

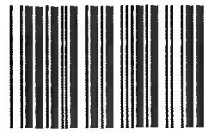


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

Industriestrasse 19
5200 Brugg
Tel.: 056 / 460 84 00
Fax: 056 / 460 84 99

433



AN-Nummer

ENSI-AN-7911

Datum

23. April 2012

Aktenzeichen

10KKB

Typ/Charakter

Bericht

Klassifikation

öffentlich

Bearbeiter

ALF/BID/PFD/SCD/
SAS

Visum

Sachbearbeiter:

Vorgesetzter:

Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter)

Kernkraftwerke, Hochspannungsnetz, Infrastruktur,
Kommunikationsnetz, Erdmagnetsturm, Sonnensturm

Seiten 7

Beilagen

Zeichnungen

Betrachtungen zu infrastrukturellen elektromagnetischen Auswirkungen aufgrund von solaren Eruptionen

- 1 Solare Eruptionen**
- 2 Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld**
- 3 Effekte von Sonnen- und Erdmagnetstürmen**
 - 3.1 Atmosphäre
 - 3.2 Satelliten
 - 3.3 Hochspannungsnetze
 - 3.4 Kraftwerke
 - 3.5 Kernkraftwerke
 - 3.6 Telekommunikationssysteme
 - 3.7 Pipelines
- 4 Lagebeurteilung**
 - 4.1 Schadenszenario
 - 4.2 Auswirkungen für die nukleare Sicherheit
 - 4.3 Lage in der Schweiz
- 5 Referenzen**

Verteiler:

ENSI: ELTE, KASI
Archiv



1 Solare Eruptionen

Die Sonne besteht im Wesentlichen aus einem Plasma, einem Gas in dem die Teilchen elektrisch geladen sind (Ionen). Den grössten Anteil haben Wasserstoff- und Heliumkerne sowie Elektronen. Grund für die Ionisation ist die hohe Temperatur der Sonne. Ein Teil dieses Plasmas wird kontinuierlich ins Weltall abgegeben. Dieses Phänomen wird als Sonnenwind bezeichnet.

Die Geschwindigkeit der Elektronen und der positiven Ionen im Sonnenplasma ist unterschiedlich, was eine elektrische Nettostromdichte zur Folge hat. Diese elektrische Stromdichte erzeugt ein Magnetfeld, welches seinerseits wieder mit den bewegten Ladungen eine Wechselwirkung hat.

Das Magnetfeld der Sonne ist deshalb nicht stabil. Es kehrt sich etwa alle 11 Jahre um. Mit dem abschwächenden globalen Sonnenmagnetfeld treten auch vermehrt lokale Magnetfeldstörungen auf, welche sich als Sonnenflecken mit einer niedrigeren Oberflächentemperatur äussern. Die starken Magnetfelder bei grossen Sonnenflecken können Wolken mit heissen Plasmas aus den Aussenschichten der Sonne ins All schleudern. Die Eruptionen werden Sonnenstürme genannt und dauern ein bis zwei - in Ausnahmefällen auch mehrere Tage.

Bei einem Sonnensturm werden sowohl elektromagnetische Strahlung (Licht, UV, Röntgenstrahlung) als auch elektrisch geladene Teilchen freigesetzt. Während die elektromagnetische Strahlung nach etwa 8 Minuten die Erde erreicht, unmittelbar gefolgt von den hochenergetischen Teilchen, dauert es bis zum Eintreffen der niederenergetischen Teilchen 24 bis 36 Stunden. Der genaue zeitliche Verlauf des in der Erdumgebung eintreffenden Teilchenstroms wird insbesondere durch die Wechselwirkung mit dem permanent emittierten Sonnenwind beeinflusst.

Die elektromagnetische Strahlung und die hochenergetischen Teilchen werden durch die Ionosphäre und das Erdmagnetfeld gut abgeschirmt. Sie können aber insbesondere für Astronauten und Satelliten gefährlich werden. Die niederenergetischen Teilchen beeinflussen im Wesentlichen das Erdmagnetfeld und werden im folgenden Kapitel diskutiert.

2 Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld

In grober Näherung kann das Erdmagnetfeld als Dipol betrachtet werden. Die magnetische Achse ist gegenüber der Rotationsachse geneigt und verschiebt sich im Laufe der Zeit. Auch die Stärke des Magnetfeldes variiert langsam. Sie beträgt am (magnetischen) Äquator etwa $30 \mu\text{T}$, an den Polen etwa $60 \mu\text{T}$. Zum Vergleich: Die magnetische Flussdichte eines starken Magneten ist rund 20'000 mal grösser.

Auch ohne solare Eruption, d.h. bei zeitlich konstantem Sonnenwind, beeinflussen sich Erdmagnetfeld und Sonnenwind. Der Sonnenwind bewirkt, dass das gestörte Magnetfeld in Richtung der Sonne schneller abnimmt, in sonnenabgewandter Richtung hingegen langsamer. An der Erdoberfläche bewirkt der Sonnenwind eine Änderung des Magnetfeldes im einstelligen Prozentbereich, verglichen mit dem ungestörten Dipolfeld.

Treffen die bei einer solaren Eruption emittierten zusätzlichen Teilchen auf das Erdmagnetfeld, wird dieses verglichen mit dem Normalzustand stärker gestört. Die nach etwa 24 bis 36 Stunden auf der Erde eintreffenden, elektrisch geladenen Teilchen, treten dabei den Magnetfeldlinien folgend in der Umgebung der magnetischen Pole in die Erdatmosphäre ein, wo sie die Nord- und Südlichter erzeugen und zu einer Abschwächung des Erdmagnetfeldes führen. Wegen der Auswirkung auf das Erdmagnetfeld wird das Ereignis auch als Erdmagnetsturm bezeichnet.



Etwa zwölf Stunden nach Eintreffen des solaren Teilchenstromes erreicht das Erdmagnetfeld seine minimale Feldstärke. Ein intensiver Magnetsturm führt zu einer Feldstärkenabsenkung an der Erdoberfläche bis ca. 250 nT. Es wurden aber auch schon maximale Abschwächungen von bis zu 1000 nT beobachtet. Nach einigen Stunden beginnt das Erdmagnetfeld wieder stärker zu werden. Diese Erholungsphase kann zwischen 8 Stunden und einer Woche dauern.

3 Effekte von Sonnen- und Erdmagnetstürmen

3.1 Atmosphäre

Wenn die Sonnenwindteilchen auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre treffen, regen sie dort die Luftmoleküle zum Leuchten an. Da die Teilchen den Erdmagnetfeldlinien folgen, treten die Lichterscheinungen hauptsächlich in den Polarregionen auf. Das Phänomen wird deshalb Polarlicht genannt. Bei starken Sonnenstürmen können Polarlichter auch in mittleren Breiten zum Teil bei klarem Himmel sogar in den Subtropen beobachtet werden.

Aufgrund der atmosphärischen Absorption treffen nur wenige Teilchen des Sonnenwindes auf die Erdoberfläche auf. In grösserer Höhe können sie aber insbesondere für Astronauten und Satelliten gefährlich werden. Auch die Strahlenbelastung für Flugzeugbesatzungen und -Passagiere ist während Sonnenstürmen erhöht.

Sonnenstürme können auch zu vorübergehenden Änderungen in der Ionosphäre führen. Einige Kommunikationssysteme für weite Distanzen benutzen die Ionosphäre um Signale zu reflektieren. Durch die Veränderung der Ionosphäre können diese Funkübertragungen zeitweilig gestört werden. Dies betrifft insbesondere Flug- und Schiffsfunkverbindungen unterhalb 30MHz. Auch die Signale der GPS-Satelliten werden durch ionosphärische Effekte gestört. So fielen während der Sonnensturmserie zwischen dem 19. Oktober und dem 5. November 2003 die Navigationssysteme für den automatischen Landeanflug auf US-Flughäfen teilweise aus.

3.2 Satelliten

Satelliten können durch die Teilchen des Sonnenwindes direkt beschädigt werden. Insbesondere die hochenergetischen, schnellen Sonnenwindanteile können die Solarzellen der Satelliten schädigen. Auch die Elektronik kann durch entstehende Differenzpotentiale oder Ladungsakkumulation geschädigt oder gestört werden.

Als Beispiel können der kanadische Satellit Anik E1 und der Forschungssatellit Equator-S genannt werden, die in den Jahren 1994 bzw. 1998 vermutlich durch Einwirkung energiereicher Elektronen ausgefallen sind. In beiden Fällen besteht ein enger zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Ausfall und beobachteten Sonnenausbrüchen.

Die niederenergetischen, langsamen Sonnenwindanteile heizen die obere Erdatmosphäre lokal auf. Durch die Ausdehnung der Atmosphäre erhöht sich der Luftwiderstand für Satelliten in niedrigen Orbits. Bahnänderungen oder erhöhter Treibstoffverbrauch zur Kompensation des Höhenverlustes sind die Folge. Insgesamt, so schätzte die europäische Weltraumorganisation ESA, entstand in den letzten Jahren allein wegen Ausfalls von Satelliten ein Schaden von mehr als 500 Millionen Dollar.



3.3 Hochspannungsnetze

Die während eines Erdmagnetsturmes auftretenden Variationen des Erdmagnetfeldes, induzieren ein elektrisches Feld im Erduntergrund. Dadurch können in langgestreckten elektrischen Leitern - wie z.B. Überlandleitungen - Ströme eingekoppelt werden. Die Magnetfeldänderung während eines Erdmagnetsturmes hat eine Periode von mehreren Stunden bis zu einigen Tagen. Dementsprechend ändern sich die durch die Veränderung des Erdmagnetfeldes induzierten Ströme in elektrischen Netzen zeitlich nur sehr langsam. Elektrotechnisch betrachtet verhalten sie sich daher praktisch wie Gleichströme.

Die induzierten Spannungen bzw. Ströme können elektrische Komponenten beschädigen bzw. zerstören. Insbesondere Transformatoren und zum Teil auch Generatoren können infolge der quasi Gleichstromeinwirkungen Sättigungserscheinungen erfahren, die neben Überhitzungen der Spulen auch Auslösungen von Sicherheitseinrichtungen bewirken können. Diverse Netzbetreiber benutzen neben der Blindleistungskompensation (Phasenschiebung) mittels Generatoren auch statische Blindleistungskompensatoren. Deren Kondensatorbänke können bei magnetsturmbedingten Blindleistungsschwankungen ebenfalls zerstört oder durch die zugehörigen Schutzrichtungen abgeschaltet werden.

Besonders ausgeprägt ist die Problematik der induzierten Gleichströme in Netzen in Pol-Nähe mit langen Leitungen in Nord-Süd-Richtung. Konkrete Erfahrungen gibt es bisher vor allem aus den kanadischen, skandinavischen und südafrikanischen Netzen.

Als Beispiel aus jüngerer Zeit kann der heftige Sonnensturm vom 13. März 1989 /1/ angeführt werden. Der dabei entstandene Magnetsturm breitete sich vom magnetischen Nordpol nach Süden aus und reichte bis in die US-Nordoststaaten bzw. nach Skandinavien und England. In Kanada wurden Magnetfeldänderungen von ca. 8 nT/s über einen Zeitraum von mehreren Minuten gemessen. Bei den dort vorhandenen, zum Teil über 1000 Kilometer langen Überlandleitungen, hat diese an sich geringe Feldänderung gereicht, um über die eingekoppelten Gleichströme den 735 kV-Transformator des Kernkraftwerkes Salem nachhaltig zu schädigen (siehe Referenzen /1/, /3/). Der Ausfall des Transformators führte über einen Dominoeffekt zu einem grossräumigen Stromausfall in der Region um Montreal und verursachte ein Chaos. Verkehrsleitsysteme, Flughäfen sowie die Fernwärmeversorgung fielen aus, insgesamt waren sechs Millionen Menschen betroffen.

Als Schutzmassnahmen gegen Erdmagnetstürme kommen die Auslegung der Hochspannungstransformatoren für plötzliche Stromspitzen sowie eine Leistungsreduktion vor dem Ereignis in Frage. Letzteres ist möglich da der Erdmagnetsturm mit einer Verzögerung von 24 bis 36 Stunden nach dem Sonnensturm auftritt und entsprechende Alarmierungssysteme zur Verfügung stehen (Weltraumwettervorhersagen).

3.4 Kraftwerke

Der direkte Einfluss von Erdmagnetstürmen auf Kraftwerke ist sehr klein. Die auftretenden Magnetfeldänderungen reichen nicht aus, um in den auf den Kraftwerksanlagen anzutreffenden Leiterschleifen von wenigen 100 Metern Länge, nennenswerte Spannungen zu induzieren. Die auftretenden Störspannungen belaufen sich selbst bei starken Erdmagnetstürmen auf wenige 0.1 mV und werden mit den vorhandenen Schutzmassnahmen mit grosser Reserve beherrscht. Bisher sind keine direkten Beeinträchtigungen von Stromproduktionsanlagen durch Erdmagnetstürme bekannt.



Zu berücksichtigen sind hingegen die indirekten Einwirkungen von Erdmagnetstürmen auf die Kraftwerke. Darunter werden Störspannungen und -ströme verstanden, welche über die vorhandenen Hochspannungsleitungen in die Anlagen eingebracht werden. An dieser Stelle sind insbesondere die bereits unter Kapitel 3.3 erwähnten Schäden an Hochspannungstransformatoren und Blindleistungskompensatoren zu nennen. Dadurch kann die Leistungsabgabe an das Hochspannungsnetz ausfallen.

3.5 Kernkraftwerke

Wie bei konventionellen Kraftwerken können auch bei Kernkraftwerken Schäden durch direkte Einwirkungen von Erdmagnetstürmen ausgeschlossen werden. Die vorhandenen Schutzmassnahmen gegen elektromagnetische Einflüsse wie Abschirmung, Potentialtrennung sowie ein hervorragend ausgebauter Blitzschutz gewährleisten die Beherrschung der auftretenden Störspannungen mit grosser Reserve. Die bisherigen Erdmagnetstürme hatten keinen erkennbaren Einfluss.

Das grösste Gefährdungspotenzial für Kernkraftwerke durch Erdmagnetstürme sind somit die Störspannungen und -ströme, welche über die vorhandenen Hochspannungsleitungen in die Anlagen eingebracht werden. Insbesondere Transformatoren und zum Teil auch Generatoren können Sättigungserscheinungen erfahren, was neben Überhitzungen der Spulen auch Auslösungen von Sicherheitseinrichtungen bewirken kann. Das Kernkraftwerk wird bei einem Netzausfall galvanisch vom Netz getrennt.

Nach der Abtrennung vom Hochspannungsnetz benötigen Kernkraftwerke weiterhin Strom für die Aufrechterhaltung der Kernkühlung. Dafür stehen in der Schweiz mehrere Rückfallebenen wie die Eigenbedarfsversorgung im Inselbetrieb, die direkte Anbindung an ortsnahe Wasserkraftwerke sowie redundante Notstromdiesel-Aggregate zur Verfügung.

3.6 Telekommunikationssysteme

Früher waren insbesondere Überland-Telefonleitungen von geomagnetischen Änderungen betroffen, weil diese zum Teil über weite Strecken mit Gleichstrom versorgt wurden und die Erde als Rückleiter ausgelegt war. Beim bisher mächtigsten Erdmagnetsturm vom 1. bis 2. September 1859 schossen in den höheren nördlichen Breiten Starkströme durch Telegrafleitungen, diese schlugen Funken, Papiere fingen Feuer und das gerade weltweit installierte Telegrafennetz wurde massiv beeinträchtigt.

Mit den heutigen erdverlegten, engmaschigen und teils optischen Telekommunikationsnetzen sind diese Effekte kleiner.

3.7 Pipelines

Auf der Erde koppeln sich die magnetischen Störfelder in lange elektrische Leiter wie unter anderem Pipelines ein. Auch in Pipelines können deshalb Ströme und Spannungen induziert werden, die insbesondere die Durchflussmessungen verfälschen können. Daneben werden Einflüsse auf die Korrosion angenommen.



4 Lagebeurteilung

4.1 Schadenszenario

Wie in Kapitel 3 dargelegt, sind neben Satelliten insbesondere die Hochspannungsnetze von Sonnen- und Erdmagnetstürmen betroffen. Während der Ausfall von Satelliten begrenzte wirtschaftliche Auswirkungen hat, können durch Erdmagnetstürme ausgelöste Stromausfälle grosse volkswirtschaftliche Schäden verursachen.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei sehr grossen Erdmagnetstürmen grossflächige Stromausfälle auftreten. Laut /4/ wären bei einem Ereignis wie dem grossen geomagnetischen Sturm von Mai 1921 heute in den Vereinigten Staaten mehr als 130 Millionen Menschen von Stromausfällen betroffen. 350 Höchstspannungstransformatoren könnten bleibende Schäden erleiden.

Je nach Ausmass des betroffenen Gebietes und der aufgetretenen Schäden an elektrischen Komponenten kann es zudem mehrere Tage bis Wochen dauern, bis eine stabile Stromversorgung wiederhergestellt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein mehrtägiger Stromausfall zu einem vollständigen Zusammenbruch der technischen Infrastruktur führt. Unter anderem ist bei diesem Zusammenbruch der Ausfall der Telekommunikations-, Treibstoff- und Trinkwasserversorgung sowie des öffentlichen Verkehrs zu unterstellen.

4.2 Auswirkungen für die nukleare Sicherheit

Wie in Kapitel 3.5 ausgeführt sind die direkten Einwirkungen von Erdmagnetstürmen auf Kernkraftwerke sehr klein. Bei ausgefallener Netzversorgung benötigen die Kernkraftwerke für die Aufrechterhaltung der Kernkühlung aber weiterhin Strom.

Die in der Schweiz verfügbaren Rückfallebenen der Stromversorgung für Kernkraftwerke wie die Eigenbedarfsversorgung im Inselbetrieb, die direkte Anbindung an ortsnahe Wasserkraftwerke sowie die Versorgung über redundante Notstromdiesel-Aggregate sind geeignet die Stromversorgung der Kernkraftwerke auch bei länger andauernden Netzausfällen sicherzustellen.

Die indirekten Auswirkungen der massiven Störungen des gesamten Infrastruktursystems bei einem sehr lange andauernden Stromausfall lassen sich nur schwer abschätzen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein mehr als 10 Tage dauernder Netzausfall nur mit externer Unterstützung bewältigt werden kann.

4.3 Lage in der Schweiz

Die Schweiz ist von den direkten Auswirkungen von Erdmagnetstürmen aufgrund der grösseren Entfernung zum Pol generell weniger betroffen als die Gebiete in den nördlicheren Breiten. Für das schweizerische Hochspannungsnetz besteht aus Sicht der Swissgrid zurzeit kein unmittelbarer Handlungsbedarf, da die schweizerischen Hochspannungsleitungen zudem relativ kurz sind.

Im Rahmen der regelmässigen Aktualisierung der Netzplanung wird sich Swissgrid in Zukunft mit dieser Thematik verstärkt auseinandersetzen, nicht zuletzt aufgrund der wichtigen in Nord-Südrichtung geplanten Leitungen. Sollte sich die Gefahr einer Auswirkung auf die Netzsicherheit in der Schweiz erhöhen, werden wir entsprechende Schutzmassnahmen einleiten. Als erster Schritt wurde in der AG Stromversorgungssicherheit eine Überprüfung der Priorisierung von KKW bei



Stromausfall (generell) gefordert. Zu untersuchen wäre auch, wie nach einem Totalausfall der Netzaufbau inkl. Einbindung der Kernkraftwerke erfolgen würde.

5 Referenzen

Die Informationen wurden aus internen Quellen sowie dem World Wide Web zusammengetragen, redigiert und thematisch geordnet. Speziell zu erwähnen sind:

- /1/ "Electric Power Grid Vulnerability to Natural and Intentional Geomagnetic Disturbances." Processing of 16th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibilities, February 4-18, 2005, Zurich
- /2/ The Hydro-Quebec System Blackout on March 13, 1989 – Report from June 8, 1989 from Hydro-Quebec
- /3/ Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid, Meta-R-319, John Kappenman, Metatech Corporation, January 2010
- /4/ OECD Report „Geomagnetic Storms“ vom 14. Januar 2011 unter <http://www.oecd.org/dataoecd/57/25/46891645.pdf>