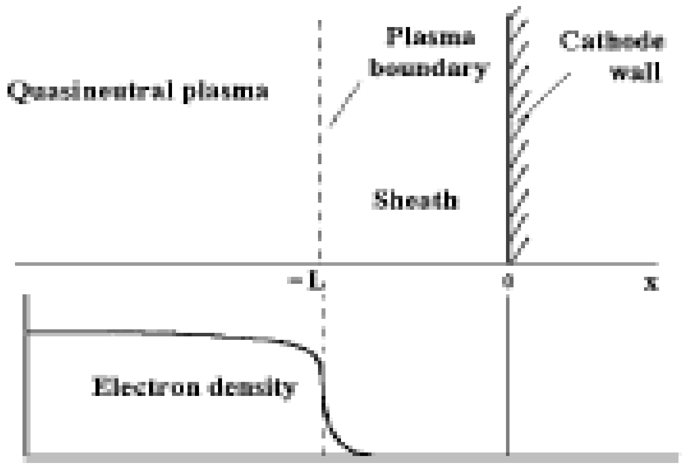
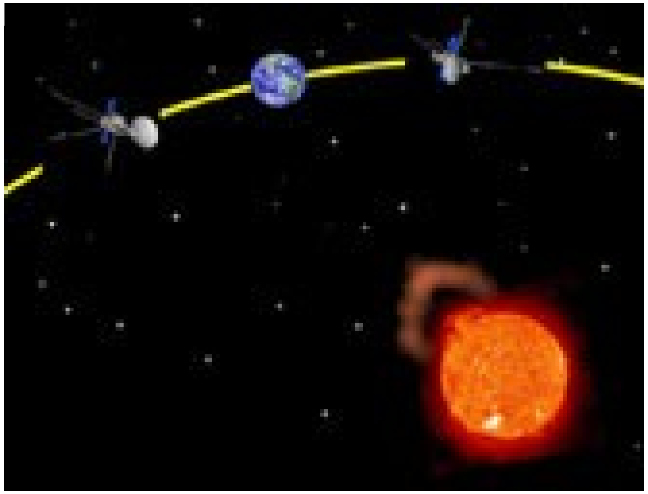
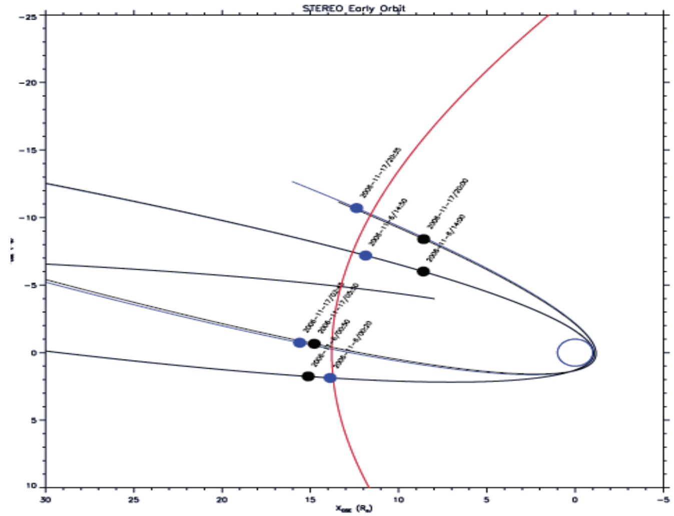
Antennen in Plasma







Antennen in Plasma

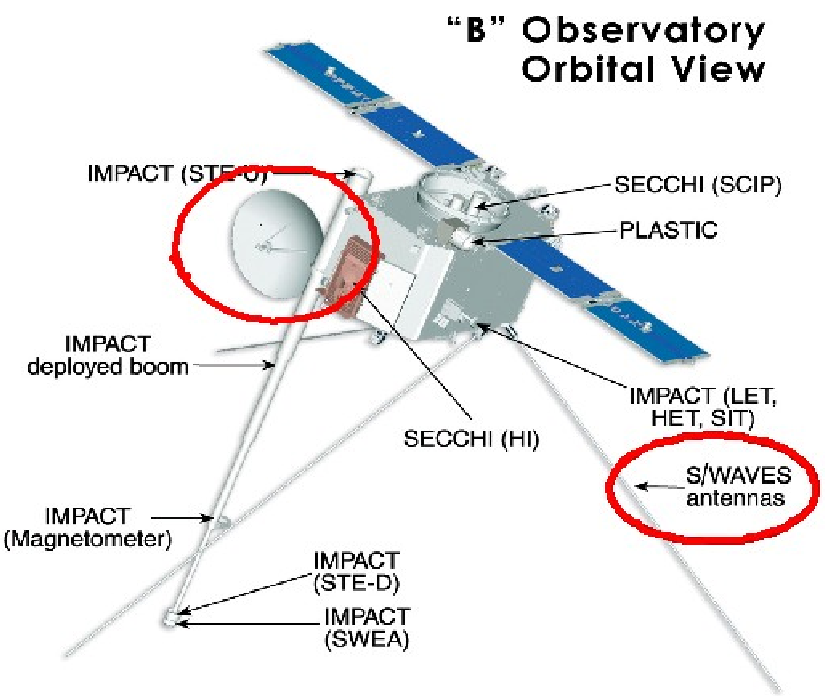
Wegweiser

- Einleitung, Kalibrierung von Raumsondenantennen.
- Plasma Sheath.
- Plasma als Dielektrikum.

Antennen in Plasma

Einleitung

- Antennen dienen als Schnittstelle zwischen geführter Ausbreitung entlang eines Kabels und freier Ausbreitung im Raum
- Verschiedene Plasma-Wellen können durch Antennen empfangen oder gesendet werden.
- Antennen auf Raumsonden dienen zum Empfang natürlicher Strahlung.
- Die empfangenen Daten geben Rückschlüsse auf physikalische Prozesse.

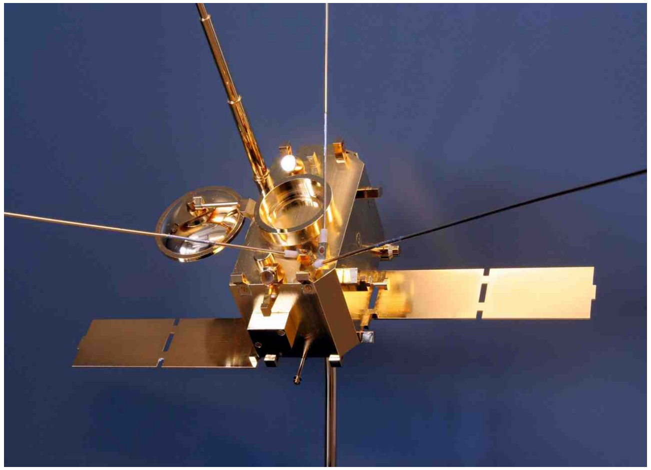


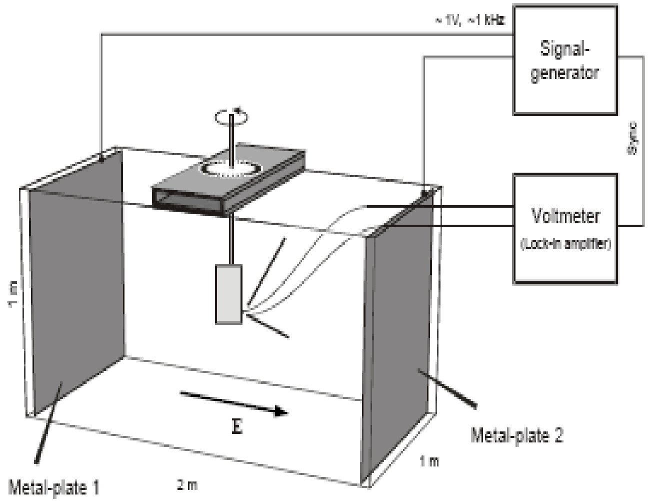
Antennen in Plasma

Einleitung

- Um eine korrekte Datenauswertung zu garantieren, müssen die Antenneneigenschaften genau bekannt sein.
- Effektive Längenvektoren, Impedanzen, Admittanzen, Powerpattern
- Numerische und eperimentelle Methoden:
  - Wire/Patchgrid modeling
  - Rheometry
  - Anechoic chamber
  - Inflight calibration

Antennen in Plasma



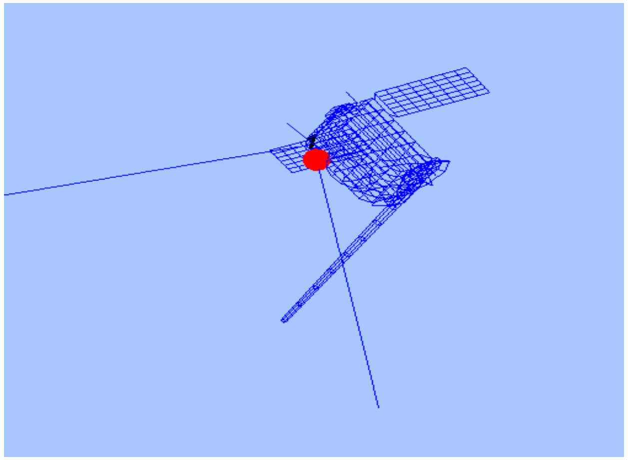


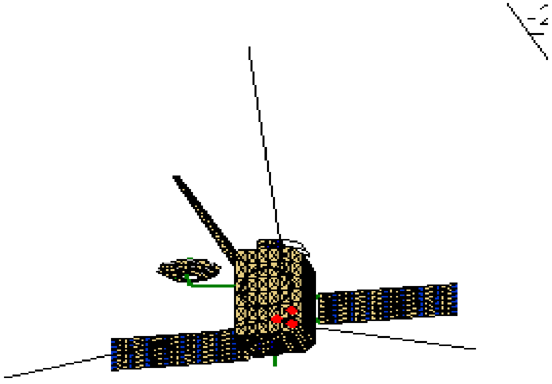
- Ein vergoldetes Modell wird in einem Wassertank versenkt.
- Ein niederfrequentes elektrisches Feld wird über 2 Metallplatten angelegt.
- Die induzierte Spannung an den Antennen wird als Funktion der Orientierung des Modells im Vergleich zum E-Feld gemessen.
- Die effektiven Längenvektoren und Impedanzen können aus den gemessenen Daten ermittelt werden.
- Die Methode kann nur für den quasi-statische Grenzfall eingesetzt werden.

Antennen in Plasma

Die numerische Methode

- Die Raumsonde wird aus Drähten (wires) oder Oberflächenelementen (patches) modelliert.
- Die Stromverteilung entlang des Modells wird berechnet.
- Diese Berechnung machen wir mit ASAP (wires) und CONCEPT II (wires and patches) bald auch mit NEC4
- Aus der bekannten Stromverteilung können dann alle andern Parameter berechnet werden. Dies wird mit unseren Matlab Funktionen bewerkstelligt.

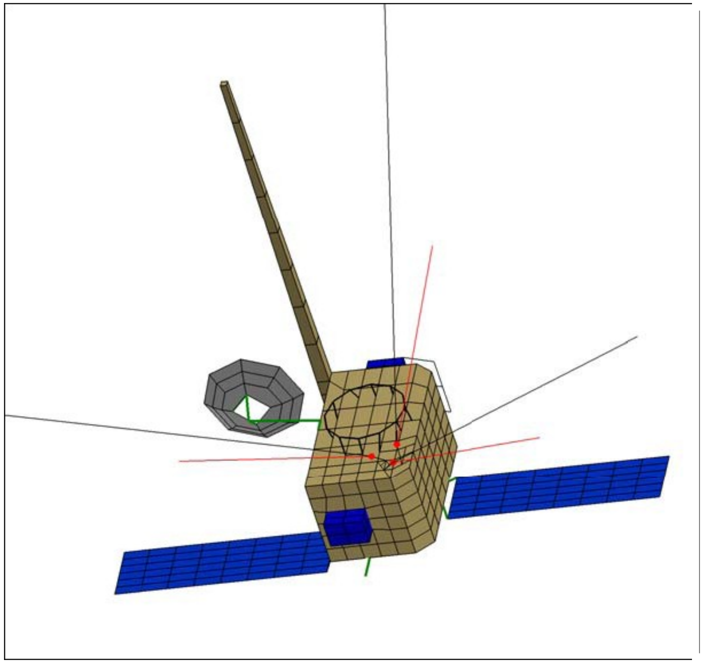




Antennen in Plasma

Wiregrid

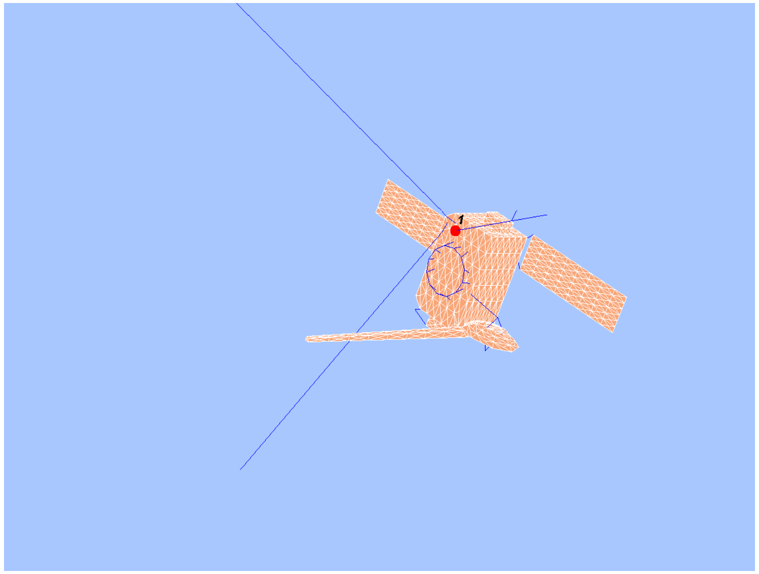
- Die Stromverteilung wird durch die electric field integral equation (EFIE. CONCEPT), oder die reaction integral equation (RIE, ASAP) berechnet.
- Die Antenne wird am feed betrieben.
- Vereinfachungen:
  - Unendlich dünner Strom entlang des Zentrums der Drähte.
  - Keine transversalen Ströme.
- Es wird die abstrahlende Antenne berechnet, aber aufgrund der Reziprozität gelten die Ergebnisse auch für die empfangende Antenne.

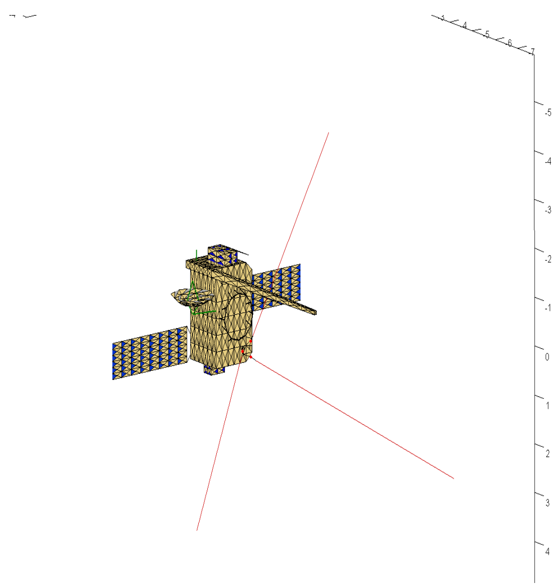


Antennen in Plasma

Patchgrid

- Die Stromverteilung wird durch die magnetic field integral equation (MFIE, CONCEPT) berechnet.
- Vorteil: Höhere Genauigkeit, vor allem bei hohen Frequenzen.
- Nachteil: Hohe Rechenzeit.





Antennen in Plasma

Anechoic chamber

- Ein Modell der Raumsonde wird durch kohärente elektromagnetische Strahlung beleuchtet.
- Anechoic heißt, dass der Raum mit einer absorbierenden Wand versehen ist.
- Die Induzierte Spannung an den Antennen wird gemessen.
- Vorteil gegenüber Rheomtrie: Verschiedene Frequenzen können behandelt werden.
- Eine Anlage steht in Frankreich.

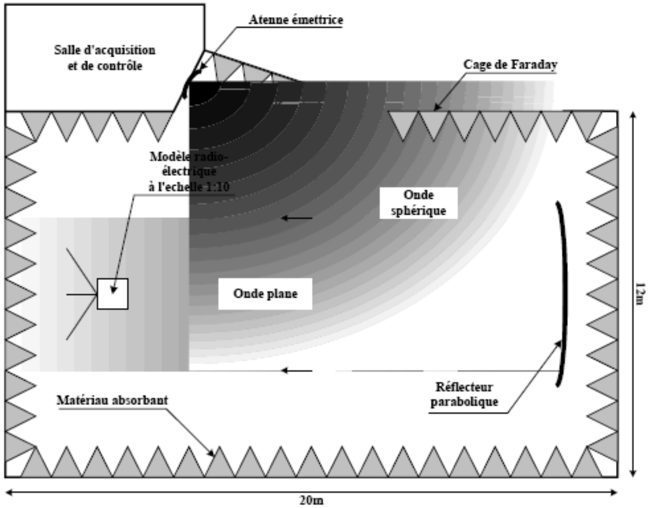
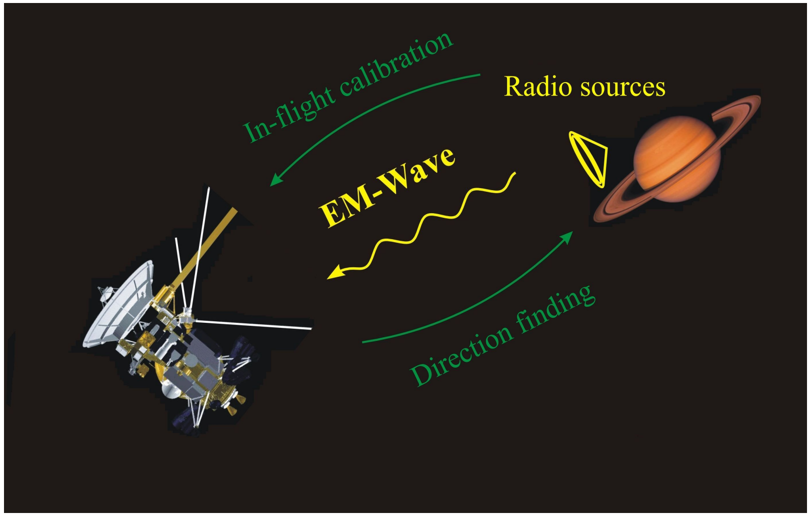


Figure 3.2 : Principe de la BCMA

Antennen in Plasma

Inflight Calibration

- Nach dem Start der Sonde kann eine künstliche oder natürliche Radioquelle, deren Intensität und Position bekannt ist, dazu verwendet werden, die echten Antennen zu kalibrieren.
- Idealerweise führt die Sonde dazu ein Rollmanöver durch.



Antennen in Plasma

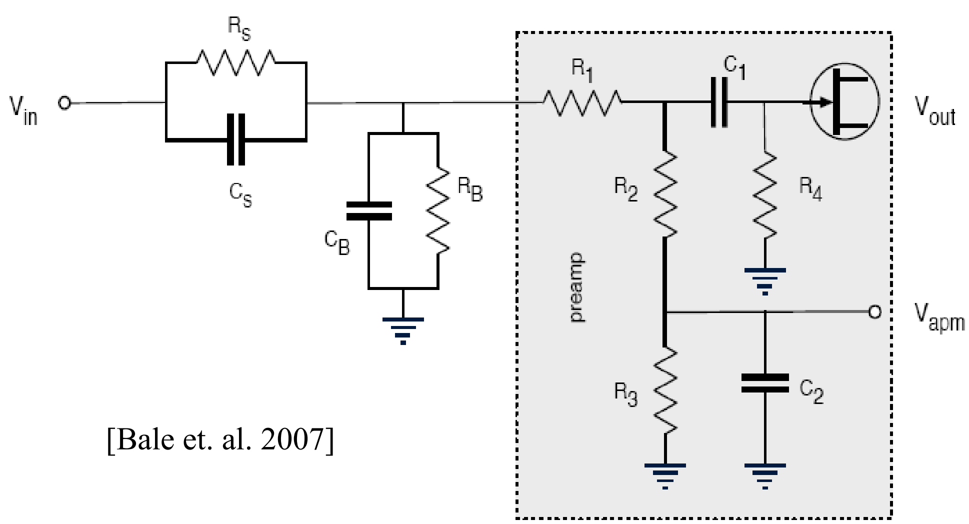
Wegweiser

- Einleitung, Kalibrierung von Raumsondenantennen.
- Plasma Sheath.
- Plasma als Dielektrikum.

Plasma sheath

Antennen in Plasma

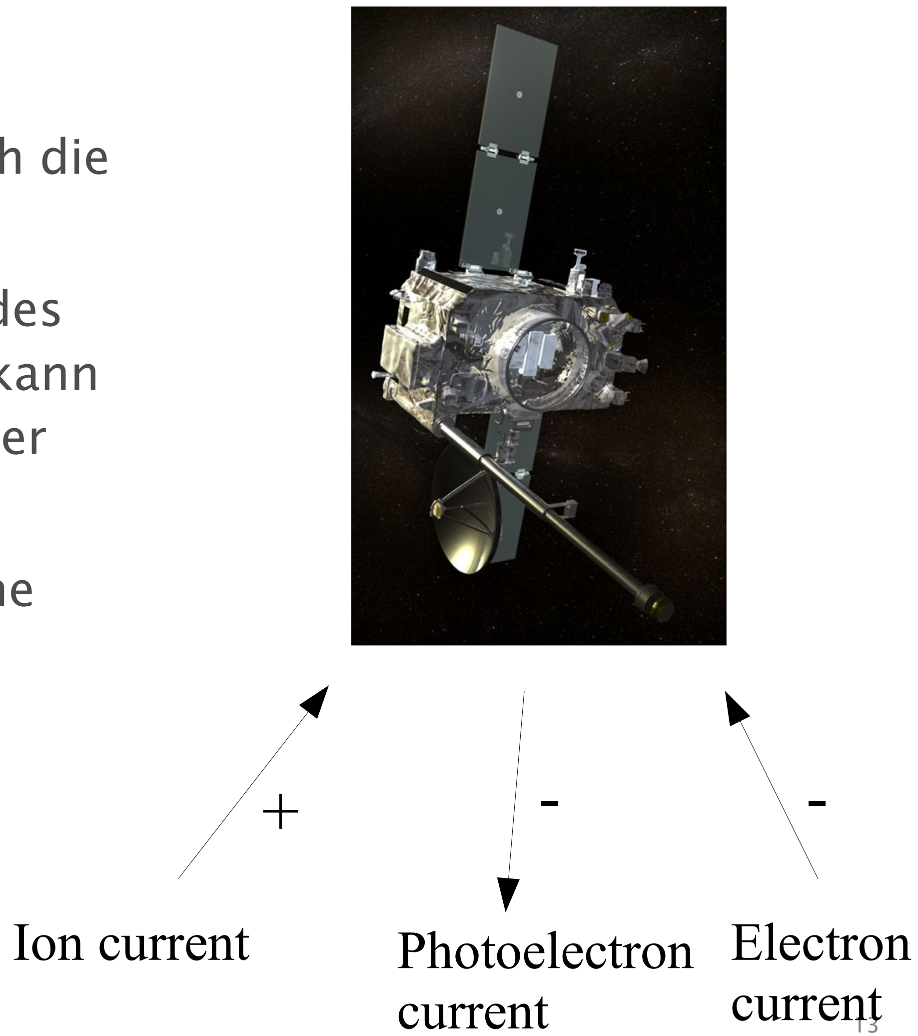
- Oberflächen aus leitendem Material wechselwirken mit umgebendem Plasma.
- Es bildet sich eine Schichte um das Objekt, welche plasma sheath genannt wird.
- Die plasma sheath ist unterschiedlich, je nachdem, ob die Oberfläche positiv oder negativ geladen ist.
- Sie kann als System aus Widerstand und Kapazität modelliert werden.



[Bale et. al. 2007]

Antennen in Plasma

- 2 oder 3 verschiedene Stöme fliessen von und zu der Raumsonde.
- In einem dynamische Gleichgewicht müssen sich die Ströme auf Null addieren.
- Abhängig von der Größe des Photoelektronen-Stroms kann die Raumsonde positiv oder negativ geladen sein.
- Verschiedene physikalische Effekte treten auf.



Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Keine Sonneneinstrahlung--> Nur Ionen und thermische Elektronen
- Wenn Elektronen und Ionen im thermischen Gleichgewicht sind, ist die Mittlere Geschwindigkeit der Elektronen höher: $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$
- --> mehr Elektronen treffen die Oberfläche pro Zeit.
- --> RS baut negative Ladung auf.
- --> negative Ladung stößt thermische Elektronen ab.
- --> Ionen werden angezogen.
- --> Eine Elektronenarme Schicht formt sich um die RS.
- --> Die Dicke der Schicht und die Potenzial-Verteilung werden sich dergestalt regulieren, dass der Betrag der beiden Ströme gleich gross ist.

Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Postulat: thermische Elektronen sind Maxwell verteilt.
- Energieerhaltung: $\frac{1}{2}m_e v^2 - e\phi(x)$
- Teilchendichte: Nulltes Moment.
- Drift Geschwindigkeit: Erstes Moment x Ladung.
- V ist das Potenzial der RS im Vergleich zum Plasma (V<0)

$$I_e = -e\bar{n}_e A\sqrt{\frac{\kappa T_e}{2\pi m_e}}e^{\frac{eV}{\kappa T_e}}$$

$$f_e(x,v) = \frac{\bar{n}_e}{\sqrt{\frac{2\pi\kappa T_e}{m_e}}}e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa T_e}}$$

$$\begin{aligned} n_e(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_e(x,v)dv \\ &= \frac{\bar{n}_e}{\sqrt{\frac{2\pi\kappa T_e}{m_e}}}e^{\frac{e\phi(x)}{\kappa T_e}}\sqrt{\frac{2\pi\kappa T_e}{m_e}} \\ &= \bar{n}_e e^{\frac{e\phi(x)}{\kappa T_e}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} j_e(x) &= -e\int_0^{\infty} v f_e(x,v)dv \\ &= -e\bar{n}_e\sqrt{\frac{\kappa T_e}{2\pi m_e}}e^{\frac{e\phi(x)}{\kappa T_e}} \end{aligned}$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Alle ionen erreichen die Oberfläche.
- Sie fallen in eine Potenzialsenke.
- --> Beschleunigung
- --> Dichte sinkt wegen Massenerhaltung. $n_i(x) \propto v_i(x)^{-1}$
- Energie erhalten.
- Kombination beider Erhaltungsgesetze ergibt Gleichung für Teilchendichte.
- Daraus kann der Ionenstrom hergeleitet werden.
- Unter Berücksichtigung der Flussdichte kann man die finale Form erhalten.

$$\frac{1}{2} m_i \bar{v}_i^2 = \frac{1}{2} m_i v_i(x)^2 + e\phi(x)$$

$$v_i(x) = \sqrt{\bar{v}_i^2 - \frac{2e\phi(x)}{m_i}}$$

$$n_i(x) = \frac{\bar{n}_i}{\sqrt{1 - \frac{2e\phi(x)}{m_i \bar{v}_i^2}}}$$

$$I_i(x) = eld\pi n_i(x) v_i(x)$$

$$I_i(x) = eld\pi \bar{n}_i \bar{v}_i$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Photoelektronen werden durch Photonen erzeugt, welche auf der Oberfläche auftreffen. Oft Solarer Ursprung.
- Alle Photoelektronen erreichen die Oberfläche.
- Stromdichte an der Oberfläche i_{ph} hängt von Energieverteilung der Photoelektronen, sowie Material und Geometrie der RS ab.
- A_ϕ...beleuchtete Querschnittsfläche.
- Geschwindigkeit und Dichte können wie bei Ionen berechnet werden.

$$I_{ph} = i_{ph} A_\phi$$

$$v_{ph}(x) = \sqrt{\bar{v}_{ph}^2 - \frac{2e}{m_e}\left(V - \phi(x)\right)}$$

$$n_{ph}(x) = \frac{\bar{n}_{ph}}{\sqrt{1 - \frac{2e}{m_e \bar{v}_{ph}^2}\left(V - \phi(x)\right)}}$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Randbedingung des Potenzial
- Um das Potenzial zu berechnen werden die Ströme gleichgesetzt.
- Quasi-Neutralität postuliert.
- Der Einfluss der Ionen ist sehr klein.
- A_{rel} relativer Anteil der beleuchteten Fläche.
- Die Dicke der sheath kann man durch die Debye Länge der Elektronen annähern, oder man kann den Potenzial- und Dichteverlauf durch die Schicht berechnen und so einen genaueren Wert erhalten.

$$\begin{aligned} \phi(0) &= V \\ \phi(\infty) &= 0 \end{aligned}$$

$$\boxed{V = \frac{\kappa T_e}{e} ln \left[\frac{i_{ph} A_{rel}}{e \bar{n}_e \pi} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{\kappa T_e}} \right]}$$

$$\boxed{V = \frac{\kappa T_e}{e} ln \left[\left(\frac{i_{ph} A_{rel}}{e \bar{n}_e \pi} + \bar{v}_i \right) \sqrt{\frac{2\pi m_e}{\kappa T_e}} \right]}$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: negativ geladene Oberfläche

- Der sheath Widerstand ist der Gradient der V-I Kurve.

$$R_s = \frac{\partial V}{\partial I}$$

- Expliciter Ausdruck [Gurnett 2000]

$$R_s = \frac{\kappa T_e}{e(I_{ph} + I_i)}$$

- Der Widerstand kann bei hohen Frequenzen ignoriert werden.
- Für die Kapazität verwende ich die allgemeine Formel für zylindrische Kondensatoren

$$C_s = l_a \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{\delta}{r_a}\right)}$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: positiv geladene Oberfläche

- Photoelektronen dominieren.
- Die Summe der Ströme muss sich wieder zu Null addieren.
- -->Der Körper lädt sich positiv auf. Die Anzahk der Photoelektronen welche das Plasma erreichen ist gleich der Anzahl der thermischen Elektronen welche die Oberfläche erreichen.
- Die meisten Photoelektronen haben nicht genug Energie um die sheath zu durchqueren und fallen zur Oberfläche zurück.
- Diese Elektronen formen die Elektronenschicht.
- Sie tragen aber nicht zum Photoelektronen-Strom bei.

Antennen in Plasma

Plasma sheath: positiv geladene Oberfläche

- Alle thermischen Elektronen erreichen die Oberfläche --> kein Boltzmann.
- Nur Photoelektronen mit genug Energie erreichen das Plasma.
- Photoelektronen annähernd Maxwell-Verteilt [Grard et. al].
- Photoelektronen-Rückfluss:
- Photoelektronenstrom==thermischer Elektronenstrom.
- -->Gesamtelektronenstrom der die Oberfläche erreicht :

$$I_e = -e n_e d l \pi \sqrt{\frac{\kappa T_e}{2\pi m_e}}$$

$$I_{ph} = A_{rel} i_{ph} l d e^{-\frac{eV}{\kappa T_{ph}}}$$

$$I_{ph,back} = A_{rel} i_{ph} l d (1 - e^{-\frac{eV}{\kappa T_{ph}}})$$

$$I_{back} = I_{ph,back} + I_e \sim A_{rel} i_{ph} l d$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: positiv geladene Oberfläche

- Potenzial der Raumsonde kann durch Gleichsetzen der Ströme hergeleitet werden.

$$V = -\frac{\kappa T_{ph}}{e} \ln\left[\frac{e n_e \pi}{A_{rel} i_{ph}} \sqrt{\frac{\kappa T_e}{2\pi m_e}}\right]$$

Antennen in Plasma

Plasma sheath: positiv geladene Oberfläche

- Formeln für positiv geladene RS.
- ϵ_r ist der relative dielektrische Tensor.
- Dieser ändert sich kontinuierlich entlang des sheath.
- Als erste Annäherung kann man den Mittelwert nehmen.

$$\boxed{R_s = \frac{\partial V}{\partial I}}$$

$$\boxed{R_s = -\frac{\kappa T_{ph}}{e I_{ph}}}$$

$$\boxed{C_s = l_a \frac{2\pi\epsilon_0\bar{\epsilon}_r}{\ln\left(\frac{\delta}{r_a}\right)}}$$

Antennen in Plasma

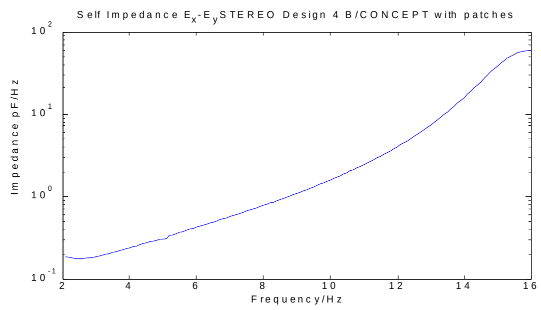
Beispiel STEREO

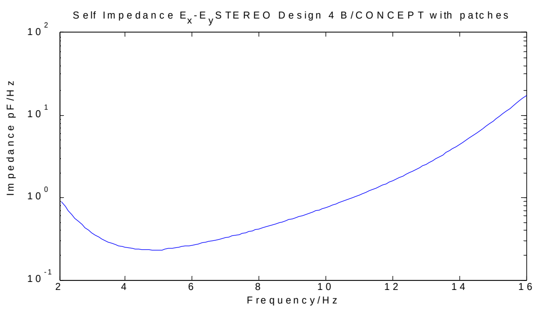
- Wendet man die Theorie bei STEREO an, erhält man folgende Werte:
- Vergleich des Realteils der Impedanz :

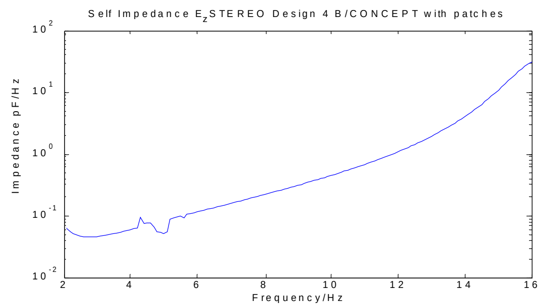
$$V \sim 5.5V \qquad \lambda_{sh} \sim 0.4m$$

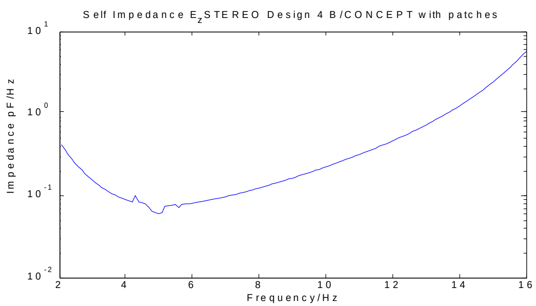
$$R_s = 0.2M\Omega \qquad \text{oder}$$

$$C_s = 87pF \qquad \lambda_{ph} \sim 0.6m$$









Antennen in Plasma

Wegweiser

- Einleitung, Kalibrierung von Raumsondenantennen.
- Plasma Sheath.
- Plasma als Dielektrikum.

Antennen in Plasma

Plasma als Dielektrikum

- Das Verhalten der Antennen wird auch direkt vom umgebenden Plasma beeinflußt.
- Der Einfluss ist nahe der Plasmaresonanzfrequenzen am grössten, aber auch in höheren Frequenzbereichen nicht vernachlässigbar.
- Als dielektrisches Modell kann der Plasmaeinfluss leicht in die numerische Kalibrierung aufgenommen werden.
- Der Plasmaeinfluss wird komplett durch den Green's Tensor, dessen Form vom Modell abhängt, beschrieben.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},\omega) = \int_{V'} \mathbf{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}')\, \mathbf{j}_{ant}(\mathbf{r}',\omega)dV'$$

- Die allgemeine Form ist

$$\mathbf{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \frac{\mu_0 \imath\omega}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{\infty} \lambda^{-1} e^{\imath(k\cdot(\mathbf{r}-\mathbf{r}'))} d\mathbf{k}$$

$$\lambda = \; -\left(\mathbf{kk} - k^2\mathbf{I} + k_0^2\epsilon_r\right)$$

- Der resultierende Tensor kann direkt in die EFIE übernommen werden.

Antennen in Plasma

Plasma als Dielektrikum

$$\mathbf{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}') = -\left(\nabla\nabla + k_0^2\epsilon_r\mathbf{I}\right) g(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$$

- Kaltes isotropes Plasma:

$$g(\mathbf{r}-\mathbf{r}') = -\frac{\epsilon_r^{-1}}{4\pi\imath\omega\epsilon_0}\frac{e^{-\imath k|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$$

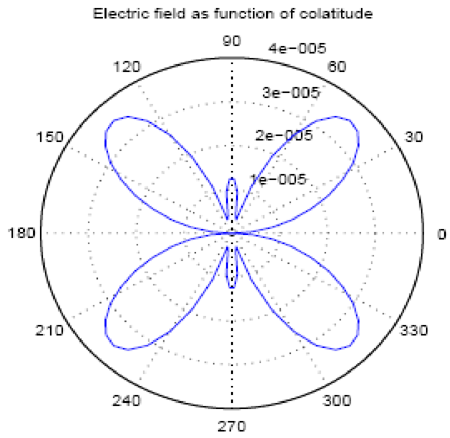
- Kaltes anisotropes Plasma:

$$\mathbf{G}(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \frac{\mu_0\imath\omega}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{\infty}\lambda^{-1}e^{\imath(k\cdot(\mathbf{r}-\mathbf{r}'))}d\mathbf{k}$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} 1+n^2\cos^2\theta-\frac{\omega_p^2}{\omega^2-\Omega^2} & \imath\frac{\omega_p^2\Omega}{\omega(\omega^2-\Omega^2)} & -n^2\sin\theta\cos\theta \\ -\imath\frac{\omega_p^2\Omega}{\omega(\omega^2-\Omega^2)} & 1+n^2-\frac{\omega_p^2}{\omega^2-\Omega^2} & 0 \\ -n^2\sin\theta\cos\theta & 0 & 1+n^2\sin^2\theta-\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \end{pmatrix} \quad (3$$

Antennen in Plasma

Plasma als Dielektrikum



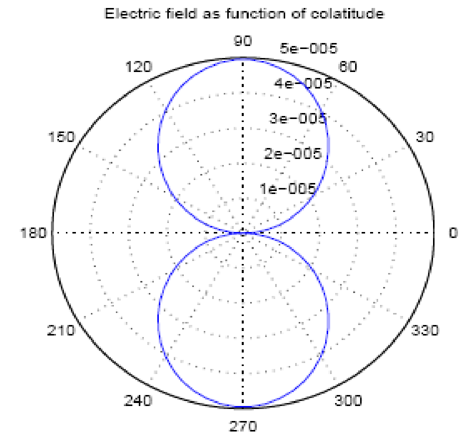


Fig. 5.20: Electric field strength at 10000m distance in vacuum and in plasma at $\frac{3}{2}\lambda$ resonance condition

Antennen in Plasma

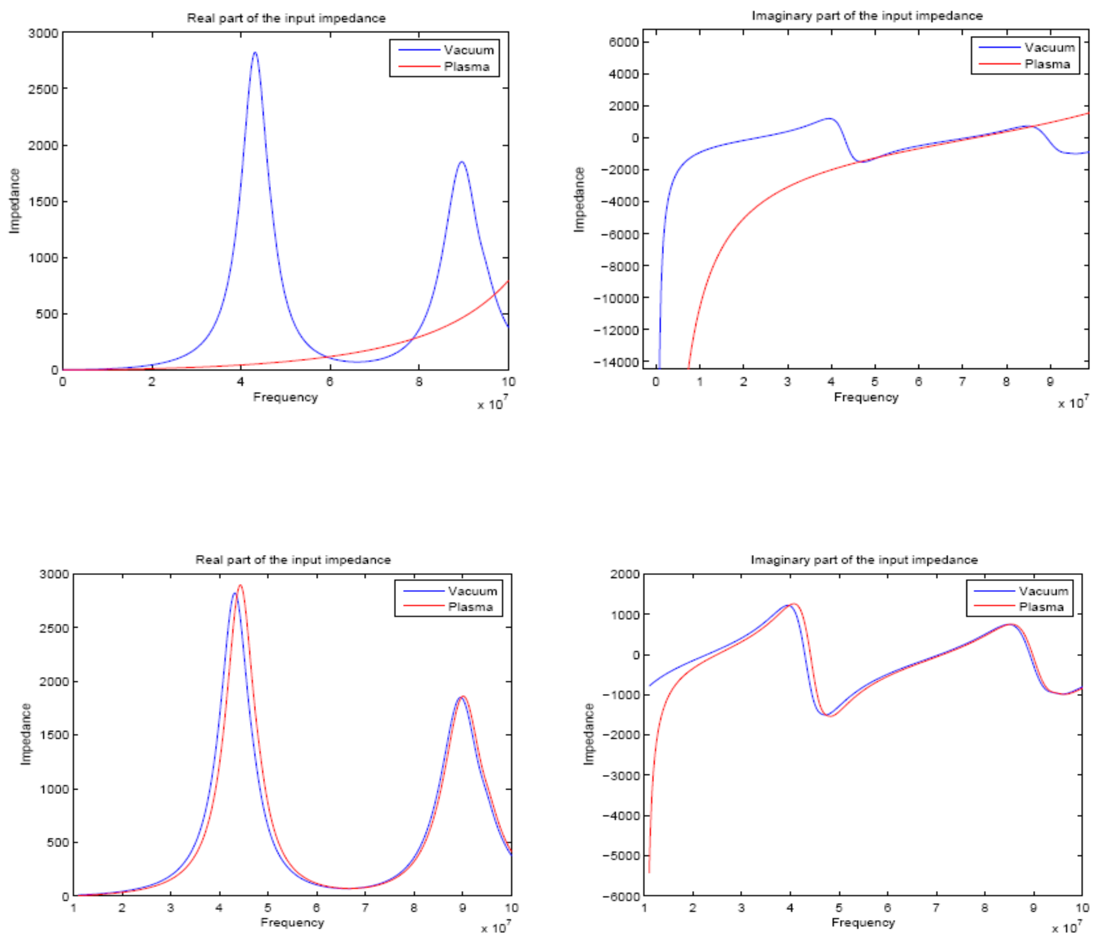


Fig. 5.19: Impedance curves of the dipole with and without plasma. $\omega_{pe} = 10MHz$

STEREO

Tab. 6.1: Effective length vectors in vacuum: $f = 300kHz$

	$length/m$	$\zeta/°$	$\xi/°$
E_x	1.34	119.8	−135.3
E_y	1.64	114.3	127.3
E_z	1.09	124.6	15.5

Tab. 6.2: Effective length vectors in cold plasma: f=300kHz, $f_{pe} = 100kHz$

	$length/m$	$\zeta/°$	$\xi/°$
E_x	1.26	119.5	−135.0
E_y	1.53	114.1	127.2
E_z	1.02	124.2	15.2

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !