

Einführung in den Sonnenwind



(vorgestellt von Peter Volkmer)

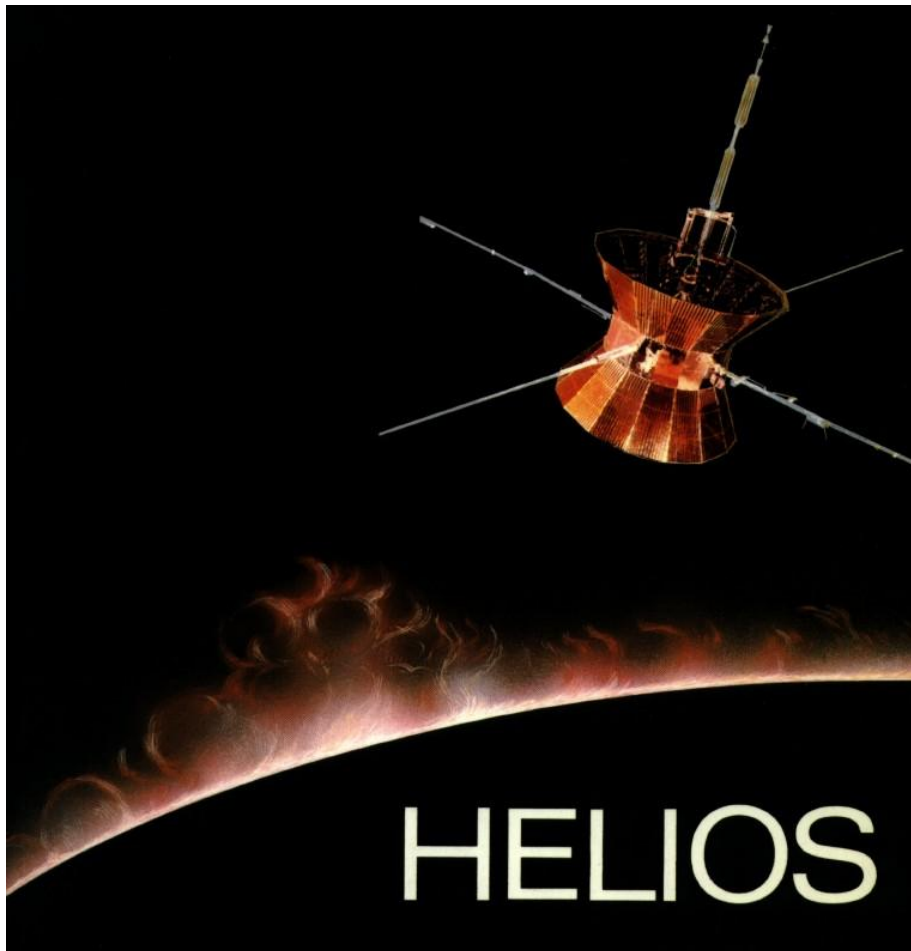
Gliederung

- 1. Historischer Überblick**
- 2. Erkundung in der Ekliptik: HELIOS-1 und HELIOS-2**
- 3. Erkundung senkrecht zur Ekliptik: ULYSSES**
- 4. Phänomene im Sonnenwind**
- 5. Messergebnisse von HELIOS (Stoßwellen)**
- 6. Ergebnisse der Sonde ULYSSES**
- 7. Ausblick: Wechselwirkung mit der Erdmagnetosphäre**

Historischer Überblick der Sonnenwinderkundung

- 1859** Carrington
erste (zufällige) Beobachtung eines Sonnen-Flares mit geomagnetisch nachgewiesener Auswirkung
- 1930** Chapman und Ferraro
Erklärung der Störungen des Erdmagnetfelds („ssc“: storm sudden commencement) durch Plasmawolken
- 1951** Biermann
erster ernsthafter Rückschluss auf Sonnenwind durch Interpretation der Kometenschweife (Staub+Plasma)
- 1958** Parker: erstes theoretisches Sonnenwindmodell
- 1959** erste Messung des Sonnenwindes durch Lunik 1
- 1962** erste detaillierte Studie durch Venus-Sonde Mariner 2
- 1974-1985** erste systematische Untersuchung des Sonnenwindes in der Ekliptik durch HELIOS-1 und HELIOS-2
- 1992-2009** erste systematische Untersuchung des Sonnenwindes senkrecht zur Ekliptik durch ULYSSES

HELIOS – 1 und 2: Missionsdaten



	HELIOS-1	HELIOS-2
Startdatum:	10.12.74	15.01.76
Missionsende:	15.03.86	08.01.81
Aphel:	0.985 AU	0.983 AU
Perihel:	0.309 AU	0.290 AU
Bahnneigung:	0.011°	0.039°
Umlaufszeit:	190 d	187 d
Spin:	60 U/Min	60 U/Min
Anzahl Experimente:	10 aktiv, 2 passiv	
Generatorleistung:	240 W	
Sendeleistung:	0.5 W / 8 W / 20 W	
Abmessungen:	2.77 m Durchm. 4.20 m Höhe	

Experimentübersicht: HELIOS 1 und 2

Die Experimente betrafen 3 Fragestellungen:

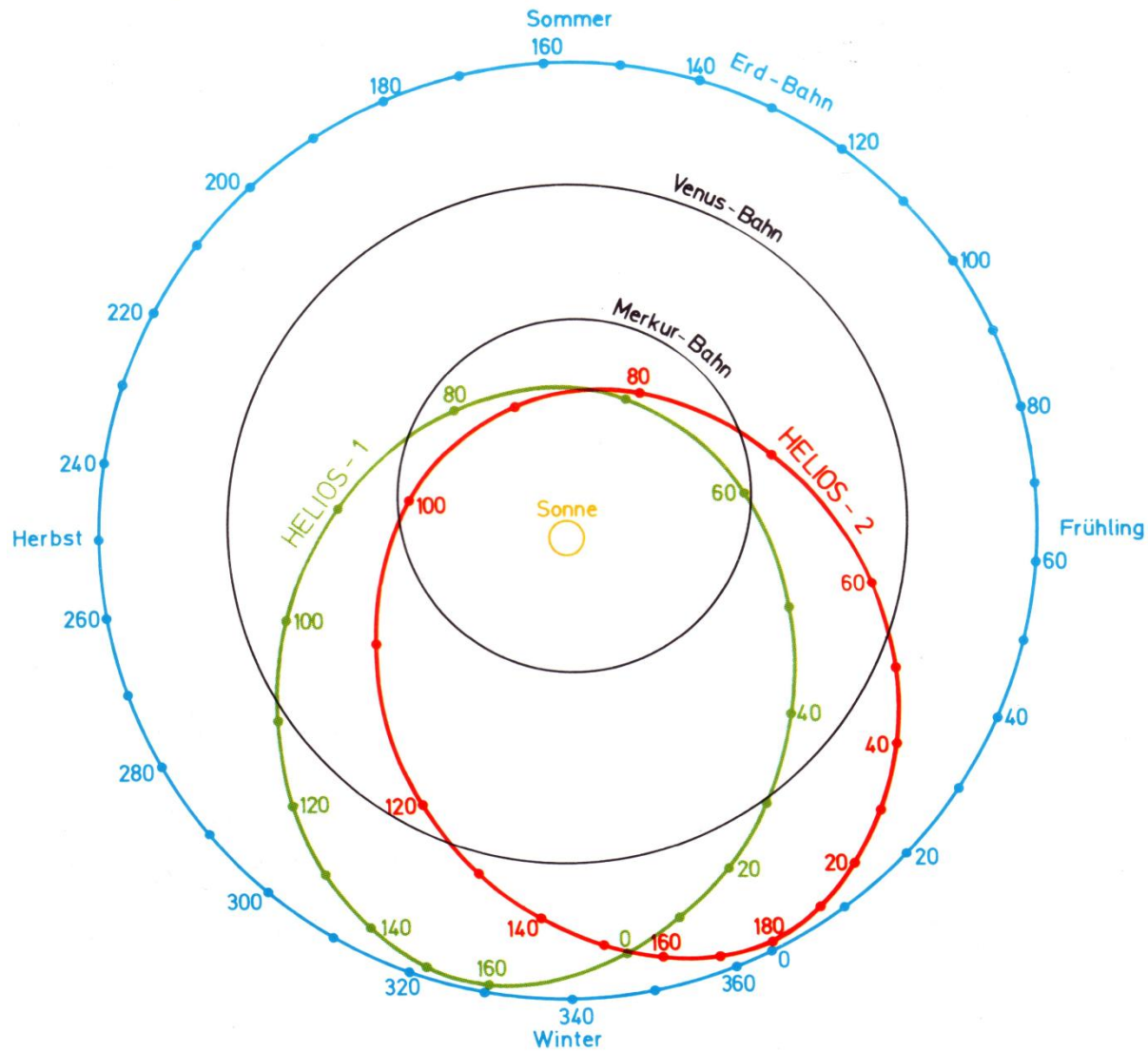
- (1) Untersuchung von Plasma-Partikeln
(Elektronen, Protonen, Ionen)**
- (2) Untersuchung des interplanetaren Magnetfelds**
- (3) Untersuchung des Staubs und Zodiakallichtes**

**Insgesamt waren 10 Experimente auf den Sonden etabliert.
(siehe Übersicht: <http://www.bernd-leitenberger.de/helios.shtml>)**

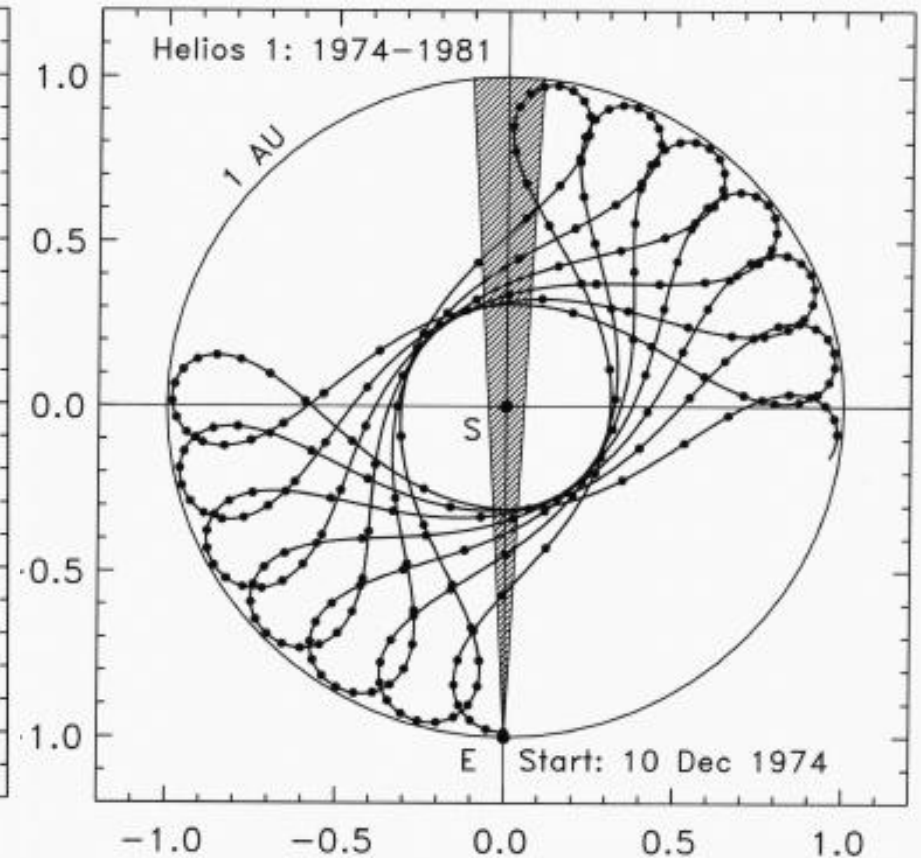
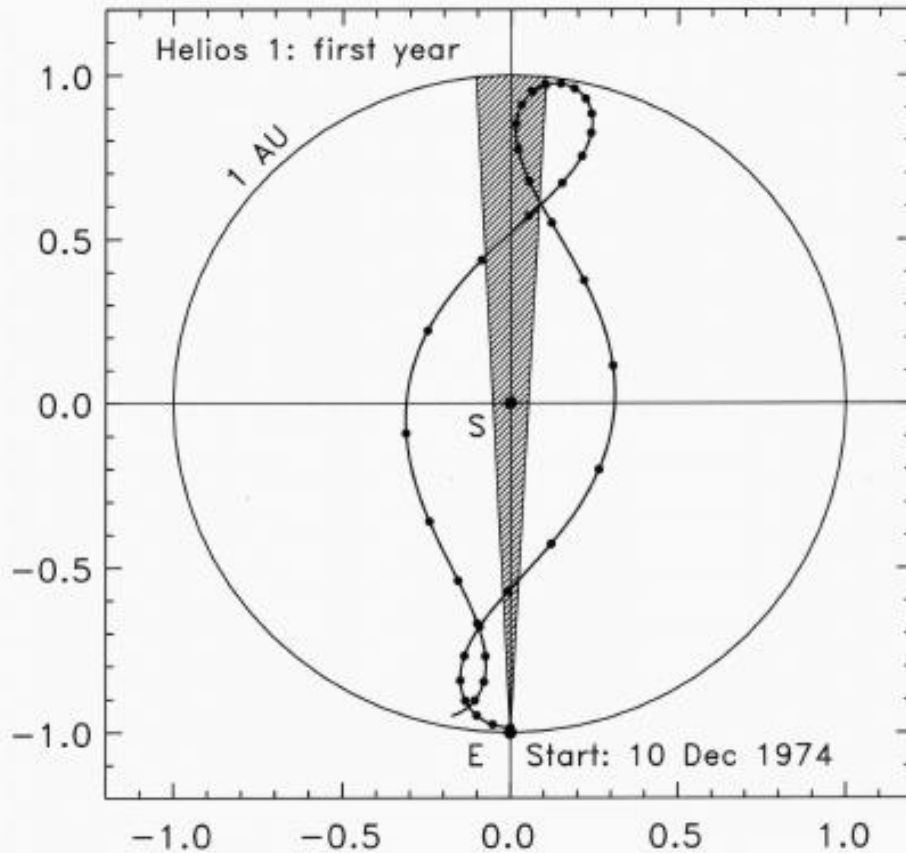
Die wichtigsten:

- E1 (Plasmaexperiment),
Max-Planck-Institut Katlenburg-Lindau,**
- E2 (Magnetfeldexperiment),
Institut f. Geophysik u. Meteorologie, TU Braunschweig**

Bahnen von HELIOS – 1 und HELIOS – 2



HELIOS – 1 : Bahndarstellung (Bezugssystem: Verbindungslinie Erde/Sonne fest)



Projektplanung der ESA / NASA zur Sonnenwinderforschung

Ekliptikebene: HELIOS 1 und HELIOS 2

Senkrecht zur Ekliptik: ISPM 1 und ISPM 2

ISPM = „International Solar Polar Mission“

Planung: Mit Auslaufen des HELIOS-Projekts sollte das ISPM-Projekt gestartet werden, um nahtlos die Erforschung fortzusetzen

ABER:

Anfang 80er Jahre wurden durch Ronald Reagans Politik (Krieg der Sterne) der NASA Finanzmittel entzogen, sodass die amerikanische Sonde nicht gebaut werden durfte und NASA sich aus dem Projekt zurückziehen musste -> Ende von ISPM.

ULYSSES : ESA-Nachfolgeprojekt zur Sonnenwinderforschung senkrecht zur Ekliptik



Missionsübersicht:

- 6.10.1990** Start vom Space Shuttle Discovery
- 8.2.1992** Vorbeiflug an Jupiter in Entfernung von 450.000 km, Ablenkung in polare Sonnenumlaufbahn

Perihel: 1,4 AU, Aphel: 5,4 AU

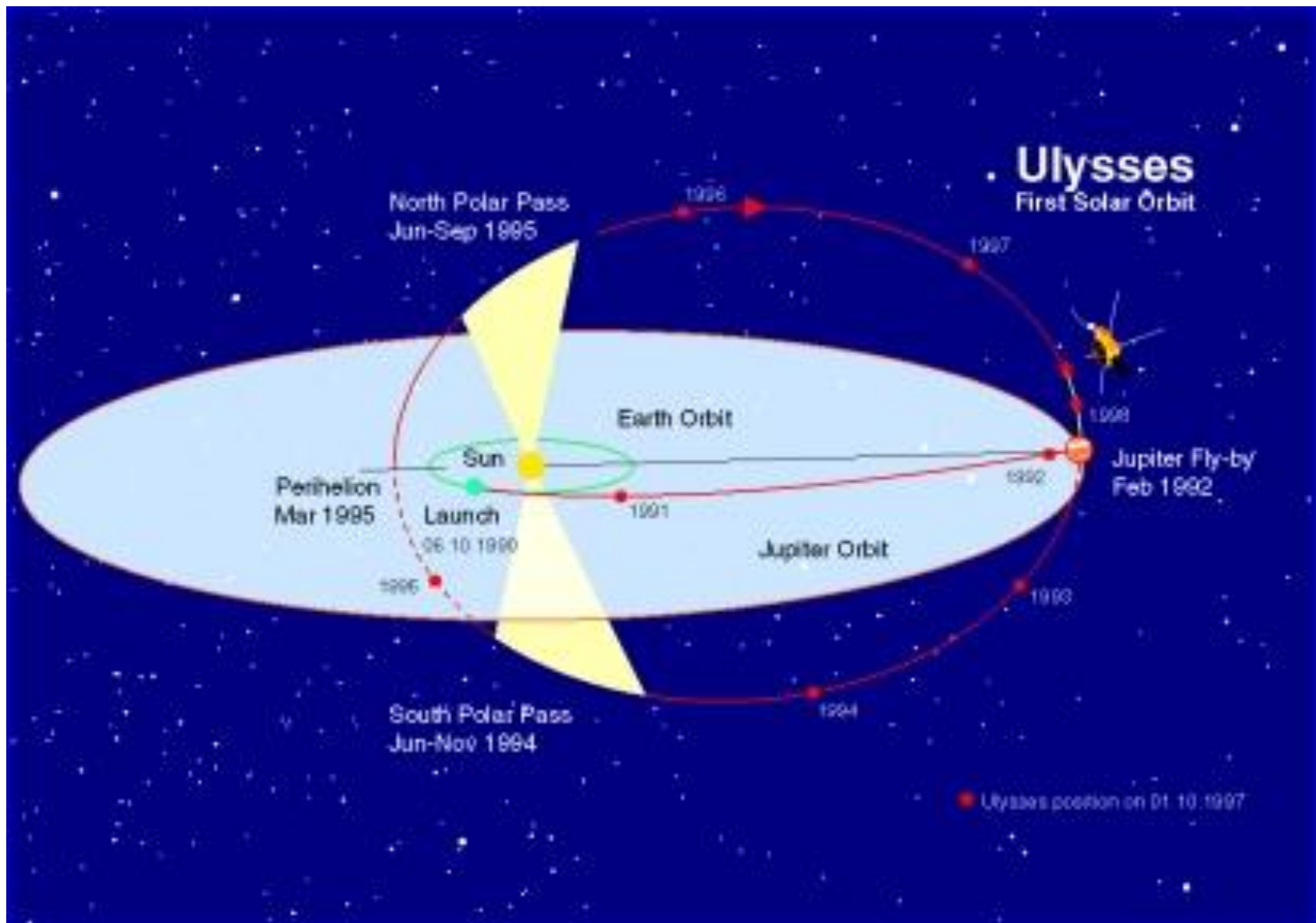
Umlaufszeit: 6,2 Jahre

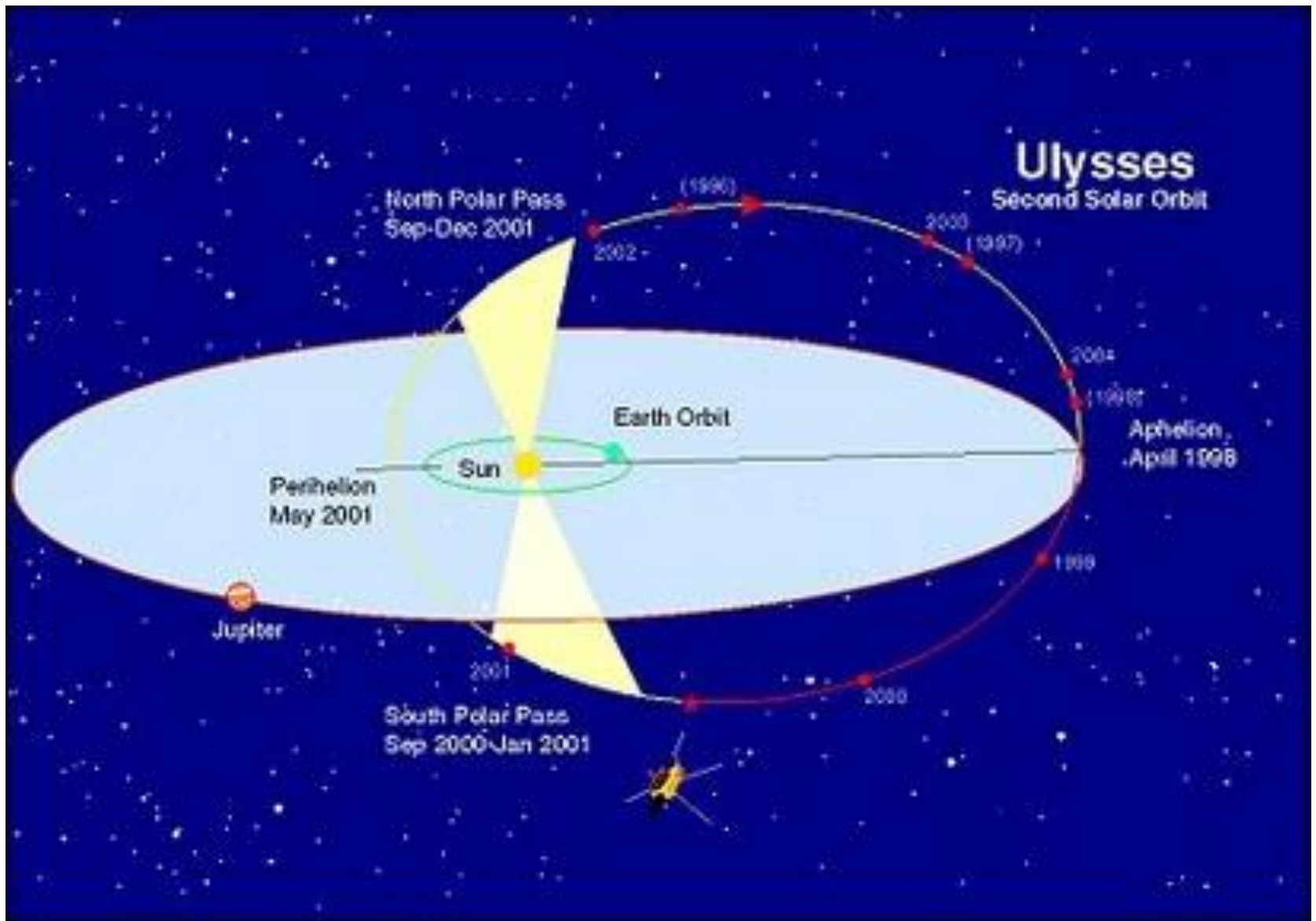
1992 – 1998 : 1. Umlauf um die Sonne (Perihel: 1,35 AU)

1998 – 2003 : 2. Umlauf

2003 – 2009 : 3. Umlauf (zu ca. $\frac{3}{4}$ vollzogen)

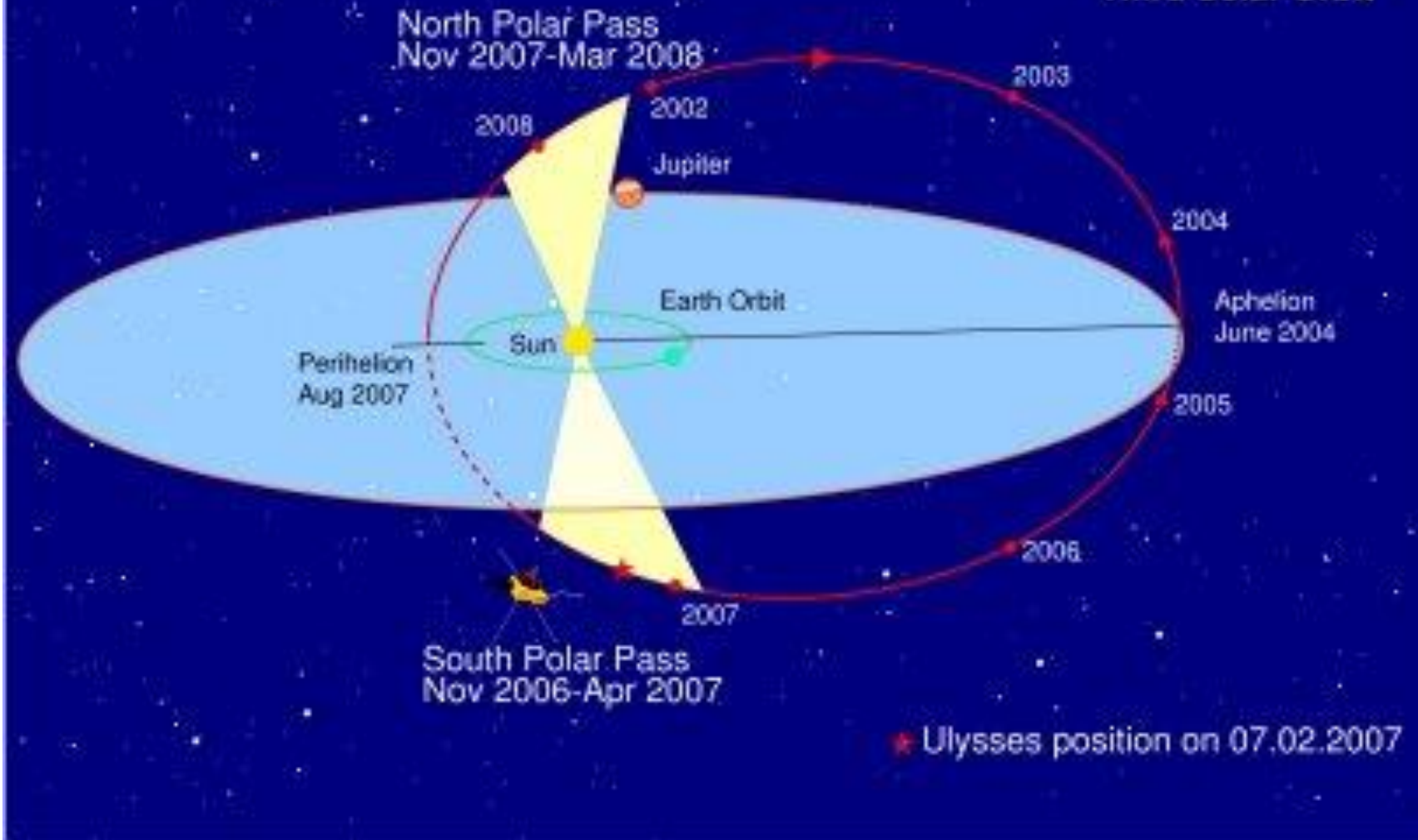
29.6.2009 : Missionsende (Abschaltung wg. Treibstoffmangel)



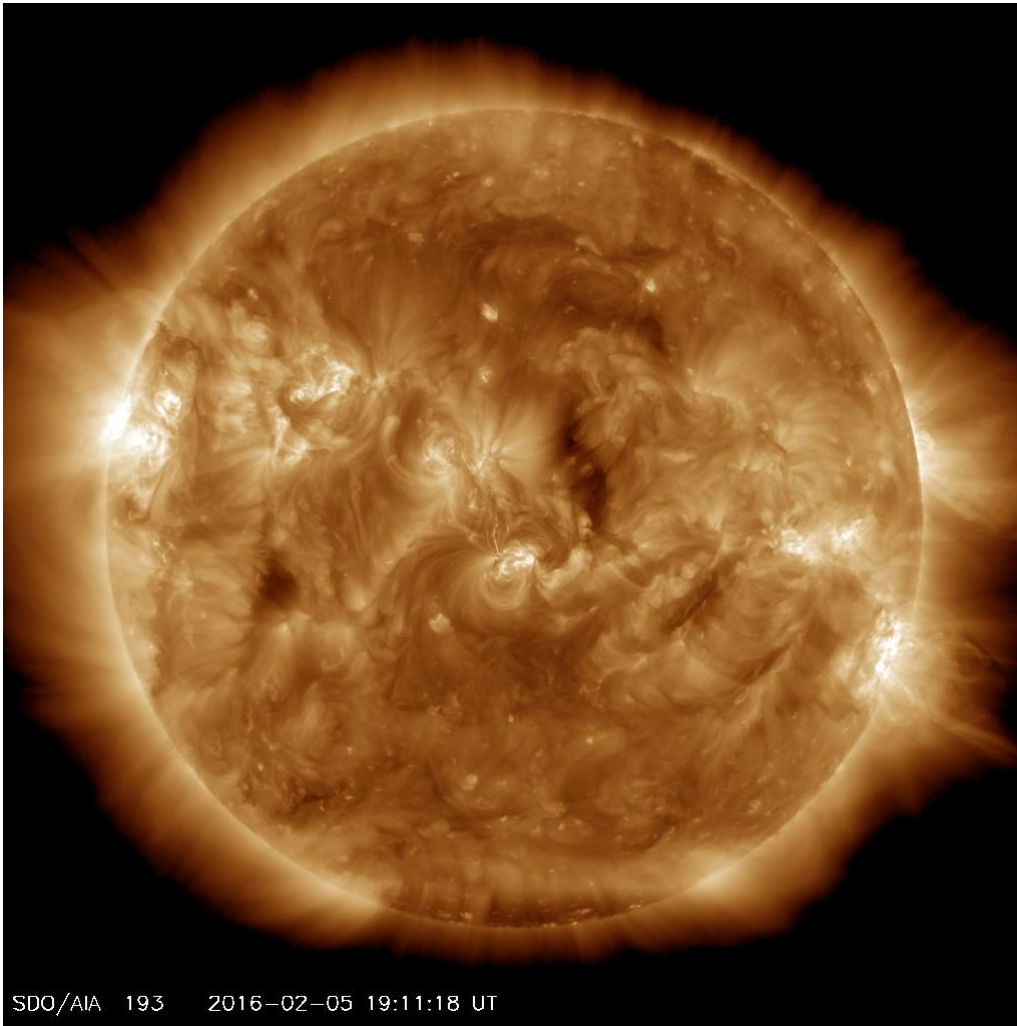


Ulysses

Third Solar Orbit



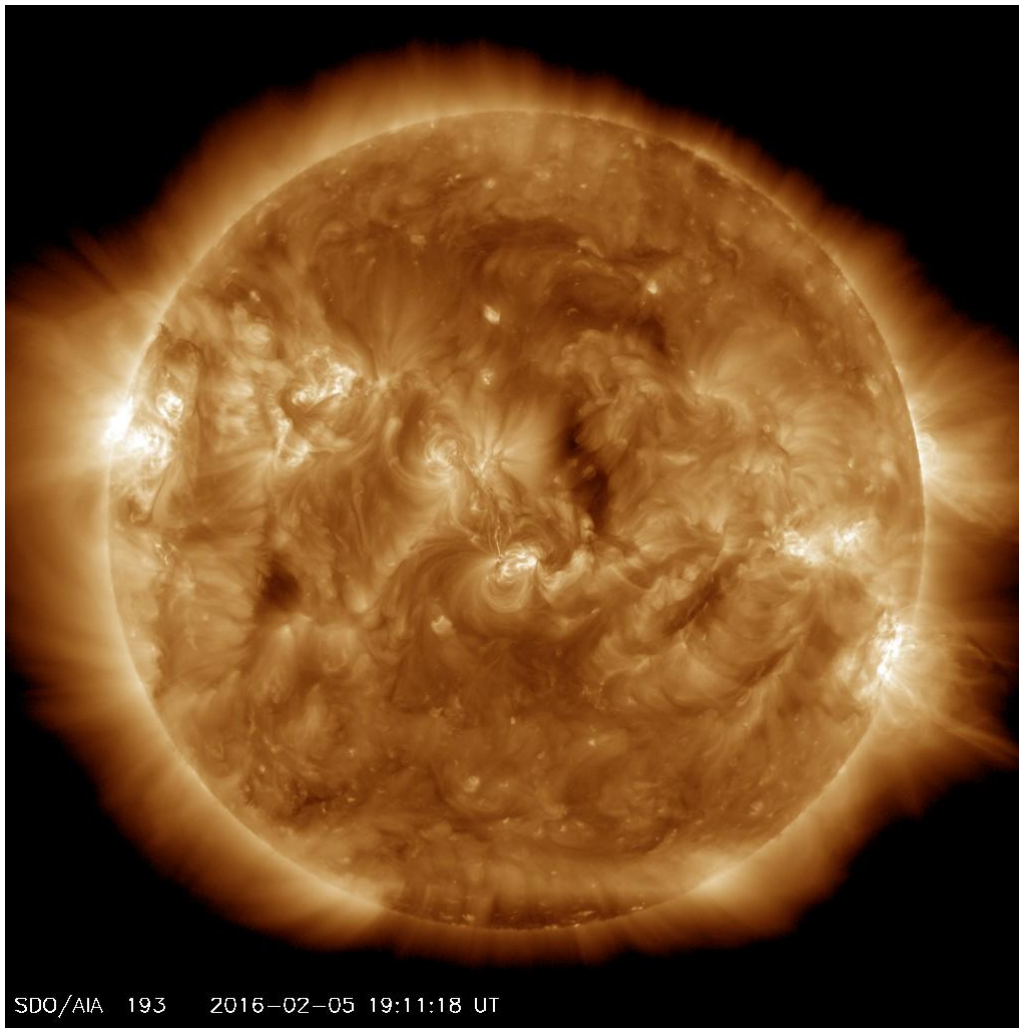
Unsere Sonne



**Masse: 2×10^{30} kg
oder 2×10^{27} t**

**Chemische
Zusammensetzung
Photosphäre:**

Wasserstoff	73,46 %
Helium	24,85 %
Sauerstoff	0,77 %
Kohlenstoff	0,29 %
Eisen	0,16 %



Unsere Sonne

**Masse: 2×10^{30} kg
oder 2×10^{27} t**

**Massenverlust pro
Sekunde: 5×10^6 t**

**- durch Kernfusion:
 4×10^6 t
(Umsetzung in
Strahlungsenergie)**

**- durch Sonnenwind:
 1×10^6 t
(Abtransport)**

Sonnenwind : Übersicht

- ist ein Plasma (ionisiertes Gas) bestehend aus 95% Protonen (ionisierter Wasserstoff) und Elektronen, ca 4 % Helium-Ionen, Rest andere Elemente
- ist die kontinuierliche Expansion von Sonnengas in die Heliosphäre
- wird angetrieben durch die riesige Druckdifferenz von über 10 Größenordnungen zwischen Sonnenkorona (Dichte ca. 10^8 cm^{-3}) und interstellarem Raum (Dichte ca. $0,1 \text{ cm}^{-3}$)
- hat eine Reichweite bis ca. 100 AU (Heliopause, Grenze zum interstellaren Gas), vermutete Grenze
- Dichte nimmt bei konstanter Windgeschwindigkeit proportional r^{-2} ab (Massenerhaltung)

Eigenschaften des Sonnenwindplasmas bei 1 AU im Aktivitätsminimum

	langsamer Wind (< 400 km/s)	schneller Wind (> 600 km/s)
Protonengeschwindigkeit	348 km/s	667 km/s
Protonenanzahldichte n_p	10,7 cm ⁻³	3,0 cm ⁻³
Protonentemperatur	55.000 K	280.000 K
Elektronentemperatur	190.000 K	130.000 K
Häufigkeit He ²⁺ / n_p	0,025	0,036

Zum Vergleich:

Teilchenzahldichte auf der Erde (Normalbedingungen): $6 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$

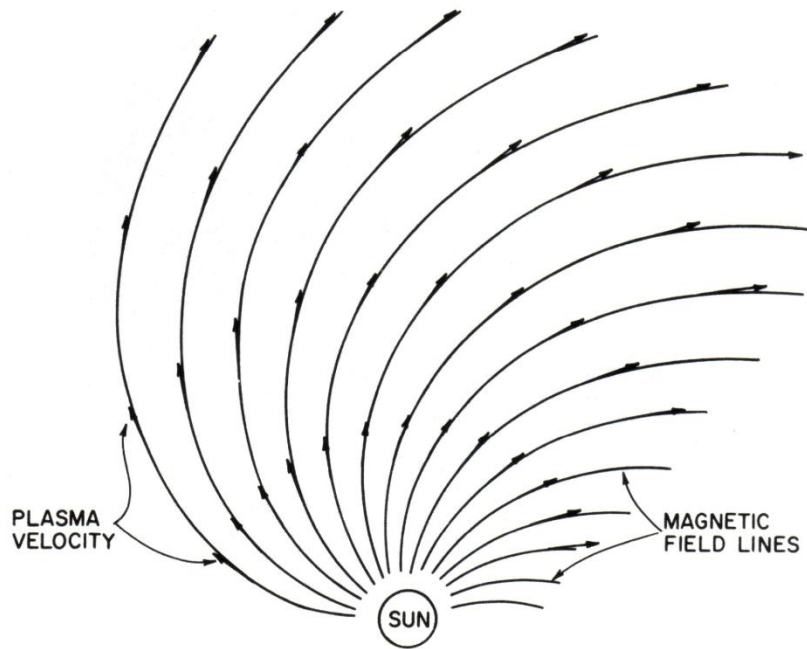
Sonnenwind und Magnetfeld

- eingebettet im Sonnenwind ist das solare Magnetfeld, es wird durch ihn „mitgerissen“ und nach außen getragen (wird damit zum interplanetaren Magnetfeld), die Magnetfeldlinien sind quasi im Plasma „eingefroren“
- durch die Sonnenrotation wird das solare Magnetfeld trotz radialer Plasmaströmung in sog. Archimedische Spiralen verbogen („Rasensprengerspirale“, „Parker-Spirale“); bei 1 AU beträgt der Winkel zur Radialen ca. 45° , in Saturnentfernung bereits über 80°
- **Größe des interplanetaren Magnetfelds**
bei 1 AU : ca. 5 nT
zum Vergleich:
in der Korona : ca. 100.000 nT
Erdmagnetfeld: ca. 50.000 nT (am Pol),
ca. 30.000 nT (am Äquator)
interstellar : 0,5 nT (vermutet)

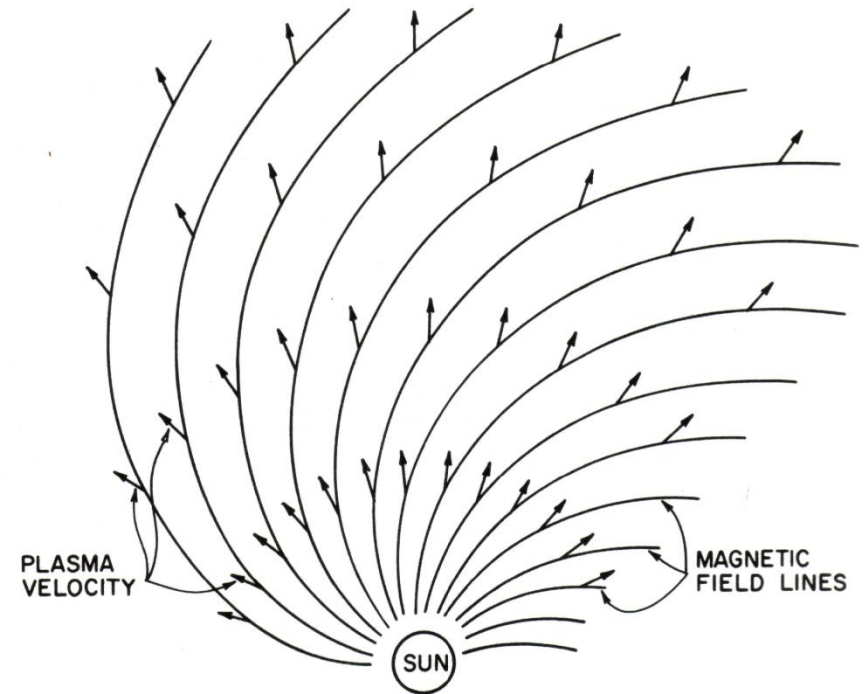
Das interplanetare Magnetfeld („Rasensprengerspirale“)

Betrachtungsweise in verschiedenen Koordinatensystemen:

korotierend



stationär

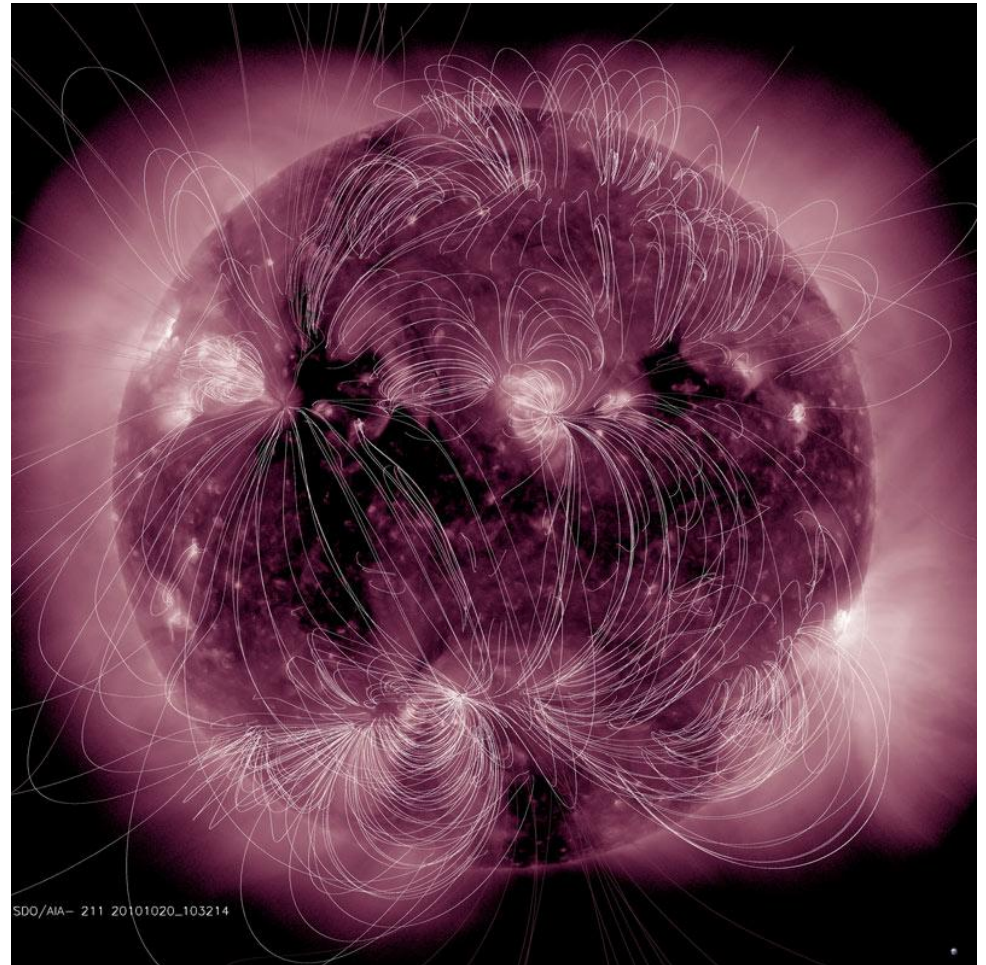
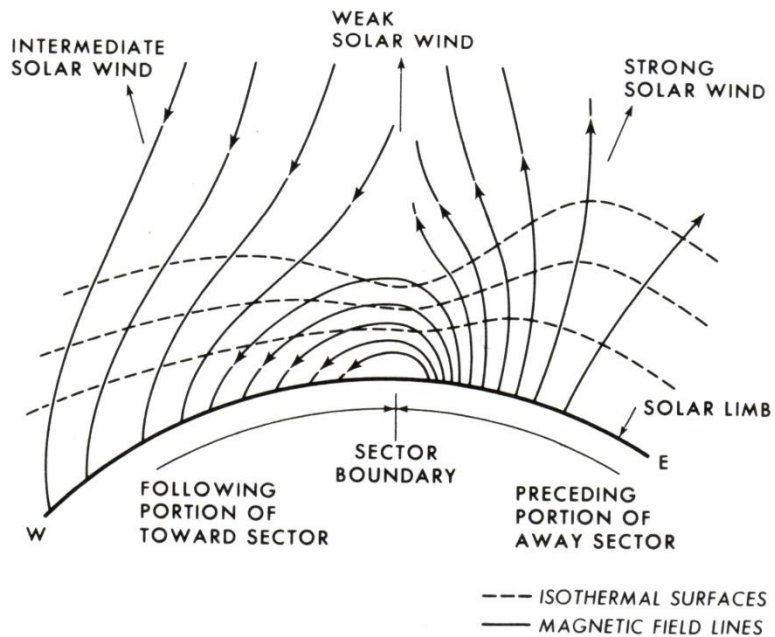


Einflüsse auf den Sonnenwind

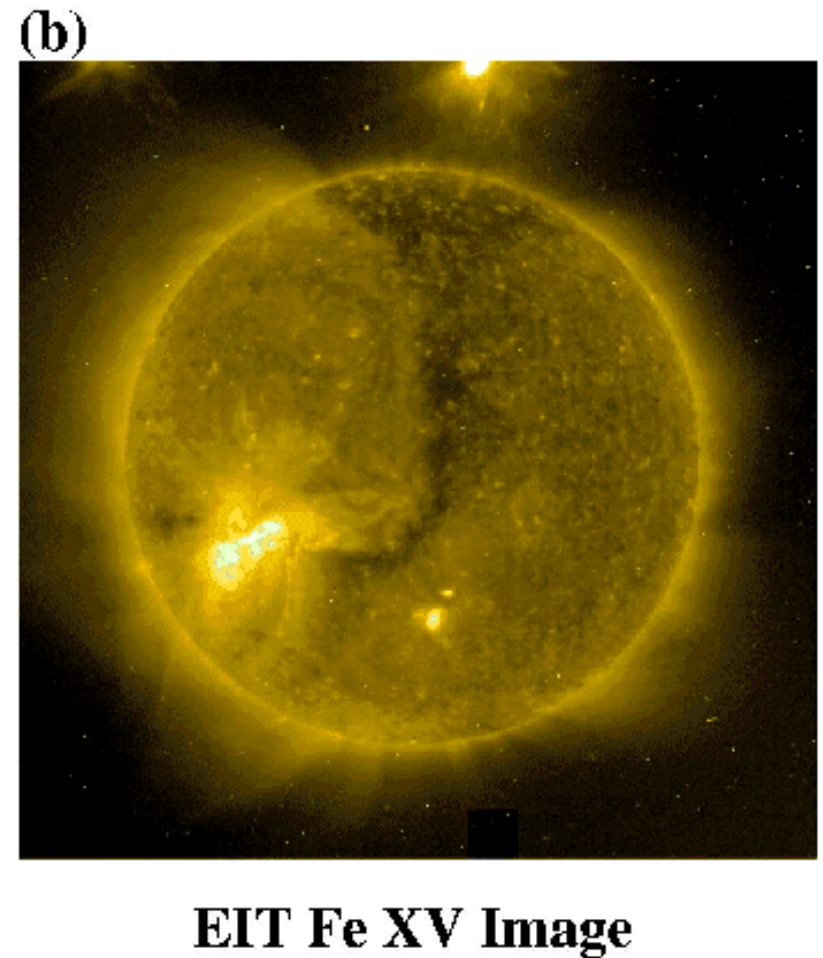
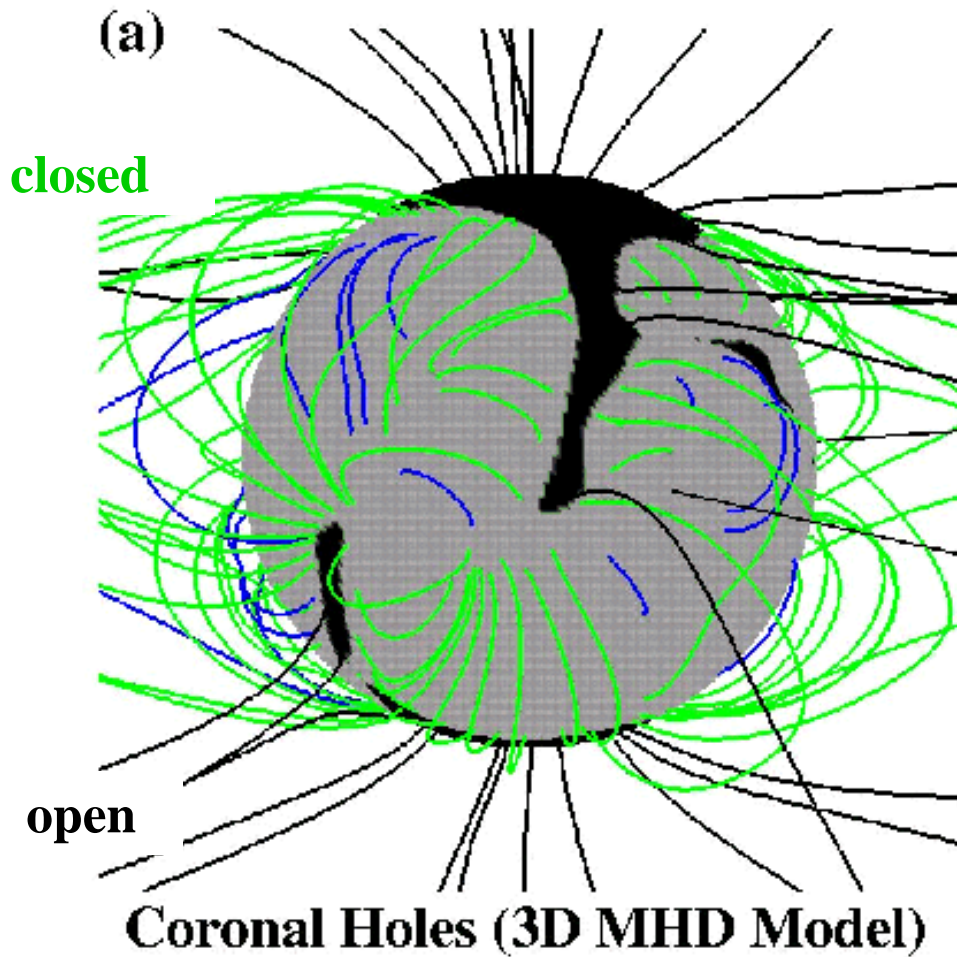
Der Sonnenwind wird maßgeblich von Vorgängen auf der Sonne beeinflusst / moduliert:

- (1) Verteilung des Magnetfeldes auf Sonnenoberfläche**
- (2) Koronale Löcher sind Quellen von lokalen Hochgeschwindigkeitsströmen („high speed streams“), die z.T. auch über einige Sonnenrotationen andauern können.**
- (3) Flares erzeugen koronale Massenauswürfe (CMEs = „coronal mass ejections“), die nicht selten von Stosswellen begleitet sind.**
- (4) Die Sonnenwindströmung (Aussehen / Verhalten) ist nicht zuletzt auch abhängig vom Sonnenfleckenzyklus.**

Einfluss des Magnetfelds der Sonnenoberfläche auf die Sonnenwindströmung

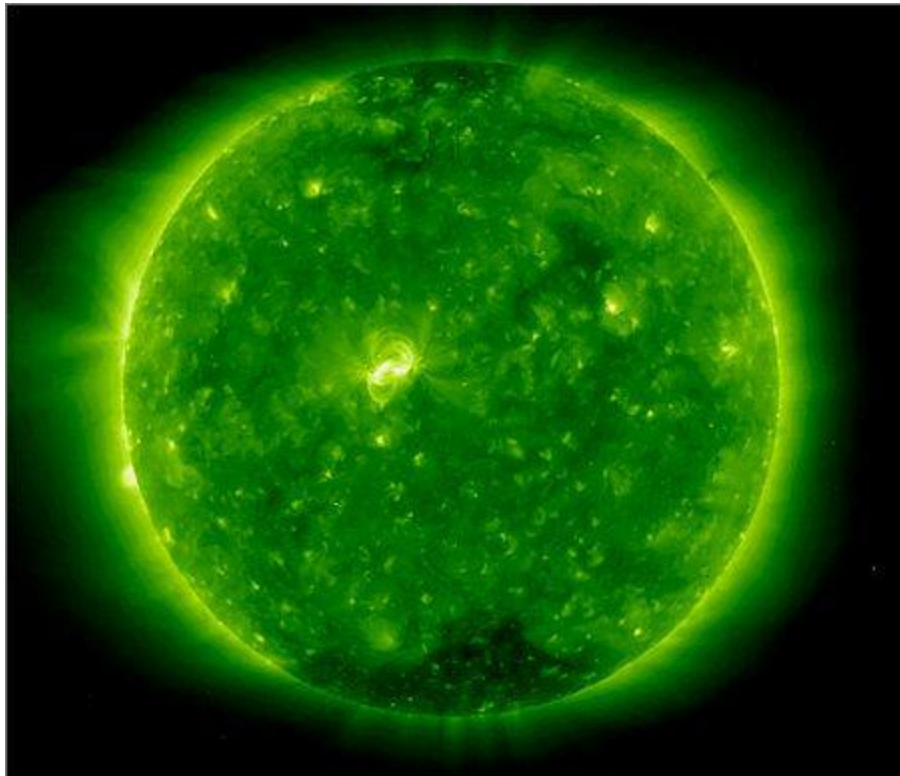


MHD-Modell: koronales Magnetfeld

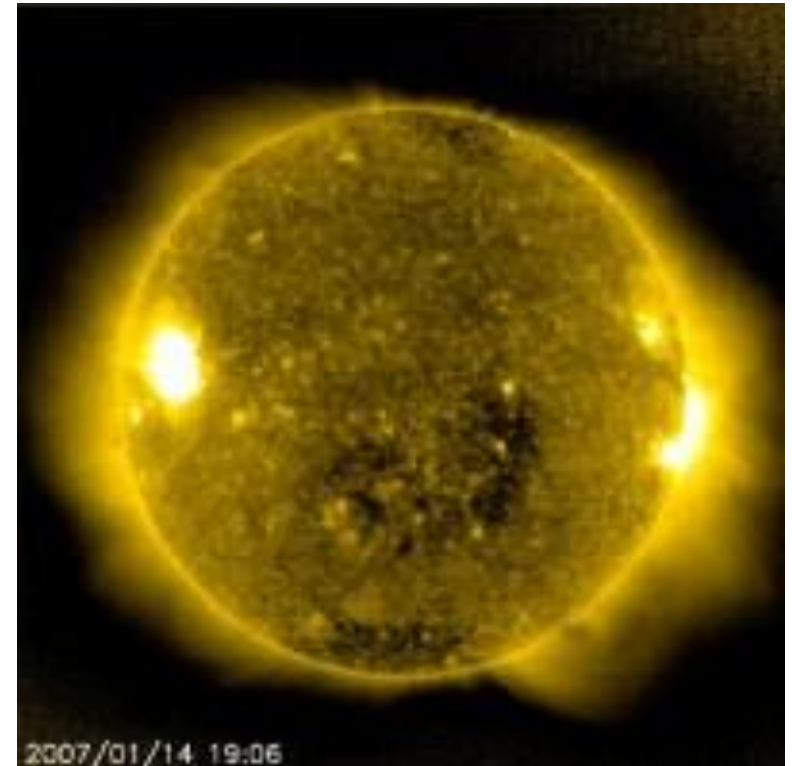


Koronale Löcher : Quellen des schnellen Sonnenwindes

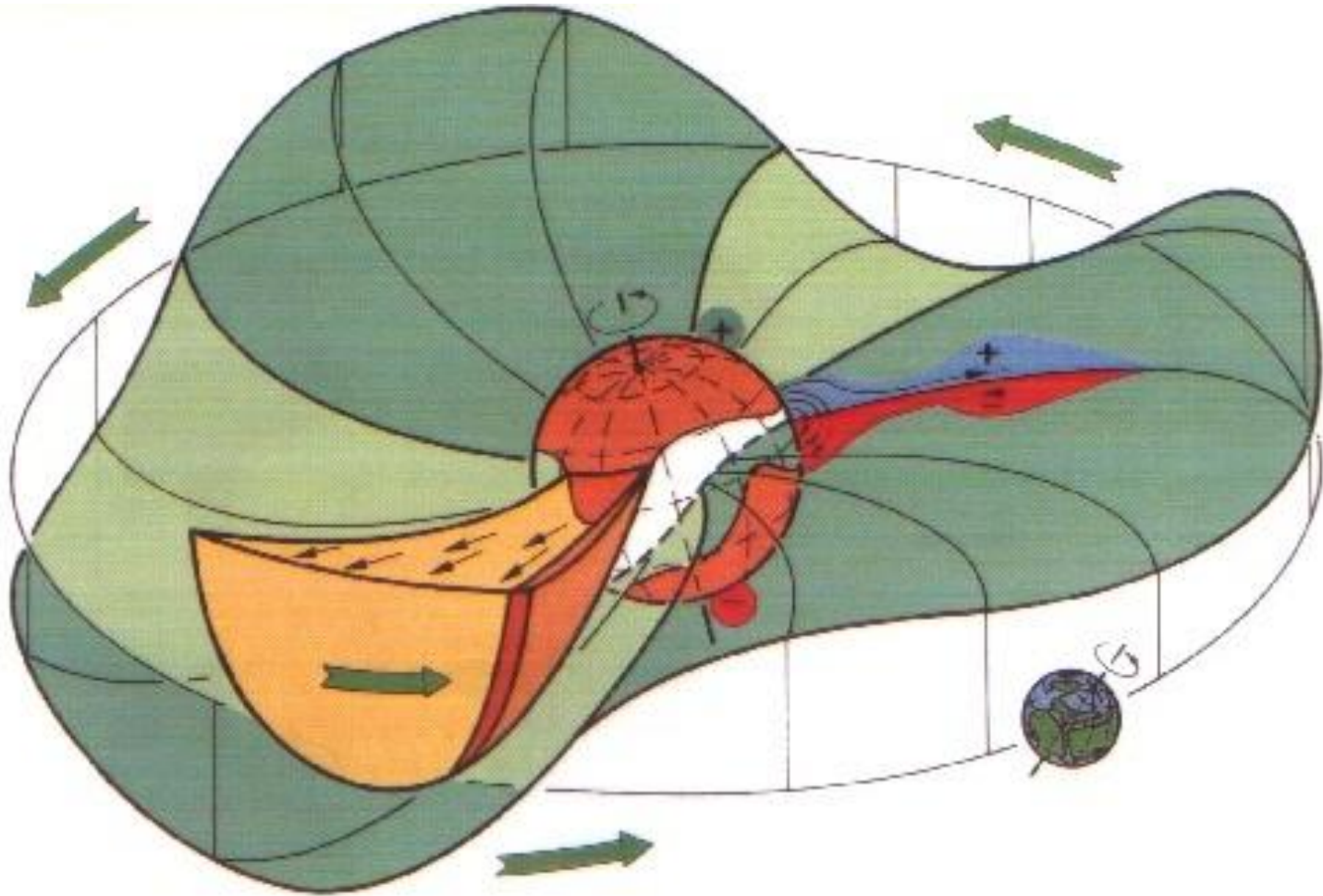
Koronale Löcher sind Regionen mit „offenen“ Magnetfeldlinien, die den radialen Abtransport des Sonnenplasmas fördern, obwohl das Gas in diesen Regionen „kühler“ ist.



PEGASUS, 16.06.2016



Ballerina-Modell der heliosphärischen Stromschicht (Sektorgrenze) (Ausdehnung des Magnetfeldes der Sonne in den interplanetaren Raum)



Erscheinungsformen im Sonnenwind: Wellen

Durch die Plasma-Magnetfeld – Kopplung gibt es zahlreiche Wellenarten und Diskontinuitätstypen im Sonnenwind, hier:

Wellen (periodische Änderungen von Zustandsparametern):

a) Schallwelle:
$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

b) „Alfvén“-Welle:
$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}}$$

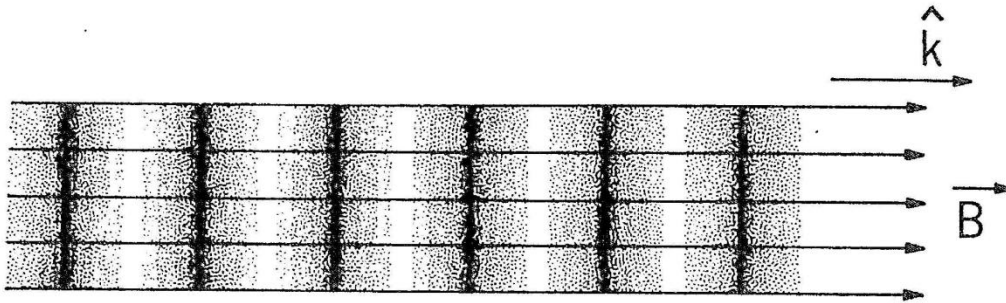
c) schnelle magnetoakustische Welle:

$$v_{\text{fast}} = \sqrt{0,5 \left(v_A^2 + c_s^2 + \sqrt{(v_A^2 + c_s^2)^2 - 4v_A^2 c_s^2 \cos^2 \theta} \right)}$$

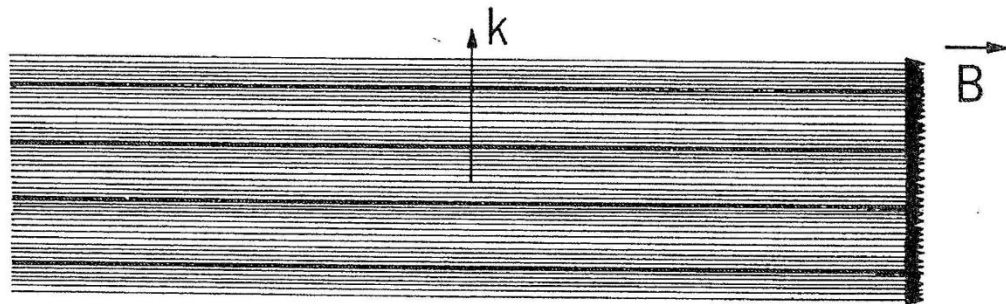
d) langsame magnetoakustische Welle:

$$v_{\text{slow}} = \sqrt{0,5 \left(v_A^2 + c_s^2 - \sqrt{(v_A^2 + c_s^2)^2 - 4v_A^2 c_s^2 \cos^2 \theta} \right)}$$

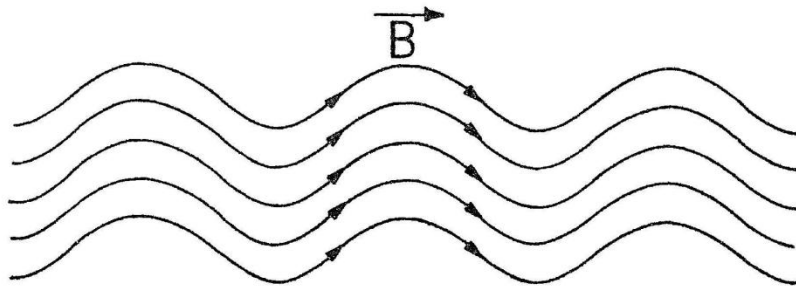
Basis-Wellenformen im kompressiblen Plasma



longitudinale akustische
Welle
(Schallwelle)

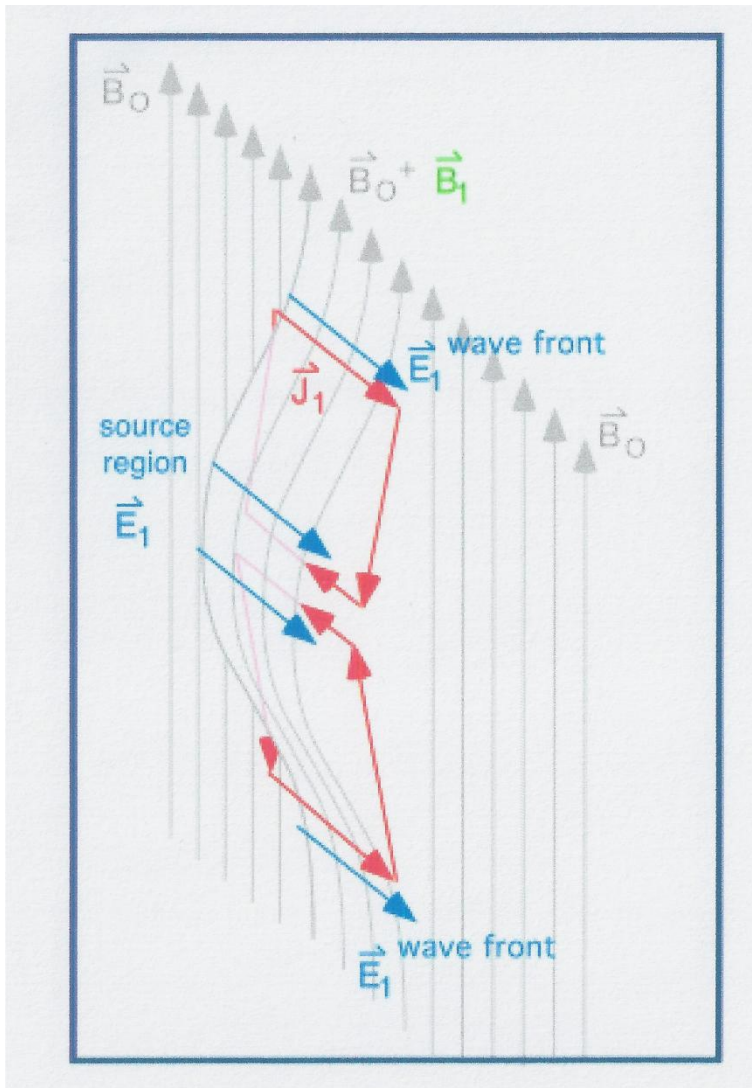


magnetoakustische
Welle



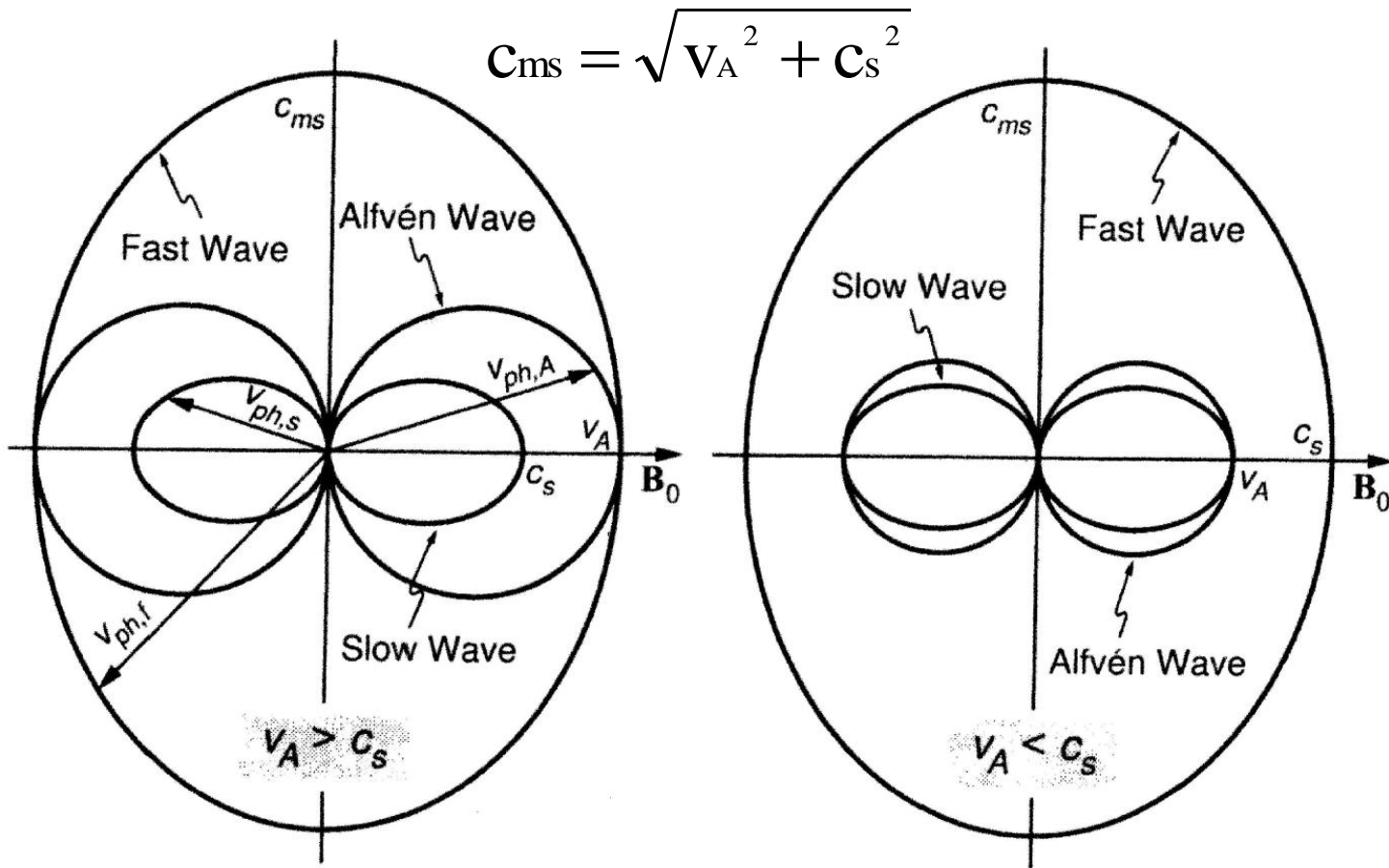
Alfvén - Welle

Einschub: Alfvén-Welle in 3D



- (1) Feldlinien sind nicht real, können daher auch nicht schwingen!
- (2) ABER: Ein veränderliches magnetisches Feld erzeugt eine elektromotorische Kraft.
- (3) Wegen der hohen Leitfähigkeit ergibt sich daraus ein Strom.
- (4) Ein Strom erzeugt ein Magnetfeld.
- (5) Geometrie (nebenstehend) derart, dass sich eine sich parallel zum Feld ausbreitende Transversalwelle ausbildet.

Phasengeschwindigkeit der Wellen relativ zum äußeren Magnetfeld bei beliebigem Winkel zum äußeren Magnetfeld



Erscheinungsformen im Sonnenwind: Diskontinuitäten

Durch die Plasma-Magnetfeld – Kopplung gibt es zahlreiche Wellenarten und Diskontinuitätstypen im Sonnenwind, hier:

Diskontinuitäten

(einmalige sprunghafte Änderungen von Zustandsparametern),

dabei ist zu unterscheiden, ob

**Typ A : KEIN Massenfluss durch die Diskontinuität stattfindet
(Diskontinuität wird mit der Strömung transportiert)**

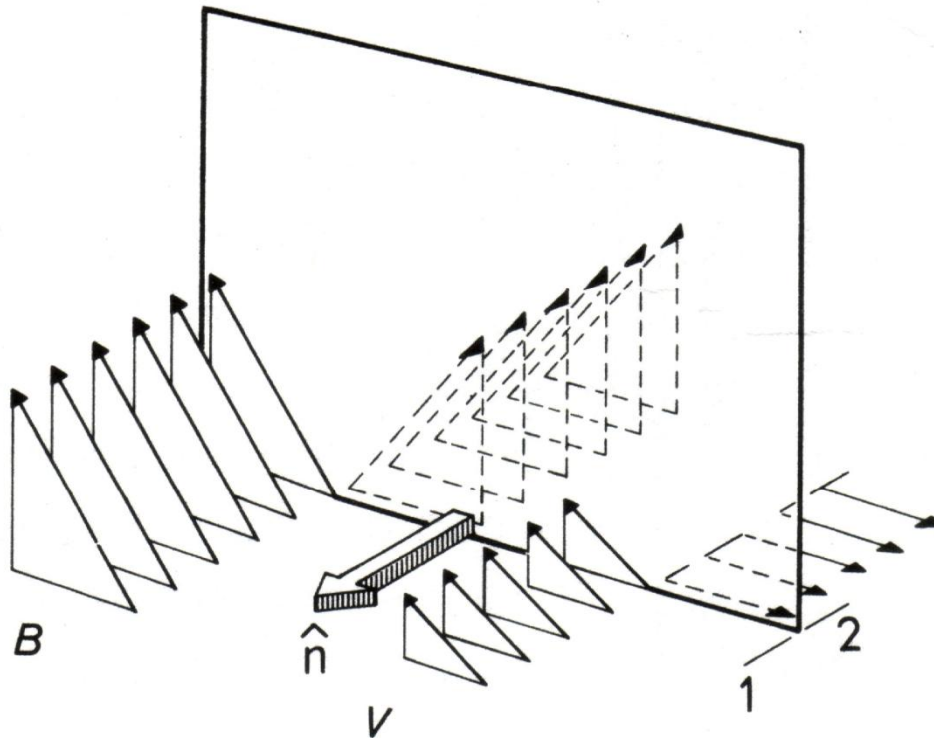
**Typ B: es erfolgt Massenfluss durch die Diskontinuität
(sie bewegt sich gegenüber der Strömung):**

a) Tangentialdiskontinuitäten (Typ A)

b) Stoßwellen zu allen möglichen Wellenarten (Typ B)

Tangentialdiskontinuität

ist die Trennfläche, die zwei Halbräume 1+2 mit unterschiedlichen Zustandsgrößen trennt mit der Randbedingung, dass der Druck p auf beiden Seiten gleich groß ist und das Magnetfeld und Geschwindigkeit keine Normalkomponenten zur Fläche haben:



$$p = nk(T_p + T_e) + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$p_1 = p_2$$

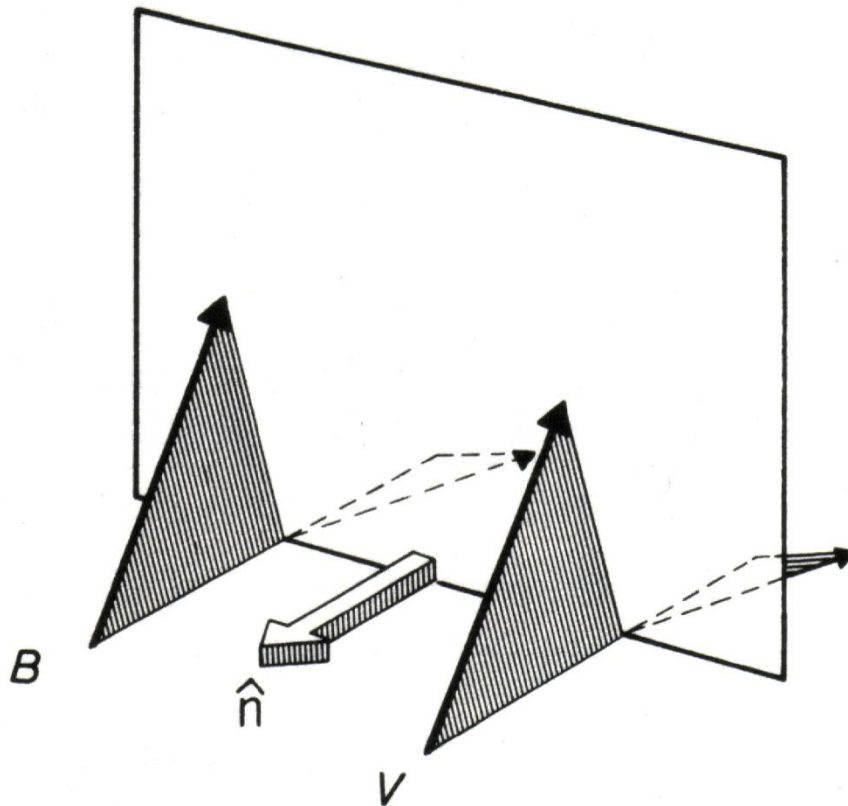
$$B_{n1} = B_{n2} = 0$$

$$V_{n1} = V_{n2} = 0$$

Magnetfelder B_1 und B_2 sind koplanar, ebenso die Geschwindigkeiten v_1 und v_2

Rotationsdiskontinuität (Alfvén-Stoßwelle)

ist die Trennfläche, die zwei Halbräume 1+2 mit unterschiedlichen Zustandsgrößen trennt mit der Randbedingung, dass der Druck p auf beiden Seiten gleich groß ist, jedoch sowohl Magnetfeld als auch Geschwindigkeit Normalkomponenten zur Fläche haben:



$$p = nk(T_p + T_e) + B^2 / 2\mu_0$$

$$p_1 = p_2 \quad (\text{keine Kompression})$$

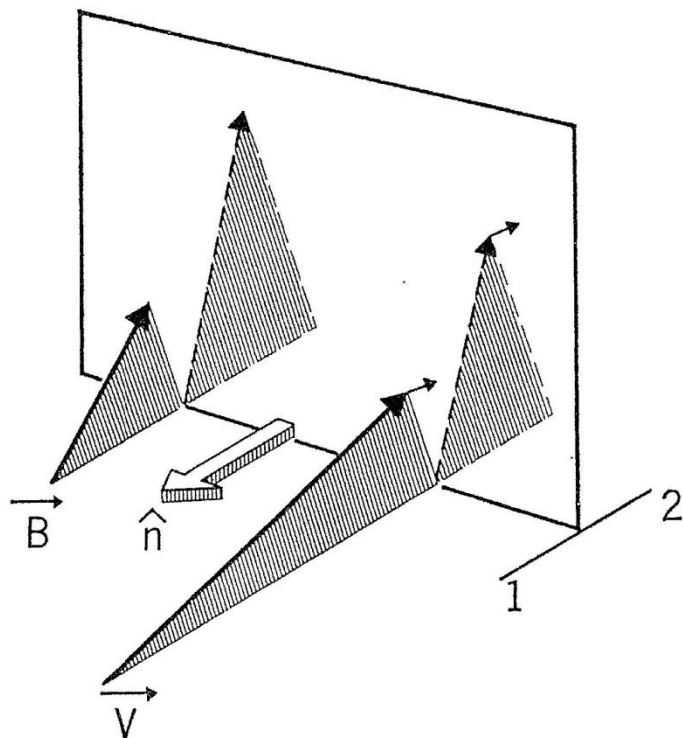
$$B_{n1} = B_{n2} \quad \text{ungleich } 0$$

$$V_{n1} = V_{n2} \quad \text{ungleich } 0$$

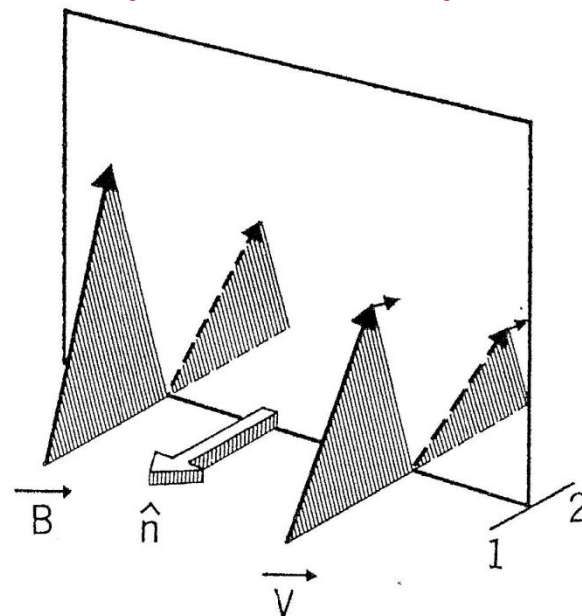
Ausbreitungsgeschwindigkeit = v_A
und Magnetfelder B_1 und B_2 sind nicht koplanar

Schnelle und langsame magnetoakustische Stoßwellen

schnelle Stoßwelle
(„fast shock“)



langsame Stoßwelle
(„slow shock“)



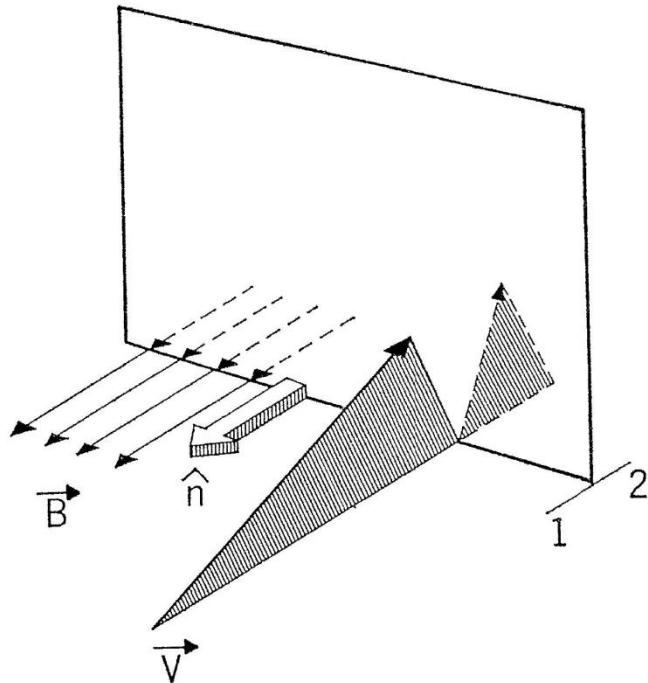
$B_1 < B_2, v_{n1} > v_{n2}, v_{n1} > c_{f1}, v_{n2} < c_{f2}$
super-alfvenisch auf beiden Seiten

$B_1 > B_2, v_{n1} > v_{n2}, v_{n1} > c_{s1}, v_{n2} < c_{s2}$
sub-alfvenisch auf beiden Seiten

Dichte und Temperatur nehmen hinter der Stoßwelle zu, B_1 und B_2 sowie v_1 und v_2 sind koplanar

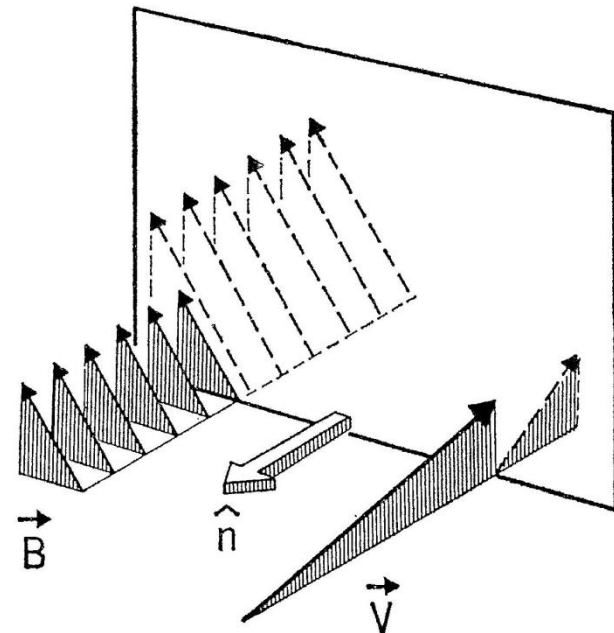
Sonderfälle: Parallel- und Senkrechtstoßwellen (bezüglich des äußeren Magnetfelds)

paralleler Fall



theoretischer Fall, bisher nicht beobachtet; Verhalten abhängig von v_A und c_s zueinander

senkrechter Fall



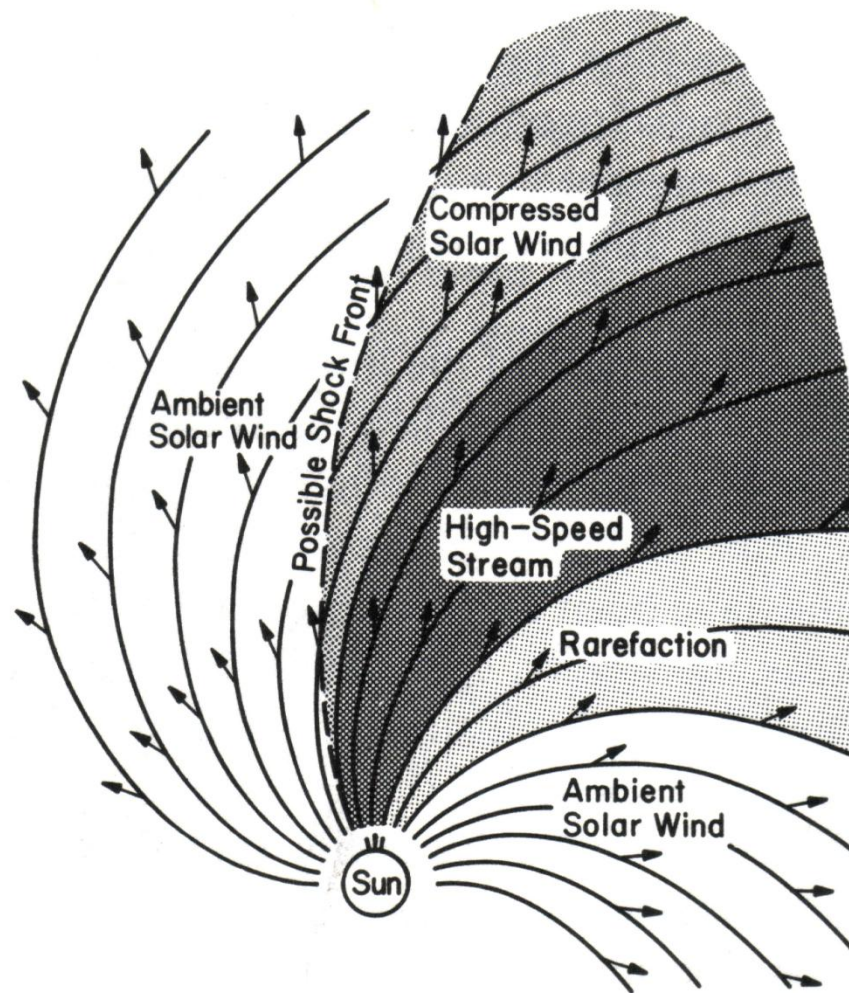
keine Richtungsänderung von B ,
 $B_1 / B_2 = n_1 / n_2$

Großskalige Erscheinungsformen im Sonnenwind

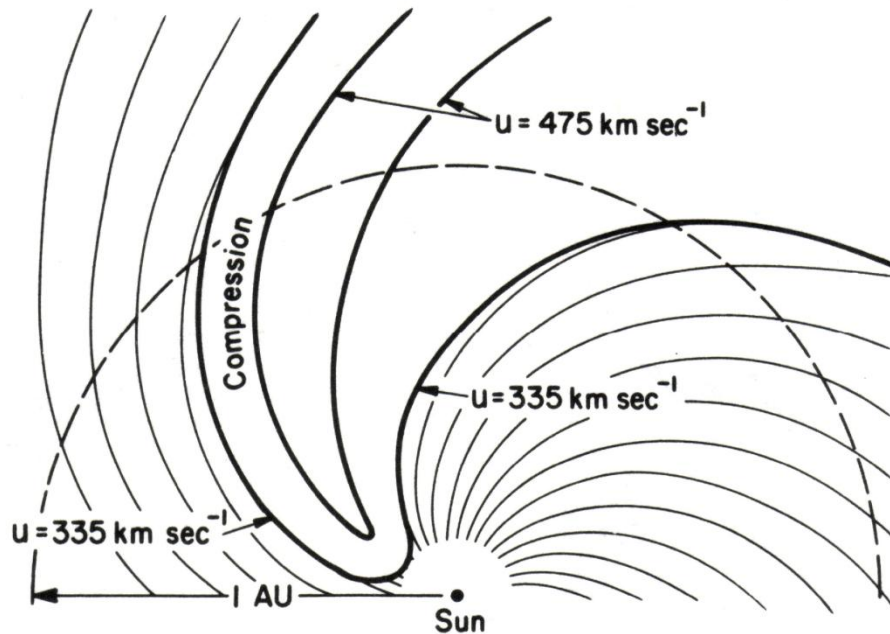
Eingebettet in der „ungestörten“ Sonnenwindströmung sind:

- a) Hochgeschwindigkeitsströme
- b) Stromschichten (Sektorgrenzen)
- c) korotierende Stoßwellen
- d) Flare-erzeugte Stoßwellen
- e) Alfvén-Stoßwellen (Rotationsdiskontinuitäten)
- f) Tangentialdiskontinuitäten
- g) magnetische Blasen (Regionen mit geschlossenen Magnetfeldlinien)

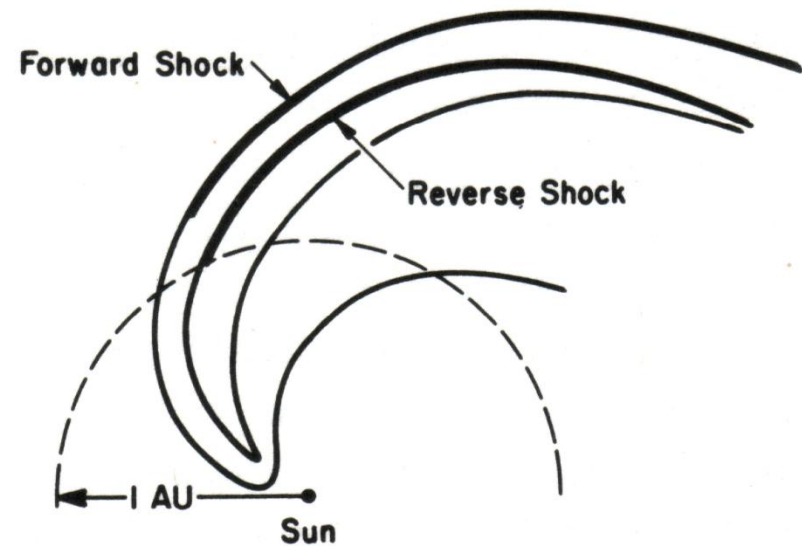
Schematische Darstellung eines Hochgeschwindigkeitsstroms („high speed stream“)



Bildung korotierender Stoßwellen bei Hochgeschwindigkeitsströmen jenseits 1 AU



in der Nähe von 1 AU



jenseits 1 AU

Stosswellenmodell: „Schneeschieber“



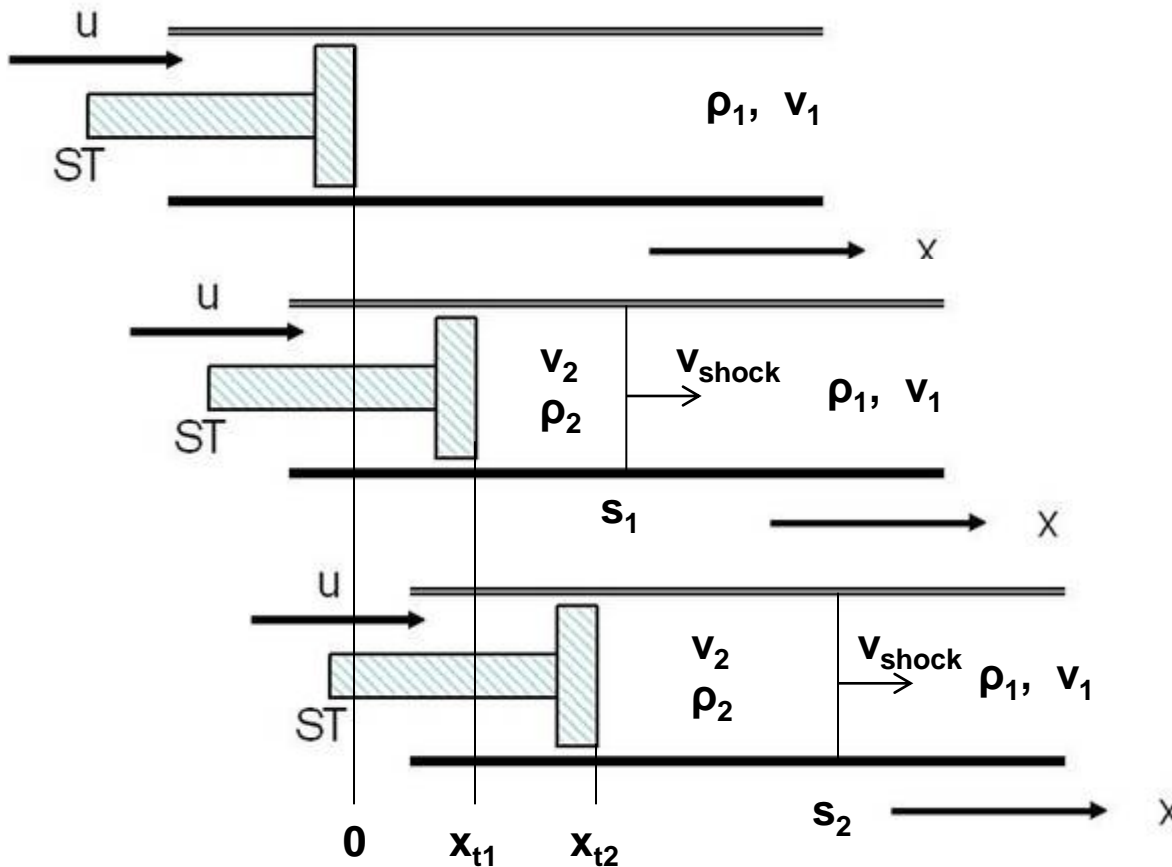
„Rentner beim Schneeräumen“

Beobachtung beim Räumen eines beschneiten Weges mit einem geraden Schieber:

Wird der Schneeschieber kontinuierlich nach vorn bewegt, sammelt sich vor ihm immer mehr Schnee an, der mit gleicher Geschwindigkeit wie der Schieber bewegt wird.

Abstand zwischen Schneeschieber und ungestörter Schneefläche nimmt zu: Diese Grenzlinie ist analog einer „kolbengetriebenen Stoßwelle“.

Modell: Stosswellenrohr



$t = 0, \rho = \rho_1, v_1 = 0$
 $u = 0,$
 $t > 0: u = u$

$t = t_1, \rho = \rho_1, v_1 = 0$
 $v_s > v_2 = u, \rho_2 > \rho_1$
 $d_1 = s_1 - x_{t1}$

$t = t_2, \rho = \rho_1, v_1 = 0$
 $v_s > v_2 = u, \rho_2 > \rho_1$
 $d_2 = s_2 - x_{t2}, d_2 > d_1$

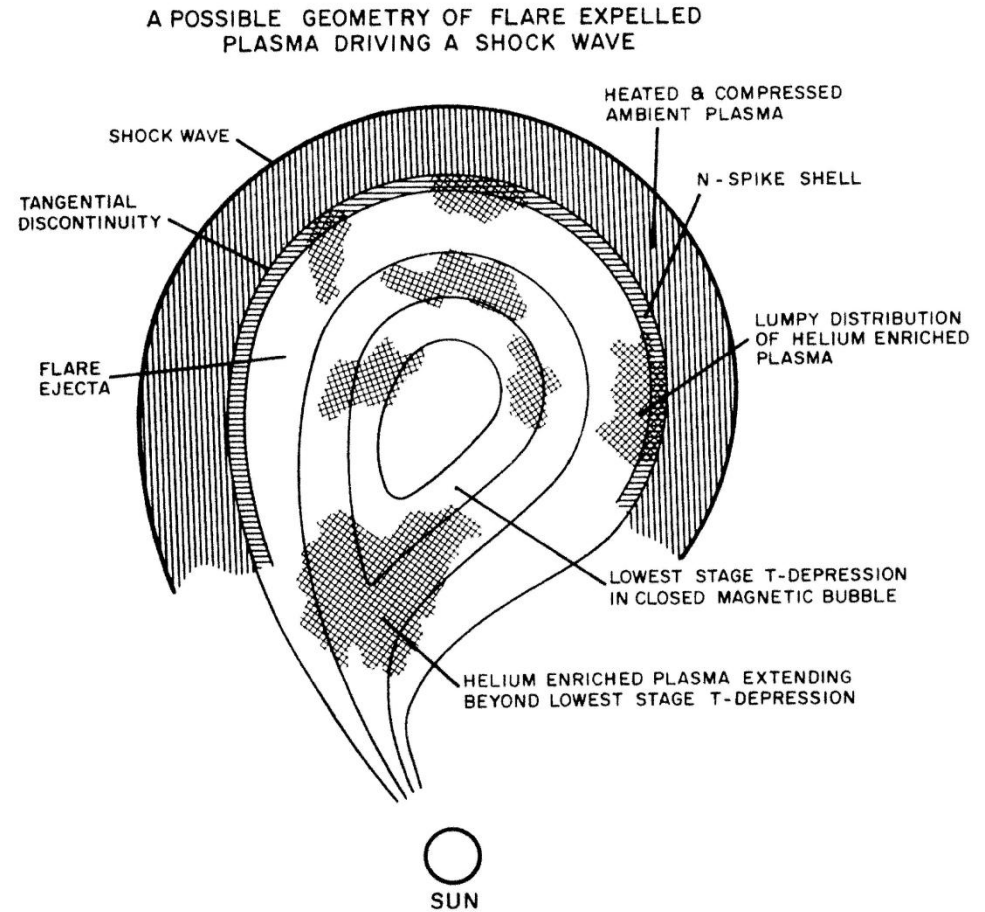
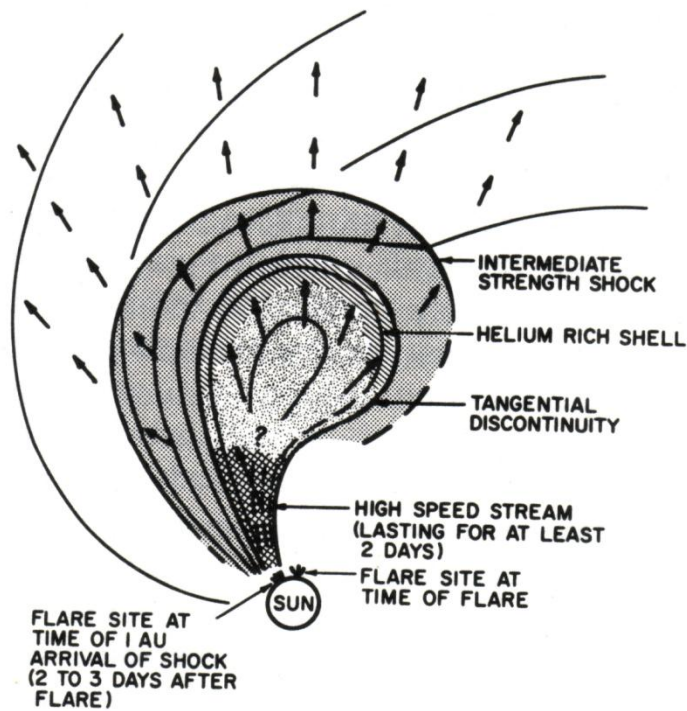
allgemein:

$$v_{\text{shock}} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 - \rho_1}$$

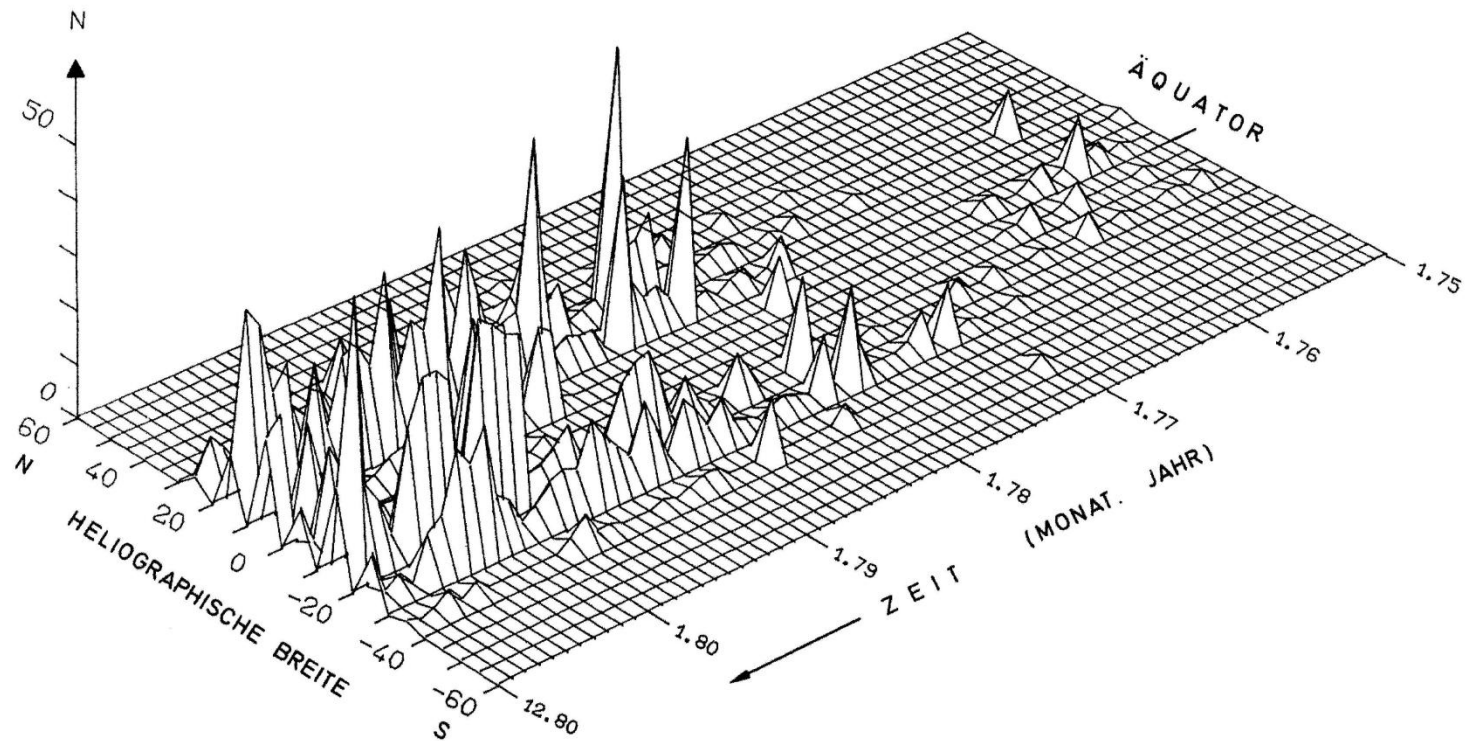
hier:

$$v_{\text{shock}} = \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} u$$

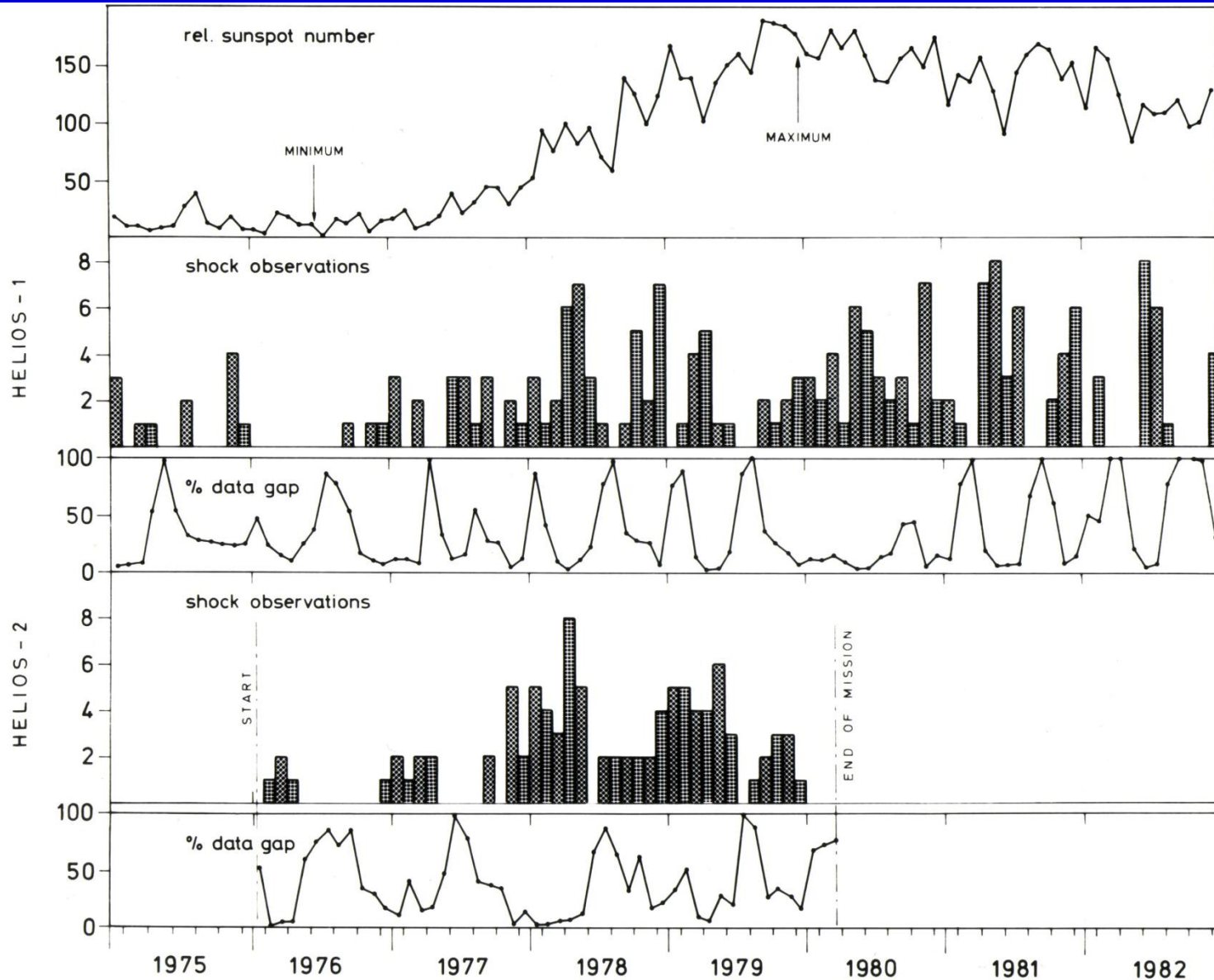
Ausbreitungsmodell einer Flare-erzeugten Stoßwelle im Sonnenwind



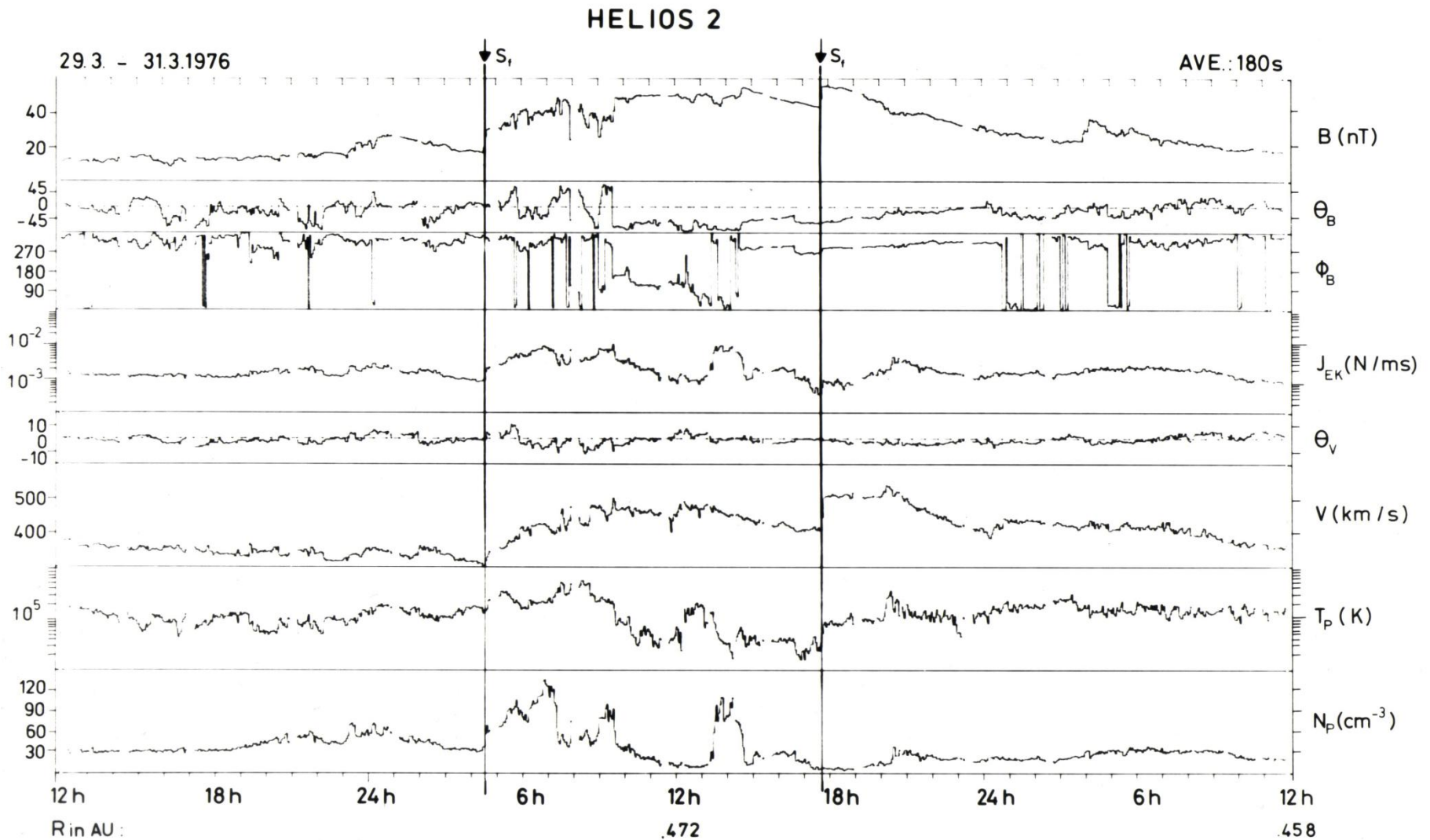
Flares auf der Sonne von Januar 1975 bis Dezember 1980



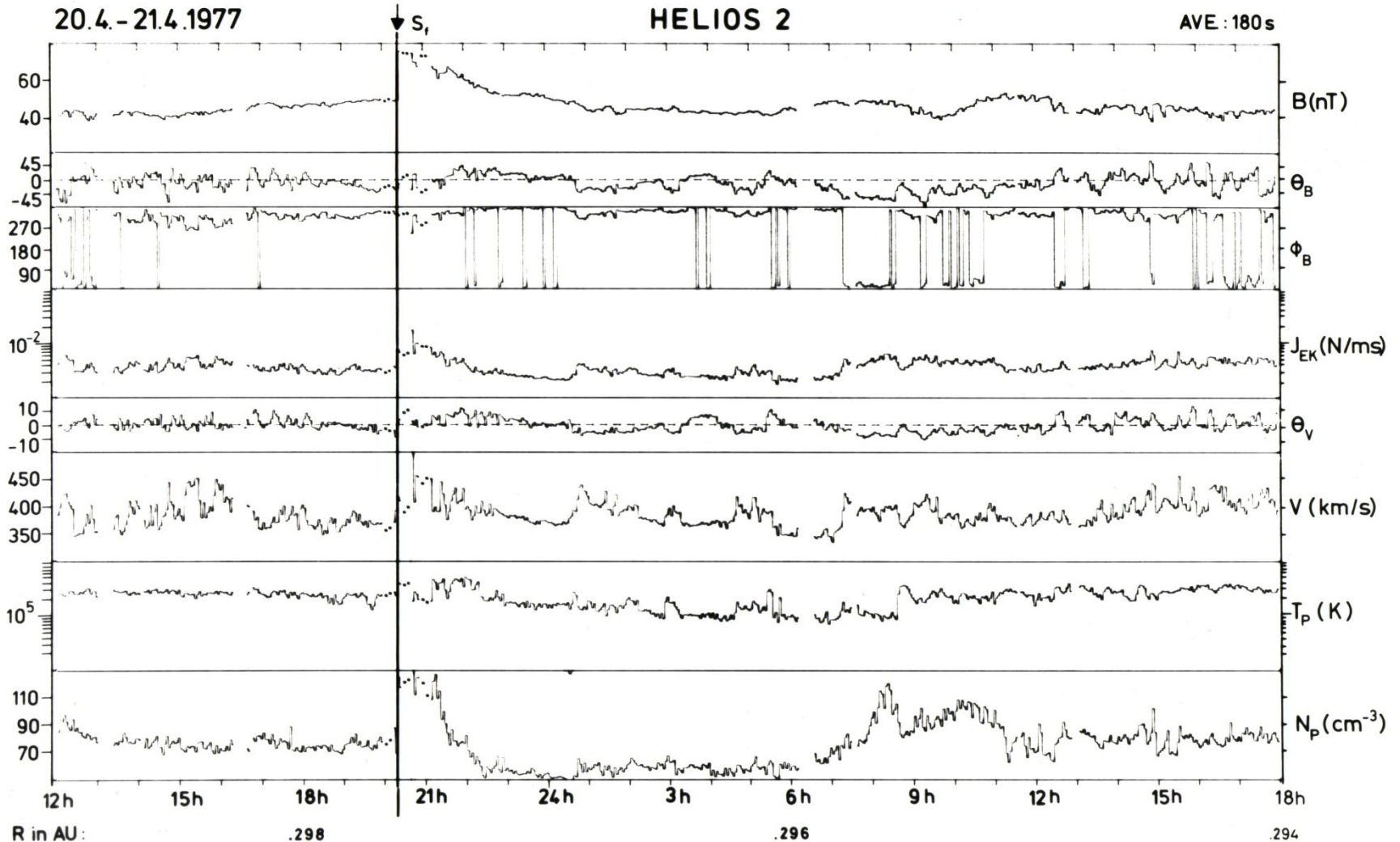
HELIOS - Stoßwellenbeobachtungen im Sonnenzyklus



HELIOS – 2 : Beobachtung zweier schneller Stoßwellen

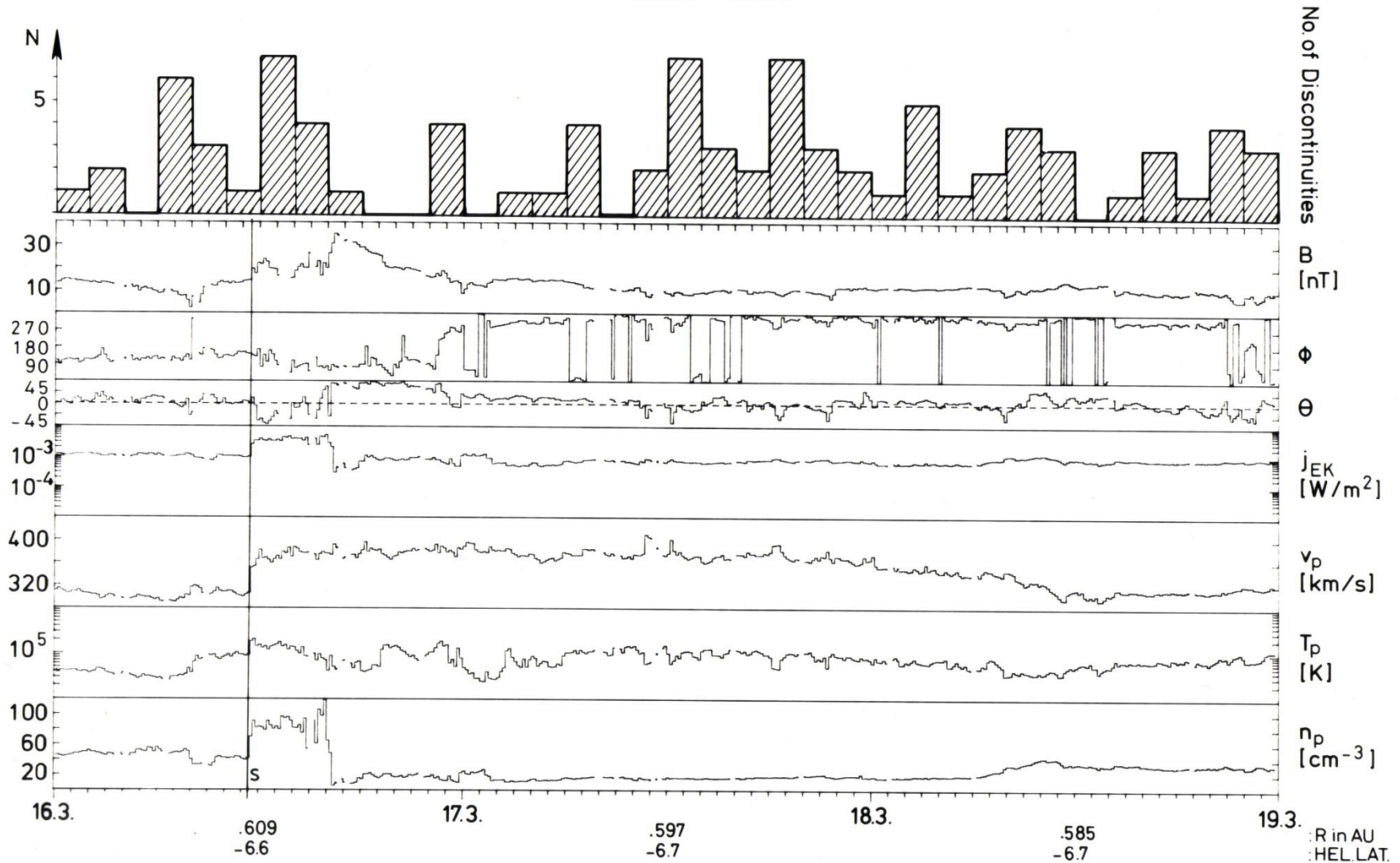


HELIOS – 2: Stoßwellenbeobachtung bei $r = 0,298$ AU



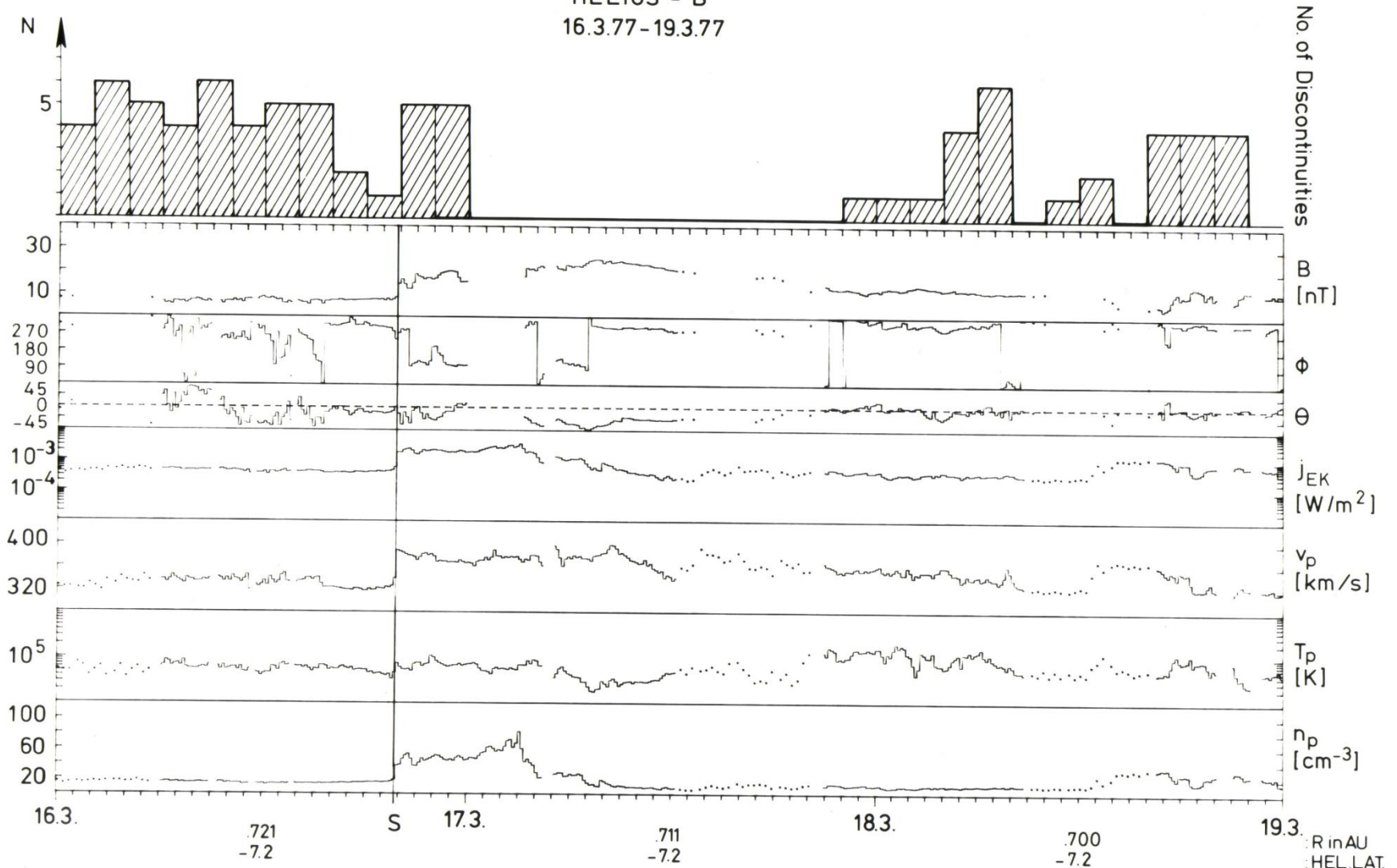
HELIOS - 1 : schnelle Stoßwelle bei $r = 0,609$ AU

HELIOS-A
16.3.77 - 19.3.77



HELIOS - 2 : schnelle Stoßwelle bei r = 0,72 AU

HELIOS - B
16.3.77-19.3.77



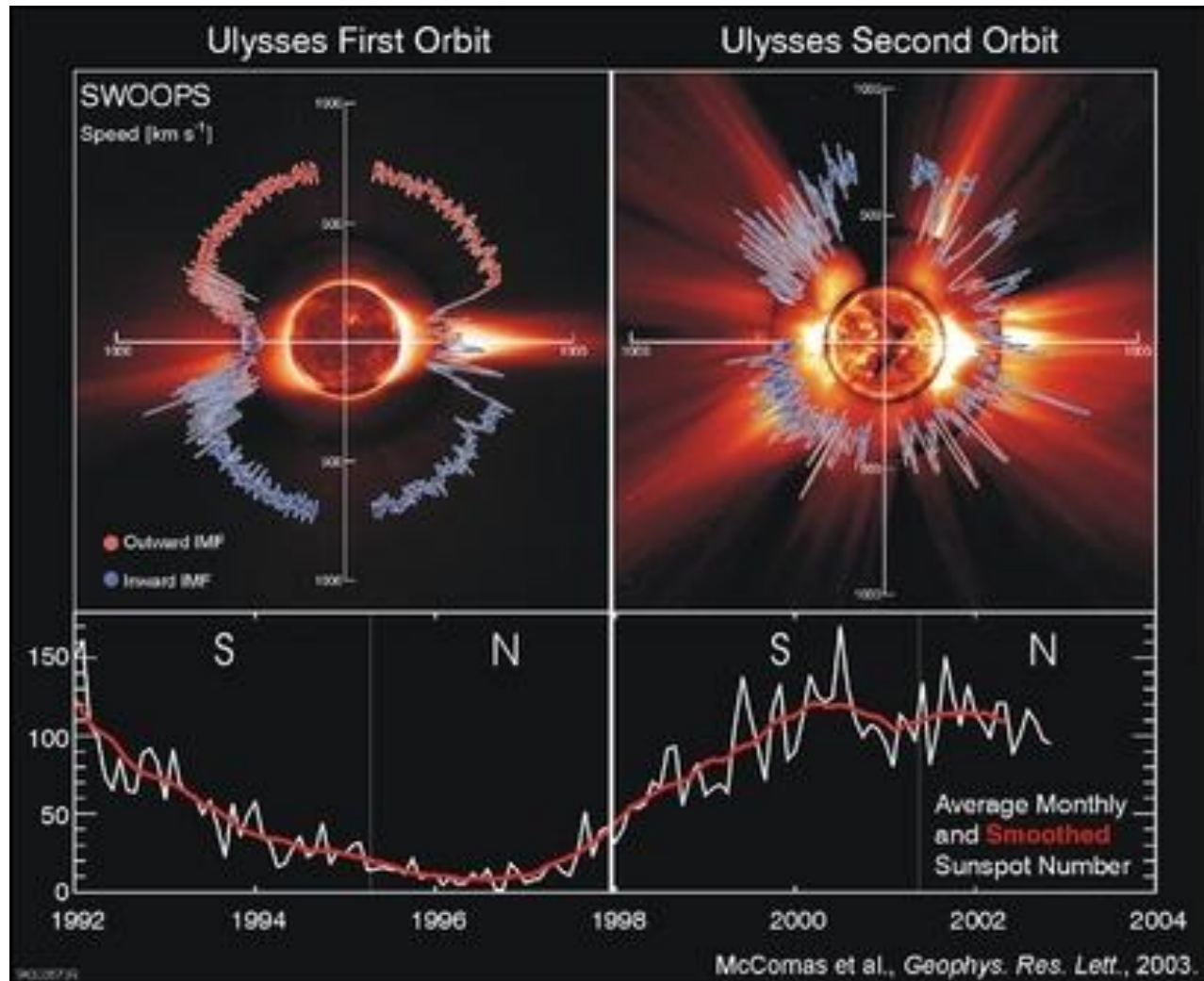
Statistische Eigenschaften schneller magnetoakustischer Stoßwellen zwischen 0.3 AU und 1 AU

Es wurden von Januar 1975 bis Dezember 1980 178 Stoßwellen von HELIOS-1 und HELIOS-2 beobachtet. Eine statistische Auswertung ergab u.a.:

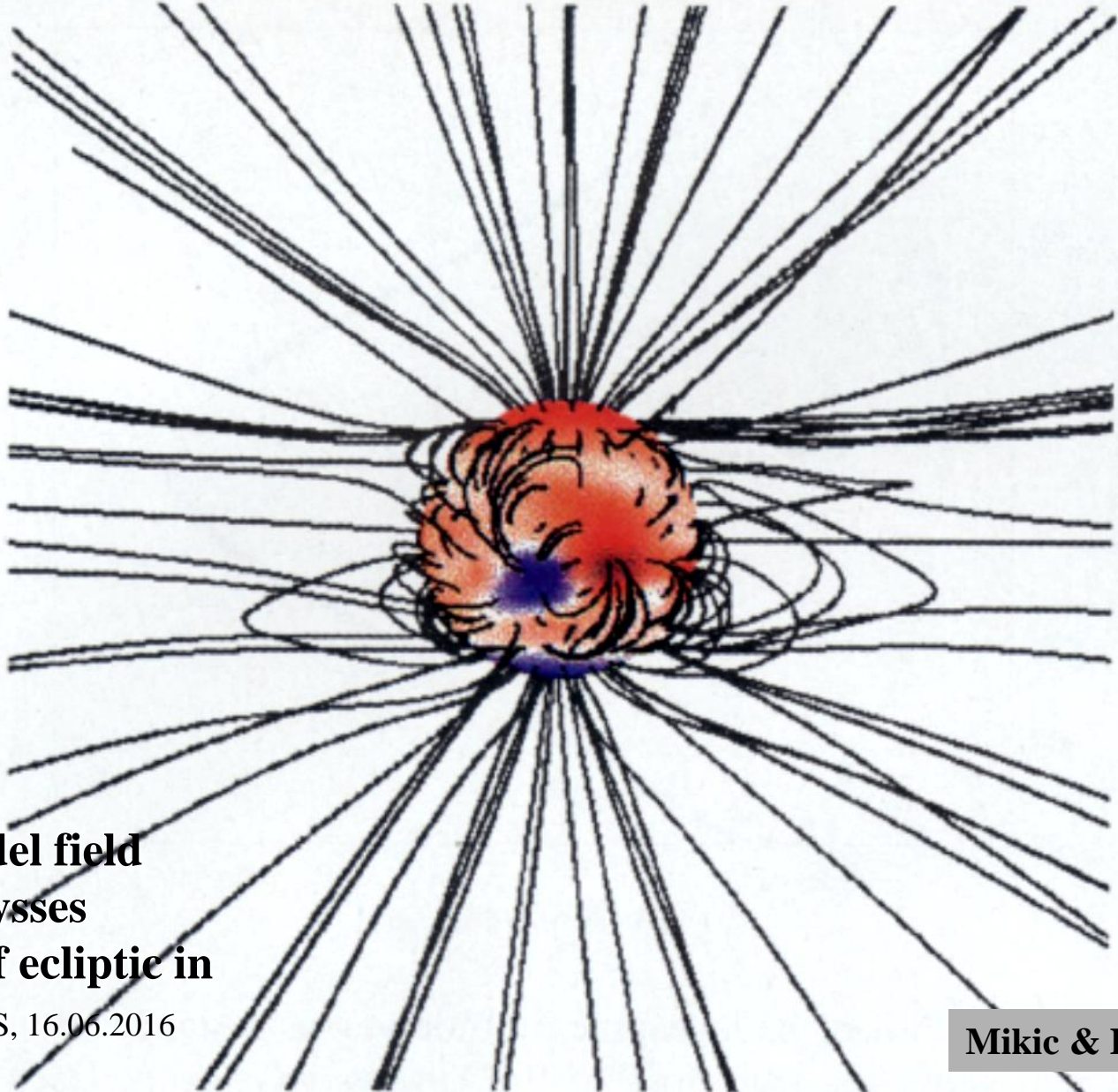
- (1) Die Ausrichtung der Stoßwellennormalen zeigt keine Entfernungsabhängigkeit; 60% der Normalen befinden sich in einem 35° Kegel zur radialen Richtung.
- (2) Die schnelle Machzahl liegt zwischen 1 und 2 und überschreitet selten die 4.
- (3) Die Alfvén-Machzahl liegt zwischen 1 und 4 und überschreitet selten die 10.
- (4) Die Stoßwellengeschwindigkeit zeigt eine Entfernungsabhängigkeit der Form:

$$v_s = 105 \text{ km/s} \times r^{-0,54} \quad (r \text{ in AU})$$

Ergebnisse der ULYSSES - Mission



The Sun's open magnetic field lines

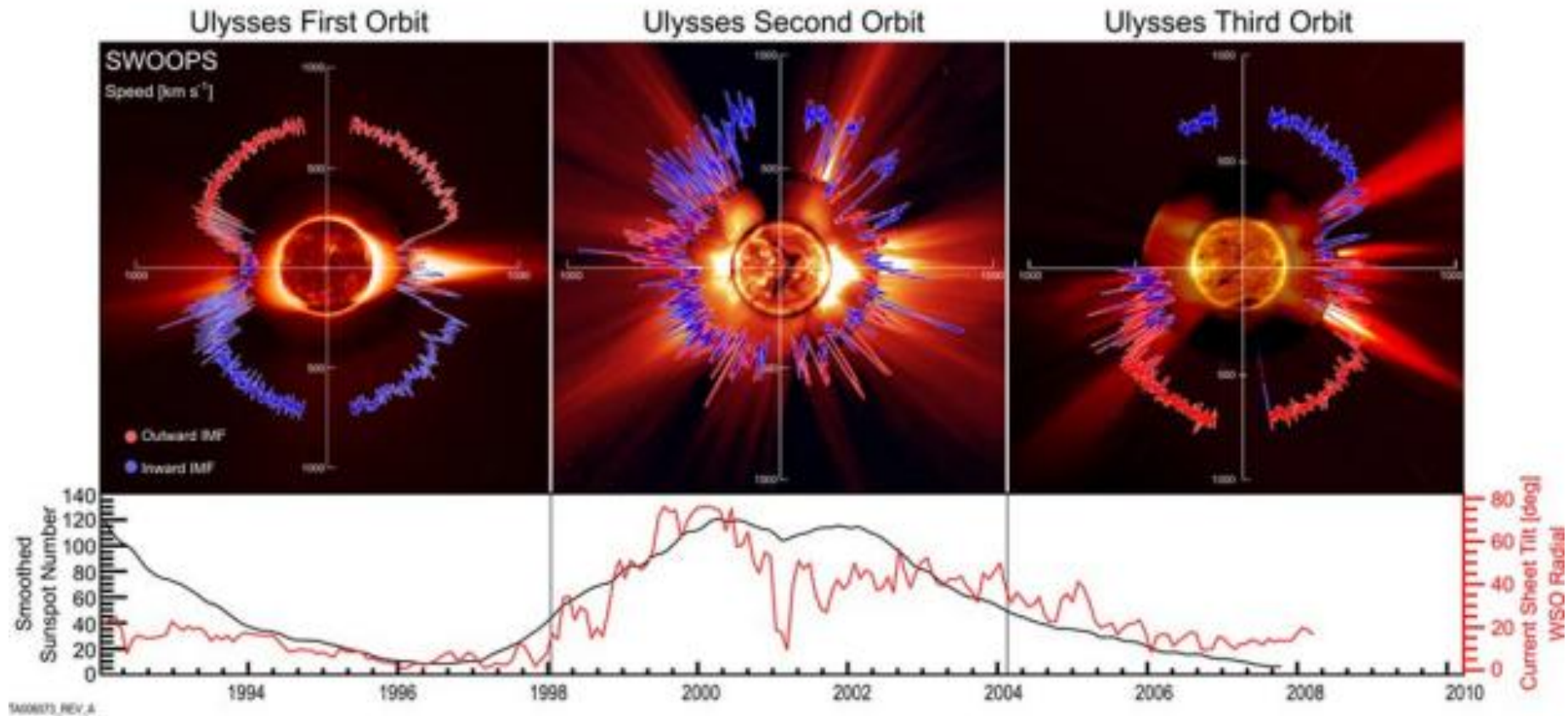


**MHD model field
during Ulysses
crossing of ecliptic in
early 1995**

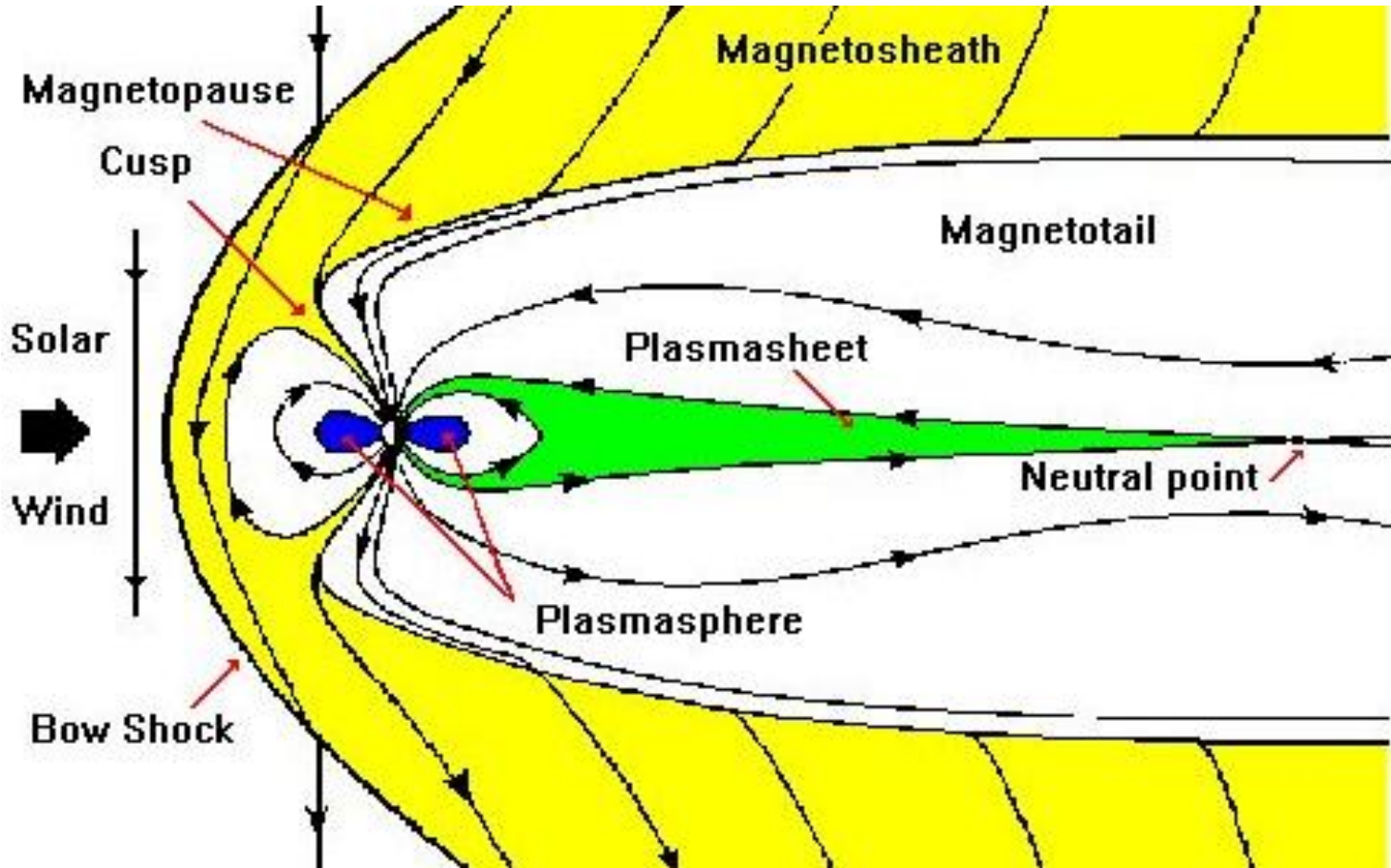
EDAS, 16.06.2016

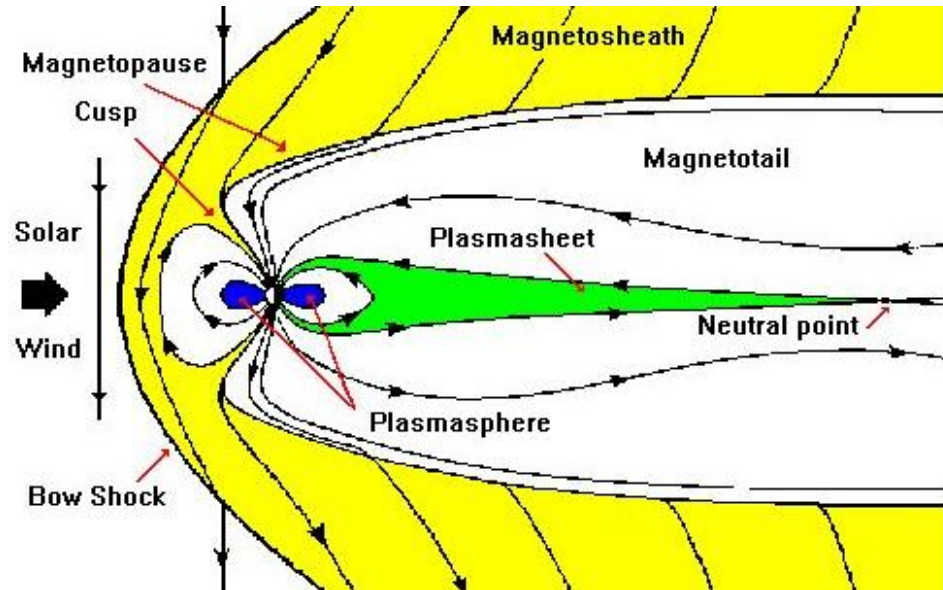
Mikic & Linker, 1999⁴⁷

ULYSSES: Ergebnisse der 3 Umläufe



Wirkung des Sonnenwindes auf die Magnetosphäre der Erde





..... aber das ist vielleicht mal Thema eines anderen Vortrags !!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

Quellennachweis: Veröffentlichungen

- Burlaga, L.F., Hydromagnetic waves and discontinuities in the solar wind, Space Science Rev., Vol. 12, 600-657, 1971**
- Hundhausen, A.J., Coronal expansion and solar wind, Physics and Chemistry in space, Vol. 5, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1972**
- Mc Comas, D.J. et al., Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun, Geophysical Research Letters, Vol. 35, 18103-18105, 2008**
- Schwenn, R., Marsch E. (Hg), Physics of the Inner Heliosphere II: Particles, Waves and Turbulence, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 1991**
- Volkmer, P.M. et al., Observation of flare-generated shock waves by HELIOS-2 near the sun, Space Science Rev., Vol. 32, 131-144, 1982**
- Volkmer, P.M., Neubauer F.M., Statistical properties of fast magnetoacoustic shock waves in the solar wind between 0.3 AU and 1 AU: HELIOS-1,2 observations, Annales Geophysicae, Vol. 3, 1-12, 1985**

Quellennachweis: Internet

<http://sci.esa.int/ulysses/>

<http://www.cosmos.esa.int/web/ulysses>

<http://sci.esa.int/ulysses/43458-ulysses-spacecraft-data-indicate-solar-wind-at-a-50-year-low/>

http://www.ieap.uni-kiel.de/et/people/steigies/Phys_VI/P6_V9.pdf

http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/spacebook/spacebook_files/lectures_d/space-kap4.pdf

<http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/>

https://www.nasa.gov/mission_pages/soho/index.html

https://de.wikipedia.org/wiki/Helios_%28Sonde%29

<http://www.bernd-leitenberger.de/helios.shtml>

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>