

## **Störungen im Stromnetz und Notstromfälle in Kernkraftwerken in den Jahren 2003 bis 2012**

Teil A

**Ursachen, Abläufe und  
Auswirkungen von Netz-  
störungen**

Teil B

**Auswertung nationaler  
und internationaler Betriebs-  
erfahrung zu Notstromfällen**



## **Störungen im Stromnetz und Notstromfälle in Kernkraftwerken in den Jahren 2003 bis 2012**

Teil A

**Ursachen, Abläufe und  
Auswirkungen von Netz-  
störungen**

Teil B

**Auswertung nationaler  
und internationaler Betriebs-  
erfahrung zu Notstromfällen**

Claudia Quester  
Dagmar Sommer  
Claus Verstegen

Juli 2014

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3612 R 01320 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

**GRS - 317**  
**ISBN 978-3-939355-96-0**

## **Deskriptoren**

Fremdnetz, Frequenzschwankung, Hauptnetz, Lastabwurf auf Eigenbedarf, Netzausfall, Netzstörung, Notstromdiesel, Notstromfall, Phasenungleichgewicht, Spannungsschwankung, Station Blackout, Stromnetz, Verbundnetz

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>Teil A: Ursachen und Ablauf von großflächigen Netzausfällen und deren Auswirkungen auf Kernkraftwerke</b>	<b>3</b>
<b>1 Europäisches Verbundnetz</b>	<b>3</b>
1.1 Aufbau	3
1.2 Maßnahmen im Verbundnetz zur Beherrschung von Netzstörungen	4
<b>2 Mögliche Ursachen für Netzstörungen und Netzausfälle</b>	<b>9</b>
2.1 Spannungs- und Frequenzänderungen	9
2.2 Frequenzschwankungen	9
2.3 Spannungskollaps	10
2.4 Verlust der transienten Stabilität	10
<b>3 Netzausfälle in Jahren 2003 bis 2012</b>	<b>11</b>
3.1 Netzausfall in den USA/Kanada, 2003	11
3.2 Netzausfall in Großbritannien, 2003	27
3.3 Netzausfall in Dänemark und Schweden, 2003	29
3.4 Netzausfall in Italien, 2003	32
3.5 Netzausfall in Griechenland, 2004	36
3.6 Netzausfall in Luxemburg sowie im Raum Trier, Deutschland, 2004	39
3.7 Ausfall des Eisenbahnnetzes in der Schweiz, 2005	42
3.8 Netzausfall im Münsterland, Deutschland, 2005	45
3.9 Netzausfall in Europa, 2006	48
3.10 Netzausfall in Florida, USA, 2008	56
3.11 Netzausfall in Frankreich und Spanien, 2009	60
3.12 Netzausfall in London, Großbritannien, 2009	62
3.13 Netzausfall in Brasilien und Paraguay, 2009	63
3.14 Netzausfall in Japan, 2011	67
3.15 Netzausfall in Zypern, 2011	78

3.16	Netzausfall in Hannover, Deutschland, 2011 .....	80
3.17	Netzausfall in Indien, 2012.....	81
3.18	Netzausfall in den USA, der Karibik und Kanada, 2012 .....	86
<b>4</b>	<b>Bewertung der Netzausfälle .....</b>	<b>95</b>
<b>Teil B:</b>	<b>Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung bei Notstromfällen .....</b>	<b>99</b>
<b>1</b>	<b>Mögliche Ursachen für einen Notstromfall .....</b>	<b>99</b>
<b>2</b>	<b>Ereignisse der Jahre 2003 bis 2012.....</b>	<b>101</b>
2.1	Ereignisse aus der deutsche Betriebserfahrung.....	101
2.2	Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung.....	112
<b>3</b>	<b>Bewertung der aufgetretenen Ereignisse .....</b>	<b>139</b>
	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>145</b>
<b>Anhang:</b>	<b>Netzausfälle in den Jahren 2003 bis 2012 .....</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>187</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>209</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>215</b>

## Einleitung

Die Infrastruktur und die Lebensbedingungen der Menschen in modernen Industriegesellschaften hängen von einer zuverlässigen Stromversorgung ab. Ohne Stromversorgung funktionieren der öffentliche Personennahverkehr, Kommunikationseinrichtungen, die Infrastrukturen der Unternehmen, Ampelanlagen, die kommunale Wasserversorgung und auch alle modernen Heizungsanlagen nicht. Darüber hinaus sind nach relativ kurzer Zeit Schwierigkeiten bei der Lebensmittelversorgung und im Gesundheitswesen zu erwarten. [169]

Die Auswirkungen eines großflächigen und lang andauernden Ausfalls der Stromversorgung wurden am 14.08.2003 in den USA und Kanada deutlich. Ähnliche Auswirkungen hatten beispielsweise auch die Versorgungsausfälle 2003 in Südschweden und Ostdänemark sowie in Italien, die Versorgungsausfälle 2004 in Griechenland, die Netzstörung 2006 in Westeuropa und der zweimalige Versorgungsausfall in Indien 2012. Auch bei vergleichsweise kurzen oder weniger Personen betreffenden Netzausfällen wird vielfach von einem Ausfall der Ampelanlagen, einer Unterbrechung der Wasserversorgung, Problemen bei der Abwasserbehandlung, nicht verfügbaren Kommunikations- oder Informationswegen und Feuerwehreinsätzen zur Befreiung von Menschen aus liegengebliebenen U-Bahnen und Fahrstühlen sowie Anstrengungen zur Notstromversorgung z. B. von Beatmungsgeräten in Pflegeheimen etc. berichtet. Darüber hinaus kommt es in solchen Fällen immer wieder zur Evakuierung von Krankenhäusern aufgrund nicht vorhandener oder erschöpfter Versorgung durch Notstromaggregate. Ein weiteres Problem ist auch insbesondere bei länger andauernden Ausfällen die Notwendigkeit, betroffene Personen von außen mit Lebensmitteln, Wasser, Decken und weiteren Hilfsgütern zu versorgen.

Die Ausfälle der Stromversorgung 2003 in den USA und Skandinavien, aber auch in Florida 2008, Brasilien 2009, Japan 2011 oder in Indien 2012 haben gezeigt, dass neben den Auswirkungen auf Bevölkerung und Industrie auch Kernkraftwerke betroffen waren. Diese waren während des Ausfalls der Netze zur Sicherstellung ihrer sicherheitsrelevanten Stromversorgung auf einen funktionierenden Lastabwurf auf Eigenbedarf oder die Verfügbarkeit ihrer Notstromdieselaggregate angewiesen. In einigen Fällen wurden die Kernkraftwerke über die Versorgung eines Inselnetzes auch zum Netzwiederaufbau herangezogen.

Vor dem Hintergrund der internationalen großflächigen Netzausfälle stellt sich die Frage nach den Auswirkungen einer Netzstörung oder eines Netzausfalls in Deutschland auf die deutschen Kernkraftwerke. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die GRS mit Schreiben vom 22.04.2004, AG RS I 3 - 10321 [136] im Rahmen des Vorhabens SR 2468 mit der Auswertung der internationalen Betriebserfahrung mit großflächigen Netzausfällen und Notstromfällen im Hinblick auf die entsprechenden deutschen Verhältnisse beauftragt. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Auswertung, die in einem Bericht der GRS detailliert dargestellt sind [208], beauftragte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die GRS am 26.07.2012 mit der Erstellung eines generischen Berichts zu Netzstörungen und Netzausfällen in den Jahren 2003 bis 2012.

Dieser Bericht gliedert sich inhaltlich in zwei Teile A und B:

**Teil A** des vorliegenden Berichts beschäftigt sich mit Ursachen und Ablauf von Netzstörungen und Netzausfällen sowie mit deren Auswirkungen auf die Kernkraftwerke im betroffenen Gebiet. Im Vorfeld werden das europäische Verbundnetz und die Maßnahmen der Netzbetreiber zur Beherrschung von Netzstörungen und Netzausfällen beschrieben. Ebenso wird kurz auf Ursachen für Netzstörungen und Netzausfälle eingegangen. Nach der Beschreibung von ausgewählten Netzstörungen und Netzausfällen aus den Jahren 2003 bis 2012 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung dieser Ereignisse.

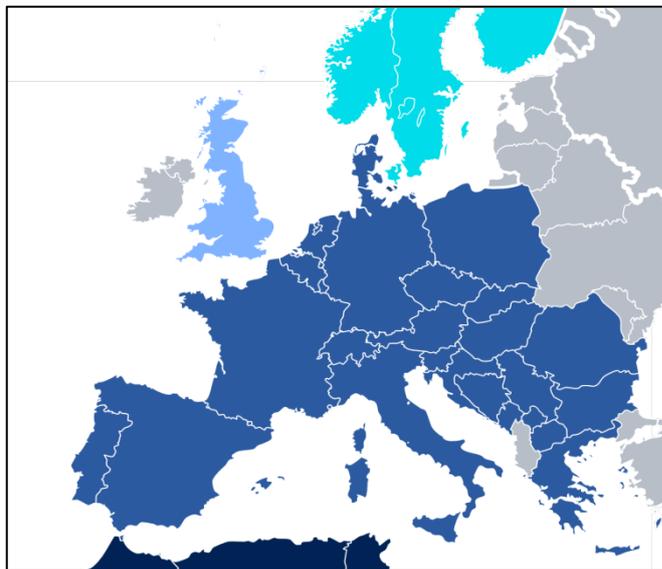
**Teil B** des vorliegenden Berichts beschäftigt sich mit der Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung bei Notstromfällen. Zuvor erfolgt eine Beschreibung der Maßnahmen in den Kernkraftwerken zur Verhinderung der Ausbreitung einer Netzstörung in die Anlage sowie zur Beherrschung von Netzausfällen und Notstromfällen. Anschließend an die Beschreibung von ausgewählten nationalen und internationalen Ereignissen in Kernkraftwerken im Zusammenhang mit Netzstörungen und Notstromfällen erfolgt eine zusammenfassende Bewertung dieser Ereignisse.

## Teil A: Ursachen und Ablauf von großflächigen Netzausfällen und deren Auswirkungen auf Kernkraftwerke

### 1 Europäisches Verbundnetz

#### 1.1 Aufbau

Das deutsche Übertragungsnetz ist Teil des kontinentaleuropäischen Verbundnetzes (UCTE-Netz). Dieses umfasst im Wesentlichen die Hoch- und Höchstspannungsleitungen (220 kV und 400 kV) in den meisten Ländern West-, Mittel-, Süd- und Südosteuropas (siehe Abb. 1.1). An dieses kontinentaleuropäische Verbundnetz sind einige Länder Nordafrikas über eine Wechselspannungsverbindung zwischen Spanien und Marokko synchron angebunden, d. h. Netzfrequenz und Phasenlage sind identisch zum europäischen Verbundnetz. Die beiden Verbundnetze in Skandinavien und Großbritannien sind über HGÜ-Verbindungen (Hochspannungs-Gleichstromübertragung) asynchron angebunden.



**Abb. 1.1** Kontinentaleuropäisches Verbundnetz (mittelblau). Synchron angebunden sind einige nordafrikanische Staaten (dunkelblau, nur teilweise sichtbar), asynchron angebunden sind das britische Verbundnetz (hellblau) und das nordische Verbundnetz (graublau, nur teilweise sichtbar).

Grundsätzlich können sich Netzstörungen, die ihren Ursprung in Mittel-, West- oder Südeuropa haben, nicht nur im kontinentaleuropäischen Verbundnetz sondern auch in

den synchron angebotenen Gebieten und über fehlende Bereitstellung von Erzeugerleistung oder fehlende Abnahme von Verbraucherlast auch auf die asynchron über HGÜ angebotenen Gebiete auswirken. Umgekehrt können auch Netzausfälle beispielsweise in Skandinavien im kontinentaleuropäischen Verbundnetz spürbar sein.

Im europäischen Verbundnetz gibt es eine Vielzahl von Regelzonen. In diesen ist jeweils ein Übertragungsnetzbetreiber für das Gleichgewicht von Erzeugerleistung und Verbraucherlast (einschließlich Stromfluss in oder aus anderen Regelzonen) verantwortlich. Deutschland ist in vier Regelzonen geteilt: Amprion, Tennet TSO, TransnetBW und 50Hertz Transmission.

## **1.2 Maßnahmen im Verbundnetz zur Beherrschung von Netzstörungen**

Zur Bewertung möglicher Auswirkungen von großflächigen Netzstörungen auf die Sicherheit der elektrischen Energieversorgung der deutschen Kernkraftwerke sind zunächst die Maßnahmen zur Störungsbeherrschung im Verbundnetz zu betrachten. Darüber hinaus spielen die Maßnahmen zur Störungsbeherrschung in den Kernkraftwerken eine wichtige Rolle (siehe Teil B des Berichts).

### **1.2.1 Allgemeine Maßnahmen im europäischen Verbundnetz**

Im kontinentaleuropäischen Verbundnetz gibt es eine Reihe von Maßnahmen, die auf die Vermeidung und Beherrschung von Netzstörungen abzielen. Vom Verband der europäischen Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) wurden im Rahmen der Versorgungssicherheit Regeln aufgestellt, die für alle Übertragungsnetzbetreiber im kontinentaleuropäischen Verbundnetz bindend sind. Darüber hinaus werden die in den einzelnen Regelzonen bislang unterschiedlichen Richtlinien für Netzplanung und Netzbetrieb harmonisiert. [188]

Der deutsche Verband der Netzbetreiber VDN hat die Netz- und Systemregeln im TransmissionCode 2007 festgeschrieben. [189] Auf europäischer Ebene wird das Operation Handbook of ENTO-E Regional Group Continental Europe angewendet. [190] Maßnahmen bei Netzstörungen werden beispielsweise auch in verschiedenen Berichten der ENTSO-E beschrieben. [188], [191]

Nach einer Auswertung dieser Berichte sowie von Betreiberberichten über die „Wiederherstellung der Netzverbindungen nach einer Netzstörung“ aus dem Jahr 1987 [20] und dem Vortrag der Transportnetze AG der ENBW vor dem RSK-Ausschuss Elektrische Einrichtungen im Jahre 1999 [21] basieren die Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Beherrschung von Netzstörungen im Verbundnetz im Wesentlichen auf den folgenden technischen und administrativen Maßnahmen:

- Grundsätzliche Auslegung des Verbundnetzes unter Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums: Die Anforderungen des (n-1)-Kriteriums sind erfüllt, wenn es den störungsbedingten Ausfall einer Komponente (Netzbetriebsmittel, Erzeugungseinheit) ohne unzulässige Einschränkung seiner eigenen Übertragungs- oder Verteilungsfunktion übersteht. Solange das (n-1)-Kriterium erfüllt ist und ausreichende Regelreserven zur Verfügung stehen, befindet sich das Netz im anforderungsgerechten Normalbetrieb. Ist das (n-1)-Kriterium nicht mehr erfüllt und die Reserven sind ausgeschöpft, spricht man von gefährdetem Betrieb (nach wie vor volle Versorgung). Der gestörte Betrieb ist erreicht, wenn das (n-1)-Kriterium nicht mehr erfüllt ist, keine Reserven zur Verfügung stehen und auch nicht mehr alle Kunden versorgt werden.
- Schnelles Erhöhen oder Senken von Regelenergie: Jedes Kraftwerk > 100 MW Leistung muss sich an der Primärregelung im Übertragungsnetz beteiligen. Dazu wird ein Regelband von 2.5 % der Kraftwerksleistung freigehalten und im Bedarfsfall automatisch innerhalb von 30 Sekunden bereitgestellt (Sekundenreserve). Gleichzeitig startet die Sekundärregelung und stellt innerhalb von 5 Minuten zusätzliche regelbare Kraftwerksleistung bereit. Die Tertiärregelung erfolgt durch telefonische Anweisung durch den Übertragungsnetzbetreiber zum Herauf- oder Herunterfahren von Kraftwerkskapazitäten, sie muss die Sekundärregelleistung binnen 15 Minuten ablösen können (Minutenreserve).
- Vorhalten von ausreichenden Kraftwerksregelreserven im Verbundnetz (Pumpspeicherkraftwerke, Laufwasserkraftwerke, Thermische Kraftwerke).
- Einsatz von automatischen Schutzeinrichtungen, die Betriebsmittel und Erzeugungseinheiten bei unzulässigen Betriebszuständen selektiv vom Netz trennen.
- Fernsteuerung und weitgehende Automatisierung von Schaltvorgängen im Verbundnetz zur Vermeidung von Fehlschaltungen.
- Geringe Abstände zwischen den Netzknoten im Hochspannungsnetz, so dass gestörte Netzbereiche umgangen werden können.

- Vorkehrungen zum automatischen frequenzabhängigen Lastabwurf von Verbrauchergruppen bei Großstörungen mit Frequenzeinbruch, die über das (n-1)-Kriterium hinausgehen, (VDN-5-Stufenplan) [135], [189]:
  - Stufe 1 bei 49,8 Hz:  
Alarmierung des Personals, Mobilisierung von noch nicht eingesetzten Kraftwerkskapazitäten (auf Anweisung des Übertragungsnetzbetreibers).
  - Stufe 2 bei 49 Hz:  
Unverzögerter Lastabwurf von 10 bis 15 % der Netzlast
  - Stufe 3 bei 48,7 Hz:  
Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 10 bis 15 % der Netzlast
  - Stufe 4 bei 48,4 Hz:  
Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 15 bis 20 % der Netzlast
  - Stufe 5 bei 47,5 Hz:  
Abtrennen aller Kraftwerke vom Verbundnetz und Übergang auf Eigenbedarfsdeckung

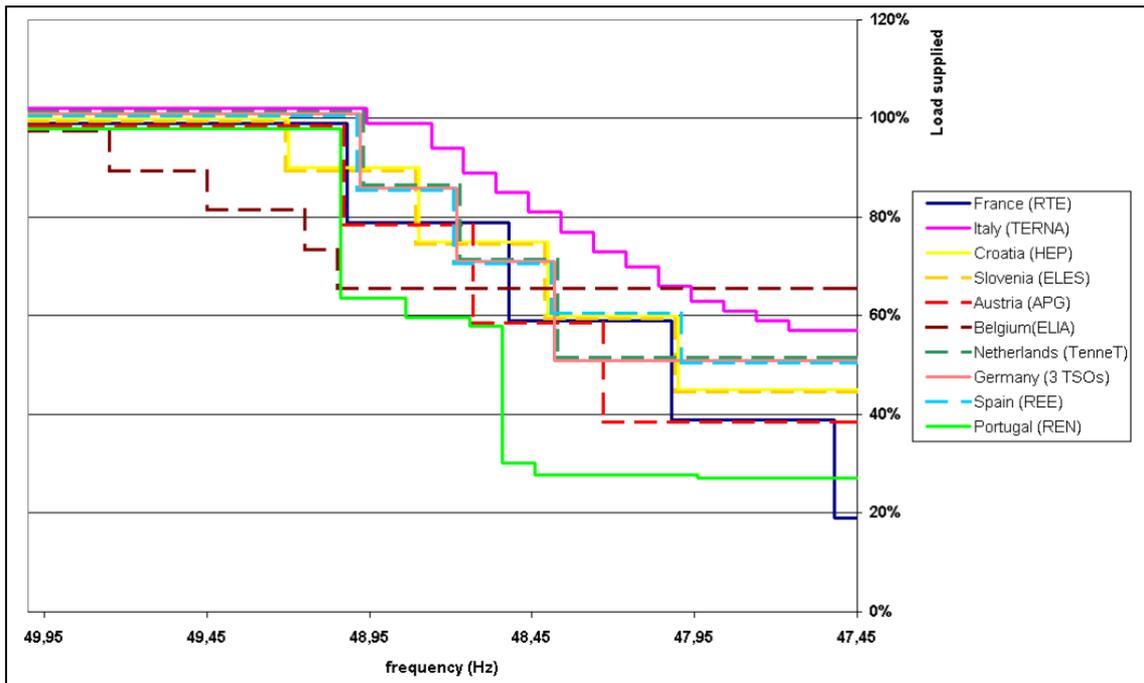
Dieser 5-Stufenplan gilt in dieser Weise in Deutschland, andere Länder gehen mit davon abweichenden Stufen (d. h. Abwurf von teilweise unterschiedlichen Anteilen und bei anderen Frequenzen, siehe Teil A, Abschnitt 1.1.2).

- Vorkehrungen zum automatischen spannungsabhängigen Lastabwurf durch Unterspannungsauslösung von Schutzrelais zur Vermeidung eines Spannungskollapses und zum Schutz von technischen Einrichtungen.
- Netzwiederaufbaukonzept in jeder Regelzone, Planungen zu den von den jeweiligen Partnern im Verbundnetz durchzuführenden Maßnahmen zum Netzwiederaufbau nach einem Netzausfall, dahingehendes Training des Personals.
- Schriftliche Vereinbarungen zwischen benachbarten Übertragungsnetzbetreibern zum Vorgehen und zur Koordination bei Störungen.
- Vorhalten von ausreichend schwarzstartfähigen Erzeugungseinheiten in jeder Regelzone für einen Netzwiederaufbau (z. B. schwarzstartfähige Wasser- und Gasturbinenkraftwerke).
- Anweisung an die Lastverteiler, dass beim Netzaufbau die Eigenbedarfsversorgung der Kernkraftwerke bevorzugt sichergestellt werden soll. Dabei stehen für je-

des deutsche Kernkraftwerk eines oder auch mehrere schwarzstartfähige konventionelle Kraftwerke zur Verfügung, die bei einem großflächigen Netzausfall über so genannte „Punkt-zu-Punkt-Schaltungen“ die Kernkraftwerke bevorzugt, aber spätestens nach 2 Stunden wieder mit Strom versorgen sollen. Hierfür werden in vielen Fällen schwarzstartfähige Wasserkraftwerke wie beispielsweise das Koepchenwerk (für KKE), das Pumpspeicherkraftwerk in Vianden (für Biblis-A und -B), das Pumpspeicherkraftwerk in Forbach (für KKP-1 und -2) oder das Laufwasserkraftwerk in Niederaichbach (für KKI-1), aber auch schwarzstartfähige Gaskraftwerke wie die Gasturbine in Walheim (für GKN-1 und -2) herangezogen.

### **1.2.2 Unterschiede bei den einzelnen europäischen Netzbetreibern**

Die Maßnahmen zur Stabilisierung des europäischen Verbundnetzes sind in Europa zwar denselben übergeordneten Regelungen unterworfen, im Detail aber nicht einheitlich festgelegt. Beispielsweise der automatische frequenzabhängige Lastabwurf erfolgt in den Gebieten der einzelnen Netzbetreiber nicht gleich. Die Richtlinien der ENTSO-E schreiben einen stufenweisen frequenzabhängigen Lastabwurf vor, der bei 49 Hz beginnen und bei 48 Hz mindestens 50 % der Verbraucherlast umfassen muss. [190] In der Umsetzung in den einzelnen Ländern unterscheiden sich aber die Anzahl der Stufen für den Lastabwurf, der Prozentsatz der Verbraucher, die bei den einzelnen Stufen abgeworfen werden sowie die Frequenzen, bei denen der Abwurf erfolgt (siehe Abb. 1.2).



**Abb. 1.2** Automatischer Lastabwurf bei Unterfrequenz bei den einzelnen Netzbetreibern im europäischen Verbundnetz [134]

## **2 Mögliche Ursachen für Netzstörungen und Netzausfälle**

Zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit ist ein stabiler Netzbetrieb ausschlaggebend. Das Übertragungsnetz muss nicht nur in der Lage sein, die ständig auftretenden Schwankungen von Last und Erzeugerleistung auszugleichen, sondern auch unvorhergesehene Fehler wie beispielsweise Kurzschlüsse in Übertragungsleitungen, Kraftwerksausfälle, Topologieänderungen durch Isolation von Fehlern und kaskadierende Ausfälle zu beherrschen.

Die Netzsicherheit ist insbesondere gefährdet wenn beispielsweise Betriebsmittel überlastet sind, Spannungsgrenzwerte nicht eingehalten werden oder das (n-1)-Kriterium nicht mehr erfüllt ist.

### **2.1 Spannungs- und Frequenzänderungen**

Grundsätzlich werden in einem Hoch- oder Höchstspannungsnetz sowohl die Netzfrequenz als auch die Netzspannung geregelt. Dabei ist eine ausgeglichene Wirkleistungsbilanz für eine stabile Netzfrequenz wichtig, während eine lokal ausgeglichene Blindleistungsbilanz eine Voraussetzung für eine stabile Netzspannung ist. Eine zu geringe Wirkleistung führt zu einem Absinken der Netzfrequenz. Andererseits führt eine zu geringe Bereitstellung von Blindleistung zu einem Spannungsabfall im Netz. Umgekehrt führt eine zu hohe Wirkleistung im Netz zu einer steigenden Netzfrequenz und eine zu hohe Bereitstellung von Blindleistung zu einem Spannungsanstieg im Netz.

### **2.2 Frequenzschwankungen**

Ein Verlust der Frequenzstabilität tritt dann auf, wenn das Übertragungsnetz nach dem Auftreten einer Störung, die zu einem starken Ungleichgewicht zwischen Erzeugerleistung und Verbraucherlast führt (z. B. Aufspaltung des Verbundnetzes in Inseln), nicht mehr in der Lage ist, zu einem stabilen Betriebspunkt zurückzukehren. Dies kann dann anhaltende Schwingungen der Netzfrequenz mit automatischen Abschaltungen von Erzeugungseinheiten oder Verbraucherlast nach sich ziehen.

### **2.3 Spannungskollaps**

Ein Spannungskollaps beginnt in der Regel mit einer Überlastung von Übertragungsleitungen und mit nicht verfügbaren Kraftwerken in der Nähe von Verbraucherschwerpunkten. Tritt in dieser Situation eine Störung wie beispielsweise ein Kraftwerks- oder Leitungsausfall auf, der zu einer Verschiebung des Lastflusses führt, entsteht ein Defizit an Blindleistung im stark belasteten Netz und die Spannung an Verbraucherschwerpunkten sinkt ab. Mehrere Effekte tragen anschließend dazu bei, dass es in der Folge zu einem weiteren Absinken der Spannung und schließlich zum Verlust der Spannungsstabilität kommen kann. Zu diesen Effekten zählen beispielsweise der verstärkte Entzug von Blindleistung aus dem übergeordneten Netz durch die Spannungsregelung der Transformatoren zu unterlagerten Netzebenen oder die aufgrund der sinkenden Spannung geringere Bereitstellung von Blindleistung aus Kompensationsanlagen.

### **2.4 Verlust der transienten Stabilität**

Transiente Stabilität bezeichnet die Fähigkeit von synchron betriebenen Erzeugungseinheiten eines Verbundnetzes, auch nach einem Kurzschluss im Netz noch synchron zueinander zu arbeiten. Werden nach Klärung des Fehlers im Netz durch den Netzschutz einzelne oder mehrere Erzeugungseinheiten asynchron gegenüber dem Verbundnetz, liegt keine transiente Stabilität mehr vor. Dies kann das Verbundnetz durch große Frequenz- und Spannungsänderungen sowie durch hohe Ausgleichsströme zwischen dem Verbundnetz und den asynchron laufenden Erzeugungseinheiten erheblich beeinträchtigen. [189] Eine mögliche Folge kann ein Spannungskollaps sein. [188]

### **3 Netzausfälle in Jahren 2003 bis 2012**

In den Jahren 2003 bis 2012 trat eine Vielzahl von Stromausfällen auf, teilweise langandauernd, großflächig oder mit einer hohen Zahl an betroffenen Verbrauchern<sup>1</sup>. Eine ausführliche Übersicht über Stromausfälle ab 100 000 betroffenen Personen bzw. 50 000 betroffenen Verbrauchern ist im Anhang gegeben. Von den dort aufgeführten Stromausfällen werden im Folgenden einige beispielhaft beschrieben. Ausgewählt wurden Netzausfälle und Netzstörungen mit möglichst repräsentativen Ursachen und Abläufen sowie hinsichtlich ihrer Dimension herausragende Netzausfälle und Netzstörungen.

#### **3.1 Netzausfall in den USA/Kanada, 2003**

##### **3.1.1 Ablauf**

Am 14.08.2003 erlebten große Teile des mittleren Westens und des Nordostens der USA und die Region Ontario in Kanada einen Ausfall des Stromversorgungsnetzes. Von diesem Versorgungsausfall waren ca. 50 Millionen Menschen betroffen. 61 800 MW elektrische Leistung fielen in den Bundesstaaten Ohio, Michigan, Pennsylvania, New York, Vermont, Massachusetts, Connecticut, New Jersey und im kanadischen Ontario aus (siehe Abb. 3.1).

---

<sup>1</sup> Die Zahl der Verbraucher bezieht sich meist auf die Zahl der vom Stromausfall betroffenen Stromzähler und nicht auf die Zahl der vom Stromausfall betroffenen Personen. Da pro Haushalt üblicherweise ein Stromzähler vorhanden ist, kann die Zahl der Verbraucher in den meisten Fällen mit der Zahl der betroffenen Haushalte (z. B. Einzelpersonen, Familien, Bürogebäude, Industriegebäude) gleichgesetzt werden. Die Zahl der betroffenen Personen ist zumeist eine Schätzung, die aus der Zahl der Verbraucher ermittelt wird.



**Abb. 3.1** Vom Netzausfall am 14.08.2003 komplett oder teilweise betroffene Gebiete der USA (hellrot) und Kanadas (dunkelrot). In hellem bzw. dunklem Grau dargestellt sind die Bundesstaaten der USA bzw. Provinzen Kanadas, die über das östliche, westliche oder texanische bzw. Québec-Teilnetz versorgt werden (Teilnetz-Grenzen sind schwarz gekennzeichnet).

Der Versorgungsausfall am 14.08.2003 begann gegen 16.00 Uhr Ortszeit (EDT). Die Stromversorgung konnte in einigen Bereichen der USA erst nach vier Tagen, in Ontario zum Teil erst nach einer Woche wieder hergestellt werden. [1]

Das nordamerikanische Stromnetz besteht aus zwei großen Teilnetzen, dem westlichen und dem östlichen Teilnetz (siehe Abb. 3.1). Darüber hinaus gibt es noch drei kleinere Teilnetze, das texanische Teilnetz sowie die Teilnetze von Alaska und Québec. Die Teilnetze sind nur relativ schwach vermascht, d. h. es gibt relativ wenige Verbindungen zwischen den Teilnetzen. Die Stützung eines Teilnetzes im Falle von Netzinstabilitäten durch ein benachbartes Teilnetz ist somit erschwert. Von dem Versorgungsausfall am 14.08.2003 war der Norden des östlichen Teilnetzes betroffen. Das östliche Teilnetz wird von mehreren regionalen Netzbetreibern betrieben. Jeder regionale Netzbetreiber hat eine Netzüberwachungszentrale, die die Stabilität des regionalen Netzes steuert und überwacht.

Der Ausfall der Stromversorgung am 14.08.2003 wurde durch fehlerhafte Personalhandlungen, Softwarefehler in den Netzüberwachungseinrichtungen, das Ausbleiben von Maßnahmen zur Stabilisierung des Netzes und Kurzschlüsse an Hochspannungsleitungen durch Baumkontakt ausgelöst. [1], [9]

Die Netzstörung begann im Bundesstaat Ohio. Aufgrund von hoher Last, mehrerer Leitungsausfälle und durch die Abschaltung eines Kohlekraftwerks (Eastlake-5) um 13.31 Uhr traten hier erste Netzinstabilitäten auf. Das Kohlekraftwerk Eastlake ist eine der Hauptquellen für die Bereitstellung von Blindleistung im Raum Cleveland, allerdings wurden trotz der nach dem Ausfall des Blocks 5 auftretenden Spannungsabfälle keine Maßnahmen unternommen, um den Blindleistungsbedarf anderweitig zu decken. Obwohl der Ausfall von Eastlake-5 den weiteren Verlauf der Netzstörung begünstigte, war er nicht der Auslöser für den späteren Netzausfall.

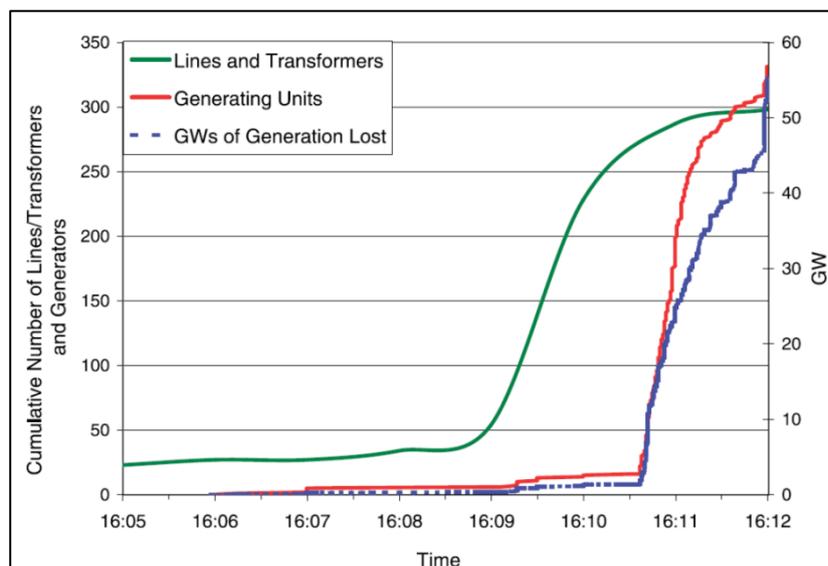
Die Netzüberwachungseinrichtung der für diesen Netzbereich zuständigen regionalen Netzüberwachungszentrale war durch eine fehlerhafte Personalhandlung bereits seit 12.15 Uhr nicht verfügbar. Das Personal bemerkte die Unverfügbarkeit der Netzüberwachungseinrichtung nicht und konnte die Netzinstabilitäten nicht feststellen. Kurze Zeit später (14.02 Uhr) trat durch Baumkontakt ein Kurzschluss an einer 345-kV-Höchstspannungsleitung auf, die dadurch ausfiel. Hierdurch wurden die Netzinstabilitäten verstärkt und weiteten sich räumlich aus. Die Verschlechterung der Netzstabilität wurde in der Netzüberwachungszentrale nicht bemerkt und es wurden keine Gegenmaßnahmen ergriffen. Bei einer anderen regionalen Netzüberwachungszentrale traten kurz darauf (14.14 Uhr) Fehler in der Alarmsoftware und der Ausfall sowohl des Zentralrechners als auch der Backup-Einheit des Zentralrechners auf, so dass auch in dieser Netzüberwachungszentrale die sich ausweitende Netzinstabilität nur unzureichend erkannt wurde und keine angemessenen Gegenmaßnahmen ergriffen wurden. [1], [26]

Im weiteren Verlauf (15.05 Uhr bis 15.42 Uhr) fielen weitere drei 345-kV-Höchstspannungsleitungen aufgrund von Überlast und Baumkontakt aus. Als Gründe für den Baumkontakt werden eine unzureichende Beschneidung der Bäume an den Leitungstrassen sowie die Überlast selbst angegeben, da die Leitungen bei Überlast durch die Erhitzung stärker durchhängen. Mit jeder ausfallenden Übertragungsleitung nahm die Last auf den verbleibenden Leitungen zu. Durch den Ausfall der wichtigen 345-kV-Höchstspannungsleitungen verlagerte sich der Lastfluss auf die unterlagerten 138-kV-Hochspannungsleitungen. Hierdurch kam es zur Überlastung und folglich zur Abschaltung einer Vielzahl weiterer Hochspannungsleitungen. Aufgrund der Überlast

und der absinkenden Spannung fielen zwischen 15.39 Uhr und 16.09 Uhr insgesamt sechzehn 138-kV-Hochspannungsleitungen aus. Eine rechtzeitige gezielte Abschaltung von Hochspannungsleitungen und ihren Verbrauchern, um die Lastaufnahmen zu verringern und so das verbleibende Netz zu stabilisieren, nahm das Personal der Netzüberwachungszentralen nicht rechtzeitig vor. [1], [26]

Aufgrund des kaskadierenden Ausfalls des Hochspannungsnetzes in Ohio fiel um 16.05 Uhr die verbleibende 345-kV-Höchstspannungsleitung zur Versorgung des Raums Cleveland wegen Überlast aus. Dieser Ausfall führte zu einem nicht mehr kontrollierbaren, kaskadierenden Ausfall des Netzes mit Auswirkungen in acht US-Bundesstaaten und Teilen Kanadas. Binnen 7 Minuten fielen reihenweise Hoch- und Höchstspannungsleitungen wegen Überlast aus. Um 16.13 Uhr waren insgesamt 508 Kraftwerksblöcke an 265 Standorten nicht mehr verfügbar. [26]

Der kaskadierende Ausfall von Leitungen und Blöcken ist in Abb. 3.2 dargestellt. Abb. 3.1 zeigt das betroffene Gebiet.



**Abb. 3.2** Ausfall von Leitungen und Transformatoren (grün) und von Kraftwerksblöcken (rot), sowie Ausfall von Leistung in GW (blau). Der relativ langsame, auf Ohio beschränkte Verlauf der Störung bis 16.05 Uhr mündet in einen schnellen, kaskadierenden Ausfall von Kraftwerken und Netzen im Nordosten der USA und im östlichen Kanada. [26]

In den meisten Bereichen in Ontario und New York war die Stromversorgung nach 24 Stunden wieder hergestellt, in den westlichen Landesteilen von Ohio und Michigan dauerte der Wiederaufbau des Netzes bis zu 48 Stunden, teilweise sogar bis zu 1 Woche. [27]

### 3.1.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

Im Zusammenhang mit dem Ausfall der Stromversorgung am 14.08.2003 wurden 9 US-amerikanische und 7 kanadische Kernkraftwerke aufgrund des Netzausfalls aus Vollast schnellabgeschaltet [1], [26], [192]:

- Perry-1 (Ohio), 16.10 Uhr
- Fermi-2 (Michigan), 16.10 Uhr
- Indian Point-2 und Indian Point-3 (New York), 16.11 Uhr und 16.25 Uhr
- Oyster Creek (New Jersey), 16.11 Uhr
- Nine Mile Point-1 und Nine Mile Point-2 (New York), 16.11 Uhr
- FitzPatrick (New York), 16.11 Uhr
- Ginna-1 (New York), 16.11 Uhr
- Bruce B (Ontario), keine Angabe zur Uhrzeit
- Pickering A und B (Ontario), Blöcke 5, 6 und 8 aus Leistungsbetrieb, zusätzlich die Blöcke 4 und 7 aus Anfahrbetrieb, 16.10 Uhr
- Darlington (Ontario), Blöcke 1, 2 und 4, Trennung vom Netz 16.12 Uhr, RESA später: 16.24 Uhr bzw. 16.28 Uhr

Vier weitere kanadische Kernkraftwerke (drei Blöcke in der Anlage Bruce B sowie ein Block in Darlington) wurden vom Netz getrennt, konnten aber durch Lastabwurf mit reduzierter Leistung weiter betrieben werden (60 % Vollast, Auslegung der CANDU Reaktoren in Bruce B und in Darlington sieht den Weiterbetrieb bei 60 % im Notstromfall vor). Nur diese vier Kernkraftwerke konnten im Gegensatz zu den betroffenen US-amerikanischen und den meisten der abgeschalteten kanadischen Kernkraftwerke bei einer Trennung vom Netz auf Eigenbedarf abgefahren werden. Ein Betrieb der Notstromdieselgeneratoren war bei diesen Kernkraftwerken somit nicht notwendig. Als das Netz wieder hergestellt war, konnten diese Kernkraftwerke direkt wieder ins Netz einspeisen. Weitere sechs US-amerikanische und ein kanadisches Kernkraftwerk erlitten erhebliche elektrische Störungen durch den großräumigen Netzausfall, konnten aber weiter Strom produzieren. [1], [26]

Die Dauer des Notstromfalls am 14.08.2003 (und ggf. 15.08.2003) unterscheidet sich in den einzelnen Anlagen. Für die kanadischen Anlagen wird die Dauer des externen Stromausfalls mit 3 bis 9 Stunden angegeben. In den US-amerikanischen Kraftwerken dauerte es 4 bis 14 Stunden, bis mindestens eine Notstromschiene wieder vom externen Netz versorgt werden konnte. Aus einer IRS-Meldung der Anlage Pickering geht beispielsweise auch hervor, dass der Zeitraum bis zur Wiederherstellung der Stromversorgung in den Blöcken mit 5-7 Stunden deutlich über dem in der Auslegung vorgesehenen Zeitraum von 60 Minuten liegt. [1], [195]

In den vom Verlust der externen Stromversorgung betroffenen, schnellabgeschalteten Anlagen wurde die Notstromversorgung durch Dieselgeneratoren aufrechterhalten. Während und nach der Störung kam es dabei teilweise zu Abweichungen. In einem Block konnte ein Notstromdiesel erst nach einem manuellen Eingriff einspeisen, da er zum Zeitpunkt der Störung gerade im Prüfungsbetrieb lief. In den beiden betroffenen Blöcken der Anlage Indian Point funktionierte jeweils der Notstromdiesel des technischen Supportcenters nicht und es fielen auch Teile der unterbrechungsfreien Gleichstromversorgung aus. Indian Point-2 und -3 verfügen jeweils über 3 Notstromdieselgeneratoren und zusätzlich über kleinere Diesel für die Technischen Supportcenter. Der Dieselgenerator des Technischen Supportcenters von Block 2 fiel nach Erkenntnissen der NRC aufgrund zu großer Last aus. Dieser Zustand wurde bereits im Jahr 2000 entdeckt, aber nicht zeitnah beseitigt. Der Dieselgenerator des Technischen Supportcenters von Block 3 hatte bereits bei einer Prüfung im April 2003 versagt, danach wurden keine adäquaten Funktionstests mehr durchgeführt. Am 14.08.2003 lief er zwar an, fiel aber während der Zuschaltung der Verbraucher aus. Die Technischen Support Center der Blöcke 2 und 3 wurden daraufhin zusammengelegt. Da zur Versorgung einiger Systeme des Technischen Supports nur Batterien zur Verfügung standen, wurden nicht dringend benötigte Systeme zur Minimierung der Last außer Betrieb genommen. Dazu gehörten auch Computersysteme wie Prozessrechner, das Emergency Data Display System oder das Radiation Monitoring System von Block 2. Die jeweils drei Notstromdieselgeneratoren für die Versorgung der Notstromschienen der Blöcke 2 und 3 von Indian Point starteten auslegungsgemäß und speisten ein. Allerdings gab es bei Block 2 ein Leck an der Kühlwasserversorgung eines Diesels, was aber nicht zur Abschaltung des Diesels führte. In Block 3 schaltete sich aufgrund zu niedrigen Füllstands im Ölbehälter einer der Diesel um 23.40 Uhr ab. In einer weiteren Anlage speisten die Diesel während der Dauer des Notstromfalls auslegungsgemäß ein, beim Wiederan-

fahren einige Tage später wurden aber Probleme an einem der Dieselgeneratoren festgestellt. [1], [15], [26], [193], [194]

Insgesamt reagierten die US-amerikanischen und die kanadischen Kernkraftwerke auf die Netzstörungen auslegungsgemäß. Die Netzstörung verursachte die Anregung des Blockschutzes, z. B. durch Erreichen von Schutzkriterien der Generatoren und Turbinen. Dadurch wurden Reaktorschutzmaßnahmen ausgelöst. Die betroffenen Kernkraftwerke haben den Stromausfall nicht ausgelöst und abgesehen von deren planmäßiger Abschaltung auch nicht zu einer Verbreitung des Stromausfalls beigetragen. [1], [10]

Die vier kanadischen Kernkraftwerke, die nach Trennung vom Netz mit reduzierter Leistung weiterbetrieben wurden, konnten nach Spannungsrückkehr etwa sechs Stunden nach Auftreten des Netzausfalls wieder ins Netz einspeisen. Sechs US-amerikanische und drei kanadische Kernkraftwerke konnten im Zeitraum von etwa einem Tag, vom 17.-18.08.03 wieder auf das Netz aufgeschaltet werden. Im Zeitraum von fünf Tagen, vom 20.-25.08.03 erfolgte die Rückschaltung der übrigen abgeschalteten Kernkraftwerke. In einer US-amerikanischen Anlage mussten aufgrund von beschädigten Kabelverbindungen zunächst Reparaturen vorgenommen werden. Alle betroffenen Kernkraftwerke konnten bis zur Rückschaltung auf das Netz nach 1 – 11 Tagen in einen sicheren Zustand überführt und in diesem gehalten werden. [1], [26] Eine Übersicht über das Verhalten der US-amerikanischen und kanadischen Kernkraftwerke bei der Netzstörung am 14.08.2003 ist in nachfolgender Tabelle gegeben.

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Perry-1 (Ohio), SWR	Abschaltung Generator wegen Unterfrequenz	RESA	ja	ja (funktionierten auslegungsgemäß)	15.08.2003, 19:52 Uhr (eine Notstromschiene bereits 18:13 Uhr)	21.08.2003
Fermi-2 (Michigan), SWR	Ansprechen Generatorschutz, Abschaltung des Generators aufgrund von Spannungs- und Frequenzschwankungen	RESA	ja	ja, alle vier starteten und speisten ein	15.08.2003, 13:48 Uhr (eine Notstromschiene bereits 1:53 Uhr)	20.08.2003
Indian Point-2 (New York), DWR	Unterfrequenz im Netz führt zur Abschaltung der Hauptkühlmittelpumpen	RESA	ja	ja, alle drei starteten und speisten ein; Schwierigkeiten in der Notstromversorgung: - Leck am Komponentenkühlwasser eines Diesels, Diesel läuft und speist ein - Diesel für das Technical Support Center funktioniert nicht - unterbrechungslose Versorgung für Kommunikation und Dokumentation in mehreren Fällen nicht verfügbar	15.08.2003, 2:10 Uhr (eine Notstromschiene bereits am 14.08.03, 20:02 Uhr)	17.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Indian Point-2 (New York), DWR	Unterfrequenz im Netz führt zur Abschaltung der Hauptkühlmittelpumpen	RESA	ja	ja, alle drei starteten und speisten ein; Schwierigkeiten in der Notstromversorgung: - Leck am Komponenten-kühlwasser eines Diesels, Diesel läuft und speist ein - Diesel für das Technical Support Center funktioniert nicht - unterbrechungslose Versorgung für Kommunikation und Dokumentation in mehreren Fällen nicht verfügbar	15.08.2003, 2:10 Uhr (eine Notstromschiene bereits am 14.08.2003, 20:02 Uhr)	17.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Indian Point-3 (New York), DWR	Unterfrequenz im Netz führt zur Abschaltung der Hauptkühlmittelpumpen	RESA	ja	ja, alle drei starteten und speisten ein; Schwierigkeiten in der Notstromversorgung: – einer der drei Diesel wurde um 23.40 Uhr un verfügbar wegen zu niedrigem Füllstand im Ölbehälter – Diesel für das Technical Support Center funktioniert nicht – unterbrechungslose Versorgung für Kommunikation und Dokumentation in mehreren Fällen nicht verfügbar	15.08.2003, 2:10 Uhr (eine Notstromschiene bereits am 14.08.03, 20:12 Uhr)	22.08.2003 (Reparaturarbeiten vor Wiederanfahren)
Oyster Creek (New Jersey), SWR	Ansprechen Generatorschutz, Abschaltung Generator aufgrund von Spannungs- u. Frequenzschwankungen	RESA	nein	nein	keine Angaben	17.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Nine Mile Point-1 (New York), SWR	Ansprechen des Turbinenschutzes wegen Überfrequenz, TUSA	RESA	ja	ja (funktionierten ordnungsgemäß)	15.08.2003, 1:23 Uhr (eine Notstromschiene bereits am 14.08.2003, 23:39 Uhr)	18.08.2003
Nine Mile Point-2 (New York), SWR	Ansprechen des Turbinenschutzes wegen Überfrequenz	RESA	ja	ja (funktionierten ordnungsgemäß)	15.08.2003, 1:33 Uhr	17.08.2003
FitzPatrick (New York), SWR	Ansprechen des Turbinenschutzes wegen Überfrequenz	RESA	ja	ja (funktionierten ordnungsgemäß)	15.08.2003, 0:39 Uhr (eine Notstromschiene am 14.08.2003, 23:07 Uhr)	18.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Ginna-1 (New York), DWR	Ansprechen des Turbinenschutzes wg. Überfrequenz	RESA	nein (externes Netz instabil, stabil nach ca. 50 min)	ja (Personal schaltete die Notstromschienen manuell auf Versorgung durch die Diesel, da sie das externe Netz als instabil einstufen)	14.08.2003, 21:08 Uhr für mindestens eine Notstromschiene	17.08.2003
Palisades-1 (Michigan), DWR	Spannungseinbruch auf den Notstromschienen führt zum Start der Diesel	keine RESA, Einspeisung ins Netz	nein	Diesel gestartet, speisen aber nicht ein		
Davis Besse-1 (Ohio), DWR		Anlage unterkritisch kalt	ja	ja	15.08.2003, 19:40 Uhr	
Pickering A-4 (Ontario), CANDU, 515 MW		RESA aus Anfahrbetrieb, zu geringer Kühlmitteldurchfluss aufgrund Pumpenausfall nach Eintreten des Notstromfalls	ja	ja	nach 9 Stunden	20.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Pickering B-5 (Ontario), CANDU, 515 MW	Spannungsschwankungen führen letztlich zur Abschaltung des Generators; Frequenzschwankungen führen zur Abschaltung des Systemtransformators, über den die Notstromschienen bei nicht verfügbarem Generator noch versorgt werden können	RESA aufgrund zu geringem Durchfluss im primären Wärmeabfuhrsystem nach Eintreten des Notstromfalles	ja	ja	keine Angaben	23.08.2003
Pickering B-6 (Ontario), CANDU, 515 MW	Spannungsschwankungen führen letztlich zur Abschaltung des Generators; Frequenzschwankungen führen zur Abschaltung des Systemtransformators, über den die Notstromschienen bei nicht verfügbarem Generator noch versorgt werden können	RESA aufgrund zu geringem Durchfluss im primären Wärmeabfuhrsystem nach Eintreten des Notstromfalles	ja	ja	keine Angaben	25.08.2003
Pickering B-7 (Ontario), CANDU, 515 MW		Hand-RESA aus Anfahrbetrieb aufgrund der Netzstörung	ja	ja	keine Angaben	29.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Pickering B-7 (Ontario), CANDU, 515 MW		Hand-RESA aus Anfahrbetrieb aufgrund der Netzstörung	ja	ja	keine Angaben	29.08.2003
Pickering B-8 (Ontario), CANDU, 515 MW	Lastabwurf auf 2 %	RESA durch zu geringen Sekundärdruck	ja	ja	keine Angaben	22.08.2003
Bruce B-5 (Ontario), CANDU, 840 MW	Trennung des Generators vom Netz aufgrund der Frequenzschwankungen	Leistungsreduktion auf 60 % Vollast	ja		nach 3 Stunden	14.08.2003 (nach 6 h)
Bruce B-6 (Ontario), CANDU, 840 MW	Trennung des Generators vom Netz aufgrund der Frequenzschwankungen	Leistungsreduktion auf 60 % Vollast, kurz darauf RESA über Neutronenfluss	ja		nach 3 Stunden	23.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Bruce B-7 (Ontario), CANDU, 840 MW	Trennung des Generators vom Netz aufgrund der Frequenzschwankungen	Leistungsreduktion auf 60 % Volllast	ja		nach 3 Stunden	14.08.2003 (nach 6 h)
Bruce B-8 (Ontario), CANDU, 840 MW	Trennung des Generators vom Netz aufgrund der Frequenzschwankungen	Leistungsreduktion auf 60 % Volllast	ja		nach 3 Stunden	14.08.2003 (nach 6 h)
Darlington-1 (Ontario), CANDU, 880 MW	Manuelle Abschaltung der Turbine aufgrund Frequenzschwankungen nach manueller RESA	Automatische Leistungsreduktion auf 60 % Volllast, Durchführung der Prozedur zur Bestätigung durch den Schichtleiter aufgrund Zeitknappheit nicht rechtzeitig beendet, daher manuelle RESA und danach manuelle TUSA	ja		keine Angaben	18.08.2003

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen der Störung auf die Anlage	RESA / Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung	Erneute Einspeisung ins Netz
Darlington-2 (Ontario), CANDU, 880 MW		Automatische Leistungsreduktion auf 60 % Volllast, Durchführung der Prozedur zur Bestätigung durch den Schichtleiter aufgrund Zeitknappheit nicht rechtzeitig beendet, daher manuelle TUSA und dadurch RESA	ja		keine Angaben	17.08.2003
Darlington-3 (Ontario), CANDU, 880 MW		Automatische Leistungsreduktion auf 59 % Volllast	ja		keine Angaben	14.08.2003 (nach 6 h)
Darlington-4 (Ontario), CANDU, 880 MW		Lastabwurf und nachfolgend manuelle RESA und TUSA	ja		keine Angaben	18.08.2003
Point Lepreau (New Brunswick), CANDU, 680 MW		Frequenzschwankungen führen zu Senkung der Generatorleistung um 140 MW, Reaktorleistung bleibt konstant; nach 25 Minuten Generatorleistung wieder angehoben	nein			

**Tab. 3.1** Verhalten US-amerikanischer und kanadischer Kernkraftwerke bei Netzstörung am 14.08.2003 (Fortsetzung)

## 3.2 Netzausfall in Großbritannien, 2003

### 3.2.1 Ablauf

Am 28.08.2003 trat im Süden des Großraums London sowie in Teilen von Kent ein großflächiger Ausfall des Stromversorgungsnetzes auf (siehe Abb. 3.3).



**Abb. 3.3** Vom Netzausfall am 28.08.2003 zumindest teilweise betroffene Regionen Großbritanniens (rot)

Die Stromversorgung von ca. 400 000 Menschen wurde für ca. 30 Minuten unterbrochen. Die elektrische Energieversorgung von Teilen der Londoner U-Bahn fiel ebenfalls aus. Der Versorgungsausfall wurde durch das Zusammentreffen eines technischen Fehlers mit einer fehlerhaften technischen Installation während der Durchführung von Wartungsarbeiten und durch eine unzureichende Planung der Wartungsarbeiten ausgelöst. [12]

Der Süden Londons ist über vier Hauptversorgungsleitungen an das Stromnetz angebunden. Am 28.08.2003 waren zwei dieser Leitungen wegen planmäßiger Wartungs-

arbeiten außer Betrieb. Hierbei handelte es sich um eine übliche Vorgehensweise des Energieversorgungsunternehmens. Wartungsarbeiten an der elektrischen Energieversorgung werden in Großbritannien bevorzugt in den Sommer gelegt, da dann ein niedrigerer Energiebedarf herrscht. [2]

Während der Wartungsarbeiten musste eine der verbleibenden beiden Hauptversorgungsleitungen für die Stromversorgung des Londoner Südens aufgrund einer Fehlermeldung außerplanmäßig abgeschaltet werden: Um 18.11 Uhr hatte der Buchholzschutz eines Transformators in einem Umspannwerk angesprochen, um 18.20 Uhr wurde mit der Freischaltung des Transformators begonnen. Die Stromversorgung des Londoner Südens war durch die Freischaltmaßnahmen zeitweise von nur einer Hauptversorgungsleitung abhängig. Diese fiel nachfolgend aufgrund einer fehldimensionierten Schutzeinrichtung ebenfalls aus. Zwei Jahre vor dem Netzausfall war ein Schutzrelais mit fehlerhaftem Ansprechwert in dieser Leitung installiert worden. Dieser Fehler wurde seit der Installation vor zwei Jahren nicht bemerkt. Als die Leitung als letzte Versorgungsleitung in Betrieb voll belastet wurde, sprach das fehl dimensionierte Schutzrelais an und veranlasste die Leitungsabschaltung. Die Belastung der betreffenden Versorgungsleitung lag jedoch noch innerhalb der spezifizierten Grenzen. [2]

Die fehlerhafte Installation der Schutzeinrichtung ist letztendlich auf eine fehlerhafte Personalhandlung zurückzuführen. Eine unzureichende Planung der Wartungsarbeiten hat ebenfalls zum Versorgungsausfall beigetragen.

Um 18.57 Uhr war die Versorgung der Verbraucher wieder hergestellt. [2]

### **3.2.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Der Netzausfall fand im Süden des Großraums London statt. Angaben zu Auswirkungen auf die nationalen Kernkraftwerke wurden vom britischen Betreiber des Versorgungsnetzes nicht gemacht. Die britischen Kernkraftwerke liegen nicht im vom Stromausfall betroffenen Bereich. Die der GRS derzeit vorliegenden Informationen enthalten keine Angaben zu Instabilitäten im nicht vom Netzausfall betroffenen Teil des britischen Stromversorgungsnetzes und zu Auswirkungen auf die britischen Kernkraftwerke.

### **3.3 Netzausfall in Dänemark und Schweden, 2003**

#### **3.3.1 Ablauf**

Am 23.09.2003 kam es im dänischen Seeland, in Lolland, auf der Insel Bornholm und Teilen Südschwedens zu einem großflächigen Ausfall der Stromversorgung. Insgesamt waren ca. 4 Millionen Menschen vom Stromausfall betroffen. Etwa 7 Stunden später war die Stromversorgung wieder vollständig hergestellt. Der Versorgungsausfall wurde durch das nahezu gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger technischer Probleme verursacht. [3], [4], [13]

Das schwedische Stromnetz ist über ein Seekabel mit dem dänischen Netz verbunden. Durch den engen Verbund der schwedischen und dänischen Stromnetze breitete sich eine durch einen Fehler im schwedischen Netz verursachte Störung vom schwedischen Netz auf das dänische Netz aus. [3], [4]

Vor dem Netzausfall herrschten im schwedischen und im dänischen Stromnetz normale Betriebsbedingungen. In den betreffenden Teilen Südschwedens und Dänemarks wurden ca. 6.600 MW elektrische Leistung gefordert. In Südschweden wurde eine vergleichsweise geringe Menge Strom erzeugt. Etwa 400 MW wurden aus Ostdänemark nach Südschweden importiert. [3], [4], [27]

Aufgrund eines internen technischen Fehlers wurde das schwedische Kernkraftwerk Oskarshamn-3 abgeschaltet. Damit fiel die Bereitstellung von 1200 MW elektrischer Leistung aus. Der plötzliche Ausfall eines Kraftwerks ist ein üblicher Vorgang, der normalerweise durch die Kapazitäten des schwedischen und dänischen Versorgungsnetzes aufgefangen werden kann. Zur Kompensation der weggefallenen elektrischen Leistung wurde die bereitgestellte Leistung der umliegenden Kraftwerke erhöht. Bis ein Ausfall dieser Größenordnung kompensiert ist, vergehen jedoch ca. 15 Minuten. Nur 5 Minuten nach der Abschaltung von Oskarshamn-3 trat in einer Verteilerstation des südschwedischen Stromnetzes (Horred) ein Kurzschluss auf, der zur Abschaltung von vier 400-kV-Versorgungsleitungen führte. Hierdurch fielen unter anderem die Netzanbindungen der Kernkraftwerke Ringhals-3 und -4 mit einer aktuellen Einspeiseleistung von 1 750 MW aus, so dass diese vom Stromnetz getrennt wurden. Die Kernkraftwerke Barsebäck-2, Oskarshamn-1, -2 und ein konventionelles Kraftwerk waren zur Revision abgeschaltet. Zwei 400-kV-Verbindungen innerhalb des schwedischen Netzes sowie

die Überseeverbindungen nach Deutschland und Polen waren aufgrund von Wartungsarbeiten planmäßig abgeschaltet. Hierdurch waren die Reservekapazitäten stark eingeschränkt und die Möglichkeiten des Stromimports zum Ausgleich fehlender Kapazitäten begrenzt. [3], [4]

Südschweden wurde somit nur noch über eine Versorgungsleitung aus Zentralschweden und über die Leitung im Öresund versorgt. In Südschweden trat ein erhebliches Ungleichgewicht zwischen Energiebereitstellung und Energiebedarf auf. Dies führte zu Netzinstabilitäten und einem Frequenzeinbruch auf 49 Hz. Aufgrund des Blindleistungsmangels kam es zu Spannungsproblemen und schließlich zum Spannungskollaps als Folge dessen die noch verbliebene Verbindung nach Zentralschweden abgeschaltet wurde. Die Verbindung nach Dänemark wurde nicht gleichzeitig abgeschaltet. Die Netzinstabilitäten führten nachfolgend zur Abschaltung der konventionellen Kraftwerke in Ostdänemark und somit zum Ausfall der Stromversorgung in Ostdänemark und Südschweden. [3] Insgesamt betrug die Versorgungsunterbrechung 3 000 MW in Schweden und 1 850 MW in Dänemark. Die betroffenen Gebiete sind in Abb. 3.4 dargestellt.



**Abb. 3.4** Die vom Stromausfall am 23.09.2003 zumindest teilweise betroffenen Gebiete in Südschweden einschließlich Bornholm, Öland und Gotland (dunkelrot markiert) sowie Seeland, Lolland und Falster in Dänemark (hellrot markiert). Laut [27] waren südlich der schwarz markierten Verbindungslinie Varberg - Norrköping nur noch wenige Versorgungsinseln mit Wasserkraft vorhanden.

Die Stromversorgung war ca. 6 ½ Stunden nach Störungseintritt wieder hergestellt.  
[27]

### 3.3.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

Für die elektrische Energieversorgung werden in Dänemark Kraftwerke mit fossilen Energieträgern und Windkraftanlagen betrieben. Kernkraftwerke sind nicht vorhanden.

In Schweden schaltete das Kernkraftwerk Oskarshamn-3 aufgrund von Problemen mit der Speisewasserversorgung bereits vor dem Netzausfall ab. Der Block 4 des Kernkraftwerks Ringhals wurde aufgrund des Ausfalls der 400-kV-Netzanbindung vom Netz getrennt und auf Eigenbedarf abgefangen. [3] Der Block 3 des Kernkraftwerks Ringhals wurde aufgrund des Ausfalls der Netzanbindung abgeschaltet. Zu den weiteren Abläufen im Block 3 nach dessen Trennung vom Netz liegen der GRS keine Angaben vor.

## **3.4 Netzausfall in Italien, 2003**

### **3.4.1 Ablauf**

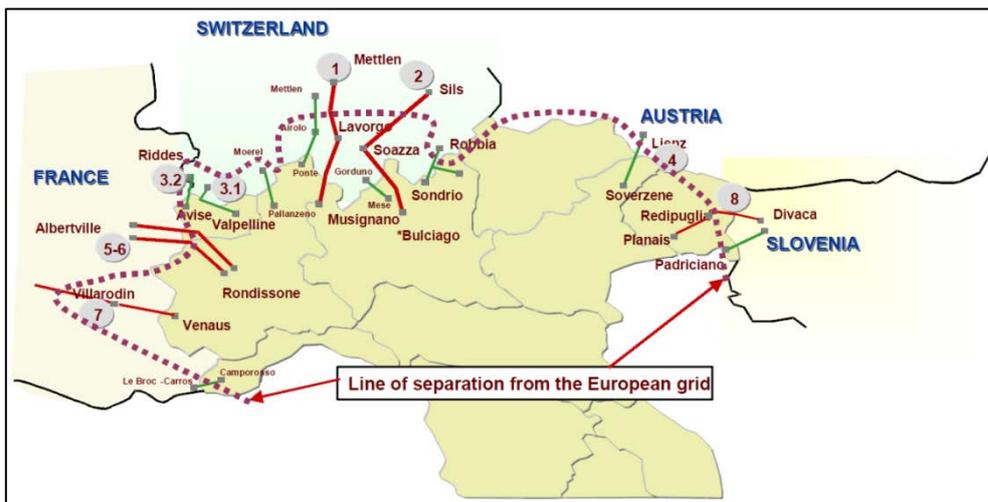
Am 28.09.2003 kam es gegen 3.30 Uhr morgens zum Ausfall der Stromversorgung in ganz Italien, ausgenommen Sardinien. Teile der Schweiz, vor allem das Tessin, das Oberengadin, das Wallis und Teile von Genf waren ebenfalls von einem kurzzeitigen Ausfall der Stromversorgung betroffen. Insgesamt waren ca. 50 Millionen Menschen zeitweise ohne Stromversorgung. [14]

Der Ausfall des Stromnetzes wurde durch eine Folge technischer Probleme, durch eine unzureichende Koordination von Korrekturmaßnahmen zwischen den Ländern Schweiz, Italien und Frankreich sowie durch zu lange Reaktionszeiten bei den Korrekturmaßnahmen während der kritischen Netzsituation ausgelöst. Darüber hinaus hat zu dem Stromausfall beigetragen, dass Italien einen hohen Stromimport aus den Nachbarländern aufweist. Hierdurch werden die Transitleitungen zwischen den Ländern stärker belastet als in der ursprünglichen Netzkonzeption vorgesehen. [7]

Der Ursprung der Störung war ein Überschlag zwischen einer 380-kV-Leitung im Schweizer Stromnetz und einem Baum. Die Leitung wurde bei dem Überschlag beschädigt und fiel aus. Es handelte sich hierbei um die Lukmanier-Leitung, eine der Haupttransitleitungen zwischen dem Schweizer und dem italienischen Stromnetz. Die Last der ausgefallenen Leitung wurde von anderen Transitleitungen übernommen. In Folge dessen wurde eine weitere Transitleitung, die San-Bernadino-Leitung, zwischen der Schweiz und Italien überlastet. Die Überlastung war in der vorliegenden Situation für eine Dauer von 15 Minuten tolerierbar. [5], [7]

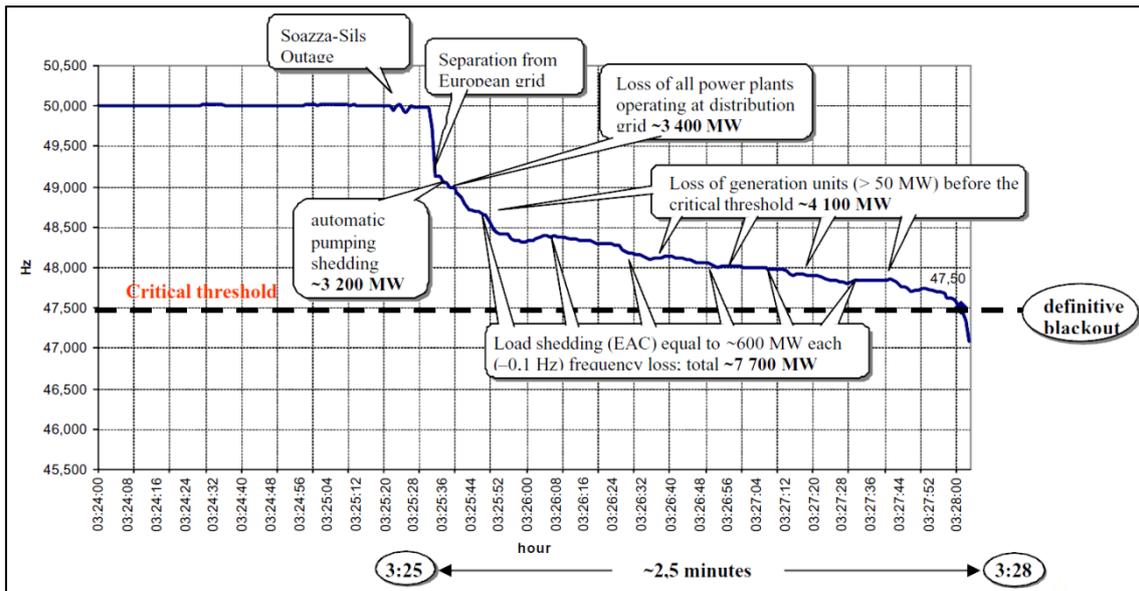
Erst 10 Minuten nach Ausfall der Lukmanier-Leitung forderte das Schweizer Koordinationszentrum ETRANS bei der Kontrollzentrale des italienischen Stromnetzbetreibers GRTN Gegenmaßnahmen an, um die Überlastung der San-Bernadino-Leitung zu reduzieren und das System wieder in einen sicheren Zustand zu überführen. GRTN wurde aufgefordert, seine Stromimporte um 300 MW zu reduzieren, da Italien zum aktuellen Zeitpunkt 300 MW elektrische Leistung mehr importierte als vereinbart. Erst 10 Minuten nach der Aufforderung war der Import nach Italien nahezu auf das vereinbarte Maß reduziert. Die Importreduktion und weitere Maßnahmen im Schweizer System reichten jedoch nicht aus, die Überlastsituation auf der San-Bernadino-Leitung zu be-

seitigen. Wenige Minuten später fiel diese ebenfalls durch Überlast aus. Hiermit stieg die Überlastung der verbleibenden Transitleitungen unzulässig an. Dies führte sofort zum Auftreten einer Spannungstransiente. Als Folge davon wurde durch eine kaskadierende automatische Abschaltung der verbleibenden 220-kV- und 380-kV-Transitleitungen nach Italien das italienische Stromnetz vom europäischen Verbundnetz getrennt (Trennungslinie siehe Abb. 3.5). [5]



**Abb. 3.5** Abtrennung des italienischen Stromnetzes vom UCTE-Verbundnetz [5]

Durch die Instabilitäten im Stromnetz, die schon vor der Abtrennung begannen, wurden mehrere italienische Kraftwerke abgeschaltet. Deshalb hatten Maßnahmen zur Stabilisierung des abgetrennten italienischen Stromnetzes keinen Erfolg mehr. Die Netzfrequenz brach durch die kaskadierende Schutzabschaltung der Kraftwerke innerhalb von ca. 2 ½ Minuten zusammen (Abb. 3.6).



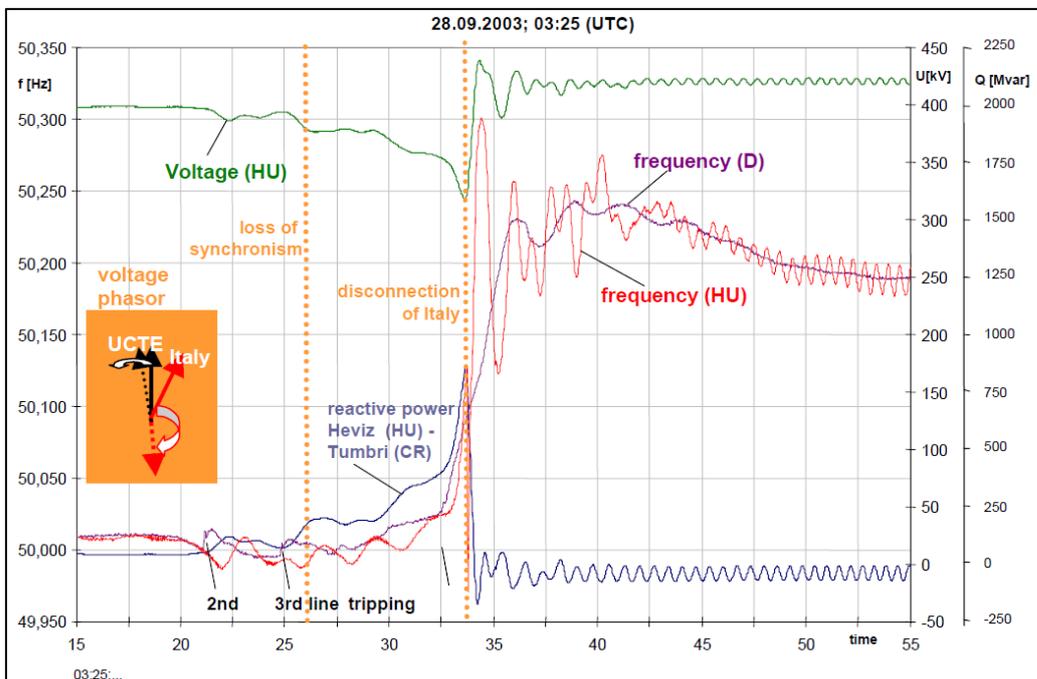
**Abb. 3.6** Verlauf der Netzfrequenz in Italien vom Beginn der Störung bis zum Netzausfall [5]

Wenige Minuten nach der Abtrennung des italienischen Netzes vom europäischen Verbundnetz trat ein vollständiger Ausfall der italienischen Stromversorgung ein. [5] In der Schweiz fiel im Tessin und im Oberengadin ebenfalls die Stromversorgung aus. [7] Die vom Netzausfall betroffenen Gebiete sind in Abb. 3.7 dargestellt.



**Abb. 3.7** Die vom Netzausfall in Italien vollständig (rot) und in der Schweiz zumindest teilweise (dunkelrot) betroffenen Gebiete

Durch die Abtrennung des italienischen Stromnetzes vom europäischen Verbundnetz wurde die Last im Verbundnetz erheblich reduziert. Bereits vor der Abtrennung Italiens vom europäischen Verbundnetz stieg der Blindleistungsüberschuss in den angrenzenden Gebieten durch den Ausfall der Transitleitungen an. Ebenso kam es zu Spannungsschwankungen sowie zu einem kurzfristigen Anstieg der Netzfrequenz im europäischen Verbundnetz. Dies konnte beispielsweise im deutschen und im ungarischen Verbundnetz festgestellt werden (siehe Abb. 3.8). In der Schweiz mussten aufgrund hoher Spannungen nach Abtrennung Italiens vom Verbundnetz Kraftwerke abgeschaltet werden. In Genf fiel ein Transformator aufgrund von Überspannung aus. [7]



**Abb. 3.8** Verlauf von Spannung, Frequenz und Blindleistung in Deutschland (Uchselfangen) und Ungarn (Heviz) im Verlauf der Störung und kurz nach der Trennung Italiens vom europäischen Verbundnetz [27]

### 3.4.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

In Italien werden keine Kernkraftwerke betrieben. Die Netzinstabilitäten führten jedoch zur Abschaltung konventioneller thermischer Kraftwerke.

Im Schweizer Verbundnetz traten nach der Abtrennung des italienischen Stromnetzes Netzinstabilitäten in Form einer erhöhten Netzfrequenz und –spannung auf. So schalteten sich in der Schweiz, Deutschland und Spanien Kraftwerke mit insgesamt 1 475 MW

Erzeugerleistung ab. Auch aus Rumänien und der Tschechischen Republik wurden Kraftwerksausfälle gemeldet. Die Überfrequenz im gesamten verbleibenden Verbundnetz führte bei vier der fünf Schweizer Kernkraftwerke zu automatischen Lastreduktionen. Im weiteren Verlauf des Netzausfalls in Italien wurden die Leistungen der Schweizer Kernkraftwerke aufgrund des verringerten Leistungsbedarfs auf 65 – 90 % der Nennleistung reduziert. [5], [8]

Auch in Deutschland wurden im Rahmen der Regelaßnahmen zur Stabilisierung der Netzfrequenz Kraftwerksleistungen reduziert. Dies betraf auch das Kernkraftwerk Isar-1 wo es aufgrund des Netzzusammenbruchs in Italien zu einer Leistungsabsenkung über die Blockleistungsregelung kam. In den beiden Blöcken der schweizerischen Anlage Beznau wurde nach dem Netzzusammenbruch in Italien die Blockleistung auf Anweisung der Netzregelstelle im Zusammenhang mit dem vorübergehend geringeren Energiebedarf um je 35 % reduziert. Auch die schweizerische Anlage Leibstadt fuhr in diesem Zusammenhang mit geringerer Leistung. [5], [8], [196]

### **3.5 Netzausfall in Griechenland, 2004**

#### **3.5.1 Ablauf**

Am 12.07.2004 kam es zu einer mehrstündigen Unterbrechung der Stromversorgung in Athen und Teilen Südgriechenlands aufgrund eines Spannungskollapses. Von diesem Versorgungsausfall waren ca. 5 Millionen Menschen im Großraum Athen, auf dem Peloponnes und auf den Kykladen betroffen (Abb. 3.9). Insgesamt fehlten ca. 4 500 MW Leistung. Da das Netz in Mittel- und Nordgriechenland die Versorgung aufrechterhielt, konnte das Netz innerhalb von zwei Stunden größtenteils wieder aufgebaut werden. [32], [33]



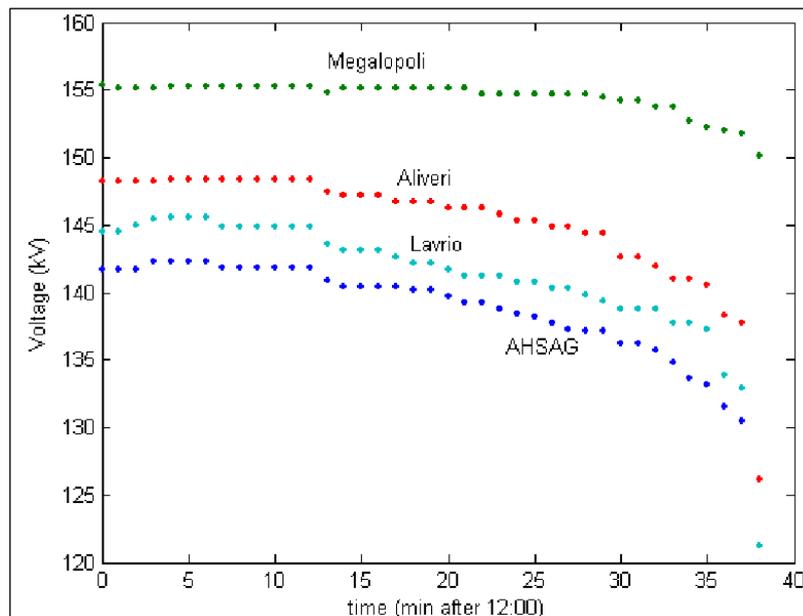
**Abb. 3.9** Vom Stromausfall 2004 zumindest teilweise betroffene Gebiete Griechenlands (rot). Die dargestellten Informationen beruhen auf Angaben in [33] sowie auf einer in Pressemeldungen zitierten Aussage eines griechischen Regierungssprechers. Welche Teile Südgriechenlands über den Peloponnes, die Kykladen sowie den Großraum Athen hinaus noch vom Netzausfall am 12.07.2004 betroffen waren, ist der GRS derzeit nicht bekannt.

Typischerweise zählen in Griechenland die Tage Anfang Juli zu den laststärksten Tagen im Jahr, wenn Klimaanlage verstärkt genutzt werden und Schul- bzw. Werksferien noch nicht begonnen haben. Der Großraum Athen ist die verbrauchsintensivste Region Griechenlands, während sich die Kraftwerke eher in Nord- und Mittellgriechenland befinden. Daher müssen die erzeugten Strommengen über lange Distanzen transportiert werden. [32]

Am 12.07.2004 waren mehrere Hochspannungs- bzw. Höchstspannungsleitungen (400 kV bzw. 150 kV) im Großraum Athen sowie ein Kraftwerk auf der Peloponnes aufgrund von Wartungsarbeiten und Fehlern nicht verfügbar. Zusätzlich belastete der zweimalige Ausfall eines Kraftwerksblocks in Lavrio (7.08 Uhr und 12.10 Uhr) südöstlich von Athen das Netz. Dies führte verbunden mit der hohen Last und insbesondere der nicht ausreichenden Bereitstellung von Blindleistung zu einem immer niedrigeren Spannungsniveau im verbleibenden Hoch- und Höchstspannungsnetz im Großraum Athen. Bereits um 12.01 Uhr hatte das Netz bei einer Last von 9 160 MW fast 90 % Nennspannung erreicht. Zwei Lastabwürfe um 12.25 Uhr (100 MW) und 12.30 Uhr (80 MW) konnten angesichts des auf 9 320 MW gestiegenen Bedarfs das weitere Absinken des Spannungsniveaus nicht aufhalten. Der Ausfall von zwei Kraftwerksblöcken

in Aliveri nördlich von Athen um 12.37 Uhr und 12.38 Uhr führte zu einem Spannungskollaps (siehe Abb. 3.10). [32]

Bei Zusammenbruch der Netzspannung trennte sich das griechische Netz über die Unterspannungsschutzauslösung in den 400-kV-Nord-Süd-Verbindungen in zwei Bereiche auf: In Mittel- und Nordgriechenland kam es durch die Lasttrennung zu einem Energieüberschuss, während in Südgriechenland das Netz völlig zusammenbrach. [32]



**Abb. 3.10** Verlauf der Spannung auf den 150-kV-Schienen von den Kraftwerken AHSAG (in Piräus, dem Hafen von Athen), Lavrio (ca. 60 km südöstlich von Athen), Aliveri (> 100 km nördlich von Athen), Megalopoli (Peloponnes, ca 200 km südwestlich von Athen). Deutlich sichtbar ist der immer stärker werdende Spannungsabfall nach dem zweiten Ausfall von Lavrio-2 um 12.10 Uhr und der Zusammenbruch der Spannung um 12.38 Uhr. [32]

### 3.5.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

In Griechenland werden keine Kernkraftwerke betrieben. Auswirkungen des Netzausfalls im Raum Athen auf Kernkraftwerke im europäischen Verbundnetz sind der GRS derzeit nicht bekannt.

## **3.6 Netzausfall in Luxemburg sowie im Raum Trier, Deutschland, 2004**

### **3.6.1 Ablauf**

Am 2. September 2004 kam es im Raum Luxemburg/Trier zu einer Netzstörung mit Versorgungsunterbrechung in Luxemburg sowie in Teilen von Rheinland-Pfalz. [31]

Als Ursache der Störung wurden zwei voneinander unabhängige Ereignisse ermittelt, die zu einem Ausfall von zwei der drei in diesem Gebiet zur Verfügung stehenden 220-kV-Leitungen führte. Eine weitere Möglichkeit zur Versorgung des Raums Trier durch Einspeisung aus dem 380-kV-Netz stand am 2. September 2004 nicht zur Verfügung, da der entsprechende Transformator zu planmäßigen Instandhaltungsarbeiten freigeschaltet war. Die Situation vor Störungsbeginn ist in Abb. 3.11 dargestellt. [31]

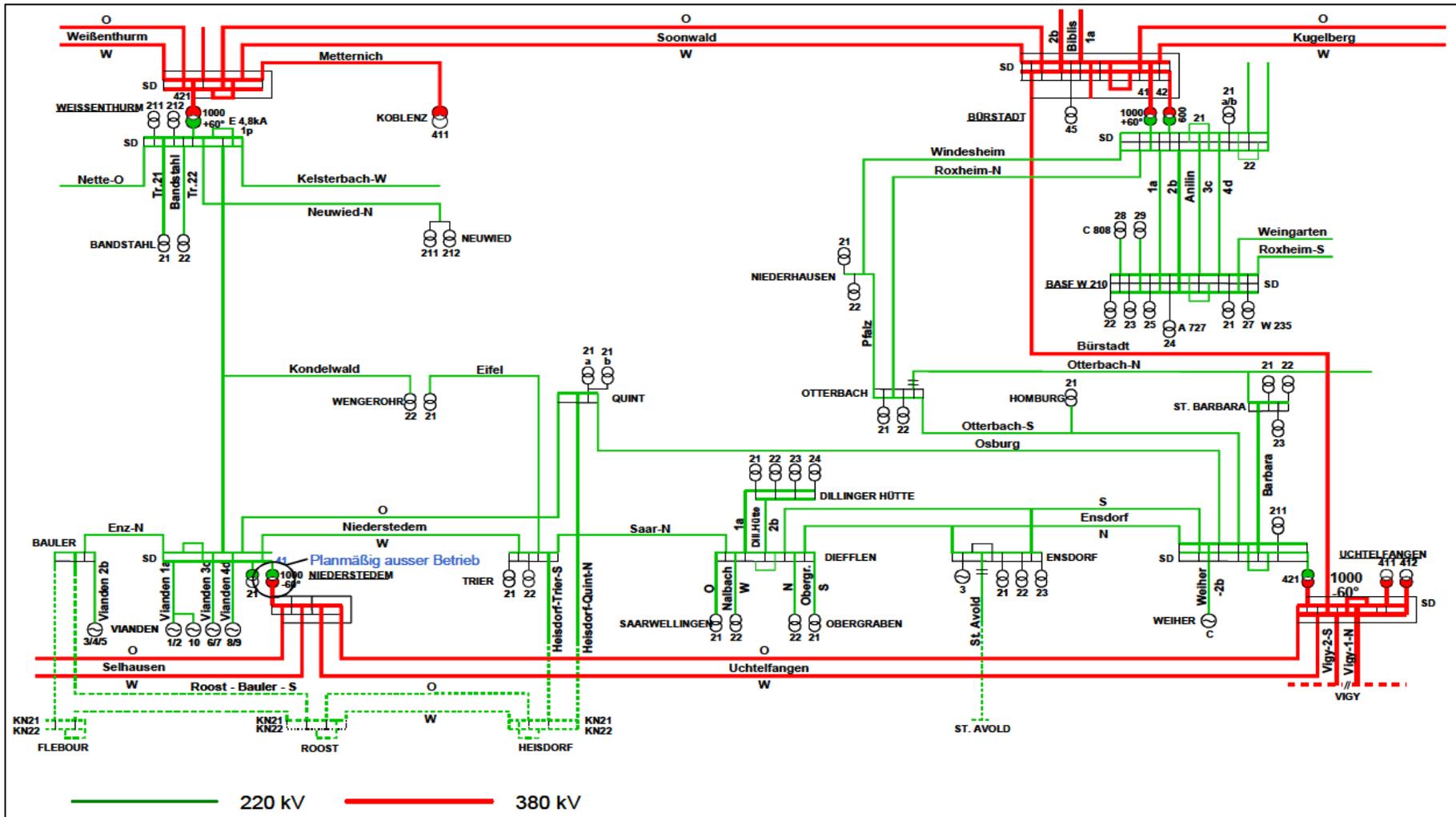


Abb. 3.11 Netztopologie des Raumes Trier/Luxemburg am 2. September 2004 vor Störungsbeginn [31]

Um 16.51 Uhr kam es in der 220-kV-Leitung von Diefflen nach Trier („Saar-Nord-Leitung“) zu einem Kurzschluss zwischen zwei Leiterseilen mit nachfolgendem Ausfall dieser Leitung. Die Ursache für diesen Kurzschluss konnte nicht geklärt werden, allerdings gingen Hinweise ein, die auf eine Fremdeinwirkung schließen lassen. [31]

Der Ausfall der Saar-Nord-Leitung führte zu einer Pendelung der Leistung im Netz, die gemäß Auslegung des Netzschutzes aber nicht zu einer Schutzabschaltung einer der Leitungen hätte führen dürfen, da bei der entstandenen Leistungspendelung zwar der Leistungsgrenzwert (Anregewert) erreicht, aber durch die kurze Periode der Pendelung (ca. 1 Hz) der Rückfallwert der Leistung (85 % des Anregewertes) vor Schutzauslösung wieder unterschritten wurde. Allerdings führte eine Überfunktion eines Schutzgerätes in der 220-kV-Leitung zwischen Uchtelfangen und Trier („Osburg-Leitung“) trotzdem zu einer Schutzabschaltung dieser Leitung. [31]

Der Ausfall der Saar-Nord- sowie der Osburg-Leitung führte zu einer Überlast auf der verbliebenen 220-kV-Leitung „Kondelwald“ mit anschließender Schutzabschaltung. Damit waren ab 16.51 Uhr Luxemburg und der Raum Trier spannungslos (siehe Abb. 3.12). [31]



**Abb. 3.12** Vom Netzausfall am 02.09.2004 betroffene Gebiete in Luxemburg (hellrot) und Deutschland (dunkelrot)

Ein erster Zuschaltversuch um 16.57 Uhr schlug fehl, da zwar die Kondelwald-Leitung wieder zugeschaltet wurde jedoch die Zuschaltung der Osburg-Leitung, die unmittelbar danach erfolgen sollte, durch ein Versagen der Funksteuereinrichtung nicht ausgeführt

werden konnte. Grundsätzlich werden solche Funksteuereinrichtungen batteriegepuffert, um eine Versorgung der Einrichtung auch bei einer etwaigen Spannungslosigkeit der Umspannanlage sicherzustellen. Im vorliegenden Fall war jedoch die Batterie unvollständig an die Funksteuereinrichtung angeschlossen, so dass die Gleichspannungsversorgung über die Batterie nicht gegeben war. Da so auf das Zuschalten der Kondelwald-Leitung keine weitere Zuschaltung einer Leitung folgte, kam es zu einem Spannungskollaps mit Schutzabschaltung der Kondelwald-Leitung. [31]

Um 17.03 Uhr wurde ein erneuter Zuschaltversuch mit der Kondelwald-Leitung unternommen, dieser blieb aber ebenfalls erfolglos, da die Überstromanregung des Schutzes auslöste. Dies geschah, da sich die Stufensteller der Transformatoren durch das niedrige Spannungsniveau beim ersten Zuschaltversuch in Endstellung befanden und so beim zweiten Zuschaltversuch sofort ein erhöhter Strom auf der Kondelwald-Leitung floss. [31]

Um 17.23 Uhr wurde die Kondelwald-Leitung erfolgreich wieder zugeschaltet, nachdem zuvor die Last des 220-kV-Netzes durch Abschaltung der 220/110-kV-Transformatoren verringert worden war. Um 17.43 Uhr folgte die Oswald-Leitung, die Saar-Nord-Leitung um 21.13 Uhr. [31]

### **3.6.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Auswirkungen des Netzausfalls im Raum Luxemburg/Trier auf Kernkraftwerke in den angrenzenden Regionen sind der GRS derzeit nicht bekannt.

## **3.7 Ausfall des Eisenbahnnetzes in der Schweiz, 2005**

### **3.7.1 Ablauf**

Am 22.06.2005 kam es zu einem fast vierstündigen Ausfall der Bahnstromversorgung in der gesamten Schweiz. Dadurch kam der Bahnverkehr auf den Strecken der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sowie der BLS Lötschbergbahn AG, der Regionalbahnen Mittelland AG, der Südostbahn, der Transports publics fribourgeois, der Chemin de fer du Jura, der Matterhorn-Gotthard-Bahn, der Rhätischen Bahn und der Zentralbahn zum Erliegen. [108], [127]

Das betroffene Gebiet ist in Abb. 3.13 dargestellt.



**Abb. 3.13** Vom Ausfall des schweizerischen Bahnstromnetzes am 22.06.2005 beoffenes Gebiet

Am 22.06.2005 waren seit dem Mittag von den drei vorhandenen Süd-Nord-Übertragungsleitungen zwischen dem Tessin und dem Mittelland aufgrund von Bau-maßnahmen zwei planmäßig freigeschaltet. Eine (n-1)-Sicherheit war somit nicht mehr vorhanden. Die Last auf der verbleibenden Leitung war hoch, da durch das heiße Sommerwetter die Klimaanlage in den Zügen auf Vollast liefen. Zudem bestand die Situation, dass die Speicher der Wasserkraftwerke aufgrund von Schmelzwasseranfall gefüllt waren und viel Laufwasser zu Verfügung stand. Dadurch standen insbesondere im Gotthardgebiet im Süden mehr Stromerzeugungskapazitäten zur Verfügung als im 16⅔-Hz-Bahnstromnetz an Eigenbedarf zuzüglich Regelreserve benötigt wurden. Aus diesem Grund sowie aufgrund des relativ hohen Strompreises wurde entschieden, den im Süden zusätzlich produzierten Strom in das 50-Hz-Netz im Tessin und im Mittelland zu verkaufen. Dies erhöhte die Last insbesondere auf der noch verbliebenen Übertragungsleitung zwischen Tessin und Mittelland zusätzlich. Auf dieser Leitung kam es um 17.08 Uhr zu einer Überstromauslösung. [108], [127]

Damit zerfiel das schweizerische Bahnstromnetz in eine Süd-Insel und eine Nord-Insel. In der Süd-Insel war ein Überschuss an erzeugtem Strom vorhanden. Der damit verbundene Frequenzanstieg führte binnen 11 Sekunden zu einer Schutzabschaltung von Kraftwerken und Frequenzumformern. Eine Einspeisung des Stromüberschusses in das 50-Hz-Netz gelang nicht. Nach wenigen Minuten (17.17 Uhr) kam es aufgrund einer Generatorenüberlast zu einer kaskadierenden Abschaltung weiterer Kraftwerke und letztlich zu einem kompletten Versorgungsausfall der Süd-Insel. Nach der Auftrennung des Bahnstromnetzes geriet die Nord-Insel in einen instabilen Bereich, in Teilen des Netzes sank die Spannung um 20 % von 15 kV auf 12 kV. Der Wegfall der Erzeugungskapazitäten südlich des Leitungsunterbruchs wurde durch das Hochfahren von

Kraftwerken in der Nord-Insel und Stromtransfer über die Kuppelstellen mit dem Netz der Deutschen Bahn vorübergehend kompensiert. Diese Kuppelstellen wurden um 17.35 Uhr wegen Überlast abgeschaltet. Zwar wurde durch Produktionssteigerung in den verbleibenden Kraftwerken weiter versucht, die Versorgung aufrecht zu erhalten, aber bis 18.05 Uhr wurden nacheinander alle verbleibenden Kraftwerke wegen Überlast schutzabgeschaltet und der Bahnverkehr kam auch in der Nord-Insel vollständig zum Erliegen. [108], [127]

Nach Ansicht der SBB wäre es möglich gewesen, die Energieversorgung nach dem Ausfall der Nord-Süd-Verbindung zu stabilisieren und so den Zusammenbruch des Bahnstromnetzes zu verhindern, wenn das Personal in der Leitstelle die Lage rechtzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen ergriffen hätte. Maßgeblich zu der fehlenden raschen Lagebeurteilung durch das Leitstellenpersonal beigetragen haben Defizite in der Leittechnik. So standen in der Stunde von 17.00 Uhr bis 17.59 Uhr 3385 kritische Alarmmeldungen an. Von solchen Alarmmeldungen muss jede einzelne quittiert werden, bevor die nächste auf den Bildschirmen angezeigt wird. Im Vergleich dazu waren es in der Stunde davor nur 54 Alarme. Diese Alarmflut führte dazu, dass das Leitstellenpersonal keine Übersicht über die Vorgänge im Netz mehr hatte und keine Lagebeurteilung vornehmen konnte. So wurde beispielsweise aus dem Teilnetz nördlich des Leitungsunterbruchs trotz der fehlenden Leistung im Bahnstromnetz Strom aus dem Bahnstromnetz ins 50-Hz-Netz abgegeben, weil diese Situation von der Leitstelle nicht erkannt wurde. [108], [127]

Nach Zusammenbruch des Netzes wurde mit dem Aufbau von Inselnetzen begonnen und diese nach und nach synchronisiert. Der Netzwiederaufbau des Bahnstromnetzes war um 21.05 Uhr abgeschlossen. [108]

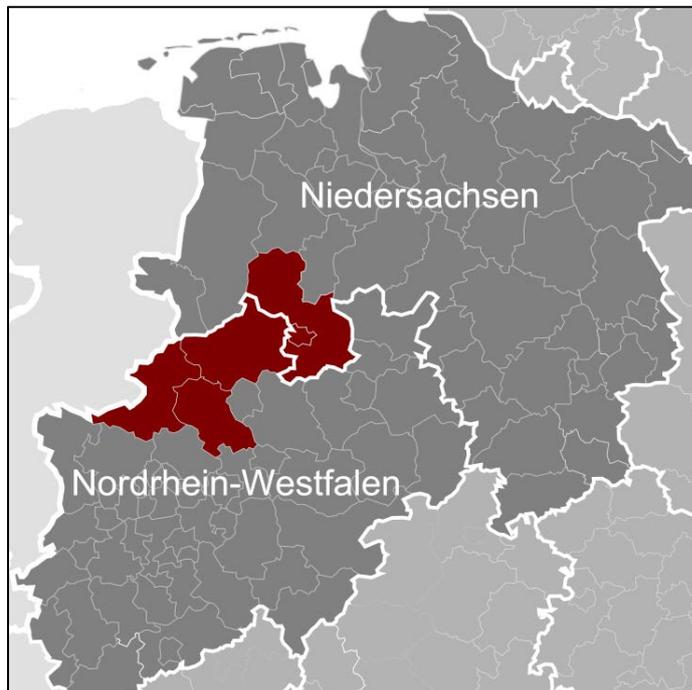
### **3.7.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Auswirkungen des Ausfalls des Bahnstromnetzes auf die Kernkraftwerke in der Schweiz sind der GRS derzeit nicht bekannt.

### 3.8 Netzausfall im Münsterland, Deutschland, 2005

#### 3.8.1 Ablauf

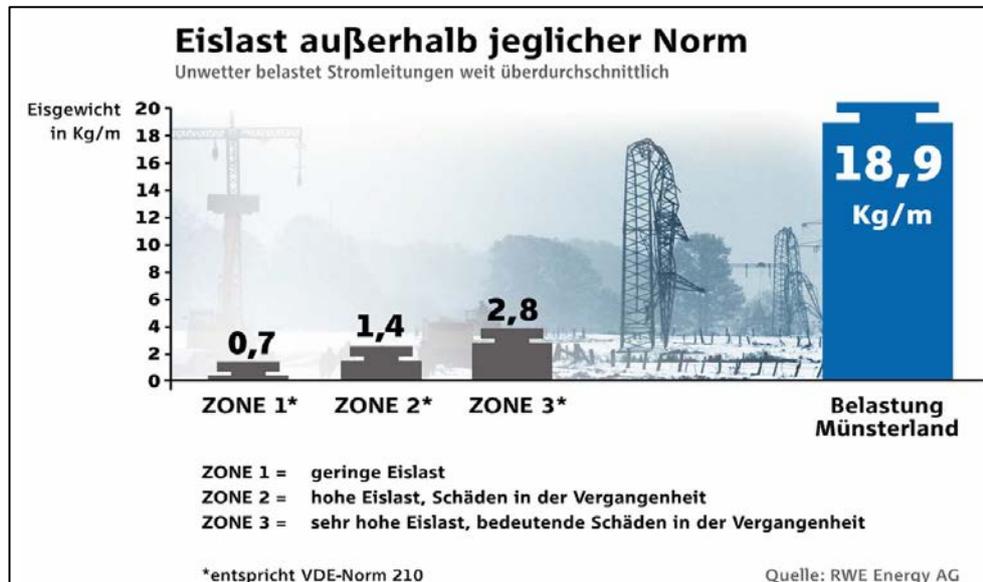
Ab dem 25.11.2005 kam es im westlichen Münsterland sowie im Raum Osnabrück zu einem bis zu vier Tage dauernden Stromausfall aufgrund von Schäden an Strommasten und -leitungen durch Schneelasten. [130] Die betroffenen Gebiete sind in Abb. 3.14 dargestellt.



**Abb. 3.14** Vom Stromausfall im November 2005 betroffene Gebiete in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen

Ab dem 24.11.2005 kam es in weiten Teilen von Nordrhein-Westfalen zu starken Schneefällen bei etwa 0 °C verbunden mit Windböen bis zu einer Stärke von 8 Beaufort. Dies führte unter anderem zu extrem schweren Ablagerungen vom Schnee mit hohem Wassergehalt an den Leiterseilen der Freileitungen. Die dabei auftretenden Eislasten auf den Freileitungen lagen deutlich über den in der VDE-Norm 210 als Auslegunggrundlage angegebenen Eislasten (Abb. 3.15). Es kam im betroffenen Gebiet zu Schäden im Übertragungsnetz – wie abgerissene Stromleitungen und umgeknickte Masten – und nachfolgenden Stromausfällen. Am stärksten von den Schäden betroffen waren Freileitungen mit Leitungsverlauf rechtwinklig zur vorherrschenden Richtung der Sturmböen. Insgesamt knickten 82 Masten unter den Lasten ein oder brachen auf-

grund der auftretenden Torsionskräfte (Abb. 3.16). Dabei waren Stahl- ebenso wie Betonmasten unterschiedlicher Spannungsebenen gleichermaßen betroffen. Untersuchungen der geschädigten Masten haben einen Beitrag von Material- oder Wartungsfehlern zur Ursache der Netzstörung ausgeschlossen. [130], [131], [132]



**Abb. 3.15** Unterstellte Eislasten auf den Freileitungen nach VDE 210 und Eislasten im November 2005 im Münsterland. Die in der Grafik angegebenen Zonen 1 bis 3 beziehen sich auf eine Einteilung des Bundesgebietes in Zonen mit erwarteter geringer, hoher oder sehr hoher Eislast. Das Münsterland wurde vor 2005 der Eislastzone 1 zugeordnet. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die dort im November 2005 tatsächlich auftretenden Eislasten auch eine Auslegung gemäß Eislastzone 3 um ein Vielfaches überstiegen. [130], [132]



**Abb. 3.16** Abgeknickte Strommasten im Münsterland im November 2005 [130], [132]

Ab dem 25.11.2005 war die Versorgung in etwa 25 Gemeinden mit 250 000 Einwohnern im westlichen Münsterland unterbrochen, teilweise für bis zu vier Tage. Zusätzlich kam es zu mehrstündigen Stromausfällen im Raum Osnabrück mit etwa 600 000 betroffenen Einwohnern. Auch in Belgien und in den Niederlanden kam es zu Schäden an Stromleitungen und zum Abknicken von Strommasten mit nachfolgenden mehrstündigen Stromausfällen. Darüber hinaus musste die A31 im Bereich des Kreuzes Gronau voll gesperrt werden, da gerissene Seile einer Hochspannungsleitung auf die Autobahn stürzten und weitere Seile aus Sicherheitsgründen gekappt wurden. Ab dem 28.11.2005 kam es zu anhaltendem Regen. Dadurch nahmen die Eismäntel an den Freileitungen noch zusätzliches Wasser auf und Leitungen des 110-kV-Netzes mussten abgeschaltet werden, da sie sich aufgrund der Last gefährlich bis in Bodennähe absenkten. Parallel dazu lief der Netzwiederaufbau im betroffenen Gebiet, ab dem 01.12.2005 waren alle betroffenen Gebiete wieder mit Strom versorgt. [130], [131], [132]

### **3.8.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Auswirkungen des Netzausfalls im Münsterland, im Raum Osnabrück sowie in Belgien und den Niederlanden auf Kernkraftwerke sind der GRS derzeit nicht bekannt.

### 3.9 Netzausfall in Europa, 2006

#### 3.9.1 Ablauf

Am 04.11.2006 kam es aufgrund von menschlichen Fehleinschätzungen zu einer Netzstörung im Europäischen Verbundnetz, die zu einer Aufspaltung des Netzes in drei Inselnetze sowie zu Stromausfällen in vielen Teilen Europas führten. Insgesamt waren 15 Millionen Menschen in Europa von den Stromausfällen betroffen. [133] Zusätzlich kam es auch in Nordafrika zu Stromausfällen. [135] Die von den Stromausfällen ganz oder teilweise betroffenen Gebiete sind in Abb. 3.17 dargestellt.



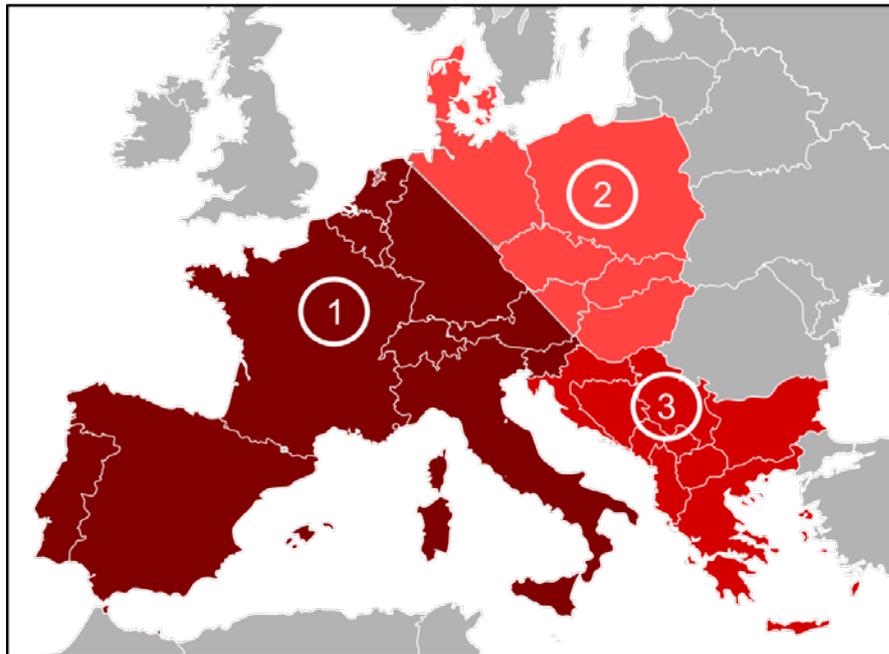
**Abb. 3.17** Länder in Europa und Nordafrika, in denen es infolge der Netzstörung im Europäischen Verbundnetz am 04.11.2006 teilweise zu Stromausfällen durch automatischen Lastabwurf kam. Beispielsweise waren in Deutschland Teile von Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Thüringen sowie des Saarlandes betroffen; in Frankreich fiel der Strom teilweise in Paris, Lyon, der Normandie und der Bretagne aus; in Spanien waren die Regionen Madrid, Valencia, Katalonien sowie Andalusien teilweise ohne Strom.

Bereits im September 2006 hatte die Meyerwerft mit Sitz an der Ems bei E.ON Netz für den 05.11.2006, 01.00 Uhr, die Freischaltung der 380-kV-Höchstspannungsleitung Conneforde-Diele für die Überführung des Kreuzfahrtschiffs „Norwegian Pearl“ beantragt. Solche Freischaltungen sind notwendig, um Schiffe mit hohen Aufbauten sicher über die Ems zur Nordsee überführen zu können, und sind in der Vergangenheit vielfach vorgenommen worden. Diesem Antrag wurde nach Absprache mit den angrenzenden Netzbetreibern TenneT und RWE vorbehaltlich einer Überprüfung der Lastflüsse im Netz für den Tag der Überführung stattgegeben. Anfang November bat die Meyerwerft um eine Vorverlegung der Freischaltung um 3 Stunden auf den 04.11.2006, 22.00 Uhr. E.ON entsprach dieser Bitte nach Durchführung einer Simulationsrechnung der Lastflüsse. Eine (n-1)-Analyse wurde nicht durchgeführt. Die Vorverlegung des Freischaltungstermins teilte E.ON den angrenzenden Netzbetreibern am Abend des 04.11.2006 mit. [136]

Am 04.11.2006 wurde um 21.29 Uhr von E.ON eine Lastflussberechnung durchgeführt, die nicht auf Verletzungen von Grenzwerten im Netz schließen ließ. Das Personal in der Leitstelle nahm aufgrund einer empirischen Evaluation an, dass die (n-1)-Sicherheit im E-ON-Netzgebiet auch nach Abschaltung der Leitung Conneforde-Diele erfüllt wäre, eine (n-1)-Berechnung wurde nicht durchgeführt. Um 21.30 Uhr führte RWE für das RWE-Netz eine Lastflussberechnung sowie eine (n-1)-Analyse durch mit dem Ergebnis, dass die (n-1)-Sicherheit auch nach Abschaltung der Leitung Conneforde-Diele für das RWE-Netz gegeben war, daher gab RWE wie auch TenneT die Einwilligung zur Abschaltung der Leitung Conneforde-Diele. [136]

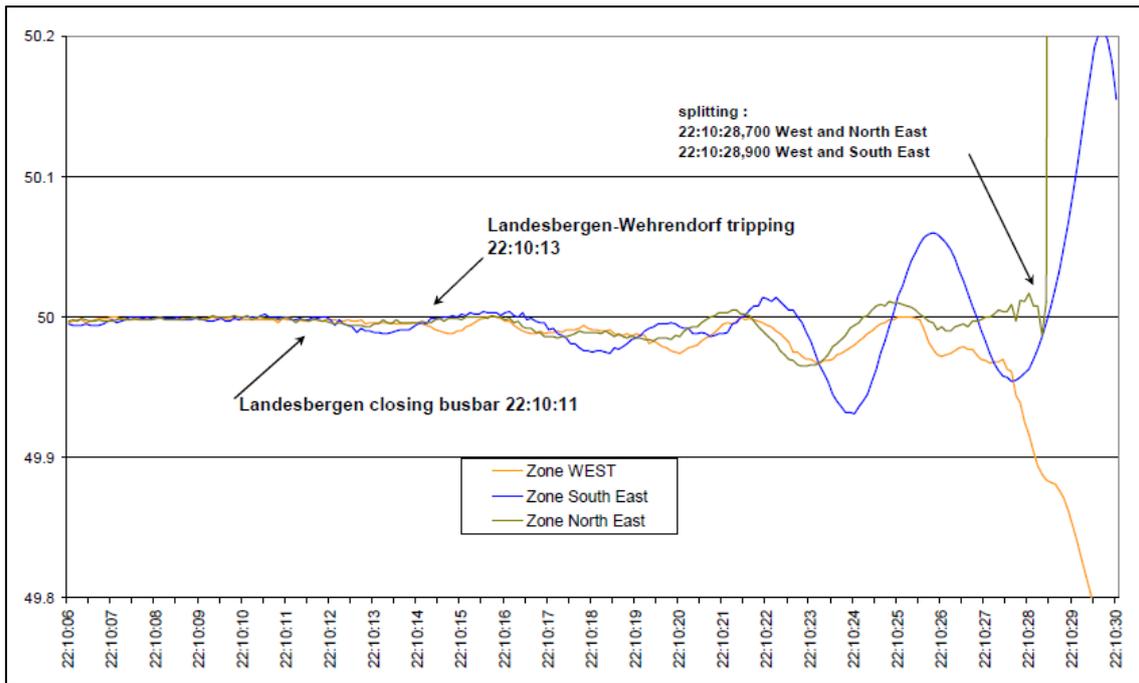
Um 21.38 Uhr wurde die 380-kV-Leitung Conneforde-Diele durch E.ON freigeschaltet. Daraufhin verlagerte sich der Lastfluß wie erwartet auf weiter südlich gelegene Ost-West-Leitungen, insbesondere auf die 380-kV-Leitung Landesbergen-Wehrendorf (Verbindungsleitung zwischen den Netzgebieten von E.ON (Landesbergen) und RWE (Wehrendorf)). Um 22.07 Uhr wurde der Sicherheitsgrenzwert der Leitung im Umspannwerk Wehrendorf überschritten (Ausgabe eines Alarms), was ein unverzügliches Eingreifen zur Wiederherstellung eines sicheren Netzbetriebes erforderte. Die Leitstelle von RWE forderte E.ON telefonisch auf, Maßnahmen zu ergreifen. Zur Umverteilung der Lastflüsse entschied sich E.ON, die Sammelschienen im Umspannwerk Landesbergen zu kuppeln, da nach einer empirischen Einschätzung davon ausgegangen wurde, dass dies den Lastfluss verringern würde. Die Maßnahme wurde ohne weitere Rücksprache mit RWE durchgeführt. Entgegen der Erwartungen von E.ON erhöhte

sich der Lastfluss auf der Leitung Landesbergen-Wehrendorf noch. Zwei Sekunden später schaltete die Schutzeinrichtung im Umspannwerk Wehrendorf die Leitung wegen Überlast ab. Eine Verlagerung der Lastflüsse immer weiter südlich und dadurch ein kaskadierender Ausfall von Leitungen des Höchst- und Hochspannungsnetzes war die Folge. Innerhalb weniger Sekunden spaltete sich das Europäische Verbundnetz in drei Teilnetze auf (Abb. 3.18). [136]



**Abb. 3.18** Aufspaltung des ÜCTE-Netzes in drei Zonen mit unterschiedlicher Frequenz nach der kaskadierenden Schutzabschaltung mehrerer Leitungen (Situation nach 22:10 Uhr).

Der Verlauf der Netzfrequenz unmittelbar vor der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes ist in Abb. 3.19 dargestellt.



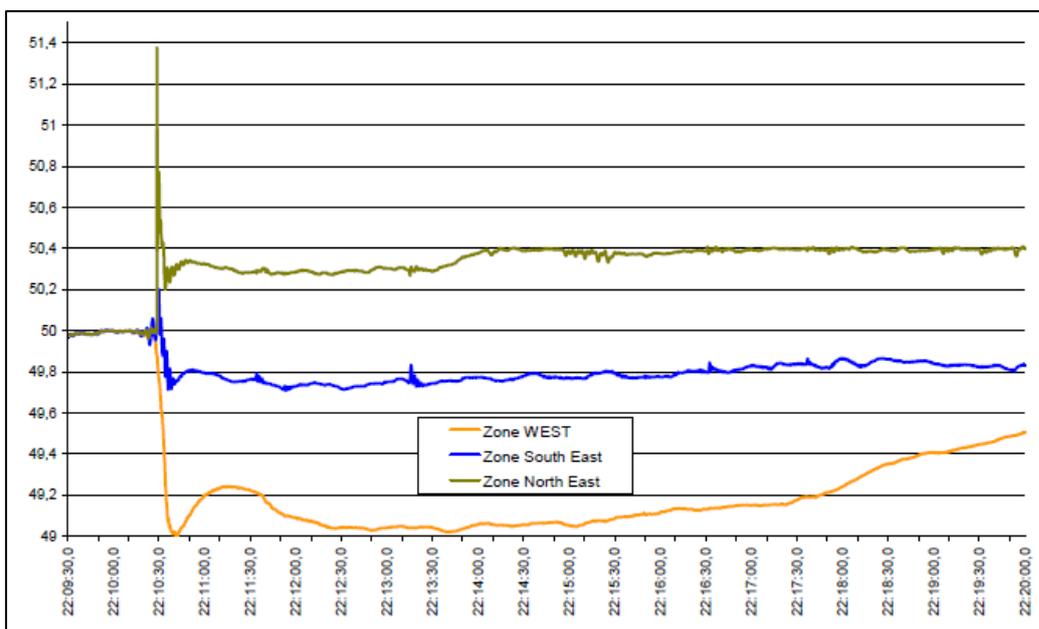
**Abb. 3.19** Verlauf der Netzfrequenz unmittelbar vor der Aufspaltung in drei Teilnetze. Ab der Kupplung der Sammelschienen im Umspannwerk Landesbergen um 22.10.11 Uhr sind immer größere Abweichungen sichtbar. 17 Sekunden später, um 22.10.28 Uhr, erfolgte die Aufspaltung des europäischen Verbundnetzes in eine westliche Zone (blau dargestellt), eine nord-östliche Zone (grün dargestellt) und eine süd-östliche Zone (blau dargestellt). [136]

Nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes war die Balance zwischen Erzeugerleistung und Last in keinem der drei Teilnetze mehr gegeben. Im westlichen Teilnetz betrug das Defizit an Erzeugerleistung fast 9 GW, während es im nord-östlichen Teilnetz einen Überschuss von etwa 10 GW an Erzeugerleistung gab. Auch im süd-östlichen Teilnetz wurde zu wenig Strom erzeugt, hier betrug das Defizit etwas mehr als 1,5 GW. Im westlichen Teilnetz brach die Netzfrequenz auf 49 Hertz ein (Abb. 3.20), was in nahezu allen betroffenen Ländern zu automatischen Lastabwürfen mit nachfolgenden Stromausfällen führte (siehe Tabelle 2). Mit diesen automatischen Lastabwürfen mussten nicht nur die fehlenden 9 GW kompensiert werden, sondern auch die fehlende Leistung von Erzeugungseinheiten, bei denen es durch die Unterfrequenz zu Schutzabschaltungen kam.

	Lastabwurf	Anteil der abgeworfenen Last an der Gesamtlast des Landes	Abwurf von Pumpspeichern	Erzeugerleistung von Aufspaltung des Verbundnetzes (22.09 Uhr)	Schutzabgeschaltete Erzeugungseinheiten (22.10 bis 23.00 Uhr)	Anteil der nach der Aufspaltung ausgefallenen Erzeugerleistung des Landes
Niederlande	340 MW	3 %	-	8 210 MW	310 MW	4 %
Belgien	800 MW	8 %	-	9 104 MW	140 MW	2 %
Frankreich	6 460 MW	12 %	-	61 581 MW	2 882 MW	5 %
Spanien	2 107 MW	10 %	572 MW	28 719 MW	3 729 MW	13 %
Portugal	1 101 MW	19 %	-	5 796 MW	1 467 MW	25 %
Italien	2 912 MW	8 %	-	30 316 MW	900 MW	3 %
Schweiz	7 MW	0,1 %	-	3 796 MW	42 MW	1 %
Deutschland (westl. Teilnetz)	2 558 MW	13 % RWE 14 % E.ON 8 % EnBW	697 MW	29 861 MW	924 MW	3 %
Österreich (westl. Teilnetz)	127 MW	18 %	297 MW	2 542 MW	315 MW	12 %
Slowenien	113 MW	8 %	-	1 516 MW	-	0 %
Ungarn (westl. Teilnetz)	199 MW	14 %	-	1 240 MW	200 MW	16 %

**Tab. 3.2** Lastabwürfe und Ausfall von Erzeugungseinheiten im westlichen Teilnetz nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes am 04.11.2006

Im nord-östlichen Teilnetz stieg die Netzfrequenz nach der Aufspaltung sprunghaft auf etwa 51,4 Hz an (siehe Abb. 3.20). Dem wirkten zunächst die automatische Abschaltung von Erzeugungseinheiten (größtenteils Windkraft) und die Drosselung von Kraftwerken entgegen und die Netzfrequenz sank. Allerdings begannen die Windkraftwerke nach kurzer Zeit wieder automatisch mit der Einspeisung ins Netz, ohne dass die Netzleitstellen darauf Einfluss nehmen konnten. Dies führte zu einem erneuten Anstieg der Netzfrequenz, der nur durch die manuelle Abschaltung von Kraftwerksblöcken in Polen kompensiert werden konnte. Im süd-östlichen Teilnetz kam es durch die fehlende Erzeugerleistung zu einem Absinken der Netzfrequenz auf 49,7 Hz (Abb. 3.20).



**Abb. 3.20** Verlauf der Netzfrequenz in den drei Teilnetzen in den Minuten nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes [136]

Die wesentlichen Eckdaten zum Verhalten der drei Teilnetze sind in nachfolgender Tabelle 3 zusammengefasst.

	Zone 1 (westliches Teilnetz)	Zone 2 (nord-östliches Teilnetz)	Zone 3 (süd-östliches Teilnetz)
Maximale bzw. minimale Frequenz nach der Aufspaltung	49 Hz	51,4 Hz	49,7 Hz
Überschuss bzw. Defizit an Erzeugerleistung nach der Aufspaltung um 22.10 Uhr	- 8 940 MW	+ 10 000 MW	- 1 680 MW
Lastabwürfe (größtenteils automa- tisch) aufgrund Erzeugungsdefi- zit durch Aufspaltung und Schutzabschaltung von Erzeugungseinheiten	17 000 MW		
Abwürfe von Pumpspeichern	1 566 MW		
Ab 22.10 Uhr ausgefallene bzw. abgeschaltete Erzeugerleistung (gesamt)	10 909 MW		
Ab 22.10 Uhr ausgefallene Erzeugerleistung (nur Wind)	4 892 MW		
Automatisch abgeschaltete Erzeugerleistung (gesamt)		6 200 MW	
Automatisch abgeschaltete Erzeugerleistung (nur Wind)		6 200 MW	

**Tab. 3.3** Netzfrequenz und Defizite bzw. Überschüsse in der Erzeugerleistung in den drei Teilnetzen nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes, Abwürfe von Last und Erzeugerleistung sowie durch Schutzeinrichtungen abgeschaltete Erzeugerleistungen [136]

Anschließende Analysen haben laut UCTE gezeigt, dass sich das Netz bis zur Abschaltung der Leitung Conneforde-Diele in einem (n-1)-sicheren Zustand befand. [136]

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass es den automatischen Maßnahmen bei Störungen der Netzfrequenz sowie den manuellen von den Netzbetreibern am 04.11.2006 ergriffenen Maßnahmen zu verdanken ist, dass ein kompletter Ausfall der Stromversorgung im Europäischen Verbundnetz oder in einem der Teilnetze verhindert wurde. [136]

Direkt nach Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes wurde mit dem Netzwiederaufbau begonnen. Zunächst wurde das westliche Teilnetz mit dem nordöstlichen Teilnetz synchronisiert, dann das südöstliche Teilnetz mit diesen beiden. Bereits 38 Minuten nach Störungseintritt liefen die drei Teilnetze wieder synchron. Der Netzwiederaufbau war nach weniger als 2 Stunden in allen europäischen Ländern abgeschlossen. [136]

### **3.9.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Die Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes und die damit verbundenen Unter- bzw. Überfrequenzen führte zum Ausfall von vielen Erzeugungseinheiten. Allein im westlichen Teilnetz fielen mehr als 10 GW an Erzeugerleistung aus. Bei den ausgefallenen Erzeugungseinheiten handelte es sich großteils um kleinere Anlagen, darunter zahlreiche Windkraftanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. So fielen 60 % der zum Störungszeitpunkt in Betrieb befindlichen Windkraftanlagen aus (insgesamt 40 % der ausgefallenen Erzeugerleistung) und 30 % der in Betrieb befindlichen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Mit Ausnahme eines thermischen Kraftwerks in Spanien mit 700 MW Erzeugerleistung fiel zum Störungszeitpunkt kein mit dem Europäischen Verbundnetz verbundenes Großkraftwerk aus. [136] Es kam nach derzeit der GRS vorliegenden Informationen auch in keinem der anderen Teilnetze zu Schnellabschaltungen in Kernkraftwerken aufgrund der Netzstörung.

Allerdings führte die Störung des europäischen Verbundnetzes in einigen deutschen Kernkraftwerken zu Leistungsabsenkungen oder Leistungsschwankungen. Im nordöstlichen Teilnetz betraf dies beispielsweise die Anlage in Brokdorf. Hier kam es gegen

22.00 Uhr zu Wirkleistungsschwankungen, die durch die Turbinenregelung bestimmungsgemäß ausgeregelt wurden. Infolge der erhöhten Netzfrequenz (50,4 Hz) wurde die Generatorleistung automatisch auf ca. 89 % abgesenkt. Nach der Netznormalisierung wurde gegen 23.25 Uhr wieder der Volllastzustand erreicht. [199] Im westlichen Teilnetz waren beispielsweise die beiden Blöcke in Neckarwestheim betroffen. Aufgrund des Frequenzeinbruchs im Verbundnetz auf ca. 49 Hz wurde in Block 1 die Leistung der Drehstrom-Maschine um ca. 20 MW und die der Bahnstrom-Maschine um ca. 25 MW gesenkt. In Block 2 wurde die Leistung der Drehstrom-Maschine durch die Reaktorleistungsbegrenzung um ca. 62 MW abgesenkt. Nach ca. 20 Minuten normalisierte sich die Netzsituation soweit, dass alle drei Maschinen wieder mit Volllast betrieben werden konnten. [197], [198] Auch in der Anlage Isar-2 kam es im Rahmen der Netzstörung zu größeren Leistungsschwankungen. In der Anlage Emsland kam es zu einer Leistungsreduktion durch das Begrenzungssystem. Darüber hinaus kam es auch in den schweizerischen Anlagen Beznau-2 und Gösgen zu Lastreduktionen bzw. Leistungsschwankungen. [200] Informationen zu Auswirkungen auf weitere Kernkraftwerke in Deutschland oder den anderen betroffenen europäischen Gebieten liegen der GRS derzeit nicht vor.

### **3.10 Netzausfall in Florida, USA, 2008**

#### **3.10.1 Ablauf**

Am 26.02.2008 kam es in großen Teilen des US-Bundesstaats Florida zu einer Netzstörung (siehe Abb. 3.21), in deren Folge 22 Übertragungsleitungen und 4 300 MW an Erzeugerleistung ausfielen. Dies führte für mehrere Millionen Menschen (knapp eine Million Verbraucher) zu einem bis zu drei Stunden andauernden Ausfall der Stromversorgung. Die Störung ist auf menschliche Fehlhandlungen zurückzuführen. [140]



**Abb. 3.21** Vom Stromausfall am 26.02.2008 teilweise betroffene Gebiete. Nach Berichten der Federal Energy Regulatory Commission (FERC) waren die unteren 2/3 von Florida betroffen. [140]

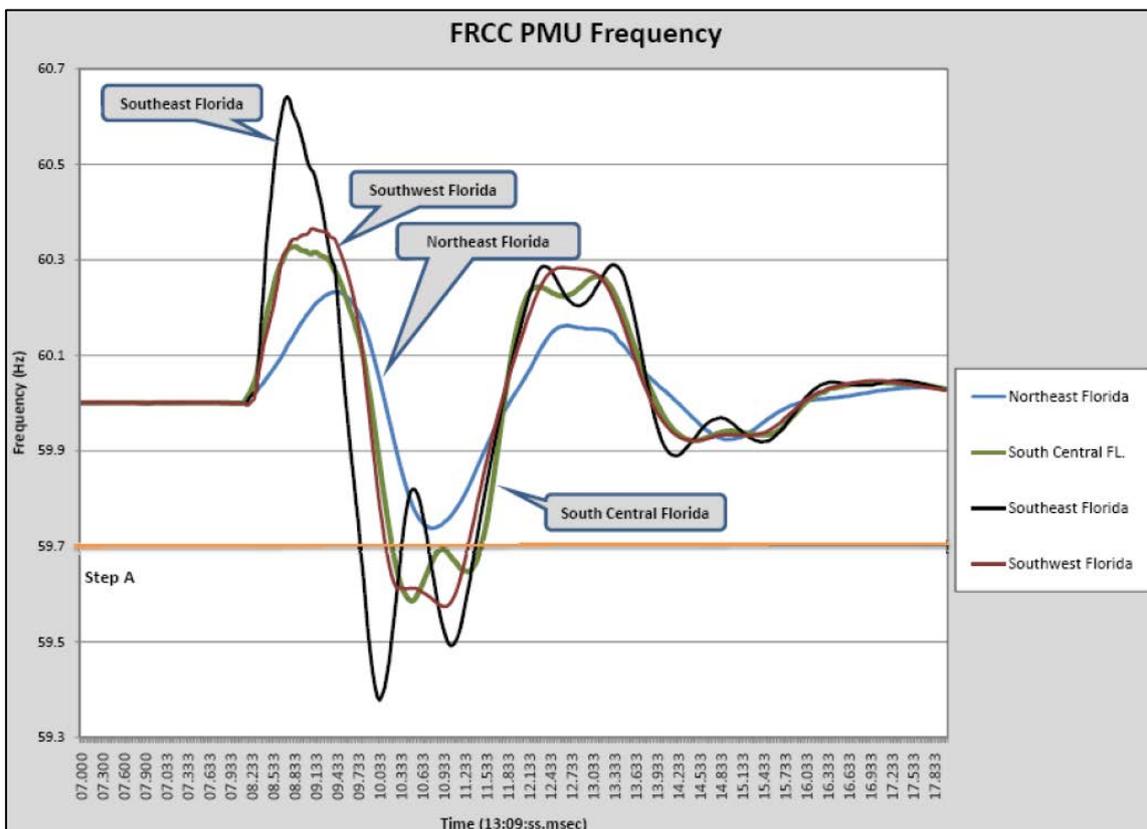
Die Störung vom 26.02.2008 nahm ihren Anfang bei Arbeiten an einem Teil des Übertragungsnetzes in einem Umspannwerk. Dort war zwei Tage zuvor beim Versuch, von der Leitstelle in Miami aus eine der beiden zur Spannungshaltung eingesetzten Kompensationsdrosseln von der 138-kV-Verteilerschiene abzukuppeln, ein Schalter durch das Ansprechen des Sperrrelais auffällig geworden. Am 26.02.2008 entsandte der Netzbetreiber einen Mitarbeiter vor Ort, um den Schalter überprüfen zu lassen. Dieser deaktivierte vor Ort zunächst den primären Differentialschutz und auch die Backup-Schutzeinrichtung (sekundärer Schutz) der nach wie vor in Betrieb befindlichen Schalter, allerdings ohne dies der Leitstelle mitzuteilen. Daraufhin führte der Mitarbeiter eine visuelle Inspektion des SF<sub>6</sub>-Schalters<sup>2</sup> durch, wobei eine fehlerhafte Anzeige das ordnungsgemäße Vorhandensein von Gas im Schalter und damit eine Funktionstüchtigkeit des Schalters anzeigte, die in Wirklichkeit nicht gegeben war. Der Mitarbeiter entschied, die Fehlerdiagnose bei geöffnetem Schalter fortzusetzen. Auf Anforderung des Mitarbeiters öffnete der Lastverteiler anschließend den auffälligen, unter Last stehenden Schalter (SF<sub>6</sub>-Schalter in Reihe mit einem Trennschalter). Aufgrund eines internen Fehlers des SF<sub>6</sub>-Schalters führte dies für 17-19 Sekunden zu einem Lichtbogen, der

---

<sup>2</sup> Leistungsschalter, in dem Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) als Medium zur Löschung des Schaltlichtbogens eingesetzt wird.

auch den Schalter der benachbarten Kompensationsdrossel beschädigte, und letztlich zu einem Defekt in allen drei Phasen der 138-kV-Verteilung führte. [137], [139], [140]

Solch ein Fehler hätte normalerweise zu keiner Unterbrechung der Stromversorgung geführt, da die Schutzeinrichtungen den fehlerhaften Bereich unverzüglich vom Netz getrennt hätten. Durch die Unverfügbarkeit des primären und des sekundären Schutzes konnte der Fehler lokal nicht vom Netz getrennt werden und so dauerte es bis zur Abtrennung des Fehlers durch weiter entfernte Schutzeinrichtungen der Übertragungsleitungen ca. 1,7 Sekunden. Durch diese verzögerte Abtrennung des Fehlers vom Netz entstanden erhebliche Frequenzschwankungen (siehe Abb. 3.22). Dies führte zum kaskadierenden Ausfall von Übertragungsleitungen (sechs 230-kV-Leitungen, 15 138-kV-Leitungen und eine 69-kV-Leitung) und Erzeugungseinheiten (insgesamt 4.300 MW) und Lastabwürfen aufgrund von Unterfrequenz. Dadurch kam es zu Stromausfällen in weiten Teilen von Florida. [137]



**Abb. 3.22** Frequenzverlauf in verschiedenen Teilen von Florida bei der Netzstörung am 26.02.2008 [137]

Die Vorgehensweise des Mitarbeiters vor Ort bei der Fehlerdiagnose und insbesondere die Deaktivierung von primären und sekundären Schutzeinrichtungen entsprechen nicht den vorgeschriebenen Vorgehensweisen bei der Instandhaltung. Zusätzlich stellt das FRCC in seinem Untersuchungsbericht fest, dass es nur in unzureichendem Maß Prozeduren oder Vorgaben für die Freigabe solcher Arbeiten durch einen Vorgesetzten gab. Zusätzlich ist die Rede von unzureichender Kommunikation des Mitarbeiters vor Ort mit der Leitstelle. Darüber hinaus haben zwei technische Defekte mit zur Entscheidung des Mitarbeiters vor Ort beigetragen, die letztlich zur Netzstörung führte. Erstens versagte der Kontaktmechanismus im Inneren des SF<sub>6</sub>-Schalters auf eine Weise, die eine Einschätzung des Schalterzustandes schwierig machte und zweitens führte ein weiterer Fehler dazu, dass der Verlust von Gasdruck nicht bemerkt wurde und der Mitarbeiter so eine Fehlinformation erhielt. [137], [140]

Im Nachgang zu diesem Stromausfall in Florida wurden nach eingehenden Untersuchungen des Sachverhalts durch die NERC (North American Electric Reliability Corporation) und die FERC (Federal Energy Regulatory Commission) aufgrund der Verletzung von Regelungen und Standards in mehreren Punkten Zivilstrafen in Höhe von 25 Millionen Dollar an den Netzbetreiber FPL (Florida Power and Light) und in Höhe von 350 000 Dollar an die FRCC (Florida Reliability Coordinating Council) verhängt. [138], [140]

### **3.10.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Aufgrund der Netzstörung kam es am 26.02.2008 über das Kriterium Unterspannung auf den 4-kV-Notstromschienen zu Schnellabschaltungen in den Kernkraftwerksblöcken Turkey Point-3 und Turkey Point-4. Nach den Schnellabschaltungen wurden die beiden Blöcke auslegungsgemäß aus dem Netz versorgt, das wieder Nennspannung lieferte. [141]

Beim Standort Turkey Point handelt es sich um den der Störungsursache am nächsten gelegenen Kraftwerksstandort. Dort fielen die drei fossilen Kraftwerksblöcke aufgrund der kurzzeitigen Unterspannung im Netz ebenfalls aus. In den anderen Kernkraftwerken in Florida (St. Lucie-1, St. Lucie-2, Crystal River) kam es nicht zu Schnellabschal-

tungen aufgrund der Netzstörung, allerdings fielen eine Reihe weiterer konventioneller Kraftwerksblöcke aus. [137], [141]

Turkey Point Block 3 wurde am 03.03.2008 wieder angefahren und befand sich ab dem 04.03.2008 wieder im Volllastbetrieb. Block 4 wurde bereits am 28.02.2008 wieder angefahren, aber einen Tag später aufgrund einer Transiente des Dampferzeugerfüllstandes von Hand wieder abgeschaltet. [142]

### **3.11 Netzausfall in Frankreich und Spanien, 2009**

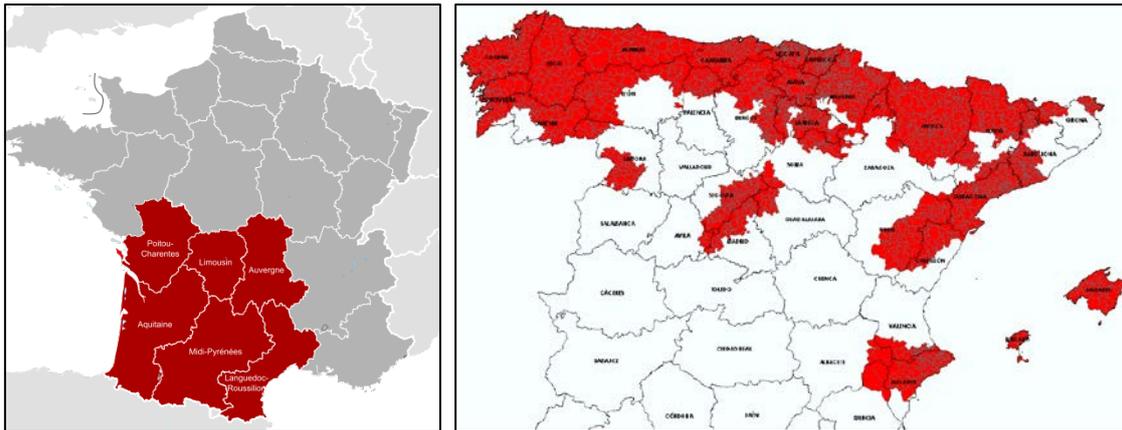
#### **3.11.1 Ablauf**

Zwischen dem 23.01.2009 und dem 25.01.2009 traf Orkan „Klaus“ auf das europäische Festland. Mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 220 km/h verursachte „Klaus“ insbesondere im Süden Frankreichs und im Norden Spaniens erhebliche Schäden am Übertragungsnetz durch umstürzende Bäume und abknickende Strommasten (siehe Abb. 3.23).



**Abb. 3.23** Durch Orkan „Klaus“ verursachte Schäden an Strommasten in Nordspanien [146]

Besonders stark waren Leitungen des Hoch- und Höchstspannungsnetzes betroffen. Dadurch kam es in weiten Teilen Nordspaniens und Südfrankreichs zu Stromausfällen. In Frankreich waren insgesamt etwa 1,7 Millionen Haushalte betroffen, im Norden Spaniens mehrere Hunderttausend. [148] Die vom Stromausfall ganz oder teilweise betroffenen Gebiete sind in Abb. 3.24 dargestellt.



**Abb. 3.24** Von den Stromausfällen nach Orkan „Klaus“ ganz oder teilweise betroffene Gebiete (rot eingefärbt) im Süden Frankreichs (links) und im Norden Spaniens einschließlich der Balearen (rechts, [147])

Der Netzwiederaufbau gestaltete sich schwierig, da vielerorts der Zugang zu beschädigten Teilen des Übertragungsnetzes aufgrund der Zerstörungen durch Orkan „Klaus“ behindert war. Daher wurden allein in Frankreich mehrere Hundert Notstromaggregate in den stark betroffenen Regionen eingesetzt, um die Verbraucher notdürftig zu versorgen. [144] Der Netzwiederaufbau in Frankreich war nach fünf Tagen abgeschlossen. [152]

### 3.11.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

In Spanien liegt die Anlage Santa Maria de Garoña im vom Orkan „Klaus“ betroffenen Gebiet. Auswirkungen des Sturms auf die Anlage sind der GRS derzeit nicht bekannt. Aus einem Bericht des spanischen Nuklearen Sicherheitsrates (CSN – Consejo de Seguridad Nuclear) zum Jahr 2009 geht allerdings hervor, dass sich die Anlage zum Zeitpunkt des Sturms im ungestörten Volllastbetrieb befand. [149]

In Frankreich gab es keine direkten Schäden an Kernkraftwerken durch Orkan Klaus. Allerdings wurde im Kraftwerk Le Blayais der interne Notfallplan über das Kriterium der Höhe der Windgeschwindigkeit in Kraft gesetzt. Dieses Vorgehen erlaubt es, Vorkehrungen gegen eventuell auftretende Überschwemmungen zu ergreifen. Die vier Reaktoren in Le Blayais waren in ihrer Funktion aber nicht beeinträchtigt. [150]

Im Nachgang zu Orkan Klaus und einem weiteren starken Sturm Anfang Februar 2009 gab es in der Anlage Le Blayais wiederholt Schwierigkeiten mit der Kühlwasserreinigung und den Hauptkühlwasserpumpen, da sich eine große Menge an Treibgut, Grünabfällen und Schlamm in der Gironde angesammelt hatten und in den Kühlwassereinfluss gerieten. Dies führte zu häufigen Ausfällen der Hauptkühlwasserpumpen über hohen Widerstand der Siebtrommeln der Kühlwasserreinigung. In einigen Fällen kam es durch Ausfall je beider einem Block zugeordneten Hauptkühlwasserpumpen zu Reaktorschnellabschaltungen (12.02.2009 alle vier Blöcke, 24.02.2009 Blöcke 1 und 4, 02.03.2009 Block 4). [151]

In Berichten zu Schäden durch Orkan Klaus wird auch über große Schäden an Windkraftanlagen berichtet, die durch ihre exponierte Lage in den Bergen besonders hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt waren. Hier kam es zu Beschädigungen der Verkleidungen an den Gondeln, zur Beschädigung (Verbiegung oder Bruch) der Schaufeln, zum Abbruch der Masten und bei schweren Beschädigungen der Gondeln auch zu Bränden durch den Kontakt der unter Spannung stehenden Teile mit dem hydraulischen Öl. [145]

### **3.12 Netzausfall in London, Großbritannien, 2009**

#### **3.12.1 Ablauf**

Ab dem 20.07.2009 kam es im Südosten Londons und Teilen von Kent (ähnliche Gebiete ganz oder teilweise betroffen wie in Abb. 3.3 dargestellt) zu einem bis zu drei Tage andauernden Stromausfall nach einem Brand auf einer Kabelbrücke bei Dartford. Der Brand schädigte die vier über die Brücke laufenden 132-kV-Kabel sowie vorhandene Überwachungskabel irreparabel. Zum Zeitpunkt der Störung stellten diese vier Kabel die Hauptversorgungsleitungen vom Umspannwerk Littlebrook in das Londoner Netz der EDF sowie das Netz zur Versorgung des Südostens dar. Untersuchungen durch die Polizei sowie OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets) ergaben, dass das Feuer nach einem Einbruch auf die Kabelbrücke absichtlich von Dritten verursacht wurde. Die Schäden auf der Kabelbrücke wurden auf erhebliche Gewaltanwendung im Zusammenhang mit Vandalismus durch zwei oder mehr Personen und vermutliche Brandstiftung zurückgeführt. [153], [154], [155]

Insgesamt waren 94 000 Verbraucher bis zu drei Tage ohne Strom. Die Wiederherstellung der Stromversorgung verzögerte sich, da durch den Brand auch die Kabelbrücke an sich schweren Schaden genommen hatte und aufgrund polizeilicher Ermittlungen zunächst gesperrt war. Der Netzbetreiber verwendete 46 mobile Notstromdieselaggregate zur notdürftigen Versorgung von sensiblen Verbrauchern wie beispielsweise Pflegeheimen und setzte gezielte Lastabwürfe (rolling blackouts) mit dreistündiger Versorgung pro Tag ein, um einen Teil der betroffenen Verbraucher wenigstens zeitweise mit Strom zu versorgen. [153], [154], [155]

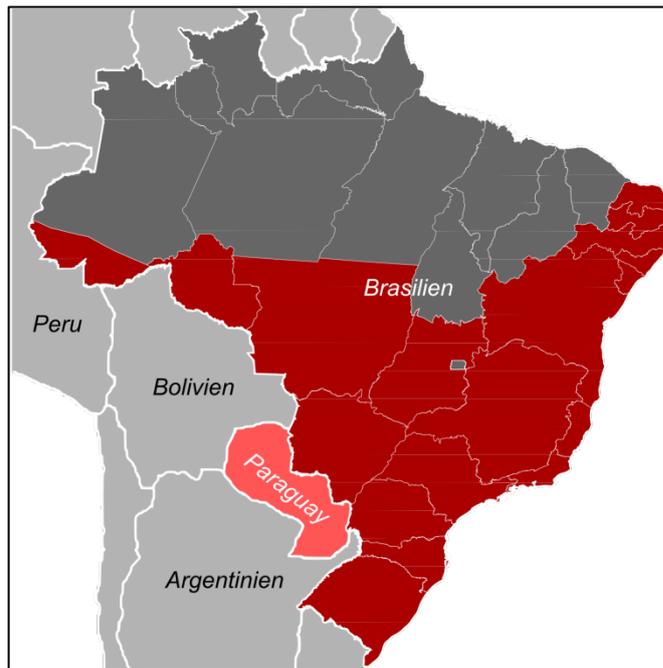
### **3.12.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Der Netzausfall fand im Süden Londons und in Teilen von Kent statt. Die der GRS derzeit vorliegenden Informationen enthalten keine Angaben zu Instabilitäten im nicht vom Netzausfall betroffenen Teil des britischen Stromversorgungsnetzes und zu Auswirkungen auf die britischen Kernkraftwerke.

## **3.13 Netzausfall in Brasilien und Paraguay, 2009**

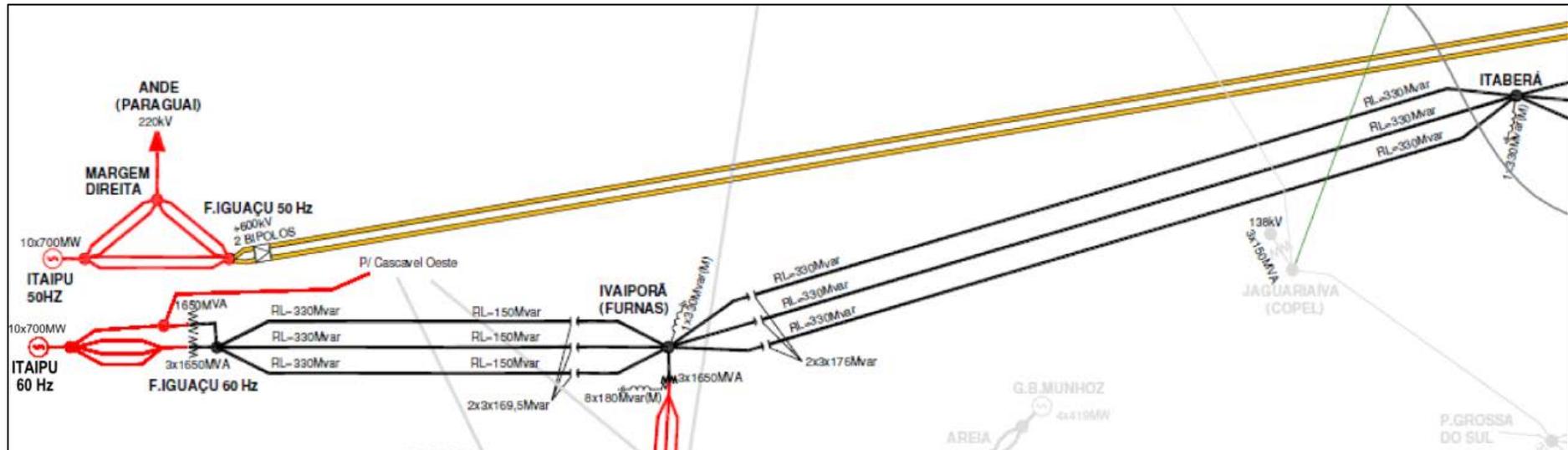
### **3.13.1 Ablauf**

Am 10.11.2009 kam es vermutlich durch Witterungsbedingungen zu einem Ausfall der Stromversorgung in weiten Teilen von Brasilien einschließlich der größten beiden Städte São Paulo und Rio de Janeiro sowie zu einem vollständigen Ausfall der Stromversorgung im benachbarten Paraguay. Das vom Stromausfall ganz oder teilweise betroffene Gebiet ist in Abb. 3.25 dargestellt. [158]



**Abb. 3.25** Vom Netzausfall am 11.09.2009 komplett oder teilweise betroffene Gebiete Brasiliens (dunkelrot) und Paraguays (hellrot). Vollständig betroffen waren unter anderem Paraguay und der Südosten Brasiliens einschließlich der Großräume São Paulo und Rio de Janeiro.

Das brasilianische Stromnetz besteht aus vier Teilnetzen (Süden, Südosten/Zentrum-Westen, Nordosten, Norden), die untereinander verbunden sind. Brasilien erzeugt etwa 70 % des Stroms in Wasserkraftwerken. Allein 14 GW Leistung sind im Wasserkraftwerk Itaipu, dem zweitgrößten Kraftwerk der Welt, an der Grenze zu Paraguay installiert. Itaipu ist zur Hälfte auf brasilianischem Gebiet und zur anderen Hälfte in Paraguay erbaut. Jeweils 10 Turbinen produzieren dort Strom. Das brasilianische Stromnetz wird mit 60 Hz betrieben, daher produziert die brasilianische Hälfte der Turbinen Strom mit 60 Hz. Dieser wird über drei 765-kV-Leitungen von Itaipu in Richtung der Ballungszentren um São Paulo und Rio de Janeiro übertragen. Die zehn Turbinen auf paraguayischem Gebiet produzieren Strom mit 50 Hz, der großteils direkt nach Brasilien exportiert wird (siehe Abb. 3.26). Dieser wird über zwei HGÜ-Leitungen in den Großraum São Paulo transportiert und dort in Wechselstrom mit 60 Hz umgeformt. Wenn alle 20 Turbinen in Betrieb sind, ist Itaipu in der Lage, etwa 20 % des brasilianischen sowie knapp 90 % des paraguayischen Strombedarfs zu decken. [158], [159]



**Abb. 3.26** Die beiden Teile des Wasserkraftwerks Itaipu (60 Hz und 50 Hz) an der Grenze zwischen Brasilien und Paraguay sind über drei 765-kV-Leitungen (schwarz dargestellt) bzw. über zwei HGÜ-Leitungen (gelb dargestellt) mit den brasilianischen Ballungszentren an der Südostküste verbunden [159]

Am 10.11.2009 traten in der Schaltanlage Itaberá (siehe Abb. 3.26 ganz rechts) über einen Zeitraum von 17 ms einphasige Kurzschlüsse an zwei der drei 765-kV-Leitungen sowie ein einphasiger Kurzschluss an einer Schiene auf. Diese nahezu zeitgleichen Fehler führten dazu, dass alle drei 765-kV-Leitungen zwischen Ivaiporã und Itaberá über das Ansprechen von Schutzeinrichtungen abgeschaltet wurden. In der Folge kam es zu Schutzabschaltungen von fünf Turbinen in Itaipu (60 Hz) und zum Ausfall von weiteren Verbindungsleitungen zwischen dem südlichen und dem südöstlichen Teilnetz. Dadurch stieg die Frequenz im südlichen Teilnetz bis auf 63,5 Hz an, im südöstlichen Teilnetz brach die Frequenz bis auf 58,3 Hz ein (siehe Abb. 3.27).



**Abb. 3.27** Frequenzverlauf am 10.11.2009 zwischen 22:11 Uhr und 22:14 Uhr im südlichen (rot, Curitiba) und im südöstlichen (blau, Brasília) Teilnetz Brasiliens [160]

Aufgrund von Netzschwingungen kam es zu Schutzabschaltungen der verbleibenden 525-kV-, 500-kV-, 230-kV- und 138-kV-Verbindungen zwischen dem südlichen und dem südöstlichen Teilnetz und zur Abschaltung der verbleibenden Turbinen des brasilianischen Teils von Itaipu (60 Hz). Dies führte zu einem Spannungskollaps des südöstlichen Teilnetzes, insbesondere auch in São Paulo, was wiederum eine Schutzabschaltung der HGÜ zwischen den Turbinen des paraguayischen Teils von Itaipu (50 Hz) und dem Großraum São Paulo nach sich zog. Für einen solchen Fall ist eigentlich eine Schutzabschaltung aller bis auf zwei Turbinen in Itaipu (50 Hz) und ein Inselbetrieb dieser beiden Turbinen mit Paraguay vorgesehen, um große Überfrequenzen im Stromnetz von Paraguay zu vermeiden. Dieser Schutzmechanismus hat am 10.11.2009 nicht funktioniert, so dass die 220-kV-Übertragungsleitungen in Paraguay über Überfrequenzschutz abgeschaltet wurden. Auch in weiteren Kraftwerken kam es

zu Schutzabschaltungen. Die beschriebene Störung führte insgesamt zu einem vollständigen, etwa 20 Minuten andauernden Stromausfall in Paraguay, sowie zu einem durchschnittlich etwa 4 Stunden andauernden Stromausfall in weiten Teilen Brasiliens. [157]

Der Netzwiederaufbau in Brasilien wurde durch Probleme beim Schwarzstart von mehreren Kraftwerken verzögert. [157]

### **3.13.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

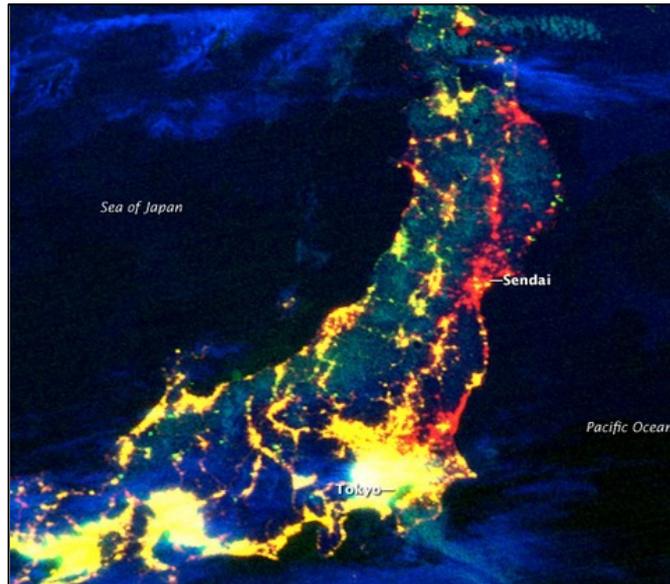
Mit Ausfall der externen Stromversorgung befanden sich die beiden Kernkraftwerksblöcke Brasiliens, Angra-1 und Angra-2, ab 22:13 Uhr am 10.11.2009 im Notstromfall. Die Dieselgeneratoren starteten auslegungsgemäß und versorgten die Sicherheitssysteme der Anlagen. Beide Reaktoren wurden schnellabgeschaltet. Die Kernkühlung in beiden Anlagen wurde über Naturumlauf aufrechterhalten. Eine Stunde nach Ausfall der externen Stromversorgung werden Ereignisse in Brasilien zur Vorsorge von der Stufe „unusual event“ auf die Stufe „alert“ angehoben. Diese Stufe wurde in Angra-1 um 00:36 und in Angra-2 um 00:55 Uhr nach Wiederherstellung der externen Stromversorgung (zumindest teilweise) wieder aufgehoben. Die beiden Anlagen wurden wieder angefahren und am 11.11.2009 um 17.50 Uhr bzw. um 18.57 Uhr wieder mit dem Netz synchronisiert. [156]

## **3.14 Netzausfall in Japan, 2011**

### **3.14.1 Ablauf**

Das Tōhoku-Erdbeben und der nachfolgende Tsunami am 11.03.2011 führten in 7 Präfekturen zu schweren Beschädigungen am japanischen Stromnetz. Zusätzlich fielen einige Großkraftwerke entweder durch Schäden an den Anlagen selbst oder durch Beschädigung ihrer Netzanbindung aus. Dies führte allein in den Versorgungsgebieten der großen Energieversorger TEPCO (Tokyo Electric Power Company) und Tohoku EPCO (Tohoku Electric Power Company) zu einem Versorgungsausfall für etwa 8 900 000 Verbraucher. Insgesamt standen zu diesem Zeitpunkt im Vergleich zum 10.03.2011 25 GW an installierter Leistung nicht mehr zur Stromerzeugung zur Verfügung. [181]

Die vom Stromausfall nach dem Erdbeben und Tsunami betroffenen Gebiete auf Japans Hauptinsel Honshu sind in Abb. 3.28 erkennbar.



**Abb. 3.28** Vom Stromausfall nach dem Erdbeben und Tsunami am 11.03.2011 betroffenen Gebiete auf Japans Hauptinsel Honshu. Die Abbildung stellt einen Vergleich von Satellitenbildern vom 12.03.2011 und aus dem Jahr 2010 dar. Rot dargestellt sind Gebiete, die am 12.03.2011 keinen Strom hatten, Gebiete mit noch funktionierender Stromversorgung erscheinen gelb (NOAA National Geophysical Data Center).

Das japanische Stromnetz hat insofern eine ungewöhnliche Struktur des Übertragungsnetzes, als das Land in zwei Teile mit unterschiedlicher Netzfrequenz aufgeteilt ist. Der östliche Teil der Hauptinsel Honshu sowie die in deren Norden liegende Insel Hokkaido besitzen ein Übertragungsnetz mit einer Netzfrequenz von 50 Hz, der westliche Teil von Honshu sowie die beiden westlichen Inseln werden von einem Netz mit 60 Hz Netzfrequenz versorgt. Das 50-Hz-Netz und das 60-Hz-Netz sind über Frequenzkonverter in vier Hochspannungs-Gleichstrom-Stationen (HVDC-Stationen) miteinander verbunden. Das 50-Hz-Netz auf Honshu besteht im Wesentlichen aus den von den Schäden durch Erdbeben und Tsunami am 11.03.2011 hauptsächlich betroffenen Versorgungsgebieten von TEPCO und Tohoku EPCO.

Nach den großflächigen Stromausfällen am 11.03.2011 wurde mit Hochdruck am Netzwiederaufbau gearbeitet. Der Energieversorger TEPCO beispielsweise benötigte insgesamt 178 Stunden, um die Stromversorgung der in seinem Gebiet betroffenen 4 Millionen Verbraucher wiederherzustellen (ausgenommen vom Tsunami verwüstete Gebiete). Da nicht nur die Schäden am Stromnetz sondern auch die nicht zur Verfü-

gung stehenden Erzeugerkapazitäten zur Stromknappheit beitrugen, wurden weitere Maßnahmen ergriffen, um die Stabilität des Stromnetzes aufrecht zu erhalten. Vom 14.03.2011 bis zum 28.03.2011 nahm TEPCO bei mehr als 10 Millionen Verbrauchern gezielte Lastabwürfe (rolling blackouts) von täglich 3 Stunden vor, um die Versorgungsknappheit bis zur Reparatur der leicht geschädigten Kraftwerke und des Stromnetzes zu überbrücken. Zusätzlich regelte ein Edikt der Regierung, dass Großverbraucher von Anfang Juli bis Mitte September ihren Spitzenverbrauch um mindestens 15 % gegenüber dem Sommer 2010 senken mussten. Darüber hinaus sank die von Kernkraftwerken zur Verfügung gestellte elektrische Leistung bis Mai 2012 immer weiter ab, da Kernkraftwerke für Sonderinspektionen vom Netz genommen wurden oder nach den regulär vorgenommenen Revisionen nicht mehr angefahren wurden. Vom 04.05.2012 bis zum 01.07.2012 war keines der 54 japanischen Kernkraftwerke am Netz (entspricht etwa 49 GW). Im Vergleich dazu waren Mitte März 2011 noch Kernkraftwerke mit insgesamt etwa 34 GW Leistung am Netz. [181], [182]

### **3.14.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Durch Schnellabschaltungen aufgrund des Erdbebens sowie Schäden an Anlagen oder deren Netzanbindungen fielen durch das Tōhoku Erdbeben und den nachfolgenden Tsunami 25 GW an Erzeugerleistung aus. Beim Energieversorger TEPCO gingen im Zusammenhang mit dem Erdbeben allein 14 GW vom Netz, darunter

- Fukushima Daiichi-1, -2 und -3 sowie Fukushima Daini-1, -2, -3 und -4 (7 Kernkraftblöcke mit 6,4 GW elektrischer Leistung)
- Hirono (Wärmekraftanlage, 2 Blöcke mit insgesamt 1,6 GW)
- Hitachinaka (Wärmekraftanlage 1 Block, 1 GW)
- Kashima (Wärmekraftanlage, 4 Blöcke, 3,2 GW)

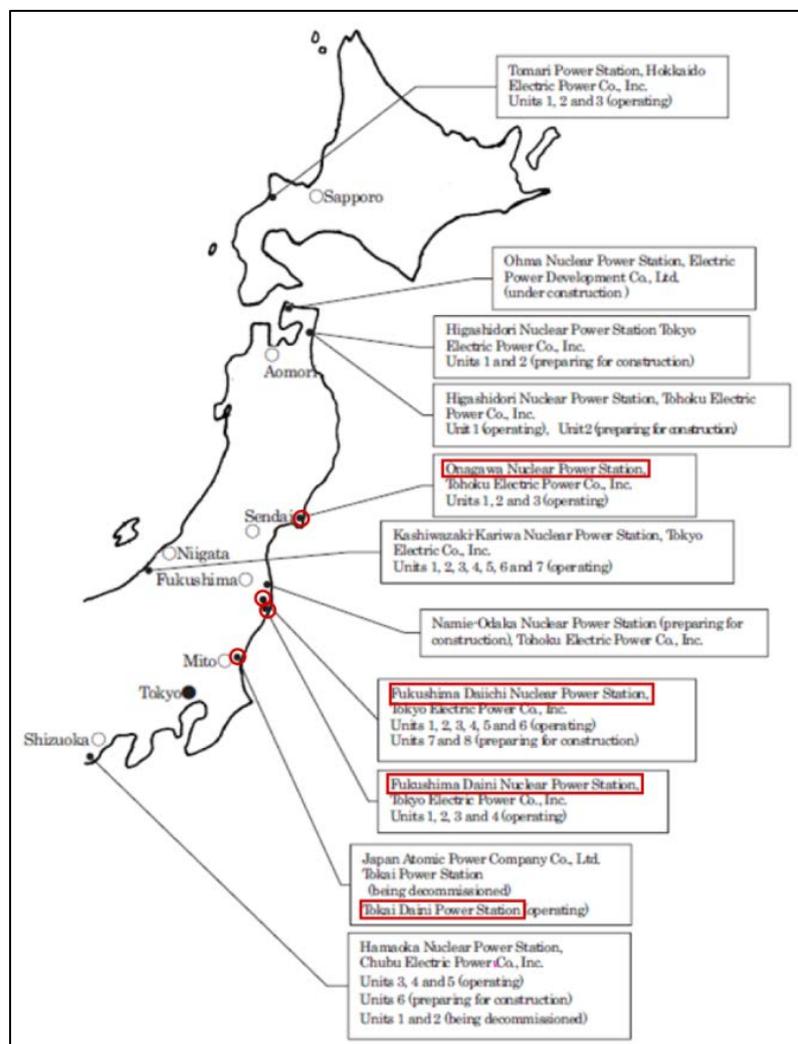
Insgesamt kam es aufgrund des Erdbebens in 10 Reaktorblöcken über die gemessenen Horizontalbeschleunigungen direkt zu einer Reaktorschnellabschaltung:

- Fukushima Daiichi 1-3
- Fukushima Daini 1-4
- Onagawa 1 und 3

- Tokai Daini

Weitere Blöcke an den betroffenen Standorten befanden sich zum Zeitpunkt des Erdbebens in Revision oder im Anfahrbetrieb.

Die Schäden durch das Erdbeben führten zu einem Ausfall der externen Stromversorgung bei allen sechs Blöcken am Kraftwerksstandort Fukushima Daiichi sowie der Anlage am Standort Tokai Daiichi. Die Überflutungen durch den Tsunami führten darüber hinaus an den Kraftwerksstandorten in Fukushima Daiichi und Fukushima Daini zu Schäden an der Notstromversorgung. Die betroffenen Kraftwerke sind in Abb. 3.29 markiert.



**Abb. 3.29** Lage der Kernkraftwerke im Norden Japans. [184] Rot markiert sind die Anlagen, die vom Erdbeben und Tsunami betroffenen waren.

Eine Übersicht über das Verhalten der betroffenen Kernkraftwerke nach dem Erdbeben mit nachfolgendem Tsunami ist in nachfolgender Tabelle gegeben.

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA ] Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Fukushima Daiichi-1	Ausfall der externen Stromversorgung	RESA	ja, Start beider Diesel	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Durch Überflutung des Anlagengeländes Versagen aller Notstromdiesel, Beschädigung von Drehstrom- und Gleichspannungsschienen, Versagen der Batterien, Block vollständig ohne Stromversorgung	Versagen aller Not- und Nachkühlsysteme innerhalb der ersten vier Tage nach dem Tsunami, Kernschmelze wird angenommen	11.3.2011, 20:00 Uhr: Wiederherstellung der 24-V-Versorgung einiger Warteninstrumente und kurz danach der Wartenbeleuchtung  12.3.2011, 7:20 Uhr: Wiederherstellung von Teilen der internen Stromversorgung, später teilweise wieder ausgefallen
Fukushima Daiichi-2	Ausfall der externen Stromversorgung	RESA	ja, Start beider Diesel	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Durch Überflutung des Anlagengeländes Versagen aller Notstromdiesel, Beschädigung von Drehstrom- und Gleichspannungsschienen, Versagen der Batterien, Block vollständig ohne Stromversorgung	Versagen aller Not- und Nachkühlsysteme innerhalb der ersten vier Tage nach dem Tsunami, Kernschmelze wird angenommen	20.3.2011, 15:46 Uhr Wiederherstellung der externen Stromversorgung

**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183]

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA] Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Fukushima Daiichi-3	Ausfall der externen Stromversorgung	RESA	ja, Start beider Diesel	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Durch Überflutung des Anlagengeländes Versagen aller Notstromdiesel, Beschädigung von Drehstromschienen	Versagen aller Not- und Nachkühlsysteme innerhalb der ersten vier Tage nach dem Tsunami, Kernschmelze wird angenommen, Versagen der Batterieversorgung nach Erschöpfung der Batterien	22.03.2011: Wiederherstellung der externen Stromversorgung
Fukushima Daiichi-4	Ausfall der externen Stromversorgung	Revision, alle BE im BE-Becken	ja, Start eines Diesels (2. wg. Instandhaltung nicht verfügbar)	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Durch Überflutung des Anlagengeländes Versagen, Ausfall des verfügbaren Diesels durch Überflutung der Schaltanlagen, Beschädigung von Drehstrom- und Gleichspannungsschienen, Versagen der Batterien, Block ohne Drehstromversorgung	Versagen der Brennelementbeckenkühlung innerhalb der ersten vier Tage nach dem Tsunami	22.03.2011: Wiederherstellung der externen Stromversorgung

**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183] (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA ] Lastabwurf / Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Fukushima Daiichi-5	Ausfall der externen Stromversorgung	Revision, RDB beladen, Druckprobe	ja, Start beider Diesel	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Überflutung des Anlagen geländes, Versagen aller Notstromdiesel durch Ausfall der Kühlwasserversorgung, Block im intermittierenden Betrieb vom einzig verfügbaren Notstromdiesel des Blocks 6 versorgt, Batterien waren intakt	-	22.03.2011: Wiederherstellung der externen Stromversorgung
Fukushima Daiichi-6	Ausfall der externen Stromversorgung	Revision, RDB beladen, Zustand unterkritisch kalt	ja, Start aller 3 Diesel	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel bis zum Eintreffen des Tsunami	Überflutung des Anlagen geländes, Versagen der wassergekühlten Notstromdiesel durch Ausfall der Kühlwasserversorgung, aber nicht des luftgekühlten Diesels, Versorgung des Blocks 6 und des Nachbarblocks 5 durch diesen Diesel im intermittierenden Betrieb		22.03.2011: Wiederherstellung der externen Stromversorgung

**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183] (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA] Lastabwurf/ Einspeisung Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Fukushima Daini-1	Ausfall von 3 von 4 Leitungen zum externen Netz	RESA	nein	nein	Unverfügbarkeit aller drei Dieselgeneratoren, nach wie vor Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-
Fukushima Daini-2		RESA	nein	nein	Unverfügbarkeit aller drei Dieselgeneratoren, nach wie vor Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-
Fukushima Daini-3		RESA	nein	nein	Unverfügbarkeit von einem von drei Dieselgeneratoren, nach wie vor Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-

**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183] (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA / Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Fukushima Daini-4		RESA	nein	nein	Unverfügbarkeit von zwei von drei Dieselgeneratoren, nach wie vor Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-
Onagawa-1	Ausfall von vier von fünf Leitungen zum externen Netz	RESA	nein	nein	keine, Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-
Onagawa-2		Anfahrbetrieb, RESA	nein	nein	Ausfall von zwei Dieselgeneratoren, Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-
Onagawa-3		RESA	nein	nein	keine, Versorgung der Anlage über die verbleibende Netzanbindung	-	-

**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183] (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Erdbebens auf die Stromversorgung der Anlage	RESA / Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Auswirkungen des Tsunami auf die Stromversorgung der Anlage	Auswirkungen des Stromausfalls auf die Anlage	Wiederherstellung der internen und der externen Stromversorgung
Tokai Daini	Ausfall der externen Stromversorgung	RESA	ja	Auslegungsgemäße Versorgung der Anlage über Diesel	keine, Versorgung der Anlage über die Dieselgeneratoren	keine Angaben	13.03.2011

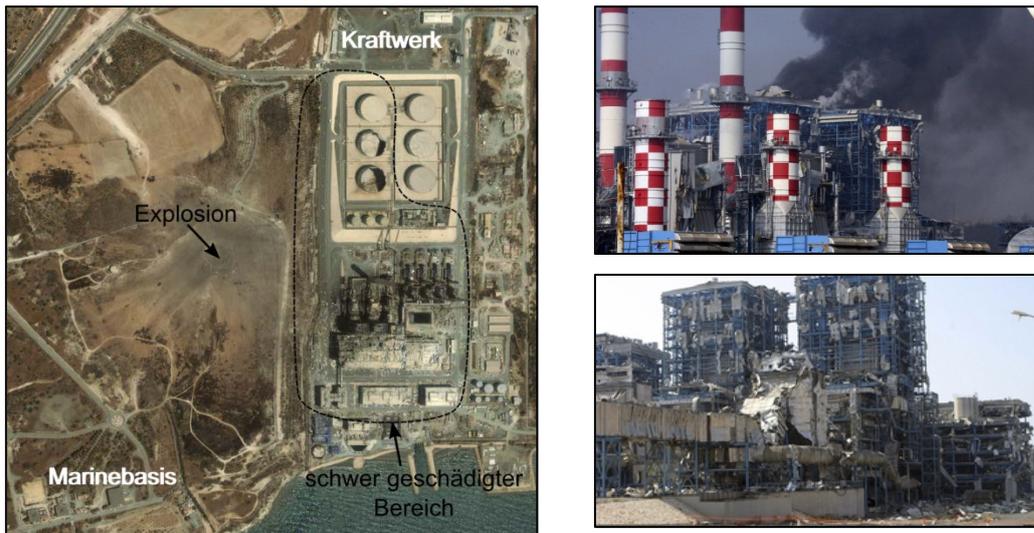
**Tab. 3.4** Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 [181], [182], [183] (Fortsetzung)

### **3.15 Netzausfall in Zypern, 2011**

#### **3.15.1 Ablauf**

Am 11.07.2011 kam es in Zypern durch eine Explosion in der Nähe des größten Kraftwerks des Landes zu weitreichenden Stromausfällen im griechischen Teil Zyperns und langandauernden Engpässen in der Stromversorgung der Insel [161].

Bei den Explosivstoffen handelte es sich um 98 Behälter mit Munition. Diese waren von den zypriotischen Behörden im Februar 2009 von einem Schiff konfisziert worden, das mit einem Waffentransport von Iran nach Syrien die Sanktionen der UN verletzte. Nach der Beschlagnahmung wurden die Munitionsbehälter unter freiem Himmel auf dem Gelände der Evangelos Florakis Marinebasis gelagert, nur etwa 300 m vom Kraftwerk Vasilikos entfernt, das als größtes Kraftwerk Zyperns Strom für etwa die Hälfte der Insel liefert. Am 11.07.2011 kam es, vermutlich in Verbindung mit einem Buschfeuer, zu einer Explosion der Behälter. Schätzungen zufolge waren an der Explosion etwa 2000 t Munition beteiligt. Dabei wurde das unmittelbar östlich gelegene Kraftwerk Vasilikos schwer beschädigt (siehe Abb. 3.30). [162], [164], [165]



**Abb. 3.30** Schäden am Kraftwerk Vasilikos durch die Explosion am 11.07.2011.  
(Fotos: Hellas SAT, Reuters)

Das Kraftwerk Vasilikos verfügte vor der Explosion über drei ölbefeuerte Dampfturbinen, eine Gasturbine und einen Gas-und-Dampf-Kombiblock mit insgesamt 640 MW elektrischer Leistung. Der Bau eines weiteren Gas-und-Dampf-Kombiblocks mit zusätzlichen 220 MW war bereits weit fortgeschritten. Die Explosion traf alle Kraftwerksblöcke und führte zu einem Komplettausfall des Kraftwerks. Kurz nach der Explosion war damit etwa die Hälfte Zyperns einschließlich der Hauptstadt Nikosia ohne Strom. Um einen völligen Zusammenbruch des Stromnetzes zu verhindern, wurden anschließend gezielte, mehrere Stunden dauernde Lastabwürfe vorgenommen. Diese gezielten Lastabwürfe wurden über mehrere Wochen weitergeführt. [161], [162]

Aufgrund der Stromengpässe mussten Meerwasserentsalzungsanlagen außer Betrieb genommen und das Trinkwasser rationiert werden. [164]

### 3.15.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

In Zypern werden keine Kernkraftwerke betrieben. Der Stromausfall in Zypern am 11.07.2011 sowie die gezielten Lastabwürfe in den folgenden Wochen sind auf die schweren Schäden und Zerstörungen sowie die dadurch notwendigen umfangreichen Reparatur- und Bauarbeiten im Kraftwerk Vasilikos zurückzuführen. Informationen zu Auswirkungen des Stromausfalls auf weitere konventionelle Kraftwerke sind der GRS derzeit nicht bekannt.

Die Schäden am Kraftwerk Vasilikos wirken sich bis heute (Stand Juni 2013) auf die Stromversorgung in Zypern aus. Die Wiederherstellung der Versorgung wurde innerhalb von etwa 8 Wochen durch eine Reihe von provisorischen Maßnahmen erreicht. Im Kraftwerk Vasilikos wurden innerhalb von fünf Wochen mobile Generatoren mit mehr als 70 MW auf dem Kraftwerksgelände aufgestellt. Auch an anderen Standorten wurden bis Ende August mobile Generatoren mit insgesamt etwa 110 MW in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurden für ein halbes Jahr Stromlieferungen von bis zu 120 MW aus dem türkischen Teil Zyperns ausgehandelt. Parallel dazu wird am Wiederaufbau des Kraftwerks Vasilikos gearbeitet. Bis zum 17.08.2011 konnte die schwarzstartfähige 38-MW-Gasturbine wieder hergestellt und in Betrieb genommen werden. Etwa ein Jahr nach der Explosion, am 07.07.2012 waren die beiden 75-MW Gasturbinen in Block 5 betriebsbereit. Ende August 2013 waren auch die Reparaturarbeiten an der verbleibenden 70-MW-Dampfturbine sowie zwei 75-MW-Gasturbinen in den Blöcken 4 und 5 abgeschlossen. [161], [163], [250]

### **3.16 Netzausfall in Hannover, Deutschland, 2011**

#### **3.16.1 Ablauf**

Am 13.07.2011 kam es im Stadtgebiet von Hannover zum vollständigen Erliegen der Stromversorgung. Von dem Stromausfall betroffen waren etwa 600 000 Menschen. [167]

Ursache für die komplette Unterbrechung der Stromversorgung in Hannover waren zwei voneinander unabhängige technische Defekte. Die Netzstörung wurde ausgelöst durch die Schutzabschaltung des Kohlekraftwerks Stöcken-2 aufgrund eines Umrichterdefekts an einer Kohlemühle. Dies führte zu einer Verschiebung der Leistungsflüsse im Stromnetz um Hannover, insbesondere zu einem Anstieg der Leistungsflüsse über zwei Hochspannungsleitungen und die beiden 110/220-kV-Transformatoren im Umspannwerk Mehrum, da die in Stöcken ausgefallene Leistungserzeugung durch das Kraftwerk in Mehrum kompensiert werden sollte. Aufgrund eines passiven Fehlers in einer Transformatorschutzeinrichtung kam es aber zu einer Schutzabschaltung der Transformatoren im Umspannwerk Mehrum und damit zu einer Unterbrechung der Anbindung ans 220-kV-Netz. Bei der Transformatorschutzeinrichtung handelte es sich um ein Teil des Distanzschutzes, genauer um ein Unterimpedanz-Anfrage-Relais. Dieses Relais löste aus, weil es aufgrund eines durchgebrannten Kondensators einen Wert

oberhalb des eingestellten Grenzwertes feststellte, obwohl dieser tatsächlich gar nicht vorlag. Das Kraftwerk in Mehrum konnte nach der Schutzabschaltung der Transformatoren im Umspannwerk nicht mehr in 110-kV-Netz der Stadt Hannover einspeisen. Der verbliebene Block 1 im Kohlekraftwerk Stöcken konnte allein die in Hannover geforderte Leistung im 110-kV-Netz nicht mehr decken, daher kam es um 22.34 Uhr zur Schutzabschaltung des Blocks und daraufhin zum Zusammenbrechen der Stromversorgung in Hannover. [166], [167], [168]

Um 23.55 war die Stromversorgung in Hannover nach dem Hochfahren von Kraftwerkskapazitäten und der Zuschaltung anderer Kupplungen ans Hochspannungsnetz wiederhergestellt. [168]

### **3.16.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Im vom Stromausfall betroffenen Gebiet werden keine Kernkraftwerke betrieben. Nach derzeitigen Informationen der GRS hatte die durch die Verbindung der oben beschriebenen technischen Defekte ausgelöste Netzstörung nur auf Block 1 des Kohlekraftwerks Stöcken einen direkten Einfluss.

## **3.17 Netzausfall in Indien, 2012**

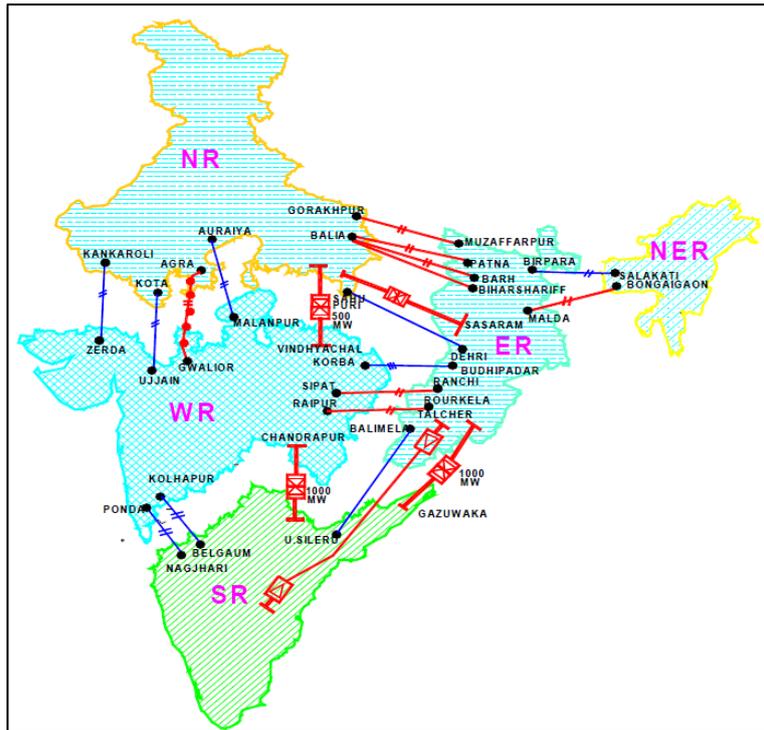
### **3.17.1 Ablauf**

Am 30.07.2012 und am 31.07.2012 ereigneten sich in Indien die – nach der Anzahl der betroffenen Personen (360 Millionen bzw. 680 Millionen Menschen) – bislang umfangreichsten Stromausfälle. Die von den Stromausfällen betroffenen indischen Bundesstaaten sind in Abb. 3.31 dargestellt.



**Abb. 3.31** Vom Stromausfall am 30.07.2012 und vom Stromausfall am 31.07.2012 betroffene indische Bundesstaaten [53], [54], [55], [56], [185]. Dunkelrot markiert sind die Bundesstaaten, die vom nördlichen oder östlichen Netz versorgt werden. Die Bundesstaaten des nördlichen Netzes waren fast vollständig vom Stromausfall am 30.07.2012 betroffen, die Bundesstaaten des östlichen Netzes waren einigen Quellen zufolge am 30.07.2012 zumindest teilweise betroffen. Vom Stromausfall am 31.07.2012 waren zusätzlich zu den dunkelrot markierten Bundesstaaten auch die Bundesstaaten, die vom nordöstlichen Netz versorgt werden, betroffen. Diese sind hellrot markiert.

Das Stromnetz in Indien ist in fünf Netze aufgeteilt: das nördliche Netz (NR), das östliche Netz (ER), das Nordöstliche Netz (NER), das westliche Netz (WR) und das südliche Netz (SR) (siehe Abb. 3.32). Seit einigen Jahren sind die vier Netze im Norden, Osten, Nordosten und Westen synchronisiert und arbeiten als ein Verbundnetz. Das Netz im Süden ist über HGÜs asynchron angebunden. Der Strombedarf in Indien beläuft sich derzeit auf etwa 110 GW, davon entfallen auf den Süden etwa 30 GW, der Rest auf das Verbundnetz aus NR, ER, NER und SR.



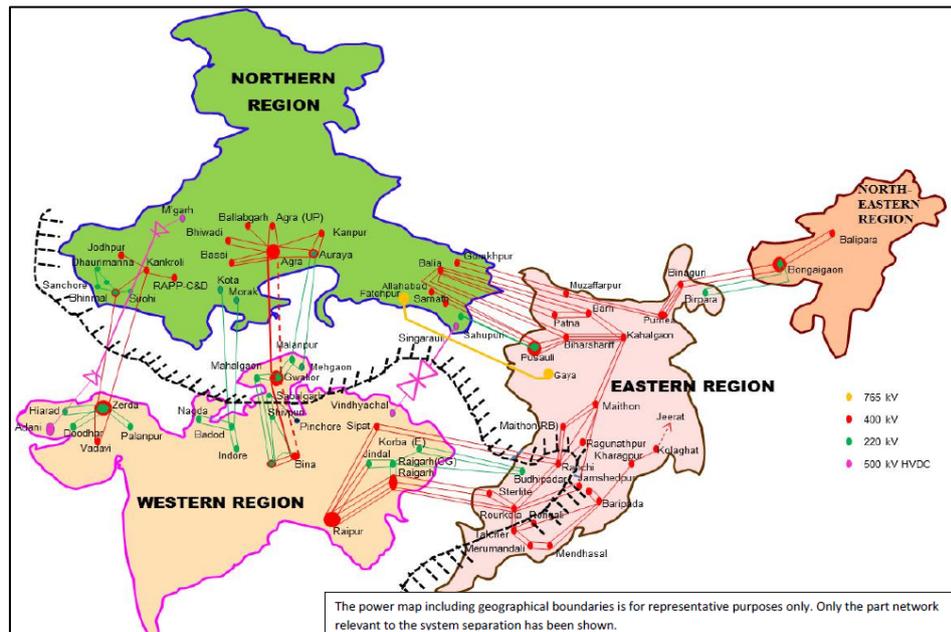
**Abb. 3.32** Indisches Stromnetz

Am 30.07.2012 und am 31.07.2012 ereigneten sich Stromausfälle, die jeweils das nördliche und das östliche Netz betrafen (NR und ER), sowie am 31.07.2010 zusätzlich das nordöstliche Netz (NR, ER und NER). An beiden Tagen konnte das nördliche Netz seinen erhöhten Bedarf nicht eigenständig decken und es floss eine so große Menge Strom aus der westlichen in die nördliche Region, dass das Netz seine Belastungsgrenzen erreichte. Es herrschte sowohl am 30. als auch am 31.07.2012 ein großer Überschuss an Erzeugerleistung im westlichen Netz sowie ein sehr hoher Verbrauch im nördlichen Netz. Die Zahl der Übertragungsleitungen zwischen dem westlichen und dem nördlichen Netz war stark eingeschränkt aufgrund von Freischaltungen von Leitungen oder Leitungsausfällen durch Überspannung oder Überlast. [185]

Am 30.07.2012 fielen um 00:10 Uhr und um 01:35 Uhr zwei 220-kV-Leitungen zwischen WR und NR aufgrund von Überlast aus. Mit dem Ausfall einer weiteren 220-kV-Übertragungsleitung um 02:33 Uhr kam es innerhalb weniger Sekunden zum kaskadenartigen Ausfall von elf weiteren Hoch- bzw. Höchstspannungsleitungen. Dadurch trennte sich das nördliche Netz vom westlichen und vom östlichen Netz. Nachfolgend brach die Netzspannung im nördlichen Netz ein, bereits nach 6,5 Sekunden lag die Frequenz unterhalb von 47,5 Hz. Dies führte durch den dann einsetzenden Lastabwurf der Erzeugungseinheiten zum Zusammenbruch des nördlichen Netzes. In den restlichen Teilen des Verbundnetzes (WR, ER und NER) stieg die Netzfrequenz auf

50,92 Hz an. Einige Erzeugungseinheiten schalteten sich daraufhin ab und Übertragungsleitungen wurden automatisch aufgrund Überspannung abgeschaltet. Vom Stromausfall war bis auf wenige Gebiete, die mit dem westlichen oder östlichen Netz verbunden blieben, das gesamte nördliche Netz betroffen. Insgesamt wurden 38 GW Leistung nicht mehr bereitgestellt. Der Netzwiederaufbau war gegen 16 Uhr am selben Tag abgeschlossen. [185], [186], [187]

Eine weitere Netzstörung mit noch großflächigeren Stromausfällen ereignete sich einen Tag später, am 31.07.2012 gegen 13 Uhr. Die Situation vor der Störung war vergleichbar zu der am 30.07.2012. Zusätzlich waren noch einige Übertragungsleitungen und einige Erzeugungseinheiten aufgrund der vorausgegangenen Netzstörung nicht wieder in Betrieb. Bereits am frühen Morgen mussten zwei Höchstspannungsleitungen außer Betrieb genommen werden, nachdem sie sich zuvor mehrfach wegen Fehlern abgeschaltet hatten. Um 12:56 Uhr und 12:58 Uhr schalteten sich zwei 220-kV-Leitungen aufgrund von Überlast ab. Nach dem Ausfall einer weiteren 400-kV-Leitung um 13:00 Uhr kam es innerhalb weniger Sekunden zu einem kaskadenartigen Ausfall von 12 weiteren Hoch- und Höchstspannungsleitungen. Damit spaltete sich das Verbundnetz auf und das nördliche, nordöstliche und östliche Netz trennten sich vom westlichen Netz. Die Netzfrequenz im westlichen Netz stieg sprunghaft auf 51,46 Hz an und stabilisierte sich nach Lastabwürfen und Abschaltungen von Leitungen bei etwa 51 Hz. Im über eine HGÜ asynchron angebundenes südliches Netz fiel die Netzfrequenz auf 48,88 Hz ab. Die Frequenz in den nach wie vor verbundenen Netzen (nördliches Netz, nordöstliches Netz und östliches Netz) fiel rasch ab und stabilisierte sich zunächst bei 48,12 Hz. Maßnahmen zur Anhebung der Netzfrequenz (z. B. Lastabwurf) griffen nicht oder nicht schnell genug. Um 13:01 Uhr fiel die Netzfrequenz, vermutlich aufgrund von durch Unterfrequenz schutzabgeschalteten Erzeugungseinheiten, weiter ab und das Netz brach 17 Sekunden später vollständig zusammen. Insgesamt fehlten im nördlichen, nordöstlichen und östlichen Netz 48 GW Erzeugerleistung. Die Abspaltung der – in der Folge vom Stromausfall betroffenen – Gebiete vom Verbundnetz ist in Abb. 3.33 dargestellt. Der Netzwiederaufbau war gegen 21:30 Uhr abgeschlossen. [185], [186], [187]



**Abb. 3.33** Abspaltung des nördlichen, des östlichen und des nordöstlichen Netzes vom gemeinsamen Verbundnetz mit dem westlichen Netz am 31.07.2012 [185]

### 3.17.2 Auswirkungen auf Kraftwerke

In Indien werden derzeit an sechs Standorten insgesamt 20 Kernkraftwerke betrieben. Im Norden Indiens und damit in von den Stromausfällen am 30.07.2012 und 31.07.2012 betroffenen Bundesstaaten liegen die Standorte Narora (Uttar Pradesh) und Rawatbhata (Rajasthan). Zum Zeitpunkt des ersten Stromausfalls am 30.07.2012 gegen 02:33 Uhr waren an diesen Standorten 7 Druckschwerwasserreaktoren mit je 220 MW Leistung in Betrieb:

- die beiden Blöcke Narora-1 und Narora-2 sowie
- die fünf Blöcke Rawatbhata-2, -3, -4, -5 und -6.

Am 30.07.2012 schalteten sich alle Blöcke in Rawatbhata aufgrund der Netzstörung ab. Die beiden Blöcke in Narora führten einen automatischen Lastabwurf auf Eigenbedarf durch und blieben zunächst in diesem Zustand (Deckung des Eigenbedarfs und Abblasen über Dach). Im Rahmen des Netzwiederaufbaus wurde um die Anlage in Narora ein Inselnetz aufgebaut, das von den beiden Blöcken versorgt wurde. Dieses wurde nach und nach vergrößert und schließlich mit anderen Netzteilen synchronisiert.

Am 31.07.2012 befanden sich die Blöcke in Rawatbhata noch im abgeschalteten Zustand. In den beiden Blöcken in Narora erfolgte wie schon einen Tag zuvor ein automa-

tischer Lastabwurf auf Eigenbedarf (Deckung des Eigenbedarfs und Abblasen über Dach) und die Blöcke versorgten später im Rahmen des Netzwiederaufbaus ein Inselnetz. [185]

### 3.18 Netzausfall in den USA, der Karibik und Kanada, 2012

#### 3.18.1 Ablauf

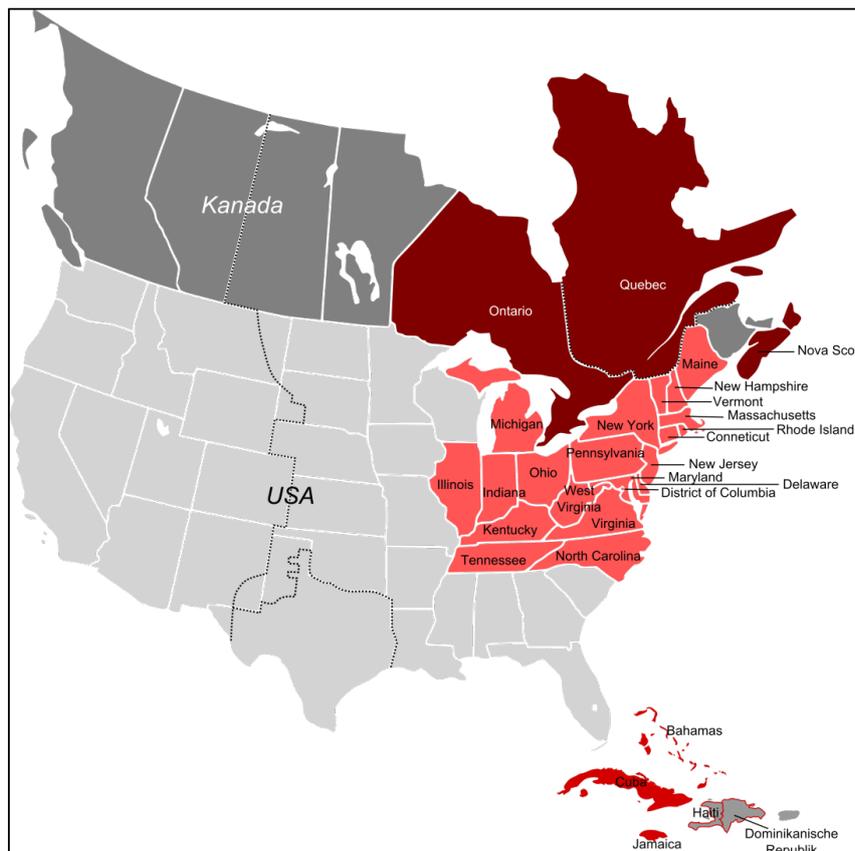
Zwischen dem 22.10.2012 und dem 31.10.2012 bewegte sich der Hurrikan „Sandy“ über die Karibik, das US-amerikanische und das kanadische Festland. Dabei kam es unter anderem zu Schäden am Übertragungsnetz durch abknickende Strommasten, umstürzende Bäume, umherfliegende Trümmerteile und Überflutungen (siehe Abbildung 36). Die Folgen waren massive Stromausfälle in Jamaika, Kuba, dem Osten der USA und einigen Provinzen Kanadas (Abb. 3.34).



**Abb. 3.34** Durch Hurrikan Sandy verursachte Schäden am Stromnetz in den USA. (links: Getty Images, rechts: Mark Wilson/Getty Images)

Allein in den USA waren am 30.10.2012 über 8,2 Millionen Verbraucher ohne Strom [170]. Am stärksten betroffen war der Bundesstaat New Jersey, in dem zwei Drittel der Verbraucher ohne elektrische Versorgung waren (zum Vergleich der Anzahl von Personen und Verbrauchern: New Jersey hat ca. 8,8 Millionen Einwohner, die sich auf etwa 4 Millionen Stromverbraucher verteilen). Jeweils etwa ein Fünftel bis ein Drittel der Verbraucher waren in den Bundesstaaten Connecticut, New Hampshire, New York, Pennsylvania, Rhode Island und West Virginia von Stromausfällen betroffen. Des Weiteren kam es in den Bundesstaaten Delaware, Illinois, Indiana, Kentucky, Maine, Maryland, Massachusetts, Michigan, North Carolina, Ohio, Tennessee, Vermont, Virginia und dem District of Columbia teilweise zu Unterbrechungen der Stromversorgung. [170]

Die kanadischen Stromversorger meldeten Stromausfälle bei über 200 000 Verbrauchern in Ontario, Quebec und Nova Scotia [171]. In Jamaika waren nach Angaben des einzigen Stromversorgers Jamaica Public Service 70 % der Verbraucher ohne Strom [172] (zum Vergleich der Anzahl von Personen und Verbrauchern: Jamaika hat ca. 2,8 Millionen Einwohner, diese verteilen sich auf ca. 585 000 Verbraucher). Nach Angaben des UNDP (United Nations Development Programme) waren in Kuba mehr als 890 000 Menschen infolge des Hurrikans ohne elektrische Versorgung [173]. Auch die Bahamas waren von Stromausfällen betroffen [174].



**Abb. 3.35** Von Netzausfällen im Zusammenhang mit dem Hurrikan Sandy (22.10.2012 bis 31.10.2012) komplett oder teilweise betroffene Gebiete der USA (hellrot), Kanadas (dunkelrot) und der Karibik (rot). Zur Karibik ist dabei anzumerken, dass aus Haiti und der Dominikanischen Republik (rot umrandet) enorme Zerstörungen gemeldet, Stromausfälle in den Berichten aber nicht explizit genannt werden.

Aufgrund der schweren Schäden am Übertragungsnetz sowie aufgrund von Überflutungen und Brandschäden dauerte der Wiederaufbau des Netzes in einigen Gegenden längere Zeit an. So waren in den USA 10 Tage nach den ersten Stromausfällen immer

noch 650 000 Verbraucher in den am schwersten betroffenen Bundesstaaten New Jersey, New York, Pennsylvania und West Virginia ohne elektrische Versorgung. [175]

Auch in den anderen betroffenen Gebieten, wie beispielsweise in Kuba, dauerten die Arbeiten am Wiederaufbau des Stromnetzes mehrere Tage an. Dort waren allein durch umstürzende Bäume 127 Hochspannungsleitungen beschädigt worden. Nach 10 Tagen hatten 83 % der vom Stromausfall betroffenen Einwohner wieder Strom. [177]

### **3.18.2 Auswirkungen auf Kraftwerke**

Bereits vor Eintreffen des Hurrikans Sandy an der amerikanischen Ostküste wurden von der NRC Vorsichtsmaßnahmen für einige Anlagen ergriffen. Zu diesen Vorsichtsmaßnahmen zählten die Entsendung von mindestens zwei „NRC Resident Inspectors“ in jede Anlage, die die Vorbereitungen vor Ort wie beispielsweise das Befestigen loser Teile auf dem Anlagengelände, überwachen sollten und für den Ausfall der Telekommunikationsnetze mit Satellitentelefonen ausgerüstet waren, um immer den Kontakt zur NRC zu halten. Zusätzlich hat jede US-Anlage Vorgaben zu den Windgeschwindigkeiten, bei denen die Reaktoren manuell abgeschaltet werden müssen.

Vorsichtsmaßnahmen wurden für folgende Anlagen ergriffen:

- Calvert Cliffs-1 und -2 (Maryland)
- Salem-1 und -2 (New Jersey)
- Hope Creek (New Jersey)
- Oyster Creek (New Jersey)
- Peach Bottom-2 und -3 (Pennsylvania)
- Three Mile Island-1 (Pennsylvania)
- Susquehanna-1 und -2 (Pennsylvania)
- Indian Point-2 und -3 (New York)
- Millstone-2 und -3 (Connecticut)

Insgesamt lagen 34 US-amerikanische Kernkraftwerke im vom Hurrikan Sandy betroffenen Gebiet. Alle Anlagen reagierten auf die Netzstörung auslegungsgemäß. 19

dieser Anlagen blieben vom Hurrikan unbeeinflusst und wurden während des Sturms bei Volllast betrieben. 7 Anlagen befanden sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision.

Durch vom Hurrikan verursachte Netzstörungen und hohe Wasserstände an den Einlaufbauwerken wurden in einigen Anlagen Block- und Reaktorschutzmaßnahmen ausgelöst. Während des Hurrikans kam es in zwei Anlagen aufgrund der durch die Schäden am Stromnetz ausgelösten Netzstörungen zu Reaktorschnellabschaltungen. Eine Anlage musste manuell schnellabgeschaltet und über Dach abgefahren werden, nachdem es aufgrund des Sturms zu einer Außerbetriebnahme der Kühlwasserpumpen gekommen war. Bei einer weiteren Anlage kam es zu einem vollständigen Netzausfall. Diese Anlage, die sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision befand, wurde über Notstromdiesel versorgt. Zusätzlich wurde in vier Anlagen eine Leistungsreduktion vorgenommen, um auf die Netzschwankungen zu reagieren und dem entstandenen Ungleichgewicht zwischen erzeugter Leistung und Last entgegenzuwirken. [178], [179], [180]

Eine Übersicht über das Verhalten der US-amerikanischen Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy Ende Oktober/Anfang November 2012 ist in nachfolgender Tabelle gegeben.

Anlage	Auswirkungen des Hurrikans auf die Anlage	RESA/Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung
Salem-1	Durch den Hurrikan wurden die Kühlwasserpumpen in ihrer Funktion beeinträchtigt und außer Betrieb genommen (aber nicht beschädigt). Daraufhin wurde die Anlage am 30.10.2012 um 05:13 Uhr manuell abgeschaltet und über Dach abgefahren.	manuelle RESA	nein	nein	-
Oyster Creek	Die Anlage befand sich zu Beginn des Hurrikans bereits einige Tage in der Revision. Am 29.10.2012 wurde um 20:45 Uhr ein „Alarm“ (zweite von vier Warnstufen) ausgegeben. Während des Sturms brach die externe Stromversorgung zusammen (29.10.2012, 20:18 Uhr) und die Anlage wurde über Notstromdiesel versorgt.	-	ja	ja	31.10.2012, am Morgen
Indian Point-3	Der Generatorschutz schaltete aufgrund von Netzstörungen während des Hurrikans die Anlage am 29.10.2012 um 22:40 Uhr ab.	RESA	keine Aussage	keine Aussage	-

**Tab. 3.5** Verhalten US-amerikanischer Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy 2012 (ausgenommen Anlagen, die sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision befanden). [178], [179], [180]

Anlage	Auswirkungen des Hurrikans auf die Anlage	RESA/Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Notstromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstellung der externen Stromversorgung
Nine Mile Point-1	Der Generatorschutz schaltete aufgrund von Netzstörungen während des Hurrikans die Anlage am 29.10.2012 um 21:00 Uhr ab. Zuvor war ein elektrischer Defekt auf einer Hochspannungsleitung ins Netz aufgetreten	RESA	nein	nein	-
Millstone-3	Leistungsreduktion auf 70 % Reaktorleistung als Vorsichtsmaßnahme schon vor dem Hurrikan	-	-	-	-
Limerick-1	Leistungsreduktion auf 50 % während des Hurrikans, nachdem der Bedarf aufgrund von Stromausfällen und Schäden am Übertragungsnetz gesunken war	-	-	-	-
Limerick-2	Leistungsreduktion auf 25 % während des Hurrikans, nachdem der Bedarf aufgrund von Stromausfällen und Schäden am Übertragungsnetz gesunken war	-	-	-	-

**Tab. 3.5** Verhalten US-amerikanischer Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy 2012 (ausgenommen Anlagen, die sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision befanden). [178], [179], [180]. (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Hurrikans auf die Anlage	RESA/Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Not- stromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstel- lung der exter- nen Stromver- sorgung
Vermont Yankee	Leistungsreduktion auf 89 % während des Hurrikans auf eine Bitte des Netzbetreibers hin, um Spannungsschwankungen im Netz nach dem Ausfall einer Übertragungsleitung zu minimieren	-	-	-	-
Nine Mile Point-2	Verlust einer Netzanbindung (von zwei) aufgrund der Beschädigung von elektrischen Komponenten in einer Schaltanlage außerhalb der Anlage durch einen herabstürzenden Blitzableiter und daraufhin automatischer Start eines Notstromdiesels (29.10.2012, 21:00 Uhr). Die Anlage blieb im ungestörten Vollastbetrieb	nein	nein	nein	Wiederherstellung der betroffenen Netzanbindung am 30.10.2012, 3:26 Uhr

**Tab. 3.5** Verhalten US-amerikanischer Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy 2012 (ausgenommen Anlagen, die sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision befanden). [178], [179], [180]. (Fortsetzung)

Anlage	Auswirkungen des Hurrikans auf die Anlage	RESA/Lastabwurf/ Einspeisung ins Netz	Not- stromfall	Versorgung über Diesel	Wiederherstel- lung der exter- nen Stromver- sorgung
Clavert Cliffs-1, Calvert Cliffs-2, Pilgrim-1, Hope Creek-1, Indian Point-2, Fitzpatrick, Nine Mile Point-2, Brunswick-1, Brunswick-2, Davis-Besse, Peach Bottom-2, Peach Bottom-3, Three Mile Is- land-1, Beaver Valley-1, Surry-1, Surry-2, North Anna-1, North Anna-2,	Vollastbetrieb vor Beginn, während und nach Abklingen des Sturms	-	-	-	-
Susquehanna-2	Betrieb bei 75 % Leistung vor Beginn, wäh- rend und nach Abklingen des Sturms	-	-	-	-

**Tab. 3.5** Verhalten US-amerikanischer Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy 2012 (ausgenommen Anlagen, die sich zum Zeitpunkt des Hurrikans in Revision befanden). [178], [179], [180]. (Fortsetzung)



## 4 Bewertung der Netzausfälle

Ein Netzausfall ist in den meisten Fällen nicht auf eine einzelne Ursache zurückzuführen, sondern die Folge des Zusammentreffens mehrerer Ursachen. Die in Kapitel 3 geschilderten Netzausfälle wurden teilweise durch recht unterschiedliche Ursachen ausgelöst, allerdings finden sich oftmals vergleichbare Ursachen, die direkt oder indirekt zur Auslösung oder zum Verlauf einer Netzstörung oder eines Netzausfalls beigetragen haben. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

Einige der Netzstörungen oder Netzausfälle wurden durch das gleichzeitige oder zeitnahe Zusammentreffen mehrerer unabhängiger Fehler verursacht. Überwiegend spielten dabei eine Rolle:

- Technische Defekte, oft auch die Überlagerung mehrerer unabhängiger technischer Defekte, wie beispielsweise
  - 2003 in Großbritannien (siehe Abschnitt 3.2),
  - 2003 in Dänemark und Schweden (siehe Abschnitt 3.3),
  - 2003 in Italien (siehe Abschnitt 3.4),
  - 2004 in Luxemburg und Deutschland (siehe Abschnitt 3.6),
  - 2008 in Florida (siehe Abschnitt 3.10),
  - 2009 in Brasilien und Paraguay (siehe Abschnitt 3.13) oder
  - 2011 in Hannover (siehe Abschnitt 3.16).
- Menschliche Fehleinschätzungen oder fehlerhafte Personalhandlungen, wie beispielsweise
  - 2003 in den USA und Kanada (siehe Abschnitt 3.1),
  - 2003 in Großbritannien (siehe Abschnitt 3.2),
  - 2005 in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.7),
  - 2006 in Europa (siehe Abschnitt 3.9) oder
  - 2008 in Florida (siehe Abschnitt 3.10).

- Ungleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung bzw. unzureichende Kapazitäten für die Produktion und Verteilung der elektrischen Energie, wie beispielsweise
  - 2003 in den USA und Kanada (siehe Abschnitt 3.1),
  - 2003 in Italien (siehe Abschnitt 3.4),
  - 2004 in Griechenland (siehe Abschnitt 3.5) oder
  - 2012 in Indien (siehe Abschnitt 3.17).

In vielen Fällen wurde der Verlauf der Netzstörung durch weitere Faktoren zusätzlich begünstigt:

- Kommunikationsprobleme bei der Verständigung der Beteiligten, unzureichender Koordination oder zu langsames Ergreifen von Korrekturmaßnahmen, wie beispielsweise
  - 2003 in den USA und Kanada (siehe Abschnitt 3.1),
  - 2003 in Dänemark und Schweden (siehe Abschnitt 3.3),
  - 2003 in Italien (siehe Abschnitt 3.4),
  - 2005 in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.7) oder
  - 2006 in Europa (siehe Abschnitt 3.9).
- Fehlerhafte oder ungeeignete Überwachungseinrichtungen des Netzes, wie beispielsweise
  - 2003 in den USA und Kanada (siehe Abschnitt 3.1),
  - 2005 in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.7).

- Lange Stromtransportwege aufgrund starker räumlicher Entfernung zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung, wie beispielsweise
  - 2003 in Dänemark und Schweden (siehe Abschnitt 3.3),
  - 2003 in Italien (siehe Abschnitt 3.4),
  - 2004 in Griechenland (siehe Abschnitt 3.5),
  - 2005 in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.7),
  - 2009 in Brasilien und Paraguay (siehe Abschnitt 3.13) oder
  - 2012 in Indien (siehe Abschnitt 3.17).
- Aufspaltung des Netzes in Teilnetze, wie beispielsweise
  - 2003 in Italien (siehe Abschnitt 3.4),
  - 2006 in Europa (siehe Abschnitt 3.3) oder
  - 2012 in Indien (siehe Abschnitt 3.17).
- Verletzung der (n-1)-Sicherheit, wie beispielsweise
  - 2005 in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.7) oder
  - 2011 in Kalifornien, Arizona und Mexico (siehe Anhang).

Davon grundsätzlich zu unterscheiden sind Netzausfälle, bei denen es durch externe Ereignisse zu schweren Schäden am Stromnetz oder an Erzeugungskapazitäten kam:

- Schäden am Stromnetz durch Witterungseinflüsse oder Naturereignisse, wie beispielsweise
  - 2005 im Münsterland (siehe Abschnitt 3.8),
  - 2009 in Frankreich und Spanien (siehe Abschnitt 3.11),
  - 2011 in Japan (siehe Abschnitt 3.14) oder
  - 2012 in den USA, der Karibik und Kanada (siehe Abschnitt 3.18).

- Schäden am Stromnetz oder dessen Regelung durch menschliche Einflüsse, wie beispielsweise
  - 2007 in Brasilien (siehe Anhang) oder
  - 2009 in London (siehe Abschnitt 3.12).
- Schwere Beschädigung von Erzeugungseinheiten durch Witterungseinflüsse oder Naturereignisse, wie beispielsweise
  - 2011 in Japan (siehe Abschnitt 3.14)
- Schwere Beschädigung von Erzeugungseinheiten durch menschliche Einflüsse, wie beispielsweise
  - 2011 in Zypern (siehe Abschnitt 3.15).

## **Teil B: Auswertung der nationalen und internationalen Betriebs- erfahrung bei Notstromfällen**

### **1 Mögliche Ursachen für einen Notstromfall**

Ein Notstromfall ist dadurch charakterisiert, dass alle block- und netzseitigen Versorgungsmöglichkeiten für die Eigenbedarfsanlage nicht zur Verfügung stehen. Grundsätzlich kann ein Notstromfall also nur durch eine Kombination mehrerer Fehler oder ein Ereignis, das zur Unverfügbarkeit beider Netzanschlüsse und zur Reaktorschnellabschaltung führt, hervorgerufen werden. Wie viele Einrichtungen bis zum Eintreten eines Notstromfalls versagen müssen, hängt neben der möglicherweise eintretenden Netzstörung zum einen vom Anlagenzustand und zum anderen von möglichen Instandhaltungsmaßnahmen ab.

Als Ursachen für einen Notstromfall beispielsweise denkbar sind die im Folgenden aufgeführten Fehler und Ereignisse.

#### Leistungsbetrieb der Anlage

- Netzstörung im Verbundnetz, die sowohl Haupt- als auch Reservenetzanschluss betrifft, und nicht erfolgreicher Lastabwurf auf Eigenbedarf.
- Anlageninterner Fehler in einem Eigenbedarfstransformator oder Maschinentransformator und Fehlschlagen der Umschaltung auf das Reservenetz.
- Naturbedingte oder zivilisatorisch bedingte Einwirkung von außen, die zur Zerstörung beider Netzanschlüsse führt sowie eine Schnellabschaltung des Reaktors nach sich zieht.

#### Anlagenstillstand

- Netzstörung im Verbundnetz, die sowohl Haupt- als auch Reservenetzanschluss betrifft.
- Netzstörung im Verbundnetz, die nur Haupt- oder Reservenetzanschluss betrifft, bei gleichzeitiger Freischaltung des jeweils anderen Netzanschlusses für Instandhaltungsmaßnahmen.

- Anlageninterner Fehler, der zum Ausfall einer Netzeinspeisung führt, bei gleichzeitiger Freischaltung des jeweils anderen Netzanschlusses für Instandhaltungsmaßnahmen.
- Naturbedingte oder zivilisatorisch bedingte Einwirkung von außen, die zur Zerstörung der verfügbaren Netzanschlüsse führt.

## **2 Ereignisse der Jahre 2003 bis 2012**

### **2.1 Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung**

Zu großflächigen Stromausfällen mit Notstromfällen in Kernkraftwerken ist es in der deutschen Betriebserfahrung in den vergangenen zehn Jahren nicht gekommen. In den Jahren 2003 bis 2012 ist es nur wenige Male zu großflächigen Störungen und Ausfällen des europäischen Verbundnetzes gekommen, die sich auf die Leistungserzeugung von Kernkraftwerken in Deutschland auswirken konnten. Darüber hinaus kam es zu einzelnen, vorwiegend witterungsbedingten Netzstörungen und Netzausfällen, die in mehreren deutschen Kernkraftwerken zu Leistungsreduktionen bzw. zu einer Störung der Netzanbindung geführt haben. Aufgrund verschiedener, zumeist lokaler Ursachen kam es auch mehrfach zum Ausfall der Netzanbindung eines Kernkraftwerks und vereinzelt zum Notstromfall.

Nachfolgend wird eine Übersicht über Ereignisse aus den Jahren 2003 bis 2012 gegeben, in denen es zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam. Dabei wurden meldepflichtige Ereignisse sowie Ereignisse, die nicht meldepflichtig waren, aber in der Transientendatenbank der GRS erfasst sind, in die Übersicht einbezogen. Ereignisse, bei denen ein Lastabwurf auf Eigenbedarf oder der Ausfall der Netzanbindung geplant war, wurden nicht berücksichtigt. Ereignisse, die auf eine Prüfung der Blockschutzeinrichtungen oder eine Fehlfunktion von Komponenten innerhalb der Anlage zurückzuführen sind, wurden nur dann berücksichtigt, wenn es dadurch zum Verlust der Netzanbindung bzw. zum Ansprechen von Blockschutzeinrichtungen kam. Zusätzlich berücksichtigt wurden Ereignisse, bei denen es zu einer Propagation einer Netzstörung in die Anlage kam, auch wenn die Verbindung zum externen Netz dabei bestehen blieb. Ereignisse im Verbundnetz, die bei Kernkraftwerken nur zu einer Leistungsreduktion geführt haben, werden nicht aufgeführt.

Die Übersichtstabelle enthält neben einem kurzen Hinweis auf den Auslöser der Störung Informationen dazu, welche Netzanbindungen unverfügbar waren, ob eine Umschaltung auf eine andere Netzanbindung erfolgreich war, ob ein Lastabwurf auf Eigenbedarf erfolgte und ob die Notstromdiesel gestartet wurden und einspeisten. Zusätzlich wurde erfasst, ob es zu einer Propagation einer Störung der Netzanbindung in die Anlage kam.

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
08.02.2004	KWB-B <i>Netzstörung 220-kV-Netz</i>	-	x	x	-	x <i>(bis TUSA/ RESA)</i>	x
23.08.2004	KKB Kurzschluss EB-Trafo	-	x	- <i>(Fremd- netztrafo frei- geschaltet)</i>	x <i>(Langzeitum- schaltung auf Gasturbinen- werk)</i>	- <i>(TUSA)</i>	-
07.11.2004	KWO <i>Kurzschluss in der Steuerung des 220-kV-Netzschalters</i>	-	x	-	x <i>(nach RESA)</i>	x <i>(bis RESA)</i>	- <i>(Start, aber keine Ein- speisung)</i>
24.04.2005	KKI-1 TUSA im Zusammenhang mit Spannungsschwankungen im Netz	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
22.05.2005	KKU TUSA durch Ständererd- schlussüberwachung am Gene- rator	-	x	-	x	- (TUSA)	-
16.12.2005	KKI-2 Lastabwurf auf Eigenbedarf aufgrund Störung im 380-kV- Netz	-	x	-	-	x	-
14.01.2006	GKN-1 Lastabwurf auf Eigenbedarf nach Auslösung des 220-kV- Leitungsschutzes	-	x	-	-	x	-
15.09.2006	KWB-A Fehlerhafte Abschaltung des 380-kV-Netzes	-	x	-	x (nach TUSA)	x (bis TUSA)	-
18.01.2007	<i>KKE</i> <i>Erdschluss im 380-kV- Hauptnetz</i>	-	x	-	x	-	-

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt. (Fortsetzung)

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
28.06.2007	<i>KKB Lastabwurf auf Eigenbedarf und RESA nach einer Netzstö- rung</i>	-	x	-	<i>x (Langzeit, nach TUSA)</i>	<i>x (bis TUSA)</i>	<i>- (Start, aber keine Ein- speisung)</i>
28.06.2007	<i>KKK Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung auf- grund Kurzschluss in einem Maschinentransformator</i>	-	<i>x (zeitlich ver- setzt durch gestaffeltes Ansprechen der Block- schutzeinrich- tungen)</i>	-	<i>x (Langzeit, bei zwei Schie- nen zeitlich versetzt)</i>	-	-
19.08.2008	KKE TUSA und Leistungsreduktion aufgrund einer Netzstörung im 380-kV-Netz (einpoliger Erd- schluss durch Kran)	-	x	-	x	-	-
24.08.2007	KKP-1 TUSA von Hand aufgrund einer Druckluftleckage am Genera- torschalter	-	x	-	x	-	-

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt. (Fortsetzung)

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
04.07.2009	KKK <i>Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung auf- grund Kurzschluss in einem Maschinentransformator</i>	-	x	-	x <i>(Langzeit)</i>	-	-
07.07.2009	KKE <i>Umschaltung auf das Reserve- netz nach einpoligem Erd- schluss im 380-kV-Netz</i>	-	x	-	x	-	-
24.07.2009	KKE Fehlerhaftes Auslösen des Lastumsehlerschutzrelais an einem Maschinentransformator führt zu TUSA, Leistungsredu- ktion auf 25 % und Kurzzeitum- schaltung auf das Reservenetz	-	x	-	x	-	-

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt. (Fortsetzung)

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
30.09.2010	KKG Auslösung einer RESA/TUSA durch gleichzeitiges Öffnen der 10-kV-Blockeinspeiseschalter durch den Blockschutz (Fehler- ursache nicht eindeutig fest- stellbar)	-	x	-	x	-	-
04.04.2011	KWB-A <i>Anregung von Notstromsigna- len in zwei Redundanzen nach Ausfall des 380-kV- Hauptnetzanschlusses auf- grund Brand in einem Um- spannwerk während des lang- fristigen Nichtleistungsbetriebs</i>		x	-	x (Red. 2 u. 3)	-	x (Red. 1 u. 4)

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt. (Fortsetzung)

Datum	Anlage/ Kurzbeschreibung der Störung	Propagation von Netzstö- rungen in die Anlage	Ausfall Hauptnetz	Ausfall Re- servenetz	Umschaltung auf das Re- servenetz	Lastabwurf	Versorgung der Anlage durch Diesel
07.08.2011	KBR TUSA und Kurzzeitumschal- tung auf das 220-kV- Reservenetz nach Ansprechen des Blockschutzes aufgrund eines Schadens an einem Ma- schinentransformator	-	x	-	x (Kurzzeit)	-	-
01.01.2012	KKG Langzeitumschaltung auf das 110-kV-Reservenetz mit RESA nach fehlerhafter Auslösung des Lastumsehlerschutzrelais an einem Maschinentransfor- mator	-	x	-	x	-	-

**Tab. 2.1** Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam [200], [202], [204 - 205], [216 - 219], [221]. Nachfolgend ausführlicher beschriebene Ereignisse sind grau hinterlegt. (Fortsetzung)

Bei den in vorstehender Tabelle aufgeführten Ereignissen kam es nur selten zu einem Notstromfall, überwiegend handelt es sich um Ereignisse, bei denen die Hauptnetzanbindung der Anlage unverfügbar war. In einigen Fällen wurde die Anlage dabei auf Eigenbedarf abgefangen und konnte sich bis zur Wiederherstellung der Netzanbindung oder bis zum Eintreten einer TUSA oder RESA selbst versorgen. In anderen Fällen erfolgte eine Umschaltung auf das Reservenetz. Ein Station Blackout trat in Deutschland nicht auf. Auch über die Propagation einer Netzstörung in eine Anlage ist der GRS für den Zeitraum 2003 – 2012 derzeit nichts bekannt.

Nachfolgend werden einige der oben genannten Fälle beispielhaft beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf dem Ereignisverlauf hinsichtlich der Netzstörung und der Aufrechterhaltung der Eigenbedarfsversorgung der Anlage. Auf weitere Fehler und deren Ursache wird nicht näher eingegangen.

#### **2.1.1 Notstromfall in Biblis B, 08.02.2004**

Am 08.02.2004 kam es witterungsbedingt zu einem zweiphasigen Kurzschluss im 220-kV-Netz außerhalb der Anlage. Dadurch kam es zur Anregung des 220-kV-Netzschutzes. Die Anlage befand sich zu diesem Zeitpunkt im ungestörten Vollastbetrieb. Unmittelbar mit der Kurzschlussanregung wurde die Anlage durch den Kraftwerksentkopplungsschutz direkt vom Netz getrennt. Diese Anregung des Kraftwerksentkopplungsschutzes erfolgte aufgrund eines Defekts des Kraftwerksentkopplungsrelais verfrüht. Bei einem bestimmungsgemäß funktionierenden Kraftwerksentkopplungsrelais greift der Kraftwerksentkopplungsschutz erst zeitlich verzögert ein, falls ein kraftwerksnaher Fehler im Netz nicht innerhalb einer bestimmten Zeitspanne durch den Netzschutz geklärt wird. [203], [204]

Durch das verfrühte Ansprechen des Kraftwerksentkopplungsschutzes wurden die 220-kV- und 380-kV-Schalter getrennt und ein Lastabwurf auf Eigenbedarf ausgelöst. Dieser schlug aufgrund eines Fehlers in der Messwertverarbeitung des Turbinen-Radraumdruckes fehl. Dies führte zu einer TUSA und RESA mit auslegungsgemäßer Anregung der Notstromsignale YZ82-85. Dadurch starteten in allen vier Redundanzen die Notstromdiesel und versorgten die Notstromverbraucher. Die Wärmeabfuhr erfolgte über die sekundärseitigen Abblaseregelventile über Dach. Etwa nach einer halben Stunde wurde das Hauptnetz wieder durchgeschaltet und im weiteren Verlauf wurden die Notstromdiesel wieder abgeschaltet. [203], [204]

### **2.1.2 Kurzschluss in der Steuerung für den 220-kV-Netzschalter in KWO, 07.11.2004**

Durch einen Kurzschluss in der 24-V-Steuerung kam es am 07.11.2004 im KWO zu einem Öffnen des 220-kV-Netzschalters bei Vollast. Durch Öffnen des Netzschalters wurde Lastabwurf auf Eigenbedarf ausgelöst. Im weiteren Verlauf sank aber die Frequenz im Inselnetz durch eine nicht ordnungsgemäße Funktion der Turbinenregelventile soweit ab, dass dadurch RESA und TUSA ausgelöst wurden. Dadurch wurde die Umschaltung auf das Reservenetz angeregt, die erfolgreich verlief. Gleichzeitig wurde durch die mehr als 2,5 Sekunden anstehende Unterfrequenz auch das Startsignal für die Notstromdiesel ausgelöst, diese speisten aber nicht ein. [205]

### **2.1.3 Erdschluss im 380-kV-Netz, KKE, 18.01.2007**

Bedingt durch den Orkan Kyrill kam es am 18.01.2007 kraftwerksnah zu einem einpoligen Lichtbogenerdschluss an der Phase L1 der 380-kV-Ableitung. Der Blockschutz löste daraufhin eine Trennung der Anlage vom 380-kV-Netz durch Öffnen des Netzschalters sowie eine Abschaltung des Generatorschalters aus. Zeitgleich wurde die Eigenbedarfsumschaltung auf das Reservenetz ausgelöst. Diese Umschaltung erfolgte in den Scheiben 3 und 4 in Kurzzeit, während die Umschaltung in den Scheiben 1 und 2 aufgrund der nicht synchronen Netzverhältnisse zwischen Haupt- und Reservenetz im Moment der Anregung in Langzeit ausgeführt wurde. Hierbei ist zu beachten, dass jede Scheibe über ein eigenes Umschaltgerät verfügt. [206], [207]

Bei der Umschaltung wurden alle elektrischen Verbraucher in den Scheiben 3 und 4 unterbrechungslos weiterversorgt. In den Scheiben 1 und 2 wurden die leistungsstarken 10-kV- und 660-V-Verbraucher gezielt automatisch abgeschaltet und nach der Umschaltung wurden ausgewählte Verbraucher wieder zugeschaltet. Dies führte über die Abschaltung von 2v4 Hauptkühlmittelpumpen über das Kriterium „Drehzahl 2v4 HKMP < 94 %“ zur RESA. [206], [207]

#### **2.1.4 Lastabwurf auf Eigenbedarf und RESA nach einer Netzstörung, KKB, 28.06.2007**

Am 28.06.2007 wurden in einer kraftwerksnahen Schaltanlage des Netzbetreibers Instandhaltungsarbeiten durchgeführt. Dabei kam es zu einem einphasigen kraftwerksnahen Kurzschluss. Aufgrund eines Projektierungsfehlers der Auslegung einer Netzschutzeinrichtung, des sogenannten Sammelschienen-Richtungsvergleichsschutzes, führte dies zu einer Trennung der Anlage vom Netz. In der Anlage öffnete der 380-kV-Leistungsschalter des Maschinentransformators und es wurde ein Lastabwurf auf Eigenbedarf ausgelöst. Dieser war zunächst erfolgreich und die Anlage versorgte sich im Eigenbedarfsbetrieb. Die drei Notstromdiesel starteten parallel dazu, erhielten aber kein Zuschalt-Signal und schalteten sich wieder ab. [209]

Zwölf Minuten nach dem Lastabwurf auf Eigenbedarf löste der Turbinenschutz über das Kriterium „Relativausdehnung Hochdruckgehäuse/Läufer“ einen Turbinenschnellschluss aus. Dadurch kam es zur Langzeitumschaltung des Eigenbedarfs auf das Fremdnetz. Die kurzzeitige Unterspannung auf den Notstromschienen während der Langzeitumschaltung führte zur Reaktorschnellabschaltung. Zusätzlich erhielten die drei Notstromdiesel erneut ein EIN-Signal, wurden aber aufgrund der Versorgung durch das Fremdnetz nicht zur Versorgung der Notstromverbraucher angefordert und schalteten wieder ab. Am 01.07.2007 wurde der Leistungsbetrieb wieder aufgenommen. [209]

#### **2.1.5 Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund Kurzschluss in einem Maschinentransformator, KKK, 28.06.2007**

Die Anlage befand sich am 28.06.2007 im ungestörten Leistungsbetrieb. Durch einen Kurzschluss mit nachfolgendem Brand an einem der beiden Maschinentransformatoren kam es zum Ansprechen des Differentialschutzes, der auslegungsgemäß den 400-kV-Leistungsschalter des betroffenen Transformators sowie den Generatorschalter der nicht betroffenen Generatorableitung öffnete und die Entregung des Generators auslöste. Damit blieben zwei der vier Eigenbedarfsschienen weiterhin mit dem Hauptnetz verbunden. Für die nun nicht mehr versorgten 10-kV-Eigenbedarfsschienen wurde eine Langzeitumschaltung auf das 110-kV-Reservenetz angeregt. Der Lastsprung führte auslegungsgemäß über das Lastsprungrelais zum automatischen Öffnen von zwei Si-

cherheits- und Entlastungsventilen, um überschüssigen Dampf in die Kondensationskammer zu leiten. [212], [213]

Bei einem Ereignis wie diesem dient der Distanzschutz als zeitlich nachgelagerter Reserveschutz für den Differentialschutz. Da der Generator, solange er noch nicht vollständig entregt war, weiterhin auf den Kurzschluss im Maschinentransformator speiste und dadurch einen entsprechend hohen Strom erzeugte, sprach nach etwa 500 ms die erste Stufe des Distanzschutzes an und öffnete auch den 400-kV-Leistungsschalter des nicht betroffenen Maschinentransformators. Damit wurden die beiden bisher noch mit dem Hauptnetz verbundenen 10-kV-Eigenbedarfsschienen von diesem getrennt und eine Langzeitumschaltung auf das Reservenetz wurde ausgelöst. Aufgrund des kurzzeitigen Spannungsabfalls auf den Eigenbedarfsschienen wurde RESA ausgelöst. Nach etwa 1,7 Sekunden erfolgte die gesamte Eigenbedarfsversorgung vom Reservenetz. Allerdings führte der Zeitversatz bei der Langzeitumschaltung der vier Eigenbedarfsschienen auf das Reservenetz zu Schwierigkeiten bei der Wiederschaltung der in diesem Betriebszustand benötigten Reaktorspeisewasserpumpe, da aufgrund der zeitlich versetzten Langzeitumschaltung eine Verriegelung nicht wirksam wurde. [212], [213]

#### **2.1.6 Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund Kurzschluss in einem Maschinentransformator, KKK, 04.07.2009**

Die Anlage wurde zum Zeitpunkt des Ereignisses bei 91 % Reaktorleistung betrieben. Aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator sprachen zeitlich gestaffelt mehrere Blockschutzeinrichtungen an. Zunächst löste der Differentialschutz des betroffenen Maschinentransformators ein Öffnen des zugeordneten 400-kV-Netzschalters und des Generatorschalters der nicht betroffenen Generatorableitung sowie eine Entregung des Generators aus, kurz darauf sprach der Differentialschutz des anderen Maschinentransformators an und trennte die Anlage vom Hauptnetz. Auf allen vier 10-kV-Eigenbedarfsschienen kam es zu einer Langzeitumschaltung auf das Reservenetz, wodurch nach 2,2 Sekunden die Eigenbedarfsversorgung wiederhergestellt war. Auslegungsgemäß kam es nach Ansprechen des Differentialschutzes zu einem Ansprechen des Lastsprungrelais, wodurch ein Sicherheits- und Entlastungsventil einen Öffnungsbefehl erhielt und TUSA ausgelöst wurde. Des Weiteren kam es zum Ansprechen des Ständererdschlussschutzes des Generators. Durch die Langzeitum-

schaltung kam es auf den Eigenbedarfsschienen zu einer Unterspannung für länger als 1 Sekunde, wodurch auslegungsgemäß RESA ausgelöst wurde. [214], [215]

### **2.1.7 Umschaltung auf das Reservenetz nach einpoligem Erdschluss im 380-kV-Netz, KKE, 07.07.2009**

Bis 2009 wurde am Kraftwerkstandort Lingen, etwa 2 km vom Kernkraftwerk Emsland entfernt, ein Gas- und Dampfturbinenkraftwerk errichtet. Auf der Kraftwerksbaustelle kam es bei Transportarbeiten mit einem Hubgerät zu einem Funkenüberschlag zwischen einem Hochspannungsseil und dem Fahrzeug (vergleichbares Ereignis bereits am 19.08.2008). Dadurch kam es zu einem einpoligen Erdschluss im 380-kV-Netz. Dies führte im Kernkraftwerk Emsland zu einer Blockschutzauslösung mit nachfolgendem Öffnen des 380-kV-Netzschalters und des Generatorschalters. Durch das Öffnen dieser Schalter wurden eine Turbinenschnellabschaltung und die Umschaltung der Eigenbedarfsversorgung auf das Reservenetz ausgelöst. Es erfolgte eine Leistungsreduktion durch das Begrenzungssystem auf etwa 20 % Reaktorleistung. Nach etwa 2,5 Stunden wurde die Anlage wieder mit dem Hauptnetz synchronisiert. [217], [218], [220]

## **2.2 Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung**

In der internationalen Betriebserfahrung ist eine Vielzahl von Ausfällen oder Störungen der externen Netzanbindungen von Kernkraftwerken bekannt. Es sind wiederholt Netzausfälle und Netzinstabilitäten aufgetreten, die zu Notstromfällen in einem oder mehreren Kernkraftwerken geführt haben. In der nachfolgenden Tabelle 7 wird eine Übersicht über solche Netzausfälle gegeben. Dabei wurden insbesondere Ereignisse der Jahre 2003 bis 2012 berücksichtigt, die über das internationale Incident Reporting System (IRS) von den betroffenen Ländern gemeldet wurden. Zusätzlich wurden weitere prominente Ereignisse erfasst.

Die nachfolgende Übersichtstabelle enthält sowohl Ereignisse, bei denen externe, von der Anlage unabhängige Schwierigkeiten zur Störung oder zum Ausfall der Netzanbindungen geführt haben, als auch Ereignisse, bei denen der Ausfall der Netzanbindungen auf Fehler oder Störungen auf dem Kraftwerksgelände zurückzuführen sind. Im Gegensatz zur Übersicht über die Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung sind Ereignisse, bei denen nur ein Teil der Netzanbindungen von Störungen oder Ausfällen betroffen war, nur in Einzelfällen erfasst.

Aus der Tabelle geht hervor, ob es zum Verlust der Netzanbindungen kam und ob ein Lastabwurf auf Eigenbedarf erfolgreich durchgeführt wurde. Des Weiteren ist ersichtlich, ob es zum Start und zur Einspeisung der Notstromdieselaggregate kam, sowie ob ein Station Blackout eintrat. Darüber hinaus ist erfasst, ob es zu einer Propagation einer Störung an der externen Netzanbindung in die Anlage kam.

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
25.06.2003	Chasnupp-1 (Chashma-1), Pakistan	Plötzlicher Einbruch der Verbraucherlast im Netz führte zum Anstieg der Turbinendrehzahl; Nach dem mehrfachen Ansprechen von Schutzeinrichtungen und dem Auslösen von Schutzaktionen kam es zu Frequenzschwankungen an der Turbine zwischen 48,5 Hz und 51,9 Hz und schließlich zu TUSA und RESA. [222]	x	-	-	-	-
14.08.2003	Perry-1, Fermi- 2, Indian Point-2 und -3, Oyster Creek, Nine Mile Point-1 und -2, FitzPatrick und Ginna-1, USA Bruce B (ein Block), Pickering-4, -5, -6, -7 und -8 und Dar- lington-1, -2 und -4, Kanada	Netzausfall in den USA/Kanada (siehe Teil A, Abschnitt 3.1)	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
14.08.2003	Bruce B (drei Blöcke) und Dar- lington-3, Kanada	Netzausfall in den USA/Kanada (siehe Teil A, Abschnitt 3.1)	-	x	x	-	-
15.09.2003	Peach Bottom-2 und -3, USA	Aufgrund eines kurzen Ausfalls von zwei der drei externen Netzanbindungen infolge eines Blitz- schlags war die Versorgung der Notstromschie- nen durch das externe Netz in beiden Blöcken für 16 Sekunden unterbrochen. Daraufhin starte- ten all vier Dieselgeneratoren und versorgten je eine Notstromschiene in beiden Blöcken. Ein Teil der betrieblichen Schienen waren nach wie vor durch die dritte Anbindung an das externe Netz versorgt.  In beiden Anlagen kam es zur Schnellabschal- tung aus Vollast bzw. aus 91 % Leistung sowie zur Auslösung des Durchdringungsabschlusses. [223]	-	x	-	x	-
23.09.2003	Ringhals-3 , Schweden	Netzausfall in Dänemark und Schweden (siehe Teil A, Abschnitt 3.3)	-	x	k. A.	k. A.	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
23.09.2003	Ringhals-4 , Schweden	Netzausfall in Dänemark und Schweden (siehe Teil A, Abschnitt 3.3)	-	x	x	-	-
14.06.2004	<i>Palo Verde-1, -2 und -3, USA</i>	<i>Ausfall aller Netzanbindungen aufgrund eines Versagens des Netzschutzes [225]</i>	x	x	-	x	-
11.10.2004	Dungeness-A1-1, Großbritannien	Aufgrund eines Schaltfehlers des Netzbetreibers im Rahmen einer geplanten Freischaltung wurde die Anlage vom externen Netz getrennt. Die im Anfahrbetrieb befindliche Anlage wurde abgeschaltet und ein Dieselgenerator übernahm die Versorgung der Komponenten. [228]	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
01.01.2005	Angra-1, Brasilien	Aufgrund einer Störung im externen Verbund- netz wurde die Anlage zeitgleich von beiden ex- ternen Netzen (138 kV und 500 kV) getrennt. Die Komponenten wurden von den Dieselgenerato- ren versorgt. Die Wärme wurde für 34 Minuten bis zur Wiederschaltung der Hauptkühlmittel- pumpen nach Wiederherstellung der externen Netzanbindung primärseitig über Naturumlauf und sekundärseitig über Dach abgegeben. [229]	-	x	-	x	-
30.12.2005	Paluel, Frankreich	Ausfall aller Netzanbindungen durch Kurz- schlüsse in den Schaltanlagen aufgrund von Eis- regen und starkem Wind [230]	-	x	3 von 4 Blöcken	1 von 4 Blöcken	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
20.05.2006	Catawba-1 und -2, USA	Ausgelöst durch einen elektrischen Defekt kombiniert mit Fehleinstellungen an Differential-schutzrelais kam es zum Öffnen der meisten Leistungsschalter in der gemeinsamen Schaltanlage beider Blöcke. Die verbleibenden zwei 230-kV-Übertragungsleitungen wurden kurz danach über Überlastauslösung abgeschaltet. Daraufhin verloren beide Blöcke die externe Stromversorgung. Alle vier Dieselgeneratoren (2 pro Block) starteten und speisten ein. Etwa 6,6 Stunden nach Ausfall der externen Stromversorgung war diese wiederhergestellt. [231]	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust der Netzan- bindun- gen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
25.07.2006	Forsmark-1, Schweden	Bei Wartungsarbeiten in einer kraftwerksnahen 400-kV-Schaltanlage kam es zu einem zweiphasigen Kurzschluss. Der Sammelschienenschutz in der Schaltanlage war ungeeignet, den hier auftretenden Kurzschluss vom Netz zu trennen. Dadurch erfolgte die Isolation der Anlage vom Kurzschluss nicht bereits nach 100 ms, sondern erst nach 300 ms durch den Unterspannungsschutz der Anlage. In dessen Folge fiel in der Anlage die gesicherte Wechselstromversorgung in 2 von 4 Strängen aus. Dies führte im weiteren Ereignisablauf zur Unverfügbarkeit aller Wechselstromschienen in 2 von 4 Strängen der Notstromanlage. Die Anlage wurde vom externen Netz getrennt und fing sich kurzzeitig auf Eigenbedarf, bevor die Schnellabschaltung erfolgte. Alle vier Notstromdiesel starteten, allerdings konnten nur die beiden Diesel in den nicht vom Ausfall der gesicherten Wechselstromversorgung betroffenen Strängen einspeisen. [238]	x	x	x (kurz- zeitig)	x (zwei der vier Diesel konnten nicht ein- speisen)	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
03.08.2006	Dukovany, Tschechische Republik	<i>Menschlicher Fehler führt zum Ausfall von Teilen des Höchstspannungsnetzes und Abspaltung des Kernkraftwerks Dukovany sowie zweier Schaltanlagen vom Verbundnetz. [232], [233]</i>	x	-	-	-	-
24.09.2006	Chasnupp-1 (Chashma-1), Pakistan	Eine Netzstörung führt zum Ausfall beider externer Netzanbindungen des Kraftwerks. Zunächst wurde ein Lastabwurf auf Eigenbedarf durchgeführt, aber kurze Zeit später erfolgte eine Reaktorschnellabschaltung aufgrund von Unterspannung auf sicherheitsrelevanten Schienen. Daraufhin wurde die Anlage von den beiden Notstromdieseln versorgt. Aufgrund des Fehlschließens eines Frischdampfabsperreschiebers wurde eine Sicherheitseinspeisung ausgelöst. Die externe Stromversorgung war nach etwa 8,5 Stunden wieder hergestellt. [234]	-	x	x (kurz- zeitig)	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
27.06.2007	Braidwood, USA	<i>Aufgrund eines Blitzschlags trat ein einphasiger Erdschluss im externen Netz auf. Spannungsschwankungen im externen Netz führten daraufhin in Verbindung mit dem Versagen eines Schutzrelais zu einer Reaktorschnellabschaltung. [235]</i>	x	-	-	-	-
25.03.2008	Chasnupp-1 (Chashma-1), Pakistan	Eine Netzstörung im 220-kV-Netz führte zum Lastabwurf auf Eigenbedarf über den Überfrequenzschutz der Anlage, der bei 51,3 Hz auslöst. Die beiden externen Netzanschlüsse (220 kV und 132 kV) waren für 2 bzw. 4 Stunden un- verfügbar. Die Anlage versorgte sich für etwa 4 Stunden im Eigenbedarf und wurde anschlie- ßend wieder mit dem Netz verbunden. [236]	-	x	x	-	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
30.04.2008	Atucha, Argentinien	Eine Störung des externen Verbundnetzes führte zum gleichzeitigen Verlust beider externer Netz-anbindungen (220 kV). Dies löste automatisch einen Lastabwurf aus, aber 4 Minuten später kam es über das Kriterium „Level Dampferzeu-ger hoch“ zu einer TUSA. Weitere 7 Minuten später löste das Schichtpersonal RESA aus. [237]	-	x	x (kurz- zeitig)	x (2 von 3 Dieseln starteten und speisten ein)	-
11.06.2008	Forsmark-2, Schweden	Etwa 80 km vom Anlagengelände entfernt kam es durch Blitzschlag zu einem 90 ms dauernden dreiphasigen Kurzschluss im 400-kV-Höchstspannungsnetz. Die daraus resulterende Unterspannungstransiente (33 % Nennspannung im externen Netz) propagierte in die Anlage. Dadurch kam es zu einem abrupten Stopp der Kühlmittelumwälzpumpen, der Leistungsoszillationen im Kern und eine manuelle Reaktor-schnellabschaltung nach sich zog. [238]	x	-	-	-	-
10.11.2009	Angra-1 und -2, Brasilien	Netzausfall in Brasilien und Paraguay (siehe Teil A, Abschnitt 3.13)	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
06.07.2010	Shin-Kori-1, Korea	Die Anlage befand sich im Zustand unterkritisch heiß, vor dem erstmaligen Anfahren. Da die 765-kV-Anbindung der Anlage zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt war, wurde übergangsweise ein Step-down-Transformator 765 kV] 345 kV zur Anbindung an das 345-kV-Netz eingesetzt. Aufgrund eines fehlerhaften Signals des Öldruckrelais dieses Transformators wurden die entsprechenden Leistungsschalter geöffnet, so dass eine Versorgung der Anlage über den Eigenbedarfstransformator nicht mehr verfügbar war. Die daraufhin auslegungsgemäß vorgesehene Umschaltung auf den Anfahrtransformator schlug aufgrund einer unvollständig ausgeführten Umschaltlogik fehl. Dadurch befand sich die Anlage im Notstromfall. Die beiden Notstromdiesel starteten und versorgten die sicherheitsrelevanten Verbraucher. [240]	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
11.03.2011	Fukushima Daiichi-1, -2, -3, -4, -5 und -6, Tokai Daini, Japan	Netzausfall in Japan (siehe Teil A, Abschnitt 3.14)	-	x	-	x (in To- kai Daini sowie teil- bzw. zeitweise in Fuku- shima Daiichi-1 bis -6)	x (in Fukushi- ma Daiichi-1 bis -4)
23.08.2011	North Anna-1 und -2, USA	Ein Erdbeben der Stärke 5,8 führte zur Reaktor-schnellabschaltung und zum Notstromfall in beiden Blöcken. Die für beide Blöcke vorhandenen vier Notstromdiesel plus der vorhandene Station Blackout Diesel starteten. Zunächst versorgten die vier Notstromdiesel die Verbraucher. Einer der beiden Diesel von Block 2 fiel nach knapp 50 Minuten aus. Daraufhin wurde der Station Blackout Diesel 38 Minuten später manuell auf die betroffene Notstromschiene geschaltet. Nach etwa 9 Stunden war die externe Stromversorgung wieder hergestellt. [241]	-	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
13.01.2012	Wolf Creek, USA	Reaktorschnellabschaltung nach Verlust der externen Netzanbindungen. Ein externes Netz war nach etwa 3 Stunden wieder verfügbar. [243]	-	x	-	x	-
30.01.2012	Byron-2, USA	<i>Aufgrund einer ungeeigneten Auswahllogik im Blockschutz konnte nach einem einphasigen Erdschluss im externen Netz die asynchrone Spannung in die Anlage propagieren und über einen Zeitraum von 8 Minuten undetektiert bleiben. [244]</i>	x	x	-	x (nach manuel- lem Ein- greifen der Schicht)	-
09.02.2012	Kori-1, Korea	<i>Ein Station Blackout während der Revision führt zu einem 19-minütigen Ausfall der Nachwärmeabfuhr aus RDB und BE-Becken. [242]</i>	-	x	-	-	x
29.02.2012	Byron-2, USA	Aufgrund eines einphasigen Kurzschlusses im externen Netz wird die Anlage vom Netz getrennt, da die Unterspannungsüberwachung der sicherheitsrelevanten Schienen im Gegensatz zum Ereignis vom 30.01.2012 den Fehler detektiert. Die Diesel werden gestartet und versorgen die sicherheitsrelevanten Verbraucher. [247]	x	x	-	x	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
04.04.2012	Catawba-1 und - 2, USA	Aufgrund eines Fehlers in der Logik der Schutzrelais des Hauptgenerators von Block 1 kam es in Folge einer Reaktorschnellabschaltung zur Trennung des Blocks von den externen Netzanbindungen. Da sich Block 2 zu diesem Zeitpunkt in Revision befand und über Block 1 versorgt wurde, waren damit beide Blöcke im Notstromfall. Die beiden Dieselgeneratoren pro Block starteten auslegungsgemäß und versorgten die relevanten Verbraucher. Die externe Stromversorgung war nach etwa 5,5 Stunden wieder hergestellt. [244]	-	x	-	x	-
13.07.2011	Forsmark-3, Schweden	Die Anlage befand sich in Revision und wurde über das 70-kV-Reservenetz versorgt. Eine auftretende Störung durch einen Blitzschlag ins 70-kV-Netz konnte in die Anlage propagieren und elektronische Komponenten beschädigen. [248]	x	k. A.	-	k. A.	-
30.07.2012 und 31.07.2012	Rawatbhata-2, - 3, -4, -5 und -6, Indien	Netzausfall in Indien (siehe Teil A, Abschnitt 3.17)	-	k. A.	k. A.	k. A.	-

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Datum	Anlage, Land	Kurzbeschreibung der Störung	Propa- gation v. Netzstö- rungen in die Anlage	Verlust d. Netz- anbin- dungen	Lastab- wurf	Versor- gung d. Anlage durch Diesel	Station Blackout
30.07.2012 und 31.07.2012	Narora-1 und -2, Indien	Netzausfall in Indien (siehe Teil A, Abschnitt 3.17)	-	x	x	-	-
29.10.2012	Oyster Creek, USA	Netzausfall in den USA, der Karibik und Kanada (siehe Teil A, Abschnitt 3.18)	-	x	-	x	-
30.05.2013	<i>Forsmark, Schweden</i>	<i>Öffnen von 2v3 Phasen am Hauptnetzschalter und Weiterversorgung der Anlage über eine Phase</i>	-	-	-	-	x

**Tab. 2.2** Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung mit Störung oder Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen (Fortsetzung)

Bei den in vorstehender Tabelle aufgeführten Ereignissen handelt es sich überwiegend um Ereignisse, bei denen die externen Netzanbindungen der Anlage unverfügbar waren und die Anlage entweder einen erfolgreichen Lastabwurf auf Eigenbedarf durchführte oder die relevanten Verbraucher durch Notstromdiesel versorgt wurden. Nur selten kam es zu einem Station Blackout, d. h. dem vollständigen Ausfall aller nicht durch Batterien gepufferten Stromversorgungen. Auch sind in der Tabelle einige Ereignisse aufgeführt, bei denen es bis zur Trennung der Anlage vom externen Netz zu einer Propagation einer Netzstörung in die Anlage kam.

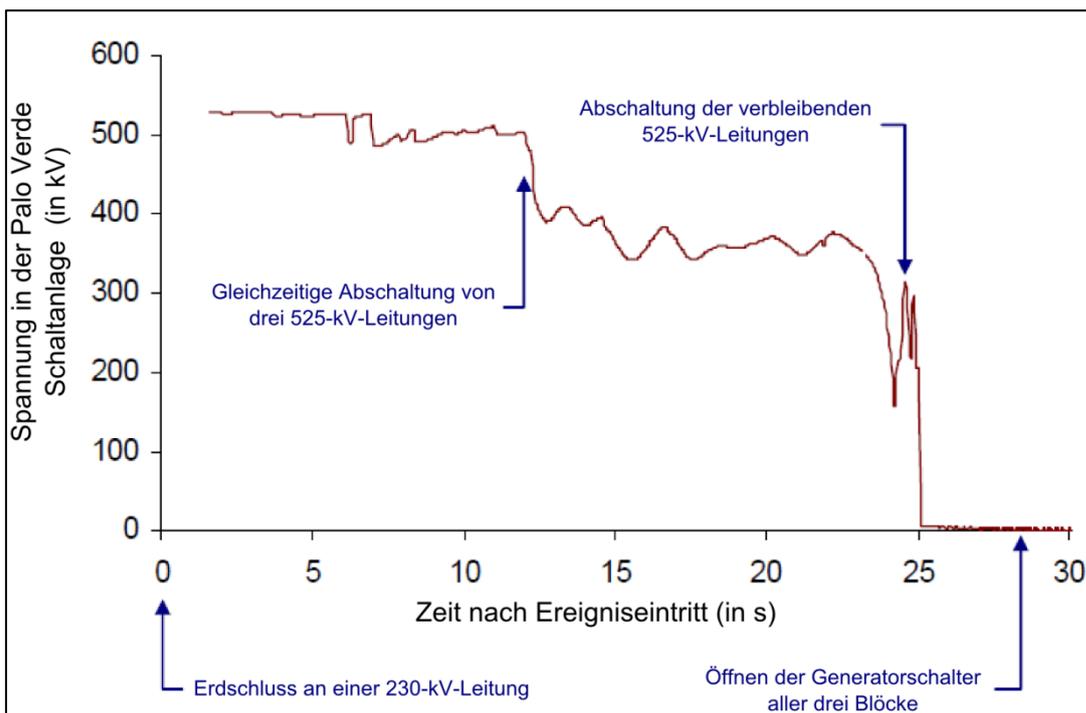
Nachfolgend werden einige der oben genannten Ereignisse beispielhaft beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf dem Ereignisverlauf hinsichtlich der Netzstörung, des Verhaltens der Schutzeinrichtungen und der Aufrechterhaltung der Eigenbedarfsversorgung der Anlage. Auf weitere Fehler und deren Ursache wird nicht detailliert eingegangen.

### **2.2.1 Palo Verde-1, -2 und -3, USA, 14.06.2004**

Am 14. Juni 2004 führte ein Einzelfehler im Übertragungsnetz aufgrund von Versagen einer Netzschutzeinrichtung zum Ausfall aller externen Netzanbindungen der drei Blöcke in der Anlage Palo Verde. Die Schaltanlage der Anlage Palo Verde besteht aus zwei 525-kV-Schienen, die mit den drei Blocktransformatoren sowie mit sieben Übertragungsleitungen (3 nach Hassayampa, 2 nach Westwing und je 1 nach Rudd und Dever) des externen Netzes verbunden sind. [225]

Die Netzstörung begann mit einem einphasigen Erdschluss aufgrund des Versagens eines gealterten Isolators an einer 230-kV-Hochspannungsleitung etwa 75 km von der Anlage Palo Verde entfernt. Der Netzschutz in den beiden an diese Leitung angebotenen Schaltanlagen regte die Isolation des Fehlers an, allerdings öffnete einer der Schalter aufgrund eines Fehlers in einem Schutzrelais nicht. Dadurch wurde der Fehler für insgesamt 38 Sekunden nicht vom Netz isoliert. Innerhalb der ersten 12 Sekunden nach Ereigniseintritt wurden einige Hoch- und Höchstspannungsleitungen (60 kV, 230 kV, 345 kV und 500 kV) aufgrund von Überstrom schutzabgeschaltet und drei Kraftwerke (zwei mit Gasturbinen, eines mit Dampfturbine) gingen vom Netz. Etwa 12 Sekunden nach Ereigniseintritt wurde der zunächst einphasige Erdschluss zu einem dreiphasigen Erdschluss und die drei 525-kV-Leitungen zwischen den Schaltanlagen Palo Verde und Hassayampa wurden zeitgleich schutzabgeschaltet. Etwa 24 Sekunden nach Ereigniseintritt wurden die beiden 525-kV-Leitungen von Palo Verde zu den

Schaltanlagen Devers bzw. Rudd schutzabgeschaltet. Nach etwa 25 Sekunden folgten die verbleibenden beiden 525-kV-Leitungen zur Schaltanlage Westwing. Damit war die Schaltanlage Palo Verde vom Verbundnetz isoliert. Nach weiteren drei Sekunden trennten sich die drei Blöcke über den Generatorschutz ebenfalls von der Schaltanlage. Etwa 38 Sekunden nach Ereigniseintritt waren alle weiteren auf den Fehler speisenden Leitungen abgeschaltet und der Fehler im Netz damit geklärt. Insgesamt wurden 5,5 GW Erzeugerleistung vom Netz getrennt. Der Ereignisablauf mit Bezug auf die Palo Verde Schaltanlage ist auch in Abb. 2.1 dargestellt. [224 – 227]



**Abb. 2.1** Spannungsverlauf in der Palo Verde Schaltanlage während der Netzstörung am 14.06.2004

Nach Abschaltung der drei 525-kV-Leitungen nach Hassayampa wurde die Spannung in der Palo Verde Schaltanlage signifikant geringer und die Blindleistung auf den verbleibenden Leitungen bzw. von den drei Generatoren stieg stark an. Vor Trennung von der Palo Verde Schaltanlage wurden auf den Warten der drei Blöcke Generatorleistungsschwankungen von 100 MW Wirkleistung und 500 bis 700 MW Blindleistung beobachtet. Da in Palo Verde nicht alle Schienen von den Generatoren versorgt werden, sondern die Notstromschienen direkt vom externen Netz, d. h. über Anfahrtransformatoren von der Schaltanlage Palo Verde, gespeist werden, kam es auch zu einer Propagation der Netzstörung in die Anlage. Dies äußerte sich, in dem sich die Spannung auf den Notstromschienen proportional zur Spannung in der Schaltanlage (siehe Abb. 2.1)

änderte. Da sich die Blöcke im Volllastbetrieb befanden, waren die meisten an diese Schienen angeschlossenen Komponenten nicht in Betrieb. Von den in Betrieb befindlichen Verbrauchern der Notstromschienen schalteten sich einige aufgrund der niedrigen Spannung ab, darunter Batterieladegeräte und Pumpen. [224-227]

In den Blöcken 1 und 2 kam es nach dem Verlust aller externen Netzanbindungen in beiden Blöcken zur TUSA über Überdrehzahl der Turbine und anschließender RESA über das Kriterium „zu geringe Drehzahl der Hauptkühlmittelpumpen“. Alle Dieseldiesengeneratoren (2 pro Block) starteten und speisten ein, allerdings schaltete sich einer der beiden Diesel in Block 2 aufgrund einer fehlerhaften Diode bereits nach 26 Sekunden (während des Wiedereinschaltens von Komponenten) wieder ab. [225]

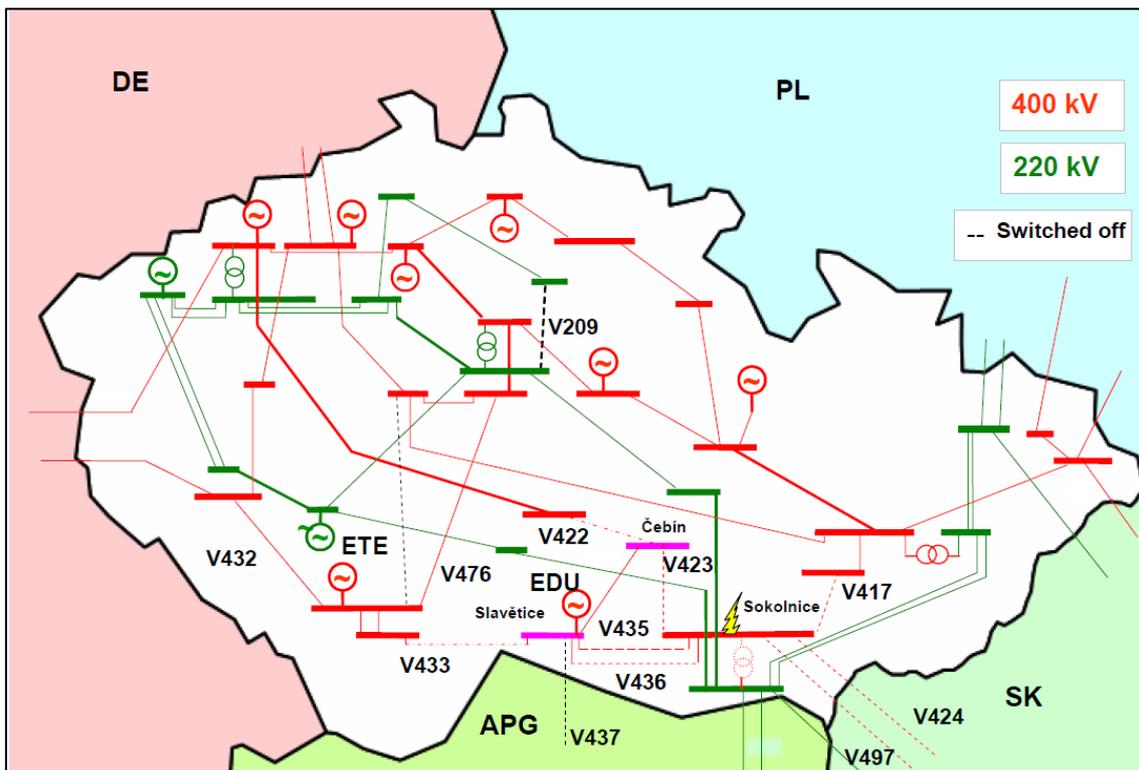
Auch in Block 3 kam es zur TUSA, RESA und zum Start der beiden Dieseldiesengeneratoren. Im Unterschied zum Ereignisablauf in den anderen Blöcken arbeitete in Block 3 der Begrenzer für den Maximal-Erregerstrom des Generators nicht ordnungsgemäß. Nach Isolierung der Palo Verde Schaltanlage vom Netz und der damit wegfallenden Stabilisierung der Frequenz (Netzfrequenz 60 Hz), stieg die Generatorfrequenz auf 67 Hz an. Da die Schalter für die Hauptkühlmittelpumpen noch geschlossen waren stieg die Pumpendrehzahl ebenfalls an. Durch den höheren Durchsatz im Reaktorkühlkreislauf gelangte kühleres Wasser in den oberen Kern, was zu einem schnellen Anstieg der Reaktorleistung führte. Der Reaktorschutz schaltete den Reaktor aufgrund zu hoher Reaktorleistung ab. [225]

Alle drei Blöcke wurden auf hot standby abgefahren. Die Anbindung an das externe Netz wurde in Block 1 nach 4:09 Stunden, in Block 2 nach 1:46 Stunden und in Block 3 nach 2:15 Stunden wiederhergestellt. [224]

### **2.2.2 Dukovany-1, -2 und -3, Tschechische Republik, 03.08.2006**

Am 30.08.2006 befanden sich bei Ereigniseintritt alle drei Blöcke des tschechischen Kernkraftwerks Dukovany im ungestörten Leistungsbetrieb. Das Kraftwerk ist über Höchstspannungsleitungen an die wenige Kilometer entfernte Schaltanlage Slavetice angebunden. Von dieser Schaltanlage wiederum führen Höchstspannungsleitungen zu mehreren Schaltanlagen in der Tschechischen Republik sowie in Österreich, darunter die Schaltanlagen Sokolnice und Cebín. [232]

Spannung und Frequenz des Höchstspannungsnetzes waren vor Ereigniseintritt stabil, allerdings waren in der Schaltanlage Sokolnice aufgrund von Wartungsarbeiten Schutzanlagen der 400-kV-Ebene außer Betrieb genommen worden. Daher konnte ein bei den Wartungsarbeiten auftretender dreiphasiger Kurzschluss in der Schaltanlage nicht in der vorgesehenen Zeit isoliert werden, sondern wurde erst innerhalb von 560 ms durch die Schutzanlagen (Distanzschutz) der nach Sokolnice führenden Leitungen geklärt, d. h. alle mit Sokolnice verbundenen Höchstspannungsleitungen wurden durch Schutzanlagen abgeschaltet. Nach weiteren 50 ms schalteten sich aufgrund der entstandenen Netzinstabilitäten auch die verbleibenden Höchstspannungsleitungen nach Slavetice und Čebín ab (Ansprechen des Distanzschutzes). Die Folge davon war, dass das Kernkraftwerk Dukovany sowie die Schaltanlagen in Slavetice und Čebín vom 400-kV-Netz getrennt wurden und in Inselbetrieb gingen (Abb. 2.2). [232], [233]



**Abb. 2.2** Situation des tschechischen Höchstspannungsnetzes am 03.08.2006 nach Auftreten des Kurzschlusses in der Schaltanlage Sokolnice. [233] Durch den Kurzschluss wurden alle gestrichelt dargestellten Leitungen abgeschaltet und es bildete sich ein Inselnetz aus den Blöcken des Kernkraftwerks Dukovany (EDU) sowie den Schaltanlagen in Slavetice und Čebín. Auch das Kernkraftwerk Temelín (ETE) war von den auftretenden Netzstörungen im verbleibenden Verbundnetz betroffen.

Die Netzfrequenz des Inselnetzes schwankte kurz nach Beginn der Netzstörung zwischen 50 und 53 Hz und stabilisierte sich 12 Sekunden nach Ereigniseintritt kurzfristig auf 52,2 Hz, später auf 51,9 Hz. [232]

In den Blöcken 1, 2 und 4 arbeiteten die Begrenzungs- und Schutzeinrichtungen auslegungsgemäß und die auftretenden Transienten (Anstieg der Drehzahl der Hauptkühlmittelpumpen, Anstieg des Kerndurchsatzes und Absinken der Kernaustrittstemperatur, gefolgt von einem Ansprechen der Reaktorbegrenzungssysteme über zu hohen Neutronenfluss, sowie Anstieg der Drehzahl der Hauptspeisewasserpumpen und des Sekundärdrucks) wurden auslegungsgemäß beherrscht. In allen Blöcken wurden Leistungsreduktionen durchgeführt. In Block 3 kam es durch einen Defekt an einem Relais zusätzlich zum Ausfall einer Schaltanlage und dadurch zum Spannungsverlust an nahezu allen Regelungen, Anzeigen und Armaturen der Sekundärseite, so dass sich die betroffenen Armaturen und Ventile nur noch von Hand verfahren ließen. Dies führte u. a. dazu, dass der Druck auf der Sekundärseite bis über den maximal zulässigen Wert auf 98 bar stieg. Etwa 10 Minuten nach Auftreten des Kurzschlusses wurde Block 3 schutzabgeschaltet. [232], [233]

Die Frequenz des Inselnetzes blieb für etwa 20 Minuten größer 51 Hz und wurde dann langsam auf 50 Hz abgesenkt. 33 Minuten nach Auftreten des Kurzschlusses wurde das Inselnetz wieder mit dem Verbundnetz synchronisiert. Block 2 erreichte nach 3 Stunden wieder Vollast, Block 1 nach 3,5 Stunden, Block 4 nach 6 Stunden und Block 3 wurde nach 9 Stunden wieder bei 100 % Leistung betrieben. [232]

### **2.2.3 Braidwood-1, USA, 27.06.2007**

Durch einen Blitzschlag kam es etwa 7 km vom Anlagengelände entfernt zu einem einphasigen Erdschluss im Höchstspannungsnetz. Durch diesen Erdschluss sank die Spannung in der betroffenen Phase auf etwa 48 % ihres Nennwertes ab, bis die Schutzeinrichtungen in Braidwood und der nächstgelegenen Schaltanlage den Fehler nach 51 ms klärten. [235]

Während dieser Zeit lag an den Hauptkühlmittelpumpen der Anlage ein Phasengleichgewicht vor, da die einbrechende Spannung auf der einen Phase einen erhöhten Strom in den anderen Phasen nach sich zog. Dies führte bei einer Hauptkühlmittelpumpe zur Auslösung des Überstromschutzes und zur Abschaltung der Pumpe. Auslegungsgemäß hätte ein Impedanzrelais die Abschaltung der Pumpe aufgrund des kurz-

zeitigen Überstroms verhindern sollen, aber dieses war aufgrund eines nicht selbst-meldenden Fehlers einer Sicherung nicht betriebsbereit. Dadurch war die Anlage ohne Kenntnis des Schichtpersonals anfällig für die auftretende Netzstörung. [235]

#### **2.2.4 Kori-1, Korea, 09.02.2012**

Die elektrische Eigenbedarfsversorgung der Anlage Kori-1 ist in die beiden Stränge A und B aufgeteilt. In jedem Strang gibt es sicherheitsrelevante und nicht sicherheitsrelevante Schienen. Für die sicherheitsrelevanten 4-kV-Schienen gibt es jeweils drei verschiedene Einspeisemöglichkeiten. Zum einen ist jedem Strang ein Eigenbedarfstransformator (Unit Auxiliary Transformer, UAT) zugeordnet, der entweder vom Blockgenerator oder vom externen 345-kV-Netz versorgt wird. Zum anderen sind zwei Reservenetztransformatoren (Station Auxiliary Transformer, SAT) vorhanden, über die die Stränge A und B vom externen 145-kV-Netz versorgt werden können. Als dritte Einspeisemöglichkeit ist für die sicherheitsrelevanten 4-kV-Schienen A und B jeweils ein Dieselgenerator vorhanden. [242]

Zum Zeitpunkt des Ereignisses befand sich die Anlage in der Revision zum Brennelementwechsel. Aufgrund von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten waren folgende Komponenten nicht verfügbar: im Strang A der Eigenbedarfstransformator, die sicherheitsrelevante 4-kV-Schiene, der Dieselgenerator und die Nachkühlpumpe sowie im Strang B der Reservenetztransformator. Die elektrische Versorgung der Nachkühlpumpe B und weiterer Verbraucher der sicherheitsrelevanten 4-kV-Schiene B erfolgte vom 345-kV-Netz über den Eigenbedarfstransformator B. Die einzige in Reserve stehende elektrische Versorgungsmöglichkeit war zu diesem Zeitpunkt der Dieselgenerator B. [242]

Beim Test von Schutzrelais des Blockgenerators kam es aufgrund eines menschlichen Fehlers zur Trennung der Anlage vom externen Netz. Der Dieselgenerator B erhielt das Startsignal, konnte aber aufgrund eines mechanischen Defekts im Startluftsystem nicht starten. Die Anlage befand sich daraufhin im Station Blackout, eine Kühlung von RDB (geöffneter Deckel) und BE-Becken war nicht mehr verfügbar. [242]

Die elektrische Energieversorgung wurde innerhalb von 12 Minuten vom 345-kV-Netz über den Eigenbedarfstransformator A (Wartungsarbeiten bereits abgeschlossen, aber Diesel noch freigeschaltet) und eine Querverbindung zwischen den sicherheitsrelevanten 4-kV-Schienen A und B manuell wiederhergestellt. Die Nachkühlung sowie die Be-

ckenkühlung waren für insgesamt 19 Minuten ausgefallen. Dadurch stieg die Temperatur des Primärkreises um 21,3 °C von 37 °C auf 58,3 °C an. Die Temperatur des BE-Beckens stieg von 21 °C auf 21,5 °C. [242]

### **2.2.5 Byron, USA, 30.01.2012**

In der Anlage Byron verfügt jeder der beiden Blöcke über zwei Blocktransformatoren, über die der vom Generator erzeugte Strom ins externe Netz gespeist wird. Jeder Block besitzt zwei Eigenbedarfstransformatoren (UAT), über die entweder vom Generator oder vom externen Netz nicht sicherheitsrelevante Eigenbedarfsschienen versorgt werden. Zusätzlich verfügt die Anlage pro Block über zwei Transformatoren (SAT), die nicht vom Generator sondern direkt vom Hauptnetz versorgt werden. Die beiden SAT versorgen zwei weitere, nicht sicherheitsrelevante 6,9-kV-Eigenbedarfsschienen und zwei sicherheitsrelevante 4,16-kV-Eigenbedarfsschienen (ESF-Schienen). Jede 6,9-kV-Eigenbedarfsschiene versorgt eine Hauptkühlmittelpumpe, im Normalbetrieb werden die Pumpen A und D von den UATs versorgt und die Pumpen B und C von den SATs. [244], [245], [246]

Am 30.01.2012 kam es durch den Bruch des Isolators der C-Phase der SATs von Block 2 und den nachfolgenden Abriss der C-Phase zu einem Erdschluss mit hoher Impedanz. Die Schutzeinrichtungen der Anlage waren aufgrund der realisierten Auswahllogik nicht in der Lage, die Unterbrechung der C-Phase und die daraus entstehende Schiefelage bei der Spannung zu detektieren. Es erfolgte lediglich eine Überwachung von Spannungsdifferenzen zwischen den Phasen A und B sowie zwischen den Phasen B und C, aber keine Überwachung der Spannungsdifferenz zwischen den Phasen A und C. Die Auslösung der Schutzaktion war mit einer 2v2-Auswahl der gemessenen Spannungsdifferenzen realisiert. Durch den Ausfall der Phase C änderte sich im vorliegenden Ereignis zwar die gemessene Spannungsdifferenz zwischen den Phasen B und C, aber nicht die gemessene Spannungsdifferenz zwischen den Phasen A und B. Daher war die 2v2-Auswahl nicht erfüllt und es erfolgte keine Auslösung der in dieser Situation erforderlichen Schutzaktion. Die Anlage blieb also über die SATs mit dem externen Netz verbunden. Aus diesem Grund konnte die Asynchronität der Spannung durch die SATs in die Anlage propagieren. [244], [245], [246]

In der Folge detektierte der Reaktorschutz die auftretende Unterspannung auf den beiden von den SATs versorgten 6,9-kV-Eigenbedarfsschienen und löste RESA aus (Kri-

terium: 1v2 Unterspannung in der Versorgung bei zwei von vier Hauptkühlmittelpumpen). Nach der RESA schalten die anderen beiden, bis dahin von den UATs versorgten 6,9-kV-Eigenbedarfsschienen, auslegungsgemäß auf die Versorgung über die SATs um. Dadurch entstand eine höhere Last an den SATs. Aufgrund der ausgefallenen Phase C stieg der Stromfluss in den verbleibenden Phasen A und B daraufhin stark an, wodurch der Aggregateschutz alle vier Hauptkühlmittelpumpen über Überstrom abschaltete. [244], [245], [246]

Die sicherheitsrelevanten 4,16-kV-Schienen wurden nach wie vor über die SATs, d. h. mit asynchroner Spannung, versorgt, da der Reaktorschutz aufgrund seiner Auslegung nicht in der Lage war, die Situation richtig zu detektieren. Es erfolgte daher auch kein Start der Notstromdiesel. Dadurch wurden die in Betrieb befindlichen sicherheitsrelevanten Komponenten mit asynchroner Spannung und asynchronem Überstrom gespeist, was eine Schädigung der Komponenten nach sich ziehen kann. Eine Reihe dieser Komponenten wurden vom Aggregateschutz über das Kriterium Überstrom schutzabgeschaltet, andere nicht. [244], [245], [246]

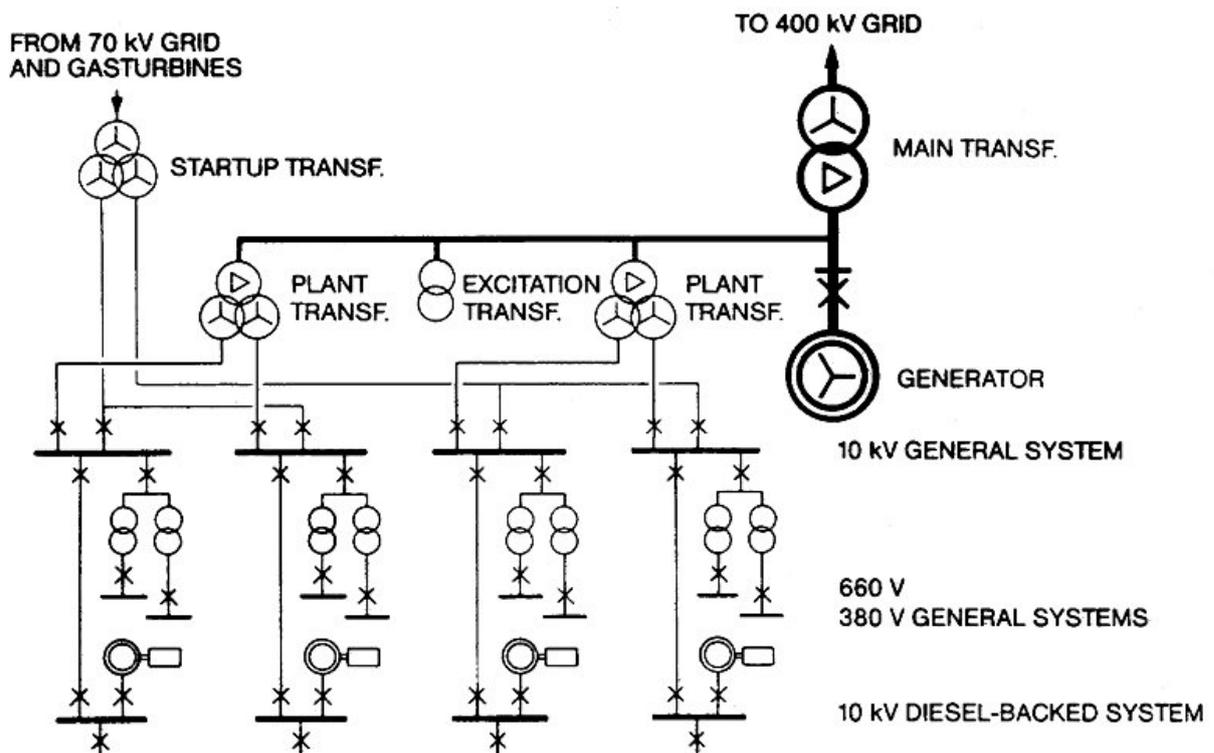
Etwa 8 Minuten nach der RESA stellte die Schicht nach Berichten von anderem Kraftwerkspersonal über Rauch an den SATs und der Schutzabschaltung einiger sicherheitsrelevanter Komponenten den Ausfall der Phase C fest und leitete manuell das Öffnen der Schalter zwischen den Eigenbedarfsschienen und der Stromversorgung über die SATs ein. Dadurch entstand eine ausreichende Unterspannung auf den Schienen, wodurch die Notstromdiesel ein EIN-Signal bekamen und die Versorgung der sicherheitsrelevanten 4,16-kV-Notstromschienen übernahmen. [244], [245], [246]

### **2.2.6 Forsmark NPP, Block 3, 30. Mai 2013<sup>3</sup>**

Block 3 der schwedischen Anlage Forsmark befand sich am 30.05.2013 seit 11 Tagen in Revision. [248] Die 70-kV-Reservenetzanbindung war für Wartungsarbeiten freigeschaltet, der Eigenbedarf der Anlage wurde über das 400-kV-Hauptnetz gedeckt. Der für das Ereignis relevante Teil des Eigenbedarfs ist in Abb. 2.3 dargestellt.

---

<sup>3</sup> Ereignis aus 2013 ist in Zusammenhang zu sehen zu dem Ereignis Byron, USA, 2012 (Kap. 2.2.5).



**Abb. 2.3** Schematischer Aufbau Eigenbedarf und Netzanbindung Forsmark [249]

Bei Wartungsarbeiten an der Erregereinrichtung des Generators kam es gegen 10:01 Uhr zu Fehlanregungen von Blockschutzeinrichtungen mit der Folge, dass der Hauptnetzschalter einen AUF-Befehl erhielt. In 2 von 3 Phasen öffnete der Hauptnetzschalter daraufhin auslegungsgemäß, eine Phase blieb jedoch mit dem – netzseitig verfügbaren – Hauptnetz verbunden. Die einzelne verfügbare Phase an der 400-kV-Oberspannungsseite des Maschinentransformators (Main Transformer) führte auf der 10-kV-Unterspannungsseite der Eigenbedarfstransformatoren (Plant Transformer) dazu, dass in zwei der drei Phasen die Spannungsgrenzwerte, bei denen der Reaktorschutz die Schiene als ausgefallen erkennt, nicht unterschritten wurden. Da die Erkennung in einer 2-von-3-Auswahl realisiert ist, kam es zu keiner Anregung der eigentlich notwendigen Reaktorschutzaktionen (Trennung der notstromversorgten Schienen vom Netz, Start der Diesel).

In der Folge schalteten sich diverse (mindestens 146 [248]) sicherheitstechnisch wichtige Verbraucher mit Differential- bzw. Überstromschutz automatisch ab, u. a. kam es zu einem vollständigen Ausfall der Nachkühlketten. Einige nicht-sicherheitstechnisch wichtige Verbraucher ohne vergleichbare Schutzeinrichtungen wurden durch Überhitzung beschädigt. [248]

Um 10:15 Uhr wurde per Handmaßnahme ein Strang des Notstromnetzes (10-kV Diesel-backed System [Abb. 2.3]) vom Rest der Anlage durch Öffnen der Einspeiseschalter getrennt und der zugehörige Diesel gestartet. 2 Minuten später konnte eine Nachkühlkette und die Kühlwasserversorgung der Diesel wiederhergestellt werden. In den folgenden Minuten wurden die anderen 3 Stränge des Notstromnetzes durch Handmaßnahmen wieder verfügbar gemacht. Gegen 10:37 Uhr war die Versorgung aller vier Notstromschienen und der Nachkühlketten durch die Diesel wiederhergestellt.

Die Ursachenklärung ergab, dass das Nicht-Öffnen einer Phase des Hauptnetzschalters durch eine fehlende Kabelverbindung in einem Schaltschrank verursacht worden ist.



### 3 Bewertung der aufgetretenen Ereignisse

Die ungeplante Trennung eines Kernkraftwerks von den externen Netzanbindungen kann unterschiedliche Ursachen haben. Oftmals liegt auch ein Zusammentreffen mehrerer Ursachen vor. Auch ist die Reaktion der Anlagen auf die Ereignisse unterschiedlich. So muss es bei Ausfall aller Netzanbindungen beispielsweise nicht zwangsläufig zu einer Reaktorschnellabschaltung kommen, wenn ein erfolgreicher Lastabwurf auf Eigenbedarf durchgeführt wird. Eine weitere mögliche Folge einer Netzstörung ist der Übergang in einen Inselbetrieb, der nicht das Kraftwerk allein sondern auch umliegende Schaltanlagen oder Verbraucher umfasst.

Eine Propagation einer Netzstörung in die Anlage sollte normalerweise durch Schutz-einrichtungen verhindert werden. Daher liegt hier, vor allem wenn die Situation längerfristig (mehrere Sekunden oder länger) bestehen bleibt, meist eine Kombination mehrerer Ursachen vor.

Die in Kapitel 3 geschilderten Ereignisse mit Verlust oder Störung der Netzanbindungen der Kernkraftwerke wurden teilweise durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen, die jedoch wiederholt beobachtet werden können. Daher finden sich bei vielen Ereignissen vergleichbare Ursachen. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

Einige der Ereignisse mit Verlust der externen Netzanbindungen traten im Zusammenhang mit den in Teil A des vorliegenden Berichts beschriebenen großflächigen Netzstörungen oder Netzausfällen auf:

- großflächiger Netzausfall, der zum Notstromfall oder Station Blackout der Anlage führte, wie beispielsweise
  - 14.08.2003: 18 Anlagen in den USA und Kanada (siehe Teil A, Abschnitt 3.1),
  - 10.11.2009: Angra-1 und 2, Brasilien (siehe Teil A, Abschnitt 3.13),
  - 11.03.2011: 7 Anlagen in Japan (siehe Teil A, Abschnitt 3.14) oder
  - 29.10.2012: Oyster Creek, USA (siehe Teil A, Abschnitt 3.18).
- großflächiger Netzausfall, der zum Verlust der Netzanbindungen und einem erfolgreichen Lastabwurf auf Eigenbedarf der Anlage führte, wie beispielsweise
  - 14.08.2003: 4 Anlagen in Kanada (siehe Teil A, Abschnitt 3.1),

- 23.09.2003: Ringhals-4, Schweden (siehe Teil A, Abschnitt 3.3) oder
- 30.07.2012: Narora-1 und -2, Indien (siehe Teil A, Abschnitt 3.17).

Eine Reihe von Ereignissen, die über das korrekte Ansprechen von Netz- oder Blockschutzeinrichtungen zur Trennung der Anlage vom externen Netz führten, traten aufgrund von anlagennahen bzw. lokalen Einzelfehlern im externen Netz auf:

- Ereignisse durch Witterungseinflüsse (Blitzschläge, Eisregen, Starkwind etc.) oder Naturereignisse (Erdbeben etc.), wie beispielsweise
  - 15.09.2003: Peach Bottom-2 und 3 (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7),
  - 08.02.2004: Biblis-B (siehe Teil B, Abschnitt 2.1.1),
  - 30.12.2005: Paluel, Frankreich (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7),
  - 18.01.2007: Emsland (siehe Teil B, Abschnitt 2.1.3, hier war das Reservenetz weiterhin verfügbar)
  - 11.06.2008: Forsmark-2, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 23.08.2011: North Anna-1 und -2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).
- menschliche Fehleinschätzungen oder fehlerhafte Personalhandlungen im Rahmen von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten am externen Netz, wie beispielsweise
  - 11.10.2004: Dungeness-A1-1, Großbritannien (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7),
  - 03.08.2006: Dukovany-1, -2, -3 und -4, Tschechische Republik (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.2; bei diesem Ereignis kam es nicht zur Trennung der Anlage vom Netz, sondern zum Inselbetrieb der Anlage mit zwei Schaltanlagen) oder
  - 28.06.2007: Brunsbüttel (siehe Teil B, Abschnitt 1.1.1; bei diesem Ereignis war das Reservenetz weiterhin verfügbar).

- Spannungs- oder Frequenzschwankungen im externen Netz oder lokale Netzstörung, wie beispielsweise
  - 01.01.2005: Angra-1, Brasilien (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7),
  - 25.03.2008: Chashma-1, Pakistan (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 30.04.2008: Atucha, Argentinien (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).

Bei vielen Fällen, die zur Trennung der Anlage vom externen Netz führten oder eine Propagation einer Netzstörung in die Anlage nach sich zogen, lag eine Kombination aus einem Einzelfehler und einer nicht korrekt arbeitenden Schutzeinrichtung vor:

- Versagen einer Netzschutzeinrichtung (z. B. durch einen Defekt), wie beispielsweise
  - 14.06.2004: Palo Verde-1, -2 und -3, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.1).
- Außerbetriebnahme einer Netzschutzeinrichtung (z. B. während Wartungsarbeiten), wie beispielsweise
  - 03.08.2006: Dukovany-1, -2 und -3, Tschechische Republik (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.2).
- Ungeeignete Schutzeinrichtung im Netz (z. B. Sammelschienenschutz der Schaltanlage), die den auftretenden Fehler nicht klären konnten, wie beispielsweise
  - 25.07.2006: Forsmark-1, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).
- Ungeeignete oder fehlende Schutzeinrichtung in der Anlage (z. B. Blockschutzeinrichtung), die den auftretenden Fehler nicht klären konnten, wie beispielsweise
  - 30.01.2012: Byron-2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.5) oder
  - 13.07.2012: Forsmark-3, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt, Tabelle 7).
- Versagen oder ungeeignete Einstellung von nachgelagerten Schutzeinrichtungen in der Anlage (z. B. Aggregateschutz), die eine Auswirkung des Fehlers auf Komponenten nicht verhindern konnten, wie beispielsweise
  - 25.07.2006: Forsmark-1, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 27.06.2007: Braidwood-1, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.3).

Bei Fällen, in denen eine Schutzeinrichtung nicht korrekt arbeitet oder aus anderen Gründen versagt, sind zumeist Schädigungen oder Fehlfunktionen der nachgelagerten Komponenten durch die Störung nicht auszuschließen. Bei den hier aufgeführten handelt es sich beim auslösenden Fehler um Störungen, die nicht alle drei Phasen des externen Netzes gleichermaßen beeinflussen:

- Einphasige Kurz- oder Erdschlüsse, wie beispielsweise
  - 14.06.2004: Palo Verde-1, -2 und -3, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.1),
  - 27.06.2007: Braidwood-1, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.3) oder
  - 30.01.2012: Byron-2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.5).
- Zweiphasige Kurz- oder Erdschlüsse, wie beispielsweise
  - 25.07.2006: Forsmark-1, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).

Bei den folgenden Ereignissen zeigt sich, dass es durch die Propagation von Netzstörungen in die Anlage auch zu systematischen Ausfällen kommen kann:

- Common cause failures von betroffenen Komponenten, wie beispielsweise
  - 25.07.2006: Forsmark-1, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 11.06.2008: Forsmark-2, Schweden (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).

Auch gab es Fälle, in denen es zur Trennung der Anlage vom externen Netz kam, ohne dass eine Störung des externen Netzes vorlag:

- Passive Fehler oder Logikfehler, die durch ein unabhängiges einleitendes Ereignis zu Tage traten, wie beispielsweise
  - 06.07.2010: Shin-Kori, Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 04.04.2012: Catawba-1 und -2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).
- Durchführung von Prüfungen an mit der Stromerzeugung verbundenen Komponenten (Generator etc.), wie beispielsweise
  - 09.02.2012: Kori-1, Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.4).

- Fehlauslösung von Signalen, wie beispielsweise
  - 06.07.2010: Shin-Kori, Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).
- Technische Defekte, wie beispielsweise
  - 07.11.2004: Obrigheim (siehe Teil B, Abschnitt 2.1.2; bei diesem Ereignis war das Reservenetz weiterhin verfügbar) oder
  - 28.06.2007: Krümmel (siehe Teil B, Abschnitt 2.1.5; bei diesem Ereignis war das Reservenetz weiterhin verfügbar).

In einigen Fällen wurde der Ereignisverlauf durch zusätzliche Fehler negativ beeinflusst:

- technische Defekte von zur Ereignisbeherrschung benötigten Komponenten, wie beispielsweise
  - 23.08.2011: North Anna-2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7) oder
  - 09.02.2012: Kori-1, Republik Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.4).
- Zerstörung von zur Ereignisbeherrschung benötigten Komponenten durch externe Einwirkungen, wie beispielsweise
  - 11.03.2011: Fukushima Daichi-1, -2, -3, -4, -5 und -6 (siehe Teil A, Abschnitt 3.14).

Auch traten immer wieder Notstromfälle oder Ereignisse mit Station Blackout während der Revision oder dem Nichtleistungsbetrieb der Anlagen auf:

- im Vergleich zum Leistungsbetrieb geringere Zahl an Rückfallebenen bei der elektrischen Energieversorgung (Lastabwurf auf Eigenbedarf nicht möglich, Freischaltung von Komponenten wie Dieselgeneratoren oder Transformatoren etc.), wie beispielsweise
  - 06.07.2010: Shin-Kori-1, Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7),
  - 09.02.2012: Kori-1, Korea (siehe Teil B, Abschnitt 2.2.4) oder
  - 04.04.2012: Catawba-2, USA (siehe Teil B, Abschnitt 2.2, Tabelle 7).



## Zusammenfassung

Der Ablauf von Netzstörungen und Netzausfällen, bei denen technische Defekte, menschliche Fehleinschätzungen oder das Ungleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung ursächlich sind, unterscheidet von solchen, bei denen externe Einflüsse wie Stürme oder Erdbeben zum Netzausfall führen. Im Fall technischer Defekte, menschlicher Fehleinschätzung u. ä. geht der Netzwiederaufbau meist zügig vonstatten. So waren die Verbraucher bei Netzausfällen aufgrund von technischen Defekten u. ä. meist innerhalb einiger Stunden wieder versorgt, wie beispielsweise in Schweden und Dänemark 2003 nach 7 Stunden, in Griechenland 2004 nach 2 Stunden, in Europa 2006 ebenfalls nach 2 Stunden, in Brasilien und Paraguay 2009 nach 4 Stunden und in Indien 2012 nach 15 bzw. 16 Stunden. Bei den großen Netzausfällen in den USA dauerte der Netzaufbau 2003 bis zu 48 Stunden und 2008 in Florida 36 Stunden. Sobald der Netzausfall auf Witterungseinflüsse wie Stürme oder Eisregen oder sonstige Naturereignisse zurückzuführen ist, dauert der vollständige Netzwiederaufbau aufgrund der in diesen Fällen auftretenden Schäden am Stromnetz oder an Erzeugungskapazitäten zumeist mehrere Tage oder sogar Wochen, wie beispielsweise im Münsterland 2005 (4 Tage), in Frankreich und Spanien 2009 (mehr als 1 Tag), in Japan 2011 (mehr als 3 Wochen) und in den USA 2012 (mehr als 10 Tage). Eine detailliertere Bewertung der Ursachen der hier beschriebenen Netzausfälle wird in Teil A, Abschnitt 4 gegeben.

In der Betriebserfahrung sind anlagenspezifisch sehr unterschiedliche Auswirkungen von Netzausfällen und Netzstörungen auf deutsche und internationale Kernkraftwerke zu beobachten. In einer Vielzahl von Ereignissen im internationalen Umfeld führten Netzininstabilitäten und Netzausfälle in den Jahren 2003 bis 2012 zu Notstromfällen in Kernkraftwerken. Teilweise standen diese Ereignisse im Zusammenhang mit großflächigen Netzausfällen, andere sind auf anlagennahe oder lokale Fehler im externen Netz zurückzuführen. Es ist zu beobachten, dass häufig eine Kombination aus einem Einzelfehler und einer nicht korrekt arbeitenden bzw. ungeeigneten Netz- oder Blockschutzeinrichtung ursächlich für die Trennung einer Anlage vom externen Netz oder aber die Propagation einer Netzstörung in die Anlage war. Dabei können die auslösenden Einzelfehler im Netz auch Störungen, die nur eine oder zwei Phasen des externen Netzes betrafen sein, wie beispielsweise 2004 in Palo Verde, 2006 in Forsmark oder 2012 in Byron. Dies verdeutlicht, wie wichtig es ist, dass Netz- und Blockschutzeinrichtungen auch im Hinblick auf solche Fehler wirksam arbeiten. Deren ordnungsgemäße

Funktion leistet einen entscheidenden Beitrag dazu, dass die Eigenbedarfs- bzw. Notstromversorgung der Anlage auslegungsgemäß zur Verfügung steht.

Der letzte Notstromfall in einer deutschen Anlage ereignete sich 2004 im Kernkraftwerk Biblis. Hier werden Unterschiede in der Auslegung deutscher und vieler internationaler Kernkraftwerke sichtbar. Kommt es während des Leistungsbetriebs einer deutschen Anlage zu einer Störung am Hauptnetz oder am Hauptnetzanschluss, wird zunächst ein Lastabwurf auf Eigenbedarf ausgelöst. Dieser war nach den der GRS vorliegenden Informationen in den vergangenen Jahren in 20 von 28 Fällen längerfristig erfolgreich. Misslingt der Lastabwurf auf Eigenbedarf, kommt es zu einer Umschaltung auf das Reservenetz. Erst wenn auch diese nicht gelingt, muss die Versorgung der sicherheitstechnisch wichtigen Verbraucher der Anlage durch Notstromdiesel aufrechterhalten werden. Da international nicht alle Anlagen zwei getrennte Netzanschlüsse besitzen und die Anlagen teilweise auch nicht lastabwurffähig sind, besitzen die deutschen Anlagen im Vergleich zu diesen internationalen Anlagen mehr Rückfallebenen zur Aufrechterhaltung der Eigenbedarfsversorgung bevor ein Notstromfall überhaupt eintreten kann.

Abgesehen von der Eigenbedarfsversorgung des Kernkraftwerks ermöglicht der Lastabwurf auf Eigenbedarf beim Ausfall des Stromversorgungsnetzes einen schnelleren Wiederaufbau des Netzes. Kernkraftwerke und auch viele Kraftwerke mit fossilen Energieträgern können nicht ohne externe Zuführung von elektrischer Energie in den Anfahrbetrieb gehen. Nach einem erfolgreichen Lastabwurf auf Eigenbedarf ist jedoch die Aufnahme des Normalbetriebs ohne externe elektrische Energiezufuhr möglich, da die Anlage bereits alle relevanten Systeme selbst versorgt und lediglich die Leistung erhöht werden muss, um wieder ins Netz einspeisen zu können. Beispielsweise sind US-amerikanische Anlagen im Gegensatz zu den kanadischen CANDU-Reaktoren in vielen Fällen nicht lastabwurffähig, was sich auch beim Netzausfall 2003 in den USA und Kanada auf die Zahl an Notstromfällen in Kernkraftwerken und vor allem auf die benötigte Zeit bis zum erneuten Einspeisen der Anlage ins Netz auswirkte.

Die zuverlässige Versorgung der deutschen Kernkraftwerke mit elektrischer Energie aus dem Verbundnetz hat in der Vergangenheit zu deren auslegungsgemäßigem Betrieb beigetragen. Die hohe Bedeutung einer zuverlässigen elektrischen Energieversorgung aus dem Verbundnetz ist auch aufgrund der zukünftig zunehmenden Anzahl von Kernkraftwerken in der Nachbetriebsphase unverändert gegeben.

Vor dem Hintergrund der Energiewende in Deutschland und aufgrund der Bedeutung der elektrischen Energieversorgung von Kernkraftwerken für deren sicheren Betrieb sollte der Zuverlässigkeit der Netzversorgung in Deutschland daher besondere Beachtung geschenkt werden. Aus Sicht der GRS sollten die Entwicklungen bei Energieerzeugung und -transport verfolgt und unter den Aspekten der Zuverlässigkeit der deutschen Stromversorgung und der Stabilität des europäischen Verbundnetzes ausgewertet werden, um frühzeitig angemessene Gegenmaßnahmen bei einer Verschlechterung der Zuverlässigkeit des deutschen Stromnetzes auch im Hinblick auf die sicherheitstechnische Bedeutung für die in Betrieb und in der Nachbetriebsphase befindlichen deutschen Kernkraftwerke ergreifen zu können.



## **Anhang: Netzausfälle in den Jahren 2003 bis 2012**

Da die Zahl der jährlich auftretenden Netzstörungen und Netzausfälle sehr hoch ist, wurden für das Kapitel 3 nur einige herausragende Netzstörungen und Netzausfälle aus den Jahren 2003 bis 2012 ausgewählt und beispielhaft beschrieben. Eine Übersicht über Netzausfälle und Netzstörungen aus den Jahren 2003 bis 2012 ist in nachfolgender Tabelle gegeben. Auch bei dieser Übersicht handelt es sich um eine Zusammenstellung ausgewählter Netzstörungen und Netzausfälle, sie erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die in Kapitel 3 (Teil A) ausführlicher beschriebenen Netzausfälle sind in dieser Übersicht grau hinterlegt.

In der Übersicht wird zumeist entweder die Zahl der betroffenen Verbraucher oder die Zahl der betroffenen Personen genannt. Die Zahl der Verbraucher bezieht sich dabei in den meisten Quellen auf die Zahl der vom Stromausfall betroffenen Stromzähler und nicht auf die Zahl der vom Stromausfall betroffenen Personen. Da pro Haushalt üblicherweise ein Stromzähler vorhanden ist, kann die Zahl der Verbraucher in den meisten Fällen mit der Zahl der betroffenen Haushalte gleichgesetzt werden. Bei einem Verbraucher kann es sich also um eine Einzelperson, eine Familie, aber auch um ein Industrie- oder Bürogebäude handeln. Die Zahl der Verbraucher wird insbesondere von Stromversorgern bevorzugt verwendet, da sie sich im Gegensatz zur Zahl der betroffenen Personen direkt angeben lässt. Die Zahl der betroffenen Personen ist zumeist eine Schätzung, die aus der Zahl der Verbraucher durch Multiplikation (häufig mit dem Faktor 2 oder 3, aber gelegentlich auch mit dem Faktor 1 oder dem Faktor 4) ermittelt wird.

Grundsätzlich wurden Stromausfälle mit weniger als 100 000 betroffenen Personen bzw. weniger als 50 000 betroffenen Verbrauchern nicht in die Übersicht mit einbezogen.

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
12.01.2003	Kroatien, Bosnien Herzegovina	Kurzschluss auf einer 400-kV-Übertragungsleitung; Kaskadierender Ausfall von Stromleitungen, Transformatoren und Erzeugungseinheiten führt 30 Sekunden nach dem ersten Ausfall zum Stromausfall	2 Stunden	keine Angaben	keine Angaben	[65]
31.01.2003	Kanada (Ontario)	Ablagerungen von Streusalz auf den Isolatoren im Kraftwerk Preston führen bei Nebel zu einem Kurzschluss mit Lichtbogen und Ausfall der Hochspannungsversorgung	4,5 Stunden	keine Angaben	150 000	[44]
03.02.2003	Algerien	Ausfall von zwei Gasturbinen (350 MW) im Kraftwerk Hamma; durch den nachfolgenden Frequenzeinbruch Schutzabschaltung weiterer Kraftwerke; nach 15 Sekunden Zusammenbruch des Netzes in Nordalgerien bei 46 Hz	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[45]
15.03.2003	USA (Texas)	Blitzschlag in eine Hochspannungsleitung, daraufhin Lastabwurf weiter Teile von Texas	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[45]
31.03.2003	Iran	Lastspitze, einige Kraftwerke und Übertragungsleitungen nicht verfügbar; 7 GW fehlen	8 Stunden	22 000 000 (32 % der Bevölkerung)	keine Angaben	[60]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird.

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
26.06.2003	Italien (Mailand, Rom und weitere Städte)	Unterkapazitäten bei der Stromerzeugung, die nicht durch Stromimporte gedeckt werden konnten, führen bei einer Lastspitze zu Lastabwürfen (gezielte Stromabschaltungen, keine Vorwarnzeit) In der Folge wurden die Temperaturgrenzwerte bei der Wassererwärmung durch Kraftwerke angehoben, um einigen Kraftwerken den weiteren Betrieb zu ermöglichen.	mehrere Stunden	6 000 000	keine Angaben	[61], [62]
21.07.2003	Balearen (Mallorca, Menorca)	Überlastung der Netze durch Lastspitze (Hitze und starker Gebrauch von Klimaanlage) führen zu Abschaltungen in einem Elektrizitätswerk	12 Stunden	keine Angaben	1 500 000	[99]
14.08.2003	<i>USA und Kanada (Ohio, Michigan, Pennsylvania, New York, Vermont, Massachusetts, Connecticut, New Jersey sowie Ontario)</i>	<i>Kombination aus Instandhaltungsmängeln, menschlichen Fehlern und Versagen von elektrischen Komponenten normalerweise braucht die Region 61 800 MW</i>	<i>24 Stunden bis zu 1 Woche</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>50 000 000</i>	<i>[26], [27]</i>
23.08.2003	Finnland (Helsinki, Vantaa)	Schaltfehler	37 Minuten	keine Angaben	500 000	[59]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
27.08.2003	Kroatien	Fehler im Kraftwerk Krsko, Auslösung der Schutzschalter in einem Umspannwerk durch Fehlverhalten des Schutzes vor Schalterversagen	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[59]
28.08.2003	Großbritannien (London)	<i>Freischaltungen kombiniert mit Fehlern elektrischer Komponenten in den verbleibenden beiden Leitungen Ansprechen Buchholzschutz 724 MW fehlen (20 % der Gesamtlast Londons zu diesem Zeitpunkt)</i>	<i>38 Minuten [27]</i>	<i>410 000</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>[2], [27], [60]</i>
18.09.2003	USA (North Carolina, Virginia, Maryland, Delaware, West Virginia, Pennsylvania, District of Columbia)	Beschädigte Stromleitungen durch Hurrikan Isabel führt in vielen Gebieten zum Ausfall der Stromversorgung	keine Angaben	6 000 000	keine Angaben	[66]
01.09.2003	Malaysia (Hauptstadt und 5 Bundesstaaten)	keine Angaben	5 Stunden	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[64]
02.09.2003	Mexico (Cancun, Yucatan)	keine Angaben	3 Stunden	keine Angaben	3 000 000	[64]
05.09.2003	Großbritannien (Birmingham)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[63]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
23.09.2003	Dänemark und Schweden (Seeland, Lolland, Bornholm, Südschweden)	Ausfall eines Kraftwerks und 15 Minuten später Kurzschluss in einer Verteilerstation, der zur Abschaltung von vier 400-kV-Leitungen und dadurch zur Trennung mehrerer Kraftwerke vom Netz führte; anschließend wurden durch Netzinstabilitäten weitere Kraftwerke abgeschaltet es fehlen 3 000 MW in Schweden und 1850 MW in Dänemark	6,5 Stunden	keine Angaben	1 600 000 in Schweden und 2 400 000 in Dänemark [28]	[27], [28], [60]
28.09.2003	Italien und Schweiz (ganz Italien außer Sardinien, Tessin, Oberengadin, Wallis)	Lichtbogen (Ausfall einer 380-kV-Leitung durch Überschlag auf Baum) und danach unzureichende Koordination der Korrekturmaßnahmen (Leistungsüberlastung und anschließend kaskadierende Leitungsabschaltungen) Es fehlen 24 GW	18 Stunden	keine Angaben	57 000 000	[25], [29], [60]
30.09.2003	Georgien (weite Teile)	Sabotage; Angriff mit Minen und Sprengstoff auf eine Übertragungsleitung von Russland nach Georgien	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[100]
09.10.2003	Deutschland (Berlin)	Kurzschluss in einem 110-kV-Kabel im Umspannwerk Wiebestraße; Stromausfall auch am Flughafen Tegel, Ausfall von Ampelanlagen	20 Minuten	100 000	keine Angaben	[102]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
22.10.2003	Großbritannien (Cheltenham, Gloucester)	Fehler in einem Umspannwerk	1,5 Stunden	70 000	keine Angaben	[63], [103]
November 2003	Jordanien (weite Teile)	2-poliger Kurzschluss auf 400-kV-Leitung nach Syrien kombiniert mit Versagen auf zwei 400-kV-Leitungen/Fehler Schutzeinstellung; Trennung der Verbindung nach Ägypten	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[59]
08.02.2004	Deutschland (Worms)	Sturmtief Ursula verursacht Schäden am Übertragungsnetz; Kernkraftwerk Biblis-B muss heruntergefahren werden, da die Leistung nicht mehr ins Netz gespeist werden kann; zusätzlich starke Sturmschäden mit nachfolgendem Brand an einem Umspannwerk	2 Stunden	keine Angaben	keine Angaben	[104]
13.02.2004	Norwegen (westliche Landesteile, Bergen)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	300 000	[52]
14.06.2004	USA (Arizona)	Netzstörung bleibt für 38 Sekunden ungeklärt und führt zur Schutzabschaltungen vieler Leitungen und von Kraftwerken mit insgesamt 5,5 GW Leistung	2 Stunden	65 000		[224 - 227]
20.06.2004	Frankreich (Korsika)	Fehlfunktion der Fernkontrollsystems des Umspannwerks Lucciana führt zu einem kompletten Zusammenbruch des Netzes	keine Angaben	keine Angaben	300 000	[52]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
29.06.2004	Spanien (Sevilla)	Ausfall mehrerer Übertragungsleitungen	keine Angaben	keine Angaben	120 000	[52]
Sommer 2004	China (24 der 31 Provinzen)	Fehler in den Leitungen, Probleme bei der Kohlezulieferung an Kohlekraftwerke; Strombedarf übersteigt die Stromerzeugung, daher gezielte Lastabwürfe alle 2 Tage (trifft auch Industrie); es fehlen 35 GW	alle 2 Tage	keine Angaben	keine Angaben	[52]
12.07.2004	Griechenland (Athen und Teile Südgriechenlands)	<i>Ausfall von 2 Kraftwerksblöcken in Athen in kurzem zeitlichen Abstand, dadurch Überlast im Süden; Erzeuger mit 4 500 MW fehlen Distanzschutz in den 400-kV-Nord-Süd-Leitungen öffnet wegen Unterspannung, dadurch Abspaltung der betroffenen Region von der 2. synchronen UCTE-Zone; Zusammenbruch des abgespaltenen Teils und Anstieg der Netzfrequenz auf 50.75 Hz in der verbleibenden 2. UCTE-Zone</i>	<i>2 Stunden (Angaben variieren)</i>	keine Angaben	5 000 000	[52]
19.07.2004	Spanien (Cádiz)	Zwischenfall im Kohlekraftwerk Bahia de Algeciras	keine Angaben	keine Angaben	1 000 000	[52]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
09.08.2004	Jordanien (landesweit)	Bruch in einer Gasleitung, dadurch Ausfall des Kraftwerks Aqaba (5 x 130 MW); nachfolgend Ausfall von Übertragungsleitungen zwischen Jordanien und Syrien sowie zwischen Jordanien und Ägypten; jordanisches Netz in Unterfrequenz; daraufhin kompletter Ausfall der Stromversorgung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[52]
18.08.2004	Georgien	Ausfall mehrerer Übertragungsleitungen	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[52]
23.08.2004	Bahrein	Ausfall der Stromversorgung aufgrund Überlast; Klimaanlage führen letztlich dazu, dass der Strombedarf die Stromerzeugung übersteigt	keine Angaben	keine Angaben	1 200 000	[52]
23.08.2004	Argentinien (Buenos Aires)	Fehler an einem Transformator	40 Minuten	keine Angaben	600 000	[52], [106]
02.09.2004	Luxemburg, Deutschland (Großraum Trier)	<i>Fehlerhafte 220-kV-Leitung, Wartungsarbeiten und eine verfrühte Überlastauslösung</i>	<i>bis zu 4,7 Stunden</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>540 000</i>	<i>[29]</i>
04.-15.09.2005	USA (Florida, Alabama, Georgia)	Schäden am Übertragungsnetz durch Hurrikan Frances	mehrere Tage	keine Angaben	5 000 000	[64]
26.-30.09.2004	USA (Florida)	Schäden am Übertragungsnetz durch Hurrikan Jeanne	mehrere Tage	keine Angaben	2 600 000	[74]
27.09.2004	Brasilien (9 Staaten)	Fehler in einer Schaltanlage	1 Stunde	keine Angaben	47 000 000	[105]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
01.11.2004	Deutschland (Frankfurt)	Isolationsschaden an einem Spannungswandler, dessen Explosion beschädigt zwei Leistungstransformatoren und führt zum Einsturz einer Außenwand der Umspannstation	9 Stunden	26 500	keine Angaben	[59], [107]
18.11.2004	Spanien (Madrid)	Brand eines Transformators im Umspannwerk Cerro de Plata	keine Angaben	200 000	keine Angaben	[52]
22.11.2004	Spanien (Sevilla und Estremadura)	Brand in Endesa-Kraftwerk	keine Angaben	keine Angaben	1 000 000	[52]
Januar 2005	Georgien	Mehrere Stromausfälle nach Beschädigung der Stromleitungen in der Region Abchasien durch Beschuss	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[51]
01.01.2005	Brasilien (Rio de Janeiro, Espírito Santo)	Stromausfall wird einer Cyberattacke zugeschrieben, nähere Details sind derzeit nicht bekannt	1 Stunde	keine Angaben	keine Angaben	[64]
09.01.2005	Schweden und weitere Länder in Nordeuropa	Orkan Gudrun; Sturmschäden an ca. 30 000 km Hochspannungsleitungen; 4 KKW's zur Sicherheit außer Betrieb genommen	>1 Tag	keine Angaben	663 000	[51]
18.01.2005	Schweiz (Westen einschließlich Genf und Lausanne)	Blitzeinschlag in die einzige 380-kV-Verbindung zwischen der Westschweiz und Frankreich; danach kaskadierender Ausfall von 220-kV-Leitungen wegen Überlast	1 Stunde	keine Angaben	500 000	[50]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
23.02.2005	Guadeloupe	Ausfall des Kraftwerks Jarry Nord (erzeugt 66 % der benötigten Strommenge) und nachfolgender Ausfall weiterer Kraftwerke; Flächendeckender Stromausfall	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[51]
März 2005	Frankreich (Korsika)	Kälte kombiniert mit Schwierigkeiten bei der Kraftstofflogistik zur Versorgung eines Kraftwerks; Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, daher Lastabwürfe (Rolling blackouts)	30 Minuten alle 3 Stunden	keine Angaben	208 000 Verbraucher	[51]
13.05.2005	Frankreich (Süden)	Waldbrand erfordert das Abschalten zweier Hochspannungsleitungen	mehrere Stunden	keine Angaben	1 000 000 Verbraucher	[29]
23.05.2005	Russland (Moskau und drei angrenzende Regionen)	Kurzschluss in einem 500/220-kV-Umspannwerk (Chagino), zusätzlich schlechter Instandhaltungszustand der Schaltanlagen, keine Reservekapazitäten, Hitzewelle; Abschaltung von 321 Umspannwerken	32 Stunden	keine Angaben	4 000 000	[51]
22.06.2005	<i>Schweiz: Ausfall des Eisenbahnnetzes</i>	<i>Überlastauslösung auf Übertragungsleitung und kaskadierende Schutzabschaltungen von Kraftwerken bis zum Totalausfall der Bahnstromversorgung</i>	<i>4 Stunden</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>[108]</i>
24.07.2005	Georgien	Ausfall von 2 essentiellen Übertragungsleitungen	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[51]
05.08.2005	Irland und Großbritannien (Nordirland)	Fehlerhafte Detektion einer Aufspaltung der Netze von Irland und Nordirland, in der Folge fehlerhafte Funktion von Schutzrichtungen; Frequenzeinbruch	2 Stunden	400 000	keine Angaben	[109]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
18.08.2005	Indonesien (Java, Bali)	Technischer Fehler führt zu kaskadierender Abschaltung von Kraftwerken (zwei Blöcke von Paiton in Ost Java und sechs Blöcke von Suralaya in West Java)	7 Stunden	keine Angaben	120 000 000 Personen	[129]
22.08.2005	Irak (Baghdad, südliche Landesteile)	Unterbrechung einer Übertragungsleitung und Abschaltung eines Kraftwerks; als Ursache wird von offizieller Seite Sabotage genannt	7 Stunden	keine Angaben	31 200 000	[64], [73]
23.-30.08.2005	USA (Alabama, Mississippi, Louisiana, Georgia, Florida)	Hurrikan Katrina, davon 181 Übertragungsleitungen und 263 Verteilungsleitungen betroffen	mehrere Tage bis Wochen	2 600 000 Verbraucher (am 30.08.2005) (64 % der Verbraucher in Mississippi, 42 % der Verbraucher in Louisiana, 27 % der Verbraucher in Alabama)	keine Angaben	[38]
13.09.2005	USA (Los Angeles, San Fernando Valley)	Irrtümliches Schneiden eines Kabels in einem Umspannwerk durch einen Arbeiter, Schutzabschaltung einer Leitung und kaskadierender Ausfall weiterer Leitungen	2 Stunden	2 000 000	keine Angaben	[43]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
24.10.2005	USA, Kuba, Mexiko (Florida)	Hurrikan Wilma führt zu Schäden am Übertragungsnetz	18 Tage	keine Angaben	5 000 000 in den USA, zu Mexiko und Kuba liegen keine Zahlen vor	[64]
November 2005 bis Januar 2006	Albanien	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, daher Lastabwürfe (rolling blackouts)	18 Stunden täglich	keine Angaben	bis 2 500 000	[71]
11.11.2005	Südafrika (Western Cape)	Fehler auf einer Stromschiene im KKW Koeberg führt zur Abschaltung der Reaktoren	2 Stunden	1 800	große Teile der ca. 5 000 000 Einwohner der Provinz Western Cape sind betroffen	[59]
16.11.2005	Südafrika (Western Cape)	Feuer unter einer 400-kV-Leitung führt zur Abschaltung der Leitung, der dadurch verursachte Spannungseinbruch führt zur Abschaltung des KKW Koeberg	keine Angaben	1 800	große Teile der ca. 5 000 000 Einwohner der Provinz Western Cape sind betroffen	[59]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
25.11.2005	<i>Deutschland, Niederlande, Belgien (Münsterland, Raum Osnabrück)</i>	<i>Eingeknickte Strommasten durch Schneelast (50 110-kV- und Mittelspannungsmasten), Berührung der 220-kV-Leitung mit der 110-kV-Bahnstromleitung, Explosion von Wandlern</i>	<i>4 Tage im Münsterland und mehrere Stunden im Raum Osnabrück, in den Niederlanden und Belgien</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>250 000 im Münsterland und 600 000 im Raum Osnabrück, 55 000 in den Niederlanden sowie weitere in Belgien</i>	<i>[30], [110], [130], [132]</i>
25.11.2005	Südafrika (Western Cape, Eastern Cape und Northern Cape)	Lastabwürfe (rolling blackouts) nach dem Herunterfahren des KKW Koeberg	1 Tag, jeweils mehrere Stunden	keine Angaben	große Teile der ca. 13 000 000 Einwohner der drei Provinzen sind betroffen	[59]
28.11.2005	Spanien (Kanarische Inseln)	Sturm Delta beschädigt Übertragungsnetz	96 Stunden	keine Angaben	500 000	[64]
15.12.2005	USA (Ostküste)	Schäden am Übertragungsnetz durch Eissturm	mehrere Tage	keine Angaben	700 000	[91]
22.12.2005	Japan	Schneesturm führt zu Schäden am Übertragungsnetz	75 Stunden	keine Angaben	700 000	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
25.12.2005	Südafrika (Kapstadt und Umgebung)	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, insbesondere nach Herunterfahren des KKW Koeberg (aufgrund bei Wartungsarbeiten vergessenen Bolzen Generatorschaden in Block 1), daher gezielte Lastabwürfe (rolling blackouts)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[59]
18.- 23.02.2006	Südafrika (Western Cape einschließlich Kapstadt)	Kombination aus Buschfeuern und Nebel verschmutzt die Isolatoren der Übertragungsleitungen und führt zu Kurzschlüssen; gleichzeitiger Ausfall von 1 500 MW Erzeugerleistung; Gezielte Lastabwürfe (rolling blackouts)	keine Angaben	keine Angaben	große Teile der ca. 5 000 000 Einwohner der Provinz Western Cape sind betroffen	[49]
27.03.2006	Deutschland (Hamburg)	Windhose deckt das Aluminiumdach einer Bootswerft ab, die umherfliegenden Teile beschädigen 380-kV-Übertragungsleitungen	12 Stunden	keine Angaben	300 000	[29]
12.06.2006	Neuseeland (Auckland)	Abriss zweier Leitungen in einer 110-kV-Schaltanlage; Frequenzanstieg im nördlichen Teil von Neuseeland auf 50,8 Hz	8 Stunden	240 000	keine Angaben	[49]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
26.06.2006	Polen	Schwaches Netz, da viele Erzeugerkapazitäten im Nordosten nicht verfügbar sind; Keine ausreichende Bereitstellung von Blindleistung; Spannungsinstabilität im 400-kV-Netz aufgrund unerwartet hoher Last; Die Operateure werden sich der Problematik erst spät bewußt, die Spannung im 400-kV-Netz bricht auf 320 kV ein; kein Stromausfall	3 Stunden	-	-	[49]
01.07.2006	Türkei	Panne im Gaskraftwerk Bursa; ungeeignete regulatorische Standards	21 Stunden	keine Angaben	10 000 000	[64]
25.07.2006	Tschechien	Andauernde Sommerhitze führt zu Überlastung des Netzes (starker Gebrauch von Klimaanlage), sukzessives Auftreten von Kurzschlüssen und Ausfällen aufgrund Überlast, Ansprechen des Distanzschutzes, Brand; Tschechien spaltet sich in 4 Inselnetzen vom UCTE Netz ab; im verbleibenden UCTE Netz sinkt die Frequenz auf 49.83 Hz	-	-	-	[49]
27.07.2006	Großbritannien (London)	Strombedarf aufgrund der Hitzewelle größer als Stromerzeugung, dies führt zu Lastabwürfen (rolling blackouts)	3 Tage, je ca. 3 Stunden	keine Angaben	7 600 000	[64]
01.08.2006	Kanada (Québec)	Gewitterstürme führen zu Stromausfällen im südlichen Québec	1 Tag bis 1 Woche	keine Angaben	500 000	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
02.08.2006	Kanada (Ontario)	Gewitterstürme und Tornados führen zur Unterbrechung der Stromversorgung	3 Tage	keine Angaben	300 000	[64]
14.08.2006	Japan (Tokio)	Ein Schwimmkran beschädigt eine 235-kV-Übertragungsleitung über den Fluß Edo; 2,16 GW fehlen im Raum Tokyo	5 Stunden	1 398 000	keine Angaben	[49], [67]
16.10.2006	Frankreich (Korsika)	Schaltfehler während Instandhaltungsarbeiten im Kraftwerk Vazzio, daraufhin kaskadierender Ausfall aller Stromerzeugenden Einrichtungen	keine Angaben	keine Angaben	300 000	[51]
23.10.2006	Peru (Lima)	Heißluftballon prallt gegen einen Hochspannungsmast; darauffolgend Kurzschluss mit Lichtbogen und Abschaltung mehrere Leitungen	3 Stunden	keine Angaben	2 500 000	[64]
04.11.2006	<i>Deutschland, Frankreich, Belgien, Italien, Österreich, Spanien, Portugal</i>	<i>Planmäßige Abschaltung einer Hochspannungsleitung für die Ausschiffung eines Kreuzfahrtschiffes; mangelnde Kommunikation und Koordination der Netzbetreiber; Dreiteilung des Europäischen Verbundnetzes in Bereiche mit Unter- bzw. Überfrequenz Abwurf von ca. 10 000 000 Verbrauchern im „Westinselnetz“</i>	<i>2 Stunden</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>15 000 000 [25]</i>	<i>[25], [64], [67]</i>
01.12.2006	USA (Long Island)	Feuer in einer Schaltanlage	37 Stunden	keine Angaben	4 200 000	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
12.- 24.01.2007	USA (Missouri, Michigan, Oklahoma, Illinois, Kansas, Massachusetts, New Hampshire, New York, Texas)	Eisstürme führen zu Schäden am Übertragungsnetz	Stunden bis Tage	keine Angaben	1 000 000	[90]
14.01.2007	Schweden und Norwegen (nördliche Landesteile)	Orkan Per führt zu Schäden im Übertragungsnetz	7 Tage	keine Angaben	400 000	[64]
16.01.2007	Australien (Victoria)	Buschfeuer schneiden Victoria von der nationalen Stromversorgung ab	75 Stunden	keine Angaben	200 000	[64]
18.01.2007	Deutschland, Österreich, Polen, Tschechien, Belgien, Großbritannien, Irland, Frankreich, Luxemburg, Niederlande, Schweiz, Ukraine	Orkan Kyrill beschädigt an vielen Orten Stromleitungen, umknickende Strommasten sowie umstürzende Bäume führen zu Ausfällen im Mittelspannungsnetz Allein in Polen Ausfall von 26 Hoch- und Höchstspannungsleitungen	2 Tage	keine Angaben	allein in Deutschland 1 000 000 Menschen	[48]
25.03.2007	Argentinien (Buenos Aires)	Feuer in einer Schaltanlage	3 Stunden	168 000	keine Angaben	[111]
19.04.2007	Costa Rica (weite Teile)	Ausfall einer Übertragungsleitung	2 Stunde	keine Angaben	4 300 000	[64], [71]
26.04.2007	Kolumbien (landesweit)	Menschliches Versagen, Schaltfehler in einer Schaltanlage in Bogota	4,5 Stunden	keine Angaben	25 000 000 Menschen (92 % der Bevölkerung)	[71]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
26.06.2007	Italien (Palermo, Agrigento)	Andauernde Sommerhitze (Nutzung von Klimaanlage), Überlastung der Leitungen, Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, Leitung zwischen Sizilien und dem italienischen Festland ist beschädigt, daher befindet sich Sizilien im Inselbetrieb; als Folge werden gezielte Lastabwürfe vorgenommen (rolling blackouts)	mehrere Tage, jeweils einige Stunden	keine Angaben	ein Großteil der 5 000 000 Einwohner von Sizilien ist betroffen	[112]
27.06.2007	USA (New York City)	Ausfall mehrerer Übertragungsleitungen durch Blitzschlag	1 Stunde	136 700	keine Angaben	[92]
23.07.2007	Spanien (Barcelona)	Gleichzeitiges Eintreten zweier Ereignisse: 1. Abriss einer 110-kV-Leitung, Kurzschlüsse und Schutzabschaltungen durch mehrfaches Berühren von Teilen der 220-kV-Schaltanlagen mit nachfolgendem Abschalten weiterer Schaltanlagen sowie 2. Brand in einer weiteren Schaltanlage mit Zerstörung der 220-kV-Anlagen; kaskadierender Ausfall von Leitungen	1 Stunde 40 Minuten (Ereignis 1) 58 Stunden (Ereignis 2)	323 337 Verbraucher (davon 40 000 durch Ereignis 1, >280 000 durch Ereignis 2)	keine Angaben	[48]
24.07.2007	Albanien, Makedonien, Griechenland	Lastspitze durch starke Nutzung von Klimaanlage bei Hitzewelle, Ausfall einer Übertragungsleitung zwischen Makedonien und Albanien führt zum kompletten Ausfall der Stromversorgung in Albanien; Griechenland im Inselbetrieb mit Unterfrequenz (48,7 Hz)	36 Stunden	keine Angaben	3 000 000	[48], [64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
10.09.2007	Guadeloupe (landesweit)	Kompletter Ausfall der Stromversorgung aufgrund eines tropischen Sturms	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[48]
26.09.2007	Brasilien (Espírito Santo)	Stromausfall wird einer Cyberattacke zugeschrieben, nähere Details sind derzeit nicht bekannt	54 Stunden	keine Angaben	3 000 000	[64]
Dezember 2007	Südafrika (landesweit)	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, daher gezielte Lastabwürfe (rolling blackouts)	regelmäßige Stromabschaltungen für jeweils 2 Stunden; geschätztes Ende 2013	keine Angaben	keine Angaben	[48]
08.12.2007 bis 12.12.2007	USA (Oklahoma, Kansas, Nebraska)	Eislasten beschädigen das Übertragungsnetz	4 Tage	1 000 000	keine Angaben	[64]
12.-14.12.2007	Niederlande	Apache-Helikopter beschädigt auf einem Trainingsflug ein Hochspannungskabel	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	
Januar 2008	China (17 Provinzen)	Sehr kalter Winter mit Schneestürmen führt zum Ausfall von Höchstspannungsleitungen und Kohlekraftwerken	5 Tage	keine Angaben	350 000 000	[64]
Januar 2008	Guatemala	Sturmschäden	keine Angaben	keine Angaben	7 000 000	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
Januar und Februar 2008	Tadschikistan (landesweit)	Extreme Kälte lässt zum einen den Strombedarf steigen, zum anderen sinkt die Erzeugung aus den Wasserkraftwerken, da der Wasserstand in den Reservoirs zu niedrig ist und das Wasser teilweise einfriert	1 Monat (Stromabschaltungen für 21-23 Stunden täglich, in der Hauptstadt ca. 12 Stunden täglich, auf dem Land teilweise wochenlang durchgehend)	keine Angaben	Großteile der 7 500 000 Einwohner	[113]
04.01.2008	USA (Kalifornien)	Sturmschäden an ca. 800 km der Stromleitungen in Kalifornien	1 Tag	keine Angaben	1 600 000	[64]
22.01.2008	Großbritannien (Greater Manchester)	keine Angaben	1 Stunde	keine Angaben	3 000 000	[64]
25.01.2008	Südafrika	Strombedarf übersteigt die Stromerzeugung, hinzu kommen ungeplante Kraftwerksausfälle; zusätzlich zu den gezielten Lastabwürfen kommt die Rationierung des Stromverbrauchs der großen industriellen Verbraucher (auf ein Minimum reduziert z.B. zur Evakuierung der Arbeiter aus den Minen)	6 Wochen	keine Angaben	keine Angaben	[46]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
30.01.2008	Deutschland (Karlsruhe)	Brand an einem 110-kV-Messwandler führt zu Kurzschluss in einem Umspannwerk mit nachfolgender Schutzabschaltung von Transformatoren	1 Stunde	140 000	keine Angaben	[29]
20.02.2008	Indonesien (Jakarta)	Schiffe mit Kohlelieferungen können aufgrund hoher Wellen die Häfen nicht anlaufen	37 Stunden	keine Angaben	9 600 000	[64]
26.02.2008	USA (Florida)	<i>Menschliches Versagen (Abschaltung von Schutzeinrichtungen und von Back-up Schutzeinrichtung und so ungehinderte Ausbreitung der Störung) führt zu Kurzschluss und Brand im Umspannwerk Flagami, daraufhin Ausfall von zwei Übertragungsleitungen und mehreren Kraftwerken (RESA im KKW Turkey Point, danach kaskadierende Schutzabschaltung 8 weiterer Kraftwerke) Verlust von 3650 MW</i>	36 Stunden	keine Angaben	4 000 000	[64]
26.02.2008	Pakistan (Karatschi)	Streitigkeiten zwischen Stromversorger und Kraftwerken über unbezahlte Rechnungen führt zur Nicht-Versorgung von Karatschi	keine Angaben	keine Angaben	12 000 000	[75]
14. und 16.03.2008	Indien (Delhi)	Ausfall von 37 Hochspannungsleitungen durch Überschläge an Isolatoren aufgrund von Nebel und Luftverschmutzung	mehrere Stunden	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[75]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
18.03.2008	Mexico (Monterrey, San Nicolás)	Sturmschäden, auf die Übertragungsleitungen stürzende Bäume	1 Tag	330 000	keine Angaben	[114]
02.04.2008	Australien (Melbourne und andere Teile Victorias)	Sturmschäden	3 Tage	keine Angaben	420 000	[64]
08.04.2008	Polen (Szczecin und Umgebung)	Naßschnee beschädigt Stromleitungen und -masten	18 Stunden	keine Angaben	400 000	[64]
11.04.2008	Philippinen (Manila)	Umstürzender Baukran beschädigt Übertragungsleitung	3 Stunden	keine Angaben	1 000 000	[75]
21.04.2008	Malaysia (Kuala Lumpur, Sabah)	Diebstahl von Metallstreben an einem Strommasten führt zum Umstürzen dieses Masten; kaskadierender Ausfall von Leitungen	keine Angaben	keine Angaben	300 000	[75]
29.04.2008	Venezuela	Waldbrände in der Nähe eines Wasserkraftwerks führen zu einem Kurzschluss in den Übertragungsleitungen	5 Stunden	keine Angaben	10 000 000	[64]
20.05.2008	Tansania (Sansibar)	Abriss des Unterseekabels zwischen Sansibar und dem Festland von Tansania	1 Monat	keine Angaben	1 100 000	[68]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
27.05.2008	Großbritannien	Abschaltung des Kohlekraftwerks Longanet und wenige Minuten später Ausfall des Kernkraftwerks Sizewell B (Ausfall von 1,5 GW); In der Folge Ausfall von weiteren Kraftwerken (insgesamt neun Blöcke) und Schutzabschaltungen in Umspannwerken; Daraufhin automatischer Lastabwurf aufgrund zu geringer Netzfrequenz (48,79 Hz); Abmilderung der Netzstörung durch 2 GW Leistung über das Unterseekabel aus Frankreich	keine Angaben	keine Angaben	600 000	[46], [76]
29.05.2008	Venezuela	Waldbrände führen zur Abschaltung einer Übertragungsleitung und damit zum Ausfall der 10 300 MW des Wasserkraftwerks Guri	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[46]
13.06.2008	USA (Washington D. C.)	Schalterversagen bei einem Transformator in einem Umspannwerk; Stromausfall in der kompletten Innenstadt von Washington D. C. (Ausnahme sind durch Notstromgeneratoren abgesicherte Regierungsgebäude)	2 Stunden	keine Angaben	keine Angaben	[76]
25.06.2008	Griechenland (Athen)	Waldbrände führen zum Ausfall einer Übertragungsleitung	wenige Stunden	keine Angaben	mehrere 100 000	[76]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
20.- 24.07.2008	USA und Mexico (Texas, Tamaulipas)	Sturmschäden an Übertragungsleitungen und Strommasten durch Hurrikan Dolly	mehrere Tage	keine Angaben	210 000 Verbraucher in den USA sowie 125 000 Personen in Mexico	[41]
23.07.2008	Saudi Arabien (Riad, östliche und zentrale Landesteile)	Abschaltung einer 380-kV-Hochspannungsleitung kombiniert mit mehreren Kraftwerksausfällen (drei Blöcke in Quraya sowie Kraftwerke in Qassim und Hail); es fehlen 3 400 MW (15 % des Bedarfs)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[64], [76]
25.08.- 04.09.2008	USA, Kuba, Jamaika, Dominikanische Republik, Haiti (Arkansas, Louisiana, Mississippi)	Sturmschäden an Übertragungsleitungen und Strommasten durch Hurrikan Gustav	mehrere Tage bis mehrere Wochen	1 222 000 Verbraucher allein in den USA	keine Angaben	[42]
26.08.2008	Deutschland (Raum Isar)	Fehler in einem Umspannwerk/110-kV-Netz, dadurch Schutzabschaltungen in mehreren Umspannwerken	45 Minuten	200 000	keine Angaben	[115]
01.09.2008	Venezuela	Ausfall der Übertragungsleitung vom Wasserkraftwerk Guri (Kapazität 10 300 MW)	36 Stunden	keine Angaben	5 000 000	[46], [64]
08.- 14.09.2008	USA (Arkansas, Louisiana, Texas,	Hurricane Ike	keine Angaben	2 825 000 Verbraucher allein in den USA	keine Angaben	[40]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
19.10.2008	Venezuela	Ausfall der Übertragungsleitung vom Wasserkraftwerk Guri (Kapazität 10 300 MW)	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[46]
03.11.2008	Frankreich (Var, Alpes Maritimes)	Ausfall einer 400-kV-Leitung und der nachgelagerten 225-kV-Versorgung aufgrund eines Gewittersturms; Ausfall von 1 500 MW	keine Angaben	1 500 000	keine Angaben	[46]
11.12.2008	USA (Louisiana, Massachusetts, New Hampshire)	Schneelast auf den Übertragungsleitungen/Eissturm	12 Stunden	keine Angaben	1 000 000	[64]
26.12.2008	USA (Hawaii)	Blitzschlag verursacht Schäden an Stromleitungen	12 Stunden	keine Angaben	1 300 000	[64]
15.01.2009	Kanada (Toronto)	Eine fehlerhafte Sprinkleranlage führt zur Überflutung (Wasserstand bis 1 m) von Transformatoren und Schaltern in einem Umspannwerk	mehrere Stunden	keine Angaben	250 000	[77]
16.01.2009	Ecuador (70 %)	Ausfall einer Übertragungsleitung kombiniert mit Lastspitze	4 Stunden	keine Angaben	keine Angaben	[50]
20.01.2009	Irland	Sturmschäden an Übertragungsleitungen (direkt oder durch umstürzende Bäume)	keine Angaben	110 000	keine Angaben	[50]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
23.- 25.01.2009	<i>Frankreich, Spanien (Aquitanien, Pyrenäen, Languedoc, Poitou-Charentes, Limousin, Auvergne, Andorra, Baskenland, Katalonien)</i>	<i>Orkan Klaus beschädigt das Stromnetz schwer</i>	<i>einige Tage</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>2 400 000 (1 700 000 in Frankreich und 700 000 in Spanien)</i>	<i>[116], [117]</i>
27.01.2009	USA (Kentucky, Indiana)	Ein Eissturm verursacht schwere Schäden an den Stromleitungen	mehrere Wochen	keine Angaben	700 000	[69]
30.01.2009	Australien (Melbourne)	Hitzewelle kombiniert mit Ausfall einer Übertragungsleitung; Lastabwurf von 1 GW	4 Tage	keine Angaben	300 000	[64], [77]
10.02.2009	Frankreich	Sturmschäden führen zu Stromausfall	keine Angaben	keine Angaben	500 000	
26.03.2009	Spanien (Teneriffa)	Kompletter Stromausfall nach Sturm	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[50]
30.03.2009	Großbritannien (Westliches Schottland)	Fehler in einem Umspannwerk führt zu einem Zusammenbruch der Stromversorgung	2 Stunden	keine Angaben	keine Angaben	[64]
15.04.2009	Kasachstan, Kirgisistan	Ausfall einer Hochspannungsleitung und in der Folge Ausfall von Kraftwerkskapazitäten	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[78]
21.05.2009	Indien (Nagpur)	Reparaturarbeiten an einer Hochspannungsleitung und Versagen eines Transformators in einem Umspannwerk	keine Angaben	keine Angaben	2 400 000	[79]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
15.06.2009	Kenia (Nairobi)	Ausfall einer Hochspannungsleitung durch Leitungsabriss in einer 132-kV-Schaltanlage	4 Stunden	keine Angaben	400 000	[79]
16.06.2009	Malta (Malta und Gozo)	Ausfall der Ölkraftwerksblöcke in Marsa und Delimara (Malta bezieht nahezu 100 % des Stroms aus diesen Kraftwerken) aufgrund eines technischen Defekts; bei der Normalisierung der Stromversorgung Schutzabschaltung einer Turbine im Kraftwerk Marsa und erneuter Stromausfall	mehrere Stunden	keine Angaben	400 000	[79]
17.06.2009	Pakistan (Karatschi)	Technischer Fehler im Übertragungsnetz	mehrere Stunden	keine Angaben	15 000 000	[79]
02.07.2009	Australien (New South Wales, Queensland, weitere Bundesstaaten)	Generatorausfall in einem Wasserkraftwerk	1 Stunde	keine Angaben	200 000	[64]
04.07.2009	Deutschland (Hamburg)	Stromausfall im Hamburger Hafen nach der Schnellabschaltung im Kernkraftwerk Krümmel	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	[79]
20.07.2009	Großbritannien (London, Kent)	<i>Vandalismus; Ein Feuer auf einer Kabelbrücke über einen Kanal beschädigt vier Hochspannungsleitungen sowie einen Brückenpfeiler</i>	4 Tage	keine Angaben	100 000	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
02.09.2009	Dominikanische Republik (landesweit)	Versagen einer 138-kV-Übertragungsleitung und Schutzabschaltungen in einem Umspannwerk, dadurch keine Verbindung mehr zum Kraftwerk in Andres (1,5 GW)	keine Angaben	keine Angaben	9 000 000	[80]
29.09.2009	Indonesien (Jakarta)	Brand in einem Umspannwerk	mehrere Stunden	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[80]
04.10.2009	Sudan (Khartoum)	Gleichzeitiger Ausfall aller Turbinen im Wasserkraftwerk Merowe (zu diesem Zeitpunkt 250 MW)	8 Stunden	keine Angaben	600 000	[80]
08.10.2009	Australien (Melbourne und Umland)	Keine Aussage zur Fehlerursache	3 Stunden	keine Angaben	400 000	[64]
09.10.2009	Sri Lanka	Technischer Defekt in einer Schaltanlage; Kabelbruch in einer 132-kV-Übertragungsleitung und nachfolgend weitere drei Fehler im Übertragungsnetz	mehrere Stunden	keine Angaben	20 000 000	[80]
30.10.2009	Neuseeland (Northland, Auckland)	Gabelstapler beschädigt beim Transport eines Schiffscontainers eine 220-kV-Leitung, die andere 220-kV-Leitung wegen planmäßiger Wartungsarbeiten freigeschaltet	3 Stunden	keine Angaben	280 000 Verbraucher (14,5 % der Verbraucher in Neuseeland)	[64]
November 2009	USA (Tennessee und weitere Bundesstaaten)	Schneesturm beschädigt Übertragungsleitungen und weitere Einrichtungen des Übertragungsnetzes	10 Tage	keine Angaben	keine Angaben	[64]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
November 2009 bis Januar 2010	Ecquador (Quito und nördliche Landesteile)	Trockenperiode führt zu Wasserknappheit am Wasserkraftwerk Paute River (nur noch 2 Turbinen mit 5 GW statt 10 Turbinen mit 20 GW betreibbar)	3 Monate, 2 bis 6 Stunden täglich	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[81]
10.11.2009	<i>Brasilien, Paraguay (18 brasilianische Staaten und 90 % des Staatsgebietes von Paraguay)</i>	<i>Starkregen, Sturm und Blitzschlag verursachen Kurzschlüsse auf drei Hochspannungs-Übertragungsleitungen; daraufhin Abschaltung aller Turbinen im Wasserkraftwerk Itaipu (14 GW, deckt 40 % des Strombedarfs in Brasilien und 90 % des Strombedarfs in Paraguay); insgesamt 28 GW Ausfall an Produktion (entspricht 45 % des damaligen Strombedarfs in Brasilien)</i>	4 h	keine Angaben	87 000 000	[50]
10.12.2009	Tansania (Sansibar)	Abriss des Unterseekabels zwischen Sansibar und dem Festland von Tansania	3 Monate	keine Angaben	1 100 000	[68]
21.12.2009	Frankreich (Marseille, Nizza, Provence des Alpes, Cote d'Azur)	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung, daher Lastabwürfe (rolling blackouts)	2 Stunden	keine Angaben	2 000 000	[119]
02.01.2010	Indien (Punjab, Haryana, Himachal Pradesh, Jammu, Kashmir, Chandigarh)	Nebel und kaltes Wetter führen zu technischen Defekten im Übertragungsnetz; daraufhin Zusammenbruch des Northern Grid, Abschaltung von Kraftwerkskapazitäten;	7 Stunden	keine Angaben	Northern Grid versorgt über 70 000 000	[81]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
30.01.2010	Australien (Darwin und Umgebung)	Blitzschläge in zwei verschiedene Hochspannungsleitungen	72 Stunden	keine Angaben	500 000	[64]
05.-10.02.2010	USA (Baltimore, Washington)	Eisstürme führen mehrfach zu flächen-deckenden, längeren Stromausfällen	3 Tage	keine Angaben	200 000	[64]
27.02.2010	Chile	Starkes Erdbeben (8,8 MW)	30 Minuten bis 2 Wochen	keine Angaben	13 000 000 Personen (ca. 80 % der Bevölkerung)	[120]
06.03.2010	Australien (Melbourne)	Hagelsturm verursacht Schäden im Übertragungsnetz	72 Stunden	keine Angaben	500 000	[64]
08.03.2010	Spanien (Katalonien)	Leitungszusammenbrüche aufgrund von Schneefall	1 Tag	200 000	keine Angaben	[47]
14.03.2010	Chile	Fehler an einem Haupttransformator	37 Stunden	keine Angaben	15 000 000 (ca. 90 % der Bevölkerung)	[64]
14.03.2010	USA (Conneticut, New Jersey, weitere Bundesstaaten an der Ostküste)	Sturm und Unwetter führen zu Stromausfällen	6 Tage	keine Angaben	20 000 000	[64]
22.03.2010	Malta (alle Inseln)	Plötzlicher Lastanstieg; Stromausfall nach dem Fehlschlagen der automatischen Synchronisation einer weiteren Turbine im Ölkraftwerk Marsa mit dem Netz	5 Stunden	keine Angaben	450 000	[82]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
30.03.2010	Großbritannien (Nordirland)	Winterliche Wetterbedingungen führen zu Stromausfällen	3 Stunden	keine Angaben	200 000	[64]
18.06.2010	Sambia	Explosion eines Schalters im Kraftwerk Kariba North (zweitgrößtes Kraftwerk in Sambia)	10 Stunden	keine Angaben	2 000 000	[64]
05.07.2010	Kanada (Toronto)	Feuer in einem Umspannwerk kombiniert mit Lastspitze aufgrund Hitzewelle	keine Angaben	keine Angaben	250 000	[47]
25.07.2010	USA (Nordosten)	Sturmschäden am Übertragungsnetz	24 Stunden	keine Angaben	867 000	[93]
August 2010	Ägypten	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung	3 Stunden	keine Angaben	10 000 000	[64]
20.08.2010	Russland (St. Petersburg)	Kabelalterung führt zu einem Fehler in einem Umspannwerk, daraufhin Ausfälle in einem weiteren Umspannwerk	1 Stunde	keine Angaben	4 000 000	[72]
01.09.2010	Island (nahezu landesweit)	Keine Angaben	3 Stunden	keine Angaben	300 000	[64]
05.09.2010	Georgien (nahezu landesweit)	Feuer beschädigt eine Übertragungsleitung	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[83]
06.09.2010	Jemen (Sanaa, Aden)	Fehler im Übertragungsnetz, werden hohen Temperaturen in Kombination mit starkem Regen zugeschrieben	mehrere Stunden	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[83]
26.12.2010	Nigeria (weite Teile)	Ungenügende Gaslieferungen an zwei Kraftwerke (zusammen ca. 2 GW) kombiniert mit dem Ausfall mehrerer Wasserkraftwerke aufgrund der Trockenheit	5 Tage	keine Angaben	mehrere 10 000 000	[84]
26.12.2010	Russland (Moskau)	Leitungsbrüche aufgrund von schweren Schneelasten	keine Angaben	keine Angaben	100 000	[47]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
01.02. - 04.02.2011	USA (Texas, Arizona, New Mexico)	Ausfall zweier Kohlekraftwerke (7 GW), weiterer Erzeugungseinheiten sowie der hohe Verbrauch aufgrund der Kälte führen zu gezielten Stromabschaltungen (4 GW) und rolling blackouts (1 GW)	keine Angaben	4 400 000	keine Angaben	[85], [143]
03.02.2011	Australien (North Queensland)	Zyklon Yasi führt zu schweren Beschädi- gungen an Übertragungsleitungen	75 Stunden	keine Angaben	200 000	[64]
03./ 04.02.2011	Brasilien	Fehler in einem Umspannwerk	mehrere Stunden	keine Angaben	10 000 000	[64], [85]
22.02.2011	Neuseeland (Christchurch)	Ein Erdbeben beschädigt Schaltanlagen, Umspannwerke, Hochspannungsleitungen (>200 11-kV-Kabel (ca. 15 %), 4 66-kV- Kabel (50 %), der größte Teil erdverlegt). Durch die großen Erdverschiebungen wurden einige Erdkabel bis zu 1 m ge- dehnt und dadurch mehrfach, teilweise auch irreparabel beschädigt.	90 % nach ca 10 Tagen hergestellt, danach bis zu 2 Monate	160 000 (>80 % der Stadt)	keine Angaben	[121]
11.03.2011	<i>Japan (Tokyo und nördliches Japan)</i>	<i>Schäden durch starkes Erdbeben (9,0 MW)</i>	<i>21 Tage</i>	<i>3 000 000 Ver- braucher von Tokyo Electric und 4 400 000 Verbraucher von Tohoku Electric</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>[64]</i>

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
14.03.2011	Japan (Tokyo und nördliches Japan)	Lastabwürfe aufgrund zu geringer Erzeugungskapazitäten in Folge des Erdbebens/Tsunamis vom 11.03.2011	Ca. 4 Wochen (3-4 Stunden täglich pro betroffenem Gebiet)	keine Angaben	Großteil der 45 000 000 im Versorgungsgebiet von Tokyo Electric	[122]
07.04.2011	Japan (Tokyo und nördliches Japan)	Schäden durch starkes Nachbeben (7,1 MW)	>1 Tag	3 600 000	keine Angaben	[123]
07.04.2011	Venezuela (weite Teile)	Waldbrand führt zu Schäden an einer Übertragungsleitung; nachfolgend Ausfall von ca. 6 GW	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[85]
11.04.2011	Japan (nördliches Japan)	Schäden durch starkes Nachbeben (7,1 MW)	keine Angaben	250 000	keine Angaben	[124]
27.04.2011	USA (Alabama und weitere sieben Bundesstaaten)	Tornado beschädigt Stromleitungen und -masten	48 Stunden	keine Angaben	1 000 000	[64]
14.05.2011	Kamerun (Jaunde)	Transformatorbrand in einem Umspannwerk und Beschädigung von Kabelanbindungen des zweiten Transformators in diesem Umspannwerk	keine Angaben	keine Angaben	1 500 000	[86]
15.05.2011	Pakistan (Karatschi)	Strombedarf übersteigt Stromerzeugung; hinzu kommt ein Streik bei der Elektrizitätsgesellschaft, der dazu führt, dass technische Defekte im Übertragungsnetz nicht behoben werden	mehrere Tage, 8 bis 12 Stunden täglich	keine Angaben	20 000 000	[86]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
11.06.2011	Zypern (nahezu komplette Insel)	Explosion von ca. 2 000 t gelagerter Munition beschädigt das größte Kraftwerk der Insel schwer. 50 % der Erzeugungskapazitäten in Zypern sind zerstört Gezielte Lastabwürfe	1 Monat, 2 bis 5 Stunden täglich	Großteil der 500 000 Verbraucher, die von der Electricity Authority of Cyprus (EAC) versorgt werden	keine Angaben	[125]
11.07.2011	USA (Illinois, Michigan und weitere Bundesstaaten)	Derecho (Extremwindereignis bei Gewitter) führt zu Schäden am Übertragungsnetz		keine Angaben	1 500 000 (davon 868 000 in Chicago)	[94]
13.07.2011	Deutschland (Hannover)	Schutzabschaltung eines Kraftwerksblocks (Kraftwerk Stöcken aufgrund überhitzter Kohlemühle) kombiniert mit einer defekten Transformator-Schutzeinrichtung (Umspannwerk Mehrum)	80 Minuten	keine Angaben	600 000 Menschen	[126]
02.08.2011	Kenia (Mombasa)	Brand in einem Umspannwerk führt zu kaskadierenden Ausfällen im Übertragungsnetz; der Brand wird Vandalismus zugeschrieben	24 Stunden	keine Angaben	1 000 000	[87]
11.08.2011	Kamerun (Jaunde)	Sabotage an Strommasten als Protest gegen die Regierung führt zu Stromausfällen in weiten Teilen Kameruns	keine Angaben	keine Angaben	mehrere 1 000 000	[87]
27.- 28.08.2011	USA	Schäden am Übertragungsnetz durch Hurrican Irene	mehrere Stunden bis mehrere Tage	7 200 000	keine Angaben	[95]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
08.09.2011	USA und Mexico (Kalifornien, Arizona und Mexico)	Kurzschluss bei Wartungsarbeiten führt zur Abschaltung einer 500-kV-Leitung mit nachfolgender Kettenreaktion aufgrund von Überlast der verbleibenden Einrichtungen (Schutzabschaltung von Transformatoren, Leitungen, Kraftwerken, u. a. Schutzabschaltung des KKW San Onofre, sowie darauf folgende Lastabwürfe); Blackout ca. 11 Minuten nach dem ersten Kurzschluss; Es fehlen ca. 7 500 MW San Onofre ging nach 3 bzw. 4 Tagen wieder ans Netz	12 Stunden	2 000 000 in den USA und 1 000 000 in Mexico	keine Angaben	[34], [96]
11.09.2011	Südkorea	Ungewöhnlich hohe Temperaturen kombiniert mit geplanten Wartungsarbeiten am Übertragungsnetz führen zum Ausfall der Stromversorgung	keine Angaben	keine Angaben	1 620 000	[87]
24.09.2011	Chile	Kurzschluss in einer 220-kV-Kondensatorbank und Fehlfunktion der zugeordneten Schutzrelais; die zuständige chilenische Behörde (SEC) wirft den Netzbetreibern schlechte Instandhaltung vor	ca 2 Stunden	keine Angaben	9 000 000	[35]
08.12.2011	Ghana (landesweit)	Explosion eines Trennschalters in einer Schaltanlage	4 Stunden	keine Angaben	25 000 000	[88]
26.12.2011	Finnland	Schwerer Schneefall und Schneesturm führen zu Schäden an Übertragungsleitungen	10 Tage	keine Angaben	200 000	[88]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
13.12.2011	Neuseeland	Ausfall des Kraftwerks Huntly (größtes Kraftwerk Neuseelands) führt zu einem kurzfristigen Einbruch von Netzfrequenz und –spannung und dadurch zum automatischen Lastabwurf von Verbrauchern; zusätzlich werden weitere Lastabwürfe durchgeführt	mehrere Stunden	keine Angaben	400 000	[88]
14.01.2012	Türkei (Istanbul und Umgebung)	Fehler im Gaskraftwerk Bursa	1 Stunde	keine Angaben	20 000 000	[70], [88]
24.01.2012	Brasilien (Estado do Rio)	Kurzschluss in einer 500-kV-Hochspannungsleitung während des Zuschnitts der Bäume entlang der Leitung führt zum Ausfall dieser sowie einer weiteren 500-kV-Hochspannungsleitung	1,5 Stunden	keine Angaben	940 000	[88], [89]
04.04.2012	Zypern	Fehler im Kraftwerk Dhekelia	5 Stunden	keine Angaben	80 % der Einwohner (entspricht ca. 900 000)	[176]
29.06.2012	USA (Dellaware, District of Columbia, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, Virginia, West Virginia)	Gewitterstürme mit Böen in Hurrican-Stärke	keine Angaben	3 854 000	keine Angaben	[58]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
09.07.2012	Kanada (Alberta)	Lastabwürfe (rolling blackouts) aufgrund von hoher Nachfrage, Hitze, keiner Wind-einspeisung aufgrund der Wetterlage und ungeplanten Ausfällen von Kraftwerken (2 Kohlekraftwerke, 1 Gaskraftwerk)	3,5 Stunden (ca. 30 Minuten bis 1 Stunde pro Gebiet)	keine Angaben	keine Angaben	[57]
18.07.2012	USA (Ohio, weitere nord-östliche Bundesstaaten)	Starkregen, Sturm und Gewitter mit Hagel führen zu Schäden am Übertragungsnetz	mehrere Stunden bis Tage	keine Angaben	400 000	[97]
26.07.2012	USA (Ohio, weitere nord-östliche Bundesstaaten)	Starkregen, Sturm und Gewitter mit Hagel führen erneut zu Schäden am Übertragungsnetz	mehrere Stunden bis Tage	keine Angaben	515 000	[98]
30.07.2012	Indien (8 Bundesstaaten)	<i>Netzüberlastung; Strombedarf übersteigt Stromerzeugung; Ausfall einer 400-kV-Hochspannungsleitung, danach kaskadierender Ausfall von Übertragungsleitungen und Kraftwerken; Zusammenbruch des nördlichen und des östlichen Netzes 32 GW fehlen</i>	<i>15 Stunden bis zur Wiederherstellung von 80 % der Stromversorgung</i>	<i>keine Angaben</i>	<i>360 000 000</i>	<i>[53], [54]</i>

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

Datum	Betroffenes Gebiet	Ursache	Dauer	Zahl der Betroffenen, angegeben in		Quellen
				Verbraucher	Menschen	
31.07.2012	Indien (19 Bundesstaaten)	Netzüberlastung; Strombedarf übersteigt Stromerzeugung; erneut Fehler im Übertragungsnetz und daraufhin kaskadierender Ausfall von Übertragungsleitungen und Kraftwerken; Zusammenbruch des nördlichen Netzes, gefolgt von Zusammenbrüchen des östlichen und des nordöstlichen Netzes	16 Stunden bis zur Wiederherstellung des nordöstlichen Netzes sowie 95 % des nördlichen und des östlichen Netzes	keine Angaben	680 000 000	[55], [56]
28.08.- 07.09.2012	USA (Alabama, Arkansas, Louisiana, Mississippi)	Hurricane Isaac zieht Schäden am Übertragungsnetz und damit Stromausfälle nach sich	bis zu 10 Tagen	1 000 000	keine Angaben	[175]
28.10.2012- Mitte/ Ende November 2012	USA (21 Bundesstaaten im Nordosten), Kanada (3 Bundesstaaten), Kuba, Jamaika, Bahamas und weitere Staaten in der Karibik	Hurrikan Sandy zieht schwere Schäden am Übertragungsnetz und damit weitreichende Stromausfälle nach sich.	bis zu >10 Tagen (in den USA sind 10 Tage nach den ersten Stromausfällen immer noch 650 000 Menschen ohne Strom)	8 200 000 (USA) 200 000 (Kanada)	1 900 000 (Jamaika) 890 000 (Kuba) v. den anderen karibischen Staaten sind keine Zahlen bekannt	[170], [171], [172], [173], [174]

**Tab. 4.1** Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012. Im Bericht ausführlicher beschriebene Ausfälle und Störungen sind grau hinterlegt. Hellgrau hinterlegt sind zusätzlich dazu Netzausfälle, auf die in Kapitel 4 (Teil A) verwiesen wird. (Fortsetzung)

## Literaturverzeichnis

- [1] U.S.-Kanada Power System Outage Task Force: Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Kanada: Causes and Recommendations, [www.nerc.com](http://www.nerc.com), April 2004
  
- [2] National Grid Transco: Investigation Report into the Loss of Supply Incident affecting parts of South London at 18:20 on Thursday, 28 August 2003, [www.nationalgridtransco.com](http://www.nationalgridtransco.com), 10 September 2003
  
- [3] Elkraft System: Power Failure in Eastern Denmark and Southern Sweden on 23 September 2003, Final report on the course of events, [www.elkraft.dk](http://www.elkraft.dk), 4 November 2003
  
- [4] Svenska Kraftnat: The black-out in southern Sweden and eastern Denmark, 23 September 2003, Preliminary report, [www.ske.se](http://www.ske.se), 02.10.2003
  
- [5] UCTE: Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy, [www.ucte.org](http://www.ucte.org), April 2004
  
- [6] GRTN (Gestore della rete di trasmissione nazionale): Press Release on the UCTE's Report on the Italian Blackout of 28 September 2003, [www.grtn.it](http://www.grtn.it), 28 October 2003
  
- [7] Bundesamt für Energie BFE: Bericht über den Stromausfall in Italien am 28. September 2003, [www.bfe.ch](http://www.bfe.ch), November 2003
  
- [8] Schweizerische Vereinigung für Atomenergie (SVA): Monatsbericht über den Betrieb der schweizerischen Kernkraftwerke im September 2003, [www.atomenergie.ch](http://www.atomenergie.ch)
  
- [9] David Nevius, North American Electric Reliability Council: Grid Reliability – NERC Actions to Address the August 14, 2003 Blackout, Presentation at Regulatory Information Conference RIC2004, March 10, 2004
  
- [10] Jeffrey S. Merrifield, U. S. Nuclear Regulatory Commission: Getting Past Gridlock, Regulatory Conference RIC 2004, March 11, 2004

- [11] W. S. Raughley, G. F. Lanik, U. S. Nuclear Regulatory Commission: Operating Experience Assessment – Effects of Grid Events on Nuclear Power Plant Performance, NUREG-1784, December 2003
- [12] Pressemitteilung des Verbands der Netzbetreiber VDN e. V.: Blackout in London am 28. August, Berlin, [www.vdn.de](http://www.vdn.de), 16.09.2003
- [13] Pressemitteilung des Verbands der Netzbetreiber VDN e. V.: Stromausfall in Dänemark und Schweden am 23. September 2003 - Weiträumiger Stromausfall im östlichen Dänemark und auf der Insel Bornholm, Berlin, [www.vdn.de](http://www.vdn.de), 24.09.2003
- [14] Pressemitteilung des Verbands der Netzbetreiber VDN e. V.: Stromausfall in Italien am 28. September 2003, Berlin, [www.vdn.de](http://www.vdn.de), 01.10.2003
- [15] NRC Event Texts, Event No 40066-40075, NRC, 14.08.2003
- [16] IAEA Safety Standards Series: Design of Emergency Power Systems for Nuclear Power Plants, Draft Safety Guide, DS303, IAEA, Wien, 13.10.2003
- [17] GRS, Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland: Reaktorschnellabschaltung nach einem geplanten Lastabwurf auf Eigenbedarf im Kernkraftwerk Philippsburg 1 (KKP-1) am 30. Mai 1999, WL 07/99, Köln, 06.07.1999
- [18] GRS, Ergänzung zur Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland: Reaktorschnellabschaltung nach einem geplanten Lastabwurf auf Eigenbedarf im Kernkraftwerk Philippsburg 1 (KKP-1) am 30. Mai 1999, WL 07A]99, Köln, 31.08.1999
- [19] KTA 3701, Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken, Regeländerungsentwurf Fassung 2012-11
- [20] Protokoll 73. Sitzung RSK-Ausschuss ELEKTRISCHE EINRICHTUNGEN am 23. Juni 1987

- [21] Protokoll 121. Sitzung RSK-Ausschuss ELEKTRISCHE EINRICHTUNGEN am 26. August 1999
- [22] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Bericht zum Aufsichtsschwerpunkt „Stromausfall“, Az.: 75-4631.00, Stuttgart, 29.01.2004
- [23] BMU-Vorhaben SR 2475, Textmodul 3 „Ereignislisten DWR- und SWR-Leistungsbetrieb“, Entwurf GRS 2004
- [24] KTA 2000 – Basisregel 6 „Methodik der Nachweisführung“, Regelentwurfsvorlage, Fassung Dezember 2002
- [25] Power Blackout Risks, Markus Aichinger (Ed.), CRO Forum, November 2011
- [26] North American Electric Reliability Council, Technical Analysis of the August 14, 2003 Blackout: What happened, Why, and What did we learn?, Report to the NERC Board of Trustees by the NERC Steering Group, 2004
- [27] VDE-Analyse, Stromversorgungsstörungen in den USA/Kanada, London, Schweden/Dänemark und Italien, 27.11. 2003
- [28] Silvast, Kaplinsky, Project Understand, White Paper on Security of European Electricity Distribution, 20.06.2007
- [29] Birkmann et al., State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom/Stromausfall, Schriftenreihe Forschungsforum Öffentliche Sicherheit, 2010
- [30] G. Thierauf, Gutachten Nr. A8232/05 Kurzfassung zur Ermittlung der Schadensursache der am 25./26.11.2005 im westlichen Münsterland geschädigten Stahlgittermaste des Hoch- und Mittelspannungsnetzes, 13.02.2006
- [31] RWE, Technischer Bericht, Netzstörung mit Versorgungsunterbrechung am 02. September 2004

- [32] Prof. C. Vournas, Electrical Energy Systems Lab., National Technical University of Athens, Technical Summary on the Athens and Southern Greece Blackout of July 12, 2004
- [33] V. C. Nikolaidis et al., Automatic Load Scheduling Schemes against Voltage Instability in the Hellenic System, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007
- [34] FERC, NERC, Arizona-Southern California Outages on September 8, 2011, Causes and Recommendations, April 2012
- [35] Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), SEC formula cargos contra TRANSELEC, ENDESA, COLBÚN y CHILECTRA por el black-out del "24S", <http://www.sec.cl> (abgerufen am 30.07.2012), Dezember 2011
- [36] Comisión Nacional de Energía, Informe técnico sobre los hechos ocurridos en el incidente acaecido el 23 de julio de 2007 a las 10 horas 53 minutos que afectó al suministro eléctrico de Barcelona, Oktober 2007
- [37] The Vancouver Sun, Rolling blackouts strike Edmonton and across the province, 09. Juli 2012
- [38] Office of Electricity Delivery and Energy Reliability (OE), U.S. Department of Energy, Hurricane Katrina Situation Report #11, 30.08.2005
- [39] Office of Electricity Delivery and Energy Reliability (OE), U.S. Department of Energy, Gulf Coas Hurricanes Situation Report #4, 27.09.2005
- [40] U. S. Department of Energy, Emergency Support Function 12, Hurricane Ike Situation Report #2, 14.09.2008
- [41] U. S. Department of Energy, Emergency Support Function 12, Hurricane Dolly Situation Report #3, 24.07.2008
- [42] U. S. Department of Energy, Emergency Support Function 12, Hurricane Gustav Situation Report #5, 03.09.2008

- [43] NY Times, Accident Causes Blackout in Much of Los Angeles, 12.09.2005
- [44] J. Spears, Cambridge site eyed for controversial power plant, The Record, 18.02.2011
- [45] French Power System reliability report 2003, RTE, 13.07.2004
- [46] French Power System reliability report 2008, RTE, 24.06.2009
- [47] 2010 Reliability Report, RTE, 08.07.2011
- [48] French Power System reliability report 2007, RTE, 07.07.2008
- [49] French Power System reliability report 2006, RTE, 21.06.2007
- [50] Reliability Report 2009, RTE, 05.07.2010
- [51] French Power System Reliability Report 2005, RTE, 26.06.2006
- [52] French Power System Reliability Report 2004, RTE, 21.06.2005
- [53] The Hindu, Worst outage cripples north India, 30.07.2012, [www.thehindu.com](http://www.thehindu.com) (abgerufen am 03.08.2012)
- [54] The Washington Post, Singh's \$400 Billion Power Plan Gains Urgency as Grid Collapses, 30.07.2012, <http://washpost.bloomberg.com> (abgerufen am 03.08.2012)
- [55] The Wall Street Journal, India's Power Network Breaks Down, 31.07.2012, <http://online.wsj.com> (abgerufen am 03.08.2012)
- [56] The Washington Post, Singh Answers Sought as Worst Power Crisis May Hurt Growth, 01.08.2012, <http://washpost.bloomberg.com> (abgerufen am 03.08.2012)
- [57] The Huffington Post, Kanada, Alberta Hit By Rolling Power Blackouts, 07.09.2012, [www.huffingtonpost.ca](http://www.huffingtonpost.ca) (abgerufen am 03.08.2012)

- [58] U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, Ohio Valley & Mid-Atlantic Summer Storm Situation Report #1, 30.07.2012
- [59] W. Schossig, VDE Thüringen, Blackouts 2003 und danach, 10. Symposium der Arbeitskreise Netzleittechnik des VDE Bezirksverein Dresden und des VDE Bezirksverein Thüringen, Anlage zum Vortrag, 23./24.05.2007
- [60] Veloza, Cespedes, Regulatory Mechanisms to Mitigate the Vulnerability of Power Systems to Blackouts, 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference
- [61] Autorità per l'energia elettrica e il gas, Annual Report 2004
- [62] KoCos, Vortrag: Wie wirkt sich die Regulierung der Netze auf die Stromversorgungsqualität aus?, [www.vde.com](http://www.vde.com) (abgerufen am 06.08.2003)
- [63] J. W. Bialek, Wide-area Blackouts: why do they happen and how can modelling help, Durham University, 2010
- [64] International Confederation of Energy Regulators, Report on Role of Energy Regulators in Guaranteeing Reliability and Security of Supply, The national, regional and global dimensions, Annex C – Overview of Energy Supply Emergencies, Ref: I12-SoS-08-03
- [65] N. Dizdarevic et al., Causes, analyses and countermeasures with respect to blackout in Croatia on January 12, 2003, The CRIS international workshop on power system blackouts, May 2004
- [66] U.S. Department of Commerce, Service Assessment, Hurricane Isabel September 18-19, 2003, Mai 2004
- [67] Protection, Automation & Control World, Summer 2007 Issue, Tokyo Blackout August 14, 2006, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 07.08.2012)
- [68] Global Post, Zanzibar's three-month blackout April 1, 2010, [www.globalpost.com](http://www.globalpost.com) (abgerufen am 06.08.2012)

- [69] S. Foster, Preliminary Impact Assessment from January 2009 Ice Storm
- [70] Turkish Press, Failure in Bursa power plant caused power cut in Istanbul, 15.01.2012, [www.turkishpress.com](http://www.turkishpress.com) (abgerufen am 07.08.2012)
- [71] BBC News, Albania paralysed by power cuts, 11.11.2005, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 07.08.2012)
- [72] Ria Novosti, Power blackout paralyzes St. Petersburg for over an hour, 20.08.2010, <http://en.rian.ru> (abgerufen am 07.08.2012)
- [73] BBC News, Power cuts halts Iraqi oil export, 22.08.2005, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 07.08.2012)
- [74] Office of Energy Assurance, U. S. Department of Energy, Hurricane Jeanne Situation Report #3, September 27, 2004
- [75] Protection, Automation & Control World, Spring 2008 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 07.08.2012)
- [76] Protection, Automation & Control World, Summer 2008 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [77] Protection, Automation & Control World, Winter 2009 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [78] Protection, Automation & Control World, Spring 2009 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [79] Protection, Automation & Control World, Summer 2009 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [80] Protection, Automation & Control World, Autumn 2009 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [81] Protection, Automation & Control World, March 2010 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)

- [82] Protection, Automation & Control World, June 2010 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [83] Protection, Automation & Control World, Dezember 2010 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [84] Protection, Automation & Control World, March 2011 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [85] Protection, Automation & Control World, June 2011 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [86] Protection, Automation & Control World, September 2011 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [87] Protection, Automation & Control World, Dezember 2011 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [88] Protection, Automation & Control World, March 2012 Issue, System Power Outages, [www.pacw.org](http://www.pacw.org) (abgerufen am 08.08.2012)
- [89] Agência Estado, Apagão deixa 940 mil sem luz no Estado do Rio, 24.01.2012, [www.folhape.com.br](http://www.folhape.com.br) (abgerufen am 08.08.2012)
- [90] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, Thursday, January 18, 2007
- [91] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, December 16, 2005
- [92] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, June 28, 2007
- [93] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, July 27, 2010
- [94] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, July 12, 2011

- [95] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, August 29, 2011
- [96] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, September 09, 2011
- [97] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, July 19, 2012
- [98] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Energy Assurance Daily, July 27, 2012
- [99] Wiener Zeitung, Stromausfall auf den Urlaubsinseln Mallorca und Menorca – Klimageräte überforderten Netz, 23.07.2003, [www.wienerzeitung.at](http://www.wienerzeitung.at) (abgerufen am 08.08.2012)
- [100] The Guardian, Power line explosions hit Georgia, 31.03.2003, [www.guardian.co.uk](http://www.guardian.co.uk) (abgerufen am 08.08.2012)
- [101] DiePresse.com, Stromausfall in Wien: 26 000 Haushalte betroffen, 04.10.2003 (abgerufen am 08.08.2012)
- [102] BZ, Schon wieder Stromausfall – 100 000, 10.10.2003, [www.bz-berlin.de](http://www.bz-berlin.de) (abgerufen am 08.08.2003)
- [103] BBC News, Power cut hits city, 22.10.2003, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 08.08.2003)
- [104] Deutsche Rück, Sturmdokumentation Deutschland 1999-2004
- [105] EFE, Sufre Brasil fuerte apagón, 27.09.2004, [www.esmas.com](http://www.esmas.com) (abgerufen am 09.08.2012)
- [106] [www.emol.com](http://www.emol.com), Gigantesco, apagón provocó caos en Buenos Aires, 23.08.2004 (abgerufen am 09.08.2012)
- [107] FAZ Rhein-Main, Stundenlanger Stromausfall und ein Millionenschaden, 02.11.2004, [www.faz.net](http://www.faz.net) (abgerufen am 09.08.2004)

- [108] Bulletin SEV/VSE 17/05, Der schweizweite Bahnstromausfall vom 22. Juni 2005, S. 33-35
- [109] ESB National Grid, Report on Investigation into System Disturbance of August 5<sup>th</sup> 2005, 11.12.2005
- [110] Focus, Stromausfall im Münsterland – 100 Millionen Euro Verlust, 28.11.2005, [www.focus.de](http://www.focus.de) (abgerufen am 09.08.2012)
- [111] [www.periodismo.com](http://www.periodismo.com), un apagón afectó a miles personas en Buenos Aires. Hubo protestas, con cacerolas y fogatas, 27.3.2007 (abgerufen am 09.08.2012)
- [112] Terna Press Release, Electricity Emergency in Sicily: Anti-Blackout Measures Activated, 26.06.2007
- [113] [www.eurasianet.org](http://www.eurasianet.org), Tajikistan: Energy shortages, extreme cold create crisis situation, 12.01.2008
- [114] La Jornada, Paraliza un ventarrón a Monterrey; dos muertos, 19.03.2008, [www.jornada.unam.mx](http://www.jornada.unam.mx) (abgerufen am 09.08.2012)
- [115] Welt online, Unerfreulicher Stromausfall entlang der Isar, 26.08.2008, [www.welt.de](http://www.welt.de) (abgerufen am 09.08.2008)
- [116] [www.noows.de](http://www.noows.de), Orkan Klaus fordert 38 Menschenleben, 26.01.2009 (abgerufen am 09.08.2012)
- [117] Le Point, Environ 1,7 million de foyers privés d'électricité dans le Soud-Ouest, 24.01.2009, [www.lepoint.fr](http://www.lepoint.fr) (abgerufen am 09.08.2012)
- [118] The herald Scotland, Power cut hits Glasgow and west of Scotland, 30.03.2009, [www.heraldscotland.com](http://www.heraldscotland.com) (abgerufen am 09.08.2012)
- [119] Power cuts hit 2,000,000 people in southern France, 22.12.2009, [ww.ubalert.com](http://ww.ubalert.com) (abgerufen am 09.08.2012)

- [120] Reuters América Latina, Apagón deja sin luz a Chile dos semanas después de terremoto, 15.03.2010, [lta.reuters.com](http://lta.reuters.com) (abgerufen am 09.08.2012)
- [121] Zeit online, Erdbeben führt zu Chaos und Panik in Christchurch, 22.02.2011, [www.zeit.de](http://www.zeit.de) (abgerufen am 09.08.2012)
- [122] Japan Today, TEPCO begins power blackouts, 14.03.2011, [www.japantoday.com](http://www.japantoday.com) (abgerufen am 09.08.2012)
- [123] [www.bloomberg.com](http://www.bloomberg.com), Sony, Canon Plants Knocked Out By Aftershock, Setting Back Japan Recovery, 08.04.2011 (abgerufen am 09.08.2012)
- [124] PBS Newshour, Strong aftershock jolts Japan on one month anniversary of Tsunami, Earthquake disaster, 11.04.2011, [www.pbs.org](http://www.pbs.org) (abgerufen am 09.08.2012)
- [125] BBC News Europe, Cyprus: Zygi naval base munition blast kills 12, 11.07.2011, [www.bbc.co.uk](http://www.bbc.co.uk) (abgerufen am 09.08.2012)
- [126] Focus online, Stromausfall legt Hannover lahm, 14.07.2011, [www.focus.de](http://www.focus.de) (abgerufen am 09.08.2011)
- [127] Fichtner Consulting & IT AG, Schweizerische Bundesbahnen (SBB), Zentralbereich Revision, Second Opinion zur Strompanne der SBB, Zusammenfassender Bericht an den Verwaltungsrat, 24.01.2006
- [128] The Jakarta Post, Massive blackout hits Java, Bali, 19.08.2005, [www.thejakartapost.com](http://www.thejakartapost.com) (abgerufen am 14.08.2012)
- [129] BBC News, Massive power outage in Indonesia, 18.08.2005, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 14.08.2005)
- [130] RWE Energy, Ereignisse im Münsterland – Hintergründe, 08.12.2005
- [131] Deutscher Wetterdienst, Das Münsterländer Schneechaos am 1. Adventswochenende 2005, Klimastatusbericht 2005

- [132] Bundesnetzagentur, Untersuchungsbericht über die Versorgungsstörungen im Netzgebiet des RWE Münsterland vom 25.11.2005 durch die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn, Juni 2006
- [133] Bundesnetzagentur, Bericht der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 4. November 2006, Februar 2007
- [134] European Regulator's Group for Electricity and Gas, ERGEG Final Report, The lessons to be learned from the large disturbance in the European Power System on the 4<sup>th</sup> of November 2006, Ref.: E06-BAG-01-06, February 2006
- [135] EnBW, Rolf Neumaier, Hintergründe zum Stromausfall vom 04.11.2006, Energie-Team-Infoveranstaltung am 30.11.2006 in Pforzheim, November 2006
- [136] UCTE, Final Report System Disturbance on November 2006
- [137] Florida Reliability Coordinating Council, FRCC System Disturbance and Underfrequency Load Shedding Event Report, February 26<sup>th</sup>, 2008, Final Report, November 2008
- [138] United States of America Federal Energy Regulatory Commission, FERC approves settlement on FRCC's role in Florida Blackout, Docket No. IN08-5-000, März 2010
- [139] Protection, Automation & Control World, Florida Disturbance 2008 Blackout Watch, Winter 2009 Issue, [www.pacworld.com](http://www.pacworld.com) (abgerufen am 23.08.2012)
- [140] United States of America Federal Energy Regulatory Commission, Florida Blackout, Order approving stipulation and consent agreement, Docket No. UN08-5-000, Oktober 2009
- [141] Preliminary Notification of Event or Unusual Occurrence, PNO-II-08-002, Dual unit trip at Turkey Point due to Grid Disturbance, February 2008

- [142] United States Nuclear Regulatory Commission, Turkey Point Nuclear Plant – integrated inspection report, April 2008
- [143] FERC/NERC, Report on Outages and Curtailments during the Southwest Cold Weather Event of February 1-5, 2011, Causes and Recommendations, August 2011
- [144] Reuters, France, Spain pick up pieces after deadly storm, 25.01.2009, <http://uk.reuters.com> (abgerufen am 29.08.2009)
- [145] Fundación mapfre, El ciclón extratropical Klaus y sus efectos sobre los Grandes Riesgos en España, No. 105, September/Oktober 2009, [www.mapfre.com](http://www.mapfre.com) (abgerufen am 29.08.2009)
- [146] Red Eléctrica de España, Incidentes causados por el ciclón Klaus, 23 y 24 de enero de 2009, [www.ree.es](http://www.ree.es) (abgerufen am 29.08.2009)
- [147] Consorcio de compensacion de seguros, Tempestad ciclónica atípica de 23 a 25 de enero de 2009, municipios afectados, [www.consorseguros.es](http://www.consorseguros.es) (abgerufen am 29.08.2009)
- [148] ERDF, En se déplaçant, la tempête continue à endommager fortement le réseau électrique. ERDF mobilise toutes ses équipes et ses moyens techniques pour rétablir 1,7 million de clients privés d'électricité, [www.erdfdistribution.fr](http://www.erdfdistribution.fr) (abgerufen am 29.08.2009)
- [149] Consejo de Seguridad Nuclear, Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado, Año 2009
- [150] [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com), Tempête: plan d'urgence levé à ôa centrale de Blayais, 26.01.2009 (abgerufen am 30.08.2012)
- [151] IRS, Massive ingress of plant debris into raw water pumping station 03.02.2009, IRS No. 8087, Blayais-4, 26.05.2010
- [152] EDF Group, 2009 Document de référence, April 2010

- [153] BBC News, "Vandalism" link to power failure, 20.07.2009, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 03.09.2009)
- [154] BBC News, Over 10,000 still without power, 22.07.2009, <http://news.bbc.co.uk> (abgerufen am 03.09.2009)
- [155] Office of Gas and Electricity Markets, Minded to position on the major supply interruption at Dartfort Creekin July 2009, Consultation Ref: 70/10, 07.06.2010
- [156] World nuclear news, Nuclear shutdown in Brazil blackout, 12.11.2009, [www.world-nuclear-news.org](http://www.world-nuclear-news.org) (abgerufen am 10.09.2012)
- [157] Protection, Automation & Control World, Brazilian Blackout 2009, March 2010 Issue
- [158] Terra, Problema em Itaipu causa apagão em 18 Estados do País, 10.11.2009, <http://noticias.terra.com.br> (abgerufen am 10.09.2009)
- [159] Operador Nacional do Sistema Elétrico, [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br) (abgerufen am 10.09.2009)
- [160] Operador Nacional do Sistema Elétrico, Análise da perturbação do dia 10/11/2009 às 22h13min envolvendo o desligamento dos três circuitos da LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã, ONS-RE-3-252/2009, 2009
- [161] Electricity Authority of Cyprus, Vasilikos Power Station, [www.eac.com.cy](http://www.eac.com.cy) (abgerufen am 11.09.2012)
- [162] Cyprus Newsreport, Huge Explosion at Zygi Naval Base causes National Disaster, 11.07.2011, [www.cyprusnewsreport.com](http://www.cyprusnewsreport.com) (abgerufen am 11.09.2012)
- [163] Cyprus Mail, Unit 5 at Vassilikos almost fully operational, 07.07.2012, [www.cyprus-mail.com](http://www.cyprus-mail.com) (abgerufen am 11.09.2012)
- [164] Die Zeit, Munitionsexplosion schadet Zyperns Wirtschaft, 13.07.2011, [www.zeit.de](http://www.zeit.de) (abgerufen am 11.09.2012)

- [165] Frankfurter Allgemeine, Rücktritte nach Explosion auf Zypern, 11.07.2011, [www.faz.net](http://www.faz.net) (abgerufen am 11.09.2012)
- [166] Enercity Netz, Ursachen des Stromausfalls in Hannover gefunden, 26.07.2011, [www.enercity-netz](http://www.enercity-netz) (abgerufen am 11.09.2012)
- [167] Hannoversche Allgemeine, Alle Rätsel des Stromausfalls in Hannover gelöst, 26.07.2011, [www.haz.de](http://www.haz.de) (abgerufen am 11.09.2012)
- [168] Hamburger Abendblatt, Zwei zeitgleiche Störungen Ursache für Stromausfall, 14.07.2011, [www.abendblatt.de](http://www.abendblatt.de) (abgerufen am 11.09.2012)
- [169] Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Gefährdung und Verletzbarkeit modernen Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung, Arbeitsbericht Nr. 141, November 2010
- [170] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, Hurricane Sandy Situation Report #5, October 30, 2012
- [171] CBC News, Kanada, Sandy weakens as hydro workers restore power to thousands, 30.10.2012, [www.cbc.ca](http://www.cbc.ca) (abgerufen am 05.11.2012)
- [172] Reuters, Hurricane Sandy pounds Jamaica, heads toward Kuba, 25.10.2012, <http://in.reuters.com> (abgerufen am 05.11.2012)
- [173] United Nations Development Programme (UNDP), News, Hurricane Sandy kills around 80 in the Caribbean, 1.8 million affected in Haiti, 2. November 2012, [www.undp.org](http://www.undp.org) (abgerufen am 05.11.2012)
- [174] [www.tribune242.com](http://www.tribune242.com), BTC post hurricane update, BTC update #11, 27.10.2012 (abgerufen am 05.11.2012)
- [175] U. S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, Hurricane Isaac Situation Report #6, August 31, 2012
- [176] Reuters, UPDATE-2 Cyprus power returns after major outage, 04.04.2012, [www.reuters.com](http://www.reuters.com) (abgerufen am 08.11.2012)

- [177] Prensa Latina, Efforts Focus on Power Restoration after Hurricane Sandy, 03.11.2012, [www.plenglish.com](http://www.plenglish.com) (abgerufen am 08.11.2012)
- [178] U. S. NRC, Event notification reports vom 29. Oktober, 31. Oktober und 1. November 2012, [www.nrc.gov](http://www.nrc.gov) (abgerufen am 20.11.2012)
- [179] Veröffentlichungen der NRC, „NRC Prepared for Hurricane Sandy; Strom Forces Postponement of Meetings“, “NRC Continues to Monitor Hurricane Sandy; No Plants Shut Down So Far As a Result of the Storm“, “NRC Continues to Monitor Hurricane Sandy; Including Alert at Oyster Creek Plant“, “NRC Keeps Eye on Nuclear Plants in Sandy’s Path – Including Three That Shut Down During the Storm“, NRC Starting to Return to Normal Inspection Coverage After Sandy” vom Oktober 2012, [www.public-blog-nrc-gateway.gov](http://www.public-blog.nrc-gateway.gov) (abgerufen am 20.11.2012)
- [180] Nuclear Energy Institute, Nuclear Energy Facilities Prove Resilience During Hurricane Sandy, 30.10.2012, [www.nei.org](http://www.nei.org) (abgerufen am 20.11.2012)
- [181] C. Murakoshi et al., Electricity Crisis and Behavior Change in the Residential Sector: Tokyo Before and after the Great East Japan Earthquake, ACEEE Summer study on Energy Efficiency in Buildings, 2012
- [182] GRS, Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan, Abschlussbericht Phase 2, August 2012
- [183] A. Kawano, Fukushima Nuclear Accident Interim Report: Effects of the earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations, especially on electric an I&C systems and equipments, Juli 2011
- [184] Operational Status of Nuclear Facilities in Japan, Japan Nuclear Energy Safety Organization, 2010
- [185] Report on the grid disturbance on 30<sup>th</sup> July 2012 grid disturbance on the 31<sup>st</sup> July 2012, August 2012

- [186] Report of the enquiry committee on grid disturbance in northern region on 30<sup>th</sup> July 2012 and in northern, eastern & north-eastern region on 31<sup>st</sup> July, 2012, August 2012
  
- [187] Power Systems Engineering Research Center, Selected Information about the July 31 Blackout in India Affecting the Northern and Eastern Regions, August 2012
  
- [188] ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators für Electricity, Technical Background and recommendations for defence plans in the continental europe synchronous area, Januar 2011
  
- [189] VDN, TransmissionCode 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, 2007
  
- [190] ENTSO-E, Operational Handbook of ENTO-E Regional Group Continental Europe
  
- [191] ENTSO-E, Special Protection Schemes, 2012
  
- [192] U.S. NRC, Event notification report for August 15, 2003
  
- [193] Indian Point Unit 2, Licensee event report, Automatic Reactor Trip due to Reactor Coolant Pump Trip on Under-Frequency Caused by a Degraded Off-Site Grid, Oktober 2003
  
- [194] Indian Point Unit 3, Licensee event report, Automatic Reactor Trip due to Reactor Coolant Pump Trip on Under-Frequency Caused by a Degraded Off-Site Grid, Oktober 2003
  
- [195] IRS, Pickering-4, Pickering Response to a Loss of Bulk Electrical System, Juni 2004
  
- [196] VGB PowerTech, 5/2003
  
- [197] EnBW, Technischer Bericht Block 1, Kernkraftwerk Neckarwestheim, November 2006

- [198] EnBW; Technischer Bericht Block 2, Kernkraftwerk Neckarwestheim, November 2006
- [199] E.On, Kernkraftwerk Brokdorf, Jahresbericht 2006
- [200] VGB PowerTech, 5/2007
- [201] VGB PowerTech, Untersuchungsprogramm zum Einfluss von Spannungstransienten auf das Notstromsystem, Abschlussbericht Stand 25.06.2012, Version 5.0
- [202] VGB PowerTech 5/2006
- [203] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Biblis Block B, Reaktorschnellabschaltung und Notstromfall nach 220 kV Netzstörung, 08.02.2004
- [204] VGB PowerTech, 5/2005
- [205] VGB PowerTech, 5/2008
- [206] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Emsland, Reaktorschnellabschaltung infolge eines Erdschlusses in der 380-kV-Ableitung, 18.01.2007
- [207] TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG, Kernkraftwerk Emsland, Meldepflichtiges Ereignis KKE-01/07 „Reaktorschnellabschaltung infolge eines Erdschlusses in der 380-kV-Ableitung“
- [208] GRS, Auswertung der internationalen Betriebserfahrung mit großflächigen Netzausfällen und Notstromfällen, SR 2468, GRS-A-3633
- [209] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Brunsbüttel, Netzstörung mit Lastabwurf auf Eigenbedarf und anschließender RESA, 28.06.2007

- [210] GRS, Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland: Auswirkungen des Tohoku-Erdbebens an den japanischen Kernkraftwerksstandorten Fukushima Dai-ichi (1) und Dai-ni (11) am 11.03.2011 und des NiigatakenChuetsu-Oki-Erdbebens am japanischen Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki-Kariwa am 16.07.2007, Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in ausländischen Kernkraftwerken, WLN 2012/02, 25.02.2012
- [211] BMU, Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, 20. November 2012
- [212] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Krümmel, Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator, 28.06.2007
- [213] GRS, Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland, Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator im Kernkraftwerk Krümmel am 28.06.2007, WLN 2009/01
- [214] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Krümmel, Reaktorschnellabschaltung durch kurzzeitigen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator, 04.07.2009
- [215] TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG, Energie- und Systemtechnik, Stellungnahme zum KKK ME 03/2009, 16.04.2010
- [216] VGB PowerTech, 2009
- [217] VGB PowerTech, 2010
- [218] Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Foliensatz Chronologie und Analyse der Speisewasserregelungen, Besprechung am 25.01.2010 im KKE

- [219] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Grafenrheinfeld, Abschaltung des KKG aufgrund einer Eigenbedarfsumschaltung, 30.09.2010
- [220] RWE Power, Pressemitteilung, RWE Standort Lingen: Hubgerät löst Störung im 380-kV-Übertragungsnetz aus, 07.07.2009
- [221] Meldung eines meldepflichtigen Ereignisses, Kernkraftwerk Grafenrheinfeld, RESA als Folge der Auslösung des Lastumschalterschutzes eines Maschinentrafos, 01.01.2012
- [222] IRS, Reactor trip on grid load transient, Chasnupp-1, IRS No. 7590, 11.12.2003
- [223] IRS, Dual-unit scram at Peach Bottom, units 2 and 3: NRC information notice 2004-15, Peach Bottom, IRS No. 7652
- [224] IRS, Three-unit trip and loss of offsite power at Palo Verde nuclear generating station: NRC information notice 2005-15, Palo Verde IRS No. 7712
- [225] Licensee Event Report (LER), Loss of offsite power – three unit trip, Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1, 13.08.2004
- [226] B. Kirby and H. Leake, Nuclear Generating Stations and Transmission Grid Reliability, IEEE
- [227] Palo Verde Nuclear Generating Station, Sequence of Events on Monday, June 14, 2004
- [228] IRS; Partial loss of 275 kV system and subsequent trip of R2 and loss of forced cooling on R1, Dungeness-A1, IRS No. 7750, 11.10.2004
- [229] IRS, Angra 1 trip due to total loss of offsite power (LOPS) and auxiliary feedwater turbine-driven pump trip, IRS No. 7801, 01.01.2005
- [230] IRS, Loss of the main transmission lines from the four units during freezing rain, IRS No. 7824, 30.12.2005

- [231] IRS, Loss of offsite power and dual-unit-trip at Catawba nuclear generating station: NRC information notice 2007-14, IRS No. 7856, 20.05.2006
- [232] IRS, Transition of all Dukovany NPP units to insular operation after the disconnection of several 400 kV lines of the national grid caused by a short circuit in the Sokolnice switch yard, IRS No. 7929, 03.08.2006
- [233] Electrical Power Engineering 2007, Power system disturbances – Technical physical point of view, K. Máslo, 2007
- [234] IRS, Complete loss of offsite power, IRS No. 7859, 24.09.2006
- [235] IRS, Reactor trip due to off-site power fluctuation; NRS Information notice 2008-12, 27.06.2007
- [236] IRS, Simultaneous loss of 220 kV and 132 kV lines resulting in house load operation, IRS No. 7961, 25.03.2008
- [237] IRS, Manual reactor trip due to offsite-power disturbance, IRS No. 8018, 30.04.2008
- [238] IRS, Loss of 400 kV and subsequent failure to start emergency diesel generators in sub A and sub B, IRS No. 7788, 25.07.2006
- [239] IRS, Discrepancy with the assumptions in SAR safety analyses, IRS No. 8062, 13.06.2008
- [240] IRS, Loss of offsite power due to incomplete logic for power transfer, IRS No. 8121, 06.07.2010
- [241] APS Analysis, North Anna Unit 1&2, Earthquake causes reactor trip with a loss of offsite power and subsequent failure of a unit 2 emergency diesel generator, 23.08.2011
- [242] IRS, Loss of shutdown cooling due to station blackout during refueling outage, IRS No. 8229, 09.02.2012

- [243] U. S. NRC, Event Notification Report, Wolf Creek, Notification of unusual event and reactor trip due to loss of offsite power, Event No: 47590, 13.01.2012
- [244] Licensee Event Report, 2012-001-00, Unit 2 Loss of Normal Offsite Power and Reactor Trip and Unit 1 Loss of Normal Offsite Power Due to failure of System Auxiliary Transformer Inverted Insulators, 30.03.2012
- [245] U. S. NRC. Special Inspection Team Report, 05000455/2012008, Byron Unit 2, 27.03.2012
- [246] U. S. NRC, NRC Bulletin 2012-01, Design Vulnerability in Electrical Power Systems, 27.07.2012
- [247] U. S. NRC, Event Notification Report, Byron-2, Unusual Event due to Loss of Offsite Power, Event No. 47708, 28.02.2012
- [248] IAEA, International Reporting System for Operating Experience (IRS), Preliminary Report 8315, Forsmark-3, "EDG Failed to start after undetected loss of two phases on 400-kV incoming offsite supply", 13.06.2013
- [249] Nuclear Power Experience Inc., Plant Description Forsmark-3
- [250] Cyprus Mail, Vasilikos Power Station returns to full operations, 20.08.2013, [www.cyprus-mail.com](http://www.cyprus-mail.com) (abgerufen am 20.03.2014)

## Abbildungsverzeichnis

### Teil A

Abb. 1.1	Kontinentaleuropäisches Verbundnetz.....	3
Abb. 1.2	Automatischer Lastabwurf bei Unterfrequenz bei den einzelnen Netzbetreibern im europäischen Verbundnetz .....	8
Abb. 3.1	Vom Netzausfall am 14.08.2003 komplett oder teilweise betroffene Gebiete der USA und Kanadas.....	12
Abb. 3.2	Ausfall von Leitungen, Transformatoren und Netzen im Nordosten der USA und im östlichen Kanada. ....	14
Abb. 3.3	Vom Netzausfall am 28.08.2003 zumindest teilweise betroffene Regionen Großbritanniens .....	27
Abb. 3.4	Die vom Stromausfall am 23.09.2003 zumindest teilweise betroffenen Gebiete in Südschweden und Dänemark .....	31
Abb. 3.5	Abtrennung des italienischen Stromnetzes vom UCTE-Verbundnetz.....	33
Abb. 3.6	Verlauf der Netzfrequenz in Italien vom Beginn der Störung bis zum Netzausfall.....	34
Abb. 3.7	Die vom Netzausfall in Italien vollständig und in der Schweiz zumindest teilweise betroffenen Gebiete. ....	34
Abb. 3.8	Verlauf von Spannung, Frequenz und Blindleistung in Deutschland und Ungarn (Heviz) im Verlauf der Störung und kurz nach der Trennung Italiens vom europäischen Verbundnetz. ....	35
Abb. 3.9	Vom Stromausfall 2004 zumindest teilweise betroffene Gebiete Griechenlands. ....	37

Abb. 3.10	Verlauf der Spannung auf den 150-kV-Schienen von den Kraftwerken in Griechenland .....	38
Abb. 3.11	Netztopologie des Raumes Trier/Luxemburg vor Störungsbeginn. ....	40
Abb. 3.12	Vom Netzausfall am 02.09.2004 betroffene Gebiete in Luxemburg und Deutschland.....	41
Abb. 3.13	Vom Ausfall des schweizerischen Bahnstromnetzes am 22.06.2005 betroffenes Gebiet. ....	43
Abb. 3.14	Vom Stromausfall im November 2005 betroffene Gebiete in Nordrhein- Westfalen und Niedersachsen .....	45
Abb. 3.15	Unterstellte Eislasten auf den Freileitungen im Münsterland.....	46
Abb. 3.16	Abgeknickte Strommasten im Münsterland im November 2005. ....	47
Abb. 3.17	Länder in Europa und Nordafrika, in denen es infolge der Netzstörung im Europäischen Verbundnetz am 04.11.2006 teilweise zu Stromausfällen kam.....	48
Abb. 3.18	Aufspaltung des UCTE-Netzes in drei Zonen mit unterschiedlicher Frequenz nach der kaskadierenden Schutzabschaltung mehrerer Leitungen.....	50
Abb. 3.19	Verlauf der Netzfrequenz unmittelbar vor der Aufspaltung in drei Teilnetze.....	51
Abb. 3.20	Verlauf der Netzfrequenz in den drei Teilnetzen in den Minuten nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes.....	53
Abb. 3.21	Vom Stromausfall am 26.02.2008 teilweise betroffene Gebiete in Florida .....	57
Abb. 3.22	Frequenzverlauf in verschiedenen Teilen von Florida bei der Netzstörung am 26.02.2008.....	58

Abb. 3.23	Durch Orkan „Klaus“ verursachte Schäden an Strommasten in Nordspanien. ....	60
Abb. 3.24	Von den Stromausfällen nach Orkan „Klaus“ ganz oder teilweise betroffene Gebiete im Süden Frankreichs und im Norden Spaniens einschließlich der Balearen. ....	61
Abb. 3.25	Vom Netzausfall am 11.09.2009 komplett oder teilweise betroffene Gebiete Brasiliens und Paraguays. ....	64
Abb. 3.26	Die beiden Teile des Wasserkraftwerks Itaipu an der Grenze zwischen Brasilien und Paraguay .....	65
Abb. 3.27	Frequenzverlauf am 10.11.2009 zwischen 22:11 Uhr und 22:14 Uhr im südlichen und im südöstlichen Teilnetz Brasiliens. ....	66
Abb. 3.8	Vom Stromausfall nach dem Erdbeben und Tsunami am 11.03.2011 betroffenen Gebiete auf Japans Hauptinsel Honshu. ....	68
Abb. 3.29	Lage der Kernkraftwerke im Norden Japans. ....	70
Abb. 3.30	Schäden am Kraftwerk Vasilikos durch die Explosion am 11.07.2011. ....	79
Abb. 3.31	Vom Stromausfall am 30.07.2012 und vom Stromausfall am 31.07.2012 betroffene indische Bundesstaaten. ....	82
Abb. 3.32	Indisches Stromnetz. ....	83
Abb. 3.33	Abspaltung des nördlichen, des östlichen und des nordöstlichen Netzes vom gemeinsamen Verbundnetz mit dem westlichen Netz am 31.07.2012. ....	85
Abb. 3.34	Durch Hurrikan Sandy verursachte Schäden am Stromnetz in den USA. ....	86
Abb. 3.35	Von Netzausfällen im Zusammenhang mit dem Hurrikan Sandy (22.10.2012 bis 31.10.2012) komplett oder teilweise betroffene Gebiete der USA, Kanadas und der Karibik. ....	87



## **Teil B**

Abb. 2.1	Spannungsverlauf in der Palo Verde Schaltanlage während der Netzstörung am 14.06.2004.....	129
Abb. 2.2	Situation des tschechischen Höchstspannungsnetzes am 03.08.2006 nach Auftreten des Kurzschlusses in der Schaltanlage Sokolnice.....	131
Abb. 2.3	Schematischer Aufbau Eigenbedarf und Netzanbindung Forsmark.....	136



## Tabellenverzeichnis

### Teil A

Tab. 3.1	Verhalten der US-amerikanischen und kanadischen Kernkraftwerke..... bei der Netzstörung am 14.08.2003.....	18
Tab. 3.2	Lastabwürfe und Ausfall von Erzeugungseinheiten im ..... westlichen Teilnetz nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes am 04.11.2006.....	52
Tab. 3.3	Netzfrequenz und Defizite bzw. Überschüsse in der Erzeugerleistung in den drei Teilnetzen nach der Aufspaltung des Europäischen Verbundnetzes, .....	54
Tab. 3.4	Verhalten der betroffenen japanischen Kernkraftwerke nach dem Erdbebens und nachfolgenden Tsunami am 11.03.2011 .....	77
Tab. 3.5	Verhalten US-amerikanischer Kernkraftwerke während des Hurrikans Sandy 2012 .....	93

### Teil B

Tab. 2.1	Ereignisse aus der deutschen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam.....	107
Tab. 2.2	Ereignisse aus der internationalen Betriebserfahrung, bei denen es zur Störung oder zum Ausfall einer oder mehrerer Netzanbindungen kam....	114
Tab. 4.1	Auswahl an großflächigen bzw. langandauernden Netzausfällen und Netzstörungen in den Jahren 2003 bis 2012.....	186

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-939355-96-0**