

SONNENSTÜRME UND WELTRAUMWETTER



© CC0 (Chris Henry/unplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Weltraumwetterphänomene wie Sonnenstürme haben das Potential, das menschliche Leben auf der Erde aufgrund unserer Abhängigkeit von diesbezüglich vulnabler kritischer Infrastruktur über Wochen oder Monate stark in Mitleidenschaft zu ziehen. Vor allem die als Querschnittsinfrastruktur bezeichneten Netze für Strom und Kommunikation, die die Basis für das Funktionieren aller anderen Bereiche kritischer Infrastrukturen darstellen, wären stark betroffen. Seit einigen Jahren gewinnt das Forschungsfeld durch die steigende Abhängigkeit von diesen Technologien an Relevanz. Welche Probleme sind zu erwarten und was kann in Österreich getan werden, um für einen höheren Grad an Resilienz zu sorgen?

Welche Auswirkungen hätten massive Sonnenstürme auf Österreich?

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Sonnenflecken, die mit starken Magnetfeldern an der Sonnenoberfläche und der Strahlungsintensität der Sonne einhergehen, folgen einem etwa elfjährigen Zyklus. Wir befinden uns aktuell im Sonnenfleckenzyklus 25, dessen Maximum nach einer Korrektur der Prognosen letzten November für den Zeitraum Jänner bis Oktober 2024 erwartet wird. Während dieses Maximums ist mit einer deutlich erhöhten Sonnenaktivität zu rechnen, die in der Anzahl der sog. Sonnenflecken sichtbar wird. Es wird angenommen, dass das bevorstehende Maximum deutlich über dem Maximum des Zyklus 24 liegen wird, jedoch, wie die Maxima der Zyklen davor, noch unterhalb des Mittels aller aufgezeichneten Zyklen.¹

*Was sind
Sonnenflecken
und was haben sie
mit der Erde zu tun?*

Die Sonne sendet kontinuierlich Strahlung und Teilchen in den Weltraum. Dieser Teilchenstrom erreicht auch die Erde und wird als Sonnenwind bezeichnet. Wird dieser kurzfristig und in einem bestimmten Gebiet stärker als gewöhnlich, spricht man von einer Sonneneruption (Jaswal et al 2023).

*Was sind
Sonnenstürme,
Eruptionen,
Sonnenwind ...*

Die Ursachen dafür sind Veränderungen im Magnetfeld der Sonne, das normalerweise das heiße Plasma einschließt. Bei einer Neuordnung des Magnetfelds kann das Plasma aber ins All ausgestoßen werden. Dabei kommt es zu Interferenzen zwischen den Magnetfeldern der Sonnenflecken mit Teilchenströmen. Dadurch werden hochenergetischen Teilchen (meist Protonen) mit hoher Geschwindigkeit weggeschossen, die in circa einer Stunde die Distanz zur Erde zurücklegen können. Wenn die Teilchen außerhalb der Sonne entstehen (Flares²), fliegen sie zunächst auch Richtung Sonne, werden dort abgebremst und sind dann dementsprechend langsamer. Die verlorene Energie ist als Röntgenblitz sichtbar. Diese breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, und sind daher noch vor den Protonenschauern auf der Erde messbar.

Meist folgt den Flares ein koronaler Masseauswurf³. Dabei verbinden sich die Magnetfelder der Flares auf eine Art und Weise, die eine Plasmawolke von der Sonnenoberfläche ablöst und durch den Wechsel in den Magnetfeldlinien ins All katapultiert. Der koronale Masseauswurf besteht aus geladenen Teilchen (Elektronen, Protonen und Atomkernen) und bewegt sich mit rund 1.000 km/s von der Sonne weg.⁴ Diese Wolke ist für einen Großteil der auf der Erde bemerkbaren Phänomene, auch die zeitweise Störung der Magnetosphäre eines Planeten verantwortlich.

Das Erdmagnetfeld schützt uns zwar vor den Auswirkungen der Eruptionen, das Auftreffen des Stroms (aus Protonen, Elektronen und Ionen, sowie kurzweilige Strahlungen im UV- und Röntgenbereich) in der Ionosphäre führt jedoch zu einer sichtbaren Interaktion in der oberen Atmosphärensicht (sog. Polarlichtern oder

*... und was machen
sie mit unserem
Erdmagnetfeld?*

¹ heise.de/news/Sonne-jetzt-doch-aktiver-und-mit-deutlich-mehr-Sonnenflecken-als-vorhergesagt-9350207.html.

² Einfache Plasma-Magnetfelddbögen auf der Sonnenoberfläche.

³ Bei Reorganisation der Flares (durch Rekonnexion der Magnetfelder) kann es auch zur Ablösung von der Sonnenoberfläche kommen, was als eruptive Protuberanz bezeichnet wird. Die damit verbundenen Teilchenströme werden auch als Protonenschauer beschrieben.

⁴ mps.mpg.de/sonnenstuerme-sonnenaktivitaet-faq/1 und de.wikipedia.org/wiki/Sonneneruption.

Aurora Borealis) und zur Störung des (Rund)Funkverkehrs. Mit zunehmender Intensität des Teilchenstroms verformt sich das Erdmagnetfeld und wird schwächer. Weiter vordringende Protonen erhöhen die Elektronendichte in der Atmosphäre, was zu steigender Absorption von Kurzwellen und UKW bis 300 MHz führt. Bei stärkerer Intensität der Stürme können auch negative Effekte für die kritische Infrastruktur auf der Erde eintreten. Mit zunehmender Abhängigkeit von vulnerablen Systemen steigt auch die Relevanz der Erforschung verschiedener Weltraumwetterphänomene. Ziel ist es dabei, die Vorhersagegenauigkeit und die Vorwarnzeit zu erhöhen, um mögliche Schäden abwenden oder zumindest eindämmen zu können. Im Mai 2024 ereignete sich der stärkste Sonnensturm seit 2003, der Kommunikationssysteme beeinträchtigte: Satelliten und GPS-Signale wurden gestört, Flüge umgeleitet⁵. Im Gegensatz zum Sonnensturm von 1989 kam es in Kanada jedoch zu keinem Stromausfall, da Netzbetreiber dank Satellitenüberwachung rechtzeitig reagieren konnten. Der Sturm war dennoch mehr als zweimal schwächer als das Carrington-Ereignis von 1859.⁶ Erstmals wurde ein Supersturm durch mehrere Satelliten beobachtet, wodurch relevante Daten gesammelt wurden, die zur Verbesserung der Vorhersage zukünftiger Ereignisse, insbesondere durch längere Warnzeiten, beitragen sollen. Im März 2025 ist es dem Austrian Space Weather Office gelungen, die Intensität zweier geomagnetischer Stürme sieben bzw. 15 Stunden vor ihrem Auftreffen auf die Erde mit großer Genauigkeit vorherzusagen. Diese bis dahin nicht mögliche Vorhersage in Echtzeit war das Ergebnis einer neuen Methode, Daten des Forschungssatelliten Solar Orbiter zu verwenden. Der Ansatz kann zu einem Vorhersagewerkzeug weiterentwickelt werden.⁷ Angesichts dessen, dass der zur Vorhersage konzipierte Satellit „Vigil“ der ESA erst 2031 ins All geschickt werden soll⁸, ist dies bedeutend. Im August 2025 kündigte die NASA das Surya-KI-Modell an, das die Vorhersage von Sonnenstürmen verbessern soll.⁹

Auf Grund der Form des Erdmagnetfeldes treten zwischen der Strahlung der Sonne und unserer Atmosphäre Interferenzen auf, die als Polarlichter vermehrt in den Polregionen sichtbar werden. Wird die Strahlungsintensität größer, verformt sich das Erdmagnetfeld soweit, dass dieses optische Phänomen auch in Regionen zu sehen ist, die näher beim Äquator liegen. Polarlichter in Mitteleuropa sind jedoch extrem selten. Das bekannteste und stärkste beobachtete Ereignis dieser Art war das sog. Carrington-Event im Jahr 1859.¹⁰ Es wird berichtet, dass die Polarlichter damals sogar in Rom sichtbar waren. Die im 19. Jahrhundert großräumig vorhandene Infrastruktur war das Telegraphennetz. Die Abhängigkeit von Stromnetzen oder anderen Kommunikationsnetzen bestand noch nicht. Der Strom der geladenen Teilchen erzeugte in den Telegraphenleitungen durch Induktion hohe Gleichstrom-Spannungen. Da die Leitungen für derartige Ereignisse nicht abgesichert waren, kam es in vielen Telegraphenstationen zu Stromschlägen, Überspannungen, Funkenschlag und Bränden, durchgeschmorten Lei-

*Massive
Beeinträchtigungen
in der Vergangenheit*

⁵ geosphere.at/de/aktuelles/news/neue-erkenntnisse-zum-geomagnetischen-supersturm-im-mai-2024.

⁶ cgs.jhuapl.edu/Resources/May-10-12-Geospace-Storm.php.

⁷ archive.ph/2025.09.01-083107/https://www.newscientist.com/article/2494433-spacecraft-used-to-forecast-solar-storm-15-hours-before-it-hit-earth/.

⁸ esoc.esa.int/content/vigil.

⁹ science.data.nasa.gov/features-events/inside-surya-solar-ai-model.

tungen und insgesamt zu erheblichen Schäden an der Infrastruktur. Eine Zeit lang konnte sogar zwischen einigen Stationen telegraphiert werden, ohne dass eine Stromversorgung anlag, weil die durch den Sonnensturm induzierte Gleichspannung der Stromversorgung der batteriegestützten Telegraphenleitungen nahekam.¹⁰

Fachleute sind sich einig, dass ein Ereignis dieser Intensität heute massive Schäden vor allem an Strom- und Kommunikationsnetzen verursachen würde (Hayakawa 2023). Auch der Flugverkehr, Radar, Radiofunk oder etwa der Behördenfunk wären in Mitleidenschaft gezogen.¹¹ Es würden aber auch elektronische Bauteile von Satelliten beschädigt werden. Das, sowie veränderte Signallaufzeiten, würden Positionsbestimmungssysteme wie GPS oder Galileo beeinträchtigen – bis hin zu einem Totalausfall. Davon wären selbstverständlich nicht nur Navigationsinstrumente betroffen. Viele Systeme verwenden das GPS-Signal zur exakten Zeitbestimmung bzw. -synchronisierung, bspw. im High-Frequency-Trading oder im Stromnetz (Strauß et al 2017).

*Was wäre aktuell an
Schäden zu erwarten?*

Schwächere Sonnenstürme führten durch abgebrannte Transformatoren und Leitungsausfälle schon in der Vergangenheit zu Ausfällen im Stromnetz. Die Faktoren, von denen das Schadensausmaß abhängt, sind einerseits die geografische Breite sowie die Länge der Leitungen, deren Nord/Süd-West/Ost-Ausdehnung und schließlich die Leitfähigkeit des Untergrunds (Material und Feuchtigkeit). Vor allem bei sehr langen Leitungen sind durch Erdrotation und Einfallswinkel des Sonnensturms nicht beide Enden der Leitung zugleich betroffen. Dadurch kommt es nicht nur zu induzierten Spannungen, sondern auch zu einem starken Spannungsgefälle zwischen den Endpunkten, das mehr oder weniger gut über den Boden ausgeglichen werden kann. Das ist vor allem deshalb problematisch, weil sich der Ausfall von Hochspannungstransformatoren, wie zum Beispiel 1989 in der Region Quebec in Kanada, nichts ist, nicht leicht/schnell in Ordnung bringen lässt. Man geht davon aus, dass eine Reparatur Wochen bis Monate in Anspruch nehmen kann, auch abhängig von der Verfügbarkeit der benötigten Teile am Weltmarkt. Bei einem Schadensereignis, das mit dem Carrington-Event vergleichbar ist, wären viele Gebiete auf der Erde betroffen, was die Verfügbarkeit der Ersatzteile dramatisch verschlechtern würde (Strauß et al. 2017). Eine im Oktober 2025 herausgegebene Warnung der Europäischen Weltraumagentur (ESA)

¹⁰ Die Teilchen des koronalen Masseauswurfs trafen mit einer Geschwindigkeit von ca. 2.000 km/s auf die Erde, brauchten nur 17,5 Stunden (bei einer durchschnittlichen Laufzeit von 24-36 Stunden), um die Distanz zwischen Sonne und Erde zurückzulegen: en.wikipedia.org/wiki/Carrington_Event. Ein anderes derart starkes Ereignis trat 1872 auf (sog. Chapman-Silverman-Sturm), als Polarlichter bis in den Sudan und die Karibik zu sehen waren: mps.mpg.de/polarlichter-ueber-der-karibik. Im Jahr 2012 verfehlte ein Sonnensturm, der in seiner Intensität mit dem Carrington-Event vergleichbar gewesen wäre, die Erde nur knapp: spiegel.de/wissenschaft/weltall/sonnensturm-2012-fast-katastrophe-auf-erde-plasma-verfehlt-planet-a-982652.html. Die hohe Intensität scheint nicht nur eine Frage des Timings und der Interferenzen einzelner Flares zu sein, sondern, wie 2012 beobachtet wurde, auch daher zu rühren, dass multiple Schockwellen nacheinander die Erde treffen. Die späteren finden ein schon stark verformtes Magnetfeld vor und können daher viel weiter eindringen.

¹¹ de.wikipedia.org/wiki/Sonneneruption.

betont die Dringlichkeit von Vorbereitungsmaßnahmen. Die Warnung beruht auf einer Szenarioanalyse, die bei extremen, aber realistischen Sonnenstürmen¹² schwerwiegende Folgen prognostiziert.

Als vorbeugende Maßnahme kommt die Installation von Gleichstromschutzschaltern in Betracht. Damit würden die Leitungen immer noch kurzzeitig ausfallen (was auch großflächige Stromausfälle nach sich ziehen kann), aber es käme zu weniger physikalischen Schäden. Ähnlich verhält es sich bei Satelliten. Wenn die Vorwarnzeit groß genug ist, können die Systeme heruntergefahren werden. Dadurch werden größere Schäden an den elektronischen Bauteilen vermieden. Auch hier wäre also ein Netzausfall mit all seinen Konsequenzen zu beobachten, physikalische Schäden könnten jedoch minimiert werden, was bei Satelliten aufgrund der schlechten Zugänglichkeit für Reparaturen besonders wichtig ist.

Gibt es präventive Maßnahmen?

Das Internet betreffend wird erwartet, dass derart intensive Schadensereignisse wie das Carrington-Event zu einem großflächigen Ausfall mit physischen Schäden führen würden, der sich nicht kurzfristig beheben ließe. Da die Abhängigkeit unserer Gesellschaft vor allem von Strom und Internet sehr hoch ist und weiterhin kontinuierlich zunimmt, ist klar, dass gravierende Auswirkungen auf das gesellschaftliche Leben weltweit und in Österreich zu erwarten wären, so dass ein Leben, wie wir es gewohnt sind, über zumindest Monate nicht vorstellbar wäre.¹³

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die Forschungsaktivitäten in Österreich zu dem Themenkomplex werden bspw. am Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, bei GeoSphere Austria, an der TU Graz und auch in Kooperation mit Betreibern kritischer Infrastrukturen wie der Austrian Power Grid (APG) durchgeführt. Sowohl was Kompetenzen als auch Forschungsressourcen, wie das Conrad-Observatorium, betrifft, ist Österreich in der Lage, einen relevanten Beitrag zur internationalen Forschung zu leisten. (Schachinger et al 2020) In immer mehr Staaten werden die Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet gebündelt und institutionalisiert.

Unterstützung der Forschungsanstrengungen und die Erarbeitung einer nationalen Strategie

Die Erkenntnisse aus solchen Projekten sind für Österreichs kritische Infrastrukturen essentiell. Auch wenn Österreich aufgrund seiner geografischen Lage von den Auswirkungen kleinerer Sonnenstürme nicht unmittelbar betroffen wäre, haben die starken Sonnenstürme, unbedacht ihrer Seltenheit, ein enormes Schadenspotential. Obendrein wird auf Grund der zuvor beschriebenen Beobachtungen 2012 und anderer Forschungsergebnisse aus der jüngeren Vergangenheit (O'Hare et al 2019) vermutet, dass Ereignisse mit der Intensität des Carrington-Events viel häufiger sind als bisher angenommen (einmal alle zehn Jahre), und

Risiko bisher deutlich unterschätzt

¹² esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Durch_den_staerksten_jemals_registrierten_Sonnensturm_fliegen.

¹³ Details zu den Folgen eines großflächigen Internetausfalls in Österreich finden sich bei Schachenhofer et al. 2022.

auch noch deutlich stärkere Schadensereignisse möglich sind, was darauf hinweist, dass das Risiko auch in Österreich bisher womöglich deutlich unterschätzt wurde. Um hier keine Doppelgleisigkeiten in der Forschung und der Ressourcennutzung entstehen zu lassen, wäre es auch sinnvoll, eine nationale Strategie zum Umgang mit dem Thema zu etablieren.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

In Vorbereitung einer nationalen Strategie zum Thema „Weltraumwetterphänomene“ sollte eine umfassende Bestandsaufnahme über Forschungsstand und -bedarf erfolgen. Auf Basis einer solchen Studie sollten in der Folge in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Krisen- und Katastrophenschutzmanagement (SKKM) und den Betreibern kritischer Infrastrukturen Notfallpläne erarbeitet werden. Hierbei kann auch auf das Wissen in anderen Staaten, die schon länger mit dem Thema befasst sind, zurückgegriffen werden (bspw. USA, Kanada, Skandinavien ...). Besonders wichtig erscheint die Prävention (Abschirmung, Frühwarnsysteme, Vorgehensweise im Katastrophenfall u. dgl. m.) sowie eine eventuelle Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet.

*Aktionsplan
Weltraumwetter*

ZITIERTE LITERATUR

- Hayakawa, H., Cliver, E., Clette, F. et al. (2023), The extreme space weather event of 1872 February: Sunspots, Magnetic Disturbance, and Auroral Displays, *The Astrophysical Journal*, Vol 959, No 1, DOI 10.3847/1538-4357/acc6cc.
- Jaswal, P., Saha, C., Nandy, D. (2023), Discovery of a relation between the decay rate of the Sun's magnetic dipole and the growth rate of the following sunspot cycle: a new precursor for solar cycle prediction, *Monthly Notices of the Royal Astronomic Society*, 528, L27-L32, doi.org/10.1093/mnrasl/slad122.
- O'Hare, P., Mekhaldi, F., Adolphi, F. et al. (2019), Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2,610 B.P. (~660 BC), *PNAS* 116 (13) 5961-5966, doi.org/10.1073/pnas.1815725116.
- Schachenhofer, L., Gronalt, M., Krieger-Lamina, J. et al. (2022), ISIDOR – Folgen einer langandauernden und großflächigen Einschränkung der internetbasierten Dienste und Infrastrukturen (Endbericht), Wien, [doi:10.1553/ITA-pb-2022-04](https://doi.org/10.1553/ITA-pb-2022-04).
- Schachinger, P., Albert, D., Renner, H. et al. (2020), Niederfrequente Sternpunktströme im Übertragungsnetz: Ein Überblick über aktuelle und zukünftige Forschung in Österreich, Tagungsband EnInnov 2020, S. 205f, tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/allg/EnInnov2020_Tagungsband.pdf.
- Strauß, S., Krieger-Lamina, J. (2017), Digitaler Stillstand – Die Verletzlichkeit der digital vernetzten Gesellschaft – Kritische Infrastrukturen und Systemperspektiven, Wien, PB 2017/01, pub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/2017-01.pdf.