

Wissenschaftliche Beiträge	
Die ersten Ergebnisse von Solar Orbiter.....	5
Wiechert'sche Erdbebenwarte in Göttingen weiterhin aktiv	13
Eötvös' „polare Abstoßungskraft“ und kontinentale Migration: Wie hätte Eötvös' „polare Abstoßungskraft“ dazu beitragen können, Wegeners Theorie der kontinentalen Migration zu akzeptieren?.....	16
Nachrichten aus der Gesellschaft	21
Aus dem Archiv	35
Verschiedenes	40

Die ersten
Ergebnisse
von Solar Orbiter
Seite 5

Mitteilungen

2/2021

Die ersten Ergebnisse von Solar Orbiter

Daniel Verscharen

Mullard Space Science Laboratory, University College London,
Holmbury House, Holmbury St. Mary, Dorking, RH5 6NT, Großbritannien, <d.verscharen@ucl.ac.uk>

DOI: <https://doi.org/10.23689/fidgeo-5255>

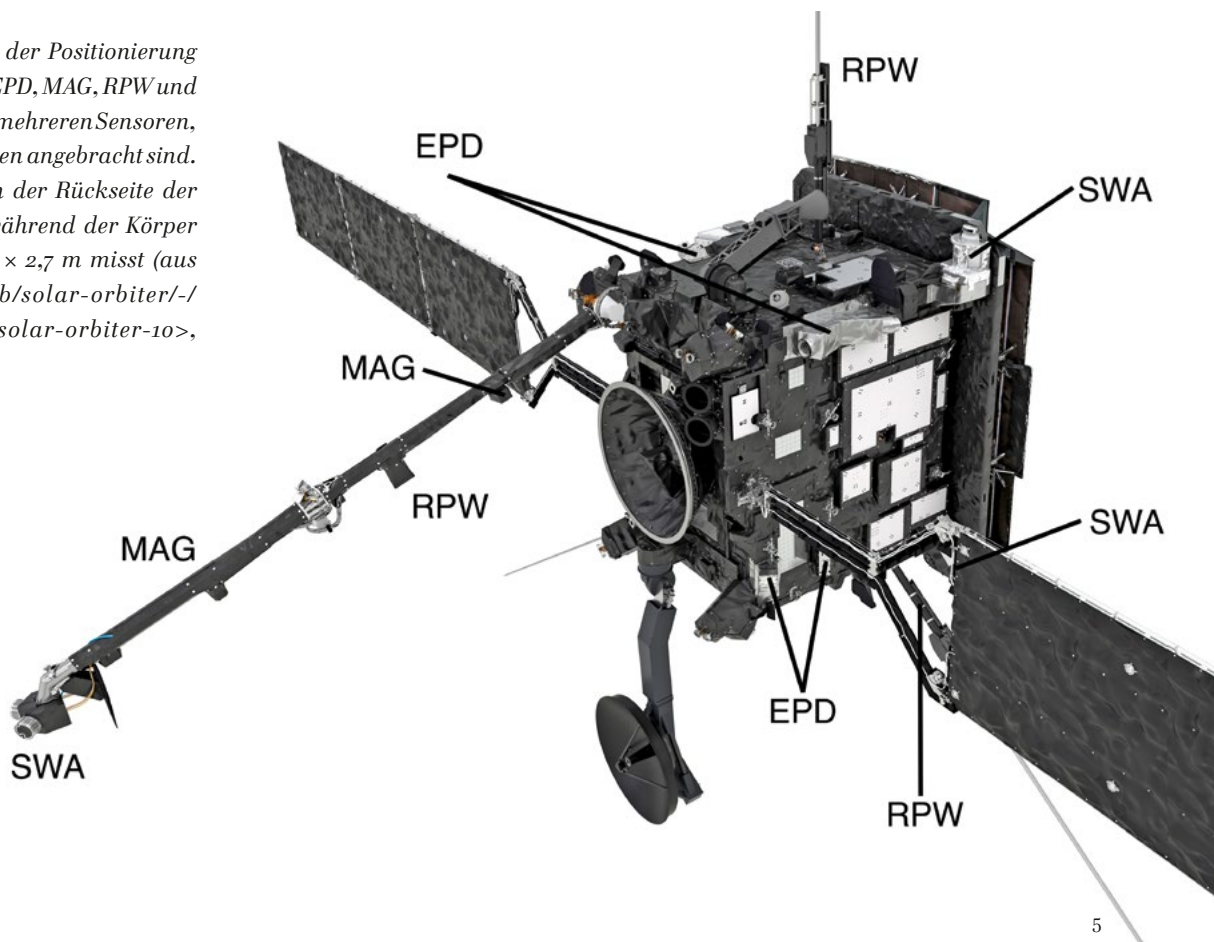
1. Einleitung

Die Heliosphäre ist die Plasmaumgebung der Sonne, die durch den Sonnenwind dominiert wird. Der Sonnenwind ist ein kontinuierlicher Plasmafluss, der in der Sonnenkorona entsteht und den Raum zwischen den Planeten füllt (VERSCHAREN et al. 2019). Wechselwirkungen zwischen dem Sonnenwind und den planetaren Magnetosphären führen zu den Prozessen, die wir unter dem Begriff „Weltraumwetter“ zusammenfassen. Das Verständnis der fundamentalen plasmaphysikalischen Prozesse im Sonnenwind und im erdnahen Weltraum sowie des Weltraumwetters im Allgemeinen sind die Kernziele der Weltraumgeophysik.

Im Abstand der Erde von der Sonne hat der Sonnenwind typischerweise Dichten von ungefähr 5 Teilchen pro Kubikzentimeter, Geschwindigkeiten um 500 km/s und Temperaturen von etwa 100.000 K. Die typische Magnetfeldstärke beträgt etwa 5 nT. Diese Parameter zeigen

jedoch starke zeitliche Variationen sowie eine Abhängigkeit vom elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne. Der Sonnenwind trägt Masse, Impuls, Drehimpuls und Energie von der Sonne in die Heliosphäre (VERSCHAREN et al. 2021a). Wie jedes Plasma ist dabei auch der Sonnenwind ein komplexes Vielteilchensystem, das üblicherweise mit den Methoden der statistischen Physik beschrieben wird. Im Vergleich zu neutralen Gasen hat ein Plasma weitere Freiheitsgrade aufgrund der zusätzlichen Wechselwirkungen zwischen den geladenen Plasmateilchen und den elektromagnetischen Feldern. Da Coulombstöße im Sonnenwind eine nachgeordnete Rolle spielen, ist er häufig in einem Zustand außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts, was eine zusätzliche Komplikation darstellt. In-situ-Messungen im Sonnenwind bieten somit eine einzigartige Möglichkeit, ein komplexes Plasmasystem im Nicht-Gleichgewichtszustand mit hoher Präzision zu untersuchen.

Abb. 1: Solar Orbiter mit der Positionierung der In-situ-Instrumente. EPD, MAG, RPW und SWA bestehen jeweils aus mehreren Sensoren, die an verschiedenen Stellen angebracht sind. Der Instrumentenarm an der Rückseite der Sonde ist 4,40 m lang, während der Körper der Sonde 2,5 m × 3,1 m × 2,7 m misst (aus <<https://sci.esa.int/web/solar-orbiter/-/artist-s-impression-of-solar-orbiter-10>>, © ESA/ATG medialab).



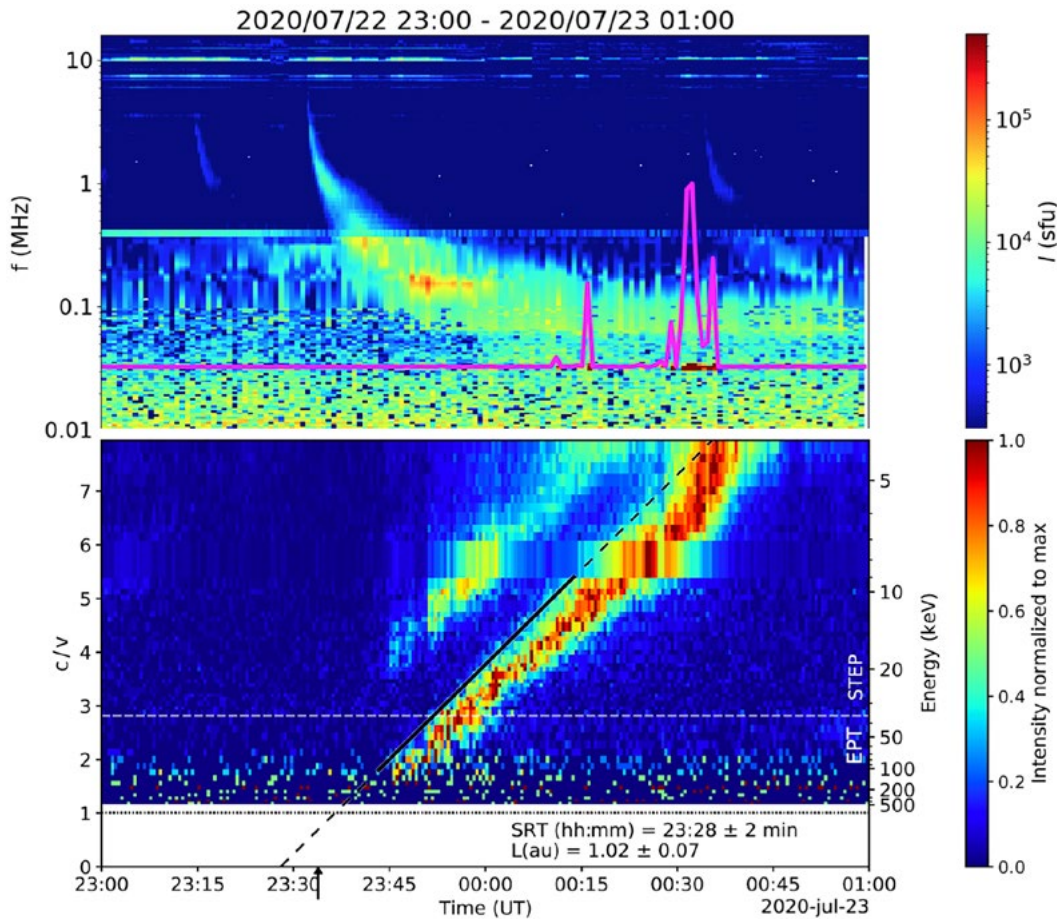


Abb. 2: Oben: Dynamisches Spektrum von RPW. Der magentafarbene Graph zeigt den spektralen Fluss an der lokalen Plasmafrequenz, der auf die Existenz von Langmuir-Wellen hindeutet. Unten: c/v als Funktion der Zeit für die mit EPD gemessenen energiereichen Elektronen (c ist die Lichtgeschwindigkeit und v die Geschwindigkeit der Elektronen). Ein Fit (schwarz-gestrichelte Linie) erlaubt die Bestimmung der Weglänge und des Zeitpunkts der Freisetzung der Elektronen (aus GÓMEZ-HERRERO et al. 2021, reproduziert mit Genehmigung von Astronomy & Astrophysics, ©ESO).

Solar Orbiter wurde entwickelt, um zu erforschen, wie die Sonne die Heliosphäre kreiert und kontrolliert (MÜLLER et al. 2020). *Solar Orbiter* ist eine ESA-geführte Weltraummission unter starker Beteiligung der NASA, die am 9. Februar 2020 an Bord einer *Atlas-V*-Rakete von Cape Canaveral startete. Bereits wenige Wochen nach der Inbetriebnahme des Satelliten begannen die In-situ-Instrumente mit der Aufzeichnung von Messdaten. Die ersten wissenschaftlichen Ergebnisse der Mission sind nun veröffentlicht worden. In diesem Artikel gebe ich eine Übersicht über eine kleine Auswahl der ersten Ergebnisse, um das Potenzial des *Solar Orbiter* für zukünftige Entdeckungen im Bereich der Weltraumgeophysik zu verdeutlichen.

2. Wissenschaftliche Ziele und Instrumentierung

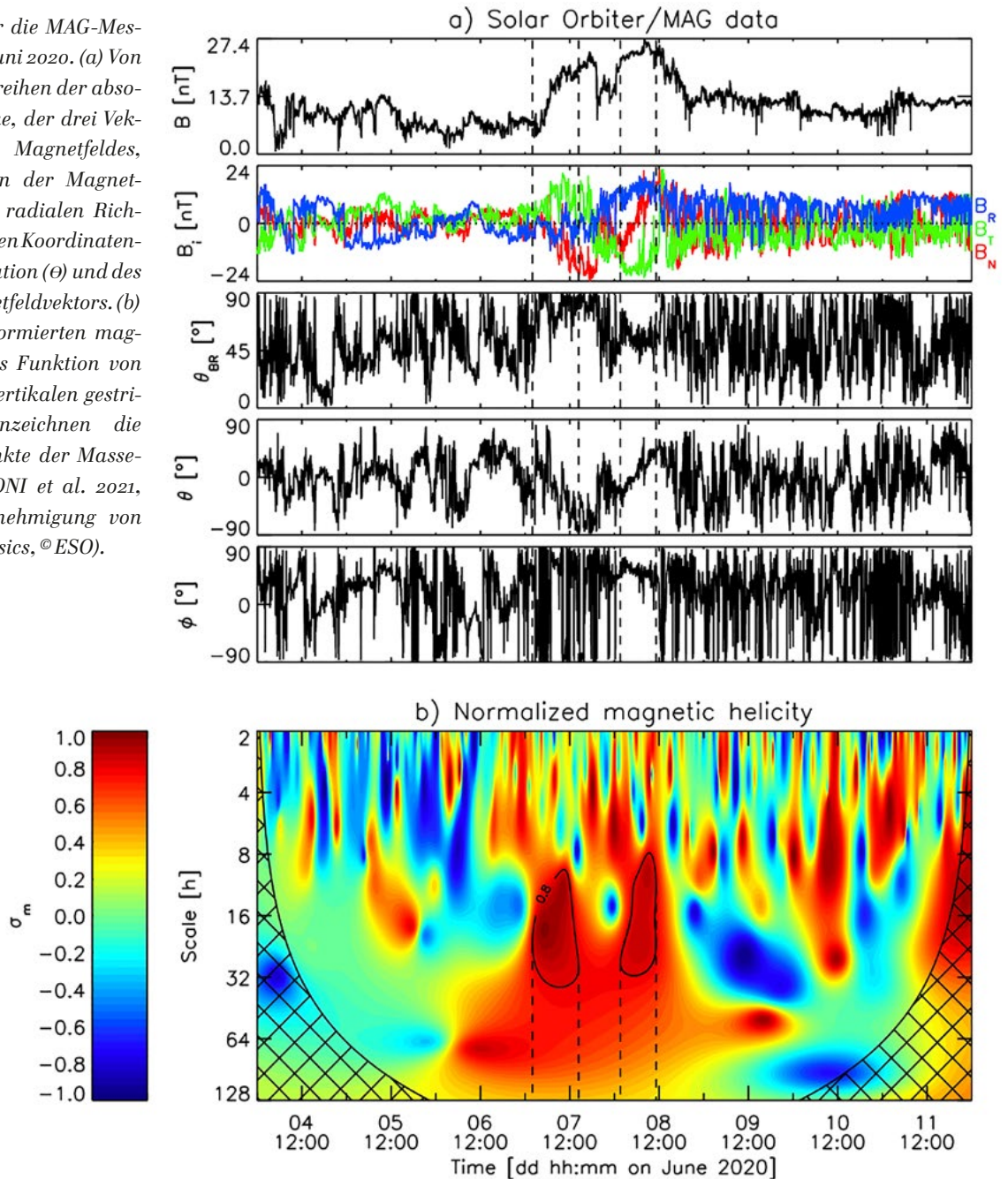
Das *Solar-Orbiter*-Team hat die wissenschaftlichen Ziele der Mission in vier Fragen zusammengefasst:

1. Was treibt den Sonnenwind an, und wo liegen die Ursprünge des koronalen Magnetfeldes?
2. Wie treiben nicht-stationäre solare Ereignisse Veränderungen in der Heliosphäre?
3. Wie generieren solare Eruptionen energiereiche Teilchen, die die Heliosphäre füllen?
4. Wie funktioniert der Dynamo im Inneren der Sonne, und wie bestimmt er die Verbindung zwischen der Sonne und der Heliosphäre?

Die Instrumentierung an Bord des *Solar Orbiter* wurde zusammengestellt, um diese Fragen zu beantworten. Die Auswahl fiel dabei auf zehn wissenschaftliche Instrumente. Sechs dieser Instrumente dienen der Fernerkundung der Sonne in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Hierzu zählen der *Extreme Ultraviolet Imager* (EUI), der Koronagraf *Metis*, der *Polarimetric and Helioseismic Imager* (PHI), der *Heliospheric Imager* (SoloHI), der Ultraviolett-Spektrograf SPICE sowie das Röntgenspektrometer STIX. Die übrigen vier Instrumente dienen der In-situ-Messung der Weltraumumgebung an der Position der Sonde. Diese Instrumente sind der *Energetic Particle Detector* (EPD; RODRÍGUEZ-PACHECO et al. 2020), das Magnetometer (MAG; HORBURY et al. 2020), der *Radio and Plasma Wave Analyser* (RPW; MAKSIMOVIC et al. 2020) und der *Solar Wind Analyser* (SWA; OWEN et al. 2020). Abbildung 1 zeigt eine grafische Darstellung der Sonde mit der Positionierung der In-situ-Instrumente. Die Kombination von Instrumenten zur Fernerkundung mit In-situ-Instrumenten ist in dieser Form einzigartig.

Solar Orbiter wird durch wiederholte *Swing-by*-Manöver an Venus einen Orbit erzielen, der im Laufe der siebenjährigen nominalen Missionsdauer die Sonde auf einen Abstand von nur 0,28 Astronomischen Einheiten von der Sonne bringen wird. Gleichzeitig wird die Inklination des Orbits auf über 20 Grad – in der erweiterten Missionsphase bis 2031 sogar auf über 30 Grad – angehoben werden, um einen einzigartigen Blick auf die Pole

Abb. 3: Übersicht über die MAG-Messungen vom 4. bis 11. Juni 2020. (a) Von oben nach unten: Zeitreihen der absoluten Magnetfeldstärke, der drei Vektorkomponenten des Magnetfeldes, des Winkels zwischen der Magnetfeldrichtung und der radialen Richtung im heliozentrischen Koordinatensystem sowie der Elevation (θ) und des Azimuts (Φ) des Magnetfeldvektors. (b) Spektrogramm der normierten magnetischen Helizität als Funktion von Zeit und Dauer. Die vertikalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Anfangs- und Endpunkte der Masseauswürfe (aus TELLONI et al. 2021, reproduziert mit Genehmigung von Astronomy & Astrophysics, © ESO).



der Sonne zu gewähren. Die polaren Regionen spielen insbesondere bei der Erzeugung des Sonnenmagnetfeldes eine entscheidende Rolle. Um die harsche Strahlungsumgebung so nah an der Sonne zu überstehen, ist *Solar Orbiter* mit einem Hitzeschild ausgestattet, der Temperaturen von bis zu 500 °C widerstehen kann, während die dahinterliegenden Instrumente etwa bei Raumtemperatur operieren können.

Da die Fernerkundungsinstrumente enorme Datenmengen produzieren werden, operieren diese nur in ausgewählten Zeitfenstern, um die vielversprechendsten Daten zu erhalten. Bis zum Beginn der nominalen Missionsphase am 26. November 2021 befindet sich *Solar Orbiter* in der „Cruise Phase“, während die Instrumente zur Fernerkundung noch nicht vollständig in Betrieb sind. Die In-situ-Instrumente sind jedoch bereits aktiv und operieren fast durchgängig. Sie gewähren somit bereits

jetzt einen einzigartigen Einblick in die Plasmaprozesse im Sonnenwind. In den folgenden fünf Abschnitten fasse ich aktuelle Studien zusammen, die kombiniert auf Daten von allen vier In-situ-Instrumenten basieren.

3. Relativistische Elektronenmessungen mit EPD und RPW

Type III Radio Bursts sind Ausbrüche solarer Radiostrahlung mit einem charakteristischen spektralen Verlauf, der zunächst bei höheren Frequenzen im MHz-Bereich beginnt und anschließend zu niedrigeren Frequenzen abfällt. Diese *Radio Bursts* werden durch energiereiche Elektronen erzeugt, die mit dem Plasma der Korona wechselwirken. Am 22. Juli 2020 beobachtete RPW einen solchen *Type III Radio Burst* mit RPWs Antennen zur Messung des elektrischen Feldes (Abb. 2; GÓMEZ-HERRERO et al. 2021). Etwa eine Stunde nach dem Auftreten

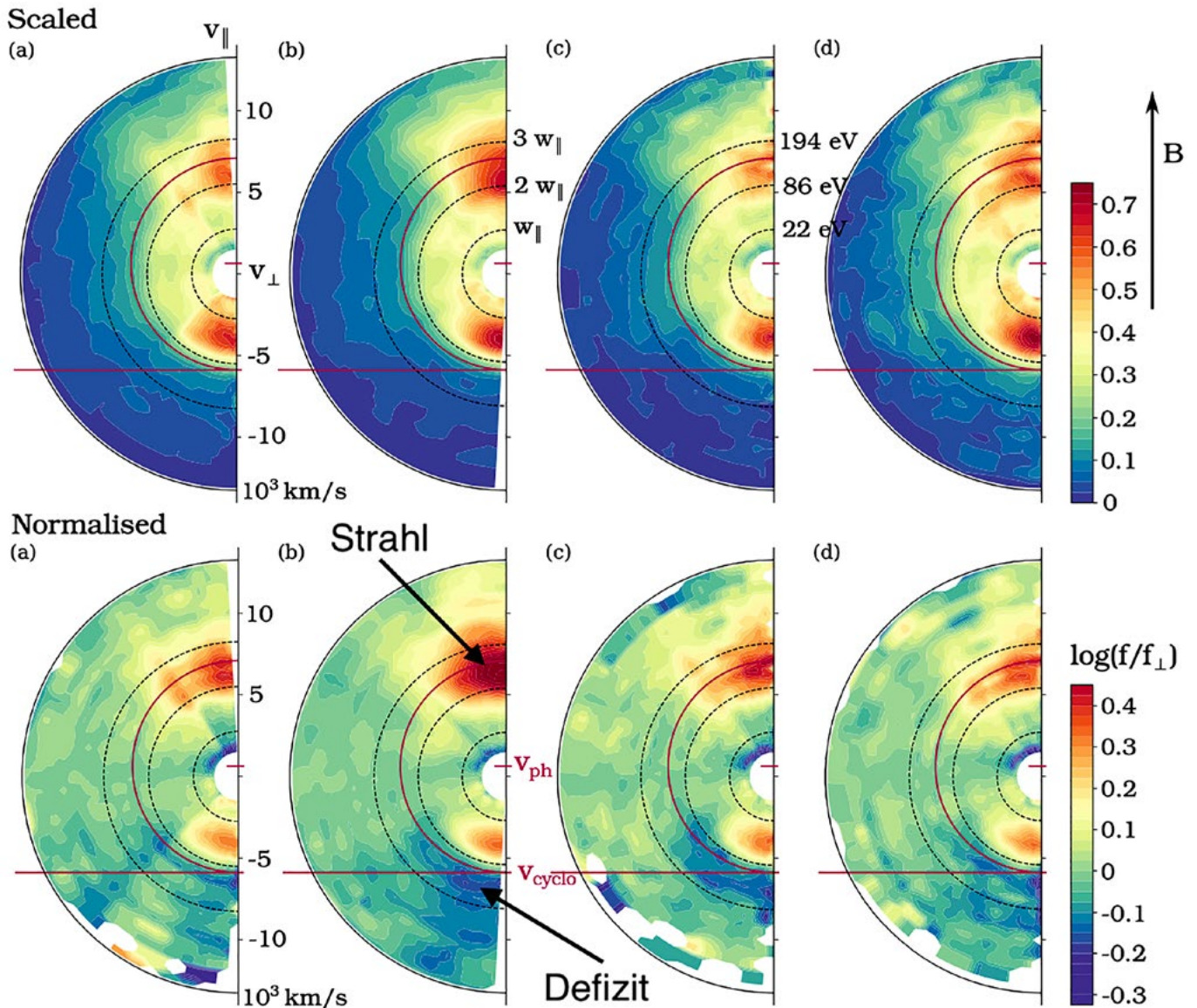


Abb. 4: Pitch-Winkel-Verteilungen der Elektronen gemessen durch SWA/EAS. Der Elektronenstrahl ist als lokales Intensitätsmaximum bei positiven v_{\parallel} sichtbar, wobei v_{\parallel} die Komponente der Geschwindigkeit parallel zur Magnetfeldrichtung (B) repräsentiert. Das Elektronendefizit erscheint auf der gegenüberliegenden Seite im Geschwindigkeitsraum. Die obere Reihe zeigt Verteilungen, bei denen der Wert der Verteilungsfunktion in jedem Energiering zwischen 0 und 1 skaliert wurde. Die untere Reihe zeigt Verteilungen, bei denen der Wert der Verteilungsfunktion zu ihrem Wert entlang der Achse bei $v_{\parallel}=0$ normiert wurde (aus BERCIC et al. 2021, reproduziert mit Genehmigung von Astronomy & Astrophysics, © ESO).

des *Radio Bursts* detektierte RPW ein Signal, das auf die Existenz von Langmuir-Wellen hindeutet. Langmuir-Wellen sind eine spezifische Art elektrostatischer Plasmawellen. Diese Detektion weist auf eine lokale Wechselwirkung zwischen den energiereichen Elektronen und dem Sonnenwindplasma hin, in der Langmuir-Wellen durch eine kinetische Plasmainstabilität getrieben werden.

EPD besteht aus vier Teleskopen, die Elektronen im Bereich von 4 keV bis 30 MeV sowie Ionen im Bereich von 4 keV bis 500 MeV pro Nukleon messen können. Zur Zeit des *Type III Radio Bursts* detektierten zwei Teleskope des EPD-Instruments energiereiche Elektronen im Bereich von 5 bis 500 keV. Die hochenergetischen Elektronen erreichten dabei *Solar Orbiter* vor den niederenergeti-

schen. Durch dieses dispersive Verhalten lassen sich Rückschlüsse auf die zurückgelegte Weglänge der Elektronen entlang des Magnetfeldes und damit auf die magnetische Konfiguration der Heliosphäre ziehen. In diesem Fall beträgt die effektive Weglänge etwa 1,02 Astronomische Einheiten und ist somit fast 50 % größer als die direkte Entfernung zwischen *Solar Orbiter* und der Sonne zum Zeitpunkt der Messung.

Die detaillierte Struktur des Elektronenspektrums erlaubt es zusätzlich, theoretische Modelle für den Transport energiereicher Teilchen in Plasmen zu testen. Messungen wie diese werden dabei helfen, die Evolution energiereicher Teilchen von ihren Ursprungsregionen in der Korona bis in den interplanetaren Raum und schließlich zur Erde zu verstehen.

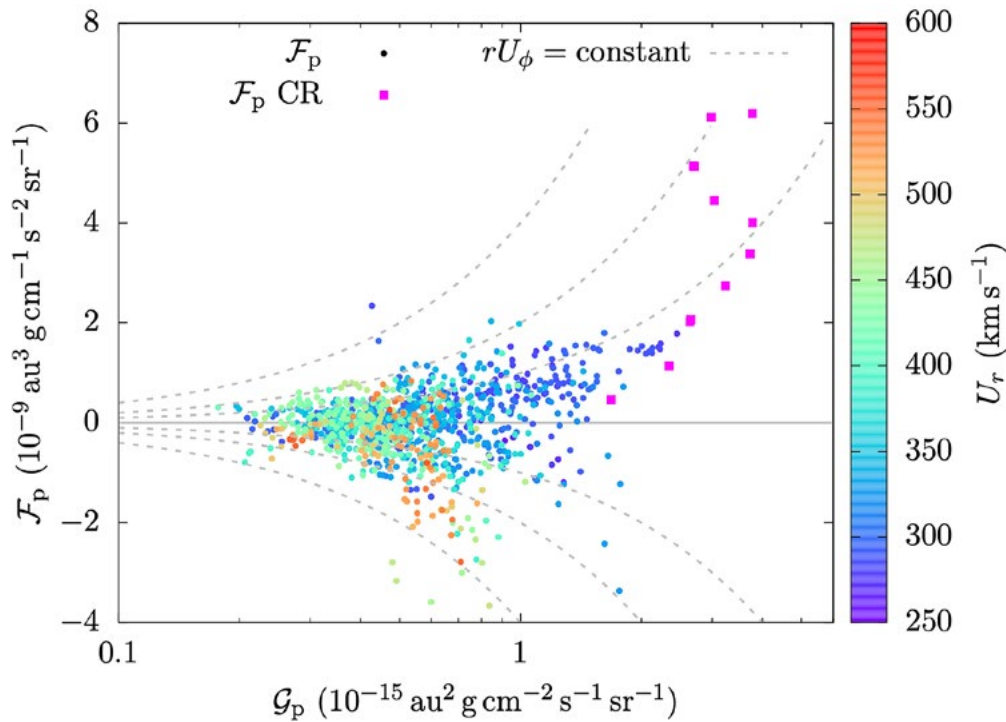


Abb. 5: SWA/PAS-Messungen des Drehimpulsflusses \mathcal{F}_p als Funktion des Masseflusses \mathcal{G}_p und der radialen Sonnenwindgeschwindigkeit U_r . Sonnenwind mit größerem \mathcal{G}_p und kleinerem U_r dominiert den im Durchschnitt positiven Drehimpulsfluss des Sonnenwindplasmas. Die Region komprimierten Sonnenwindes (CR) ist gekennzeichnet durch magentafarbene Quadrate. Sie zeigt einen ähnlichen spezifischen Drehimpuls (rU_ϕ , grau-gestrichelte Kurven) wie der langsame Sonnenwind (aus VERSCHAREN et al. 2021, reproduziert mit Genehmigung von Astronomy & Astrophysics, © ESO).

4. Koronale Masseauswürfe und die heliosphärische Stromschicht in MAG-Daten

Das Magnetometer (MAG) an Bord von *Solar Orbiter* misst die Stärke und Richtung des Magnetfeldes mit einer Präzision von etwa 0,1 nT bei einer Kadenz von bis zu 128 Magnetfeldvektoren pro Sekunde. Diese Genauigkeit erlaubt es, nicht nur die Richtung und Stärke des interplanetaren Feldes zu messen, sondern ebenso die Beschaffenheit von komplexen Magnetfeldstrukturen, die mit dem Sonnenwind konvektiert werden.

Auf diese Weise wurden zwei koronale Masseauswürfe am 7. und 8. Juni 2020 identifiziert (TELLONI et al. 2021). Bei diesen Masseauswürfen handelt es sich um Wolken von koronalem Plasma, das durch eine Umstrukturierung des koronalen Magnetfeldes in den interplanetaren Raum beschleunigt wird. Diese Plasmawolken sind dichter und mit Geschwindigkeiten bis zu 3.000 km/s typischerweise auch schneller als der umgebende Sonnenwind. Koronale Masseauswürfe tragen das komplexe Magnetfeld, das zu ihrer Beschleunigung beigetragen hat, mit sich. Dieses Magnetfeld zeigt üblicherweise eine charakteristische Wicklung, die sich in einem kohärenten Helizitätssignal ausdrückt. Helizität ist hierbei eine Kenngröße für den Drehsinn und die Stärke der Wicklung. Die Messungen durch *Solar Orbiters* MAG-Instrument am 7. und 8. Juni zeigen deutlich zwei solche kohärente Signale (Abb. 3b).

Die Magnetfeldmessungen zeigen jedoch auch, dass zwischen diesen beiden Helizitätssignalen das Magnetfeld eine deutliche Rotation durchführt (Abb. 3a, zweites Panel von oben). Während das Feld zu Beginn der Messungen eher in Richtung der Sonne zeigt, ist es nach dem Übergang am 7. Juni von der Sonne weg gerichtet. Ein solcher Übergang ist typischerweise ein Zeichen für

eine Überquerung der heliosphärischen Stromschicht. Diese Stromschicht kennzeichnet die Trennfläche zwischen interplanetaren Magnetfeldlinien, die mit der nördlichen oder der südlichen Hemisphäre der Sonne verbunden sind.

Da beide Masseauswürfe trotz gleicher Helizität auf gegenüberliegenden Seiten der Stromschicht zu finden sind, schließen TELLONI et al. (2021), dass es sich um zwei unterschiedliche Masseauswürfe handelt, die miteinander und mit der heliosphärischen Stromschicht wechselwirken. Die Autoren stellen Simulationen basierend auf den Gleichungen der Magnetohydrodynamik (MHD) an, die dieses Bild bestätigen.

Da koronale Masseauswürfe eine entscheidende Rolle für zahlreiche Weltraumwetterprozesse spielen, sind Studien dieser großskaligen Objekte von besonderer Wichtigkeit. *Solar Orbiter* wird dabei helfen, die Ausbreitung und Entwicklung dieser Masseauswürfe zu verstehen. Die Stoßwellen vor schnellen Masseauswürfen stellen außerdem effiziente Beschleuniger für energiereiche Teilchen dar, so dass Kombinationsmessungen von MAG und EPD in Zukunft weitere Einblicke in die Physik von Masseauswürfen liefern werden.

5. Hochauflösende Elektronenmessungen und Instabilitätsuntersuchungen mit SWA und RPW

Das *Electron Analyser System* (EAS) ist einer der drei Sensoren des SWA-Instruments. Angebracht am Ende des Instrumentenarms misst dieser Sensor die Verteilungsfunktion der Elektronen des Sonnenwindes mit hoher Auflösung in Energie, Einfallrichtung und Zeit. Im *Burst Mode* liefert EAS acht *Pitch*-Winkel-Verteilungen pro Sekunde. Diese geben an, wie die Elektronen in Abhängigkeit von Energie sowie dem Winkel zwischen

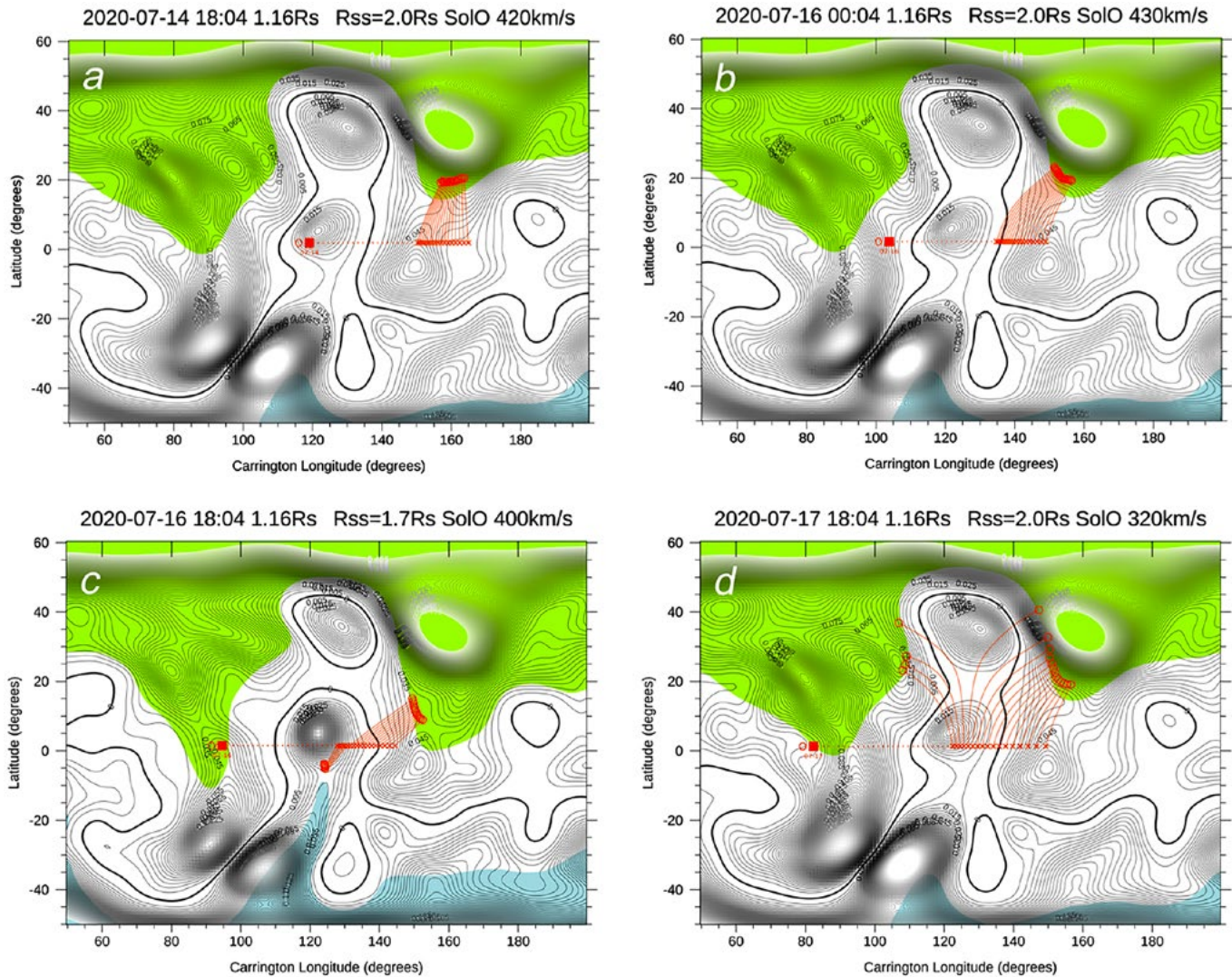


Abb. 6: Ursprungsregionen des mit SWA/PAS gemessenen Sonnenwindes. Die schwarzen Konturlinien repräsentieren das Quadrat der Magnetfeldstärke. Das Potenzialfeldmodell erlaubt die Bestimmung der Ursprungsregion des gemessenen Sonnenwindes (orangefarbene Kreise) bei zugehöriger Projektion der Position von Solar Orbiter (orangefarbene Quadrate). Die Regionen mit offenen Magnetfeldkonfigurationen sind durch farbliche Schattierungen gekennzeichnet (aus D'AMICIS et al. 2021, reproduziert mit Genehmigung von Astronomy & Astrophysics, © ESO).

ihrem Geschwindigkeitsvektor und dem Magnetfeldvektor verteilt sind. Asymmetrien in den *Pitch*-Winkel-Verteilungen kennzeichnen Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand nach Maxwell und Boltzmann.

BERCIC et al. (2021) untersuchen solche *Pitch*-Winkel-Verteilungen von EAS und finden gleich mehrere Abweichungen vom Gleichgewichtszustand (Abb. 4). Zum einen tritt der Elektronenstrahl deutlich hervor, eine Elektronenpopulation, die mit großer Geschwindigkeit (typischerweise mit etwa 4.500 km/s) kollimiert in die lokale Magnetfeldrichtung durch den Sonnenwindhintergrund strömt. In der entgegengesetzten Richtung zum Strahl tritt – insbesondere in Sonnennähe – zeitweise ein Defizit der Elektronen im Vergleich zum Gleichgewichtszustand auf.

Die Autoren diskutieren eine kinetische Mikroinstabilität, die durch dieses Defizit einen bestimmten Typ von Plasmawelle antreibt, die sogenannte Whist-

ler-Welle. In der Tat misst das Hochfrequenzmagnetometer des RPW-Instrumentes Magnetfeldfluktuationen zeitgleich mit der Erscheinung des Defizits, die auf das Vorkommen von Whistler-Wellen hindeuten. Es handelt sich hierbei um eine neue Instabilität, die in dieser Form in der Literatur noch nicht behandelt worden ist.

Obwohl die Elektronen aufgrund ihrer niedrigen Masse nur einen vernachlässigbaren Beitrag zum Impulsfluss des Sonnenwindes beitragen, liefern sie aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit einen entscheidenden Beitrag zu seinem Energiebudget. Wenn Instabilitäten – wie die neu entdeckte, vom Defizit getriebene Whistler-Instabilität – die Verteilungsfunktion der Elektronen umformen, so hat dies einen signifikanten Effekt auf die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen und somit das Energieverhalten des Sonnenwindes. Weitere Untersuchungen des kinetischen Elektronenverhaltens sind bereits in der Durchführung.

6. Messungen des Drehimpulsflusses im Sonnenwind mit SWA und MAG

Der Sonnenwind transportiert nicht nur Masse, Impuls und Energie von der Sonne, sondern auch Drehimpuls. Aufgrund der Sonnenrotation besitzt der Sonnenwind eine nicht vernachlässigbare azimutale Geschwindigkeitskomponente im sonnenzentrierten sphärischen Koordinatensystem. Der zugehörige Drehimpuls wird dabei durch den Sonnenwind von der Sonne abgeführt, was über die Lebensdauer der Sonne betrachtet zu einer merklichen Verlangsamung ihrer Rotation führt. Da die Rotation der Sonne eine zentrale Rolle für den internen Dynamoprozess spielt, der das Magnetfeld der Sonne kreiert, besteht ein besonderes Interesse daran, die Drehimpulsverluste präzise zu quantifizieren und zu verstehen.

Der *Proton Alpha Sensor* (PAS), ein weiterer Sensor des SWA-Instruments, misst die Dichte und Geschwindigkeit der Protonen des Sonnenwindes. Dies erlaubt die präzise Bestimmung des Drehimpulsflusses $F_p = r^3 \rho U_r U_\phi$, wobei r der Abstand von der Sonne, ρ die Massendichte des Sonnenwindes, U_r die radiale und U_ϕ die azimutale Komponente der Sonnenwindgeschwindigkeit repräsentieren. VERSCHAREN et al. (2021b) untersuchen unter anderem, wie F_p von der Geschwindigkeit U_r und dem Massefluss $G_p = r^2 \rho U_r$ abhängt. Der Nutzen dieser Flussgrößen liegt in ihren Erhaltungseigenschaften in den MHD-Gleichungen, die einen Vergleich unabhängig von der Entfernung zur Sonne ermöglichen.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis dieser Analyse. Sonnenwind mit Geschwindigkeiten über 400 km/s hat im Schnitt einen geringeren Massefluss und zeigt stärkere Variationen in F_p als der langsamere Sonnenwind. Dies ist vermutlich die Konsequenz von lokalen Umlenkungen des Sonnenwindes durch Turbulenz oder großskalige Strukturen im interplanetaren Raum. Anders als der schnellere Sonnenwind zeigt der langsamere Sonnenwind jedoch eindeutig einen Trend zu positiven Werten von F_p , was im Durchschnitt dem allgemein erwarteten Drehimpulsverlust der Sonne und damit der Verlangsamung der Sonnenrotation entspricht.

Die Messergebnisse von *Solar Orbiter* zeigen eine Region komprimierten Sonnenwindes (CR), die zum Beispiel durch einen schwachen koronalen Masseauswurf verursacht worden ist. Interessanterweise hat dieser komprimierte Sonnenwind den gleichen spezifischen Drehimpuls rU_ϕ wie der langsame Sonnenwind. Dies deutet darauf hin, dass diese komprimierte Region lediglich den Drehimpuls des Hintergrundsonnenwindes aufgenommen und nicht bereits mit zusätzlichem Drehimpuls die Korona verlassen hat. Der Beitrag solcher nicht-stationärer Ereignisse zum Drehimpulsverlust der Sonne ist bislang nicht bekannt und bedarf weiterer Untersuchung.

Neben den Protonen tragen auch Heliumteilchen, Anisotropien in den Verteilungsfunktionen, Fluktuationen

sowie nicht-diagonale Elemente des Maxwell'schen Spannungstensors zum Drehimpulsfluss bei. *Solar Orbiter* wird in der Lage sein, alle diese Beiträge zu quantifizieren. Es ist dabei besonders wertvoll, Messungen bei verschiedenen Abständen von der Sonne und bei verschiedenen heliographischen Breitengraden durchzuführen, um ein Gesamtbild des Drehimpulsflusses im Sonnenwind zu erhalten.

7. Die Ursprungsregionen des Sonnenwindes mit SWA, Modellen und Fernerkundungsinstrumenten

Um die Beschleunigung des Sonnenwindes zu verstehen, ist es besonders wichtig, seine Ursprungsregionen möglichst genau zu identifizieren. Obwohl wir mittlerweile verstehen, dass der schnelle Sonnenwind wohl hauptsächlich aus koronalen Regionen mit geöffneten Magnetfeldkonfigurationen, sogenannten „koronalen Löchern“, stammt, sind die Ursprungsregionen des langsamen Sonnenwindes noch immer größtenteils unbekannt.

Typischerweise zeigt langsamer Sonnenwind, neben dem offensichtlichen Geschwindigkeitsunterschied, einige Unterschiede zum schnellen Sonnenwind in seiner elementaren Zusammensetzung, den Ladungszuständen der Ionen und den Temperaturen der Plasmaspezies. Zusätzlich beinhaltet der schnelle Sonnenwind üblicherweise starke, korrelierte Fluktuationen in den Richtungen des Geschwindigkeitsvektors und des Magnetfeldvektors, die als „Alfvénische Fluktuationen“ bezeichnet werden. Alfvénische Fluktuationen haben meist wesentlich niedrigere Amplituden im langsamen Sonnenwind.

D'AMICIS et al. (2021) diskutieren nun jedoch basierend auf Daten der MAG- und SWA-Instrumente eine atypische Form von langsamem Sonnenwind, der trotz Geschwindigkeiten von unter 400 km/s starke Alfvénische Fluktuationen aufweist. Die Ursprungsregionen dieses langsamen Alfvénischen Sonnenwindes sind noch weitgehend unbekannt, können uns aber wertvolle Hinweise auf die unterschiedlichen Beschleunigungsmechanismen des Sonnenwindes liefern.

Um die Ursprungsregionen des langsamen Alfvénischen Sonnenwindes zu verstehen, nutzen D'AMICIS et al. (2021) ein numerisches Potenzialfeldmodell, das die Struktur des koronalen Magnetfeldes basierend auf spektroskopischen Beobachtungen des photosphärischen Magnetfeldes an der Sonnenoberfläche extrapoliert. Die Ergebnisse dieses Magnetfeldmodells werden anschließend in ein MHD-Expansionsmodell des Sonnenwindes gefüttert, das bis zur Position von *Solar Orbiter* zum Zeitpunkt der entsprechenden Messung des Sonnenwindes evaluiert wird. Dies erlaubt die Assoziierung der Zeitreihen der In-situ-Messungen mit den zugehörigen Ursprungsregionen in der Korona.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis im Fall des gemessenen Sonnenwindintervalls von D'AMICIS et al. (2021).

Zunächst entspringt der Sonnenwind einem koronalen Loch. Im weiteren Verlauf des Messintervalls bewegt sich die Ursprungsregion in ein Gebiet mit einer aufgrund der lokalen Feldtopologie stark nicht-monotonen Expansion der Feldlinien. Aus dieser Region stammt der gemessene langsame Alfvénische Sonnenwind in diesem Beispiel, was die Wichtigkeit der koronalen Feldkonfiguration für die Beschleunigung des Sonnenwindes unterstreicht.

In Zukunft wird die simultane Beobachtung durch die Fernerkundungs- und In-situ-Instrumente des *Solar Orbiter* die Verknüpfungen zwischen den Ursprungsregionen und dem lokal gemessenen Sonnenwind noch genauer beleuchten. Neben dem Vergleich von Plasma- und Magnetfeldeigenschaften bietet *Solar Orbiter* hierzu eine neue Technik. Die elementare Zusammensetzung der Plasmaionen ändert sich auf dem Weg des Sonnenwindes durch den interplanetaren Raum nicht. Das SPICE-Instrument ist in der Lage, die elementare Zusammensetzung des koronalen Plasmas spektroskopisch zu vermessen. Auf der Seite der In-situ-Instrumente bestimmt der *Heavy Ion Sensor* (HIS), der dritte Sensor des SWA-Instrumentes, die elementare Zusammensetzung des lokalen Sonnenwindes. Wenn nun also Sonnenwind mit gleichartiger Zusammensetzung durch SPICE in der Korona und nach einer durch die Sonnenwindgeschwindigkeit bestimmten Verzögerung durch HIS in der Heliosphäre gemessen wird, ist es naheliegend, die durch SPICE beobachtete Region in der Korona als die Ursprungsregion des gemessenen Sonnenwindes zu identifizieren.

Durch die Kombination von Instrumenten zur Fernerkundung und In-situ-Instrumenten ist *Solar Orbiter* somit in der einzigartigen Position, die Fragen nach dem Ursprung des Sonnenwindes zu beantworten. Diese Beobachtungen werden durch die theoretische und numerische Arbeit der *Modelling and Data Analysis Working Group* (MADAWG; ROUILLARD et al. 2020) unterstützt, die Modellberechnungen zur Verbindung zwischen *Solar Orbiter* und den Ursprungsregionen des Sonnenwindes anbietet.

Zusammenfassung

Solar Orbiter trägt eine einzigartige Kombination von sechs Instrumenten zur Fernerkundung der Sonne und vier Instrumenten zur In-situ-Messung von Teilchen und Feldern in die innere Heliosphäre. Bereits im ersten Jahr nach der Indienststellung der Sonde haben die In-situ-Instrumente Daten zur Erde gesendet, die zu einem besseren Verständnis unserer kosmischen Nachbarschaft geführt haben. In diesem Artikel illustriere ich durch eine Auswahl dieser ersten Ergebnisse das Potenzial für zukünftige grundlegende Entdeckungen mit *Solar Orbiter*. Die vollständigen Artikel sind in einer Sonderausgabe des Journals *Astronomy & Astrophysics* verfügbar (<<https://www.aanda.org/component/toc/?task=topic&id=1340>>).

Um die wissenschaftliche Arbeit an der Analyse der Daten von *Solar Orbiter* voranzutreiben, habe ich mit einer Gruppe von Kolleginnen und Kollegen wissenschaftliche Arbeitsgruppen eingerichtet, die sich seit dem Sommer 2020 regelmäßig online treffen. Der Zweck dieser Arbeitsgruppen ist es, neue Kollaborationen zu schaffen, das Verständnis für die aktuellen Arbeiten mit *Solar-Orbiter*-Daten zu vertiefen und sicherzustellen, dass die wissenschaftlichen Ziele der Mission erfüllt werden. Die Mitgliedschaft in diesen Arbeitsgruppen steht allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern uneingeschränkt und unabhängig von ihrer Zugehörigkeit zu einem Instrumententeam, ihrer Affiliation oder ihrem Karrierelevel offen. Insbesondere Doktorandinnen und Doktoranden sowie Postdocs leisten bereits heute einen entscheidenden Beitrag zu diesen Arbeitsgruppen. **Ich lade herzlich alle interessierten Leserinnen und Leser ein, sich unter <<https://sites.google.com/view/solo-wg/>> unkompliziert für unsere Arbeitsgruppen zu registrieren.**

Solar Orbiter wird während der Missionszeit in den kommenden zehn Jahren und darüber hinaus das Feld der Weltraumgeophysik maßgeblich mitbestimmen. Neben den erwarteten Fortschritten in unserem fundamentalen Verständnis der Sonne, der Heliosphäre und der Plasmaphysik im erdnahen Weltraum wird *Solar Orbiter* dabei einen kritischen Beitrag zu unserem Wissen über die physikalischen Grundlagen von Weltraumwetter leisten. Wenn wir die Prozesse verstehen, die den Transport von Masse, Impuls, Drehimpuls und Energie von der Sonne in den erdnahen Weltraum bestimmen, werden wir ebenso verstehen können, wie diese Prozesse den Einfluss der Sonne auf die Erde definieren.

Danksagung

Solar Orbiter ist eine Weltraummission unter internationaler Kollaboration zwischen ESA und NASA. Die Mission wird operiert von ESA. Ein besonderer Dank gilt den Autorinnen und Autoren der hier zusammengefassten Arbeiten sowie den Leiterinnen und Leitern der *Solar Orbiter In-situ Science Working Groups*, in denen diese Arbeiten präsentiert wurden. Die Abfassung dieses Artikels wurde finanziert durch das britische *Science and Technology Facilities Council* (STFC).

Literatur

- *BERCIC, L., VERSCHAREN, D., OWEN, C.J. et al. (2021): Whistler instability driven by the sunward electron deficit in the solar wind. – Astronomy and Astrophysics, im Druck.*
- *D'AMICIS, R., BRUNO, R., PANASENCO, O. et al. (2021): First Solar Orbiter observation of the Alfvénic slow wind and identification of its source. – Astronomy and Astrophysics, im Druck.*

- GÓMEZ-HERRERO, R., PACHECO, D., KOHLHOFF, A. et al. (2021): First near-relativistic solar electron events observed by EPD onboard Solar Orbiter. – *Astronomy and Astrophysics*, im Druck.
- HORBURY, T.S., O'BRIEN, H., CARRASCO BLAZQUEZ, I. et al. (2020): The Solar Orbiter magnetometer. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A9, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937257>>.
- MAKSIMOVIC, M., BALE, S.D., CHUST, T. et al. (2020): The Solar Orbiter Radio and Plasma Waves (RPW) instrument. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A12, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936214>>.
- MÜLLER, D., ST. CYR, O.C., ZOUGANELIS, I. et al. (2020): The Solar Orbiter mission. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A1, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467>>.
- OWEN, C.J., BRUNO, R., LIVI, S. et al. (2020): The Solar Orbiter Solar Wind Analyser (SWA) suite. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A16, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937259>>.
- RODRÍGUEZ-PACHECO, J., WIMMER-SCHWEINGRUBER, R.F., MASON, G.M. et al. (2020): The Energetic Particle Detector. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A7, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935287>>.
- ROUILLARD, A.P., PINTO, R.F., VOURLIDAS, A. et al. (2020): Models and data analysis tools for the Solar Orbiter mission. – *Astronomy and Astrophysics*, 642, A2, <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935305>>.
- TELLONI, D., SCOLINI, C., MÖSTL, C. et al. (2021): Study of two interacting interplanetary coronal mass ejections encountered by Solar Orbiter during its first perihelion passage. – *Astronomy and Astrophysics*, im Druck.
- VERSCHAREN, D., KLEIN, K.G. & MARUCA, B.A. (2019): The multi-scale nature of the solar wind. – *Living Reviews in Solar Physics*, 16, 5, <<https://doi.org/10.1007/s41116-019-0021-0>>.
- VERSCHAREN, D., BALE, S.-D. & VELLI, M. (2021a): Flux conservation, radial scalings, Mach numbers, and critical distances in the solar wind: magnetohydrodynamics and Ulysses observations. – *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 506: 4993–5004, <<https://doi.org/10.1093/mnras/stab2051>>.
- VERSCHAREN, D., STANSBY, D., FINLEY, A.J. et al. (2021b): The angular-momentum flux in the solar wind observed during Solar Orbiter's first orbit. – *Astronomy and Astrophysics*, im Druck.

Wiechert'sche Erdbebenwarte in Göttingen weiterhin aktiv

Udo Wedeken, Volker Zürn & Wolfgang Brunk, Wiechert'sche Erdbebenwarte Göttingen e.V.,
<www.erdbebenwarte.de>; Kontakt: info@erdbebenwarte.de>

DOI: <https://doi.org/10.23689/fidgeo-5257>

Im Jahre 1898 erhielt Emil WIECHERT (1861–1928) als einer der Ersten einen Lehrstuhl für Geophysik und bezog 1901 das neuerbaute Geophysikalische Institut auf dem Hainberg oberhalb von Göttingen. 1902 errichtete Wiechert dort ein Erdbebenhaus; die Göttinger Station GTT mit den drei Wiechert-Seismographen wurde 1905 eine Hauptstation im internationalen Netz der Erdbebenforschung. Diese Seismographen sind noch heute voll funktionsfähig. Das ist auch dem 2005 gegründeten Verein „Wiechert'sche Erdbebenwarte Göttingen e.V.“ zu verdanken, der das Observatoriumsgelände mit den beiden Erdbebenhäusern nach dem Umzug des Instituts für Geophysik auf den Nordcampus der Universität Göttingen gekauft und damit vor der Stilllegung und dem Abriss gerettet hat (BRUNK et al. 2005). Wenn Besucher heute das „Alte Erdbebenhaus“ betreten, erblicken sie stauend die drei historischen Seismographen (Abb. 1).

Im Januar 2006 wurde im „Neuen Erdbebenhaus“ etwa 10 m entfernt von der historischen Wiechert'schen Station GTT die moderne Station GTTG von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) eingerichtet. Sie registriert kontinuierlich und online mit einem STS-2-Breitbandseismometer und ist Teil des deutschen Regionalnetzes GRNS.

Im Jahr 2019 besuchten etwa 2.300 Interessierte die Göttinger Erdbebenwarte und ließen sich von engagierten Vereinsmitgliedern für diesen Ort lebendiger Göttinger Wissenschaftsgeschichte begeistern. Die Corona-Pandemie führte dann in den Jahren 2020 und 2021 zu monatelangen Zwangspausen und wenigen Führungen unter erschwerten Bedingungen. Die für den 14. Juni 2020 geplante Feier zum 15-jährigen Vereinsjubiläum (BEISERT et al. 2020) musste leider ausfallen. Aber die Seismographen verrichteten auch in dieser Zeit