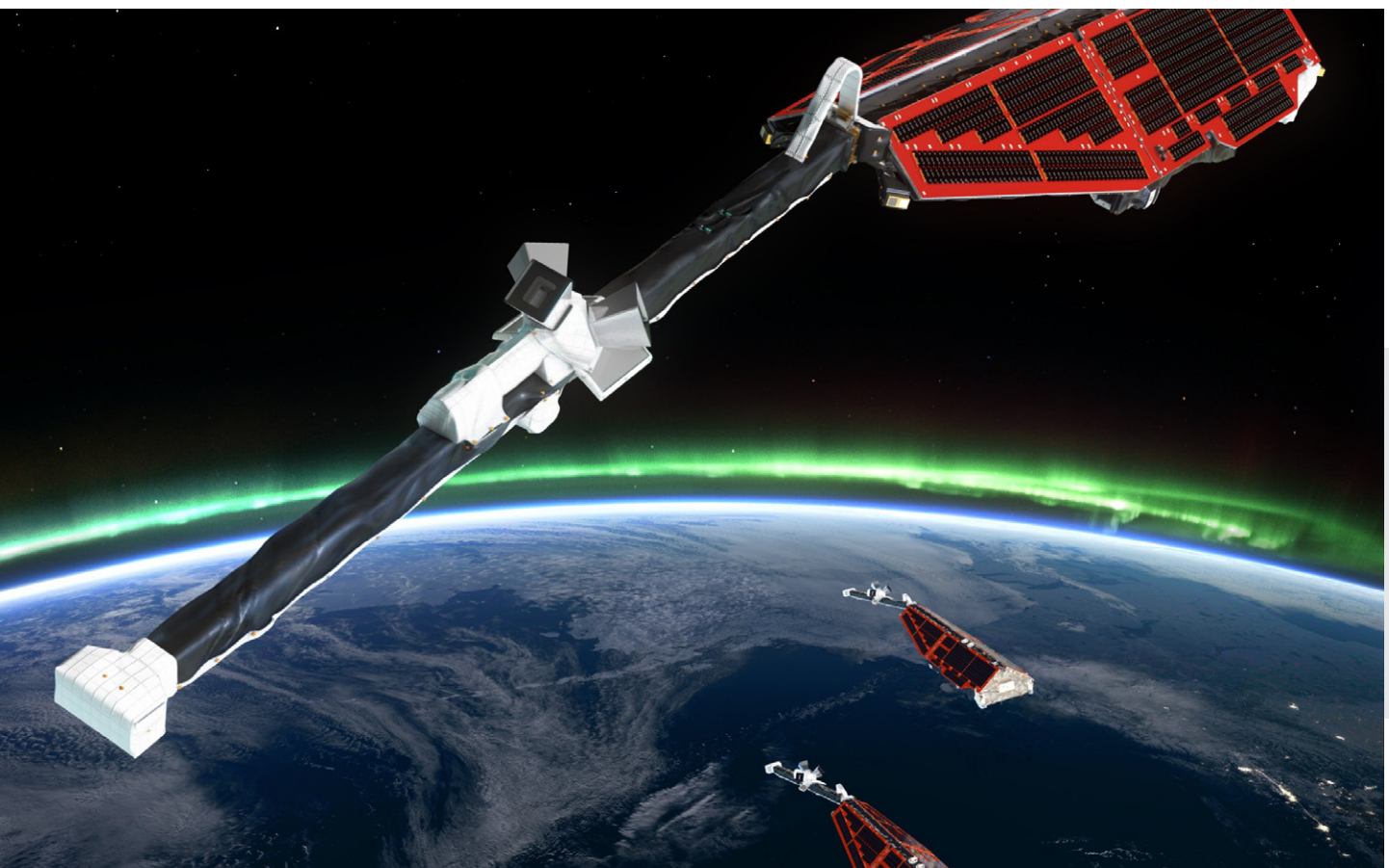


Geomagnetismus und Partikelstrahlung im Weltraum

Claudia Stolle, Yuri Shprits, Jan Saynisch, Foteini Vervelidou, Jürgen Matzka
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The geomagnetic field originates in the Earth's outer core and reaches into space for several Earth radii. It thereby tells us about variations in the deep Earth, controls the shape and strength of electric currents and particle drift in the ionosphere and magnetosphere, and protects Earth's life from solar and cosmic radiation. It is therefore important to understand the geophysical processes that lead to geomagnetic variations, and how the solar-terrestrial system is affected by space weather events. Research on geomagnetism, upper atmosphere research and magnetospheric as well as radiation belt physics profit enormously from dedicated satellite missions in low Earth orbit. GFZ's scientific achievements in these research areas significantly benefit from ESA's Swarm constellation mission, launched in 2013. GFZ contributed largely to its design and product definition by leveraging experiences from the successful CHAMP mission operated by GFZ during the last decade. Parameters including the geomagnetic and electric field, air density and wind, electron content and temperature are measured with high precision and global coverage. Also, particle flux measurements on the Lomonosov satellite will help us better understand the loss of particles from the Van Allen radiation belts into the atmosphere. The data from these missions are currently also utilized within the GFZ-coordinated Priority Programme 1788 "Dynamic Earth" funded by the German Research Foundation.



Tief im Innern unseres Planeten, im äußeren Erdkern, bewegt sich flüssiges Eisen und erzeugt ein Magnetfeld, das so stark ist, dass es zigtausende Kilometer in den Weltraum reicht (Abb. 1). Das Erdmagnetfeld lenkt solare und kosmische Strahlung von der Erde ab und wird damit zum Schutzschild, ohne das ein Leben, wie wir es kennen, kaum möglich wäre. Für den Menschen ist das Magnetfeld nicht unmittelbar wahrnehmbar, aber schon eine einfache Kompassnadel zeigt deutlich seine Kraftwirkung. Mit hochempfindlichen, wissenschaftlichen Magnetometern wird nachgewiesen, dass das Erdmagnetfeld in ständiger Veränderung ist und dies auf allen Zeitskalen, von Sekunden bis Jahrtausenden. Die Erforschung der unterschiedlichen Quellen des Erdmagnetfelds durch Beobachtungen, Analysen und Modellierung liefert wichtige Erkenntnisse zum langfristigen globalen Wandel in der Atmosphäre, den Ozeanen und im Erdinnern (z. B. Stolle *et al.*, 2017).

Durch die zunehmende Nutzung neuer Technologien, wie kabellose Datenübertragung, autonome Fahrzeuge oder Satellitennavigation, ist unsere Gesellschaft aber auch verwundbar gegenüber elektromagnetischen Störungsereignissen, die in der Sonnenaktivität ihren Ursprung haben und durch den Sonnenwind sowie das Erdmagnetfeld in die technischen Systeme übertragen werden. Für das sogenannte Weltraumwetter ist das Erdmagnetfeld deshalb ein wichtiger Faktor.

Neben dem äußeren Erdkern gibt es weitere Quellen des Erdmagnetfelds, wie etwa die Gesteinsmagnetisierung der Erdkruste und elektrische Ströme im Weltraum, in der Atmosphäre, in den Ozeanen und im Erdmantel. Die Geometrie des Erdmagnetfelds bestimmt dabei die Lage der Polarlichter in der Ionosphäre und die Lage der Strahlungsgürtel in der Magnetosphäre. Gleichzeitig erzeugen die elektrischen Ströme, die z. B. bei der Entstehung der Polarlichter fließen, wiederum Magnetfelder, die dann ein Teil des Erdmagnetfelds sind. Eine umfassende Beschreibung dieser Ereignisse ist Teil des Forschungsgebiets Geomagnetismus.



Abb. 1: Künstlerische Darstellung des Erdmagnetfelds, das tief im Erdinnern entsteht und sich weit in den Weltraum ausdehnt. Es lenkt von der Sonne (oben rechts) stammende Partikelstrahlung von der Erde (Mitte unten) ab. (Illustration: M. Rother, GFZ)

Fig. 1: Artistic representation of the geomagnetic field. The field originates in deep Earth and spreads wide into space. It redirects solar (upper right part in panel) wind particles away from Earth (mid lower part in panel).

Links: Satelliten-Trio auf Forschungsreise durch das Magnetfeld der Erde. Swarm ist eine Satellitenmission im Earth Observation Opportunity Programme der ESA. Die Mission besteht aus drei baugleichen Satelliten (A, B und C), die die Erde als Konstellation auf polaren Bahnen umkreisen. (Grafik: ESA/AOES Medialab)

Left: Satellite trio on a research expedition through the magnetic field of the Earth. Swarm is a satellite mission within ESA's Earth Observation Opportunity Program. The mission consists of three identical satellites (A, B and C), which cruise the Earth as a constellation on polar orbits.

LEO-Satelliten auf besonderer Mission

Moderne, auf die Vermessung des Erdmagnetfelds zugeschnittene Satellitenmissionen haben seit der Jahrtausendwende die geomagnetische Forschung revolutioniert. Sie ermöglichen hochpräzise, weltumspannende Messungen des Erdmagnetfelds, da sie in niedrigen Orbits fliegen. Mit diesen sogenannten LEO-Satelliten (Englisch: Low Earth Orbiting satellites) können im Besonderen die Quellen der Ionosphäre quantifiziert werden, wenn sie gleichzeitig weitere Eigenschaften der Hochatmosphäre erfassen. Die erste Satellitenmission dieser Art war CHAMP (CHallenging Mini Satellite Payload), welche unter Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ im Jahr 2000 erfolgreich ins All startete.



Kontakt: C. Stolle
(claudia.stolle@gfz-potsdam.de)

Um Störungen der Magnetfeldmessungen durch den Satelliten selbst zu verhindern, wird beim Zusammenbau des Satelliten auf magnetische Reinheit geachtet und das Magnetometer wird an einem Ausleger, also mit einem gewissen Abstand zum Satelliten selbst, angebracht. Sternenkameras sorgen dafür, dass die Magnetfeldvektordaten immer in einem absoluten Referenzkoordinatensystem angegeben werden können.

Nachdem CHAMP im Jahr 2010 in der Atmosphäre verglühte, startete am 22. November 2013 unter der Leitung der Europäischen Weltraumbehörde ESA die Konstellationsmission Swarm. Diese besteht aus drei baugleichen polar umlaufenden Satelliten, wovon zwei Satelliten im Duett in 450 km und der dritte Satellit in 510 km Höhe fliegen (siehe Abb. Seite 32). Diese Konstellation ist für ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Fragestellungen konzipiert, das sich von der Erforschung des Erdkerns über den Erdmantel und die Erdkruste bis zur Hochatmosphäre und den erdnahen Weltraum erstreckt. Die Swarm-Mission liefert neben Messungen des Erdmagnetfelds auch Beobachtungen der Elektronendichte in der Ionosphäre, der Elektronen- und Ionentemperatur, des elektrischen Felds und der Atmosphärendichte. Dazu werden auf jedem Satelliten ein Fluxgate-Vektormagnetometer mit drei Sternenkameras, ein optisch gepumptes Absolutmagnetometer, ein Ionendriftmessgerät, eine Langmuir-Sonde, ein Akzelerometer, ein GPS-Empfänger und ein Laserreflektor geflogen.

In die Konzeption der Swarm-Mission sind wertvolle Erfahrungen aus der CHAMP-Mission eingeflossen. Das GFZ stellte einen der drei wissenschaftlichen Projektleiter von Swarm und beteiligte sich, neben der wissenschaftlichen Auswertung, maßgeblich an der Definition, Kalibrierung und Validierung der Swarm-Datenprodukte. Im Besonderen trägt das GFZ mit einem Magnetfeldmodell des Erdkerns und Weltraumwetterprodukten bei. Zu diesen gehören die Quantifizierung von Strömen zwischen der Hochatmosphäre und erdnahem Weltraum, die Bestimmung des

Elektronengehalts der Ionosphäre und Plasmasphäre sowie die Erkennung ionosphärischer Störungen, die auch den Empfang der GPS-Signale stören können.

Eine besondere Möglichkeit, die Swarm-Daten national wissenschaftlich zu nutzen, ergibt sich aus dem vom GFZ koordinierten Schwerpunktprogramm 1788 „DynamicEarth“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (<http://www.spp-dynamicearth.de/de/spp1788-dynamicearth>).

Verborgenes: Das Erdinnere

Rund 90 % des Erdmagnetfelds stammen von der am tiefsten gelegenen Quelle, dem äußeren Erdkern, und zeigen ausgeprägte Anomalien. Diese sind nicht nur für die geophysikalische Forschung, sondern auch für die Navigation von Interesse. Das neue, auf Daten der Swarm-Satelliten beruhende Kernfeldmodell „Mag.num“ des GFZ zeigt globale Asymmetrien, wie etwa drei Bereiche mit hoher Magnetfeldstärke (in Kanada, Sibirien sowie dem Gebiet zwischen Antarktis und Australien) und ein Gebiet geringer Feldstärke von Südamerika bis Südafrika – die Südatlantische Anomalie (SAA, Abb. 2). Die zeitliche Änderung der Fließbewegung im äußeren Erdkern, also tief im Erdinnern, verändert das Erdmagnetfeld mit der Zeit und kann über die Magnetfeldbeobachtungen und die Modellierung detektiert werden. Abbildung 2 zeigt auch strahlungsbedingte technische Störungen an den Swarm-Satelliten (Single Event Upset). Deutlich erkennbar ist der Zusammenhang mit dem Erdmagnetfeld: Das schwache Magnetfeld im Südatlantik kann die Satelliten nicht komplett vor magnetosphärischer, aus dem Strahlungsgürtel stammender Strahlung schützen. Durch die Magnetfeldänderungen werden sich auch die Lokationen von durch die Strahlung verursachten Satellitenstörungen in Zukunft verschieben.

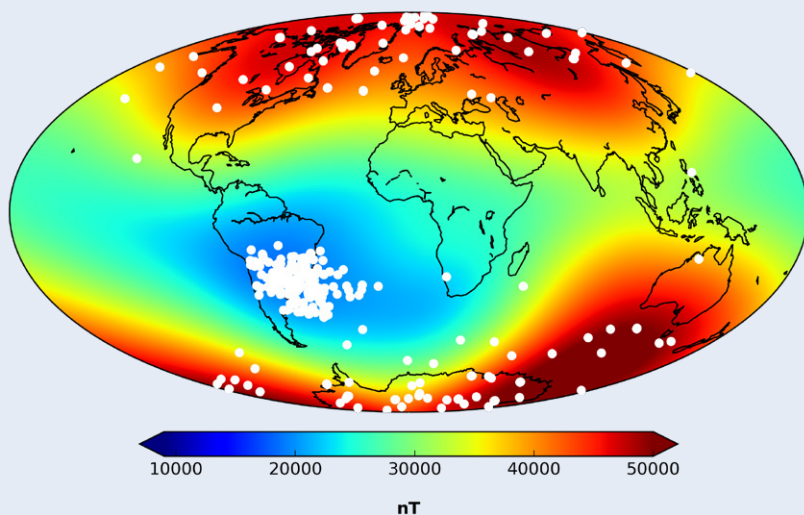


Abb. 2: Die Stärke des Kernfelds in einer Höhe von 471 km berechnet aus dem Mag.num-Modell des GFZ. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen schwachem Magnetfeld (blau) und strahlungsbedingten technischen Störungen der Swarm-Satelliten in dieser Höhe (weiße Punkte) ist zu erkennen. (Grafik: I. Michaelis, GFZ)

Fig. 2: Strength of the core field in an altitude of 471 km calculated from GFZ's Mag.num model. A distinct connection between low magnetic field values (blue) and radiation-induced technical failures of the Swarm satellites at this height (white dots) can be seen.

Magnetisierte Gesteine in der Lithosphäre tragen ebenfalls zum Erdmagnetfeld bei. Es ist möglich, ihr magnetisches Signal durch Datenprozessierung von dem des Erdkerns und dem Signal der Ionosphäre sowie Magnetosphäre zu trennen. Damit können Parameter der magnetisierten Gesteinsschicht der Lithosphäre, wie Mächtigkeit und Magnetisierung, bestimmt werden (Vervelidou und Thébaud, 2015). Diese Parameter sind wiederum von Eigenschaften wie dem Druck oder der Temperatur in der Lithosphäre abhängig. Abbildung 3 zeigt die radiale Komponente der Magnetisierung, abgeleitet aus Swarm-Daten. Die Swarm-Mission mit ihrem Konstellationsaspekt, insbesondere durch die zwei parallel fliegenden unteren Satelliten, ermöglicht durch die Messung des Ost-West-Gradienten des Magnetfelds eine verbesserte Abtrennung der nicht lithosphärischen Signale sowie eine höhere räumliche Auflösung der lithosphärischen Signale. Die räumliche Auflösung wird sich im Lauf der Satellitenmission weiter verbessern, da die Satelliten nach und nach absinken, d. h. niedrigere Orbits einnehmen und somit näher an die Lithosphäre herankommen.

Signale aus dem Ozean

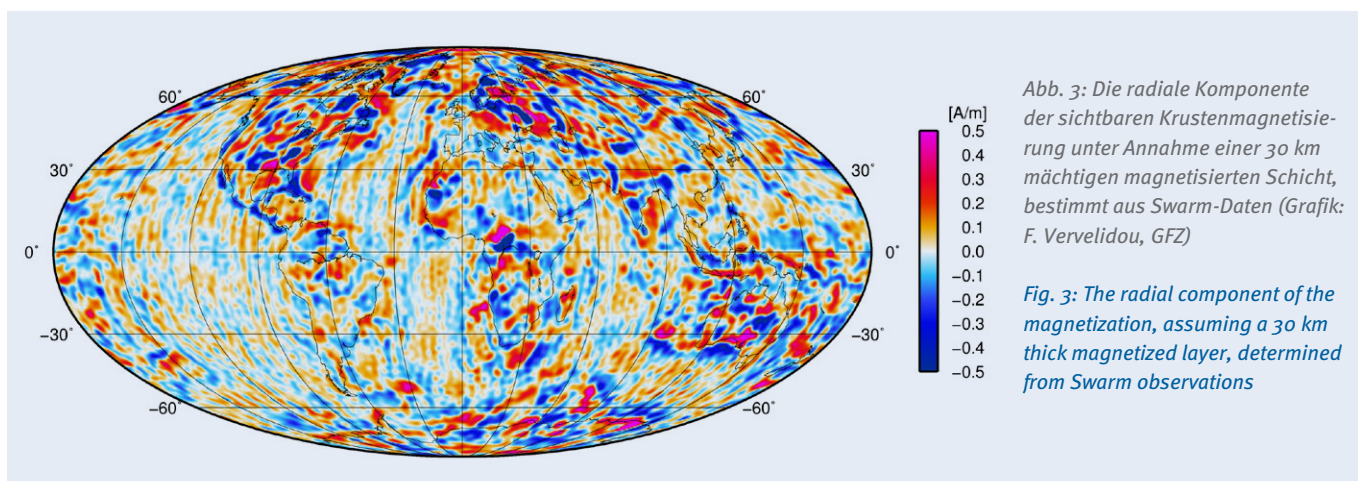
Bereits 1832 spekulierte Michael Faraday über die elektromagnetische Induktion im Ozean. Elektromagnetische Messungen am Ozeanboden sind bis heute ein wichtiges Instrument der Ozeanographie, um vertikale Geschwindigkeitsprofile, ozeanische Massentransporte und sogar Tsunami detektieren zu können. Seit der CHAMP-Mission ermöglichen nun auch Satelliten-Magnetometer eine globale Messung dieser Eigenschaften.

Aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit und seiner Strömungsbewegung durch das Erdmagnetfeld induziert das Meerwasser elektromagnetische Signale, die unter anderem auch von der Temperatur und dem Salzgehalt des Meerwassers selbst abhängen. Diese Signale sind zwar am Ort der Satelliten extrem schwach, eine satellitengestützte Beobachtung ist aber dennoch möglich. Insbesondere gezeiteninduzierte Magnetfelder sind aufgrund ihrer strikten Periodizität relativ einfach zu detektieren. Wissen-

schaftlerinnen und Wissenschaftler am GFZ haben Methoden entwickelt und getestet, um mit Hilfe der Swarm-Satelliten diese Signale und ihre Abhängigkeit vom Salzgehalt und der Ozean-temperatur zur Überwachung der globalen Erwärmung der Ozeane zu nutzen (Saynisch et al., 2016; Saynisch et al., 2017; Abb. 4).

Wetter zwischen Atmosphäre und Weltraum

Entsprechend dem Wetter in der uns umgebenden Troposphäre gibt es natürliche Schwankungen in der Hochatmosphäre (zwischen etwa 80 bis 800 km). Wind, Dichte, Elektronengehalt und die ionosphärischen/magnetosphärischen elektrischen Ströme unterliegen typischen jahreszeitlichen Schwankungen und zeigen einen direkten Bezug zum solaren Zyklus, der im Schnitt elf Jahre dauert. Aber auch tägliche Schwankungen in der Dissipation von solarer Energie in Richtung Erde führen zu einem täglichen Wetter im erdnahen Weltraum, dem „Weltraumwetter“. Hier sind die Beobachtungen von LEO-Satelliten besonders relevant, da sie direkte Messungen mit globaler Abdeckung ermöglichen. Die Relevanz der Hochatmosphäre z. B. für die Lebensdauer von LEO-Missionen lässt sich direkt an der erwarteten Lebensdauer der Swarm-Mission selbst erkennen. Fällt das nächste solare Maximum, das im Moment für die Jahre 2022 bis 2024 erwartet wird, besonders hoch aus, so werden ohne eine künstliche Anhebung der Satellitenorbits die beiden unteren Satelliten im Jahr 2022 in die Atmosphäre eintreten und verglühen. Fällt der kommende Sonnenzyklus schwach aus, so fliegen diese Satelliten noch bis zum Jahr 2030 in über 350 km Höhe. Grund für diese Variabilität ist der Luftwiderstand, den die Satelliten erfahren und der sie mehr oder weniger stark abbremst. Die selben Bedingungen gelten für alle im erdnahen Weltraum befindlichen Objekte und sind grundlegend wichtige Parameter für die Bahnbestimmungen, sei es zur Vorhersage von Satellitenkollisionen, der Wiedereintritt von Weltraumschrott, oder für die Planung der kurz- und langfristigen Ausrichtung der Weltrauminfrastruktur. Die Verwendung der Swarm- und CHAMP-Daten für ein verbessertes Modell der Thermosphäre werden in einem aktuellen Projekt innerhalb des Schwerpunktprogramms „DynamicEarth“ entwickelt.



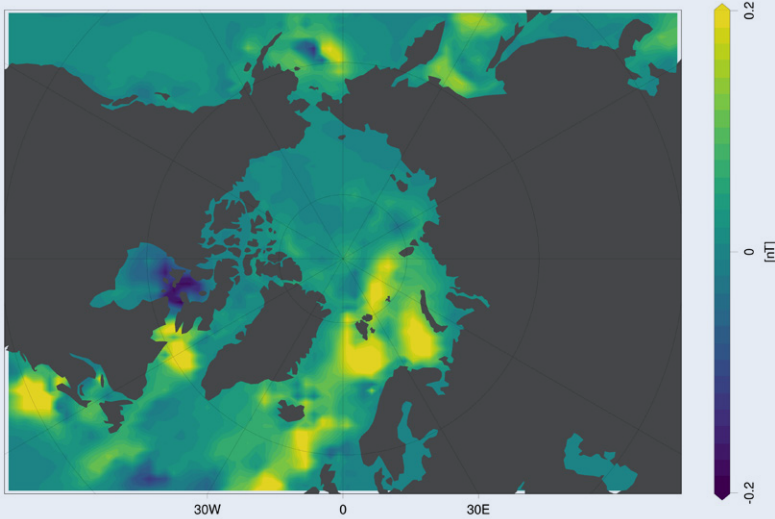


Abb. 4: Änderung der Gezeiten-Magnetfeld-Amplituden aufgrund des Temperaturanstiegs des Ozeanwassers im 21. Jahrhundert (Grafik: J. Saynisch, GFZ)

Fig. 4: Deviations in tidal magnetic field amplitudes induced by temperature enhancements of ocean water in the 21th century

Auch kleinräumige Turbulenzen im Elektronengehalt der Ionosphäre beeinflussen die satellitengestützte Navigation und Positionierung, es kann also zu Störungen von Systemen wie GPS oder Galileo kommen. Auf Swarm beobachtete Störungen des GPS-Empfangs zeigen charakteristische örtliche wie zeitliche Eigenschaften, die mit bekannten elektromagnetischen Prozessen in der Ionosphäre der polaren und der äquatorialen Breiten zusammenhängen (Abb. 5).

Teilchenstrahlung

Seit der Entdeckung der Van-Allen-Strahlungsgürtel wurde mit großem Aufwand versucht, die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen. Hierbei handelt es sich um Partikelstrahlung der Sonne. Die Teilchen werden durch das Erdmagnetfeld eingefan-

gen und laufen dann in Höhen von etwa 1000 bis 25 000 km in Ost-West-Richtung um die Erde. Diese Reise der Partikel kann Sekunden bis Jahre dauern. Die Dynamik der Strahlungsgürtel und ihre Reaktion auf Sonnenaktivität sind immer noch ein ungelöstes Problem der Weltraumphysik. Das Verständnis der magnetosphärischen Partikelstrahlung ist sehr wichtig, da sie ein Risiko für die Technik der in dieser Höhe fliegenden Satelliten oder auch für die bemannte Raumfahrt und den Luftverkehr darstellen.

Durch die Daten der Van-Allen-Probe-Satelliten der NASA konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte zum Verständnis der Beschleunigungsmechanismen gemacht werden, die Elektronen in den Energiebereich von Megaelektronenvolt (MeV) oder sogar Multi-MeV bringen. Die Van-Allen-Probe-Satelliten fliegen nahe der Äquatorebene auf sehr elliptischen Bahnen (HEO, Highly

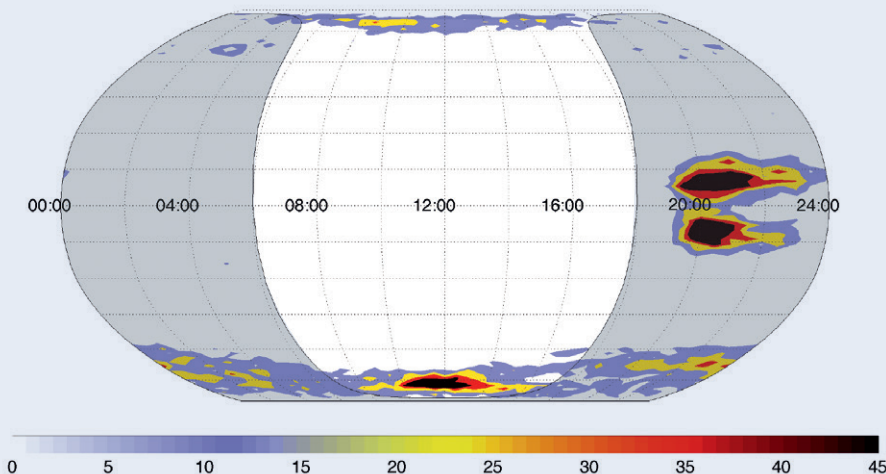
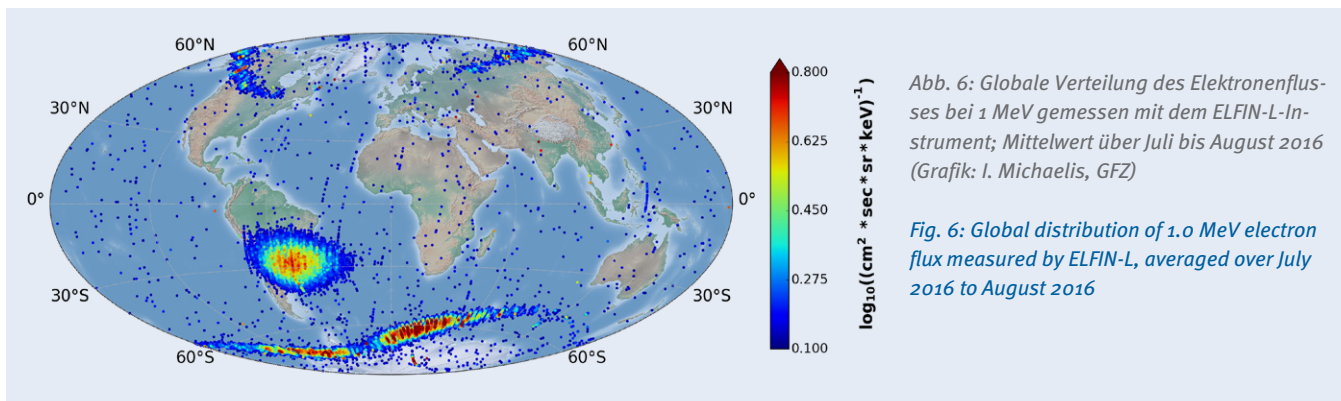


Abb. 5: Kumulierte Anzahl von GPS-Empfangsausfällen detektiert auf dem Swarm-Satelliten C über drei Jahre hinweg. Horizontale Gitterlinien repräsentieren die geomagnetische Breite und vertikale Gitterlinien die geomagnetische Ortszeit (nach Xiong et al., 2016).

Fig. 5: Accumulated number of GPS signal loss events as observed at the Swarm C GPS receiver during three years. Horizontal grid lines represent geomagnetic latitude and vertical grid lines geomagnetic local time (after Xiong et al., 2016).



Elliptical Orbits) und sind deshalb ideal geeignet, um die gesamte Population der in den Strahlungsgürteln gefangenen Partikel und ihre Beschleunigungsmechanismen zu untersuchen. Auf der anderen Seite kann von diesen HEO-Satelliten aus der Partikelverlust an die Atmosphäre nicht untersucht werden. Hierzu eignen sich nur LEO-Satelliten, da in diesen Höhenbereichen Partikel zurückgespiegelt werden, die nahe an die Atmosphäre gelangen können. Die Verlustprozesse sind nach wie vor nicht gut genug verstanden und müssen zunächst genau quantifiziert werden. Sie sind wichtig, um die nicht lineare Entwicklung der Strahlungsgürtel zu verstehen, da hier Teilchenbeschleunigung wie auch Teilchenverluste eine Rolle spielen.

Der Start des Lomonosov-Satelliten mit einer Sojus-Rakete am 28. April 2016 war der erste vom neuen russischen Wostotschny-Kosmodrom. Die Mission soll über drei Jahre Messdaten liefern. Eines der Instrumente, ELFIN-L (Electron Losses and Fields INvestigation onboard the Lomonosov satellite), dient der Bestimmung des Energiespektrums der in die Atmosphäre verlorengehenden Partikel. Die Messungen des ELFIN-L-Instruments und anderer polarer und äquatorialer LEO-Satelliten werden genutzt, um die Mechanismen zu verstehen, die zur Streuung der Strahlungspartikel in der Atmosphäre führen (Shprits *et al.*, 2017). Der Orbit des Lomonosov-Satelliten in 400 bis 500 km Höhe ist hierfür ideal geeignet.

Abbildung 6 zeigt die globale Verteilung des Elektronenflusses im 1 MeV-Bereich gemessen mit dem ELFIN-L-Instrument. Deutlich ist auch hier der Zusammenhang mit dem Erdmagnetfeld: Im Bereich der Südatlantischen Anomalie, wo das Erdmagnetfeld besonders schwach ist (siehe auch Abb. 2) und entsprechend die Rückspiegelung der gefangenen Elektronen tiefer liegt, zeigt der Elektronenfluss in Satellitenhöhe besonders hohe Werte. Die Bereiche mit hohem Elektronenfluss in Kanada, Sibirien und um die Antarktis entsprechen dem äußeren Strahlungsgürtel der Erde. Auch dieser ist in seiner Position durch die Geometrie des Erdmagnetfelds bestimmt.

Ausblick

LEO-Satellitenmissionen spielen eine zentrale Rolle in der Erforschung des Erdmagnetfelds, der Hochatmosphäre sowie der Magnetosphäre. Das GFZ engagiert sich stark bei der wissenschaftlichen Bearbeitung ihrer Messdaten. Im Besonderen wird auf die interdisziplinäre Nutzung der neuen Daten im Schwerpunktprogramm „DynamicEarth“ der DFG gesetzt, dessen zweite Finanzierungsphase im Frühjahr 2018 beginnt. Die gewonnene Expertise soll genutzt werden, neue Satellitenmissionen zu planen und durchzuführen, die offen gebliebene Fragen beantworten werden.

Literatur

- Saynisch, J., Petereit, J., Irrgang, C., Kuvshinov, A., Thomas, M. (2016): Impact of climate variability on the tidal oceanic magnetic signal - a model based sensitivity study. - *Journal of Geophysical Research*, 121, 8, pp. 5931–5941. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JCo12027>
- Saynisch, J., Petereit, J., Irrgang, C., Thomas, M. (2017): Impact of oceanic warming on electromagnetic oceanic tidal signals - a CMIP5 climate model based sensitivity study. - *Geophysical Research Letters*, 44, 10, pp. 4994–5000. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL073683>
- Shprits, Y. (2017): Editorial: Topical Collection on the Lomonosov Mission. - *Space Science Reviews*, 212, 3-4, pp. 1685–1686. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0393-1>
- Stolle, C., Olsen, N., Richmond, A. D., Opgenoorth, H. J. (2017): Editorial: Topical Volume on Earth's Magnetic Field—Understanding Geomagnetic Sources from the Earth's Interior and Its Environment. - *Space Science Reviews*, 206, 1, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0346-8>
- Vervelidou, F., Thébault, E. (2015): Global maps of the magnetic thickness and magnetization of the Earth's lithosphere. - *Earth Planets and Space*, 67, 173. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0329-5>
- Xiong, C., Stolle, C., Lühr, H. (2016): The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities. - *Space Weather*, 14, 8, pp. 563–577. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001439>