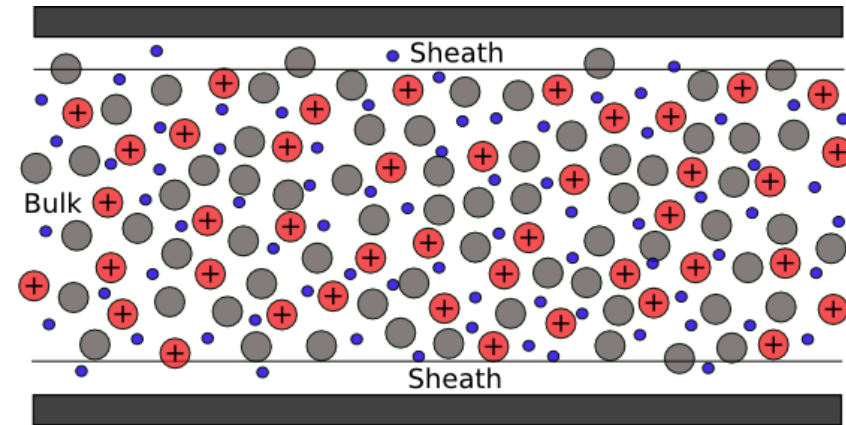
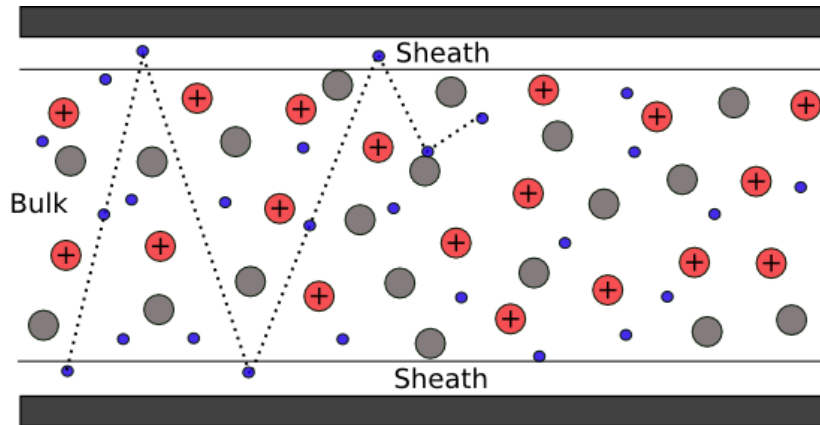


## **Kinetische Simulation von Modenübergängen und Hysterese-Effekten in kapazitiven Hochfrequenzentladungen**

**Sebastian Wilczek, Jan Trieschmann, Julian Schulze, Edmund Schüngel, Ralf Peter Brinkmann, Aranka Derzsi, Ihor Korolov, Zoltán Donkó und Thomas Mussenbrock**

Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik  
Ruhr Universität Bochum



## ■ Niederdruck

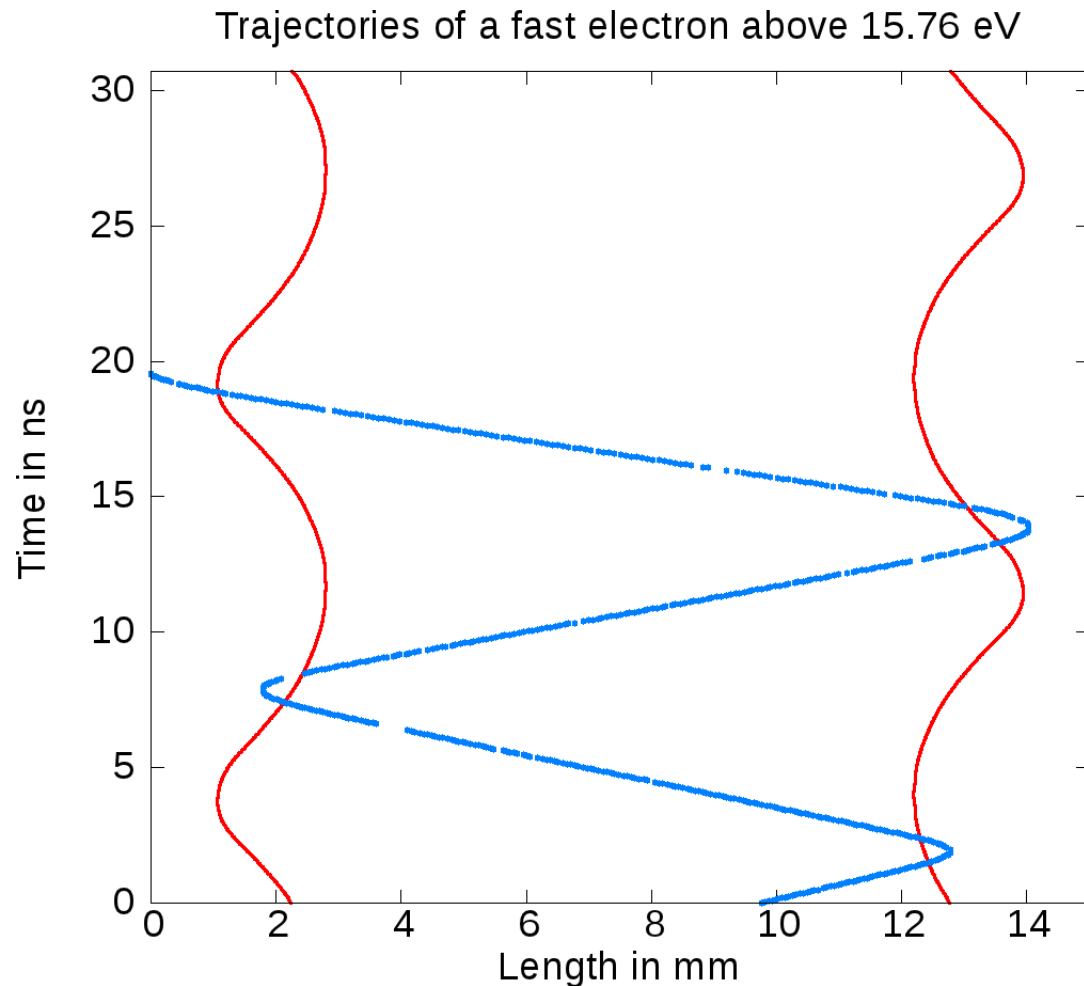
- Stochastische Heizung
- Wechselwirkung mit der Randschicht
- kaum Stöße im Bulk
- Auftreffzeitpunkt (kollabierende und expandierende Phase)

## ■ Hochdruck

- Ohmische Heizung
- Elektronen-Neutralteilchen Stöße im Bulk

# Dynamik von schnellen Elektronen

- 1d3v Particle-in-Cell Simulation<sup>1</sup>
- Plattenabstand 15 mm
- Anregungsfrequenz bei 65 MHz
- 1 Pa Argon
- Reflektion an der expandierenden Schicht
- Bounce-Resonance-Effekt<sup>2</sup>



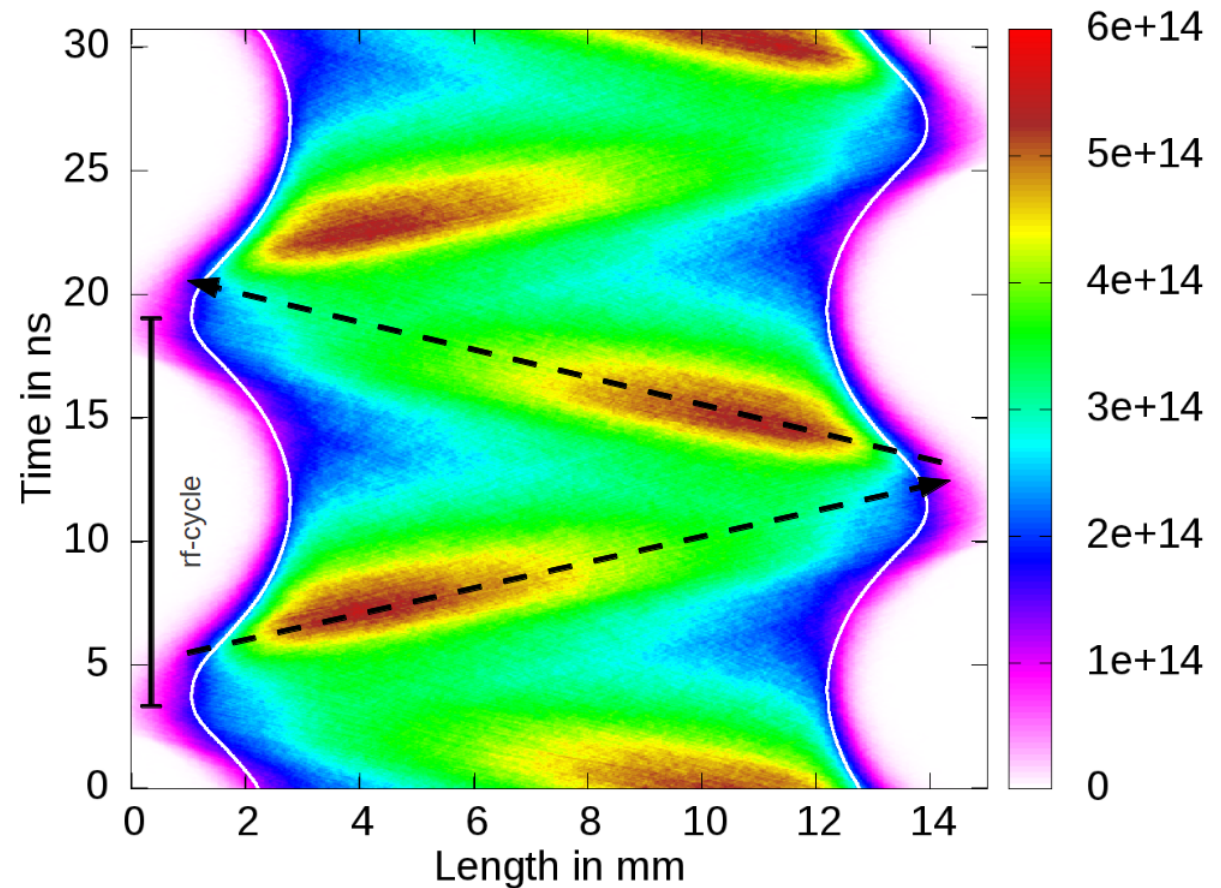
<sup>1</sup>M.M. Turner et. al, Phys. Plasmas 20, 013507 (2013)

<sup>2</sup>Liu et al., Phys. Rev. Lett. 107, 055002 (2011)

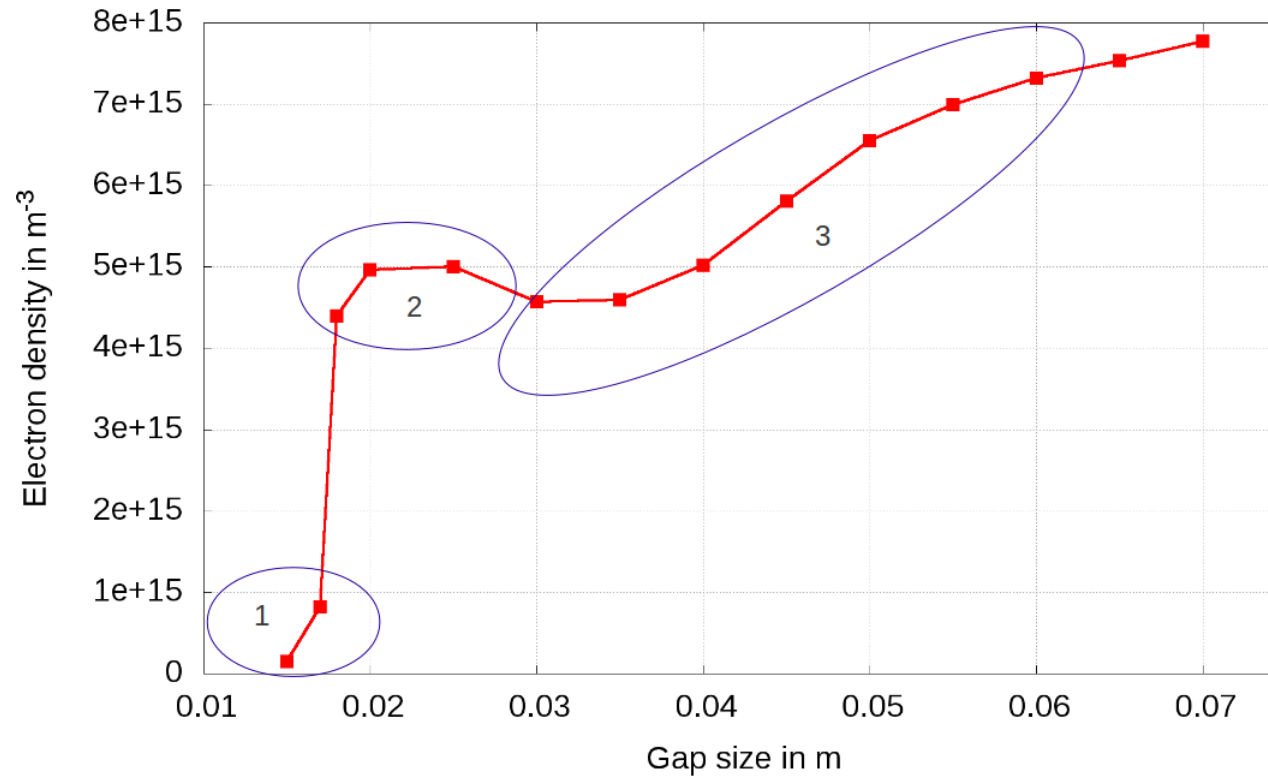
# Beamformation und Auftreffzeitpunkt

- expandierende Randschicht beschleunigt Beams<sup>3</sup>
- Auftreffzeitpunkt berücksichtigen
- Welche Parameter können diesen Punkt verändern?
- Plattenabstand
- **Anregungsfrequenz**

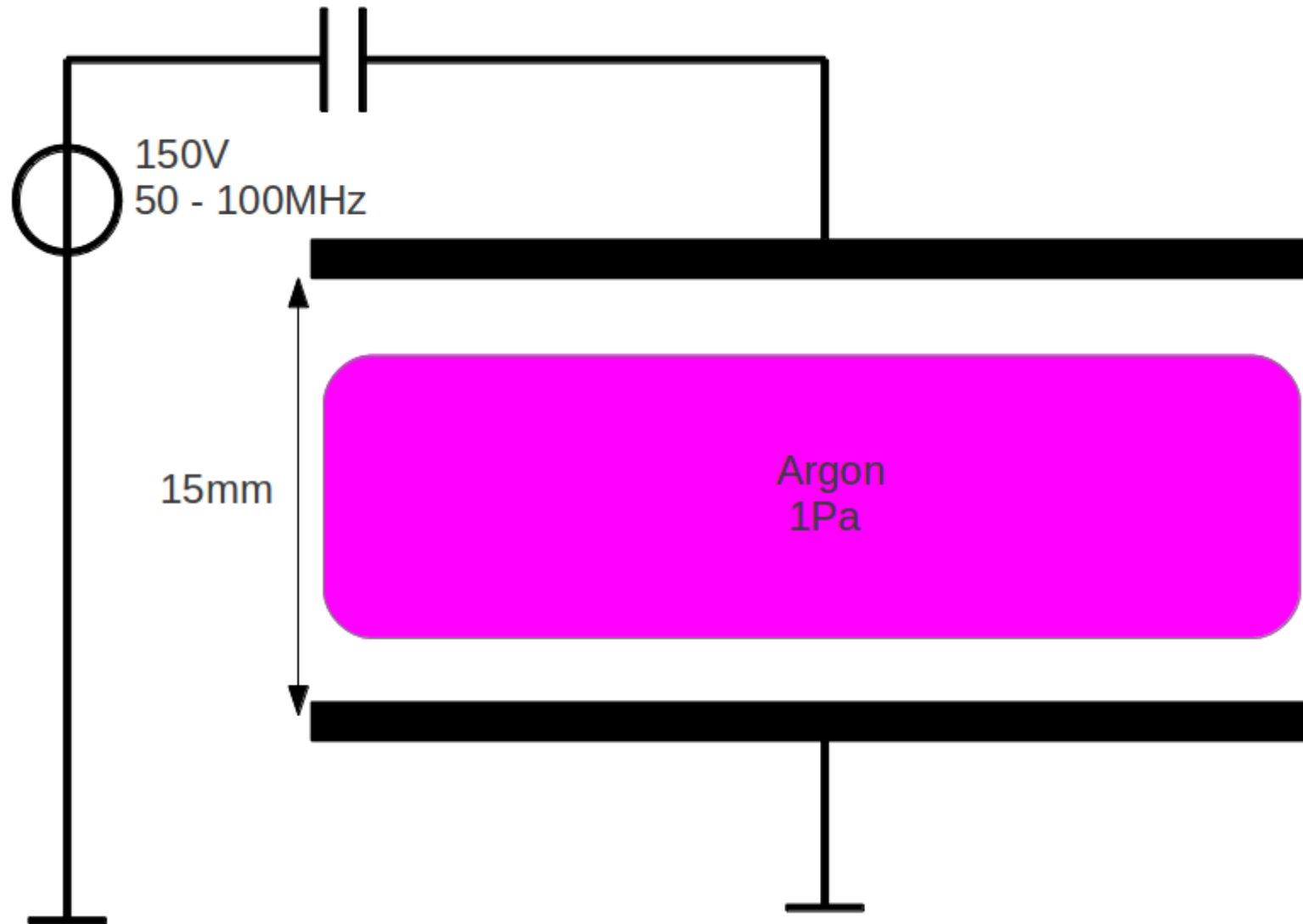
Spatio-temporal distribution of fast electrons in  $\text{m}^{-3}$  (15.76eV)



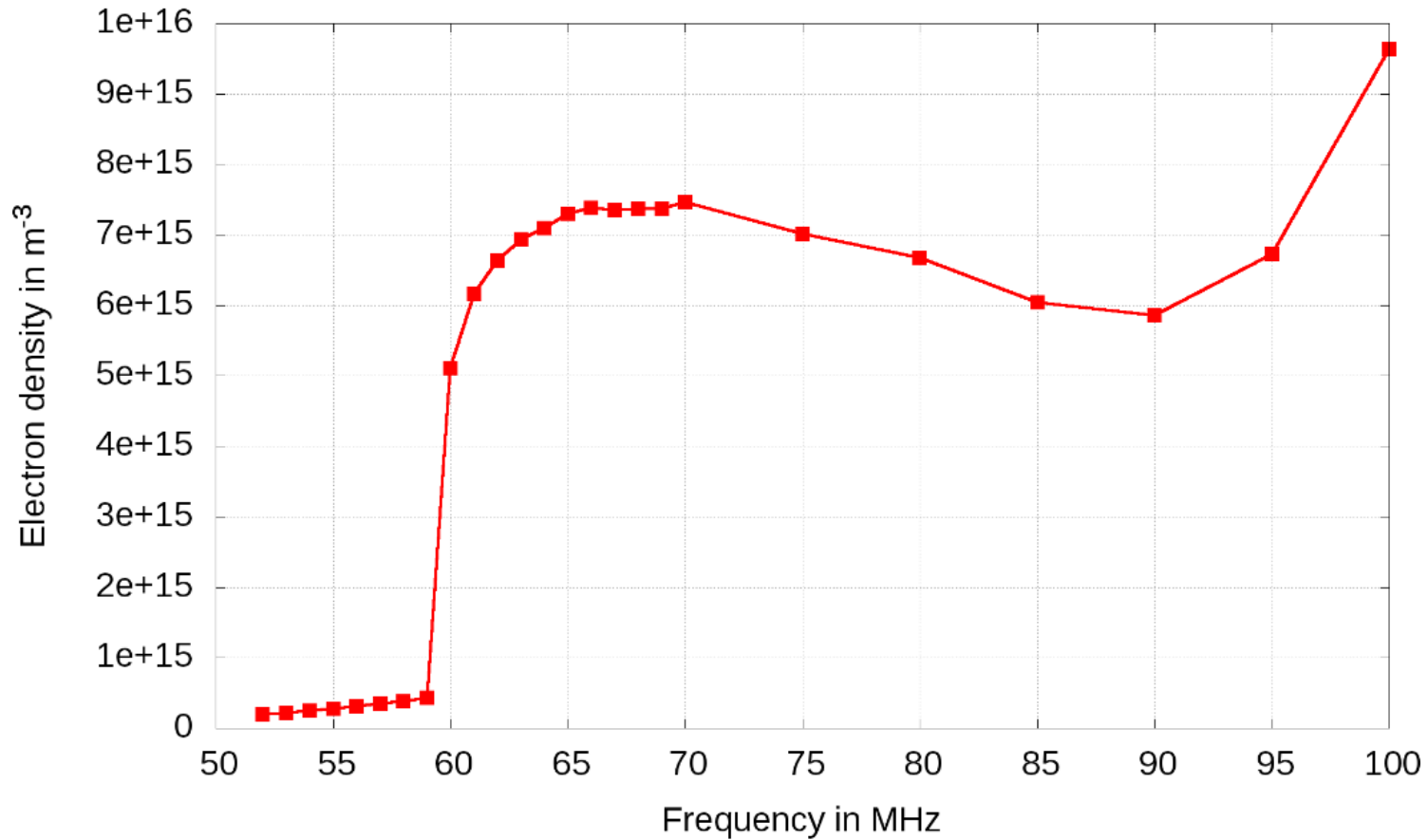
<sup>3</sup>J. Schulze et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 41, 042003 (2008)



- Auftreffzeitpunkt der Elektronenbeams ändert sich
- abrupter Modenübergang zwischen Region 1 und 2

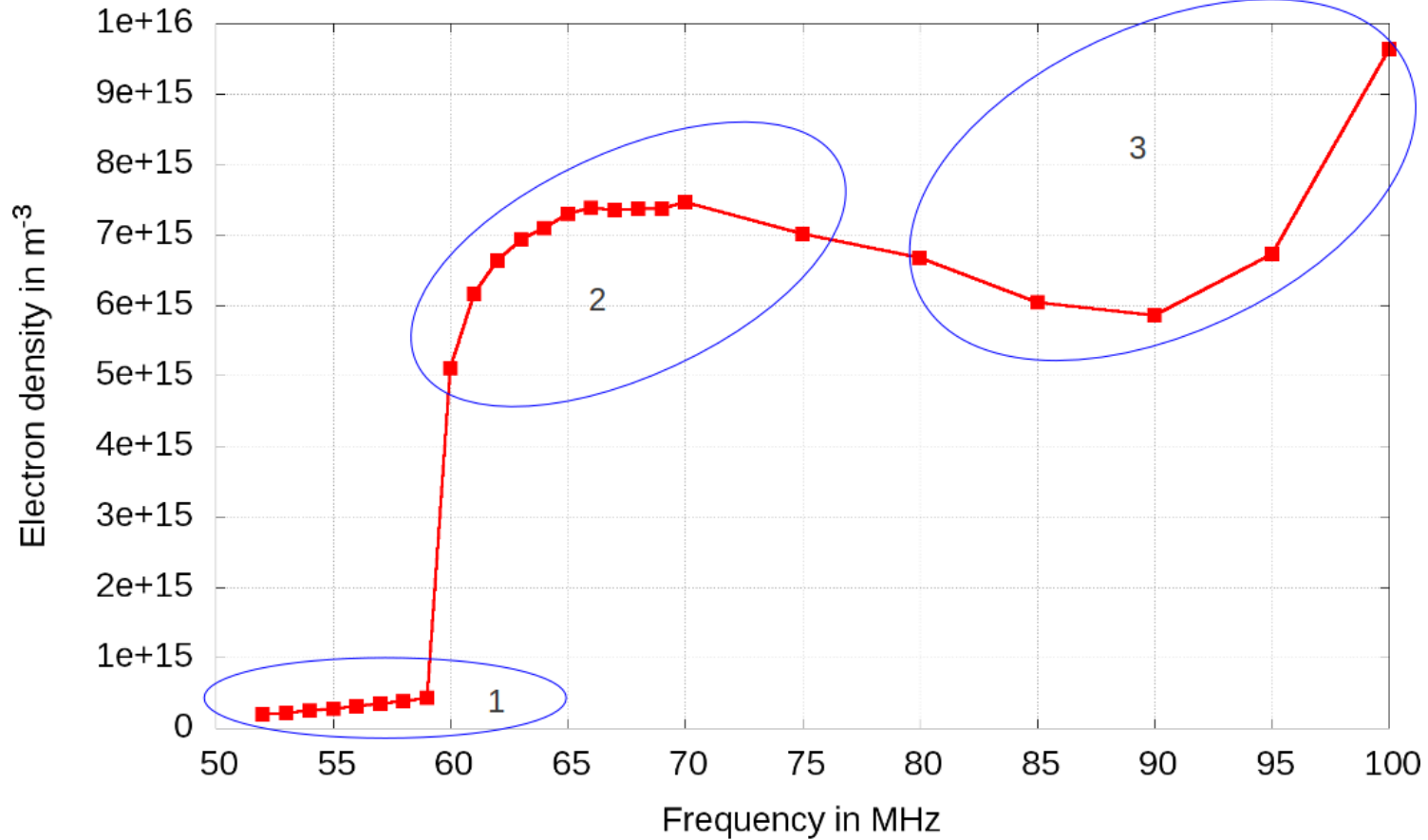


# Elektronendichte über Anregungsfrequenz



- 15 mm, 150 V, 1 Pa Argon

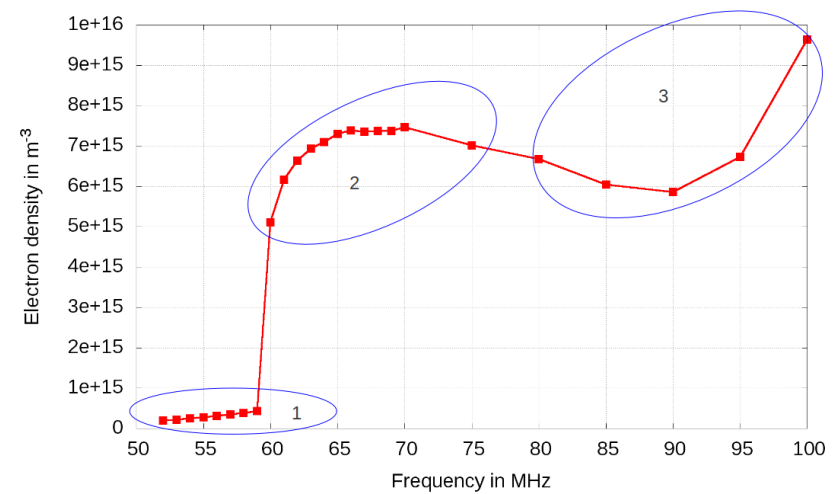
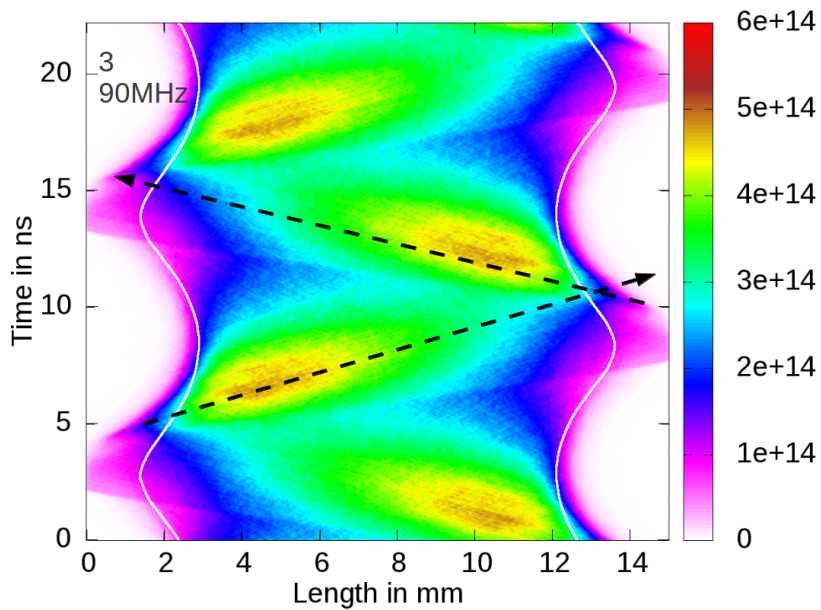
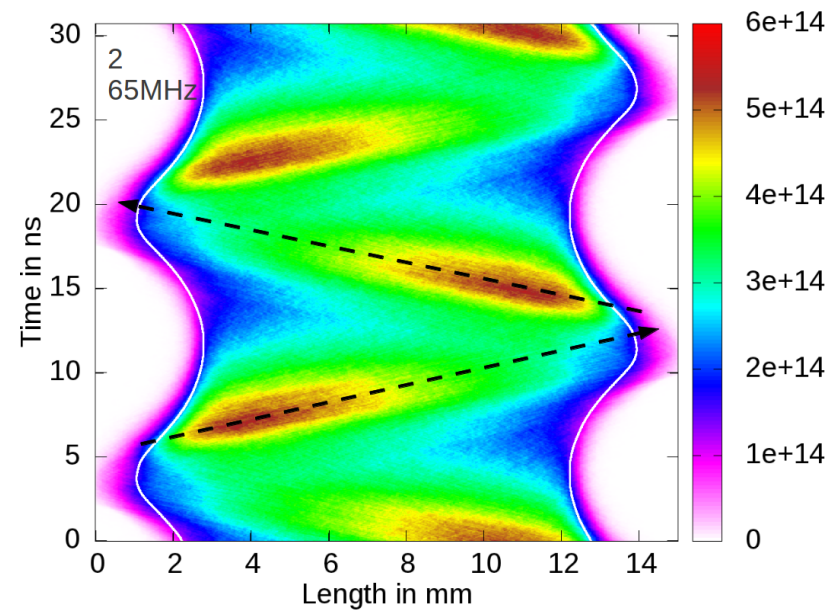
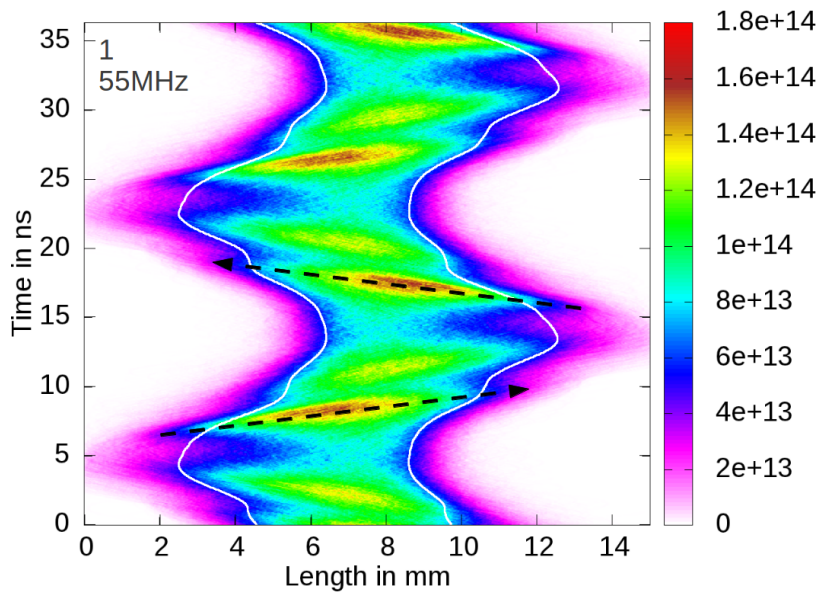
# Elektronendichte über Anregungsfrequenz

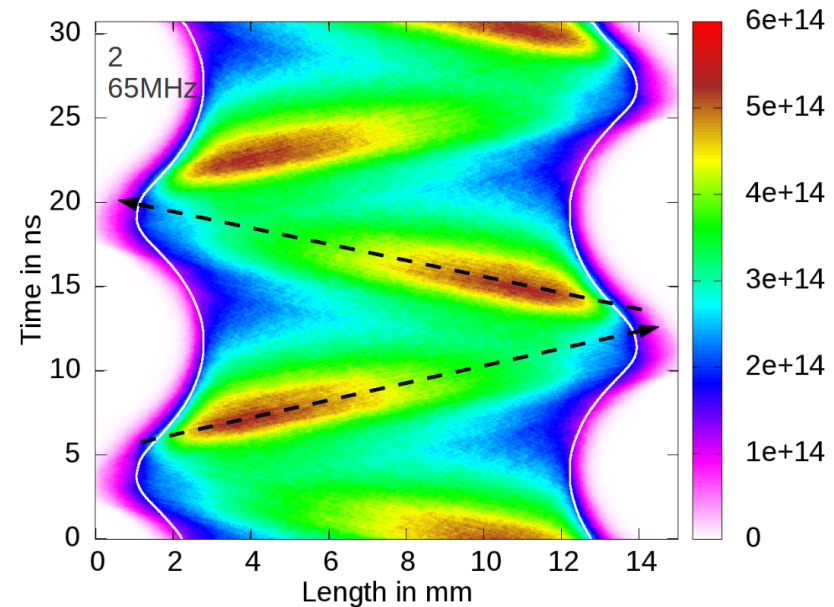
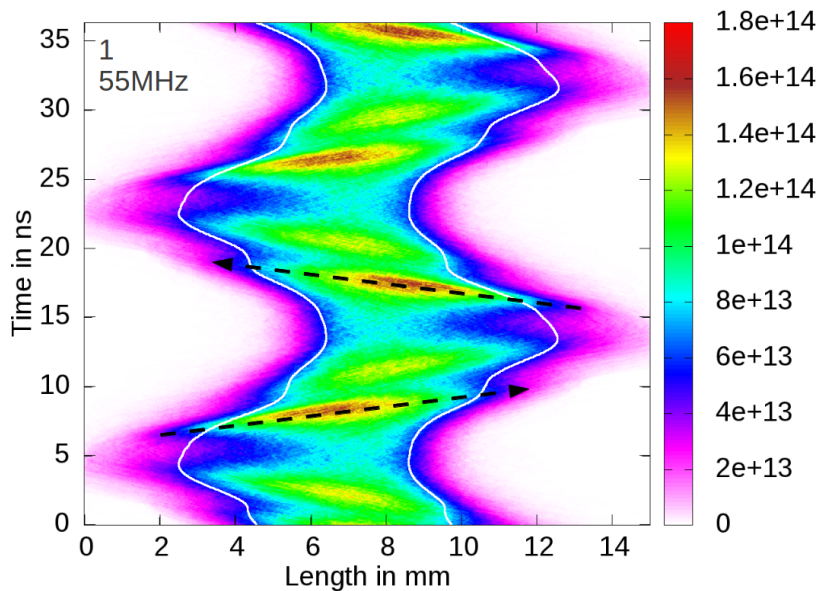


- 15 mm, 150 V, 1 Pa Argon

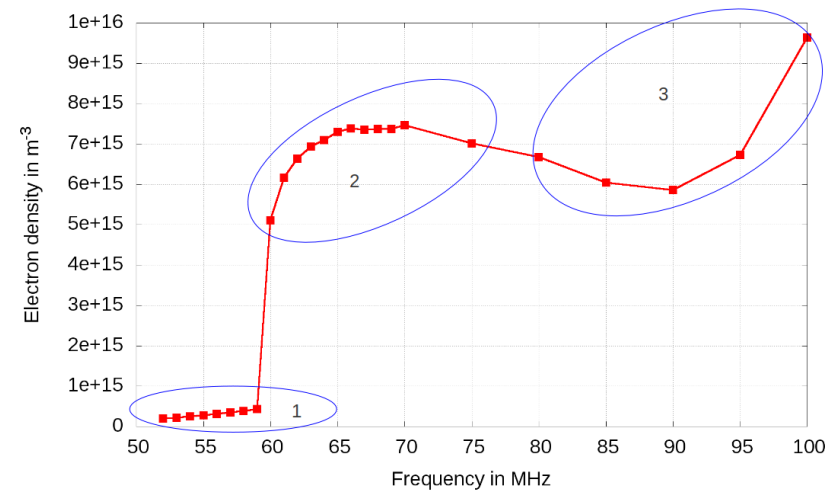


# Raum-Zeit-Dynamik der schnellen Elektronen in $m^{-3}$

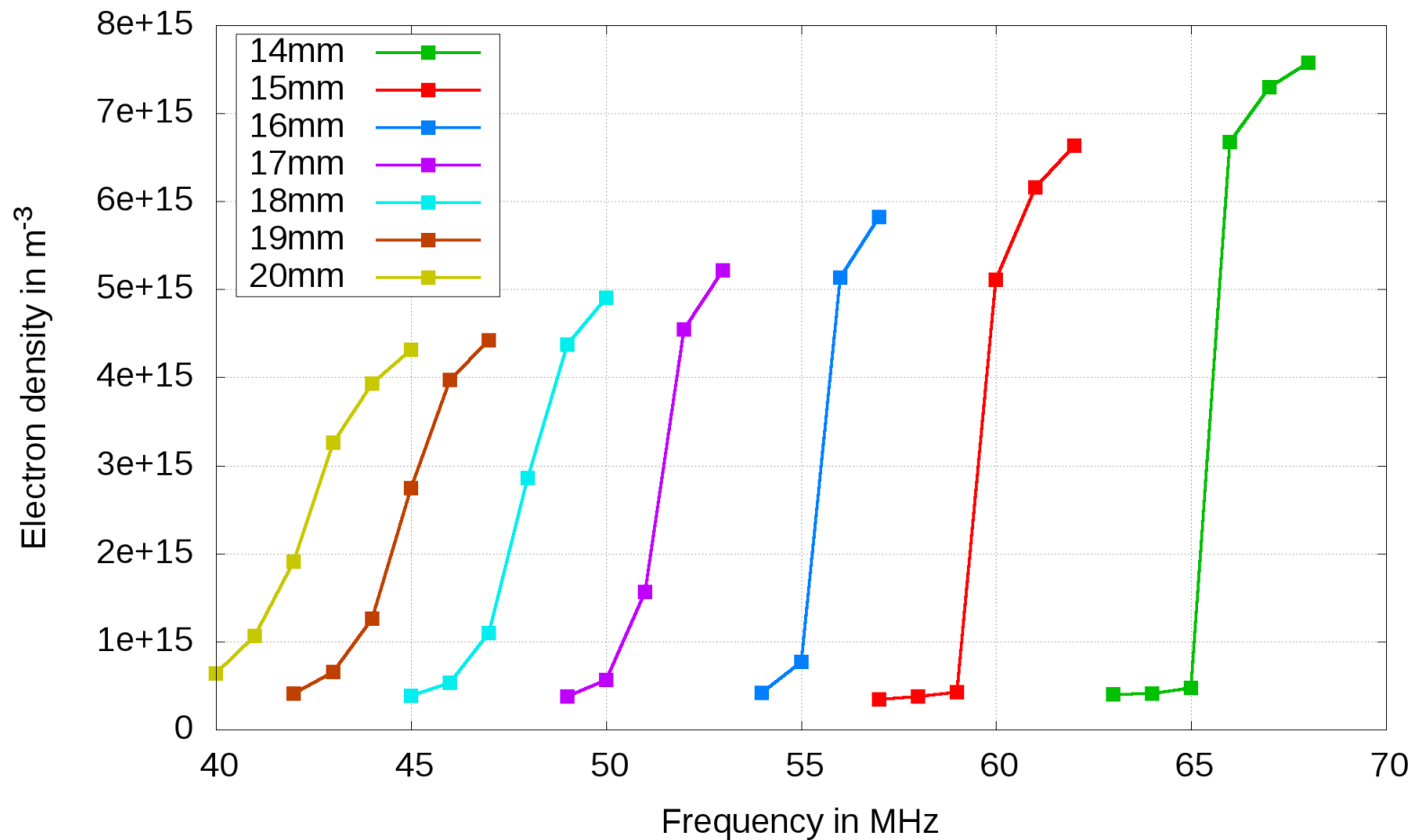




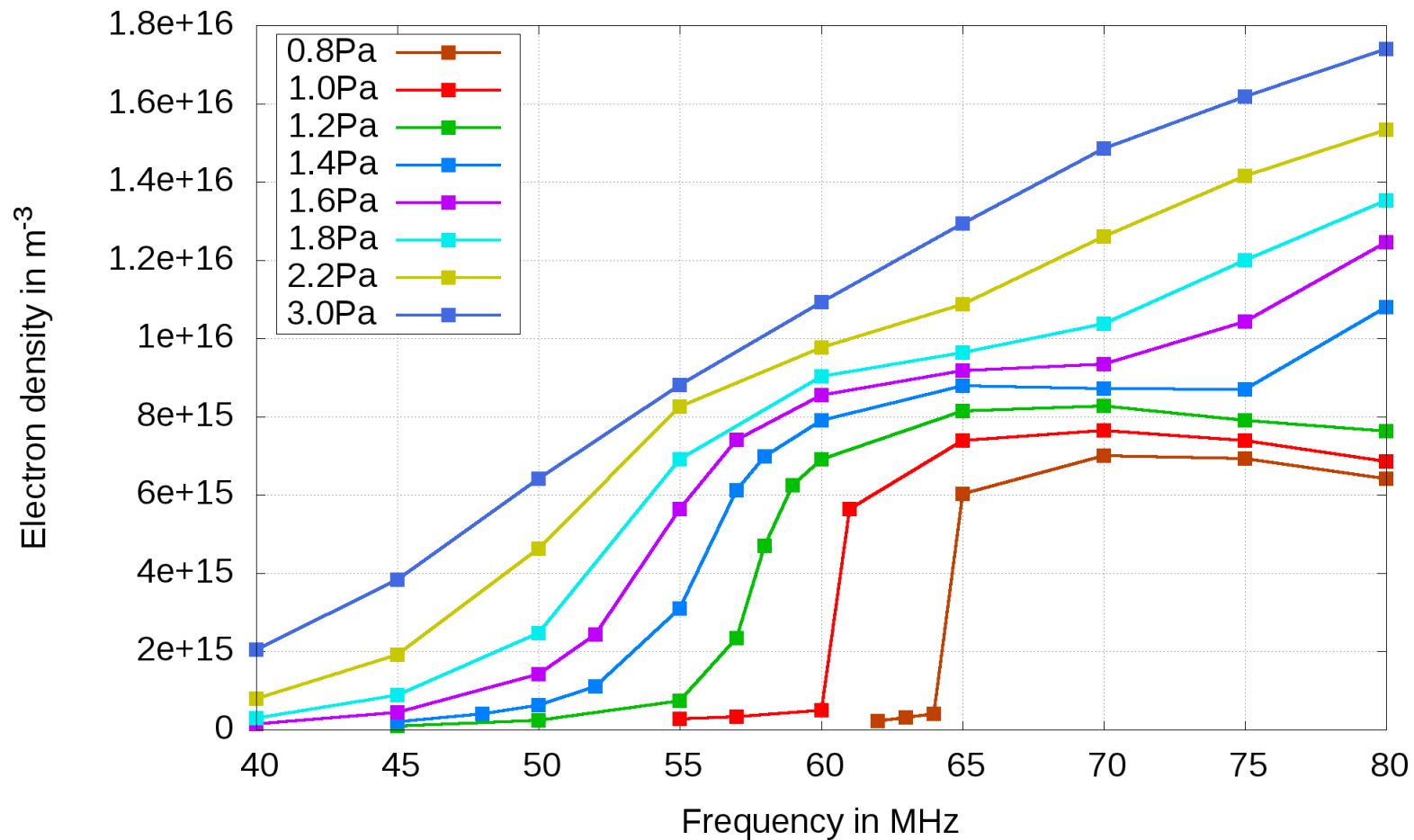
- Verhältnis  $\frac{\lambda_m}{L_{gap}} \approx 3$
- gerichteter Elektronenbeam, kaum Streuung durch Stöße
- hoch-energetischen Elektrone treffen die kollabierende Phase und verlieren im Mittel gesehen einen großen Teil ihrer Energie



# Modenübergang: Variation $L_{gap}$

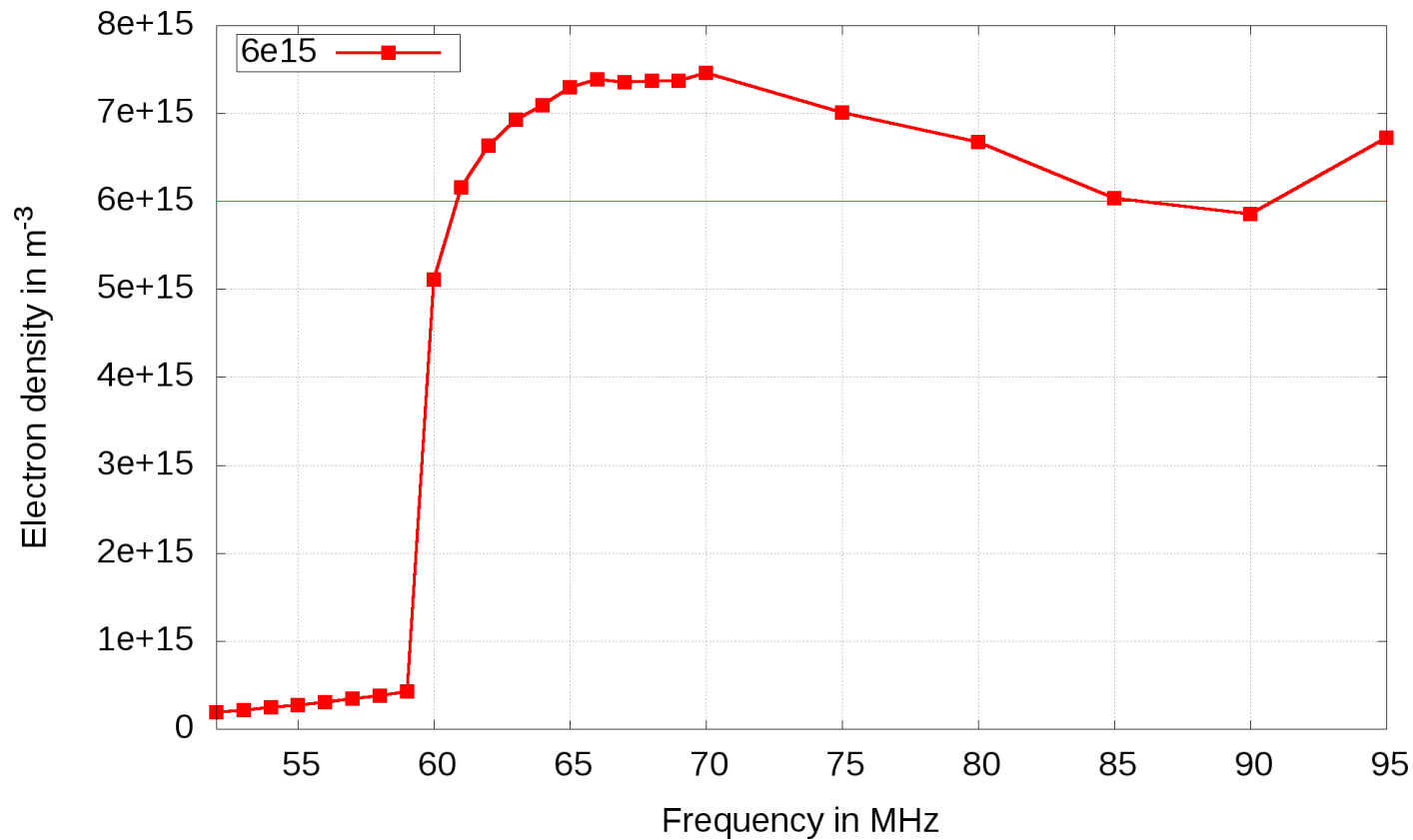


- $L_{gap} \uparrow \implies \frac{\lambda_m}{L_{gap}} \downarrow \implies$  Stoßwahrscheinlichkeit steigt für den Beam
- Elektronen werden mehr gestreut und Übergang wird weicher



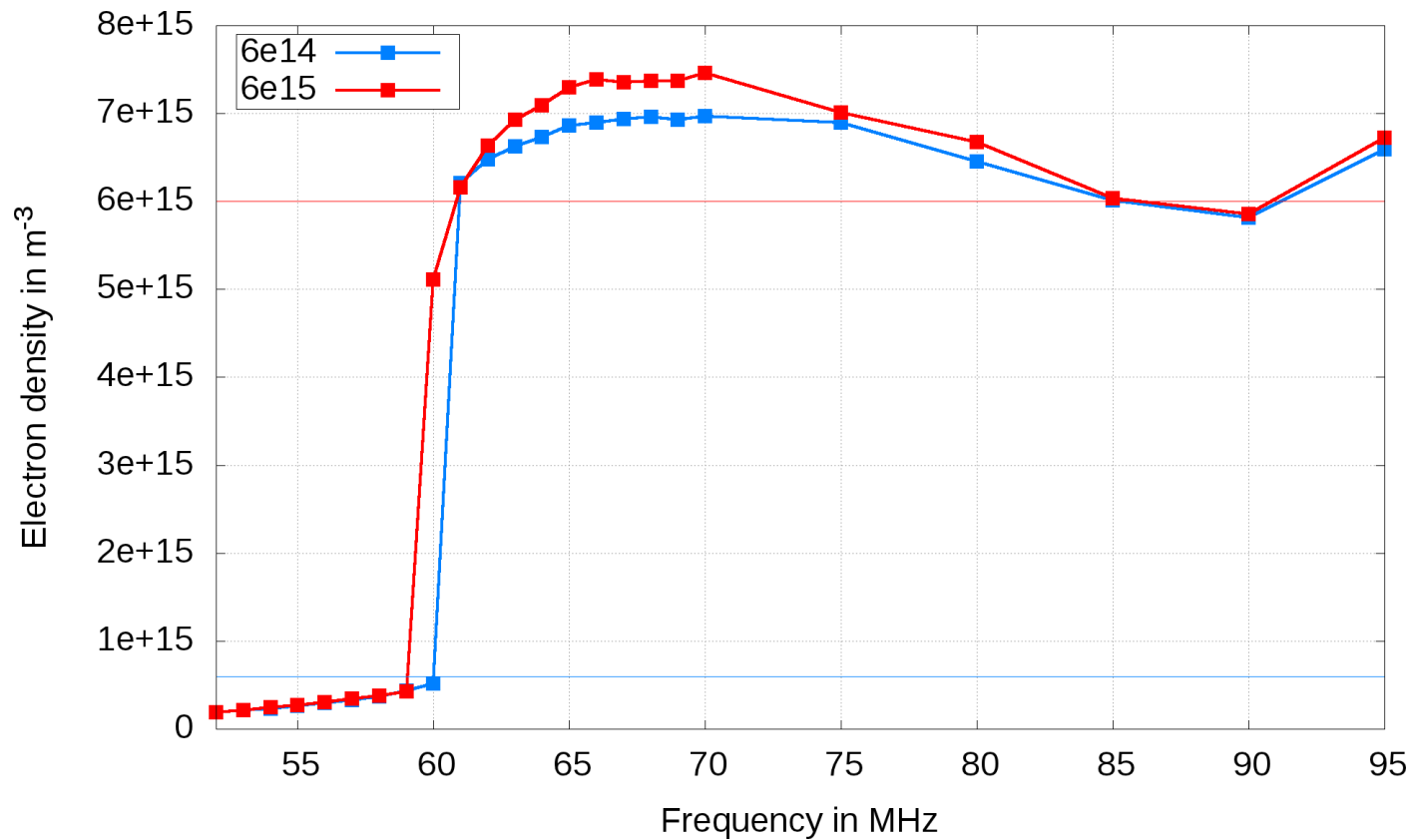
- $\lambda_m \downarrow \implies \frac{\lambda_m}{L_{gap}} \downarrow \implies$  Stoßwahrscheinlichkeit steigt für den Beam
- Elektronen werden mehr gestreut und Übergang wird weicher

15 mm, 150 V, 1 Pa Argon



## ■ Initialwerte der Simulation

- Initialdichte:  $6 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ , Superparticle: 80000



- Unterschiedliche Initialdichten auskonvergierter Endzustände
- führt zu einem Hysterese-Effekt<sup>4</sup>
- Wechselwirkung der Beams wird beeinflusst

<sup>4</sup>Wei Jiang et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 102005 (2009)

# Zusammenfassung

- Variation von Plattenabstand und Anregungsfrequenz führt zu unterschiedlichen Auftreffzeitpunkten der Elektronenbeams
- abrupter Modenübergang von kollabierender zu expandierender Auftreffphase
- Auftreten von Hysterese-Effekten am Übergang
  - zwei physikalische Endzustände

## Ausblick

- lokale Resonanzeffekte
- Zusammenspiel zwischen Leitungs- und Verschiebungsstromdichte