



Kinetic Effects in RF Discharges

Philipp Hacker

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Physik

Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

4. Dezember 2017

Betreuer: Prof. Dr. R. Schneider

Gutachter: Prof. Dr. J. Meichsner



1. Motivation

2. Experiment

3. Particle-in-Cell Methode

4. 1D Simulation

5. Simulationen in 2D

6. Ausblick

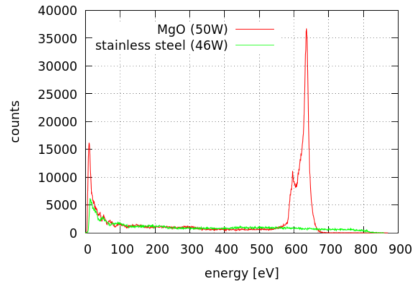
Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

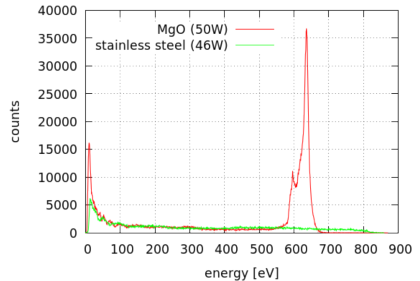
Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

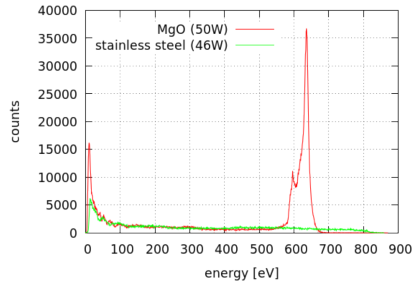
Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



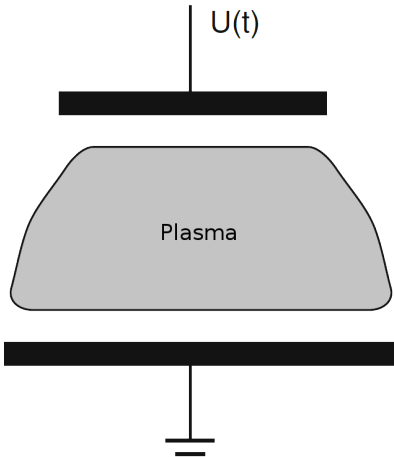
Wissen
lockt.
Seit 1456

- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

Randschichteffekte



(Schema einer Entladung) [1]

- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias

- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt

$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$

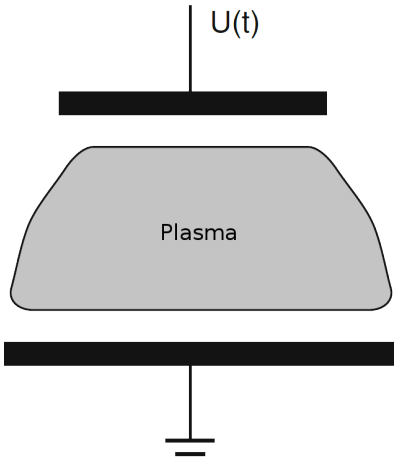
- Asymmetrie der getriebenen/geerdten Elektroden

Randschichteffekte

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



(Schema einer Entladung) [1]

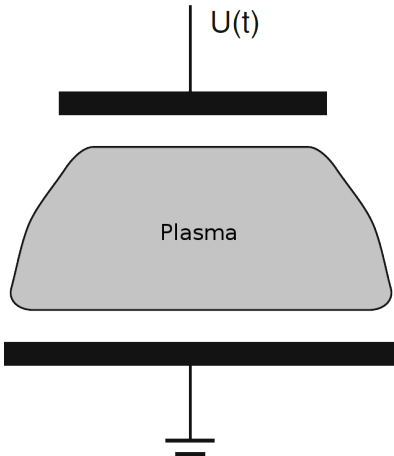
- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias

- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt

$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$

- Asymmetrie der getriebenen/geerdeten Elektroden

Randschichteffekte



(Schema einer Entladung) [1]

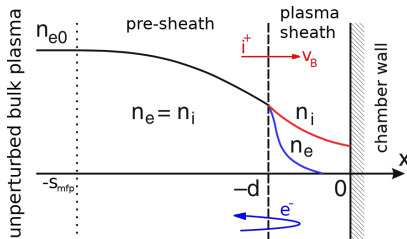
- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias
- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt
$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$
- Asymmetrie der getriebenen/geerdten Elektroden

Randschichteffekte

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



(Dichte und Potential vor einer Wand) [1]

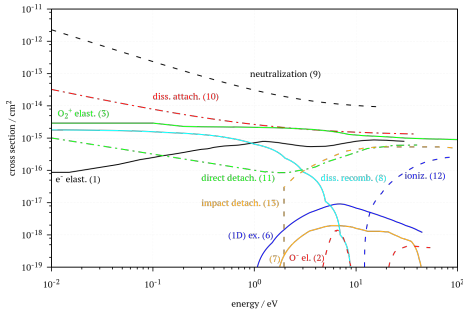
- ...
- Kapazitive Kopplung führt zur Verschiebung des Plasma-Potentials

Oberflächen- und Stoßprozesse

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Nr.	Reaction	Type
Electron and ion reactions		
(8)	$e^- + O_2^+ \rightarrow 2O$	Creation and loss
(9)	$O^- + O_2^+ \rightarrow O_2 + O$	Dissociative recombination
(10)	$e^- + O_2 \rightarrow O + O^-$	Neutralization
(11)	$O^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + e$	Dissociative attachment
(12)	$e^- + O_2 \rightarrow 2e^- + O_2^+$	Direct detachment
(13)	$e^- + O^- \rightarrow O + 2e^-$	Impact ionisation
		Impact detachment

(ausgewählte Stoßquerschnitte in Sauerstoff)

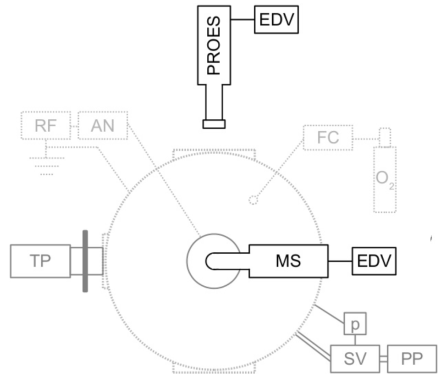
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



(Draufsicht des Experimentes) [2]

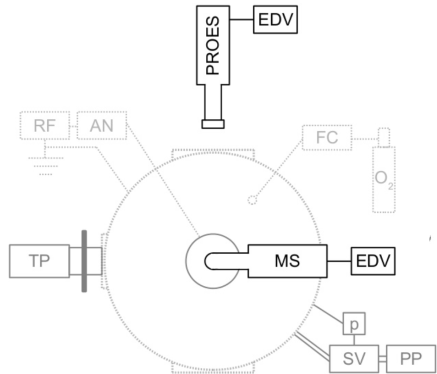
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



(Draufsicht des Experimentes) [2]

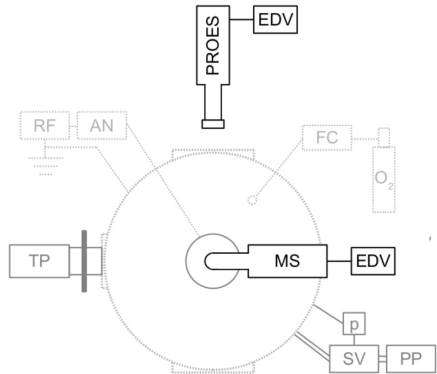
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD

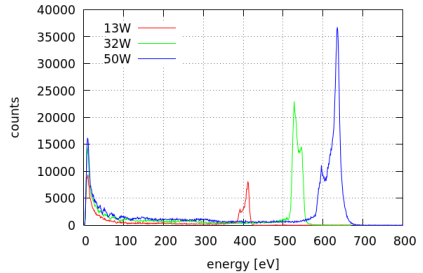
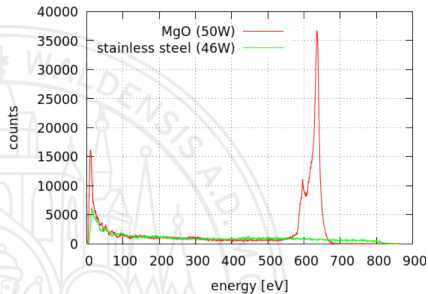


Wissen
lockt.
Seit 1456

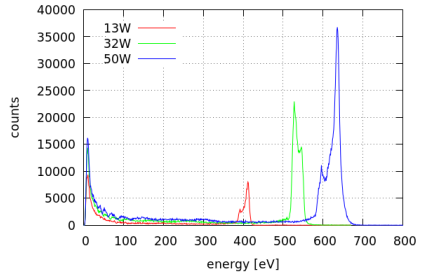
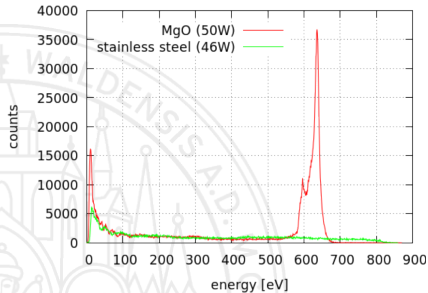
- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



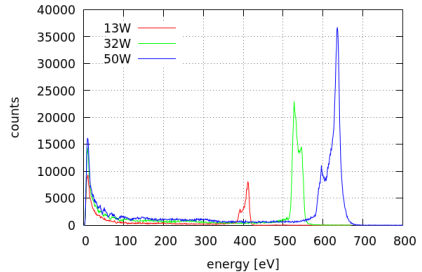
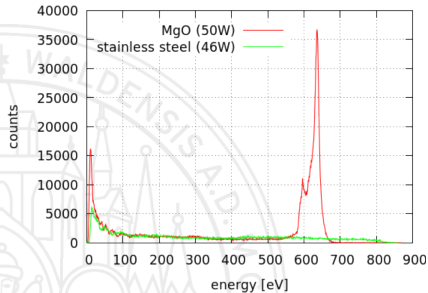
(Draufsicht des Experimentes) [2]



Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung und Material
⇒ Anionen von der Elektrode?



Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung und Material
⇒ Anionen von der Elektrode?

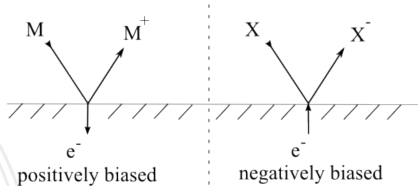


Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung und Material
⇒ Anionen von der Elektrode?

"vacuum"

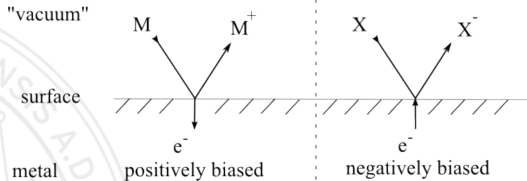
surface

metal



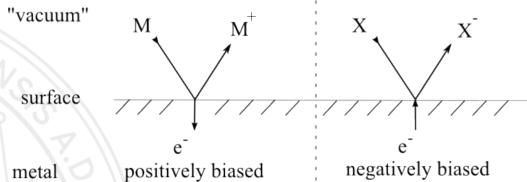
Saha-Langmuir Gleichung:

Ionisation hängt von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie, Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen Koeffizienten des Materials ab



Saha-Langmuir Gleichung:

Ionisation hängt von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie, Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen Koeffizienten des Materials ab



Saha-Langmuir Gleichung:

~~Ionisation hängt von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie,
Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen
Koeffizienten des Materials ab~~

Particle-in-Cell Methode

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



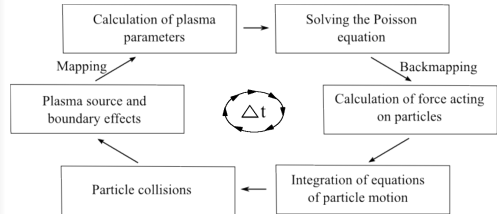
Wissen
lockt.
Seit 1456

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = - \frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$



Particle-in-Cell Methode

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



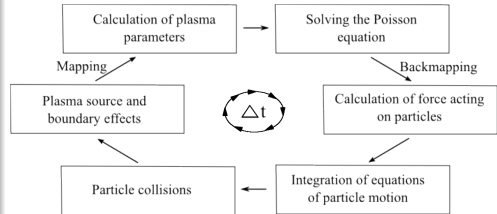
Wissen
lockt.
Seit 1456

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$



Particle-in-Cell Methode

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



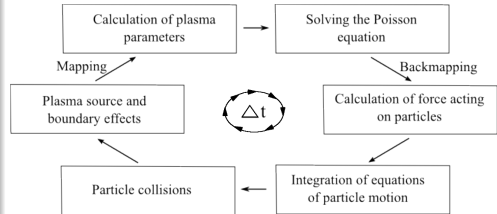
Wissen
lockt.
Seit 1456

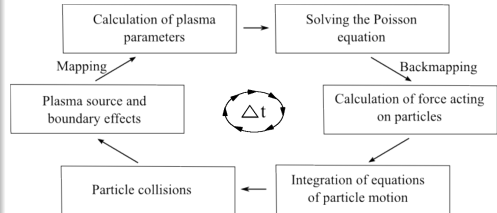
$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$





Particle-in-Cell Methode

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



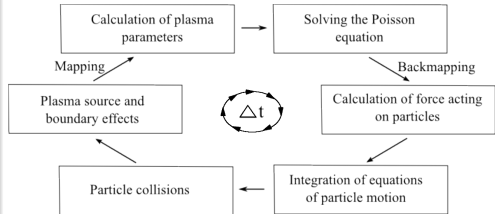
Wissen
lockt.
Seit 1456

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$

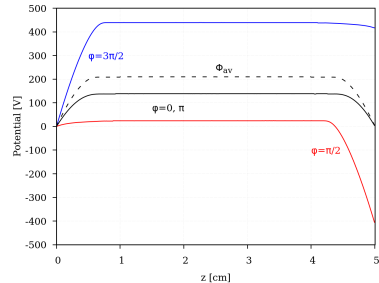
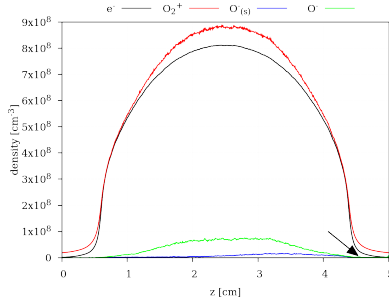


1D Simulation

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



(Entladung bei 5 Pa und 400 V)

Dichte und phasenaufgelöstes Potential in 1D mit Injektion negativer Ionen von der Kathode

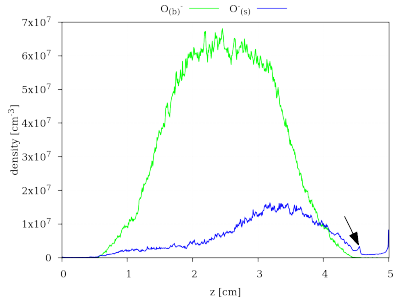
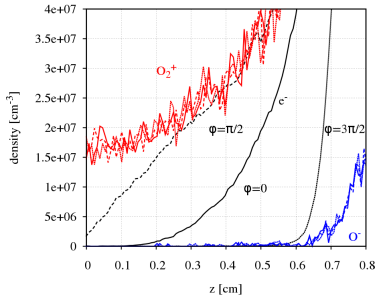
$$\Rightarrow \eta = I(O^-)/I(O_2) = 0,03$$

1D Simulation

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



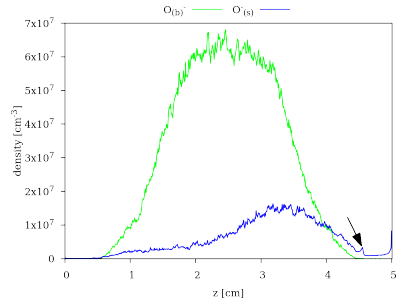
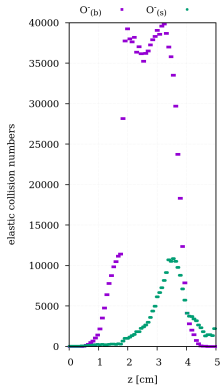
Wissen
lockt.
Seit 1456



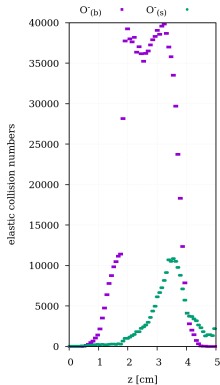
(Entladung bei 5 Pa und 400 V)

Dichte und phasenaufgelöstes Potential in 1D mit Injektion negativer Ionen von der Kathode

$$\Rightarrow \eta = I(\text{O}^-)/I(\text{O}_2) = 0,03$$



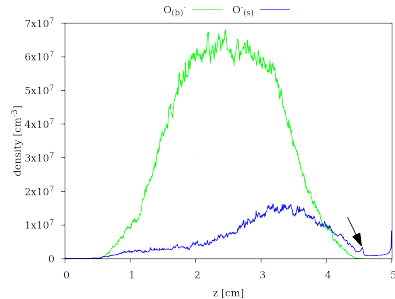
⇒ Schicht nicht vollständig stoßlos
 Dynamik der schnellen negativen Ionen von der
 gegenüberliegenden Elektrode stark durch elastische Stöße mit O_2
 beeinflusst



ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



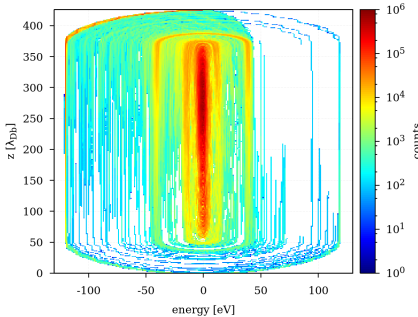
Wissen
lockt.
Seit 1456



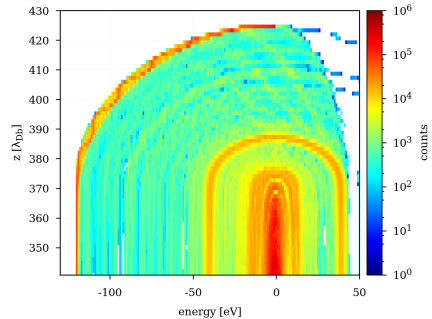
⇒ Schicht nicht vollständig stoßlos
Dynamik der schnellen negativen Ionen von der
gegenueberliegenden Elektrode stark durch elastische Stöße mit O_2
beeinflusst



Dynamik negativer Ionen



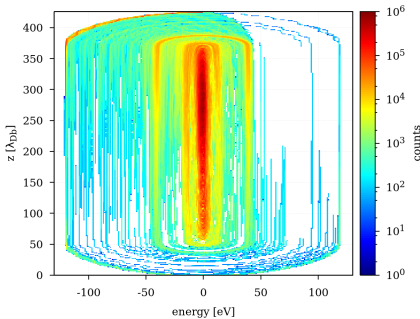
(Energieverteilung der negativen Ionen von der Oberfläche)



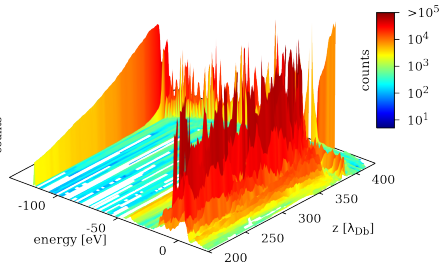
(Anodenbereich der EVF von O^-)

hochenergetische Struktur bei ~ 100 eV vor Anode, abnehmend zur Kathode mit mittlerer freien Weglänge der O^-

Dynamik negativer Ionen



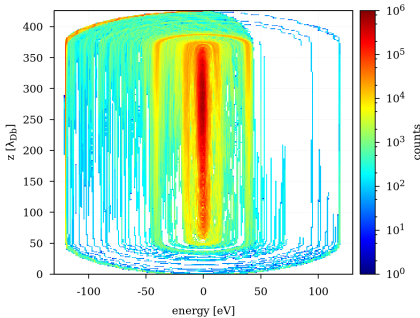
(Energieverteilung der negativen Ionen von der Oberfläche)



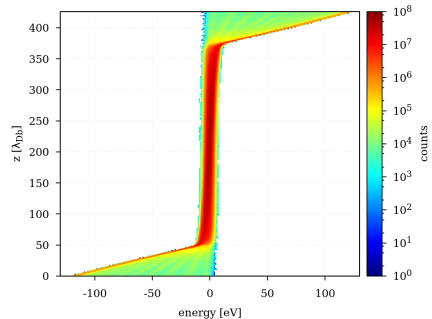
(Surfaceplot der O^- EVF)

hochenergetische Struktur bei ~ 100 eV vor Anode, abnehmend zur Kathode mit mittlerer freien Weglänge der O^-

Dynamik negativer Ionen



(Energieverteilung der negativen Ionen von der Oberfläche)

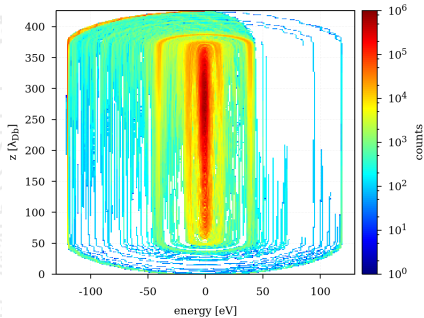


(EVF der O_2^+ Ionen)

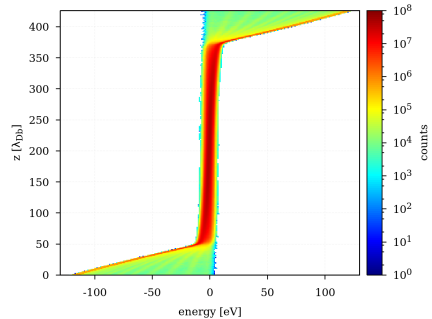
langsame Ionen im Bulk der Entladung

→ schnelle O^- abgebremst und kehren in Randschicht um

Dynamik negativer Ionen



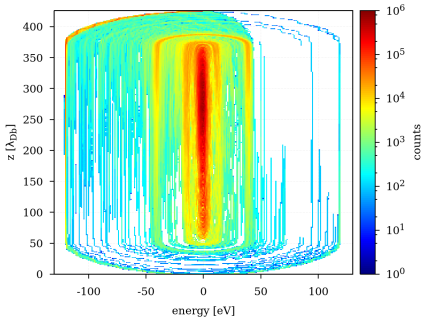
(Energieverteilung der negativen Ionen von der Oberfläche)



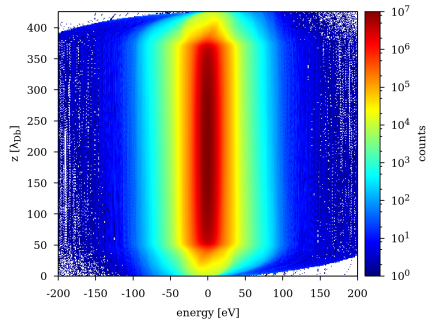
(EVF der O_2^+ Ionen)

Struktur über großen Energiebereich vor den Elektroden?

Dynamik negativer Ionen



(Energieverteilung der negativen Ionen von der Oberfläche)



(EVF der Elektronen)

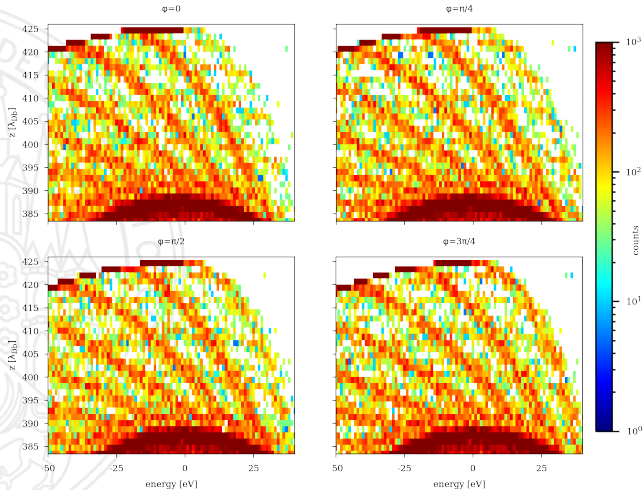
Struktur über großen Energiebereich vor den Elektroden?
bei Elektronen keine sichtbar!

Dynamik negativer Ionen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD

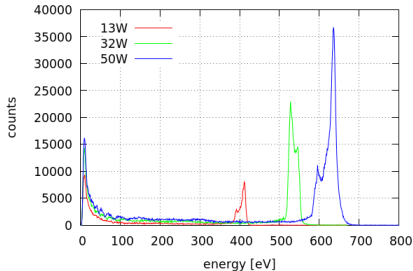


Wissen
lockt.
Seit 1456

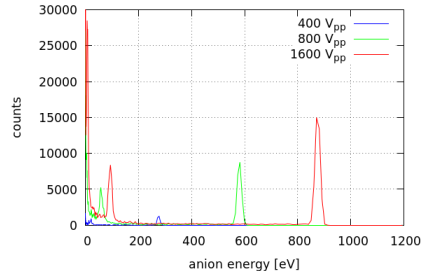


(Phasenaufgelöster Anodenbereich der O^-)

Experiment-Vergleich

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALDWissen
lockt.
Seit 1456

(Experiment)



(Simulation)

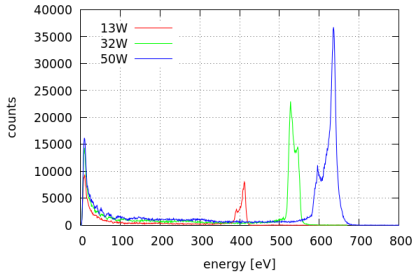
- bisher: Vermutung für hochenergetische Struktur in O^- EVF im Vergleich zu Experiment bestätigt

Experiment-Vergleich

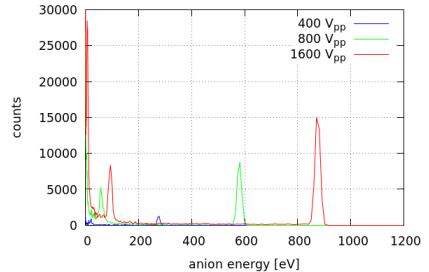
ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



(Experiment)



(Simulation)

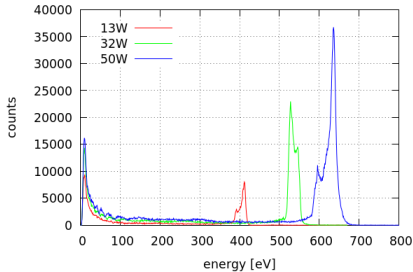
- Spannungsvariation zeigt Abhängigkeit der Energieverteilung der Oberflächenprozesse

Experiment-Vergleich

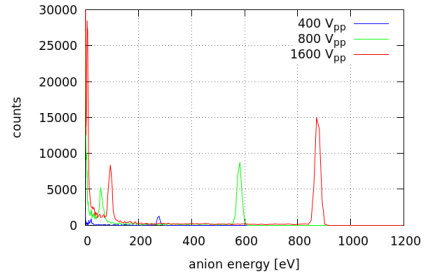
ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



(Experiment)



(Simulation)

- niederenergetische Struktur nicht in Experiment zu finden

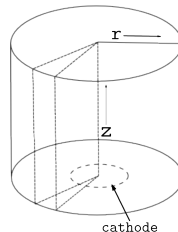
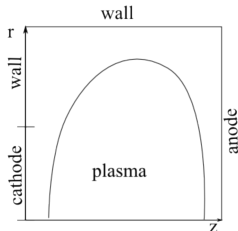
Simulationen in 2D

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

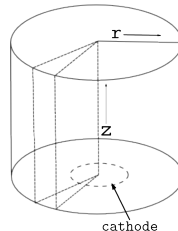
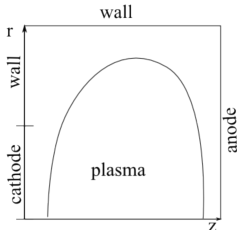
- Annahme einer zylinder-symmetrische Entladung um Mitte der Elektrode
- jetzt: verschiedene Kombinationen von Randbedingungen, zBsp. Dielektrika
- viel größerer numerischer Aufwand



Simulationen in 2D

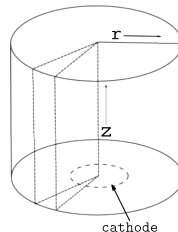
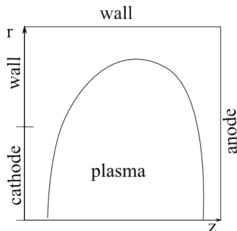


- Annahme einer zylinder-symmetrische Entladung um Mitte der Elektrode
- jetzt: verschiedene Kombinationen von Randbedingungen, zBsp. Dielektrika
- viel größerer numerischer Aufwand



Simulationen in 2D

- Annahme einer zylinder-symmetrische Entladung um Mitte der Elektrode
- jetzt: verschiedene Kombinationen von Randbedingungen, zBsp. Dielektrika
- viel größerer numerischer Aufwand



Vergleich mit 1D

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Negative Ionen EVF

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Asymmetrische Ranbedingungen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Einfluss des Self Bias

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Ausblick

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Referenzen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



A. Piel. „Plasma Physics - An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas“. In: (2010), pp. 170 ff., 338 ff.



S. Scheuer. „Plasmadiagnostische Untersuchungen zur Charakterisierung von Moden in elektronegativen RF-Plasmen“. In: *Master thesis* (2015).