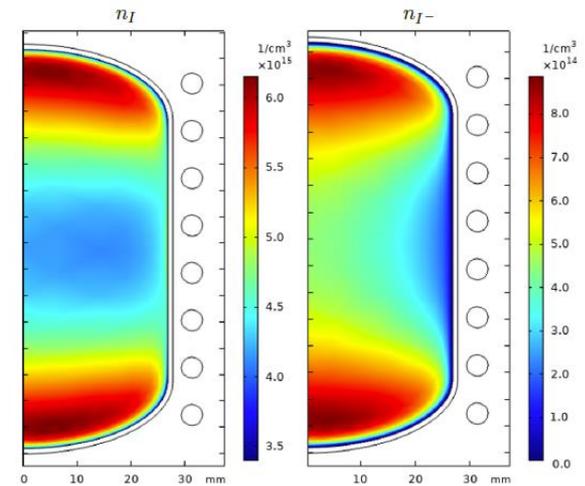
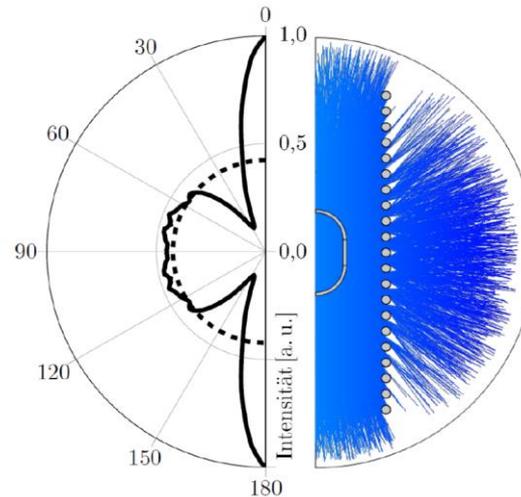
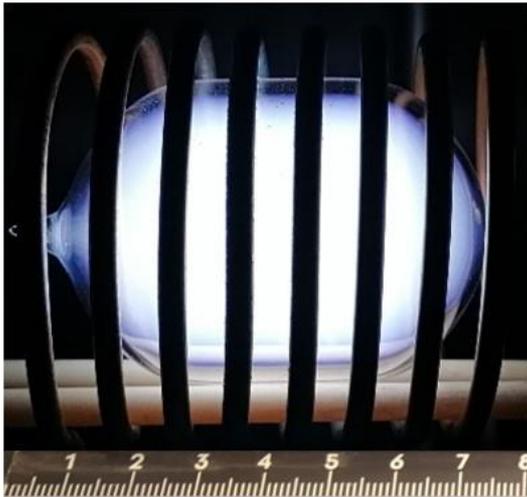


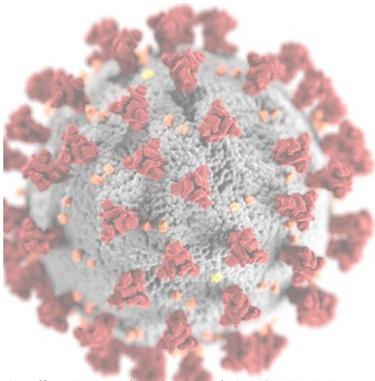
# Induktive UV-Strahler Simulation und Vermessung

■ **Dr.-Ing. Tim Gehring**, Qihao Jin, Jan Dycke, Biruk Alemu, Raghuraman Anantharaman und Rainer Kling

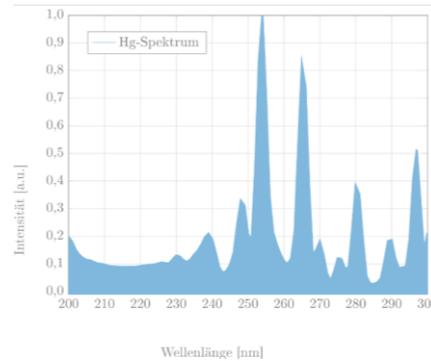
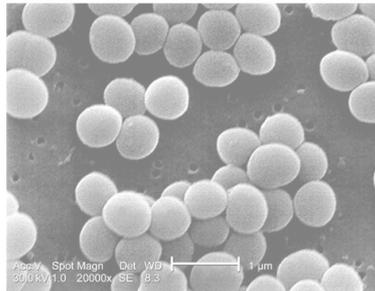
Lichttechnisches Institut: Licht, EVG- und Plasmatechnologien

10.07.2023





<https://www.pexels.com/de-de/suche/virus/>, abgerufen am 23.02.2022



80	200,59
0,860(2)	2
[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	
-39 / 357	
Hg	2, 1
Quecksilber	

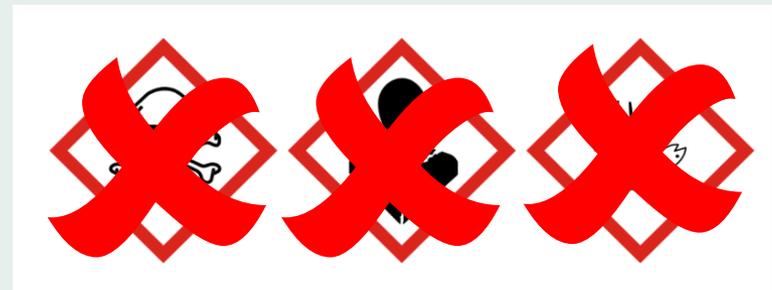
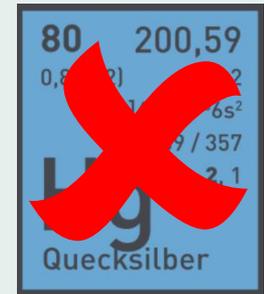
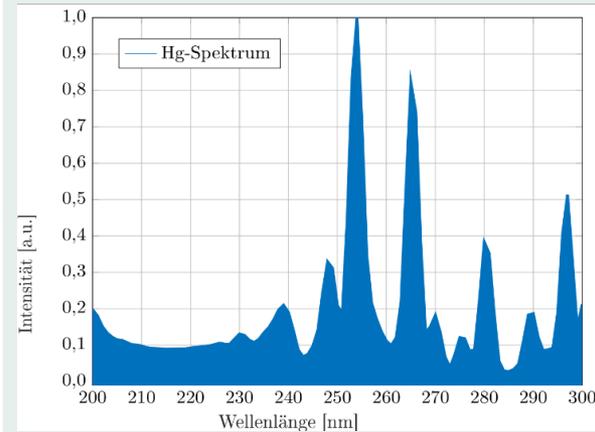


# Motivation

## Standardtechnologie zur UV-Erzeugung: Quecksilberstrahler

### Quecksilbereigenschaften

- Vorteile
  - Spektrum günstig für UV-Erzeugung
  - Dampfdruck passend für Anwendung
- Nachteil
  - **Toxisch!**
- Ziel
  - Strahler mit minimaler Umweltbelastung
    - Vermeiden von Quecksilber
    - Möglichst hohe Effizienz
    - Lange Lebensdauer



# Neuer Ansatz zur UV-Erzeugung

## Quecksilberfreie induktive Plasmastrahlungsquelle

### ■ Möglichkeiten zur Plasmaerzeugung

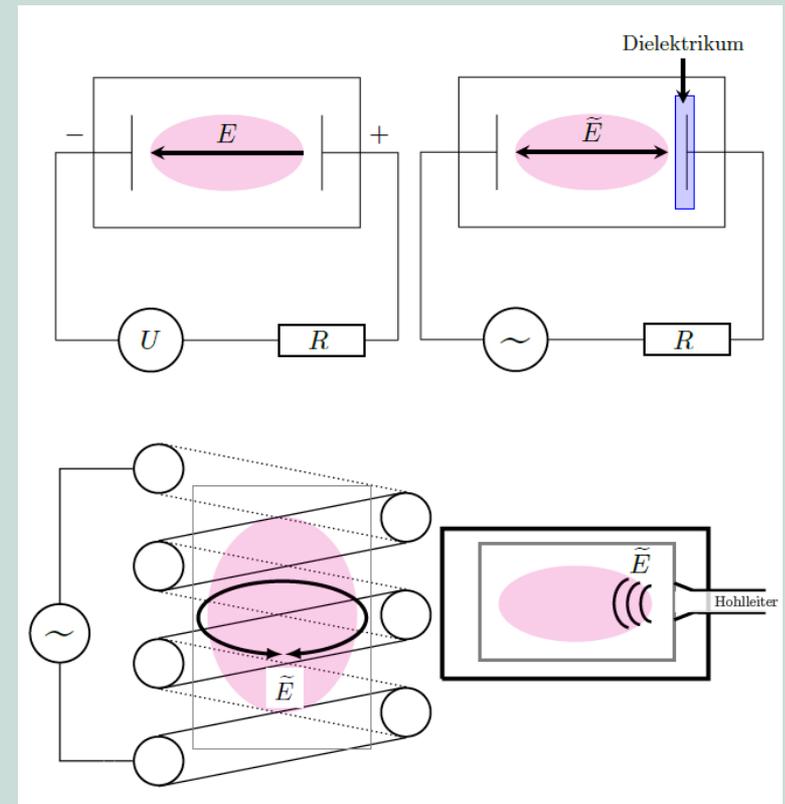
- Gleichstrom
- Kapazitiv
- Mikrowelle
- Induktiv

### ■ Vorteile induktiver Plasmen

- Effiziente Vorschaltgeräte
- Elektrodenlos
  - Lange Lebensdauer
  - Keine Elektrodenreaktionen



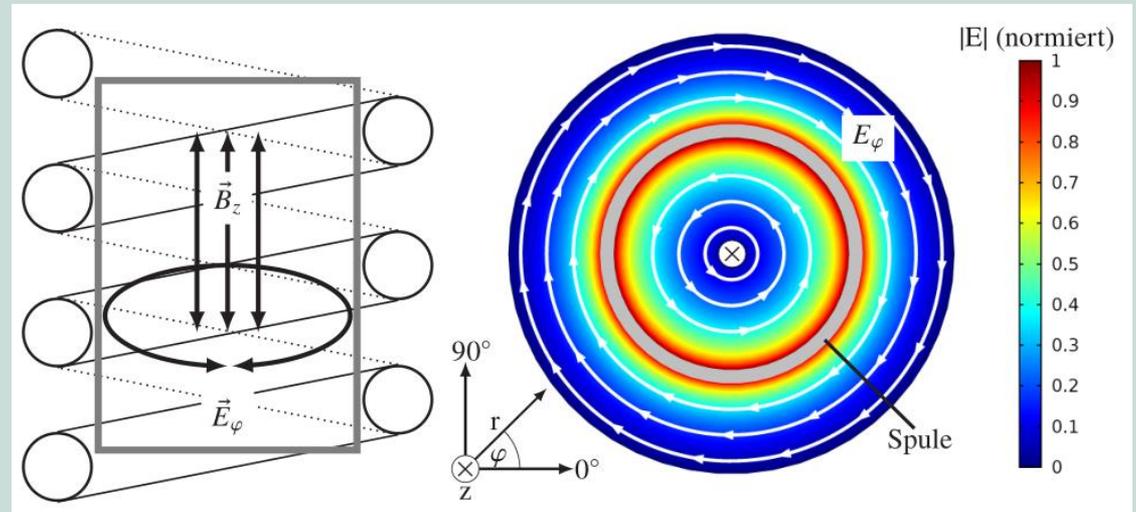
Breites Feld an möglichen Füllmaterialien



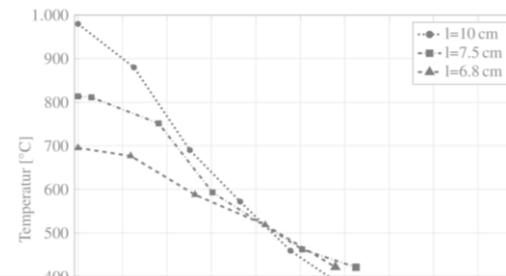
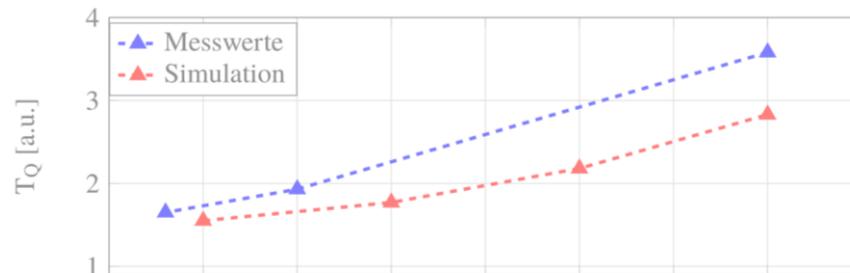
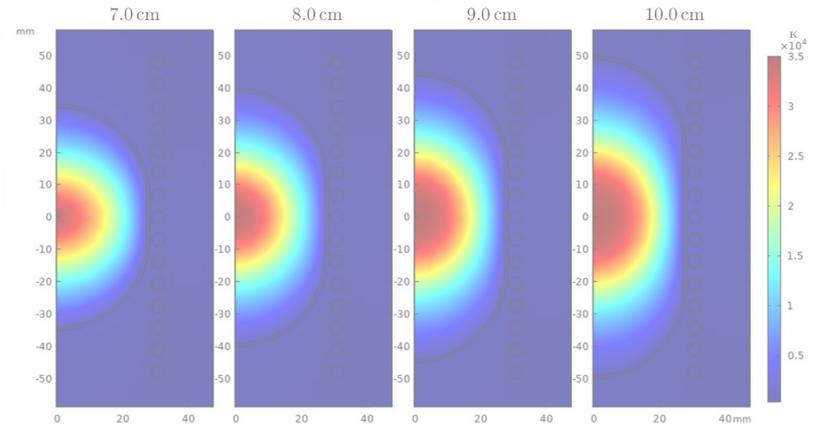
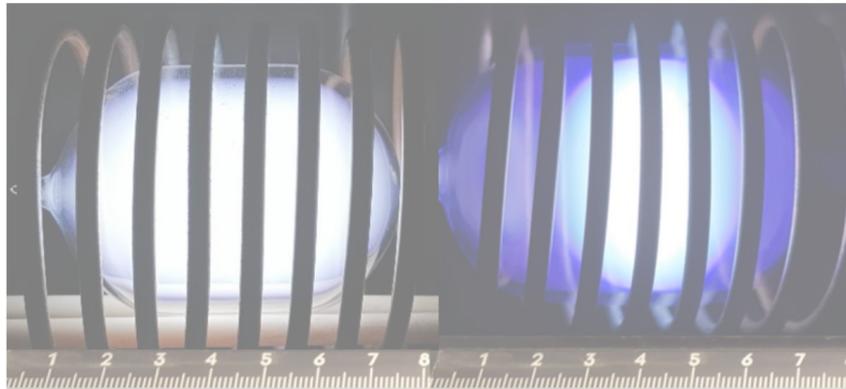
# Induktive Plasmen

## Prinzip der induktiven Einkopplung

- Einkopplung von Energie durch Induktion



Strahlerlänge:



# Simulation

## Software und Simulationsmodell

### ■ Simulationsmodell

#### ■ Abhängigkeiten:

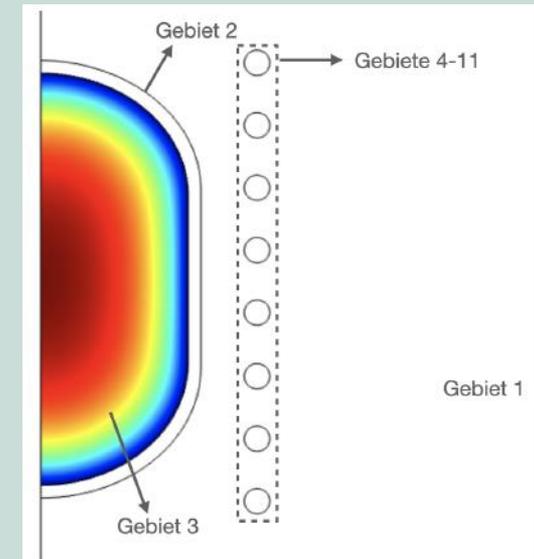
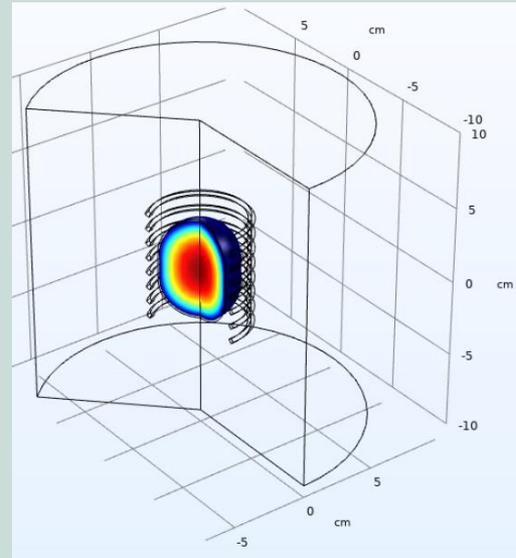
-  Plasma
-  Magnetische Felder
-  Wärmetransport in Fluiden
-  Laminare Strömung

#### ■ Software

- COMSOL Multiphysics

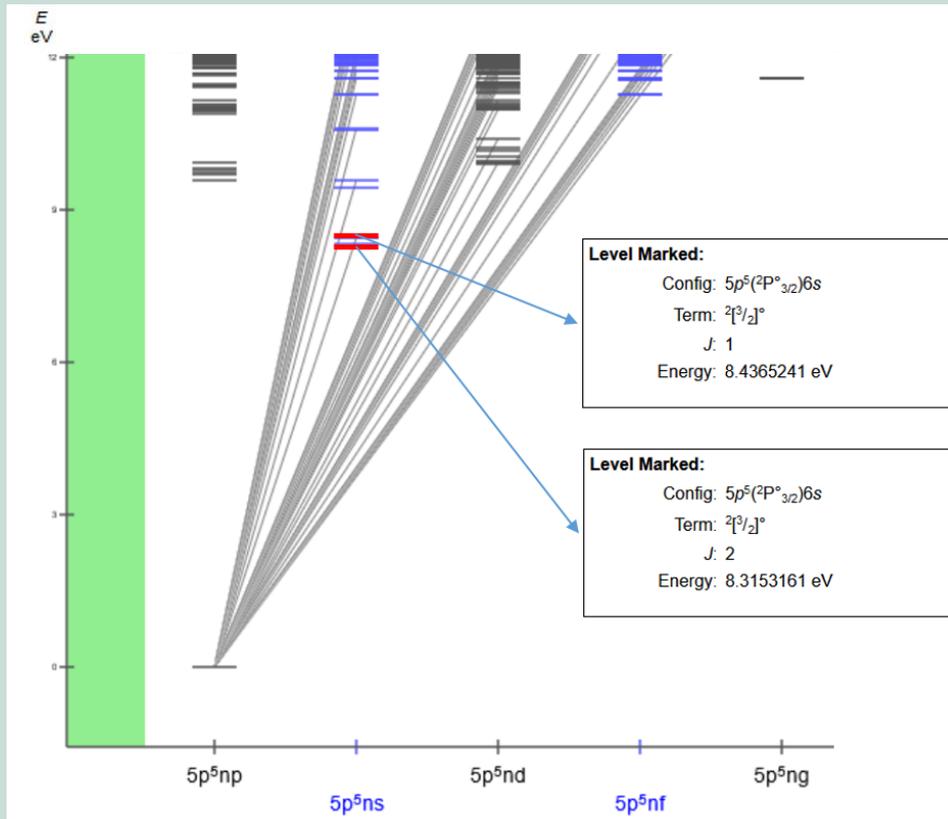
### ■ 2D-rotationssymmetrisches Modell

### ■ Definition von Materialeigenschaften



## Auswahl der Reaktionen: Beispiel Xe

 Plasma



- Große Anzahl möglicher Anregungszustände
- Vereinfachung: Nutzung der ersten beiden Anregungszustände

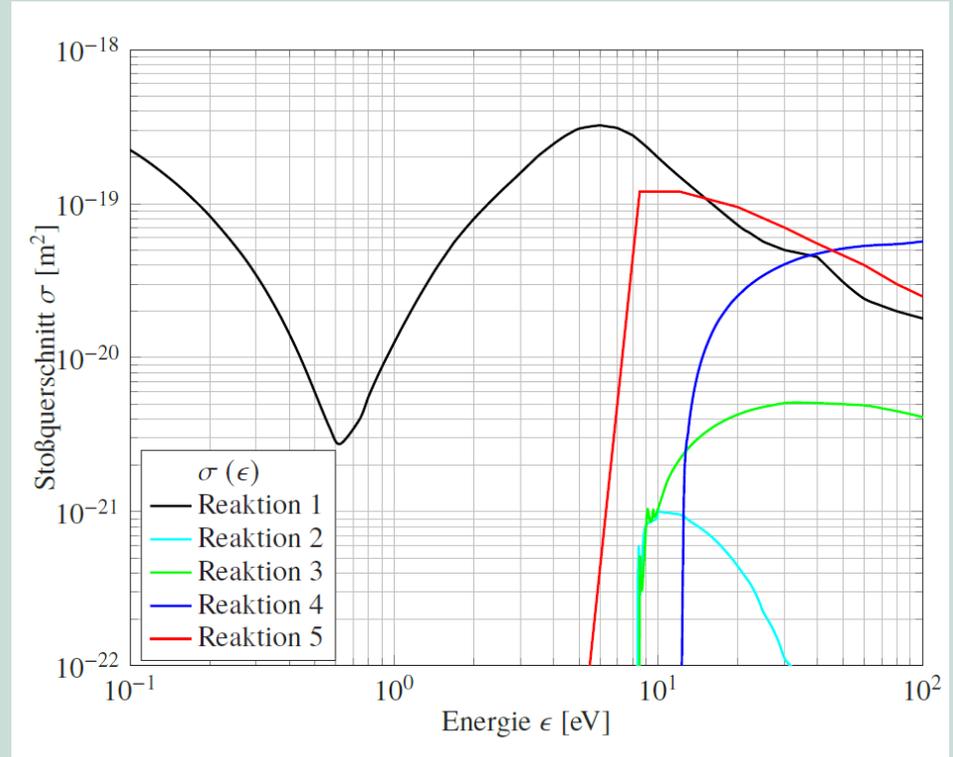
## Implementierte Reaktionen

Plasma

Reaktion N <sup>o</sup>	Prozess	Reaktion	$\Delta\epsilon$ [eV]
1	Elastisch	$Xe + e \rightarrow Xe + e$	
2	Anregung	$Xe + e \rightarrow Xe(6s_2) + e$	8,31
3	Anregung	$Xe + e \rightarrow Xe(6s_1) + e$	8,43
4	Ionisation	$Xe + e \rightarrow Xe^+ + 2e$	12,12
5	Stufen-Ionisation	$Xe(6s_2) + e \rightarrow Xe^+ + 2e$	3,44
6	Relaxation <sup>1</sup>	$Xe(6s_1) \rightarrow Xe + h\nu$	-8,43

<sup>1</sup>Für diese Reaktion wurde die Reaktionsrate von  $k_j = 2,73 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$  genutzt.

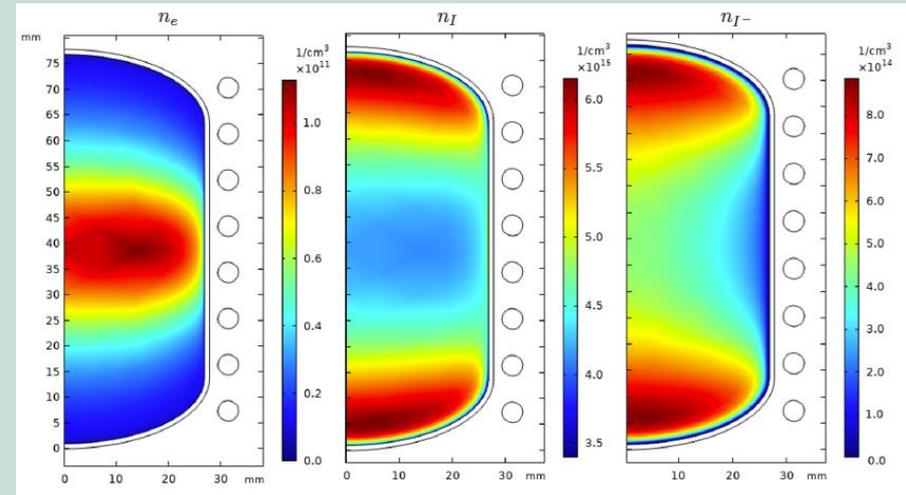
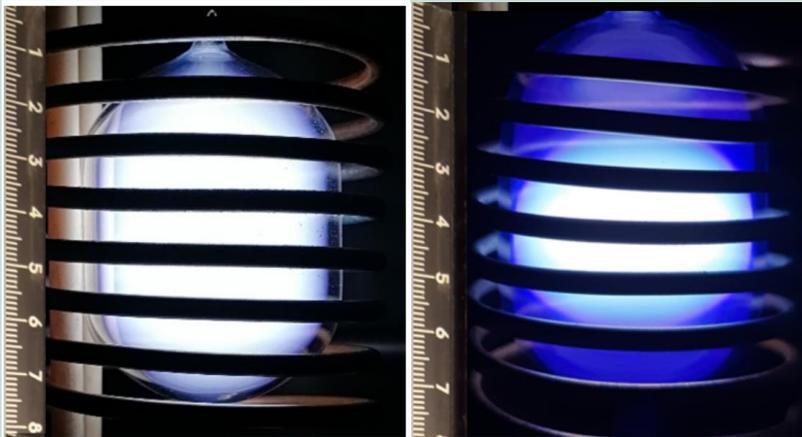
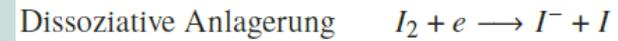
Reaktion N <sup>o</sup>	Prozess	Reaktion	$\Delta\epsilon$ [eV]
7	Dissoziative Anlagerung	$I_2 + e \rightarrow I^- + I$	
8	Elastisch	$I + e \rightarrow I + e$	
9	Ionisation	$I + e \rightarrow I^+ + 2e$	10,45



## Teilchendichteverteilungen



- Ausbildung einer Kugel bei halogenidhaltigen Entladungen



- Direkter Einfluss auf die Temperaturverteilung



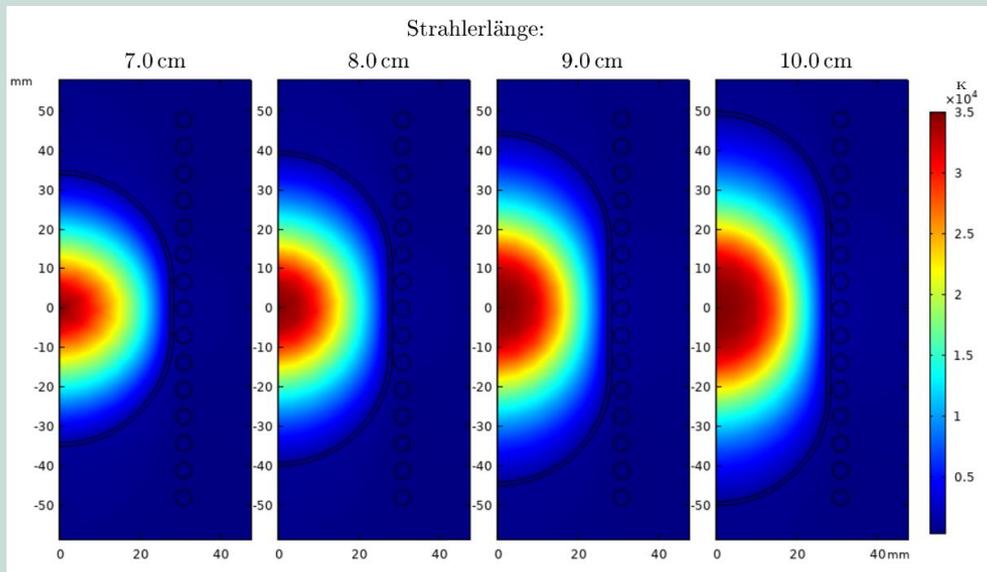
## Temperaturverteilung



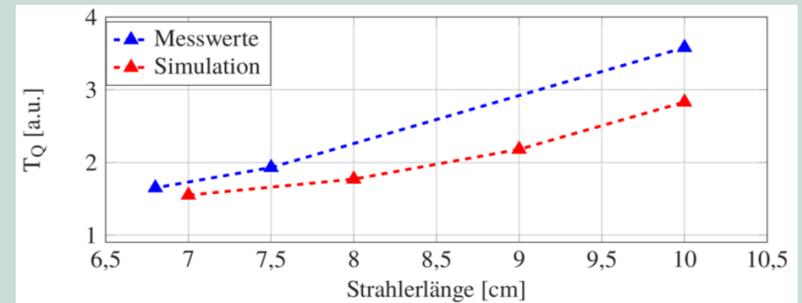
Plasma



Wärmehtransport in Fluiden



$$T_Q = \frac{T_{max}}{T_{min}}$$



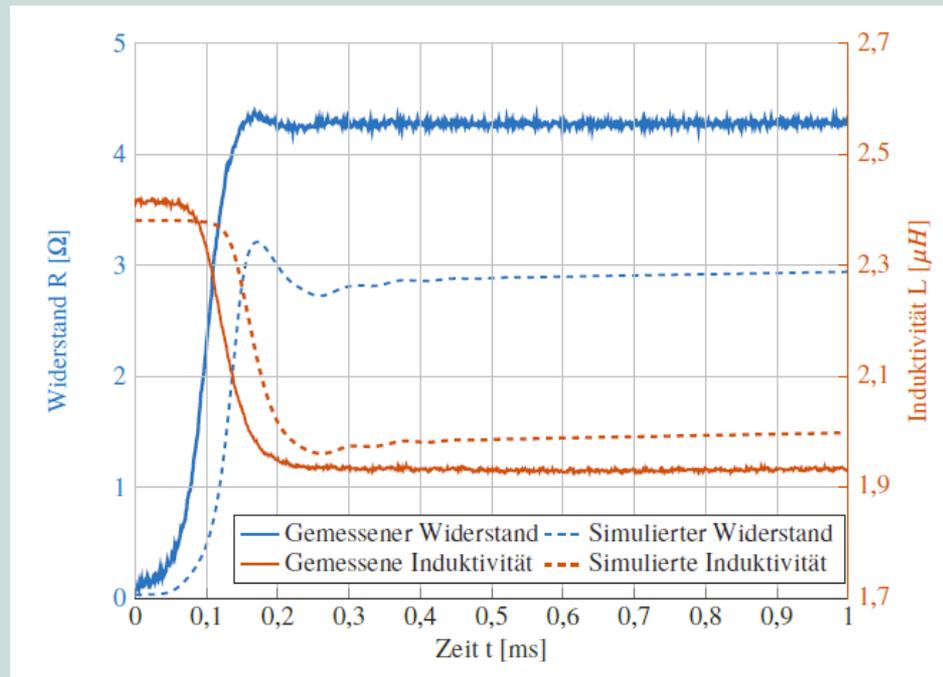
- Möglichst kurze Strahlerlänge für homogene Temperaturverteilung



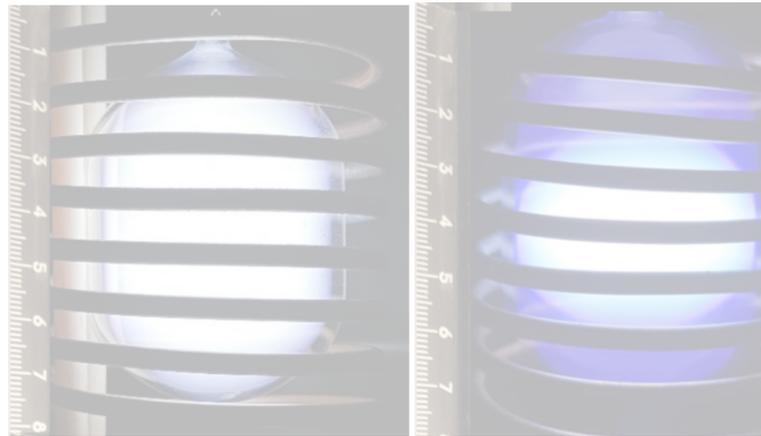
Laminare Strömung

## Impedanzverhalten

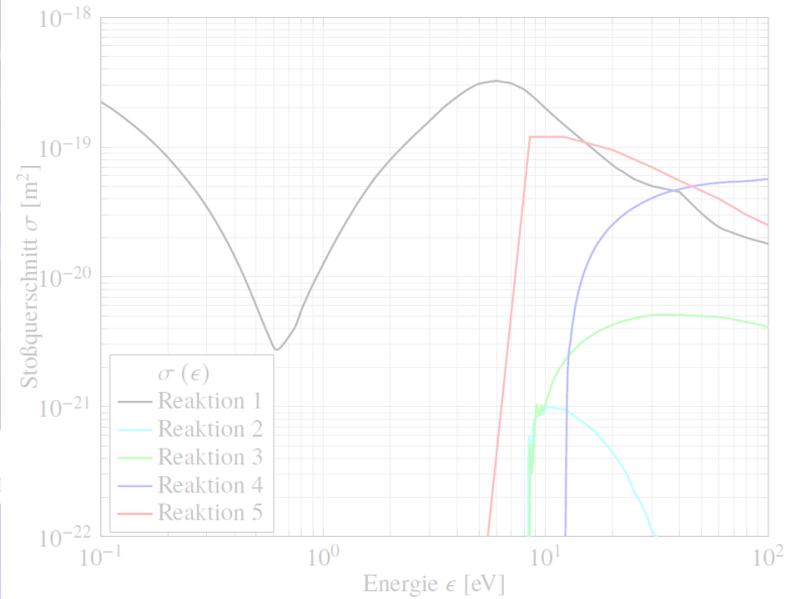
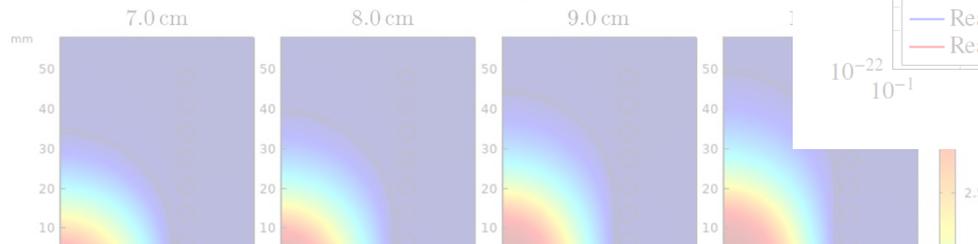
+<sub>-</sub> Magnetische Felder



- Abweichende Absolutwerte
- Dynamisches Plasmaverhalten wird abgebildet



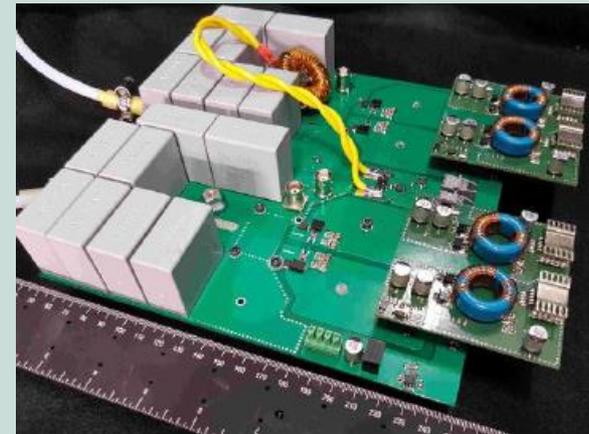
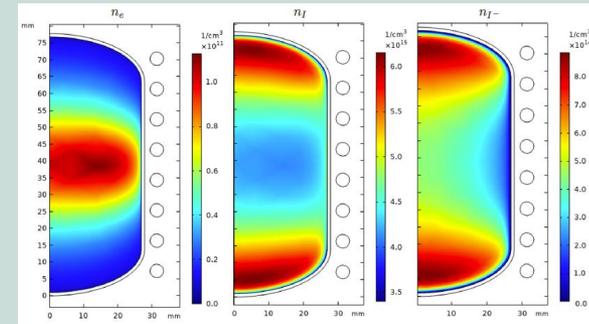
Strahlerlänge:

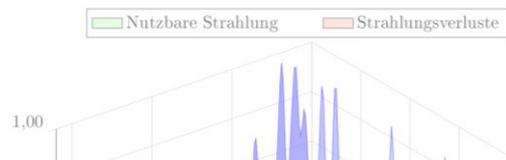
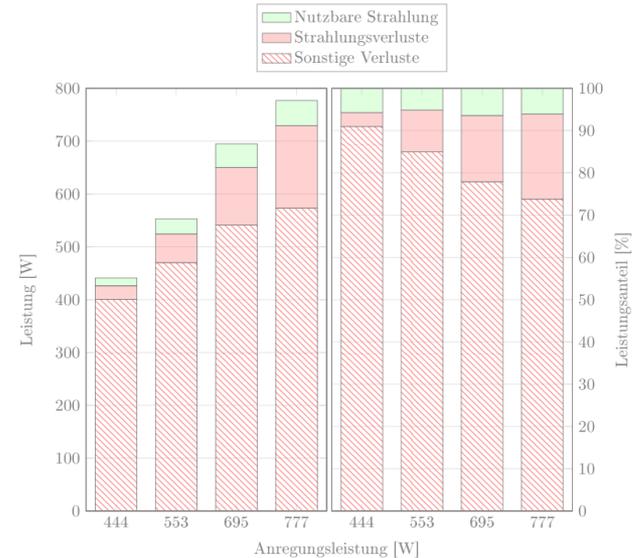
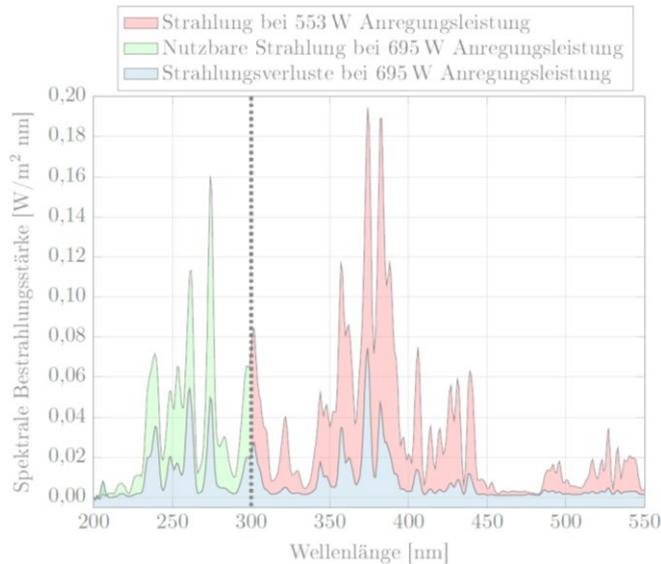


# Zusammenfassung Plasmasimulation

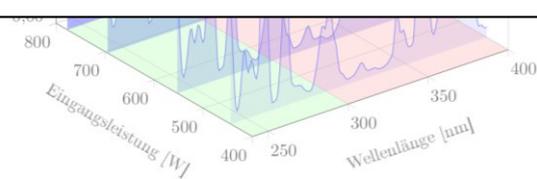
## Anwendbarkeit der Simulationemethode

- Simulation Plasma
  - Teilchendichteverteilungen
    - Strahlerentwicklung
  - Temperaturverteilung
    - Strahlerentwicklung
  - Impedanzverhalten
    - Entwicklung von Leistungsversorgung

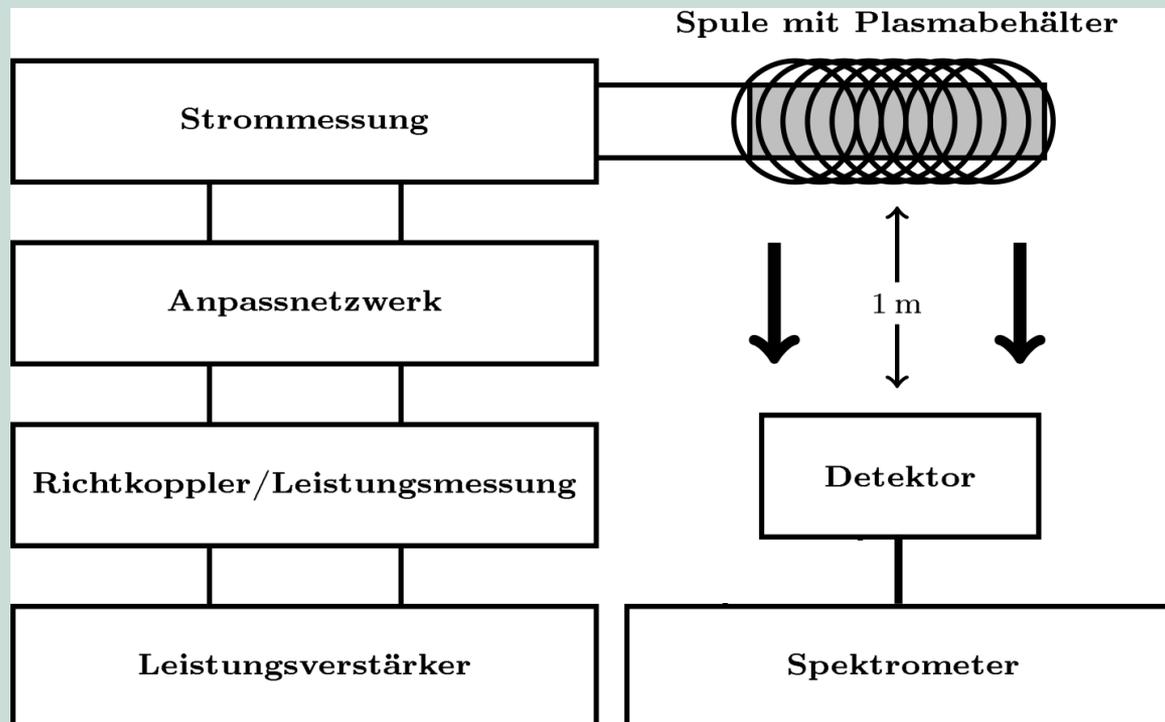




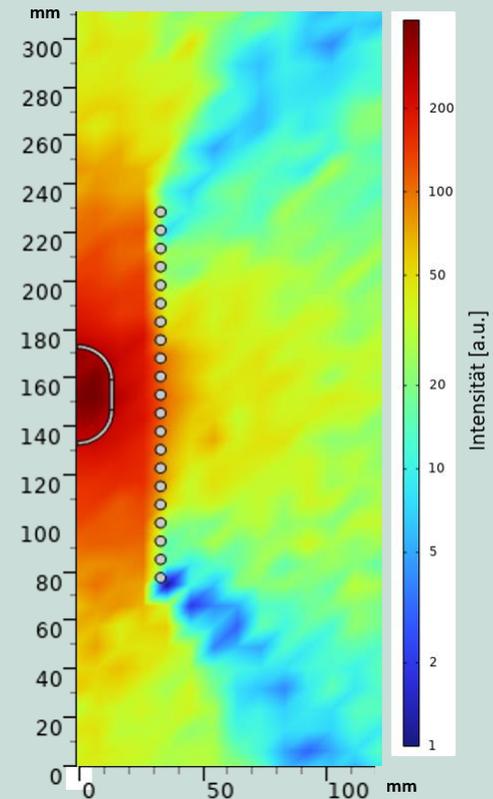
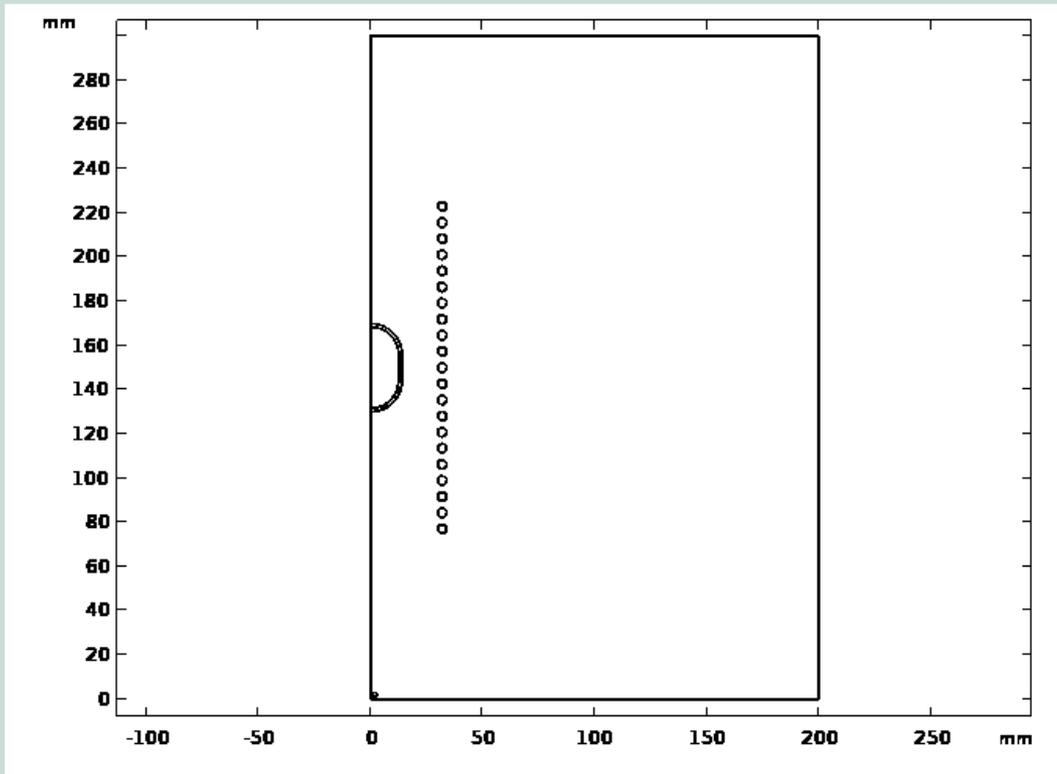
# Strahlungsverteilung und Strahlungsvermessung



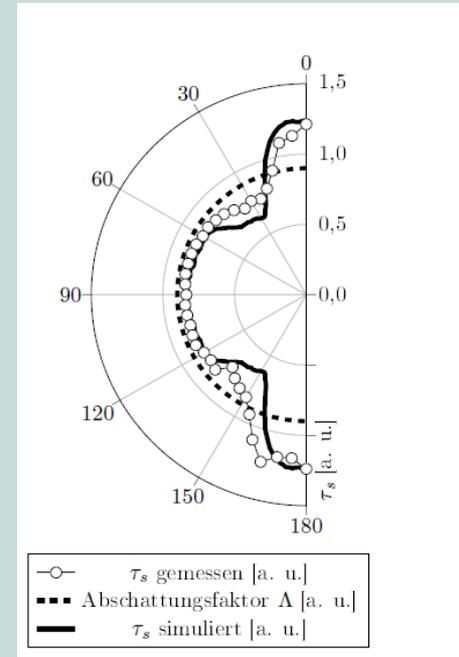
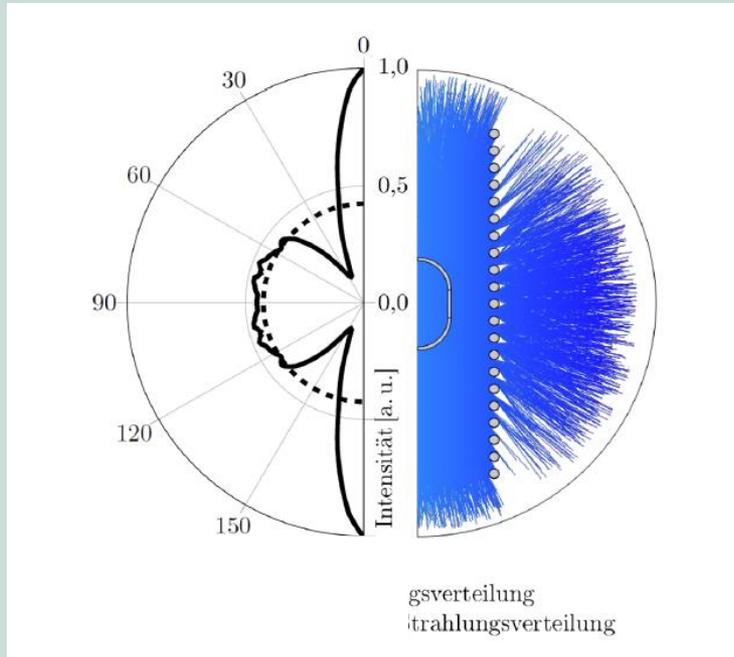
## Skizze Messaufbau



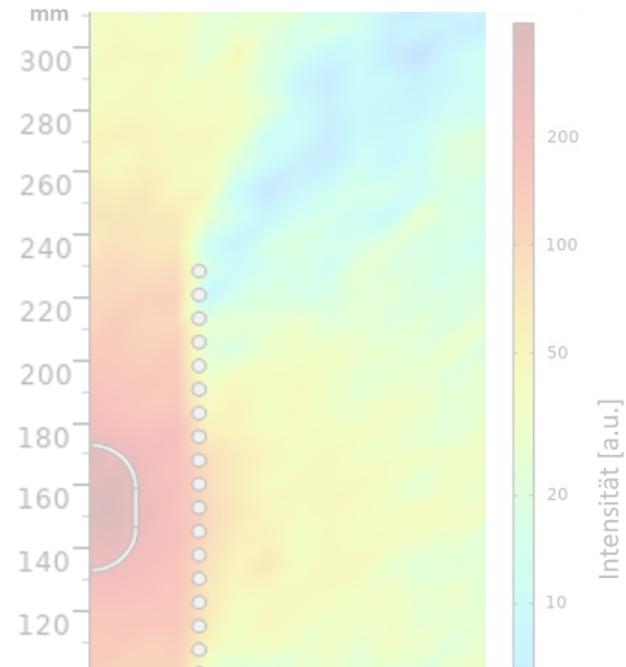
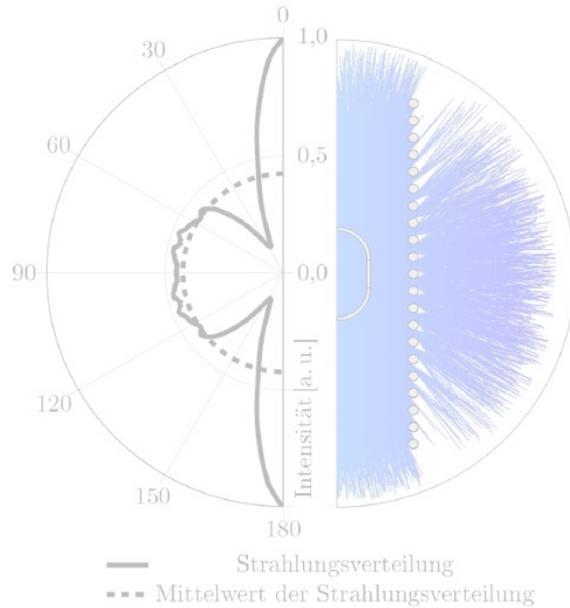
## Raytracing und Intensität



## Spulenabschattung



Fehler im Bereich von  $\approx 6\%$



# Zusammenfassung Strahlungsverteilung und Strahlungsvermessung

## Anwendbarkeit der Simulationemethode

- Simulation Strahlungsverteilung
  - Bestimmung der Spulenabschattung
    - Effizienzbestimmung
  - Intensitätsverteilung
    - Bsp. Anwendung in Bezug zur DIN/TS 67506:2022 möglich

DIN/TS 67506:2022-02

### 7.3.3 Bestimmung der Bestrahlungsstärke — validierte Simulationemethoden

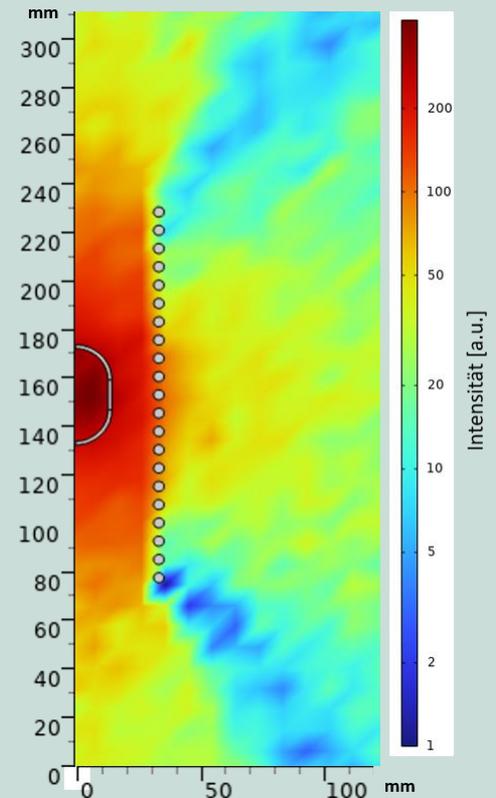
Komplexe Simulationemethoden können die Bestrahlungsstärkeverteilung im Raum und/oder die Fluenz berechnen.

Die Bestrahlungskammer ist hierbei mit all Ihren Eigenschaften (Geometrie, Reflexionsgrade, Abschattungen) möglichst vollständig abzubilden. Die Simulation muss über eine virtuelle Detektorfläche an mehreren Messpunkten mit den Messergebnissen der Bestrahlungsstärkemessungen validiert werden.

Aus der Simulation wird der Mittelwert der Bestrahlungsstärke in der  $E_{avg,sim}$  ermittelt und kann verwendet werden, um die Dosis  $H$  zu berechnen.

Für die Validierung des Simulationemodells ist die Bestrahlungsstärke an mindestens drei Messpunkten messtechnisch zu überprüfen und mit der Simulation abzugleichen. Die Messpunkte müssen dabei an räumlich deutlich unterschiedlichen Stellen in der Bestrahlungskammer liegen, so dass unterschiedliche Verhältnisse zwischen direkter Lampenbestrahlung und Reflexionsanteil auftreten.

ANMERKUNG Einer der größten Einfluss-Faktoren auf das Simulationsergebnis ist die Reflexionseigenschaft des Materials, die ohne Messung nur annähernd anhand von Tabellenwerten berücksichtigt werden kann.





## Vielen Dank



**Deutsche Akademie für Photobiologie und Phototechnologie e.V.  
(DAfP)**

Gesellschaft für technische und medizinische  
Anwendungen optischer Strahlung



Eco-UV is a research project funded under the  
European Union's Horizon research and innovation  
2020 programme, Grant Agreement 641702