

Empfehlungen zum Ausbau der deutschen Weltraumwetter-Fähigkeiten und Kapazitäten in einem koordinierten Ansatz

Basierend auf den Ergebnissen des Fünften Nationalen Weltraumwetter-Workshops vom 21.-23. September 2021, zusammengestellt von der deutschen Weltraumwetter-Expertengemeinschaft

Vorwort

Das Weltraumwetter umfasst eine Reihe von natürlich vorkommenden Phänomenen, die primär durch die Sonne, aber auch durch weitere Quellen, wie z.B. der galaktischen kosmischen Strahlung, ausgelöst werden. Es hat dabei **direkte Auswirkungen auf die modernen Infrastrukturen**¹ unserer Gesellschaft. Zu der Vielzahl dieser heute alltäglich verwendeten Infrastrukturen gehören Stromnetze, Funkkommunikation (Flug- und Schiffsverkehr), satellitengestützte Navigation und Kommunikation, militärische Anwendungen, Zeitsynchronisation und die globale Vernetzung durch das Internet. Aber auch der Betrieb von Wetter- und Erdbeobachtungssatelliten, u.a. zur Erfassung, Vorhersage und Erforschung von Extremwetter-Ereignissen, Naturkatastrophen und des Klimawandels kann von Weltraumwetter-Ereignissen betroffen sein. Schwächere Ereignisse können stündlich bis täglich auftreten, katastrophale deutlich seltener, alle Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Diese Aspekte werden in den kommenden Jahren mit der weiteren Erschließung des erdnahen Weltraums und den geplanten Explorationen von Mond und Mars von zunehmender Bedeutung sein.

Weltraumwetter mit den o.a. komplexen Auswirkungen ist noch immer eine junge Wissenschaftsdisziplin. Ein kontinuierlich wachsendes Verständnis der Entstehung und Auswirkungen von Weltraumwetter-Ereignissen durch **dedizierte nationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte**, auch auf multinationaler Ebene, wird daher zum Schutz der Infrastruktur, nationalen Sicherheit, Gesellschaft und Wirtschaft der Bundesrepublik Deutschland einen entscheidenden Beitrag leisten. Dafür muss die gesamte physikalische Prozesskette zwischen Sonne und erdnahem Weltraum bzw. Erdoberfläche in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung sowie in den angewandten Wissenschaften betrachtet werden. Dies umfasst die entsprechenden gekoppelten Bereiche von der Sonne in den interplanetaren Raum, bis hin zur Magnetosphäre, Plasmasphäre, Ionosphäre, Thermosphäre und unteren Atmosphäre der Erde.

Durch die **zunehmende Verwendung komplexer Technologien**, z.B. in der Satelliten-Kommunikation bei der Verbreitung präziser Zeitsignale für den Finanzsektor² sowie für unsere nationalen Sicherheitskräfte, wird die Thematik des Weltraumwetters in den nächsten Jahrzehnten eine Schlüsselrolle spielen.

¹ Wie würde ein Tag ohne Raumfahrt aussehen – [Video](#) (YouTube), Deutsche Raumfahrtagentur im DLR

² Beispiel-[Studie](#) zum Resilienzaufbau für den Finanzsektor in UK

Besondere Aufmerksamkeit muss den Auswirkungen auf betroffene Systeme gelten, insbesondere der Sicherstellung der Energieversorgung (Umspannwerke, Transformatoren) sowie aufstrebenden Neuentwicklungen wie im Bereich des autonomen Fahrens und der e-Mobilität. Die Kommerzialisierung des erdnahen Weltraums geht einher mit einer rasanten Zunahme von Kleinsatelliten, die oft keinen oder nur geringen Systemschutz gegenüber Weltraumwetter-Gefahren haben³. Dies erfordert ein verbessertes Warnmanagement für zivile und militärische Infrastrukturen.

Damit stellen die Effekte des Weltraumwetters eine direkte Gefährdung unserer sicherheitspolitischen und ökonomischen Interessen dar, mit geschätzten Schäden in Milliardenhöhe bei extremen Weltraumwetter-Ereignissen⁴. Vor allem die Möglichkeit von Ausfällen essentieller Dienste wie Strom- und Wasserversorgung, Kommunikation und Transport bedeutet für die Bevölkerung ernstzunehmende Katastrophenszenarien. Die Minimierung solcher Risiken durch die Entwicklung geeigneter Schutzmaßnahmen ist ein wesentlicher Bestandteil zur Stärkung der **nationalen wie globalen Resilienz**. Daher wird bereits weltweit in multinationalen Kooperationen an Strategien zur zukünftigen operationellen Beobachtung des Weltraumwetters und seiner Vorhersage gearbeitet.

Weltraumwetter-Ereignisse, wie u.a. Sonnenstürme, wurden bereits von anderen Industrienationen in **nationale Risikobewertungen** (siehe [UK](#)) aufgenommen bzw. per Gesetz als von großem, nationalem Interesse eingestuft (siehe [USA](#)). In Deutschland erfolgte eine Studie im Auftrag des BMVg zu einer Risikobewertung von Weltraumwetter-Ereignissen bisher nur aus militärischer Sicht. Die daraus resultierenden Risikomatrizen und Kataloge dienen der Beschreibung der Auswirkungen und Wahrscheinlichkeiten für Katastrophenfälle, vergleichbar zum Vorgehen im Falle von Pandemien.

[Weltraumwetter-Strategie für Deutschland](#)

Die Nachfrage nach operationellen Warnungen und Informationen zum Weltraumwetter wächst mit fortschreitender technischer Entwicklung stetig. Die Bundesrepublik Deutschland ist bereits in eine Vielzahl von Gremien wissenschaftlicher und politischer Natur zum Thema eingebunden. Auch die deutsche Wissenschaftsgemeinschaft im Bereich Weltraumwetter umfasst eine Vielzahl von international führenden Wissenschaftlern und Einrichtungen. Gleiches gilt für in Deutschland entwickelte Technologie; so markieren für die Beobachtung und Vorhersage von Weltraumwetter-Ereignissen essentielle Instrumente und Sensoren teils den aktuellen internationalen Stand der Technik, z.B. weltraumgestützte Sonnen-Magnetographen, Teilchenteleskope und Kameras zur Erfassung von Sonnenstürmen.

³ SpaceX Starlink verliert am 04.02.2022 in geomagnetischem Sturm Dutzende neu gestarteter Satelliten (z.B. bei [heise](#) oder [SpaceNews](#)).

⁴ Beispiel-[Studie](#) zu Auswirkungen von Weltraumwetter-Ereignissen aus USA

Doch es fehlt an einer dringend erforderlichen **Nationalen Gesamtstrategie**, die im Einklang mit der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung steht. UK und USA haben erst kürzlich Strategien in Kombination mit Meilensteinplänen, sogenannten Roadmaps, veröffentlicht. Diese sind mit konkreter politischer Unterstützung und Finanzierung unterlegt. An diesen auf mehrere Jahre ausgelegten Visionen sollte sich Deutschland orientieren, um die Gesellschaft optimal vor eingreifenden Auswirkungen von Weltraumwetter-Ereignissen zu schützen.

Um Forschung, Entwicklung und den Weg zum 24/7 Betrieb von Weltraumwetter-Diensten voranzutreiben, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Aktivitäten und **Kooperationen durch nationale und internationale Organisationen** initiiert⁵. Auch die Forschungsprogramme der ESA mit der [Vigil Mission](#) (vormals Lagrange-Mission) im Space Safety Programme ([S2P](#)) und der Europäischen Union ([Horizont Europa](#)) sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Weltraumwetter wird ebenfalls im EU-Raumfahrtprogramm thematisiert und wurde auf dem Weltraumgipfel 2022 explizit unter „Schutz der Weltraumressourcen“ integriert. Die Bundesrepublik Deutschland ist in diesen Gremien als Mitgliedsstaat oder durch ihre entsandten Experten vertreten.

Die oftmals herausragenden Arbeiten in all diesen Forschungsgruppen werden jedoch vielfach nicht angemessen gefördert, sondern basieren auf dem persönlichen Engagement der beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen. Wir empfehlen daher dringend die Forschung an deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen zum Thema Weltraumwetter im Rahmen **Nationaler Forschungsprogramme** finanziell hinreichend auszustatten und national koordiniert voranzutreiben, um die Fortsetzung hervorragender Beiträge deutscher Wissenschaftler zu den globalen Anstrengungen im Bereich Weltraumwetter und die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Sorgfältig und aufwendig in diesem aktuellen und multidisziplinären Gebiet ausgebildete wissenschaftliche Nachwuchskräfte müssen für Deutschland erhalten bleiben. Einer Abwanderung aufgrund fehlender Finanzierung muss entgegengewirkt werden.

Es gilt die deutsche Weltraumwetter-Interessengemeinschaft gesamtheitlich zu organisieren. Auch der Gesetzgeber, Verantwortliche aus den Ressorts und direkt Betroffene, z.B. aus der Wirtschaft müssen informiert und Vorsorgemaßnahmen initiiert und koordiniert werden. Ein international gut vernetztes **Nationales Weltraumwetter-Zentrum** soll deutsche Kompetenzen und Fähigkeiten bündeln und zudem einen Nationalen Weltraumwetter-Dienst unter Nutzung und Einbindung der vorhandenen Weltraumwetter-Beiträge⁶ der verschiedenen Ressorts unterstützen.

⁵ Z.B. „Committee on Space Research“ (COSPAR) mit „Int’l Space Weather Action Teams“ ([ISWAT](#)), „Int’l Space Weather Initiative“ ([ISWI](#)) der Vereinten Nationen, Weltraumwetter-Expertengruppe im „Committee on the Peaceful Uses of Outer Space“ ([COPUOS](#)), „Int’l Association of Geodesy“ ([IAG](#)), World Meteorological Organization ([WMO](#)), ressortgemeinsames Weltraumlagezentrum von BMVG und BMWK (WRLageZ)

⁶ z.B. Weltraumwetterberatungszentrale des ressortgemeinsamen Weltraumlagezentrums von BMVG und BMWK sowie das Institut für Solar-Terrestrische Physik des DLR

Dies ist ein notwendiger Schritt, um den wachsenden nationalen Bedarf an Weltraumwetter-Informationen zu bedienen sowie die Resilienz von Gesellschaft und Wirtschaft in Kooperation mit unseren internationalen Partnern zu stärken. Dieses Weltraumwetter-Zentrum bietet durch kontinuierlichen Austausch mit Industrie und potentiellen nationalen Bedarfsträgern sowie einem Vergleich auf internationaler Ebene die Möglichkeit, einen Regelungsbedarf bezüglich der Weltraumwetter-Anfälligkeit aktueller und zukünftiger Technologien zu sichern. Austauschplattformen wie etwa Messen oder Workshops mit Vertretern der betroffenen Industriebereiche können zusätzlich zu einer umfassenden Bedarfsermittlung beitragen.

Parallel gilt es einen **Nationalen Weltraumwetter-Dienst** zur Koordinierung von Erfassung und Warnung vor Weltraumwetter-Gefahren aufzubauen. Zurzeit werden bereits hoheitliche und militärische Nutzer mit Warnungen und Beratungskapazitäten durch eine im Aufbau befindliche Weltraumwetter-Beratungszentrale des ressortgemeinsamen Weltraumlagezentrums von BMVg und BMWK bedient. Eine umfassende nationale Bedarfsanalyse befindet sich in der Vorbereitung. Eine Steuerungsgruppe aus Vertretern aus Forschung, Koordination, Betrieb und mittelfristig auch Industrie soll bei der Umsetzung des Dienstes ein integraler Bestandteil des Implementierungs- und Strategiefindungsprozesses sein. Der Dienst bietet weiterhin eine Plattform, um Rückmeldung aus Politik, Behörden, Industrie und Gesellschaft zu benötigten Informationen, Produkten und Services auf direktem Wege zu erhalten⁷.

Die Verbesserung der operativen Fähigkeiten bzgl. Vorhersage und Warnung muss vehement vorangetrieben werden, dazu bedarf es dedizierter **Weltraumwetter-Sensorik**. Die Überwachung und Verfolgung der gesamten Kette von der Sonne zur Erde ohne nennenswerte Unterbrechungen mit operativen Weltraummissionen ergänzt durch bodengebundene Observatorien und Messstationen muss sichergestellt werden (siehe Anhang 1). Im Hinblick auf das bevorstehende Maximum des Sonnenzyklus ist die Vigil Mission der ESA von besonderer Bedeutung. Diese soll mit einem deutschen Magnetographen ausgestattet werden und erstmals operationell verfügbare Daten zur Vorhersage des Weltraumwetters liefern.

Unsere nationale Resilienz gegen extreme Weltraumwetter-Ereignisse bedarf des Ausbaus und der steten Weiterentwicklung. Um die Auswirkungen und Gefahren von Weltraumwetter und solchen extremen Ereignissen zu quantifizieren, sind weitere, umfassende **Nationale Risikostudien** unabdingbar. Darin sollen für verschiedene Szenarien und Ausprägungsgrade aus dem Bereich Weltraumwetter konkrete Risikomatrizen enthalten sein, die Eintrittswahrscheinlichkeiten, gegenseitige Abhängigkeiten und potenzielle direkte Auswirkungen auf die Infrastruktur unserer modernen Gesellschaft evaluieren. Ergänzend ist ein Maßnahmenkatalog zur Vermeidung, Verminderung und Handhabung von solchen Umweltkatastrophen in Deutschland zu erstellen.

⁷ Stichwort „research-to-operations, R2O“ und „operations-to-research, O2R“

Insbesondere die jüngste Hochwasserkatastrophe in Teilen West- und Süddeutschlands im Juli 2021 hat erhebliche Defizite sowohl in der Funktionsweise von Meldekettens und Vorbeugemaßnahmen als auch in der Koordination der Rettungs- und Hilfsmaßnahmen nach Eintritt der Katastrophe offenbart. Die **Melde-, Informations- und Warnketten** von der Lagebilderstellung am Weltraumlagezentrum bis hin zum Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), bzw. zu kritischen Infrastrukturen (KRITIS) und des Gemeinsamen Melde- und Lagezentrum (GMLZ) müssen nicht nur im Ernstfall eines Weltraumwetter-Ereignisses funktionieren, sondern auch regelmäßig in Probeläufen getestet werden. Nur so können die zuständigen Stellen auf Bundes- und Länderebene unmittelbar Maßnahmen zur Gefahrenabwehr ergreifen.

Die explizite Aufnahme von Weltraumwetter mit seinem enormen Gefahrenpotential für Navigation, Kommunikation, Energieversorgung, Gesundheit und Menschenleben als eigenständiges Risiko für kritische Infrastrukturen in nationale Warnsysteme, insbesondere **KRITIS**, wird nachdrücklich empfohlen.

Schlusswort

Die Relevanz des Themas Weltraumwetter und seiner Auswirkungen wird in den kommenden Jahren dramatisch zunehmen. Denn mit wachsender Abhängigkeit unserer Behörden, Gesellschaft und Wirtschaft von hochentwickelten Technologien und den nachgelagerten Diensten wird auch die Anfälligkeit dieser sensiblen Systeme für die Einflüsse moderater bis extremer Weltraumwetter-Ereignisse steigen (siehe Anhang 2).

Die Umsetzung der folgenden Empfehlungen wird dazu beitragen, die deutschen Interessen bzgl. bemannter und unbemannter Weltraumnutzung und -erkundung erfolgreich und effizient zu verfolgen. Letztendlich kann so auch das Wachstum der künftigen kommerziellen Weltraumaktivitäten der Bundesrepublik Deutschland gefördert werden.

Die **Empfehlungen der deutschen Weltraumwetter-Expertengemeinschaft**, um die Bundesrepublik Deutschland entsprechend vorzubereiten und zu wappnen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

E1) Aufbau eines international gut vernetzten Nationalen Weltraumwetter-Zentrums, das deutsche Kompetenzen und Fähigkeiten bündelt und einen Nationalen Weltraumwetter-Dienst unterstützt.

E2) Einführung eines finanziell hinreichend ausgestatteten Nationalen Forschungsprogramms für Grundlagenforschung und angewandte Forschung, u.a. zur koordinierten Weiterentwicklung von Beobachtungsmethoden und Weltraumwetter-Modellen.

E3) Auf- und Ausbau operationeller boden- und satellitengestützter Beobachtungssysteme, die sowohl national als auch in enger internationaler Kooperation betrieben werden, und das Rückgrat von Frühwarnsystemen für kritische Infrastrukturen bilden. Dazu gehört akut der mögliche deutsche Beitrag des Sonnen-Magnetographen PMI zur in Vorbereitung befindlichen Vigil Mission der ESA.

E4) Erstellung einer nationalen Risikobewertung, welche die vollumfängliche Analyse aller durch das Weltraumwetter betroffener Systeme und Services beinhaltet, und die Etablierung von Meldekettten und Vorbeugemaßnahmen bis hin zur Koordinierung der Rettungs- und Hilfsmaßnahmen nach Eintritt eines Katastrophenfalls ermöglicht.

E5) Stärkung des nationalen Rückhalts und der Vertretung deutscher Interessen in EU-, ESA- sowie NATO-Gremien bezüglich deutscher Beiträge zur Erforschung des Weltraumwetters z.B. durch Satellitenmissionen, sowie Gremien zur internationalen Koordinierung des Umgangs mit Weltraumwetter-Ereignissen, z.B. in der Internationalen Zivilen Luftfahrtorganisation (ICAO) und den Vereinten Nationen.

Folgende Autoren waren an der Erstellung dieses Empfehlungspapiers beteiligt:

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)

Geodätisches Observatorium Wettzell
Sackenrieder Straße 25, 93444 Bad Kötzing
Dr. Sebastian Mühlbauer (sebastian.muehlbauer@bkg.bund.de)

Christian-Albrecht-Universität zu Kiel (CAU)

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik - Extraterrestrische Physik
Leibnitzstraße 11, 24098 Kiel
Prof. Dr. Bernd Heber (bernd.heber@email.uni-kiel.de)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
Linder Höhe, 51147 Köln
Dr. Matthias M. Meier (Matthias.Meier@dlr.de)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Solar-Terrestrische Physik
Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz
Dr. Jens Berdermann (jens.berdermann@dlr.de)

Georg-August-Universität Göttingen

Institut für Astrophysik und Geophysik
Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen
Dr. Volker Bothmer (volker.bothmer@uni-goettingen.de)

Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Telegrafenberg, 14473 Potsdam
Prof. Dr. Jens Wickert (jens.wickert@gfz-potsdam.de)

Technische Universität München

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Arcisstr. 21, 80333 München
Prof. Dr. Michael Schmidt (mg.schmidt@tum.de)

Vereinigung Cockpit

Unterschweinstiege 10, 6. OG, 60549 Frankfurt
Capt. Klaus Sievers (ret.) (Klaus.Sievers@VCockpit.de)

Mit der geschätzten Mitarbeit von
Oberstleutnant René Heise, NATO-Headquarter, Brüssel (Heise.Rene@hq.nato.int)

ANHANG 1:

Weltraumwetter-Sensorik im Weltall und auf der Erde

Die Beobachtung der unterschiedlichen Effekte des Weltraumwetters ist die Basis für ein umfassendes Verständnis der komplexen physikalischen Prozesse zwischen Sonne und erdnahem Weltraum bzw. der Erdoberfläche. Operationelle boden- und satellitengestützte Beobachtungssysteme, die in enger internationaler Kooperation betrieben werden, bilden das Rückgrat von Frühwarnsystemen. Ein nachhaltiger Beitrag zum Betrieb dieser Infrastrukturen durch Deutschland erfordert kontinuierliche Investitionen und wissenschaftliche Aktivitäten zur ständigen Weiterentwicklung der Systeme.

Satellitengestützte Sensorik

Deutschland ist gegenwärtig an einer Vielzahl von **wissenschaftlichen Weltraummissionen** beteiligt, speziell SOHO, Cluster, ACE, SDO, STEREO, Parker Solar Probe, Solar Orbiter. Diese Missionen haben das Verständnis über die Einflüsse der Sonne auf unsere Erde und die weiteren Planeten des Sonnensystems entscheidend vorangebracht. Vorher unerklärte Kausalitäten zwischen Sonnenstürmen und Weltraumwetter-Ereignissen können inzwischen quantifiziert werden. Dabei ermöglichen Satelliten, die sich 1,5 Millionen Kilometer vor der Erde in Richtung Sonne in sogenannten L1-Orbits⁸ befinden, ein kontinuierliches Monitoring der Sonnenaktivitäten und die Erfassung des Sonnenwindes nahe der Erdumlaufbahn.

Genauere Vorhersagen sind hingegen nur aus dem L5-Orbit möglich, aus dem die Seite der Sonne beobachtet werden kann, die sich erst in Richtung Erde drehen wird. Eine solche L5-Mission, die **Vigil Mission** (vormals Lagrange Mission), wird gegenwärtig von der ESA entwickelt und soll im Jahr 2027 starten. Den wesentlichen Teil eines möglichen deutschen Beitrags bildet dabei der Magnetograph PMI, eine Weiterentwicklung des SO/PHI Magnetographen auf Solar Orbiter. Er repräsentiert sowohl den aktuellen Stand der Technik, als auch einen direkten Transfer von Technologie aus der Grundlagenforschung in die operationelle Anwendung.

Derzeit plant die US-amerikanische NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) mit der **Space Weather Follow-On L1 Mission (SWFO-L1)** eine Nachfolgemission für die in die Jahre gekommenen L1-Missionen SOHO, ACE und DSCOVR. Damit soll die internationale Echtzeit-Überwachung der Sonnenkorona und des Sonnenwindes aufrechterhalten werden, die für die Genauigkeit und Vorlaufzeit von Weltraumwetter-Warnungen und -Vorhersagen von entscheidender Bedeutung ist.

⁸ Lagrange-Punkt L1 bzw. L5: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lagrange-Punkte>

Die Fortführung der gegenwärtigen deutschen Beteiligung am Empfang und der Bereitstellung von DSCOVR-Daten mit den Messungen von SWFO-L1, als einzige europäische Empfangsstation, ist von essentieller Bedeutung für zukünftige operative Vorhersagen im Rahmen eines Nationalen Weltraumwetter-Dienstes.

Die Zusammenarbeit bei der für einen Start Ende 2023 geplanten **NASA-Kleinsatelliten-Mission [PUNCH](#)** (Polarimeter to UNify the Corona and Heliosphere) wird ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Erfassung von Sonnenstürmen leisten. Die Messung der Strahlungsexposition am L1 wird durch die **Interstellar Mapping and Acceleration Probe ([IMAP](#), Start im Jahr 2023)** der NASA eine Fortführung des in Deutschland weiterentwickelten und betriebenen Vorhersagesystems [RELEASE](#) ermöglichen.

Weltraumwetter-Sensorik auf erdnahen Umlaufbahnen ermöglicht vor allem die kontinuierliche Beobachtung der Ionosphäre und des Erdmagnetfeldes im globalen Maßstab. Deutschland trägt zu verschiedenen internationalen Satellitenmissionen bei. Hervorzuheben sind SWARM (ESA, Start 2013) und Missionen zur Nutzung von GNSS-Signalen für 3D-Beobachtungen der Ionosphäre (COSMIC-2, Spire, zukünftig Metop-SG). Hierbei bedarf es vor allem eines verstärkten deutschen Einsatzes für eine **[SWARM-Nachfolgemission](#)**, um die Kontinuität der Magnetfeldmessungen zu sichern.

[Bodengestützte Sensorik](#)

Durch Kombination der Satellitensysteme mit bodengestützter Sensorik kann die raumzeitliche Auflösung der Informationen über solare Phänomene, den interplanetaren Weltraum, die Ionosphäre und das Erdmagnetfeld erhöht werden. Die Sensoren sind überwiegend Teil großflächiger internationaler, teils globaler Bodennetzwerke, zu denen Deutschland in vielfältiger Weise beiträgt. Besonders präsent sind Sonnenteleskope und Monitoringsysteme im Radiofrequenzbereich.

Deutschland betreibt zwei eigene **Sonnenteleskope** auf Teneriffa und ist an den europäischen Projekten European Northern Observatory (ENO), Teide, und European Southern Observatory, (ESO, Chile) maßgeblich beteiligt. Mit dem Solar Flux Teleskop in Wettzell kann in naher Zukunft die Strahlungsintensität der Sonne im Mikrowellenbereich direkt beobachtet werden. So lassen sich Warnsignale für Weltraumwetter-Ereignisse durch eine erhöhte Sonnenaktivität erkennen.

Die Beobachtung von Veränderungen des Erdmagnetfeldes einschließlich geomagnetischer Stürme in Echtzeit erfolgt mit **Magnetometermessungen** im Rahmen des internationalen [INTERMAGNET](#)-Verbundes mit globalen Messtationen, in dem Deutschland eine Schlüsselrolle besetzt. U.a. wird ein operationelles Auswertezentrum betrieben, das geomagnetische Indizes (z.B. Kp-Index) bereitstellt, die essentiell für die Klassifizierung des Weltraumwetters sind.

Deutschland ist auch für den Betrieb eines weltweiten Netzwerkes zur Detektion von solaren Strahlungsausbrüchen, sogenannten Flares, in Echtzeit (Global Ionospheric Flare Detection System, GIFDS) verantwortlich. Es besteht derzeit aus fünf **VLF-Empfängern**, die in den mittleren Breiten auf der nördlichen Hemisphäre betrieben werden.

LOFAR (LOw Frequency Array) ist ein europäisches Projekt zur Radarinterferometrie, das ebenfalls zur Sonnenforschung beiträgt. Es ist derzeit das weltweit größte Radioteleskop, das Radiowellen im Kurzwellen- und Ultrakurzwellenbereich messen kann. Seine 51 Empfängerstationen sind über sieben europäische Länder verteilt, sechs davon befinden sich in Deutschland.

Ergänzende solare Informationen werden durch ein weltweites **Netzwerk** von **Neutronenmonitoren** bereitgestellt, zu dem Deutschland bisher allerdings nur mit einer Station beiträgt. Die gemessenen Neutronenflüsse erlauben die Bestimmung solar-terrestrischer Modellparameter und die Abschätzung von zusätzlichen Strahlungsbeiträgen durch solare Weltraumwetter-Ereignisse mit besonderer Relevanz für die Einhaltung von Grenzwerten bei der beruflichen Exposition des fliegenden und raumfahrenden Personals durch kosmische Strahlung. Modellierungen relevanter physikalischer Größen des jeweiligen Strahlungsfeldes können anhand von Teilchenmessungen mit AMS-02 an Bord der Internationalen Raumstation ISS und auf dem Mond sowie dem Mars validiert werden. Diese werden unter anderem durch in Deutschland entwickelte Messinstrumente gewonnen.

Ebenso wichtig wie das Erkennen von Warnsignalen durch solare Beobachtungen ist eine zuverlässige Charakterisierung der Einflüsse auf das Erdmagnetfeld und die Ionosphäre, um Vorhersagemodelle mit besonderer Relevanz für technische Systeme (z.B. Satelliten im erdnahen Orbit) zu validieren und nachhaltig zu verbessern. Deutschland ist dabei besonders an Systemen zur Bestimmung des aktuellen Ionosphärenzustandes beteiligt und liefert internationale Schlüsselbeiträge, u.a. mit dem Aufbau und Betrieb von **GNSS-Stationen** in verschiedenen Erdregionen, meist als Teil internationaler Netzwerke (z.B. **IGS** mit 500 Stationen global verteilt). Hinzu kommen echtzeitfähige Prozessierungssysteme für regionale und globale Elektronendichteverteilungen und ionosphärische Störungen.

In **Juliusruh** bei Rostock wird eine **Ionosondenstation** als Teil eines globalen Beobachtungsnetzes betrieben. Zur besseren Abdeckung des Bundesgebiets ist der Aufbau einer weiteren Ionosondenstation im süddeutschen Raum beabsichtigt.

ANHANG 2:

Zukunftsweisende Relevanz der Thematik Weltraumwetter

Die Einflüsse des Weltraumwetters sind von immer größerer Bedeutung in ökonomischer Hinsicht und in Bezug auf die großen nationalen und globalen Herausforderungen in den kommenden Jahren, einschließlich der benötigten technologischen Entwicklungen und bei der weiteren Erschließung des Weltraums. Extreme Weltraumwetter-Ereignisse können verheerende Schäden an der technologischen Infrastruktur am Boden und im Weltraum verursachen und damit den Entwicklungsstand unserer Technologiegesellschaft für mehrere Jahre beeinträchtigen. Aufgrund der Interaktion global vernetzter Technologien müssen vollumfängliche Analysen aller betroffenen Systeme und Services erstellt werden. Zusätzlich sind zurzeit verschiedene neue, vielversprechende Technologien in der Entwicklung, deren Resilienz gegenüber Weltraumwetter-Effekten noch erforscht werden muss.

Nicht nur in einer Notfallsituation, sondern auch im Alltag zahlreicher Wirtschaftsbereiche und der Verteidigung hat der Einsatz von Geräten und Verfahren, die für Positionierungs-, Navigations- und Zeitsynchronisierungsaufgaben auf Daten des Globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) zugreifen müssen eine zunehmend hohe Relevanz. Betroffen sind u.a. Systeme zur autonomen Navigation in der Luftfahrt, Schifffahrt und im Landverkehr, Bereitstellung von hochgenauen Zeitsignalen für die Netzsteuerung im Bahnbetrieb oder dem Finanzwesen. Die Abhängigkeit von der zuverlässigen Funktion der GNSS-Dienste aber auch der Satelliten-gestützten Kommunikation nimmt stetig zu.

Dies ist v.a. in der Luftraumüberwachung bzw. Flugsicherung oder auch in der Flugverfolgung und bei Notsender-Datenübermittlung sichtbar. Im Rahmen des PECASUS-Konsortiums ist die deutsche Wissenschaft in die Erfüllung der Anforderungen der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) im Teilbereich der weltraumwetterbedingten Störungen auf Navigationsdienste eingebunden.

Zusätzlich stellt die Strahlenschutzgesetzgebung in Deutschland für die Luftfahrt hohe Anforderungen an die Genauigkeit von Weltraumwetterinformationen. Zur Ermittlung der beruflichen Strahlenexposition des fliegenden Personals und zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte müssen erhöhte Strahlenbelastungen durch Weltraumwetter-Ereignisse zuverlässig bestimmt werden.

Weitere durch das Weltraumwetter betroffene Bereiche sind z.B. der Raketen- und Satellitenbetrieb, Flugzeug- und Satellitenelektronik, Versicherungsgesellschaften, Strom- und Energieversorgung, Pipelines sowie kabelbasierte Nachrichtennetze. In den hier angeführten Bereichen gibt es aktuell bestenfalls Insel-Lösungen. Informationen über Signalausbreitungsfehler, die Leistungsfähigkeit von Diensten oder zu erwartende Systemausfälle seitens der Betreiber und somit Feedback aus der Nutzergemeinschaft sind entscheidend für die Bewertung bestehender und den Aufbau zukünftiger Weltraumwetter-Dienste (siehe R2O-O2R).

Die nachfolgende Liste soll einen ersten Einblick in das Ausmaß der Beeinträchtigungen durch die Einwirkungen des Weltraumwetters geben und die Relevanz der Weltraumwetter-Forschung im Allgemeinen, sowie die in diesem Dokument dargestellten Empfehlungen, aufzeigen.

- Das Weltraumwetter beeinflusst die Zuverlässigkeit und Präzision von **Globalen Navigationssystemen (GNSS)** und der damit verbundenen Navigationsdienste in folgenden Bereichen:
 - Autonome Navigation
 - Flug- und Schiffsverkehr ([ICAO](#), Ergänzungssysteme zur Erhöhung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit wie z.B. [EGNOS](#))
 - Flugshuttles (Airbus)
 - Präzise Landwirtschaft und Landvermessung
 - Drohneneinsätze (UAV)
 - Satellitengestützte Datenübertragungen, z.B. das Internet und die Verwendung von Künstlicher Intelligenz, Erschließung neuer Datendomänen, Banking
 - Space Traffic Management (einschließlich Weltraum-Tourismus)
 - Weiterentwicklung von Galileo
 - Militärische Anwendungen
 - Such- und Rettungsmissionen, z.B. Ortung von Personen
- Verfügbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit von **Systemen mit Trägerfrequenzen bis zu 10 GHz** können entscheidend beeinträchtigt werden:
 - Satellitenkommunikation
 - Flugverkehr, ICAO
 - Drohneneinsätze
 - Smartphones und Fernsehen
 - Erdbeobachtung zur Klimaforschung und zur Bewertung von Naturkatastrophen wie Überflutungen, Tsunamis, Erdbeben z.B. durch Radar-Satellitenmissionen wie BIOMASS
 - Grenzüberwachung
- **Teilchenstrahlung** in der Erdmagnetosphäre, solare energetische Teilchen und galaktische, kosmische Strahlung, stellen eine erhebliche Gefahr für Satelliten und Menschen im Weltraum dar. Teilchen können tiefe dielektrische Aufladungen, Oberflächenaufladungen, Einzelstörungen und die Schädigung von Sonnenkollektoren und Materialien im Weltraum verursachen. Besonders betroffene Bereiche und Technologien sind:
 - Strahlenschutz in der Luft- und Raumfahrt
 - Raketenstarts (Kleinsatelliten, National)
 - Sicherheit vor Naturkatastrophen aus dem Weltraum
 - Wettersatelliten
 - Design neuer Satellitenmissionen und zugehörige Komponentenentwicklung, u.a. strahlungsgehärteter Elektronik

- ESA-Erdbeobachtungsprogramm [Copernicus](#), EU-Programm Global Monitoring for Environment and Security (GMES)
 - militärische Nutzung, Aufklärungssatelliten
 - Störung von Datenübertragungssystemen bei Drohneneinsätzen
 - Kommerzialisierung des erdnahen Weltraums
- **Stromübertragungsnetze und andere leitende Systeme** sind durch geomagnetisch induzierte Ströme ([GICs](#)) anfällig für Weltraumwetter-Ereignisse:
 - Einfluss auf Stromnetzeffizienz und mögliche Störungen/Ausfälle
 - Gas- und Ölleitungen
 - Warnung vor und Beobachtung von Naturkatastrophen aus dem Weltraum, z.B. Überflutungsüberwachung, Erdbeben- und Tsunamiwarnung
 - Weltraumwetter-Phänomene mit ihren Auswirkungen auf technologische Systeme werden sich stark auf **Missionen innerhalb unseres Planetensystems** auswirken
 - geplantes Lunar Gateway, Marsmissionen

Eine detaillierte Kenntnis über die Auswirkungen von Weltraumwetter-Effekten sowie deren Begrenzung, fördert die Entwicklung von Technologien (z.B. präzise Navigation bei autonomen Fahrzeugen) und trägt zur Erschließung neuer Marktsegmente bei. Zudem können existierende Technologien im Sinne des „Green Deal“ deutlich nachhaltiger betrieben werden (z.B. „precision farming“).