

# Modellierung von dielektrisch behinderten Atmosphärendruck- entladungen in Argon und Ar-HMDSO-Gasgemischen

---

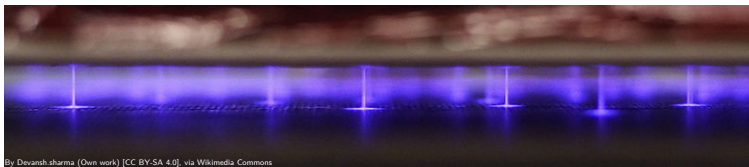


M. Becker, D. Loffhagen

5. März 2015

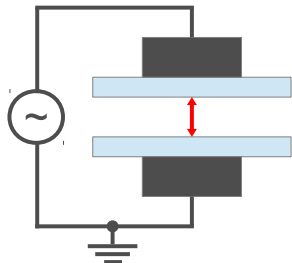
**DFG**

- 1 Motivation
- 2 Modellansatz
- 3 Asymmetrische DBE in Argon
- 4 Symmetrische DBE mit Beimischungen von HMDSO
- 5 Zusammenfassung



- Dielektrisch behinderte Entladungen (DBE) werden in vielen technischen Anwendungen genutzt, z. B.
  - Oberflächenbehandlung
  - Ozonerzeugung
- Verständnis grundlegender Prozesse und Einflussfaktoren ermöglicht Optimierung von Plasmaquellen.
- Fluid-Modellierung hat sich als nützliches Werkzeug zur theoretischen Analyse von Barrierentladungen bewährt.

Zeitabhängige, räumlich eindimensionale Beschreibung von Barrierenentladungen [1]

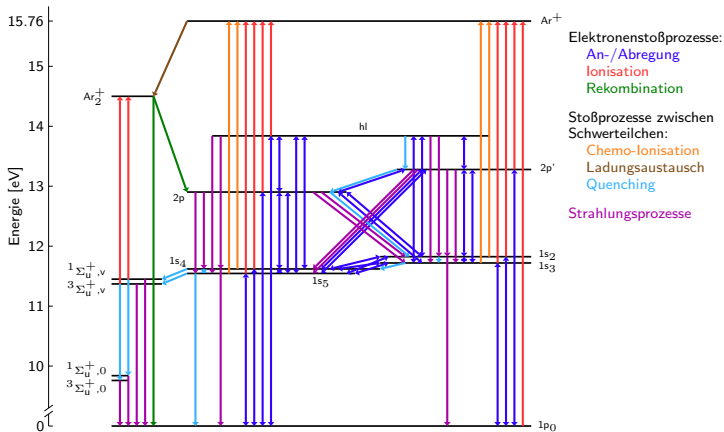


- umfassendes reaktionskinetisches Argonmodell mit 15 Spezies und 110 Reaktionen [1]
- vereinfachte Beschreibung von Hexamethyldisiloxan (HMDSO) Beimischungen

[1] M. M. Becker et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **46** (2013) 355203

Spezies:

- Ar[1p<sub>0</sub>] und 11 angeregte Zustände
- Ar<sup>+</sup>- und Ar<sub>2</sub><sup>+</sup>-Ionen sowie Elektronen

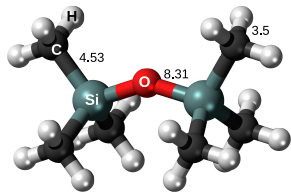


## Anwendungen

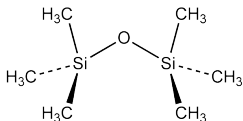
- Herstellung siliziumhaltiger Funktionsschichten mittels Plasmapolymerisation (PE-CVD)
- Lösungsmittel mit niedriger Oberflächenspannung

## Eigenschaften

- Flüchtige farblose Flüssigkeit mit charakteristischem Geruch
- Strukturformel:  $(\text{CH}_3)_3\text{SiOSi}(\text{CH}_3)_3$
- Aggregatzustand: flüssig
- Masse: 162.38 u
- Dichte:  $0.76 \text{ g/cm}^3$
- Dampfdruck: 42 hPa @ 293 K



Molekülstruktur von HMDSO  
mit Bindungsenergien in eV



PMDSI <sup>+</sup> :	Pentamethyldisiloxanyl-Ion	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> SiOSi <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
TMSoxy:	Trimethylsiloxy	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> SiO
TMSI:	Trimethylsilyl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Si
DMSIen:	Dimethylsilylen	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Si

## Elektronenstoßionisation



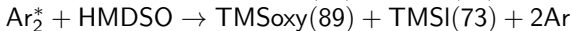
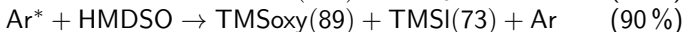
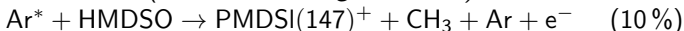
## Elektron-Ion-Rekombination



## Ionen-Molekül-Reaktionen



## Neutralteilchenkinetik (inklusive Penning-Ionisation)



- Kontinuitätsgleichungen

$$\partial_t n_j + \partial_x \Gamma_j = S_j$$

- Energiebilanzgleichung für die Elektronen

$$\partial_t w_e + \partial_x Q_e = -e_0 \Gamma_e E + \tilde{S}_e, \quad w_e = \bar{\epsilon} n_e$$

- Poisson-Gleichung für das elektrische Potenzial

$$-\varepsilon_0 \partial_x^2 \Phi = \sum_j q_j n_j, \quad E = -\partial_x \Phi$$

- Akkumulation von Oberflächenladungen

$$\partial_t \sigma = \sum_j q_j \Gamma_j \cdot \vec{\nu}_j$$

- Drift-Diffusionsnäherung für Stromdichten  $\Gamma_j$  und  $Q_e$



- Stromdichte der Schwerteilchen

$$\Gamma_j = -\partial_x(D_j n_j) + \text{sgn}(q_j) b_j E n_j$$

- Neuartige Drift-Diffusionsnäherung für Teilchen- und Energiestromdichte der Elektronen abgeleitet aus 4-Momenten-Modell [1,2]

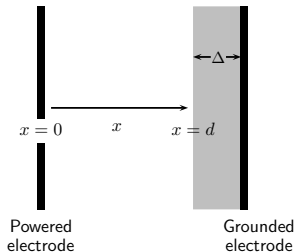
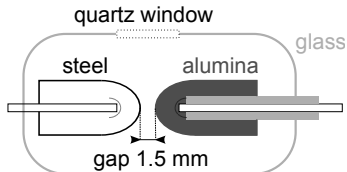
$$\Gamma_e = -\frac{1}{\nu_e} \partial_x \left( \left( \frac{2\bar{\epsilon}}{3m_e} + \hat{\xi}_2 \right) n_e \right) - \frac{e_0}{m_e \nu_e} E n_e$$

$$Q_e = -\frac{1}{\tilde{\nu}_e} \partial_x \left( (\tilde{\xi}_0 + \tilde{\xi}_2) n_e \right) - \frac{e_0}{\tilde{\nu}_e} \left( \frac{5}{3} \frac{\bar{\epsilon}}{m_e} + \hat{\xi}_2 \right) E n_e$$

[1] M. M. Becker und D. Loffhagen, *AIP Advances* **3** (2013) 012108

[2] M. M. Becker und D. Loffhagen, *Adv. Pure Math.* **3** (2013) 343–352

- Gas: Argon, Gasdruck  $p = 1 \text{ atm}$
- Gastemperatur  $T_{\text{gas}} = 300 \text{ K}$
- Spaltbreite  $d = 1.5 \text{ mm}$
- Dielektrikum:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\epsilon_r = 10$ , Dicke  $\Delta = 0.5 \text{ mm}$
- Sinusförmige Versorgungsspannung mit Frequenz  $f = 60 \text{ kHz}$

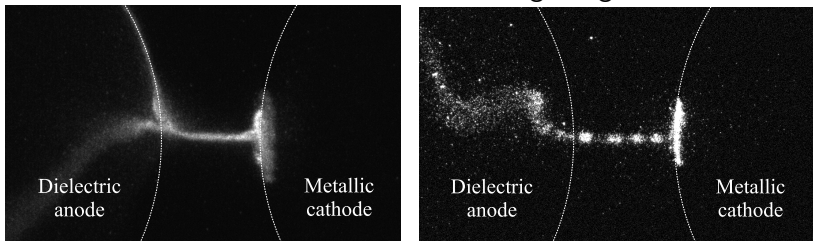


T. Hoder et al., *Phys. Rev. E* **84** (2011) 46404

M. M. Becker et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 355203

M. Becker, DPG-Frühjahrstagung, 5. März 2015, Bochum

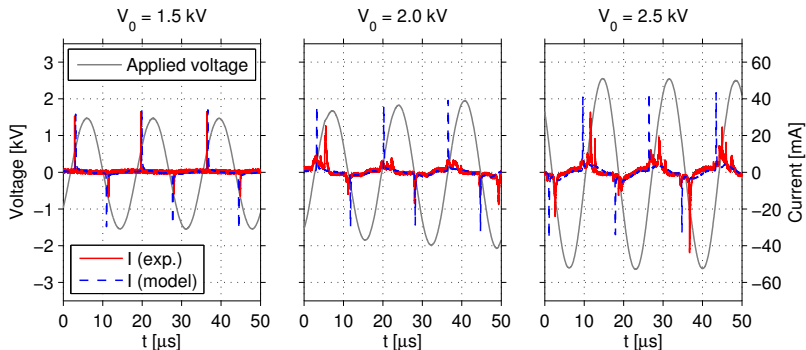
## ICCD-Bilder einzelner Entladungsereignisse



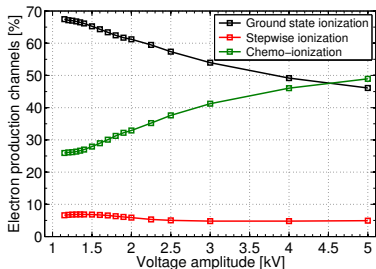
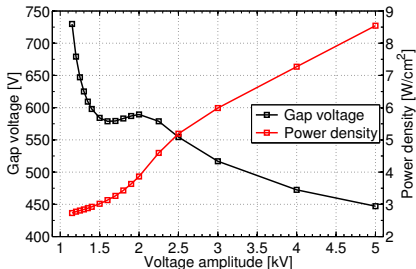
- Entladungen mit homogenem und mit geschichtetem Entladungskanal werden beobachtet.

T. Hoder et al., *Phys. Rev. E* **84** (2011) 46404

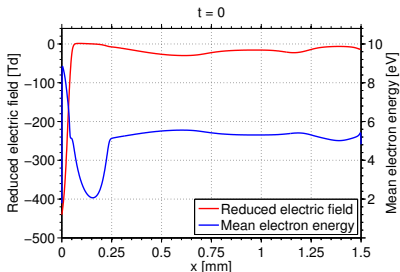
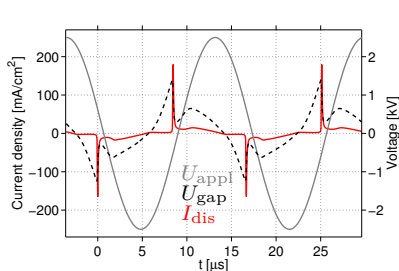
M. M. Becker et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 355203



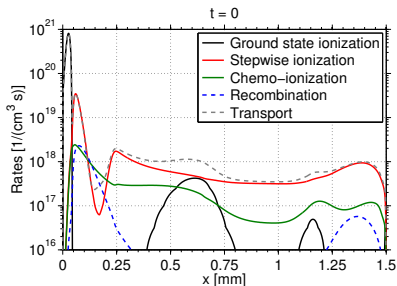
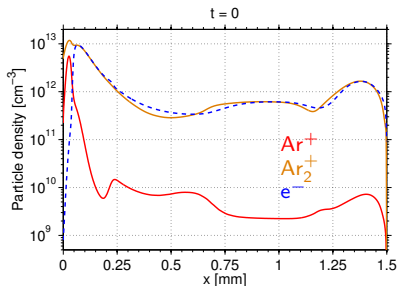
- Deutliche Änderung des Stromverlaufs bei  $V_0 = 2$  kV.
- Gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Entladungsstrom.



- Modenübergang bei 1.5–2 kV maßgeblich mitbeeinflusst durch steigenden Beitrag von Chemo-Ionisationsprozessen.

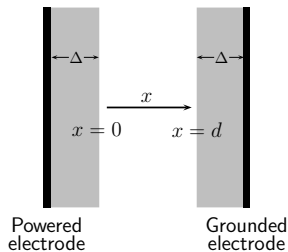


- Zum Zeitpunkt des maximalen Stroms zeigen mittlere Elektronenenergie und elektrisches Feld deutliche Inhomogenitäten im Entladungskanal.



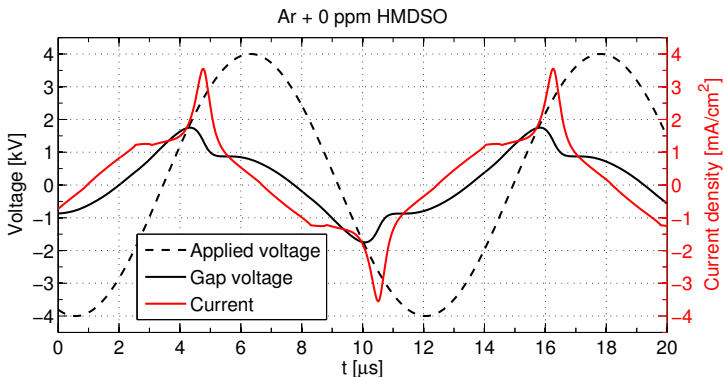
- Inhomogenitäten im Entladungskanal werden verursacht durch Ungleichgewicht der unterschiedlichen Ionisationsprozesse.

- Spaltbreite  $d = 1 \text{ mm}$
- Dielektrika: Glas,  $\epsilon_r = 4.6$ , Dicke  $\Delta = 2 \text{ mm}$
- Sinusförmige Versorgungsspannung:
  - Amplitude  $V_0 = 4 \text{ kV}$
  - Frequenz  $f = 87 \text{ kHz}$
- Gasmischung:
  - Argon + 0...220 ppm HMDSO
  - Gasdruck  $p = 1 \text{ atm}$
- Gastemperatur  $T_{\text{gas}} = 300 \text{ K}$

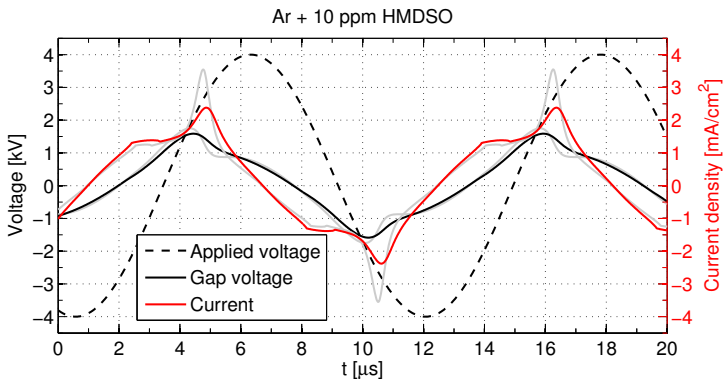


Untersuchungen in Kooperation mit Prof. C.-P. Klages, TU Braunschweig

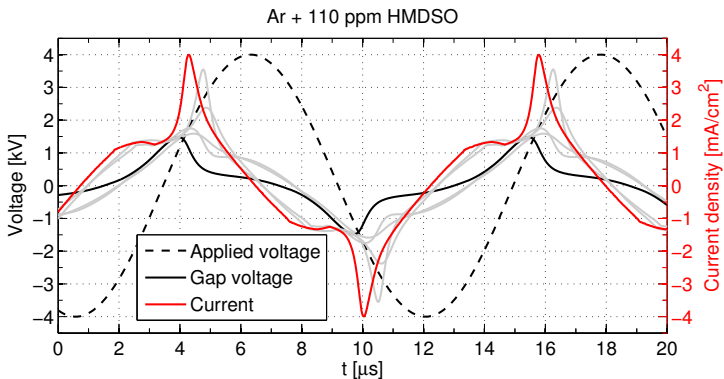




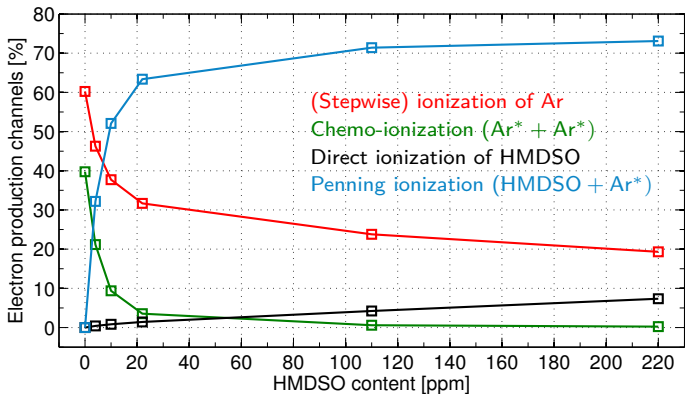
- Schwach ausgeprägte Stromspitzen mit zeitlich ausgedehntem Stromfluss  $\Rightarrow$  glow/Townsend-artiger Entladungsmodus



- Signifikanter Einfluss geringer Beimischungen von HMDSO auf Verlauf von Entladungsstrom und -spannung.



- Signifikanter Einfluss geringer Beimischungen von HMDSO auf Verlauf von Entladungsstrom und -spannung.



- Unmittelbare Beeinflussung der Ionisationsprozesse durch Beimischung von HMDSO von wenigen ppm.
- Penning-Ionisation von HMDSO dominiert bei HMDSO-Gehalt  $> 10$  ppm.

Ar<sup>+</sup>

Ar<sub>2</sub><sup>+</sup>

PMDSI<sup>+</sup>

e<sup>-</sup>

Ar<sup>(\*)</sup> + e<sup>-</sup>

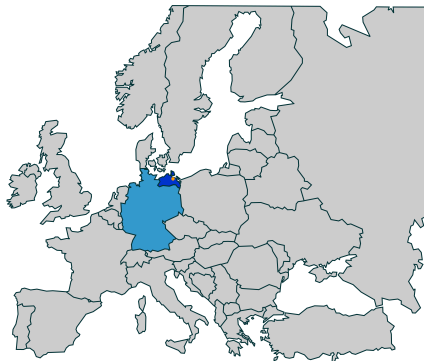
Ar\* + Ar\*

HMDSO + e<sup>-</sup>

HMDSO + Ar\*

- Fluid-Modellierung und Analyse zweier DBE-Konfigurationen in Argon und Ar-HMDSO-Gasmischungen durchgeführt.
- Beobachteter Modenübergang mit steigender Spannungsamplitude in asymmetrischer DBE in Argon kann durch zunehmenden Einfluss von Chemo-Ionisationsprozessen erklärt werden.
- Geringe Beimischungen von HMDSO in symmetrischer Argon-DBE verursachen Änderung der Entladungscharakteristik, bedingt durch Beitrag von Penning-Ionisationsprozessen.

- 
- Entwickeltes 1D-t Fluid-Tool vielfältig einsetzbar:
    - DBE in  $\text{CO}_2$  für Solarkraftstoffe
    - DBE in  $\text{N}_2\text{-O}_2$  für Ozonerzeugung und Schadstoffabbau
    - ...
  - Erweiterung auf 2D zur weiteren Untersuchung der Schichtstrukturen erforderlich



EUROPA DEUTSCHLAND MECKLENBURG VORPOMMERN GREIFSWALD

**Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V.**

Adresse: Felix-Hausdorff-Str. 2, 17489 Greifswald

Telefon: +49 - 3834 - 554 300, Fax: +49 - 3834 - 554 301

E-mail: [welcome@inp-greifswald.de](mailto:welcome@inp-greifswald.de), Web: [www.inp-greifswald.de](http://www.inp-greifswald.de)