

Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 Niederdruckentladungen
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.1.6 Plasma Strahler direkt
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.1 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

5.1 Überblick Diagnostik

Wertebereich der Plasmadiagnostik

5.1 Überblick Diagnostik

Die wichtigsten Plasmadiagnostik Verfahren

Aktive und passive Verfahren

Aktive Diagnostik	Passive Diagnostik
Sonden: elektrische Langmuirsonde Doppelsonde diamagnetische Sonde Leitfähigkeitssonde	
aktive Mikrowellendiagnostik: Interferometer Hohlraumresonatoren Faraday-Drehung Streuung	passive Mikrowellendiagnostik: Bremsstrahlung Schwarzkörperstrahlung
aktive optische Diagnostik: Interferometer Streuung laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	passive optische Diagnostik: Schwarzkörperstrahlung Linienstrahlung; absolut, relativ Doppler-, Starkverbreiterung Kalorimetrie
Elektronen-, Ionen-, Neutralstrahl-Diagnostik: Ladungsaustauschanalysator	Teilchendiagnostik: Massenspektrometrie Teilchensammler Flugzeitspektroskopie

5.1 Überblick Diagnostik

Plasmadiagnostik Verfahren

Orts –und Zeitauflösung

Meß- verfahren	Plasma- kenn- größen	Auflösung		Vorteile, Kosten	Nachteile
		Ort	Zeit		
Langmuir- Sonde	n_e, n_i, T_e	1mm	10s	sehr einfach, preiswert;	Störung des Plasmas; Magnetfeld ! Chemie ! Hitze !
Doppel- sonde	n_e, T_e	1mm	10s	sehr einfach, preiswert, kein Bezugspunkt; Magnetfeld erlaubt	Störung des Plasmas; Chemie ! Hitze !
Mikro- wellen- Inter- ferometer	n_e, v_{en}	20mm	< 1ms	für dünne Plasmen, keine Störung; Mikrowellen- ausrüstung !	nicht für kleine Plasmen; Vorsicht bei Magnetfeldern
Mikro- wellen- resonator	n_e, v_{en}	10mm	1ms	für kleine, dünne Plasmen; Mikro- wellenausrüstung !	nicht für große, nicht für dichte Plasmen
Faraday- Effekt	n_e, B_0	20mm	1s	berührungslose Mag- netfeldmessung im Plasmannern; Mikro- wellenausrüstung !	nur mit Magnetfeld; Messung des Produkts $B_0 \cdot n_e$

Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stoßprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

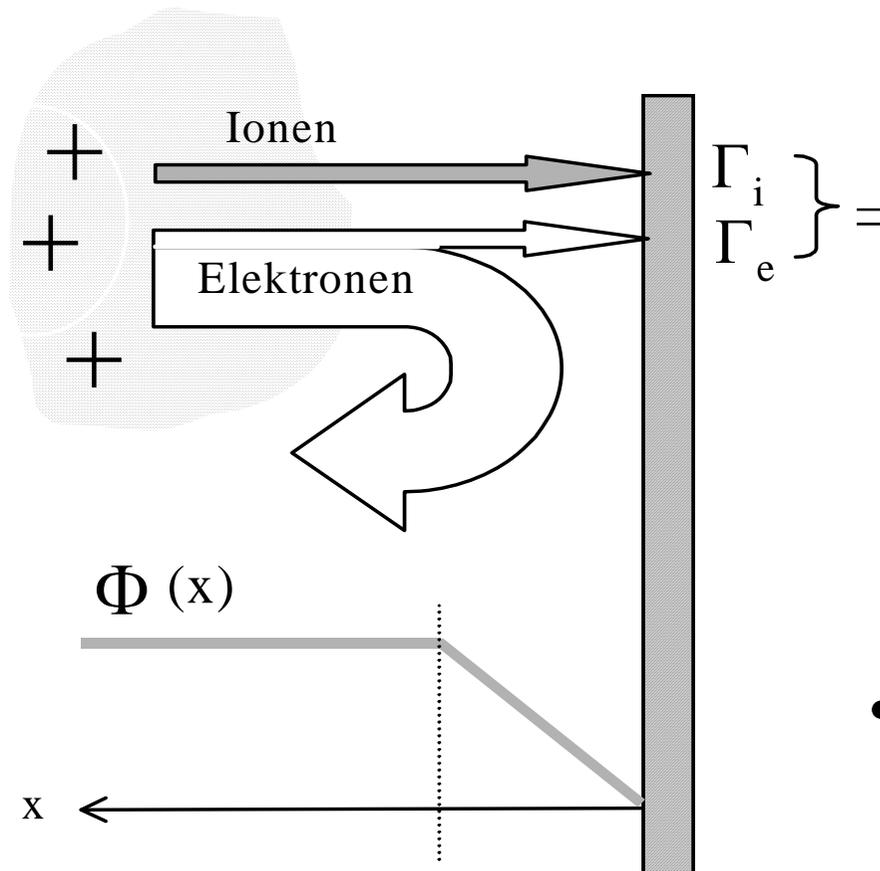
3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 Niederdruckentladungen
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.1.6 Plasma Strahler direkt
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.11 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

5.11 Plasma Randschicht

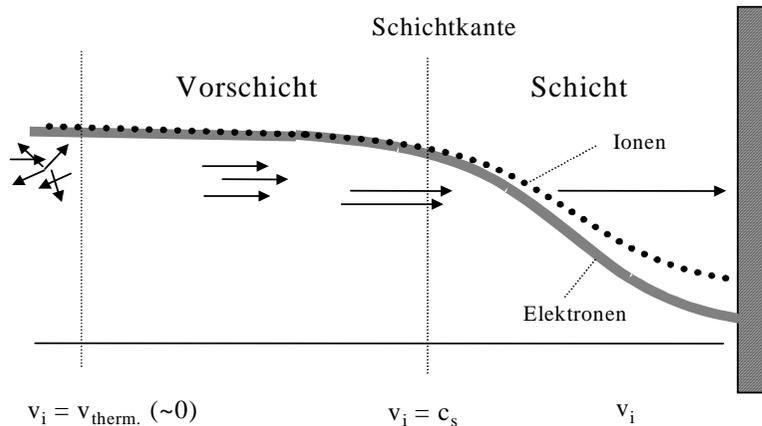
Einschub: Die Plasma-Randschicht



“Randschicht”
= einige
Debyelängen

- In Randschicht ist Plasma nicht mehr quasineutral!

5.11 Plasma Randschicht



Potentialabfall in der Vorschicht

BOHM-Geschwindigkeit

BOHM-Kriterium:

$$\Delta V_{\text{Bohm}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_B \cdot T_e}{e}$$

$$v_{\text{Bohm}} = \sqrt{\frac{k_B \cdot T_e}{m_+}}$$

$$\frac{m_+}{2} \cdot v_{\text{Bohm}}^2 \geq \frac{1}{2} \cdot k_B \cdot T_e$$

Aus der Ionisationsschicht müssen Ionen mindestens mit Schallgeschwindigkeit ausströmen!

Bohm-Kriterium:
$$c_s = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$$

Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 Niederdruckentladungen
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.11 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

5.2 Sondenmessungen

Sondenmessungen in Niederdruckplasmen

Die Langmuir Sonde

Prinzip: Metallische Sondenspitze

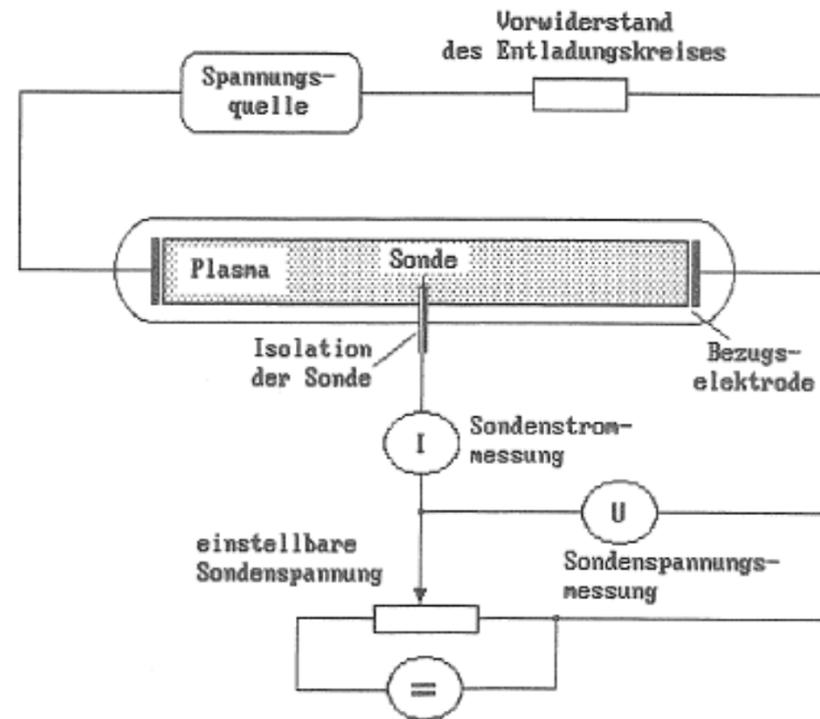
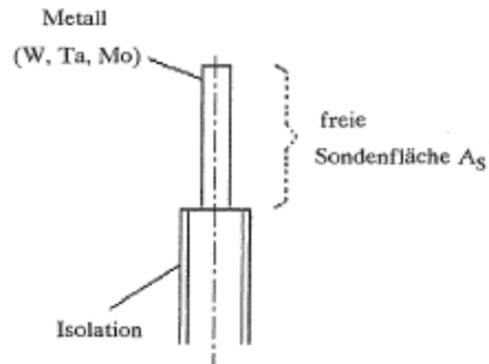
- (i. allg. Zylindersonde), Aufnahme einer U/I-Kennlinie
 - Interpretation der U/I-Kennlinie
- > Theorie zur Auswertung der Kennlinie

> **Ziel:** Bestimmung von Plasmakenngrößen:

- Konzentration der Ladungsträger (n_e , n_i)
- Elektronenenergieverteilungsfunktion (EEVF) / Elektronentemperatur (T_e)
- Floatingpotential (VFL), Plasmapotential (VPL)

5.2 Sondenmessungen

Sondenmessungen in Niederdruckplasmen Die Langmuir Sonde

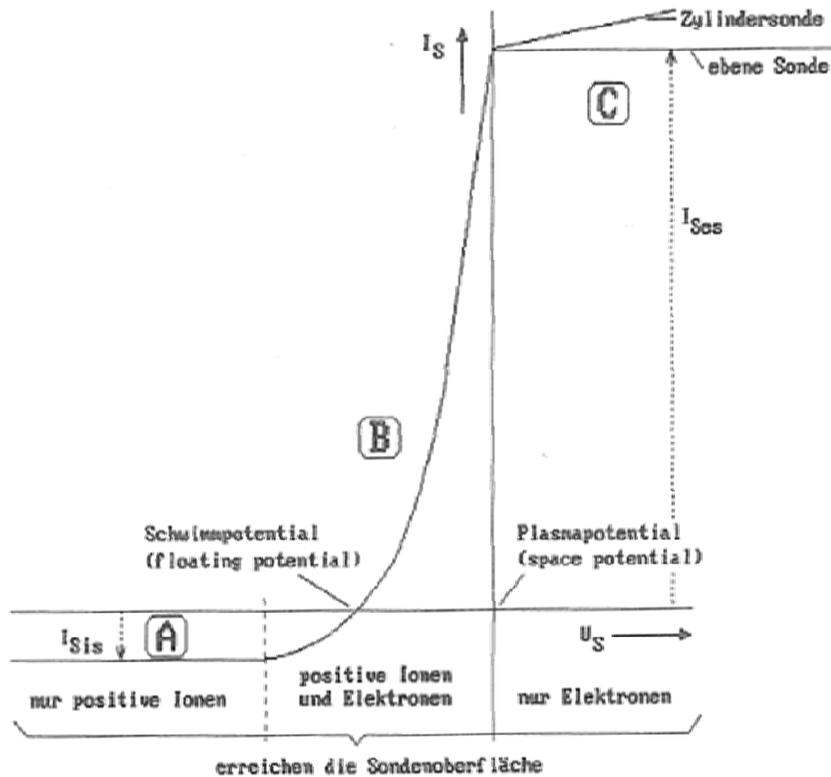


- Aufbau Langmuir Sonde

- Messaufbau nach Langmuir

5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Sonde



- Bereiche:
- **A: Ionenstrom Sättigungsbereich**
 - Im Ionenstromsättigungsbereich "A" ist das Potential der Sonde so stark negativ gegen das am Meßort im Plasma herrschende Potential, daß nur Ionen die Sonde erreichen können
- **B: Anlaufbereich**
 - Im Anlaufbereich "B" ist das Potential der Sonde gegen das Plasma nicht mehr so abstoßend für Elektronen > schnellen Elektronen erreichen den Sondendraht

$$j_{ges} = |j_e| + j_i = 0$$

- **C: Elektronenstromsättigungsbereich C**

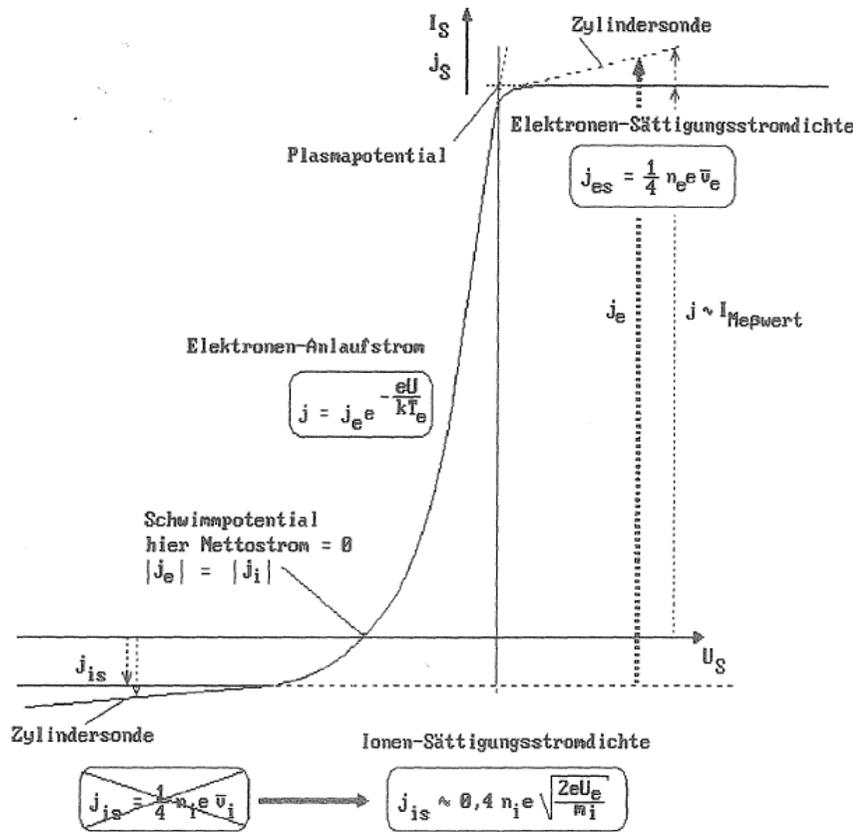
$$j_e = j_{es} = \frac{1}{4} e n_e v_e$$

$$j_e = j_{is} = \frac{1}{4} e n_i v_i$$

- Idealisierte Strom Spannungs Kennlinie
- Langmuir Sonde

5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Sonde



Bereich:

C: Elektronenstromsättigungsgebiet

$$v_e = \sqrt{\frac{2kT_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{2eU_e}{m_e}}$$

$$j_{es} = \frac{I_{ses}}{A_s}$$

$$\frac{n_e}{m^{-3}} = 4,21 \cdot 10^{16} \frac{\frac{I_{ses}}{mA}}{\frac{A_s}{mm^2} \sqrt{\frac{U_e}{V}}}$$

Strom-Spannungs- bzw. Stromdichte-Spannungs-Kennlinie einer Langmuir-Sonde

5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Sonde

Bereiche:

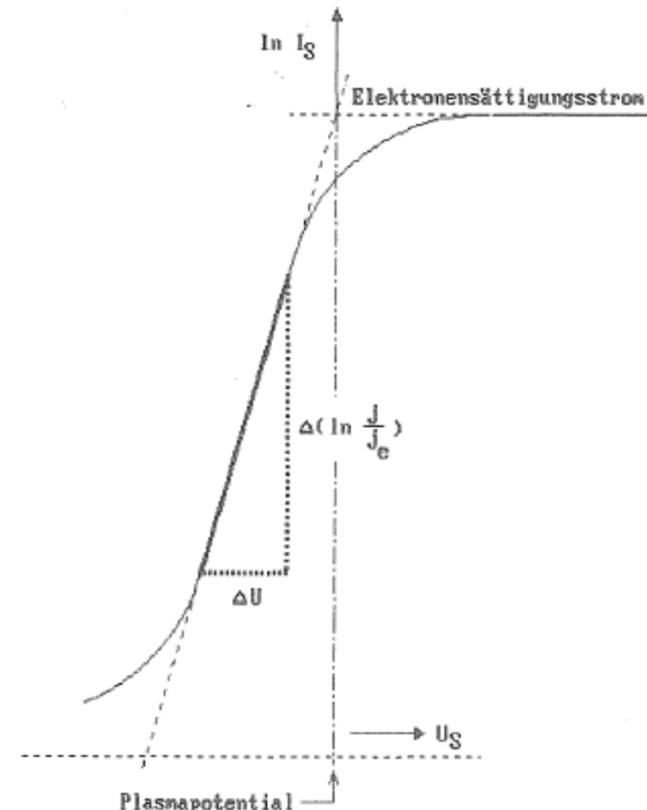
Aus Anlaufstromgebiet (doppellog. Darstellung)

Ergibt sich bei der Messung keine Gerade, so ist von einer stark von der Maxwell Verteilung abweichenden Verteilung auszugehen, es ist dann keine T_e mehr angebar.

$$U_e = \frac{\Delta U}{\Delta \left[\ln \left(\frac{j}{j_e} \right) \right]}$$

$$= \frac{\Delta U}{\Delta \left[\ln \left(\frac{I}{I_e} \right) \right]}$$

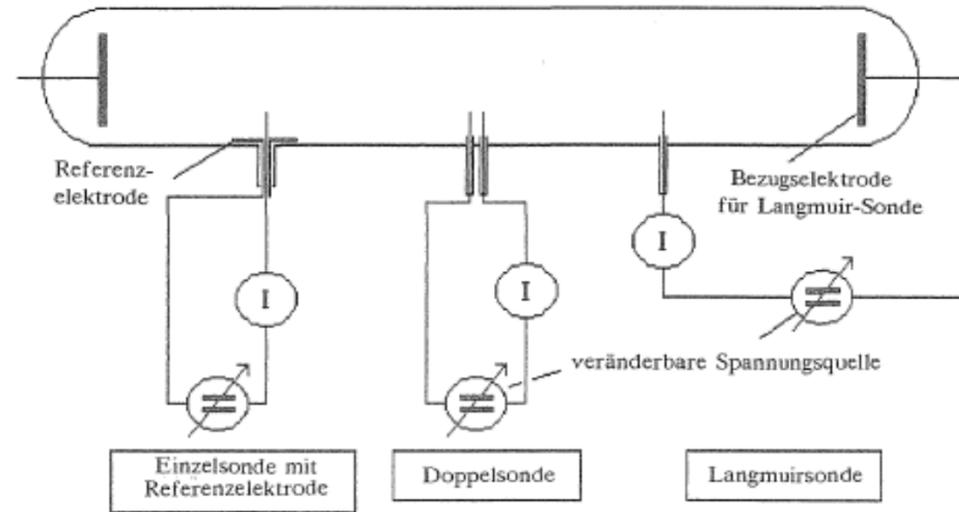
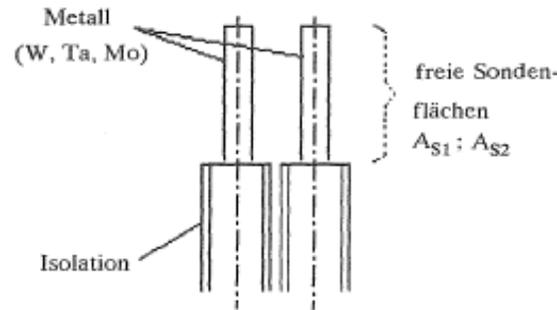
Halblogarithmisch aufgetragenes Mittelstück "B" einer Langmuir-Sondenkennlinie zur Ermittlung der Elektronentemperatur T_e aus der Steigung



5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Doppel - Sonde

Vorteil: kein Bezugspotential – auch für HF und elektrodenlose Plasmen



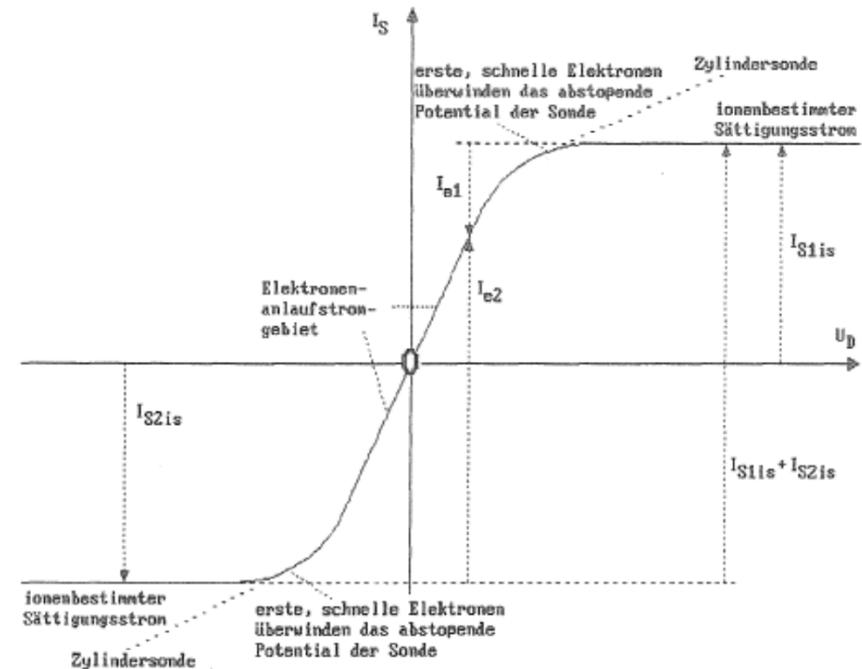
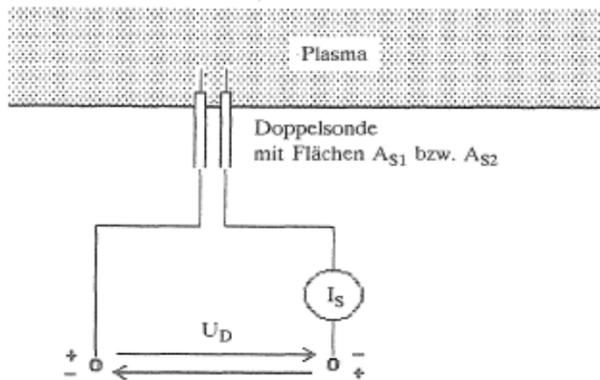
Aufbau Langmuir Doppel Sonde

Messaufbauten

5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Doppel - Sonde

- Vorteil: kein Bezugspotential – auch für HF und elektrodenlose Plasmen



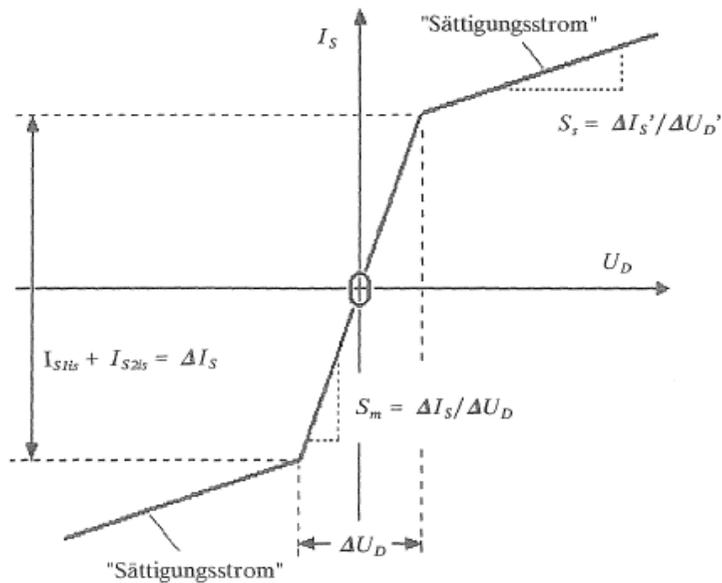
- Aufbau Langmuir Doppel Sonde

- Typ. Doppelsondenkennlinie

5.2 Sondenmessungen

Die Langmuir Doppel – Sonde

Vorteil: kein Bezugspotential – auch für HF und elektrodenlose Plasmen



$$U_e = \frac{\Delta I_s - 0,85 S_s \Delta U_D}{2 (2 S_m + S_s)}$$

$$I_{sis} = 0,4 n_i e A_s \sqrt{\frac{2 e U_e}{m_i}}$$

$$\frac{n_e}{m^{-3}} = 1,13 \cdot 10^{18} \sqrt{A} \frac{\frac{I_{sis}}{mA}}{\frac{A_s}{mm^2} \sqrt{\frac{U_e}{V}}}$$

Doppel Sonden Kennlinie

5.2 Sondenmessungen

Zu Sondenmessungen

Messungen mit Sonden sind einfach, schnell und preiswert.

Aber: Voraussetzungen

- Quasineutralität
- Maxwell-Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen
- Ionentemperatur klein ist gegen die Elektronentemperatur,
- Sondenstrom sehr klein ist gegen den Strom im Plasma
- Sondenradius sehr groß ist gegen die Debye-Länge,
- und Sondenradius sehr klein gegen die freien Weglängen von Ionen und Elektronen :

$$\left. \begin{array}{l} \text{• Sondenradius sehr groß ist gegen die Debye-Länge,} \\ \text{• und Sondenradius sehr klein gegen die freien Weglängen} \\ \text{von Ionen und Elektronen :} \end{array} \right\} \lambda_D \ll r_{sonde} \ll \lambda_{e,i}$$

n_e in m^{-3}	U_e in V	λ_D in mm	d_s in mm	λ_e in mm	angegebenes λ_e wird bei der Gastemperatur T_g und der Stoßwahrscheinlichkeit Q_m (in $1/(\text{Torr} \cdot \text{cm})$) beim Druck p erreicht :		
					$T_g=300\text{K}$ $Q_m=100$	$T_g=3000/300\text{K}$ $Q_m=100 / 10$	$T_g=3000\text{K}$ $Q_m=10$
10^{22}	1	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$\geq 2 \cdot 10^{-3}$	p < 10 kPa p < 3 kPa		
	10	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$			
10^{20}	1	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$\geq 2 \cdot 10^{-2}$	p < 1 kPa p < 300 Pa	p < 10 kPa p < 3 kPa	
	10	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$\geq 5 \cdot 10^{-2}$			
10^{18}	1	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$\geq 2 \cdot 10^{-1}$	p < 100 Pa p < 30 Pa	p < 1 kPa p < 300 Pa	p < 10 kPa p < 3 kPa
	10	$2 \cdot 10^{-2}$	0,2	$\geq 5 \cdot 10^{-1}$			
10^{16}	1	$7 \cdot 10^{-2}$	0,7	$\geq 1,5$	p < 10 Pa p < 3 Pa	p < 100 Pa p < 30 Pa	p < 1 kPa p < 300 Pa
	10	$2 \cdot 10^{-1}$	2	≥ 5			

Debye-Längen λ_D (für verschiedene Elektronendichten und Elektronenenergien) und mittlere freie Weglängen von Elektronen λ_e (für verschiedene Gastemperaturen und Stoßwahrscheinlichkeiten) zur Festlegung des maximal zulässigen **Sondendurchmessers** d_s in Abhängigkeit vom Neutralgasdruck p

5.2 Sondenmessungen

Beispiel zur Sondenmessung:

In einem Neon-Plasma sollen Sondenmessungen bei der Elektronendichte $n_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ und der Elektronentemperatur von etwa 10000 K durchgeführt werden. Mit einer Stoßwahrscheinlichkeit bei $Q_m = 10 / (\text{Torr} \cdot \text{cm})$ liegt aus Tabelle aus vorheriger Seite die Debye-Länge bei $7 \mu\text{m}$.

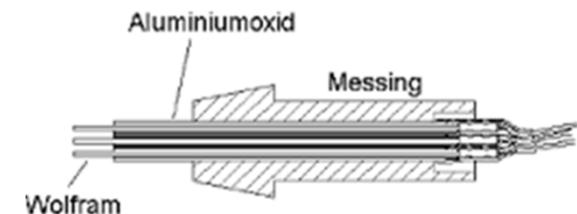
Der Sondendurchmesser $d_s = 2r_s$ sollte laut Tabelle mindestens $70 \mu\text{m}$ betragen ($AD \ll r_s$). Würde ein Sondendraht dieses Durchmessers gewählt werden können, so wäre eine freie Weglänge $\lambda_e = 0,15 \text{ mm}$ ausreichend ($r_s \ll \lambda_e$), und es könnte bei einer Gastemperatur $T_g = 300 \text{ K}$ bei $Q_m = 10 / (\text{Torr} \cdot \text{cm})$ bis zu einem Druck $p = 1 \text{ kPa}$ gemessen werden. Jede Vergrößerung des Sondendurchmessers verlangt eine größere freie Weglänge λ_e ; wodurch der für die hier angenommene Sonden­theorie gültige Druckbereich abnimmt.

5.2 Sondenmessungen

Die wichtigsten Plasmaparamter

Sondenmaterial	hochtemperaturfeste, vakuumgeeignete Metalle (W, Mo, Ta)
Sondendurchmesser	0,05 mm ... 1 mm
freie Sondenlänge	0,5 mm ... 5 mm
Drahtabstand bei Doppelsonden	1 mm ... 2 mm
Sondenströme	$< 1 \mu\text{A} \dots \pm 30 \text{ mA}$
Spannungen zwischen Doppelsondendrähten	$\pm 0 \text{ V} \dots \pm 30 \text{ V}$

- Doppelsonde (Uni Stuttgart)



5.2 Sondenmessungen

Zusammenfassung der Sondenmessungen

Pros

- einfach, preiswert und schnell
- Ortsaufgelöste Messungen möglich:
 $n_e(r)$, $T_e(r)$
- Zeitaufgelöste Messungen möglich
 $n_e(t)$, $T_e(t)$
- Messungen an magnetischen Plasmen sind auswertbar
- Energieverteilung bzw. Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen ist messbar.

Cons

- Sonde stört das Plasma (Abkühlung, Verunreinigung, Feldnullstelle)
- Sonde kann verdampfen
- Sondenfläche verändert sich (Spittern, Verdampfen)
- Sonde unterliegt chemischen Eingriff
- Sondenfläche ist nie genau bekannt (Schicht!)
- Sonde muss vakuumdicht eingebaut werden.

Übersicht über die Vorlesung

- 1. Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

- 2. Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

- 3. Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1. Stationäre Gasentladung
 - 3.2. Entladung im Wechselfeld

- 4. Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 Niederdruckentladungen
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.2. Plasmafusion

- 5. Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.11 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 Analytische Verfahren Beispiel TIMS Messung

5.3 Mikrowellen Messungen

Mikrowellen Messverfahren

Die aktive Diagnostik von Plasmen mit Hilfe elektromagnetischer Wellen beruht darauf, dass eingestrahlte Wellen in charakteristischer Weise von Plasmen beeinflusst werden.

- Übergang von vollkommener Wellendurchlässigkeit zu totaler Wellenreflexion an einer Plasmaoberfläche
- Dämpfung von Wellen beim Durchgang durch ein Plasma.

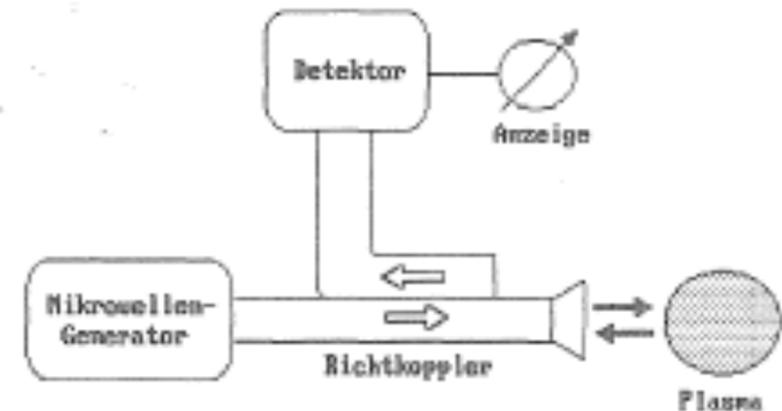
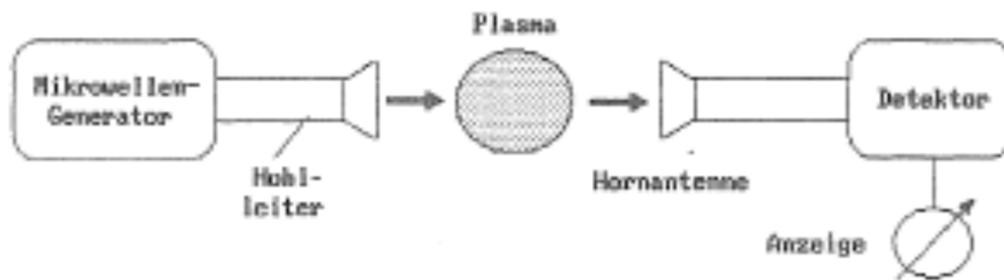
Die Frequenzgrößen Plasmafrequenz, Gyrationfrequenz und Stoßfrequenz stellen die direkte Verbindung zwischen den Plasmakenngrößen und den Wellengrößen her:

$n_e \rightarrow \omega_p^2$	$\omega_p^2 = e^2 n_e / \epsilon_0 m_e \rightarrow \omega_p^2 / \omega^2$	< 1	optisch dünn
		> 1	optisch dicht
$B_0 \rightarrow \omega_{ce}$	$\omega_{ce} = eB_0 / m_e \rightarrow \omega_{ce} / \omega$	< 1	schwach magnetisiert
	$\omega_{ci} = eB_0 / m_i$	> 1	stark magnetisiert
v_e	$v_e = v \rightarrow v / \omega; v / \omega_{ce}$	$\ll 1$	stoßfrei
		> 1	stoßbestimmt

5.3 Mikrowellen Messungen

1) Transmissions- und Reflexionsmessungen

Die einfachsten Mikrowellendiagnostikverfahren sind Transmissions- und Reflexionsmessungen Plasmen (Amplitudenmessungen, d.h. Leistungsmessungen):



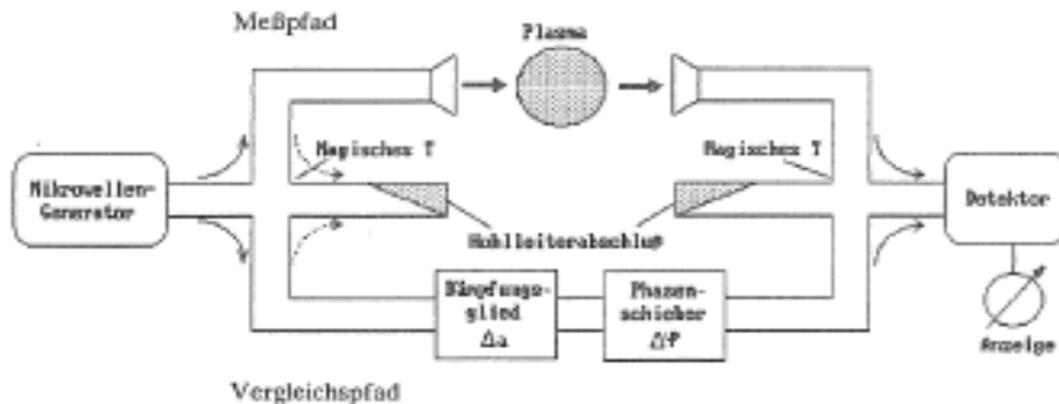
Abbildungen: Schemata Mikrowellenanordnung zur Diagnostik von Plasmen in Transmission (links) und Reflexion (rechts)

5.3 Mikrowellen Messungen

2) Mikrowellen Interferometrie

Interferometeranordnung bei der vor allem die Wellenphase aufgenommen. Das im Meßpfad liegende Plasma in einem Vergleichspfad nach Amplitude (= Dämpfung) und Phase (= Ausbreitungsgeschwindigkeit) nachgebildet:

Meßgrößen sind die zusätzliche Dämpfung $\Delta\alpha$ und die veränderte Phase $\Delta\varphi$, die notwendig sind, die Brücke nach Beeinflussung durch das Plasma wieder auf null abzugleichen.



$$\Delta\varphi \approx \bar{n}_e L$$

$$\frac{\bar{n}_e}{m^{-3}} = 1,18 \cdot 10^{17} \frac{f}{GHz} \frac{\Delta\varphi}{L} \frac{rad}{cm}$$

nur gültig wenn n_e über Messweg konstant und $n_e \ll n_c$ vorausgesetzt ist.

Ansonsten Entabelung notwendig zur lokalen Dichtebestimmung !

Abbildung: Schema Mikrowellen Interferometrie

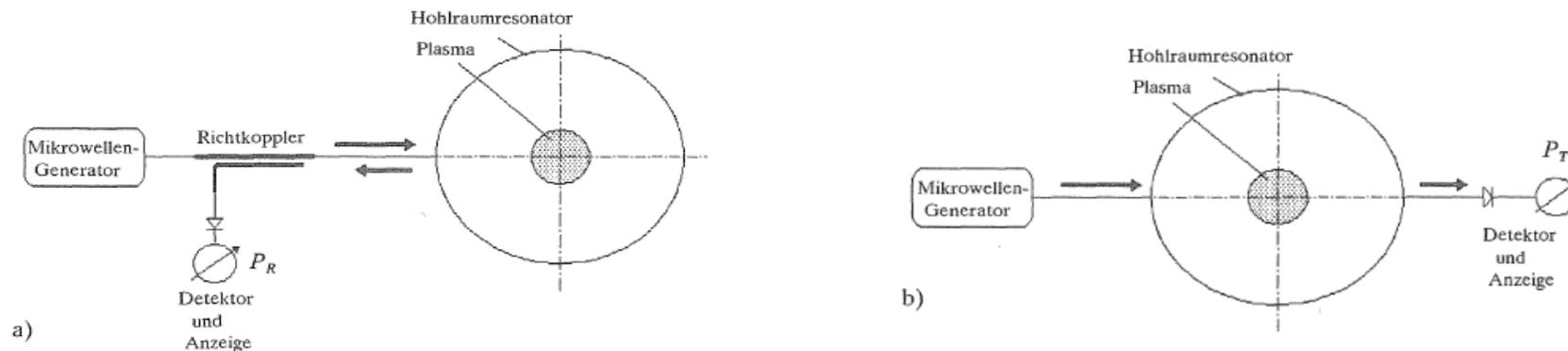
5.3 Mikrowellen Messungen

3) Hohlraum Resonator

Ein Mikrowellen-Hohlraumresonator ist ein meist metallenen berandeter, kreiszylindrischer oder würfelförmiger Hohlraum, in dem sich stehende Wellen ausbilden können (Moden: $T_{x,y,z}$ aus TE und TM gebildet)

Prinzip: Messgrößen sind die zusätzliche Dämpfung $\Delta\alpha$ und die veränderte Phase $\Delta\varphi$, die notwendig sind, die Brücke nach Beeinflussung durch das Plasma wieder auf null abzugleichen.

Prinzip- Abbildungen: in Reflektion (links) und Transmission (rechts)



Wird ein Hohlresonator ganz oder teilweise mit einem Dielektrikum (Festkörper, Flüssigkeit, Gas, Plasma) gefüllt, dann ändern sich sowohl Resonanzfrequenz als auch die Güte des Resonators.

5.3 Mikrowellen Messungen

Hohlraum Resonator

Im Falle eines Plasmas sind die Dielektrizitätszahl mit der Plasmaelektronendichte und die ohmschen Verluste mit der Elektronenstoßfrequenz verbunden > Plasmadiagnostik

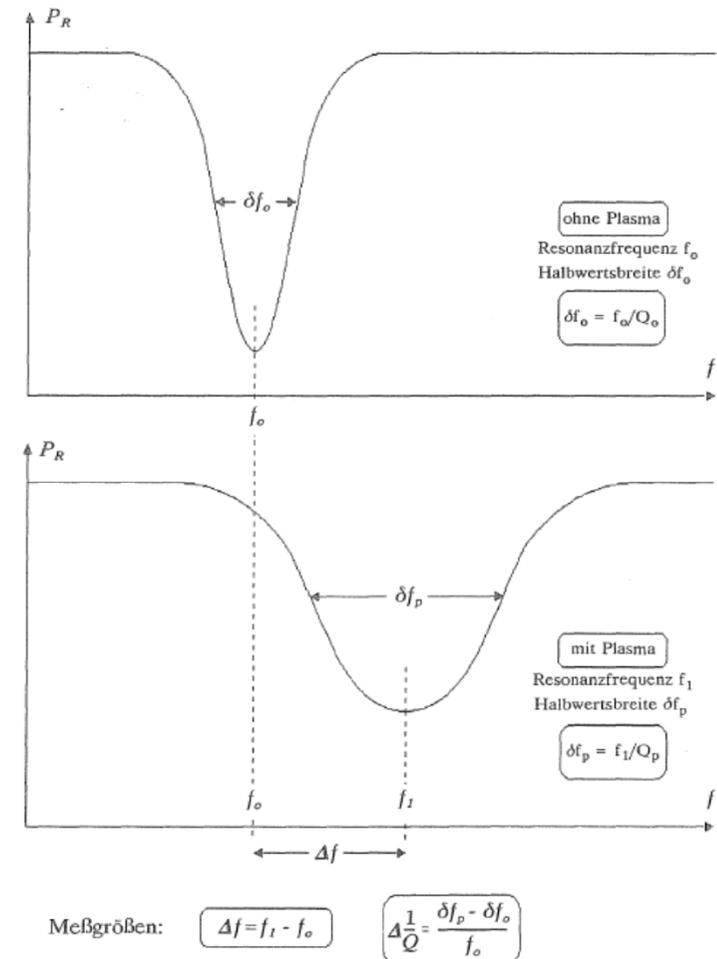
Voraussetzungen:

- Plasma in den Resonator hineinpasst (nur teilweise füllt)
- die Elektronendichte unter der kritischen bleibt ($ne < nc$)
- die Stoßfrequenz nicht zu hoch ist

Beispiel in Reflektion:

Abbildung Messgrößen an einem leeren und an einem plasmagefüllten Mikrowellenhohlraumresonator zur Bestimmung der Plasmaelektronendichte und der Elektronenstoßfrequenz:

$$\frac{v}{\omega_o} = \frac{1}{2} \frac{\delta f}{\Delta f}$$



5.3 Mikrowellen Messungen

Beispiel: Ein Gasentladungsplasma mit dem Durchmesser 10 mm steckt in einem Mikrowellenhohlraumresonator mit dem Durchmesser 50 mm, der in der Resonanzmode TM_{020} betrieben wird. Die Resonanzfrequenz des plasmafreien Resonators beträgt 11,376 GHz; bei Vorhandensein des Plasmas ist die Resonanzfrequenz 11,355 GHz. Die Resonanzbreite (= Halbwertsbreite bei Leistungsdarstellung, was wegen der quadratischen Kennlinie von Mikrowelldioden üblich und normal ist, siehe [S. 10](#)) verändert sich von 10 MHz auf 13 MHz.

Der Füllgrad beträgt $R_p/R_r = 5 \text{ mm}/25 \text{ mm} = 0,2$. Geometriefaktor $\phi = 0,14$ entnehmen. Frequenzverschiebung $\Delta f = 21 \text{ MHz}$; mit $f \approx f_0 = 11,376 \text{ GHz}$, und (aus Gl.(2.4.23)) $n_c = 1,24 \cdot 10^{10} \cdot (11,376)^2 \text{ cm}^{-3} = 1,605 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ergibt sich aus Gl.(5.4.19) $n_e = 1,605 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot (1/0,14) \cdot (21 \text{ MHz}/11376 \text{ MHz}) = 2,12 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Aus den Halbwertsbreiten folgt mit $\delta f = \delta f_p - \delta f_0 = 3 \text{ MHz}$ und aus der Formel für die Stoßfrequenz, Gl.(5.4.27), schließlich:

$$\nu/\omega_0 = 0,5 \cdot (3 \text{ MHz}/21 \text{ MHz}) = 0,071$$

oder

$$\nu = 0,071 \omega_0 = 5,1 \cdot 10^9 \text{ 1/s.}$$

Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3.2 Entladung im Wechselfeld

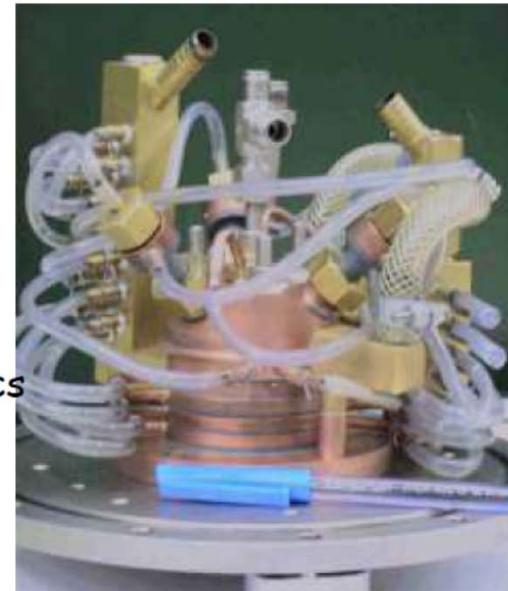
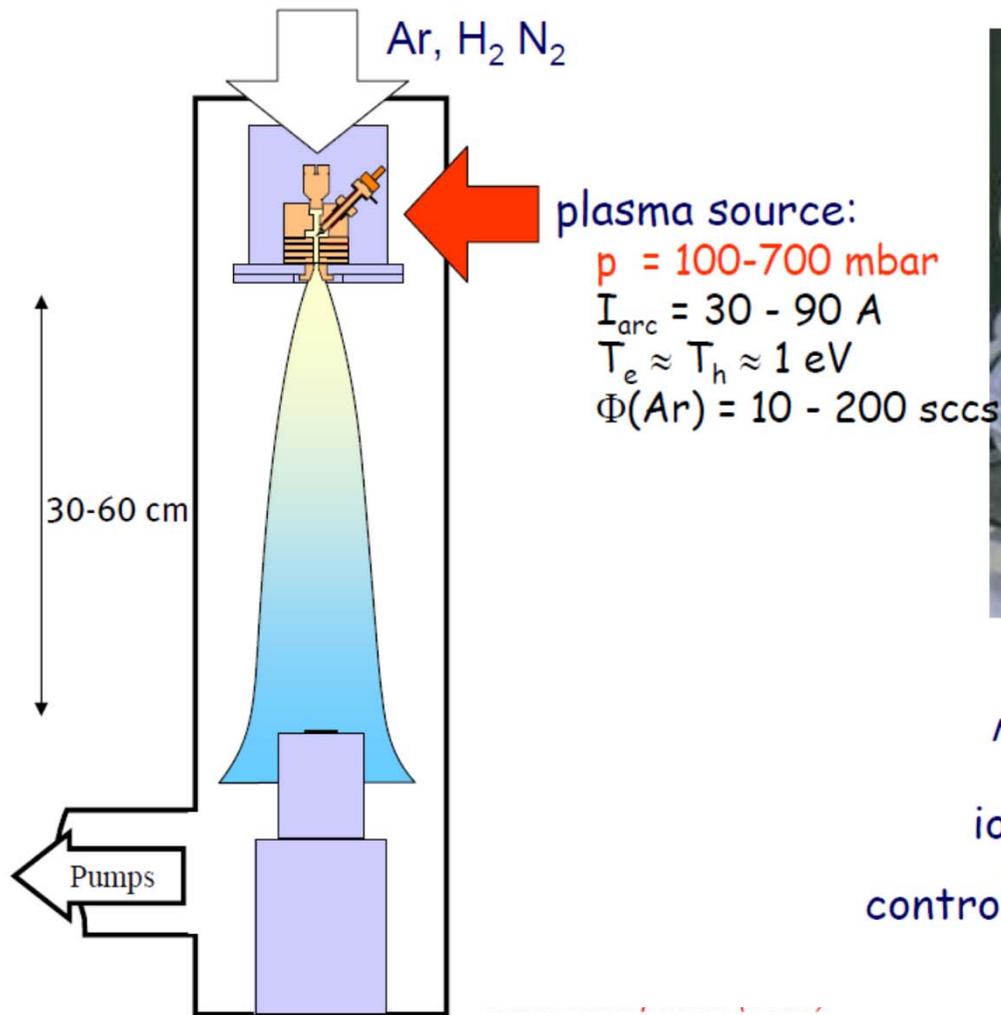
4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 Niederdruckentladungen
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.11 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

5.4 Analytische Verfahren

Beispiele TIMS (Threshold Ionization Mass Spectroscopy)
für thermisches Plasma

Expanding thermal plasma - CVD



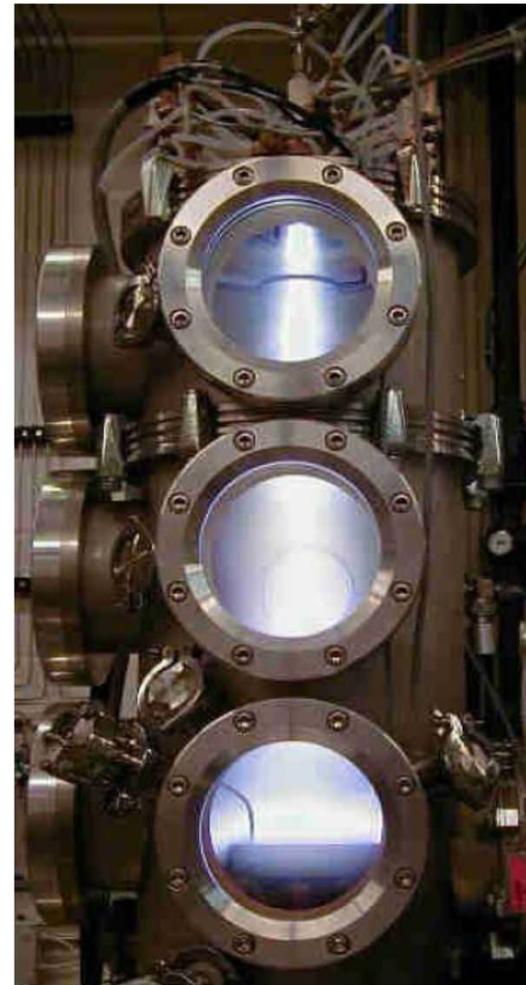
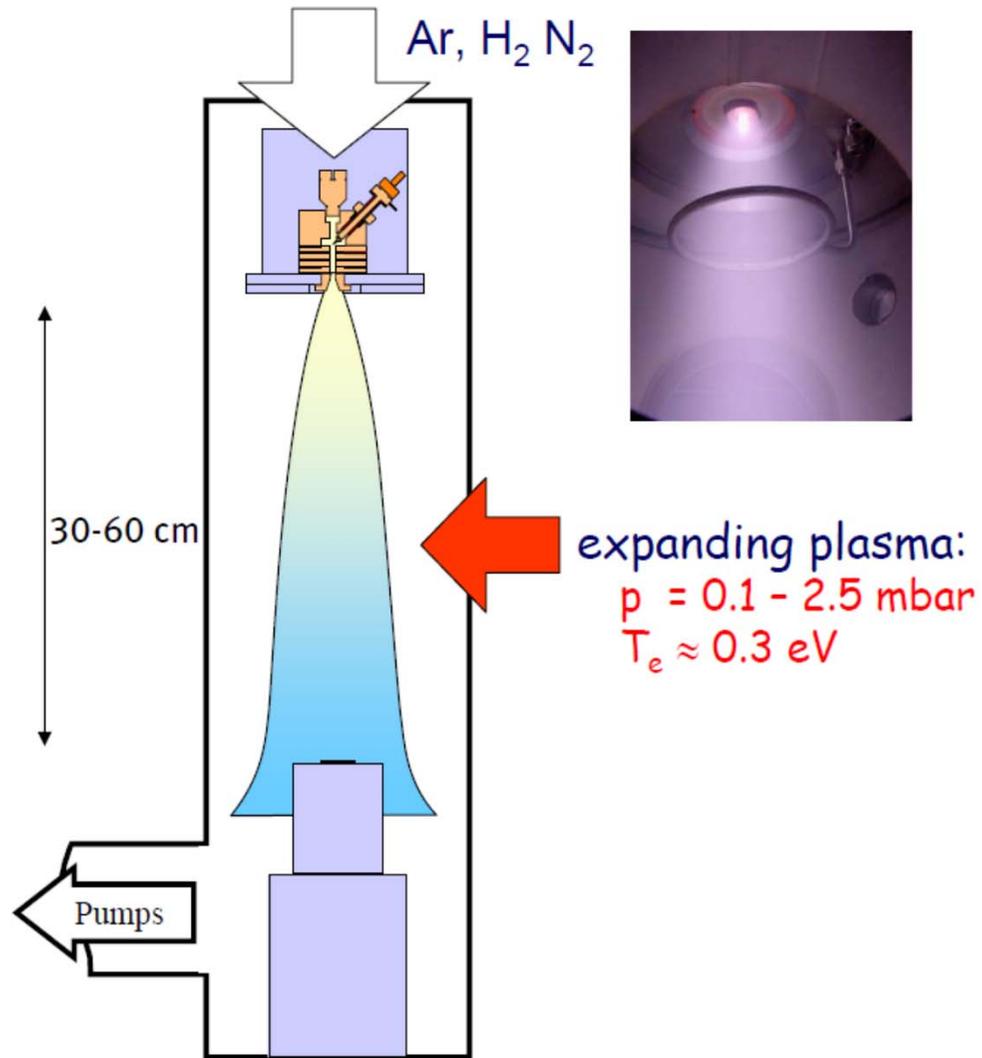
CASCADED ARC

remote plasma source

ionisation degree 1-20%

controlled by arc current and flow

Expanding thermal plasma - CVD



Expanding thermal plasma - CVD

