Geomagnetische Stürme – wo lauern Gefahren?

In Eisbohrkernen des GRIP (Greenland Icecore Project) sind geomagnetische Monsterstürme nachweisbar, die unsere hochtechnologische Zivilisation stark in Mitleidenschaft ziehen würden. Was ist die Physik hinter diesem Phänomen und welche Systeme sind gefährdet?

Am 21. Dezember 1806 wunderte sich Alexander von Humboldt in Berlin, dass die Nadel seines Kompasses mit unregelmässigen Schwankungen von der üblichen Nordrichtung abwich und in der darauffolgenden Nacht sah er Polarlichter **(Abb. 1)**. Der mächtigste gut dokumentierte geomagnetische Sturm in neuerer Zeit ereignete sich am 1. und 2. September 1859 mit Polarlichtern in Rom, Havanna und Hawaii.

Dieses sog. Carrington-Ereignis bewirkte in Nordamerika und Nordeuropa Starkströme in Telegrafenleitungen und Funken setzten sogar Telegrafenstationen in Brand. Das weltweit installierte Telegrafie-Netz wurde massiv beeinträchtigt. Dieses Ereignis wurde bereits drei Tage vorher durch starke Sonneneruptionen angekündigt, die durch den englischen Astronomen Richard Carrington beobachtet wurden.

Sonnenflecken beeinflussen die Magnetnadel

Der Zürcher Rudolf Wolf (1816-1893) wurde 1855 zum Professor für Astronomie an die Universität Zürich und die neu gegründete ETH ernannt. Er trat der NGZH bei und übernahm die Redaktion der Vierteljahrsschrift ab der Nummer 1 im Jahre 1856 und behielt sie bis zu seinem Tod. Seine Sonnenflecken-Relativzahl wurde in der Folge weltbekannt **(Friedli & Keller 1993)**.

Er erforschte bereits vor seiner Rückkehr nach Zürich seit rund einem Jahrzehnt den Sonnenflecken-Zyklus als Astronomieprofessor an der Universität Bern und machte dabei eine bedeutsame Entdeckung, die er der Naturforschenden Gesellschaft in Bern mitteilte **(Wolf 1852)**.

Der Münchner Astronom Johannes von Lamont beobachtete 15 Jahre lang die Schwankungen der Magnetnadel und fand eine Periode von rund 10,5 Jahren. Wolf fiel die Ähnlichkeit mit der Sonnenfleckenperiode von etwa 11 Jahren auf und als er erkannte, dass auch die Maxima und Minima von Magnetnadelvariationen und Sonnenflecken zeitlich übereinstimmten, war er überzeugt, einen wichtigen Zusammenhang gefunden zu haben: Sonnenflecken beeinflussen das Magnetfeld der Erde!

Heute wissen wir, dass die Sonne etwas stärker strahlt, wenn sie viele Flecken aufweist, weil deren Ränder enorm aktive und heisse Zonen sind, die riesige Plasmawolken in den Weltraum hinaus schleudern können.

Wie eine Plasmawolke das Erdmagnetfeld schwächt

Durch grosse Sonnen-Eruptionen werden geladene Elementarteilchen (mehrheitlich Protonen) auf so hohe Geschwindigkeiten beschleunigt, dass sie das starke Gravitationsfeld der Sonne verlassen können. Sie bewegen sich dann mit zwei- bis dreitausend Kilometern pro Sekunde geradlinig durchs Weltall. Ist ihre Bahn auf die Erde gerichtet, brauchen sie einen halben bis einen Tag, um die Magnetosphäre der Erde zu erreichen, die als Schutzschild gegen die kosmische Strahlung wirkt.

Ein Bruchteil der Teilchen können jedoch hoch über der Atmosphäre in diesen Schutzschild eindringen und bewegen sich schraubenförmig um die magnetischen Feldlinien herum den polnahen Regionen zu. Dieser rotierende Ladungsstrom erzeugt seinerseits ein sekundäres Magnetfeld, das prinzipiell so gerichtet ist, dass das primäre Erdmagnetfeld abgeschwächt wird (sog. Lenzsche Regel). Mit der Erde kollidierende Plasmawolken bewirken deshalb insgesamt eine Abschwächung des Betrages des Erdmagnetfeldes.

Da sich der Feldvektor bei diesem Prozess um verschiedene Achsen drehen kann, werden nicht notwendigerweise alle seine Komponenten kleiner. Werden die horizontalen Komponenten ungleich beeinflusst, dreht sich die Kompassnadel. Weil die meisten Feldlinien des Erdmagnetfeldes von nördlichen Regionen ausgehen (Quellen) und in südlichen Regionen im Erdboden verschwinden (Senken),

Abb. 1: Polarlichter entstehen, wenn elektrisch geladene Teilchen des Sonnenwinds (hauptsächlich Protonen) auf Sauerstoff- und Stickstoffatome in den oberen Schichten der Erdatmosphäre treffen und diese anregen oder ionisieren. Bei der nach kurzer Zeit wieder erfolgenden Rekombination bzw. dem Rückfall in den Grundzustand wird Licht ausgesandt. Die obige Aufnahme wurde in Kilpisjärvi (Finnland) gemacht. (Bild: Sami Matias / unsplash)

sind die polnahen Regionen der Erde von den stärksten Protonenströmen betroffen, weshalb auch dort die meisten Polarlichter beobachtet werden (Polarlichter entstehen durch Zusammenstösse von Protonen mit Luftmolekülen). In Nordamerika und Europa sind dies Alaska, Kanada, Norwegen, Schweden und Finnland.

Schwankungen des Erdmagnetfeldes induzieren Spannungen

Michael Faraday formulierte 1831 das Induktionsgesetz, wonach die zeitliche Veränderung eines senkrecht zu einer Drahtschlaufe gerichteten Magnetfeldes eine Induktionsspannung erzeugt, die gleich der durch die Schlaufe umschlossenen Fläche multipliziert mit der Änderung des Magnetfeldes pro Sekunde ist.

Wenden wir dieses Gesetz für eine grobe Abschätzung an auf eine idealisierte und stark vereinfachte Situation: Ein einzelner 100 km langer Draht, der 100 m über dem Boden von Westen nach Osten verläuft, sei auf der einen Seite mit der Sekundärspule des Hochspannungstransformators eines Kraftwerks verbunden. Das andere Ende dieser Spule sei mit dem Erdboden verbunden, den wir als Nullleiter betrachten. Auf der anderen Seite sei der Draht ebenfalls durch einen Transformator mit dem Grundpotenzial verbunden, der die Hochspannung auf eine für die Verbraucher nutzbare Spannung reduziert.

Bezogen auf das Induktionsgesetz liegt also eine durch einen Leiter umspannte vertikale Fläche von $100\,000 \times 100\,\mathrm{m}^2$ vor und die Veränderung der horizontalen, vom Nordpol herkommenden X-Komponente des Erdmagnetfeldes induziert eine

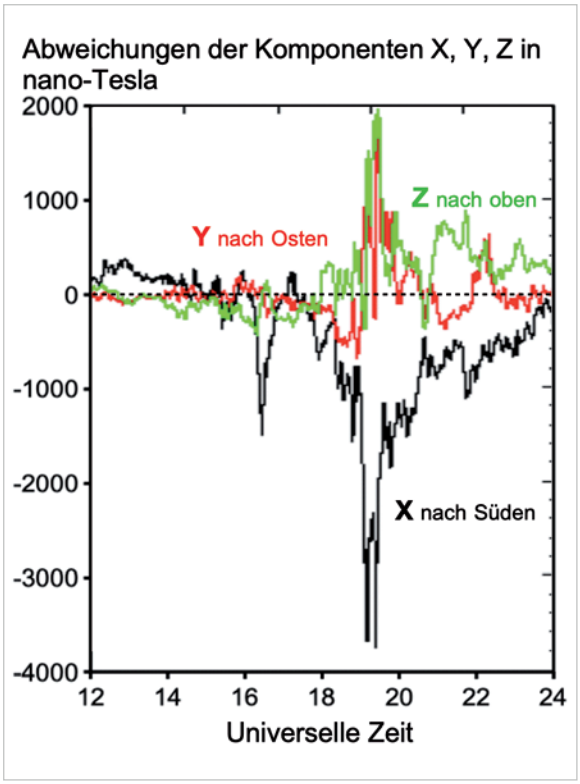

Abb. 2: Gemessene Abweichungen der drei Komponenten des Erdmagnetfeldes von ihren Mittelwerten in Kiruna (Schweden) während der «Halloween-Stürme» von 2003. Die X-Komponente des Feldvektors (Schwarz) zeigt gegen Süden und hat einen mittleren Wert von 10685 nT (Nano-Tesla). Die beiden anderen Komponenten Y (Rot) und Z (Grün) zeigen nach Osten und nach oben (beim magnetischen Nordpol zeigen die Feldvektoren senkrecht nach oben). Zwischen 6 und 12 Uhr herrscht Ruhe und alle drei Komponenten liegen nahe bei ihren Mittelwerten. Da in der Grafik nur die Abweichungen von diesen Mittelwerten aufgetragen sind, liegen dort alle Kurven nahe bei 0. Ausschläge von über 600 nT gelten als starke geomagnetische Stürme. (Bild: Auszug aus https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kiruna-magnetometer.html, Texte ergänzt durch Autor).

Spannung in dieser Leiterschlaufe (gebildet durch Draht, Transformatoren und Erdboden). Entsprechend dem Widerstand der gesamten Schlaufe fliesst dann als Folge dieser Spannung ein Strom.

Wir nehmen als Beispiel die «Halloween-Stürme» vom 30. Oktober 2003. In der Station Kiruna des Schwedischen Instituts für Weltraumphysik werden die drei Komponenten des Erdmagnetfeldes im Minutentakt gemessen. **Abb. 2** zeigt die Ausschläge der Magnetfeld-Komponenten, die durch die zweite, grössere Wolke vom Abend verursacht wurden. Die nach Süden gerichtete X-Komponente verkleinerte sich bis zu 4000 nT (Nano-Tesla), was rund 40 % ihres Mittelwertes von 10685 nT entspricht. Da nur ein Messwert pro Minute vorliegt, sehen wir nicht, wie schnell sich X verändert. Aufgrund von Beobachtungen der Nordlichter wissen wir jedoch, dass sich diese im Sekundentakt bewegen und wir können deshalb annehmen, dass auch X in diesem Frequenzbereich variiert.

Als theoretisches Beispiel nehmen wir eine sinusförmige Variation von X mit einer Amplitude von 2000 nT und einer Frequenz von 1 Hertz und erhalten eine maximale Änderungsgeschwindigkeit von X von rund 12000 nT pro Sekunde. Multipliziert mit der obigen Fläche von 10^7 m^2 erhalten wir eine Induktionsspannung von 120 Volt. Da Leistungstransformatoren für derart kleine Frequenzen sehr kleine Impedanzen (Wechselstromwiderstände) haben, ergeben sich grosse Ströme um 100 Ampère, die auch gemessen werden konnten **(Bolduc 2002)**.

Wie können Kraftwerks-Transformatoren durch Sonnenstürme verbrennen?

Bei einem wesentlich schwächeren Ereignis als das Carrington wurden am 13. März 1989 Transformatoren der Hydro-Québec verbrannt, was Blackouts bis zu 9 Stunden für 6 Millionen Menschen zur Folge hatte **(Bolduc 2002)**. Die noch schwächeren «Halloween-Stürme» von 2003 sorgten für Blackouts in Teilen Europas für mehrere Stunden und in Südafrika wurden Transformatoren irreversibel beschädigt mit enormen sozialen Folgekosten **(Paleari et al. 2022)**. Da es fast absurd erscheint, dass die stärksten Transformatoren durch Schwankungen des Erdmagnetfeldes durchbrennen sollten, versuche ich, den verursachenden Prozess mit Hilfe eines kleinen handelsüblichen Netztransformators verständlich zu machen.

Die wichtigsten Komponenten eines Transformators sind in **Abb. 3** dargestellt. Ohne den Eisenkern würde der Transformator fast keine Leistung übertragen, da nur ein kleiner Teil des in der Primärspule erzeugten Magnetfeldes ins Innere der Sekundärspulen gelangen würde. Der Kern ist sehr wichtig, indem er das Magnetfeld bündelt und praktisch vollständig ins Innere der Sekundärspulen leitet. Dies geschieht dadurch, dass die sog. Weiss'schen Bezirke mit zunehmender Feldstärke der Primärspule in die Richtung der Spulenachse

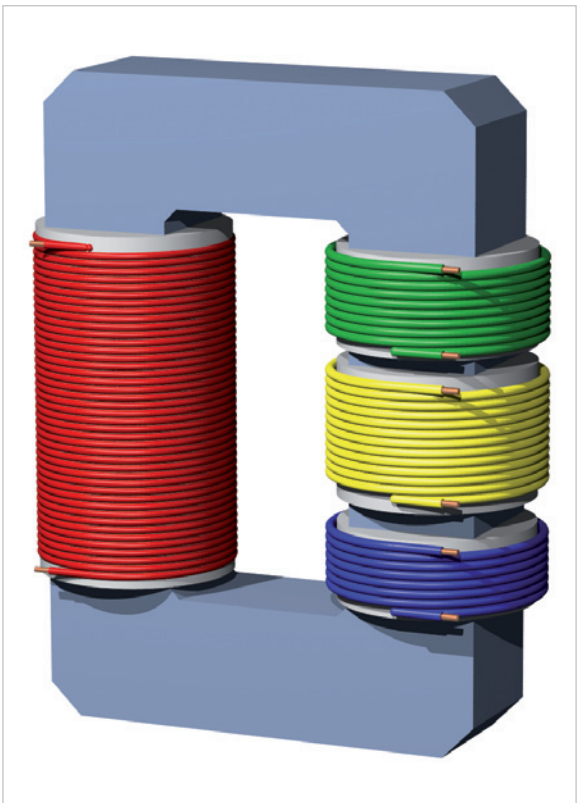

Abb. 3: Typischer Netztransformator mit einer Primärspule (Rot) mit grosser Windungszahl N, die ans 230 Volt Netz angeschlossen wird. Die drei Sekundärspulen haben Windungszahlen n_1 (Grün), n_2 (Gelb) und n_3 (Blau) für drei verschiedene niedrigere Spannungen V = 230 n/N, wobei n = n1, n2, n3. Der Eisenkern (Grau) besteht aus dünnen gegeneinander isolierten Platten, um induzierte Wirbelströme zu unterdrücken, die einen Teil der zu übertragenden Leistung in unerwünschte Wärme umwandeln würden. Der Wechselstrom in der roten Primärspule erzeugt im Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld, das in den Sekundärspulen die entsprechenden Spannungen induziert. Weitere Erklärungen im Text. (Bild: Svjo, wikimedia, CC BY-SA 3.0)

umklappen. Dadurch wird der Kern immer stärker magnetisiert und das Magnetfeld ändert sich im Innern der Sekundärspulen gleich wie im Innern der Primärspule im Takt des Wechselstroms von 50 Hertz.

Nach dem Induktionsgesetz wird dadurch eine Spannung in den Sekundärspulen induziert, die proportional zur Windungszahl und zur Änderung des Magnetfeldes pro Sekunde ist. Diese Überlegungen betreffen den linearen Arbeitsbereich eines Transformators und sind Gegenstand jedes Grundlagenkurses für Elektrotechnik. Ich möchte nun zeigen, wie durch nichtlineare Effekte ein Transformator schlagartig überlastet werden kann.

Sobald das Magnetfeld in der Primärspule so stark wird, dass alle Weiss'schen Bezirke, die als kleine Magnetchen aufgefasst werden können, parallel zueinander ausgerichtet sind, kann eine weitere Vergrösserung des Magnetfeldes in der Primärspule nicht mehr weitergeleitet werden. Der Eisenkern ist «gesättigt» und das Magnetfeld tritt aus dem Kern aus und verteilt sich im Raum, so dass die vorher stark gekoppelten Spulen nun als separate, fast ungekoppelte Spulen zu betrachten sind.

Es kommt noch schlimmer: Hat die Primärspannung ihr Maximum noch nicht erreicht, steigt sie weiter an und die Primärspule reagiert, wie wenn sie ohne Eisenkern wäre, gemäss dem Induktionsgesetz mit einer Zunahme des sogenannten «Blindstroms». Das entsprechende Induktionsgesetz lautet: Die Spannung U an der Spule ist gleich dem Selbstinduktionskoeffizient L mal der Änderung des Stromes J pro Zeit t (mathematisch: $U = L \times dJ/dt$).

Im linearen Arbeitsbereich ist L eine Konstante. Sobald Sättigung eintritt, wird L bis zu tausendmal kleiner und der Strom ändert sich entsprechend schneller. Dadurch entstehen riesige Blindströme, die einen Transformator verbrennen können, vor allem, wenn er ohne sie bereits stark belastet ist.

Ein Laborexperiment zeigt den Sättigungseffekt

Ich möchte den Sättigungseffekt illustrieren mit einem kleinen 50 Watt Transformator, der die 230 Volt Netzspannung in 12 Volt bei maximal 4 Ampère umwandelt. Er wurde verwendet, um Halogen-Spotlampen zu betreiben. Um den geomagnetischen Sturm zu simulieren, speise ich auf der Sekundärseite mit Hilfe eines 12 Volt Ladegerätes für eine Autobatterie über einen regulierbaren Widerstand Gleichstrom ein, analog wie der magnetische Sturm einen gegenüber der Netzfrequenz langsam veränderlichen Strom in die Sekundärseite eines Kraftwerktransformators einspeist.

Mit dem Schieber lässt sich der Wert des Widerstandes zwischen 3 und 24 Ohm variieren und so ein Gleichstrom zwischen 4 und 0,5 Ampère einstellen. Mit dem Spannungsabfall über einen kleinen Widerstand von 0,33 Ohm im Primärkreis konnte ich mit Hilfe eines Oszilloskops den Strom im Primärkreis sichtbar machen.

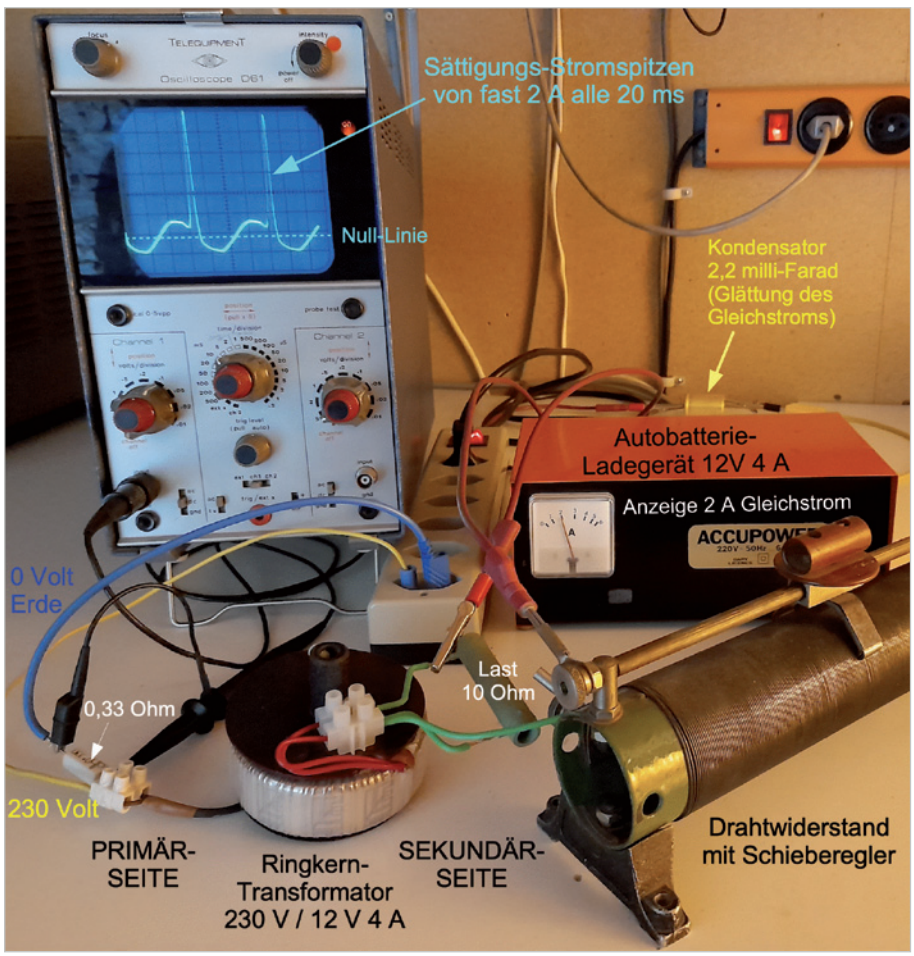

Abb. 4: Laborexperiment mit Gleichstrom-Einspeisung auf der Sekundärseite eines Ringkern-Transformators zeigt riesige Sättigungs-Stromspitzen auf der Primärseite, die den maximalen Auslegungsstrom vielfach übersteigen. Sehr grosse Hochleistungs-Hochspannungs-Transformatoren beanspruchen die Materialien bereits im Normalbetrieb derart stark, dass eine wiederholte mehrfache Überschreitung schnell zu Schäden führt. (Bild: Fritz Gassmann)

Abb. 4 zeigt den Aufbau des Experiments. Da Gleichströme durch Transformatoren nicht übertragen werden, könnte sich mancher Leser wundern, weshalb auf der Primärseite durch einen Gleichstrom auf der Sekundärseite überhaupt etwas passieren sollte. Der Gleichstrom erzeugt im Kern ein permanentes Magnetfeld in eine bestimmte Richtung und erzeugt so eine Asymmetrie. Falls die Primärspule dieses Magnetfeld verstärkt, was in jeder Wechselstromperiode einmal vorkommt, kann das Magnetfeld so stark werden, dass der Kern gesättigt wird und der Selbstinduktionskoeffizient kurzzeitig zusammenbricht, was auf der Primärseite zu einem grossen Stromstoss führt. **Abb. 4** zeigt diese Stromstösse auf dem Oszilloskop, die bei nur 2 Ampère Gleichstrom auf der Sekundärseite zu Spitzen von bereits 2 Ampère in der Primärspule führen (bei 4 Ampère im Sekundärkreis sind es Spitzen von 3 Ampère im Primärkreis). Da die Primärspule aus wesentlich dünnerem Draht besteht als die Sekundärspule und viel mehr Windungen aufweist als diese, hat sie einen beachtlichen Widerstand von 46 Ohm. Im Mittel werden durch Spitzen von 3 Ampère gegen 20 Watt in Wärme umgewandelt, was beim Volllastbetrieb bereits zuviel sein kann. Kurzzeitig bewirken die Stromspitzen sogar Momentanleistungen von $3^2 \times 46 \approx 400$ Watt.

Berücksichtigt man, dass gemäss Auslegung des Transformators die maximalen Ströme nur 0,3 Ampère sein dürften und damit die maximale

momentane Verlustleistung im Transformator nur 4 Watt wäre, sieht man ein, wie kritisch die Situation bereits geworden ist! Bei grossen Kraftwerkstransformatoren, die im Normalbetrieb an der Leistungsgrenze arbeiten und gekühlt werden müssen, sind zusätzliche sich wiederholende hundertfache Überlastungsspitzen absolut intolerabel. Bei einigen kanadischen Kraftwerken wurden deshalb bereits Vorkehrungen getroffen: Es wurden Kondensatoren in die Hochspannungsleitungen eingebaut, die langsam variierende Ströme stark dämpfen. So konnten die durch Sonnenstürme verursachten Stromspitzen um rund 80 % reduziert werden (Bolduc 2002).

Die potenziell gefährlichsten Sonnenstürme der letzten 100 Jahre

Ich möchte hier zwei Ereignisse erwähnen, die keine nennenswerten Schäden angerichtet haben, aber nur dank Glück nicht in die Weltgeschichte Eingang gefunden haben:

Das potenziell gefährlichste Ereignis geschah am 23. Mai 1967 in der Zeit des kalten Krieges, das das US-amerikanische Ballistic Missile Early Warning System in Kanada, Grönland und England simultan ausser Betrieb setzte und dadurch die Erde an den Rand eines Atomkriegs brachte. Kurz zuvor eingestellte Astrophysiker, die das Weltraumwetter beobachteten, konnten glücklicherweise die militärischen Einsatzkräfte überzeugen, dass es sich um einen geomagnetischen Sturm handeln müsse (AGU 2016).

NASA-Forscher fanden nach Analysen von Beobachtungsdaten der STEREO-Sonden, dass die Erde am 23. Juli 2012 knapp einem ähnlich starken Ereignis wie dem Carrington entging (Phillips 2014). Daniel Baker der Universität Colorado drückte es so aus: «Wäre die Eruption eine Woche früher passiert, wäre die Erde direkt in der Schusslinie gewesen!» Weiter ist er überzeugt, dass der Sturm bei einem Volltreffer mindestens die Stärke des Carrington-Ereignisses von 1859 gehabt hätte.

Gemäss einer Studie der National Academy of Sciences, dürfte der wirtschaftliche Schaden eines solchen Ereignisses etwa 20 mal grösser sein als die Kosten des Wirbelsturms Katrina und insbesondere bräuchte es Jahre, um die beschädigten riesigen Transformatoren zu reparieren. Die STEREO-A Sonde wurde im interplanetaren Raum durch die Plasmawolke zwar getroffen, überlebte aber den Sonnensturm. Wäre sie jedoch innerhalb der Magnetosphäre der Erde getroffen worden, wären grosse Ströme entstanden, die die Sonde hätten beschädigen können.

Ob die GPS-Systeme einen solchen Sturm überleben würden, ist deshalb fraglich. Sicher ist jedoch, dass ein plötzlicher GPS-Totalausfall zusammen mit grossräumigen Blackouts Konsequenzen hätte, die in ihrer Gesamtheit nur schwer vorstellbar sind. Beunruhigend ist weiter, dass in Eisbohrkernen durch erhöhte Konzentrationen von ^{10}Be und ^{36}Cl Superstürme mit wesentlich grösseren Protonenflüssen nachgewiesen werden können, als dies vermutlich beim Carrington-Ereignis der Fall war (Paleari et al. 2022). Weiter lässt sich aus Eisbohrkernen abschätzen, dass alle etwa 500 Jahre ein Carrington-ähnliches Ereignis stattfand.

Fritz Gassmann

Literatur

AGU 2016. American Geophysical Union / Univ. of Colorado Boulder. https://www.scinexx.de/news/technik/sonnensturm-loeste-1967-fast-einen-atomkrieg-aus/

Bolduc L. 2002. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. J. Atm. and Solar-Terr. Ph. 64(16): 1793-1802.

Friedli T. K. & Keller H.U. 1993. Rudolf Wolf als Pionier der Sonnenfleckenforschung. Vierteljahrsschrift 138/4: 267-281.

Paleari C. I. et al. 2022. Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. nature communications. Open Access https://www.nature.com/articles/s41467-021-27891-4.pdf

Phillips T. 2014. Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012.

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

https://www.youtube.com/watch?v=7ukQhycKOFw

Wolf J. R. 1852. Sonnenflecken-Beobachtungen in der ersten Hälfte des Jahres 1852; Entdeckung des Zusammenhanges zwischen den Declinationsvariationen der Magnetnadel und den Sonnenflecken. Mittheilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern: 179-184.