



Themenkurzprofil Nr. 84
November 2025

Weltraumwetter und seine Auswirkungen – Wissens- stand und Forschungsbedarfe

Tobias Hungerland

In Kürze

Weltraumwetter beschreibt die Wechselwirkung zwischen Aktivitäten der Sonne, Sonnenwinden, -eruptionen und koronalen Masseauswürfen mit der Erde. Die Aktivitäten folgen einem 11-jährigen Zyklus, wobei ab 2030 wieder Zyklen mit einem höheren Aktivitätsniveau erwartet werden. Wenn erhöhte elektromagnetische Strahlung sowie Plasmawolken auf die Erde treffen und mit dem Erdmagnetfeld sowie der Atmosphäre interagieren, können Risiken für technische Infrastrukturen (Satelliten, Stromnetze, Unterseedatenkabel und große metallische Infrastrukturen) sowie die menschliche Gesundheit resultieren.

Zentral für eine frühzeitige Warnung und die Umsetzung von Schutzmaßnahmen sind die Beobachtung der Sonnenaktivitäten, einschließlich einer Echtzeit-Datenanalyse, die Modellierung und Simulation von geomagnetischen Stürmen sowie eine Risikoanalyse der Auswirkungen auf kritische Infrastruktursysteme.

Realisiert werden die Erforschung und die Weiterentwicklung von Klassifikationssystemen, Modellen und Simulationen unter Beteiligung verschiedener deutscher Akteure. Die aktuelle deutsche Raumfahrtstrategie betont die Bedeutung einer vertieften Auseinandersetzung mit Weltraumwetter und einem Ausbau der nationalen Kapazitäten und Kenntnisse auch, um unabhängiger von US-amerikanischen Akteuren zu werden und die Souveränität Deutschlands und Europas zu erhöhen.

Obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass Deutschland von den Auswirkungen eines geomagnetischen Sturms direkt betroffen sein wird, gering ist, fehlt bislang eine Analyse potenzieller wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Schäden sowie des Nutzens durch verstärkte Investitionen in Beobachtungs- und Frühwarnsysteme.

Hintergrund und Entwicklungsstand

Sonnenzyklen und Weltraumwetter

Unsere Sonne setzt kontinuierlich geladene Teilchen (Elektronen und Protonen) frei, die sich als Sonnenwinde im Sonnensystem ausbreiten (Space Foundation 2025, S. 14). Der Einfluss dieser Sonnenwinde und weiterer Sonnenaktivitäten auf den erdnahen Weltraum, insbesondere auf das Erdmagnetfeld und die Erdatmosphäre, wird als Weltraumwetter bezeichnet.

Die Sonnenaktivitäten haben einen durchschnittlich 11-jährigen Zyklus, der mit minimalen Aktivitäten beginnt und sich nach der Hälfte der Zeit einem Maximum nähert, ehe die Aktivitäten wieder auf ein Minimum zurückgehen (Earth Observatory o. J.). Derzeit befinden wir uns im 25. Sonnenzyklus seit Beginn der Zählung im Jahr 1755. Er begann 2019 und erreichte Ende 2024 seinen Höhepunkt. Zwar können auch 2025 noch starke Sonnenaktivitäten auftreten, bis 2030 dürften sie jedoch schwächer werden (DLR o. J.; Gentner/Kernn 2025).

Sonnenaktivitäten variieren nicht nur innerhalb eines Sonnenzyklus. Auch die einzelnen Zyklen können unterschiedlich stark sein. Aktuelle Forschungen deuten darauf hin, dass es in den letzten Jahrzehnten eine Phase mit eher geringer Sonnenaktivität gab, zwischen dem 24. und 25. Sonnenzyklus jedoch eine Trendumkehr einsetzte: Die Sonne ist nun in eine aktivere Phase eingetreten, wodurch in den kommenden Sonnenzyklen deutlich mehr und extremere Aktivitäten auftreten können (Jasinski/Velli 2025). Deshalb wird seit Längerem eine stärkere Befassung mit dem Phänomen und seinen Folgen gefordert (Mühlbauer et al. 2022) und in der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung (2023b, S. 43) auch angekündigt.

Phänomene des Weltraumwetters

Das Aktivitätsniveau eines Sonnenzyklus wird anhand der Zahl und Größe der Sonnenflecken bestimmt (Berdermann 2023, S. 7; DKKV 2024, S. 2). Bei zunehmenden Sonnenaktivitäten werden mehr und größere Sonnenflecken beobachtet, also dunkle Stellen auf der ansonsten hellen Sonnenoberfläche (Lagg et al. 2011). In Regionen mit zahlreichen Sonnenflecken ist das Magnetfeld der Sonne besonders stark und es können weitere, unregelmäßige Phänomene einzeln oder gemeinsam auftreten: Sonneneruptionen sowie koronale Masseauswürfe (May/Dobrijevic 2022).

Sonneneruptionen sind in den Sonnenfleckenregionen örtlich begrenzt auftretende plötzliche, starke Emissionen elektromagnetischer Strahlung, vor allem ultravioletter und Röntgenstrahlung (Berdermann 2023, S. 9). Sie dauern durchschnittlich etwa 30 Minuten. Die Ursache ist eine Neuordnung der magnetischen Feldlinien in der Sonnenatmosphäre. Die Strahlung breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und erreicht die Erde nach etwa

8 Minuten. Sie wird nicht vom Magnetfeld der Erde abgelenkt und interagiert mit den oberen Atmosphäreschichten.

Sonneneruptionen gehen oft einher mit koronalen Masseauswürfen. Dabei durchbrechen Plasmawolken (geladene Teilchen wie Elektronen, Protonen und Atomkerne) das Magnetfeld der Sonne, wenn dieses in Sonnenflecken zusammenbricht. Wenn koronale Masseauswürfe auf die Erde gerichtet sind, transportieren Sonnenwinde die Plasmawolken innerhalb eines Zeitraums von 1 bis zu 4 Tagen zur Erde (Berdermann 2023, S. 13; BABS 2020).

Wenn die von der Sonne freigesetzte elektromagnetische Strahlung sowie die Plasmawolken auf die Erde treffen, kommt es zu Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld (Magnetosphäre) und der Atmosphäre, insbesondere der Thermosphäre, der Erde. Erhöhte Interaktionen mit Magneto- und Thermosphäre werden als (geo)magnetische oder Sonnenstürme bezeichnet (Berdermann 2023, S. 10; DLR 2025a). Sie können dazu führen, dass sich die Atmosphäre aufheizt und ausdehnt sowie Polarlichter auftreten. Polarlichter entstehen in der Ionosphäre, dem Grenzbereich zwischen Atmosphäre und Weltraum, der aufgrund der Sonneneinstrahlung große Mengen geladener Teilchen enthält (Günzkofer 2024; NASA Science Editorial Team 2019). Je nach Intensität der Interaktion können Polarlichter nicht nur in den nördlichen oder südlichen Breiten, sondern auch bis in mitteleuropäische Regionen sichtbar sein (DLR 2025b).

Mögliche Folgen geomagnetischer Stürme und Gegenmaßnahmen

Je nach Intensität und Dauer können geomagnetische Stürme technische Infrastrukturen in Erdumlaufbahnen und auf der Erde (Satelliten, vor allem Satellitennavigationssysteme, Flugverkehr, Strom- und Kommunikationsnetze) sowie die Umwelt und die menschliche Gesundheit schädigen. Aufgrund der geografischen Lage und der Form des Erdmagnetfeldes sind polnahe Regionen und Länder stärker von Weltraumwetterereignissen betroffen.

In der Regel schützen Magnetfeld und Thermosphäre die Erde weitgehend vor elektromagnetischer und Teilchenstrahlung aus dem Weltall. Wenn große Strahlungsmengen auf die Erde treffen, reicht dieser Schutz allerdings nicht mehr aus (Lühr 2014, S. 93 f.) und die Strahlungsdosis steigt. Davon können sowohl Astronaut/innen, die zum Beispiel auf der Internationalen Raumstation (International Space Station – ISS) arbeiten, als auch Passagier/innen und Besatzung im Luftverkehr betroffen sein. Bei wiederholter Exposition mit hohen Strahlungsdosen kann sich das Krebsrisiko erhöhen (Abt Associates 2017, S. 53; Hellweg et al. 2018; UK Health Security Agency 2025). Falls die in rund 400 km Höhe um die Erde kreisende ISS in den Bereich eines geomagnetischen Sturms kommt, ändert die Besatzung nach Möglichkeit die Flugbahn, um betroffene Bereiche zu meiden. Astronaut/innen dürfen dann keine Außenbordeinsätze durch-

Abbildung 1 Effekte des Weltraumwetters



Quelle: nach ESA/Science Office (2018)

führen, sondern müssen sich in dafür vorgesehene Schutzräume begeben und dort warten, bis die Gefahr vorüber ist. Auch im Luftverkehr werden Flugrouten geändert, um von Sonnenstürmen betroffene Bereiche zu meiden und die Strahlungsexposition von Personen zu reduzieren (Abt Associates 2017, S. 54). Präventive Maßnahmen umfassen beispielsweise die Entwicklung technischer Fähigkeiten zur Messung von Strahlenbelastung in Echtzeit (UK Health Security Agency 2025), um präziser ermitteln zu können, ob eine mögliche Gesundheitsgefährdung für Passagier/innen und Besatzungen von Flugzeugen besteht, und davor rechtzeitig warnen zu können.

Aktuelle Beobachtungen zeigen, dass geomagnetische Stürme dazu führen, dass sich die oberen Atmosphäreschichten temporär aufheizen und ausdehnen. Veränderungen der oberen Atmosphäreschichten können zu Zirkulationsveränderungen und Schwankungen in der Ozonbildung führen (Teng et al. 2021).

Einzelne Satelliten oder ganze Satelliteninfrastrukturen (Konstellationen) können bei geomagnetischen Stürmen sowohl durch die erhöhte Strahlung als auch durch atmosphärische Bremsung Schaden nehmen oder vollständig ausfallen. Die erhöhten hochenergetischen Teilchenströme können elektronische Komponenten von Satelliten beschädigen, sodass unterschiedliche Systeme eines Satelliten ausfallen und dieser seine Aufgaben nicht mehr oder nicht vollständig erbringen kann oder bei einem Totalausfall sogar aufgegeben werden muss. Navigations- und

Kommunikationssatelliten, die in mittleren (2.000 bis 36.000 km) oder hohen geostationären Umlaufbahnen (35.786 km) um die Erde kreisen und vom Erdmagnetfeld weniger stark geschützt sind, sind potenziell besonders gefährdet.

Geomagnetische Stürme können auch die Funkverbindungen zwischen Satelliten und Bodenstationen bzw. zwischen Satelliten untereinander stören. Das kann dazu führen, dass Befehle nicht mehr an Satelliten übermittelt oder Daten nicht mehr vom Satelliten zur Bodenstation übertragen werden und infolgedessen beispielsweise die Flugbahnen nicht mehr genau eingehalten werden können (Abt Associates 2017, S. 26). Mit mathematischen Modellen können Störungen simuliert werden, um vorherzusagen, wann und wo Signalstörungen auftreten können. Zur Minimierung von Störungen können Signale außerdem auf mehreren Frequenzen übermittelt werden, sodass die Übertragung stabilisiert wird (Sun et al. 2021).

Werden bei Satellitennavigationssystemen wie GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou sowohl elektronische Komponenten einzelner Satelliten beschädigt als auch Funksignale gestört, kann dies zu Abweichungen der Flugbahnen führen. Dies hat zur Folge, dass die genaue Positionsbestimmung und die exakte Zeitmessung beeinträchtigt werden (Cander 2019, S. 215 ff.; Facskó et al. 2024). Davon betroffen sind unter anderem der Straßenverkehr und die Präzisionslandwirtschaft, die Güterlogistik (Schiffe, Flugzeuge und Lkw) sowie die Finanzmärkte (insbesondere im

Hochfrequenzhandel, der auf präzise Zeitmessungen angewiesen ist) (ÖAW-ITA 2024, S. 4).

Satelliten in niedrigen Erdumlaufbahn können auch durch den erhöhten Luftwiderstand, der durch eine aufgeheizte und ausgedehnte Atmosphäre entsteht, gebremst werden, dadurch von ihren Umlaufbahnen abweichen und in der Atmosphäre verglühen (Kasten) (DLR 2025a). Davon besonders gefährdet sind Erdbeobachtungs- und Kommunikationssatelliten (etwa Starlink), die gegenwärtig den größten Teil der aktiven Satelliten darstellen (Baker 2025).

Beispiele für Schäden an der Weltrauminfrastruktur durch geomagnetische Stürme

- 1979 hatte die bereits seit Jahren ungenutzte US-amerikanische Raumstation Skylab durch eine ausgedehnte Atmosphäre eine andere als die vorausberechnete Bahnposition. Sie stürzte früher und an anderer Position als geplant ab. Sie verglühte beim Absturz nur teilweise, einige Trümmerteile schlugen in Australien auf. Es kam glücklicherweise nicht zu nennenswerten Schäden (Berdermann 2023, S. 14 ff.).
- Weil ein geomagnetischer Sturm 2022 die Atmosphärendichte erhöhte, konnten 40 zeitgleich ausgesetzte Starlink-Kleinsatelliten nicht auf ihre endgültige Umlaufbahn gehoben werden. Sie wurden kontrolliert zum Absturz gebracht und verglühten in der Atmosphäre (DLR 2025a).

Um Satelliten vor solchen Schäden zu schützen, müssen sie bei sich abzeichnenden geomagnetischen Stürmen gegebenenfalls in andere Positionen manövriert werden. Um entsprechende Bahnmanöver zu planen und umzusetzen, sind ausreichend Vorlaufzeit und Treibstoff erforderlich. Die zunehmende Zahl an Kleinsatelliten zur Erdbeobachtung und Kommunikation ist gegenwärtig nur unzureichend geschützt, unter anderem weil sie nicht über den nötigen Treibstoff für Bahnänderungen verfügen (Mühlbauer et al. 2022). Wenn Satelliten nicht manövriert werden können und sie Schaden nehmen, müssen sie gegebenenfalls aufgegeben und ersetzt werden.

Geomagnetische Stürme können zudem im Erdmagnetfeld elektrischen Strom induzieren (geomagnetisch induzierter Gleichstrom), der Transformatoren in Wechselstromnetzen überlasten und zu großflächigen Stromausfällen führen kann (Abt Associates 2017, S. 10). 1989 fiel auf diese Art und Weise im kanadischen Quebec für 9 Stunden der Strom für circa 6 Millionen Menschen aus (BABS 2020, S. 2; Berdermann 2023, S. 14; Public Safety Canada 2013). 2003 waren im schwedischen Malmö 50.000 Bewohner/innen für 90 Minuten von einem derartigen

Stromausfall betroffen (Hickling Arthurs Low Corporation 2019, S. 2; Rauner 2009).

Geomagnetisch induzierte Gleichströme können zudem aus großen Metallmengen bestehende Infrastrukturkomponenten beschädigen, zum Beispiel Eisenbahnen, Rohrleitungen oder Unterseedatenkabel. Diese metallischen Infrastrukturkomponenten können bei geomagnetischen Stürmen selbst zu Stromleitern werden und Komponenten in Stromleitungen und Unterseedatenkabeln, wie etwa Transformatoren und Leitungsverstärker, durch Gleichstrom überlasten. Bei Öl- und Gaspipelines kann es zu erhöhter Korrosion kommen (Facskó et al. 2024, S. 51; Jyothi 2021; Kluger 2024).

Werden Unterseedatenkabel geschädigt, können Ausfälle des Internets die Folge sein. Reparaturen einzelner ausgefallener Leitungsverstärker können mehrere Tage bis Wochen dauern. Jyothi (2021) hat in verschiedenen Ausfallszenarien modelliert, wie und wo derartige Ausfälle bei geomagnetischen Stürmen auftreten könnten. Jyothi (2021, S. 700 ff.) zeigt auf, dass ähnlich wie bei Stromnetzen die vorübergehende Abschaltung der Datenkabel eine Maßnahme sein kann, um diese Infrastrukturkomponente zu schützen; gleichzeitig weist Jyothi aber darauf hin, dass dies bei starken geomagnetischen Stürmen nicht ausreichen dürfte, sondern beispielsweise eine stärkere Dezentralisierung von Kabelenden und Hyperscalerechenzentren eine sinnvollere, robustere Lösung wäre. Präventiv könnten die unterschiedlichen Infrastruktursystembetreiber Notfallpläne für Weltraumwetterereignisse aufstellen, die deren spezifische Eigenschaften berücksichtigen und zum Beispiel Sofortmaßnahmen wie die Abschaltung von Systemkomponenten beinhalten, mit denen umgehend auf besonders starke geomagnetische Stürme reagiert werden kann (Kluger 2024).

Der „Muttertags-Sturm“ im Mai 2024

Das im aktuellen Sonnenzyklus bislang stärkste Ereignis war der „Muttertags-Sturm“, ein geomagnetischer Sturm mit einer Einstufung von G5, der vom 10. bis 12. Mai 2024 das Magnetfeld der Erde beeinflusste. Dieser Sturm war so stark, dass die Beeinflussung des Erdmagnetfelds noch in 2.700 m Tiefe am Meeresgrund gemessen werden konnte (Podbregar 2024). In den USA wurden durch den Sturm einige Stromleitungen beschädigt, GPS-gesteuerte Traktoren kamen von ihren Routen ab und Flugrouten mussten aufgrund fehlender Funkverbindungen geändert werden. Auch die Flugbahnen einzelner Satelliten wurden geändert bzw. die Satelliten in den Ruhemodus versetzt, um Schäden zu vermeiden (Johnson-Groh et al. 2025). In Deutschland waren vor allem die durch diesen und einen weiteren geomagnetischen Sturm im Herbst 2024 verursachten Polarlichter sichtbar (DLR 2025b).

Geomagnetische Stürme können auch auf Kurzwellensignalen basierende Funkverbindungen stören (zum Beispiel im Flugverkehr), da Kurzwellen mit der Ionosphäre interagieren (Facskó et al. 2024, S. 49). Ohne Funkverbindungen und satellitenbasierte Positionsbestimmungen sind Navigationsfehler möglich (Berdermann/Banys 2023; Berdermann/Schmölter 2023). Um dies zu vermeiden, sollten bei solchen Stürmen die Flugrouten gegebenenfalls geändert oder in betroffenen Regionen der Flugverkehr vorübergehend eingestellt werden, bis Kommunikations- und Navigationssysteme wieder zuverlässig funktionieren. Durch diese Maßnahme wird zugleich das Risiko für Gesundheitsschäden durch Strahlenbelastung reduziert. Geomagnetische Stürme können außerdem die Umwelt beeinflussen. Vor allem Tiere, deren Orientierungssinn auf dem Erdmagnetfeld basiert (etwa Bienen, Zugvögel und Meerestiere wie Wale und Delfine), können während geomagnetischer Stürme in ihrer Orientierung beeinträchtigt werden, sodass Migrationswege sich verändern und Ökosysteme dadurch Schaden nehmen können (Berdermann 2023, S. 33 f.).

Wie lassen sich Weltraumwetterphänomene beobachten und vorhersagen?

Obwohl Beobachtungen der Sonne bereits in der Antike zur Entdeckung der Sonnenflecken und im 18. Jahrhundert zur Entdeckung von Sonnenzyklen geführt haben, gilt erst das Carrington-Ereignis 1859 (Kasten) als Beginn der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Weltraumwetter (Debnath

2025, S. 1). Der Begriff Weltraumwetter fand sogar erst Mitte der 1990er Jahre Eingang in den Sprachgebrauch (Berdermann 2023, S. 6).

Das Carrington-Ereignis 1859

Das nach dem britischen Astronom Richard Carrington benannte Weltraumwetterereignis gilt als bisher besonders folgenschweres. Carrington beobachtete am 1. September 1859 die Sonne und nahm in einer Region mit Sonnenflecken einen hellen Blitz wahr (Green/Boardsen 2006, S. 2). Rund 17 Stunden später wurde bei einem extrem starken geomagnetischen Sturm das damals in den USA und Europa gerade erst in Betrieb genommene Telegrafennetz durch Gleichstromspannung überlastet (Cliver/Dietrich 2013; Green/Boardsen 2006). Infolgedessen kam es zu Stromschlägen, Überspannungen, Funkenschlag und vereinzelt Bränden an Telegrafestationen (Rauner 2009; ÖAW-ITA 2024, S. 3). Für rund acht Stunden war ein Großteil der damals bestehenden 200.000 km langen Telegrafenableitungen unterbrochen und Nachrichtenübermittlungen nicht möglich (Green/Boardsen 2006). Die Stärke dieses geomagnetischen Sturms wird heute mit G5+ angegeben (Bundesregierung 2018, S. 2) und liegt damit jenseits der etablierten Skala (Tabelle 1). Nach Hochrechnungen treten derart starke Sonnenstürme einmal in 100 bis 250 Jahren auf (Elvidge 2024; Maynard et al. 2013, S. 8).



Seit den 1970er Jahren wurde die erdgebundene Beobachtung der Sonne mit optischen Teleskopen ergänzt durch weltraumbasierte Beobachtungen mittels Raumsonden und Weltraumteleskopen, die von verschiedenen Raumfahrtagenturen betrieben werden (Ishii et al. 2025). Relevante Weltraummissionen sind vor allem die Raumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, seit 1985 von der ESA und der NASA gemeinsam betrieben; Fleck o. J.), der Erdbeobachtungssatellit DSCOVR (Deep Space Climate Observatory, seit 2015 von der NASA betrieben; Kremer 2014) und die im März 2025 gestartete PUNCH-Mission (Polarimeter to UNify the Corona and Heliosphere) der NASA.¹ Sie sammeln Daten über den Zustand des Magnetfeldes der Sonne, die Partikeldichte, die Stärke und die Richtung von Sonnenwinden sowie über optische Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen. Hinzu kommen vielfältige erdnahe Messungen des Erdmagnetfeldes und von Strahlungsveränderungen. Die Auswirkungen von geomagnetischen Stürmen bzw. die Interaktion mit der Ionosphäre wird außerdem mit Radargeräten untersucht (Mühlbauer et al. 2022, S. 10).

Die Beobachtungskapazitäten und Frühwarnsysteme zu geomagnetischen Stürmen sind in Ländern, die in nördlichen und auch südlichen Breitengraden liegen, zum Teil deutlich weiter entwickelt als in Deutschland. Zu nennen sind hier beispielsweise Finnland, Schweden und Norwegen, die mitunter seit Jahrzehnten systematisch Weltraumwetterphänomene erforschen sowie Informationen und Dienstleistungen wie Weltraumwetterberichte und Warnmeldungen anbieten (Kauristie et al. 2024). Insbesondere Finnland hat sich als zentraler Akteur bei der Durchführung von Simulationen globaler Effekte des Weltraumwetters etabliert (Ishii et al. 2025, S. 29).² Schweden hat angekündigt, die nationalen Vorhersagefähigkeiten auszubauen (Ishii et al. 2025, S. 31 f.).

In Nordamerika verfügen die USA mit der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)³ und Kanada mit dem Space Weather Forecast Center (SWFC)⁴ über umfassende institutionelle Strukturen zur Beobachtung, Vorhersage und Warnung von Weltraumwetterphänomenen. Zudem betreibt die US-amerikanische Raumfahrtbehörde NASA mehrere Satellitenprogramme zur kontinuierlichen Beobachtung der Sonnenaktivitäten.

Die kontinuierlichen Beobachtungen und Messungen fließen in die Erstellung von Weltraumwetterberichten ein (DLR 2025c). Weltraumwetterberichte zielen darauf ab, Ereignisse möglichst früh zu erkennen und gegebenenfalls zu warnen, sodass betroffene Bereiche Schutzmaßnahmen ergreifen können. Weltraumwetterberichte sind zum Beispiel über die Webseiten der

NOAA, der ESA⁵ oder auch des Helmholtz-Zentrums für Geoorschung (GFZ)⁶ zugänglich. Sie bieten Informationen über aktuelle Polarlichtaktivitäten, Sonnenstürme, Strahlungsausbrüche und geomagnetische Störungen sowie Prognosen über künftige Sonnenaktivitäten und die Auswirkungen auf das Erdmagnetfeld.

Vielfältige Beobachtungsdaten aus unterschiedlichen Quellen werden kombiniert und analysiert, um physikalische und empirische Modelle zu erstellen (DLR 2025c). Um Simulationen durchführen zu können, müssen unterschiedliche Computermodelle für verschiedene Systeme wie Sonnenoberfläche, Sonnenwind, Magneto-, Atmo- und Ionosphäre miteinander verknüpft werden. Das Ziel von Simulationen ist die Formulierung möglichst präziser Vorhersagen, die Eintrittszeitpunkte und regionale Auswirkungen umfassen (CORDIS 2022).

Klassifikation von Weltraumwetterereignissen und geomagnetischen Stürmen

Wie stark die jeweiligen Infrastruktursysteme betroffen sein können, hängt von der Stärke, der räumlichen Ausbreitung und der Dauer von Weltraumwetterereignissen ab. Geomagnetische Stürme werden derzeit anhand von drei unterschiedlichen Kategorien mit jeweils spezifischen Skalen klassifiziert (dpa 2024; NOAA National Weather Service 2023):

- R für Radiostörungen, ausgelöst durch Röntgenblitze (R-Skala);
- S für Strahlungseffekte, verursacht durch hochenergetische Teilchen (S-Skala);
- G für geomagnetische Effekte, ausgelöst durch Plasmawolken (G-Skala).

Eine weitere wichtige Größe ist der geomagnetische Kp-Index, der den Energieeintrag aus dem Sonnenwind in das Erdsystem beschreibt (Matzka et al. 2021) und zusammen mit der G-Skala genutzt wird, um die Stärke von geomagnetischen Stürmen zu beschreiben (Tabelle 1). Mittels Kp-Index werden weltweite Störungen des Erdmagnetfeldes bestimmt. Der Index lässt sich in Echtzeit und auf lokaler Ebene darstellen und reicht von 0 (ruhig) bis 9 (starker Sturm). Je größer der Wert in einer bestimmten Region der Erde ist, desto stärker ist dort die Chance, Polarlichter zu sehen.

Die internationale Forschung arbeitet daran, diese Klassifizierungssysteme kontinuierlich zu verbessern, um differenziertere Warnungen zu ermöglichen (dpa 2024) und auch extrem seltene Ereignisse, etwa Superstürme wie beim Carrington-Ereignis, erfassen zu können (Elvidge 2024).

¹ <https://punch.space.swri.edu/index.php>

² <https://space.fmi.fi/main/space-weather/>

³ <https://www.swpc.noaa.gov>

⁴ <https://www.spaceweather.gc.ca/index-en.php>

⁵ <https://swe.ssa.esa.int/de>

⁶ <https://spaceweather.gfz.de/de>

Tabelle 1 Klassifikation geomagnetischer Stürme und möglicher Auswirkungen

G-Stufe	Intensität	Kp-Index	mögliche Auswirkungen	durchschnittliche Häufigkeit pro Sonnenzyklus
G1	gering	5	geringe Auswirkungen auf Stromnetze, minimale Satelliteneffekte	1.700
G2	mäßig	6	Spannungsalarme im Stromnetz, Navigationsfehler, Polarlicht sichtbar	600
G3	stark	7	Schutzmaßnahmen bei Satelliten, unregelmäßige Navigation möglich	200
G4	schwer	8	wichtige Systeme gefährdet, HF-Funkprobleme, Polarflugumleitungen	100
G5	extrem	9	weitreichende Stromausfälle, Satellitenschäden, GNSS Totalausfälle	4

Quelle: NOAA National Weather Service 2023

Ebenso fehlt bislang ein einfach nachvollziehbares und einheitliches Warnsystem, um Betroffene schnell und verständlich zu informieren und gegebenenfalls zu alarmieren. Elvidge (2024, S. 271) schlägt eine Art Ampelsystem vor:

- gelbe Warnungen für Branchen wie Luftfahrt, Logistik und Landwirtschaft, die von kleineren geomagnetischen Stürmen und dem Ausfall von Navigationsdiensten betroffen sein könnten;
- orangefarbene Warnungen für Stromanbieter, um vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen und sich auf Unterbrechungen vorzubereiten;
- rote Warnungen bei besonders gefährlichen Ereignissen für Stromnetzbetreiber, Satellitenbetreiber und Katastrophenschutz, um sofort Notfallpläne umzusetzen, da gefährliches Weltraumwetter mit potenziell erheblichen Auswirkungen erwartet wird.

Nationale Aktivitäten und internationale Kooperationen

Die Beobachtung der Sonne und ihrer Aktivitäten ist Teil der Weltraumlagefähigkeiten. Weltraumlagefähigkeiten umfassen das möglichst aktuelle Wissen um den Zustand der (erdnahen) Weltraumumgebung. Neben der Beobachtung des Weltraumwettergeschehens gehören dazu auch Kenntnisse über erdnahe Asteroiden sowie alle menschengemachten Objekte in unterschiedlichen Erdumlaufbahnen (Bundesregierung 2023b, S. 9).

In Deutschland gibt es unterschiedliche Institutionen, die im Bereich der Grundlagenforschung zu Weltraumwetterphänomenen sowie für die Erstellung von Weltraumwetterinformationen tätig sind. Dazu gehören verschiedene Institutionen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), wie das Institut für Solar-Terrestrische Physik⁷ und das Ionosphere Monitoring and

Prediction Center⁸, das GFZ⁹, das unter anderem Datenprodukte für die Weltraumwetterdienste der ESA bereitstellt (Ehmler 2023), sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD), der Informationen zum Weltraumwetter im Allgemeinen bereitstellt und Fluggesellschaften spezifisch informiert (Leyser 2023).

Das Weltraumlagezentrum (WRLageZ) koordiniert alle Aktivitäten zur Weltraumwetterbeobachtung in Deutschland. Es wird seit 2009 vom Weltraumkommando der Bundeswehr¹⁰ und dem DLR gemeinsam betrieben (Eickmans 2024) und informiert bei Gefahrenlagen die betroffenen Nutzergruppen (Militär, Infrastrukturbetreiber, Unternehmen etc.). Diese Zusammenarbeit unterstreicht die enge Verknüpfung ziviler und militärischer Bedeutung des Weltraums. Bisher nutzt das WRLageZ vor allem Satellitendaten sowie Daten aus anderen Quellen wie beispielsweise dem GFZ. Perspektivisch sollen auch bodengebundene Beobachtungen der Sonnenaktivitäten des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie¹¹ für Vorhersagen einbezogen werden (Bundesregierung 2023b, S. 43). Das Lagezentrum soll in den kommenden Jahren weiter ausgebaut und international stärker vernetzt werden (Bundesregierung 2023b, S. 40; Gruppe Die Linke 2024, S. 5).

Bei der Erforschung und Vorhersage von Weltraumwetterphänomenen sind deutsche Institutionen auch in europäischen und internationalen Kooperationen und Netzwerken beteiligt (Kasten). In Europa nimmt die European Space Agency (ESA/ Europäische Raumfahrtagentur) eine zentrale Rolle bei der Koordinierung unterschiedlicher Weltraumaktivitäten europäischer Akteure ein mit dem Ziel, die gemeinsamen Weltraumlagefähigkeiten auszubauen, Forschung und Entwicklung zu fördern

⁸ <https://impc.dlr.de>

⁹ <https://www.gfz.de>

¹⁰ <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/luftwaffe/organisation/-weltraumkommando-der-bundeswehr>

¹¹ <https://www.bkg.bund.de/DE/Home/home.html>

⁷ <https://www.dlr.de/de/so>

sowie den Schutz vor Weltraumgefahren zu stärken. Dies wird unter anderem im Rahmen des Space Weather Service Network (SWESNET) realisiert, dessen weiterer Ausbau auch durch deutsche Partner, wie das GFZ und das DLR, vorangetrieben wird.¹²

Ausgewählte Beispiele für internationale Kooperationen

- Das DLR ist einer von neun Partnern im PECASUS-Konsortium, einem von vier seit 2019 von der International Civil Aviation Organization (ICAO/Internationale Zivilluftfahrtorganisation) betriebenen Weltraumwetterzentren, das Weltraumwettervorhersagen und Warnmeldungen für die zivile Luftfahrt liefert (Berdermann 2023; Mühlbauer et al. 2022).
- Deutschland trägt mit einem Auswertezentrum¹³, das unter anderem den Kp-Index bereitstellt, wesentlich zum internationalen INTERMAGNET-Verbund¹⁴ mit seinen globalen Messstationen bei (Mühlbauer et al. 2022).
- Weitere internationale Netzwerke sind die International Space Weather Initiative (ISWI) der Vereinten Nationen (UNOOSA 2025) und das International Space Environment Service (ISES) Network, das unter anderem seit Ende der 1990er Jahre regionale Warnzentren (RWC) betreibt (Thompson 1998).

Weiterentwicklung von Beobachtungsfähigkeiten als Zukunftsaufgabe

Mit zunehmenden Raumfahrtaktivitäten geht zweierlei einher: zum einen eine kontinuierliche Verbesserung der Beobachtungsfähigkeiten und des Wissensstandes über die Sonne und das Weltraumwetter, zum anderen der Ausbau der Weltrauminfrastruktur (Satellitensysteme, Raumsonden, Raumstationen), die anfällig für Weltraumwettereffekte ist. Derzeit gibt es noch erhebliche Wissenslücken in Bezug auf Ursachen und Wirkungskaskaden des Weltraumwetters (Lugaz 2025). Die zahlreichen Einflüsse geomagnetischer Stürme auf immer stärker vernetzte technische Systeme, auf Mensch und Umwelt sind bisher noch nicht umfassend verstanden.

Da komplexe Versorgungsstrukturen, wie Strom- und Kommunikationsnetze oder auf Navigationsdienste angewiesene Verkehrssysteme, von weltraumgebundenen Infrastrukturen abhängen, dient die Verbesserung von Weltraumlagefähigkeiten, einschließlich der Vorhersagefähigkeiten für Weltraumwetterereignisse, vor allem dazu, erdgebundene Infrastrukturen resi-

lienter zu gestalten und Gesundheits- und Umweltgefährdungen besser erfassen zu können.

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Zwar wurden hierzulande bisher keine unmittelbaren Schäden mit geomagnetischen Stürmen in Zusammenhang gebracht; da jedoch kritische Infrastruktursysteme in hohem Maße international vernetzt sind, steigt das potenzielle Schadensrisiko auch in Deutschland.

Mögliche wirtschaftliche Schäden

Industrienationen benötigen zuverlässig funktionierende Strom- und Kommunikationsnetze sowie vielfältige digitale Dienste. Bei Schäden oder Ausfällen einzelner Infrastruktursysteme können Unterbrechungen in Produktion und Logistik von Waren und Dienstleistungen die Folge sein und wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen.

Auf europäischer Ebene sowie in den USA und Kanada wurden bereits vor knapp 10 Jahren erste Analysen durchgeführt, um sowohl potenzielle Schäden an kritischer Infrastruktur durch Weltraumwetterereignisse zu ermitteln als auch den potenziellen Mehrwert von Investitionen in Weltraumwetterbeobachtungs- und -frühwarnsysteme abzuschätzen (Abt Associates 2017; HAL 2019; PwC 2016). Es wurde gefolgert, dass Investitionen in den weiteren Ausbau der Weltraumwetterdienste dazu beitragen können, potenzielle wirtschaftliche Schäden zu reduzieren. Die Wirtschaftsprüfungsgesellschaft PricewaterhouseCoopers (PwC 2016) errechnete ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1 zu 6,25 Euro für Europa. Für die USA hat die NOAA in verschiedenen Sektoren (Strom, Luftfahrt, GNSS, Satelliteninfrastruktur) Szenarien erstellt und Schadenssummen berechnet. Die Spanne reichte von Kosten im Haben von 400.000 US-Dollar in der nationalen Luftfahrt bei mäßigen Ereignissen bis 20 Mrd. US-Dollar im Stromsektor bei extremen Ereignissen (Abt Associates 2017). Eine ähnliche Studie wurde für Kanada durchgeführt. Neben der Abschätzung potenzieller wirtschaftlicher Schäden (zwischen circa 150 Mio. Euro und 35 Mrd. Euro)¹⁵ wurde untersucht, in welchen Sektoren (unter anderem Präzisionslandwirtschaft, Stromnetze, Satellitennavigationsdienste) besonderer Informationsbedarf für Weltraumwettervorhersagen besteht (HAL 2019).

Für Deutschland gibt es bisher keine Analysen, die explizit mögliche Risiken durch Weltraumwetterereignisse für Deutschland

¹² <https://swesnet.busoc.be/#swesnet>

¹³ <https://kp.gfz.de/>

¹⁴ Internationaler Verbund zur Erforschung des Erdmagnetfeldes

¹⁵ Die große Spanne ist darin begründet, dass drei unterschiedliche Szenarien in der zitierten Studie gerechnet wurden und jedes Szenario einen niedrigen und einen hohen Wert beinhaltet.



und damit verbundene Folgekosten abschätzen (Bundesregierung 2018).

Risiken für die Gesellschaft

Auch wenn das Risiko, dass die deutsche Gesellschaft unmittelbar von den Folgen eines extremen Sonnensturms betroffen ist, sehr gering einzuschätzen ist, lässt sich ein solches Ereignis nicht vollständig ausschließen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit liegt zwar deutlich unterhalb des Bereichs alltäglicher technischer oder klimatischer Risiken, ist jedoch höher als null.

Die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen durch erhöhte Röntgen- und UV-Strahlung betreffen nur kleine, spezialisierte Personengruppen, insbesondere Astronaut/innen, Pilot/innen und häufig fliegende Passagiere. Demgegenüber können die indirekten Folgen eines geomagnetischen Sturms, etwa kurzzeitige Störungen oder Ausfälle von Strom-, Kommunikations- und Navigationsnetzen, prinzipiell breitere Gesellschaftsbereiche betreffen.

Ein stunden- bis tagelanger Ausfall von Internet- und Telekommunikationsdiensten könnte dabei besonders weitreichende gesellschaftliche Folgen haben. Bankwesen und Zahlungsverkehr kämen zum Erliegen, sodass weder Privatpersonen noch Unternehmen oder öffentliche Institutionen ihre finanziellen Transaktionen abwickeln könnten. Auch digitale Arbeit und Bildung wären erheblich eingeschränkt, da Kommunikations- und Kollaborationsplattformen ausfielen. Öffentliche Verwaltungen könnten ihre digitalen Dienstleistungen nicht mehr anbieten und auch die Nachrichtenverbreitung, Warnsysteme und Krisenkommunikation wären zeitweise gestört (SRF News 2023).

Längere, mehrere Stunden bis Tage andauernde Unterbrechungen der Strom- oder Kommunikationsversorgung könnten in besonders sensiblen Bereichen wie Krankenhäusern, Wasserwerken oder im Lebensmittelsektor temporäre Versorgungsengpässe verursachen. In extremen Fällen könnten solche Störungen gesellschaftliche Unsicherheiten, Panikkäufe oder Desinformationsdynamiken auslösen. Vergleichbare Szenarien sind aus der Folgenabschätzung zu großflächigen Stromausfällen bekannt (TAB 2010). Bereits umgesetzte Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen (BBK o. J.a) mindern die Eintrittswahrscheinlichkeit deutlich.

In Deutschland ist davon auszugehen, dass durch bestehende technische Schutzmaßnahmen und Notfallpläne schwerwiegende Auswirkungen weitgehend begrenzt würden. Die Risiken für die Gesellschaft liegen somit weniger in der materiellen Schädigung, sondern vielmehr in sekundären sozialen Effekten, etwa durch Verunsicherung oder Fehlinformationen. Das ungewöhnliche Auftreten von Polarlichtern in Deutschland führte in Teilen der Bevölkerung zu spürbarer Verunsicherung (Beuchert 2024).

Vorrangig erscheint daher eine Sensibilisierung der Bevölkerung dafür, dass geomagnetische Stürme grundsätzlich auch technische Ausfälle von Strom- und Kommunikationsnetzen verursachen können, um entsprechenden Warnmeldungen und Verhaltensempfehlungen im Ernstfall die notwendige Aufmerksamkeit zu sichern.

Aktuelle Herausforderungen

Schwerwiegende geomagnetische Stürme treten extrem selten auf. Weil das Weltraumwetter erst seit rund 160 Jahren wissen-

schaftlich erforscht wird, gibt es bislang nur wenig empirische Evidenz über Superstürme und deren Folgen. Es lässt sich also nur schwer antizipieren, wann und mit welcher Stärke wieder ein geomagnetischer Sturm die Erde treffen wird (Riley 2012). Die Vorhersage künftiger Ereignisse erfordert also die Sammlung zusätzlicher Daten über das Weltraumwetter.

Um im Fall schwerwiegender Ereignisse kurzfristig Warnungen verbreiten zu können, auf die potenziell Betroffene rechtzeitig reagieren können, müssen Weltraumwetterphänomene (Eruptionen oder Masseauswürfe) möglichst schon zum Zeitpunkt ihres Entstehens erkannt und hinsichtlich ihrer Art, Stärke und ihrer möglichen Effekte klassifiziert werden. Hierbei kann eine Echtzeitanalyse, die durch Hochleistungsrechner möglich wird, unterstützen (ESA 2025). Weil jedoch die durch Eruptionen ausgesendete erhöhte Röntgenstrahlung und die extreme ultraviolette Strahlung nur rund 8 Minuten brauchen, um die Erde zu erreichen und Satelliten oder die Gesundheit exponierter Personen zu schädigen, bedarf es einer hinreichend genauen Antizipation von geomagnetischen Stürmen hinsichtlich ihres Eintrittszeitpunkts und ihrer geografischen Reichweite. KI-basierte Modellierungen und Vorhersagen, die in bestehende Modelle des Weltraumwetters integriert werden, können dabei unterstützen (Jarolim et al. 2023; Oxford 2025; Pultarova 2025).

Mit Simulationen von Weltraumwetterphänomenen soll vorhergesagt werden, wann, wo und wie stark ein geomagnetischer Sturm auftritt (Cander 2019, S. 135 ff.). Daraus lässt sich ableiten, welche Infrastruktursysteme konkret betroffen sein könnten. In Simulationen lässt sich auch abbilden, welche Effekte geomagnetische Stürme auf unterschiedliche kritische Infrastrukturen wie Energie, Satelliten und Luftfahrt haben können. So können Frühwarnsysteme verbessert und betroffene Stellen gezielter gewarnt werden. Dies ermöglicht, dass Infrastrukturbetreiber rechtzeitig geeignete Schutz- und Vorsorgemaßnahmen umsetzen (Kasten).

Beispiele für Maßnahmen zum Umgang mit aktuellen Herausforderungen

- Großbritannien nahm 2025 ein System zur besseren Vorhersage von Weltraumwetterereignissen und deren Folgen auf kritische Infrastrukturen wie Stromnetze, Eisenbahnschienen und Pipelines in Betrieb (Sidik 2025). Das System basiert auf unterschiedlichen Vorhersagemodellen sowie Messungen des lokalen Magnetfelds und soll bei Veränderungen nahezu in Echtzeit entsprechende Warnungen an die betroffenen Stellen abgeben (Beggan et al. 2025).
- In Neuseeland wurden 2023 die Auswirkungen geomagnetischer Stürme auf das Stromnetz simuliert (Mac Manus

et al. 2023). Es wurde festgestellt, dass bereits eine teilweise Abschaltung der Stromnetze zur Risikominimierung beiträgt. Ergänzend wurden weitere Schutzmaßnahmen implementiert, indem etwa bestimmte Transformatoren in das Stromnetz integriert wurden, um es robuster zu gestalten (Mac Manus et al. 2023, S. 15 f.).

- In den USA wurde im Mai 2024 erstmals eine Notfallübung durchgeführt, bei der die Bereitschaft und die Fähigkeit geprüft wurden, mit den Folgen eines extremen geomagnetischen Sturms umzugehen (Hale/Chapman 2025). Die Übung zeigte unter anderem, dass die Vorsorge noch verbessert werden kann, indem die Beobachtungs- und Vorhersagekapazitäten ausgebaut werden und die internationale Kooperation intensiviert wird (NASA et al. 2025, S. 37).

Verbesserte Grundlagenforschung, Ausbau der Vorhersagefähigkeiten und strategische Souveränität

Der erdnahe Weltraum ist für die wirtschaftliche, gesellschaftliche und militärische Handlungsfähigkeit sowie die staatliche Souveränität zunehmend bedeutsam (Verteidigungsausschuss 2024). Deshalb ist auch ein besseres Verständnis von Weltraumwetterphänomenen, den damit verbundenen Folgen sowie verbesserte Vorhersagefähigkeiten wichtig.

Die Verbesserung von Datengrundlagen, die Schließung bestehender Datenlücken sowie die Weiterentwicklung von Weltraumwettermodellen sind innerhalb der Grundlagenforschung besonders wichtig (Ishii et al. 2025). Dafür müssen unterschiedliche Datenquellen und Modelle miteinander verknüpft werden, zum Beispiel Daten und Modelle zu relevanten Phänomenen der Sonne und der Erde. Es besteht weitgehende Einigkeit, dass dafür die internationale Kooperation und der Informationsaustausch gestärkt werden sollten (Ishii et al. 2025). Ein Beispiel für die angestrebte Verbesserung der Datengrundlage ist die für 2031 geplante Vigil-Mission der ESA. Die Raumsonde soll auf einer permanenten Position zwischen Erde und Sonne kontinuierlich Sonnenaktivitäten beobachten und an das Weltraumwetternetzwerk der ESA übermitteln. Damit sollen potenziell gefährliche Sonnenstürme noch früher als bisher erkannt werden (DKKV 2024, S.4; Ishii et al. 2025; NASA et al. 2025).

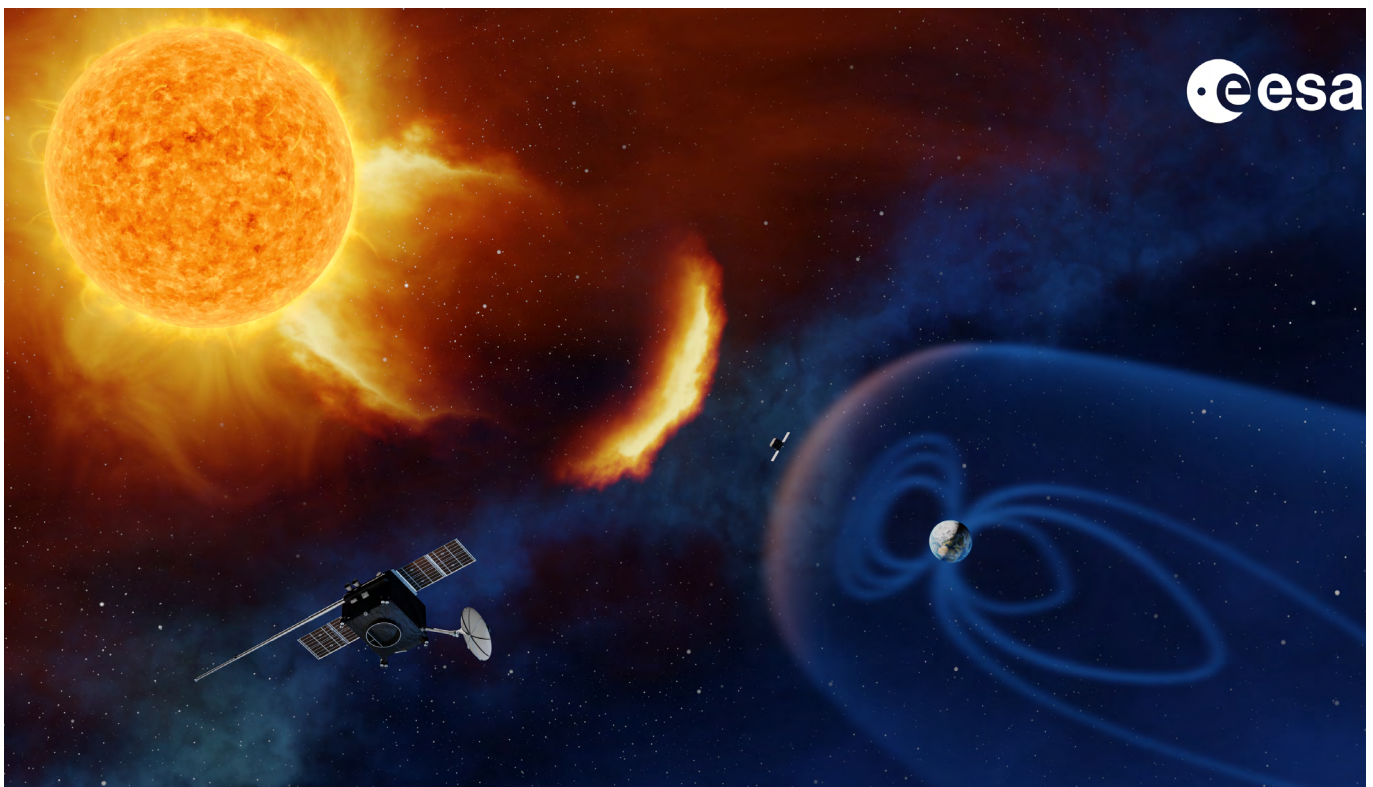
Unklar ist auch, ob und wenn ja, wie Weltraumwetterphänomene das Klima der Erde beeinflussen. Ein als Maunder-Minimum bezeichneter Zeitraum steht für eine circa 70-jährige Phase äußerst geringer Sonnenaktivität zwischen 1645 und 1715. Sie fiel zusammen mit der „Kleinen Eiszeit“ in Europa. Deshalb wird diskutiert, inwiefern eine geringere Sonnenaktivität zu niedrigeren Temperaturen auf der Erde geführt haben könnte (Berdermann 2023, S. 32; Cander 2019, S. 30). Beobachtungen der Sonnenaktivitäten 2008 und 2009 sowie der langsame Anstieg der Sonnen-

aktivitäten im 24. Sonnenzyklus ließen bislang vermuten, dass eine längere Phase von rund 30 Jahren mit insgesamt niedrigen Aktivitäten bevorsteht. Allerdings zeigen neueste Forschungen, dass sich dieser Trend möglicherweise bereits umgekehrt hat und die Sonne in eine Phase mit erhöhten Aktivitäten eintritt (Jasinski/Velli 2025). Vermutet wird, dass der mögliche Effekt des Weltraumwetters auf das Klima der Erde im Vergleich zum Effekt der anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen eher gering ist. Eine Abschwächung der Erderwärmung durch Phasen geringerer Sonnenaktivitäten vergleichbar mit der „Kleinen Eiszeit“ wird gegenwärtig nicht erwartet (Zharkova 2024).

Der weitere Ausbau von Beobachtungskapazitäten sowie die Ausweitung der Forschungsaktivitäten sind als Ziel der Bundesregierung in der Raumfahrtstrategie sowie in der nationalen Sicherheitsstrategie formuliert (Bundesregierung 2023a, S. 62 f. 2023b, S. 40). Inwieweit dies auch die Etablierung einer nationalen Koordinierungsstelle für die Koordinierung und Bündelung von Weltraumwetterforschungs- und -beobachtungsaktivitäten (Nationales Weltraumwetterzentrum; Mühlbauer et al. 2022, S. 3) umfasst, deren Aufgabengebiet über das des WRLageZ hinausreichen würde, ist offen (Ishii et al. 2025, S. 45). Denkbar ist auch eine engere Verknüpfung mit dem gemeinsam von Bund und Ländern eingerichteten Gemeinsamen Kompetenzzentrum Bevölkerungsschutz (GeKoB) (BBK 2022), um mögliche zukünftige gesellschaftliche und wirtschaftliche Schäden durch Weltraumwetterereignisse präventiv einzugrenzen. Dazu bedarf es einer rechtzeitigen, nachvollziehbaren Warnung für die am stärksten betroffenen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und öffentlichen

Bereiche sowie einer ausreichenden langfristigen Vorbereitung (Bewusstmachung, Aufstellen von Notfallplänen, Übungen und Ähnliches). Etliche der zuvor genannten Effekte und Schäden könnten auch bei anderen Naturkatastrophen eintreten, sodass entsprechende Empfehlungen, beispielsweise des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, helfen können, sich auf die Folgen von Weltraumwetterereignissen vorzubereiten (BBK o. J.b). Daten aus dem Weltraumlagezentrum könnten in das Lagebild Bevölkerungsschutz integriert werden, um dezidierte Empfehlungen und präventive Maßnahmen ableiten zu können. Das GeKoB könnte auch bei der Bewertung potenzieller Folgen geomagnetischer Stürme unterstützen.

Mit der Verbesserung der nationalen Kenntnisse und Kompetenzen in Bezug auf Weltraumwetterphänomene könnte Deutschland seine strategische Souveränität und seinen Beitrag in der Zusammenarbeit mit der ESA stärken. Deutschland und Europa könnten die bestehenden Abhängigkeiten im Hinblick auf Informationen zur Weltraumlage im Allgemeinen und zu Weltraumwetterphänomenen im Besonderen sowie mit Blick auf Infrastrukturen zur Weltraumbeobachtung reduzieren, die gegenwärtig vor allem in den USA durch die NOAA und die NASA zur Verfügung gestellt werden. Derzeit ist unklar, ob und wie diese Institutionen ihre internationalen Aktivitäten weiter aufrecht erhalten und wie deren finanzielle Ausstattung zur Durchführung relevanter Forschungsarbeiten und Datenbereitstellung unter der gegenwärtigen Regierung in den USA gewährleistet wird. Ähnliches gilt für Russland, das bislang noch in internationalen Kooperationen Daten über Sonnenaktivitäten teilt und plant,



eigene Beobachtungskapazitäten weiter auszubauen (Ishii et al. 2025, S. 50). Inwiefern Russland diese Kooperationen auf internationaler Ebene künftig fortsetzt, ist unklar.

Die im November 2025 veröffentlichte Weltraumsicherheitsstrategie dürfte dazu beitragen, dass die Bundesregierung der Bedeutung des Weltraums im Allgemeinen und der Erforschung des Weltraumwetters im Besonderen verstärkt Priorität einräumt. So ist unter anderem die Schaffung eines nationalen und europäischen Weltraumwetterberatungsservices im WRLageZ als ein strategisches Handlungsfeld formuliert (Bundesregierung 2025, S. 41). Damit könnte ein Rahmen geschaffen werden, der sowohl die internationale Zusammenarbeit als auch die nationale Forschungsförderung in diesem Bereich langfristig stärkt.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Das Themenkurzprofil bietet einen kompakten Überblick über Weltraumwetterphänomene, damit verbundene Herausforderungen, vor allem in Bezug auf die Vorhersage künftiger Ereignisse und möglicher Schäden, sowie zu Schutzmaßnahmen insbesondere für kritische Infrastrukturen. Die Relevanz der Thematik scheint von den zuständigen politischen Institutionen (Bundesregierung, Ministerien und nachgelagerte Behörden) erkannt worden zu sein. Die nationale Weltraumsicherheitsstrategie, die in der aktuellen Raumfahrtstrategie verankerte Fortsetzung der Erforschung des Weltraumwetters und die geplante Durchführung einer vertieften Bedarfsanalyse zu Weltraumwetterinformationen dürften in den nächsten Jahren weitere wichtige Informationen zu Weltraumwetterphänomenen und möglichen Folgen liefern, die dann voraussichtlich auch eine bessere Abschätzung technischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Auswirkungen erlauben werden. Eine vertiefte Analyse des Themas durch das TAB erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vordringlich.

Literatur

- Abt Associates (2017): Social and Economic Impacts of Space Weather in the United States. Final Report. Bethesda
- BABS (2020): Sonnensturm. Gefährdungsdossier. Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Bern
- Baker, H. (2025): How many satellites orbit Earth? Live-Science, www.livescience.com/how-many-satellites-orbit-earth (29.10.2025)
- BBK (o. J.a): Stromausfall. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/KRITIS-Gefahrenlagen/Stromausfall/stromausfall_node.html (29.10.2025)
- BBK (o. J.b): Vorsorgen für Krisen und Katastrophen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Vorsorge/vorsorge_node.html (29.10.2025)
- BBK (2022): Gemeinsames Kompetenzzentrum Bevölkerungsschutz – Aufgabenportfolio. Anlage zur „Vereinbarung des Bundes und der Länder über die Errichtung des Gemeinsamen Kompetenzzentrums Bevölkerungsschutz“ vom 2. Juni 2022. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, o. O.
- Beggan, C. D. et al. (2025): Implementing an Operational Cloud-Based Now- and Forecasting System for Space Weather Ground Effects in the UK. In: Space Weather 23(5), Art. e2025SW004364, <https://doi.org/10.1029/2025SW004364>
- Berdermann, J. (2023): Das Weltraumwetter. Ursprung und Auswirkungen auf unsere technologisierte Gesellschaft. Vortrag. Bundesweite Wilhelm und Else Heraeus-Lehrerfortbildung zur Astronomie. Heidelberg, 9.11.2023, https://elib.dlr.de/200057/1/20231109_BfA_Heidelberg_Berdermann_Final.pdf (29.10.2025)
- Berdermann, J.; Banys, D. (2023): Consequences of transient solar events for our technological infrastructure and observational requirements to mitigate their impact. Vortrag. Cosmic evolution of matter on all scales – Annual meeting of the Astronomische Gesellschaft. Berlin, https://elib.dlr.de/200071/1/20230915_AG_Berlin_Solar_Berdermann.pdf (29.10.2025)
- Berdermann, J.; Schmölter, E. (2023): Impact of space weather on navigation and communication services used in aviation. Poster. 19th European Space Weather Week. Toulouse,

- https://elib.dlr.de/200053/1/POSTER_ESWW2023_DLR-SO_Berdermann_Final.pdf (8.9.2025)
- Beuchert, T. (2024): Wenn der Himmel zu glühen scheint. Max-Planck-Gesellschaft, <https://www.mpg.de/21927472/polarlichter-in-sueddeutschland> (29.10.2025)
 - Bundesregierung (2018): Auswirkungen von Weltraumwetter auf elektrotechnische Infrastruktur. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, Dr. Gesine Löttsch, Lorenz Gösta Beutin, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 19/360 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/493, Berlin
 - Bundesregierung (2023a): Integrierte Sicherheit für Deutschland. Nationale Sicherheitsstrategie. Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Berlin
 - Bundesregierung (2023b): Raumfahrtstrategie der Bundesregierung. Berlin
 - Bundesregierung (2025): Weltraumsicherheitsstrategie. Berlin
 - Cander, L. R. (2019): Ionospheric Space Weather. Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99331-7>
 - Cliver, E. W.; Dietrich, W. F. (2013): The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. In: Journal of Space Weather and Space Climate 3, Art. A31, <https://doi.org/10.1051/swsc/2013053>
 - CORDIS (2022): Können wir die Erde vor Weltraumwetter schützen? Community Research and Development Information Service der Europäischen Kommission, <https://cordis.europa.eu/article/id/442605-can-we-protect-earth-from-space-weather/de> (29.10.2025)
 - Debnath, S. (2025): Origin of Space Weather, Radiation, and Its Impact on Planetary Bodies in the Solar System. Preprints. org, <https://doi.org/10.20944/preprints202503.2169.v1>
 - DKKV (2024): Weltraumgefahren. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V. Newsletter 1/2024, Bonn
 - DLR (o. J.): Der Sonnenzyklus. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/weltraumwetter/der-sonnenzyklus> (29.10.2025)
 - DLR (2025a): Auswirkungen auf Mensch, Technik und Infrastruktur. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/weltraumwetter/auswirkungen-auf-mensch-technik-und-inf-rastruktur> (29.10.2025)
 - DLR (2025b): Polarlichter – die Besonderheit der Polregionen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/weltraumwetter/polarlichter-die-besonderheit-der-polregionen> (8.9.2025)
 - DLR (2025c): Weltraumwetterbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/weltraumwetter/weltraumwetterbericht> (8.9.2025)
 - dpa (2024): Experte fordert Skala für Weltraumwetter-Warnungen. Süddeutsche.de, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/astronomie-experte-fordert-skala-fuer-weltraumwetter-warnungen-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-240616-99-413942> (29.10.2025)
 - Earth Observatory (o. J.): World of Change: Solar Activity. Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/Solar> (29.10.2025)
 - Ehmler, M. (2023): Weltraumwetterservices: Wichtige Beiträge des GFZ für die ESA. GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung, <https://www.gfz.de/presse/meldungen/detailansicht/weltraumwetterservices-wichtige-beitraege-des-gfz-fuer-die-esa> (29.10.2025)
 - Eickmans, M. (2024): Das Weltraumlagezentrum in Uedem. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. <https://www.dlr.de/de/ar/themen-missionen/weltraumsicherheit/weltraumlagezentrum> (8.9.2025)
 - Elvidge, S. (2024): Space weather can affect our daily lives – we need a better warning system. In: Nature 630(8016), S. 271, <https://doi.org/10.1038/d41586-024-01715-z>
 - ESA (2025): Supercomputing powers for space weather models. European Space Agency, https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/Supercomputing_powers_for_space_weather_models (29.10.2025)
 - ESA/Science Office (2018): Weltraumwetter: Die zerstörerische Kraft der Sonne. European Space Agency, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Weltraumwetter_Die_zerstoererische_Kraft_der_Sonne (20.11.2025)

- Facskó, G. et al. (2024): Space Weather Effects on Critical Infrastructure. In: Kovács, T. A. et al. (Hg.): Critical Infrastructure Protection in the Light of the Armed Conflicts. Cham, S. 45–56, https://doi.org/10.1007/978-3-031-47990-8_5
- Fleck, B. (o. J.): Fact Sheet. SOHO. European Space Agency, o. O.
- Gentner, A.; Kernn, J. (2025): Ausflug ins Weltraumwetter – Der aktuelle Sonnenzyklus 25. Deutscher Wetterdienst, https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2025/5/28.html (29.10.2025)
- Green, J. L.; Boardsen, S. (2006): Duration and extent of the great auroral storm of 1859. In: Advances in space research 38(2), S. 130–135, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.08.054>
- Gruppe Die Linke (2024): Nationales Weltraumgesetz und militärische Sicherheitsstrategie. Kleine Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, weiterer Abgeordneter und der Gruppe Die Linke. Deutscher Bundestag, Drucksache 20/12014, Berlin
- Günzkofer, F. L. (2024): Impact of High-Latitude Atmosphere-Ionosphere Coupling on the Space Weather. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Physik, https://edoc.ub.uni-muenchen.de/33661/1/Guenzkofer_Florian_Ludwig.pdf (29.10.2025)
- Hale, T.; Chapman, M. (2025): The US Ran A Solar Storm Emergency Drill And It Suggested The Real Thing Would Be Catastrophic. IFLScience, <https://www.iflscience.com/the-us-ran-a-solar-storm-emergency-drill-and-it-suggested-the-real-thing-would-be-catastrophic-79302> (29.10.2025)
- Hellweg, C. et al. (2018): Strahlenrisiko auf Langzeitraumflügen. In: Flugmedizin Tropenmedizin Reisemedizin 25(05), S. 205–212, <https://doi.org/10.1055/a-0748-7956>
- Hickling Arthurs Low Corporation (2019): Space Weather Socioeconomic Impact Study on Canadian Infrastructure. Final Report. Hickling Arthurs Low Corporation, Ottawa
- Ishii, M. et al. (2025): Global landscape of space weather observations, research and operations. Advances in Space Research, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.06.021>
- Jarolim, R. et al. (2023): Probing the solar coronal magnetic field with physics-informed neural networks. In: Nature Astronomy 7(10), S. 1171–1179, <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02030-9>
- Jasinski, J. M.; Velli, M. (2025): The Sun Reversed Its Decades-long Weakening Trend in 2008. In: The Astrophysical Journal Letters 990(2), Art. L55, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adf3a6>
- Johnson-Groh, M. et al. (2025): What NASA Is Learning from the Biggest Geomagnetic Storm in 20 Years. National Aeronautics and Space Administration, <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/what-nasa-is-learning-from-the-biggest-geomagnetic-storm-in-20-years/> (15.10.2025)
- Jyothi, S. A. (2021): Solar superstorms: Planning for an Internet Apocalypse. In: Kuipers, F.; Caesar, M. (Hg.): Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. Virtual Event USA, 23.–27.8.2021, New York, S. 692–704
- Kauristie, K. et al. (2024): The Arctic Space Weather Demonstrator in the European Accelerators Programme. Finnish Meteorological Institute; Norwegian Mapping Authority; Norwegian Space Agency, o. O.
- Kluger, J. (2024): We Dodged Disaster With This Solar Storm. Here's What to Know for the Next One. Time, <https://time.com/6977541/solar-storms-2024/> (29.10.2025)
- Kremer, K. (2014): Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) to Maintain Critical US Space Weather Alert Capabilities. AmericaSpace, <https://www.americaspace.com/2014/11/08/deep-space-climate-observatory-dscovr-to-maintain-critical-us-space-weather-alert-capabilities/> (29.10.2025)
- Lagg, A. et al. (2011): Wie funktioniert ein Sonnenfleck? Forschungsbericht 2011. Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, <https://www.mpg.de/4687717/sonnenflecken-ursache> (29.10.2025)
- Leyser, A. (2023): Weltraumwetter. Deutscher Wetterdienst, https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2023/9/24.html (29.10.2025)
- Lugaz, N. (2025): Space Weather Into the 2030s: The 2024 Solar and Space Physics Decadal Survey. In: Space Weather 23(2), Art. e2025SW004361, <https://doi.org/10.1029/2025SW004361>
- Lühr, H. (2014): Magnetfeld/Weltraumwetter. In: Becker, A. et al. (Hg.): Forschungsfeld Naturgefahren. Offenbach am Main, S. 92–97

- Mac Manus, D. H. et al. (2023): Geomagnetically Induced Current Mitigation in New Zealand: Operational Mitigation Method Development With Industry Input. In: Space Weather 21(11), Art. e2023SW003533, <https://doi.org/10.1029/2023SW003533>
- Matzka, J. et al. (2021): The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. In: Space Weather 19(5), Art. e2020SW002641, <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- May, A.; Dobrijevic, D. (2022): Space weather: What is it and how is it predicted? Space.com, <https://www.space.com/space-weather> (29.10.2025)
- Maynard, T. et al. (2013): Solar Storm Risk to the North American Electric Grid. Lloyds; Atmospheric and Environmental Research, o. O.
- Mühlbauer, S. et al. (2022): Empfehlungen zum Ausbau der deutschen Weltraumwetter-Fähigkeiten und Kapazitäten in einem koordinierten Ansatz. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie et al., Bad Kötzing
- NASA et al. (2025): Space Weather Tabletop Exercise. After-action Report. National Aeronautics and Space Administration; NOAA National Weather Service; National Science Foundation; Federal Emergency Management Agency; Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, o. O.
- NASA Science Editorial Team (2019): 10 Things to Know About the Ionosphere. National Aeronautics and Space Administration, <https://science.nasa.gov/earth/10-things-to-know-about-the-ionosphere/> (29.10.2025)
- NOAA National Weather Service (2023): NOAA Space Weather Scales. o. O.
- ÖAW-ITA (2024): Sonnenstürme und Weltraumwetter. Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien
- Oxford, C. (2025): IBM and NASA launch Surya AI model to forecast solar storms and safeguard technology. SpaceDaily, https://www.spacedaily.com/reports/IBM_and_NASA_launch_Surya_AI_model_to_forecast_solar_storms_and_safeguard_technology_999.html (29.10.2025)
- Podbregar, N. (2024): Sonnensturm reichte bis in die Tiefsee. Magnetfeldstörungen veränderten selbst Kompass in 2.700 Meter Meerestiefe. Scinexx, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/sonnensturm-reichte-bis-in-die-tiefsee/> (29.10.2025)
- Public Safety Canada (2013): Canadian Disaster Database. Government of Canada, <https://cdd.publicsafety.gc.ca/dtpg-eng.aspx?cultureCode=fr-Ca&dynamic=false&eventId=1043> (29.10.2025)
- Pultarova, T. (2025): Meet Surya, the 1st-of-its-kind AI model NASA and IBM built to predict solar storms. Space.com, <https://www.space.com/astronomy/sun/meet-surya-the-1st-of-its-kind-ai-model-nasa-and-ibm-built-to-predict-solar-storms> (29.10.2025)
- PwC (2016): Space Weather Study Results. PricewaterhouseCoopers, o. O.
- Rauner, M. (2009): Die Hölle kommt vom Himmel. Die Zeit, <https://www.zeit.de/zeit-wissen/2009/05/Sonnensturm/> (29.10.2025)
- Riley, P. (2012): On the probability of occurrence of extreme space weather events. In: Space Weather 10(2), Art. S02012, <https://doi.org/10.1029/2011SW000734>
- Sidik, S. (2025): U.K. space weather prediction system goes operational. In: Eos 106, <https://doi.org/10.1029/2025EO250229>
- Space Foundation (2025): The Space Briefing Book 2025. A Reference Guide to Modern Space Activities. Colorado Springs
- SRF News (2023): Was wäre, wenn morgen das Internet ausfällt? Schweizer Radio und Fernsehen, <https://www.srf.ch/news/srf-news-chats/antworten-auf-ihre-fragen-was-waere-wenn-morgen-das-internet-ausfaellt> (29.10.2025)
- Sun, A. K. et al. (2021): Markov chain-based stochastic modeling of deep signal fading: Availability assessment of dual-frequency GNSS-based aviation under ionospheric scintillation. In: Space Weather 19(9), Art. e2020SW002655 <https://doi.org/10.1029/2020SW002655>
- TAB (2010): Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. Endbericht zum TA-Projekt (Autor/innen: Petermann, T. et al.). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Arbeitsbericht 141, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000103291>

- Teng, C.-K.-M. et al. (2021): Impact of Solar Activity on Global Atmospheric Circulation Based on SD-WACCM-X Simulations from 2002 to 2019. In: Atmosphere 12(11), Art. 1526, <https://doi.org/10.3390/atmos12111526>
- Thompson, R. J. (1998): The International Space Environment Service. Vortrag. ESA Workshop on Space Weather. European Space Agency, Noordwijk, https://swe.ssa.esa.int/TECEES/spweather/workshops/proceedings_w1/SESSION4/thompson_ises.pdf (29.10.2025)
- UK Health Security Agency (2025): What is space weather, and why are we monitoring it? <https://ukhsa.blog.gov.uk/2025/03/13/what-is-space-weather-and-why-are-we-monitoring-it/> (29.10.2025)
- UNOOSA (2025): International Space Weather Initiative (ISWI). United Nations Office for Outer Space Affairs, <https://www.unoosa.org/oosa/sk/ourwork/psa/bssi/iswi.html> (29.10.2025)
- Verteidigungsausschuss (2024): Experten: Müssen im Weltraum verteidigen und abschrecken können. Deutscher Bundestag, <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2024/kw39-pa-verteidigung-weltraumsicherheitsstrategie-1014392> (29.10.2025)
- Zharkova, V. (2024): Modern Grand Solar Minimum and its Impact on the Terrestrial Environment. In: Science of Climate Change 4(3), S. 137–141, <https://doi.org/10.53234/scc202412/31>

Herausgeber

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)

Bildnachweise

Iurii Garmash/iStock (S. 1); Oleksandr Pokusai/AdobeStock (S. 5)
Nitrogliserin/iStock (S. 5); ljphoto7/iStock (S. 9);
ESA Standard Licence (S. 11)

ISSN: 2629-2874

DOI: 10.5445/IR/1000191040

Horizon SCANNING

Das Horizon-Scanning ist Teil der Foresight-Aktivitäten des
TAB und wird vom Institut für Innovation und Technik (iit) in
der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH durchgeführt.

www.tab-beim-bundestag.de/horizon-scanning