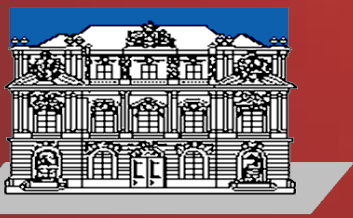


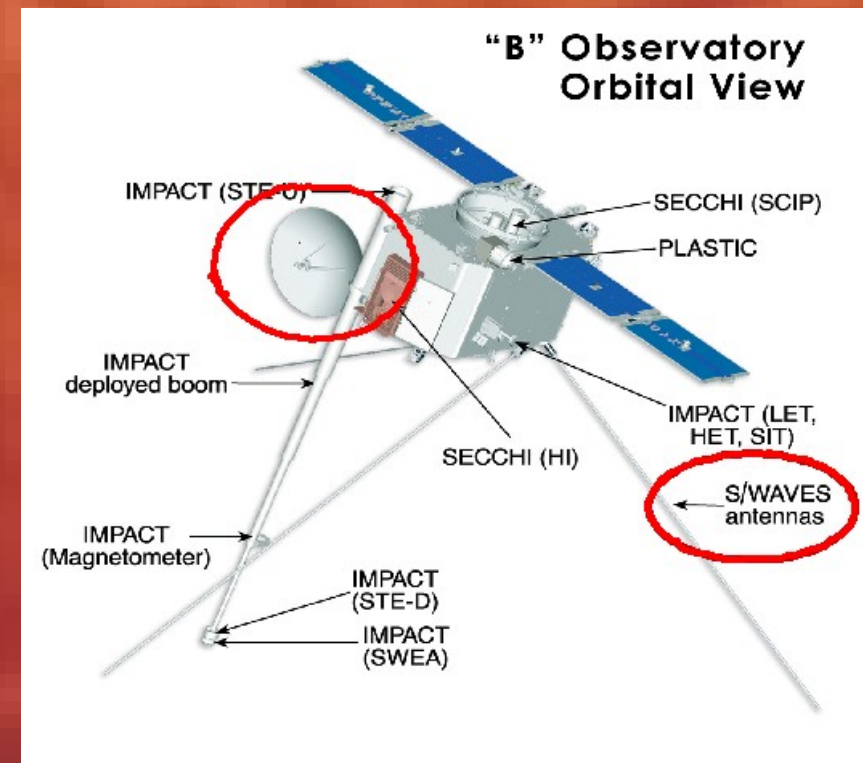
# Antennen auf Raumflugkörper

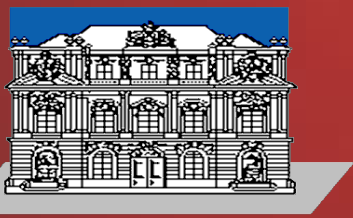
Von Thomas Oswald



# Antennen auf Raumsonden

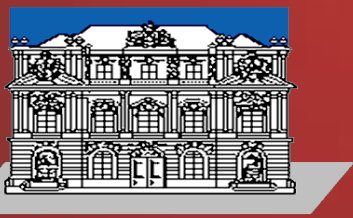
- 2 Arten:
  - Zur Kommunikation
  - Zum Empfang natürlicher Radiostrahlung
- Zur Kommunikation werden Parabolantennen verwendet, die sehr genau ausgerichtet werden können
- Zum Empfang der natürlichen Radiostrahlung werden oft Monopolantennen verwendet





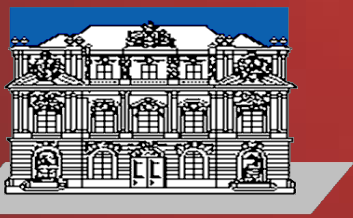
# Antennen

- Antennen dienen zur Abstrahlung und zum Empfang von elektromagnetischen Wellen und/oder anderen Plasmawellen
- Übergang: guided wave propagation  $\leftrightarrow$  free wave propagation



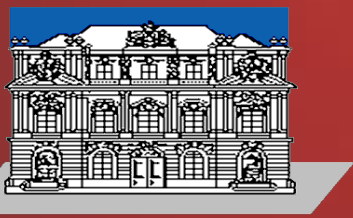
# Plasma

- Der 4. Aggregatzustand
- Ladungsträger (z.B. Elektronen u. Wasserstoffionen) sind getrennt von einander
- Verhält sich ähnlich wie Gas, allerdings kollektives Verhalten durch die grosse Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung
- 99% aller Materie im Universum besteht aus Plasma
- Der Weltraum ist mit Plasma ausgefüllt



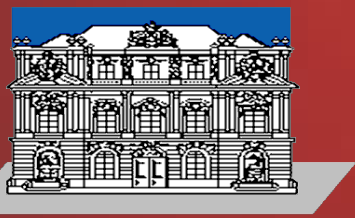
# Wellen in Plasma

- Plasmawellen sind ein wichtiges Werkzeug in der Weltraumforschung
- Sie dienen zur
  - Energieübertragung
  - Informationsübertragung
  - Remote Sensing



# Wellen in Plasma

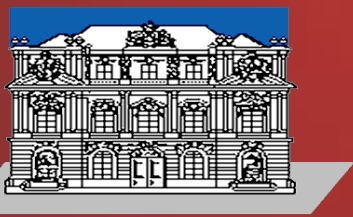
- In Vakuum können sich nur elektromagnetische Wellen ausbreiten, in Plasma gibt es aufgrund des kollektiven Verhaltens eine finite Anzahl von Wellenmodi
- Es gibt verschiedene Mechanismen in Plasma die eine Quelle von Plasmawellen darstellen
- Die ausgesendeten Wellen können von den Monopolantennen empfangen werden
- Die Messdaten geben Rückschlüsse über die Physik der Quellen



# Erzeugung von elektromagnetischen Wellen



- Elektromagnetische Wellen bestehen aus elektrischen und magnetischen Feldern die einander erzeugen
- Gemäss Maxwell Gleichungen erzeugen veränderliche elektrische Felder magnetische Felder und umgekehrt
- Einmal in Gang gebracht setzt sich diese Kettenreaktion fort und die Wellen breiten sich immer weiter aus



# Maxwell Gleichungen in Vakuum

$$\nabla \cdot E = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

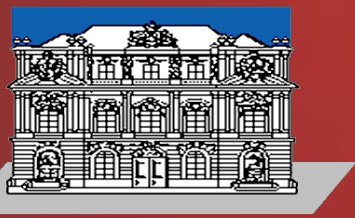
$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla^2 E - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 B - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0$$

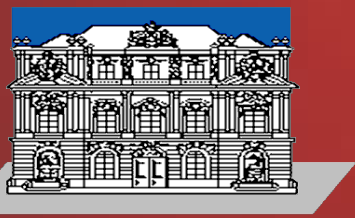




# Erzeugung von elektromagnetischen Wellen



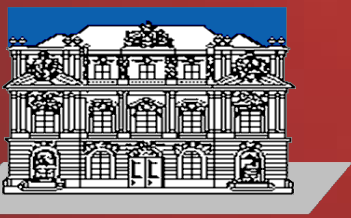
- In Plasma sind die elektromagnetischen Wellen gedämpft
- Andere Plasmawellen sehen ähnlich aus, der Formalismus ist allerdings komplizierter
- Zu einer Quelle kann es kommen wenn durch eine Instabilität eine Beschleunigung von Ladungsträgern entsteht



# Erzeugung von elektromagnetischen Wellen

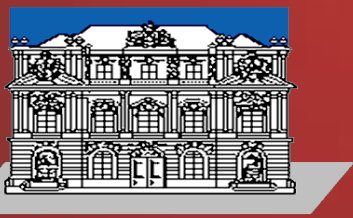


- In einer Antenne erzeugt man diesen beschleunigten Stromfluss durch einen Oszillator
- In der Natur gibt es Phänomene die eine Beschleunigung von Ladungsträgern zur Folge haben



# Gyration

- Das Gesetz der Lorentzkraft  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$  besagt, dass ein Ladungsträger welcher eine Geschwindigkeitskomponente normal zu einem Magnetfeld hat, in eine Richtung normal zu Geschwindigkeit und Magnetfeld abgelenkt wird.
- Als Folge daraus kreisen (gyrieren) Elektronen und Ionen um die Magnetfeldlinien der planetaren und solaren Magnetfelder.
- Dies gibt die Oszillationsbewegung welche die Emission der Wellen zur Folge hat.



# CMEs



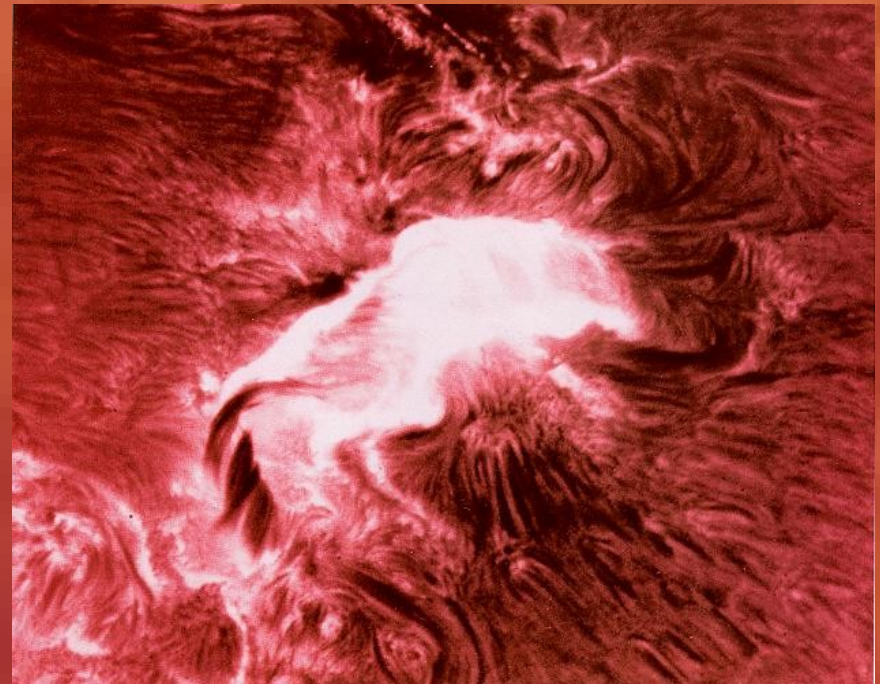
- Bei „Coronal Mass Ejections“ werden grosse Mengen an solarem Plasma in den interplanetaren Raum geschleudert.
- Am Rande dieser Stosswellen entsteht eine Dynamik bei der Elektronen beschleunigt werden und dadurch Wellen erzeugt.

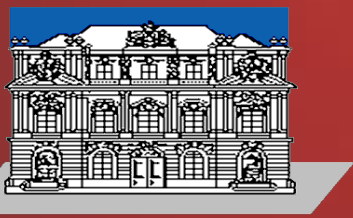




# Solar Flares

- „Solar Flares“ sind mit der Emission von EM Strahlung in Verbindung zu bringen.

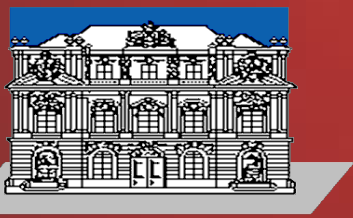




# Stream Instability



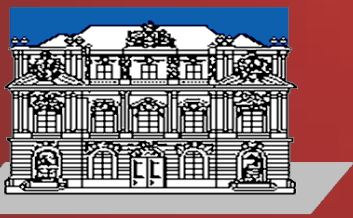
- Wenn ein Elektronenstrahl durch ein Plasma geht, entstehen Wellen aufgrund der räumlichen Änderung der Verteilungsfunktion



# Cyclotron Maser Instability



- In planetaren Magnetosphären gibt es Stellen, an denen Elektronen, welche eine bestimmte Richtung und Geschwindigkeit haben, absorbiert werden.
- Das verändert die Verteilungsfunktion in einer charakteristischen Art und Weise, die dazu führt, dass freie Energie entsteht.
- Diese Energie investiert sich in die Bildung von Plasmawellen (EM)
- Der Mechanismus ist ähnlich wie bei der Stream Instability

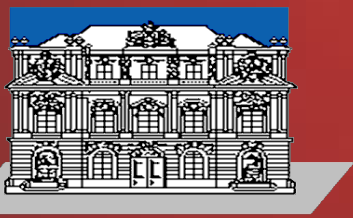


# Antennentheorie Grundlagen



- EM (und/oder andere Plasma) Wellen werden durch eine Änderung der Strom- und Ladungsverteilung erzeugt.
- Im Falle einer Antenne handelt es sich um oszillierende Elektronen in Metall.
- In Vakuum gilt das sogenannte Reziprozitätsprinzip, welches besagt, dass sich abstrahlende und empfangende Antennen äquivalent verhalten.
- Man kann also die Abstrahlungseigenschaften einer Antenne berechnen (was manchmal leichter ist) und erhält automatisch auch die Empfangseigenschaften.
- Für Antennen in Plasma gilt dieses Prinzip leider nicht.
- Dies ist noch Gegenstand aktueller Forschung.

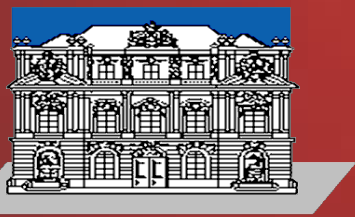




# Antennentheorie Grundlagen



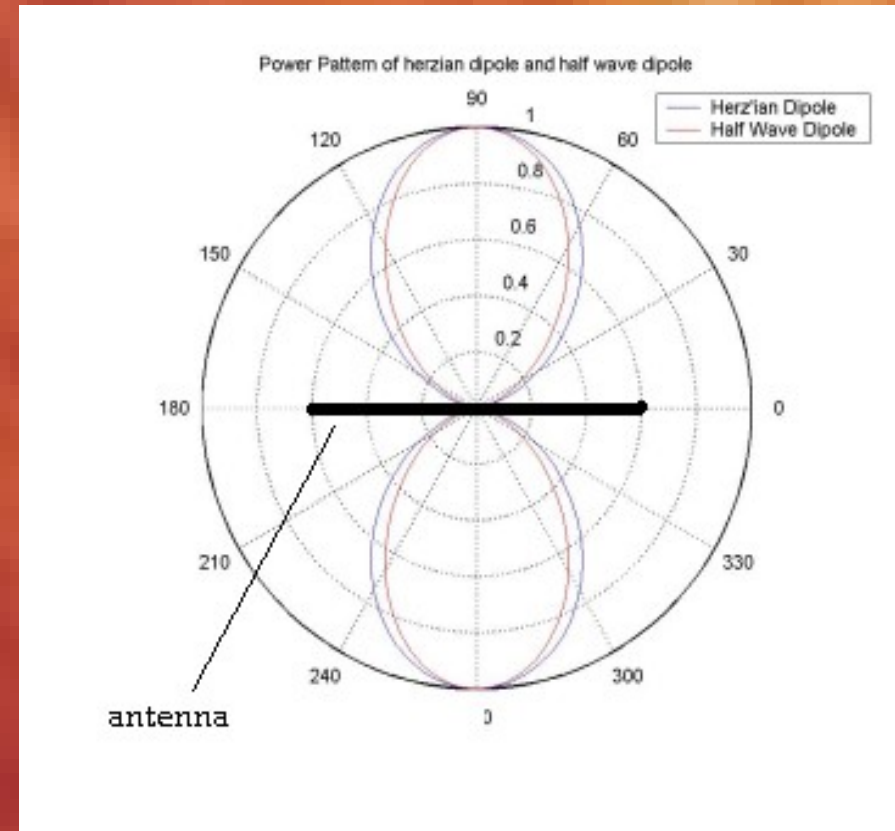
- Man kann das abgestrahlte Feld einer Antenne in ein Nahfeld und ein Fernfeld unterteilen.
- Nur das Fernfeld wird abgestrahlt, das Nahfeld speichert nur Energie, welche der Antenne wieder zugeführt wird.
- Die Intensität des Nahfeldes fällt über die ersten paar Antennenlängen stark ab.
- Daher reicht bei vielen Abstrahlungsproblemen die Berechnung des Fernfeldes.



# Antennenparameter: Gain



- Der Gain als Funktion der Abstrahlungsrichtung ist das Verhältnis der aktuellen Strahlungsleistung zu der eines hypothetischen isotropen Strahlers.
- Als Diagramm aufgetragen nennt er sich Power Pattern



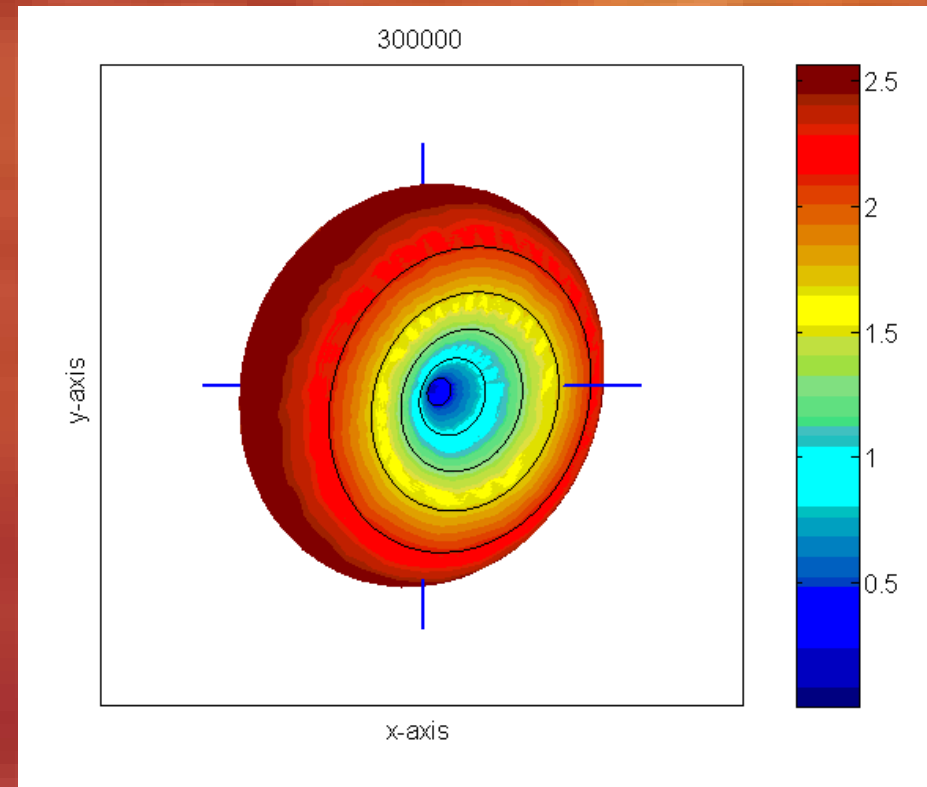
$$G(\theta, \varphi) = \frac{\langle S(\theta, \varphi, r) \rangle}{\frac{P}{4\pi r^2}}$$

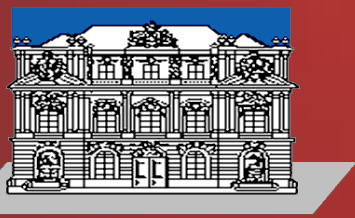


# Antennenparameter: 3D Power Pattern



- Ein dreidimensionales Diagramm des Powerpatterns eignet sich hervorragend zur Darstellung der Empfangsempfindlichkeit einer Antenne als Funktion der Einfallsrichtung der Strahlung.

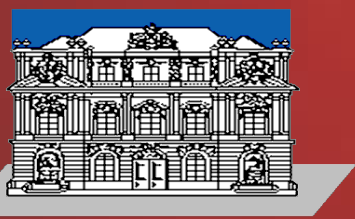




# Antennenparameter: Der effektive Höhenvektor



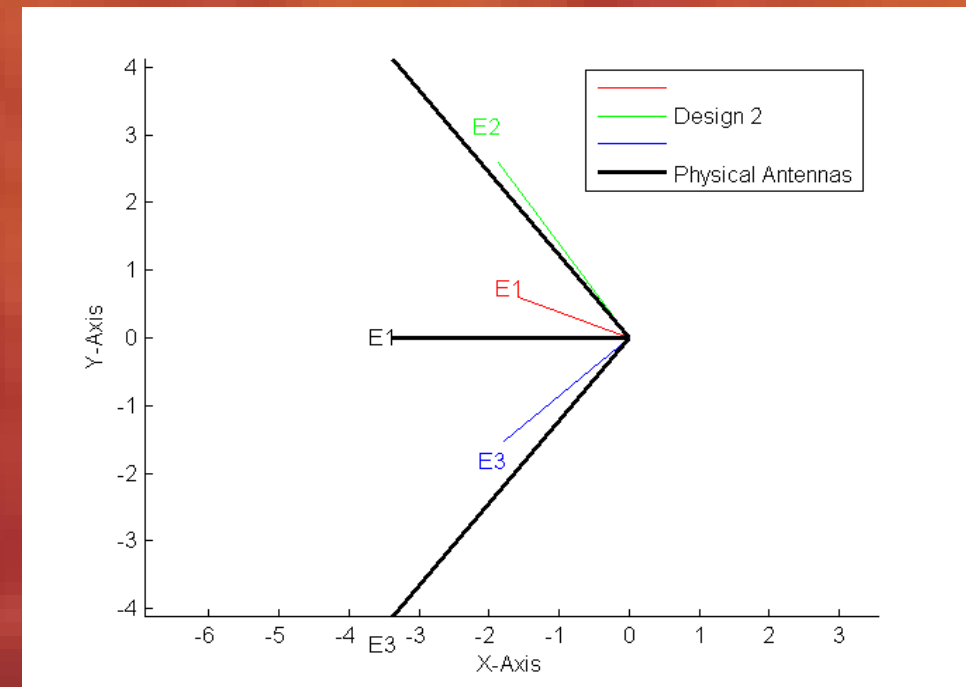
- Die Oberfläche einer Raumsonde ist immer aus leitendem Material.
- Daher verhält sich der Raumsondenkörper selber wie eine Antenne und beeinflusst die Antenneneigenschaften
- Der effektive Höhenvektor stellt eine Monopolantenne dar, die dem aktuellen Abstrahlungsverhalten entsprechen würde

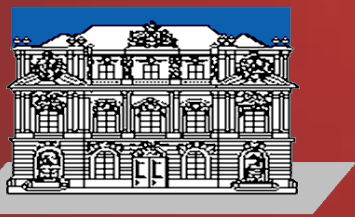


# Antennenparameter: Der effektive Höhenvektor



- Die Oberfläche einer Raumsonde ist meist sehr kompliziert, daher weicht die „elektrische Antenne“ oft stark von der physikalischen ab.
- Der effektive Höhenvektor beinhaltet die gesamte Information über den Einfluss des Raumsondenkörpers.
- Er eignet sich daher sehr gut zur Darstellung der Antenneneigenschaften.

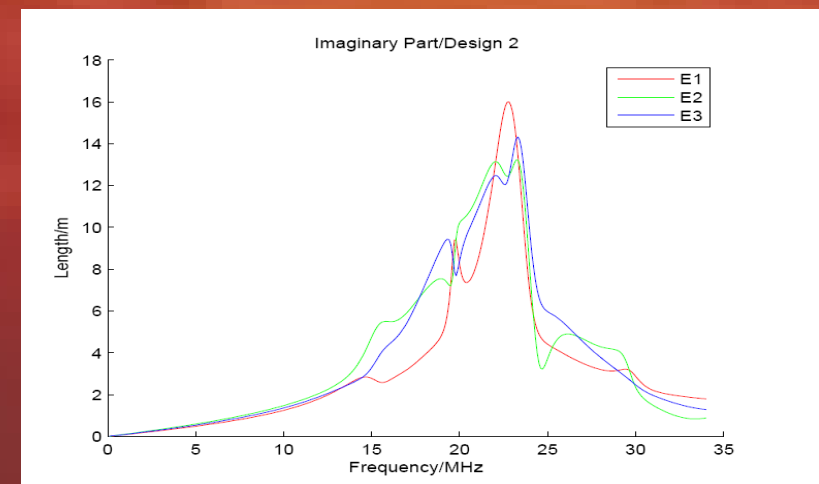
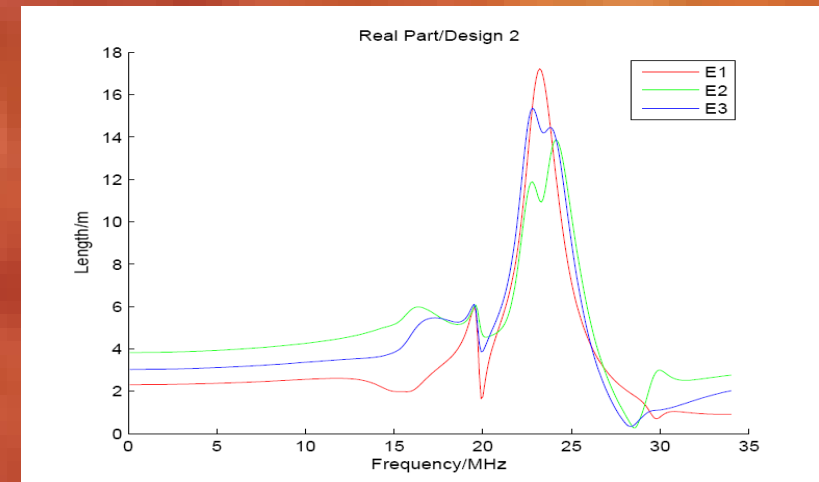


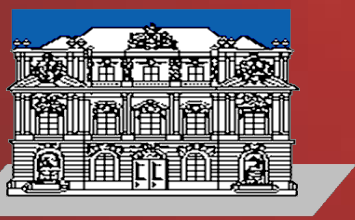


# Antennenparameter: Der effektive Höhenvektor



- Der effektive Höhenvektor ist im allgemeinen ein komplexer Vektor
- Im niederen Frequenzbereich, oft „quasi-static range“ genannt, tendiert der Imaginärteil gegen Null.

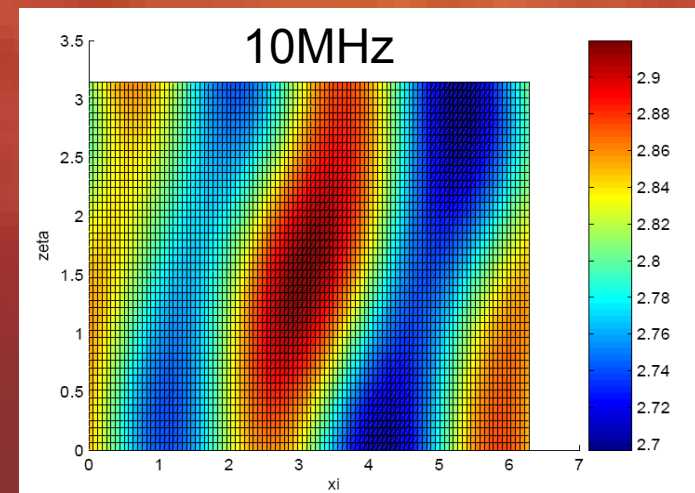
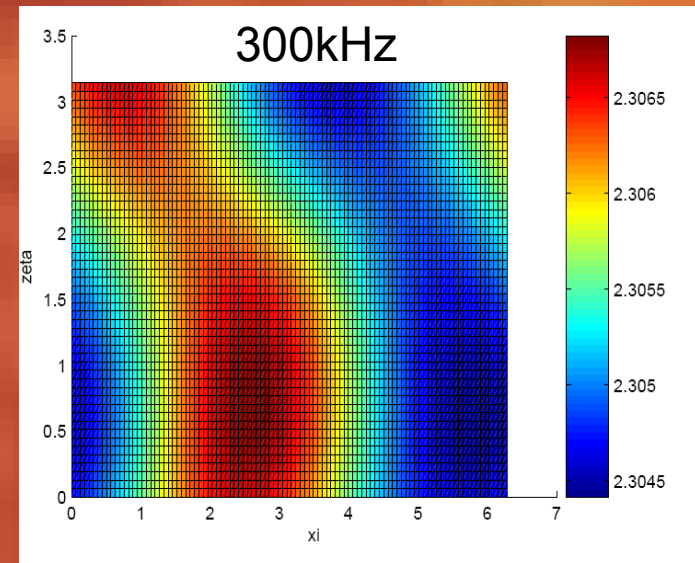


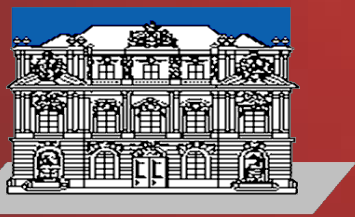


# Antennenparameter: Der effektive Höhenvektor



- Der effektive Höhenvektor ist im allgemeinen von der Einfallsrichtung der Welle abhängig
- Im niederen Frequenzbereich, oft „quasi-static range“ genannt, ist er annähernd konstant

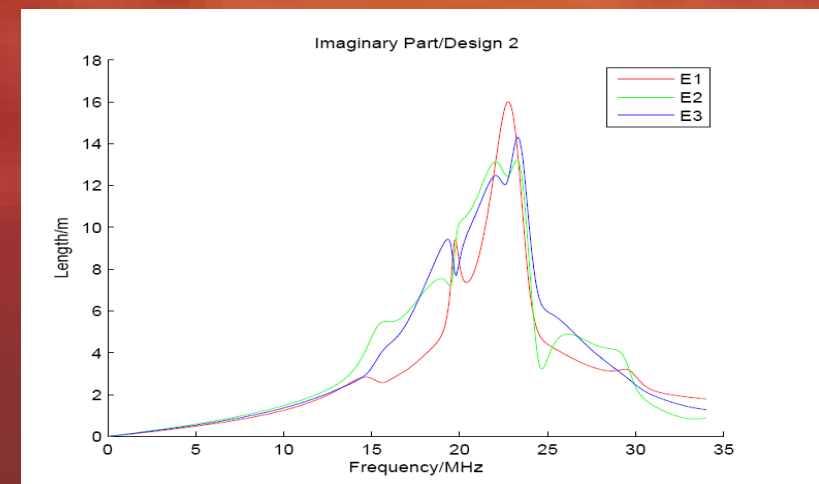
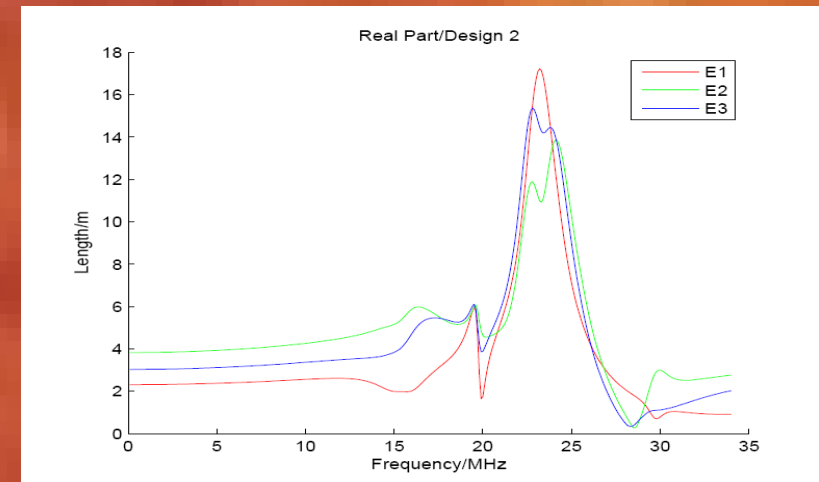




# Antennenparameter: Der effektive Höhenvektor



- Der effektive Höhenvektor ist im allgemeinen von der Frequenz abhängig
- Im niederen Frequenzbereich, oft „quasi-static range“ genannt, ist er nahezu konstant.







# Antennenimpedanz + Kapazität



- Die Antennenkapazität kann als die Fähigkeit eines Körpers, sich aufzuladen, beschrieben werden.
- Diese Fähigkeit bildet einen frequenzabhängigen Widerstand gegen den Stromfluss, die Impedanz.
- Die Antennenimpedanz ist eine komplexe Grösse

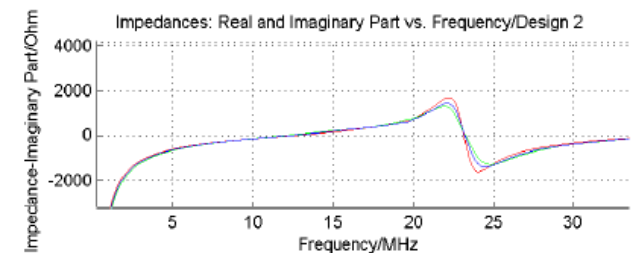
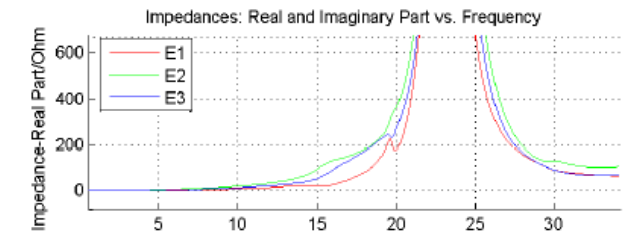
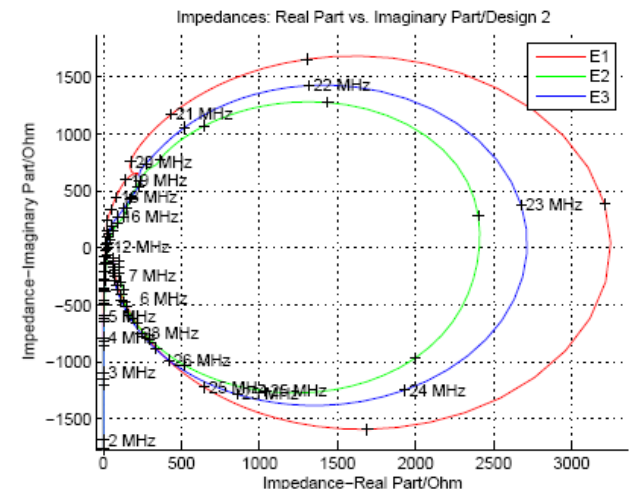
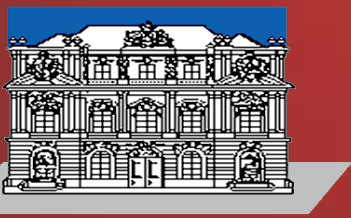


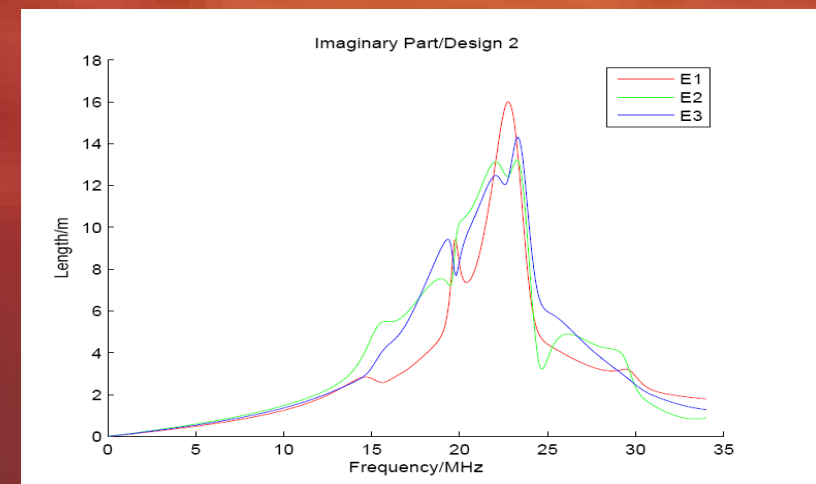
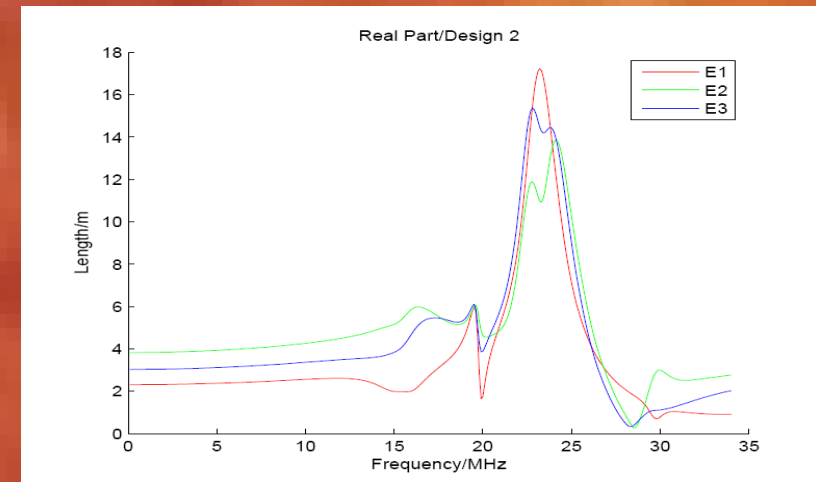
Figure 46: Impedances of Design 2

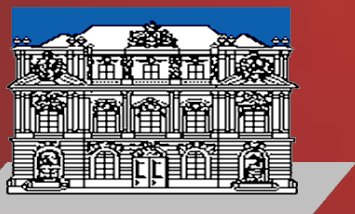




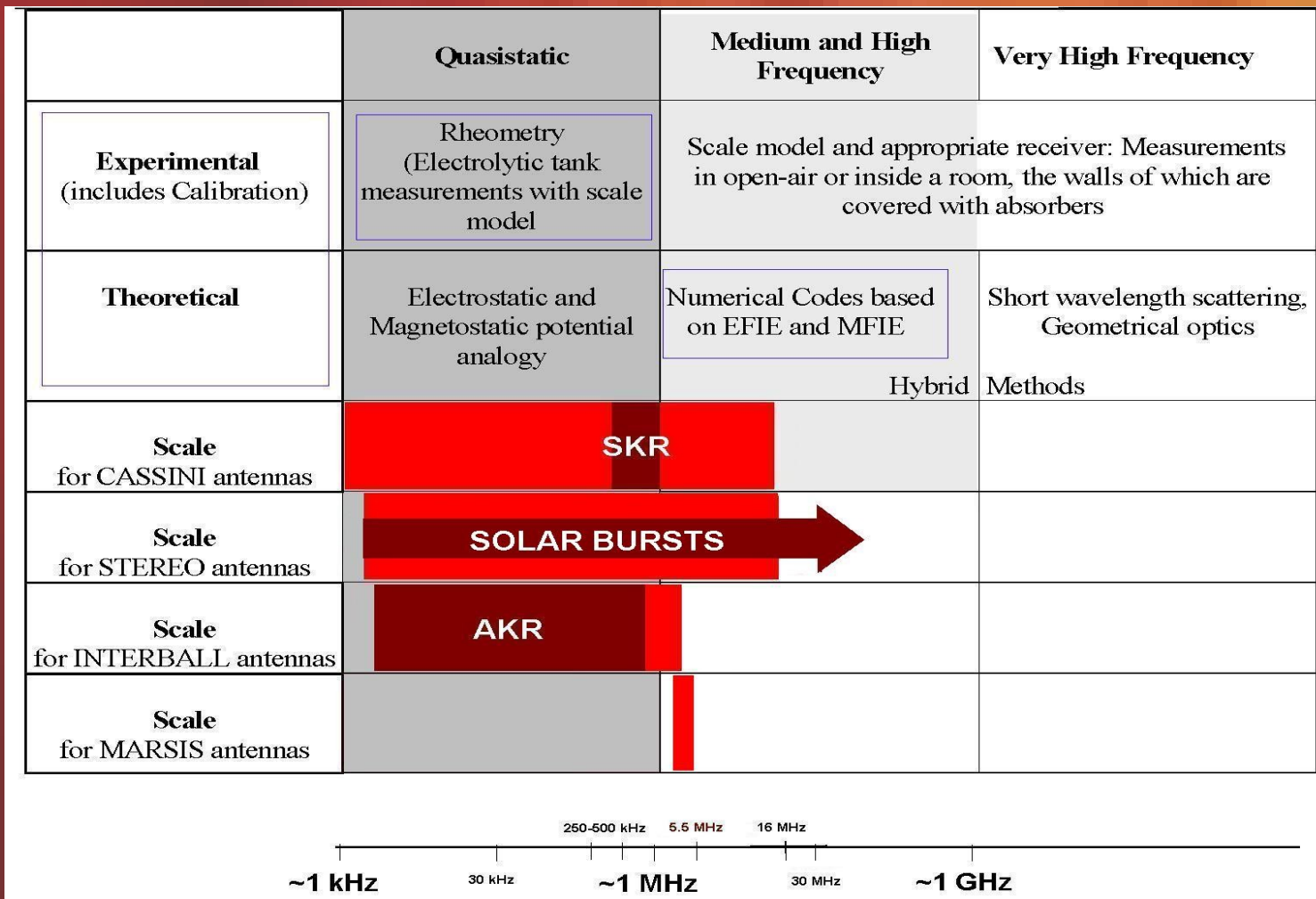
# Resonanz

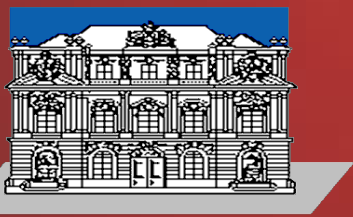
- Wenn die effektive Länge der Antenne einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entspricht, kommt es zu einer Resonanz.
- Die Impedanz ist dann reell und der Widerstand gegen den Stromfluss sehr gering.
- Dies entspricht einer grossen Empfindlichkeit der Antenne und damit einer grossen effektiven Länge.





# Frequenzbereiche

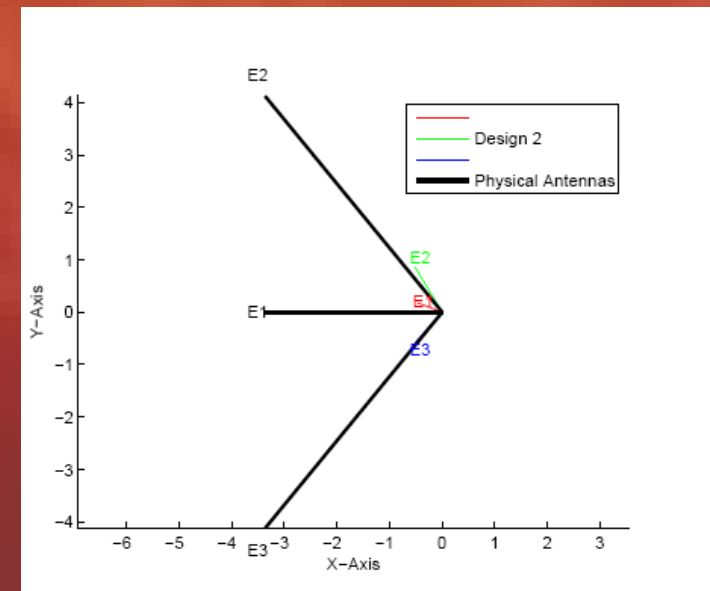
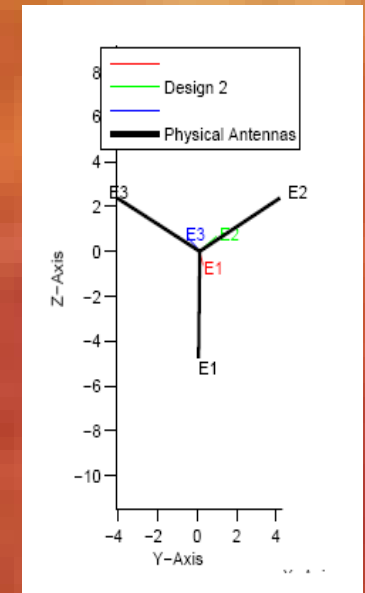
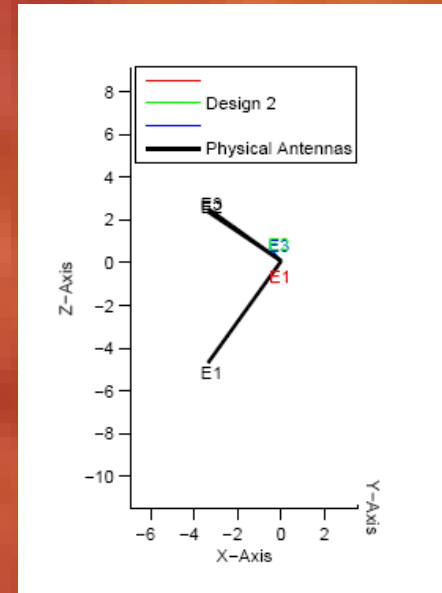


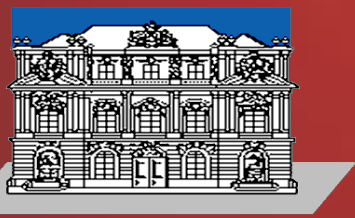


# Bestimmen der Antennenparameter



- Durch den Komplexen Einfluss des Raumsondenkörpers weichen Die Eigenschaften der realen Antennen oft erheblich von den theoretischen ab
- Dies macht eine Bestimmung der Antennenparameter notwendig

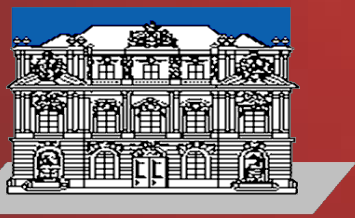




# Bestimmen der Antennenparameter: Methoden



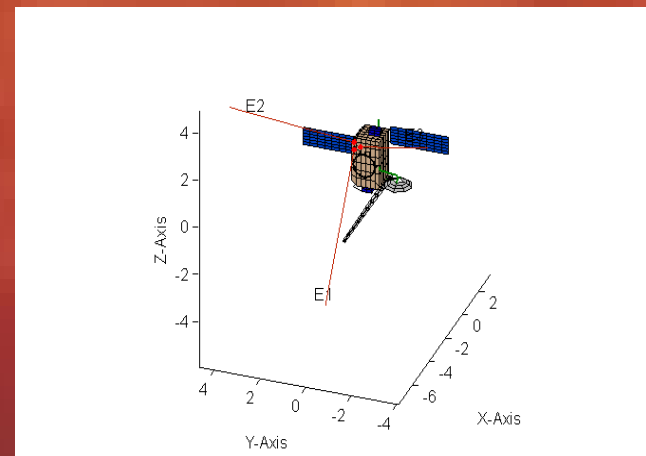
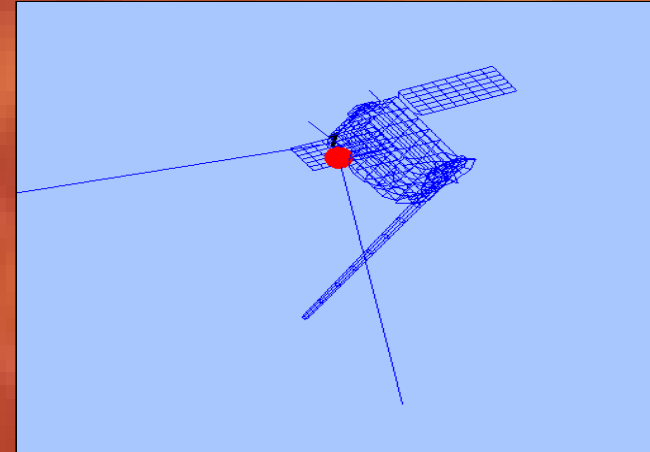
- 1) Numerische  
Berechnung
- 2) Experimentelle  
Methode (Rheometrie)
- 3) EMC Chamber
- 4) In-flight calibration

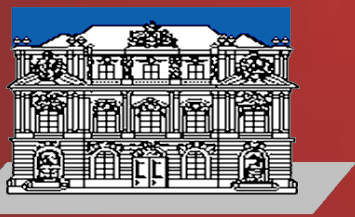


# Numerische Berechnung: Wire-grid Modelling



- Beim Wire-Grid Modelling wird die Raumsonde aus Drahtsegmenten modelliert.
- Anstatt der komplizierten Oberflächenströme werden nur Ströme entlang dieser Drahtsegmente berücksichtigt.
- Diese werden in einem ersten Schritt berechnet.
- Aus den Strömen kann man alle anderen Parameter leicht berechnen.

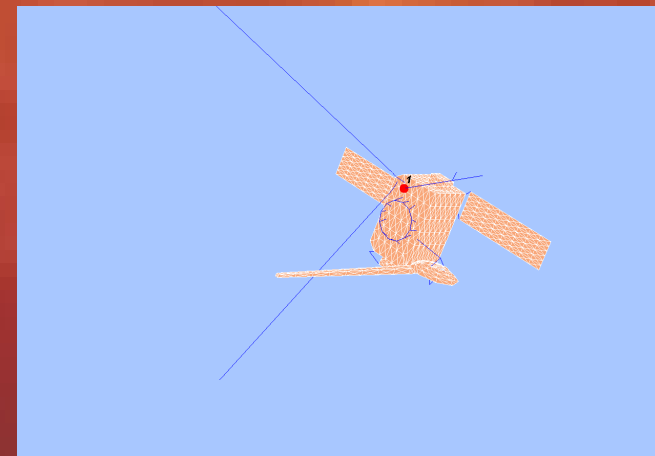
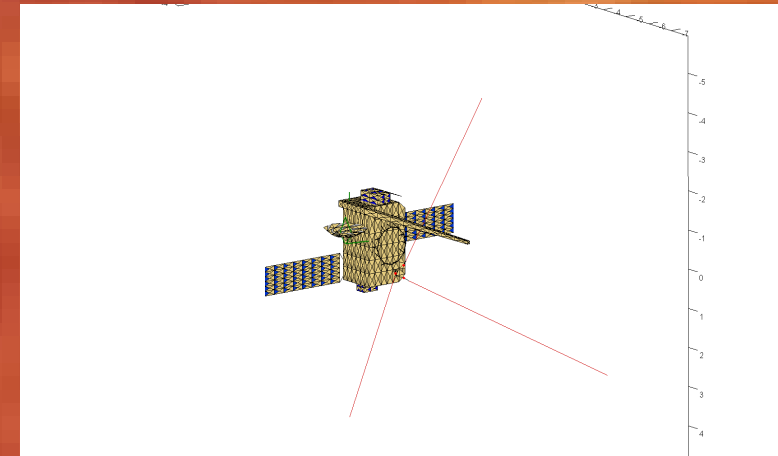




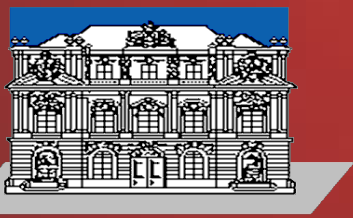
# Numerische Berechnung: Wire-grid Modelling



- Mit einem komplizierteren Formalismus können auch Flächen (Patches) statt den Drähten verwendet werden.
- Bei längerer Berechnungszeit ist die Genauigkeit grösser.
- Diese höhere Genauigkeit ist vor allem bei hohen Frequenzen von Vorteil.



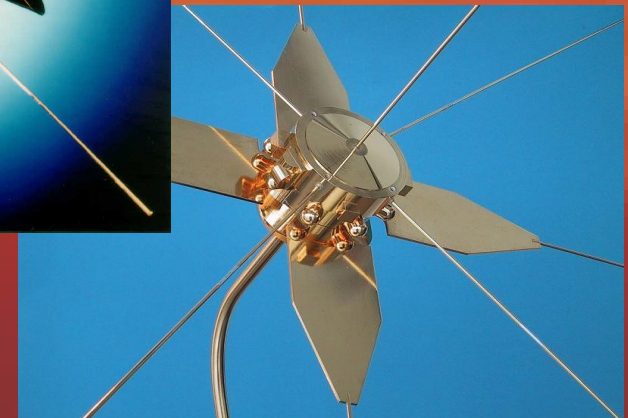
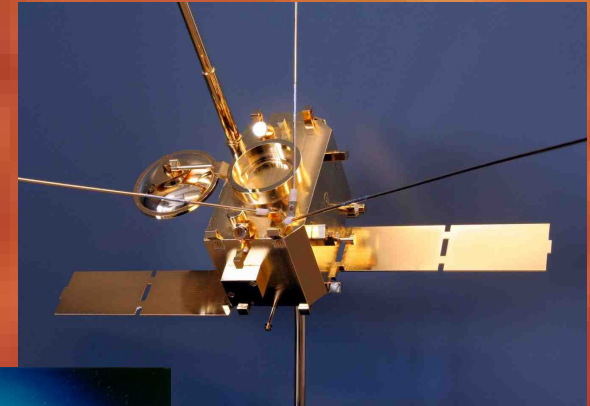




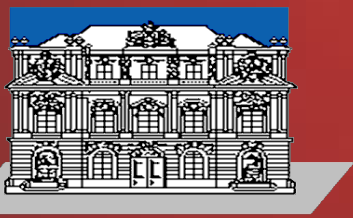
# Experimentelle Methode: Rheometrie



- Bei der Rheometrie wird ein detailliertes vergoldetes Modell der Raumsonde gebaut



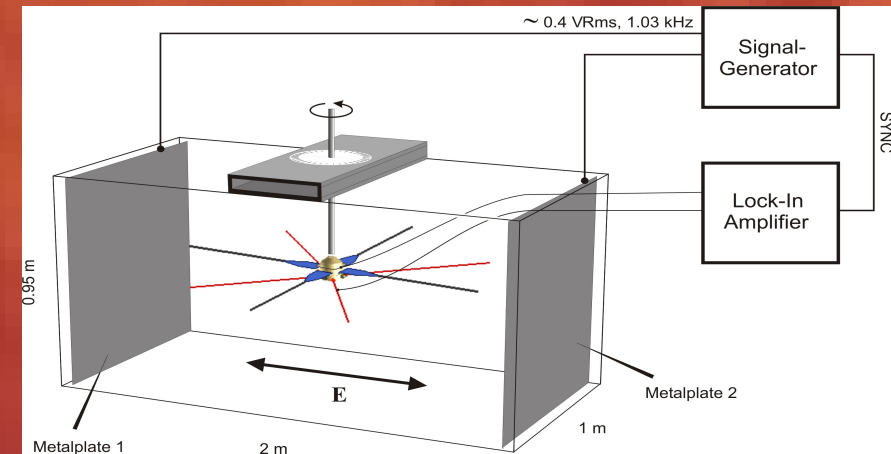


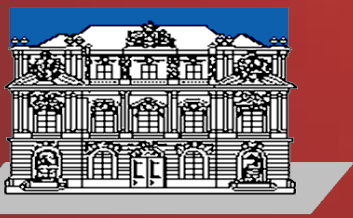


# Experimentelle Methode: Rheometrie



- Das Modell wird in einen Tank getaucht, der mit einem Elektrolyt gefüllt ist.
- An zwei Metallplatten am Tankende wird eine niederfrequente Wechselspannung angelegt.
- Das Modell wird im Tank gedreht und der Respons der Antennen als Funktion der Ausrichtung wird gemessen.

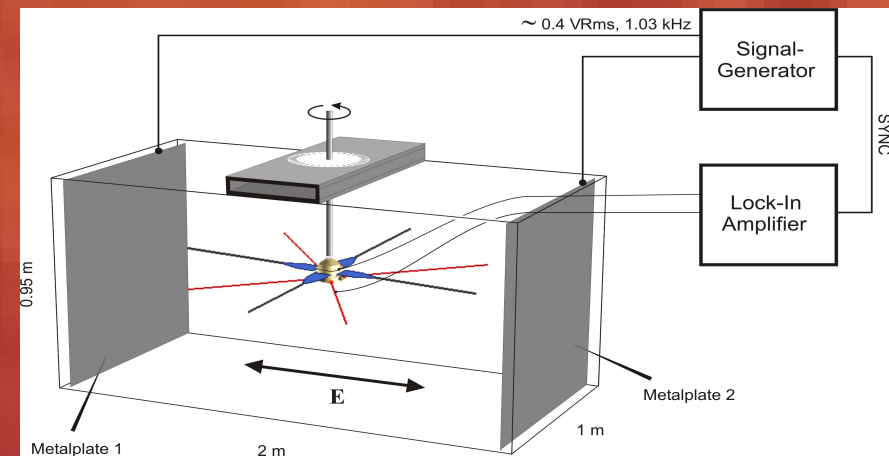


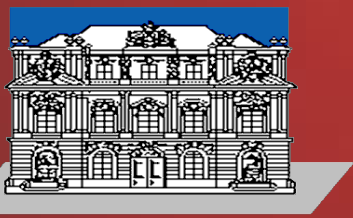


# Experimentelle Methode: Rheometrie



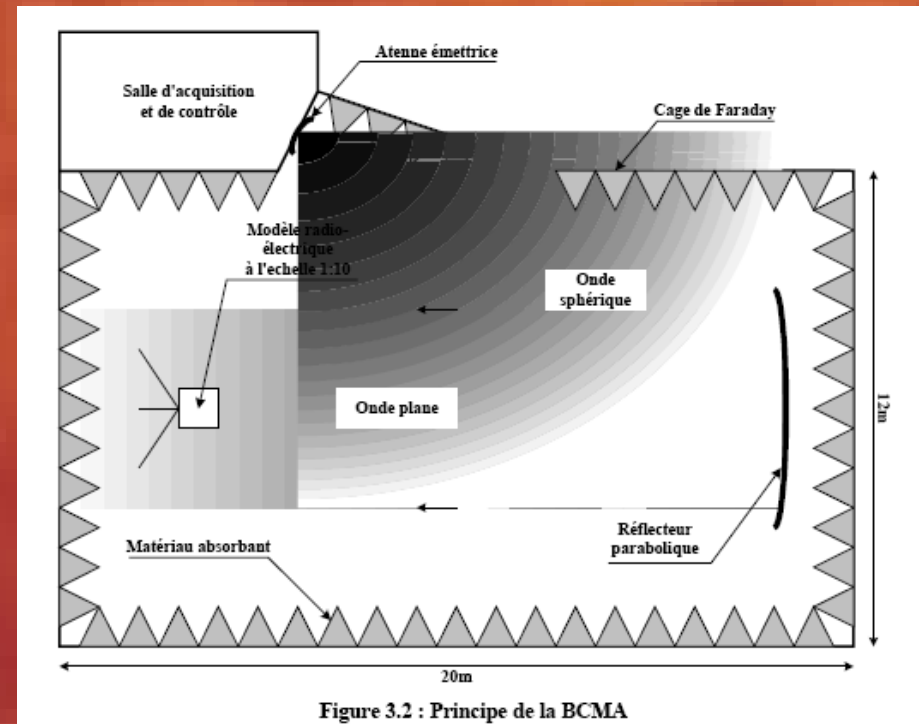
- Aus den Messergebnissen kann mit geometrische Argumenten auf die effektiven Längenvektoren und die Antennenimpedanzen/kapazitäten geschlossen werden.
- Die Ergebnisse entsprechen dem quasistatischen Grenzfall.

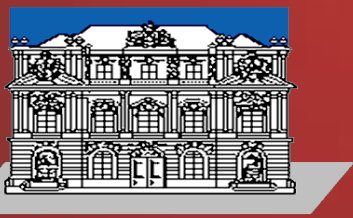




# EMC Chamber

- In der EMC (electromagnetic cleanliness) chamber wird ein Modell der Raumsonde mit kohärenter EM Strahlung beleuchtet.
- Es wird ebenfalls der Respons der Antennen auf die einfallende Strahlung gemessen.
- Es können allerdings verschiedene Frequenzen behandelt werden.

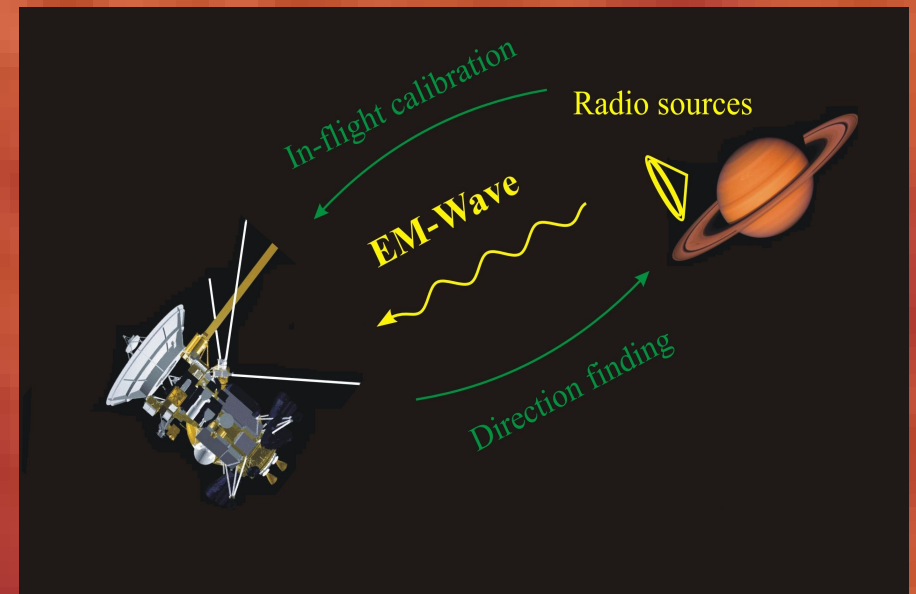


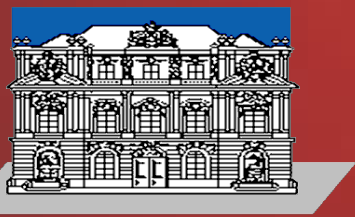


# In-flight Calibration

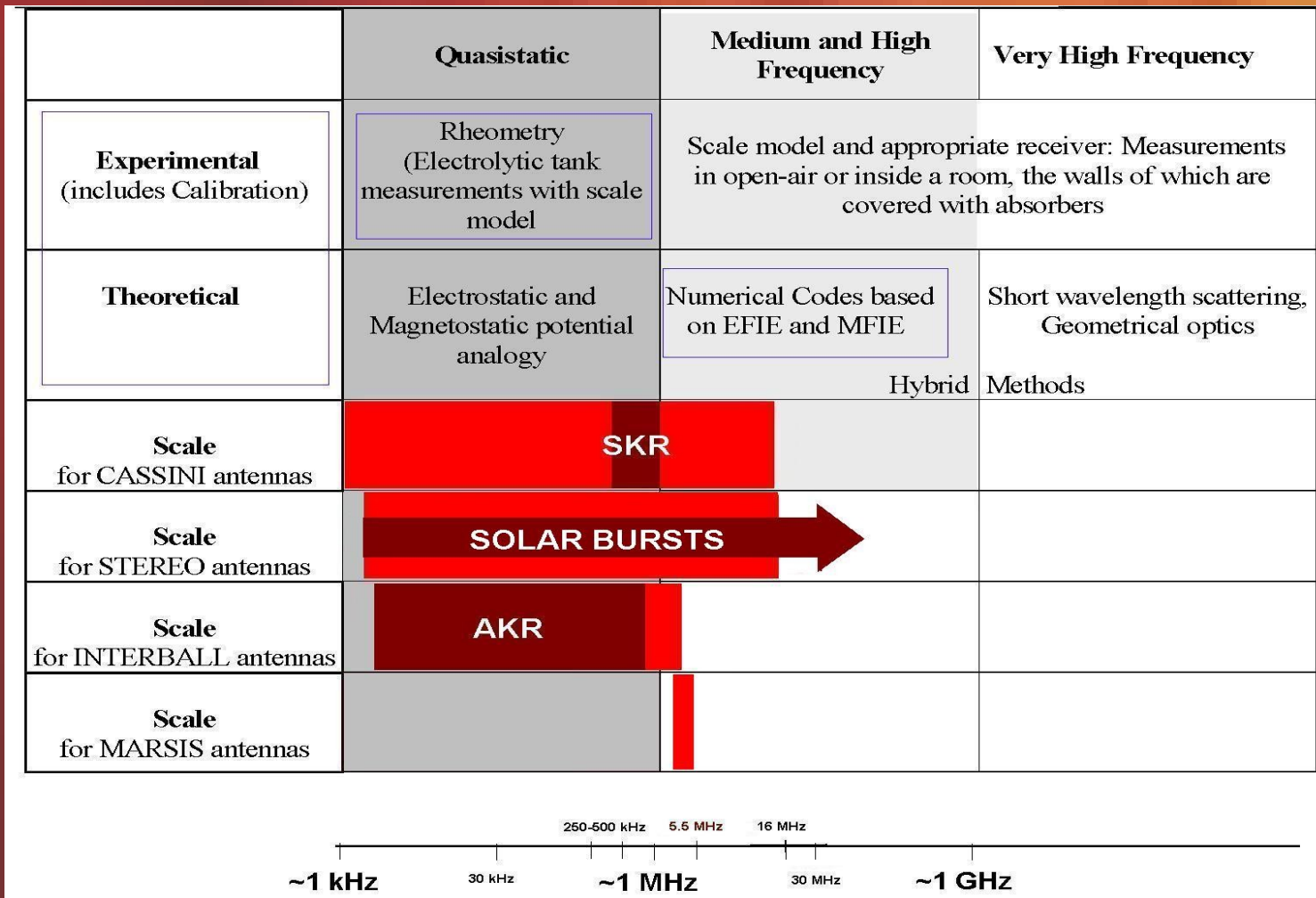


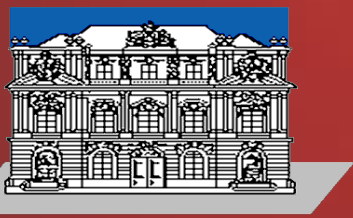
- Nach dem Start der Sonde kann eine künstliche oder natürliche Radioquelle, deren Intensität und Position bekannt ist, dazu verwendet werden, die echten Antennen zu kalibrieren.
- Idealerweise führt die Sonde dazu ein Rollmanöver durch.





# Frequenzbereiche

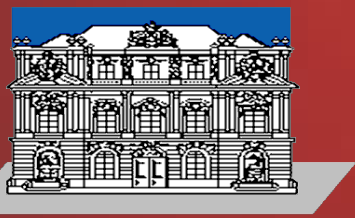




# Antennen in Plasma



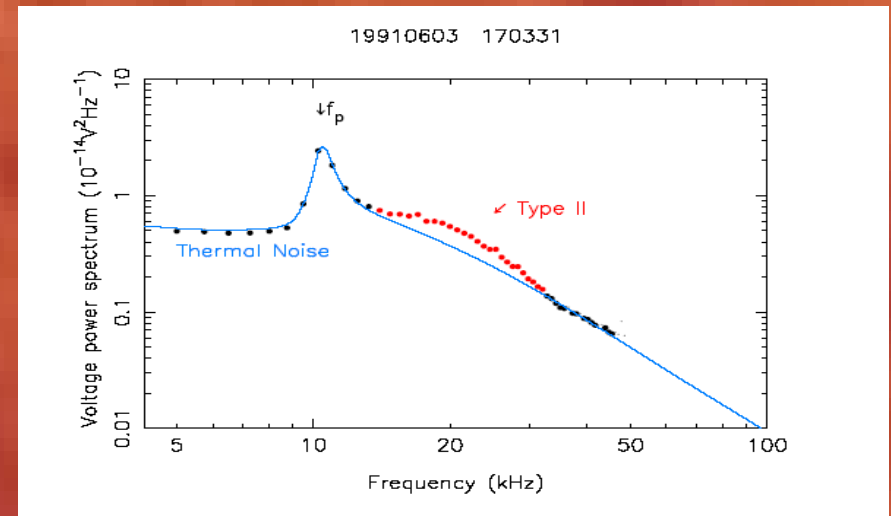
- Der Einfluss des Plasmas verändert die Empfangseigenschaften einer Antenne.
- In dem Frequenzbereich nahe der Plasmafrequenzen und der Gyrationfrequenzen kommt es zu einer Resonanzerscheinung.
- Die Plasmafrequenz einer Teilchenspezies entspricht der Frequenz der thermischen Schwingung, ist also von der kinetische Temperatur, wie auch von der Masse und Dichte der Teilchen abhängig.

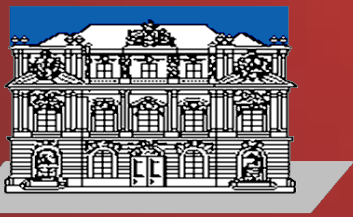


# Quasithermal Noise Spectroscopy



- Die thermische Bewegung der Plasmateilchen manifestiert sich in den elektrostatischen Langmuir-Wellen die mit der jeweiligen Plasmafrequenz schwingen.
- Diese Wellen werden von der Antenne empfangen
- Die Form des Spektrogramms gibt Aufschluss über Plasmadichte und Plasmatemperatur.





Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit