

SPACE WEATHER

State-of-the-Art

Weltraumwetter: Stand der Technik

Bericht als Teil des FFG-Projekts SWAP

Space Weather: The Austrian Platform

Dez. 2021



Autor*innen

Rachel Bailey, *ZAMG*

Roman Leonhardt, *ZAMG*

Manuela Temmer, *UniGraz*

Werner Pötzi, *UniGraz*

Astrid Veronig, *UniGraz*

Sandro Krauss, *TUGraz, Institut für Geodäsie*

Christian Möstl, *Institut für Weltraumforschung (ÖAW)*

Rumi Nakamura, *Institut für Weltraumforschung (ÖAW)*

Martin Reiss, *Institut für Weltraumforschung (ÖAW)*

Philipp Schachinger, *TUGraz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze*

Andreas Pfoser, *Austro Control*

Marcin Latocha, *Seibersdorf Laboratories*

Dieser Bericht wurde als Teil des FFG SWAP-Projekts erstellt.
Space Weather: the Austrian Plattform (SWAP), FFG #885321.

INHALTSVERZEICHNIS

WAS IST WELTRAUMWETTER?	7
FORSCHUNGSBEREICHE	9
Sonnenforschung	9
Sonnenzyklus	9
Magnetfelder auf der Sonne und koronale Löcher	11
Heliosphärenforschung	13
Koronale Massenauswürfe und deren Ausbreitung im Sonnensystem	13
Sonnenwind	14
Geospace-Forschung	16
Magnetosphärenphysik	16
Geomagnetik	17
Ionosphäre und TEC	18
Kosmische Strahlung und GLEs	19
Polarlichter	20
Geomagnetisch induzierte Ströme	23
ANWENDUNGSBEREICHE	25
Stromübertragungsnetze und Pipelines	25
Navigation und Kommunikation	26
Satelliten und Weltraummissionen	26
Aviation	28
WELTRAUMWETTER INTERNATIONAL	31
Internationale Organisationen	31
Vereinte Nationen (UN COPUOS und UNOOSA)	31
European Space Agency (ESA)	32
International Civil Aviation Organisation (ICAO) und PECASUS	32
International Space Environment Service (ISES)	32
Committee on Space Research (COSPAR)	32
Weitere Organisationen	33
Informationsanbieter	33
Bodeninfrastruktur	36
Sonnenobservatorien	36
Radioteleskope	36
Geomagnetische Observatorien	36
Neutronenmonitore	37

Ionosonden und Riometer	37
Aktuelle Satellitenmissionen	38
Solar Orbiter (SolO)	38
Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2 (GEO-KOMPSAT2)	39
Parker Solar Probe (PSP)	39
Magnetospheric Multiscale Mission (MMS)	40
Deep Space Climate Observatory (DSCOVR)	40
Swarm	41
Solar Dynamics Observatory (SDO)	41
Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS)	41
Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO)	42
Cluster	43
Advanced Composition Explorer (ACE)	43
Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)	44
Wind	44
Geotail	45
Challenging Minisatellite Payload (CHAMP)	45
Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE, GRACE-FO)	45
Geostationary Operational Environmental Satellite Program (GOES)	46
Geplante Missionen	47
PUNCH	47
TRACERS	47
Foresail-2	47
SunRISE	47
Lagrange	47
SMILE	47
Weitere Informationen und Links	47
WELTRAUMWETTER IN ÖSTERREICH	49
Forschungsgruppen	49
Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN), Technische Universität Graz	51
Forschungsbereiche	51
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	51
Links	51
Vergangene und aktuelle Projekte	51
Institut für Geodäsie (IfG), Technische Universität Graz	53
Forschungsbereiche	53
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	53
Links	53
Vergangene und aktuelle Projekte	54
Institut für Physik & Observatorium Kanzelhöhe, Karl-Franzens Universität Graz	55
Forschungsbereiche	55
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	55
Links	55
Vergangene und aktuelle Projekte	56

Institut für Weltraumforschung (IWF), Österreichische Akademie der Wissenschaften	57
Forschungsbereiche	57
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	57
Links	57
Vergangene und aktuelle Projekte	57
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Institut DIGITAL	59
Forschungsbereiche	59
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	59
Links	59
Vergangene und aktuelle Projekte	60
Seibersdorf Laboratories	61
Forschungsbereiche	61
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	61
Links	61
Vergangene und aktuelle Projekte	61
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)	64
Forschungsbereiche	64
Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen	64
Links	64
Vergangene und aktuelle Projekte	64
ZUKÜNFTIGE TRENDS	67
Aktuelle Roadmaps	67
International	67
National	68
Offene Fragen und Herausforderungen	69
GLOSSAR	71
AKRONYME	74
BIBLIOGRAFIE	76

WAS IST WELTRAUMWETTER?

Weltraumwetter ist ein Sammelbegriff für Phänomene im Sonnensystem, die, ausgehend von der Sonne, Auswirkungen auf die Erde und unsere technologische Infrastruktur haben können. Das Weltraumwetter hat kontinuierlichen Einfluss auf unseren Planeten und sein Magnetfeld. Die bekanntesten und sichtbaren Auswirkungen des Weltraumwetter sind Polarlichter.

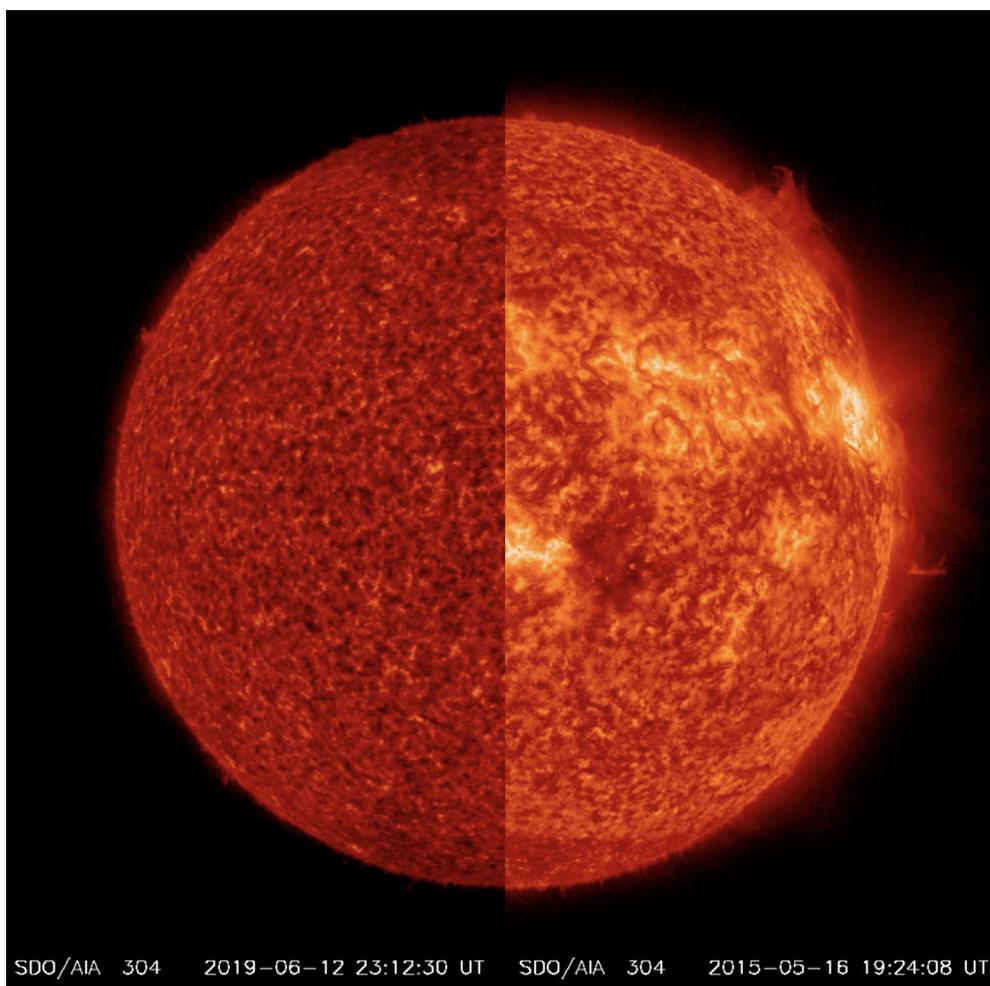


Abbildung 1. Die ruhige Sonne (links) und die aktive Sonne (rechts) im Vergleich. Besonders helle Stellen im Rechten Bild sind aktive Regionen. Quelle: NASA SDO Daten.

Es gibt jedoch auch extreme Bedingungen im Weltraumwetter (sogenannte Sonnenstürme), die unsere modernen Technologien beeinträchtigen können. Zu den bekanntesten Beispielen gehören Störungen von Navigationssystemen (z.B. GNSS), Probleme im Stromnetzbetrieb, sowie der Ausfall von Funkkommunikation. Bei besonders starken Sonnenstürmen besteht zudem erhöhte Strahlungsgefahr für Flugpassagiere und Astronauten. Da unsere Gesellschaft zunehmend von

moderner technologischer Infrastruktur abhängig ist, wächst das gesellschaftliche Interesse an Weltraumwetterinformationen und -diensten zunehmend schnell an.

Die Forschung zum Thema Weltraumwetter beschäftigt sich hauptsächlich mit der Sonne und der Ausbreitung des Sonnenwindes in unserem Sonnensystem. Zudem werden auch die Veränderungen im Magnetfeld der Sonne untersucht. Die Sonne durchläuft einen Aktivitätszyklus, der die Erscheinung des Weltraumwetters stark beeinflusst. Mit einer Periode von etwa elf Jahren alterniert die Sonne zwischen einer Phase der Ruhe und einer Phase der Aktivität (erhöhte Anzahl an Sonnenflecken und Sonnenstürmen) hin und her. Diese erhöhte Anzahl an Sonnenstürmen ist auch im Erdmagnetfeld und in der oberen Atmosphären der Erde erkennbar. Zu den bekanntesten Phänomenen gehören geomagnetische Variationen, energetische Partikel und Veränderungen in der äußersten Erdatmosphäre. Diese und andere Effekte können starken Einfluss auf die technologische Infrastruktur unserer Gesellschaft haben.

FORSCHUNGSBEREICHE

Das Weltraumwetter ist ein Forschungsgebiet welches weltweit große Beachtung findet. Eine Vielzahl an Forschungsgruppen beschäftigt sich mit Grundlagenforschung, wo beispielsweise die Prozesse in unserem Sonnensystem untersucht werden. Zudem gibt es auch angewandte Forschung, wo die Auswirkungen des Weltraumwetters auf unseren und andere Planeten untersucht werden, und Vorhersagemethoden entwickelt werden.

Grundsätzlich wird die Forschung im Bereich Weltraumwetter in drei große Bereiche aufgeteilt: Sonne, Heliosphäre, und Geospace. Während sich die Sonnenforschung mit der Physik unseres Zentralgestirns auseinandersetzt, befasst sich die Heliophärenforschung mit dem Weltraumplasma bis zur Grenze unseres Sonnensystems (Heliopause). Zur Geospace-Forschung gehören alle physikalischen Erscheinungen im erdnahen Weltraum. Hierzu gehört das Weltraumplasma um die Erde (inklusive das Erdmagnetfeld) sowie auch die Auswirkungen von Weltraumwetter auf die Erde.

Sonnenforschung

Die Sonnenforschung befasst sich mit den astronomischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Sonne. Dies beinhaltet beispielsweise die Photosphäre (die sichtbare Oberfläche der Sonne), die Korona (die äußerste Atmosphäre der Sonne), und das kleinskalige und globale Magnetfeld der Sonne welches auch die magnetische Konnektivität in unserem Sonnensystem bestimmt.

Sonnenzyklus

Der Aktivitätszyklus der Sonne (auch Sonnenfleckenzyklus oder Sonnenzyklus, siehe Abb. 2) bezeichnet die quasiperiodische Veränderung vieler Beobachtungsgrößen der Sonne mit einer Periode von etwa 11 Jahren. Der Sonnenzyklus ist am deutlichsten in Beobachtungsgrößen zu erkennen, die direkt mit dem Magnetfeld der Sonne zu tun haben. Das auffälligste Merkmal sind Sonnenflecken. Diese wurden bereits vor mehr als 400 Jahren von Galileo Galilei, unmittelbar nach Erfindung des Teleskops, beobachtet. Sonnenflecken sind Regionen auf der Sonne, die dunkler erscheinen als die umgebende Sonnenoberfläche, die sog. Photosphäre (Abb. 3). Die ruhige Sonnenoberfläche hat eine Temperatur von etwa 5500 Grad, wohingegen die Temperaturen in Sonnenflecken nur etwa 4000 Grad betragen. Dies hat mit dem starken Magnetfeld in Sonnenflecken zu tun, das den Energietransport vom heißen Sonneninneren an die Oberfläche stört und teils unterbindet. Sonnenflecken senden daher weniger Strahlung aus als die Umgebung und erscheinen somit als dunkle Gebiete auf der Sonne.

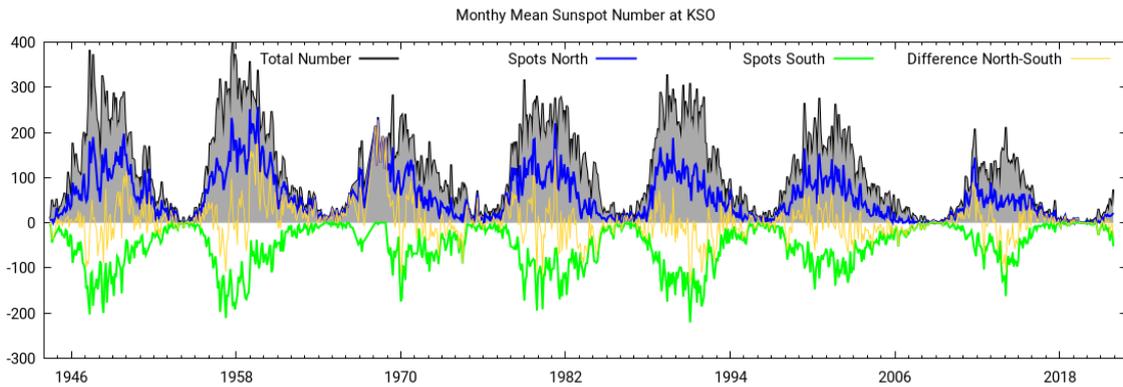


Abbildung 2. Die monatlichen mittleren Sonnenfleckenzahlen, die aus den täglichen Sonnenfleckenzeichnungen des Observatoriums Kanzelhöhe seit 1944 gewonnen werden, zeigen den 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne. Gegenwärtig (2022) befinden wir uns am Beginn des Sonnenzyklus Nummer 25. Quelle: Sonnenobservatorium Kanzelhöhe.

Sonnenflecken können Lebenszeiten von einigen Wochen bis zu einigen Monaten haben, und ihre Größe kann ein Vielfaches der Erdoberfläche erreichen. Die Beobachtung von Sonnenflecken zeigt besonders deutlich, dass unsere Sonne rotiert, im Mittel in 27 Tagen einmal um ihre Achse (von der Erde aus betrachtet). Sonnenflecken erscheinen nicht überall auf der Sonne, sondern gruppieren sich in niedrigen Breiten zu beiden Seiten des Sonnenäquators. Allerdings gibt es auch Zeiten ganz ohne Sonnenflecken, die sich abwechseln mit Zeiten, wo sehr viele und große Sonnenflecken zu beobachten sind. Im Mittel gibt es alle 11 Jahre ein Maximum im Auftreten der Sonnenflecken. Das letzte Maximum war im Jahr 2014. Gegenwärtig befinden wir uns im Zyklus 25, der im Jahr 2019 begonnen hat und dessen Maximum für 2023 - 2024 erwartet wird.

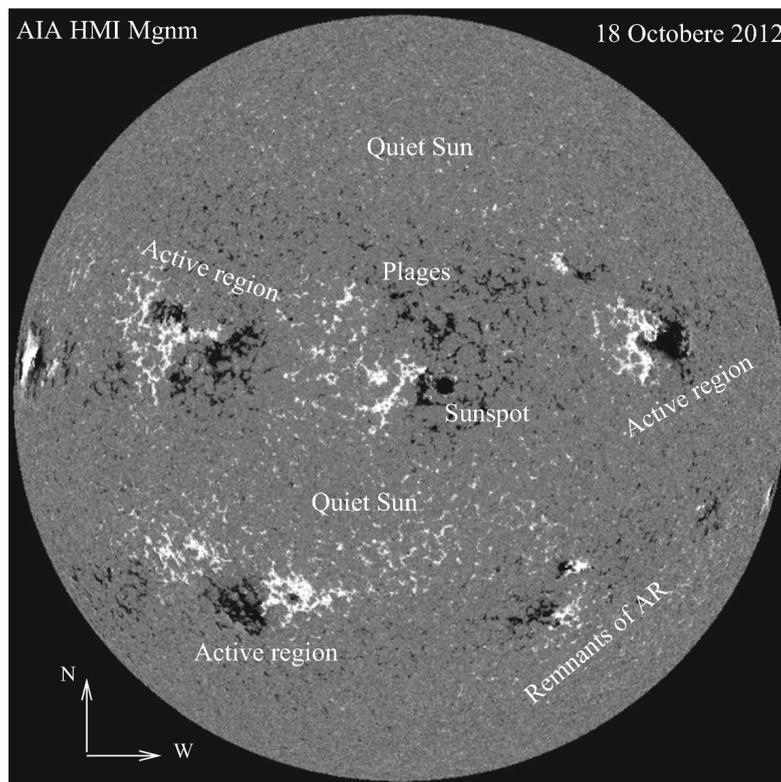


Abbildung 3. Magnetfelder auf der Sonne. Helle/dunkle Stellen sind Nord-/Südausgerichtete Magnetfelder. Sunspot = Sonnenfleck = aktive Region (AR). Quelle: Ryutova (2018).

Das starke Magnetfeld in Sonnenflecken ist auch die Ursache für die energiereichsten Ausbrüche, die unsere Sonne hervorbringt, die sogenannten Flares und koronalen Massenauswürfe. Flares

bezeichnen die plötzliche lokalisierte Freisetzung von erhöhter energiereicher Strahlung über einen Zeitraum von Minuten bis Stunden, ausgelöst durch die Verschmelzung von den starken Magnetfeldern, die mit Sonnenflecken assoziiert sind. Koronale Massenauswürfe (engl. coronal mass ejections - CMEs) sind riesige Wolken von magnetisiertem Plasma, das aus der äußersten Schicht der Sonne, der Korona, ausgeschleudert wird und sich mit Geschwindigkeiten von mehreren Millionen Kilometer pro Stunde durch den interplanetaren Raum ausbreiten (Abb. 4). Die Anzahl der CMEs die auf der Sonne ausbrechen korreliert mit der Anzahl der Sonnenflecken. Während es im Sonnenminimum alle paar Tage eine CME auf der Sonne gibt, brechen während eines Sonnenmaximum im Schnitt fünf CMEs pro Tag aus.

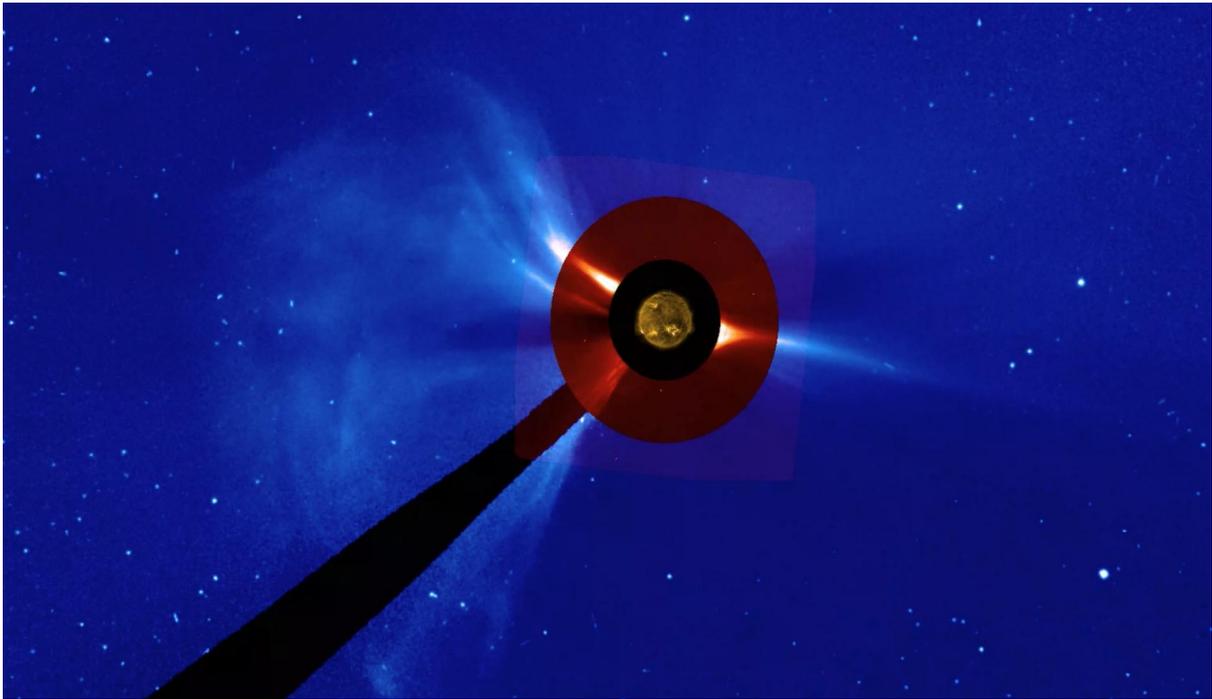


Abbildung 4. Ein CME (weiße Wolke links im Bild) beobachtet von SOHO im November 2020. Quelle: SOHO/LASCO, SDO/AIA.

Erdgerichtete CMEs erreichen die Erde nach etwa ein bis vier Tagen, abhängig von ihrer Anfangsgeschwindigkeit nahe der Sonne, Größe und Masse sowie den Kopplungsprozessen mit der umgebenden Sonnenwindströmung. CMEs können schwere geomagnetische Stürme verursachen, wenn ihre eingebetteten Magnetfelder und das von ihnen aufgestaute Plasma des Sonnenwinds sich mit dem Erdmagnetfeld verbindet. Nicht nur CMEs, sondern auch Hochgeschwindigkeits-Sonnenwindströme, die von den koronalen Löchern der Sonne ausgehen, können wiederkehrende geomagnetische Stürme verursachen. Die Wechselwirkung zwischen langsamen und schnellen Sonnenwindströmen aufgrund der Sonnenrotation (SIRs) formen korotierenden wechselwirkenden Regionen (CIRs). Raumsonden in der Erdumlaufbahn, die CIRs im Sonnenwind beobachten, sehen wiederkehrende Signaturen von SIRs mit Perioden nahe der synodischen Rotationsperiode der Sonne von ungefähr 27 Tagen (Richardson, 2018). CIRs treten am häufigsten während der abnehmenden/späten Phasen von Sonnenzyklen auf, können aber auch im Sonnenmaximum beobachtet werden (Richardson et al., 2002).

Magnetfelder auf der Sonne und koronale Löcher

Der Sonnenwind ist ein kontinuierlicher Strom geladener Teilchen, der sich radial nach außen von der heißen Korona der Sonne in den interplanetaren Raum mit Geschwindigkeiten im Bereich von

300 bis 800 km/s bewegt. Durch die gemeinsame Ausbreitung von Plasma und Magnetfeld (“frozen-in” Theorem), trägt der Sonnenwind das Sonnenmagnetfeld mit. Zusammen mit der Sonnenrotation (im Durchschnitt mit einer Periode von circa 27 Tagen für einen Beobachter auf der Erde) baut dies das interplanetare Magnetfeld in Form einer sogenannten Parker-Spirale auf.

Die heiße, ruhige Sonnenkorona (circa 10^6 K) wird regelmäßig im 193 Å Wellenlängenbereich (Fe-XII Emissionslinie) abgebildet, wo sie quasistationäre dunkle Merkmale zeigt, nämlich koronale Löcher (englisch: coronal holes oder abgekürzt CHs) und Filamentkanäle. Im Vergleich zur hellen umgebenden Korona erscheinen CHs dunkel, da sie weniger dicht sind und ein offenes Magnetfeld haben, entlang diesem können ionisierte Atome (hauptsächlich Protonen und Alpha-Teilchen) und Elektronen leicht in den interplanetaren Raum entweichen. Sie erzeugen einen schnellen Sonnenwindstrom, sogenannte Hochgeschwindigkeits- Sonnenwindströme (englisch: high speed solar wind streams oder abgekürzt HSS), welche Geschwindigkeiten bis zu 800km/s erreichen (Schwenn et al., 2005).

Harvey & Recely (2002) beschreiben die Entwicklung von CHs basierend auf Beobachtungen während verschiedener Sonnenzyklen. Isolierte CHs in hohen Breiten entwickeln sich zu polaren CHs, wo sie als stabile und starr rotierende Objekte erscheinen, die mehrere Jahre existieren können. Wenn sich die Zerfallsphase eines Sonnenaktivitätszyklus nähert, entwickeln sich polare CHs zu einem niedrigeren Breitengrad, was folglich den Sonnenwind in der Ekliptik (d.h. um die Planeten herum) dramatisch verändert. Dieser evolutionäre Prozess zeigt sich in EUV-Daten aus der deutlichen Veränderung der Morphologie (Fläche, Form) und Lage der CHs. Wang & Sheeley (1990) beschreiben die magnetische Natur koronaler Löcher und stellten fest, dass eine enge Beziehung zwischen der Morphologie von CHs und dem zugrunde liegenden photosphärischen Magnetfeld besteht. Aufgrund der quasi-stationären Lage von CHs mit niedrigen Breitengraden führt die Wechselwirkung von HSS und langsamen Sonnenwindströmen zu einer Kompression von Plasma und Magnetfeld. Da solche Strukturen mit der Sonne mitrotieren, werden sie als mitrotierende Wechselwirkungsregionen (englisch: corotating interacting regions oder abgekürzt CIRs) bezeichnet. CIRs zeigen gut definierte Stromgrenzflächen (abrupte Dichteabfälle und gleichzeitiger Anstieg der Protonentemperatur), die ursprünglich langsames, dichtes Plasma von ursprünglich schnellem dünnen Plasma auf der Rückseite der Sonne trennen (z.B. Wimmer-Schweingruber, 1997). Der Vorderkante einer CIR besteht aus einer vorwärts gerichteten Druckwelle, die sich in das langsamere Plasma vor ihr ausbreitet. Ebenso ist die Hinterkante eine umgekehrte Druckwelle (siehe Übersicht in Balogh et al., 1999).

CIRs sind häufige Auslöser von Schocks und wiederkehrenden geomagnetischen Stürmen mit einem vergleichbaren Gesamtbeitrag zur geomagnetischen Aktivität wie dem von CMEs, die stärker, aber seltener sind (Tsurutani et al., 2006). Da sich CIRs in Richtung der Planetenbewegung drehen, erreicht der HSS, welcher von einem zentralen koronalen Loch ausgeht, etwa 4 Tage später die Erde. Typische HSS-Intervalle nach CIRs können zu verlängerter geomagnetischer Aktivität führen und starke hochenergetische Partikelverstärkungen in den Strahlungsgürteln der Erde verursachen (z. B. Reeves et al., 2003; Kilpua et al., 2015). Im Detail hängen Stärke und Wirkung von geomagnetischen Stürmen neben der Aufprallgeschwindigkeit vor allem von der Nord-Süd-Komponente (B_z) des Magnetfelds des Sonnenwindstroms ab (Ryutova, 2018).

Heliosphärenforschung

In der Heliosphärenforschung werden die physikalischen Bedingungen im interplanetaren Raum studiert. Dies beinhaltet die Untersuchung der Ausbreitung des schnellen und langsamen Sonnenwindes, sowie physikalische Phänomene wie koronale Massenauswürfe. Messungen der Bedingungen in der Heliosphäre durch existierende und neue Weltraummissionen geben zudem Einblick in das Weltraumplasma, energetische Teilchen, und das interplanetare Magnetfeld.

Koronale Massenauswürfe und deren Ausbreitung im Sonnensystem

Koronale Massenauswürfe (englisch: coronal mass ejections oder CMEs) sind ein junges Phänomen, das erst vor etwa 50 Jahren entdeckt wurde. CMEs sind enorm grosse Strukturen, die sich innerhalb weniger Minuten aufgrund magnetischer Umstrukturierungsprozesse in der Sonnenkorona, aus magnetisiertem Plasma manifestieren. Die Energie, die dabei freigesetzt wird stößt diese Wolken impulsiv von der Sonne weg und somit breiten sie sich anschließend in den interplanetaren Raum aus (siehe Forbes 2000). Aufgrund ihres starken Magnetfeldes, welches über einen langen Zeitraum eine besondere Orientierung (südwärts) besitzen kann, sind sie die Hauptverursacher der allerstärksten Störungen des Weltraumwetters. In den vergangenen 20 Jahren wurde daher intensiv auf dem Gebiet der CMEs und ihrem Ausbreitungsverhalten im interplanetaren Raum, geforscht.

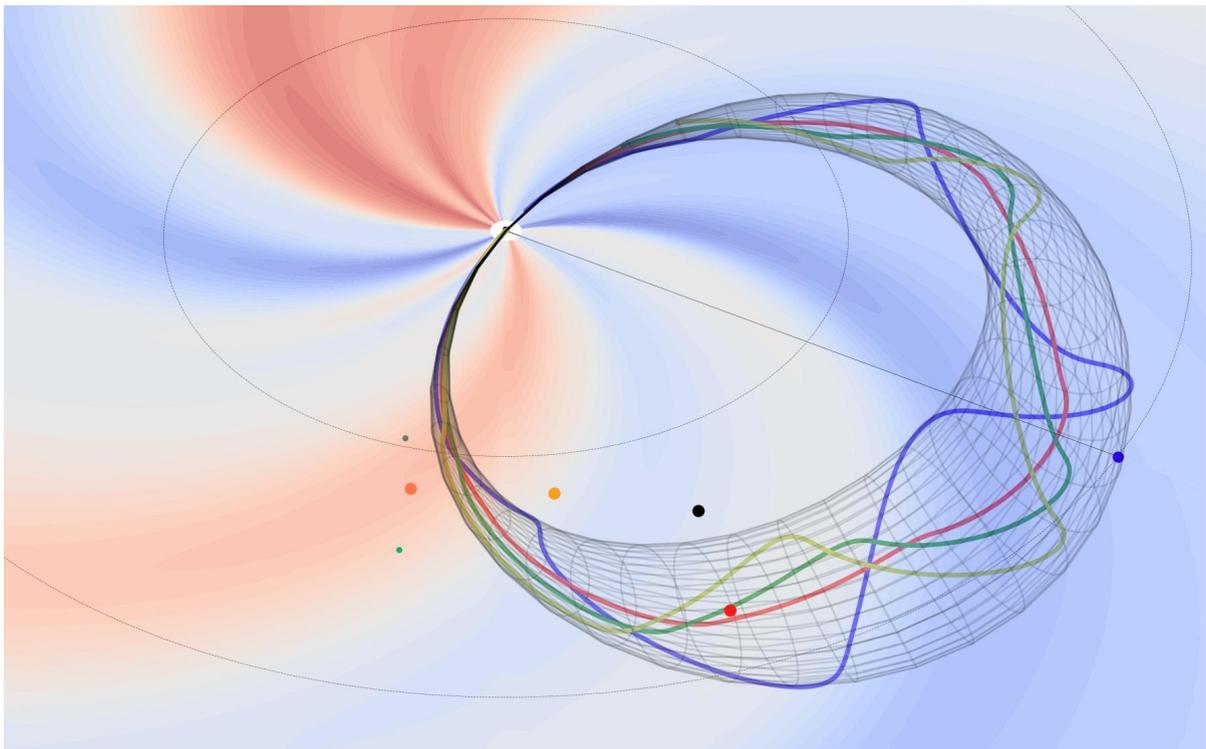


Abbildung 5. Modell des Sonnenwinds mit schnellen und langsamen Strömungen, mit einer idealisierten magnetischen Flussröhre einer CME mit spiralförmigen Feldlinien. Quelle: IWF Graz.

Resultate zeigen, dass sich CMEs im interplanetaren Raum rasch ausweiten und schnell an Größe gewinnen, denn die magnetische Kernstruktur hat einen starken magnetischen Überdruck, der sich an die Umgebung mit niedrigerem Druck anzupassen versucht. Damit sind CMEs ständig Wechselwirkungen mit der umgebenden Heliosphäre ausgesetzt. Die ausgestossenen Magnetfeldstrukturen wechselwirken insbesondere nahe der Sonne stark mit dem Magnetfeld der

Korona. Der umgebende Fluss des Sonnenwindes im interplanetaren Raum und seine variierenden Strukturen - insbesondere komprimierte Strukturen des Sonnenwindes (high speed streams) - sind dabei ebenfalls ständig in Interaktion mit den CMEs. So können sich CMEs verformen und von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt. Dies führt zu Abweichungen in der CME Ausbreitung, ihrer Grösse und Geschwindigkeit sowie der Magnetfeldstärke der innewohnenden Flussröhre. Die genannten Änderungen in diesen Parametern wiederum sind dafür verantwortlich ob ein CME die Erde überhaupt trifft und falls ja, wie stark die Auswirkungen dann auf der Erde sind.

Die 2006 gestartete STEREO Mission hat es zum ersten mal ermöglicht Bilder nicht nur von der Korona sondern direkt vom Sonnenwind zu bekommen, wodurch es gelang CMEs zu verfolgen bis sie auf die Erde treffen. Methoden um aus den heliosphärischen Bildern die Distanz, Richtung und Geschwindigkeit der CME abzuleiten wurden in den letzten Jahren deutlich verbessert und beinhalten nun sogar deformierbare Fronten, welche auf den Sonnenwind reagieren. Die berechnete Ankunftszeit von CMEs bei der Erde stimmt in etwa auf einen halben Tag mit den echten beobachteten Impakts beim LI Punkt überein, was vergleichbar vielen anderen Methoden ist. Die Mission PUNCH der NASA soll in den nächsten Jahren eine genauere Bestimmung der Position der einzelnen Teile der CMEs, die wir in den heliosphärischen Bildern sehen, ermöglichen.

Wenn eine CME die Erde trifft, ergibt sich je nach Richtung, der Orientierung der Achse und der Geschwindigkeit unterschiedliche Profile der Magnetfeldkomponenten die vor Ort von Raumsonden gemessen werden (Abb. 5). Wie genau diese lokalen Signaturen von der globalen Struktur des CME erzeugt werden ist jedoch eine offene wissenschaftliche Frage. Ein Modell wie 3DCORE das am IWF Graz entwickelt wurde beschreibt die Flussröhren in CMEs mittels analytischer Gleichungen. Sie sind in dieser Hinsicht extrem hilfreich um die Daten von Raumsonden wie Parker Solar Probe, STEREO und Solar Orbiter richtig zu interpretieren und um mehr über die bisher unbekannt große räumliche Struktur von den Flussröhren in CMEs herauszufinden. Das große ungelöste Problem in diesem Gebiet ist es die südwärts gerichtete Komponente des Magnetfelds in CMEs richtig vorhersagen zu können.

Sonnenwind

Der Sonnenwind ist ein ständiger Plasma-Strom der von der Sonne ausgestoßen wird. Bedingt durch deren Rotation bekommt das in der Sonnenkorona beschleunigte Plasma im interplanetaren Raum eine Spiral-Form, die sogenannte Parker-Spirale (Abb. 6). Diese ist benannt nach Eugene Parker, der 1958 die Existenz des Sonnenwindes theoretisch vorhergesagt hat. Schon davor wurde über die Existenz eines elektrisch leitfähigen Plasmas im Raum zwischen den Planeten spekuliert, da Kometen zwei unterschiedliche Schweife besitzen. Mittels der ersten interplanetaren Raumsonde Mariner 2 konnte 1962 der Sonnenwind dann auch tatsächlich gemessen werden.

Moderne mathematische Simulationen zur Beschreibung des Sonnenwindes basieren zuerst einmal auf Magnetfeld-Modellen der Sonne, die auf Karten des beobachtbaren Magnetfeldes in der Sonnen-Photosphäre aufgebaut werden. Das Magnetfeld in der Korona selbst zu messen ist durch die hohen Temperaturen extrem schwierig und kann daher nicht routinemäßig durchgeführt werden. Ein weiteres Problem entsteht durch die Tatsache dass es noch nie eine vollständige Karte des Sonnenmagnetfelds gab weil wir von der Sonne immer nur die uns zugewandte Seite sehen. Eine Mission zum Lagrange 5 Punkt sollte hier große Verbesserungen bringen, da man dann weitere 60° der Sonnenoberfläche beobachten kann. Auch wurden die Magnetfeldstärken an den

Polen der Sonne noch nie gemessen, was zu Unsicherheiten in den Modellen führt. Die Solar Orbiter Mission wird die Pole in den kommenden Jahren zum ersten mal vermessen, da deren Orbit sich immer weiter zur Ebene der Planeten neigen wird.

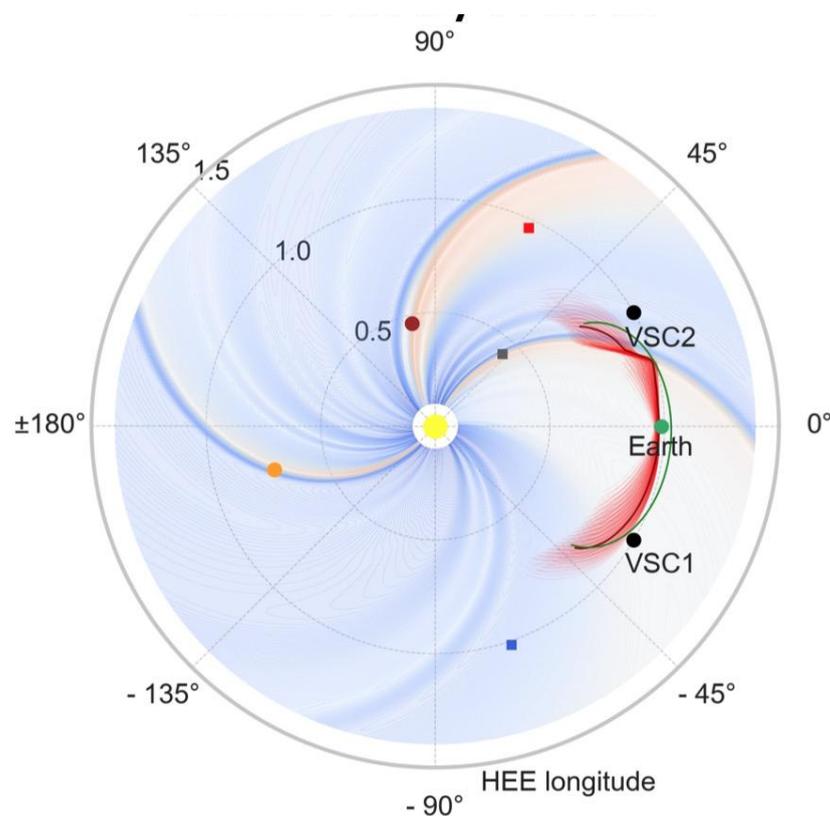


Abbildung 6. Modell der Sonnenwind-Geschwindigkeit mit der Parker Spirale und einer CME-Front die sich als Reaktion auf schnelle und langsame Strömungen verformt. Quelle: IWF Graz.

Mittels des sogenannten Wang-Sheeley-Argue (WSA) Modells kann man aus dem modellierten Magnetfeld bei etwa zwanzig Sonnenradien eine Sonnenwind-Geschwindigkeit berechnen, da offene Feldlinien zu schnellen Strömungen und geschlossene Feldlinien zu langsamen Strömungen führen. Ab hier gibt es einige Modelle den Sonnenwind in der gesamten Heliosphäre zu berechnen. Modelle welche die Gleichungen der Magnetohydrodynamik auf einem Gitter numerisch ausführen (3D-MHD) sind die komplexesten, aber auch langsamsten Methoden, für die man Supercomputer benötigt. Ein Beispiel dafür ist das *Enlil* Modell welches von NASA, NOAA und dem UK MetOffice verwendet wird, oder *EUHFORIA* der Universität Löwen. Der Fehler dieser Modelle in der Ankunftszeit von CIRs beträgt aber im Schnitt einen ganzen Tag, was noch deutlich zu ungenau ist.

In letzter Zeit haben sich auch weitere Methoden etabliert, die sehr schnell in der Ausführung sind und sich an Daten besser und schneller anpassen lassen als 3D-MHD Methoden und sogar auf herkömmlichen Laptops ausgeführt werden können. Der Unterschied dieser Methoden im Vergleich zu 3D-MHD ist dabei gering, Ein Beispiel dafür sind die Modelle HUX, HUXt und THUX entwickelt von Predictive Science Inc., der University of Reading und dem IWF Graz. Diese Modelle lassen sich insbesondere mit Machine-Learning Methoden an veränderte Anfangsbedingungen nahe der Sonne oder an Raumsonden Daten im interplanetaren Raum anpassen. Eine Verbesserung der Modelle des Sonnenwindes hat vielversprechende Auswirkungen auf andere Forschungsbereiche, da sich energiereiche Teilchen, die von der Sonne bei Eruptionen ausgestossen werden und für erhöhte Strahlung im Weltraum sorgen, entlang der Sonnenwind-

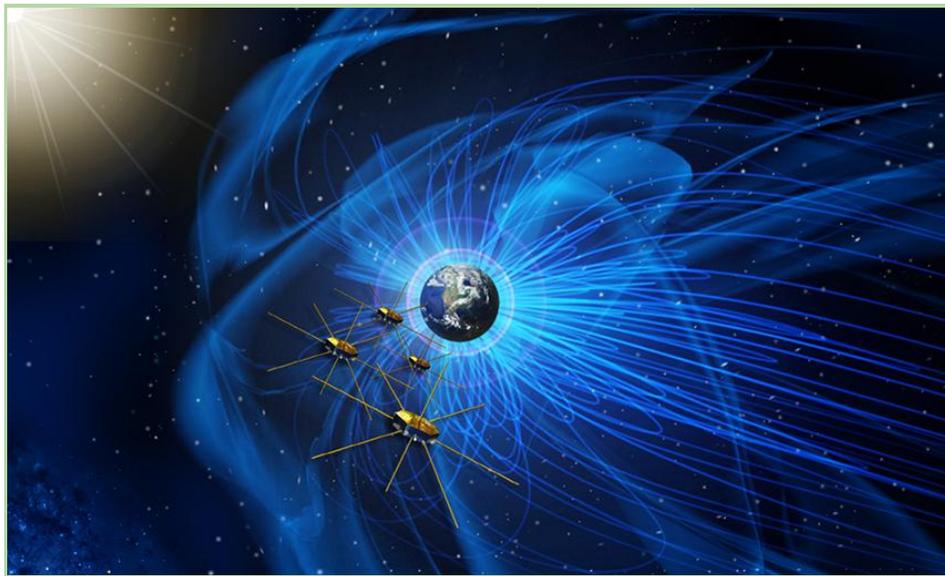
Feldlinien bewegen. Auch reagieren CMEs deutlich auf deren Umgebung im Sonnenwind wodurch sie sich verformen können oder deren Ankunftszeit und Geschwindigkeit beeinflusst wird.

Geospace-Forschung

Geospace-Forschung befasst sich mit Phänomenen des Weltraumwetter im erdnahen Weltraum, der Magnetosphäre, Ionosphäre und hoher Atmosphäre, und mit Effekten auf der Erdoberfläche. Satellitenmessungen im Weltraum werden zur Untersuchung der Magnetosphäre verwendet, während Messungen auf der Erdoberfläche Aufschluss über den Zustand der Ionosphäre und Variationen in der Strahlung liefern. Ein Großteil der Themen befasst sich mit den Auswirkungen des Weltraumwetters mit alltäglicher Infrastruktur, wie beispielsweise Stromnetze und Satelliten.

Magnetosphärenphysik

Die Magnetosphäre der Erde entsteht als Folge der Wechselwirkung zwischen dem Sonnenwind und dem Erdmagnetfeld (Abb. 7). Der Sonnenwind verformt das terrestrische Dipolfeld, dehnt die Magnetosphäre auf der Nachtseite und bildet den Magnetschweif.



*Abbildung 7. Künstlerisches Konzept der NASA Mission Magnetospheric Multiscale (MMS) in der Erdmagnetosphäre.
Quelle: NASA.*

Die bedeutendsten Manifestationen des Weltraumwetters in der Erdmagnetosphäre sind magnetische Stürme und Teilstürme. Das Erdmagnetfeld formt eine Schutzhülle die den Sonnenwind von der Erde abhält. Während magnetischen Stürmen und Teilstürmen wird die Energie des Sonnenwindes in die Magnetosphäre übertragen. Diese Energie beschleunigt und heizt das aus ionisierten Teilchen bestehende Plasma in der Magnetosphäre und im Strahlungsgürtel. Einige Teilchen können entlang der Magnetfeldlinie in die obere Atmosphäre eindringen und erzeugen die bekannten Polarlicht. Studien dieser Wechselwirkung mit dem Magnetfeld sind derzeit ein aktives Forschungsgebiet in der Magnetosphärenphysik. Die Wechselwirkung zwischen Sonnenwind und Magnetfeld ist im gesamten Sonnensystem einschließlich der Erde und andere Planeten von großer Bedeutung.

Die wichtigste Komponente der Magnetosphärenforschung ist die Messungen von Plasmaparametern und elektrischen und magnetischen Feldern durch Raumsonden. Die vier

identische Satelliten in der ESA - Mission Cluster oder der NASA - Mission MMS, die in einer engen Formation fliegen, ermöglichen eine dreidimensionale Ansicht der fundamentalen Plasmaprozesse, insbesondere der „magnetischen Rekonnexion“ oder „Turbulenzen“. Forscher am IWF Graz sind an diesen Satellitenmissionen sowohl bei der wissenschaftlichen Analyse als auch bei der Planung und Bau der Instrumente involviert. Zudem werden die Plasmaprozesse mittels Hochleistungsrechner simuliert und mit den Beobachtungen verglichen.

Geomagnetik

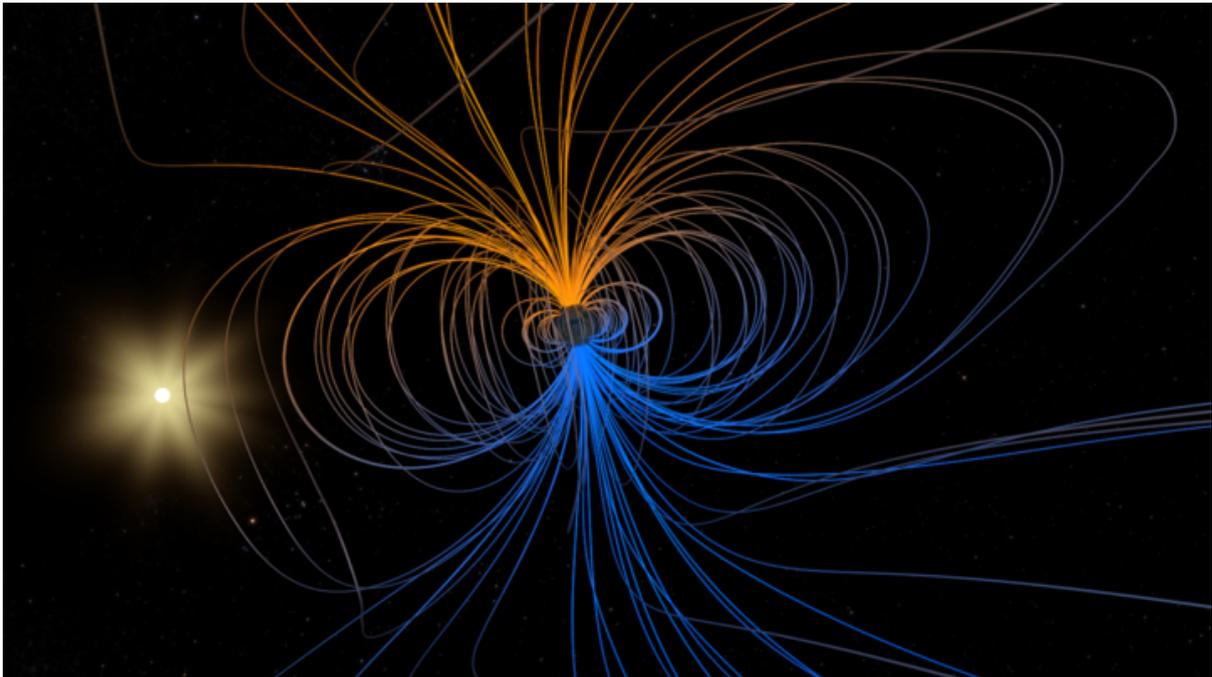


Abbildung 8. Eine Darstellung des Erdmagnetfeldes. Quelle: NASA Scientific Visualization Studio.

Das Forschungsgebiet der Geomagnetik befasst sich mit dem Magnetfeld der Erde. Das Erdmagnetfeld existiert seit geschätzte 3,5 Milliarden Jahren und kann in einer guten Näherung als Dipolfeld mit Nord- und Südpol angesehen werden (Abb. 8). Dieses Feld wird von internen und externen Quellen erzeugt. Eine wesentliche Anteil an den internen Quellen hat der geomagnetische Dynamo im Erdinneren. Nahe der Oberfläche, trägt die Magnetisierung der Kruste ebenfalls zu regionalen Magnetfeldern bei. Zudem werden zusätzliche Magnetfeldanteile durch die Interaktion mit dem Sonnenwind verursacht. Hierzu zählen ionosphärische Ströme, Ringstrom, Elektrojet, und viele weitere Ströme.

Das Erdmagnetfeld erwies sich seit jeher als nützliche Navigationshilfe. Kontinuierliche Messungen des Erdmagnetfeldes in geomagnetischen Observatorien wurden erstmals im frühen 19. Jahrhundert unter dem Einfluss von Alexander von Humboldt und Carl Friedrich Gauß eingerichtet. Seit 1852 führt die ZAMG geomagnetische Messungen in Österreich durch. Im Jahre 1955 wurde ein geomagnetisches Observatorium am Cobenzl in Wien gebaut, das nach 60 Jahren Betrieb offiziell 2014 von dem neu gebauten Conrad Observatorium in Muggendorf (Niederösterreich) abgelöst wurde.

Das Erdmagnetfeld umgibt unseren Planeten und kann mittels drei Komponenten als Vektor beschrieben werden: oft x , y , und z (x =Nordrichtung, y =Ostrichtung, z =senkrecht zur Erdoberfläche), sowie auch in H , D und Z (die horizontale Feldkomponente H , die Deklination D ,

und die vertikale Feldkomponente Z). Aus diesen drei Komponenten kann die Gesamtfeldstärke (F) berechnet werden.

Magnetische Feldstärken werden in Einheiten von Tesla (T) gemessen. Eine Angabe erfolgt meist in Nanotesla (nT; ein Nanotesla entspricht 10^{-9} Tesla oder 10^{-5} gauss). In Österreich hat das Magnetfeld eine durchschnittliche Feldstärke von ca. 48000 nT. In Äquatornähe sinkt die Feldstärke auf Werte zwischen 20000 und 35000 nT, während die Feldstärke an den Polen bei ca. 65000 nT liegt.

Im Zusammenhang mit dem Weltraumwetter wird die Magnetosphäre als jener Bereich definiert, in dem geladene Teilchen des Sonnenwindes vom Erdmagnetfeld beeinflusst werden. Die Magnetosphäre spielt eine zentrale Rolle, da sie die Erdoberfläche vor Strahlung (z.B. energetische Teilchen von der Sonne sowie kosmische Strahlung) schützt. Insbesondere werden energetische Teilchen entlang des Erdmagnetfeldes abgelenkt und in zwei ringförmigen Zonen (Van-Allen Gürtel) nahe der Erde eingefangen. Dieses "Schutzschild" kann durch die Interaktionen mit dem interplanetaren Magnetfeld erschüttert werden. Magnetische Strukturen in koronalen Massenauswürfen können hierbei heftige Variationen im Erdmagnetfeld auslösen. Diese "geomagnetischen Stürme" dauern meist 1 bis 4 Tage, und können schädliche Auswirkungen auf moderne technologische Infrastruktur haben (siehe: Geomagnetisch induzierte Ströme).

Die aktuelle Forschung im Bereich Geomagnetik befasst sich mit Themen wie der stetigen Umpolung des Magnetfeldes, und die Einflüsse von magnetischen "Substorms" auf die technologische Infrastruktur.

Ionosphäre und TEC

Die Ionosphäre der Erde ist ein dispersives Medium und erstreckt sich von ungefähr 70 - 600 km. Dabei enthält sie große Mengen von Ionen und freien Elektronen und kann in drei höhenabhängigen Schichten (D, E, F) unterteilt werden. Die untersten beiden Schichten D und E befindet sich zwischen 70 – 90 km beziehungsweise 90 – 130 km und sind ausschließlich tagsüber vorhanden. Der Grad der Ionisation entspricht dabei dem Sonnenstand, wobei in der D-Schicht die Ionisierung durch Lyman- α (Wellenlänge 121.6 nm) und in der E-Schicht durch weiche Röntgenstrahlung (1–10 nm) und ultraviolette (UV) Strahlung (80 – 102.7 nm) stattfinden. Die ab ungefähr 200 km beginnende F-Schicht ist durch extreme UV-Strahlung (14 – 80 nm) am stärksten ionisiert und wird in generell in die F1 und F2 Schicht aufgeteilt, wobei letztere auch nachtsüber vorhanden ist. Eine wichtige Kenngröße für den aktuellen Zustand der Ionosphäre stellt der Total Electron Content (TEC) dar. Er gibt die Gesamtanzahl von Elektronen integriert über eine Säule mit dem Querschnitt von 1m^2 an. Eine TEC Einheit (TECU) entspricht dabei 10^{16} Elektronen pro Quadratmeter. Da der TEC wegabhängig ist wird zumeist als standardisierte Größe der vertikale TEC (vTEC) angegeben. Dieser entspricht der Integration entlang der Zenit Richtung. In Zeiten von geringer Sonnenaktivität findet man üblicherweise Tageswerte von 5-20 TECU, wohingegen bei hoher Sonnenaktivität der Wert auf 200 TECU ansteigen kann.

Der TEC ist abhängig von der Ortszeit, dem Breitengrad und Längengrad, der Jahreszeit, den geomagnetischen Bedingungen, der Sonnenaktivität sowie von den Bedingungen in der Troposphäre (Emmert, 2015). Der TEC hat Einfluss auf die Bedingungen in der Ionosphäre und damit auch auf die Ausbreitung von Funkwellen. Die Geschwindigkeit der Funkwellen ändert sich, in Abhängigkeit des TEC in der Ionosphäre. Hierbei hängt die Gesamtverzögerung sowohl von der Frequenz der Funkwelle als auch vom TEC zwischen dem Sender und dem Empfänger ab. Bei

einigen Frequenzen können die Funkwellen die Ionosphäre durchdringen, und bei anderen Frequenzen werden die Wellen von der Ionosphäre reflektiert. Diese Änderungen in der Ionosphäre werden mit sogenannten Ionosonden gemessen. Hier wird die Ionosphäre in verschiedenen Frequenzbereichen mit Impulsen "abgetastet" um den Einfluss auf Radiowellen zu quantifizieren. Aus den Messungen werden Ionogramme erzeugt. Die Ionogramme stellen die Reflexionshöhe (d. h. die Zeit zwischen Senden und Empfangen eines Impulses) in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz dar. Diese Ionogramme können bearbeitet werden um TEC-Profile darzustellen. Die Änderung des Weges und der Geschwindigkeit der Funkwellen in der Ionosphäre haben einen großen Einfluss auf die Genauigkeit von Navigationssystemen wie GPS/GNSS, und daher werden für die Bestimmung des TEC oft auch Signale von GPS Satelliten verwendet. Veränderungen in der Ionosphäre und im TEC können Fehler von mehreren Zehn-Metern bei Positionsberechnungen verursachen (Wasle et al., 2008).

Kosmische Strahlung und GLEs

Die primäre kosmische Strahlung in der oberen Erdatmosphäre beinhaltet eine kontinuierliche galaktische Komponente und eine sporadische solare Komponente. Beide Komponenten bestehen hauptsächlich aus Protonen und zu einem geringeren Anteil aus Heliumionen, jedoch können in geringem Umfang auch Elektronen und schwerere Ionen vorhanden sein. Die Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung (Galactic Cosmic Rays - GCR) in der Nähe der Erde wird durch die Variation des interplanetaren Magnetfeldes während des 11-Jahres-Zyklus der Sonnenaktivität moduliert. Die Intensität der solaren Strahlung (Solar Cosmic Rays - SCR) in der oberen Erdatmosphäre hängt von der Quelle der hochenergetischen Prozesse auf der Sonne (wo die Teilchen der solaren Strahlung beschleunigt werden) und der Konfiguration des interplanetaren Magnetfeldes ab. Beide Komponenten, also die galaktische und die solare Strahlung, werden durch das Erdmagnetfeld abgeschirmt. Im Gegensatz zum interplanetaren Magnetfeld ist das Erdmagnetfeld relativ konstant, obwohl es gelegentlich durch große koronale Massenauswürfe von der Sonne beeinflusst wird. Die Abschirmung durch das Erdmagnetfeld ist in niedrigen geomagnetischen Breiten am effektivsten und in der Nähe der Erdmagnetpole weniger effektiv. Aus diesem Grund hängt die Dosisleistung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre von den geomagnetischen Koordinaten ab.

Teilchen kosmischer Strahlung, die auf die Atmosphäre treffen, erzeugen ein komplexes Feld von Sekundärteilchen, einschließlich beispielsweise Protonen, Neutronen, Elektronen, Positronen, Photonen, Myonen (positiv und negativ) und Pionen (positiv und negativ). Der betroffene Energiebereich umfasst viele Größenordnungen und hängt vom Partikeltyp ab. Zum Beispiel reichen sekundäre Photonen von ungefähr 10 keV bis zu 1 GeV und Neutronen von thermischen Energien bis zu 10 GeV, während Myonen von ungefähr 10 MeV bis zu 100 GeV reichen. Aufgrund der konkurrierenden Prozesse der Sekundärteilchenerzeugung und -absorption nimmt der Einfluss der sekundären kosmischen Strahlung – und damit die Dosisleistung – mit zunehmender Höhe zu und erreicht in etwa 20 km Höhe ein Maximum. In typischen Flughöhen wird der Großteil der effektiven Dosis durch Neutronen und Protonen verursacht. Näheres zu den verschiedenen Parametern, die die Dosis durch kosmische Strahlung in der Luftfahrt beeinflussen, findet sich beispielsweise in Lindborg (2004).

Die Verwendung von Codes und Modellen für die Bewertung von Strahlungs-dosis der Flugzeugbesatzung aufgrund von GCR ist eine gängige Praxis. Es werden verschiedene Modelle zur Abschätzung der Dosis durch GCR an Bord von Flugzeugen verwendet (EURADOS,

Bottollier-Depois, 2012). Einige der Codes basieren auf Monte-Carlo-Simulationen des Strahlungsfeldes. Einige andere verwenden eine analytische Berechnung des Partikeltransports durch die Atmosphäre. Wieder andere Codes basieren nur auf Messungen. Die meisten werden routinemäßig verwendet, da sie durch GCR-Messungen validiert wurden (Lindborg, 2004).

Zudem gibt es für solare Partikelereignisse auch Berechnungsmodelle. Die Meisten basieren auf Monte-Carlo-Simulationen, aber es gibt auch Modelle die nur auf Messdaten basieren. Als Messdaten dienen z.B. die Zählrate des Neutronenmonitors oder der Fluss von Protonen von Satelliten. Codes, die die Strahlenbelastung aufgrund von SEP berechnen, werden nicht routinemäßig verwendet, insbesondere weil sie nicht vollständig durch experimentelle Daten validiert sind. Dies ist ein Aufwand der in Zukunft noch benötigt wird (Beck, 2008).

Seit den 1950er Jahren liefert das Netz der Neutronenmonitore (NM) kontinuierliche Messungen der kosmischen Strahlung. Das NM-Netzwerk deckt sich mit den Ergebnissen von Raumfahrtmissionen, insbesondere mit den Messungen von hochenergetischen Teilchen von SOHO. Gleichzeitig wird die Benutzung des NM-Netzes für Weltraumwetterdienste entwickelt, z. B. für die Warnung vor Ground Level Enhancements (GLEs). Ein GLE ist ein Weltraumwetterereignis, bei denen geladene Teilchen von der Sonne ausreichend Energie haben, um Effekte zu erzeugen, die an der Erdoberfläche gemessen werden können (Miroshnichenko et al., 2013). Diese Teilchen (meist Protonen) werden entweder in der Sonnenatmosphäre oder im interplanetaren Raum auf hohe Energien beschleunigt. Bei GLEs handelt es sich um Teilchen mit deutlich höheren Energien von >500 MeV, während bei solaren Teilchenereignissen in der Regel energiereiche Teilchen mit einer Energie von 10-100 MeV auftreten. Es kann auch durch ICMEs und CIRs zu kurzfristigen Abnahmen der GCRs führen. Diese werden als Forbush-Abnahmen (FDs) bezeichnet.

Polarlichter

Polarlichter sind eine auf Phosphoreszenz basierende Lichterscheinung der hohen Atmosphäre. Auslöser sind zum einen ursprünglich mit dem Sonnenwind transportierte Elektronen, welche aus dem nachtseitigen Magnetosphärenschweif Richtung Erdatmosphäre beschleunigt werden, und zum anderen Sonnenwindpartikel (Protonen, Elektronen), welche an den tagseitigen Übergangszonen (polar cusps) in die Magnetosphäre eindringen. (An diesen Übergangszonen trennen sich tagseitig geschlossene Feldlinien des Erdmagnetfeldes von denen, die zwar an der Tagseite „entspringen“, aber durch die Schubspannungswirkung des Sonnenwindes auf die Nachtseite „verschleppt“ werden). Sobald die Sonnenwindteilchen auf atmosphärische Partikel treffen, kommt es zu verschiedenen Prozessen, von denen der Prozess der „Anregung“ für das Polarlicht der bedeutendste ist. Bei diesem Vorgang wird durch den Zusammenprall eines freien Elektrons mit einem Atmosphärenteilchen dieses auf ein höheres Energieniveau gehoben (Stoßanregung). Der nach einer gewissen Zeit wieder erfolgende Rückfall auf einen energetisch tieferen Zustand wird, wenn nicht von einer äußeren Störung ausgelöst (erneuter Stoß), von der Emission eines Photons begleitet. Die Frequenz dieser Lichtemission (und somit die Farbe) wird dabei von drei Faktoren bestimmt: Art des beteiligten Luftbestandteils (Sauerstoff, Stickstoff), dessen elektrische Ladung (neutral, ionisiert) sowie die Stoßenergie des Sonnenwindpartikels. Letztere wird im nachtseitigen Magnetosphärenschweif durch bestimmte Vorgänge (Energieübertragung durch elektromagnetische Induktion, Beschleunigung durch magnetische Rekonnexion) auf Werte bis zu etwa 200 keV erhöht, ehe sie durch Stoßkaskaden vor der

letztendlich finalen, polarlichtauslösenden Kollision wieder auf typischerweise etwa 3 keV abgebaut wird.



Abbildung 10. en 8 & 9. Typische Polarlichterscheinungen hoher Breiten. Es dominieren die gelbgrünen Farbtöne des atomaren Sauerstoffs. Im linken Bild ist zudem in hohen Schichten das violette Leuchten molekularer Stickstoffionen erkennbar, im rechten Bild die magenta Unterkante durch tief eindringende Partikel. Quelle: Andreas Pfoser.

Die am häufigsten auftretenden Polarlichtfarben sind gelbgrün (557,7 nm) und rot (630,0 nm). Sie werden vom neutralen atomaren Sauerstoff beim Rückfall vom zweiten in den ersten angeregten Zustand (gelbgrün) bzw. beim Rückfall vom ersten angeregten Zustand in den Grundzustand (rot) erzeugt. Letztgenannter Prozess ist nur bei einer extrem dünnen Atmosphäre effizient möglich, wodurch das rote Polarlicht normalerweise erst in sehr großer Höhe von 200-320 km leuchtet und vom niedriger liegenden gelbgrünen Polarlicht, welches sich in 120-140 km Höhe am intensivsten entfaltet, häufig überstrahlt wird. Weitere Farben sind das violette (391,4 nm) und blaue (427,8 nm) Leuchten ionisierten molekularen Stickstoffs sowie magenta oder orange Farbtöne, welche bei höherer Intensität fallweise am Unterrand einer Polarlichtstruktur auftreten. Die beiden letztgenannten Farben sind auf additive Farbmischungen von neutralen Stickstoffmolekülen mit Stickstoff- bzw. Sauerstoffmolekülen in etwa 70-90 km Höhe zurückzuführen. Polarlichter erscheinen in vielfältigen Formen, zeigen teils sehr rasche Bewegungen und Formänderungen, ehe sie dann auch wieder ruhig am Himmel verharren. Für Formen und Bewegungen sind unterschiedliche Klassifikationsschemata in Verwendung. Häufig wird dabei zwischen bandförmigen, strahlenförmigen und diffusen Formen unterschieden, wobei die bandförmigen Erscheinungen weiter in Bögen (ruhig) und Bänder (aktiv; Schleifen, Spiralen, Wellen) unterteilt werden können, während sich die strahlenförmige Aurora in Vorhänge (Draperien), Schleier (ausgedehnte Lichtflächen), Strahlen (vertikale Lichtstreifen) und Korona (kranzförmig aus dem Zenit) gliedern lässt. Das Polarlicht ist in der überwiegenden Zeit keine allzu helle Erscheinung und die Farben werden daher, bedingt durch die angeborene Farbsehschwäche des menschlichen Auges in Dunkelheit, oft nur fahl wahrgenommen, teils wirkt das Polarlicht sogar farblos. Tatsächlich liegt die Gesamtstrahlungsleistung eines durchschnittlichen Polarlichts, an welchem typischerweise 2 Mia. p/cm²s beteiligt sind, nur bei 0,01 W/m².



Abbildung 11. Polarlichterscheinung über Österreich (Hochrotherd, 20.11.2003). Polarlichter über mittleren Breiten erscheinen meist nur diffus. Gut zu erkennen ist, dass die rote Farbe des atomaren Sauerstoffs in größerer Höhe auftritt als die gelbgrüne Farbe desselben Elements. Quelle: Andreas Pfoser.

Die magnetische Feldlinienkonfiguration an der Nachtseite der Magnetosphäre sorgt dafür, dass eindringende Elektronen nur in bestimmten Regionen der Erde die Atmosphäre erreichen. Im Normalfall handelt es sich dabei um zwei ovalförmige Ringe (Polarlichtovale) in einem Abstand von 1500 bis 3000 km zu den geomagnetischen Polen der beiden Erdhemisphären. In diesen Regionen sind die Polarlichter permanent vorhanden und können bei klarem (durchsichtigem) Himmel und Dunkelheit auch grundsätzlich gesehen werden. Kommt es aber zu einem Geomagnetischen Sturm, so führt der erhöhte Elektroneneinfall und Energieeintrag in die Magnetosphäre zu einer intensivierten Teilchenbewegung im System Magnetosphäre-Ionosphäre, wodurch sich die Polarlichtovale vorübergehend verbreitern und äquatorwärts verlagern. Auf diese Weise können Polarlichter auch bis nach Österreich vordringen. Diese unterscheiden sich dann aber im Normalfall von den Erscheinungen hoher Breiten, indem sie meist nur diffus leuchten und lediglich in Ansätzen auch diskrete Strukturen zeigen. Grund dafür ist, dass die kollidierenden freien Elektronen hier nicht mehr vorrangig aus dem Magnetosphärenschweif über die Plasmaschicht in die Atmosphäre geleitet werden, sondern mit dem während Geomagnetischer Stürme näher rückenden Ringstrom aus der dichteren Plasmasphäre in die hohe Atmosphäre gestreut werden. Da die dabei auftretenden Energiemengen meist geringer ausfallen als bei der Aurora höherer Breiten, ist das Polarlicht über Österreich meist nur hochliegend und im Gegensatz zur polnäheren Erscheinung überwiegend rötlich gefärbt. Nordlichter treten in Österreich nicht so selten auf, wie vielleicht vermutet wird. Aus Untersuchungen über längere Zeiträume kann geschlossen werden, dass pro Jahr durchschnittlich 3-4 Polarlichterscheinungen bei uns möglich sind, von denen 1 auch eine auffällige Helligkeit entfaltet. Diese Erscheinungen sind aber über die Jahre nicht gleich verteilt sondern folgen in gewissem Maße dem Verlauf der Sonnenaktivität. So gab es im unmittelbar zurückliegenden ausgesprochen schwachen Sonnenfleckenzyklus 24 in einem Zeitraum

von 11 Jahren insgesamt nur 6 Nächte mit Nordlichtern in Österreich, von denen zudem keine einzige Erscheinung visuell auffällig gewesen ist (Abb. 11).

Geomagnetisch induzierte Ströme

Geomagnetisch induzierte Ströme (meist “GICs” abgekürzt) sind Ströme, die durch Transformatoren und Leitungen im Hoch- und Höchstspannungsnetz fließen. Sie sind eine Folge der Interaktionen zwischen Sonnenwind und Erdmagnetfeld. Beschrieben durch das Faraday’sche Induktionsgesetz führte jede Änderung eines Magnetfeldes zu einem elektrischen Wirbelfeld. Im Fall von Änderungen des Erdmagnetfeldes wird in der leitfähigen Erde ein elektrisches Feld induziert, welches Ströme in der Erdoberfläche treibt (siehe Abb. 12). Jede leitende, mit der Erde verbundene Infrastruktur bietet einen Pfad für diese induzierten Ströme. Elektrische Hoch- und Höchstspannungsnetze sind über Transformatoren starr geerdet und bieten daher einen niederohmigen Pfad für GICs. Die Frequenz von GICs ist viel kleiner als die 50 (60) Hz Netzfrequenz, daher können GICs als Gleichströme betrachtet werden.

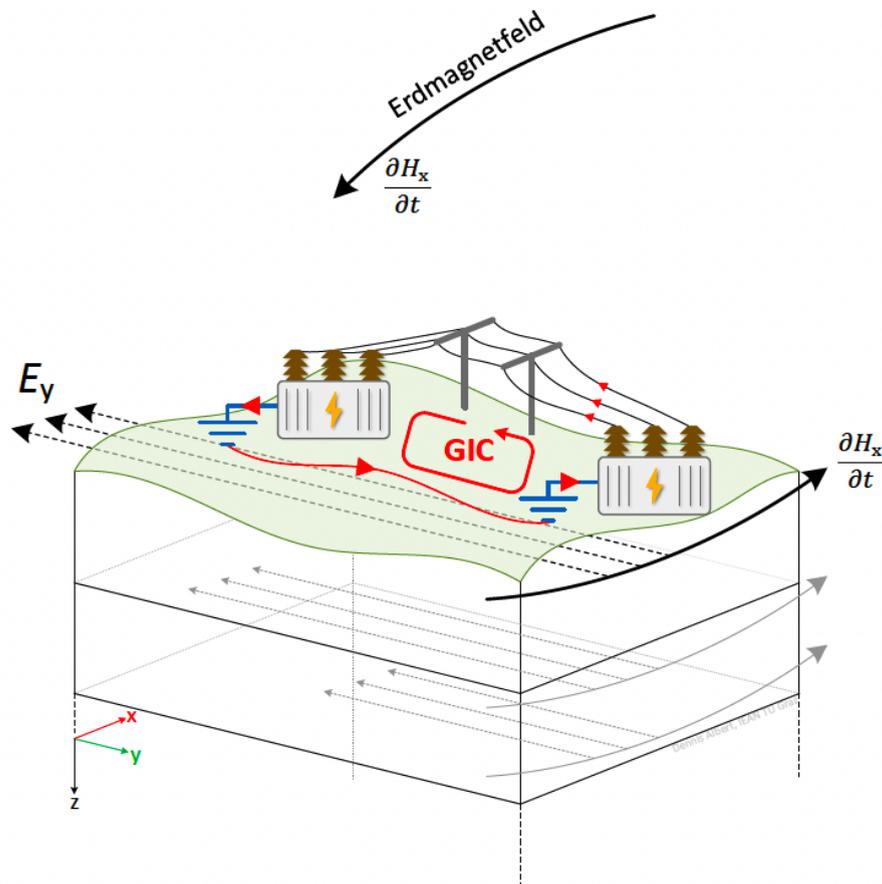


Abbildung 12. Geomagnetische Induktion im Erdboden und geomagnetisch induzierte Ströme (GIC) in Hochspannungsfreileitungen. dH/dt beschreibt die zeitliche Änderungen im Erdmagnetfeld, und E_y das daraus resultierende elektrische Feld. Die graue Boxen sind Transformatoren, und GICs fließen über die Erdungspunkte durch den Transformatoren in die Leitungen. Quelle: Dennis Albert, TU Graz.

In Leistungstransformatoren führen die überlagerten GICs zu Erwärmung und einem Gleichfluss im Transformatorkern. Bei hohen GICs kommt es durch den Gleichfluss zu Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Hysteresekurve und folglich zu Halbzyklussättigungen. Dadurch steigen nicht nur die Geräuschemissionen auf höhere Pegel, sondern es kommt auch zu Verzerrungen im Magnetisierungsstrom und daraus resultierenden Verzerrungen in Strom und Spannung an den

Transformatoranschlüssen. Der steigende Blindleistungsbedarf des Transformators muss gedeckt werden, um die Stabilität des Stromnetzes zu erhalten. Kann der Blindleistungsbedarf nicht mehr gedeckt werden, da z.B. Kompensationsanlagen wegen Überlastung ausfallen, kommt es zu großflächigen Stromausfällen wie 1989 im Hydro-Quebec Netz im Westen Kanadas (Bolduc, 2002). Die entstehende Wärme im Transformator kann bei hohen GICs zur thermischen Zerstörung führen (Gaunt & Coetzee, 2007), aber auch niedrigere GICs beschleunigen Alterungsprozesse und verkürzen so die Lebensdauer von Transformatoren. Die Verzerrung von Strom und Spannung durch gesättigte Transformatoren kann, wie 2003 in Schweden, zu Fehlauslösungen von Schutzgeräten führen.

Die Berechnung von GICs setzt sich im aus drei Teilbereichen zusammen: Die Messung des geomagnetischen Feldes, die Berechnung des resultierenden elektrischen Feldes und die Berechnung der Ströme und Auswirkungen im elektrischen Energienetz. Die Messung des geomagnetischen Feldes auf Erdoberfläche wird weltweit durch Observatorien (INTERMAGNET-Observatorien, z.B. das Conrad Observatorium in Österreich) durchgeführt, aber auch Satellitenmessungen werden für eine Vorhersage des magnetischen Feldes verwendet. Für die Berechnung des elektrischen Feldes werden Leitfähigkeiten der betrachteten Gebiete benötigt. Mittels 1D, 2D oder 3D Modellen der Erde, welche die Leitfähigkeit in Tiefen bis zu mehreren 1000 m beschreiben, wird ein elektrisches Potential an der Erdoberfläche berechnet.

Für die Berechnung der Ströme gibt es zwei verschiedene Ansätze (Albert et al., 2021): Der erste benötigt Stromnetzdaten (Leitungswiderstände, Transformatoren, Umspannwerkpositionen) und berechnet aus den Abständen zwischen geerdeten Sternpunkten und den Widerständen zwischen den Punkten einen resultierenden Strom im Transformator (hier gibt es wiederum zwei verschiedene Methoden). Der zweite Ansatz berechnet aus GIC-Messungen und elektrischen Feldern Faktoren für jeden Messpunkt und nutzt die gewonnenen Faktoren für neue GIC-Berechnungen.

GICs können zudem Probleme in unterirdischen Pipelines verursachen. Hier können GICs insbesondere Korrosion verstärken und damit Messungen zur Korrosionskontrolle beeinträchtigen. Obwohl Gleichströme in der Höhe von 30 A bereits in Rohrleitungen in Finnland gemessen worden sind (Tsurutani & Hajra, 2021), gibt es bisher noch wenige Forschungsgruppen und Firmen die sich intensiv mit dem Thema GIC in Pipelines auseinandersetzen.

ANWENDUNGSBEREICHE

Neue Forschungsergebnisse im Bereich Weltraumwetter, insbesondere die Studie der Auswirkungen von Weltraumwetter-Ereignissen auf unsere moderne Technologien, knüpfen nahtlos an gesellschaftsrelevante Anwendungsbereiche an.

Stromübertragungsnetze und Pipelines

Die Berechnung von GICs lässt eine Beurteilung von gefährdeten Umspannwerken und Transformatoren zu. Dies ermöglicht zum einen eine präventive Installation von Reduktionsmaßnahmen und zum anderen die Erstellung von Handlungsleitfäden für Stromnetzbetreiber. DC Blocker in Sternpunkten oder Leitungen werden in Stromnetzen nördlicher Breite bereits effektiv eingesetzt. Um die erhöhten Geräuschemission von Transformatoren und GIC-Einfluss zu reduzieren, werden vermehrt Leistungselektronische Komponenten in Transformatoren eingebaut, welche Sättigungseffekten entgegenwirken.

Für die Berechnung von GICs gibt es mehrere Tools, die mit unterschiedlichen Methoden auf verschiedenen Plattformen realisiert wurden. Diese werden während der Planungs- und Betriebsphase zur Risikoeinschätzung für Stromnetze sowie zur historischen Analyse von Ereignissen eingesetzt. Im Projekt GEOMAGICA der ZAMG wurde ein auf Python basierendes Programm erstellt, welches GICs im Österreichischen Stromnetz berechnet ([Link](#)). Das elektrische Feld wird aus Magnetfeld Daten, einem 1D-Modell der unterirdischen Widerstandsschicht und einem 2D-Oberflächen-Dünnschichtmodell der Erde berechnet. Die Berechnungen im Stromnetz werden durch die Lehtinen-Pirjola Methode durchgeführt. Mit dem LFC Simulator wurde vom IEAN (TU Graz) ein GIC Berechnungsprogramm mit grafischer Benutzeroberfläche auf Matlab-Basis erstellt. Das elektrische Feld wird mit der plane-wave Methode aus Magnetfelddaten und einem 1D Erdschichtmodell berechnet. Die Ströme im Hochspannungsnetz werden mit dem aus der Energietechnik bekannten Knoten-Admittanzverfahren ermittelt ([Link](#)). Im PREDSTORM-Projekt wird ein Machine-learning Algorithmus mit dem Ziel entwickelt, den Sonnenwind an LI vorherzusagen ([Link](#)). Aus der Vorhersage können unter anderem der Dst index und die Höhe von GICs abgeschätzt werden.

Die Messung von den Auswirkungen von geomagnetischen Strömen in Hochspannungsnetzen wird vor allem von Ländern in nördlichen Breitengraden durchgeführt. In Österreich werden mittlerweile an 9 Transformatoren in 8 Umspannwerken Messungen durchgeführt. Die Messdaten werden für die Evaluierung und Entwicklung von Berechnungsmethoden, zur Identifikation von anderen DC Quellen sowie zur Störungsanalyse verwendet.

Der Einfluss von GICs ist vor allem bei Transformatoren hoch. Detaillierte Modelle können die kurz- und langfristigen Folgen für Transformatoren und Netze nachbilden. Thermische Modelle (Raith & Schichler, 2016) bilden die Transformatorerwärmung und die damit verbundene

beschleunigte Alterung der Wicklungsisolation in Transformatoren nach, während Hystereseamodelle den unmittelbaren Anstieg an Blindleistung zeigen (Albert et al., 2022). Der Vergleich von Modellen und Transformatoren im Labor liefert skalierbare Ergebnisse für Hoch- und Höchstspannungsnetze.

Bei Erdgas- und Öl-Pipelines wird Korrosion aktiv mit einem kathodischen Schutz (engl. cathodic protection, CP) verhindert. Hier wird die Leitung mit einer Beschichtung aus niedrig leitendem Material versehen, und auf einem konstanten Potential gegenüber der umgebenden Erde gehalten.

Navigation und Kommunikation

Die Kommunikation zwischen modernen Technologien am Boden und Satelliten kann durch Weltraumwetter beeinträchtigt werden, da die Ionosphäre Funkwellen reflektieren, brechen oder absorbieren kann. Dies gilt nicht nur für Funksignale von Radiokommunikation sondern auch für Satelliten des Global Positioning System (GPS). Weltraumwetter kann die Struktur in der Ionosphäre verändern, indem es Bereiche mit erhöhter Dichte schafft. Da die Ionosphäre einen anderen Brechungsindex hat als die darüber und darunter liegenden Schichten, werden die Funkwellen beim Übergang "gebogen". Starke und lokal begrenzte Unterschiede in der Dichte der Ionosphäre tragen ebenfalls erheblich zu den Auswirkungen auf die Satellitenkommunikation und -navigation bei. Diese Gradienten sind während geomagnetische Stürme am stärksten ausgeprägt (Budden, 1961).

Wenn die Signale von globalen Kommunikationssystemen wie etwa dem Global Positioning System (GPS) die Ionosphäre der Erde durchlaufen erfahren sie je nach Frequenz eine Verzögerung entlang des Weges. Abhängig von der Sonnenaktivität kann diese Signalstörung bis zu 50 Meter Ungenauigkeit in der Position betragen, oder sogar zu einem vollständigen Signalverlust führen. Aus diesem Grund sollte der Einfluss der Ionosphäre unbedingt in der Auswertung von Kommunikationssignalen Berücksichtigung finden. Da die Ionosphäre ein dispersives Medium darstellt kann der Störeinfluss durch Messungen auf mehreren Frequenzen weitgehend eliminiert werden. Handelt es sich jedoch bei den Instrumenten wie in vielen Fällen (Smartphones, Großteil von Nanosatelliten) um Ein-Frequenz Empfängern so können die Effekte ausschließlich modelliert werden (z.B. Klobuchar, NeQuick, NTCM-GL).

Satelliten und Weltraummissionen

Extreme Weltraumwetterereignisse und dadurch ausgelöste geomagnetische Stürme sind in der Lage die Erdatmosphäre durch erhöhte Energiezufuhr (z.B. durch Jouleschen Wärmeentwicklung) aufzuheizen. Als Folge davon kommt es zu einer Ausdehnung der Erdatmosphäre. Speziell Forschungssatelliten welche prinzipiell auf Grund ihres Einsatzzweckes in einer niedrigeren Bahn (< 1000 km) die Erde umkreisen sind dadurch einem erhöhten Luftwiderstand ausgesetzt was sich in einem Verlust der Flughöhe widerspiegelt. Bei Satelliten, welche mit einem Beschleunigungssensor ausgestattet sind, können diese Effekte direkt gemessen werden. Diese Instrumente messen sämtliche nicht-gravitativen Kräfte, die auf den Satelliten wirken. Dazu zählen der atmosphärische Luftwiderstand, der Strahlungsdruck der Sonne sowie der Erdalbedo. Durch die Information über den aktuellen Luftwiderstand können Erkenntnisse über den Zustand und die Variabilität der Neutraldichte der Erdatmosphäre entlang des Satellitenorbits gezogen werden.

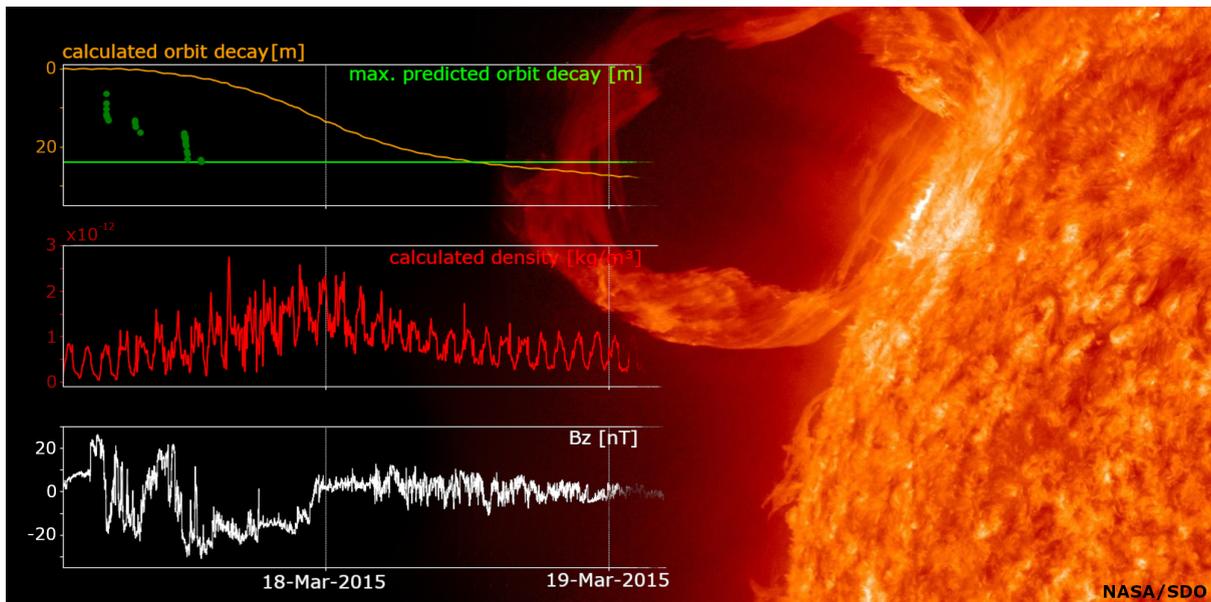


Abbildung 13. Das Bild zeigt den prädizierter (grün) und berechneten (orange) Höhenverlust des GRACE Satelliten während eines geomagnetischen Sturms im März 2015. In Rot dargestellt ist die berechnete Atmosphärendichte und in weiß ist die Echtzeitmessung der Magnetfeldkomponente B_z im Lagrange Punkt L1, welche die Eingangsgröße für das Vorhersagetool ist. Im aktuellen Beispiel betrug die Vorhersage des maximalen Höhenverlustes ungefähr 22 Stunden. Quelle: TUGraz und NASA/SDO.

Der Vorteil dieser Methodik ist, dass die Daten in einer sehr hohen zeitlichen Auflösung (Sekunden) vorliegen und zusätzlich beinahe kontinuierliche Messungen seit Anfang des Jahrtausends vorliegen. Speziell die Satellitenmissionen CHAMP und GRACE / GRACE-FO konnten damit wertvolle Erkenntnisse über den Einfluss von Sonnenstürmen auf die obere Erdatmosphäre liefern. Heutzutage werden diese Ergebnisse auch in die neueste Generation von Thermosphärenmodellen (Jacchia-Bowman 2008, NRLMSIS 2.0, DTM 2020) assimiliert (Abb. 13). Dies hat enorme Relevanz für die präzise Bahnbestimmung einer Vielzahl von Satelliten, welche nicht mit Beschleunigungssensoren ausgestattet sind und daher der Störeinfluss ausschließlich modelliert werden kann.

Zusätzlich wird in diversen wissenschaftlichen Arbeitsgruppen, wie zum Beispiel in der von der International Association of Geodesy (IAG) Commission-4 gebildeten Joint Working Group „Improvement of Thermosphere Models“, daran geforscht eine verbesserte und standardisierte Prozedur zur Bestimmung von Neutraldichten der Atmosphäre zu entwickeln und dadurch die Weiterentwicklung der Modelle zu unterstützen.

Neben den Auswirkung auf Satelliten können Weltraumwetterereignisse auch für Astronauten von Bedeutung sein (Coster et al., 2019, Chapter 8). Der Sonnenzyklus hat eine beträchtliche Auswirkung auf die mögliche Strahlungsdosen, denen Astronauten ausgesetzt sind. Während eines Sonnenmaximum wird die kosmische Strahlung äußerst effektiv durch das Magnetfeld der Sonne abgeschirmt. Während eines Sonnenminimums existiert jedoch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Krebserkrankungen bei Astronauten, die sich während Missionen außerhalb der schützenden Magnetosphäre aufhalten (z.B. bei einer Mission zum Mars).

Eine wesentliche Komponente sind zudem Solar Energetic Particle (SEPs) Ereignisse, die zukünftige Missionen treffen könnten. SEPs bestehen aus Proton, Elektronen und Ionen, die bei Sonneneruptionen (z.B. solar flares) erzeugt und auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Bei einem sehr starken Event würden Astronauten außerhalb der Erdmagnetosphäre innerhalb

weniger Stunden sterben. Das verbesserte Verständnis sowie auch die Vorhersage von SEPs ist daher gerade ein wichtiges Thema (Malandraki & Crosby, 2018).

Aviation

Weltraumwetter kann die Luftfahrt auf vielfältige Art und Weise beeinträchtigen, betroffen sind vor allem die Kommunikation mit bodengestütztem oder satellitenbasiertem Funkverkehr, die Navigation, die Strahlungsbelastung (speziell in großen Flughöhen und über polaren geomagnetischen Breiten) aber auch z.B. die Radaranlagen von Flugsicherungen.

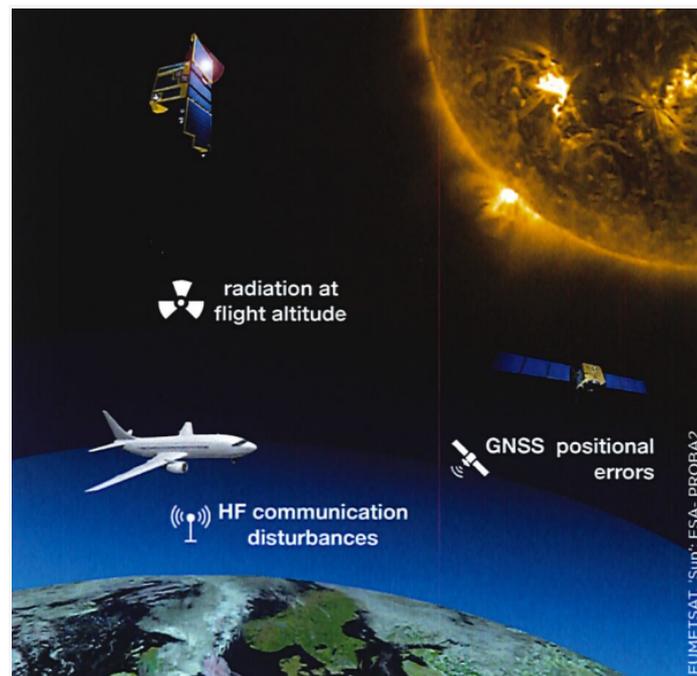


Abbildung 14. Eine Zusammenfassung der Auswirkungen vom Weltraumwetter auf Flüge und Aviation. Quelle: UNOOSA.

Bodengestützter **Funkverkehr** ist in der Luftfahrt sowohl akustisch (Radio Voice) als auch für Datentransfer (CPDLC ... Controller Pilot Data Link Communication) in Verwendung. Dabei kommt die natürliche Eigenschaft der Ionosphäre zum Tragen, Radiowellen bestimmter Frequenzbereiche zu reflektieren und damit über größere Distanzen zu verbreiten, als dies infolge der Krümmung der Erdoberfläche auf direktem Wege möglich wäre. Diese Frequenzbereiche sind allerdings stark von der Elektronendichte abhängig und demnach auch Schwankungen unterworfen, die zeitweilig ein erhebliches Ausmaß erreichen. So kann sich z.B. nach einem intensiven **Solar Flare** auf der Tagseite der Erde (SID ... Sunlit Ionospheric Disturbance) bzw. nach einem ausgeprägten **Solar Proton Event** vor allem über den Polkappen (PCA ... Polar Cap Absorption) die Elektronendichte in der oberen und mittleren Atmosphäre so stark erhöhen, dass die Reflexion des HF/KW-Bandes jetzt häufig schon in geringeren Höhen als im Normalfall erfolgt, wodurch sich die Reichweitenqualität dieses Frequenzbereiches verschlechtert. Speziell die niedrigeren Frequenzen sind dann beeinträchtigt, werden teils sogar ausgelöscht, während andererseits VHF/UKW eine teils störende Überreichweite erzielen kann. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang aber auch die **Geomagnetischen Stürme**, welche zunächst einmal, u.a. durch ihre dichten inhomogenen Elektronenwolken (sporadische Es-Schichten), ebenfalls vor allem niedrigere Frequenzen beeinträchtigen („HF COM Absorption“). Speziell zum Ende solcher

Stürme sind aber dann oftmals die höheren Frequenzen des HF/KW-Bandes unbrauchbar („HF COM Depression“) und es muss eine MUF (Maximum Usable Frequency) bestimmt werden.

Neben der bodengestützten ist aber auch die satellitenbasierte Kommunikation (speziell L-Band Übertragungen, 1-2 GHz, akustisch und Daten) sowie die **Navigation** (GNSS ... Global Navigation Satellite System) von Veränderungen des Ionisationsgrades der hohen Atmosphäre erheblich betroffen. So werden die im Mikrowellenbereich abgestrahlten GPS-Signale beim Durchdringen einer vermehrt mit Elektronen angereicherten Ionosphäre vor allem während **Geomagnetischer Stürme** spürbar verlangsamt („GNSS Delay“). Die Folge sind fehlerhafte Signallaufzeiten, die ohne geeignete Korrekturdaten ungenaue Positionsbestimmungen hervorrufen. Die Korrekturdaten werden z.B. von sogenannten Augmentation Systemen bereitgestellt, allerdings sind diese bei starken Stürmen fallweise nicht erreichbar. Zudem besteht abseits der ionosphärischen Effekte auch noch die Gefahr, dass Kommunikations- und Navigationssatelliten, welche stärker ionisierte Regionen durchqueren, Schaden erleiden oder fehlerhafte Sensordaten produzieren. Als Reaktion vergrößern Flugsicherungen in solchen Situationen fallweise die Mindestabstände zwischen Flugzeugen, um die Sicherheit des Flugverkehrs weiterhin in ausreichendem Maße zu gewährleisten. Ein spezielles Phänomen sowohl äquatornaher als auch polarer geomagnetischer Breiten ist das sporadische Auftreten von **Szintillationen** in Form von Amplituden- und/oder Phasenverschiebungen des GPS-Signals („GNSS Scintillation“), welche besonders in Regionen ausgeprägter räumlicher Elektronendichtegradienten häufiger vorkommen. Dabei werden einzelne GNSS-Signale so verzerrt, dass sie vom Empfänger teils nicht verarbeitet werden können, was zu Fluktuationen bis zum Signalverlust führen kann („loss-of-lock“).

Interferenzen und erheblich störendes Empfängerrauschen kann in manchen Fällen von markanten Radiowellenemissionen, welche bisweilen mit Sonneneruptionen einhergehen, verursacht werden. Diese sogenannten **Solar Radio Bursts** (SRBs) stellen u.a. für ATC Radaranlagen, welche im UHF-Bereich operieren (z.B. Secondary Surveillance Radar), eine Gefährdung dar, speziell bei hohen Intensitäten in den kritischen Spektralbereichen. Die Gefahr ist am größten bei Sonnenhöhen um 2-12°, also wenn das Radar direkt in die Sonne „blickt“.

Informationen über für die Luftfahrt relevante Weltraumwetterereignisse werden seit November 2019 im Anlassfall von 4 ICAO Space Weather Advisory Zentren (NOAA SWPC, PECASUS, ACFJ consortium, CRC) bereitgestellt. Die Vorhersagen mit den Intensitätsklassen „MOD“ (moderate ... be aware!) und „SEV“ (severe ... act!) sind zwar grundsätzlich schwellwertbezogen, zielen aber auf die voraussichtlichen Auswirkungen hin („impact-based“).

Gemäß den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (**ICRP**) in Veröffentlichung 60 (ICRP, 1991) hat der Rat der Europäischen Union (EU) in seiner Richtlinie 96/29/EURATOM vom 13. Mai 1996 (EU, 1996) Grundlegende Sicherheitsstandards (Basic Safety Standard - BSS), die die Exposition gegenüber natürlichen Quellen **ionisierender Strahlung**, einschließlich kosmischer Strahlung, als berufliche Exposition für fliegendes Personal kategorisiert. Ein Jahr später veröffentlichte die Europäische Kommission Empfehlungen zur Umsetzung des BSS, insbesondere die Empfehlung von Kontrolldosisgrenzwerten für Flugzeugbesatzungen und der Hinweis, dass Vielflieger möglicherweise auch Vorkehrungen zur Bestimmung der Dosis umsetzen (EU, 1997). Die europäische Richtlinie aus dem Jahr 1996 (EU, 1996) wurde in Gesetze und Verordnungen vieler EU-Mitgliedstaaten aufgenommen und deren Umsetzung in Europa überwacht (Thierfeldt et al., 2009; Drouet & Michelet, 2012). Das BSS, schreibt vor, dass

geeignete Maßnahmen ergriffen werden müssen, wenn die effektive Dosis der Flugzeugbesatzung über 1 mSv pro Jahr liegt. Anschließend werden die folgenden vier Schutzmaßnahmen identifiziert:

- Beurteilung der Exposition der betroffenen Besatzung
- Berücksichtigung der bewerteten Exposition bei der Organisation von Arbeitsplänen im Hinblick auf die Reduzierung der Dosis der hochexponierten Besatzung.
- Die betroffenen Arbeitnehmer über die Gesundheitsrisiken zu informieren, die ihre Arbeit mit sich bringt.
- Der gleiche besondere Schutz während der Schwangerschaft gilt für weibliche Besatzungsmitglieder und andere Arbeitnehmerinnen.

WELTRAUMWETTER INTERNATIONAL

Um die Forschung und das Verständnis im Bereich Weltraumwetter voranzutreiben, wird eine internationale Zusammenarbeit benötigt. Wissenschaftliche Messungen und Bilder kommen hauptsächlich von international koordinierten Satellitenmissionen (z.B. Solar Orbiter Mission), aber auch von nationalen Missionen (z.B. GEO-KOMPSAT2 aus Südkorea). Bodengebundene Daten werden von Observatorien und Messstationen erstellt, welche die Sonne und die Auswirkungen des Weltraumwetter auf der Erde beobachten. Daten von den Satelliten und von Observatorien werden meist öffentlich geteilt um weltweit Forschung zu fördern. Die Wichtigkeit der Erforschung des Weltraumwetters erfährt mehr und mehr Anerkennung. Aktivitäten zum Thema Weltraumwetter werden beispielsweise von internationalen Organisationen wie den Vereinten Nationen (UN) koordiniert.

Internationale Organisationen

Es gibt auf internationaler Ebene bereits viele Organisationen, die Aktivitäten und Forschung im Bereich Weltraumwetter aktiv fördern. Die größten Initiativen und Organisationen sind im folgenden Abschnitt aufgelistet.

Vereinte Nationen (UN COPUOS und UNOOSA)

In den Vereinten Nationen (UN) gibt es zwei untergeordnete Organisationen, die sich mit dem Thema Weltraumwetter beschäftigen: (1) United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), und (2) United Nations Committee for Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS).

UNOOSA ist die "Agentur für Weltraumfragen". Zu den breiten Aufgaben gehören die Förderung einer internationalen Kooperation um die friedliche Nutzung des Weltraums sicherzustellen. Eine wesentliche Aufgabe ist hierbei die Weiterentwicklung des allgemeinen Weltraumrechts.

Als Teil von COPUOS wurde die International Space Weather Initiative (ISWI) in 2009 ins Leben gerufen. ISWI ist ein Programm zur Förderung der internationalen Kooperation in Weltraumwetterforschung. Dieses Programm umfasst den koordinierten Einsatz von Instrumenten, der Analyse und Interpretation von Daten aus Weltraummissionen, und der Vermittlung der Ergebnisse an die Öffentlichkeit.

Webseite UNOOSA: <https://www.unoosa.org/>

Webseite COPUOS: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/index.html>

Webseite ISWI: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/bssi/iswi.html>

European Space Agency (ESA)

Die Europäische Weltraumorganisation (ESA) wurde 1975 zur Koordinierung der europäischen Raumfahrtaktivitäten gegründet. Heute beschäftigt sie sich auch mit dem Thema Weltraumwetter als Teil des “Space Safety Programme” (früher “Space Situational Awareness”), welches 2009 begonnen hat. Im Anschluss darauf, wurde mit dem Aufbau eines “Space Weather Service Networks” begonnen. Die Koordination, Homepagewartung, und statistische Auswertung zu den Services der verschiedenen Experten-Teams in Europa wird durch das “Space Weather Coordination Center” (SSCC, Brüssel, Belgien) geleitet. Eine wesentliche Aufgabe ist, dass sowohl Experten als auch die breite Öffentlichkeit auf Vorhersagen zugreifen können.

Webseite ESA Space Weather Service Network: <https://swe.ssa.esa.int/>

Webseite SSA-Programm: https://www.esa.int/Safety_Security/SSA_Programme_overview

International Civil Aviation Organisation (ICAO) und PECASUS

ICAO (1944 gegründet) ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UN) um die Planung und Entwicklung globaler Zivilluftverkehrssysteme zu fördern.

PECASUS (2018 als Service für ICAO gegründet) ist ein Konsortium aus Expertengruppen in Europa, die Vorhersagen und Echtzeitanalysen des Weltraumwetters liefern. Vorhersagen sollten vor allem “impact-based” sein, und betreffen die HF Radio-Kommunikation, GPS-Empfang und Strahlung bei Flughöhen. Seit 2019 ist das Space Weather Service 24 Stunden am Tag verfügbar.

Webseite ICAO: <https://www.icao.int>

Webseite PECASUS: <https://pecasus.eu/>

International Space Environment Service (ISES)

ISES wurde 1962 für die internationale Koordination von Weltraumwetterdiensten (“*space weather services*”) gegründet. Sie hat eine offene Kollaboration mit dem World Meteorological Organisation (WMO), UN COPUOS, COSPAR. Ende 2021 waren 22 Institutionen Teil von ISES.

ISES besteht aus Regional Warning Centers (RWC), Associate Warning Centers (AWC), und Collaborative Expert Centers (CEC). Regional Warning Centers sind die Verteiler von Informationen und Produkten zum Thema Weltraumwetter. Das Sonnenobservatorium Kanzelhöhe in Österreich ist beispielsweise eines der ISES Regional Warning Center.

Webseite: <http://www.spaceweather.org>

Committee on Space Research (COSPAR)

COSPAR wurde 1958 als Teil des International Council for Scientific Unions (heute ISC, ein INGO) gegründet. COSPAR ist eine internationale Organisation für wissenschaftliche Aktivitäten im Bereich Weltraumforschung. Hierzu gehört das Space Weather Panel, welches ein Forum bietet um die Fortschritte in der Weltraumwetterforschung zu diskutieren. Hierbei unterstützt es derzeit aktiv die Arbeit der International Space Weather Action Teams (ISWAT). Weiters unterstützt COSPAR die Entwicklung der internationalen “Space Weather Roadmap” um aktuelle Fragen offenzulegen und zukünftige Forschungsziele zu definieren.

Webseite COSPAR: <https://cosparhq.cnes.fr/>

Webseite ISWAT: <https://www.iswat-cospar.org/>

Weitere Organisationen

- Asia-Oceania Space Weather Alliance (AOSWA): <https://aoswa.nict.go.jp/>
- European Space Science Committee: <https://www.essc.esf.org/>
- The Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP): <https://scostep.org>
- International Space Weather Initiative (ISWI): <http://www.iswi-secretariat.org>
- International Living With a Star (ILWS): <https://www.cosmos.esa.int/web/ilws/home>
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA): <https://www.iaga-aiga.org/>

Informationsanbieter

Die Hauptanbieter von Daten, Vorhersagen und Informationen sind **ESA** (European Space Agency) und **NASA** (National Aeronautics and Space Administration, USA) bzw. **NOAA** (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). Es gibt zwei wesentliche Portale für Vorhersagen: 1) die **Space Weather Service Network** von ESA, und 2) das **Space Weather Prediction Center (SWPC)** von NOAA. Zudem gibt es auch weitere nationale und internationale Informationsanbieter, sowie auch private Anbieter. Jedoch werden sind die Daten oft nicht öffentlich zugänglich. Eine Zusammenfassung von den Anbietern und den verschiedenen Services befindet sich in Tabelle 1. Die zeitliche Auflösung der Vorhersagen (z.B. ob sie "Nowcasts" sind oder ob eine Vorhersage für die nächsten 24 Stunden angegeben wird) wird in den jeweiligen Spalten angegeben.

Legende für Tabelle 1

GS = Geomagnetische Stürme

SW = Sonnenwind

Sonne = Bilder von der Sonne, inkl. Sunspots & Koronale Löcher

AUR = Aurora/Polarlichter

GIC-E = Geomagnetisch induzierte Ströme und geoelektrische Felder

Particles = Solar Energetic Particles, Elektronen und weitere

RS = Aviation/Flüge und Radiation Storms

Radio = Radiostörungen

CMEs = koronale Massenauswürfe

Xray = X-Ray Flux (z.B. von Flares)

Zeitliche Auflösung der Vorhersagen

NOW - Nowcast, Echtzeitdaten

<2h - Vorhersage von 0-2 Stunden (meistens von Daten gemessen am L1-Punkt)

<24h - Vorhersage von 2-24 Stunden

>24h - Vorhersage von mind. 24 Stunden.

(Viele Vorhersagen werden von den gleichen NOAA SWPC Daten hergeleitet oder kopiert.)

Tabelle 1: Eine Liste der nationalen und internationalen Datenportale, die Weltraumwetter-Services anbieten.

LAND	Institution	Webseite	Services Sonne & Sonnenwind					Services Erde & Erdmagnetfeld					
			Sonne	CMEs	SW	Parti- cles	X-ray / Flares	GS	AUR	GIC-E	Radio	Ionos TEC	RS
Australien	<i>Bureau of Meteorology</i>	https://www.sws.bom.gov.au/Space_Weather	-	-	NOW	-	NOW	<24h NOW	<24h NOW	<24h NOW	NOW	NOW	-
Belgien	<i>SIDC (Solar Influences Data Analysis Center)</i>	http://sidc.be/	NOW	NOW	-	<2h NOW	NOW	NOW	-	-	NOW	-	-
Brasilien	<i>National Institute for Space Research</i>	http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/en/	NOW	-	NOW	-	NOW	<2h NOW	-	-	-	NOW	-
China	<i>Chinese Academy of Sciences</i>	http://eng.sepc.ac.cn/	-	-	>24h NOW	>24h NOW	>24h NOW	>24h NOW	-	-	-	NOW	-
Europe	<i>ESA (European Space Agency)</i>	Space Weather Service Network: https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather	NOW	>24h NOW	>24h NOW	NOW	<24h NOW	>24h NOW	>24h NOW	<2h NOW	NOW	<2h NOW	NOW
Finnland	<i>Finnish Meteorological Institute</i>	https://rwc-finland.fmi.fi/index.php/space-weather-in-finland/	NOW	-	-	-	-	<2h NOW	<2h NOW	NOW	-	NOW	-
Kanada	<i>Natural Resources Canada</i>	https://www.spaceweather.gc.ca/index-en.php	-	-	-	>24h NOW	NOW	>24h NOW	>24h NOW	-	NOW	NOW	-
Indonesien	<i>National Institute of Aeronautics and Space</i>	http://swifts.sains.japan.go.id/	-	-	-	NOW	<24h NOW	<24h NOW	-	-	NOW	<24h NOW	-
Japan	<i>National Institute of Information and Communications Technology</i>	Space Weather Forecast Center: https://swc.nict.go.jp/en/	<24h NOW	-	NOW	<24h NOW	NOW	<24h	<2h	-	-	<24h	-
Mexiko	<i>National Autonomous University of Mexico</i>	http://www.sciesmex.unam.mx/	NOW	-	NOW	NOW	NOW	NOW	-	-	NOW	NOW	-

Norwegen	<i>The Arctic University of Norway</i>	https://site.uit.no/spaceweather/	NOW	-	NOW	-	-	>24h NOW	<2h NOW	NOW	NOW	NOW	NOW
Österreich	<i>Kanzelhöhe Observatory</i>	https://spaceweather.at/	NOW	-	NOW	NOW	NOW	NOW	-	-	-	-	-
Polen	<i>Polish Academy of Sciences</i>	http://rwc.cbk.waw.pl/	NOW	-	-	-	-	NOW	-	-	-	>24h NOW	-
Russland	<i>Institute of Applied Geophysics, Russian Academy of Sciences</i>	http://ipg.geospace.ru/	NOW	-	NOW	-	-	NOW	-	-	NOW	>24h NOW	-
Schweden	<i>Swedish Institute of Space Physics</i>	https://www.spaceweather.se/	NOW	-	>24h	-	-	<2h NOW	NOW	-	-	-	-
Südafrika	<i>SANSA (South African National Space Agency)</i>	https://spaceweather.sansa.org.za/	NOW	-	-	-	>24h	>24h NOW	-	-	-	NOW	-
Südkorea	<i>National Radio Research Agency</i>	https://spaceweather.rra.go.kr	NOW	-	NOW	NOW	NOW	>24h NOW	-	NOW	>24h NOW	>24h	>24h NOW
UK	<i>Met Office</i>	https://www.metoffice.gov.uk/weather/specialist-forecasts/space-weather	NOW	>24h NOW	-	>24h	-	>24h NOW	>24h	-	-	-	>24h
USA	NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration)	Space Weather Prediction Center: https://www.swpc.noaa.gov/	>24h NOW	NOW	NOW	NOW	<24h NOW	>24h NOW	<2h NOW	NOW	<24h NOW	NOW	<24h NOW

Bodeninfrastruktur

Sonnenobservatorien

Etwa 40 Sonnenobservatorien über die ganze Welt verteilt beobachten die Sonne. Zu den häufigsten Instrumenten gehören Sonnentelkope, die zur Beobachtung von Phänomenen in der Sonnenatmosphäre dienen. Die Sonne wird hier im sichtbaren Licht sowie auch in anderen Wellenlängen (z.B. H-Alpha) beobachtet. Oft kommen auch Magnetografen zum Einsatz um das Magnetfeld der Photosphäre zu messen. Viele Sonnenobservatorien betreiben auch Radioteleskope.

Das österreichische Sonnenobservatorium ist das Observatorium Kanzelhöhe für Sonnen- und Umweltphysik, das 1943 errichtet wurde.

Webseite Observatorium Kanzelhöhe: <https://www.kso.ac.at/>

Radioteleskope

Radioteleskope können für die Beobachtung der Sonne und Sonnenforschung eingesetzt werden. Obwohl die meisten der mindestens 150 Radioteleskope für Radioastronomie und nicht für die Beobachtung von Weltraumwetter gebaut wurden, nimmt die Verwendung von Radioteleskopen für Weltraumwetterforschung und -beobachtung zu. Das LOFAR-Array in Europa, zum Beispiel, plant in Zukunft laufend Weltraumwetterbeobachtungen durchzuführen.

Webseite LOFAR: <http://lofar4sw.eu/>

Geomagnetische Observatorien

Es gibt weltweit mehr als 200 geomagnetische Observatorien, die mit Magnetometern kontinuierlich das Erdmagnetfeld messen. Dabei wird die Feldstärke sowie auch die Feldrichtung gemessen. Regelmäßig werden dort manuelle Messungen des Magnetfeldes durchgeführt um eine absolute Basislinie zur Kalibrierung der relativen automatisierten Instrumente zu bestimmen, welche zudem auch als Qualitätsmaßstab für den Standort des Observatorium dient. Observatorien auf der ganzen Welt schließen sich im Rahmen der International Association for Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) zusammen. Etwa 100 Observatorien sind zertifiziert durch das International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). Hierbei unterliegen die Daten u.a. einem jährlichen internationalen und unabhängigen Review-Prozess. Daten der INTERMAGNET Observatorien sind nahe Echtzeit auf der INTERMAGNET Webseite verfügbar. Etwa 40 Observatorien weltweit stellen mittlerweile magnetische Messdaten mit 1Hz Auflösung in Echtzeit zur Verfügung, darunter auch das Conrad Observatorium in Österreich. Es gibt auch andere Magnetometer-Netzwerke wie IMAGE (Nordeuropa), Embrace MagNet (Südamerika), AMBER (Äquator), und andere. SuperMAG ist eine Plattform die zahlreiche geomagnetische Datensätze öffentlich zugänglich macht, darunter auch Variometerstationen, die keine absolute Feldinformation bieten.

Das Conrad Observatorium in Österreich ist ein INTERMAGNET Observatorium und betreibt seit 2014 geomagnetische Messungen.

Webseite INTERMAGNET: <https://intermagnet.github.io>

Webseite SuperMAG: <https://supermag.jhuapl.edu/info/>

Webseite Conrad Observatorium: <https://cobs.zamg.ac.at/>

Neutronenmonitore

Es gibt weltweit mindestens 50 Neutronenmonitore, die hochenergetische Teilchen auf der Erdoberfläche messen können. Die Anzahl der Teilchen korreliert mit der Sonnenaktivität. Neutronenmonitore können auch Ground Level Enhancements (GLEs) messen. GLEs sind sehr seltene Ereignisse (im Schnitt einmal pro Jahr). Die Sonne sendet während GLE Events Teilchen mit hoher Energie und Intensität aus. Diese Teilchen können in der Folge Strahlungswerte auf der Erdoberfläche stark erhöhen. Messdaten von Neutronenmonitoren werden in der Neutron Monitor Database (NMDB) erfasst.

Webseite NMDB: <https://www.nmdb.eu/>

Ionosonden und Riometer

Ionosonden und Riometer liefern einen Einblick in die aktuellen Bedingungen in der Ionosphäre. Eine Ionosonde besteht aus einem Hochfrequenz (HF)-Funksender (mit einer Frequenzabdeckung von 0,5 bis 23 oder 1 bis 40 MHz), einem HF-Empfänger (der die Sendefrequenz automatisch verfolgen kann), und einer Sendeantenne. Der Sender durchgeht den gesamten oder einen Teil des HF-Frequenzbereichs und sendet kurze Impulse aus. Diese Impulse werden an verschiedenen Schichten der Ionosphäre reflektiert, deren Echos vom Empfänger empfangen und analysiert. Ein Riometer (Relative Ionospheric Opacity Meter) ist ein Gerät zur passiven Beobachtung der ionosphärischen Absorptionsfähigkeit im Radiowellen-Frequenzbereich. Ähnlich wie Ionosonden bestehen Riometer aus Antennen, die im VHF-Bereich Funksignale empfangen können, und dadurch die "Opazität" der Ionosphäre für kosmische Hintergrundstrahlung messen.

Es gibt weltweit mehr als 100 Ionosonden - viele davon werden von der Lowell Center for Atmospheric Research, Mass, USA betrieben. Ionogramme von Ionosonden werden in der Digital Ionogram Database (DIDBase) gesammelt.

Webseite DIDBase: <https://giro.uml.edu/didbase/>

Aktuelle Satellitenmissionen

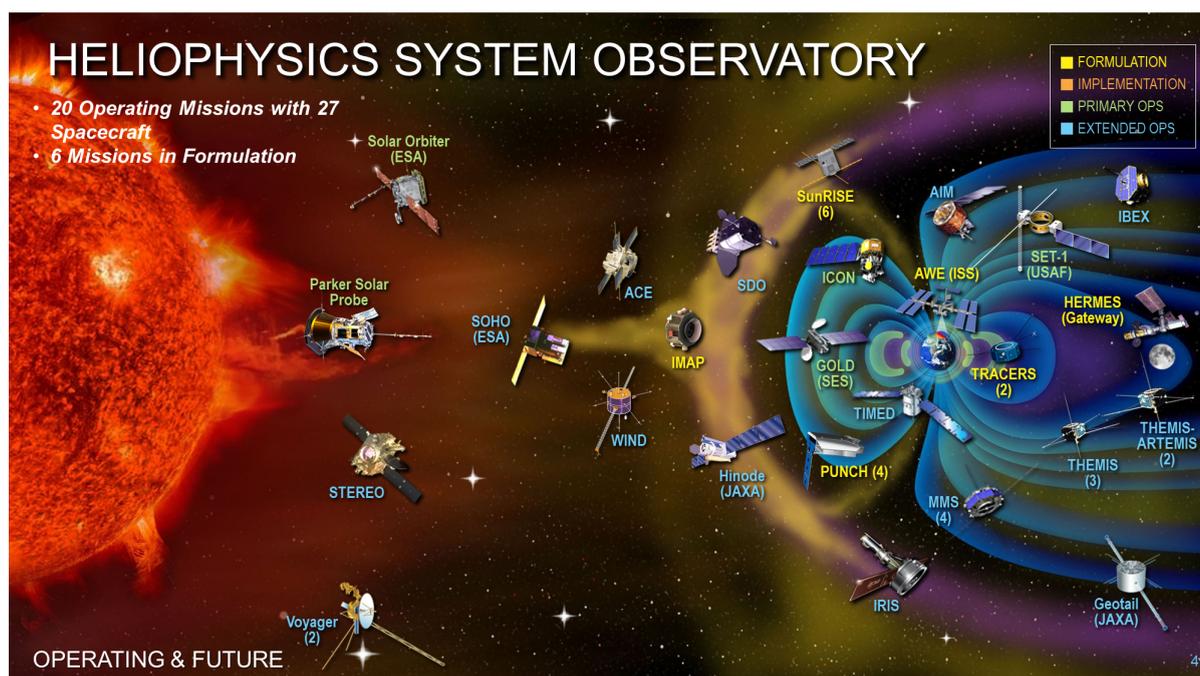


Abbildung 15. Eine Übersicht der aktuellen Satellitenmissionen, Stand Ende 2021. Quelle: NASA.

Eine Vielzahl an Satelliten beobachten die Bedingungen im Weltraum. Einige befinden sich in einer Umlaufbahn um die Erde, während andere nahe am Lagrange 1 (L1) Punkt sitzen. Der L1 Punkt befindet sich etwa 1.5 Mio km von der Erde entfernt, dies entspricht etwa 1% der Distanz zwischen Erde und Sonne. Messungen des Sonnenwindes an dieser Position führen zu einer Vorhersagezeit von 15 bis 90 Minuten bis der Teilchenstrom die Erde erreicht.

Satellitenmissionen überwachen einerseits die Bedingungen im Weltraum, und ermöglichen andererseits Forschung. Überwachungssatelliten beobachten die Bedingungen im Weltall um Vorhersage zu machen und Warnungen abzuschicken, während Forschungssatelliten die physikalischen Prozesse im Sonnensystem erforschen. Missionen werden heute speziell für Forschung oder Vorhersage designed, die tatsächliche Anwendung ist jedoch nicht stark getrennt.

Die laufenden Missionen (Stand Ende 2021) werden in der Folge von den jüngsten bis zu den ältesten aufgelistet. Es gibt viele weitere Missionen, die jedoch nicht mehr aktuell sind (z.B. Ulysses).

Solar Orbiter (SolO)

Betreiber	ESA, NASA
Start	Feb 2020
Rolle	Forschung
Position	Umlaufbahn um die Sonne. SolO wird sich bis auf etwa 30° über die Ekliptik (die Verbindungsebene zwischen Sonne und Erde) bewegen.

Messungen	Interplanetares Magnetfeld, energetische Teilchen, Teilchendichte (Elektronen, Protonen), Radiowellen Sonnenwindgeschwindigkeit, Bilder der Sonne in EUV, der Sonnenkorona und Heliosphäre, das Magnetfeld auf der Sonne, sowie X-Ray-Wellen auf der Sonne.
Beschreibung	Solo wird der erste Satellite sein, der die Pole der Sonne beobachten kann.
Link	https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter

Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2 (GEO-KOMPSAT2)

Betreiber	KARI (Korea Aerospace Research Institute)
Start	Dez 2018
Rolle	Forschung und Überwachung (Wetter und Weltraumwetter)
Position	Geostationärer Orbit, 35.786 km über Korea.
Messungen	Magnetfeld, Energetische Teilchen, Multispektralkamera für Wetterbilder
Beschreibung	GK2A überwacht das Weltraumwetter, insbesondere die Flussänderung von energetischen Teilchen während magnetischer Stürme.
Link	https://www.kari.re.kr/eng.do

Parker Solar Probe (PSP)

Betreiber	NASA
Start	Aug 2018
Rolle	Forschung
Position	Die Umlaufbahn reduziert sich laufend bis 2025, bis der Satellit eine Höhe von 6 Mio km um die Sonne erreicht hat.
Messungen	Interplanetares Magnetfeld, Teilchendichte (Protonen, Elektronen, Ionen), Sonnenwindgeschwindigkeit, Temperatur, energetische Teilchen. Bilder von der Sonnenkorona, sowie auch Magnetfelder auf der Sonne
Beschreibung	PSP umkreist die Sonne in immer kleiner werdenden Orbits, und taucht sogar in die Sonnenkorona ein. So können Prozesse in der Nähe der Sonne zum ersten Mal direkt gemessen werden.
Link	https://www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe

Magnetospheric Multiscale Mission (MMS)

Betreiber	NASA
Start	Mär 2015
Rolle	Forschung
Position	Die MMS-Konstellation hat vier Satelliten, die in eine tetraedrische Formation in einer stark elliptischen Umlaufbahn die Erde umkreisen.
Messungen	Magnetfeld, elektrisches Feld, energetische Teilchen, Teilchendichte (Elektronen, Ionen).
Beschreibung	MMS soll Forschung zu den Themen Mikrophysik der magnetischen Rekonnexion, Beschleunigung energetischer Teilchen und Turbulenz sammeln.
Link	https://mms.gsfc.nasa.gov/

Deep Space Climate Observatory (DSCOVR)

Betreiber	NASA, NOAA
Start	Feb 2015
Rolle	Überwachung
Position	L1 Punkt (ca. 1 500 000 km von der Erde entfernt)
Messungen	Interplanetares Magnetfeld, Sonnenwindgeschwindigkeit, geladene Teilchen, Teilchendichte (Elektronen), Temperatur, Kamera (erdgerichtet)
Beschreibung	DSCOVR überwacht die Bedingungen des Sonnenwinds, warnt frühzeitig vor koronalen Massenauswürfen und beobachtet zugleich die Erde.
Link	https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/dscovr-deep-space-climate-observatory

Swarm

Betreiber	ESA
Start	Nov 2013
Rolle	Forschung
Position	Erdnahe Umlaufbahn
Messungen	Magnetfeld, elektrisches Feld, Beschleunigung
Beschreibung	Swarm dient zur Erforschung des Erdmagnetfelds. Die Konstellation besteht aus drei Satelliten (Alpha, Bravo und Charlie), die sich auf zwei verschiedenen polaren Umlaufbahnen befinden, wobei zwei nebeneinander in einer Höhe von 450 Kilometern und ein dritter in einer Höhe von 530 Kilometern fliegen.
Link	https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm

Solar Dynamics Observatory (SDO)

Betreiber	NASA
Start	Feb 2010
Rolle	Forschung
Position	Geosynchrone Umlaufbahn (ca. 42 000 km)
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Detaillierte Bilder von der Sonnenatmosphäre in verschiedenen Wellenlängen. - Doppler Imaging um die Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche zu messen.
Beschreibung	SDO liefert detaillierte Bilder von der Sonnenoberfläche, um z.B. kleinflächige Strukturen und Magnetfelder zu untersuchen.
Link	https://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/main/index.html

Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS)

Betreiber	NASA
------------------	------

Start	Feb 2007
Rolle	Forschung
Position	Die Bahnen der 5 Satelliten, P1-P5, haben eine äquatoriale Erdumlaufbahn mit verschiedenen Distanzen zur Erde. Dies führt zu einer radialen Konstellation zwischen 10 bis 25 Erdradien wenn die Satelliten in der Apogäum liegen. Die zwei Satelliten, P1 und P2, fliegen seit 2011 in Mondumlaufbahn. Dadurch ist ein neue Mission, ARTEMIS (Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun), entstanden.
Messungen	Magnetfeld, Elektrisches Feld, Teilchenspektren (Protonen, Elektronen, Ionen) und makroskopische Parameter von Ionen und Elektronen (Dichte, Geschwindigkeit, Temperatur)
Beschreibung	THEMIS ist die erste Mission mit 5 identische Sonden verteilt in der Magnetosphäre. Ziel der Mission ist es dynamischste Prozesse in der Erdmagnetosphäre während magnetischen Teilstürmen zu verstehen und den Ursprung von Polarlichtern auf dem Grund zu gehen.
Link	http://themis.ssl.berkeley.edu/index.shtml

Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO)

Betreiber	NASA
Start	Okt 2006
Rolle	Überwachung und Forschung
Position	Orbit um die Sonne (STEREO-A mit 346 Tage, STEREO-B mit 388 Tage für einen Orbit)
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Interplanetares Magnetfeld, energetische Teilchen, Teilchendichte (Elektronen, Protonen, Ionen), Radiowellen, Sonnenwindgeschwindigkeit. - Sonnenbilder in EUV und weißes Licht. Dis Ausbreitung von Plasma im interplanetaren Raum kann auch mit den STEREO Koronografen fotografiert werden.
Beschreibung	STEREO besteht aus zwei identischen Satelliten, welche die Sonne in entgegengesetzten Orbits umkreisen. STEREO-A hat eine kürzeren Orbit während STEREO-B einen längeren Orbit hat. In 2015 hatten sich beide Satelliten bis auf die gegenüberliegenden Seite der Sonne bewegt. STEREO-B ist seit 2014 nicht mehr verwendbar.

Link	https://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/main/index.html
-------------	---

Cluster

Betreiber	ESA
Start	Aug 2001
Rolle	Forschung
Position	Die Bahnen der 4 Satelliten führen über die Polgebiete, wobei der erdnächste Punkt (Perigäum) in 19.000 km und der erdfernste Punkt (Apogäum) in 119.000 km Abstand vom Erdmittelpunkt nahe der Äquatorebene liegt. Die Distanzen zwischen den Satelliten können zwischen einigen hundert und einigen tausend Kilometern variiert werden.
Messungen	Magnetfeld, Elektrisches Feld, Teilchenspektren (Protonen, Elektronen, Ionen) und makroskopische Parameter von Ionen und Elektronen (Dichte, Geschwindigkeit, Temperatur)
Beschreibung	Cluster ist die erste Mission mit vier identischen Satelliten, die in Form einer Dreieckspyramide fliegen. Diese Formation ermöglicht ein 3D Studium der solar-terrestrischen Wechselbeziehungen in verschiedenen Regionen im erdnahen Weltraum.
Link	https://sci.esa.int/web/cluster

Advanced Composition Explorer (ACE)

Betreiber	NASA, NOAA
Start	Aug 1997
Rolle	Überwachung und Forschung
Position	L1 Punkt (Distanz von 1 500 000 km)
Messungen	Interplanetares Magnetfeld, Sonnenwindgeschwindigkeit, energetische Teilchen, Teilchendichte (Elektronen, Protonen, Ionen, Isotope)
Beschreibung	Das Ziel von ACE ist die Analyse von solaren, interplanetaren, interstellaren und kosmischen Partikeln. Echtzeitdaten von ACE werden zudem von NOAA verwendet, um Vorhersagen von Sonnenstürmen zu verbessern.
Link	https://solarsystem.nasa.gov/missions/ace/in-depth/

Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)

Betreiber	ESA, NASA
Start	Mai 1996
Rolle	Überwachung und Forschung
Position	L1 Punkt (1 500 000 km)
Messungen	<ul style="list-style-type: none"> - Bilder von der Sonne in verschiedenen Wellenlängen, Doppler Imaging um die Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche zu erfassen. Koronagrafen beobachten die Sonnenkorona. - Teilchendichte (Ionen, Elektronen).
Beschreibung	Bilder und Messungen von SOHO charakterisieren die äußersten Schichten der Sonne, die für viele Anwendungen wichtig sind, z.B. um Sonneneruptionen und koronale Massenauswürfe zu identifizieren.
Link	https://sohowww.nascom.nasa.gov/

Wind

Betreiber	NASA
Start	Nov 1994
Rolle	Von 1994 bis 2004 Forschung, heute Überwachung und Forschung
Position	Seit Mai 2004 beim L1 Punkt (1 500 000 km). 1994-2004 im erdnahen Orbit.
Messungen	Interplanetares Magnetfeld, Teilchendichte und -energien (Protonen, Ionen, Elektronen), energetische Teilchen, elektrisches Feld, Gammastrahlung, Sonnenwindgeschwindigkeit.
Beschreibung	Die Ziele von Wind waren die Untersuchung von Plasma, energiereicher Teilchen und des Magnetfeldes für magnetosphärische und ionosphärische Studien, sowie die Untersuchung grundlegender Plasmaprozesse, die im erdnahen Sonnenwind stattfinden. Wind wurde nach mehreren Umläufen durch die Magnetosphäre Anfang 2004 zum Lagrange-Punkt L1 gebracht, um den ungestörten Sonnenwind zu beobachten.
Link	https://wind.nasa.gov/

Geotail

Betreiber	JAXA, NASA
Start	Jul 1992
Rolle	Forschung
Position	Äquatoriale Umlaufbahn um die Erde (zur Zeit 10 - 30 Erdradien).
Messungen	Magnetfeld, Elektrische Feld, Ion und Electron Verteilungsfunktion, energetische Teilchen, Radiowellen
Beschreibung	Mission im Magnetosphärenschweif der Erde (mit Satelliten Potenzial Kontroller vom IWF). Erste Messung von kinetische Prozesse der Plasma in Rekonnexion (Energieumwandlungsprozess) im Weltraum.
Link	https://www.stp.isas.jaxa.jp/geotail/

Challenging Minisatellite Payload (CHAMP)

Betreiber	GFZ
Missionsdauer	Juli 2000 – September 2010
Rolle	Forschung
Position	Polarnahe Umlaufbahn in einer Anfangshöhe von 454 km und einer Inklination von 87.3°
Messungen	Beschleunigungssensoren, Magnetometer, GPS-Receiver, Laser Retroreflektor, Ion Driftmeter
Beschreibung	Die Mission war ausgelegt, um das Magnet- und Schwerefeld der Erde zu bestimmen. Atmosphärenforschung wurde mittels GPS-Radiookkultation sowie den sich an Bord befindlichen Beschleunigungssensoren durchgeführt.
Link	https://www.gfz-potsdam.de/champ/

Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE, GRACE-FO)

Betreiber	NASA, DLR
------------------	-----------

Start	GRACE: März 2002 – Oktober 2017; GRACE Follow On: Mai 2018
Rolle	Forschung
Position	Nahezu polare und kreisförmige Umlaufbahn mit einer Inklination von 89° und einer Anfangshöhe von 500 km.
Messungen	K-Band Entfernungsmesser, Beschleunigungssensor, Sternenkamera, GPS-Receiver, Laser Retroreflektor, Laserinterferometer (GRACE-FO)
Beschreibung	<p>Erste dezidierte Schwerefeldmission welche auf hochgenauen ($<0.1 \mu\text{m/s}$) Distanzmessungen (Mikrowellen) zwischen den beiden Satelliten GRACE A/B beruhte. Beide Satelliten umkreisten dabei die Erde auf derselben Umlaufbahn in einem Abstand von etwa 200 km. Die Nachfolgemission GRACE-FO hat zusätzlich für die Distanzmessung ein Laserinterferometer an Bord.</p> <p>Atmosphärenuntersuchungen werden wie bei der CHAMP Mission über Beschleunigungssensoren und der GPS-Radiookkultationsmethodik durchgeführt.</p>
Link	http://www2.csr.utexas.edu/grace/ & https://gracefo.jpl.nasa.gov/

Geostationary Operational Environmental Satellite Program (GOES)

Betreiber	NASA, NOAA
Start	Okt. 1975 mit GOES-I, aktuell sind GOES-13 und GOES-15 in Erdumlaufbahn
Rolle	Forschung und Überwachung
Position	Geosynchrone Umlaufbahn (ca. 42 000 km über die Erdoberfläche)
Messungen	Energetische Teilchen, Magnetfelder, Sonne in UV
Beschreibung	Obwohl die GOES-Satelliten hauptsächlich für Wetterbeobachtungen ausgestattet sind, beobachten sie auch die Sonne und messen die Anzahl an energetischen Teilchen.
Link	https://www.nasa.gov/content/goes

Geplante Missionen

PUNCH

Polarimeter to Unify the Corona and Heliosphere (PUNCH, NASA) wird aus vier kleinen Satelliten bestehen, die Strukturen in der Sonnenkorona und den Übergang von der Korona zu Heliosphäre beobachten werden. Der Start der Mission ist für 2023 geplant.

TRACERS

Zusammen mit PUNCH, wird die Tandem Reconnection and Cusp Electrodynamics Reconnaissance Satellites (TRACERS, NASA) Mission die Reaktion des Erdmagnetfeldes auf energetische Teilchen messen. Der Start ist für 2023 geplant.

Foresail-2

Foresail-2 ist ein CubeSat-Programm, das von der Aalto-Universität im Rahmen des Finnischen Exzellenzzentrums für nachhaltige Raumfahrt durchgeführt wird. In einer geostationären Transferumlaufbahn (GTO) soll der CubeSat die Variabilität von ULF-Wellen (Ultra Low Frequency) in der inneren Magnetosphäre und ihre Rolle bei der Anregung von Teilchen charakterisieren. Der Start ist für das Jahr 2023 geplant.

SunRISE

Der Sun Radio Interferometer Space Experiment (SunRISE, NASA) besteht aus sechs CubeSats (kleine Satelliten) mit Radioteleskopen, um Radioemissionen auf der Sonne zu untersuchen. Der Start ist für 2023 geplant.

Lagrange

ESA plant eine Mission zum L5-Punkt, welcher etwa 1,5 Mio. km außerhalb der Erdbahn liegt. Die Mission dient zur Überwachung des Sonnenwindes vor seiner Ankunft an der Erde durch Messungen des Weltraumplasmas und Aufnahmen der Sonne. Der Start ist für 2025 geplant.

SMILE

ist eine geplante gemeinsame Mission der ESA, der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (CAS) und der Kanadischen Weltraumagentur (CSA). SMILE soll ab Ende 2024 neuartige Bilder der Wechselwirkung des Sonnenwinds mit dem Erdmagnetfeld liefern.

Weitere Informationen und Links

- Gesammelte Informationen aus verschiedenen Quellen, oft mit interessanten News-Beiträgen und Informationen: <https://spaceweather.com/>

- Aktuelle Bilder von der Sonne mit Sonnenflecken: <https://solarmonitor.org/>.
- Hier kann man sich für verschiedene "Space Weather Alerts" registrieren: https://wwwbis.sidc.be/registration/registration_step1.php

WELTRAUMWETTER IN ÖSTERREICH

Forschungsgruppen

Die Forschungsgruppen in Österreich, die zurzeit aktiv im Bereich Weltraumwetter forschen, sind folgende, in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet:

1. Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz.
Expertise: Geomagnetisch induzierte Ströme (GIC), GIC-Messgeräte, Netzberechnungen, Transformatormodellierung.
2. Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz.
Expertise: Zeitliche Änderung des Erdschwerefeldes, kinematische Orbitbestimmung, Analyse und Ermittlung von Thermosphärendichten, globale GNSS Prozessierung.
3. Institut für Physik und das Observatorium Kanzelhöhe, Karl-Franzens Universität Graz.
Expertise: Sonnenphysik, Heliosphärenphysik, Space Weather.
4. Institut für Weltraumforschung (IWF), Österreichische Akademie der Wissenschaften.
Expertise: Beobachtung mit Raumsonden in Sonnensystem, Weltraumplasmaphysik, Magnetosphärenphysik, Zusammenhang zwischen Magnetosphäre und Polarlicht, Sonnenwind, Sonnenstürme (CMEs), Vorhersage der Sonnenwindparameter.
5. Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH.
Expertise: Breitbandkommunikation, Radartechnik und Wellenausbreitung, Navigation, Weltraumfahrtmissionen (Hard- und Software, Weltraumrobotik).
6. Seibersdorf Laboratories.
Expertise: Weltraumwetter, Strahlungsfestigkeit (Radiation Hardness Assurance), Strahlungsdetektoren, Strahlenschutz, Dosimetrie, Microdosimetrie.
7. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und das Conrad Observatorium.
Expertise: Geomagnetik, geomagnetische Stürme, Paläomagnetik, geomagnetisch induzierte Ströme (GICs), solar-terrestrische Beziehungen.

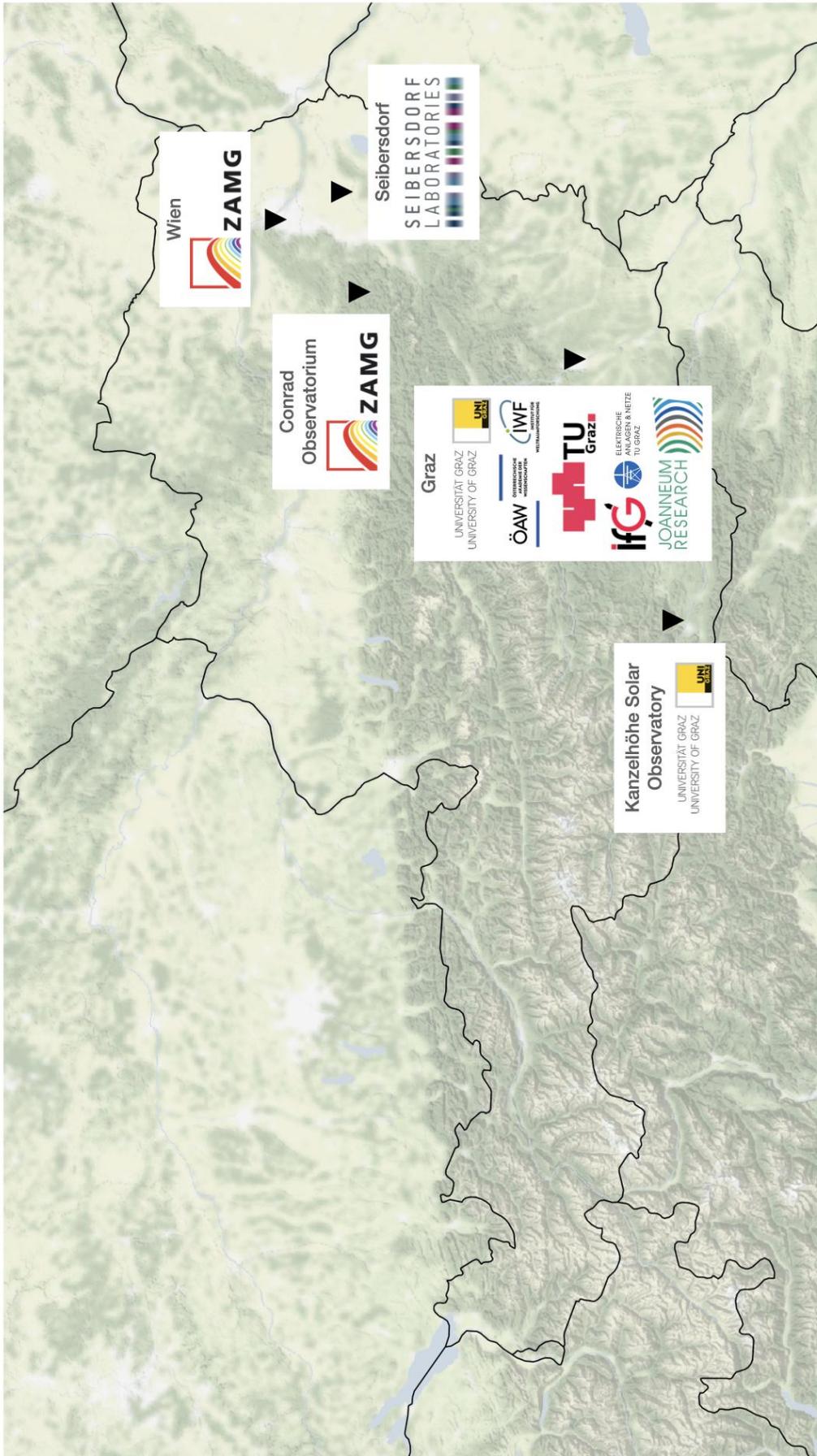


Abbildung 16. Die Forschungsgruppen in Österreich.



Abbildung 17. Transformatoren im Testbereich. Quelle: TU Graz/Lunghammer.

Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN), Technische Universität Graz

Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz

Forschungsbereiche

Geomagnetisch induzierte Ströme (GIC), GIC-Messgeräte, Netzberechnungen, Transformatormodellierung.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- Keine.

Links

- <https://iean.tugraz.at> | Institutswebsite mit Forschungsgebieten
- https://github.com/P-Schachinger/LFC_simulator | Downloadseite des GIC-Simulationsprogrammes.

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) Niederfrequente Sternpunktströme 1 (Privatwirtschaft, Nov. 2014 – Dec 2017)

Im Rahmen des Projekts „Niederfrequente Sternpunktströme 1“ wurde die Induktion des Erdmagnetfeldes und die Stromaufteilung im österreichischen Übertragungsnetz berechnet. Zur Überprüfung und Überwachung wurde ein Transformatorsternpunktmesssystem entwickelt und an fünf ausgewählten Transformatoren im Übertragungsnetz installiert. Seit 2015 liegt damit ein einzigartiger Datensatz für Mitteleuropa vor.

(2) Niederfrequente Sternpunktströme 2 (Privatwirtschaft, Mai 2019 – Mai 2022)

Das Projekt „Niederfrequente Sternpunktströme 2“ baut auf die Erkenntnisse aus dem ersten Projekt auf. Mit Hilfe von zwei selbst umgebauten Transformatoren werden skalierte Laborversuche im eigenen Versuchsfeld durchgeführt. In Kombination mit der elektromagnetischen Modellbildung von

Transformatoren helfen die Laborversuche die Wirkung und Auswirkung der niederfrequenten Ströme besser zu verstehen. Mit dem eigenen entwickelten Programm können geomagnetisch induzierte Ströme in Stromnetzen berechnet werden. Dazu werden können von dem Anwender eigene Magnetfeldmessdaten, Stromnetzdaten und Erdbodenwiderstandsmodell verwendet werden.

(3) FORESEEN – Fiber Optical Current Measurement (FFG-888052 Oktober 2021 – Oktober 2024)

Im Rahmen des FFG geförderten Projekts „Fiber Optical Current Measurement“ wird ein Demonstrator zur Messung von kleinen Gleichströmen auf Hochspannungspotential gebaut und erprobt. Damit können auch kleinen Gleichströme z. B. auf den Hochspannungsleitungen selbst gemessen werden. Damit kann sowohl die Theorie der geomagnetischen Induktion überprüft werden und weitere Quellen niederfrequenter Ströme untersucht und identifiziert werden. Das Projekt wird zusammen mit dem Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik sowie der Firma Artemes durchgeführt.



Abbildung 18. Technische Universität Graz, Quelle: TU Graz.

Institut für Geodäsie (IfG), Technische Universität Graz

Steyrergasse 30 / III, 8010 Graz

Forschungsbereiche

Für das Institut für Geodäsie an der Technischen Universität Graz ist das Forschungsgebiet Weltraumwetter dahingehend interessant, da sich extreme Weltraumwetterereignisse direkt auf Satelliten im erdnahen Weltraum auswirken können. Eine erhöhte Sonnenaktivität beeinflusst vor allem die Modellierung der nicht-gravitativen Kräfte und hier speziell jene des atmosphärischen Luftwiderstands. Die Auswirkungen sind in der Bahnbestimmung der Satelliten als auch darauf aufbauend in der Schwerefeldbestimmung der Erde sichtbar. Aus diesem Grund wird versucht durch eine präzise Modellierung beziehungsweise, wenn möglich durch Messungen dieser Störkräfte deren Einfluss auf die Ergebnisse zu minimieren. Im Gegenzug können daraus durch Informationen hinsichtlich des Luftwiderstandes Rückschlüsse auf den Zustand der Erdatmosphäre entlang der Satellitenbahn gezogen werden. Gemeinsam mit dem Institut für Physik an der Universität Graz wird im Rahmen einer Vorstudie zum ESA SSA Programmes versucht die Auswirkungen von Sonnenstürmen – speziell jener von koronalen Massenauswürfen – auf Satelliten in unterschiedlichen Flughöhen vorherzusagen.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- Seit 2019 ist S. Krauss Mitglied der Joint working group “Improvement of thermospheric models”, Joint with IAG Commission 4, Sub-commission 4.3.

Links

- <https://www.tugraz.at/institute/ifg/home/> | Institutswebsite
- <https://www.tugraz.at/institutes/ifg/downloads/gravity-field-models/> | Modelle
- <https://www.tugraz.at/institute/ifg/downloads/satellite-orbit-products/> | Resultate aus der kinematischen Orbitbestimmung (Attitude, nicht gravitative Kräfte, Kovarianzinformation, kinematisch sowie reduziert-dynamische Satellitenorbits).

- <https://www.tugraz.at/institute/ifg/downloads/gnss-reprocessing-products/> | Zeitreihen von GNSS Produkten an, welche im Rahmen der dritten Reprozessierungskampagne (repro3) des International GNSS Service (IGS) entstanden sind.

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) SWEETS (FFG, 881427, 2020-2022, PI)

Ziel des Projektes SWEETS ist es, ein Vorhersagemodell für die durch CMEs hervorgerufenen Störungen auf Satelliten zu entwickeln entwickelt. Bis dato wurden Auswirkungen von Sonnenstürmen beinahe ausschließlich anhand von Beschleunigungssensoren an Bord einzelner Satellitenmission (CHAMP, GRACE) abgeschätzt. Im Projekt SWEETS soll zum ersten Mal eine kombinierte Analyse basierend auf einer großen Bandbreite von Satellitenmissionen (u.a. Swarm A-C, TerraSAR-X, Tandem-X, CHAMP, GRACE, GRACE-FO, Cryosat-2, Sentinel 1-2, ...) durchgeführt werden. Die Grundlage dafür bilden Atmosphärendichten, abgeleitet aus kinematischen Orbits und, wenn vorhanden, in-situ Messungen von Beschleunigungssensoren an Board einiger Satelliten. Da sich diese Vielzahl von Satelliten in unterschiedlichen Flughöhen (300-800km) befinden, kann dadurch zusätzlich eine Tomographie der oberen Erdatmosphäre erfolgen und schlussendlich der Einfluss eines Sonnensturms auf die Atmosphäre in Abhängigkeit der Satellitenhöhe abgeschätzt werden.

(2) ESPRIT (FWF, P 33620, 2021-2024, PI)

Ziel des Projektes ESPRIT ist es die physikalischen Zustände des Sonnenwindplasmas und des interplanetaren Magnetfeldes sowie die eigentliche Solarstrahlung während unterschiedlicher Sonnenaktivitäten zu erforschen. Darauf aufbauend sollen bestehende Algorithmen zur Modellierung der Dichte der oberen Erdatmosphäre und der daraus ableitbaren Rate für mögliche Höhenverluste von Satelliten optimiert werden. Zudem ist bekannt, dass bestimmte vorherrschende chemische Zusammensetzungen bestehend aus NO, CO₂ und He in der oberen Erdatmosphäre einen sogenannten Kühleffekt auslösen können. Aus diesem Grund soll auch dieser Gesichtspunkt näher untersucht werden und gewonnene Erkenntnisse hinsichtlich der Kühl- und Aufheizprozesse in der oberen Erdatmosphäre in die Modellierung mit einfließen.

(3) SODA (ESA, Projektnummer, 2020-2022)

Die Vorstudie dient der Entwicklung einer Vorhersage Services zur Prädiktion von zu erwartenden Orbitdecays von Satelliten aufgrund von CME and CIR. Für die Bestimmung von thermosphärischen Dichten werden wissenschaftliche Daten aus unterschiedlichen Satellitenbeobachtungen verwendet. Durch die gemeinsame Analyse mit Daten von Sonnenwindplasma und Magnetfelddaten gemessen am Lagrange Punkt L1 wird eine Vorhersage der Auswirkung eines Sonnensturms auf erdnahe Satelliten mit einer Vorlaufzeit von bis zu einer Stunde angestrebt.



Abbildung 19. Karl-Franzens-Universität Graz, Quelle: UniGraz.

Institut für Physik & Observatorium Kanzelhöhe, Karl-Franzens Universität Graz

Universitätsplatz 5, 8010 Graz (Institut)

Kanzelhöhe 19, 9521 Treffen (Observatorium)

Forschungsbereiche

Die Forschungsbereiche der UniGraz umfassen Flares, CMEs, Sonnenwind, und damit die gesamte Bandbreite der Physik der aktiven Sonne, welche relevant ist, um die physikalischen Prozesse der Entstehung von Weltraumwetterereignissen zu untersuchen inklusive ihrer Ausbreitung im interplanetaren Raum. Als Teil des ESA SSA Programmes sind das Institut für Physik und das Observatorium Kanzelhöhe Expert Service Gruppen für "Heliospheric Weather" und „Solar Weather" (<http://swe.ssa.esa.int> und <http://swe.uni-graz.at>) sowie nationales Warnzentrum für Weltraumwetter. Die Services umfassen die Vorhersage von Ankunftszeiten und Auswirkungen von CMEs und schnellen Sonnenwindströmen, Bereitstellung von Sonnenbeobachtungen, die Echtzeiterkennung von Flares/Filamenten sowie Flare Alerts.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- COSPAR Panel for Space Weather, ISWAT
- ESA SSA and ESA Space Safety Program
- ISES, ISWI, e-CALLISTO

Links

- <https://physik.uni-graz.at/de/> | Institutswebseite
- <https://www.kso.ac.at/index.php> | Sonnenbilddaten, Echtzeit und Archiv
- <https://www.spaceweather.at> | Aktuelle Informationen und ISES Webseite
- <https://swe.ssa.esa.int/> | Heliospheric Weather: Vorhersagen Sonnenwind, CME propagation, Ionospheric Weather: Satelliten Orbit Drop (under development); Solar Weather: Echtzeitbereitstellung von Halpha Beobachtungen (Bilder, Movies), Echtzeit Flare-Erkennung und Flare-Alerting; Echtzeit Filament Erkennung.
- <https://swe.uni-graz.at/> | Echtzeitdetektion solarer radio type III bursts – in Entwicklung

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) ESA SWESNET #1 (ESA, laufend)

Das Observatorium Kanzelhöhe entwickelte im Rahmen des ESA Space Safety Programmes ein System zur automatisierten Flare- und Filamentdetektion in den Sonnenbeobachtungen (Pötzi et al., 2015, 2018, Veronig & Pötzi 2016). Des Weiteren wird die Modellierung der Sonnenwindgeschwindigkeit neu adaptiert, um geomagnetische Effekte vorherzusagen. Im Rahmen der Ionosphären Expert-Group wird eine Vorhersage von Satelliten Orbit Drops entwickelt (siehe auch Projekt SWEETS in Zusammenarbeit mit der TU Graz). In Zusammenarbeit mit der Universität Zagreb wird das Drag-Based-Ensemble Modell weiter entwickelt.

(2) Use of L5 data in CME propagation models (ESA, 2022)

Im Rahmen des ESA L5 Projektes wird analysiert inwiefern die Zusatzinformation der Seitenansicht der Sonne, Möglichkeit bietet um bessere Vorhersagen zu liefern. Die Ergebnisse sollen eine zukünftige L5 Mission schon vorab mit wissenschaftlichen Erkenntnissen unterstützen.

(3) SWEETS (FFG, #881427, 2020-2022)

Ziel des Projektes SWEETS ist es, ein Vorhersagemodell für die durch CMEs hervorgerufenen Störungen auf Satelliten zu entwickeln entwickelt. Bis dato wurden Auswirkungen von Sonnenstürmen beinahe ausschließlich anhand von Beschleunigungssensoren an Bord einzelner Satellitenmission (CHAMP, GRACE) abgeschätzt. Im Projekt SWEETS soll zum ersten Mal eine kombinierte Analyse basierend auf einer großen Bandbreite von Satellitenmissionen (u.a. Swarm A-C, TerraSAR-X, Tandem-X, CHAMP, GRACE, GRACE-FO, Cryosat-2, Sentinel 1-2, ...) durchgeführt werden. Die Grundlage dafür bilden Atmosphärendichten, abgeleitet aus kinematischen Orbits und, wenn vorhanden, in-situ Messungen von Beschleunigungssensoren an Board einiger Satelliten. Da sich diese Vielzahl von Satelliten in unterschiedlichen Flughöhen (300-800km) befinden, kann dadurch zusätzlich eine Tomographie der oberen Erdatmosphäre erfolgen und schlussendlich der Einfluss eines Sonnensturms auf die Atmosphäre in Abhängigkeit der Satellitenhöhe abgeschätzt werden.

(4) CORDIM (FFG ASAP-11, 2015-2018), SSCME (FFG ASAP-14,, 2018-2020)

Untersuchung von Signaturen von sogenannten „coronal dimmings“, mit dem Ziel eines besseren physikalischen Verständnisses der auslösenden koronalen Massenauswürfe (CMEs) sowie der genaueren Ermittlung der Kenngrößen (Geschwindigkeit, Masse) von erdgerichteten (d.h. potentiell space weather relevanten) CMEs (Dissauer et al. 2018, 2019, Vanninathan et al. 2018) und die Übertragung der Kenntnisse zur Detektierung von CMEs auf sonnenähnlichen Sternen (Veronig et al. 2021).

(5) Solarnet (EU H2020, 2019-2023)

UNIGRAZ lotet die Möglichkeiten der koordinierten Sonnenbeobachtung von erdgebundenen Observatorien aus, sowie Methoden zur automatischen Qualitätsbestimmung von Sonnenbildern, Homogenisierung der Bilder der verschiedenen Observatorien und Erweiterung der Event Detektion auf diese koordinierten Zeitserien entwickelt. Diese Entwicklungen stellen einen wichtigen Schritt zur lückenlosen Überwachung der Sonne mittels eines erdgebundenen Beobachtungsnetzwerkes für Space Weather Anwendungen dar.



Abbildung 20. Institut für Weltraumforschung, Quelle: IWF/ÖAW.

Institut für Weltraumforschung (IWF), Österreichische Akademie der Wissenschaften

Schmiedlstraße 6, 8042 Graz

Forschungsbereiche

Beobachtung mit Raumsonden in Sonnensystem, Weltraumplasmaphysik, Magnetosphärenphysik, Zusammenhang zwischen Magnetosphäre und Polarlicht, Sonnenwind, Sonnenstürme (CMEs), Vorhersage der Sonnenwindparameter.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- 13 aktive Raumsonden, darunter Magnetospheric Multiscale (MMS), Cluster, THEMIS, STEREO, Solar Orbiter, BepiColombo, GEO-KOMPSAT-2A
- 10 zukünftige Missionen, darunter SMILE und FORSAIL-2.

Links

- <https://www.oeaw.ac.at/iwf/> | Instituts-Homepage
- <https://www.oeaw.ac.at/iwf/forschung/weltraummissionen/laufende-missionen> | Liste der laufenden Weltraummissionen:
- <https://helioforecast.space/icmecat> | Website von Sonnenwindparametervorhersagen (Lead: C. Möstl) mit einem Katalog von Sonnenstürmen (800+ Ereignisse seit 2007).

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) Modellierung der magnetischen Kerne von Sonnenstürmen (FWF, P 31521-N27, 2019-2022)

In diesem Projekt arbeiten wir an einem besseren Verständnis der Magnetfelder in deren Kern, die eine relativ geordnete Struktur aufweisen und die im Kontrast stehen zur turbulenten Umgebung des Sonnenwinds in dem sie sich ausbreiten. Wenn so ein Kern auf das Erdmagnetfeld trifft, muss das Magnetfeld in die korrekte Richtung zeigen um Energie auf das Erdmagnetfeld übertragen zu können. Daher müssen diese geordneten Strukturen in den Kernen besser verstanden werden, um ihre Effekte auf die Erde und andere Planeten besser vorhersagen zu können.

(2) Verbesserung der Vorwarnzeit für geomagnetische Stürme (FWF, P 31659-N27, 2019-2023)

In diesem Projekt nutzen wir die Verfügbarkeit von über 40 Jahren an Sonnenwind-Daten, womit wir die Ergebnisse unserer eigenen Simulationen von Sonnenstürmen mit maschinellem Lernen verknüpfen können. Damit können wir die Simulationen automatisch auswählen welche die Realität am besten beschreiben. Dies wird eine Vorhersage der Entwicklung eines geomagnetischen Sturms mit einer Vorwarnzeit von bis zu 2 Tagen ermöglichen. Wir werden diese Ergebnisse mit einem bestehenden Modell für Nordlichter verbinden, welches der Öffentlichkeit ermöglichen wird besser vorausszusehen wann und wo die Aurora zu sehen sein wird. Weiters werden wir die Sonnenwind-Vorhersagen mit einem Modell der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für geomagnetisch induzierte Ströme verknüpfen, welches wiederum helfen könnte Stromausfälle zu vermeiden. Die Vorhersagen werden zuerst mit bereits bestehenden Daten entwickelt und getestet, und danach in Echtzeit angewendet. Weiters werden wir mit bereits bestehenden Daten mögliche, zukünftige interplanetary Kleinsatelliten (CubeSats) auf ihre Tauglichkeit prüfen unsere Vorhersagen weiter zu verbessern.

(3) Verbesserte Modellierung und Vorhersage des Sonnenwindes (FWF, P 34437, 2022-2026)

Die ständige Interaktion des Sonnenwindes mit dem Magnetfeld der Erde führt regelmäßig zu erhöhter geomagnetischer Aktivität. Die Kenntnis der Struktur des Sonnenwindes ist daher ein wesentlicher Aspekt in der Weltraumforschung. In diesem Forschungsprojekt befassen wir uns mit der Frage wie wir die großskalige Struktur des Sonnenwindes in unserem Sonnensystem mit fortgeschrittenen Modellen simulieren können. Insbesondere werden wir neue Ansätze entwickeln um die Randbedingungen komplexer Modelle zu verbessern.

(4) Use of L5 data in CME propagation models (ESA, 2022)

In diesem Projekt geht es darum, festzustellen, ob eine Verbesserung der Vorhersage von CMEs und solar energetic particles mithilfe von multi-point remote-sensing und in situ Beobachtungen erreicht werden kann. Im Speziellen sollen die Vorteile einer Satellitenmission (Lagrange Mission), die sich stationär am L5-Punkt des Sonne-Erde-Systems befindet, evaluiert werden. Das Institut für Weltraumforschung stellt hierbei Ergebnisse des im Haus entwickelten CME Vorhersagemodells zur Verfügung. Dieses Modell ist aktuell das einzige, das die vorteilhaften Daten von Weitwinkelkameras, die für die Lagrange Mission vorgesehen sind, und die Interaktion von CME und Sonnenwind miteinander verbindet.



Abbildung 21. Joanneum Research - Institut DIGITAL. Quelle: Joanneum Research.

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Institut DIGITAL

Steyrergasse 17, A-8010 Graz

Forschungsbereiche

Breitbandkommunikation, Radartechnik und Wellenausbreitung, Navigation, Weltraumfahrtmissionen (Hard- und Software, Weltraumrobotik).

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- Österreichische Delegierte der ITU-R SG3 (International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Study Group 3, Radiowave propagation).
- Delegierte der PSCE (Public Safety Communications Europe Network).
- Leitung der URSI (Union Radio Scientifique Internationale / International Union of Radio Science) Commission F - Wave Propagation and Remote Sensing.
- Mitglied bei der EARTO (European Association of Research and Technology Organisations), Working Group (WG) Security & Defence Research sowie WG Space Research.
- Projektleitung von internationalen Projektkonsortien, z.B. für Kleinsatellitenmissionen (CubeSat).

Links

- <https://www.joanneum.at> | Institutswebseite
- <https://www.joanneum.at/digital/space> | Webseite der Institut DIGITAL
- <https://www.joanneum.at/digital/das-institut/forschungsgruppen/weltraumtechnik-und-kommunikations-technologie> | Forschungsgruppe.

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) Analysis of GNSS Spaceborne Resilience (ESA Contract No. 4000133305/20/NL/CRS/hh, Projektstart 2021)

RFI (Radio Frequency Interference) Risikobewertung für spaceborne GNSS Empfänger und abgeleitete Produkte, Untersuchung von RFI Mitigationstechniken und Maßnahmen zur Risikominimierung, Analyse der Vulnerabilität realer spaceborne GNSS Empfänger.

(2) Be-Aware – Bedrohungsanalyse aufgrund der GNSS Störanfälligkeit in Österreich (FFG No. 860662, 2018-2019)

Umfassender Überblick über GNSS Nutzer:innen und Anwendungsfelder, insbesondere kritische Infrastrukturen, Entwicklung eines Baukastensystems zur Risikobewertung der GNSS-Bedrohung und Sicherheit, Beurteilung der Resistenz von GNSS Empfängern gegenüber Störungen durch Interferenz und Jamming, Erstellung eines Bedrohungskatalogs für Österreich.

(3) TACTIC – Creating awareness of Galileo PRS at critical infrastructures (FFG. No. 854034, 2016-2018)

Demonstration des Ausfalls von GNSS Empfängern durch Jamming und Spoofing, Demonstration des speziellen Potentials von PRS (Public Regulated Service) im Vergleich zum frei verfügbaren Open Service, Entwicklung eines SDR Jammers und Spoofers.

(4) Blind GNSS software receiver tool for field test assessment in harsh environments (ESA contract no. 4000125806/18/NL/CRS, 2019-2022)

Design und Implementierung eines omnidirektionalen GNSS Antennenarrays mit 40 Elementen, Hochgeschwindigkeitsaufzeichnung der Rohdaten von 40 Einzelantennen.

(5) GIREKO – GNSS Interferenz Karte Österreich (FFG No. 873435, Projektstart 2019)

Bereitstellung einer GNSS-Interferenzlandkarte für Österreich, Entwicklung eines kostengünstigen, SDR-basierten Demonstrators zur Interferenzdetektion und Charakterisierung, Potential des Einsatzes von KI.



Abbildung 22. Seibersdorf Laboratories, Quelle: SL.

Seibersdorf Laboratories

Campus Seibersdorf, 2444 Seibersdorf

Forschungsbereiche

Weltraumwetter (Space Weather), Strahlungsfestigkeit (Radiation Hardness Assurance), Strahlungsdetektoren, Strahlenschutz, Dosimetrie, Microdosimetrie.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- ESA Space Radiation Expert Service Centre
- EURADOS (European Radiation Dosimetry Group)
- RADECS (Radiation Effects on Components and Systems)
- ÖSV (Österreichischer Verband für Strahlenschutz)

Links

- <https://www.seibersdorf-laboratories.at> | Institutshomepage
- <http://swe.ssa.esa.int/web/guest/avidos-federated> | AVIDOS 3.0 - AVIDOS ist eine Informations- und Lernsoftware für die Abschätzung der Strahlenbelastung durch galaktische kosmische Strahlung (GCR) und solare kosmische Strahlung (SCR) bei Flügen in der zivilen Luftfahrt. Es hilft bei der Abschätzung der Strahlungsdosen bei Flügen von einem Ort zum anderen. Sie ermöglicht auch einen Vergleich der abgeschätzten Exposition mit der natürlichen Hintergrundstrahlung.

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) Projekt #1 AVIDOS 2.0 (ESA, SS1188-SL-11-13 RHEA, 2014-2016)

Die Strahlenbelastung auf Flughöhe wird namentlich durch die galaktische kosmische Strahlung (GCR – Galactic Cosmic Rays) bestimmt, dabei müssen aber auch die sporadisch auftretenden energetischen solaren Ereignisse (SEP - Solar Energetic Particles) berücksichtigt werden. Diese selten auftretenden Ereignisse können für kurze Zeit zu stark erhöhter Strahlung in der Erdatmosphäre und auch auf der Erdoberfläche führen (Ground Level Enhancement – GLE). Die Vorhersage von erhöhter Strahlenbelastung an Bord von Flugzeugen ist von großer Bedeutung für Fluggesellschaften und für die Flugzeugindustrie in Bezug auf den Strahlenschutz und der Risikoverminderung für den Verlust der Radiokommunikation oder der Navigationssignale sowie Fehler an der Bordelektronik. Verschiedene Hilfsmittel ermöglichen schon heute eine zuverlässige Vorhersage der erwarteten Strahlendosis auf Flughöhe durch die GCR. Im Rahmen des „AVIDOS 2.0“-Projektes hat SL erste

Versuche des Nowcasting der Strahlenbelastung bei SEP Ereignissen entwickelt und in ihrer Applikation AVIDOS implementiert. AVIDOS Applikation ist durch Seibersdorf Laboratories zur Verfügung gestellt werden (ESA Space Weather Portal: <http://swe.ssa.esa.int/web/guest/avidos-federated>).

(2) Projekt #2 AVIDOS-SPE-Nowcast (FFG, #859785, 2017-2018)

Die Seibersdorf Labor GmbH (Österreich) und die Internationale Stiftung Hochalpine Forschungsstationen Jungfrauoch und Gornegrat (Schweiz) haben im Rahmen des „AVIDOS-SEP-Nowcast“-Projektes gemeinsam die Kurz- und Langzeitvorhersage der Strahlenexposition in Flughöhen im Fall von spontanen, anisotropen und hochenergetischen Protonenereignissen der Sonne untersucht. Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, wie Daten aus dem weltweiten Neutronenmonitor-Netzwerk verwendet werden können, um die zeitliche Entwicklung des solaren Protonenspektrums während eines anisotropen SEP-Ereignisses zu charakterisieren. In einer erfolgreichen Proof-of-Concept Studie wurde es gezeigt, wie eine solche SEP-Charakterisierung für eine verbesserte Einschätzung der Strahlungs dosis in Flughöhen verwendet werden kann. Es wurden auch Engpässe für eine zukünftige Echtzeit-Implementierung der vorgestellten Lösung identifiziert. Abgesehen von den obigen Untersuchungen haben die Projektpartner analysiert, ob die Alarmzeiten der bestehenden GLE-Alarmsysteme, welche auf Messungen des Neutronenmonitor-Netzwerks basieren, erheblich verbessert werden können. Diese Analyse hat gezeigt, dass eine erhebliche Verbesserung der Alarmzeiten (normalerweise einige Minuten bevor das SEP-Ereignis die Strahlenbelastung auf typischen Flughöhen erhöht) nur sehr schwierig zu erreichen ist. Im Rahmen dieses Projekts wurde auch der themenwidmeten SEPRAD-Workshop (<http://seprad.eu>) veranstaltet, um die Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf die Luftfahrt während SEP-Ereignissen zu diskutieren - insbesondere Aspekte der Kurzzeitvorhersage und der Prognose von Strahlungseffekten – sowie innovative Entwicklungen und zukünftige Bedürfnisse. Die Diskussionen wurden an der European Space Weather Week im 2017 fortgesetzt. Als Ergebnis wurde eine Roadmap für zukünftige Prognosen von SEP-Ereignissen skizziert. Die finale Schlussfolgerung ist, dass für eine stabile Langzeitprognose der charakteristischen SEP Eigenschaften ein besseres wissenschaftliches Verständnis notwendig ist.

(3) Projekt #3 ELDRS - Enhanced low dose rate sensitivity (ESA, 2009)

Ziel dieses Projektes war die Erprobung eines neuen Verfahrens zur Prüfung der Strahlungshärte spezifischer elektronischer Bauteile für Weltraumanwendungen.

Herkömmlicherweise wird die Charakterisierung der Gesamtionisationsdosis (TID) von EEE-Komponenten auf bipolarer Basis mit hohen Dosisraten durchgeführt, wodurch die Testzeit in Bestrahlungseinrichtungen und damit die Kosten reduziert werden. Die verwendeten Dosisraten sind normalerweise deutlich höher als die, die Komponenten während des Fluges erfahren. In den letzten zehn Jahren wurde eine erhöhte Empfindlichkeit bei niedriger Dosisrate (ELDRS) beobachtet und in der Literatur berichtet und als ernsthaft besorgniserregend angesehen, was die Notwendigkeit von Strahlungstests zeigt, die bei niedriger Dosisrate durchgeführt werden. Der ELDRS-Effekt manifestiert sich als erhöhter Komponentenabbau mit abnehmender TID-Dosisrate. ELDRS betrifft bipolare Technologien.

Heutzutage werden ELDRS-Tests von Komponenten mit niedrigen Dosisraten durchgeführt, was einen erheblichen Kostenposten darstellt und den Projektplan je nach TID-Anforderungen des Projekts verkompliziert. Dies gilt insbesondere für Projekte auf hohem TID-Niveau wie Telekommunikation und Navigation. Um einige dieser Probleme anzugehen, wurde eine Reihe beschleunigter

ELDRS-Testmethoden vorgeschlagen. Eines davon, das sogenannte beschleunigte Schaltprüfverfahren, wird im Rahmen dieses Projekts untersucht. Es hat sich gezeigt, dass diese Testmethode die Testzeit für niedrige Dosisraten für ausgewählte Teiletypen und elektrische Parameter erheblich verkürzt. Seine allgemeine Anwendbarkeit auf einen umfassenden Satz elektrischer Parameter wird anhand einer großen Menge unterschiedlicher Bauteiltypen untersucht.



Abbildung 23. Geomagnetischer Bereich des Conrad Observatoriums der ZAMG. Quelle: ZAMG/Lammerhuber.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Hohe Warte 38, 1190 Wien (ZAMG)

Trafelberg 1-2, 2763 Thal (Conrad Observatorium)

Forschungsbereiche

Geomagnetik, geomagnetische Stürme, Paläomagnetik, geomagnetisch induzierte Ströme (GICs), solar-terrestrische Beziehungen.

Teilnahme an internationalen Gruppen und Organisationen

- INTERMAGNET (Magnetfeldmessungen), <https://intermagnet.org/>

Links

- <https://conrad-observatory.at/> | Aktuelle Messungen des Erdmagnetfelds am Observatorium (als Grafik). Jährliche Daten seit 2016 sowie Jahrbücher.
- <https://www.zamg.ac.at/> | Hauptseite der ZAMG.
- <https://coobs.zamg.ac.at/> | Messungen des Erdmagnetfelds in Echtzeit, Webservice zur automatisierten Datennutzung und Datenarchiv.

Vergangene und aktuelle Projekte

(1) Geomagnetically induced currents in Austria / GEOMAGICA (FFG #847986, Jan 2015 - Dec 2018) <https://projekte.ffg.at/projekt/1412118>

Bestimmung und Modellierung von geomagnetisch induzierten Strömen (GICs) im österreichischen Höchstspannungsnetz. Diese werden durch das Weltraumwetter (insbesondere geomagnetische Stürme) verursacht. Ergebnisse: 1) Entwicklung einer Methode zur frühzeitigen Erkennung von Weltraumwetterereignissen, die GICs auslösen können, 2) Modellierung von GICs in Österreich, und 3) Echtzeitmodellierung von GICs.

(2) Space Weather: The Austrian Platform / SWAP (FFG #885321, Jul 2021 - Jun 2024)
<https://projekte.ffg.at/projekt/4052504>

Im Rahmen dieses Projekts werden ForscherInnen und AnwenderInnen im Bereich Weltraumwetter in einer Kompetenzgruppe zusammengeführt und vernetzt. Synergien zwischen den interdisziplinären Forschungsfeldern werden gezielt gefördert. Der State-of-the-Art in den Disziplinen, mit Schwerpunkt auf regionalen Bezügen, wird festgestellt und offene Forschungsfragen formuliert. Maßgeblich ist dabei die Kooperation von ForscherInnen und NutzerInnen, um festzustellen, welche Inhalte bestmöglich für die jeweiligen Stakeholder notwendig sind und wie diese dargestellt werden müssen. Die Sichtbarkeit des Themengebietes Weltraumwetter, die Entwicklung anwendungsorientierter Weltraumwetter Szenarien und Vorhersagen sowie die fundierte Darstellung der Inhalte und der Aufbau nachhaltiger Kooperationen und Kooperationsmöglichkeiten sind die Kernziele, welche durch diese Plattform gefördert werden.

ZUKÜNFTIGE TRENDS

Durch die zunehmende Abhängigkeit unserer Gesellschaft von Weltraumtechnologien, wird das Weltraumwetter zunehmend zum Thema im Bezug auf nationale Sicherheit. In diesem Abschnitt listen wir internationale und nationale Weltraumwetterstrategien auf, und fassen die Trends sowie zukünftige Herausforderungen zusammen.

Aktuelle Roadmaps

International

Die allgemeine Agenda der **ESA** wurde 2021 publiziert (ESA, 2021), und eine Strategie bezüglich Weltraumwetterdiensten wurde 2019 publiziert (ESA, 2019). Die ESA setzt hauptsächlich auf die Beobachtung des Weltraumwetter für Sicherheitszwecke - bis 2030 sollte Europa in der Lage sein, kritische Infrastrukturen im Weltraum und auf dem Boden, und dadurch auch die Gesellschaft, vor extremen Weltraumwetterereignissen zu schützen. Im November 2021 hat sich die ESA auf das sogenannte “Matosinhos Manifesto” geeinigt. In diesem Dokument wird der Schutz von ESA-Astronauten und -Ressourcen vor Störungen durch Weltraummüll und Weltraumwetter als Ziel definiert.

COPUOS hat 2017 Weltraumwetterdienste (“International framework for space weather services”) zum “thematic priority #4” definiert und plant die Koordinierung von existierenden Strukturen wie ICAO, ISES, und anderen (UN COPUOS, 2017):

(2) “The objectives under thematic priority 4, on the international framework for space weather services, are to strengthen the reliability of space systems and their ability to respond to the impact of adverse space weather; to develop a space weather road map for international coordination and information exchange on space weather events and their mitigation, through risk analysis and assessment of user needs; to recognize space weather as a global challenge and the need to address the vulnerability of society as a whole; to increase awareness through developed communication, capacity-building and outreach; and to identify governance and cooperation mechanisms to support this objective.”

Die **WMO** strebt Ziele an, die in einem Report aus 2019 für die Jahre 2020-2023 zusammengefasst wurden (WMO, 2019). Darunter fallen, unter anderem:

-
1. Integration of Space Weather observations, through review of space- and surface-based observation requirements, harmonization of space-based sensor specifications, monitoring plans for Space Weather observations;
 2. Standardization and enhancement of Space Weather data exchange and delivery through
-

-
- the WMO Information System (WIS);
 3. Coordinating the development of SPW best practices for end-products and services, including, for example, quality assurance guidelines and emergency warning procedures, in collaboration with aviation and other major application sectors;
 4. Encouraging the dialogue between the research and operational space weather communities;
 5. Organization of capacity-building, training and outreach activities towards WMO Members and Space Weather potential users;
 6. [...]
-

Die letzte Weltraumwetter-Roadmap von **COSPAR**, wo hauptsächlich Forschungsziele identifiziert und aufgelistet werden, wurde 2015 publiziert (COSPAR Panel, 2015). Hier wurde die Kollaboration zwischen Forschern und Stakeholder besonders hervorgehoben:

-
- I. Quantify vulnerability of humans and of society's infrastructure for space weather by partnering with user groups;
 - II. Build test beds in which coordinated observing supports model development;
 - III. Standardize (meta-) data and product metrics, and harmonize access to data and model archives;
 - IV. Optimize observational coverage of the Sun-society system.
[...]
 - A. Implement an open space-weather data and information policy;
 - B. Provide access to quality education and information materials;
 - C. Execute an international, inter-agency assessment of the state of the field on a 5-yr basis to adjust priorities and to guide international coordination;
 - D. Develop settings to transition research models to operations;
 - E. Partner with the weather and solid-Earth communities to share lessons learned.
-

National

In vielen Ländern werden gezielt Strategien zu den Themen Weltraumwetter und -dienste entwickelt. Diese Strategien beschäftigen sich hauptsächlich mit der Beobachtung des Weltraumwetter zur Sicherstellung der nationalen Sicherheit, und mit der Entwicklung von neuen Forschungsgruppen zur Erweiterung der nationalen Expertise. Die meisten Strategien in Europa beziehen sich auf Programme der ESA.

Außerhalb von Europa, z.B. in den Vereinigten Staaten (NSTC, 2019) gibt es breit angelegte Vorhaben. In einem Action Plan wird vor allem der Schutz der nationalen Sicherheit, Anlagen und Operationen vor den Auswirkungen des Weltraumwetters hervorgehoben, sowie auch die Entwicklung und Verbreitung genauer und rechtzeitiger Weltraumwettercharakterisierungen und -vorhersagen. Die Erstellung eines Action Plans für die Reaktion auf und die Erholung von Weltraumwetterereignissen wird ebenfalls geplant. Manche Länder, wie z.B. Japan, erweitern zusammen mit NOAA ihre Expertise (JAXA, 2020).

Das Vereinigte Königreich schätzt das Risiko von einem schweren Weltraumwetterereignis (HM Gov, 2020) als Level C ein (Schadenskosten von £100 Millionen bis £1 Milliarden) und die Wahrscheinlichkeit als 1-5 Ereignisse pro 100 Jahre. Die nationale Prioritäten setzen auf ein

besseres Verständnis von Weltraumwetterphänomenen, nationale Resilienz und die Fähigkeit, sich effektiv von den möglichen Auswirkungen von Weltraumwetterereignisse zu erholen (BEIS, 2021).

In China sind die nationalen SSA-Fähigkeiten den People's Liberation Army *Strategic Support Force* untergeordnet, und dienen hauptsächlich der nationalen Sicherheit (Project 2049 Institute & Pointe Bello, 2020).

In Australien wurde die Entwicklung von nationaler Weltraumwetterexpertise sowie die Erstellung eines Australian Space Weather Agency diskutiert, jedoch wurde seit 2003 kein Update zur Strategie veröffentlicht (Australian Space Weather Committee, 2003).

Viele Initiativen im südafrikanischen Raum werden von dem South Africa National Space Agency (SANSA) koordiniert (SANSA, 2020). In Zukunft soll hier ein "Space Weather Centre" mit Weltraumwetterdienste für Energiebetreiber, Aviation und nationale Sicherheit aufgebaut werden, darunter auch die Aufrechterhaltung von Navigation und Kommunikation (S.44).

Weitere nationale Strategien, die nicht in englischer oder deutscher Sprache veröffentlicht wurden (z.B. Russland), werden in diesem Bericht nicht erwähnt. Viele Nationen, wie z.B. Indien (Giri, 2021), müssen ihre Weltraumwetterstrategien erst aufbauen.

Offene Fragen und Herausforderungen

Hauptsächlich wird ein **verbessertes Verständnis von Weltraumwetterphänomenen** angestrebt. Dies betrifft vor allem neue Forschungsbereiche wie z.B. die Erforschung von Solar Energetic Particles (SEPs) und deren Ursprung, und die Entwicklung von geomagnetischen "substorms", die zu großen Magnetfeldvariationen führen können. Neue Erkenntnisse hierzu sind in angewandten Gebieten wie der Ausbreitung von GICs in den Höchstspannungsnetzen besonders hilfreich. Eine Liste der wichtigsten Forschungsthemen wurde vom COSPAR Panel (2015) erfasst.

In der Forschung und in der Anwendung wird die **Erweiterung der Beobachtung der Sonne und Heliosphäre** hervorgehoben. Dies beinhaltet die Beobachtung der Sonne von verschiedenen Positionen und Höhen (außerhalb der Ekliptik), sowie auch das Messen von Plasma an mehreren Stellen im Sonnensystem. Satellitenmissionen wie Parker Solar Probe und Solar Orbiter wurden entwickelt um diese Lücke zu schließen, und die geplante ESA-Mission "Lagrange" wird die Anzahl der laufenden Messpunkten weiter erhöhen. Die lange Planung (oft 10+ Jahren) und hohen Kosten für die neue Satellitenmissionen stellen eine Herausforderung dar.

Viele Roadmaps und Agenden betonen die **Quantifizierung von den Auswirkungen von extremen Weltraumwetterereignissen**. Dazu gibt es schon Analysen von PriceWaterhouseCooper für das SSA-Programm der ESA (ESA, 2016). Hier konnte eine Kosten-Nutzen-Analyse zeigen welche Vorteile das SSA-Programm mit sich bringt. Es gibt auch Studien, in welchen die möglichen globalen ökonomischen Schäden von einem extremen Weltraumwetterereignis mit \$7 Milliarden (Oughton, 2017) bzw. zwischen \$3,7 und \$10 Milliarden (Eastwood, 2018) beziffert werden. Der globale Markt für "Space Situational Awareness" wächst zunehmend. Dies zeigt auch eine Studie von Fortune Business Insights (2021), welches auf zunehmendes globale Interesse an Weltraumwetterthemen hinweist.

Zudem wird auch die **Entwicklung von "impact-based" Vorhersagen** hervorgehoben. Hier sind die möglichen Auswirkungen schon bei der Vorhersage definiert und es braucht daher keine weitere Interpretation. Für die Umsetzung braucht es jedoch ein genaues Verständnis und eine

Quantifizierung der Auswirkungen aus vergangenen Ereignissen. Hierfür wird auch national und international eine **bessere Vernetzung von Forschern und Stakeholder** angestrebt.

GLOSSAR

Aktive Regionen - Active regions

Siehe: Sonnenflecken

Energetische Teilchen - energetic particles

Siehe auch: solar energetic particles.

Kosmische Strahlung - galactic cosmic rays (GCR)

Kosmische Strahlung, die außerhalb des Sonnensystems entsteht.

Geomagnetisch induzierte Ströme - Geomagnetically induced currents (GIC)

GICs sind ungewollte Gleichströme im Hoch- und Höchstspannungsnetz, die durch geomagnetische Stürme hervorgerufen werden.

Geomagnetische Stürme - Geomagnetic storms

Schnelle Variationen im Erdmagnetfeld, die vom Sonnenwind verursacht werden.

→ **Substorms** sind Teile der Hauptphase von geomagnetischen Stürmen, wo besonders starke Magnetfeldvariationen ausgelöst werden können.

Ground Level Enhancements (GLEs)

Plötzlicher Anstieg der kosmischen Strahlung, der am Boden von mindestens zwei Neutronenmonitoren beobachtet wurde, die gleichzeitig einen Anstieg der fünfminütigen gemittelten Zählrate von solaren energetischen Teilchen um mehr als 3 % aufzeichnen. Ein GLE ist mit einem Sonnenpartikelereignis verbunden, das eine hohe Fluenzrate von Partikeln mit hoher Energie (größer als 500 MeV) aufweist. GLEs sind relativ selten und treten im Durchschnitt etwa einmal pro Jahr auf.

Interplanetares Magnetfeld - Interplanetary magnetic field (IMF)

Das Magnetfeld (verursacht durch das Sonnenmagnetfeld), das im interplanetaren Raum gemessen wird.

Ionosphäre - ionosphere

Die Ionosphäre ist der ionisierte Teil der oberen Erdatmosphäre zwischen etwa 48 km bis 965 km Höhe - eine Region, die die Thermosphäre und Teile der Mesosphäre und Exosphäre beinhaltet.

Hochgeschwindigkeits-Sonnenwindströme - high speed solar wind streams (HSS)

Sonnenwind welcher aus bestimmten Bereichen der Sonne kommt, nämlich koronalen Löchern. Koronale Löcher haben vorwiegend offene Magnetfeldstrukturen, entlang welcher der Sonnenwind beschleunigt wird.

Korona (Sonnenkorona) - solar corona

Die Korona der Sonne liegt oberhalb der Chromosphäre und erstreckt sich Millionen von

Kilometern ins Weltall. Messungen zeigen, dass die Sonnenkorona eine Plasmatemperatur von mehr als 1 Mio Kelvin hat, also viel heißer ist als die Oberfläche der Sonne (Photosphäre).

Koronale Löcher - coronal holes (CH)

Ein koronales Loch ist eine vorübergehende Region in der Sonnenkorona mit relativ kühlem, weniger dichtem Plasma, in der sich das Magnetfeld der Sonne als offenes Feld in den interplanetaren Raum erstreckt.

Koronaler Massenauswurf - Coronal Mass Ejection (CME)

Auswurf Materialien von der Sonnenkorona. Dieser Auswurf überquert die Distanz zwischen Sonne-Erde in 14 bis 140 Stunden (mit Geschwindigkeiten von 300 - 3000 km/s).

Kosmische Strahlung - Cosmic rays (CR)

Eine hochenergetische Teilchenstrahlung, die von der Sonne, der Milchstraße und fernen Galaxien kommt.

Lagrange Punkt 1 / L1 Punkt - L1 point

Eine Stelle zwischen Sonne und Erde, wo die Anziehungskraft der Sonne und die Erde sich ausgleichen. Viele Satelliten, die Messungen von erdgerichteten Sonnenwindstrukturen ausführen, sitzen am L1 Punkt, der 1,5 Millionen km von der Erde entfernt ist.

Magnetometer - Magnetometer

Ein Gerät zur Messung des Magnetfeldes. Es werden entweder alle drei Komponenten des Magnetfeldes (x , y und z) gemessen, oder die Gesamtfeldstärke.

Magnetosphäre - Magnetosphere

Das Raumgebiet um ein Planet oder Stern, in dem geladene Teilchen vom Magnetfeld beeinflusst werden.

Nordlichter - aurora / northern lights

Lichterscheinung der hohen Atmosphäre, die durch die Interaktion zwischen Sonnenwind und die Magnetosphäre verursacht werden. Darunter versteht man die *aurora borealis* (in der nördlichen Hemisphäre) und *aurora australis* (in der südlichen Hemisphäre).

Solar Energetic Particles (SEP)s

Hochenergetische Teilchen (Protonen, Elektronen und Ionen), die von der Sonne ausgestrahlt und bei bestimmten Ereignissen beschleunigt werden. Diese Teilchen können für Astronauten im Weltraum gefährlich sein.

Sonneneruption, Flare - Solar flare

Eine Explosion auf der Sonne (in der Chromosphäre).

Sonnenfleck - Sunspot

Dunkle Stellen auf der sichtbarer Sonne mit sehr starken Magnetfeldern.

Sonnensturm - Solar storm

Allgemeiner Begriff für extreme Weltraumwetterereignisse, darunter Sonneneruptionen, koronale Massenauswürfe, geomagnetische Stürme, und Solar Energetic Particle Ereignisse.

Sonnenwind - Solar wind

Der Sonnenwind ist ein Strom geladener Teilchen, der ständig von der Sonne in alle Richtungen abströmt. Es gibt verschiedene Strukturen im Sonnenwind, darunter:

→ **Ambient solar wind:** Der umgebende Sonnenwind, in der sich alle weiteren Strukturen

ausbreiten.

→ **Coronal mass ejections** (siehe oben)

→ **Corotating interaction regions**: Regionen, wo schnelle Sonnenwindströme auf langsame Ströme treffen. Es bilden sich Regionen mit erhöhter Dichte und Magnetfeld (**IMF**), die zu **geomagnetischen Stürmen** führen können.

Sonnenzyklus - Solar cycle

Etwa alle 11 Jahre durchgeht die Sonne einen Zyklus (Schwabe Zyklus), in der sich die Pole des Sonnenmagnetfeldes austauschen und die Sonne ihr Aktivitätsmaximum erreicht. Nach zwei Zyklen (Hale Zyklus) sind die Polen wieder in der gleichen Position.

Space Situational Awareness (SSA)

Generell: die Überwachung des Weltraumwetters durch Satelliten und bodengebundene Beobachtungen. Speziell: ein ESA-Programm zur Förderung von den europäischen Fähigkeiten im Bereich Weltraumwetter.

Strahlungsfestigkeit - Radiation Hardness Assurance (RHA)

Radiation Hardness Assurance umfasst alle Aktivitäten, die unternommen werden, um sicherzustellen, dass die Elektronik und die Materialien eines Weltraumsystems nach Exposition gegenüber der Weltraumstrahlungsumgebung ihren Designspezifikationen entsprechen. Radiation Hardness Assurance befasst sich nicht nur mit Einzelteilen, sondern umfasst System-, Subsystem-, Box- und Platinenebenen.

Total Electron Content (TEC)

TEC ist eine Kenngröße der Ionosphäre der Erde, nämlich die Gesamtanzahl von Elektronen integriert über eine Säule mit dem Querschnitt von 1m^2 . Eine TEC Einheit (TECU) entspricht dabei 10¹⁶ Elektronen pro Quadratmeter.

Wechselwirkungsregionen - Corotating interaction regions (CIRs)

Komprimiertes "Staugebiet" zwischen langsamen und schnellen Sonnenwindströmen, welches sich aufgrund der Sonnenrotation regelmäßig in Messungen zeigt.

AKRONYME

ACE	Advanced Composition Explorer (Satellit)
CH	Coronal hole (koronale Löcher)
CIR	Corotating interaction region
CME	Coronal mass ejection (koronaler Massenauswurf)
ESA	European Space Agency
EUV	Extreme ultraviolet (Extrem ultraviolette Strahlung)
GCR	Galactic Cosmic Rays (kosmische Strahlung)
GIC	Geomagnetically induced currents (geomagnetisch induzierte Ströme)
GLE	Ground level enhancement
GNSS / GPS	Global Navigation Satellite System
HF	Hochfrequenz (Radio)
HSS	High speed stream (Hochgeschwindigkeits-Sonnenwindströme)
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMF	Interplanetary magnetic field (interplanetares Magnetfeld)
INTERMAGNET	International Real-time Magnetic Observatory Network
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LI	Lagrange Punkt 1 im Sonne-Erde-System
MHD	Magnetohydrodynamics (Magnetohydrodynamik)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NM	Neutronenmonitore
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RHA	Radiation Hardness Assurance
SCR	Solar Cosmic Rays (solare Strahlung)

SDO	Solar Dynamics Observatory (Satellite)
SEP	Solar Energetic Particles
SIR	Solar Energetic Particles
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory (Satellit)
SSA	Space Situational Awareness
TEC	Total electron content (Gesamtelektroneninhalt)
ULF	Ultra low frequency (Radio)
UN	United Nations
UN COPUOS	UN Committee for Peaceful Uses of Outer Space
UNOOSA	UN Office for Outer Space Affairs
WMO	World Meteorological Organization

BIBLIOGRAFIE

- Albert, D., Domenig, L., Maletic, D., Reinbacher-Köstinger, A., Roppert, K., & Renner, H. (2022). *Comparing Two Topology Transformer Hysteresis Models with Power Transformer Measurements* (Preprint) [IEEE International Conference on the Computation].
- Albert, D., Schachinger, P., Bailey, R. L., Renner, H., & Achleitner, G. (2021). Analysis of long-term GIC measurements in transformers in Austria. *Space Weather*, 20(e2021SW002912). e2021SW002912
- Australian Space Weather Committee. (2003, December 18). *Australian Space Weather Plan* [Strategic Planning to 2010 and Beyond]. Bureau of Meteorology. https://www.sws.bom.gov.au/docs/Space_Weather_Plan.pdf
- Balogh, A., Gosling, J.T., Kallenbach, R., Jokipii, J.R., & Kunow, H. (Eds.). (1999). *Corotating Interaction Regions*. Springer Netherlands.
- Beck, P. (2008). Validation of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.*, 131(1), 51-58. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn238>
- BEIS. (2021, September). *UK Severe Space Weather Preparedness Strategy*. UK Government. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-severe-space-weather-preparedness-strategy>
- Bolduc, L. (2002). GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(16), 1793–1802. 10.1016/S1364-6826(02)00128-1
- Bottollier-Depois, J.F. (2012). The European Radiation Dosimetry Group (EURADOS). In *Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew Due to Galactic Cosmic Radiation*. Publications Office. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8ae41e75-1f81-4f8b-9a44-77f055a621df>
- Budden, K. G. (1961). *Radio Waves in the Ionosphere*. Cambridge University Press.
- COSPAR Panel. (2015, June 15). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745-2807. 10.1016/j.asr.2015.03.023
- Coster, A. J., Materassi, M., Skone, S., & Forte, B. (Eds.). (2019). *The Dynamical Ionosphere: A Systems Approach to Ionospheric Irregularity*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814782-5.00008-X>
- Drouet, F., & Michelet, M. (2012, Feb). *Results of the EAN request on radiation protection of aircraft crew*. European ALARA Network. <https://www.eu-alara.net/index.php/activities/ean-documents-and-publications/docman-menu/survey/85-aircraft-crew/file.html>
- Eastwood, J. P. (2018). Quantifying the Economic Value of Space Weather Forecasting for Power Grids: An Exploratory Study. *Space Weather*, 16(12), 2052-2067.
- Emmert, J. (2015). Thermospheric mass density: A review. *Advances in Space Research*, 56(5), 773-824. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.038>
- ESA. (2016, November). *A cost-benefit analysis of the SSA programme*. European Space Agency. https://esamultimedia.esa.int/docs/business_with_esa/Space_Weather_Cost_Benefit_Analysis_ESA_2016.pdf
- ESA. (2019, November). *ESA's Technology Strategy*. ESA Website. https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/ESA_Technology_Strategy_Version_1_0.pdf
- ESA. (2021, March 31). *ESA Agenda 2025*. ESA Website. https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/Agenda_2025
- ESPI. (2008). *Europe's Way to Space Situational Awareness (SSA)*. ESPI Publications. <https://espi.or.at/publications/espi-public-reports/send/2-public-espi-reports/112-europe-s-way-to-space-situational-awareness-ssa>

- EU. (1996, June 29). Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. *Official Journal of the European Communities*, L159. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31996L0029>
- EU. (1997). European Radiation Dosimetry Group: Exposure of Air Crew to Cosmic Radiation. A Report of EURADOS Working Group 11, EURADOS Report 1996.01. *European Commission Report Radiation Protection*, 85.
- Fortune Business Insights. (2021, June). Space Situational Awareness Market Size, Growth | Trends, 2028. *Fortune Business Insights*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/space-situational-awareness-ssa-market-105446>
- Gaunt, C. T., & Coetzee, G. (2007). *Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk* [IEEE Lausanne Power Tech]. 10.1109/PCT.2007.4538419
- Giri, C. (2021, March 25). Space weather preparedness is in our national interest. *Mint*. <https://www.livemint.com/opinion/online-views/space-weather-preparedness-is-in-our-national-interest-11616688146995.html>
- Harvey, K., & Recely, F. (2002). Polar Coronal Holes During Cycles 22 and 23. *Solar Physics*, 211, 31–52. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022469023581>
- HM Gov. (2020). *National Risk Register 2020*. UK Government. <https://www.gov.uk/government/publications/national-risk-register-2020>
- ICRP. (1991). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 60*, 21, 1-3. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2060>
- JAXA. (2020, December 17). JAXA and NOAA signed Memorandum of Understanding for Global Observing Satellite Missions. *Japan Aerospace Exploration Agency*. <https://global.jaxa.jp/news/2020/>
- Kilpua, E. (2015). Unraveling the drivers of the storm time radiation belt response. *Geophysical Research Letters*, 42(9). <https://doi.org/10.1002/2015GL063542>
- Lindborg, L. (Ed.). (2004). *Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew: Compilation of Measured and Calculated Data : Final Report of EURADOS WG 5 to the Group of Experts Established Under Article 31 of the Euratom Treaty*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Malandraki, O. E., & Crosby, N. B. (Eds.). (2018). *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60051-2_1
- Miroshnichenko, L. I., Vashenyuk, E. V., & Pérez-Peraza, J. A. (2013). Solar cosmic rays: 70 years of ground-based observations. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53(5), 541–560. <https://doi.org/10.1134/S0016793213050125>
- NSTC. (2019, March). *National Space Weather Strategy and Action Plan*. White House Archives. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>
- Oughton, E. (2017). Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. *Space Weather*, 15(I), 65-83. <https://doi.org/10.1002/2016SW001491>
- Project 2049 Institute & Pointe Bello. (2020, March 30). *China's Space and Counterspace Capabilities and Activities* [Prepared for: The U.S.-China Economic and Security Review Commission]. US Gov. https://www.uscc.gov/sites/default/files/2020-05/China_Space_and_Counterspace_Capabilities.pdf
- Raith, J., & Schichler, U. (2016). *Risk Assessment of Electrical Equipment under the Influence of GIC* [2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis]. 10.1109/CMD.2016.7757824
- Reeves, G. D. (2003). Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 30(10). <https://doi.org/10.1029/2002GL016513>
- Ryutova, M. (2018). The Sun's Magnetic Fields. In *Physics of Magnetic Flux Tubes*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96361-7_1

- SANSA. (2020). *2020-2025 SANSA Strategic Plan*. SANSA Website.
https://www.sansa.org.za/wp-content/uploads/2020/03/SANSA-Strategic-Plan-2020_2025.pdf
- Schwenn, R. (2005). The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth. *Annales Geophysicae*, 23(3), 1033–1059. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-1033-2005>
- Thierfeldt, S. (2009). Evaluation of the implementation of radiation protection measures for aircrew in EU member states. *Radiat. Prot. Dosim.*, 136(4), 324–328. 10.1093/rpd/ncp170
- Tsurutani, B. (2006). Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, III(A7).
<https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- Tsurutani, B., & Hajra, R. (2021). The Interplanetary and Magnetospheric causes of Geomagnetically Induced Currents (GICs) > 10 A in the Mäntsälä Finland Pipeline: 1999 through 2019. *J. Space Weather Space Clim.*, II(23). <https://doi.org/10.1051/swsc/2021001>
- UN COPUOS. (2017, November 20). *Thematic priority 4. International framework for space weather services* (A/AC.105/1171 ed.). UNOOSA Documents.
https://www.unoosa.org/oosa/oosadoc/data/documents/2018/aac.105/aac.1051171_0.html
- UN COPUOS. (2018, June 27). *Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities* (A/AC.105/2018/CRP.20 ed.) [Conference room paper by the Chair of the Working Group on the Long-term Sustainability of Outer Space Activities]. UNOOSA Website.
https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_0_html/AC105_2018_CRP20E.pdf
- Wang, Y.-M., & Sheeley, N. (1990). Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *The Astrophysical Journal*, 355, 726–732.
- Wasle, E., Hofmann-Wellenhof, B., & Lichtenegger, H. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer.
 10.1007/978-3-211-73017-1
- WMO. (2019). *Four-year Plan for WMO’s Coordination of Space Weather Activities 2020-2023*. WMO Website.
<https://community.wmo.int/activity-areas/wmo-space-programme-wsp/ipt-sweiss>