

Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm

VII RIE: Spezielle Features, 29. April 2021

Gerhard Franz

Walter Schottky Institut

TU München

<http://www.gerhard-franz.org>



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung
- Sputtern
- RIE I + (PE)CVD
- RIE II: Microfeatures, Ätzmechanismen, Endpunktkontrolle, Plasmadiagnostik



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig
 - Massenspektrometrie,



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig
 - Massenspektrometrie,
 - Laser-Interferometrie.



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig
 - Massenspektrometrie,
 - Laser-Interferometrie.
- plasmaabhängig



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig
 - Massenspektrometrie,
 - Laser-Interferometrie.
- plasmaabhängig
 - Optische Emissions-Spektroskopie (OES),



Endpunktverfahren

- plasmaunabhängig
 - Massenspektrometrie,
 - Laser-Interferometrie.
- plasmaabhängig
 - Optische Emissions-Spektroskopie (OES),
 - Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS).



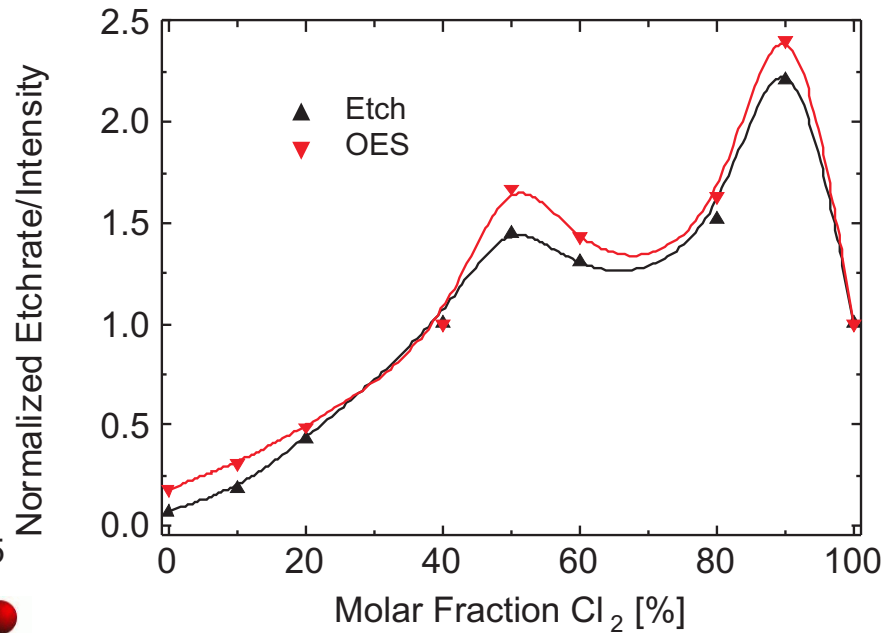
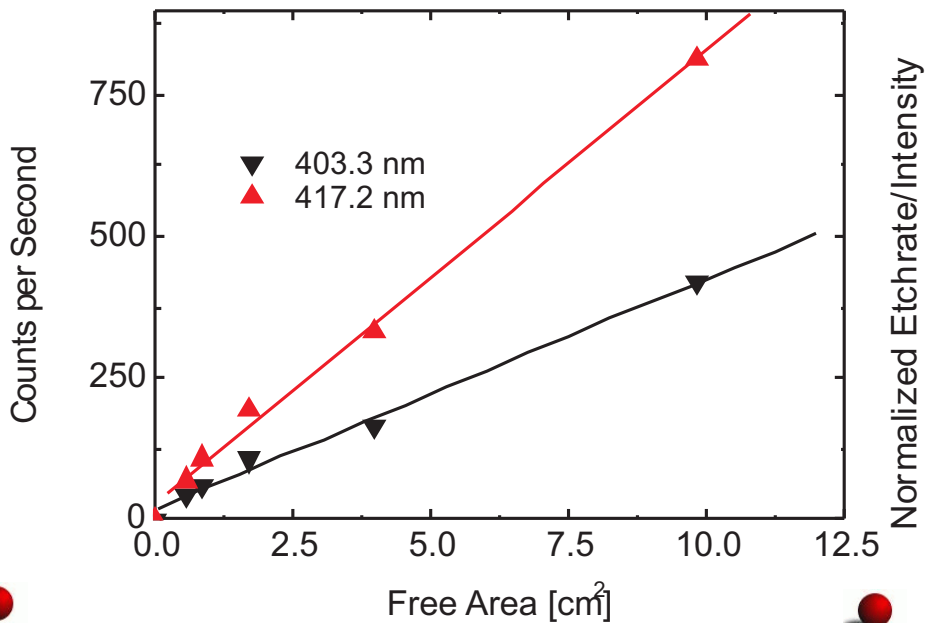
Ätzrate und OES-Signal

Intensität des OES-Signals ist proportional zur offenen Fläche ...



Ätzrate und OES-Signal

Intensität des OES-Signals ist proportional zur offenen Fläche ...
... und ist proportional der Ätzrate.



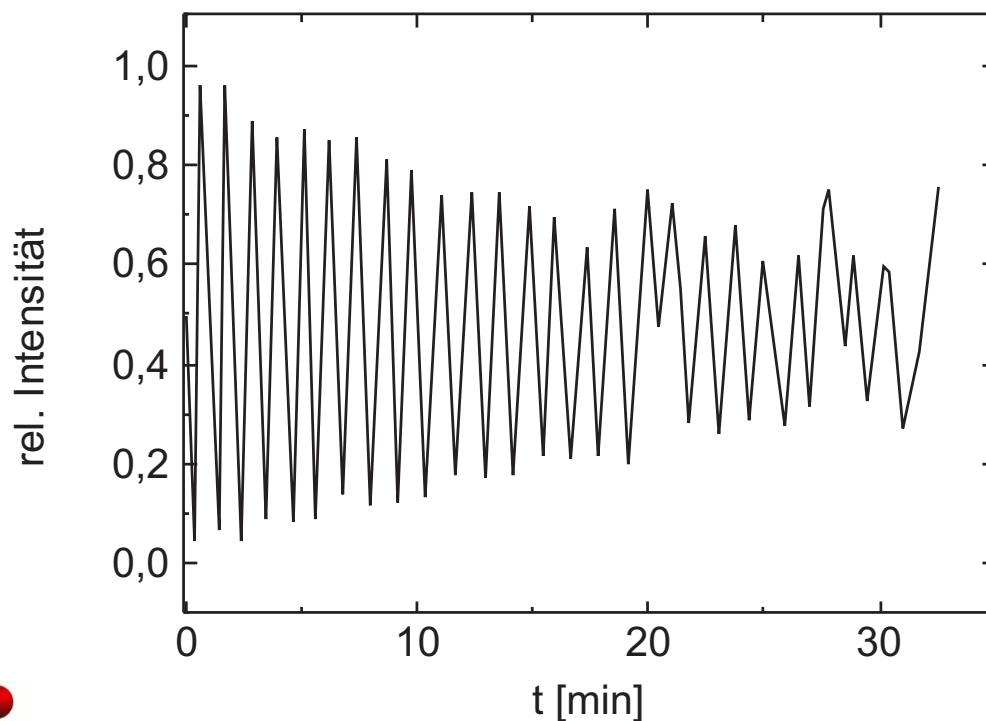
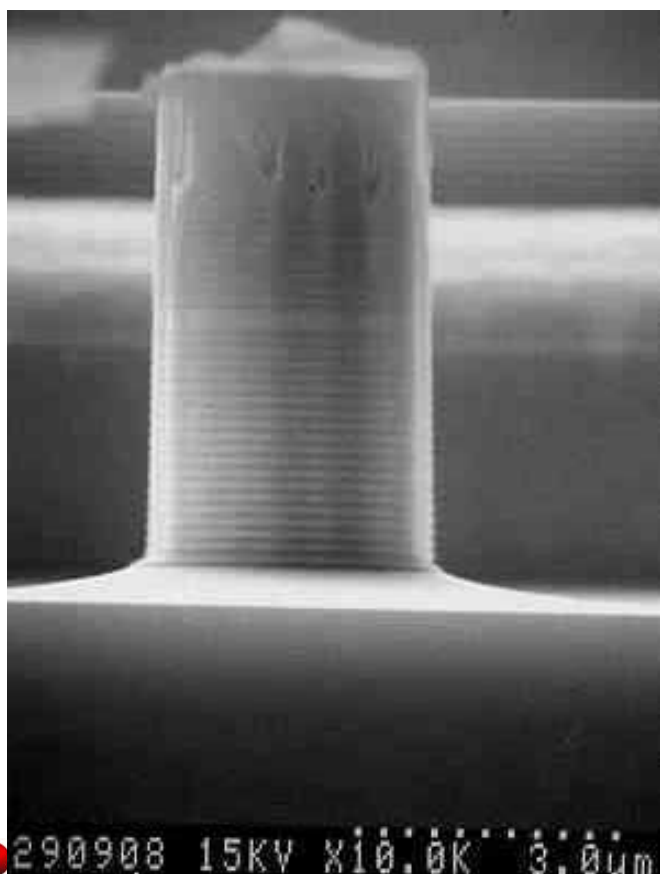
Optische Emissions-Spektroskopie

Ein mit Cl_2/BCl_3 geätzter VCSEL ($d = 5.6 \mu\text{m}$) ...

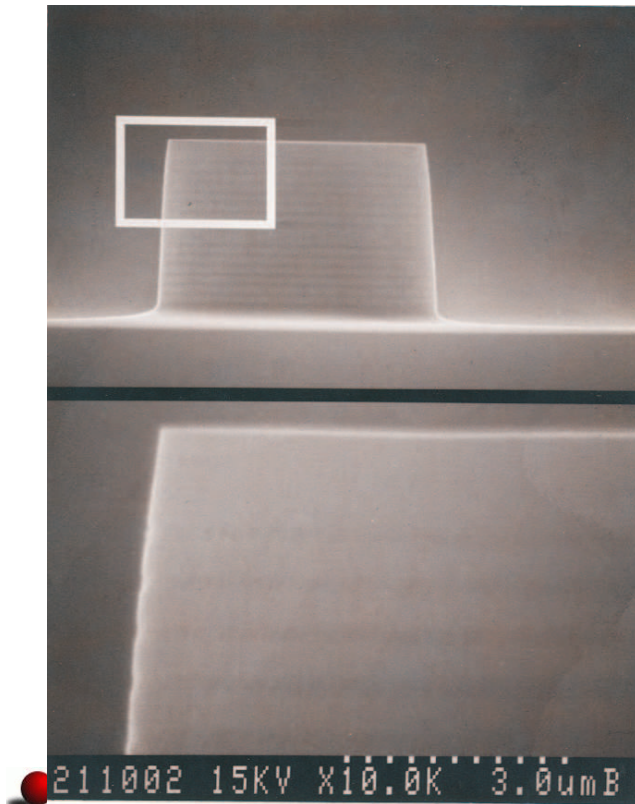


Optische Emissions-Spektroskopie

Ein mit Cl_2/BCl_3 geätzter VCSEL ($d = 5.6 \mu\text{m}$) ... und das OES-Spektrum (Ga-Linie @ 403.3 nm)



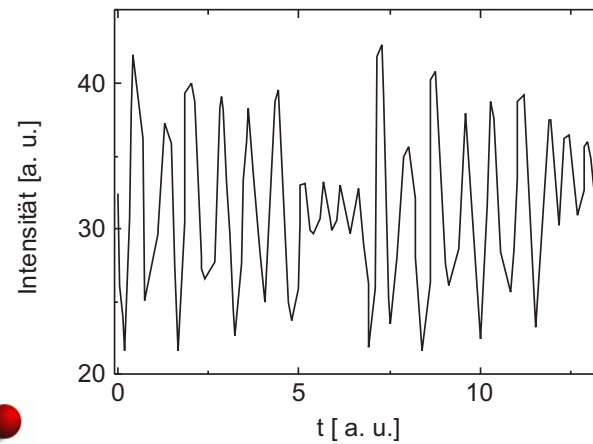
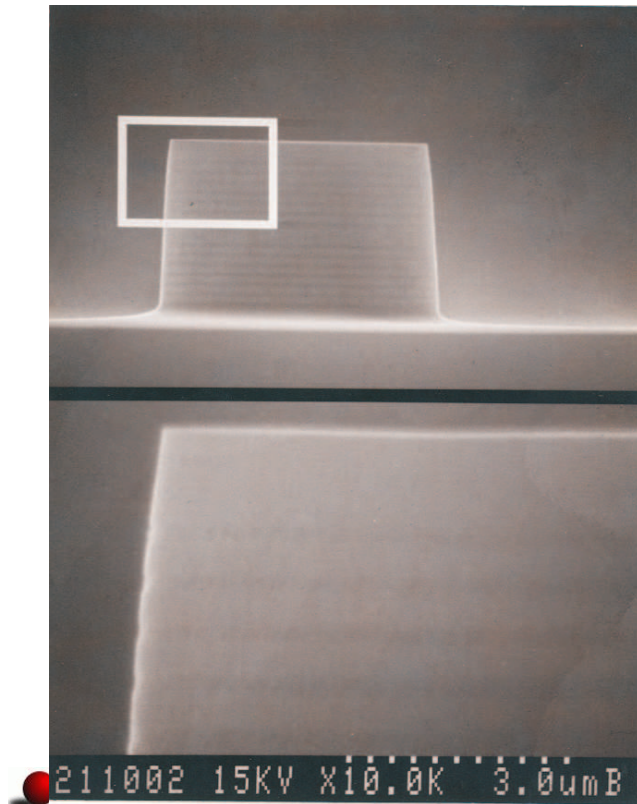
Reflektometrie



Ein mit Cl_2/BCl_3 geätzte VCSEL-Teststruktur ($d = 2.2 \mu\text{m}$) . .



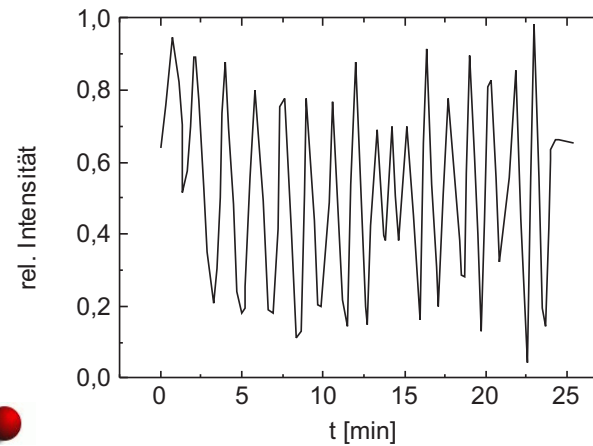
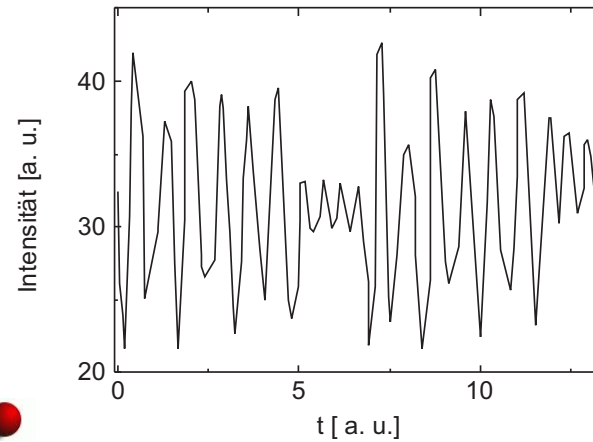
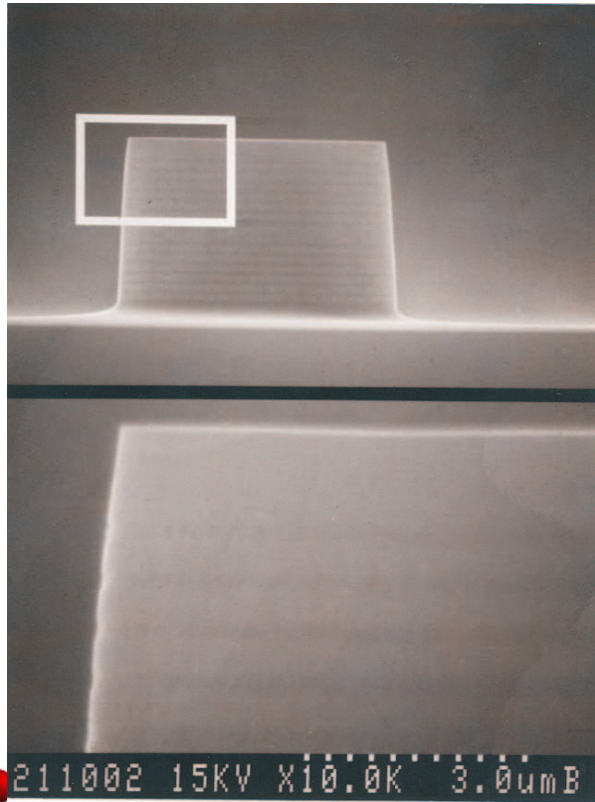
Reflektometrie



Ein mit Cl_2/BCl_3 geätzte VCSEL-Teststruktur ($d = 2.2 \mu\text{m}$) . .
und das Laserinterferogramm



Reflektometrie

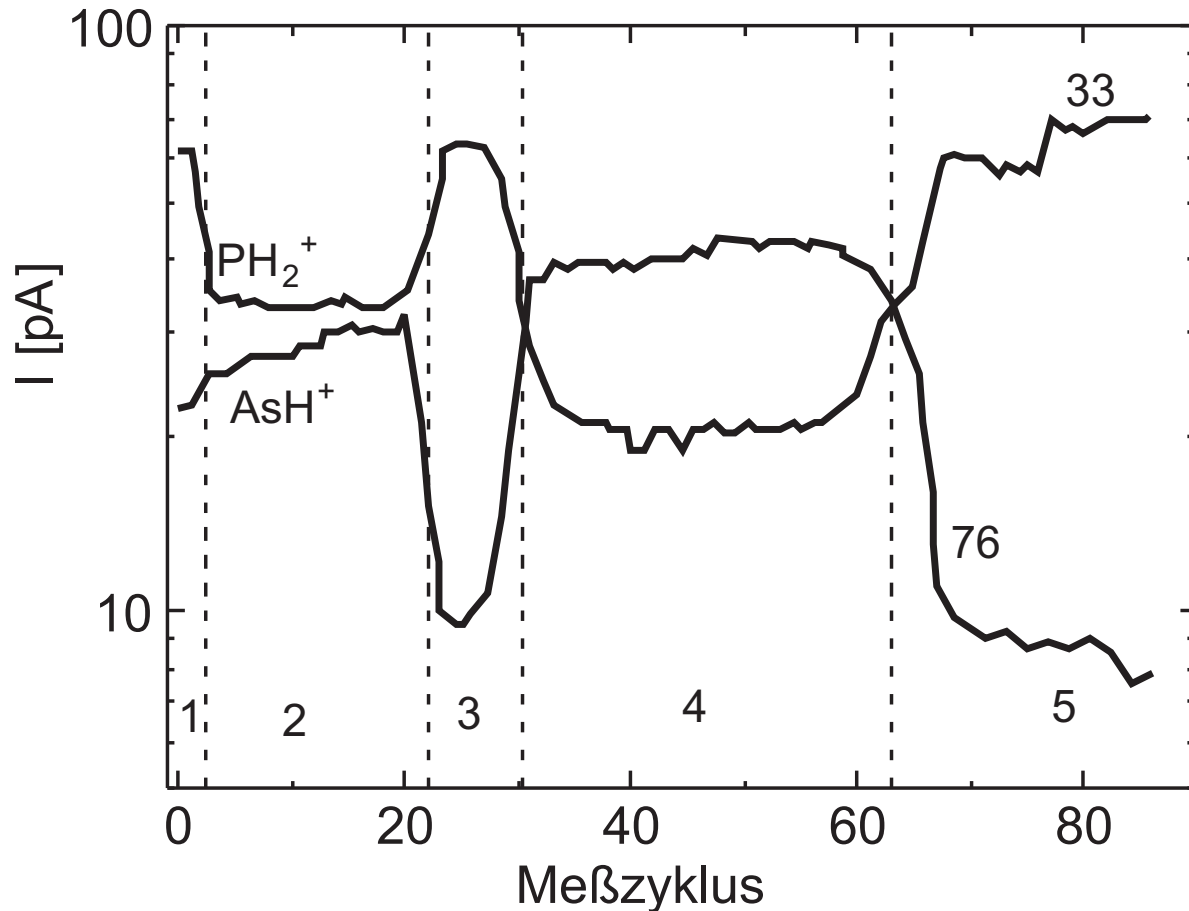


Ein mit Cl_2/BCl_3 geätzte VCSEL-Teststruktur ($d = 2.2 \mu\text{m}$) . .
und das Laserinterferogramm



(o.: gemessen, u.: berechnet)

Massenspektrometrie



(1) 200 nm InP (Cap), (2) 300 nm $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}_{0.54}\text{P}_{0.46}$

(3) 200 nm InP, (4) 430 nm InGaAs, (5) InP-Buffer



Sampling-Frequenz: 20 sec.

Plasmadiagnostik

- Optische Emissions-Spektroskopie (OES) \Rightarrow Elektronentemperatur, Gastemperatur;



Plasmadiagnostik

- Optische Emissions-Spektroskopie (OES) \Rightarrow Elektronentemperatur, Gastemperatur;
- Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS) \Rightarrow Stoßfrequenz, Plasmadichte, Leistungseinkopplung;



Plasmadiagnostik

- Optische Emissions-Spektroskopie (OES) \Rightarrow Elektronentemperatur, Gastemperatur;
- Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS) \Rightarrow Stoßfrequenz, Plasmadichte, Leistungseinkopplung;
- Mikrowellen-Reflektometrie \Rightarrow Plasmadichte,



Plasmadiagnostik

- Optische Emissions-Spektroskopie (OES) \Rightarrow Elektronentemperatur, Gastemperatur;
- Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS) \Rightarrow Stoßfrequenz, Plasmadichte, Leistungseinkopplung;
- Mikrowellen-Reflektometrie \Rightarrow Plasmadichte,
- Langmuir-Sonde \Rightarrow Elektronendichte, Elektronentemperatur;



Plasmadiagnostik

- Optische Emissions-Spektroskopie (OES) \Rightarrow Elektronentemperatur, Gastemperatur;
- Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS) \Rightarrow Stoßfrequenz, Plasmadichte, Leistungseinkopplung;
- Mikrowellen-Reflektometrie \Rightarrow Plasmadichte,
- Langmuir-Sonde \Rightarrow Elektronendichte, Elektronentemperatur;
- Z-Scan \Rightarrow $U(t)$, $I(T)$, $\cos\varphi$.



Fragen und Methoden

- Unter welchen Bedingungen zünden wir wirklich eine kapazitiv gekoppelte Entladung?



Fragen und Methoden

- Unter welchen Bedingungen zünden wir wirklich eine kapazitiv gekoppelte Entladung?
- Wie ändert sich die Charakteristik der Entladung mit steigendem Druck und zunehmender Leistungseinkopplung?



Fragen und Methoden

- Unter welchen Bedingungen zünden wir wirklich eine kapazitiv gekoppelte Entladung?
- Wie ändert sich die Charakteristik der Entladung mit steigendem Druck und zunehmender Leistungseinkopplung?
- Ändert sich die Charakteristik der Entladung, wenn wir ein molekulares reaktives Gas zunächst dem Argon beimischen und es schließlich ersetzen?



Fragen und Methoden

- Unter welchen Bedingungen zünden wir wirklich eine kapazitiv gekoppelte Entladung?
- Wie ändert sich die Charakteristik der Entladung mit steigendem Druck und zunehmender Leistungseinkopplung?
- Ändert sich die Charakteristik der Entladung, wenn wir ein molekulares reaktives Gas zunächst dem Argon beimischen und es schließlich ersetzen?
- Ist die Kongruenz zwischen Ätzrate und spektroskopischer Intensität eine Funktion der Plasmaparameter wie Elektronendichte und Elektronentemperatur, die wesentlich für die Intensität der Spektrallinien verantwortlich sind?



Kenngrößen und Methoden

<i>Plasma Größe</i>	<i>Methode</i>			
	<i>Z-Sensor</i>	<i>Langmuir</i>	<i>OES</i>	<i>SEERS</i>
V_{rms}	✓			
I_{rms}	✓			
$\cos \varphi$	✓			
T_e		✓	✓	
n_e		✓		✓
V_p		✓		
ν_{eff}				✓
T_n			✓	



Messungen der Elektrizität



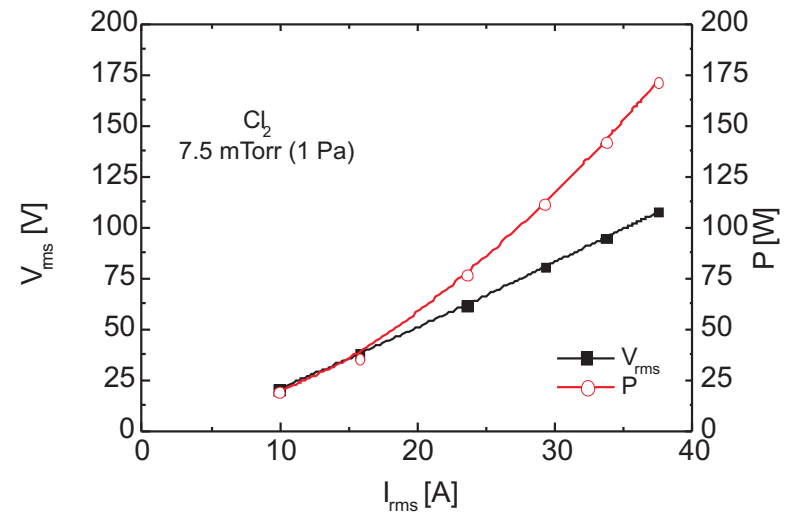
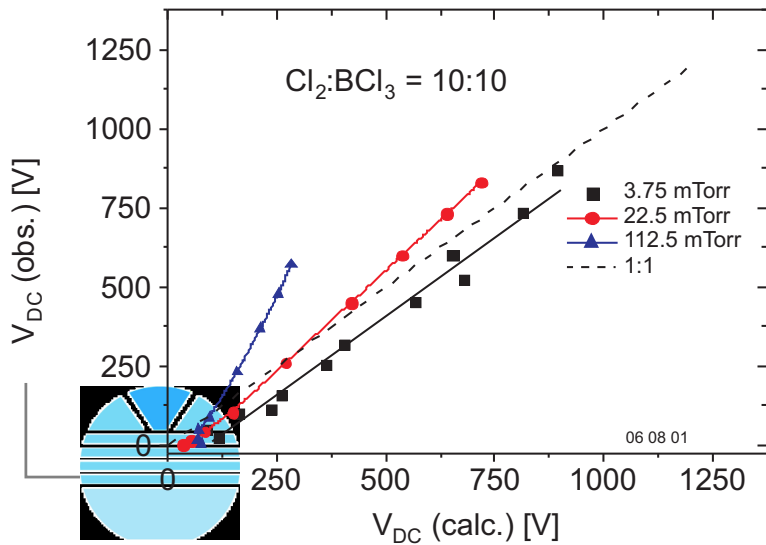
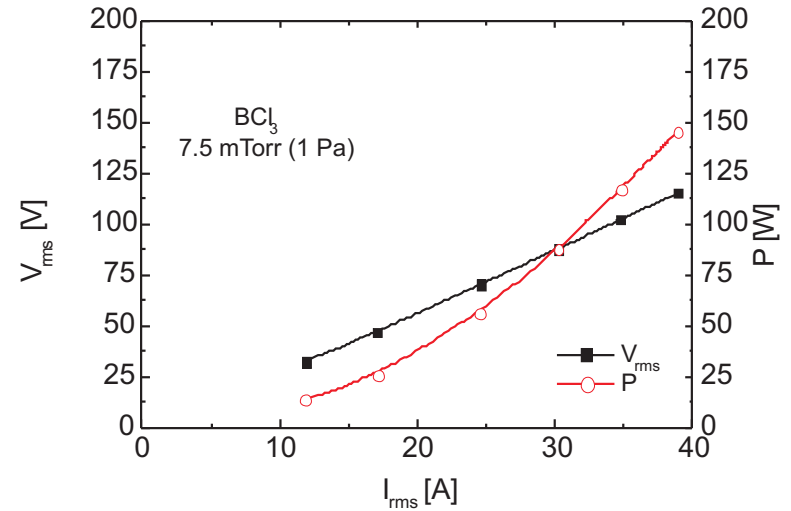
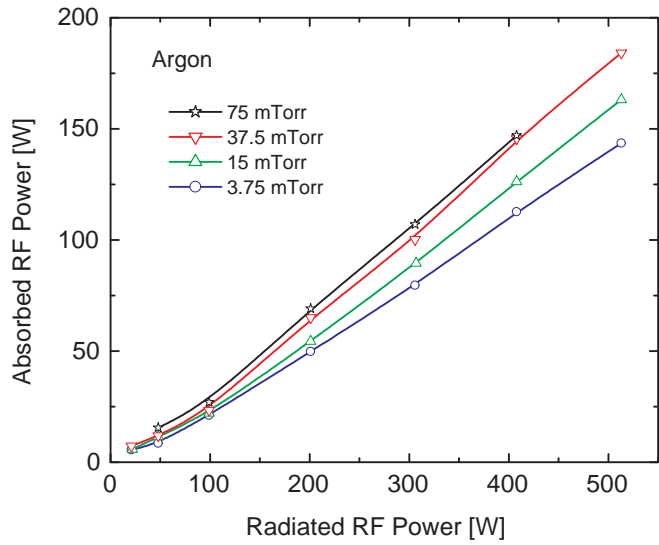
15. Juni 1752: BENJAMIN FRANKLIN auf den Spuren OTTO V. GUERICKES:
Ein Politiker führt wissenschaftliche Experimente durch. Schlechtes Wetter war

Voraussetzung für das Gelingen der Versuche:

Blitze sind eine Manifestation der Elektrizität.

Z(I,U) I

Vier verschiedene Atmosphären: Parameter, die mit dem Z-Scan zugänglich sind.



Z(I,U) II

Tiefe Drücke: $\cos\varphi$ ist fast konstant $\Rightarrow R$ ist konstant.

Hohe Drücke (Ar): $V \cos\varphi \propto V \Rightarrow R$ ist konstant, steigt aber zu kleinen Stromdichten an.

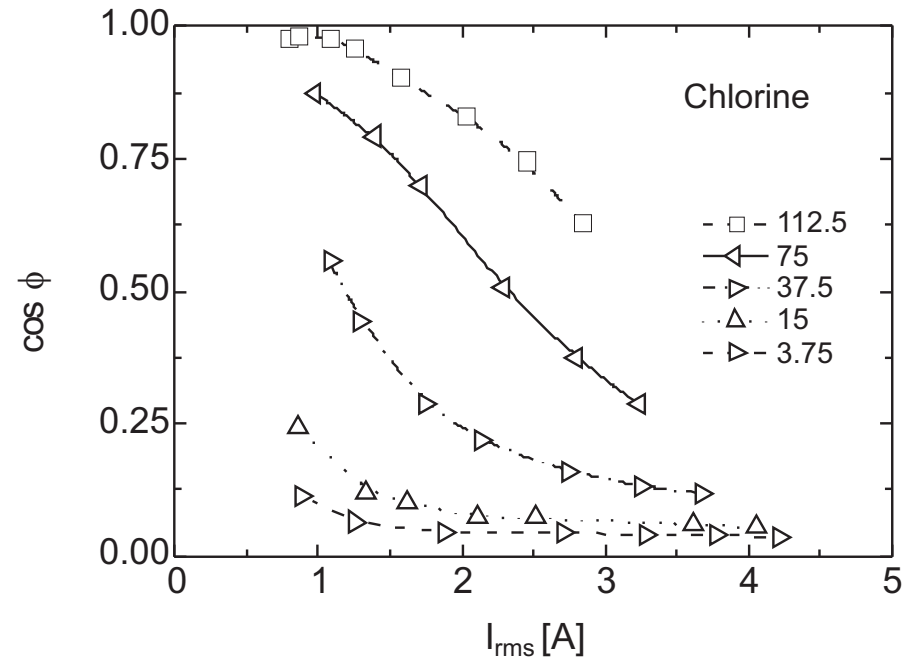
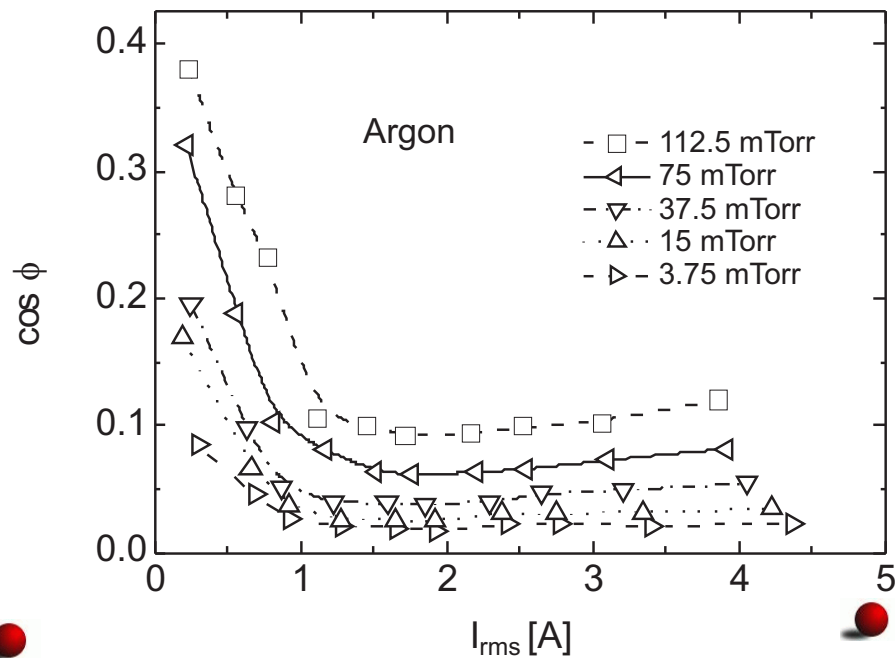


Z(I,U) II

Tiefe Drücke: $\cos\varphi$ ist fast konstant $\Rightarrow R$ ist konstant.

Hohe Drücke (Ar): $V \cos\varphi \propto V \Rightarrow R$ ist konstant, steigt aber zu kleinen Stromdichten an.

Hohe Drücke Cl₂: vollständig anderes Verhalten.



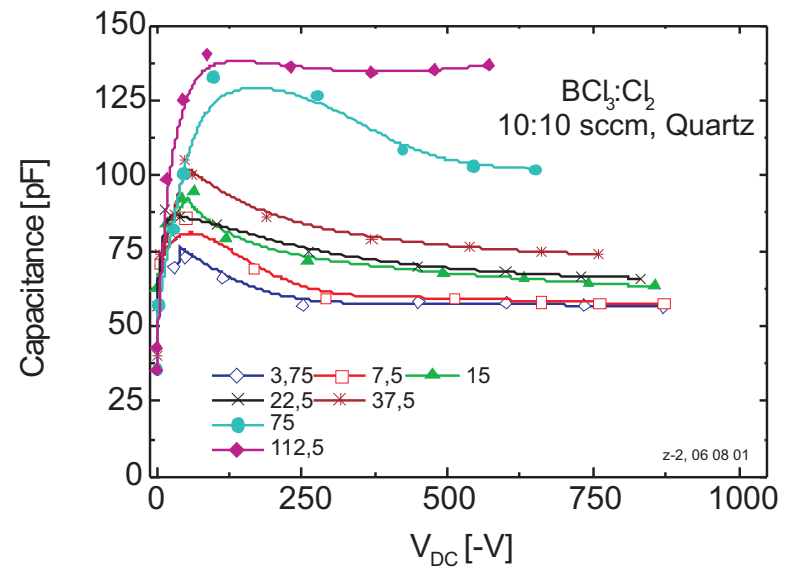
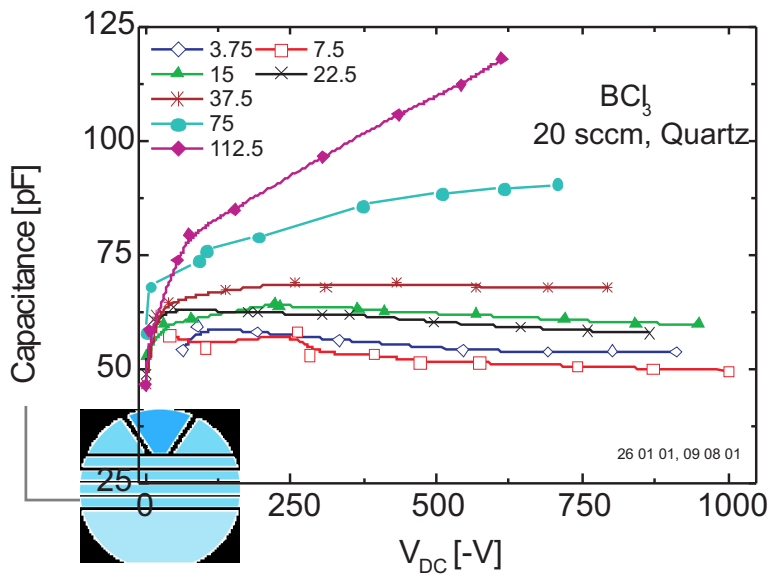
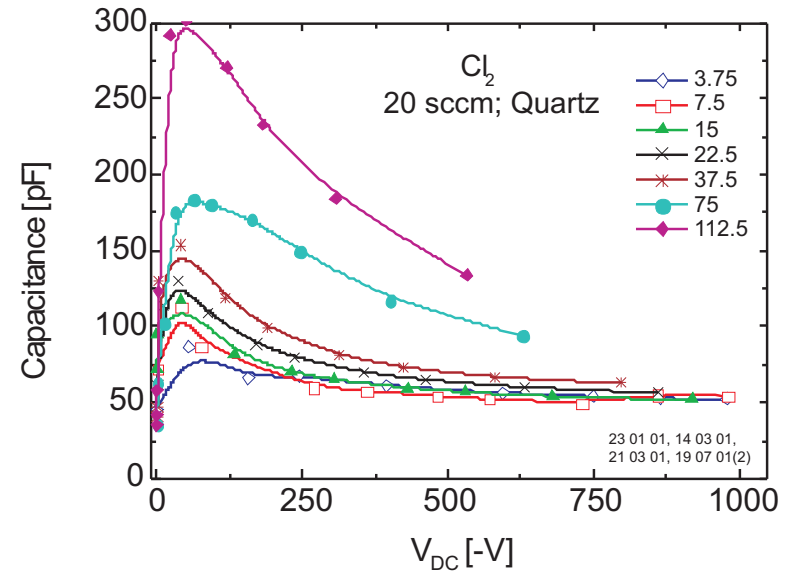
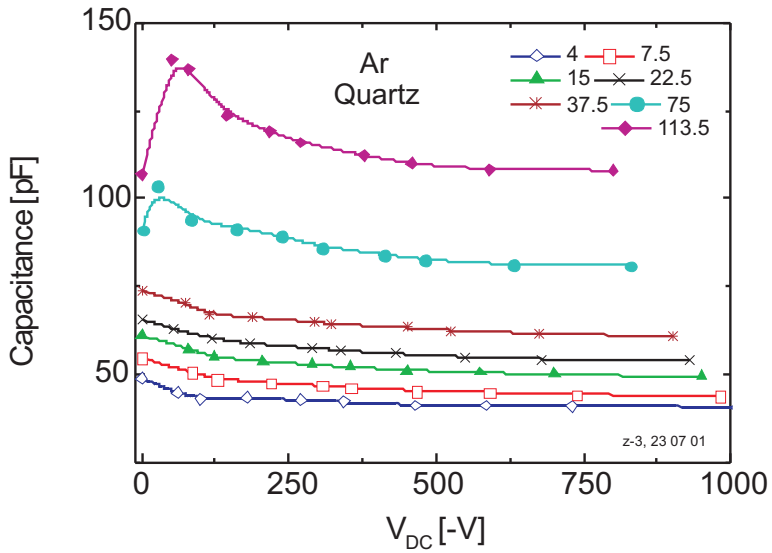
$Z(I,U)$ III

Realteil des Widerstandes: kontinuierlicher Übergang von Cl_2 nach BCl_3 .



Z(I,U) IV

$X = -i/\omega C$: bei niedrigen Drücken verhalten sich alle Gase sehr ähnlich.



Zusammenfassung Z-Scan

- Es wird nahezu nur die Hälfte der RF-Leistung in eine kapazitive Entladung eingekoppelt.



Zusammenfassung Z-Scan

- Es wird nahezu nur die Hälfte der RF-Leistung in eine kapazitive Entladung eingekoppelt.
- Argon und BCl_3 sind sich im Einkopplungsverhalten sehr ähnlich.



Zusammenfassung Z-Scan

- Es wird nahezu nur die Hälfte der RF-Leistung in eine kapazitive Entladung eingekoppelt.
- Argon und BCl_3 sind sich im Einkopplungsverhalten sehr ähnlich.
- In Cl_2 kann wesentlich mehr Leistung eingekoppelt werden. Dies führt aber zu einem höheren Realteil des Widerstandes: Verdacht auf **Electron Attachment**.

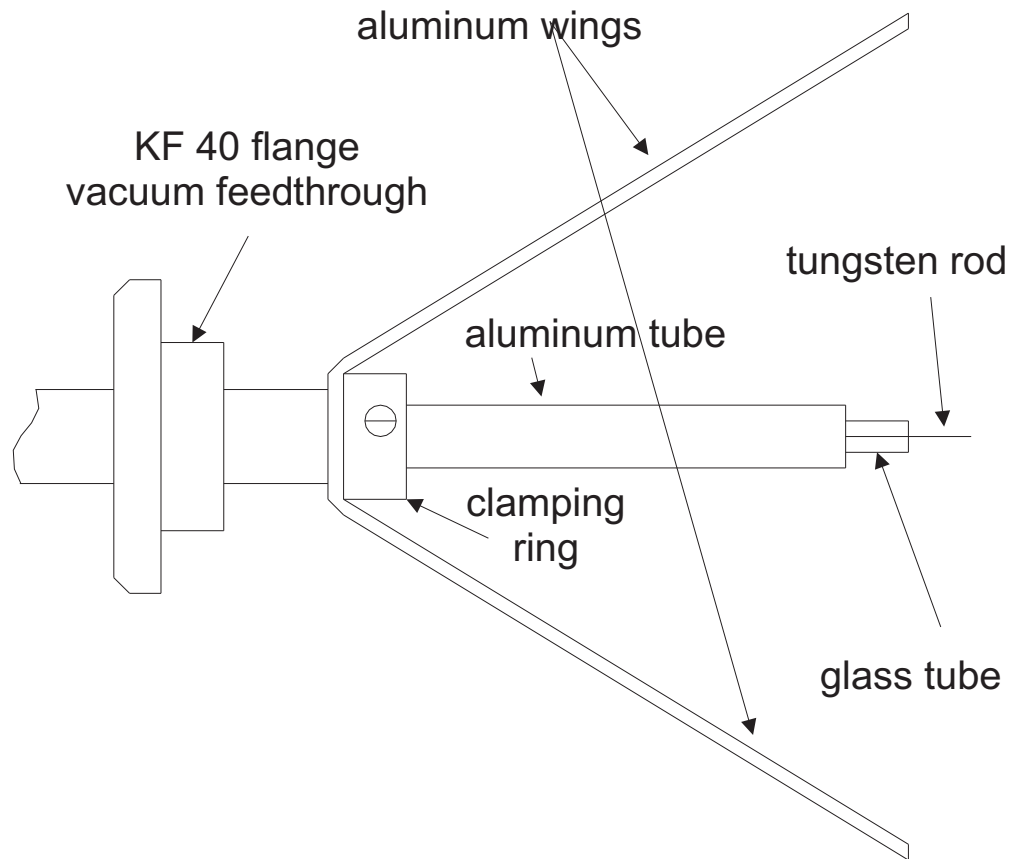


Zusammenfassung Z-Scan

- Es wird nahezu nur die Hälfte der RF-Leistung in eine kapazitive Entladung eingekoppelt.
- Argon und BCl_3 sind sich im Einkopplungsverhalten sehr ähnlich.
- In Cl_2 kann wesentlich mehr Leistung eingekoppelt werden. Dies führt aber zu einem höheren Realteil des Widerstandes: Verdacht auf **Electron Attachment**.
- Besonders bei Ar kann man zwei Bereiche unterscheiden:
 - Einen Niederdruck-Hochleistungsbereich mit harter Einkopplung (Phasenwinkel -90°) und
 - einen Hochdruck-Niedrigleistungsbereich mit weicher Einkopplung (Phasenwinkel bis fast 0°).



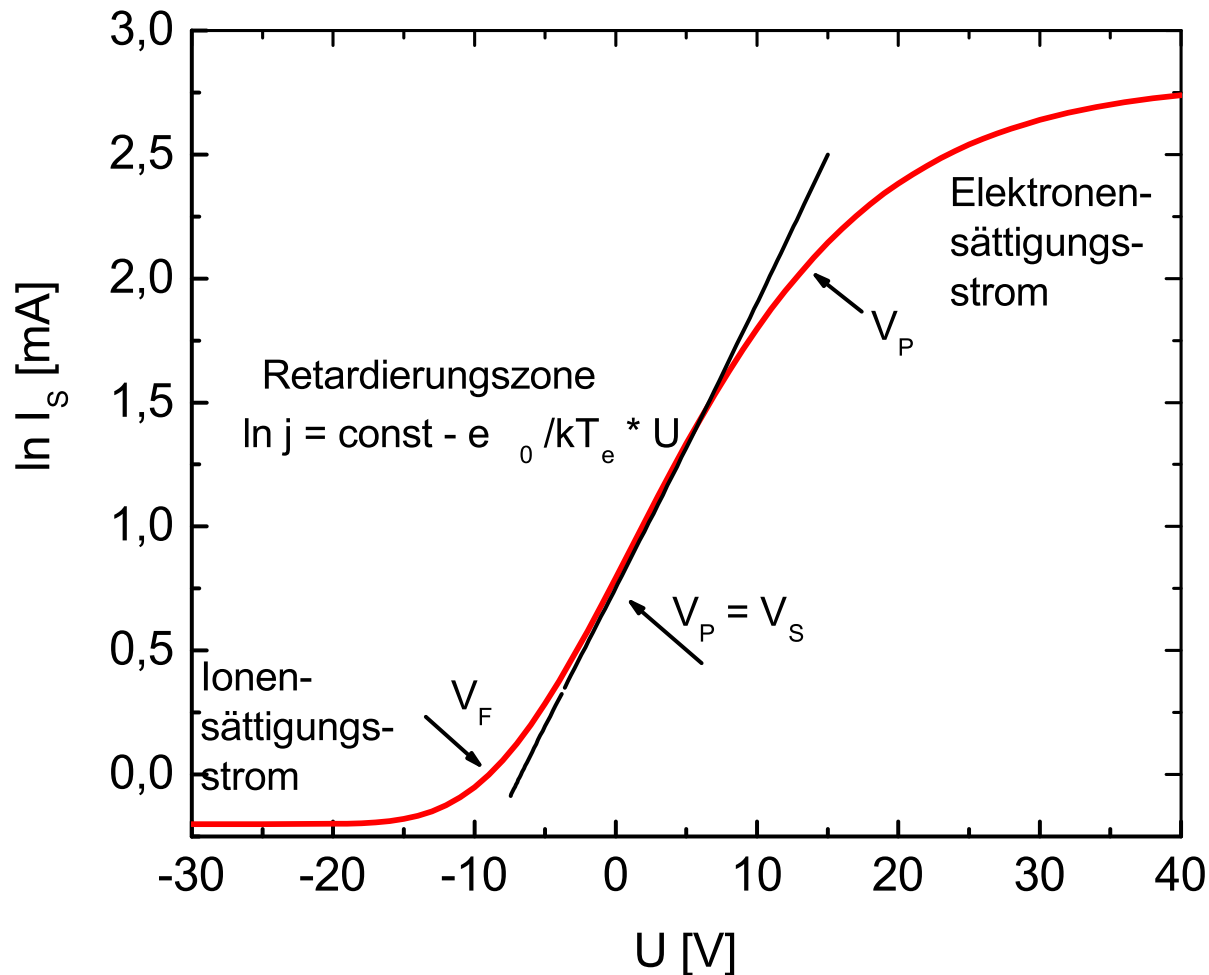
Langmuir-Sonde I



Prinzipieller Aufbau einer LANGMUIR-Sonde mit Draht in einer isolierten Scheide und den Erdungsflügeln.



Langmuir-Sonde II



Prinzipieller Verlauf der $I(U)$ -Kennlinie einer Langmuirsonde.
Ortsaufgelöste Bestimmung von T_e und n_e .

T_e ist der thermodynamisch definierte Wert $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$.



Langmuir-Sonde III

n_e sehr ähnlich und nahezu konstant für reaktive Gase. n_e in Argon ist deutlich höher und zeigt $\sqrt{\cdot}$ -Abhängigkeit:



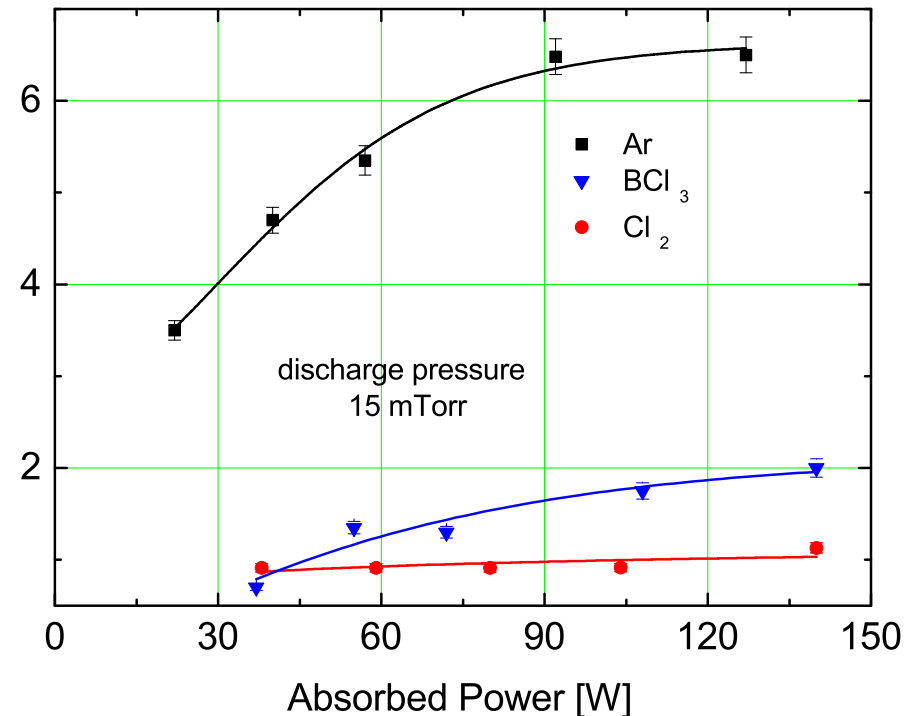
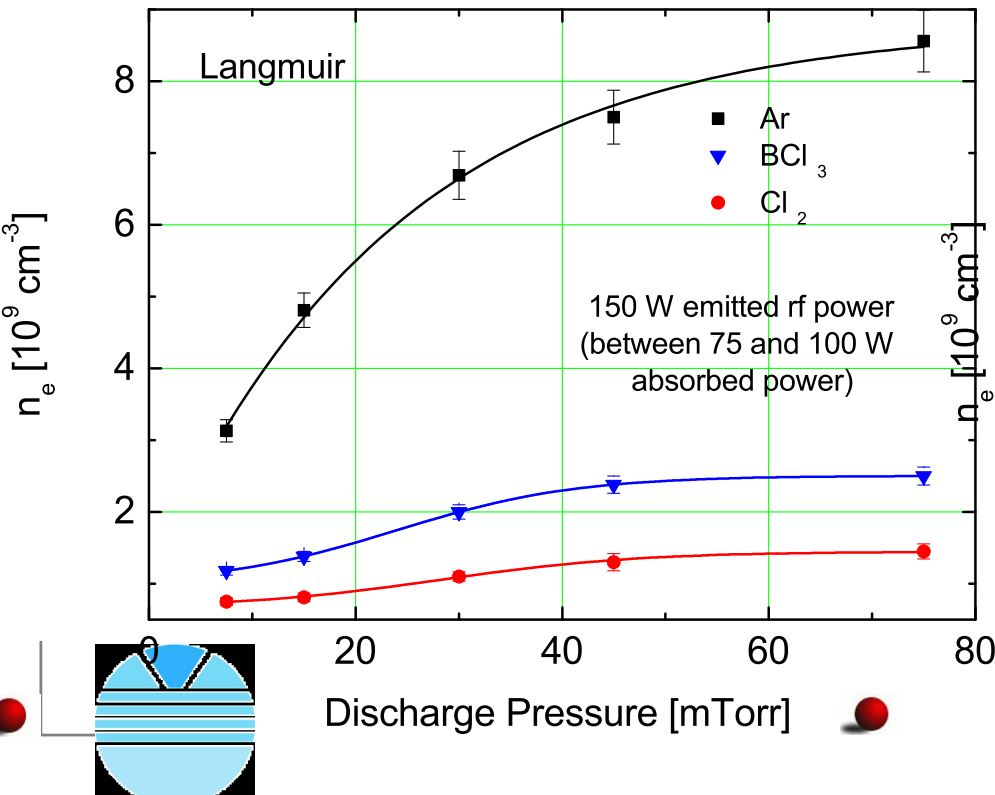
Langmuir-Sonde III

n_e sehr ähnlich und nahezu konstant für reaktive Gase. n_e in Argon ist deutlich höher und zeigt $\sqrt{\cdot}$ -Abhängigkeit:

Der wichtigste Heizungsmechanismus ist OHMSche Heizung durch die Randschicht:

($V_{DC} \propto \sqrt{P_{RF}}$), die Verlustmechanismen sind unabhängig von V_{DC}

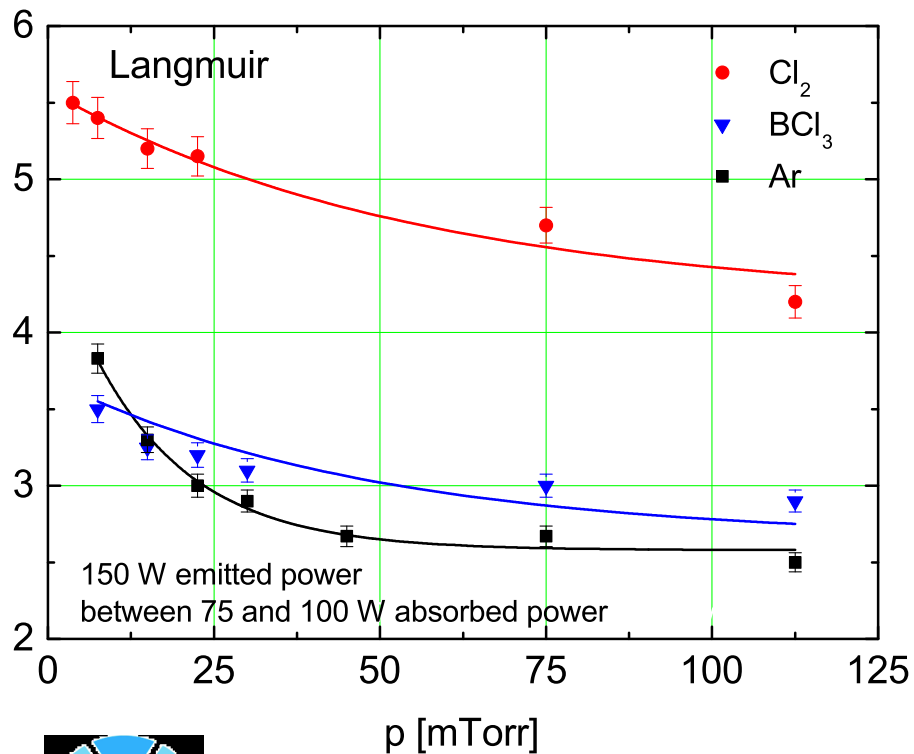
(E_{Ion} : Ar: 15.755 eV, Cl_2 : 11.48 eV, BCl_3 : 12.0 eV). LEWIS-Säure?



Langmuir-Sonde IV

Druckabhängigkeit hyperbolisch für Ar und Cl_2 und BCl_3 .

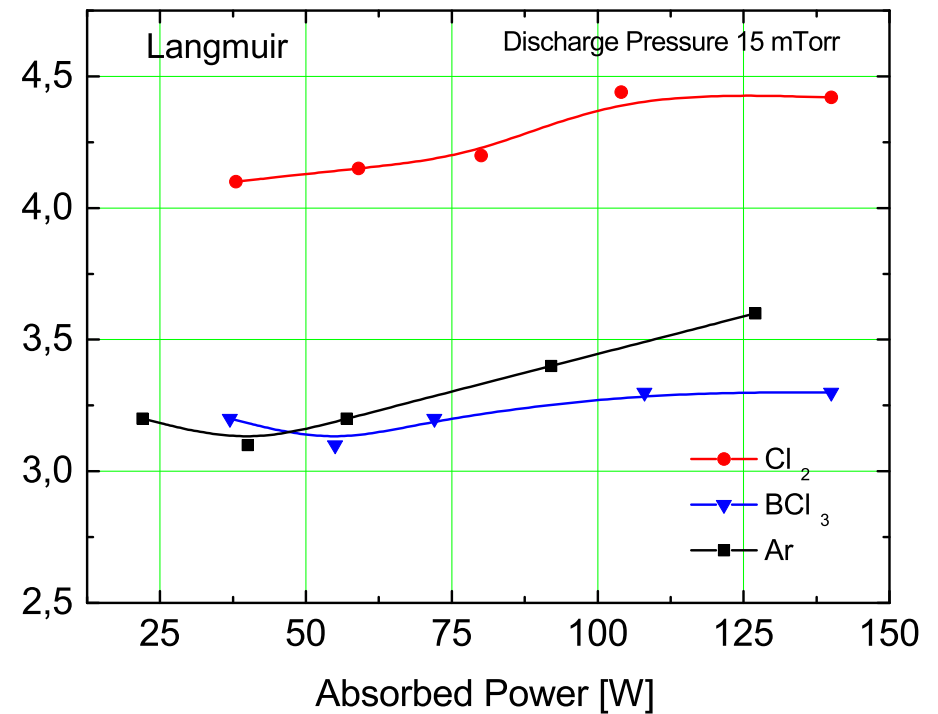
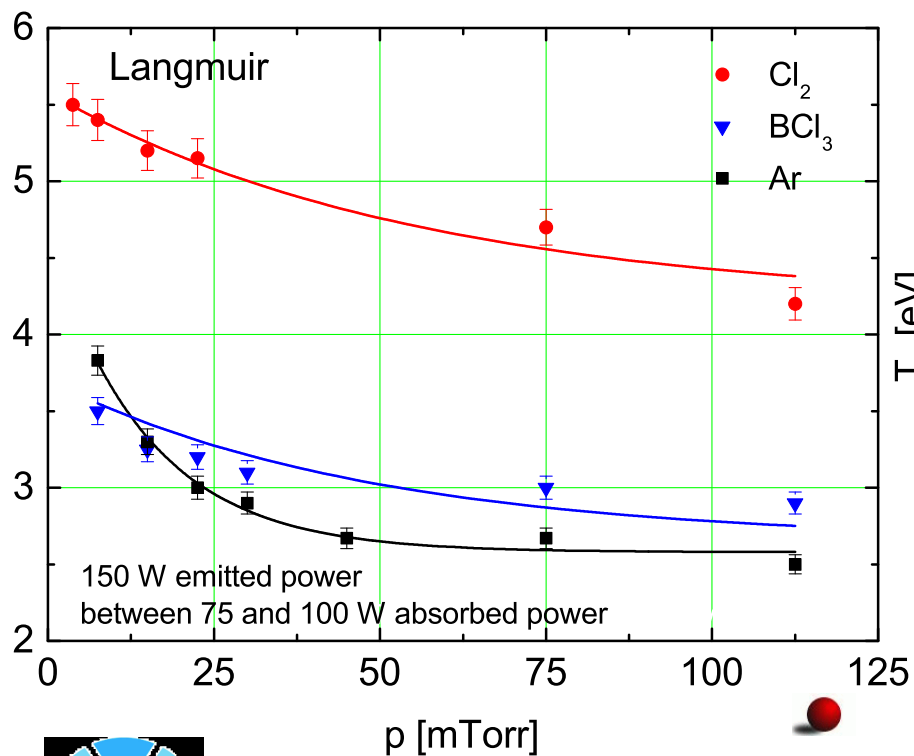
Leistungsabhängigkeit: leichte Erhöhung für Ar und Cl_2 , T_e für BCl_3 ist über den ganzen Bereich konstant. BCl_3 ähnelt viel mehr einem Edelgas als Cl_2 !!



Langmuir-Sonde IV

Druckabhängigkeit hyperbolisch für Ar und Cl_2 und BCl_3 .

Leistungsabhängigkeit: leichte Erhöhung für Ar und Cl_2 , T_e für BCl_3 ist über den ganzen Bereich konstant. BCl_3 ähnelt viel mehr einem Edelgas als Cl_2 !!



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.

- $\propto P_{\text{abs}} \propto n_n \propto p.$



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.
 - $\propto P_{abs} \propto n_n \propto p$.
 - Das stimmt gut für Argon, schlecht für die molekularen Gase.



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.
 - $\propto P_{abs} \propto n_n \propto p$.
 - Das stimmt gut für Argon, schlecht für die molekularen Gase.
- T_e wird durch Ionisation und Verlust (Diffusion) dominiert.



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.
 - $\propto P_{abs} \propto n_n \propto p.$
 - Das stimmt gut für Argon, schlecht für die molekularen Gase.
- T_e wird durch Ionisation und Verlust (Diffusion) dominiert.
 - $\propto 1/n_n \propto 1/p.$



Zusammenfassung Langmuir

- n_p wird bei einer einstufigen Ionisation dominiert durch die Leistungsabsorption in der Entladung.
 - $\propto P_{abs} \propto n_n \propto p.$
 - Das stimmt gut für Argon, schlecht für die molekularen Gase.
- T_e wird durch Ionisation und Verlust (Diffusion) dominiert.
 - $\propto 1/n_n \propto 1/p.$
 - Das stimmt gut für Argon, schlecht für die molekularen Gase.



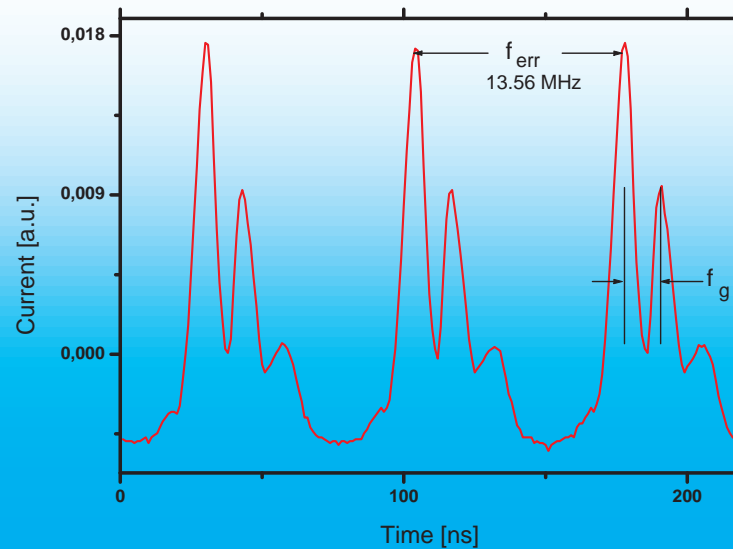
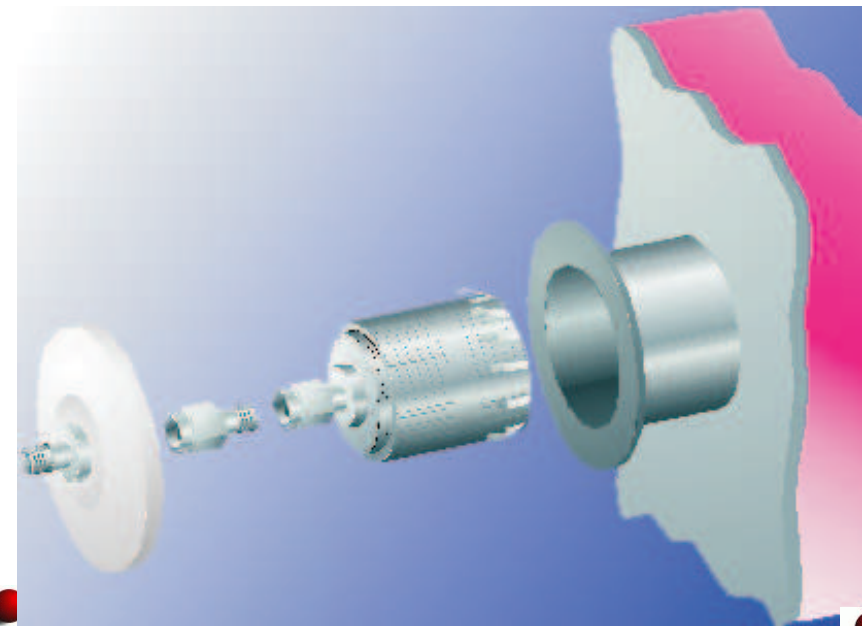
SEERS I

Der Sensor wird in die geerdete Wand des Reaktors geflanscht.



SEERS I

Der Sensor wird in die geerdete Wand des Reaktors geflanscht.
Zeit zwischen den höchsten Peaks: invertierte Anregungsfrequenz
geometrische Resonanzfrequenz: Kehrwert zwischen benachbarten Peaks
→ räumlich gemittelte Plasmadichte
aus der Dämpfung \Rightarrow effektive Stoßfrequenz.



SEERS II

$\nu_{m,eff}$ in Ar/Kr, BCl₃ und Cl₂ als Druckfunktion
(150 W Input-Power → DC-Bias zwischen 300 und 400 V)

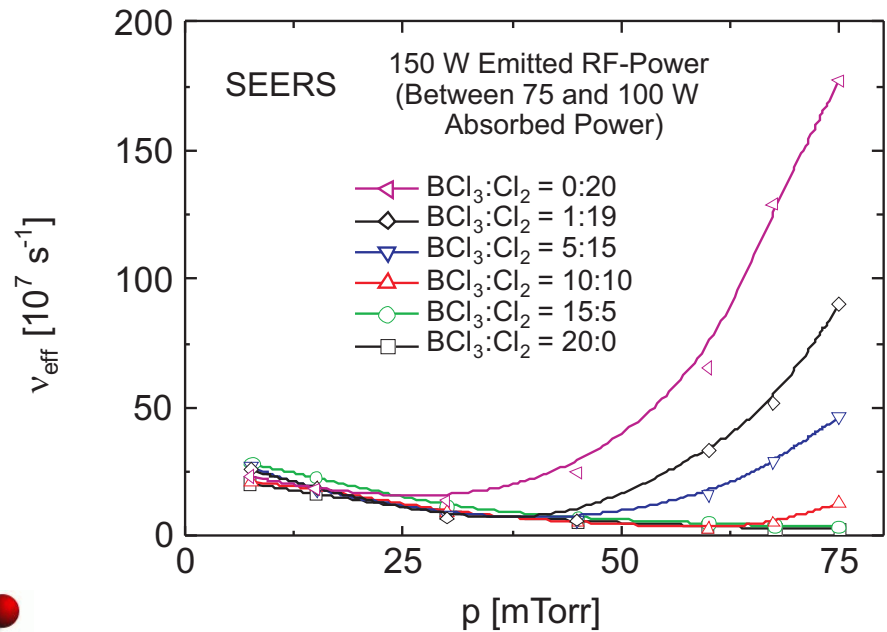
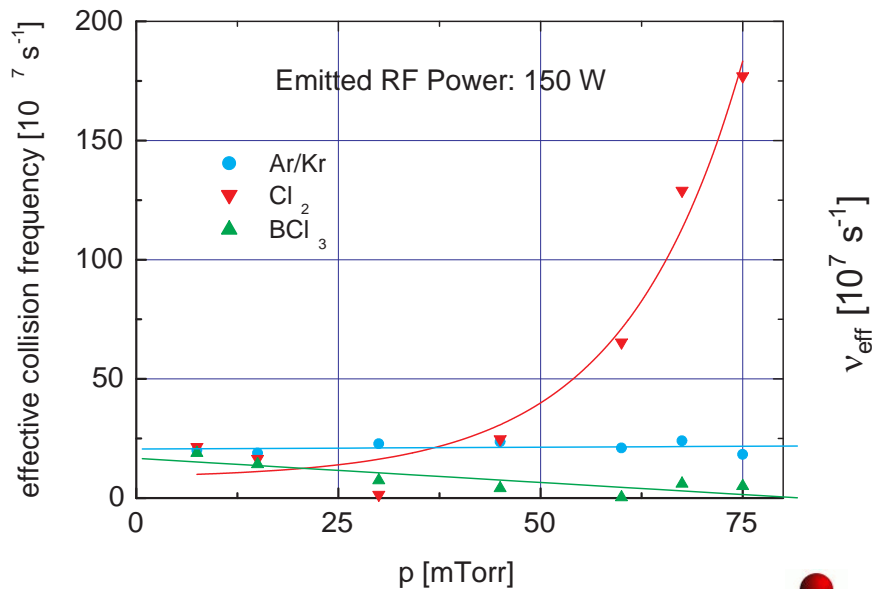


SEERS II

$\nu_{m,eff}$ in Ar/Kr, BCl₃ und Cl₂ als Druckfunktion

(150 W Input-Power → DC-Bias zwischen 300 und 400 V)

G. Franz and M. Klick; J. Vac. Sci. Technol. A **23**, 917 (2005).



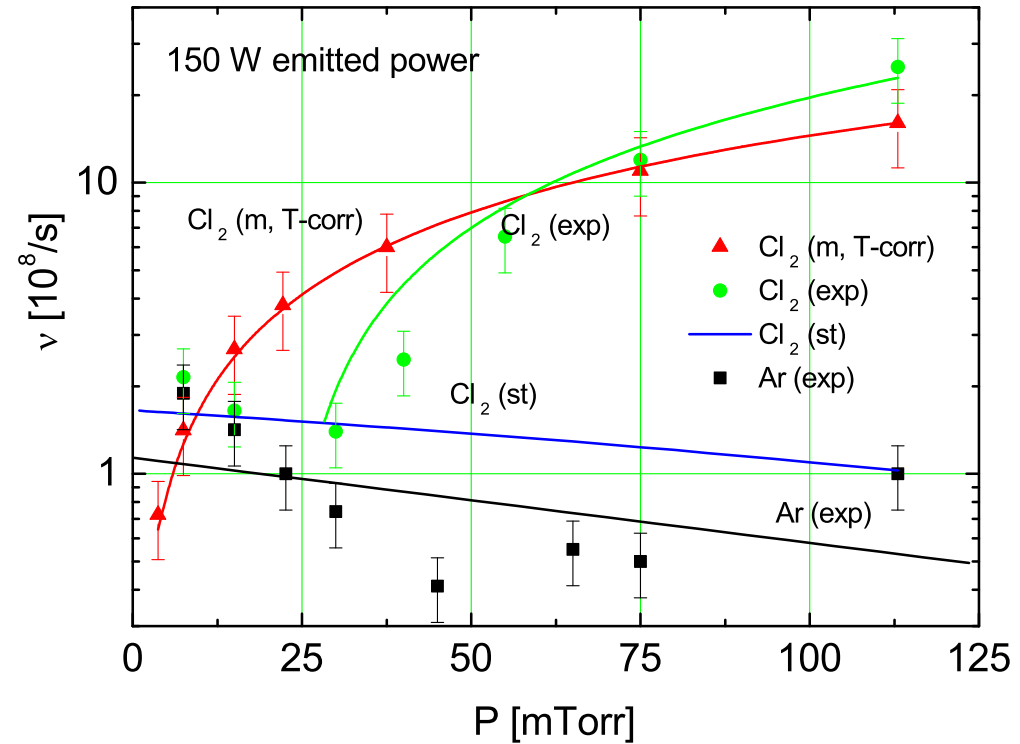
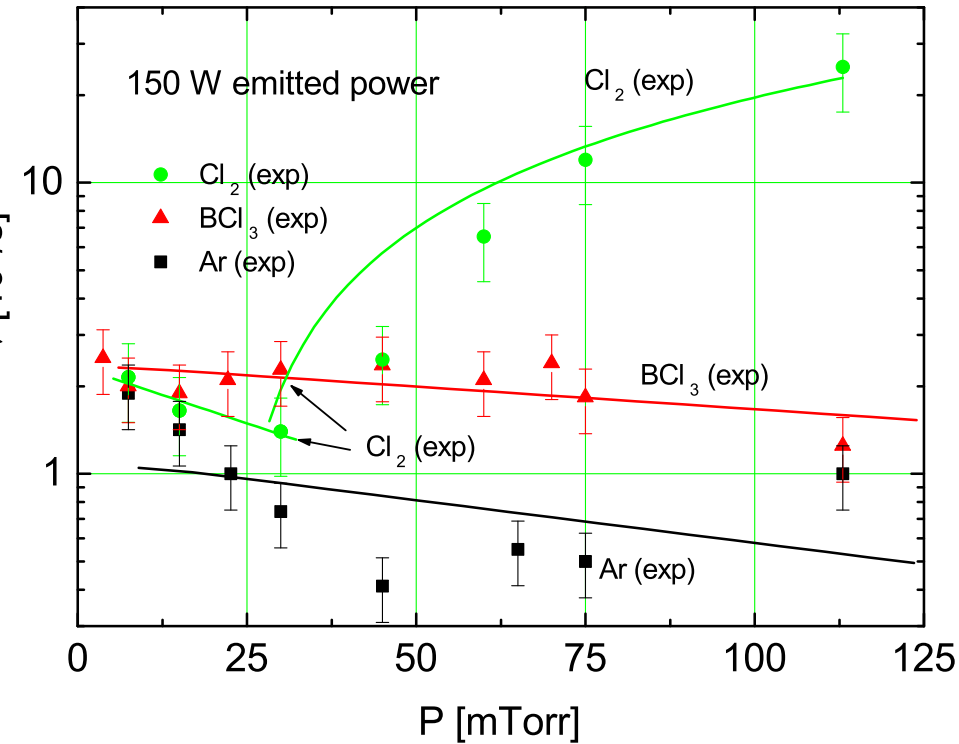
SEERS III

$$\nu_m = n_n \sigma \langle v_e \rangle$$

- n_n Neutralteilchendichte
- σ vollständiger Streuquerschnitt für elastische Streuung
- v_e thermische Geschwindigkeit der Elektronen ($\propto \sqrt{T_e}$)
- n_n aus Downstream-Messungen ($pV = nRT$)
- $T_e \Rightarrow v_e$ aus LANGMUIR-Sonden-Messungen
- σ aus der Literatur
- ν_{tot} von SEERS



SEERS IV



Simulierte ν_{eff} für Ar und Cl_2 ,
 verglichen mit experimentellen Werten für $\nu_{\text{eff}}(\text{Cl}_2)$.



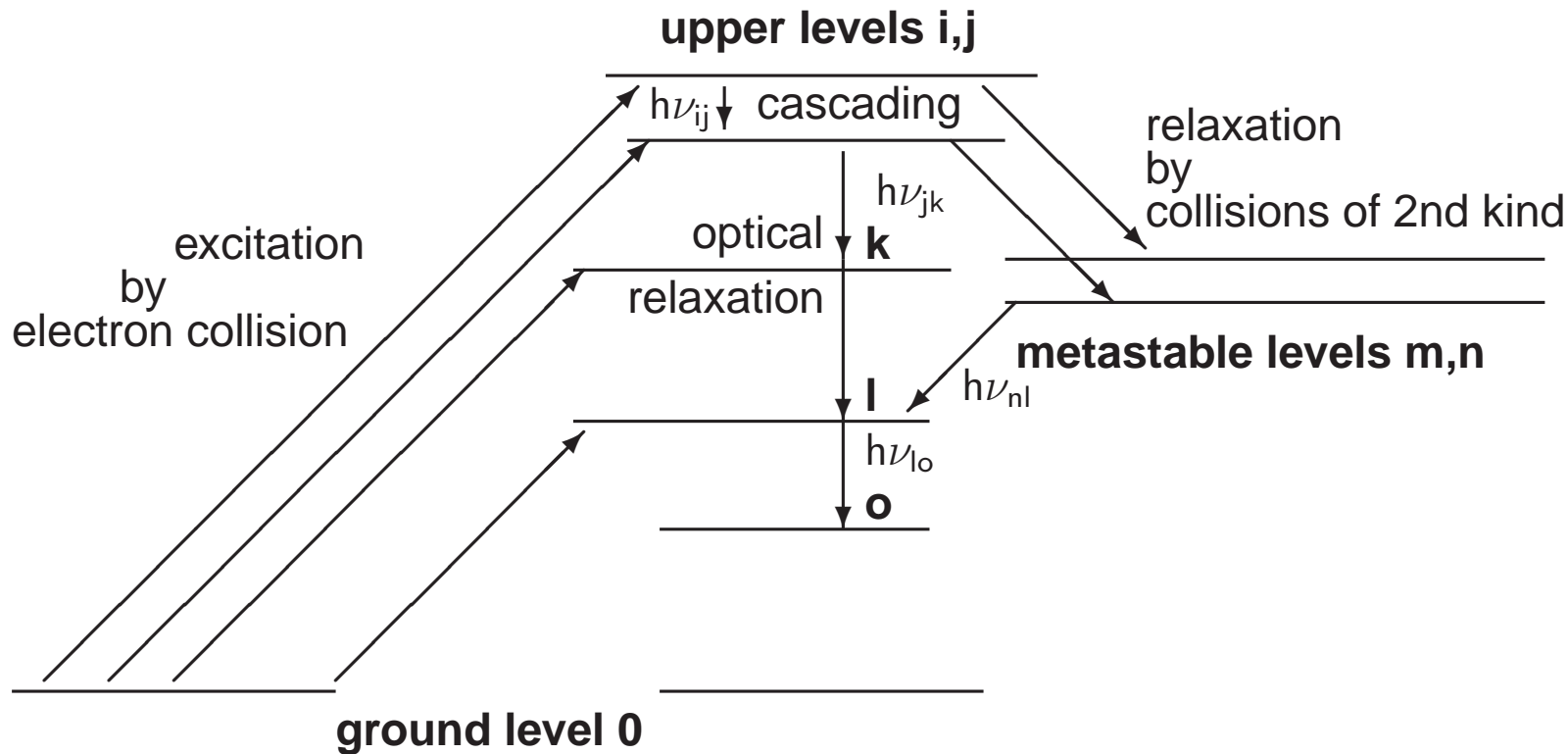
Opt. Emissionsspektroskopie I



Nachdem der junge ISAAK NEWTON einen Selbstversuch mit seiner ersten Erfindung, dem nach ihm benannten Teleskop, gemacht hatte, war er für drei Tage schneebblind.



Opt. Emissionsspektroskopie II



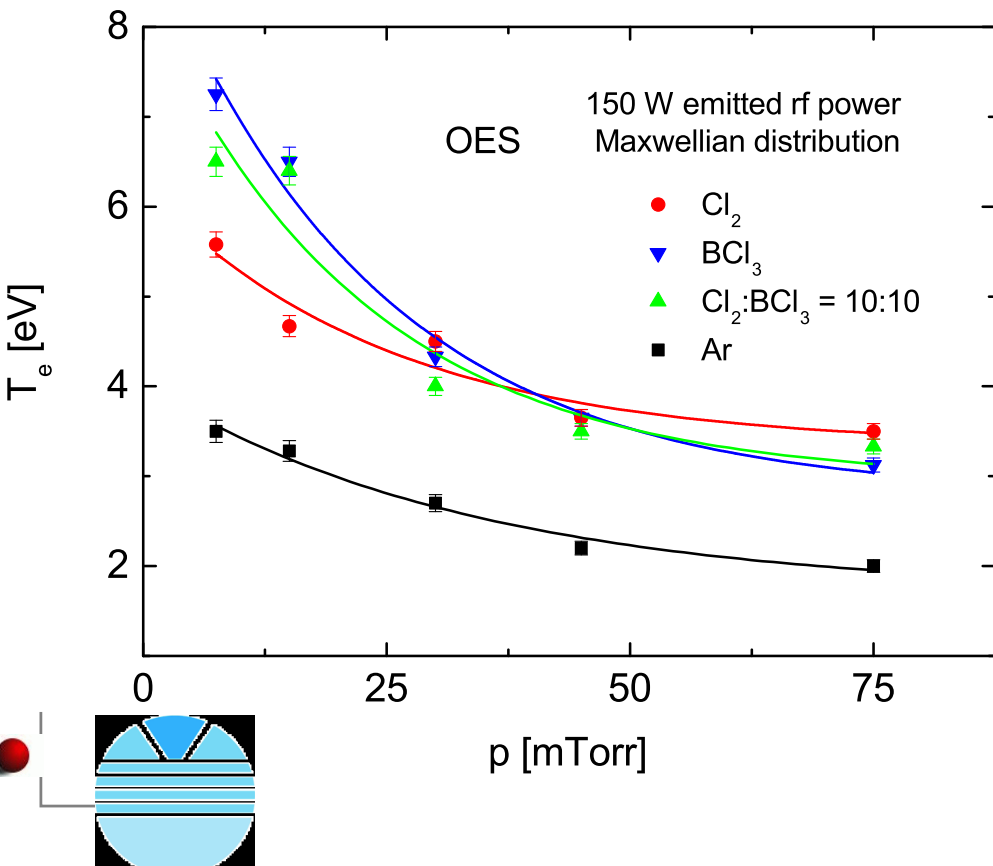
Koronamodell: Einmaliger Elektronenstoß aus dem Grundzustand, Relaxation ausschließlich durch Strahlung. Mögliche parasitäre Prozesse:

Optisches Cascading von höheren Niveaus, Stöße 2. Art → metastabile Zustände.



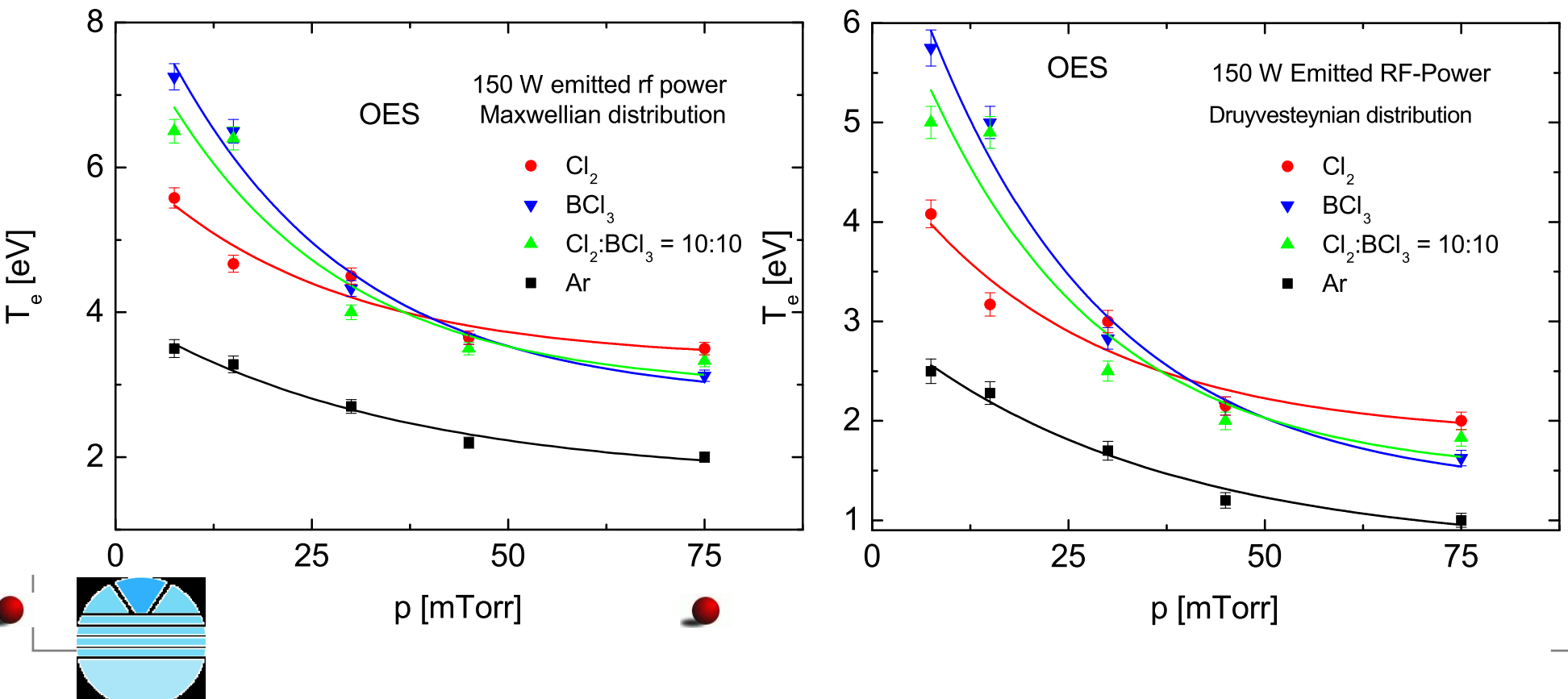
OES III

Temperatur der Elektronen (OES) als Funktion des Entladungsdrucks bei konstanter emittierter RF-Leistung ($150 \text{ W} = 0.3 \text{ W/cm}^2$, lks.) und der emittierten RF-Leistung bei konstantem Entladungsdruck (15 mTorr oder 2 Pa) in Entladungen von Ar, Cl_2 , BCl_3 , und einer Mischung von BCl_3 und Cl_2 (10:10 sccm). $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ sind alternativ MB (lks.) und D (re.).



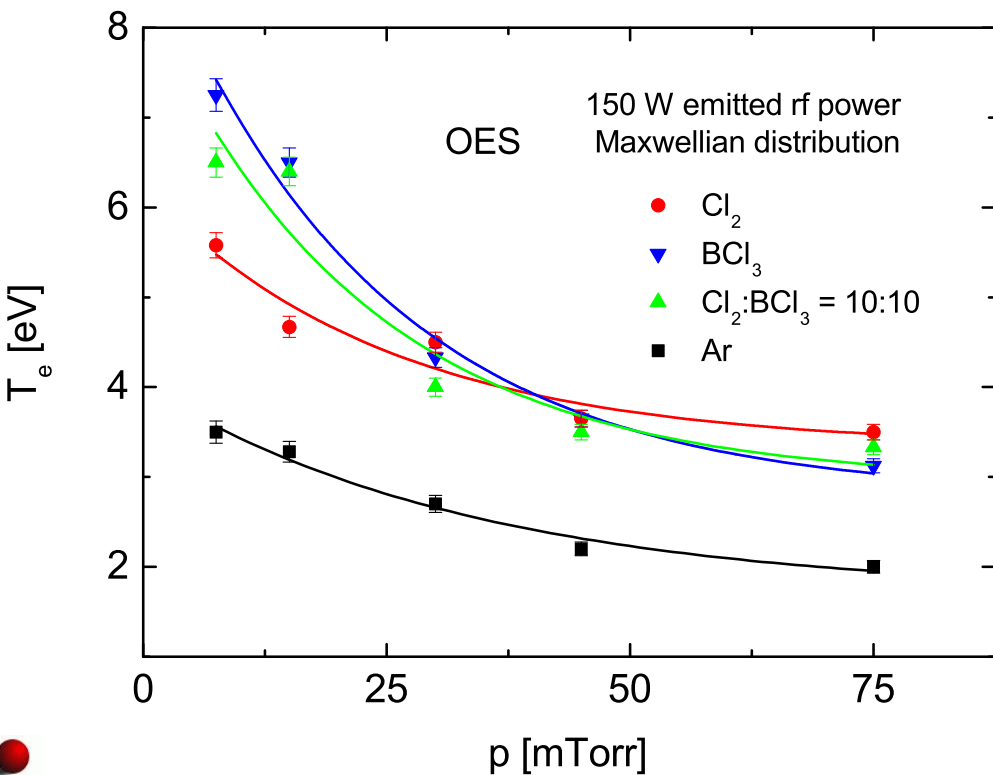
OES III

Temperatur der Elektronen (OES) als Funktion des Entladungsdrucks bei konstanter emittierter RF-Leistung ($150 \text{ W} = 0.3 \text{ W/cm}^2$, lks.) und der emittierten RF-Leistung bei konstantem Entladungsdruck (15 mTorr oder 2 Pa) in Entladungen von Ar, Cl_2 , BCl_3 , und einer Mischung von BCl_3 und Cl_2 (10:10 sccm). $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ sind alternativ MB (lks.) und D (re.).



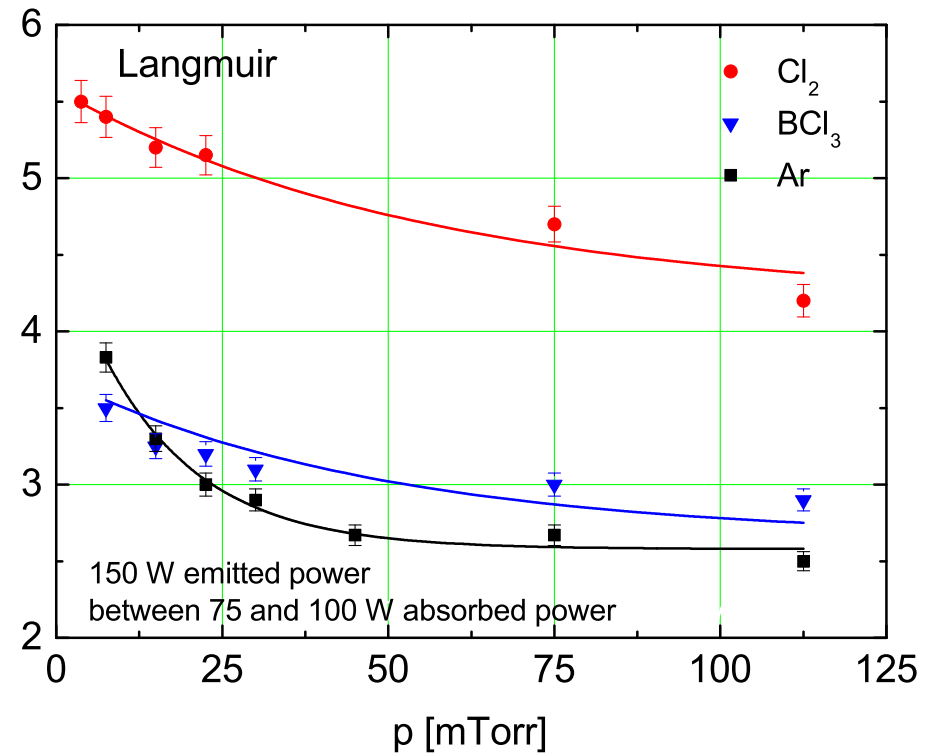
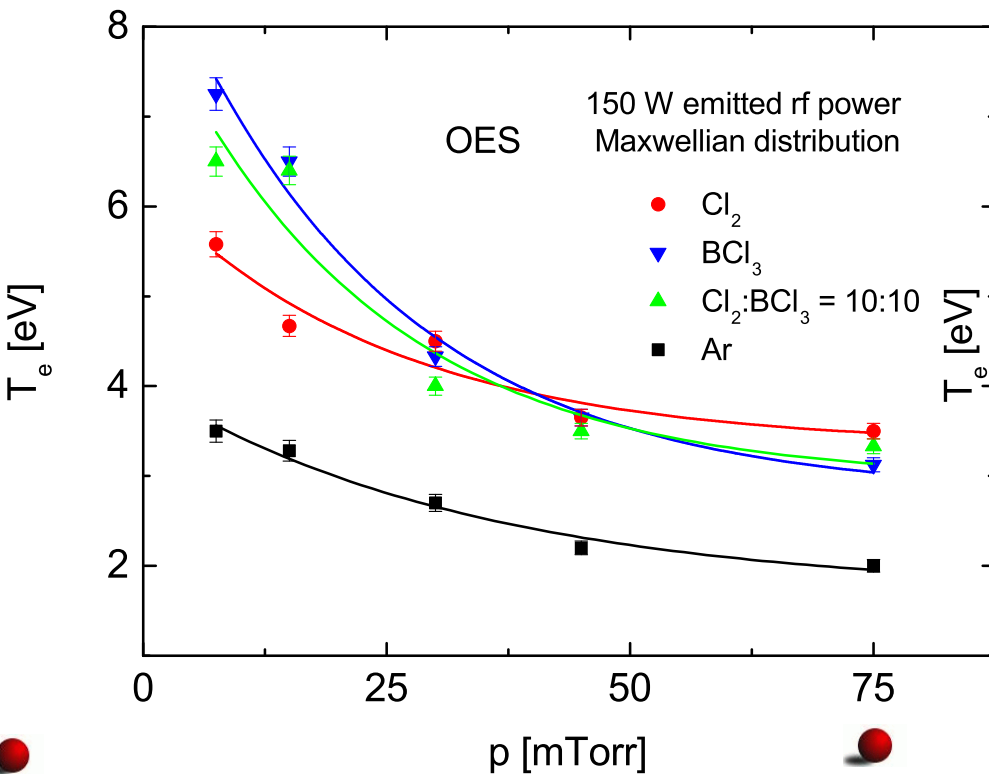
Langmuir-OES

T_e wird für BCl_3 mit OES bedeutend höher als mit Langmuir gemessen, für Cl_2 eher (schwach) umgekehrt, für Ar dagegen fast gleich.



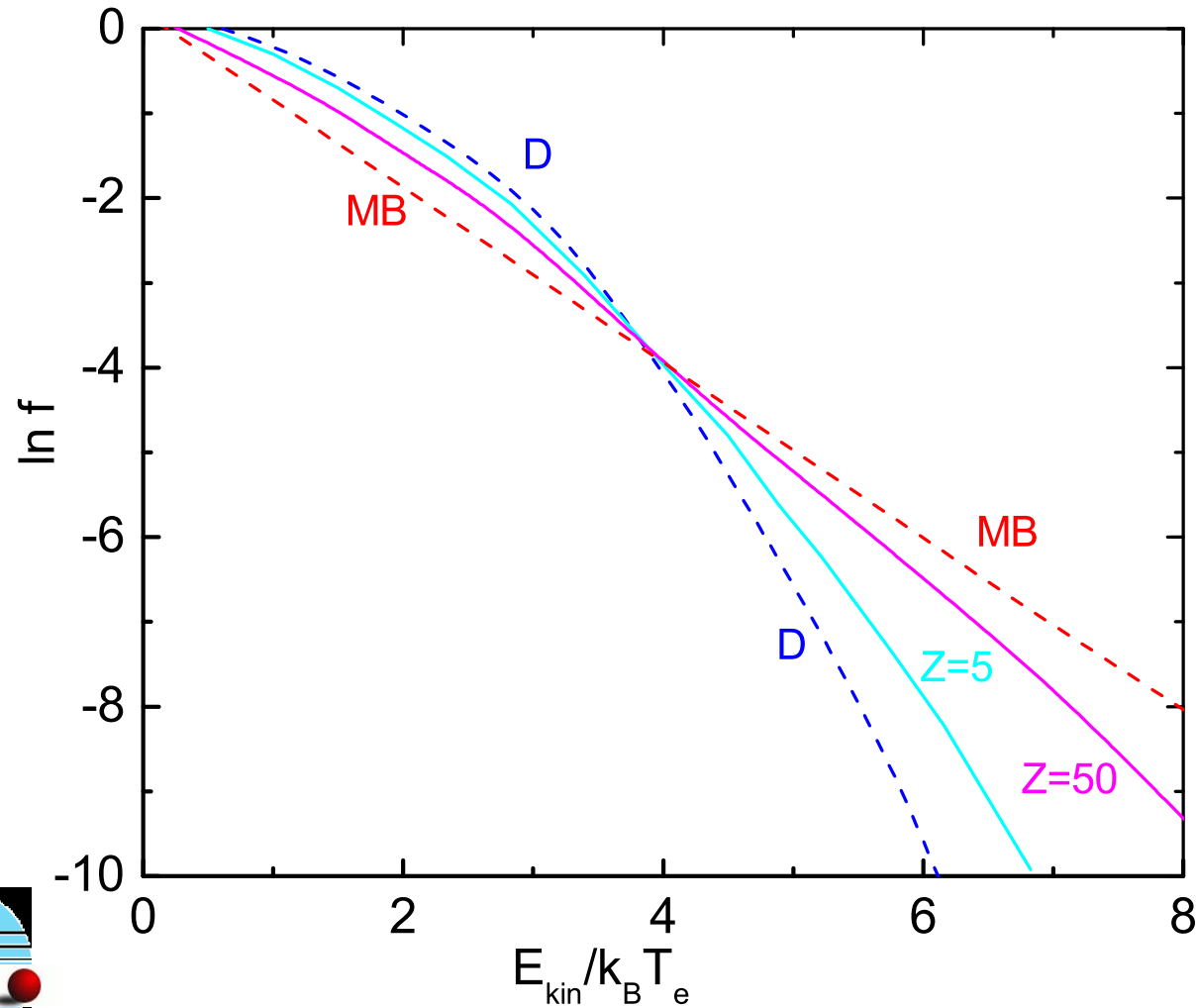
Langmuir-OES

T_e wird für BCl_3 mit OES bedeutend höher als mit Langmuir gemessen, für Cl_2 eher (schwach) umgekehrt, für Ar dagegen fast gleich.



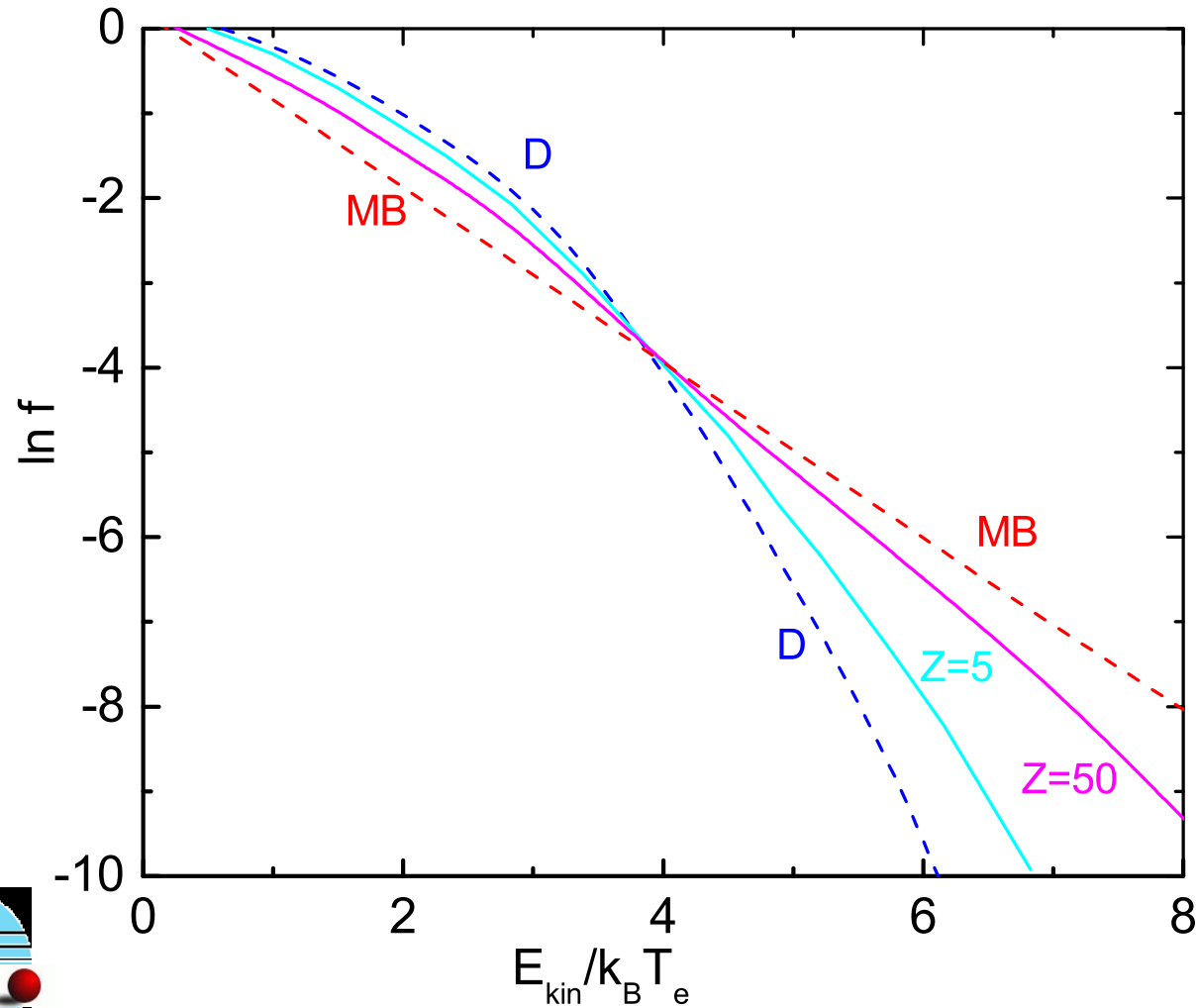
$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ I

$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ als MAXWELL-BOLTZMANN- oder als DRUYVESTAYN-Verteilung beeinflusst wesentlich das Ergebnis der Anpassung $\Rightarrow T_e$.



$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ I

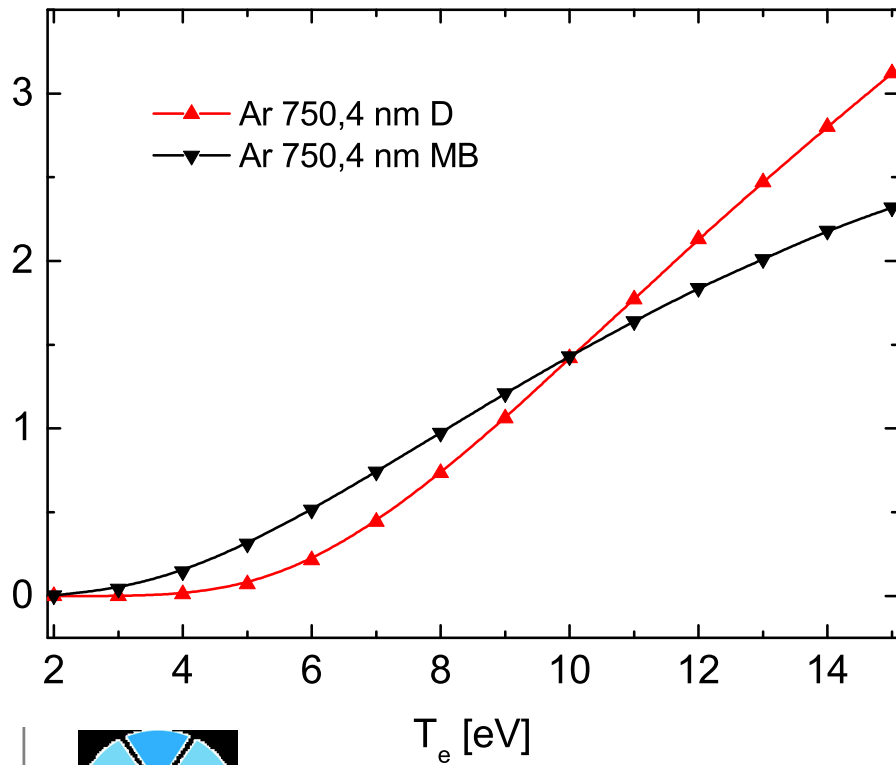
$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ als MAXWELL-BOLTZMANN- oder als DRUYVESTEYN-Verteilung beeinflusst wesentlich das Ergebnis der Anpassung $\Rightarrow T_e$.



$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ II

Ratenkoeffizienten modelliert nach MB oder D. Für gleichen Ratenkoeffizienten benötigt man jenseits von 10 eV nach MB viel höhere Temperaturen als nach D.

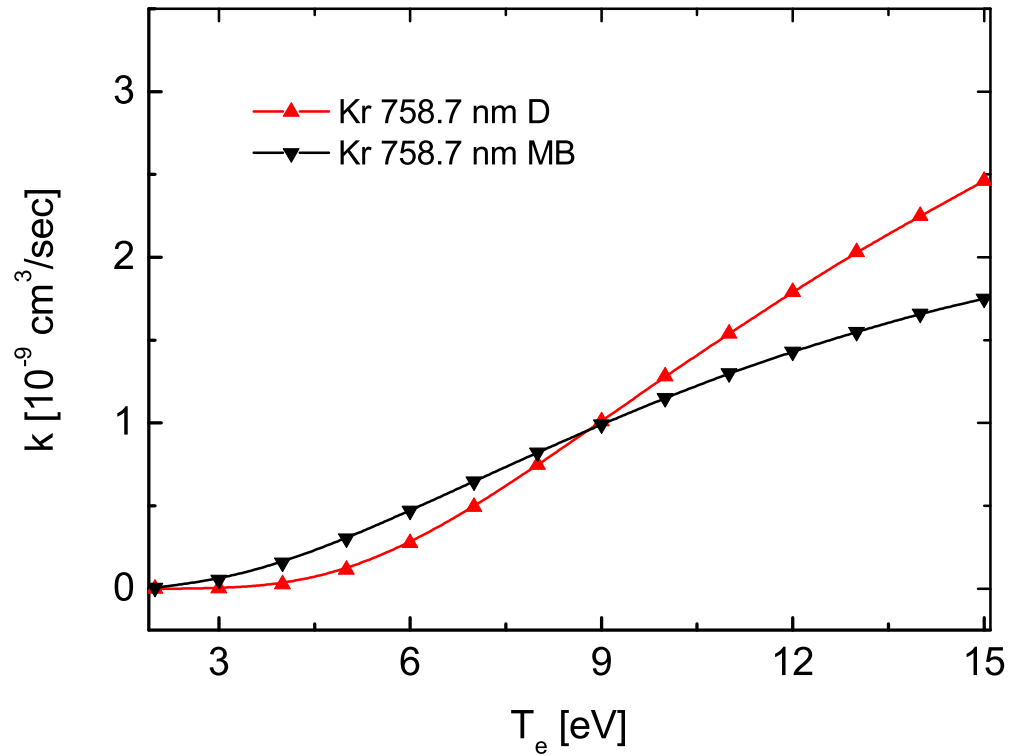
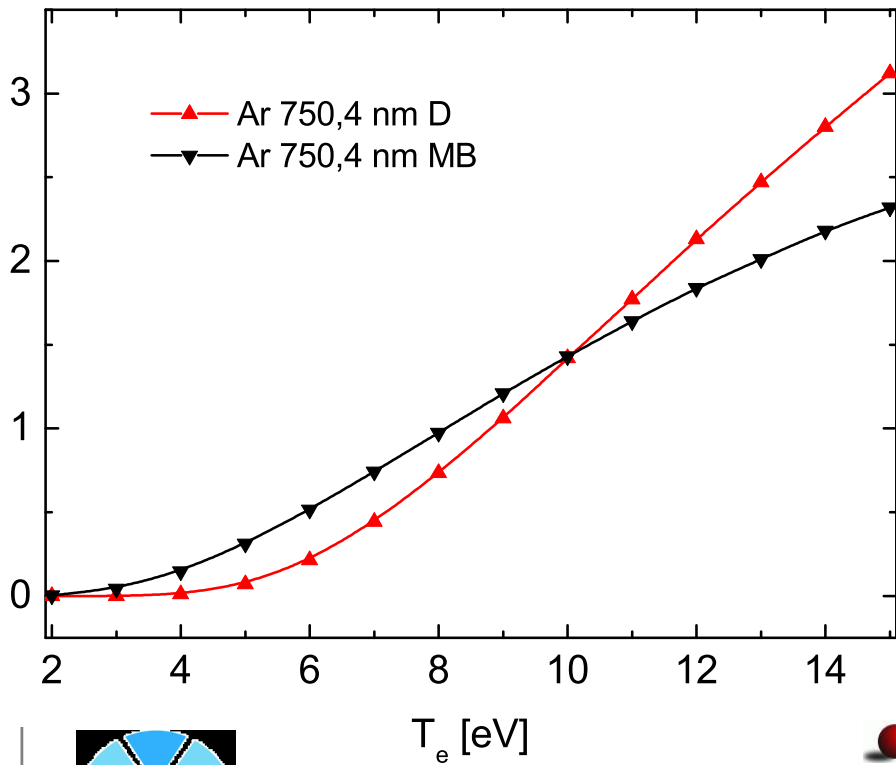
$$k = \int_0^{\infty} f(E) \sigma(E) E dE$$



$\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ II

Ratenkoeffizienten modelliert nach MB oder D. Für gleichen Ratenkoeffizienten benötigt man jenseits von 10 eV nach MB viel höhere Temperaturen als nach D.

$$k = \int_0^{\infty} f(E) \sigma(E) E dE$$



Elektronendiagnostik I

- Mit OES wird die Elektronentemperatur auch gemessen, aber im MAXWELL-Schwanz der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$, im Gegensatz zu LANGMUIR (Schwerpunkt der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$).



Elektronendiagnostik I

- Mit OES wird die Elektronentemperatur auch gemessen, aber im MAXWELL-Schwanz der \mathcal{EEDF} , im Gegensatz zu LANGMUIR (Schwerpunkt der \mathcal{EEDF}).
- Je höher die Elektronendichte, um so besser die Übereinstimmung in T_e zwischen OES und LANGMUIR, sonst \mathcal{EEDF} mit zwei Temperaturen.



Elektronendiagnostik I

- Mit OES wird die Elektronentemperatur auch gemessen, aber im MAXWELL-Schwanz der \mathcal{EEDF} , im Gegensatz zu LANGMUIR (Schwerpunkt der \mathcal{EEDF}).
- Je höher die Elektronendichte, um so besser die Übereinstimmung in T_e zwischen OES und LANGMUIR, sonst \mathcal{EEDF} mit zwei Temperaturen.
- \Rightarrow für Ar beste Übereinstimmung.



Elektronendiagnostik I

- Mit OES wird die Elektronentemperatur auch gemessen, aber im MAXWELL-Schwanz der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$, im Gegensatz zu LANGMUIR (Schwerpunkt der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$).
- Je höher die Elektronendichte, um so besser die Übereinstimmung in T_e zwischen OES und LANGMUIR, sonst $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ mit zwei Temperaturen.
- \Rightarrow für Ar beste Übereinstimmung.
- $\Rightarrow T_e$ wird durch Ionisation und Verlust (Diffusion + Rekombination + Electron Attachment) dominiert.



Elektronendiagnostik I

- Mit OES wird die Elektronentemperatur auch gemessen, aber im MAXWELL-Schwanz der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$, im Gegensatz zu LANGMUIR (Schwerpunkt der $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$).
- Je höher die Elektronendichte, um so besser die Übereinstimmung in T_e zwischen OES und LANGMUIR, sonst $\mathcal{E}\mathcal{E}\mathcal{D}\mathcal{F}$ mit zwei Temperaturen.
- \Rightarrow für Ar beste Übereinstimmung.
- $\Rightarrow T_e$ wird durch Ionisation und Verlust (Diffusion + Rekombination + Electron Attachment) dominiert.
- Je effektiver der Charakter als LEWIS-Säure, um so niedriger die Elektronendichte, je leichter das entstehende Ion, um so höher die Verluste durch Diffusion \Rightarrow Einfluß auf den ambipolaren Diffusionskoeffizienten \Rightarrow sehr niedrige Werte für n_{Cl_2} .



Elektronendiagnostik II

- Entscheidend für die Plasmadichte ist nicht die Leistungseinkopplung an sich, sondern die Einkopplung in ein Energiefenster $> E_{\text{ion}}$.



Elektronendiagnostik II

- Entscheidend für die Plasmadichte ist nicht die Leistungseinkopplung an sich, sondern die Einkopplung in ein Energiefenster $> E_{\text{ion}}$.
- Hohe Leistungseinkopplung kann z. B. die Dichte der Radikale erhöhen, was die Ätzrate bedeutend erhöhen kann.



Elektronendiagnostik II

- Entscheidend für die Plasmadichte ist nicht die Leistungseinkopplung an sich, sondern die Einkopplung in ein Energiefenster $> E_{\text{ion}}$.
- Hohe Leistungseinkopplung kann z. B. die Dichte der Radikale erhöhen, was die Ätzrate bedeutend erhöhen kann.
- So beträgt die Dissoziationsenergie des Chlors nur 2,51 eV gegenüber 12,96 eV für das erste Ionisierungspotential. Also ist das Verhältnis von Chlor-Ionen zu Chlor-Radikalen nur 29 ppm.



Gastemperatur I

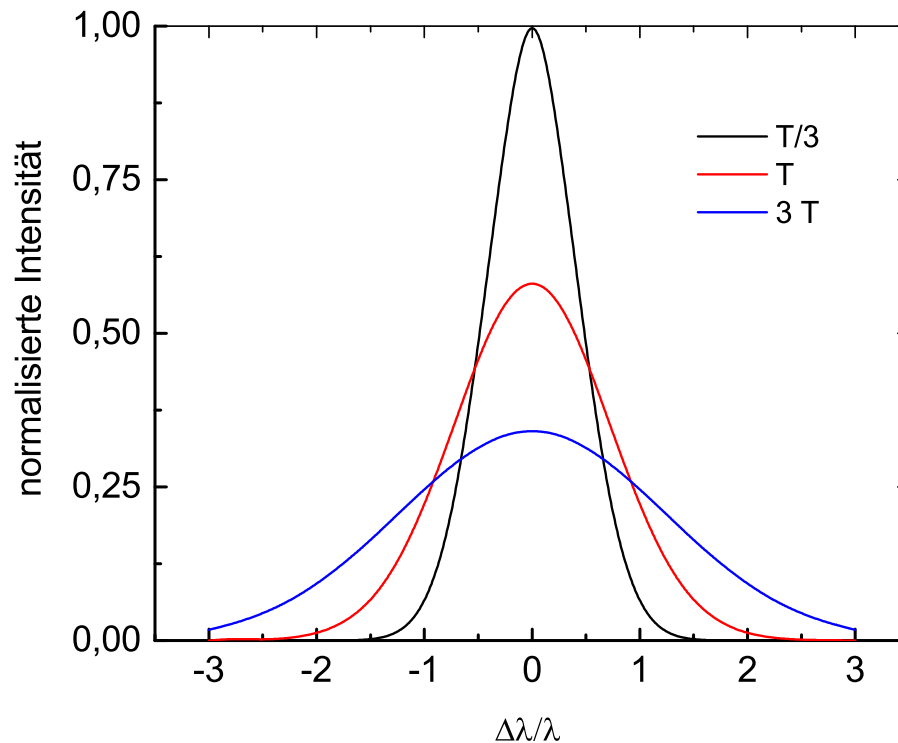
- DOPPLER-Verbreiterung.



Gastemperatur I

- DOPPLER-Verbreiterung.
- Zugabe von N_2 und Messen der rovibronischen Banden

G.P. Davis and R.A. Gottscho; J. Appl. Phys. **54**, 3080 (1983)

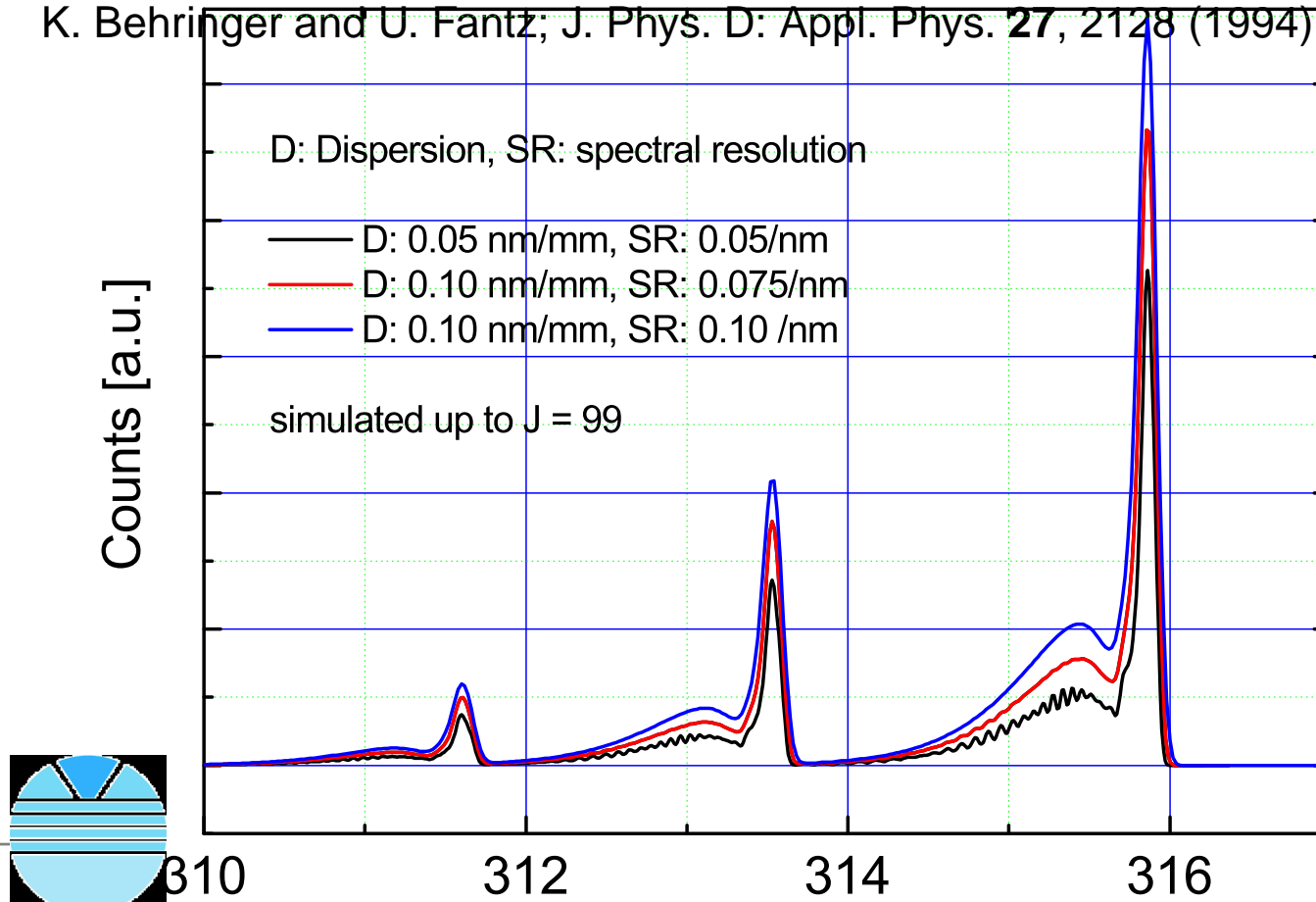


Gastemperatur II

Simulation der elektronisch angeregten
Rotations-Schwingungsspektren von N_2 am System
($C^3\Pi_u, v' \rightarrow B^3\Pi_g, v''$).

K. Behringer; Plasma Phys. Control. Fusion **33**, 997 (1991)

K. Behringer and U. Fantz; J. Phys. D: Appl. Phys. **27**, 2128 (1994)



Intensivste Chlor-Banden

Wavelength [nm]	Designation	Author(s)	Citation
307	no assignment	Pearse and Gaydon Venkateswarulu	[1] [2] [3]
329.5	$A^1\Pi_{1u}^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$	Jacksier and Barnes	[4]
406.5	$B^3\Pi_{0u}^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$	Maric et al.	[5]

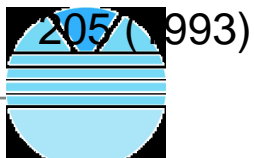
[1] R.W.B. Pearse, A.G. Gaydon: The Identification of Molecular Spectra, 4th ed., Chapman and Hall, London, England, 1976

[2] W. Finckelburg: Kontinuierliche Spektren, Springer, Berlin, 1938

[3] P.B.V. Haranath, P.T. Rao; J. Molecul. Spectrosc. **2**, 428 (1958)

[4] T. Jacksier, R.M. Barnes; Appl. Spectrosc. **48**, 382 (1994)

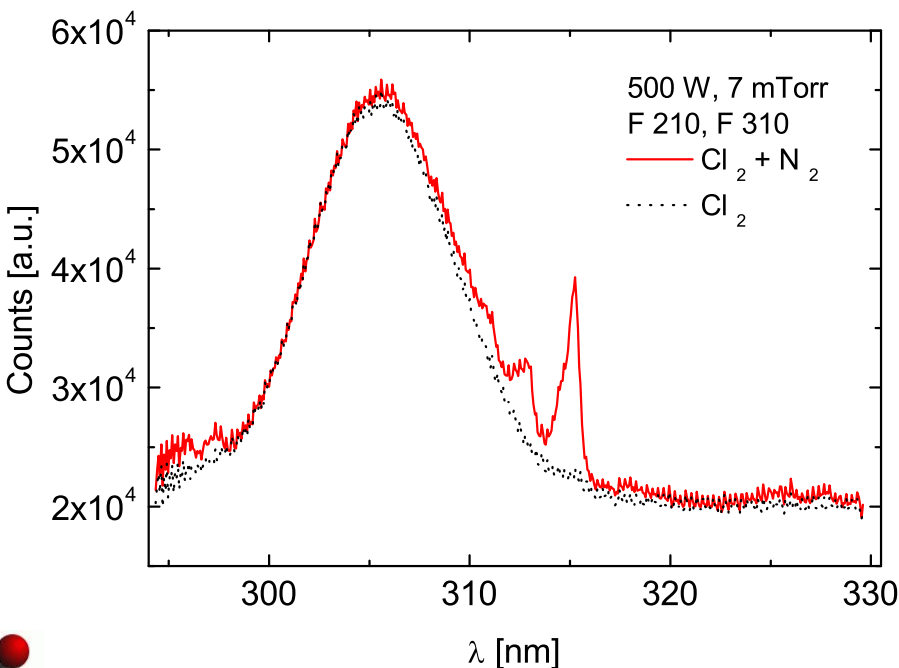
[5] D. Maric, J.P. Burrows, R. Meller, G.K. Moortgat; J. Photochem. Photobiol. A: Chem, **70**,



Gastemperatur IV

LHS: Rohdaten mit (rot) und ohne (schwarz) Spuren von Stickstoff
 $\Rightarrow 3' \rightarrow 2''$ -Übergang (Differenzfile).

RHS: Typisches Fit-Spektrum ($C^3\Pi_u, v' \rightarrow B^3\Pi_g, v''$).



Ar: N_2 -Anteil: 0.1 – 1 %, Cl_2 : N_2 -Anteil: up to 5 %;

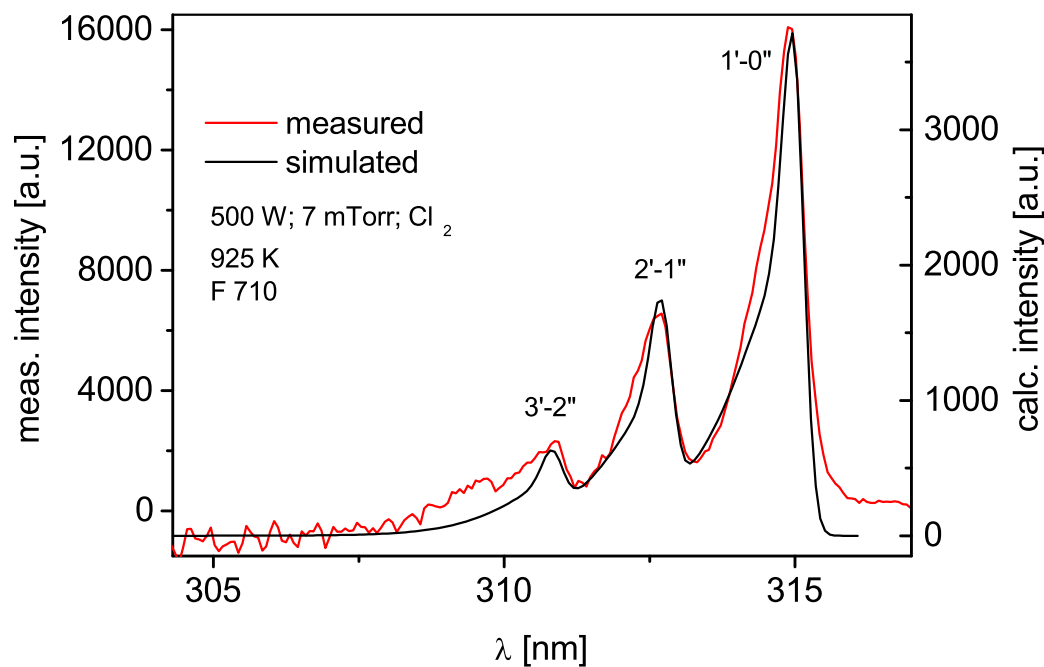
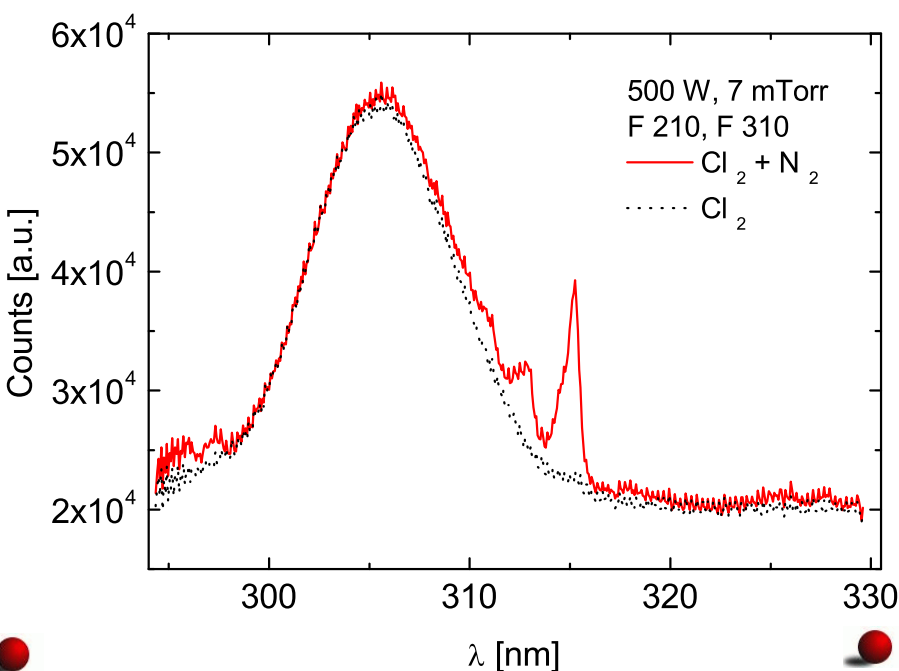
B. Bai and H. Sawin, J. Vac. Sci. Technol. **A 22**, 2014 (2004)

M.J. Schabel, V.M. Donnelly, A. Kornblit and W.W. Tai, J. Vac. Sci. Technol. **A 20**, 555 (2002).

Gastemperatur IV

LHS: Rohdaten mit (rot) und ohne (schwarz) Spuren von Stickstoff
⇒ $3' \rightarrow 2''$ -Übergang (Differenzfile).

RHS: Typisches Fit-Spektrum ($C^3\Pi_u, v' \rightarrow B^3\Pi_g, v''$).



Ar: N_2 -Anteil: 0.1 – 1 %, Cl_2 : N_2 -Anteil: up to 5 %;

B. Bai and H. Sawin, J. Vac. Sci. Technol. **A 22**, 2014 (2004)

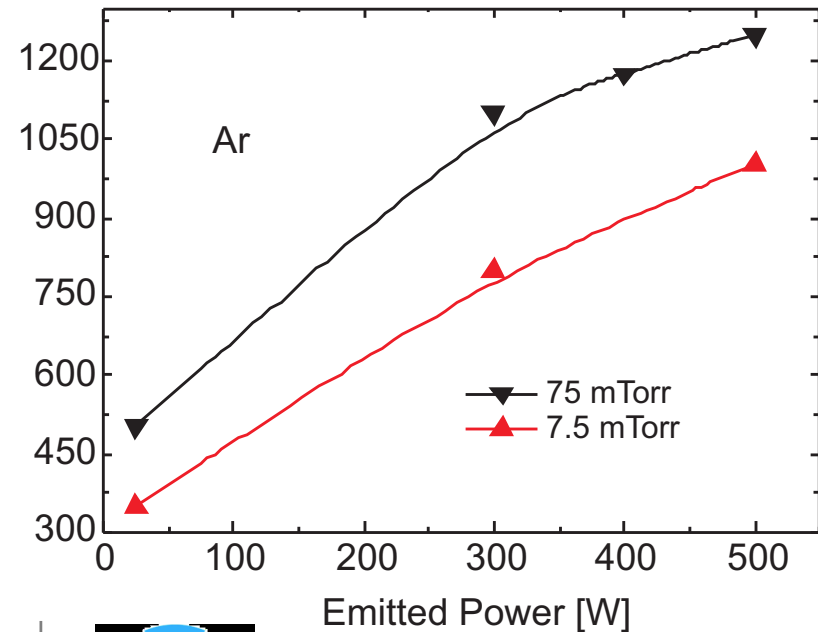
M.J. Schabel, V.M. Donnelly, A. Kornblit and W.W. Tai, J. Vac. Sci. Technol. **A 20**, 555 (2002).

Gastemperatur V

Cl₂ und Ar bei niedrigen Drücken: $T_n = mV_{DC} + b$,

Ar bei hohen Drücken: $T_n = a \cdot \ln(c \cdot V_{DC}) + b$.

Measuring error estimated: $\pm 10\%$.

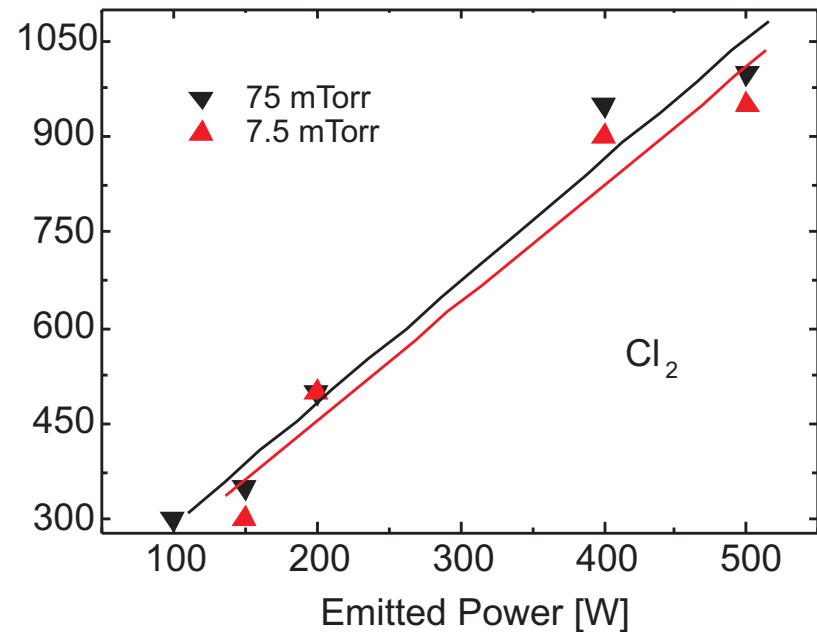
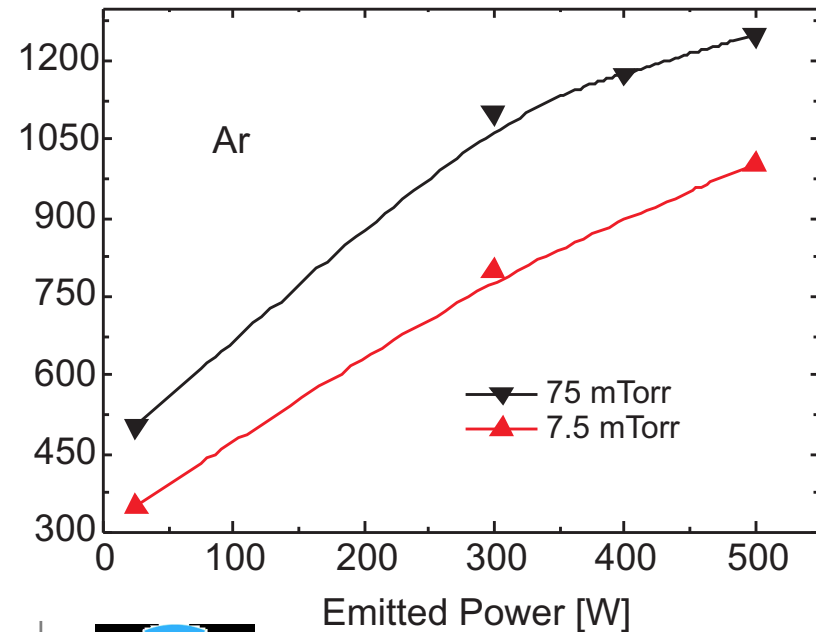


Gastemperatur V

Cl₂ und Ar bei niedrigen Drücken: $T_n = mV_{DC} + b$,

Ar bei hohen Drücken: $T_n = a \cdot \ln(c \cdot V_{DC}) + b$.

Measuring error estimated: $\pm 10\%$.



Zusammenfassung I

- Radiale Uniformität und Plasmadichte reaktiver Gase zeigen ein Edelgasverhalten.
- Die reaktiven Gase unterscheiden sich von Argon hauptsächlich in einem höheren T_e (Annahme: MB) und einem niedrigeren n_e .
- T_e gemessen mit OES und LANGMUIR ist nahezu gleich in Ar, dagegen sehr verschieden in molekularen Gasen (OES ist höher).
- Zwar ist die eingekoppelte Leistung in ein Chlor-Plasma am höchsten (nahezu doppelt so groß wie in Ar und BCl_3),
- durch zahlreiche parasitäre Prozesse (Gasaufheizung) ist aber die Ionisation dennoch niedriger als in Argon.



Zusammenfassung II

- Der höhere Energieeintrag in das Cl_2 führt also nicht zu höherem n_e , sondern zu höheren T_e , **damit aber zu einer höheren Stoßrate** und offensichtlich zu einer höheren Dichte von Cl^- (Electron Attachment), vermutlich auch höhere Dichte von Radikalen.
- ν_{eff} : Ar und BCl_3 sind über den gesamten Meßbereich bis jenseits von 100 mTorr noch im Regime der stochastischen Heizung, während Cl_2 einen Übergang zur OHMschen Heizung ab etwa 35 mTorr zeigt.
- Stochastische Heizung ist gegenüber der OHMschen Heizung sehr ineffizient; aber ohne diesen Mechanismus wären die Entladungen in Ar und BCl_3 bei niedrigen Drücken vermutlich gar nicht stabil.



Zusammenfassung III

- Ar: logarithmisches Verhalten von T_n und damit für ν_{eff} (Verlustmechanismen: Strahlung und resonanter Charge-Transfer). Wenn das in Cl_2 immer noch linear ist, muß das auf den dramatischen Anstieg von ν_{eff} zurückzuführen sein.
- Funktionale Abhängigkeit von ν_{eff} in Cl_2 : Unter 35 mTorr ist der Mechanismus rein stochastischer Natur, darüber findet ein allmählicher Übergang zu OHMSchen Verhalten statt, der mit einer T-korrigierten Gasdichte erklärt wird.



Zusammenfassung IV

- Die Gasaufheizung durch Stoßprozesse zwischen Ionen und Neutralmolekeln in der Randschicht ist leider in CCP-Entladungen besonders effektiv und begrenzt die sinnvoll einzukoppelnde Leistung nach oben. ⇒ Für das Ätzen bedeutet das eine dramatische Verringerung der Dichte reaktiver Partikeln mit steigendem Leistungseintrag, was zu niedrigeren Ätzraten führt, als sie bei linearer Extrapolation zu erwarten wären.



Per aspera ad astra



Der alte FRANKLIN als Magier und Gesellschaftslöwe

