

Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm

IV Induktiv gekoppelte Plasmen, 08. April
2021

Gerhard Franz

Walter Schottky Institut
TU München

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



Programm

- Einführung



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse



Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation



Programm

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



Programm

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



Programm

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



Programm

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



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen
 - DC-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, Ionisationsgrad 1 – 10 ppm



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen
 - DC-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, Ionisationsgrad 1 – 10 ppm
 - RF-Anregung im Parallelplatten-Reaktor (CCP); 13,56 oder 27,12 MHz, Ionisationsgrad 10 – 100 ppm



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen
 - DC-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, Ionisationsgrad 1 – 10 ppm
 - RF-Anregung im Parallelplatten-Reaktor (CCP); 13,56 oder 27,12 MHz, Ionisationsgrad 10 – 100 ppm
- Hoch-Dichte-Plasmen



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen
 - DC-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, Ionisationsgrad 1 – 10 ppm
 - RF-Anregung im Parallelplatten-Reaktor (CCP); 13,56 oder 27,12 MHz, Ionisationsgrad 10 – 100 ppm
- Hoch-Dichte-Plasmen
 - CCP-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, typisch 60 MHz/2MHz, Ionisationsgrad bis 1 %



Plasmanregung I

- Niedrig-Dichte-Plasmen
 - DC-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, Ionisationsgrad 1 – 10 ppm
 - RF-Anregung im Parallelplatten-Reaktor (CCP); 13,56 oder 27,12 MHz, Ionisationsgrad 10 – 100 ppm
- Hoch-Dichte-Plasmen
 - CCP-Anregung im Parallelplatten-Reaktor, typisch 60 MHz/2MHz, Ionisationsgrad bis 1 %
 - ICP-Anregung im Downstream-Reaktor, 13,56 MHz und 2 MHz, Ionisationsgrad höher als 1 %



Plasmanregung II

- Höchstdichteplasmen durch resonante Anregung, Ionisationsgrad bis 100 %



Plasmanregung II

- Höchstdichteplasmen durch resonante Anregung, Ionisationsgrad bis 100 %
 - Heliconwellen-Anregung



Plasmanregung II

- Höchstdichteplasmen durch resonante Anregung, Ionisationsgrad bis 100 %
 - Heliconwellen-Anregung
 - ECR-Anregung

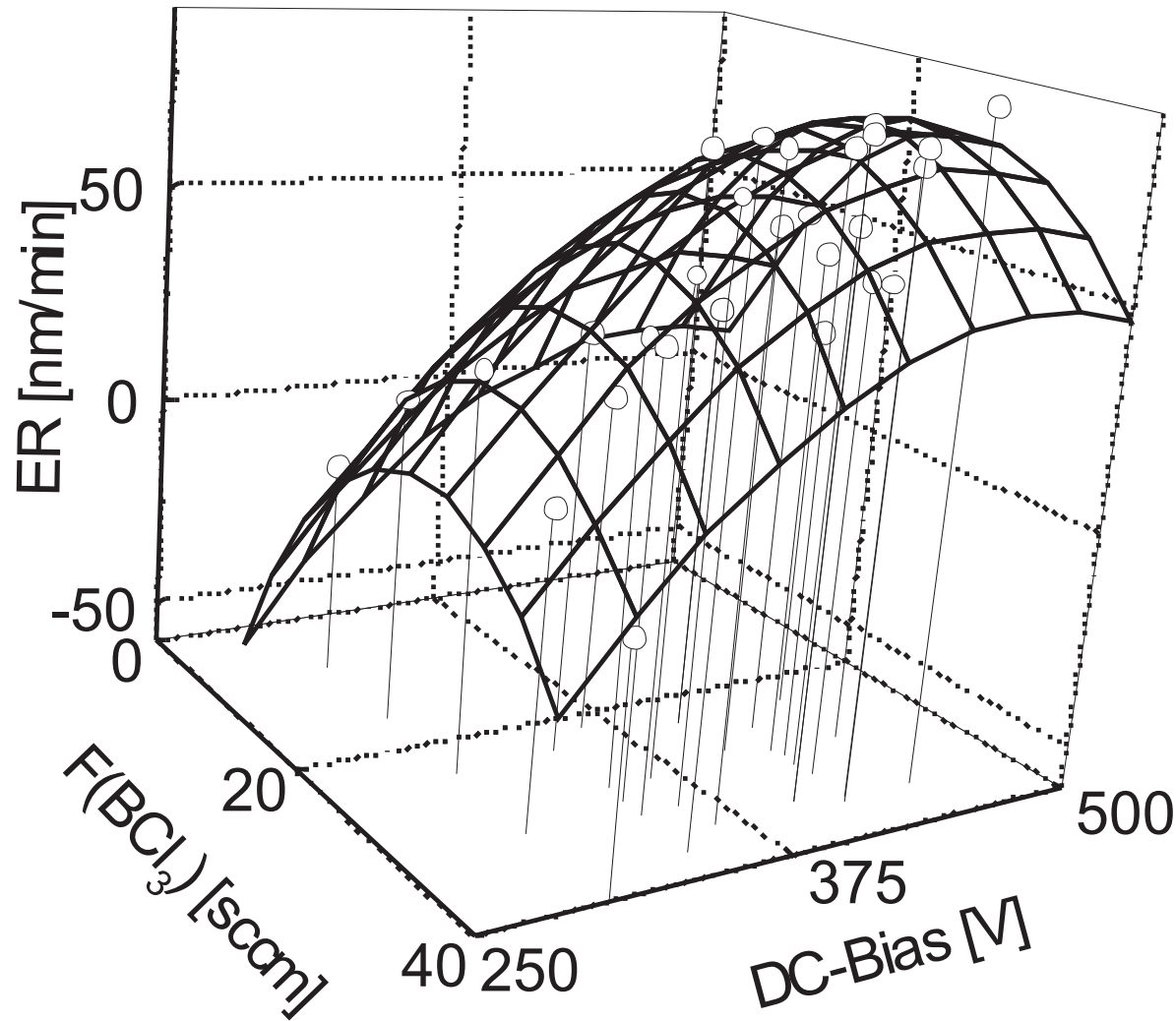


Plasmanregung II

- Höchstdichteplasmen durch resonante Anregung, Ionisationsgrad bis 100 %
 - Heliconwellen-Anregung
 - ECR-Anregung
 - Die Plasmadichte \Rightarrow Ätzrate ist nicht alles.



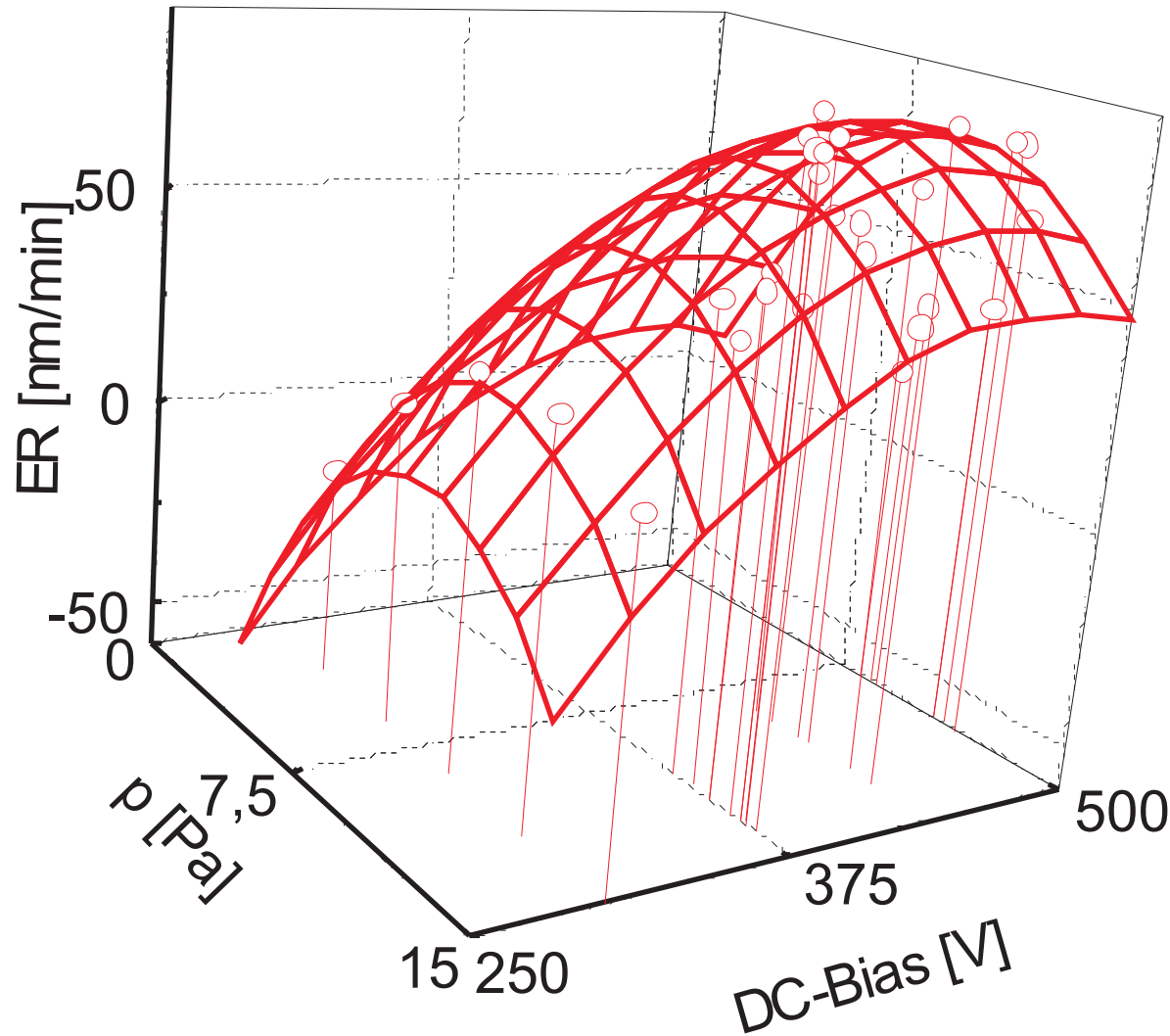
Plasmanregung III



ER von GaAs als Funktion von
BCl₃-Fluß und DC-Bias



Plasmanregung III



ER von GaAs als Funktion von
Entladungsdruck und DC-Bias



Plasmanregung III



Patscherkofel ist besser als ...

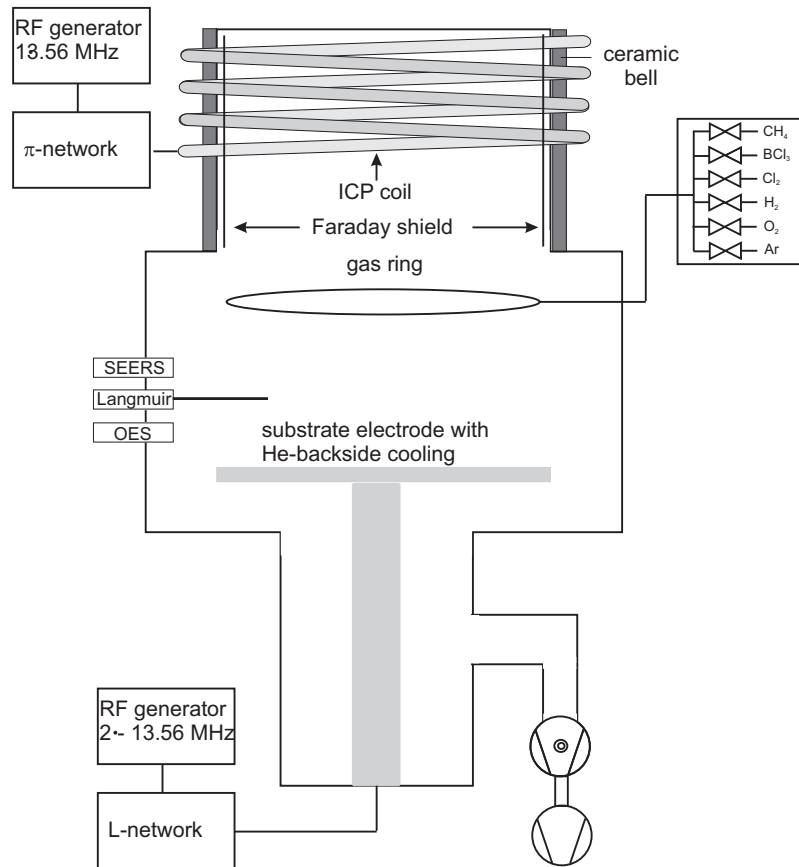
Plasmanregung III



... Matterhorn!



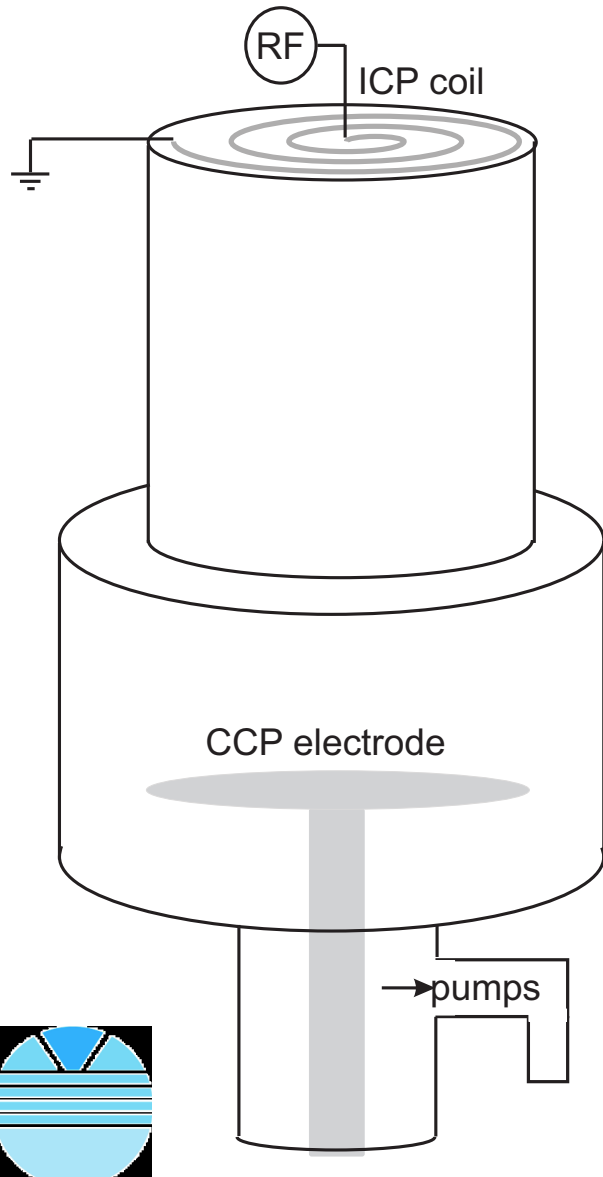
Hochdichte-Reaktortypen I



Prinzipieller Aufbau einer axialen Plasmaquelle mit FARADAY-Abschirmung und kapazitiv angekoppelter Elektrode.

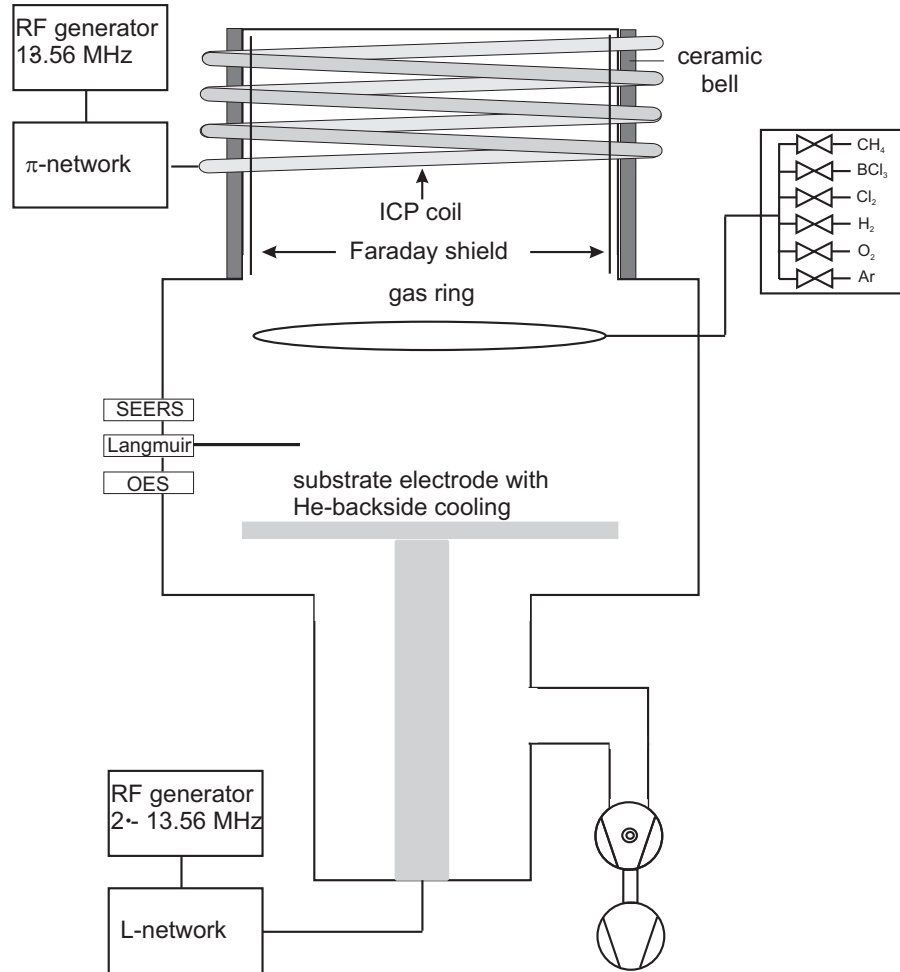


Hochdichte-Reaktortypen I



Prinzipieller Aufbau einer toroidalen Plasmaquelle mit kapazitiv angekoppelter Elektrode.

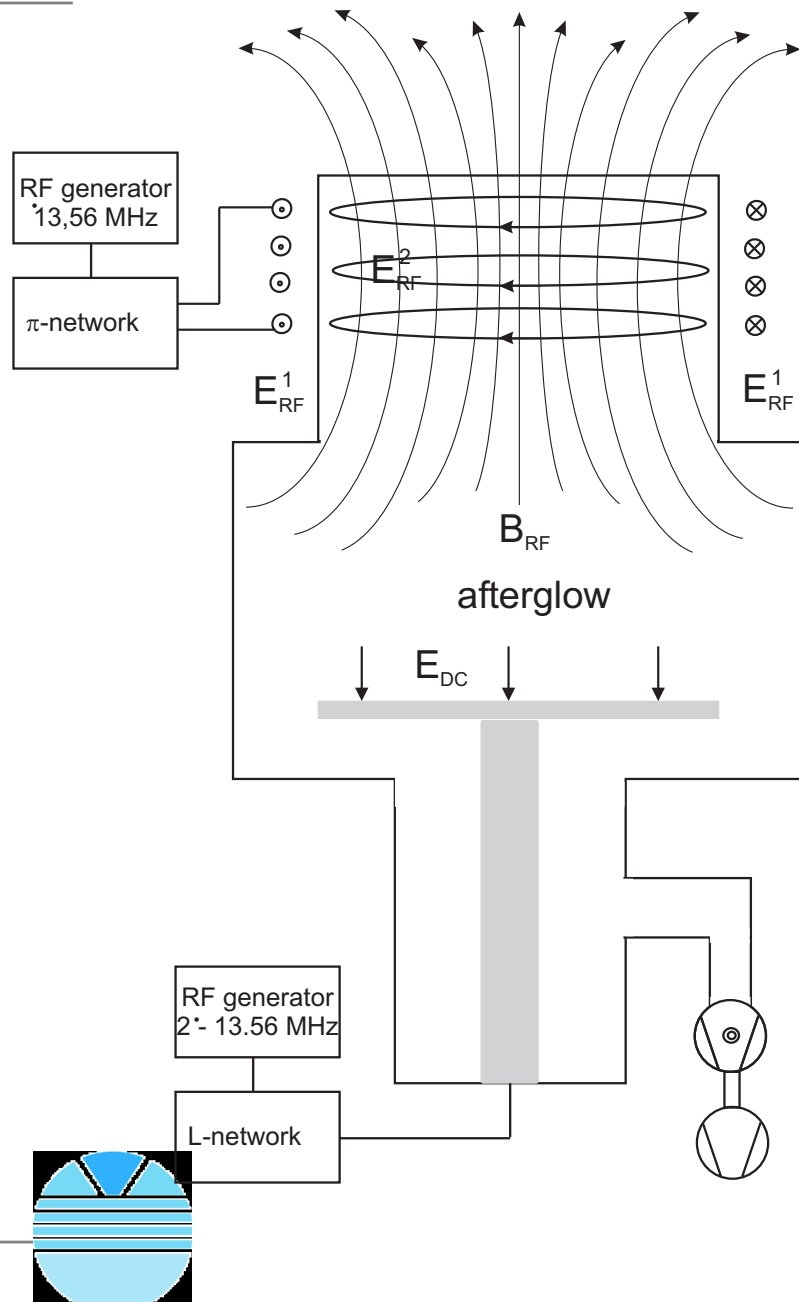
Hochdichte-Reaktortypen II



Prinzipieller Aufbau einer Plasmaquelle mit FARADAY-Abschirmung und kapazitiv angekoppelter Elektrode.

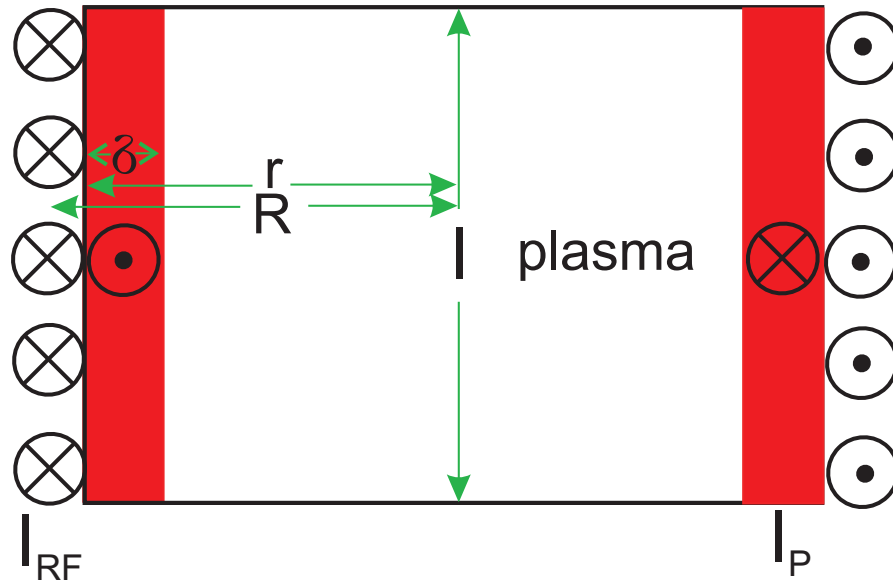


Hochdichte-Reaktortypen II



Prinzipieller Aufbau der Felder in einer ICP-Quelle.

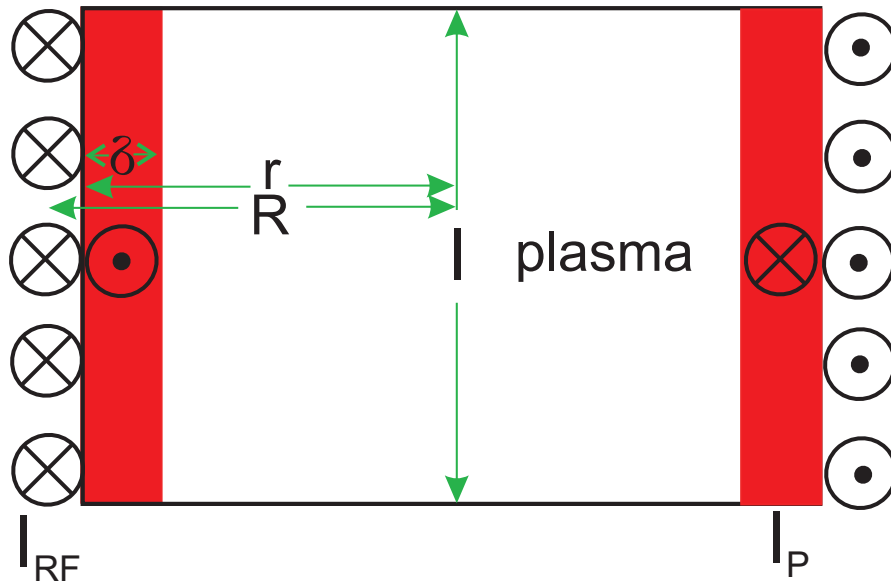
Trafo-Kopplung I



- RF-Strom in einer Spule der Länge l mit n Windungen



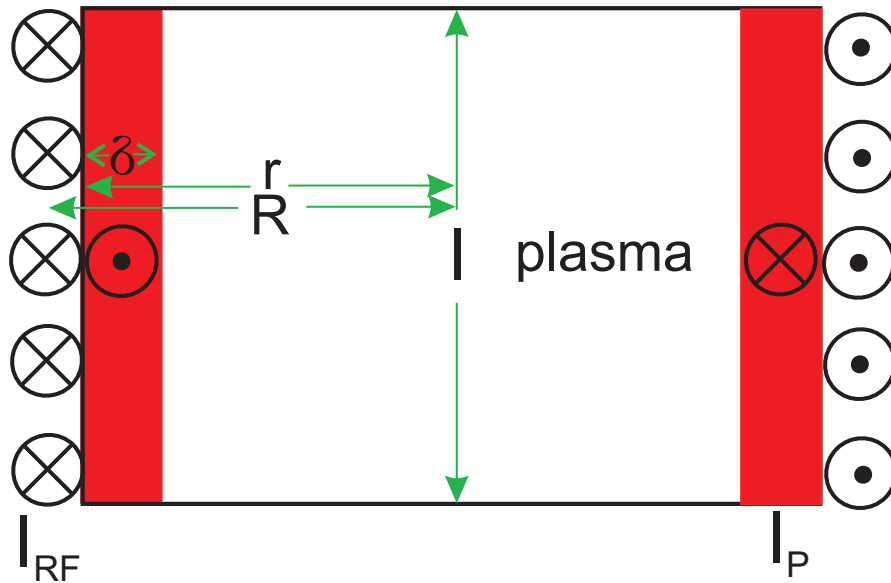
Trafo-Kopplung I



- RF-Strom in einer Spule der Länge l mit n Windungen
- induziert ein magnetisches Wirbelfeld im Plasma (1 Windung),



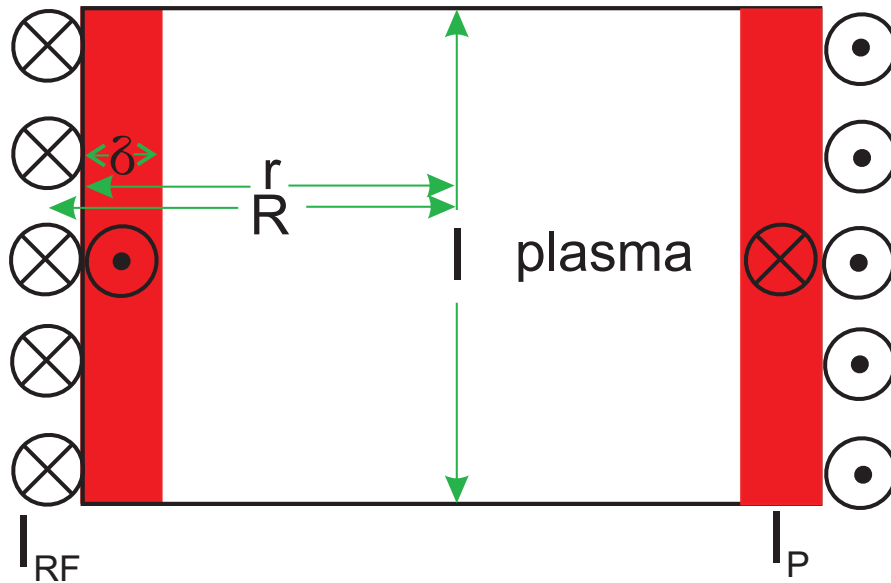
Trafo-Kopplung I



- RF-Strom in einer Spule der Länge l mit n Windungen
- induziert ein magnetisches Wirbelfeld im Plasma (1 Windung),
- das wiederum nach der LENZschen Regel ein



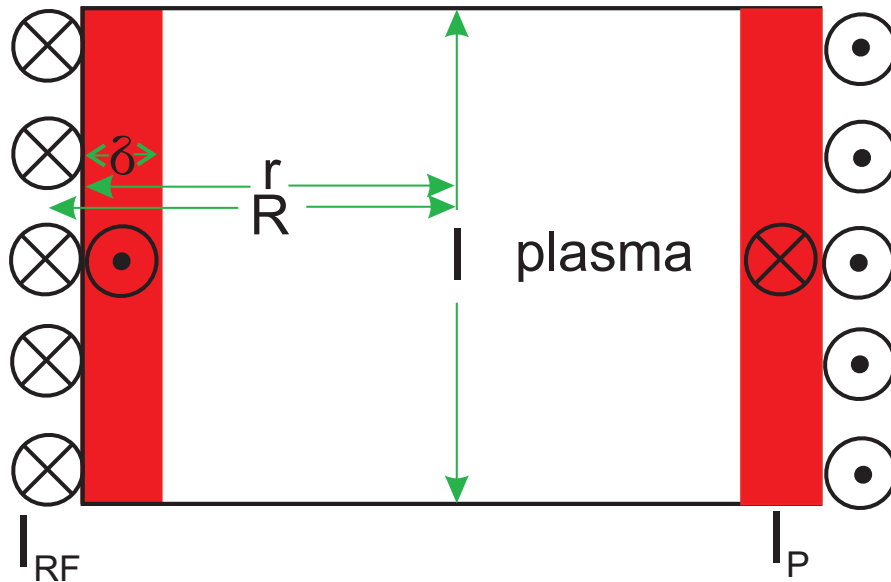
Trafo-Kopplung I



- RF-Strom in einer Spule der Länge l mit n Windungen
- induziert ein magnetisches Wirbelfeld im Plasma (1 Windung),
- das wiederum nach der LENZschen Regel ein
- sehr starkes elektrisches Feld zur Folge hat,



Trafo-Kopplung I

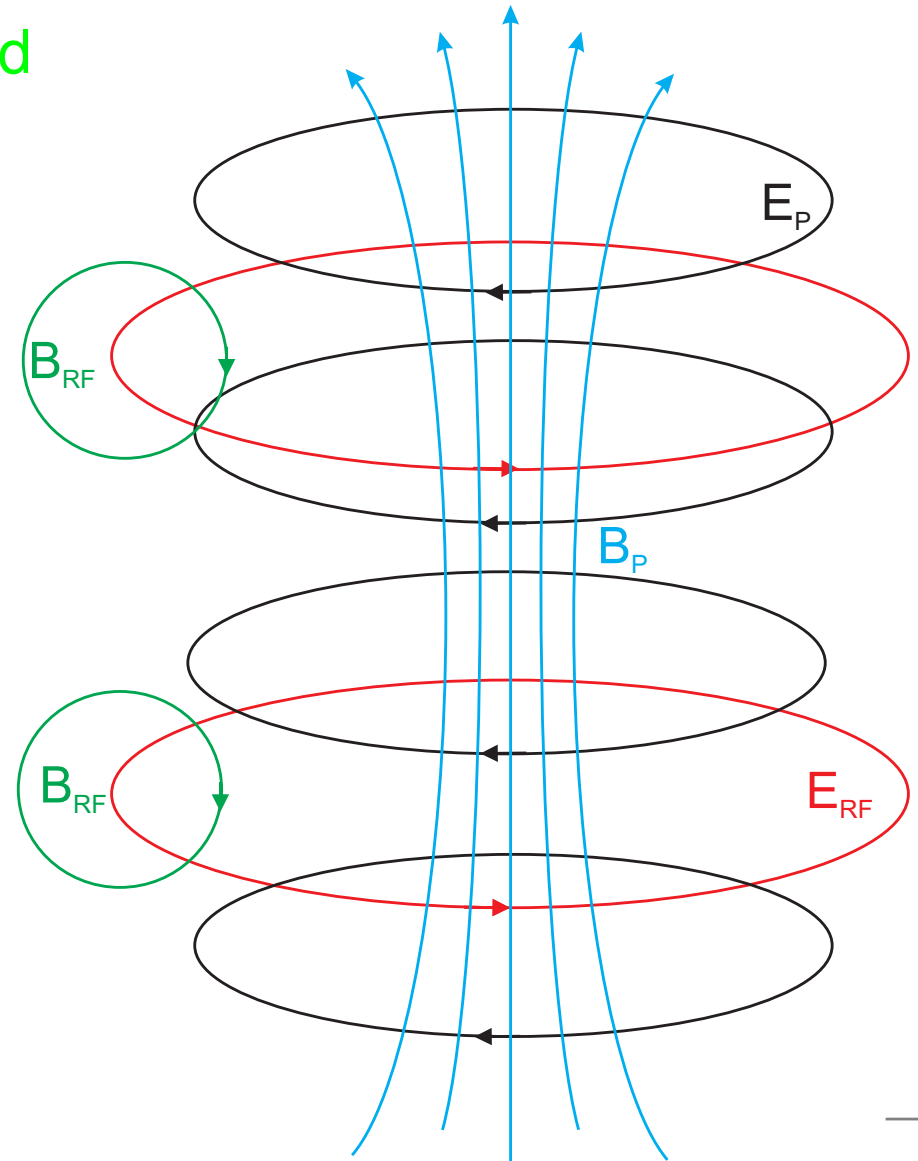


- RF-Strom in einer Spule der Länge l mit n Windungen
- induziert ein magnetisches Wirbelfeld im Plasma (1 Windung),
- das wiederum nach der LENZschen Regel ein
- sehr starkes elektrisches Feld zur Folge hat,
- das antiparallel zum ersten E-Feld ist.



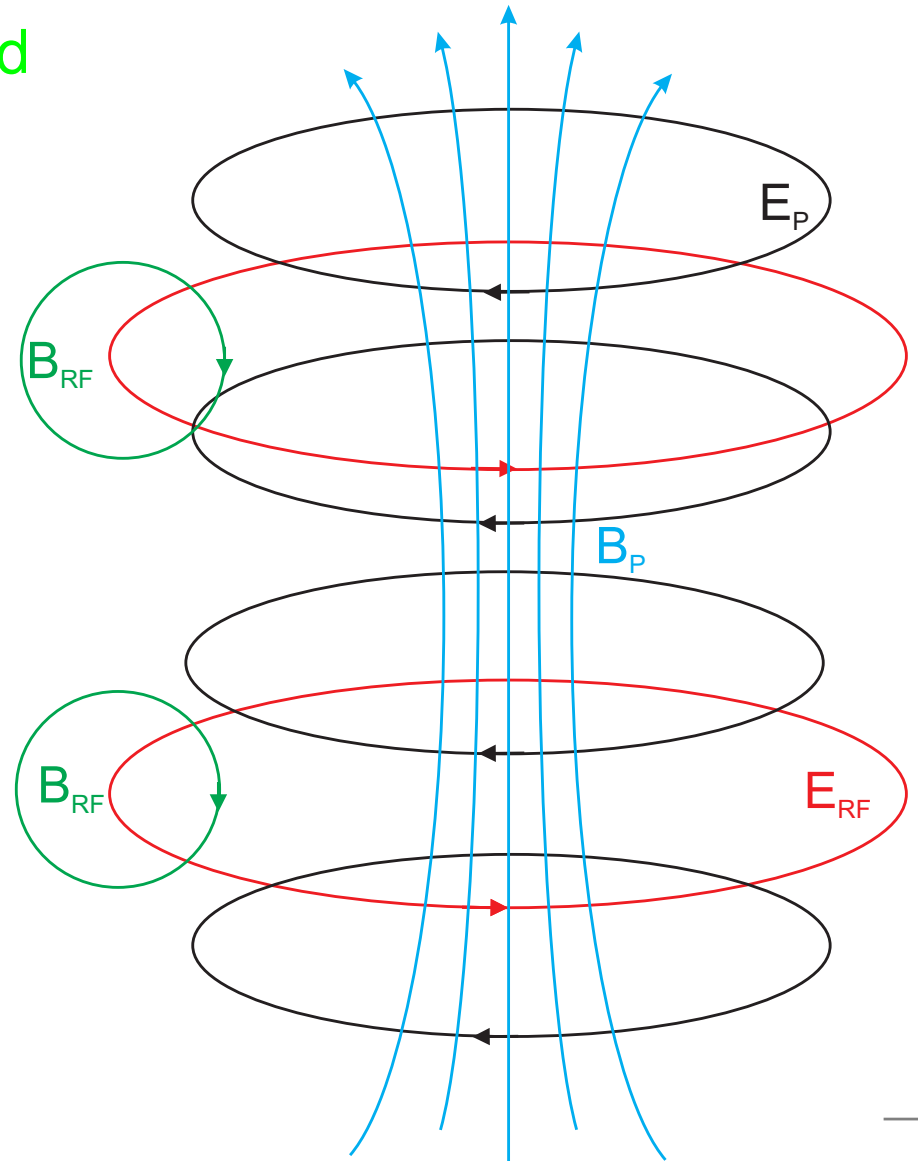
Trafo-Kopplung III

- **RF-Strom** induziert ein **B-Feld** in einer Spule der Länge mit n Windungen



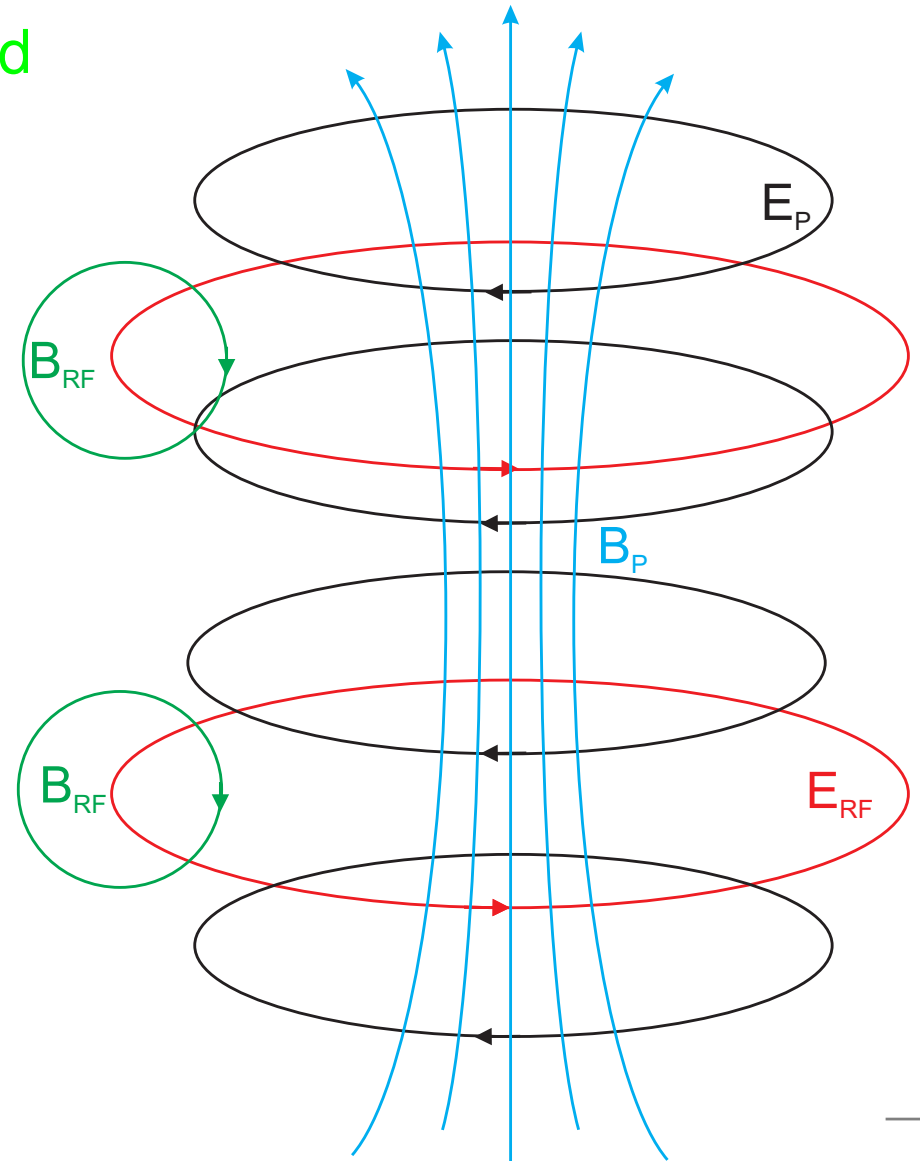
Trafo-Kopplung III

- **RF-Strom** induziert ein **B-Feld** in einer Spule der Länge mit n Windungen
- **B-Feld** induziert ein E-Feld im Plasma (1 Windung) || zur Gefäßwand

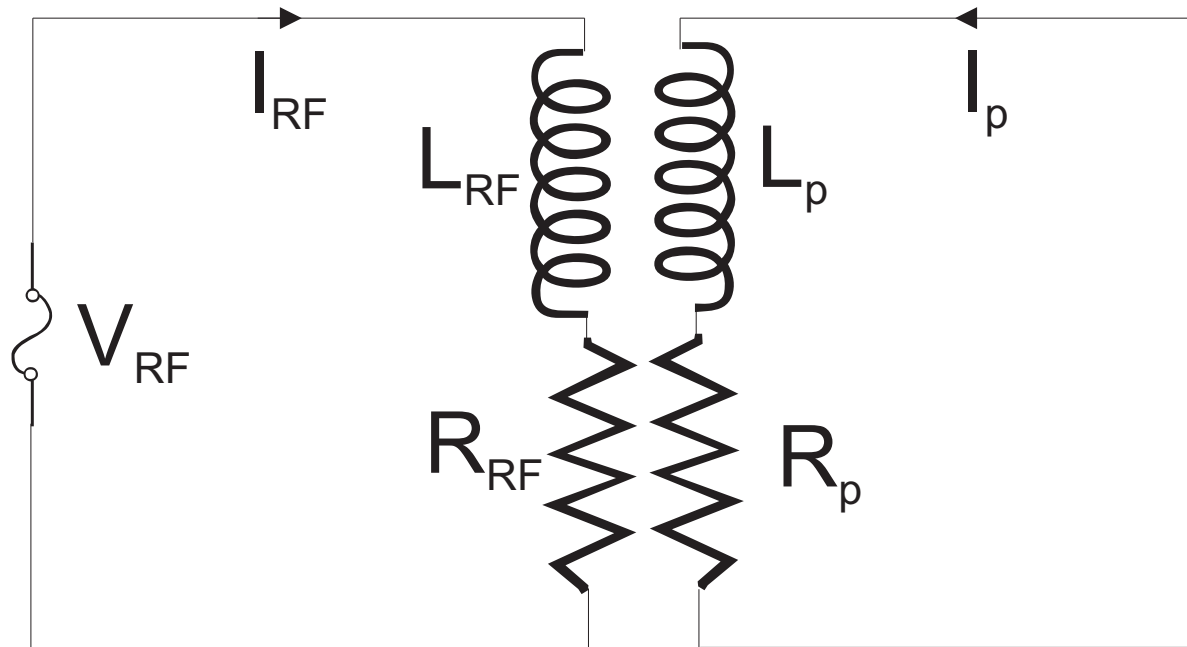


Trafo-Kopplung III

- **RF-Strom** induziert ein **B-Feld** in einer Spule der Länge mit n Windungen
- **B-Feld** induziert ein E-Feld im Plasma (1 Windung) || zur Gefäßwand
- E-Feld erzeugt ein **B-Feld** im Plasma, das antiparallel zum äußeren **H-Feld** steht.

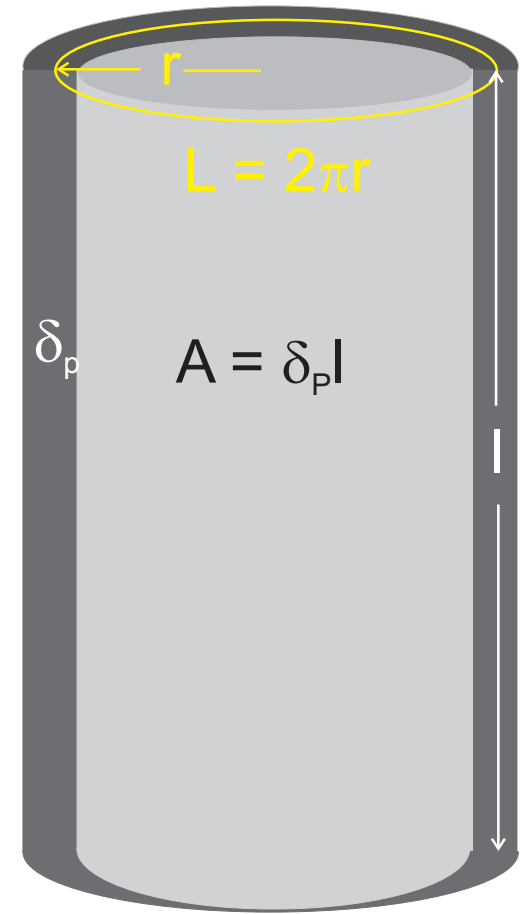


Trafo-Kopplung IV



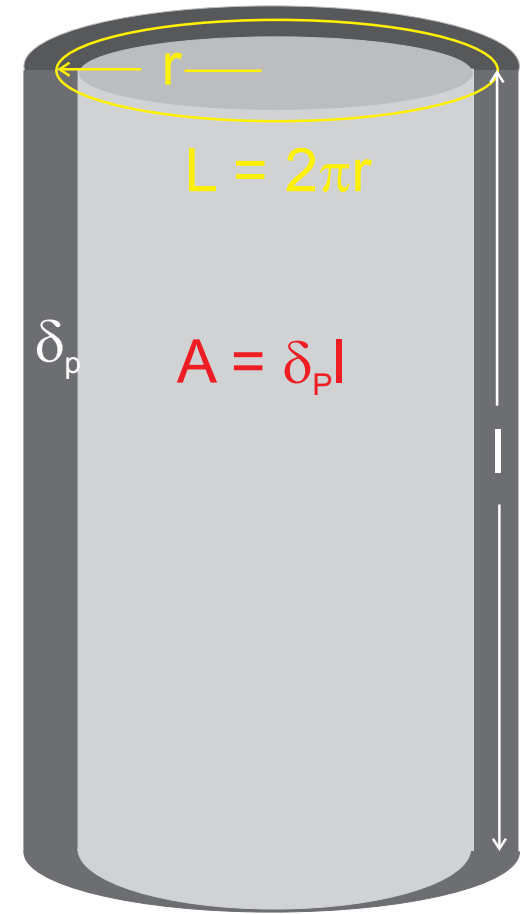
Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$



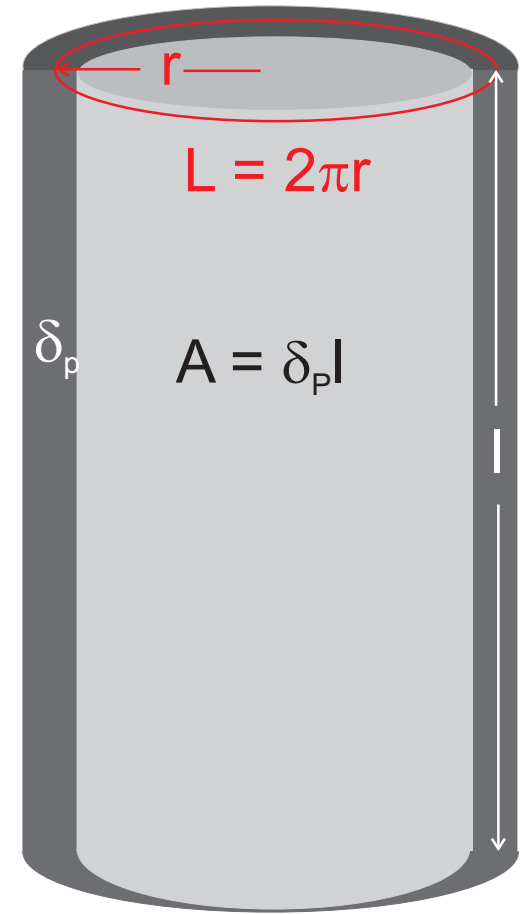
Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_P l$



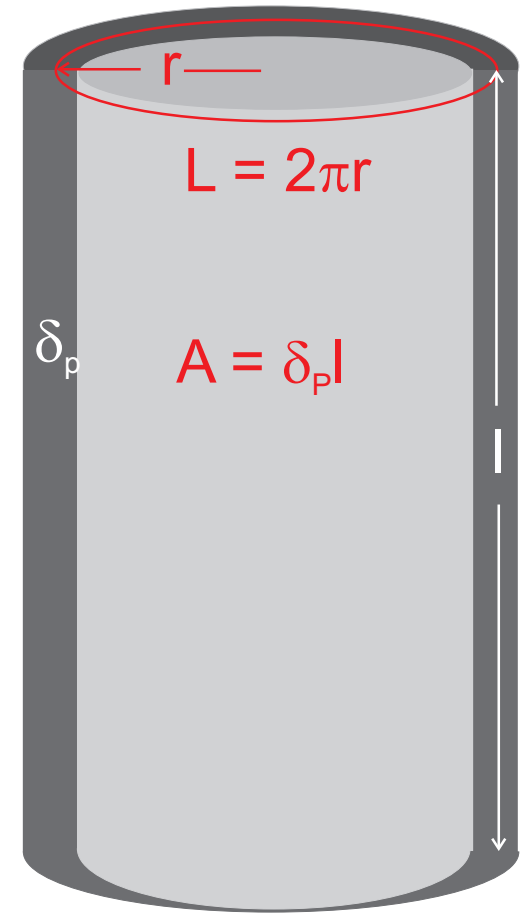
Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_P l$
- L der Länge des Strompfades \Rightarrow
 $L = 2\pi r$



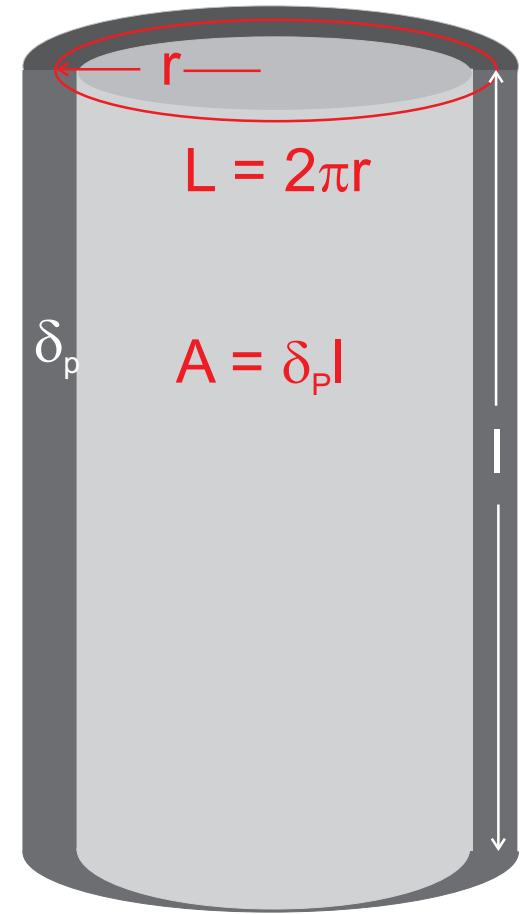
Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_p = jI\delta_p$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_p l$
- L der Länge des Strompfades \Rightarrow
 $L = 2\pi r$
- Plasmawiderstand: $R_p = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{L}{A} \right)$



Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_P l$
- L der Länge des Strompfades \Rightarrow
 $L = 2\pi r$
- Plasmawiderstand: $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A}$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P l}$



Plasmawiderstand und -impedanz

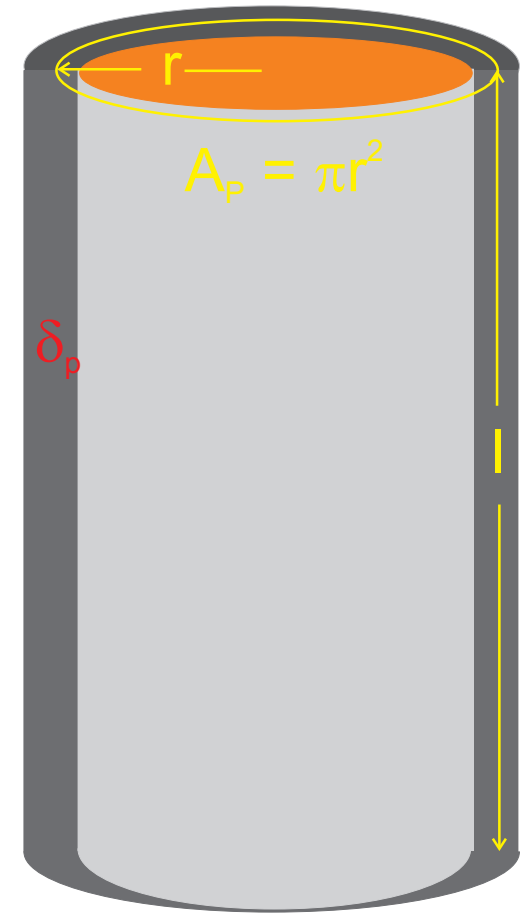
- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_P l$
- L der Länge des Strompfades \Rightarrow
 $L = 2\pi r$
- Plasmawiderstand: $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A}$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P l}$
- σ die DC-Leitfähigkeit: $\sigma = \frac{e_0^2 n}{m_e \nu_m}$



Plasmawiderstand und -impedanz

- Wirbelstrom im Plasma: $I_P = jI\delta_P$
- A die von ihm durchsetzte Fläche
 $\Rightarrow A = \delta_P l$
- L der Länge des Strompfades \Rightarrow
 $L = 2\pi r$
- Plasmawiderstand: $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A}$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P l}$
- σ die DC-Leitfähigkeit: $\sigma = \frac{e_0^2 n}{m_e \nu_m}$
- Magnetischer Fluß Φ im Zylinder:
 $\Phi = L_P I_P \wedge B_P A_P = \mu_0 \frac{I_P}{l} \pi r^2$

$$\Rightarrow L_P \approx \mu_0 \left(\frac{\pi r^2}{l} \right)$$



RF-Leistungseinkopplung I

Niedrige Plasmadichte

 $\delta_p > r$



RF-Leistungseinkopplung I

Niedrige Plasmadichte

- $\delta_p > r$

- $j \propto \frac{I_p}{A \equiv V/r}$



RF-Leistungseinkopplung I

Niedrige Plasmadichte

- $\delta_p > r$
- $j \propto \frac{I_p}{A=V/r}$
- $j \propto \frac{I_p}{r} n_p$



RF-Leistungseinkopplung I

Niedrige Plasmadichte

- $\delta_P > r$
- $j \propto \frac{I_P}{A=V/r}$
- $j \propto \frac{I_P}{r} n_P$
- $\sigma = \frac{e_0 n_P^2}{\nu_m m_e} \Rightarrow R_P \propto \frac{l}{A} \frac{1}{\sigma}$



RF-Leistungseinkopplung I

Niedrige Plasmadichte

- $\delta_P > r$
- $j \propto \frac{I_P}{A=V/r}$
- $j \propto \frac{I_P}{r} n_P$
- $\sigma = \frac{e_0 n_P^2}{\nu_m m_e} \Rightarrow R_P \propto \frac{1}{A} \frac{1}{\sigma}$
- Die eingekoppelte RF-Leistung ist

$$P = \frac{1}{2} R_P I_P^2$$

$$P \propto n_P$$



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_p < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_p < r$: Das elektrische Feld kann nur innerhalb der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_p^2$



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_p < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_p^2$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_p}$



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_p < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_p^2$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_p}$
- $\delta = \frac{1}{k} = \frac{c}{\sqrt{\omega_p^2 - \omega^2}}$



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_P < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_P^2$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P}$
- $\delta = \frac{1}{k} = \frac{c}{\sqrt{\omega_P^2 - \omega^2}}$
- $\delta \approx \frac{c}{\omega_P}$



RF-Leistungseinkopplung II

Hohe Plasmadichte

- $\delta_P < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_P^2$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P}$
- $\delta = \frac{1}{k} = \frac{c}{\sqrt{\omega_P^2 - \omega^2}}$
- $\delta \approx \frac{c}{\omega_P}$
- $\omega_P = \sqrt{\frac{e_0^2 n_P}{\epsilon_0 m_e}}$



RF-Leistungseinkopplung II

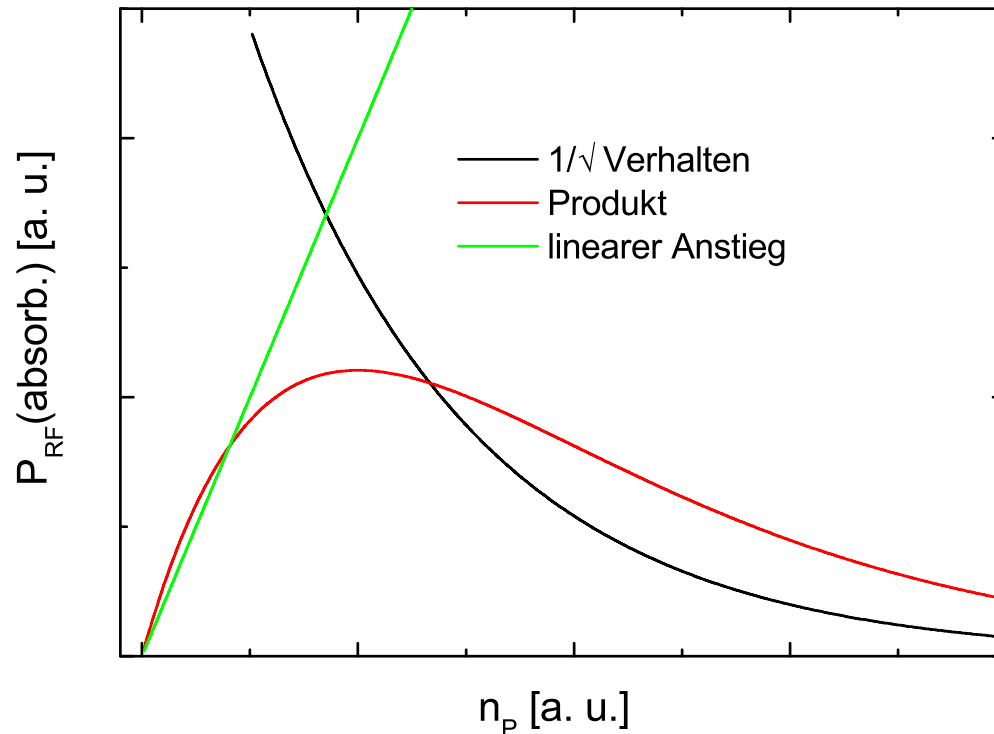
Hohe Plasmadichte

- $\delta_P < r$: Das elektrische Feld kann nur innert der Skintiefe ins Plasma eindringen.
- $P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} R_P I_P^2$
- $R_P = \frac{1}{\sigma} \frac{2\pi r}{\delta_P}$
- $\delta = \frac{1}{k} = \frac{c}{\sqrt{\omega_P^2 - \omega^2}}$
- $\delta \approx \frac{c}{\omega_P}$
- $\omega_P = \sqrt{\frac{e_0^2 n_P}{\epsilon_0 m_e}}$



$$P_{\text{abs}} \propto \frac{1}{\sqrt{n_P}}$$

RF-Leistungseinkopplung III



Bei niedrigen Plasmadichten ist die Skintiefe größer als der Durchmesser der Plasmasäule: linearer Anstieg. Zu höheren Plasmadichten begrenzt die Skinschicht die Feldeinkopplung.



Breakdown

- Einkoppeln geschieht durch ein dielektrisches Fenster, wodurch die Dicke der Randschicht sich erhöht.



Breakdown

- Einkoppeln geschieht durch ein dielektrisches Fenster, wodurch die Dicke der Randschicht sich erhöht.
- Beim Zünden ist diese Randschicht noch nicht da.



Breakdown

- Einkoppeln geschieht durch ein dielektrisches Fenster, wodurch die Dicke der Randschicht sich erhöht.
- Beim Zünden ist diese Randschicht noch nicht da.
- \Rightarrow der Spannungsabfall beträgt zwischen 1 – 2 kV.



Breakdown

- Einkoppeln geschieht durch ein dielektrisches Fenster, wodurch die Dicke der Randschicht sich erhöht.
- Beim Zünden ist diese Randschicht noch nicht da.
- \Rightarrow der Spannungsabfall beträgt zwischen 1 – 2 kV.
- CCP-Entladung: **E-Modus**

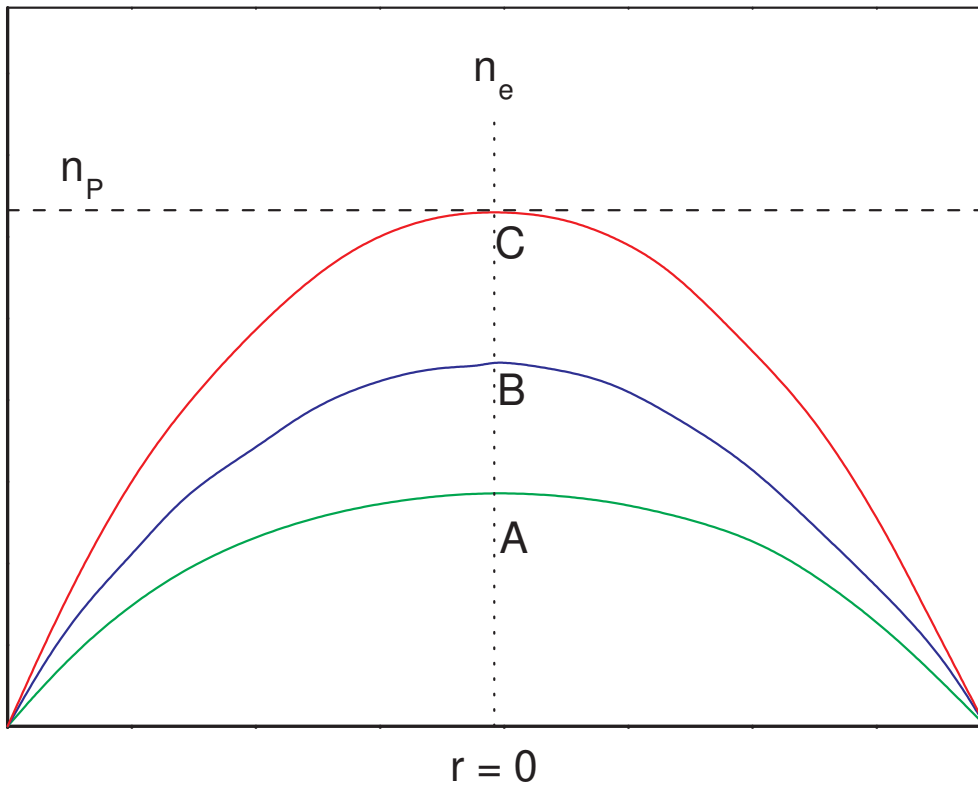


Breakdown

- Einkoppeln geschieht durch ein dielektrisches Fenster, wodurch die Dicke der Randschicht sich erhöht.
- Beim Zünden ist diese Randschicht noch nicht da.
- \Rightarrow der Spannungsabfall beträgt zwischen 1 – 2 kV.
- CCP-Entladung: **E-Modus**
- Nach der Zündung steigt n_e steil an: **H-Modus**.



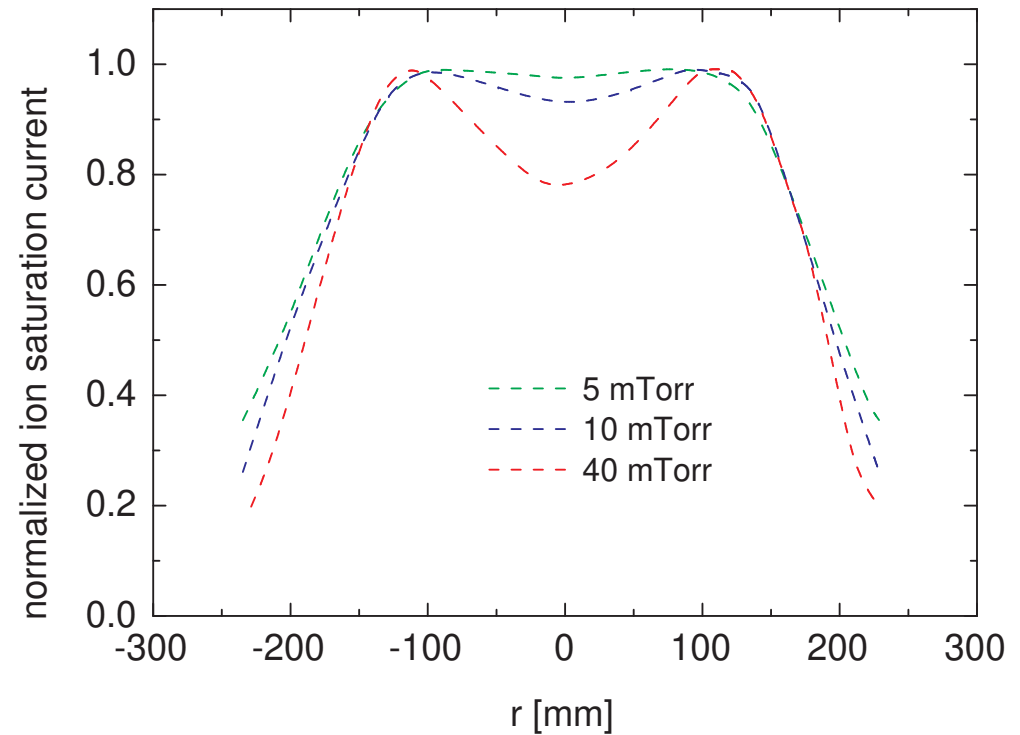
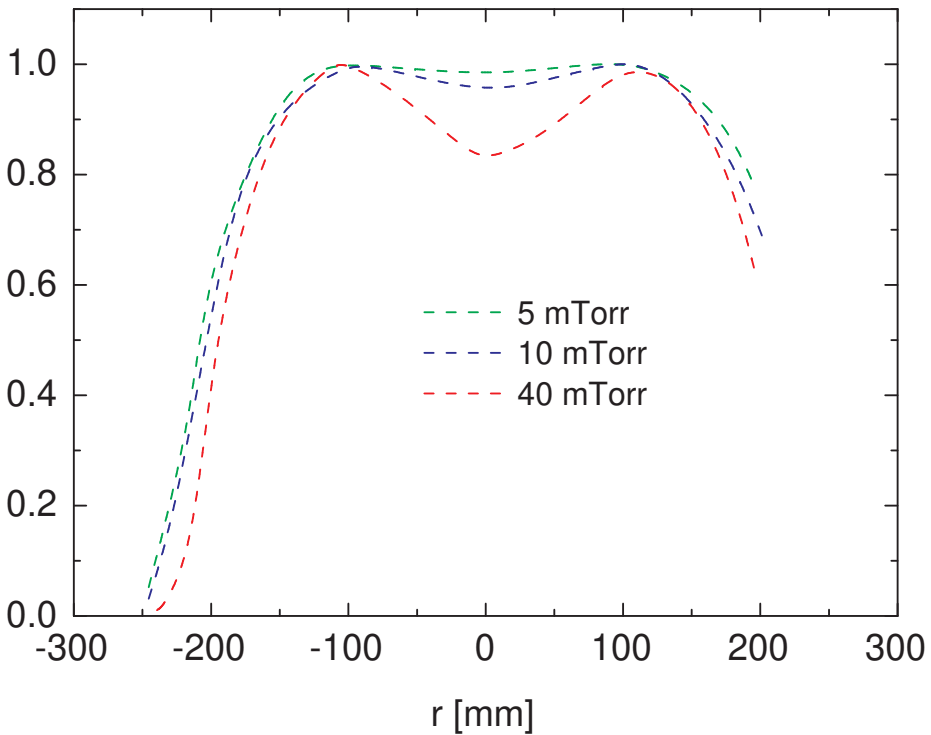
Radiale Uniformität I



Prinzipieller Verlauf der radialen Plasmadichte bei endlicher Skintiefe (S.C. BROWN, 1966).



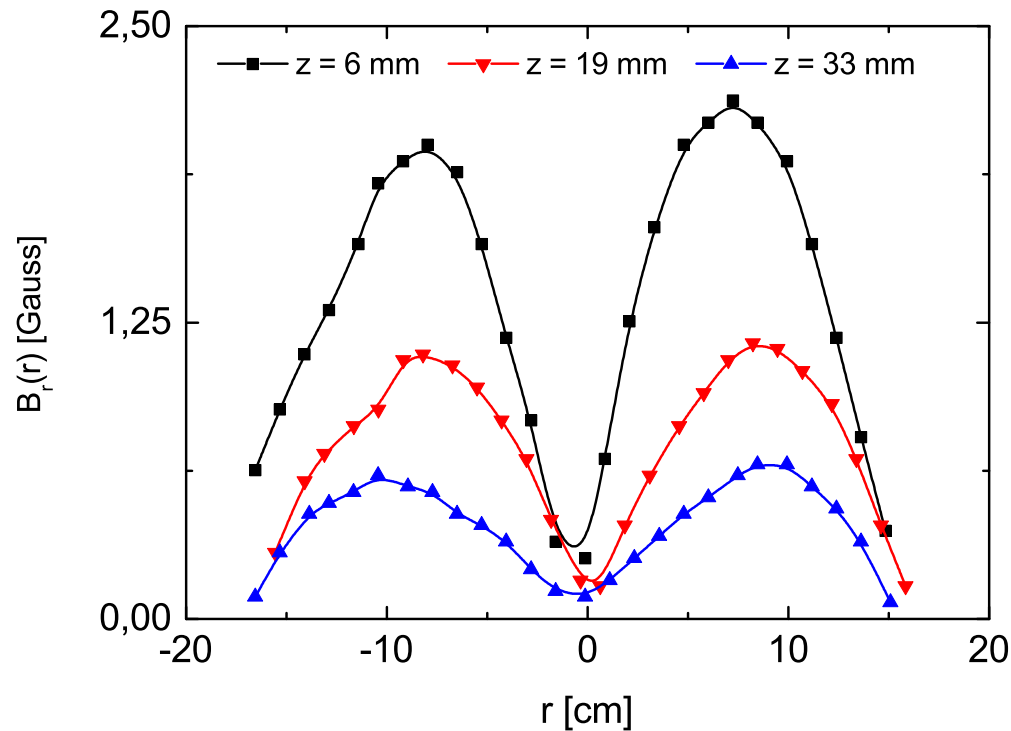
Radiale Uniformität II



Messungen (lks.) und Simulation (re.)
der radialen Plasmadichte bei
endlicher Skintiefe (COLLISON et al., 1998).



Radiale Uniformität III



Ar, 500 W ICP-Power, 5 mTorr
Radiale Variation von $B(r)$
3 unterschiedliche Abstände
unter dem dielektrischen Fenster
HOPWOOD et al., 1993.



Nachteile von ICP-Entladungen

- $n_{p,source} > n_{p,substrate}$; 1 – 2 Dekaden.



Nachteile von ICP-Entladungen

- $n_{p,source} > n_{p,substrate}$; 1 – 2 Dekaden.
- $n_p = n_p(r) \Rightarrow$ räumlich auflösende Verfahren?
B. Bai, H. Sawin; J. Vac. Sci. Technol. **A 22**, 2014 (2004).



Nachteile von ICP-Entladungen

- $n_{p,source} > n_{p,substrate}$; 1 – 2 Dekaden.
- $n_p = n_p(r) \Rightarrow$ räumlich auflösende Verfahren?
B. Bai, H. Sawin; J. Vac. Sci. Technol. **A 22**, 2014 (2004).
- endliche Skintiefe, die n_p nach oben begrenzt.



Nachteile von ICP-Entladungen

- $n_{p,source} > n_{p,substrate}$; 1 – 2 Dekaden.
- $n_p = n_p(r) \Rightarrow$ räumlich auflösende Verfahren?
B. Bai, H. Sawin; J. Vac. Sci. Technol. **A 22**, 2014 (2004).
- endliche Skintiefe, die n_p nach oben begrenzt.
- zusätzliches Potential (über die POISSON-Gl.,
unschädlich, solange es nur radialer Natur ist):

$$n_p \propto n_n \propto T_n$$

$$V = \frac{k_B T_e}{e_0} \ln \left(\frac{n}{n_p} \right)$$



M.A. LIEBERMAN, AND A.J. LICHTENBERG: *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, J. WILEY, NEW YORK, N.Y., 1994

CCP vs. ICP I

- Bei CCP werden die Elektronen durch die „atmende“ Randschicht der heißen Elektrode geheizt und senkrecht von der Elektrode in einer Halbwelle wegbeschleunigt. Je höher das DC-Bias, um so heißer die Elektronen.



CCP vs. ICP I

- Bei CCP werden die Elektronen durch die „atmende“ Randschicht der heißen Elektrode geheizt und senkrecht von der Elektrode in einer Halbwelle wegbeschleunigt. Je höher das DC-Bias, um so heißer die Elektronen.
- Bei ICP steht das induzierte E-Feld parallel zur Oberfläche der Plasmaquelle, die Beschleunigung findet zweimal pro Zyklus statt.



CCP vs. ICP I

- Bei CCP werden die Elektronen durch die „atmende“ Randschicht der heißen Elektrode geheizt und senkrecht von der Elektrode in einer Halbwelle wegbeschleunigt. Je höher das DC-Bias, um so heißer die Elektronen.
- Bei ICP steht das induzierte E-Feld parallel zur Oberfläche der Plasmaquelle, die Beschleunigung findet zweimal pro Zyklus statt.
- T_e bestimmt die Ionisation und damit die Plasmadichte. Bei CCP wird gleichzeitig die Ionenenergie bestimmt.
 n_p und E_{ion} sind nicht unabhängig voneinander.



CCP vs. ICP I

- Bei CCP werden die Elektronen durch die „atmende“ Randschicht der heißen Elektrode geheizt und senkrecht von der Elektrode in einer Halbwelle wegbeschleunigt. Je höher das DC-Bias, um so heißer die Elektronen.
- Bei ICP steht das induzierte E-Feld parallel zur Oberfläche der Plasmaquelle, die Beschleunigung findet zweimal pro Zyklus statt.
- T_e bestimmt die Ionisation und damit die Plasmadichte. Bei CCP wird gleichzeitig die Ionenenergie bestimmt. n_p und E_{ion} sind nicht unabhängig voneinander.
- Bei ICP wird E_{ion} über das DC-Bias der heißen Elektrode separat von n_p eingestellt.



CCP vs. ICP II

- Für eine hohe Ätzrate, also hohe Ionendichte, muß im CCP-Fall das DC-Bias erhöht werden. Dadurch erhöht sich ebenfalls die Ätzrate über den Sputtereffekt.
Damit sind aber erhöhte Strahlenschäden verbunden.



CCP vs. ICP II

- Für eine hohe Ätzrate, also hohe Ionendichte, muß im CCP-Fall das DC-Bias erhöht werden. Dadurch erhöht sich ebenfalls die Ätzrate über den Sputtereffekt.
Damit sind aber erhöhte Strahlenschäden verbunden.
- Im ICP-Fall kann die Ionendichte über eine hohe ICP-Leistung erreicht werden. Bei niedrigem DC-Bias sind moderate Ätzraten einstellbar — ohne Damage.
Meist müssen die Ätzraten ohnehin durch Zugabe eines Moderators abgeschwächt werden!



CCP vs. ICP II

- Für eine hohe Ätzrate, also hohe Ionendichte, muß im CCP-Fall das DC-Bias erhöht werden. Dadurch erhöht sich ebenfalls die Ätzrate über den Sputtereffekt.
Damit sind aber erhöhte Strahlenschäden verbunden.
- Im ICP-Fall kann die Ionendichte über eine hohe ICP-Leistung erreicht werden. Bei niedrigem DC-Bias sind moderate Ätzraten einstellbar — ohne Damage.
Meist müssen die Ätzraten ohnehin durch Zugabe eines Moderators abgeschwächt werden!
- Bei ICP steht das induzierte E-Feld parallel zur Oberfläche der Plasmaquelle, die Beschleunigung findet zweimal pro Zyklus statt.



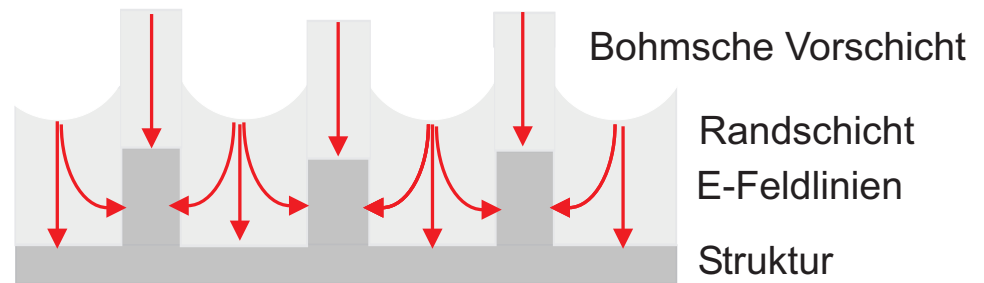
CCP vs. ICP II

- Für eine hohe Ätzrate, also hohe Ionendichte, muß im CCP-Fall das DC-Bias erhöht werden. Dadurch erhöht sich ebenfalls die Ätzrate über den Sputtereffekt.
Damit sind aber erhöhte Strahlenschäden verbunden.
- Im ICP-Fall kann die Ionendichte über eine hohe ICP-Leistung erreicht werden. Bei niedrigem DC-Bias sind moderate Ätzraten einstellbar — ohne Damage.
Meist müssen die Ätzraten ohnehin durch Zugabe eines Moderators abgeschwächt werden!
- Bei ICP steht das induzierte E-Feld parallel zur Oberfläche der Plasmaquelle, die Beschleunigung findet zweimal pro Zyklus statt.



Die Randschichten sind unterschiedlich dick, 100 μm in ICP, 10 mm in CCP.

CCP vs. ICP III



Die Randschichten sind unterschiedlich dick,
10 mm in CCP, 100 μm in ICP.



CCP vs. ICP IV

	CCP	ICP
Eigenschaft		
Anregung	E	B
Richtung d. elektr. Feldes	⊥ zur Elektrode	zur Elektrode
n_e [cm ⁻³]	≤ 10 ¹⁰	≤ 10 ¹²
$\mathcal{E}\mathcal{E}D\mathcal{F}$	Non-MAXWELLian	Oft MAXWELLian
T_e [eV]	2 – 8	2 – 8
Schichtdicke [mm]	1 – 15	0.05 – 1
Aufheizung	OHMSch, Stochastisch	OHMSch
Obere Anregungsgrenze	ionische Aufheizung	Skineneffekt

