Temperatur- und Dichtemessung von Plasmen

Mit Schwerpunkt auf:

Elektron-Zyklotron-Emission (ECE), Langmuir-Sonde, Interferometrie, Reflektometrie

05.07.2011

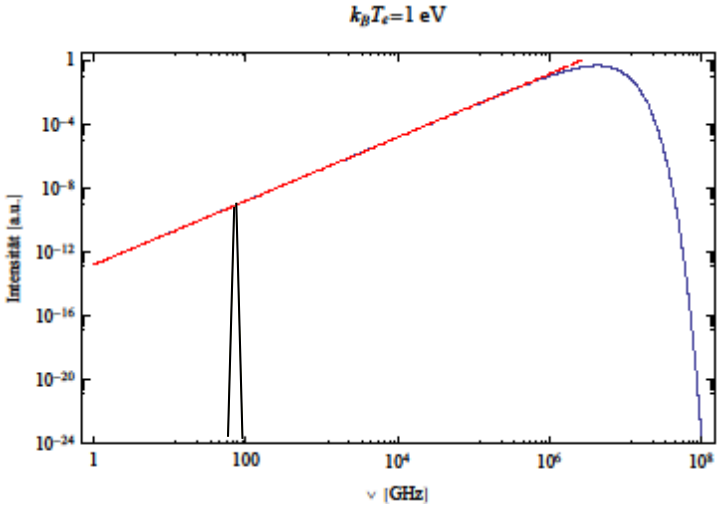
Gliederung

- Passive Strahlungsmessung
  - Elektron-Zyklotron-Emission (ECE)
- Aktive Strahlungsmessung
  - Interferometrie
  - Reflektometrie
- Teilchenmessung
  - Langmuir-Sonde
- Zusammenfassung

Mit dem Plankschen-Strahlungsgesetz

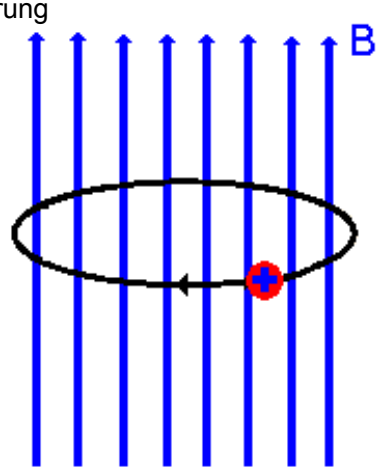
TEMPERATUR MESSEN

Passive Strahlungsmessung



Blau: Plancksches Strahlungsgesetz; Rot: Rayleigh-Jean Näherung

- Von der Schwarzkörperstrahlung wird auf die Temperatur geschlossen
- Ein optisch dichtes Plasma im lokalen Strahlungsgleichgewicht ist ähnlich einem Schwarzkörper
- Optische Dichte $\tau >> 1$



- Für die Zyklotronfrequenz ist das Plasma optisch dicht
- Die Temperatur ergibt sich aus der bei der Zyklotronfrequenz gemessenen Intensität mittels Rayleigh-Jean-Näherung

[Int1]

Örtliche Auflösung der Temperatur

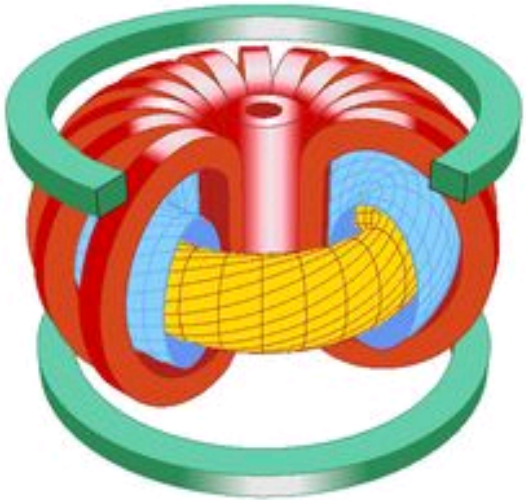
$$\omega_c = e\ B/m_e$$

$$B_t(R) \propto 1/R$$

$$I = \frac{\omega^2}{8\pi^3 c^2} k T_{rad}$$

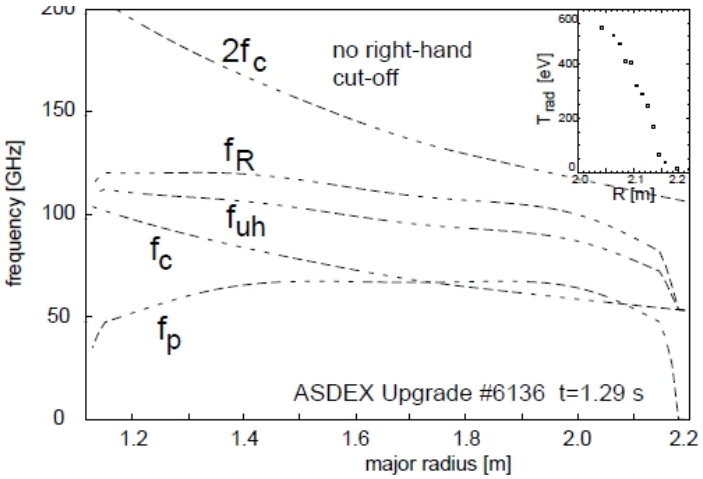
$$\frac{T_{rad}}{T_e} = \frac{I}{I_{BB}} = \frac{1 - e^{-\tau}}{1 - R_w e^{-\tau}}$$

- Bei der Zyklotronfrequenz ist das Plasma optisch dicht
- Die Zyklotronfrequenz ist aufgrund der Torusform radial abhängig
- Ortsauflösung ist durch Frequenzanalyse möglich

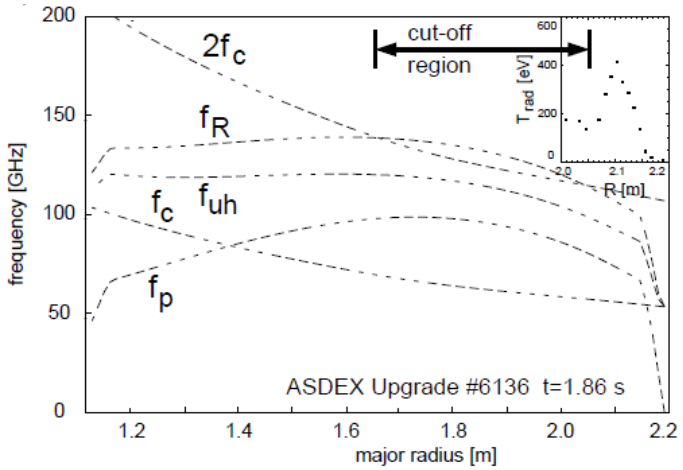


[Int3]

Cut-Off



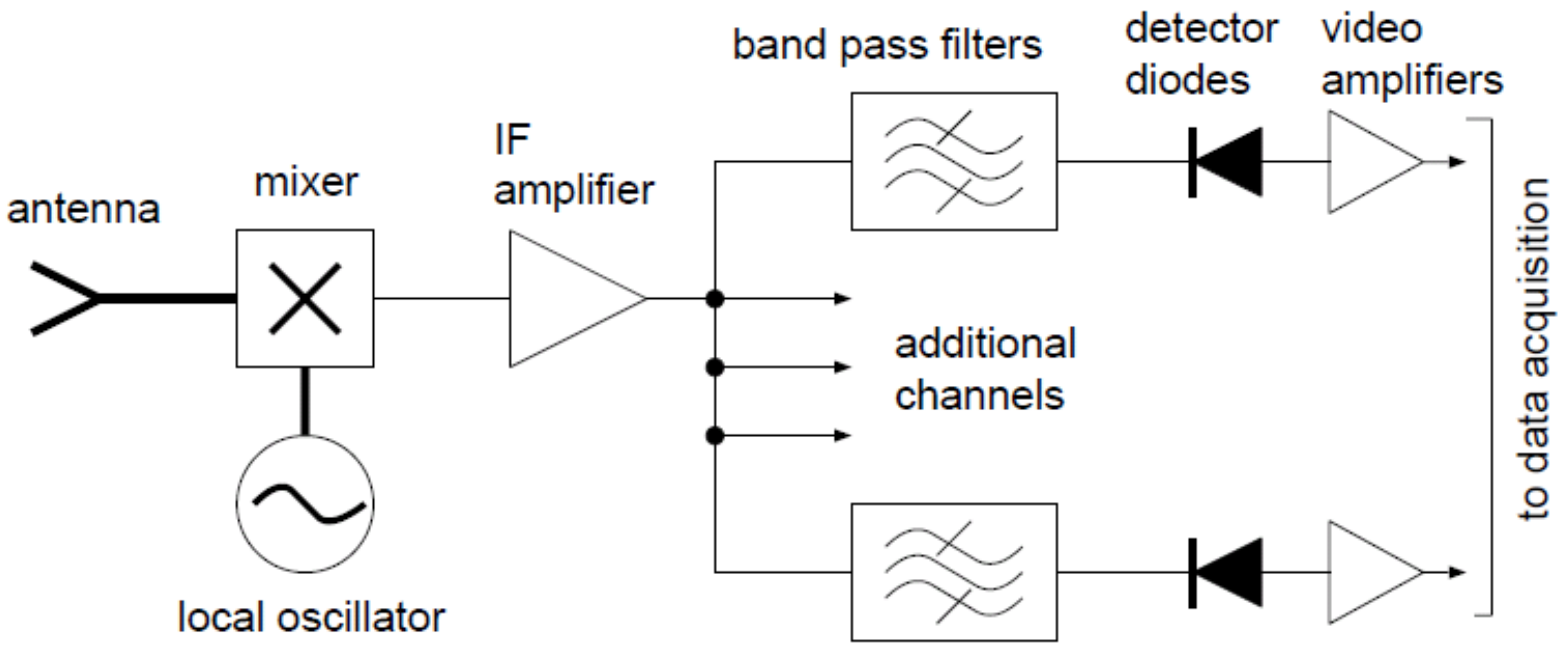
Kein Cut-Off der 2. harmonischen X-Mode [Sc2]



Cut-Off der 2. harmonischen X-Mode [Sc2]

- Für O-Moden (E parallel zu B): Plasmafrequenz (p) untere Grenze
- Für X-Moden (E senkrecht zu B): Zwischen rechtshändiger Cut-Off (R) und obere Hybrid Frequenz (uh) und unterhalb von linksh. Cut-Off keine Transmission
- Obere Schranke für die Dichte n_e beim Cut-Off der 2. harmonischen X-Mode
- Untere Schranke für die Dichte n_e sobald die optische Dichte $\tau = \int \alpha(r)dr$ zu klein ist

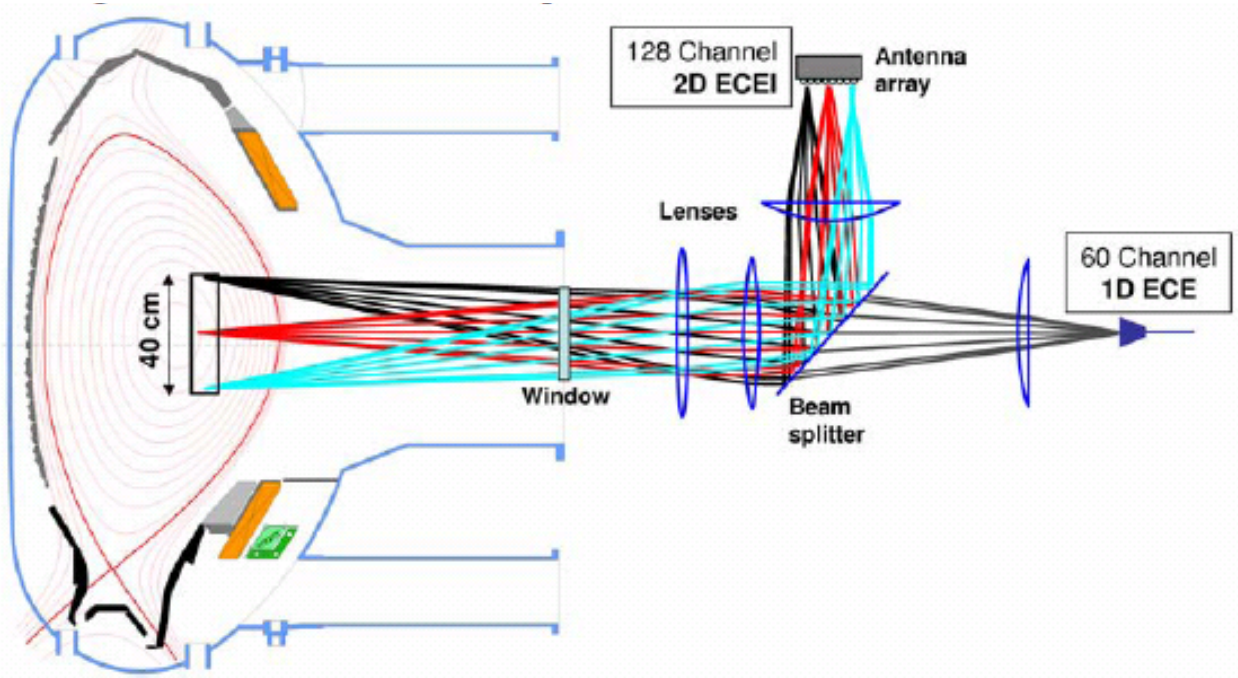
Signalauswertung eines heterodyn Radiometers



Schema der Signalanalyse eines heterodyn Radiometers zur ECE Messung [Su1]

- Die Spektralanalyse einer Antenne löst die Temperatur radial auf, indem einzelne Frequenzbänder selektiert werden
- Array aus 16 Antennen ermöglicht die 2. Dimension (z-Achse)

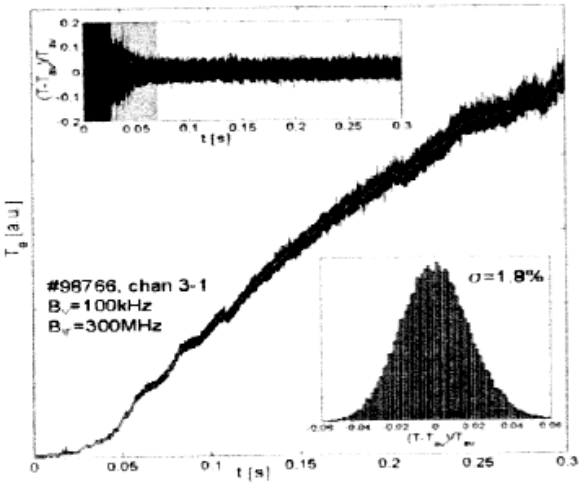
Technische Umsetzung im ASDEX Upgrade



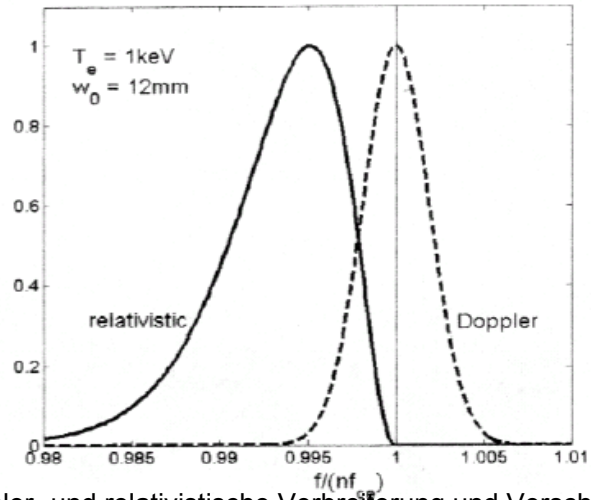
Querschnitt des Tokamak (ASDEX Upgade) [Cl2]

- Durch eine Spiegeloptik werden die Strahlen auf das Array projiziert
- Die Breite des Antennenarray gibt die z-Ausdehnung und die Breite des Frequenzspektrums das R-Intervall vor

Messgenauigkeit



Thermisches Rauschen [Cl1]

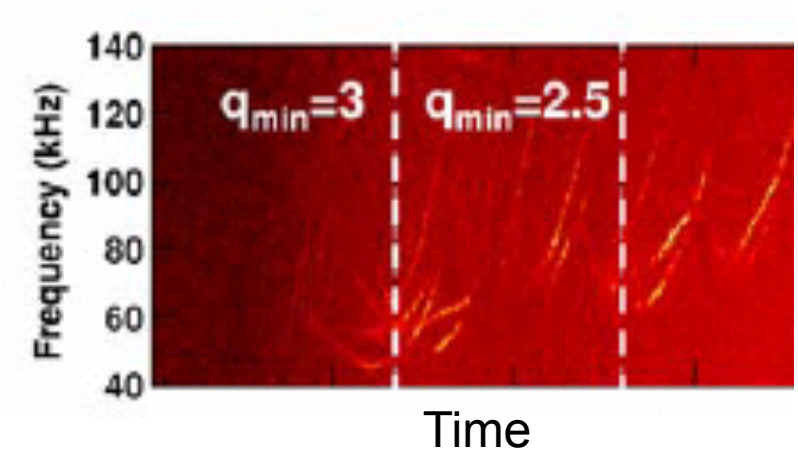


Doppler- und relativistische Verbreiterung und Verschiebung [Cl1]

- Thermisches Rauschen wird vergrößert durch
  - größere Videobandbreite (verbesserte Zeitauflösung)
  - verkleinertes Frequenzband (verbesserte Ortsauflösung)
- Ortsunschärfe wegen
  - Doppler-Verbreiterung
  - relativistischer Verbreiterung
  - relativistischer Verschiebung
  - optischer Dichte des Plasmas

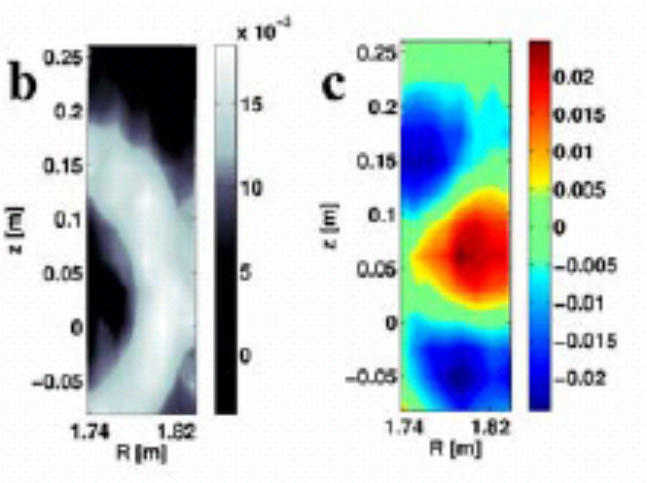
  → Resorption

Messergebnisse von ASDEX Upgrade



- Relatives Temperaturrauschen ungefähr 3 %
- Relative Alfven-Wellen Amplitude 1 %
- Mit Fourier- und singular value decomposition (SVD) Filtern wird das Signal aus dem Rauschen aufgelöst

[Cl2]



- Das Frequenzspektrum einer Antenne im zeitlichen Verlauf (oben)
- Relative Temperaturschwankung (links) und Phasenänderung (rechts) für einen Zeitpunkt von RSAE

Aufnahme von reversed shear Alfven Eigenmoden mit ECEI [Cl2]

Dichtebestimmung durch

AKTIVE STRAHLUNGSMESSUNG

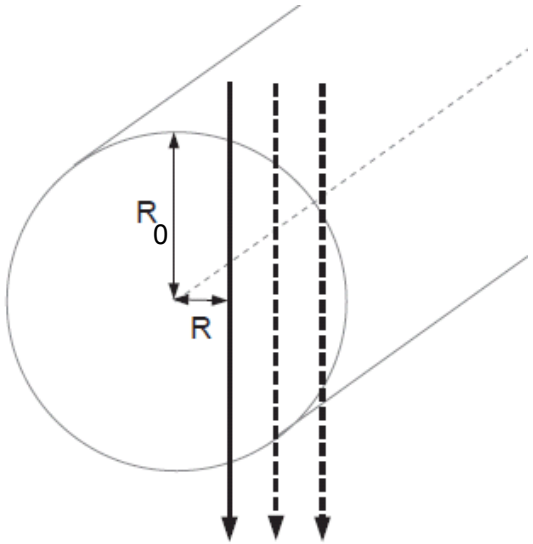
Auswertung der Phasenmessung

$$N = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{1/2}$$

$$N = \left(1 - \frac{n}{n_c}\right)^{1/2}$$

$$\varphi(R) = \frac{2\pi}{\lambda n_c} \int_R^{R_0} \frac{n(r)}{(r^2 - R^2)^{1/2}} r \, dr$$

- Brechungsindex ist abhängig von der Plasmadichte
- Messung der Phasenmodulation durch den Brechungsindex des Plasma *N*<1
- Folgerung auf die Dichte *n*



[Fan]

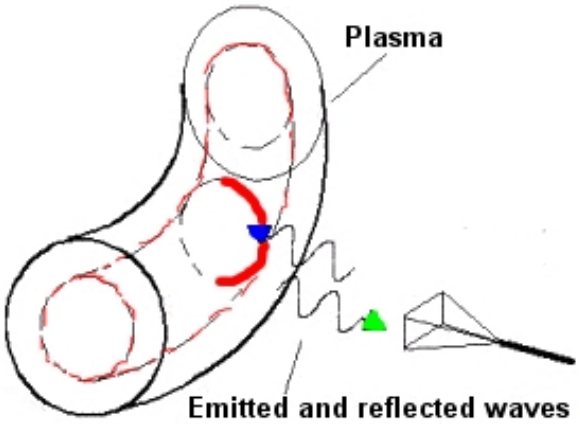
- Die Messung integriert die Dichte

$$n = \frac{1}{L} \int_0^L n(l) \, dl$$

- Mit Abel-Inversion und Symmetrie-ausnutzung

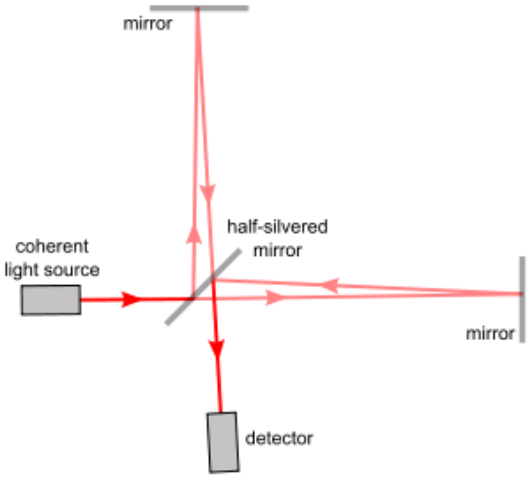
$$n(r) = \frac{-\lambda n_c}{\pi^2} \int_r^{R_0} \frac{d\varphi(R)}{dR} \frac{dR}{(R^2 - r^2)^{1/2}}$$

Reflexion bei der Cut-Off Dichte



Reflektion von GHz-Wellen an der kritischen Schicht [Int4]

- Unter der Plasmafrequenz kann eine elektromagnetische Welle nicht das Plasma durchdringen
- Eine EM-Welle wird an der Schicht, bei der die Dichte für gegebene Frequenz kritisch wird, reflektiert



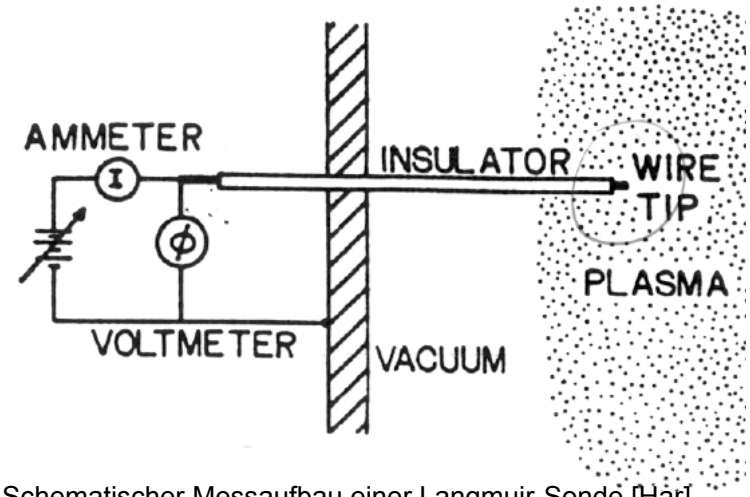
[Int2]

- Die kritische Schicht bildet den beweglichen Spiegel eines Michelson-Interferometers
- Durch Frequenzmodulation wird das Plasma abgetastet
- Mit Frequenzen von einigen 10 GHz

Dichte und Temperatur aus

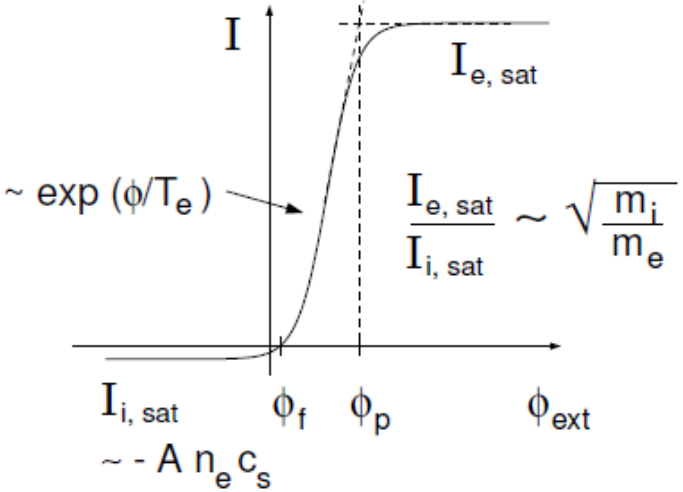
TEILCHENMESSUNG

Information aus der Strom-Spannungs-Kennlinie



Schematischer Messaufbau einer Langmuir-Sonde [Har]

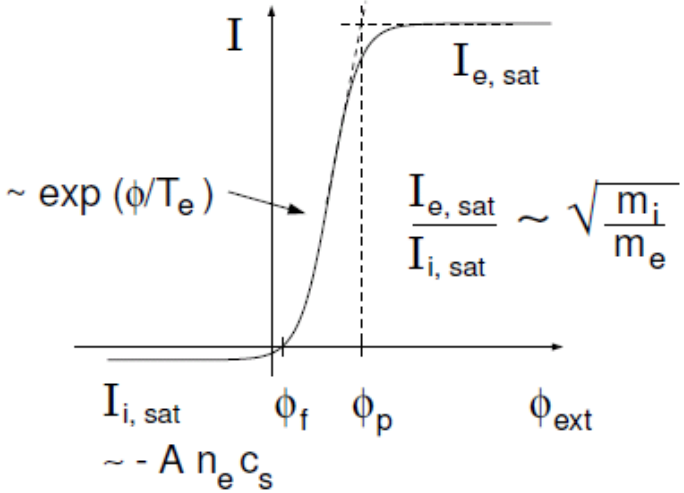
- Eine Elektrode wird in die Randschicht des Plasmas eingebracht
- Der Strom und das Potential gegenüber der Wand werden gemessen



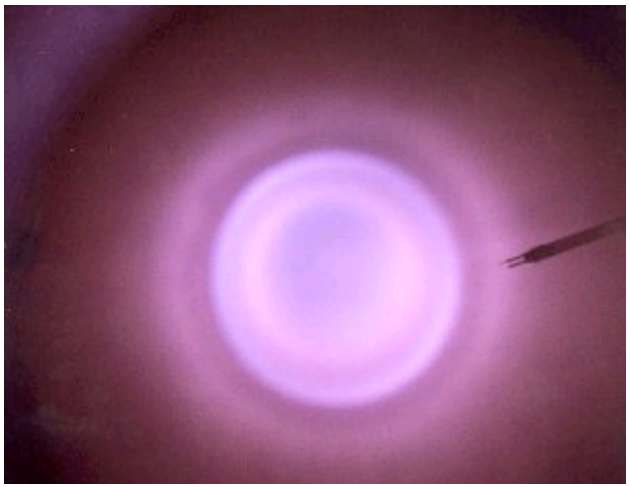
Theoretische Strom-Spannungs-Kennlinie einer Langmuir-Sonde [Bar]

- Die Ionen werden für negative Spannung, die Elektronen für positive angesaugt
- Die Temperatur erschließt sich aus der Steigung des Übergangsbereichs

Bestimmbare Plasmagrößen



Theoretische Strom-Spannungs-Kennlinie [Bar]



Langmuir-Sonde [Int6]

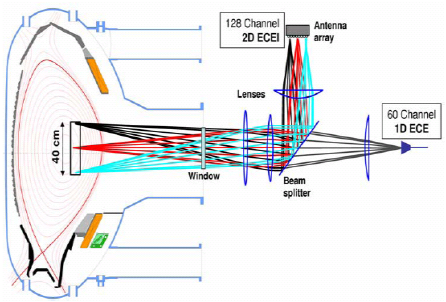
- Elektronendichte
  - aus dem Elektronen- bzw. Ionen-sättigungsstrom
- Elektronentemperatur
  - aus der Steigung der logarithmierten Kennlinie
- Energieverteilungsfunktion der Elektronen
  - aus der Krümmung der Kennlinie
- Plasmapotential

- Bei angelegtem B-Feld ist die Auswertung ähnlich

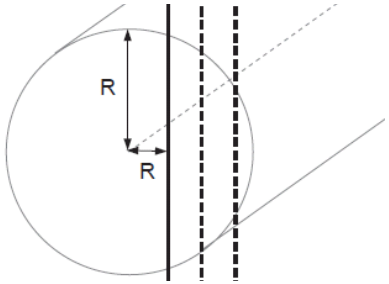
Temperatur- und Dichtemessung

ZUSAMMENFASSUNG

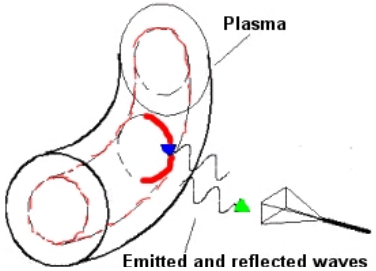
Zusammenfassung



- Mittels **ECE-Imaging** kann ein 2dim
- Temperaturprofil, mit hoher Zeit- und Ortsauflösung erstellt werden
- Zyklotronfrequenz trägt die Information



- **Interferometrie** ist eine kontaktfreie Messmethode
- Die ermittelte Dichte ist ein Integral über den Lichtweg
- Abel-Inversion → Dichteprofil



- Die **Reflektometrie** nutzt die Reflexion an der Cut-Off Schicht um ein Dichteprofil des Plasmas zu erstellen

- Die **Langmuir-Sonde** gibt Temperatur, Dichte und Plasmapotential der Randschicht an
- Die Sonde ist in Kontakt mit dem Plasma

Quellen

[Dux] R. Dux: „Plasmaphysik und Fusionsforschung II", SS 2002

[Fan] U. Fantz: „Beschreibung Praktikumsversuch: Plasmainterferometrie"

[Su1] W. Suttrop, et al.: „Electron Cyclotron Emission Plasma Diagnostics"

[Su2] W. Suttrop, et al.: „Practical Limitations to Plasma Edge Electron Temperature Measurements by Radiometry of Electron Cyclotron Emission", 1997

[Har] H.J. Hartfuß: „Teilchen, passive Messung, Langmuir Sonde"

[Cl1] I. Classen, Auszug aus Doktorarbeit: „4 Electron Cyclotron Emission", 2007

[Cl2] I. Classen, et al.: „Investigation of fast particle driven instabilities by 2D ECE-Imaging on ASDEX Upgrade", 2011

[Bar] H. W. Bartels, et al,: „Summer University for Plasma Physics", 2004

Internetquellen:

[Int1] http://titan.triumf.ca/equipment/penning_trap/images/image003.png

[Int2] http://www.websters-online-dictionary.org/images/wiki/wikipedia/commons/thumb/e/e7/Interferometer.svg/300px-Interferometer.svg.png

[Int3] http://www.weltderphysik.de/_img/article_large/20081015_Tokamak_MPIfPlasmaphysik_rdax_240x240_80.jpg

[Int4] http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/physique/diagno17.jpg

[Int6] http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/plasmaphysiker/pix/Langmuirsonde.jpg

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT