



Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm I Einführung, 18. März 2021

Gerhard Franz

Kompetenzzentrum Nanostrukturtechnik
Hochschule München

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



Programm

- Einführung



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Stoßprozesse



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Stoßprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Stoßprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Stoßprozesse
- RF- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- CCP- und ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung
- Sputtern



Programm

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

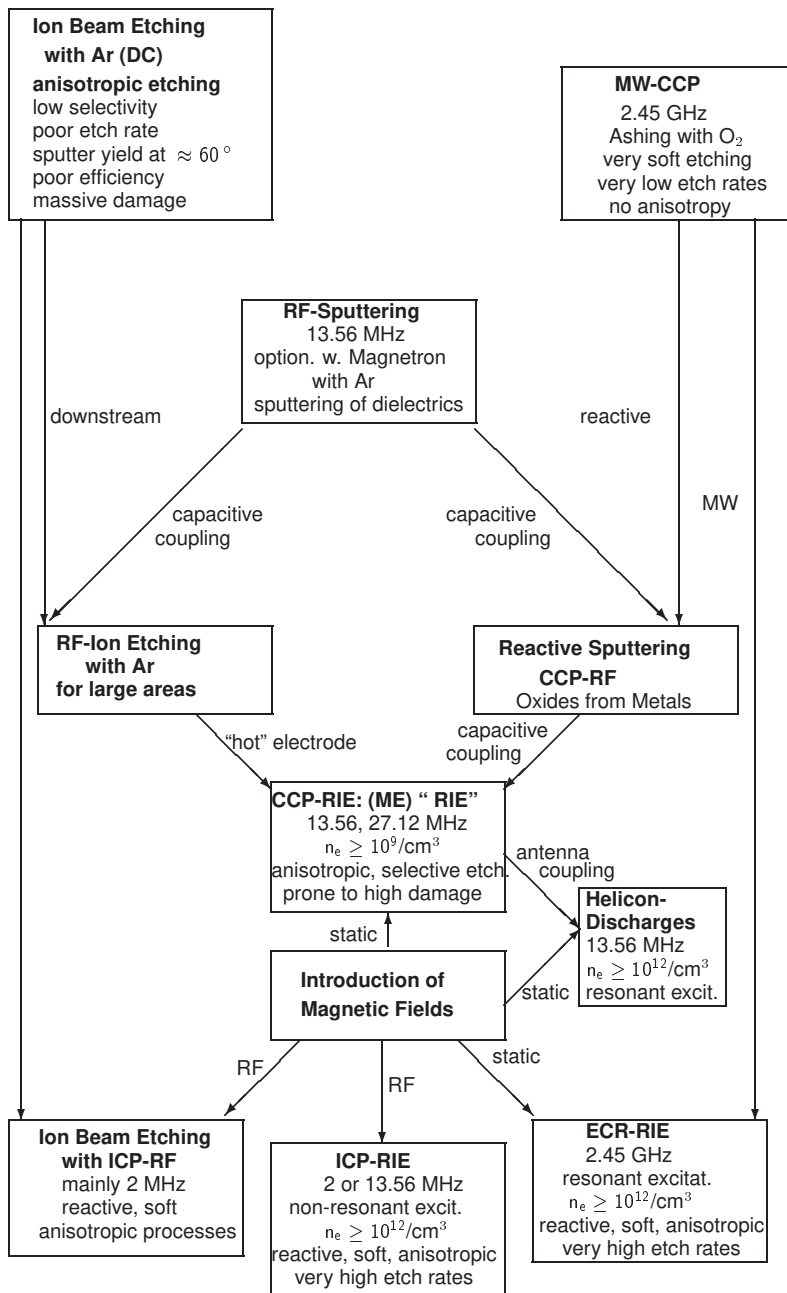


Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Stoßprozesse
- 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



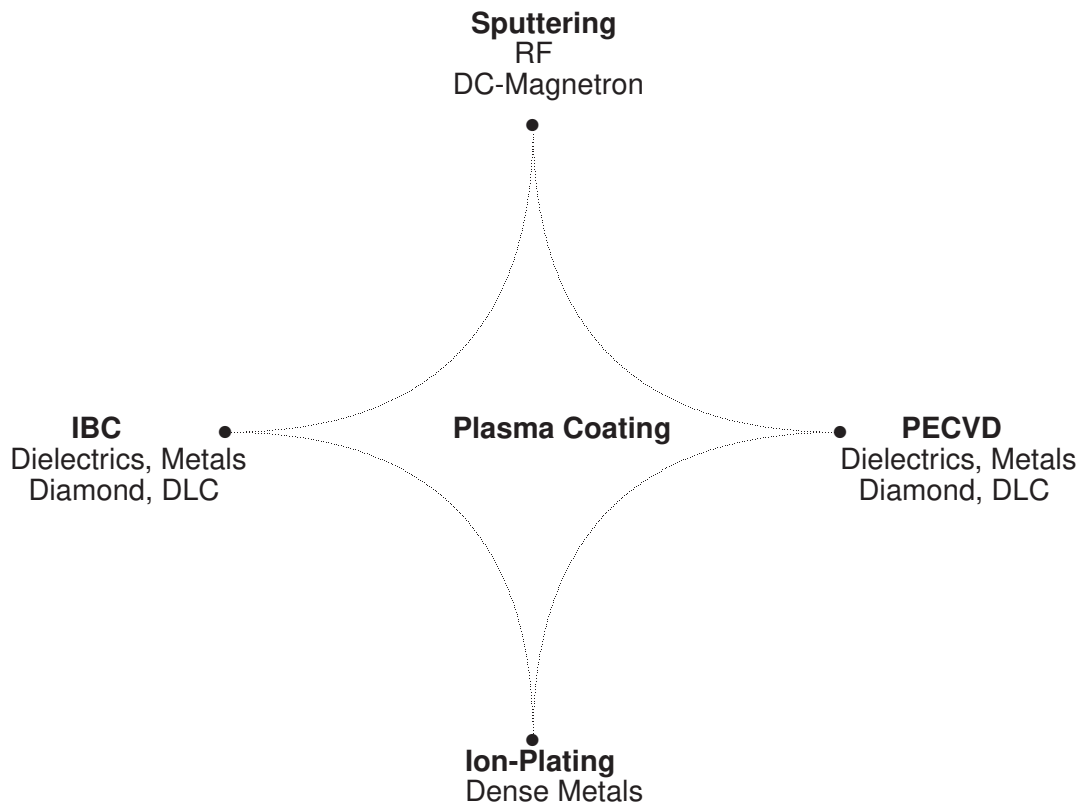
Anregung und reaktive Prozesse I



Flußdiagramm des gegenseitigen Vorwärtstreibens von Plasmamethoden und reaktiven Ätzprozessen.



Anregung und reaktive Prozesse II

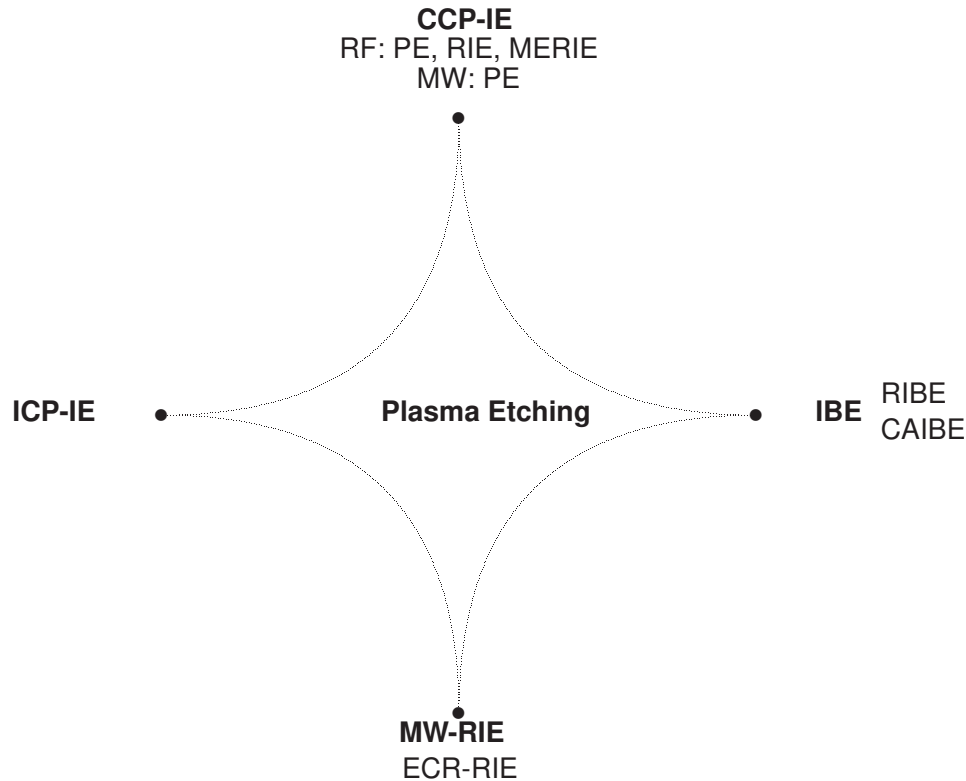


Verschiedene Beschichtungsverfahren, die sich vorzugsweise in der Anregungsmethode unterscheiden.

PECVD, **P**lasma **E**nhanced **C**hemical **V**apour **D**eposition: $p \geq 1000$ mTorr (130 Pa): sample on grounded electrode;
IBC, **I**on **B**eam **C**oating;
Ion Plating: $p < 1$ mTorr, evaporation of very dense metal on a sample atop a powered electrode;



Anregung und reaktive Prozesse III



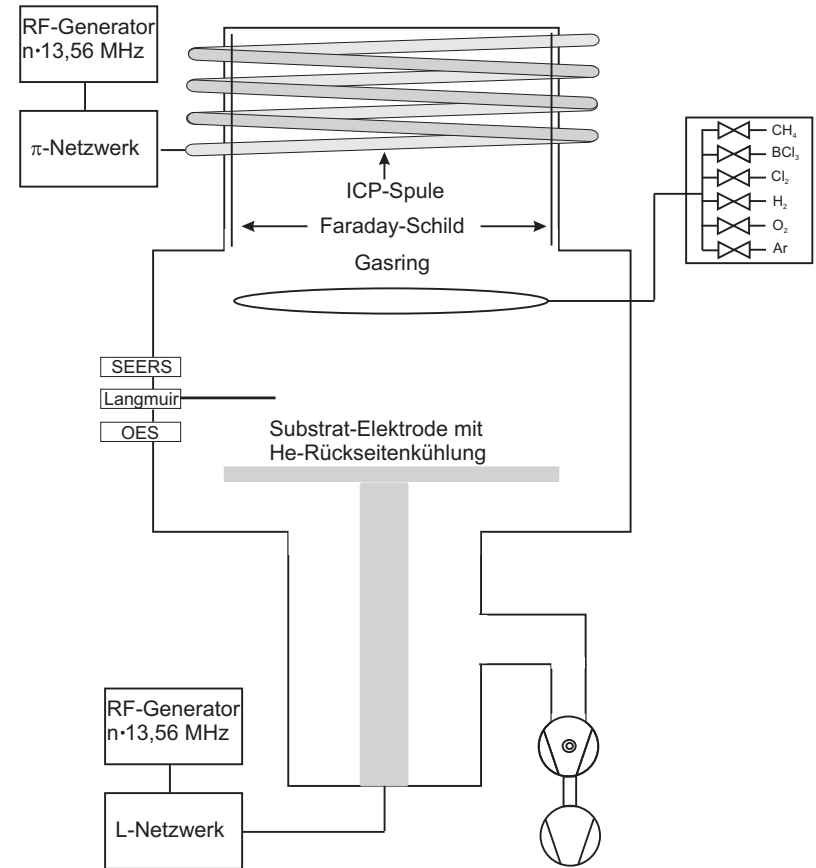
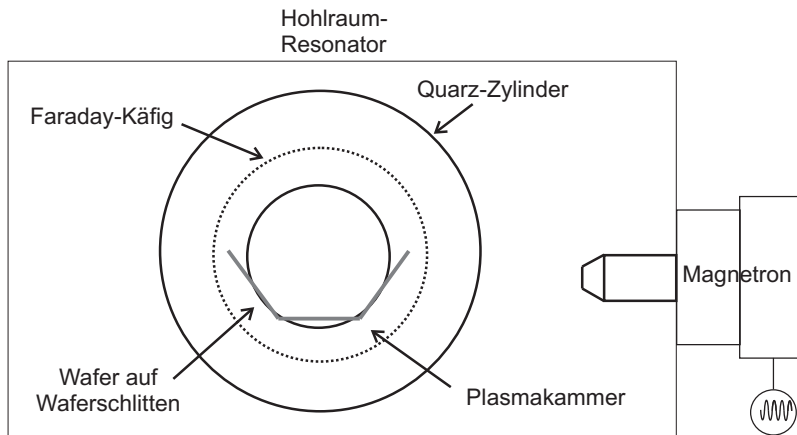
CCP, **C**apacitively **C**oupled **P**lasma;
ECR, **E**lectron **C**yclotron **R**esonance, downstream;
ICP, **I**nductively **C**oupled **P**lasma, downstream;
MW, **M**icro **W**ave (2.45 GHz);

PE, **P**lasma **E**tching: $p > 75$ mTorr (10 Pa): sample on grounded electrode;
IE, **I**on **E**tching,
RIE, **R**eactive **I**on **E**tching: $p < 50$ mTorr (7 Pa), sample on powered electrode;
IBE, **I**on **B**eam **E**tching;

MERIE, **M**agnetically **E**nhanced **R**eactive **I**on **E**tching: RIE; electrons are suppressed to reach the sample's surface by means of a magnetic field;
CAIBE, **C**hemical **A**ssisted **I**on **B**eam **E**tching;
RIBE, **R**eactive **I**on **B**eam **E**tching.

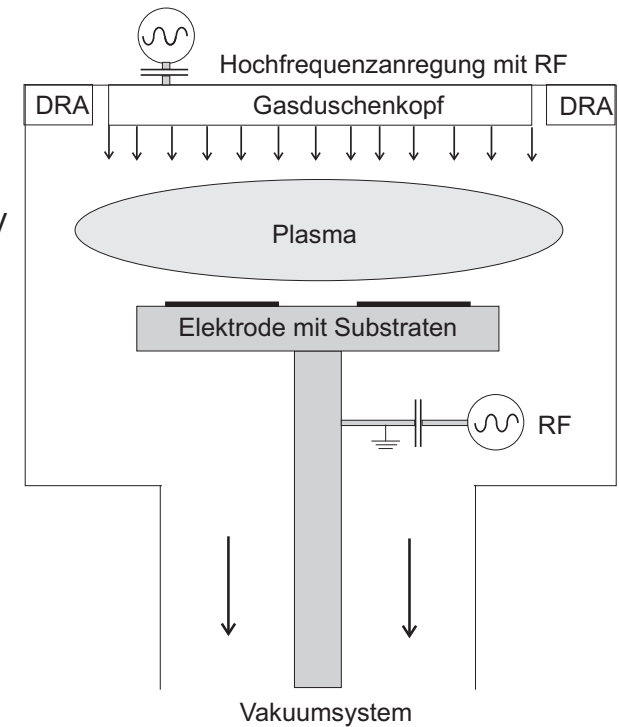
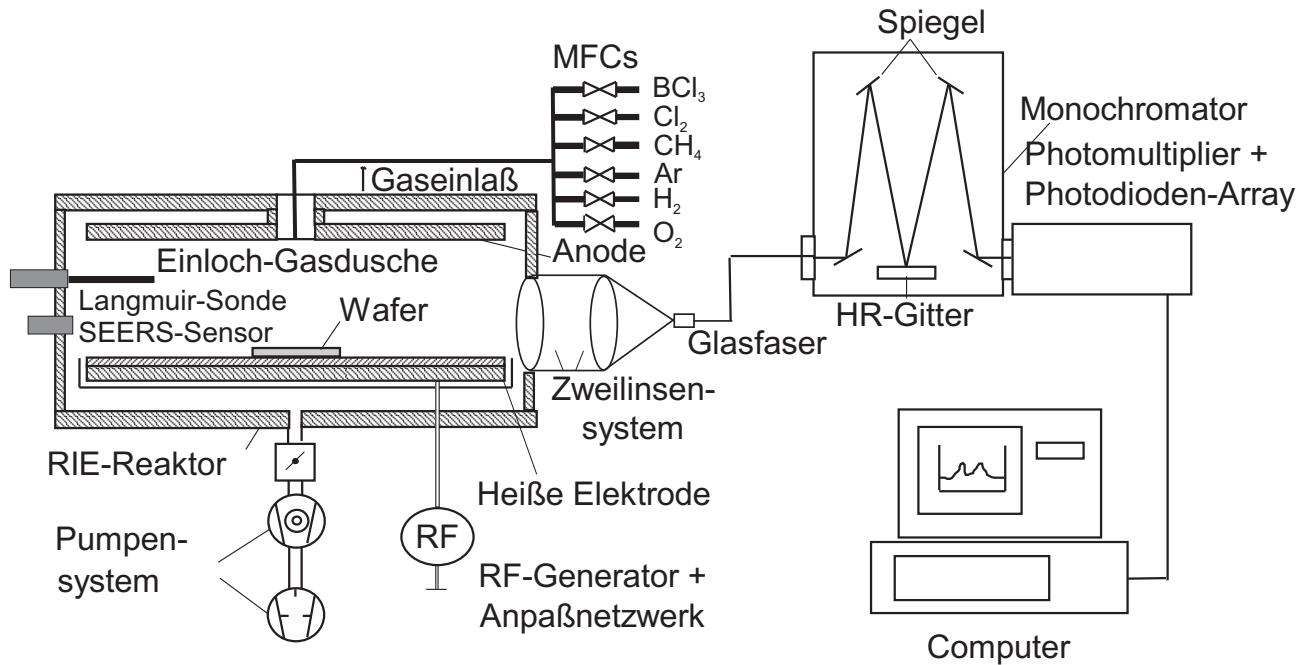
Verschiedene
Trockenätzprozesse, die sich
vorzugsweise in der
Anregungsmethode
unterscheiden.

Reaktortypen I



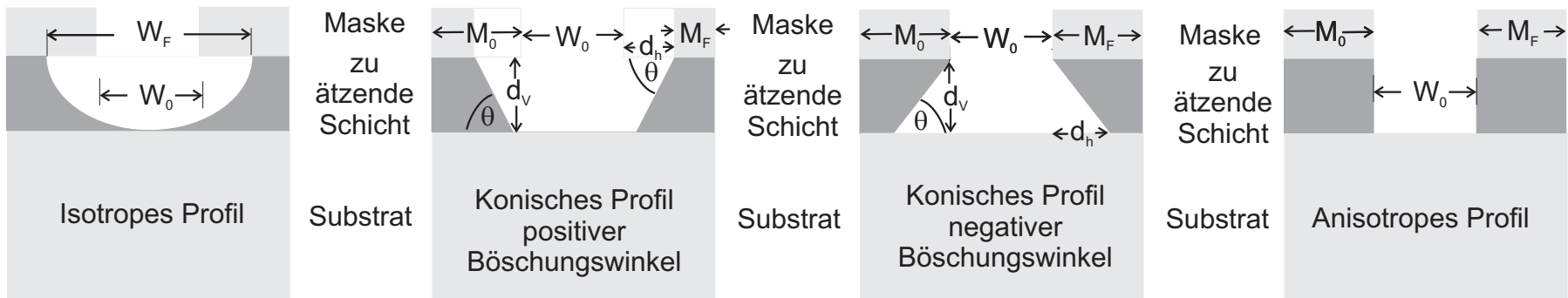
Lks.: Barrel-Reaktor, re.: ICP-Reaktor.

Reaktortypen II



Parallelplatten-Reaktoren
 lks. zum RIE, re. zum PE-CVD.

PE und RIE I

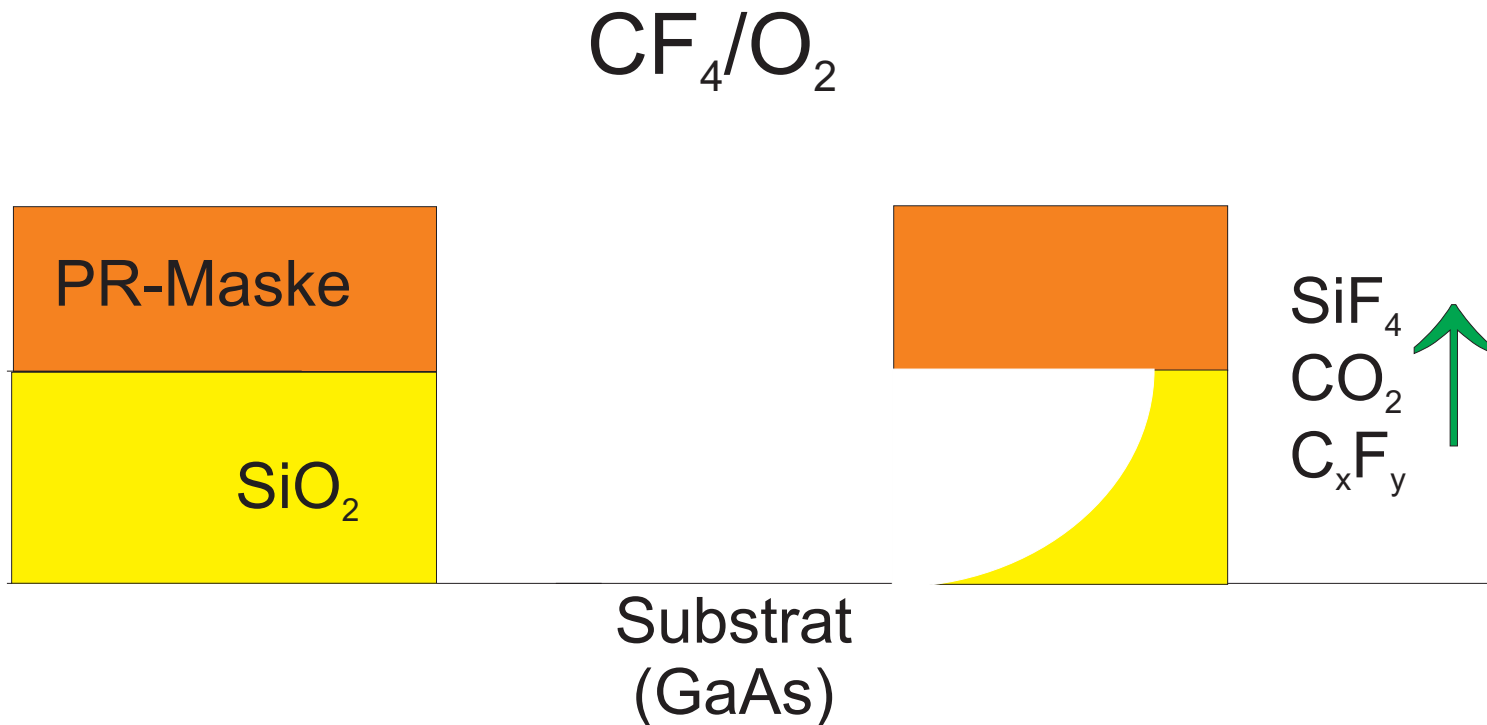


Der Hauptvorteil von RIE:
es sind anisotrope Ätzungen möglich.



PE und RIE II

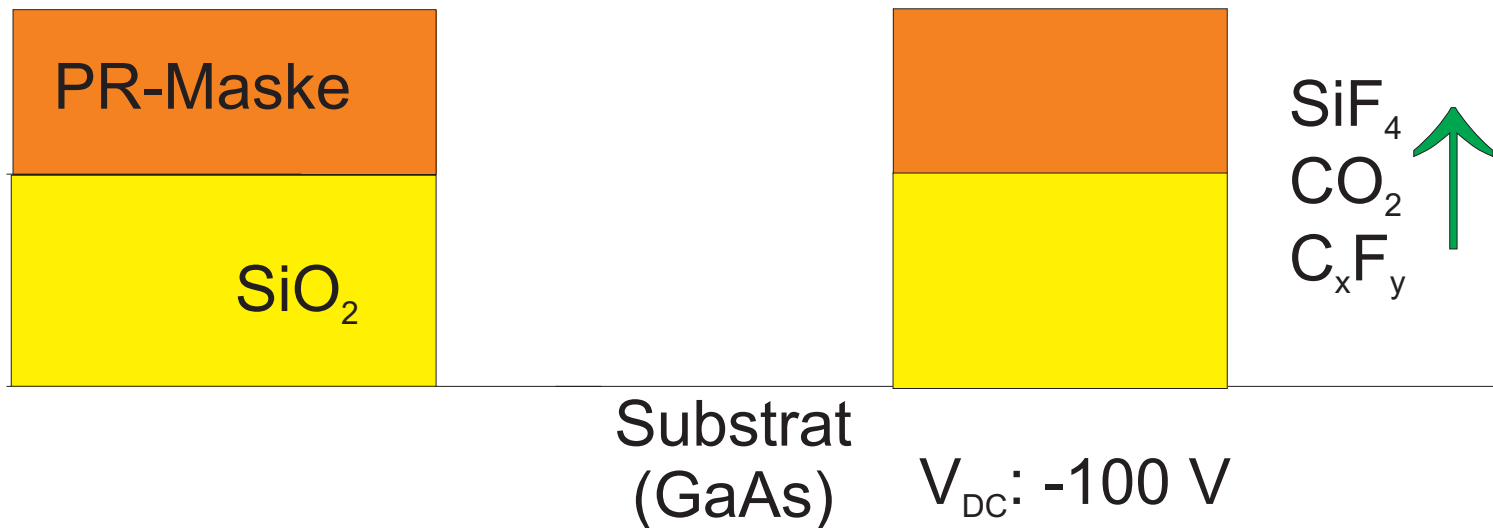
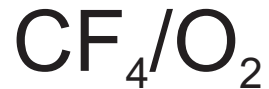
PE von SiO_2



Plasmaätzen (PE) im Barrel-Etcher mit Anregung durch Mikrowellen bei hohem Druck (1 000 mTorr oder 100 – 150 Pa) erzeugt ein isotropes Profil.

PE und RIE III

RIE von SiO_2

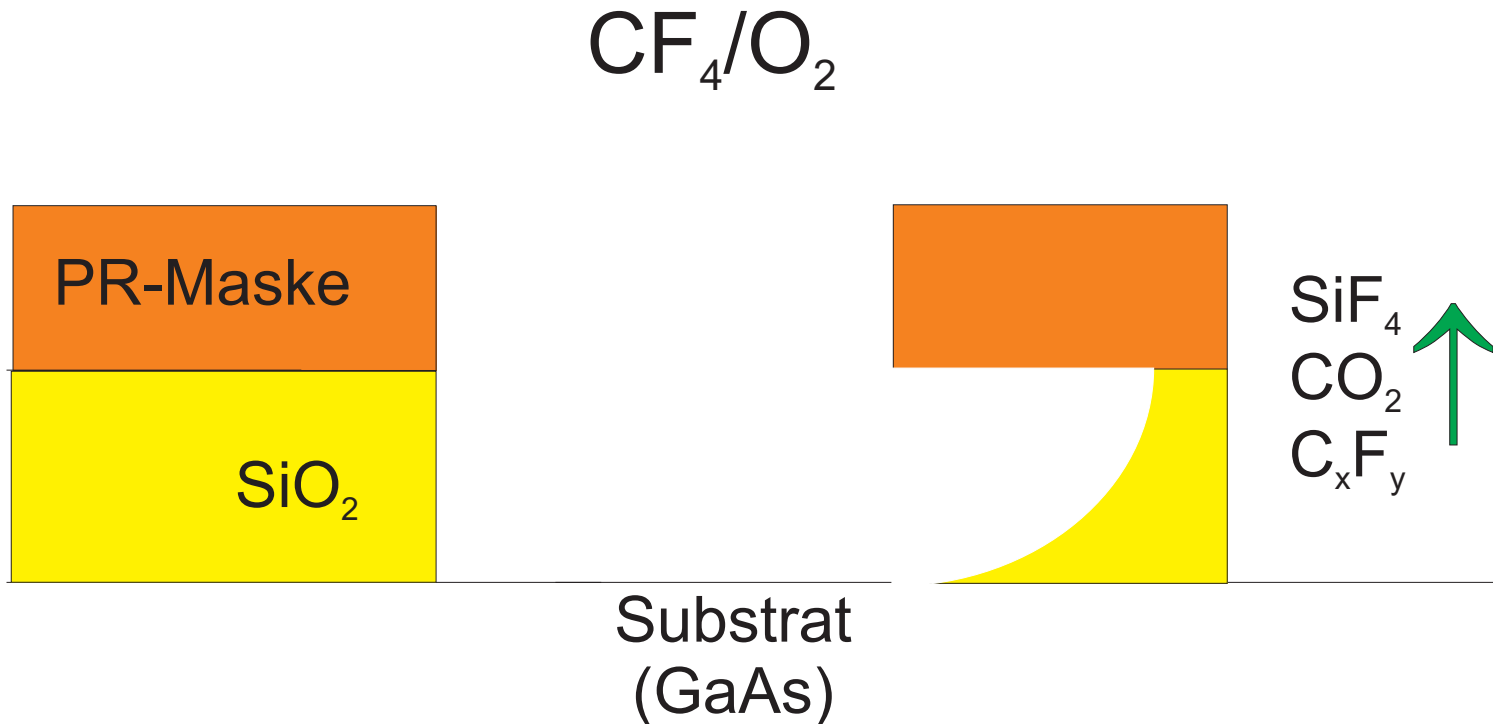


Reaktives Ionenätzen im Parallelplatten-Reaktor soll anisotrope Strukturen erzeugen . . . ,
. . . tatsächlich ist das Profil ebenfalls isotrop.



PE und RIE III

RIE von SiO_2

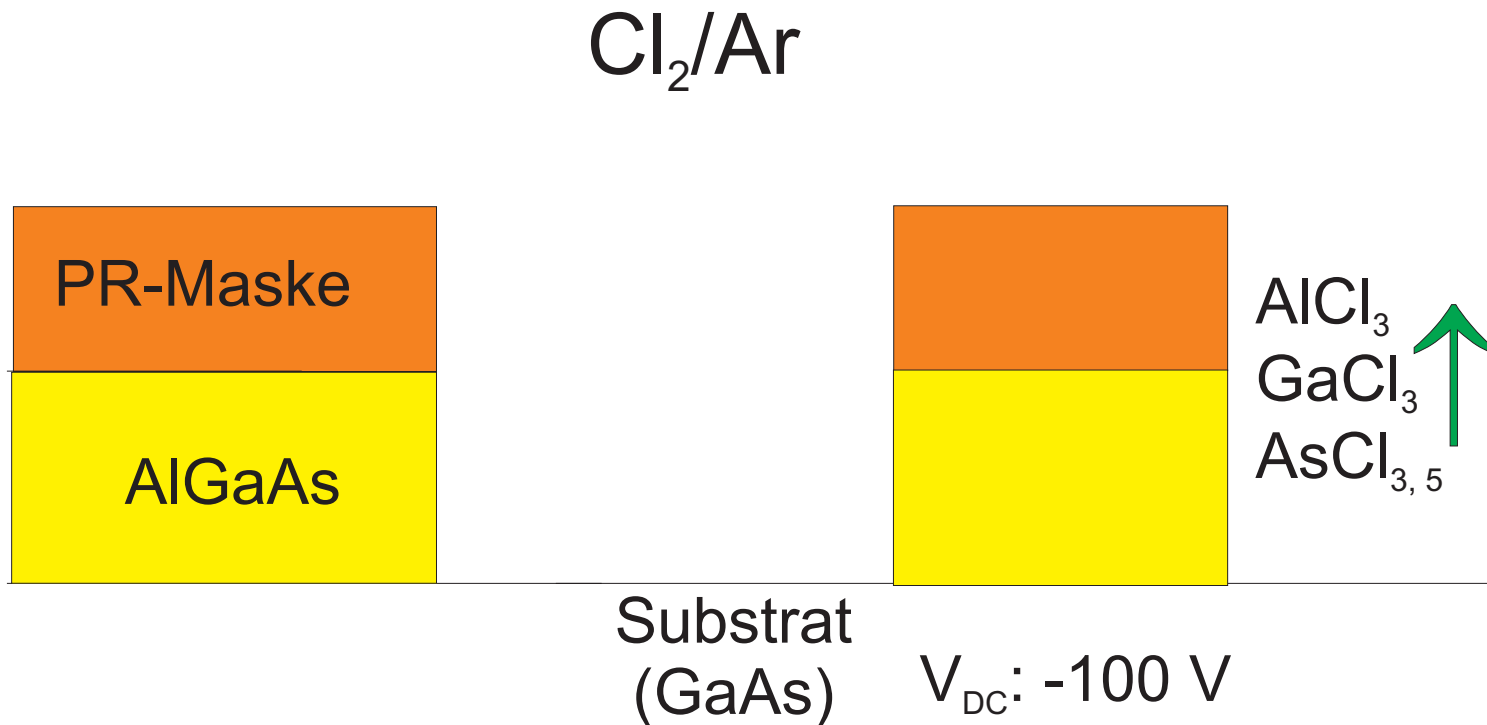


Reaktives Ionenätzen im Parallelplatten-Reaktor
soll anisotrope Strukturen erzeugen . . . ,
. . . tatsächlich ist das Profil ebenfalls isotrop.



PE und RIE IV

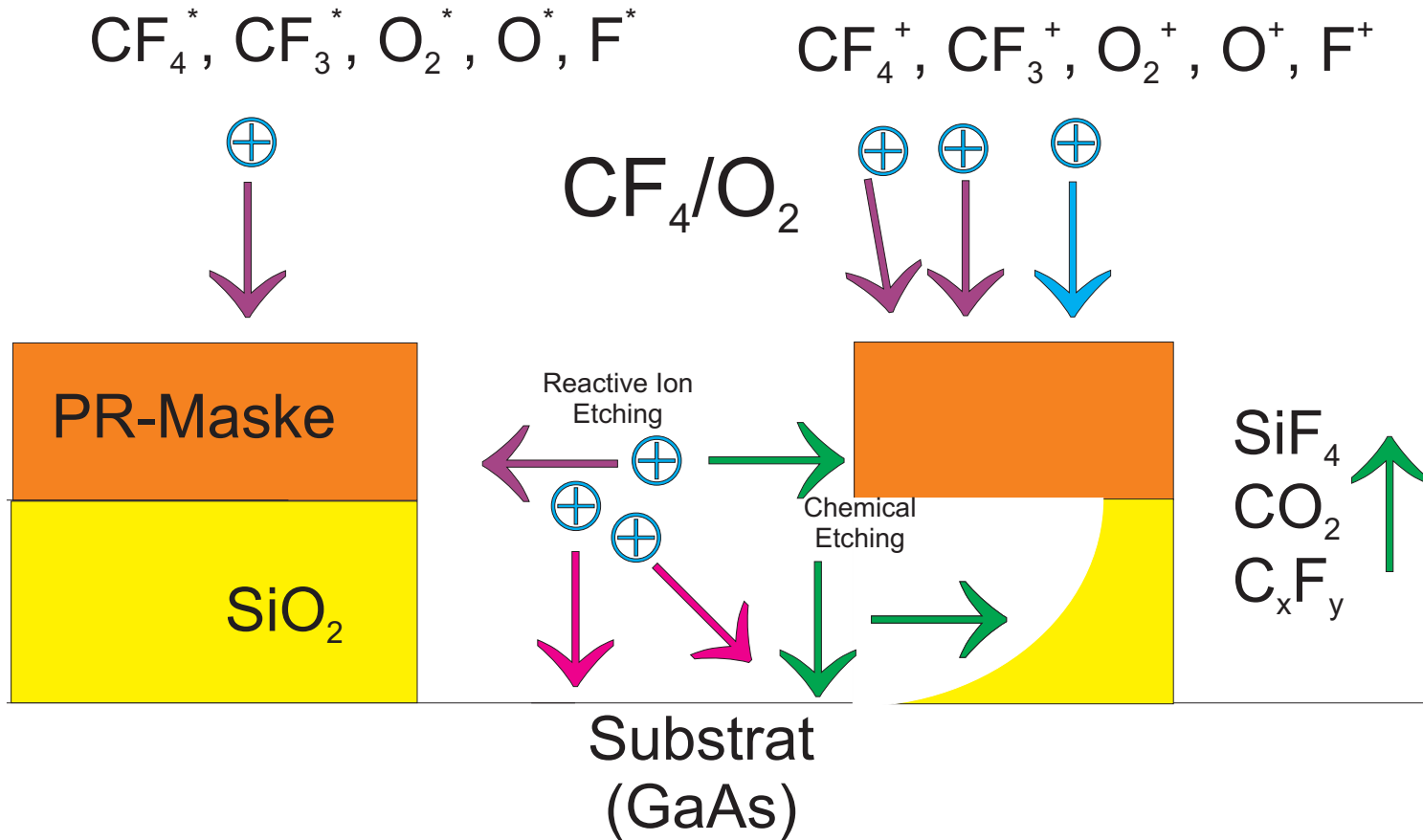
RIE von AlGaAs



Reaktives Ionenätzen (RIE) von GaAs oder AlGaAs im Parallelplatten-Reaktor mit Anregung durch Radiofrequenz bei niedrigem Druck (einige 10 mTorr oder 3 – 5 Pa) erzeugt mit Cl_2 ein anisotropes Profil.

PE und RIE V

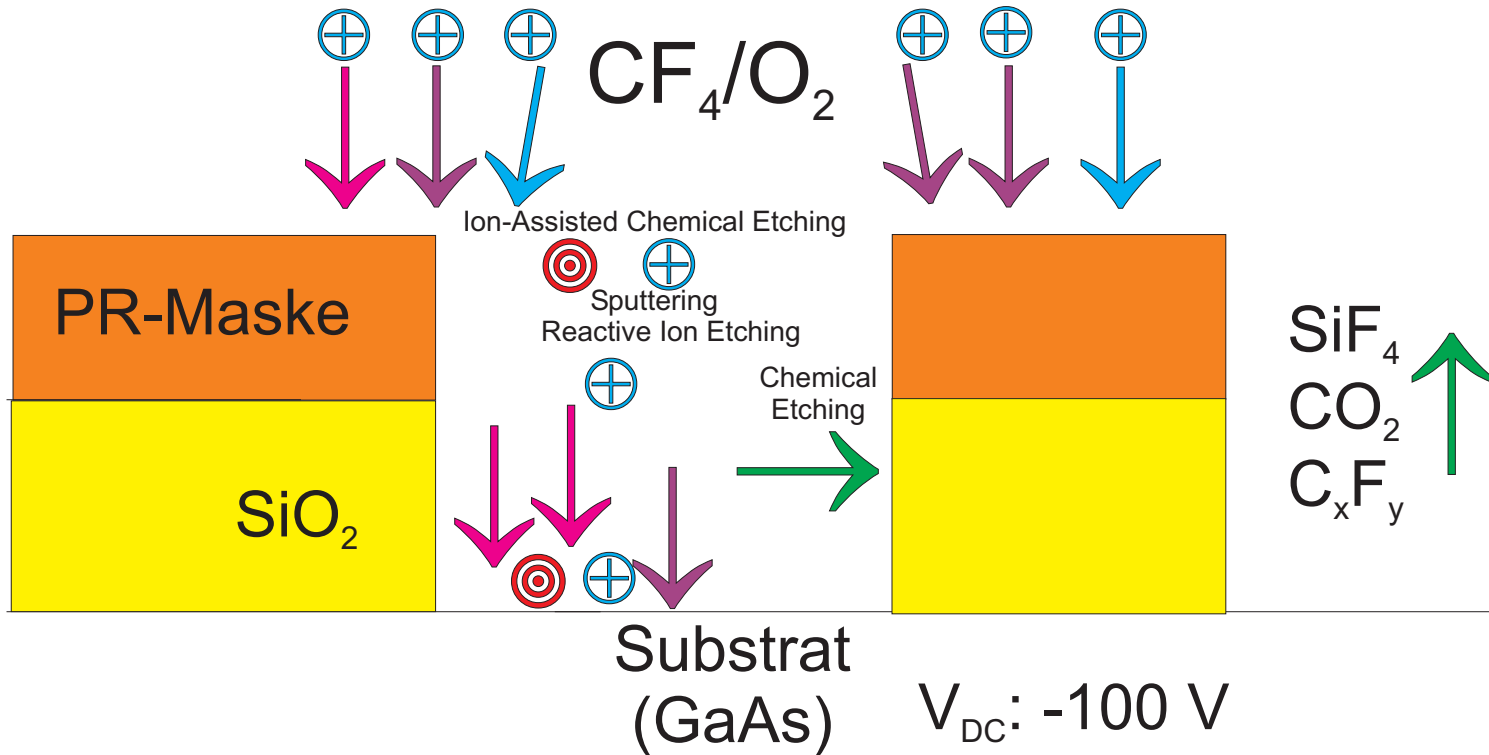
PE von SiO_2



Plasmaätzen (PE) im Barrel-Etcher mit Anregung durch Mikrowellen bei hohem Druck (1 000 mTorr oder 100 – 150 Pa) erzeugt ein isotropes Profil.

PE und RIE VI

RIE von SiO_2



Reaktives Ionenätzen im Parallelplatten-Reaktor

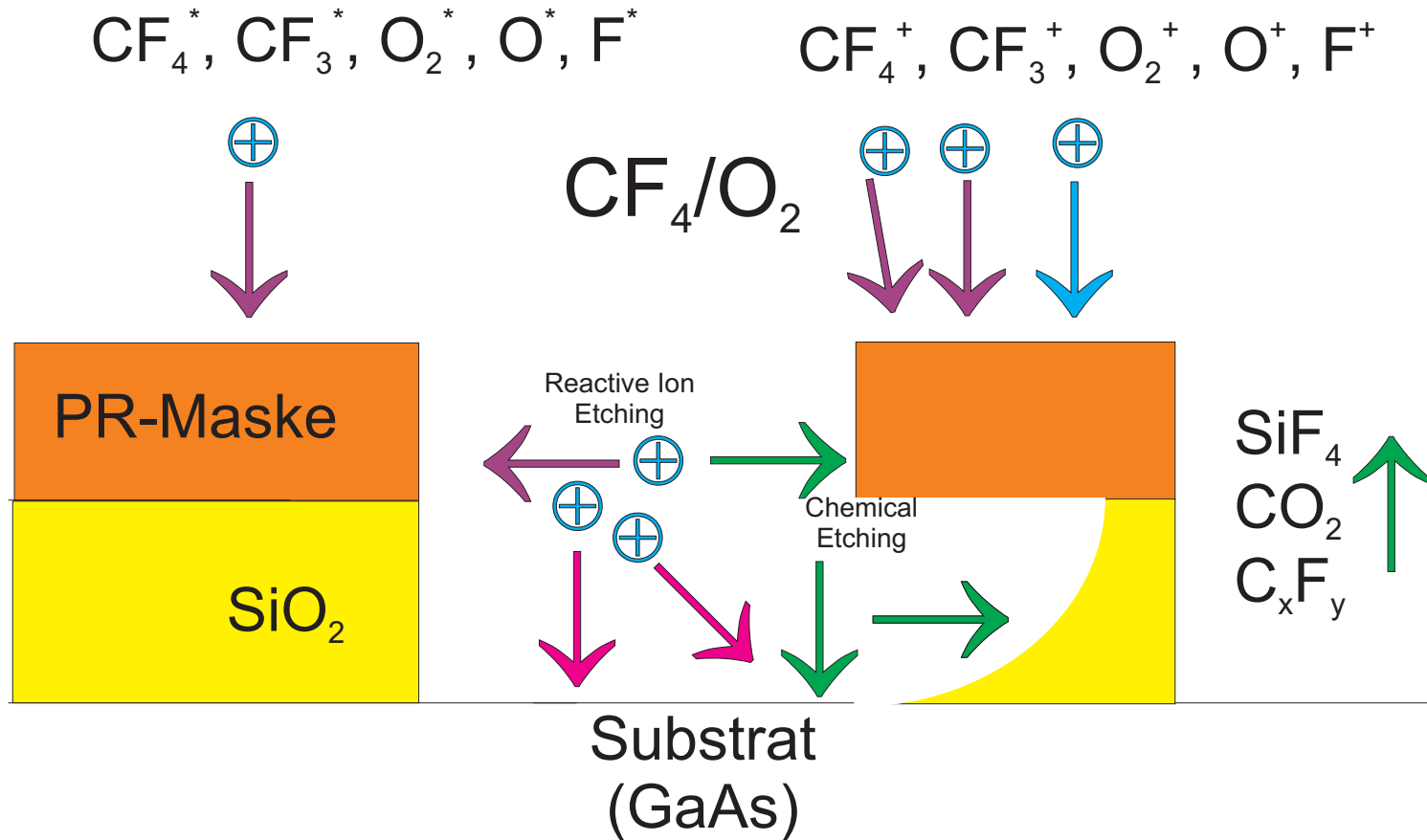
soll anisotrope Strukturen erzeugen . . . ,

. . . tatsächlich ist das Profil ebenfalls isotrop.



PE und RIE VI

RIE von SiO_2

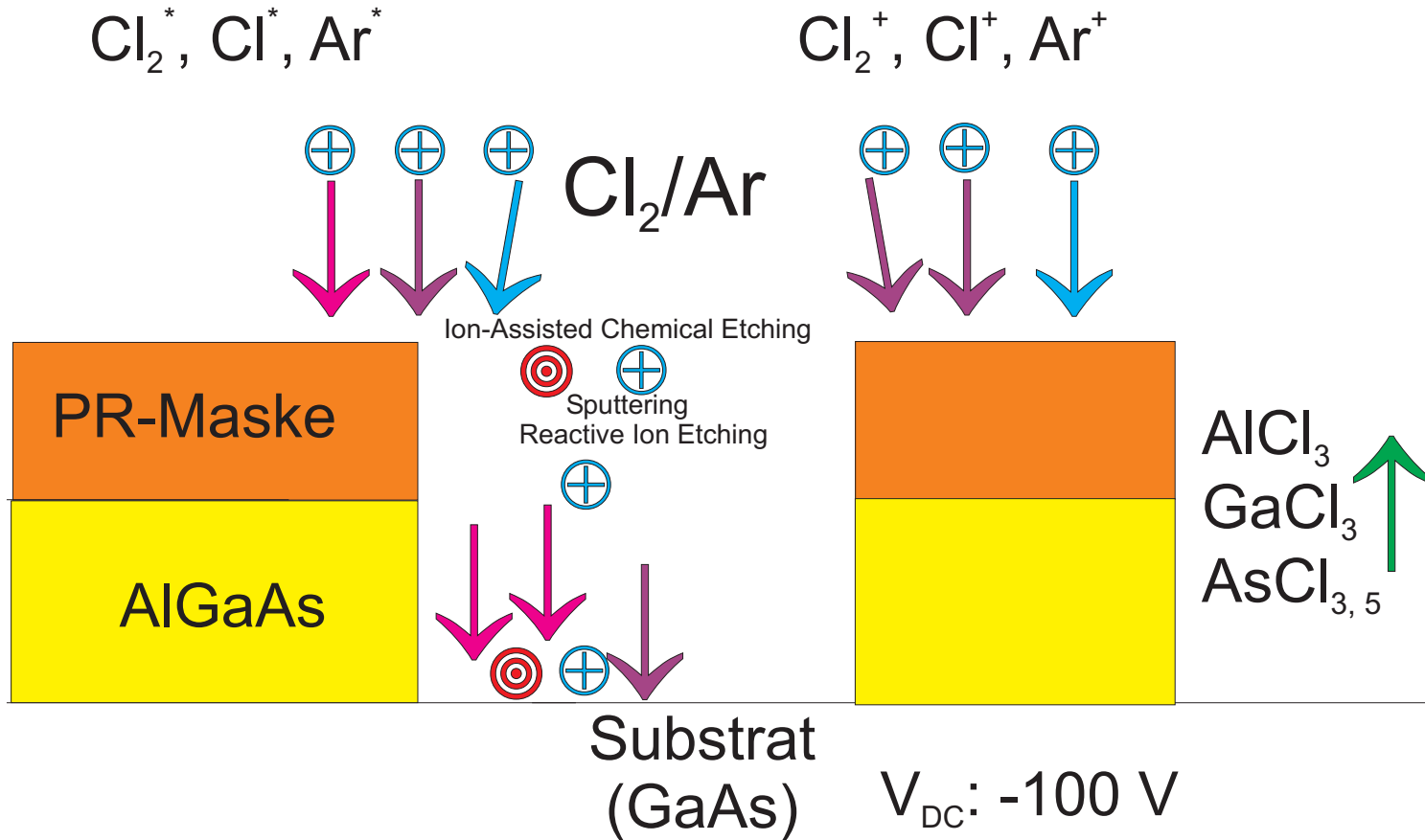


Reaktives Ionenätzen im Parallelplatten-Reaktor soll anisotrope Strukturen erzeugen . . . ,
tatsächlich ist das Profil ebenfalls isotrop.



PE und RIE VIII

RIE von AlGaAs



Reaktives Ionenätzen (RIE) von GaAs oder AlGaAs im Parallelplatten-Reaktor mit Anregung durch Radiofrequenz bei niedrigem Druck (einige 10 mTorr oder 3 – 5 Pa) erzeugt mit Cl_2 ein anisotropes Profil.

Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie



Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen



Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen
- Temperatur von Elektronen und Ionen



Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen
- Temperatur von Elektronen und Ionen
- Debye-Länge



Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen
- Temperatur von Elektronen und Ionen
- Debye-Länge
- Randschicht und Bohmsche Vorschicht



Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen
- Temperatur von Elektronen und Ionen
- Debye-Länge
- Randschicht und Bohmsche Vorschicht
- Plasmafrequenz

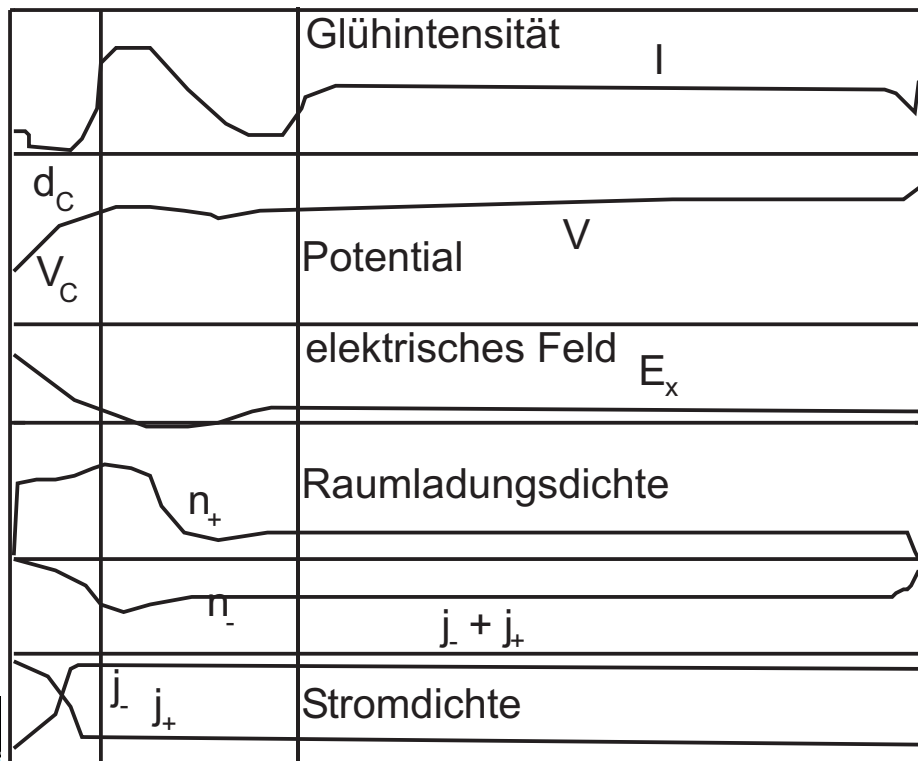
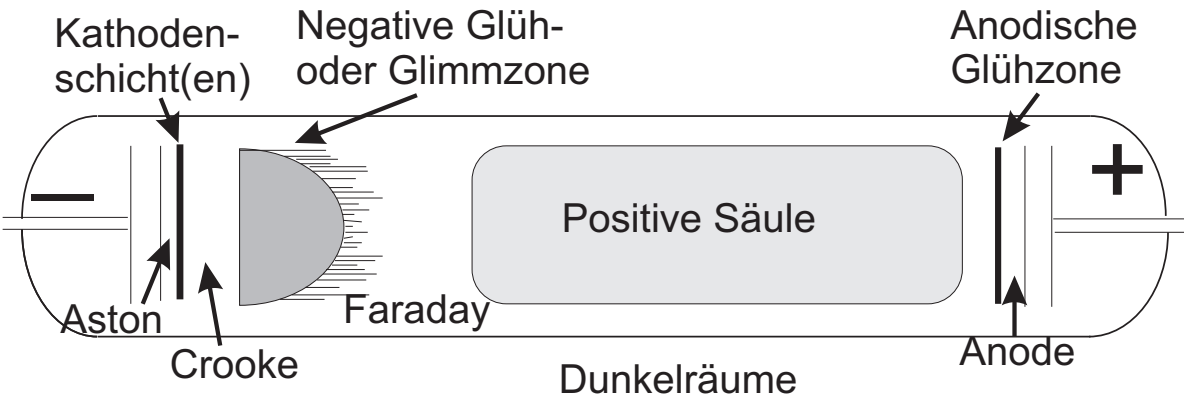


Plasmen — Eine Einführung

- Phänomenologie
- Niederdruckplasmen
- Temperatur von Elektronen und Ionen
- Debye-Länge
- Randschicht und Bohmsche Vorschicht
- Plasmafrequenz
- Globales Modell



Glimmentladung



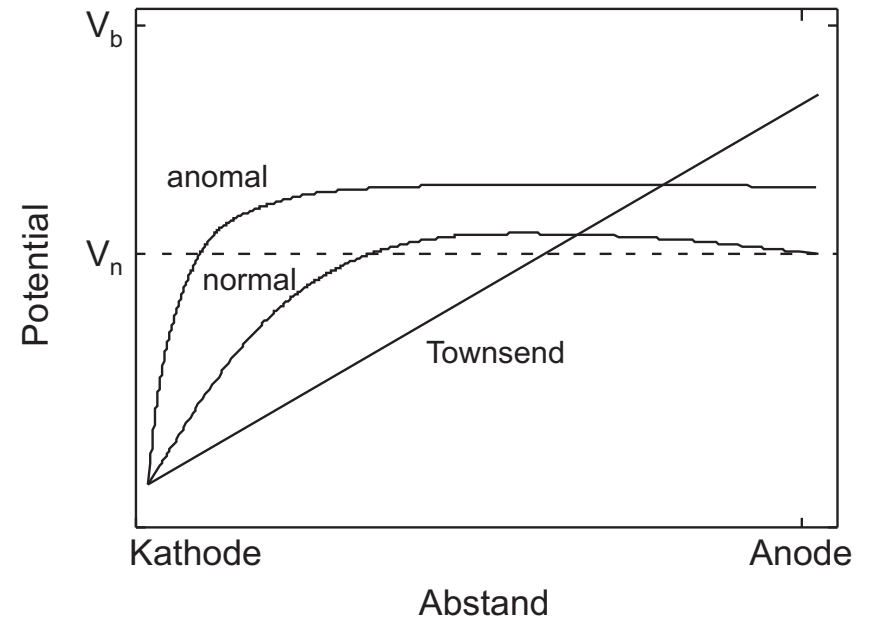
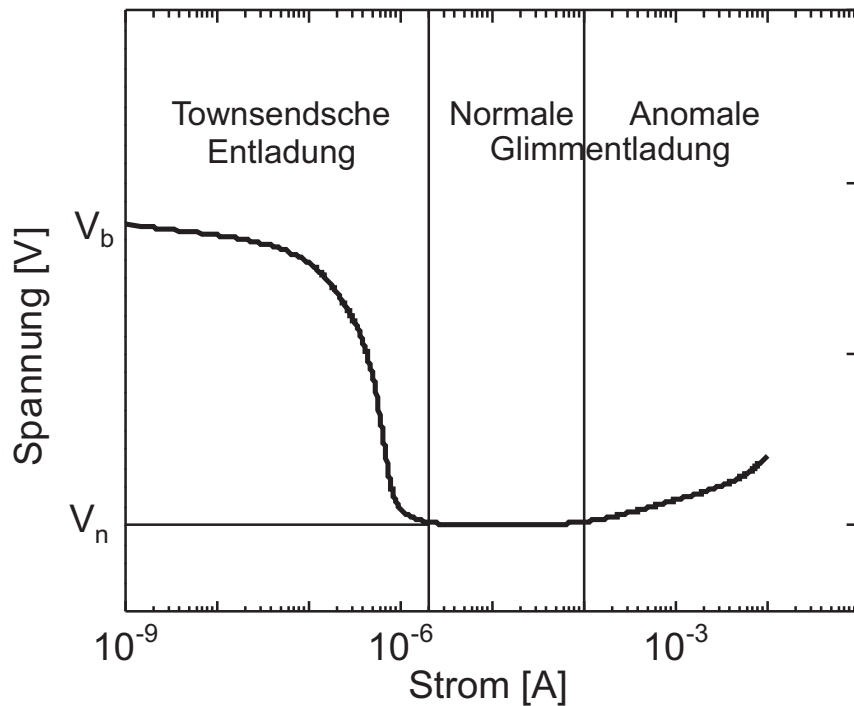
Neon: 50 cm lange Röhre,
Druck: 1 Torr (133 Pa). Die
leuchtenden Zonen sind
getönt. Darunter der Verlauf
wichtiger, die Entladung
bestimmender Größen.

Farben der Entladung

Gas	Negative Glühzone	Positive Säule
Wasserstoff	fahlblau	rosa
Stickstoff	rot	blau
Sauerstoff	gelblich	fahlblau
Helium	blaugrün	rotviolett
Neon	orange	ziegelrot
Argon	blauviolett	dunkelrot
Chlor	blau	grünlich
Natrium	weißlich	gelb
Kalium	fahlblau	grün
Quecksilber	grün	grünlich



Kennlinie und Potentialverlauf



$U-I$ -Kennlinie einer selbständigen Gasentladung ohne Positive Säule und schematischer Verlauf des Potentials für diese $U-I$ -Kennlinie



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E / m$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E/m$

- $W = \frac{(e_0 E t)^2}{2m}$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E/m$

- $W = \frac{(e_0 E t)^2}{2m}$

- \Rightarrow die Energie wird fast ausschließlich auf die Elektronen übertragen!



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E/m$

- $W = \frac{(e_0 E t)^2}{2m}$

- \Rightarrow die Energie wird fast ausschließlich auf die Elektronen übertragen!

- $1 \text{ eV} = 11.600 \text{ K}$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E/m$

- $W = \frac{(e_0 E t)^2}{2m}$

- \Rightarrow die Energie wird fast ausschließlich auf die Elektronen übertragen!

- $1 \text{ eV} = 11.600 \text{ K}$

- $T_e: 1 - 8 \text{ eV}$



Athermisches Plasma

- $W = F x = e_0 E x$

- $x = \frac{1}{2} a t^2$

- $a = e_0 E/m$

- $W = \frac{(e_0 E t)^2}{2m}$

- \Rightarrow die Energie wird fast ausschließlich auf die Elektronen übertragen!

- $1 \text{ eV} = 11.600 \text{ K}$

- $T_e: 1 - 8 \text{ eV}$

- $T_i: 300 - 1.000 \text{ K}$



Elektronen und Argon-Ionen

Energie	v [cm s ⁻¹] von	
[eV]	Elektronen	Argon
0,1	$1,9 \cdot 10^7$	$6,9 \cdot 10^4$
1,0	$5,9 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^5$
10	$1,9 \cdot 10^8$	$6,9 \cdot 10^5$
100	$5,9 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^6$
1000	$1,9 \cdot 10^9$	$6,9 \cdot 10^6$



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$
- n_0 : Ionendichte in der ungestörten Lösung: $n_+ + n_- = n_0$,
 $\rho(r) = \pm z_i e_0 (n_+ + n_-) r \longrightarrow \infty : \rho(r) \longrightarrow 0$:



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$
- n_0 : Ionendichte in der ungestörten Lösung: $n_+ + n_- = n_0$,
 $\rho(r) = \pm z_i e_0 (n_+ + n_-)$ $r \rightarrow \infty$: $\rho(r) \rightarrow 0$:
- $\rho(r) = \sum_i z_i e_0 n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$.



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$
- n_0 : Ionendichte in der ungestörten Lösung: $n_+ + n_- = n_0$,
 $\rho(r) = \pm z_i e_0 (n_+ + n_-)$ $r \longrightarrow \infty$: $\rho(r) \longrightarrow 0$:
- $\rho(r) = \sum_i z_i e_0 n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$.
- $e_0 \Phi \ll k_B T_e$: $\rho(r) \approx \sum_i z_i e_0 n_0 \left(1 - \frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$.



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$
- n_0 : Ionendichte in der ungestörten Lösung: $n_+ + n_- = n_0$,
 $\rho(r) = \pm z_i e_0 (n_+ + n_-) r \longrightarrow \infty : \rho(r) \longrightarrow 0$:
- $\rho(r) = \sum_i z_i e_0 n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\} .$
- $e_0 \Phi \ll k_B T_e : \rho(r) \approx \sum_i z_i e_0 n_0 \left(1 - \frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right) .$
- $\Rightarrow \rho(r) \approx \left(\sum_i z_i e_0 n_0 = 0 \right) - \sum_i z_i e_0 n_0 \frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} .$



Debye-Länge I

- Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(r) = n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\}$
- n_0 : Ionendichte in der ungestörten Lösung: $n_+ + n_- = n_0$,
 $\rho(r) = \pm z_i e_0 (n_+ + n_-) r \longrightarrow \infty : \rho(r) \longrightarrow 0$:
- $\rho(r) = \sum_i z_i e_0 n_0 \exp \left\{ -\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right\} .$
- $e_0 \Phi \ll k_B T_e : \rho(r) \approx \sum_i z_i e_0 n_0 \left(1 - \frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right) .$
- $\Rightarrow \rho(r) \approx \left(\sum_i z_i e_0 n_0 = 0 \right) - \sum_i z_i e_0 n_0 \frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} .$
- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$



Debye-Länge II

• $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$



Debye-Länge II

- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$

- $\Phi(r) \approx -\frac{k_B T}{e_0} \frac{n(r)}{n_0}.$



Debye-Länge II

- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$
- $\Phi(r) \approx -\frac{k_B T}{e_0} \frac{n(r)}{n_0}$.
- Einsetzen in die Poisson-Gl. $-\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{n(r) e_0}{\epsilon \epsilon_0} :$



Debye-Länge II

- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$

- $\Phi(r) \approx -\frac{k_B T}{e_0} \frac{n(r)}{n_0}$.

- Einsetzen in die Poisson-Gl. $-\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{n(r) e_0}{\epsilon \epsilon_0} :$

- $\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{e_0^2 n_0}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \Phi(r).$



Debye-Länge II

- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$

- $\Phi(r) \approx -\frac{k_B T}{e_0} \frac{n(r)}{n_0}$.

- Einsetzen in die Poisson-Gl. $-\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{n(r) e_0}{\epsilon \epsilon_0} :$

- $\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{e_0^2 n_0}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \Phi(r)$.

- $\Phi(r) = \Phi_0 \exp \left\{ -\frac{r}{d} \right\}$



Debye-Länge II

- $\Rightarrow (z_i = 1) : \rho(r) = e_0 n(r) \approx e_0 n_0 \left(-\frac{e_0 \Phi(r)}{k_B T} \right)$

- $\Phi(r) \approx -\frac{k_B T}{e_0} \frac{n(r)}{n_0}$.

- Einsetzen in die Poisson-Gl. $-\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{n(r) e_0}{\epsilon \epsilon_0} :$

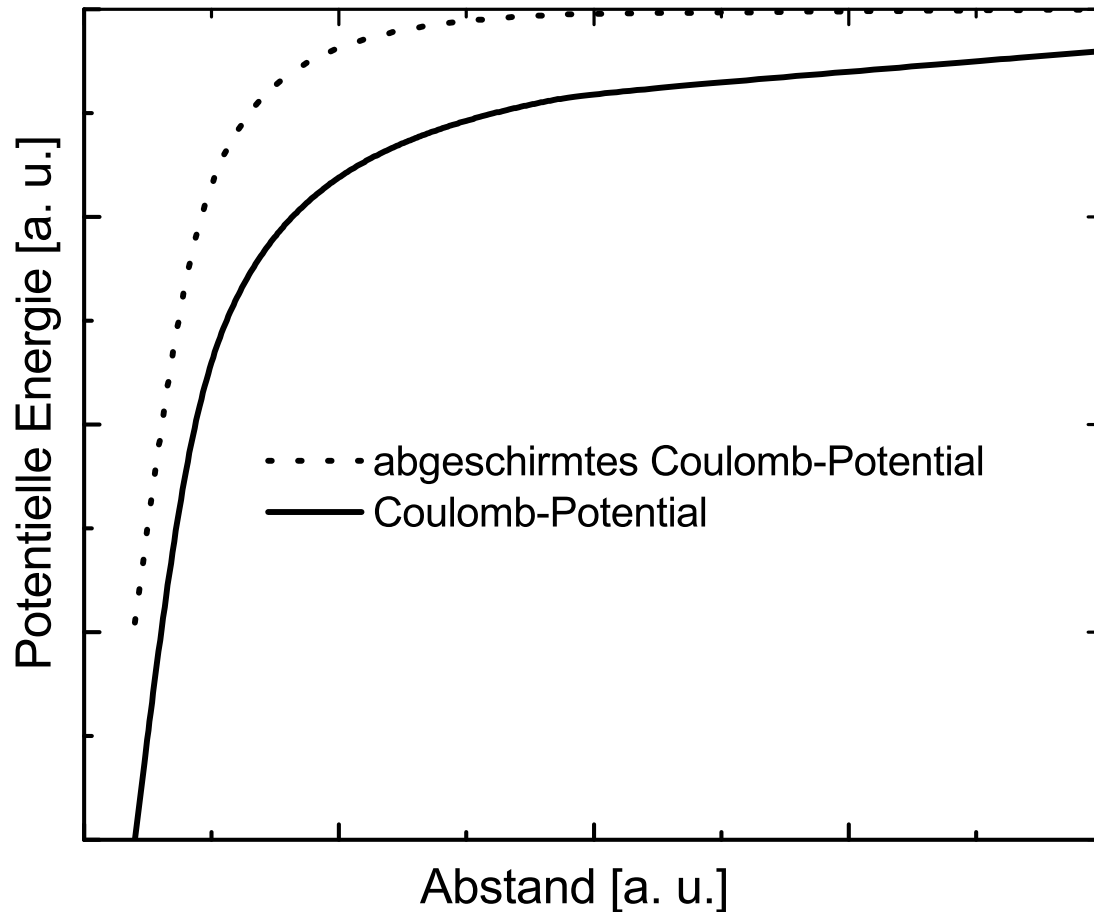
- $\frac{d^2 \Phi(r)}{dr^2} = \frac{e_0^2 n_0}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \Phi(r)$.

- $\Phi(r) = \Phi_0 \exp \left\{ -\frac{r}{d} \right\}$

- $d = \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_B T}{n_0 e_0^2}}$.



Debye-Länge III



Das COULOMB-Feld $1/r$ wird durch die Bildung einer „Ionenwolke“ mit dem Abschirmradius λ_D abgeschirmt (λ_D ist auf Eins normiert).



Debye-Länge IV

- Langmuir: λ_D muß klein sein gegen die Dimensionen des Reaktors.



Debye-Länge IV

- Langmuir: λ_D muß klein sein gegen die Dimensionen des Reaktors.
- $N_e > 100$:

$$N = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3 \propto \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n_e}} \vee \lambda_D > n_e^{-1/3}.$$



Debye-Länge IV

- Langmuir: λ_D muß klein sein gegen die Dimensionen des Reaktors.
- $N_e > 100$:

$$N = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3 \propto \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n_e}} \vee \lambda_D > n_e^{-1/3}.$$

- Ladungsausgleich dauert maximal

$$\tau = \frac{\lambda_D}{\sqrt{\langle v^2 \rangle}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e}{n_e e_0^2}} = \frac{2\pi}{\omega_P}$$



Debye-Länge IV

- Langmuir: λ_D muß klein sein gegen die Dimensionen des Reaktors.
- $N_e > 100$:

$$N = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3 \propto \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n_e}} \vee \lambda_D > n_e^{-1/3}.$$

- Ladungsausgleich dauert maximal

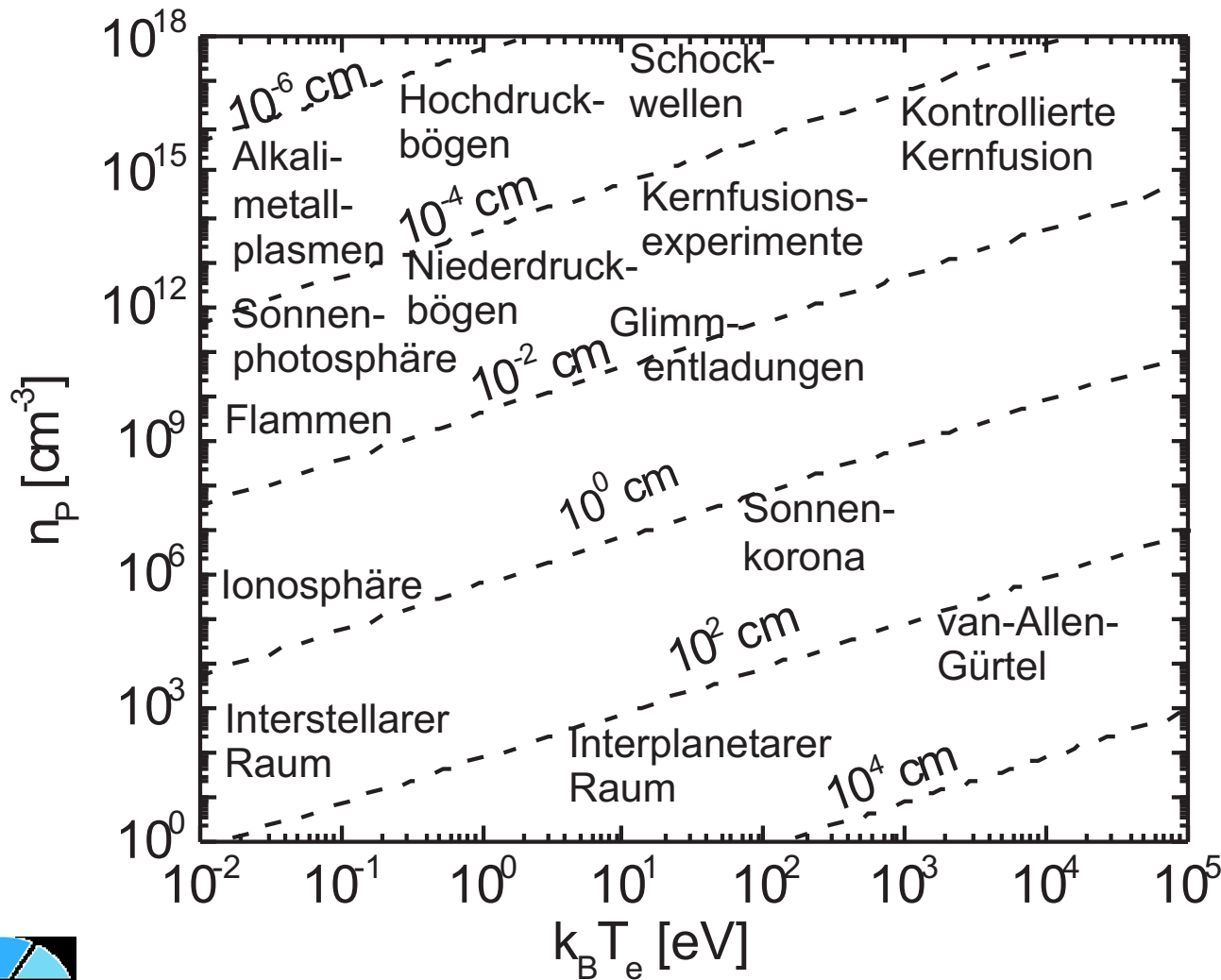
$$\tau = \frac{\lambda_D}{\sqrt{\langle v^2 \rangle}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e}{n_e e_0^2}} = \frac{2\pi}{\omega_P}$$

- mit $\langle v^2 \rangle$ der mittleren quadratischen Geschwindigkeit:

$$\langle v^2 \rangle = \sqrt{3k_B T_e / m_e} \text{ und } \omega_P \text{ der Plasmafrequenz.}$$



Debye-Länge λ_D



Elektronendichte in cm⁻³ für verschiedene Plasmen in Abhängigkeit von der Elektronentemperatur in eV. Eingezeichnet sind die Debye-Längen.



Potentialverteilung im Plasma I

- Die Geschwindigkeiten von Ionen und Elektronen unterscheiden sich um mehr als 3 Größenordnungen:

$$j_e = \frac{1}{4} e_0 n_e \langle v_e \rangle = \frac{e_0 n_e}{4} \sqrt{\frac{8 k_B T_e}{\pi m_e}}$$

$$j_i = \frac{1}{4} e_0 n_i \langle v_i \rangle = e_0 n_e \sqrt{\frac{k_B T_i}{2\pi m_i}}$$



Potentialverteilung im Plasma I

- Die Geschwindigkeiten von Ionen und Elektronen unterscheiden sich um mehr als 3 Größenordnungen:

$$j_e = \frac{1}{4} e_0 n_e \langle v_e \rangle = \frac{e_0 n_e}{4} \sqrt{\frac{8 k_B T_e}{\pi m_e}}$$

$$j_i = \frac{1}{4} e_0 n_i \langle v_i \rangle = e_0 n_e \sqrt{\frac{k_B T_i}{2\pi m_i}}$$

- Das bedeutet für das Verhältnis der Stromdichten und der mittleren Geschwindigkeiten:

$$\frac{j_e}{j_i} = \frac{\langle v_e \rangle}{\langle v_i \rangle} = \sqrt{\frac{T_e}{T_i} \cdot \frac{m_i}{m_e}}$$



Potentialverteilung im Plasma II

- Deswegen lädt sich ein isoliertes Substrat unter Beschuß eines Plasmas auf Φ_f negativ auf, bis die mittleren Geschwindigkeiten der beiden Ladungsträgersorten gleich geworden sind:

$$\langle v_i \rangle = \langle v_e \rangle e^{-\frac{e_0}{k_B T_e} \Phi_f}$$

$$-\Phi_f = \frac{k_B T_e}{2e_0} \ln \sqrt{\frac{T_e}{T_i} \cdot \frac{m_i}{m_e}} \Rightarrow \Phi_f = \frac{k_B T_e}{2e_0} \ln \sqrt{\frac{T_i}{T_e} \cdot \frac{m_e}{m_i}} :$$



Potentialverteilung im Plasma II

- Deswegen lädt sich ein isoliertes Substrat unter Beschuß eines Plasmas auf Φ_f negativ auf, bis die mittleren Geschwindigkeiten der beiden Ladungsträgersorten gleich geworden sind:

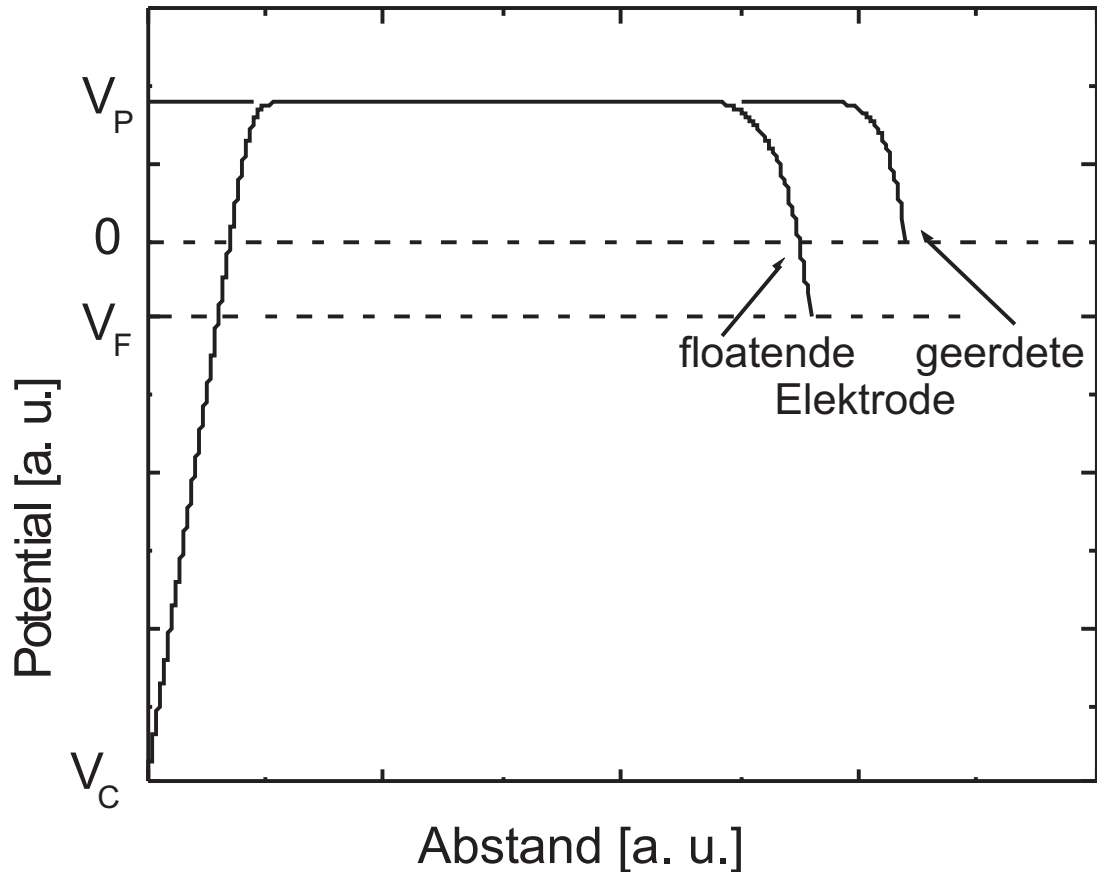
$$\langle v_i \rangle = \langle v_e \rangle e^{-\frac{e_0}{k_B T_e} \Phi_f}$$

$$-\Phi_f = \frac{k_B T_e}{2e_0} \ln \sqrt{\frac{T_e}{T_i} \cdot \frac{m_i}{m_e}} \Rightarrow \Phi_f = \frac{k_B T_e}{2e_0} \ln \sqrt{\frac{T_i}{T_e} \cdot \frac{m_e}{m_i}} :$$

- Φ_f ist immer negativ!



Potentialverteilung im Plasma III



Potentialverteilung einer Entladung, bei der die Gegenelektrode in die Negative Glühzone eintaucht.



Bohm-Geschwindigkeit I

- Am Plasmarand werden die Ionen auf höhere Geschwindigkeiten beschleunigt (ambipolare Diffusion), so daß die elektronische Komponente entlang des elektrischen Feldes erreicht wird:

$$\frac{1}{2} m_i v_B^2 = \frac{1}{3} \frac{3}{2} k_B T_e,$$

$$j_i = n_0 \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}},$$

$$v_B = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$



Bohm-Geschwindigkeit II

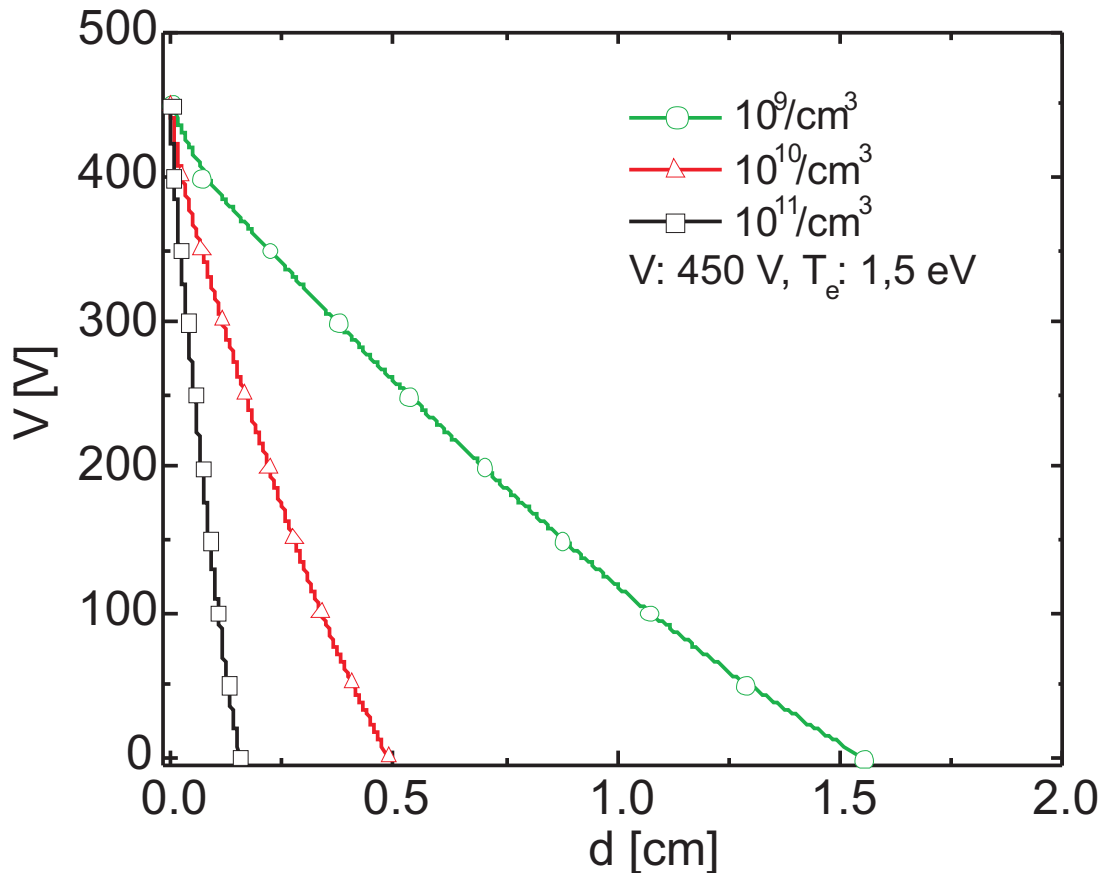
$$e_0 \Phi_B = \frac{1}{2} m_i v_B^2 \Rightarrow \Phi_B = \frac{1}{2} \frac{k_B T_e}{e_0}$$

- Auch daraus folgt, daß Φ_f immer negativ ist:

$$\Phi_f = \frac{k_B T_e}{2e_0} \ln \left(\frac{\pi m_e}{2m_i} \right).$$



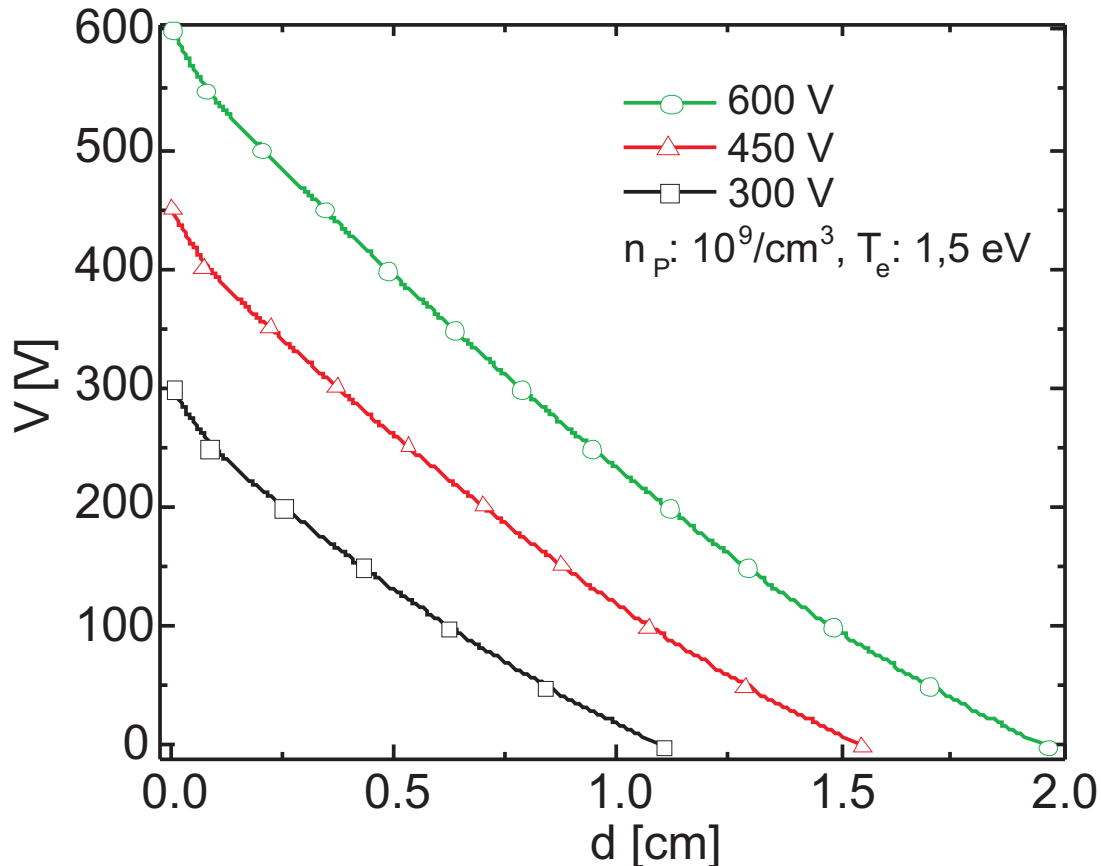
Bohm-Geschwindigkeit III



Integrierte Randschicht-Gleichung für verschiedene Plasmadichten.
Elektronentemperatur: 1,5 eV,
Kathodenfall: 450 V; durchgezogene Kurve: 10^{11} , strich-punktierte Kurve: 10^{10} , punktierte Kurve: 10^9 cm^{-3} . Das Potential ist Null für den Eintritt in das „Bulk“-Plasma, die Dicke der Randschicht ist Null auf der Elektrode.
 λ_D ist 288, 91 bzw. 29 μm .



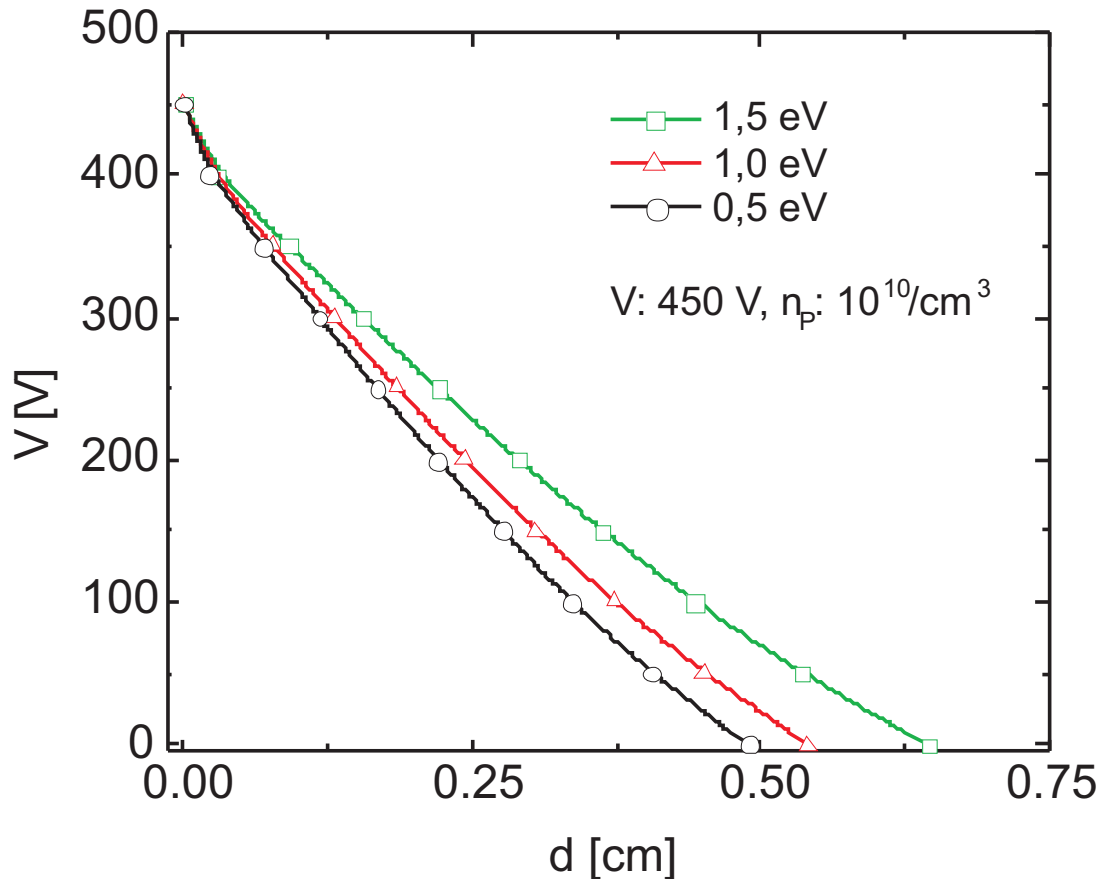
Bohm-Geschwindigkeit IV



Integrierte Randschicht-Gleichung für verschiedene Kathodenfälle. Elektronentemperatur: 1,5 eV, Plasmadichte: 10^9 cm^{-3} . Das Potential ist Null für den Eintritt in das „Bulk“-Plasma, die Dicke der Randschicht ist Null auf der Elektrode. λ_D ist $288 \mu\text{m}$.



Bohm-Geschwindigkeit V

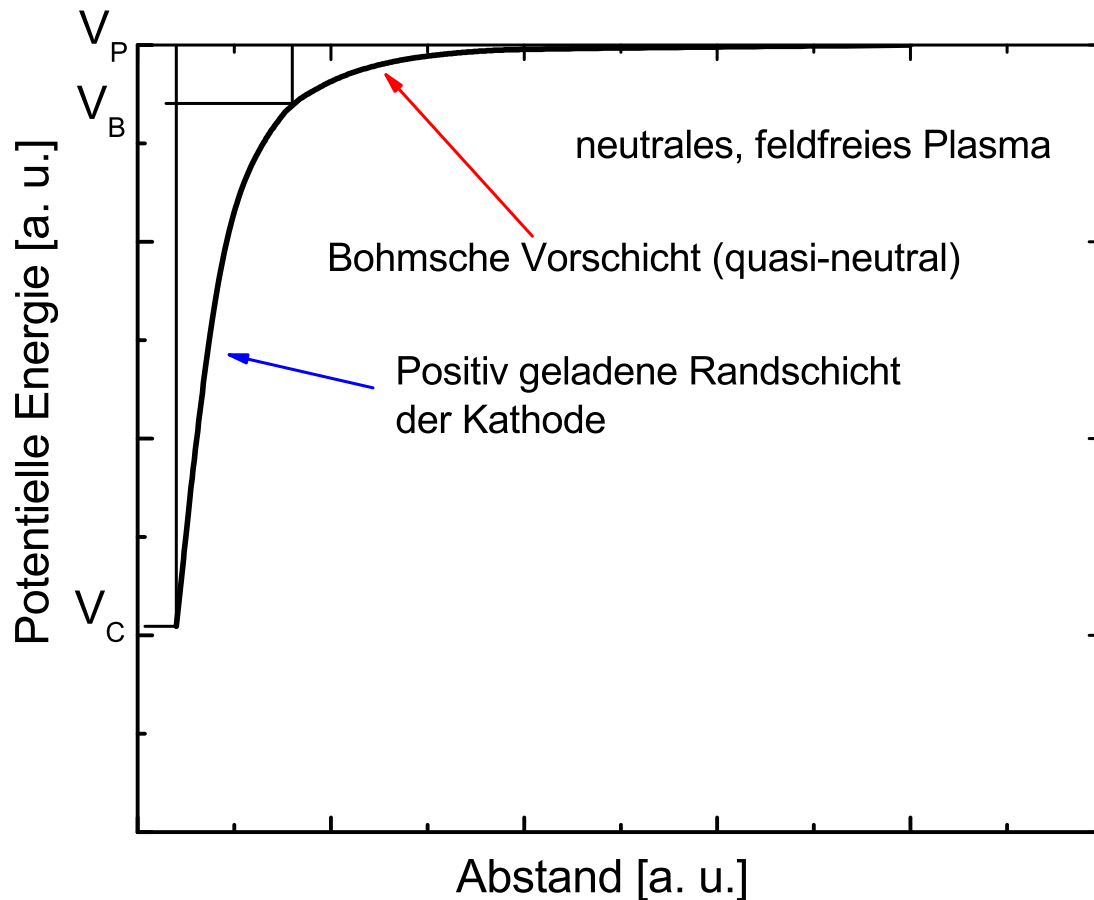


Integrierte Randschicht-Gleichung für verschiedene Elektronentemperaturen. Plasmadichte: 10^{10} cm^{-3} , Kathodenfall: 450 V, durchgezogene Kurve: 0,5 eV; strichlierte Kurve: 1 eV; punktierte Kurve: 1,5 eV. Das Potential ist Null für den Eintritt in das „Bulk“-Plasma, die Dicke der Randschicht ist Null auf der Elektrode.

λ_D ist 52,6, 74,4 bzw. 91,1 μm .



Bohm-Geschwindigkeit VI



Das ungestörte neutrale Plasma, die quasineutrale Übergangszone (BOHMSche Vorschicht) und die Fallzone der positiv geladenen Randschicht unmittelbar über einer negativ aufgeladenen Oberfläche.



Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?



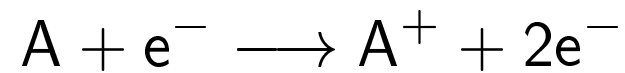
Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Wie hoch ist die Ionisationsrate?



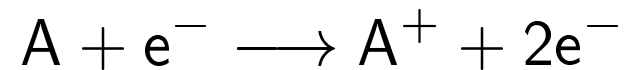
Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Wie hoch ist die Ionisationsrate?
- Einstufige Ionisation:



Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Wie hoch ist die Ionisationsrate?
- Einstufige Ionisation:



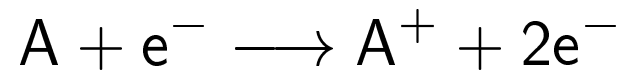
- schwache Ionisation:

$$n_i (= n_e) \ll n_0 \Rightarrow n_A = n_0 - n_e \approx n_0$$



Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Wie hoch ist die Ionisationsrate?
- Einstufige Ionisation:



- schwache Ionisation:

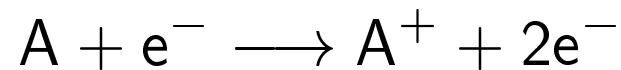
$$n_i (= n_e) \ll n_0 \Rightarrow n_A = n_0 - n_e \approx n_0$$

- Massenwirkungsgesetz



Global Model I

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Wie hoch ist die Ionisationsrate?
- Einstufige Ionisation:



- schwache Ionisation:

$$n_i (= n_e) \ll n_0 \Rightarrow n_A = n_0 - n_e \approx n_0$$

- Massenwirkungsgesetz
- Verluste nur durch Diffusion



Global Model II. Gewinn

- Bimolekulare Reaktion

$$\frac{n_i n_e^2}{n_0 n_e} = \exp \left\{ -\frac{\varepsilon_{\text{ion}}}{k_B T_e} \right\}$$

$$n_e = \sqrt{n_0} \exp \left\{ -\frac{\varepsilon_{\text{ion}}}{2k_B T_e} \right\} .$$



Global Model II. Gewinn

- Bimolekulare Reaktion

$$\frac{n_i n_e^2}{n_0 n_e} = \exp \left\{ -\frac{\varepsilon_{\text{ion}}}{k_B T_e} \right\}$$

$$n_e = \sqrt{n_0} \exp \left\{ -\frac{\varepsilon_{\text{ion}}}{2k_B T_e} \right\}.$$

- Vereinfachte Saha-Gleichung. Ionenbildungsrate:

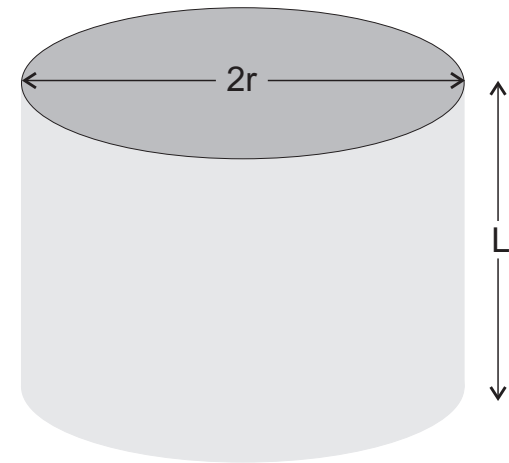
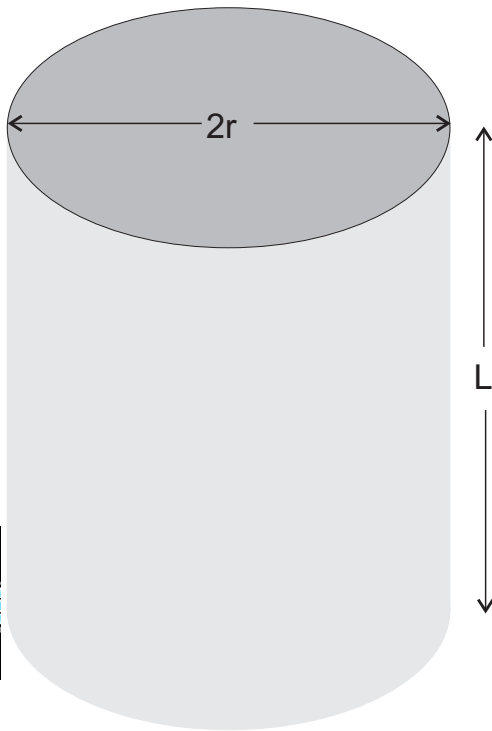
$$\frac{\partial n_{A^+}}{\partial t} = k_{\text{ion}} n_e n_A.$$



Global Model III. Gewinn

- Die Rate der Ionenbildung hängt linear von der Elektronendichte und dem Ratenkoeffizienten k_{ion} ab; dieser ist wiederum eine reine Funktion der Elektronentemperatur T_e . In einem zylindrischen Volumen von $\pi r^2 L$ ist dann die Bildungsrate der Ionen

$$\frac{\partial N_{A^+}}{\partial t} = k_{\text{ion}} n_e n_A \pi r^2 L.$$



Global Model IV. Verlust

- Der Ladungsträgerverlust in diesem Zylinder ist

$$-\frac{\partial N_{A^+}}{\partial t} = n_{A^+} v_B (2\pi r^2 + 2\pi rL),$$



Global Model IV. Verlust

- Der Ladungsträgerverlust in diesem Zylinder ist

$$-\frac{\partial N_{A^+}}{\partial t} = n_{A^+} v_B (2\pi r^2 + 2\pi rL),$$

- und der Ratenkoeffizient ist dann etwa

$$k_{\text{ion}} = \frac{v_B}{n_A} O_{\text{p,spec}}.$$

$$O_{\text{p,spec}} = \frac{2(r + L)}{rL}.$$



Global Model IV. Verlust

- Der Ladungsträgerverlust in diesem Zylinder ist

$$-\frac{\partial N_{A^+}}{\partial t} = n_{A^+} v_B (2\pi r^2 + 2\pi rL),$$

- und der Ratenkoeffizient ist dann etwa

$$k_{\text{ion}} = \frac{v_B}{n_A} O_{\text{p,spec}}.$$

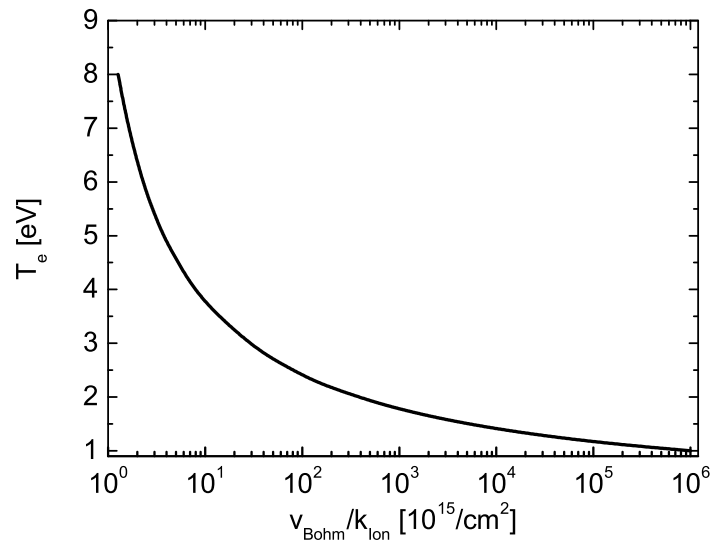
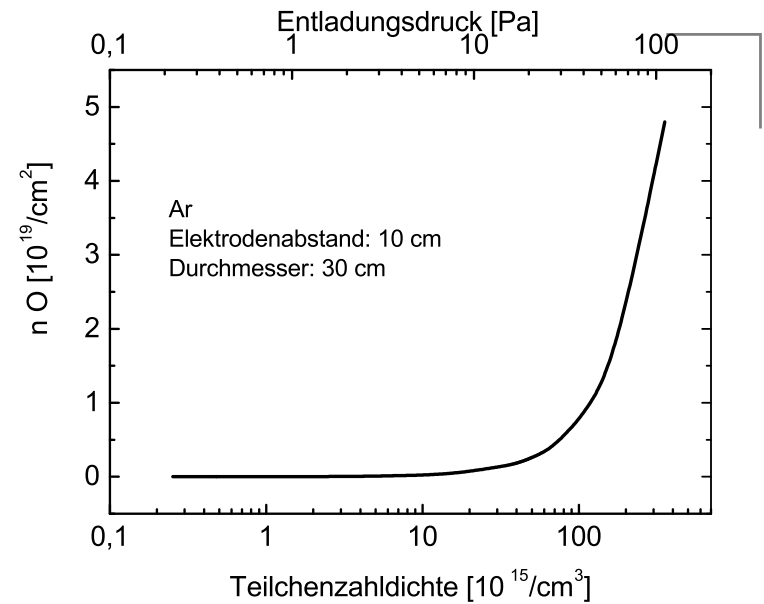
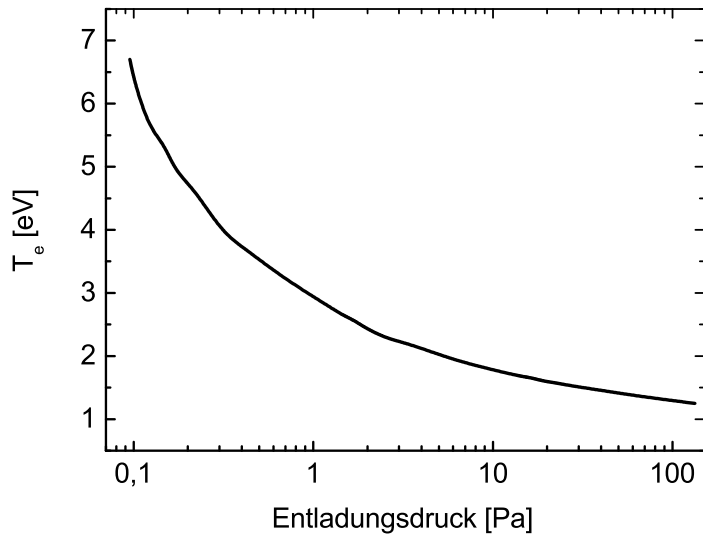
$$O_{\text{p,spec}} = \frac{2(r + L)}{rL}.$$

- Der Ratenkoeffizient hängt aber auch vom Streuquerschnitt der Ionisation ab:

$$k_{\text{ion}} = \sigma_{\text{ion}} \langle v_e \rangle.$$



Global Model V



T_e steigt mit sinkendem Druck, mit kleinerem Volumen des Reaktors und bei Vergrößerung der Begrenzungsflächen.

Global Model VI. Plasmadichte

- Mit dem OHMschen Gesetz wird

$$dP_{\text{abs}} = j_s E d^3x \quad \vee \quad dP_{\text{abs}} = \sigma E^2 d^2x dx$$

$$j_s \approx e_0 \frac{N_{A^+}}{V} v_B$$

$$dP_{\text{abs}} = e_0 N_{A^+} v_B E \frac{d^2x}{V} dx$$

$$N_{A^+} \propto \frac{dP_{\text{abs}}}{v_B O_{p,\text{spec}} E dx}$$



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.
- Anregung erfolgt durch Einkopplung elektrischer Energie.



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.
- Anregung erfolgt durch Einkopplung elektrischer Energie.
- Es liegt der seltene Fall eines athermischen Systems vor, in dem die Komponenten unterschiedliche Temperaturen aufweisen — im Unterschied zu thermischen Plasmen, etwa in der Sonne.



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.
- Anregung erfolgt durch Einkopplung elektrischer Energie.
- Es liegt der seltene Fall eines athermischen Systems vor, in dem die Komponenten unterschiedliche Temperaturen aufweisen — im Unterschied zu thermischen Plasmen, etwa in der Sonne.
- Elektronen werden durch die Felder aufgeheizt und geben durch (ineffektive) Stoßprozesse ihre Energie an die schweren Partikeln weiter.



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.
- Anregung erfolgt durch Einkopplung elektrischer Energie.
- Es liegt der seltene Fall eines athermischen Systems vor, in dem die Komponenten unterschiedliche Temperaturen aufweisen — im Unterschied zu thermischen Plasmen, etwa in der Sonne.
- Elektronen werden durch die Felder aufgeheizt und geben durch (ineffektive) Stoßprozesse ihre Energie an die schweren Partikeln weiter.
- Mit einem einfachen Modell kann man die elementaren Parameter Elektronentemperatur und Plasmadichte erklären.



Zusammenfassung

- Niederdruckplasmen sind ein Mehrkomponentensystem: Gas, Ionen, Elektronen.
- Anregung erfolgt durch Einkopplung elektrischer Energie.
- Es liegt der seltene Fall eines athermischen Systems vor, in dem die Komponenten unterschiedliche Temperaturen aufweisen — im Unterschied zu thermischen Plasmen, etwa in der Sonne.
- Elektronen werden durch die Felder aufgeheizt und geben durch (ineffektive) Stoßprozesse ihre Energie an die schweren Partikeln weiter.
- Mit einem einfachen Modell kann man die elementaren Parameter Elektronentemperatur und Plasmadichte erklären.
- Beide Größen bestimmen die DEBYE-Länge.

