

Weltraumwetter- und Sonnensturmriskien

Jan Eichner, Munich Re – Geo Risks
MUG “Science Day“, München 2022

Worum geht's...

Gefährdete Technik und Infrastruktur:

Satelliten	Strahlung, energetische Partikel → Solarpaneele, Elektronik; thermische Ausdehnung der oberen Atmosphäre → erhöhter Luftwiderstand auf LEO Satelliten → mehr Bahnkorrekturen, geringere Lebensdauer
Funkverkehr	Funkverkehr, GPS, Internet, Radio, Sat-TV etc.
Luftfahrt	Erhöhte Strahlendosis für Crews; kein O-T-H Funk; polare Routen geschlossen
Bodeneffekte	Rohrleitungskorrosion; Störung von Eisenbahninfrastruktur, Kommunikationskabel; geomagnetisch induzierten Strömen (GIC) in HV-Transmissionsnetzen

→ **Weitreichender und lang anhaltender Stromausfall**

Extreme Auswirkungen: Betriebsunterbrechungen, soziales Leben, Nahrung, Wasser, Energie, Lieferketten, med. Versorgung, etc. ...Aufstände, Plünderungen?

Risk ~ Hazard x Vulnerability x Exposure

1. Gefahr / Gefährdung

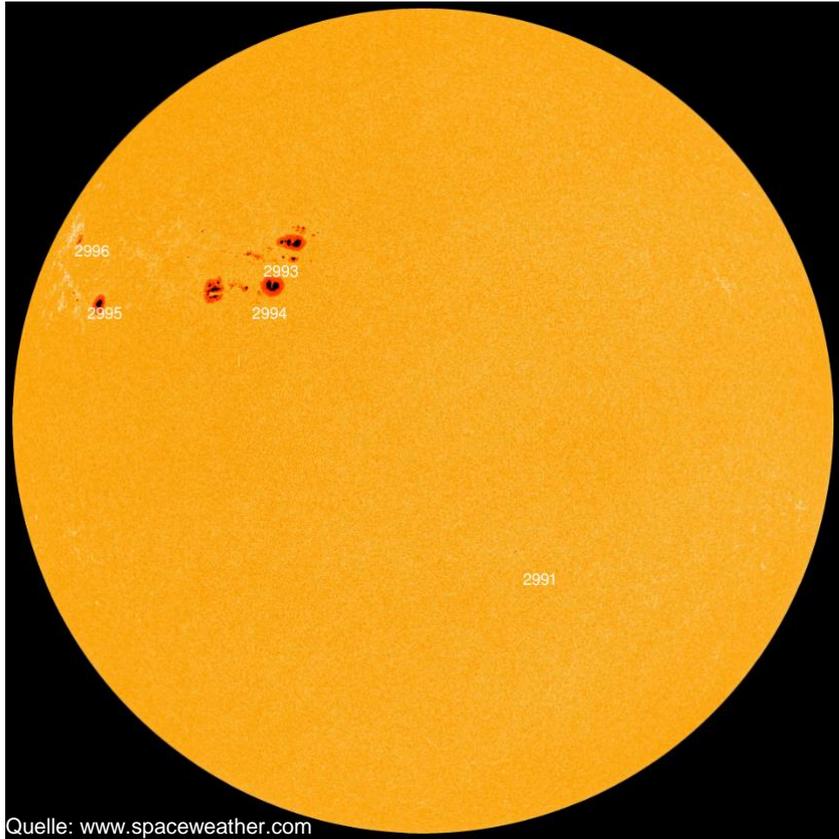
2. Was steht auf dem Spiel?

3. Schadenanfälligkeit

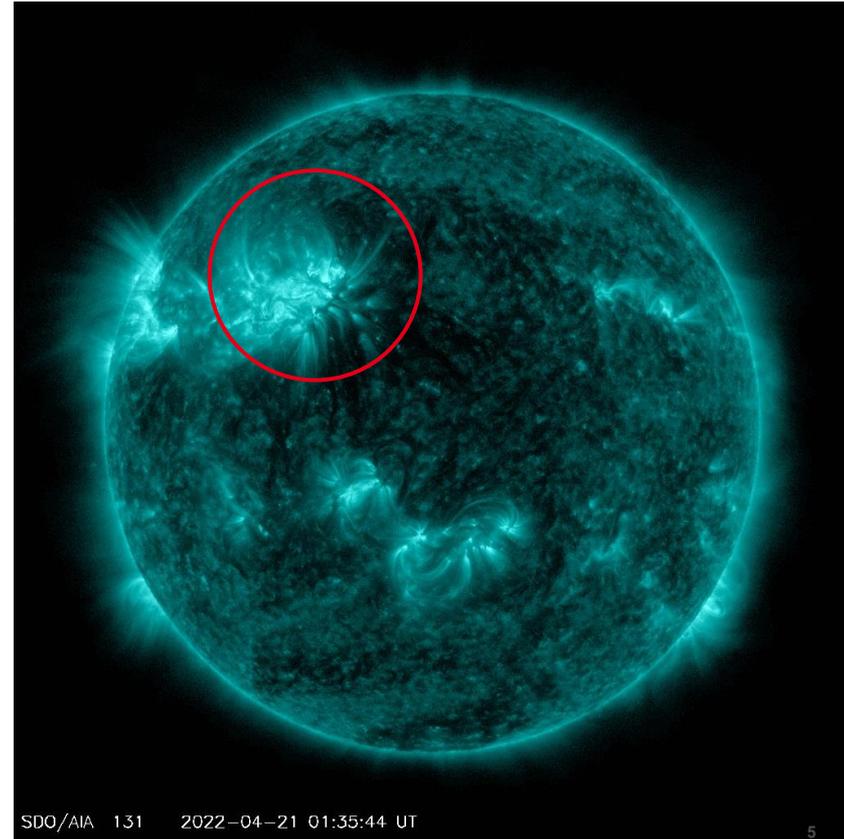
Hazard

1. Physikalische Mechanismen

Vorgestern auf der Sonne...



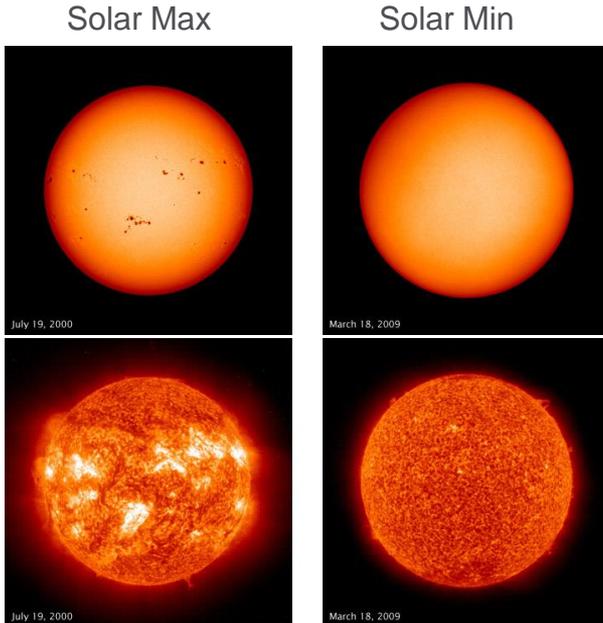
X-Class
Solar
Flare



1. Physikalische Mechanismen

Der Sonnenzyklus

- 11-jähriger Sonnenzyklus: wechselnde magnetischer Polarität
- **Solar Max** (aktive Phase), **Solar Min** (ruhige Phase)
- Wechselnde Anzahl von **Sonnenflecken**



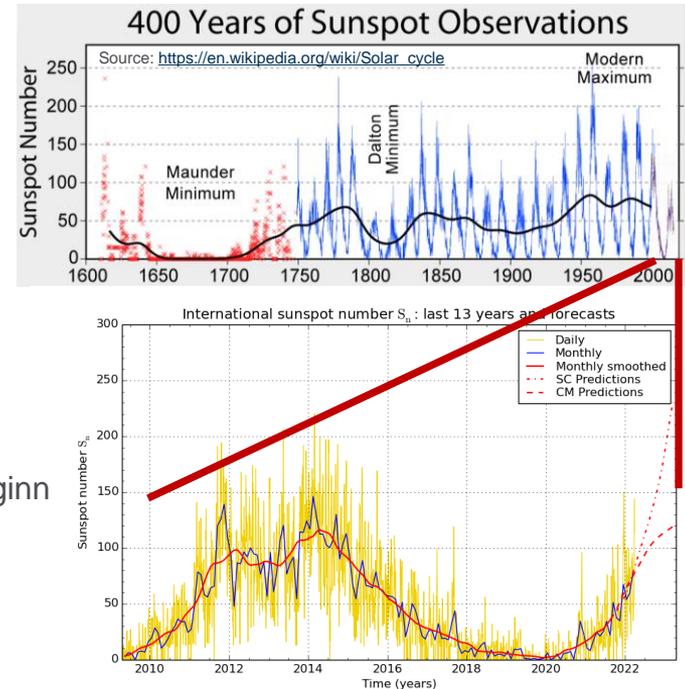
Sichtbares Spektrum

Ultraviolettes Spektrum

Source: NASA/SDO

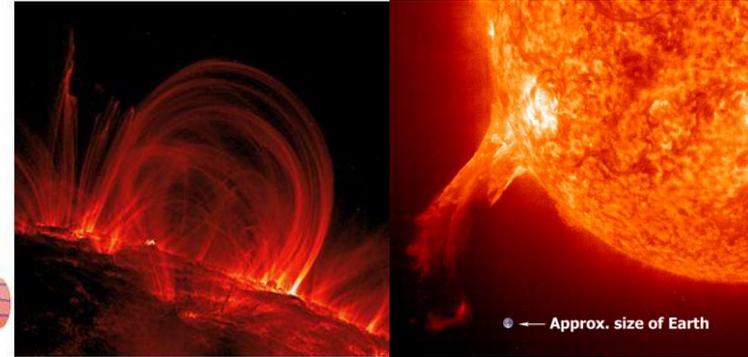
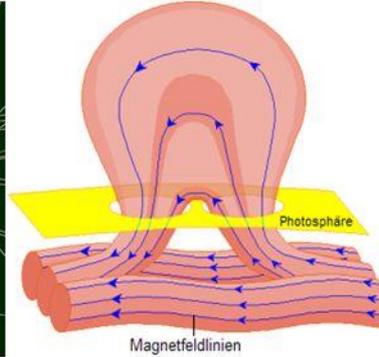
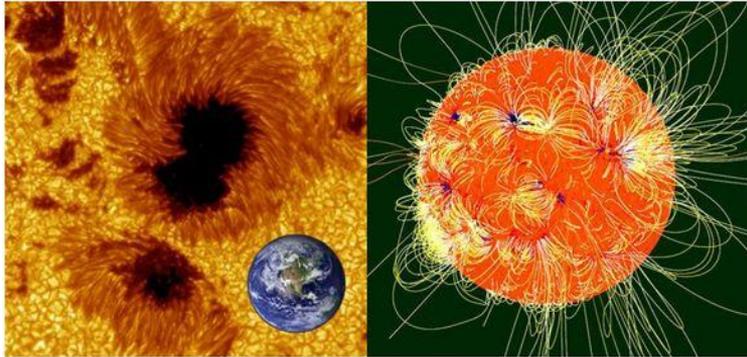
Historischer Sonnenzyklus

Derzeit am Beginn von Zyklus 25



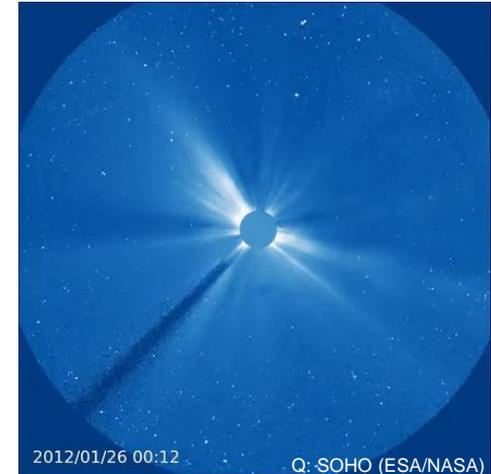
1. Physikalische Mechanismen

Ursprung eines Sonnensturms



An Sonnenflecken drängen **Magnetfeldlinien** ins All und verursachen magnetische Störungen und Spannungen.

Magnetische Spannung zu stark → Feldlinien reißen ab
→ Sonneneruptionen (**Solar Flares** und **Koronale Massenauswürfe (CME)**) emittieren Strahlung und elektr. geladenes Plasma ins All.

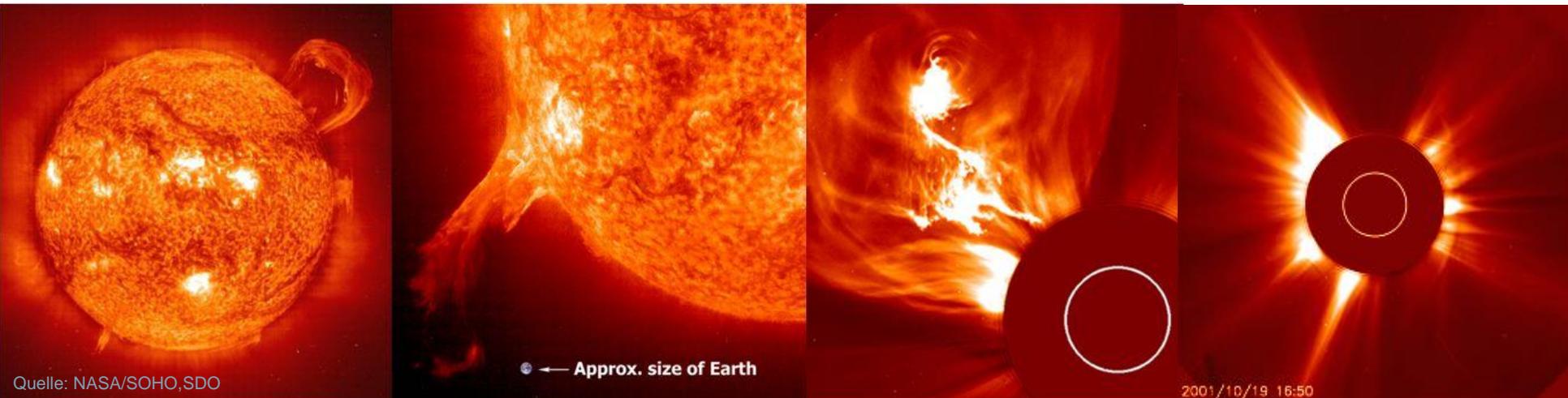


1. Physikalische Mechanismen

Koronale Massenauswürfe (CME)

Ausgestoßenes koronales Material:

- Plasmawolken (**Elektronen** und **Protonen**) mit eigenem **Magnetfeld**
- ~10 Mrd. Tonnen Material
- Geschwindigkeit > **2000 km/s**, erreicht Erde in < 1 Tag
(Vergleich: normaler Sonnenwind: ~400 km/s, ca. 4 Tage bis zur die Erde)



1. Physikalische Mechanismen

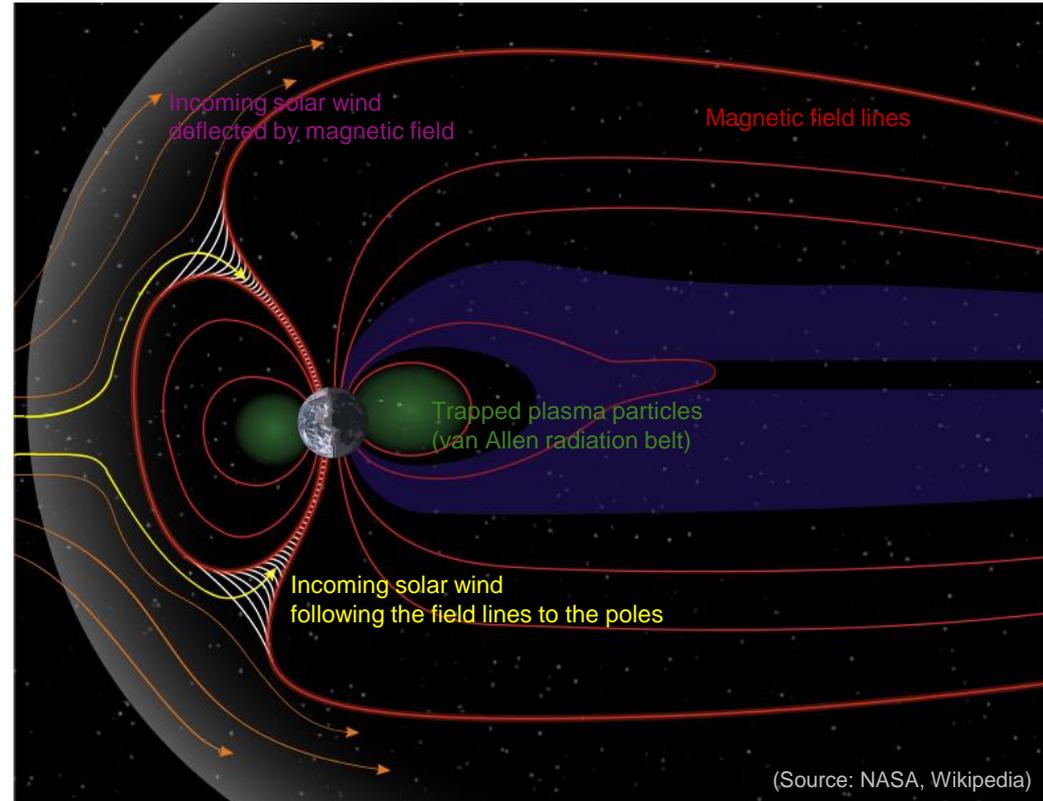
Wechselwirkung des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld

Magnetfeld der Plasmawolke interagiert mit Erdmagnetfeld (**rot**).

Wechselwirkung mit van-Allen-Strahlungsgürtel der Erde (**grün**).

Polarisation der Wolke: Erdmagnetfeld lenkt Plasmawolke ab (**orange**) oder öffnet sich für sie (**gelb**).

In beiden Fällen: Teil der Teilchen folgt Feldlinien in Richtung magnetischer Pole.



1. Physikalische Mechanismen

Geomagnetischer Sturm

Plasmateilchen dringen in Ionosphäre ein (100 - 300 km), werden durch Reibung gebremst und erzeugen **Polarlichter**.

Vorgang erzeugt EM-Induktionsfelder, die mit lokalem Erdmagnetfeld interagieren und in turbulente Schwingungen versetzen.

Geomagnetischer Sturm (Definition der NOAA):
Magnetische Störung erreicht einen $-D_{st}$ Wert von 50 nT binnen 3h Stunden.

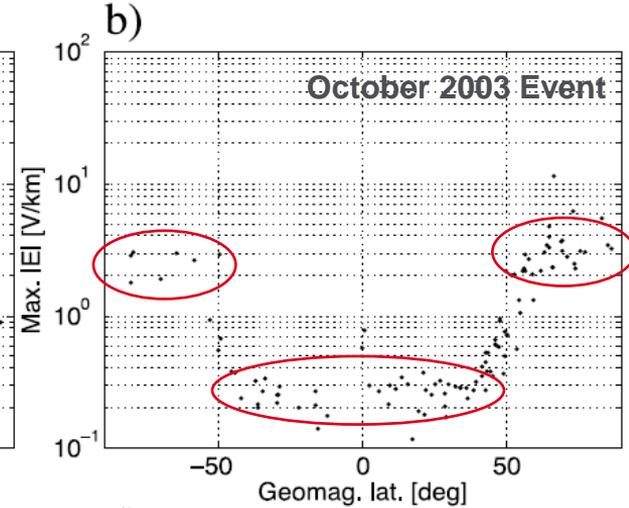
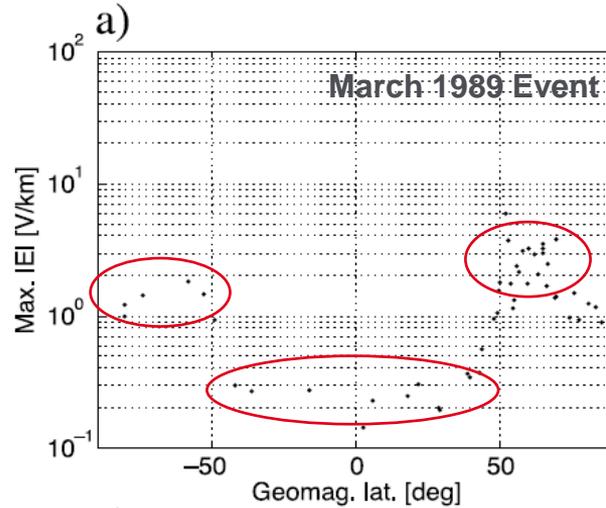
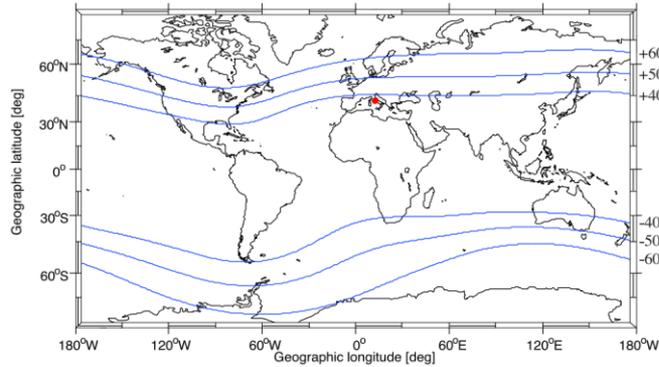
$-D_{st}$ = *Disturbance storm time index* misst geomagnetische Fluktuationen, die durch Störungen im äquatorialen Ringstrom entstehen



(Source: Wikipedia)

1. Physikalische Mechanismen

Geoelektrische Felder und geomagnetische Breite

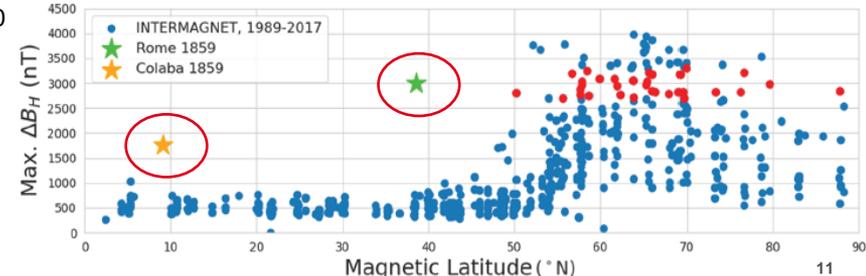


“Universelle“ (?) Schwelle bei ca. 50° geomag. Breite: E-Abfall um ca. 1 Größenordnung! (1)

(1) Pulkkinen, A., et al. (2012), Space Weather, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750

Allerdings: Berichte über historische "extreme" Extremereignisse unterhalb von 40° geomag. Nord (2)

(2) Blake, S. P. et al. (2020), J. of Geophys. Res.: Space Physics, 125, e2019JA027336



1. Physikalische Mechanismen

Geomagnetisch induzierte Ströme (GIC)

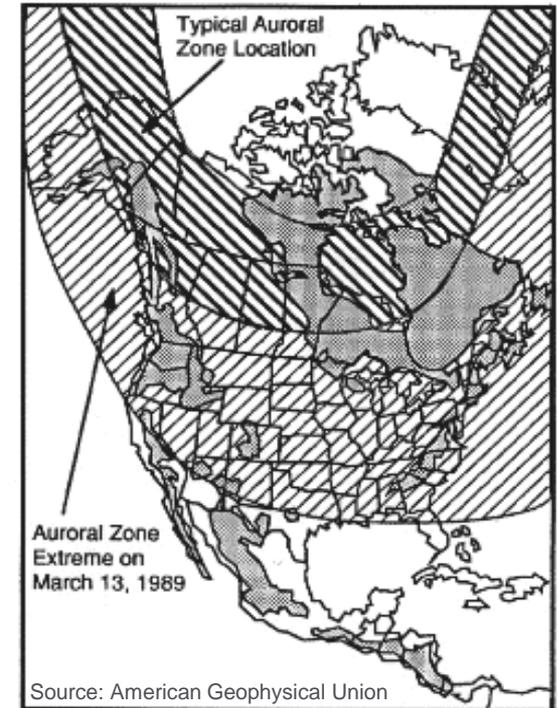
Geologie (resistiv vs. leitfähig) verstärkt oder dämpft geoelektr. Felder (>10 V/km möglich, 4 V/km bereits gemessen!).

“V/km“: Große *Antennen* integrieren E-Felder über **ausreichend große Entfernungen**, um signifikante Spannung zu erreichen.

Stromleitungen, Datenkabel, Rohrleitungen **schließen** Bereiche auf unterschiedlichen elektr. Potenzialen über Erdungen **kurz**.

E-Feld löst **geomagnetisch induzierte Ströme (GIC)** aus, die über Transformatorerdungskabel ins Stromnetz gelangen. (Stärkster gemessener GIC: **~ 400 A über 10 Sek.**)

GIC (Quasi-Gleichstrom) kann HV-Transformatoren zum Abschalten zwingen oder beschädigen.



Gebiete mit magmatischem (*resistivem*) Grundgestein in Nordamerika (dunkelgrau)

1. Physikalische Mechanismen

GIC Auswirkungen auf HV-Transformatoren

GIC: Quasi-Gleichstrom im Wechselstromsystem
→ Stört Magnetisierung des Transformator-kerns

Vorzeitige Sättigung der Magnetisierung des Kerns führt zu *Halbzyklen* im 60 Hz bzw. 50 Hz System (sog. *Harmonics*).

Harmonics führen zu...

- ...immensem Anstieg an Magnetisierungsstrombedarf
- ...lokalen Wirbelströmen (sog. *Eddies*) mit lokaler Überhitzung (sog. *Hot Spots*)

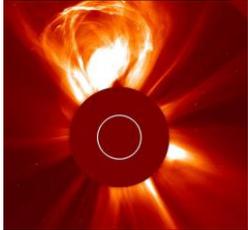
GIC-angeregte **Hot Spots** verschleifen oder zerstören **zellulosebasierte Isolierung der Kupferspulen** → Maschine funktionsunfähig!



250 MVA Leistungstransformator
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Leistungstransformator#/media/Datei:Leistungstransformator_neu.jpg

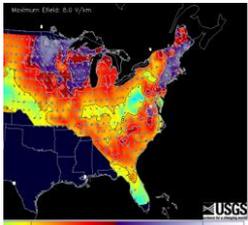
1. Komplexe Wirkungskette:

Von solarer Aktivität zur Störung der HV-Netze



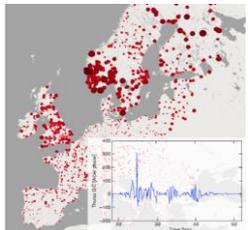
1. CME:

- Geschwindigkeit
- Masse, Partikeldichte
- Magnetische Polarisation



3. Geoelektrisches Feld:

- Durch Intensität des geomag. Sturms
- Geologie (widerständig / leitend)
- Formen geoelektrischer Feldstörungen



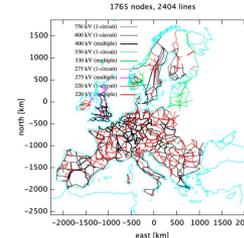
5. GIC:

- Durch Intensität des geoelektr. Feldes
- Elektr. Widerstand der HV-Leitungen
- Dauer der Entladung



2. Geomagnetischer Sturm:

- Magnetosphäre
- Strahlungsgürtel und Ringströme
- Ionosphäre / Aurorales Oval (Ausdehnung bis mittlere Breiten)



4. HV Transmissionsnetze:

- Lage (geomagnetische Breite)
- Topologie des HV-Netzes
- Leitungslängen und Erdungen



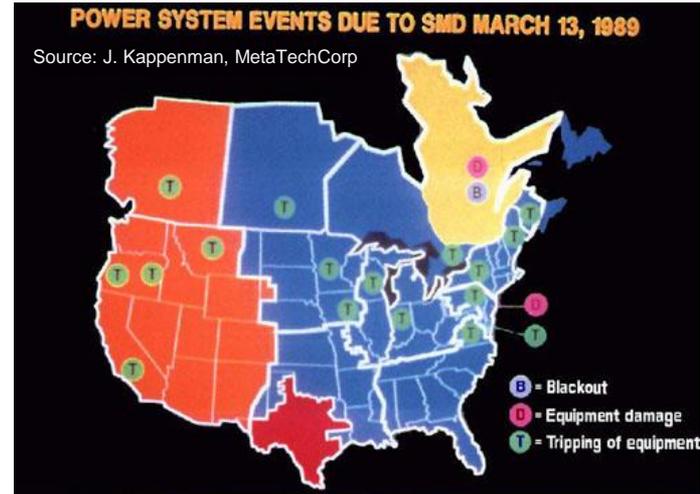
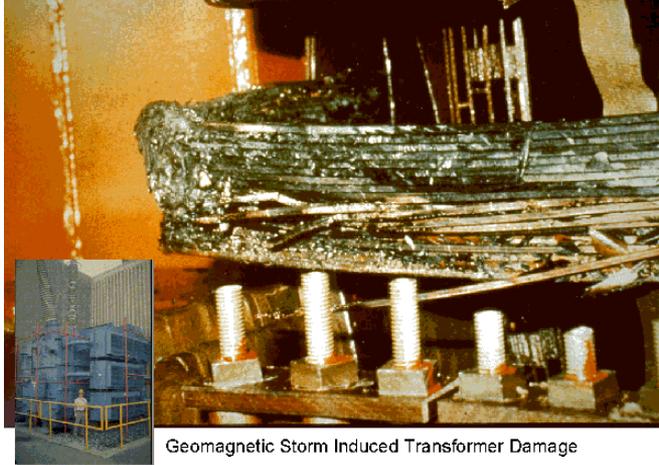
6. Vulnerabilität:

- Erdungssysteme der HV-Transformatoren
- Zustand, Design, Alter der Transformatoren
- Momentane Last auf dem Netz sowie Verfügbarkeit von Blindleistung

2. Historische Ereignisse

1989 Hydro-Quebec Blackout

Source: www.swpc.noaa.gov/Media/graphics/Transformers.gif



Kollaps des Hydro-Quebec Stromnetzes durch überhitzte Transformatoren.
Stromausfall für **6 Millionen Menschen, über 9 Stunden.**

Schaden am Netz:

CAD\$ 6.5m (nominal)

Gesamtverlust für Hydro-Quebec:

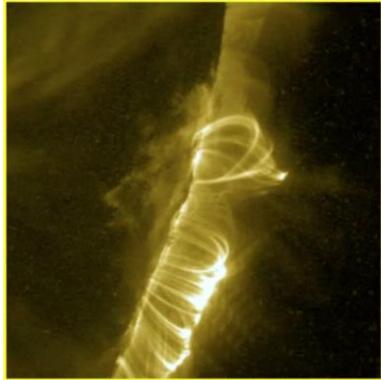
CAD\$ 13.2m (nominal)

Innerhalb weniger Minuten über 200 Stromnetzprobleme in USA.

Zerstörung eines HV-Transformators am Kernkraftwerk Salem, NJ.

2. Historische Ereignisse

2003 Halloween Sturm

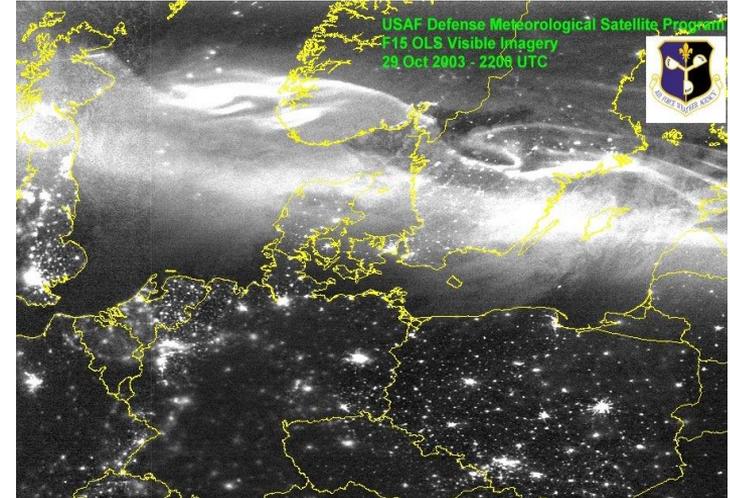


Ursprung des bisher stärksten gemessenen
X-Klasse Solar Flare (X45)
Quelle: NASA, <https://svs.gsfc.nasa.gov/10833>

Schweden:

E.ON-Netzbetreiber am 30. Okt.
um 20:04 Uhr gewarnt

Stromausfall in Malmö um 20:07 Uhr
(50.000 Menschen, Dauer: 50 Min.)

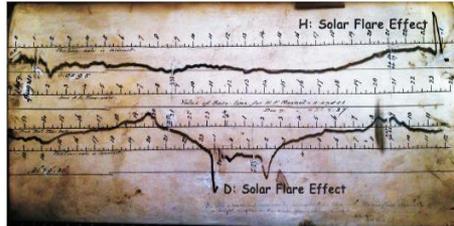


Südafrika:

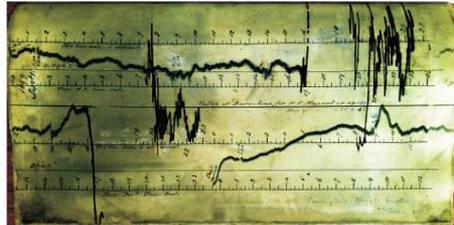
Überhitzung von 14 HV-Transformatoren im südafr. ESCOM Stromnetz.
Teure Reparaturen oder Austausch betroffener Einheiten **innerhalb des folgenden Jahres.**

2. Historische Ereignisse

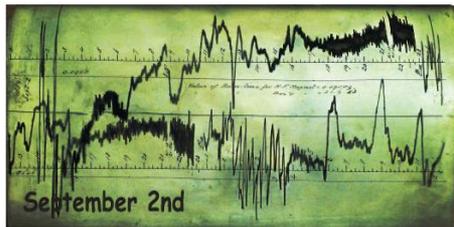
1859 Carrington Ereignis



August 31st



September 1st



September 2nd

Carrington Event magnetometer recordings at Greenwich, UK. Source: British Geological Survey

2 CMEs binnen 4 Tagen (28. Aug. bis 2. Sept.)

- 1. „fegte den Weg frei“
- 2. schlug ein mit **> 2800 km/s** (doppelte so schnell wie typisch-starke CMEs!)
- $-D_{St}$ Schätzungen zw. 850 und 1760 nT (*)
- Hist. Messungen (London, Rom, Mumbai): **off-scale!**
- Polarlichter bis Venezuela!
- Alle Telegrafenleitungen von GIC betroffen.

Schäden?

Praktisch **keine!**

Warum?

Keine HV-Netze damals!

Wiederkehrperiode? **150–500 Jahre** (NASA, NOAA, BGS)

(*) Sehr gut zusammengefasst in: Blake, S. P. et al. (2020), “Magnetic Field Measurements from Rome during the August-September 1859 Storms”, *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, 125, e2019JA027336



2. Historische Ereignisse

2012 Beinahe-Treffer eines "Super Sturms"

Carrington-type CME verfehlt Erde um 9 Tage.

STEREO-A getroffen mit fast 3000 km/s.

(Baker, D. N. (2013) SPACE WEATHER, VOL. 11, 585–591, doi:10.1002/swe.20097)

Wieder haben mehrere kleinere CMEs "den Weg geebnet".

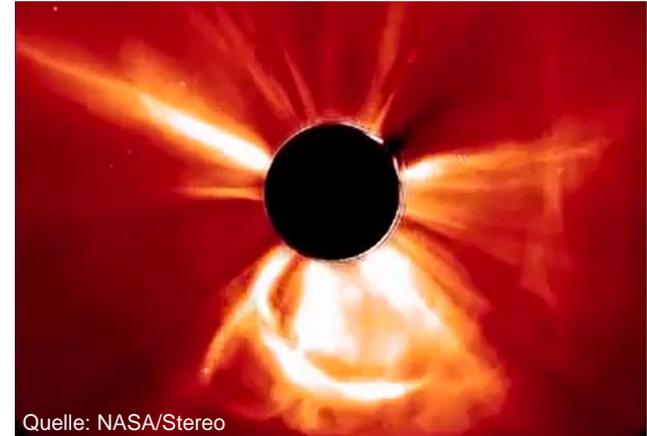
Prof. Daniel Baker (Univ. of Boulder, LASP):

"...July 2012 storm was in all respects at least as strong as the 1859 Carrington event. The only difference: it missed."

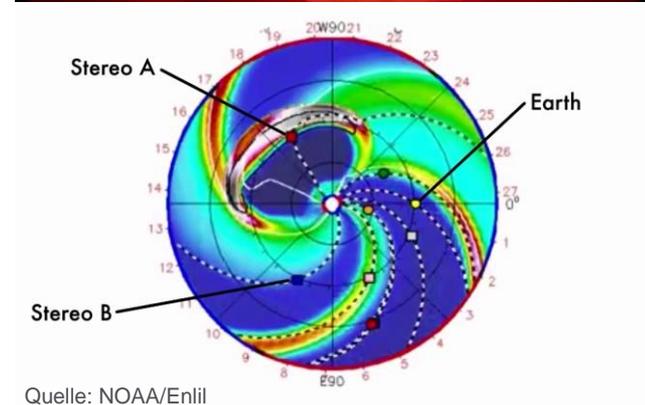
→ Auch schwacher Zyklus kann extreme Stürme erzeugen!

https://www.youtube.com/watch?v=y5_uE1ZVTFg

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/23jul_superstorm/



Quelle: NASA/Stereo



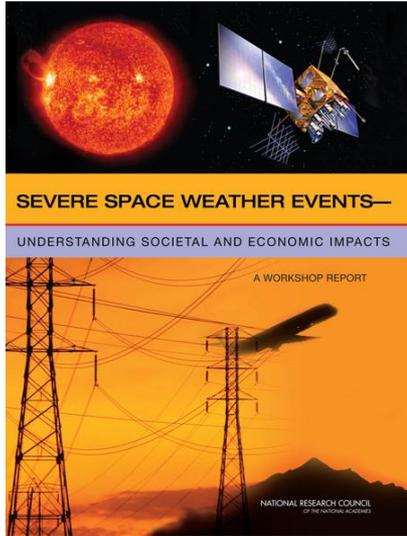
Quelle: NOAA/Enlil

Exposure

3. Extremszenarien

What if...

National Academy of Science Report 2009: (Scenario initially by J. Kappenman, *Storm Analysis Consultants*)



- Ähnliche Stärke wie **Carrington Super-Sturm** von 1859
- > **350** kritische HV-Transformatoren ausgefallen / beschädigt / zerstört
- **130 Mio. Menschen in Nordamerika betroffen von lang anhaltendem Stromausfall (> 1 Jahr)**
- Wirtschaftlicher Schaden > 1 Trillion US\$
- Benötigt > 1 Jahr zur vollkommenen Wiederherstellung der elektr. Infrastruktur



→ Szenario erlangte politische Aufmerksamkeit in USA!

(SHIELD Act 2011, Order 779 2013, Space Weather Action & Strategy Plan 2015, PROSWIFT Act 2020)

3. Extremszenarien

What if...

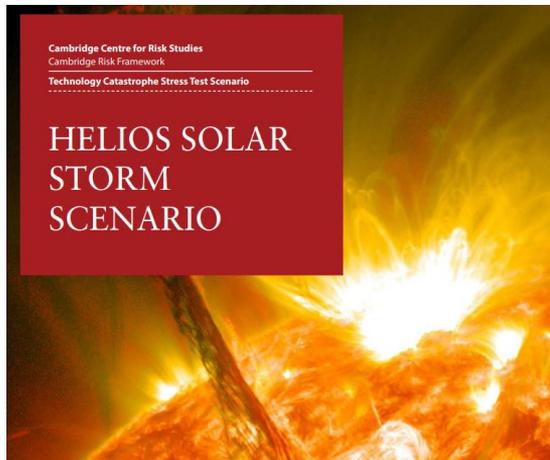
Allerdings:

Kollektiver Ausfall aller Schutzmaßnahmen...

...ist **keine** wahrscheinliche Reaktion auf ein Carrington Ereignis!

Dennoch:

Sozio-ökon. Auswirkungen eines **verkleinerten und somit wahrscheinlicheren** Szenarios sind schwerwiegend genug!



Scenario X1: ~80 kritische HV Transformatoren im US-Netz beschädigt / zerstört; Erholungsdauer: 30 – 365+ Tage

150m Menschen im Nord-Osten der USA unmittelbar betroffen für mind. 1 Woche, ca. 50m für mind. 5 Monate, ca. 10m für etwa 1 Jahr

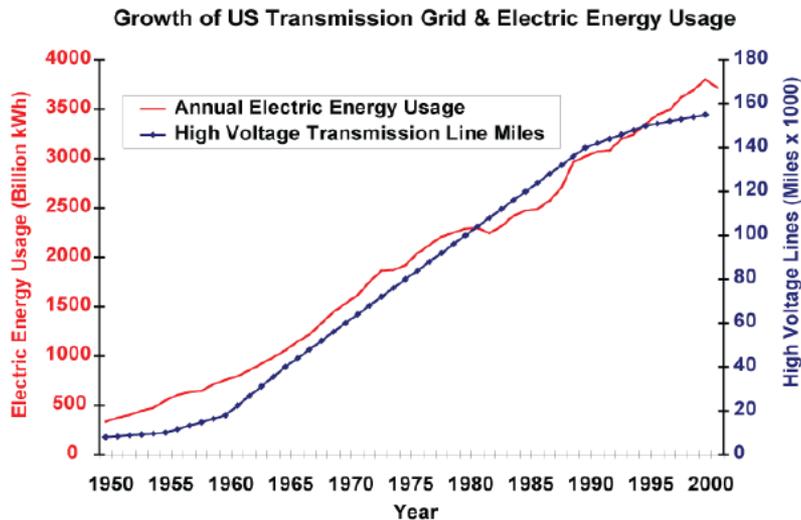
Wirtschaftlicher Gesamtschaden:

US\$ 2.7 Billionen (Engl. trillion) oder 3.9% des globalen GDP (2018)

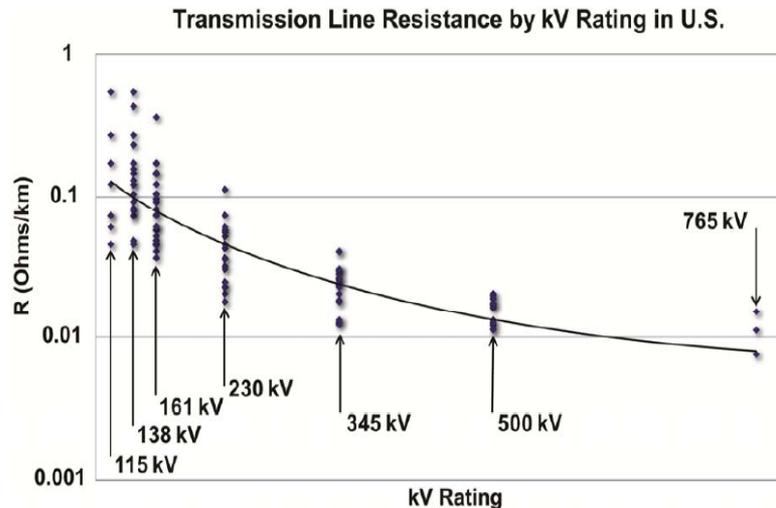
Vulnerability

4. Technologische Anfälligkeit

Leitungslängen und Leitungswiderstand



Blau: Zuwachs an Hochspannungsleitungen (USA)
Rot: Jährlicher Stromverbrauch (USA)



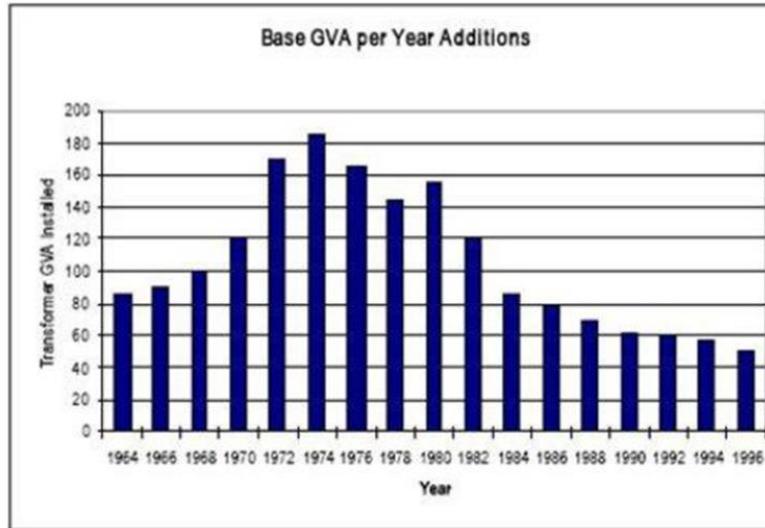
Hochspannung vs. Leitungswiderstand

Zunahme Hochspannungsleitungslänge + Abnahme Leitungswiderstand
→ Erhöhtes Potenzial für GIC!

4. Technologische Anfälligkeit

Alter von HV-Transformatoren

Die meisten Transformatoren im US-Netz in 1970ern gebaut - für Lebensdauern von ~40-50 Jahren.



Quelle: W. Bartley, The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance Co., on behalf of the IMIA Task Group Report "Analysis of Transformer Failures", presented at the International Association of Engineering Insurers 2003.

Content does NOT reflect HSB experience.

Veraltete Infrastruktur → Erhöhte Vulnerabilität!

GIC-beeinträchtigte Transformatoren versagen nicht immer sofort sondern verschleifen.

4. Technologische Anfälligkeit

Schutzmaßnahmen: neues Technolgiesdesign

ABB: (Homepage)

ABB engineering protects power plant from solar storms

2006-10-24. ABB has delivered a giant three-limbed transformer for a nuclear power plant in Sweden that is frequently subject to blackout inducing solar flares. "We wanted a transformer that would be immune to solar storms," says the customer.

By Editorial services

The three-phase 825 MVA, 420/21 kV generator step-up transformer contains one of the largest and heaviest transformer cores that ABB has ever built.

Equipped with three limbs instead of the usual five, the transformer is designed to improve availability and protect the Oskarshamn 2 nuclear power plant in Sweden from solar flares or solar storms, known more properly as geomagnetic induced currents (GIC).

Solar flares unleash magnetic storms that hit the earth's magnetic field and create geomagnetic currents that can enter power lines and the neutral point of transformers. GICs frequently lead to severely damaged transformers and voltage collapses at a cost of millions of dollars per hour in lost revenues and damaged assets.

Strongest GIC ever

The most powerful GIC ever recorded at a power plant struck Oskarshamn in 2000, and in 2003 another one hit a major power lines and transformers in one country and caused a total affecting 20,000 consumers.

To prevent the same thing from happening again, Oskarshamn – which is jointly owned by E.ON and Fortum – asked ABB to design an 825 MVA transformer that "would be immune to solar storms."

Transformers that are 200,000 MVA are usually built with five limbs, but for Oskarshamn 2, ABB took on the significantly more complex task of making one with three limbs. Three-limb transformers are the most effective protection available against GICs. The challenge for ABB lay in the sheer size and rating of the transformer core.

4,000 steel plates

The giant core consists of 44,000 steel plates that stretch electrical engineering to its limits. Each plate is up to one meter wide and a mere 0.27 millimeters thick, which makes them difficult to handle. They are placed one on top of the other in two stacks, a process that requires great skill and precision. The resultant core weighs about 200 tons.

ABB installed and commissioned the transformer in August 2006, ready for the next solar activity to hit the earth. Some regions of the world are more prone to GICs than others. Countries that are particularly vulnerable include Sweden, Finland and Norway, Canada and the United States, China and South Africa.

The most devastating GIC occurred in Canada in 1989. The entire province of Quebec was blacked out for nine hours. More than six million consumers were affected and the cost to utilities was estimated at \$15.4 million.



Siemens: (Broschüre)

Siemens Power Transformers: in operation all over the planet

Power transformers are needed to supply energy to more and more people and growing economies.

Siemens is a worldwide partner for power supply and industrial companies – accordingly, the number of our sites are global. Whether in South America, Asia or Europe, whether in the West or in specially demanding applications 15 meters underground, the thousands of sites can efficiently and reliably with our technology.

When will we have the opportunity to get your project? We are looking for power plant projects in the following regions:

2000 power for China

Whispering in New York City

High domestic performance for Mexico Power

Three generator step-up transformers 825 MVA, 420/21 kV, designed for simultaneous loading of the 10 and tertiary according to ANSIIEEE standard 552 (C1.20) – delivered by our Brazilian factory in Jarandi, São Paulo

Three phase autotransformers 800 MVA, 345/138 kV, designed for simultaneous loading of the 10 and tertiary according to ANSIIEEE standard 552 (C1.20) – delivered by our Brazilian factory in Jarandi, São Paulo

Two three phase autotransformers 800 MVA, 345/138 kV, designed for simultaneous loading of the 10 and tertiary according to ANSIIEEE standard 552 (C1.20) – delivered by our Brazilian factory in Jarandi, São Paulo

A 320 MVA, 220/110 kV three phase network transformer for the 110 kV network, high voltage temperatures in ABB China, 2007 – delivered with a special core design by our Nuremberg factory in Germany

High domestic performance for Mexico Power

Three generator step-up transformers 825 MVA, 420/21 kV, designed for simultaneous loading of the 10 and tertiary according to ANSIIEEE standard 552 (C1.20) – delivered by our Brazilian factory in Jarandi, São Paulo

Two three phase autotransformers 800 MVA, 345/138 kV, designed for simultaneous loading of the 10 and tertiary according to ANSIIEEE standard 552 (C1.20) – delivered by our Brazilian factory in Jarandi, São Paulo

A 320 MVA, 220/110 kV three phase network transformer for the 110 kV network, high voltage temperatures in ABB China, 2007 – delivered with a special core design by our Nuremberg factory in Germany



Factoring solar winds in the Croatian solution for South Africa

Four three-phase 450 MVA/420 kV generator step-up transformers in a special hot-spot design for the geomagnetic induced currents (GIC) – delivered by our Croatian factory in Zagreb

WIE HOCH WAR DIE VERANSCHLAGTE MAXIMALE GIC-STÄRKE?

To prevent the same thing from happening again, Oskarshamn – which is jointly owned by E.ON and Fortum – asked ABB to design an 825 MVA transformer that "would be immune to solar storms."

5. Extremszenarien II

Wie stark können Sonnenstürme werden?

Extrapolation in extreme Größenordnungen, die noch nicht gemessen wurden aber realistisch sind. („**Rote Linie zw. Science und Fiction**“)

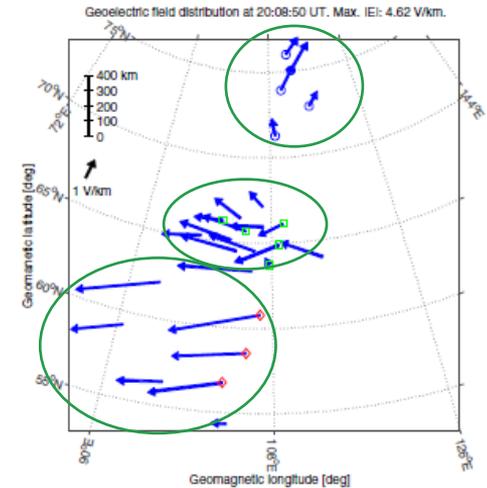
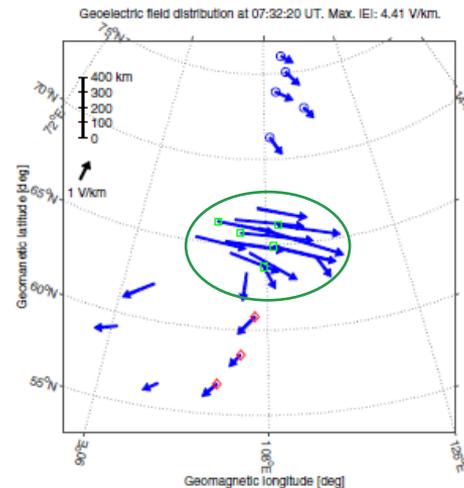
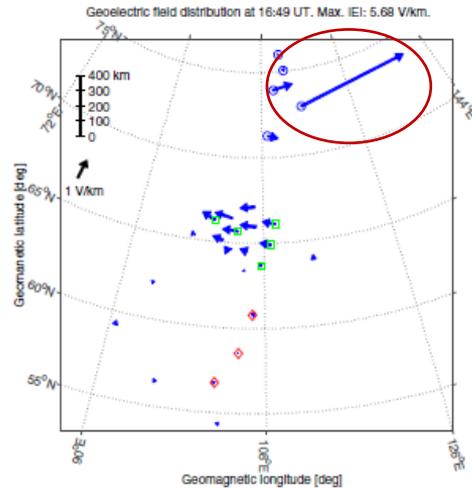
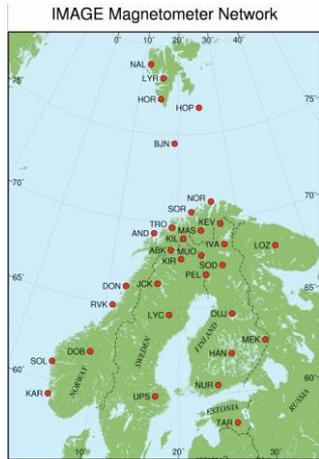
Typische Intensitäten und Dauern von GIC-treibenden Parametern, wie sie alle 100, 200, 500 oder 1000 Jahre vorkommen.

Nach Festlegung eines z.B. “100-jährlichen Sturms“ muss anfällige Technologie getestet und ggf. gehärtet werden (hinsichtl. *Resistenz* und *Resilienz*).

5. Extremszenarien II

Räuml. und zeitl. Variationen geomagnetischer Stürme

Geoelektr. Felder: **lokale Extreme** vs. **regionale Extreme**

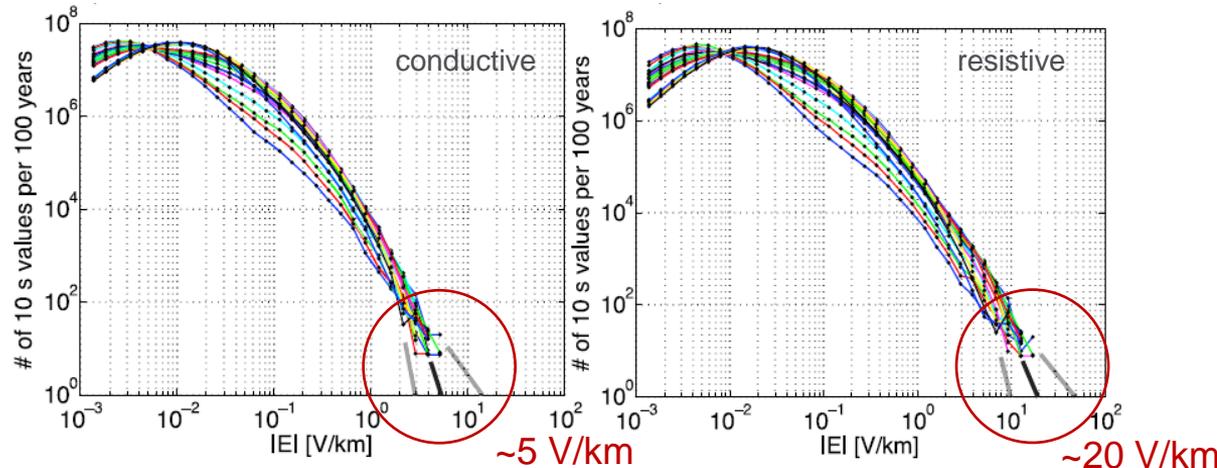


Regionale Extreme korrelieren besser mit typischer Netz-Topologie (~100-500 km)

5. Extremszenarien II

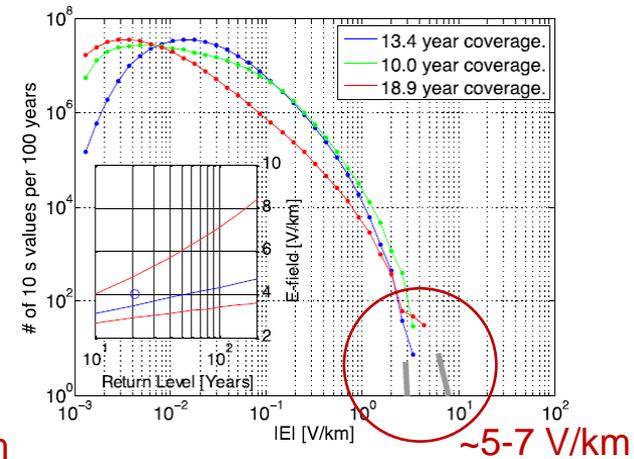
Extrapolation auf 100-jährliche E-Feldstärken

Lokale E-Feld Peaks (abh. von Geologie)



Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan and A. W. P. Thomson (2012), *Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios*, Space Weather, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750

Regionale Extreme (Gruppenmittelwerte)



Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, A. Viljanen and C. Ngwira, *Earth, Planets and Space* (2015), DOI 10.1186/s40623-015-0255-6



Sind „einmal-in-100-Jahren“-Werte überhaupt extreme genug?

5. Extremszenarien II

Transformatorreaktionen auf GIC

1. Intensive, kurzzeitige Störung

→ Sofortiger Kaskadenausfall (Quebec, 1989)

2. Anhaltend hoher GIC: Transformatorüberhitzung

→ Ausfall innerhalb weniger Tage (Salem, 1989)

3. Lokale Erwärmungen durch moderate GIC: anhaltender Verschleiß, auch nach GIC!

→ Transformator fällt binnen Wochen / Monaten aus (Südafrika, 2003)

(Low Energy Degradation Triangle entwickelt von Prof. Trevor Gaunt, Univ. of Cape Town)

Verschiedene Arten von Schäden...

→ „Ist ein einheitlicher E-Feld-Benchmark-Ansatz zu sehr vereinfacht?“

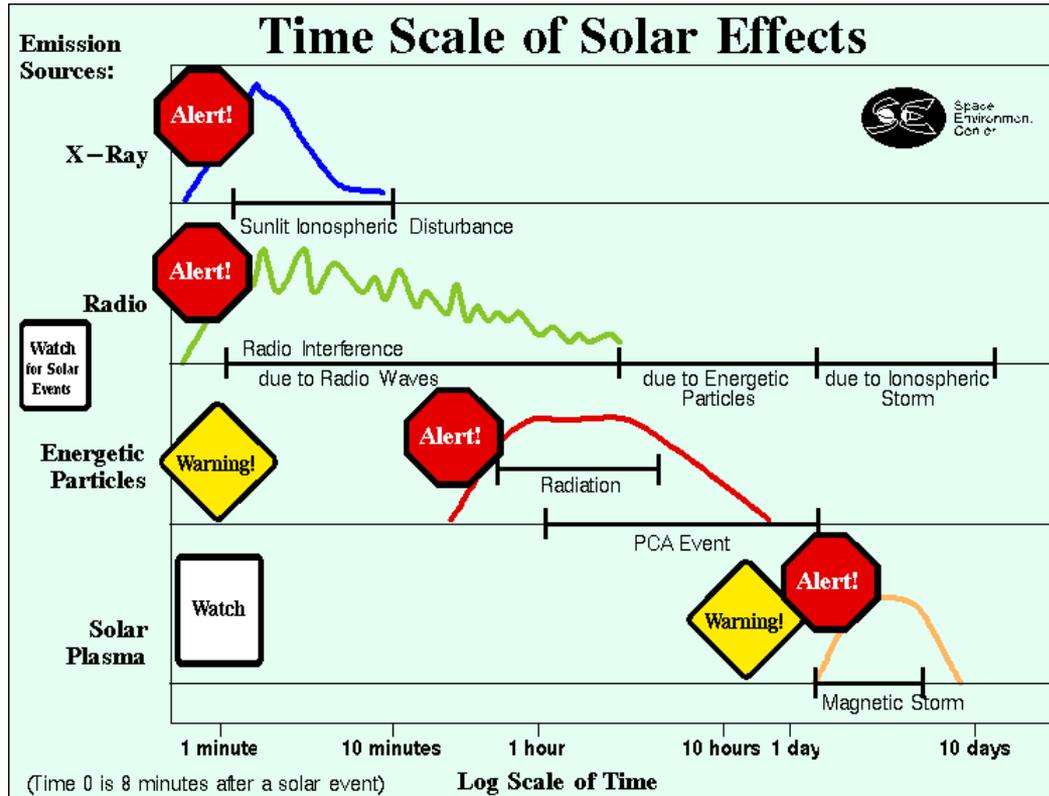
(Prof. Trevor Gaunt, Univ. of Cape Town)

Ende

Backup Slides

1. Physikalische Effekte & Auswirkungen

Zeitskalen solarer Effekte: Limitierungen von Frühwarnzeiten



Source: NOAA, <http://www.swpc.noaa.gov/Media/graphics/TimeScale.gif>

3. Technologische Anfälligkeit

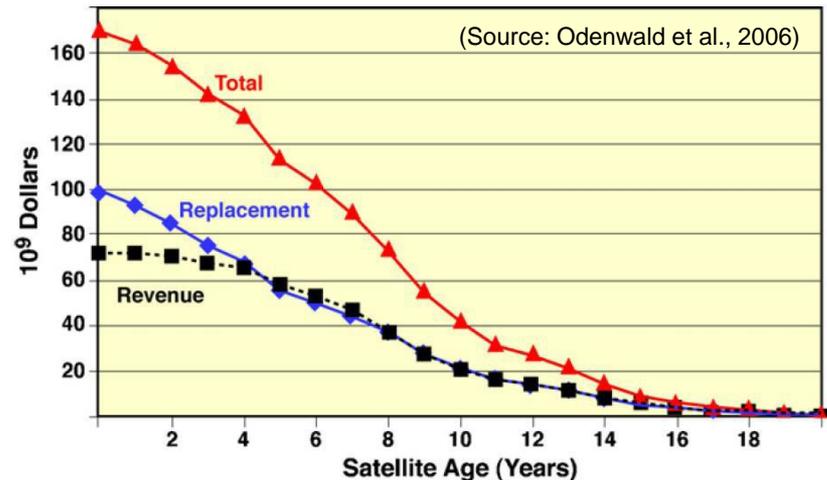
Satelliten

Gefahren für Satelliten durch Sonnenstürme

- Mechanismus:**
- Hochenergetische Protonen / Ionen durchdringen die Abschirmung von Satelliten, Ladungen können den Zustand einer Speicherzelle ändern
 - *Deep dielectric charging* durch energetisches Plasma, elektromagnetischer Puls (hochenergetische Elektronen)
 - Erwärmung der Thermosphäre → höherer Luftwiderstand auf LEO-Satelliten, Abnahme der Bahnhöhe
 - Degradation von Solarmodulen

Geschätzte potenzielle Verluste: (Szenario)

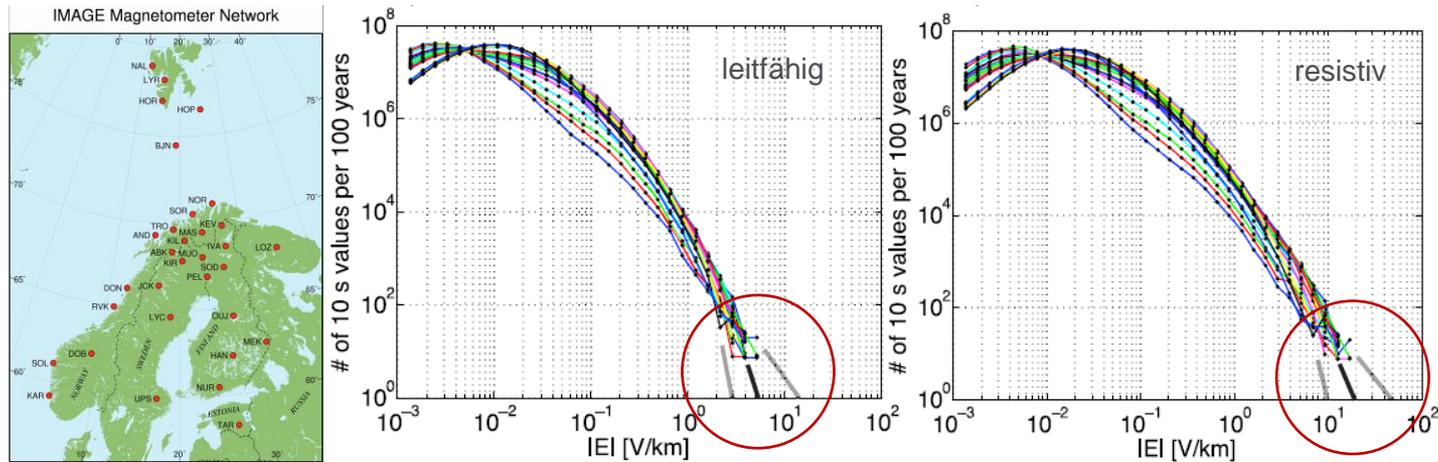
- 90 Satelliten stark betroffen bzgl. Verschlechterung der Solarmodule und Leistungsabfall unter 30%.
- Kosten für Ersatz: 24 Mrd. US-Dollar
 - Kosten für entgangene Einnahmen 30 Mrd. US-Dollar
- Möglicher Gesamtverlust von etwa 60 Mrd. US-Dollar.



5. Extremszenarien II

Erstellen eines 100-jährlichen GIC-Szenarios (I)

10 Sek. Erdmagnetfeldfluktuationen (gemessen an 23 IMAGE-Stationen zwischen 1993 – 2006)
Anwendung von zwei 1D-Erdleitfähigkeitsmodellen: leitfähig ("British Columbia") und resistiv ("Quebec")



Extrapolation auf 100-jährliche Stärken: ~5 V/km (leitfähig) und ~20 V/km (resistiv)

Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan and A. W. P. Thomson (2012), *Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios*, Space Weather, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750

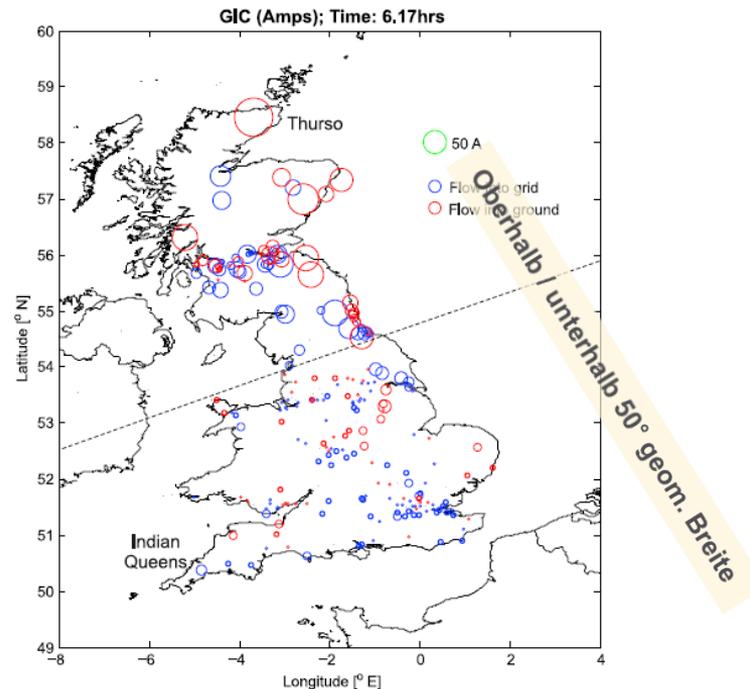
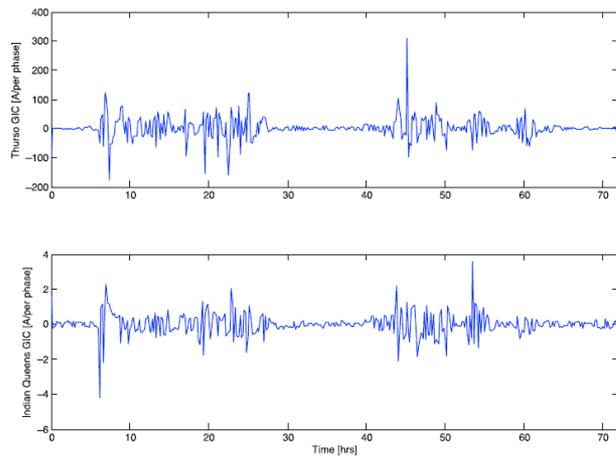
5. Extremszenarien II

Erstellen eines 100-jährlichen GIC-Szenarios (III)

Umrechnung der 100-jährl. E-Feld-Extrapolation (mittels Bodenleitfähigkeit und geomag. Breitengrad) in GIC:

$$\mathbf{GIC} = \mathbf{a} \mathbf{E}_x + \mathbf{b} \mathbf{E}_y$$

(**a** und **b** abhängig von der Netz-Topologie und elektr. Eigenschaften des Leitersystems)



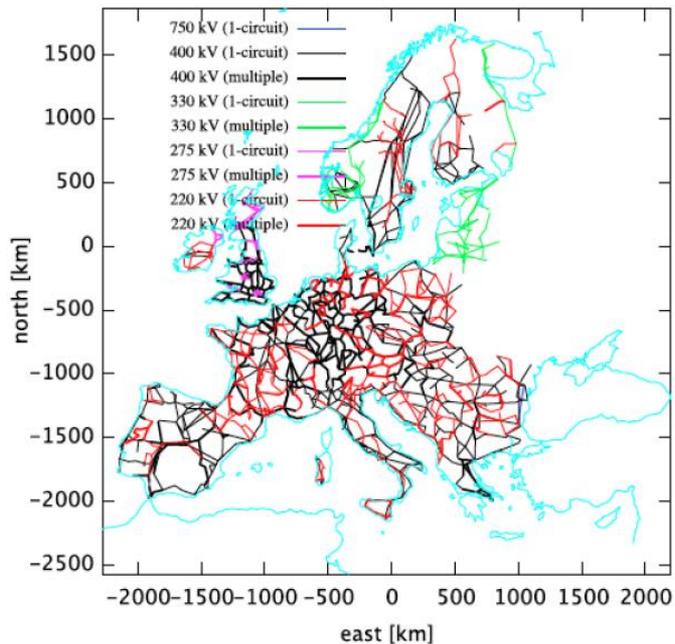
Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan and A. W. P. Thomson (2012), *Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios*, Space Weather, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750

5. Extremszenarien II

EURISGIC Project (FP7)

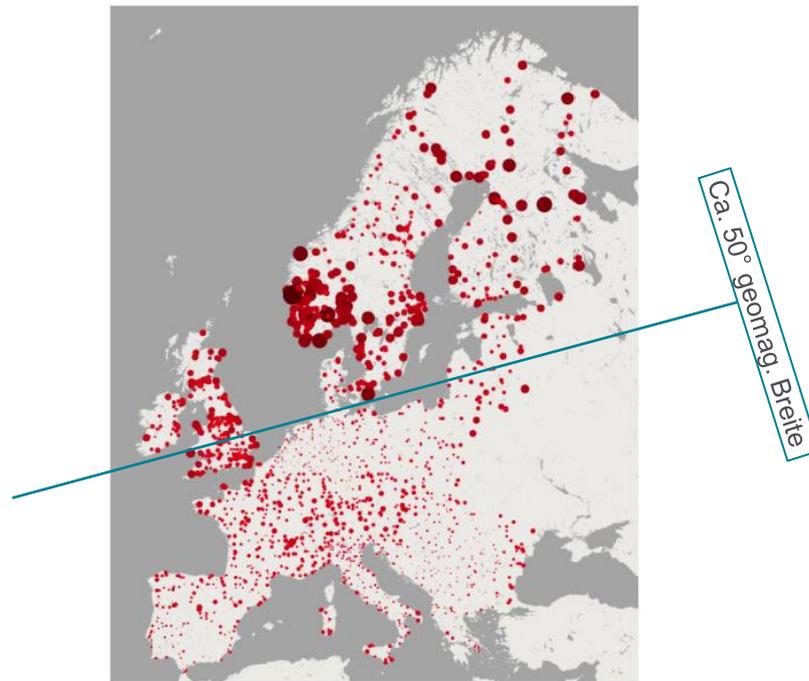
Europäisches Prototype HV Power Network Model:

1765 nodes, 2404 lines



Norwegen: 400 A, UK: 100 A, Zentral-EU: 50 A

Stärkster GIC in Europa zw. 1996-2008:



...alle während Halloween Sturm 2003

4. Technologische Anfälligkeit

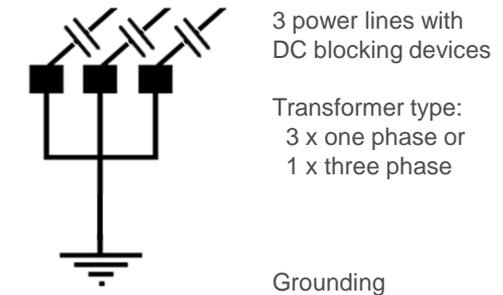
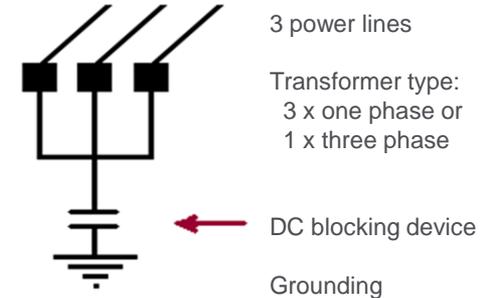
Schutzmaßnahmen vor GIC

Ingenieurlösungen – Steigerung der elektr. Robustheit

- A) DC-Blocker (Kondensatoren) stoppen GIC-Fluss
- B) Verhindern von Transformatorsättigung und Harmonics
- C) Digitale Relais reagieren stufenlos auf GIC

Verbesserte Betriebsprozesse und Gegenmaßnahmen

- D) Trennen der Netze während Sonnenstürmen (unwahrscheinlich...)
- E) Änderungen der Betriebs-/Wartungsprozesse zur Sicherstellung von ausreichender Puffer-Kapazität
- F) Verbesserte Weltraumwettervorhersage und Modellierung von GIC-Auswirkungen auf einzelne Netzabschnitte



6. Initiativen & Strategien

Aufklärungsarbeit, Initiativen und Aktionen (I)

Wissenschaft:	Nordamerika:	NOAA, NASA, USGS, LWS Institute (GIC WG)
	Europa:	ESA, British Geological Survey, Finnish Meteorological Institute, EURISGIC Project (ended 2014), SWIGS Project (started 2017)
E-Industrie:	Nordamerika:	Gutes Bewusstsein, organisiert durch NERC's <i>Geomagnetic Disturbance Task Force</i> (GMD-TF)
	Europa:	...Nur wenige TSOs sind sich potenzieller Bedrohungen durch GIC bewusst (hauptsächlich in Skandinavien und UK)
Regulatorische Seite:	Nordamerika:	<i>Industry Advisory</i> ausgestellt von NERC (2011), <i>Order 779</i> (2013), FERC beauftragt NERC mit der Entwicklung neuer Standards und Spezifikationen (2013). SWORM Unterausschuss (2016) koordiniert Regierungsämter, um Ziele und Vorgaben des <i>National Space Weather Strategy and Action Plan</i> (2019) zu erreichen; PROSWIFT Act 2020
	UK:	Sonnensturm-Risiken im <i>National Risk Register</i> (2012 & 2015)
	Europa:	<i>Space Weather Awareness Dialogue</i> , EC, Brussels (2011) <i>Space Weather and Power Grids Workshop</i> , JRC, Ispra (2013)

6. Initiativen & Strategien

Aufklärungsarbeit, Initiativen und Aktionen(II)

Versicherung:

Geneva Association's Working Group on Solar Storms

gegründet 2012 von GA-Mitgliedern: Allianz, Swiss Re, Lloyd's, Munich Re



Erste Erfolge:

- M.O.R.E. Seminar *Ground Effects of Solar Storms* (Berlin, 2013)
- Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses und einer gemeinsamen Meinung zu Risiken durch Sonnenstürme und starke GMD-Ereignisse.

2016: Mitglieder von **GA's Solar Storm Task Team** waren:
AIG, Axa, Lloyds, Munich Re, Scor, Swiss Re, XL Catlin

Ziele:

- Besseres Risiko-Bewusstsein auf Ebene der Regulierungsbehörden, Netzbetreiber, Industrie, Versicherer etc.
- Überwachung und Unterstützung der Entwicklung von Maßnahmen und Aktionen im Bereich der GMD-Risikominderung

6. Initiativen & Strategien

SWIGS – Space Weather Impact on Ground Systems (2017 – 2021)

SWIGS

- 4-jähriges Konsortium von 10 wiss. Instituten
- Geleitet vom **British Geological Survey (BGS)**
- Bringt Weltraumphysiker, Geophysiker und Atmosphärenwissenschaftler mit den relevanten Industrien zusammen

“Together with project partners in the US, Canada, Europe, New Zealand and China, as well as industry stakeholders, we will develop our understanding of how space weather and geomagnetic activity drives electric fields in the Earth and quantify the impacts of this on power grids, as well as pipeline and rail networks.” [BGS homepage]

