkeit mehr als einen Strang ausfallen lassen kann.

Gemäß KTA 3704 4.1.1 (6) [16] wird für die Auslegung des Schaltungskonzepts für Umformeranlagen u. a. gefordert:

Je Strang soll eine Verbindung vorgesehen werden zwischen der Umformer-Notstromschaltanlage und der Diesel-Notstromschaltanlage entweder des eigenen Stranges oder eines Nachbarstranges (Bild 4-1 und Bild 4-2). Diese Verbindung soll nach Ausfall der Versorgung aus dem Umformer unter Einhaltung der Bedingungen nach Abschnitt 4.5.4 über eine Umschalteinrichtung zugeschaltet werden. Verbindungen zu Nachbarsträngen sind so auszuführen, dass keine zu unterstellende Versagensmöglichkeit mehr als einen Strang ausfallen lassen kann.

Eine weitere Form der Vermaschung ist der gemeinsame (L-)-Leiter der 220-V-Gleichstromversorgung. Wie bereits in 5.1 erläutert, werden diese Schienen als isoliertes System betrieben, d. h. sie sind nicht geerdet. Da die Verbraucher dieser Schienen größtenteils über diodenentkoppelte Doppeleinspeisungen verfügen, ist zur Vermeidung der Spannungsverdopplung bei Doppelerdschlüssen ein gemeinsamer (L-)-Leiter aller vier Redundanzen realisiert.

Im langjährigen Einsatz der 220-V-Gleichstromversorgung in Verbindung mit dem Prinzip der Doppeleinspeisung in deutschen Kernkraftwerken gab es nach Kenntnis der RSK bis auf das Vorkommnis in KWG keine Ereignisse, die auf diese Art der Vermaschung zurückzuführen waren. Das KWG-Ereignis hat gezeigt, dass trotz des durch die (L-)-Leiter in alle Redundanzen wirksamen Spannungseinbruchs die 220-V-GL-Versorgung nicht beeinträchtigt wurde und die 380-V-Drehstromversorgung nach kurzer Unterbrechung (0,5 s)² wieder zur Verfügung stand.

7.3 Frage 3

Welche alternativen Lösungsmöglichkeiten zu den existierenden Kopplungen gibt es, z. B. geändertes Erdungskonzept, vollständige elektrische Entkopplung der Scheiben, Konzepte eines diversitären Aufbaus der Scheiben zueinander?

In den derzeitigen in Planung bzw. Bau befindlichen AREVA-Anlagen kommen drei unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung.

1. Diodenentkoppelte Doppeleinspeisung der 220V GS Verbraucher mit Verbindung aller Scheiben über den L-Leiter, wie in den deutschen Anlagen realisiert. (Angra 3)
2. Diodenentkoppelte Doppeleinspeisung der 220V GS Verbraucher mit Paarbildung. Damit ist gemeint, dass es nur bestimmte Doppeleinspeisungen (z. B. Redundanz 1&2 und Redundanz 3&4) gibt. In diesem Fall werden auch nur die (L-) -Leiter der entsprechenden Redundanzen (1&2 bzw. 3&4) miteinander verbunden. (Olkiluoto 3)
3. Strikte Redundanztrennung unter Verzicht auf die Doppeleinspeisung der 220V GS-Verbraucher. (Flamanville 3 und Taishan 1&2)

Entsprechend den nationalen Regelwerksanforderungen bzw. den Anforderungen der zukünftigen Betreiber werden verschiedene Konzepte in der 220-V-Gleichstromversorgung eingesetzt.

Jede dieser Lösungen erfordert eine umfassende systemtechnische Analyse der Folgen eines solchen Aufbaus der Gleichspannungsversorgung in Bezug auf die Störfallbeherrschung. Dabei wird insbesondere geprüft, ob für die Ansteuerung und Betätigung von sicherheitstechnisch wichtigen Verbrauchern (u. a. GBA-Armaturen) die jeweils geforderte Einzelfehlerfestigkeit gegeben ist.

² In KWG drei Redundanzen, da die Umschaltung aufgrund eines Einzelfehlers in einer Redundanz fehlschlug.

7.4 Frage 4

Und mit Verweis auf die Beratungen zum Ereignis im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark:

Sind aus dem Ereignis im Kernkraftwerk Forsmark, Block 1 am 25.07.2006 für die deutschen Anlagen alle erforderlichen Erkenntnisse hinsichtlich einer Vermeidung oder Beherrschung scheibenübergreifender Unverfügbarkeiten abgeleitet worden?

Als Folge des Ereignisses im Kernkraftwerk Forsmark Block 1 am 25.07.2006 wurde der Einfluss von Spannungstransienten im Netz und deren Auswirkungen auf die Eigenbedarfsversorgung und die Stromversorgung durch Notstromeinrichtungen für alle deutschen Anlagen untersucht. Insbesondere der dritte Teil der 1. Empfehlung der WLN 2006/007 [18] adressiert sicherheitstechnisch relevante Abweichungen, insbesondere solche, die zu redundanzübergreifenden Ausfällen führen können. Die Erkenntnisse aus dem Ereignis und den nachfolgenden Untersuchungen beinhalten nach Meinung der RSK alle generischen Gesichtspunkte hinsichtlich einer Vermeidung oder Beherrschung scheibenübergreifender Unverfügbarkeiten als Folge von Spannungstransienten im Netz. Hinsichtlich deren Umsetzung erfolgen noch anlagenspezifischer Prüfungen.

Bei Unterspannungen in der Eigenbedarfsversorgung oder in Teilsystemen des Notstromsystems kann, abgesehen von dem Fall „Phasenausfälle“, davon ausgegangen werden, dass aufgrund des Auslegungskonzepts die vorhandenen Schutzeinrichtungen redundanzübergreifende Auswirkungen ausreichend sicher vermeiden [19].

7.5 Ergänzende Fragen des BMU

Frage a:

Welche dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechenden technische Lösungen können empfohlen werden, um zu verhindern, dass Verstärkungen, wie hier an einem einzelnen Grenzwert durch Personalhandlungen, nicht eindeutig sicherheitsgerichtet sind?

Diskutierbar wäre z. B. ein diversitärer Aufbau der Umformereinrichtungen einzelner Scheiben oder eine Aufteilung der Auslösefunktionen eines einzelnen Grenzwertes etwa auf zwei technisch verschieden einzustellende Grenzwerte, für verschiedene Auslösefunktionen, so dass die einzelnen Einstellvorgänge eindeutig sicherheitsgerichtet sind.

Nach den vorliegenden Informationen [4] war es nach dem Ereignis 07/2009 das Ziel, einen Umformerbetrieb mit unzureichender Frequenz zu erkennen. Hierfür wäre nach Ansicht der RSK die Installation eines zusätzlichen Warngrenzwertes vorgelagert zum bestehenden, abschaltwirksamen Grenzwert notwendig gewesen. Ein derart gestaffeltes Überwachungs- und Schutzkonzept (Meldung vor Abschaltung) ist beispielhaft für verschiedene Anwendungen in den Tabellen 3-1 bis 3-4 der KTA 3705 [17] dargestellt.

Daraus leitet sich die Schlussfolgerung ab, dass, wo immer möglich, eine strikte Trennung der Aufgaben zwischen Melde- und Schutzfunktion erhalten werden sollte. Der Verzicht auf die reine, seit der Inbetriebsetzung betriebsbewährte Schutzfunktion „Abschaltung bei Drehzahl tief“ und die Umwidmung in einen kombinierten Schutz- und Überwachungsgrenzwert bildete eine der verketteten Ursachen des Ereignisses 06/2011 im KWG.

Es liegt jedoch auf der Hand, dass ein solches Konzept nicht grundsätzlich im Sinne der Frage a als Vorkehrung gegen unbeabsichtigte Auswirkungen von Grenzwertverstellungen wirken kann.

Da die dem Ereignis 06/2011 vorausgehende Grenzwertänderung nicht auf einer Fehleinstellung im Sinne einer Verwechslung oder unbewussten Fehlhandlung basierte, sondern nach Ablauf eines ordnungsgemäßen Änderungsverfahrens nach BHB erfolgte, sind technische Maßnahmen (z. B. schaltungstechnische Begrenzung des Verstellbereichs, Verzicht auf Einstellmöglichkeiten auf der Frontplatte der Baugruppe, Versiegelung von Einstellpotentiometern) gegen unbeabsichtigte Auswirkungen derartiger Änderungen nicht wirksam.

Das Potential für Fehler durch Fehleinstellungen wie bei dem Ereignis kann nur durch eine Kombination von Maßnahmen, wie z. B.:

- administrative Festlegungen
- gestaffelte, redundanzbezogene Umsetzung und entsprechender zeitlicher Vorlauf für Erprobung
- Vorgaben für Auswirkungsanalysen zur Identifikation von GVA bei Fehlern in der Auslegung oder Ausführung

reduziert, aber nicht vollständig beseitigt werden.

Frage b:

Wie bewertet der Ausschuss dieses und weitere Konzepte (bezieht sich auf die vom Betreiber vorgesehenen Verbesserungsmaßnahmen, siehe u. a. VGB-Vortrag auf der 223. Sitzung des RSK-EE am 21.11.2012) zur Beherrschung von gleichspannungsseitigen Spannungseinbrüchen, z. B. auf Grund eines länger anstehenden bzw. permanent wiederkehrenden Lichtbogens (Flackern/Wackelkontakt)?

Wird insbesondere bei den bestehenden Konzepten in den deutschen Anlagen mit (L-)-Brücken zu allen Scheiben ein Erdschluss aufgrund einer solchen Kontaktierungsart so zuverlässig beherrscht, dass ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Umformer nicht unterstellt werden muss?

Im Nachgang zum Ereignis 06/2011 wurden im KWG die folgenden Vorkehrungen gegen Wiederholung getroffen bzw. vorgesehen:

- Rücksetzen des Grenzwerts „Tacho gestört“ der Drehzahlüberwachung auf den ursprünglichen Wert 160 V

-
- Einsatz von Zeitrelais zur Unterdrückung der Folgen kurzzeitiger Schwankungen des Ausgangssignals der in der Drehzahlüberwachung der Umformer eingesetzten Tachogeneratoren
 - Prüfung des Einsatzes vergleichbarer Maßnahmen für die Auslösung der Überdrehzahlregelung
 - Nachrüstung einer Frequenzüberwachung an den gesicherten Wechselspannungsschienen GA bis GD
 - Änderungen der Zuständigkeit für die Wartung der 3WE-Schalter

Durch diese Maßnahmen sollte im KWG die Wiederholung eines vergleichbaren Ereignisses vermieden werden. Bei dem Ereignis kam es nicht zu für die übrigen Verbraucher relevanten Spannungseinbrüchen auf den 220-V-GS-Schienen selbst. Es war aufgrund des schaltungstechnischen Aufbaus nur die Grenzwertbildung der KWG-spezifischen Drehzahlüberwachung (Tachogeneratoren) der rotierenden Umformer betroffen.

Spannungseinbrüche auf den 220-V-GS-Schienen durch Motoranläufe auf der unterlagerten gesicherten Drehstromschiene sind in der Auslegung des Systems berücksichtigt. Darüber hinausgehende Spannungseinbrüche auf diesen Schienen sind denkbar aufgrund von Gerätestörungen in Form von Gleichrichterausfällen, Unterbrechungen im Strompfad der Batterien/Gleichrichter oder Sammelschienenkurzschlüssen. Kurzschlüsse in Verbraucherabzweigen werden selektiv abgeschaltet. Ein Erdschluss in einem isoliert betriebenen System führt weder zu einem Lichtbogen noch zu einem statischen Spannungseinbruch, da sich bei einem einzelnen Erdschluss kein Stromkreis bildet, der das System belastet.

Seit 1995 und vor der Grenzwertverstellung kam es in KWG zu 11 Erdschlüssen in den Schienen EB bis EE. In zwei Fällen kam es zu einem vollen Erdschluss ((L-) und (L+) gegen Erde), vergleichbar zu einem Kurzschluss (L-) zu (L+). In keinem Fall kam es dabei zu Beeinträchtigungen von Verbrauchern oder zur Abschaltung von Umformern.

Die Ursachen für die Abschaltung der rotierenden Umformer in KWG waren begründet in:

- der KWG-spezifischen Verwendung von Tachogeneratoren und der Schaltung zur Drehzahlüberwachung der rotierenden Umformer
- einem falsch eingestellten Grenzwert.

Beide Aspekte sind in anderen Anlagen auf Basis der Weiterleitungsnachricht 2013/01 zu überprüfen, so dass nach Abschluss der entsprechenden Untersuchungen ein gleichartiger Ausfall von rotierenden Umformern nicht zu unterstellen ist. Unabhängig davon bestätigen die vorliegenden Betriebserfahrungen die bestimmungsgemäße Funktion der gesicherten Drehstromversorgung auch unter dem Einfluss zufälliger Störungen wie z. B. des Auftretens von Erdschlüssen in der 220-V-GS-Versorgung.

8 In Bezug genommene Unterlagen

- [1] Beratungsauftrag des BMU „Scheibenübergreifende Unverfügbarkeit aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke“, RS I 3 – 17018, 31.01.2012 einschließlich der Anlagen:
- [1a] Bericht Eon-Kernkraft BF-WN 2011 „Bewertung des Ausfalls aller rotierender Umformer – Bewertung des abdeckenden Kühlmittelverluststörfalls mit gleichzeitigem Notstromfall“, 25.11.2011,
- [1b] Untersuchungsbericht Eon Anlagenservice, Stand 27.11.2011
- [1c] Arbeitsbericht Eon-Kernkraft E-ET 2011 „Ereignis Ausfall GZ10-40 D001 – Zusammenfassung aller Untersuchungen und Ergebnisse“, 02.12.2011
- [1d] E-Übersichtsplan Kernkraftwerk Grohnde (KWG)
- [1e] Kurzstellungnahme der GRS, A621, leb, 21.12.2011

- [2] Schreiben der RSK/ESK-Geschäftsstelle an den VGB, „Scheibenübergreifende Unverfügbarkeiten aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke“, E218_BR16.04.2012_VGB, 16.04.2012

- [3] VGB POWERTECH, „Scheibenübergreifende Unverfügbarkeiten aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke“ – „Berichterstattung des VGB vor der RSK-EE am 21.11.2012“, Foliensatz

- [4] GRS, Weiterleitungsnachricht WLN 2013/01 „Ausfall einer gesicherten Drehstromschiene bei fehlerhafter Anregung der Drehzahlüberwachung aller rotierenden Umformer im Kernkraftwerk Grohnde“

- [5] M. Leberecht, GRS, „Ausfall einer gesicherten Drehstromschiene bei fehlerhafter Anregung der Drehzahlüberwachung aller rotierenden Umformer im Kernkraftwerk Grohnde“, 30.01.2013, Foliensatz

- [6] RSK-Ausschuss ELEKTRISCHE EINRICHTUNGEN, „Scheibenübergreifende Unverfügbarkeiten aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke“, Beitrag Reßing, 03.01.2013

- [7] Ergänzende Fragen an den Ausschuss Elektrische Einrichtungen (EE) der Reaktor-Sicherheitskommission im Zusammenhang mit den Beratungen zum Beratungsauftrag „Scheibenübergreifende Unverfügbarkeiten aufgrund elektrischer Kopplungen zwischen redundanten Scheiben des Notstromsystems deutscher Kernkraftwerke“ vom 31.01.2012. RS I 3 – 17018, 12.03.2013

-
- [8] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, 20. November 2012
- [9] Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3701, „Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken“, Fassung 6/99
- [10] Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3703, „Notstromerzeugungsanlagen mit Batterien und Gleichrichtergeräten in Kernkraftwerken“, Fassung 2012-11
- [11] Final Draft International Standard - FDIS IEC 61225 „Nuclear power plants - Instrumentation and control systems important to safety - Requirements for electrical supplies
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Standards, Safety of Nuclear Power Plants: „Design“, No. SSR-2/1, Specific Safety Requirements, VIENNA, 2012
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES, SAFETY GUIDE No. NS-G-1.9 „Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants“, VIENNA, 2004
- [14] Association of Regulators of Western Europe, REACTOR HARMONIZATION WORKING GROUP, WENRA Reactor Safety Reference Levels, January 2008
- [15] GRS, G. Schnürer, „Untersuchung der Verbindungen zwischen benachbarten Strängen des Notstromsystems im Hinblick auf Versagensmöglichkeiten mehrerer Stränge“, GRS-A-1849, November 1991
- [16] Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3704, „Notstromerzeugungsanlagen mit Gleichstrom-Wechselstrom-Umformern in Kernkraftwerken“, Fassung 2013-11
- [17] Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 3705, „Schaltanlagen, Transformatoren und Verteilungsnetze zur elektrischen Energieversorgung des Sicherheitssystems in Kernkraftwerken“, Fassung 2006-11
- [18] GRS-Weiterleitungsnachrichten, WLN 2006/07 „Ereignis im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark, Block 1 am 25.07.2006: „Nichtzuschalten von zwei Notstromdieseln nach Ausfall der 400-kV-Netzanbindung“, Köln, 14.11.2006
- [19] RSK-Stellungnahme (453. Sitzung am 13.12.2012), „Netzstabilität“ Rückwirkungen von Stabilitätsproblemen im deutschen Stromnetz auf elektrische und leittechnische Einrichtungen von Kernkraftwerken und Sicherstellung der notwendigen elektrischen Energieversorgung dieser Anlagen aus dem Netz