

8te Bundesdeutsche Fachtagung Plasmatechnologie, Dresden, 15-17.9.1997

Berechnung anwendungsrelevanter Zielgrößen von thermischen Lichtbögen: Katodenfallmodelle und deren Integration in die Lichtbogenmodellierung

1. Motivation - Wozu werden Katodenfallmodelle benötigt?
2. Anforderungen an ein anwendungsrelevantes Katodenfallmodell.
3. Bisher realisierte Konzepte: Das *SubGrid*-Modell.
4. Das *Transferfunktionen-Konzept* zur Nutzung von Katodenfallmodellen.
5. Beispiele und Vereinfachungen.
6. Versuch einer Interpretation der Braunschweiger Transferfunktion.
7. Zusammenfassung und Ausblick.

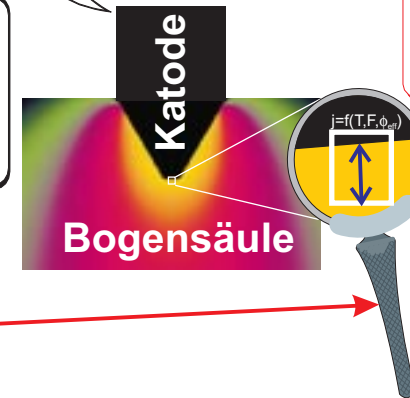
1. Motivation: Wozu werden Katodenfallmodelle benötigt?

Reine Säulenmodelle (>50 Publikationen):

- 2-D, teilweise 3-D, teilweise zeitabhängig.
- umfangreiche Implementierungen von phys. Effekten (Konvektion, PLTE ...).
- gute Übereinstimmung mit gemessenen Temperaturverteilungen.
- Elektrodeneffekte nicht berechenbar.
- Randbedingungen = Fitparameter!?

Stationäres Modell des Energie- und Stromtransportes im Festkörper [FDM Numerik]

Stationäres MHD-Modell
+ 2-D (r,z)
+ incl. Hydrodynamik
+ $T_e \neq T_h$
[FDM Numerik]



Lokal 1-D Modell der Nichtgleichgewichtsschichten

Reine Katodenfallmodelle (>50 Publikationen):

- 1-D, ortsabhängige oder globale Bilanzen.
- "Zoo" von physikalischen Effekten und Näherungen.
- Randbedingungen = Fitparameter!?

Integrierte Modelle (<10 Publikationen):

- lokal 1-D Untergitter [Delalondre et.al. 1990, Lowke et.al. 1992 ff.].
- erweitertes 2-D-Modell (diffusionsgestützte *non-LTE* Leitfähigkeit) [Fischer'84, Neiger'97, ...].

Was fehlt noch?

- quantitative Evaluierung / Nachweis der Extrapolationsfähigkeit.
- Implementierung in praktisch nutzbare Software / Visualisierung.
- Anwendung (**Voraus**berechnung eines speziellen Entladungsverhaltens).

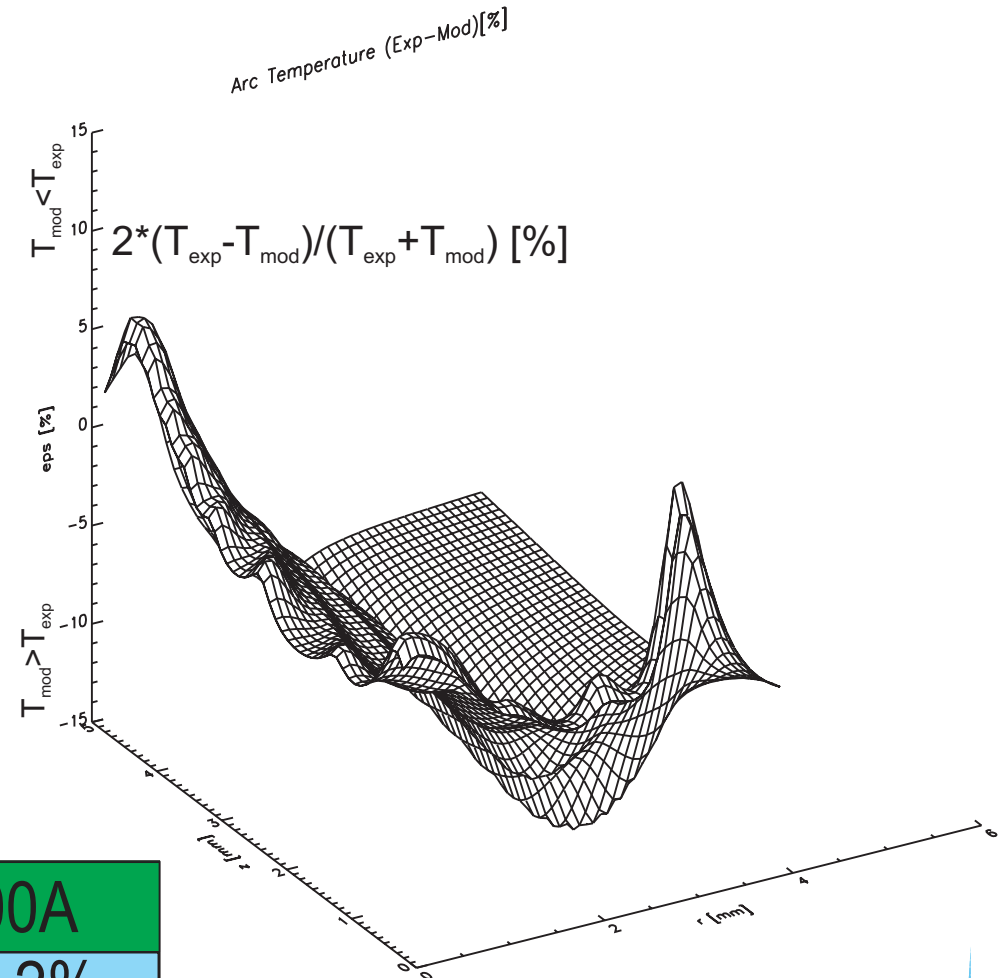
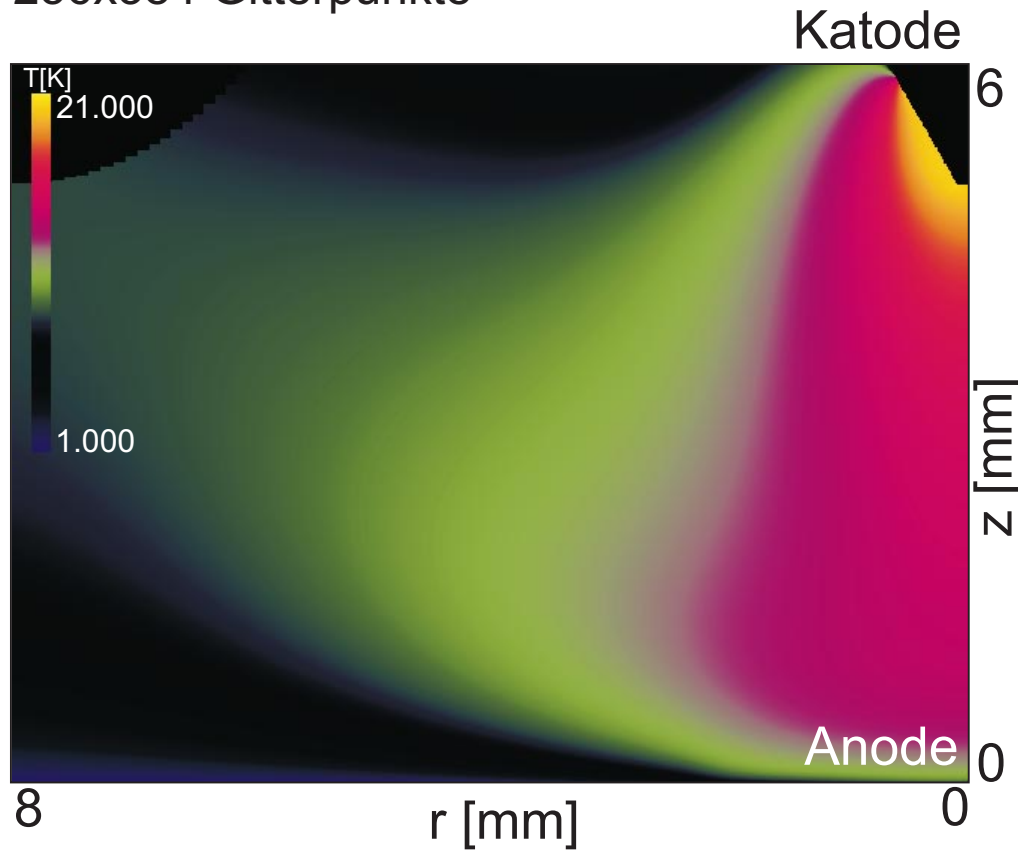
Folgerung: es wird ein konzeptioneller Rahmen zur effizienten Implementierung von in der Literatur einzeln modellierten physikalischen Effekten benötigt!?

Quantitativer Vergleich von Modell & Experiment:

Modell: 5mm Argonbogen (0.1MPa),
 $I=100\text{A}$, $j_0=10^8 \text{ A/m}^2$, 60° Spitze
 256x384 Gitterpunkte

Experiment:

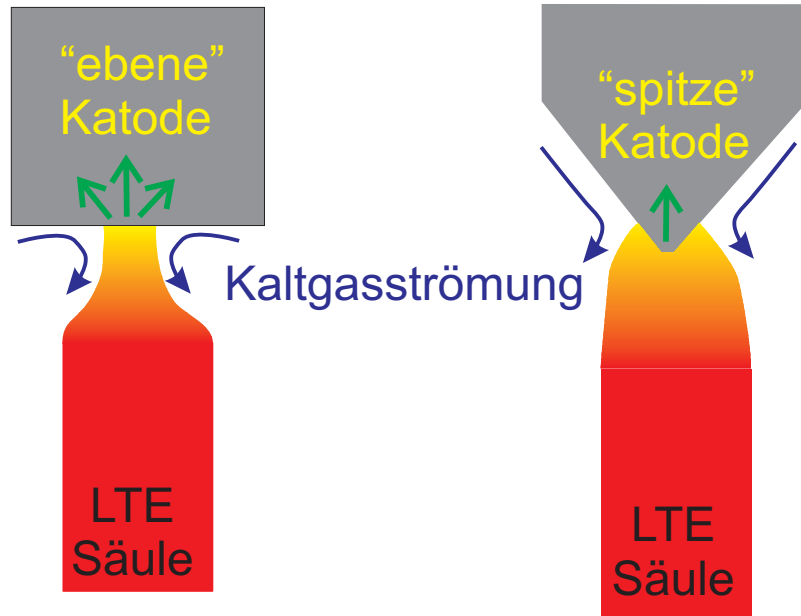
Bogenparameter wie im Modell
 Emissionsspektroskopie [Hsu'82]



Modell	Exp.	100A	200A
100A		-5,8%	+5,2%
200A		-18,3%	-7,2%

1. Motivation: Was führt zur Bildung des Katodenbrennflecks?

Es existiert kein 1-dimensionaler Brennfleck:



Katodenfestkörper:

- Wärmeleitung
- Joule'sche Heizung

2-3 D

Oberfläche:

- Strahlungskühlung
- Ionen- & Elektronenheizung
- Emissionselektronenkühlung
- Wärmeleitung

lokal

Plasma:

- Raumladungszone
- Ionisationszone
- Temperaturaufspaltung
- Kaltgasstrom
- Katodenjet

2-3 D

Die Brennfleckbildung ist eine *emergente* Eigenschaft des skizzierten Systems, eine Untersuchung der isolierten Einzelsysteme kann keine quantitativen Vorhersagen liefern!

2. Anforderungen an ein anwendungsrelevantes Katodenfallmodell

Vorüberlegung:

ein reines 1-D Katodenfallmodell berechnet i.a. Plasmaparameter, die nicht direkt experimentell überprüfbar sind, d.h. eine **Validierung** muß **über** die Auswirkungen erfolgen, die sich aus der **Ausbildung des Brennflecks** als emergente Eigenschaft des Systems

{Katodenfestkörper / Raumladungszone / Ionisationszone / [P]LTE-Plasma} ergeben:

- Brennspannung, katodennahe Plasmatemperatur, ...

Voraussetzung:

ein wohldefiniertes Randwertproblem ohne Parameter, die nicht im "Argumentvektor" einer entsprechenden Transferfunktion vorkommen.

z.B.:

1. Hoffert & Lien '67, Hsu & Pfender '83, Delalondre et.al. '90, ...
2. Zhu, Lowke et.al. '92 ff.
3. Benilov '95 ff.
4. Schmitz & Riemann '96 ff.

Auswahl: 1.+RLZ = Rethfeld et.al. '96

3. Bisher realisierte Konzepte: Das *SubGrid*-Modell.

[EDF, F] Delalondre & Simonin, *J.Physique* **C5** ('90), 199

[CSRIO, AU] Zhu, Morrow & Lowke, *J.Phys.D* **25** ('92) 1221 & 1600, **26** ('93) 634 & 1073, **28** ('95) 1369

Bogenplasma:

- 2-D LTE Modell (CFD/MHD)
- radialsymmetrisch
- stationärer frei brennender 0.1 MPa Argon Bogen (200A)

Katodenfall:

- 1-D Untergitter
- n_e & T lokal ortsabhängig

Kriterium	[EDF, F]	[CSRIO, AU]
Modelltyp	Teilchen- & Energiebilanz, Verallg. Ohm	Teilchen- & Energiebilanz, Verallg. Ohm
Vorschicht	ja (T_e, T_h) [ja] (n Glg.)	nein ($T_e = T_h$) [ja] (n Glg.)
- Bohm Kriterium	nein	nein
Raumladungszone	ja [5V]	nein
Elektronenemission	ja (Richardson)	ja (Richardson)
Numerik	SUBGRID	SUBGRID (n=50)
Integration in LB-Mod.	200A, 10mm, Ar	200A, 5mm, Ar

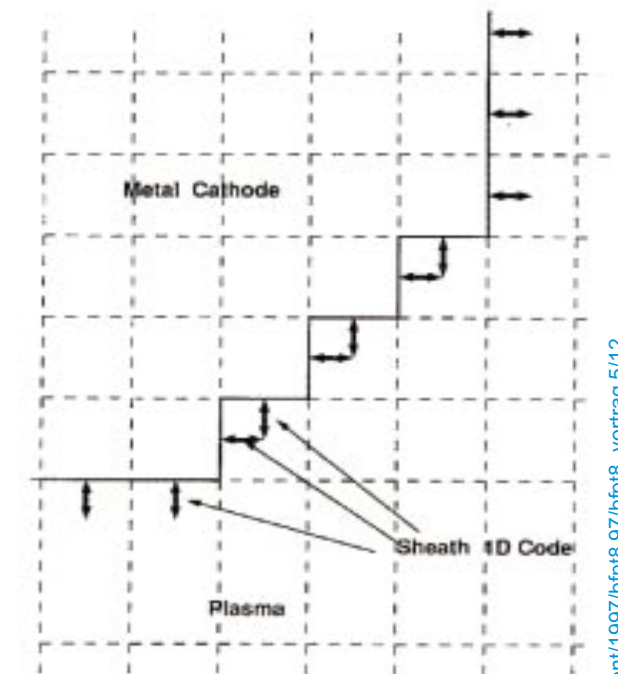
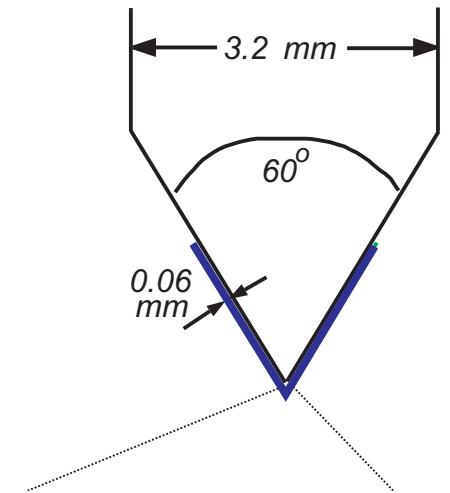


Figure 1. The grid system for representing the cathode surface and non-equilibrium sheaths.

4. Das *Transferfunktionen*-Konzept zur Nutzung von Katodenfallmodellen:

Grundidee:

Trennung der physikalischen Beschreibung:

◆ 2-D-Bereiche (Plasma, Elektroden) \Rightarrow [CFD/MHD Numerik]

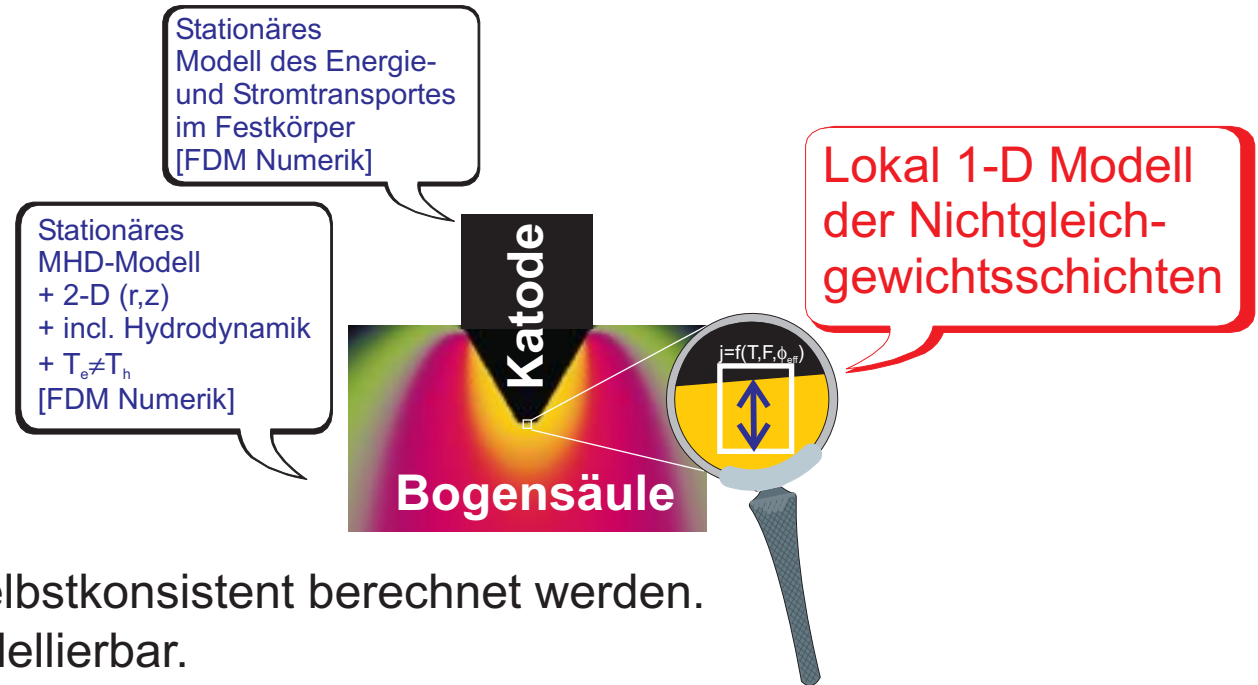
und

◆ lokal 1-D Grenzschichten vor den Elektroden

(Prozesse, deren Skala zu groß ist müssen ggf. in die mehrdimensionale Beschreibung integriert werden:

z.B. $T_e \neq T_h$ d.h. PLTE)

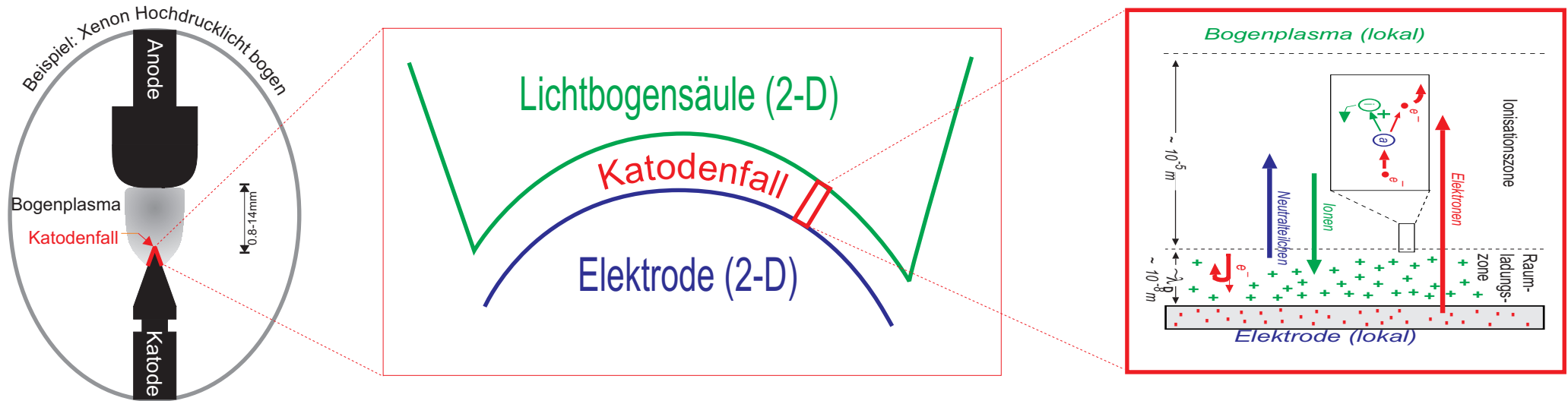
\Rightarrow [angepasste Numerik, i.a. ODE-BVP-Solver, $\Delta x \neq const.$]



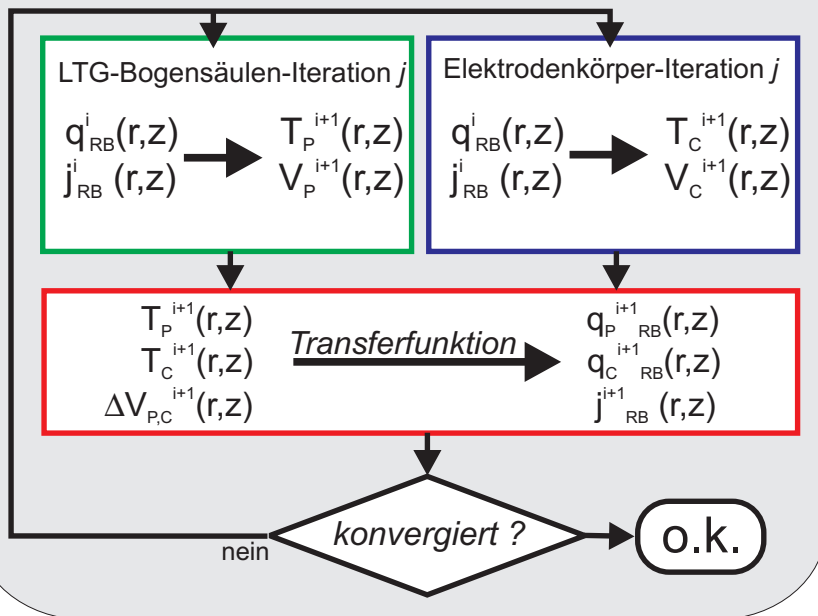
Vorteile:

- ◆ die Dicke der Randschicht kann selbstkonsistent berechnet werden.
- ◆ stark nichtlineare Phänomene modellierbar. (z.B. Katodenfall mit Raumladungszone)
- ◆ Beschränkung des numerischen Aufwandes durch einmalige Berechnung des Elektroden-Plasma-Übergangs in Form einer **Transferfunktion**:
 - die dann für verschiedene Entladungsgeometrien und Ströme verwendet werden kann!
 - die sich ggf. für bestimmte Anwendungen stark vereinfachen lässt!?

5. Ein Beispielalgorithmus zur Berechnung der Brennfleckbildung:



Algorithmus:

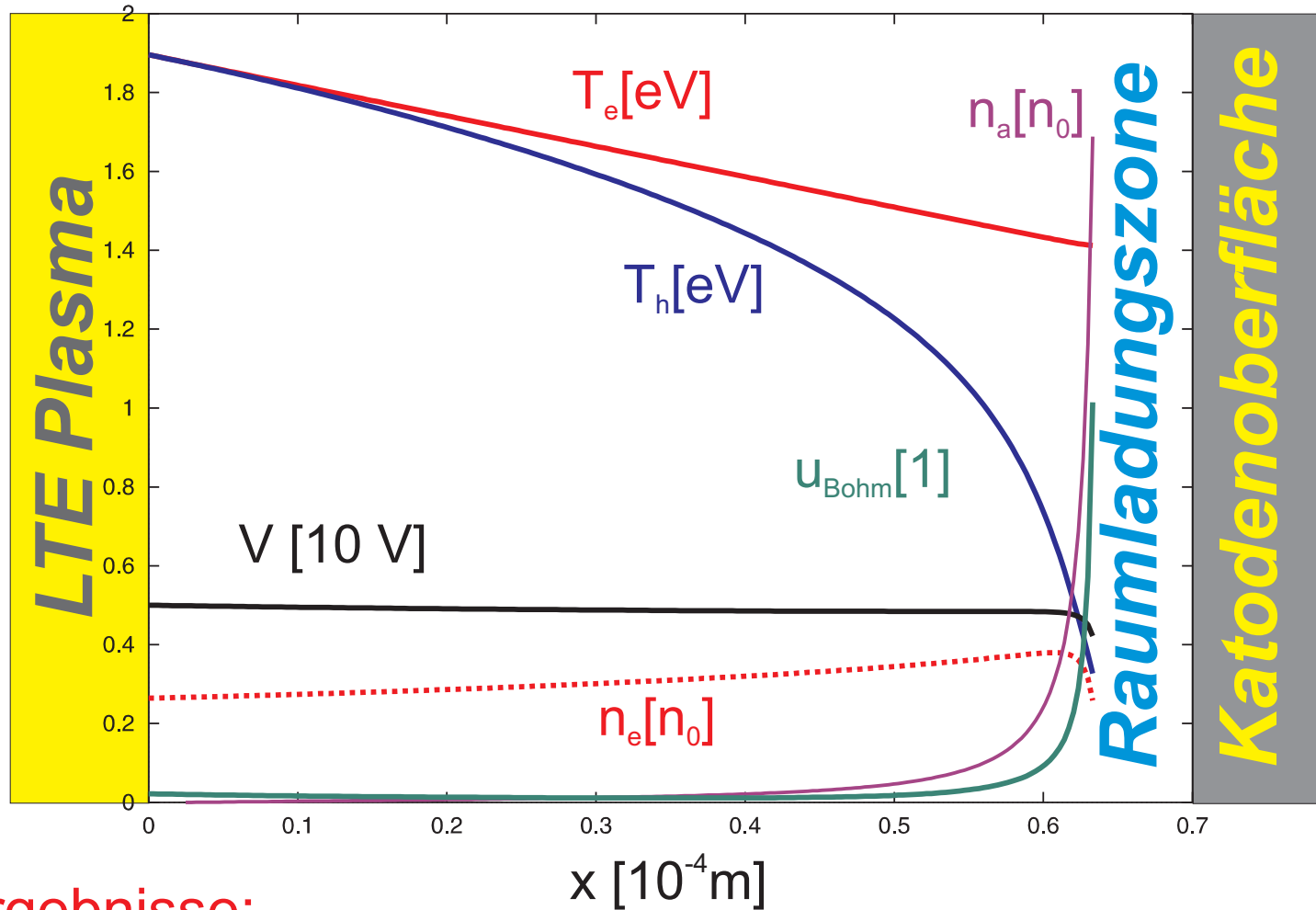


Die Transferfunktion

- enthält die Ergebnisse der Nichtgleichgewichtsrechnungen.
- ist von den 3 Parametern ΔV , T_P und T_C abhängig.
- ist eine Geometrie- und Entladungparameter-unabhängige Größe.
- ist unterschiedlich für verschiedene Austrittsarbeiten und Plasmagase...
- ist einmalig für die ΔV , T_P und T_C zu berechnen, die im Brennfleck vorkommen.

5. Ein "typischer" Katodenfall (0.1 MPa Argon / WTh20):

Parameter: $T_c = 3700$ K, $T_p = 22.000$ K, $V_p = 5$ V



Ergebnisse:

$$j_{td} = 9 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2 \left\{ j_{\text{Richardson+Schott}} = 3 \cdot 10^8, j_{\text{ion}} = 0.5 \cdot 10^8, j_{e, \text{Plasma}} = -2.6 \cdot 10^8 \right\}$$

$$q_c = -3.7 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2, V_{RLZ} = 4.23 \text{ V}$$

5. Einfache Modelle des Katoden-Plasma-Übergangs:

[Lowke et.al., *J.Phys.D* 30 ('97) 2033]

- ◆ *Ortsabhängig:*
 $n_e(x)$ aus ambipolarer Diffusionsgleichung.
- ◆ *Konstant:*
 $T_e = T_h = T_{\text{Plasma}}(r, z)$
- ◆ thermische Elektronenemission: $j \leq j_{\text{Richardson}}$
- ◆ Lokaler Quellterm an der Katodenoberfläche:
 $q_c = -\varepsilon a T^4 - |j_e| \phi_{\text{eff}} + j_{\text{ion}} V_{\text{ion}} - \lambda \nabla T$
- ◆ keine Raumladungszone (Schottkymodell).

⇒ wohldefiniertes Problem mit der Transferfunktion $\{T_P, E_P, T_C\} \Rightarrow \{\sigma_{\text{eff}}, \kappa_{\text{eff}}, q_C\}$

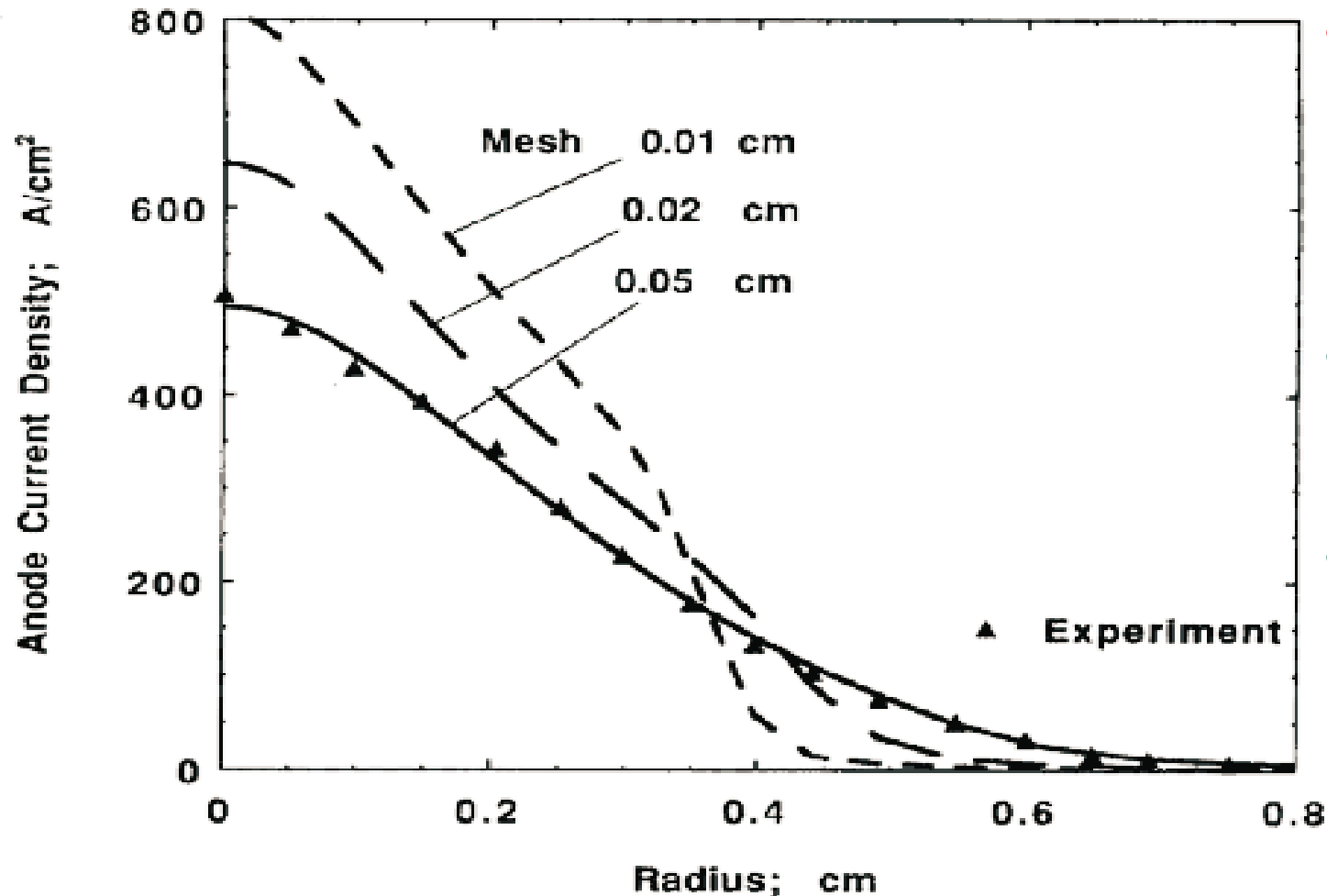
Ergebnisse:

- besser als Trivialmodell, da Numerikeffekte an der Katode reduziert werden.
- numerisch praktikabel, da 1-D Teilmodell numerisch einfach.
- anodische Stromdichte weiterhin nur schwer berechenbar!?

⇒ das Trivialmodell mit optimalem Gitter reicht ggf. schon aus:

$$j = \sigma_{\text{Plasma}} E_P = j_{\text{ion}} + j_{\text{Richardson}} \Rightarrow j_{\text{ion}} \Rightarrow q_c = -\varepsilon a T^4 - |j_e| \phi_{\text{eff}} + j_{\text{ion}} V_{\text{ion}} - \lambda \nabla T$$
$$\sigma_{\text{eff}} = (1/\sigma_P + 1/\sigma_C)^{-1}, \kappa_{\text{eff}} = (1/\kappa_P + 1/\kappa_C)^{-1}$$

triviale Transferfunktion: $\{T_P, E_P, T_C\} \Rightarrow \{\sigma_{\text{eff}}, \kappa_{\text{eff}}, q_C\}$



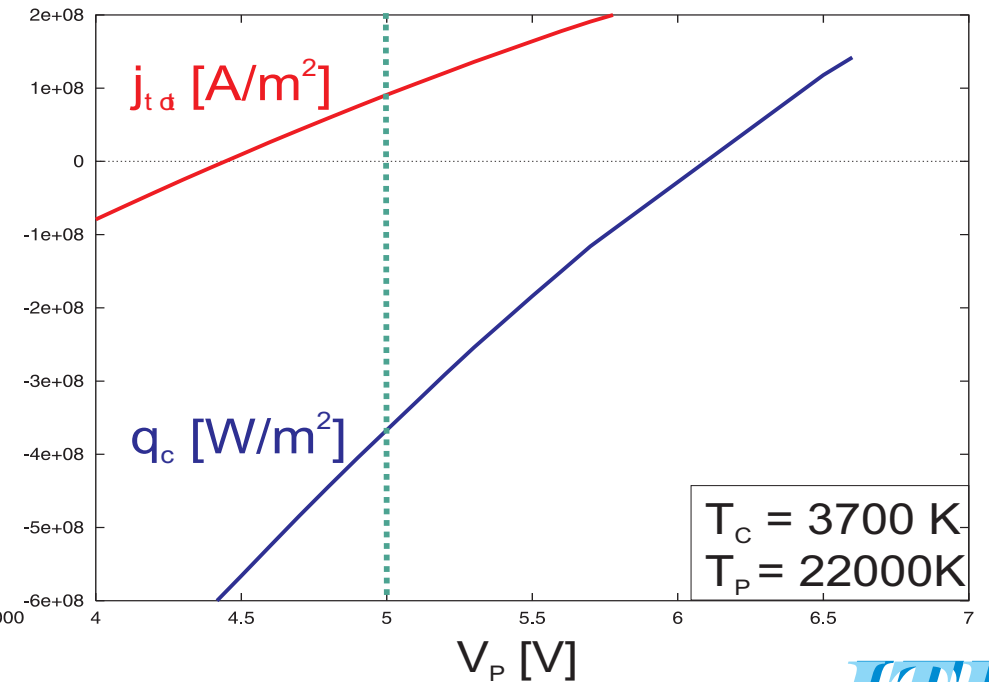
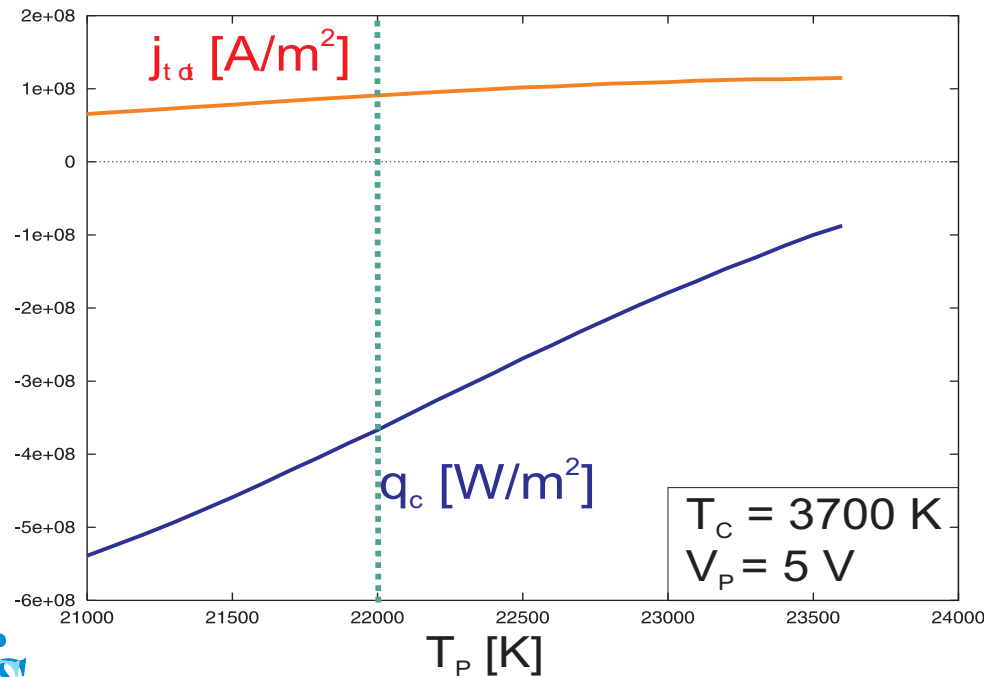
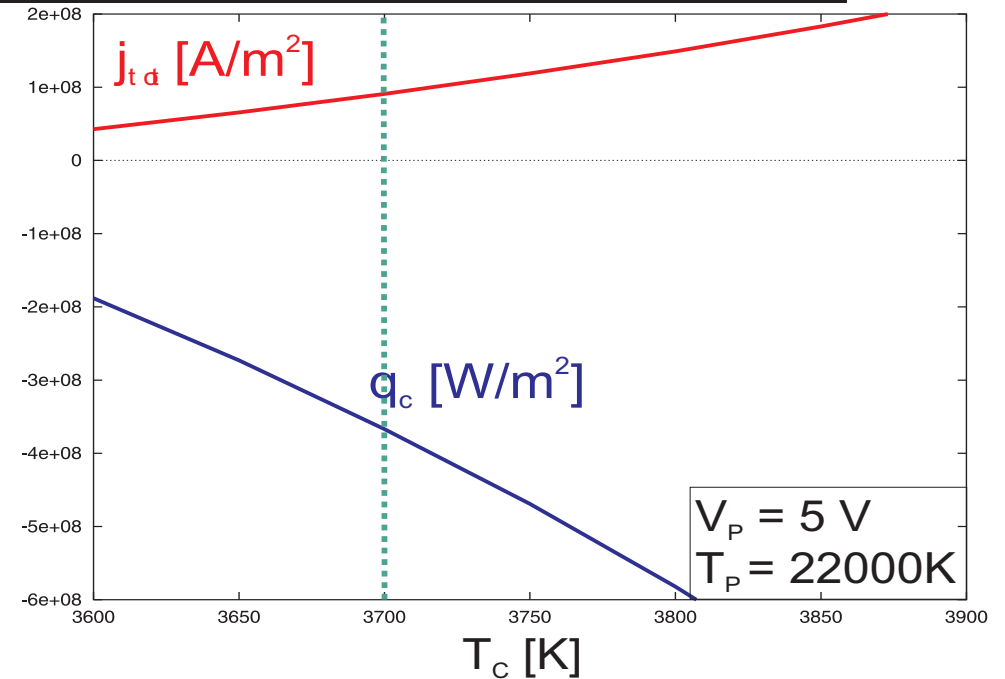
- golden rule of CFD: “use grids as coarse as possible”

- Die optimale Gitterschrittweite entspricht der Dicke des Anodenfalls!?
- Allein die Kenntnis der Ausdehnung der Nichtgleichgewichtsschichten kann also bereits von Nutzen sein!

Figure 11. Predicted current densities as functions of the radius at the anode of a 200 A arc, for various values of the axial mesh size at the anode, compared with the experimental results of Nestor [34].

6. Versuch einer Interpretation der 0.1 MPa Ar/Wth Transferfunktion:

- für einen zu kleinen Spannungsabfall wird der Emissionsstrom durch den Elektronenrückdiffusionsstrom kompensiert.
- eine zu große Oberflächentemperatur führt zu starker Kühlung.
- es gibt einen *stabilisierbaren* Bereich für die Katodenfallspannung (hier 4.5...5V) mit einer effektiven Stromdichte von 10^8 A/m^2 und effektiver Kühlung der Oberfläche.



Berechnung anwendungsrelevanter Zielgrößen von thermischen Lichtbögen: Katodenfallmodelle und deren Integration in die Lichtbogenmodellierung

7. Zusammenfassung und Ausblick:

- Die Berechnung von anwendungsrelevanten Daten (z.B. anodische Energiedichte) mit reinen Modellen der Lichtbogensäule liefert oft quantitativ falsche Werte, da die Elektrodenphänomene den Lichtbogen ganz wesentlich beeinflussen können.
- Die Brennfleckbildung an der Katode ist ein zumindest zweidimensionales Phänomen.
- Eindimensionale Katodenfallmodelle liefern erst praktisch verwertbare Informationen, wenn Sie in die mehrdimensionale Berechnung des Lichtbogens integriert werden.
- Es existiert noch kein allgemeingültiges eindimensionales Katodenfallmodell.
- Beim 0.1 MPa Argonbogen bestimmen Temperaturaufspaltung, Nichtgleichgewichtsionisation und Raumladungszone den Katodenfall.
- Ein 2-dimensionaler Lichtbogencode mit der Berücksichtigung der Nichtgleichgewichtsgebiete vor den Elektroden in Form einer Transferfunktion sollte:
 - ◆ den effizienten Vergleich der Anwendungsrelevanz von Katodenfallmodellen gestatten.
 - ◆ die mehrdimensionale Brennfleckbildung berechnen.
 - ◆ je nach Parameterbereich optimale Katodenfallmodelle benutzen.