

# Grundlagen der Plasmatechnologie



Sommersemester 2015

Dr.-Ing. Rainer Kling

# Übersicht über die Vorlesung

- 1. Einleitung**
  - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
  - 1.2. Anwendungen
  
- 2. Physikalische Grundlagen des Plasmas**
  - 2.1. Grundbegriffe
  - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
  - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
  - 2.4. Plasmadynamik
  - 2.5. Transportprozesse
  
- 3. Erzeugung eines Plasmas**
  - 3.1. Stationäre Gasentladung
  - 3.2. Entladung im Wechselfeld
  
- 4. Plasmen in der technischen Anwendung**
  4. Überblick
    - 4.1. Niederdruckentladungen
      - 4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse
      - 4.1.2. Dünnschichtbeschichtungen
      - 4.1.3. Plasma Ätzprozesse
      - 4.1.4. Plasma Sputtern
      - 4.1.5. Plasma Funktionalisieren
      - 4.1.6. Plasma Strahler direkt
    - 4.2. Plasmafusion
  
- 5. Diagnostik**
  - 5.1. Überblick Verfahren
    - 5.11. Die Plasma Randschicht
  - 5.2. Sondenmessungen
  - 5.3. Mikrowellenmessungen

Kap. 3 ab 21.5.15

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## •Gesetz von Paschen

- Mit  $\boxed{\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1}$
- der Townsendschen Zündbedingung

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B}{Ez / p}\right) \\ E = E_z = U_z / d \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha \cdot d = A \cdot p \cdot d \cdot \exp\left(-\frac{B}{U_z / (p \cdot d)}\right) =$$

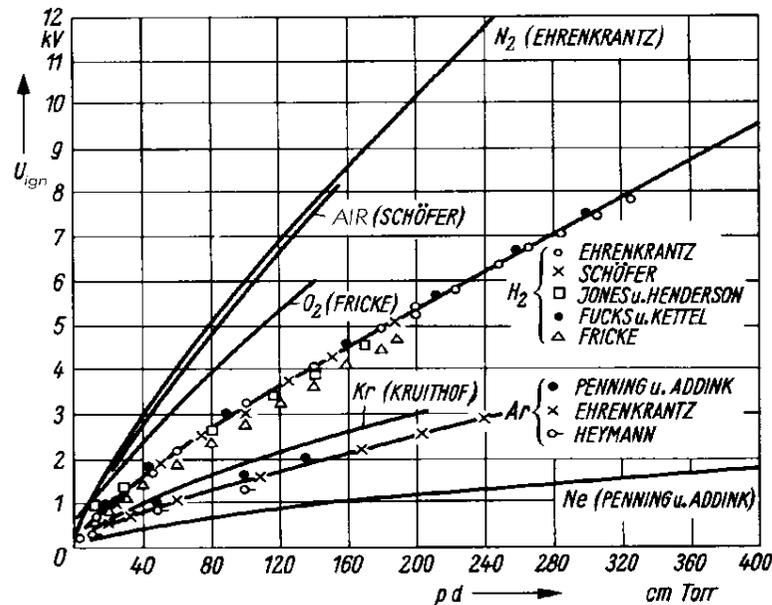
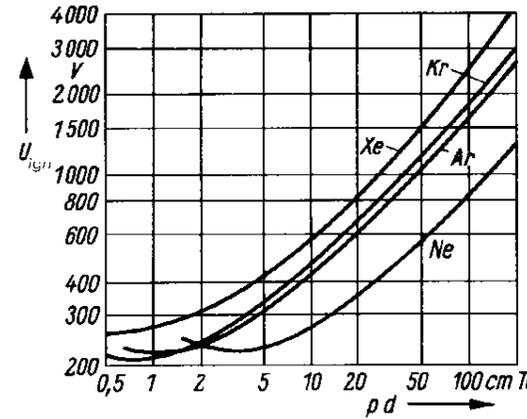
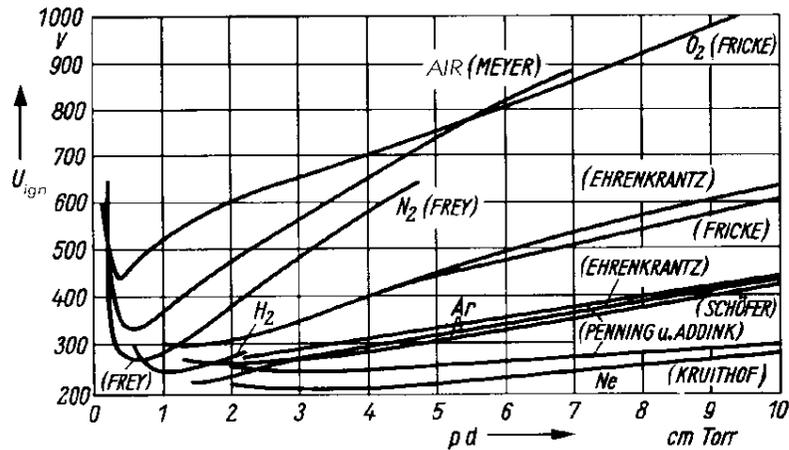
$$\boxed{U_z = B \cdot \frac{p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + \ln \frac{A}{\ln(1 + 1/\gamma)}}$$

•Bei der Zündspannung  $U_z$  ist die Townsendsche Zündbedingung erfüllt; es erfolgt ein elektrischer Durchschlag (Funke) von der Kathode zur Anode.

•**Gesetz von Paschen:** Die Zündspannung ist eine Funktion von  $p \cdot d$ .

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## • Erst-Zündspannungen von Gasentladungen



• **Tatsächlich** wird der Edelgasdruck um ca. 2 Zehnerpotenzen größer als dem Minimum entsprechend gewählt, um ein Ionenabtrag der Elektrode - Sputtern - zu vermeiden, so dass die Zündspannung bei kalten Elektroden viel höher ist.

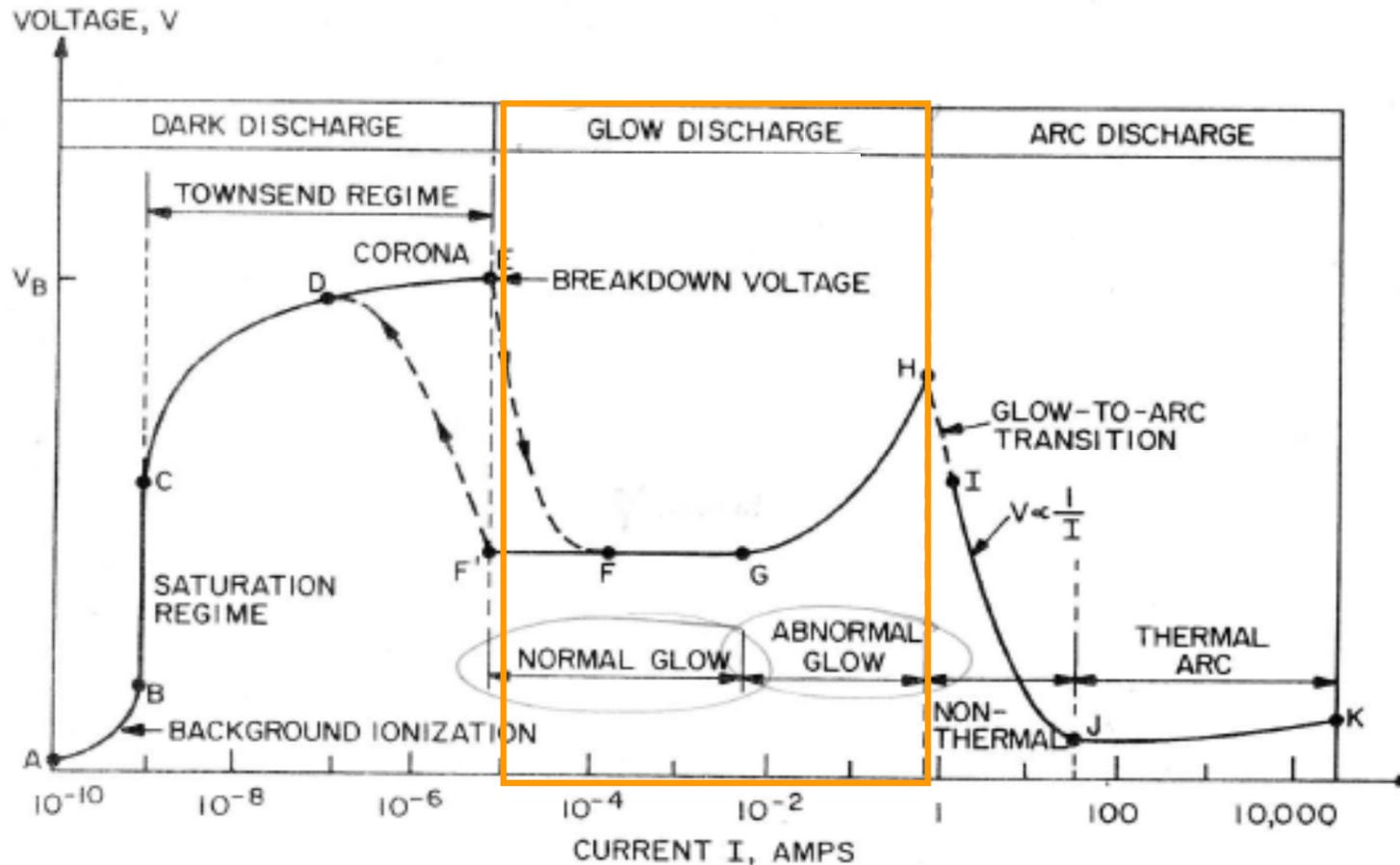
- Für Edelgase liegt die minimale Zündspannung bei nur 200 – 300 V für  $p \cdot d = 0,5 - 4 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ !
- Für Luft Zündminimum bei 300 V für  $d = 10 \mu\text{m}$ !

• Noch nach dem Abschalten **heiße Lampen** benötigen weit höhere Zündspannungen von 1 - 100 kV! Nach Abkühlen sind sie wieder leichter zündbar.

**Wiederzündspannung** nach Stromnulldurchgängen bei AC-Betrieb um so kleiner je höher die Frequenz!

# Stationäre Gasentladung

- Typen stationärer Gasentladungen



Spannung  $U$  über einer Gasentladung in Abhängigkeit vom eingepprägten Strom  $i$  durch das Plasma

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Glimmentladung

### Merkmale:

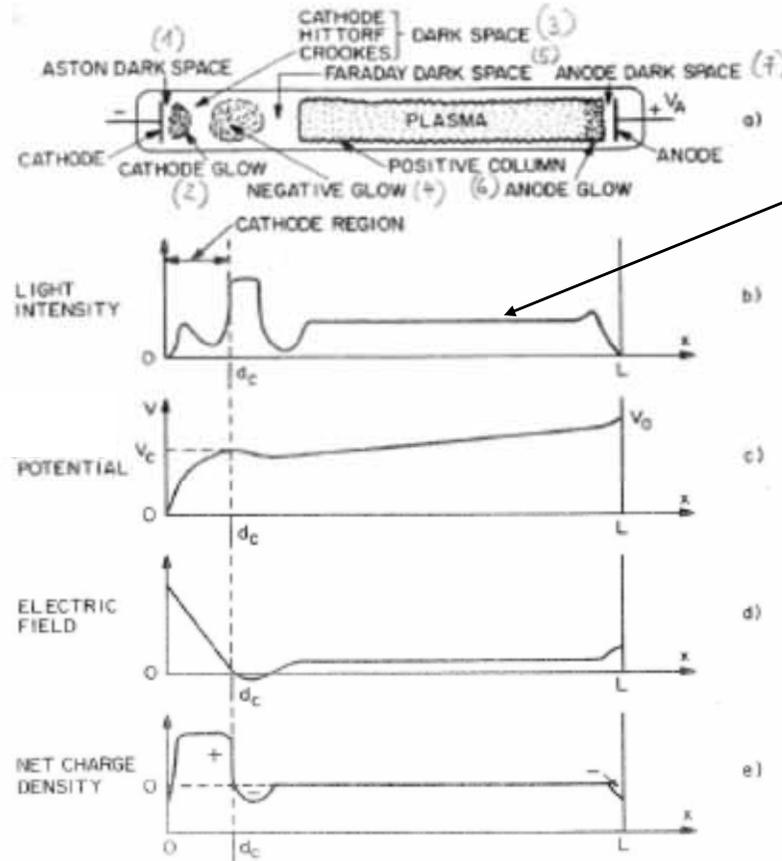
- niedrige Stromstärken ( $\mu\text{A}$  ...  $\text{mA}$ )
- hohe Brennspannung ( $> 100 \text{ V}$ )
- subnormale, normale, anomale Glimmentladung
- niedriger Gasdruck ( $1 \dots 10^5 \text{ Pa}$ )

### Zur Glimmentladung (siehe Übersichtsbild normal glow)

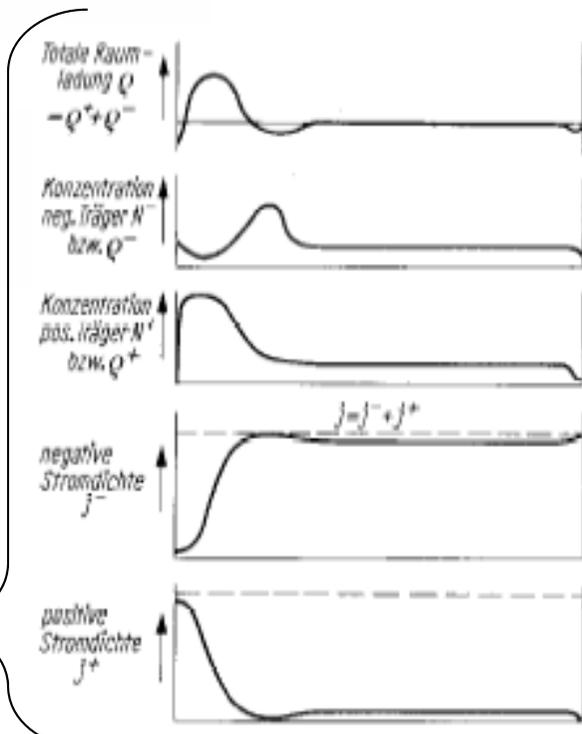
- Dicht vor der Kathode entsteht eine pos. Raumladung von Ionen. Jedes Elektron aus einer kalten Kathode (K) muss nahe der K mindestens  $1/\gamma \approx 50$  Ionen für ein neues Startelektron erzeugen. Der Strom vor der K ist i.w. ein Ionenstrom. Um  $1/\gamma$  Ionen vor K zu erhalten, wird ein hohes el. Feld vor K benötigt. Dieses wird geliefert durch eine pos. Raumladung sehr nahe K ( $0,01 - 0,001 \text{ mm}$ ). Der Spannungsabfall zwischen K und der pos. Raumladung vor K heißt **Kathodenfall** und solch eine Entladung mit kalter Kathode **Glimmentladung** (im engeren Sinne NLTE-Entladung).

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- Glimmentladung axialer Verlauf



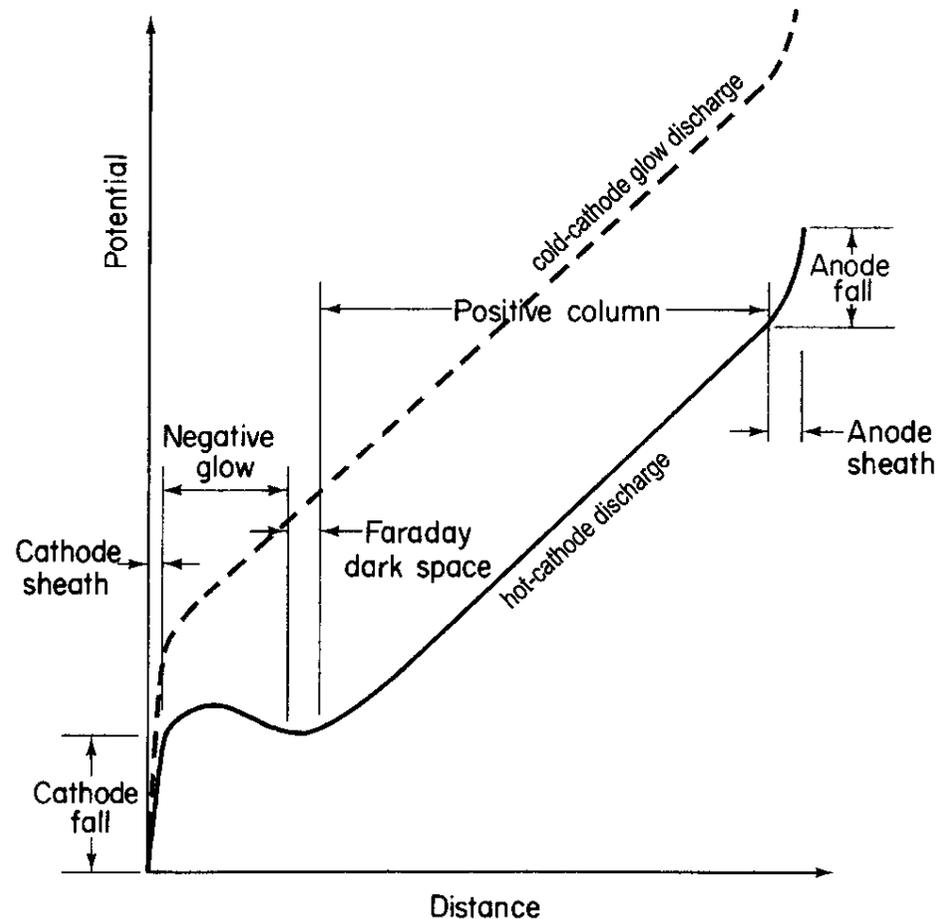
• In der Säule herrscht Quasineutralität!



- Verlauf der Raumladungsdichten und Ströme von Elektronen und Ionen

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- Potentialverteilungen über Glimmentladungen



- Eine heiße Kathode mit  $T > 1500 \text{ K}$  emittiert so viele Elektronen, dass zur Stromkontinuität nur ein Ion pro Startelektron vor der Kathode erzeugt werden muss. Es genügt ein wesentlich kleinerer Kathodenfall von etwa der Ionisierungsspannung!

- Verlauf der Potentialverteilung im Detail

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Kathodenfall

Spannung über der NLTE-Gasstrecke zwischen Kathode und positiver Raumladung vor der Kathode – bei technischen Plasmastrahlungsquellen, abgesehen von Leuchtröhren und Glimmlampen, klein gegen die Brennspannung, weil heiße Bogenkathoden mit kleinem Kathodenfall verwendet werden, um die Verluste durch diese „strahlungslose“ Zone zu begrenzen. In Hochdruckentladungen gleicht der Kathodenfall den zusätzlichen Leistungsbedarf durch den Entzug von Wärme aus dem Plasma in die Elektroden aus.

## Plasma des negativen Glimmlichtes:

- meist vernachlässigbare elektrische Feldstärke
- Ionisation durch Strahlelektronen aus dem Kathodendunkelraum
- Ladungsträgerverluste durch ambipolare Diffusion, teilweise Volumenrekombination möglich
- Starke axiale Gradienten in der Ladungsträgerkonzentration,
- Axiales Diffusionsmodell für die Plasmadichte
- $T_e \sim 0,1 \dots 0,5 \text{ eV}$ ,  $n \sim 10^9 \dots 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

**Plasma nur in der positiven Säule und näherungsweise im negativen Glimmlicht !**  
**Niedertemperaturplasma  $T_e \gg T_i \sim T_N$**

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Plasma der positiven Säule:

Raumladungsfreie Zone hinter der Glimmstrecke längs der Lampenachse, in der lokal die **Elektronendichte gleich der Ionendichte** ist, also die **elektrische Feldstärke konstant** ist. Alle Teilchen können durch eine Maxwell-Verteilung der Geschwindigkeit und Boltzmann-Verteilung der Energie beschrieben werden.

- geringe axiale elektrische Feldstärke
- Ladungsträgergeneration durch Elektronenstoßionisation
- Ladungsträgerverluste durch radiale ambipolare Diffusion (zur Rohrwand)
- diffusive Säule: Theorie von SCHOTTKY für radialen Plasmadichteverlauf
- $T_e \sim 1... 3 \text{ eV}$ ,  $n \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

## Anodenfall

Spannungsabfall über einer schmalen Schicht zwischen Säule und Anode.

Da die Anode keine positiven Ionen emittiert, muss der Strom vor der Anode nur durch Elektronen getragen werden. Dieser Elektronenstrom ist gleich dem Gesamtstrom aus Elektronen und Ionen der Säule. Dafür wird ein größeres Feld vor der Anode benötigt.

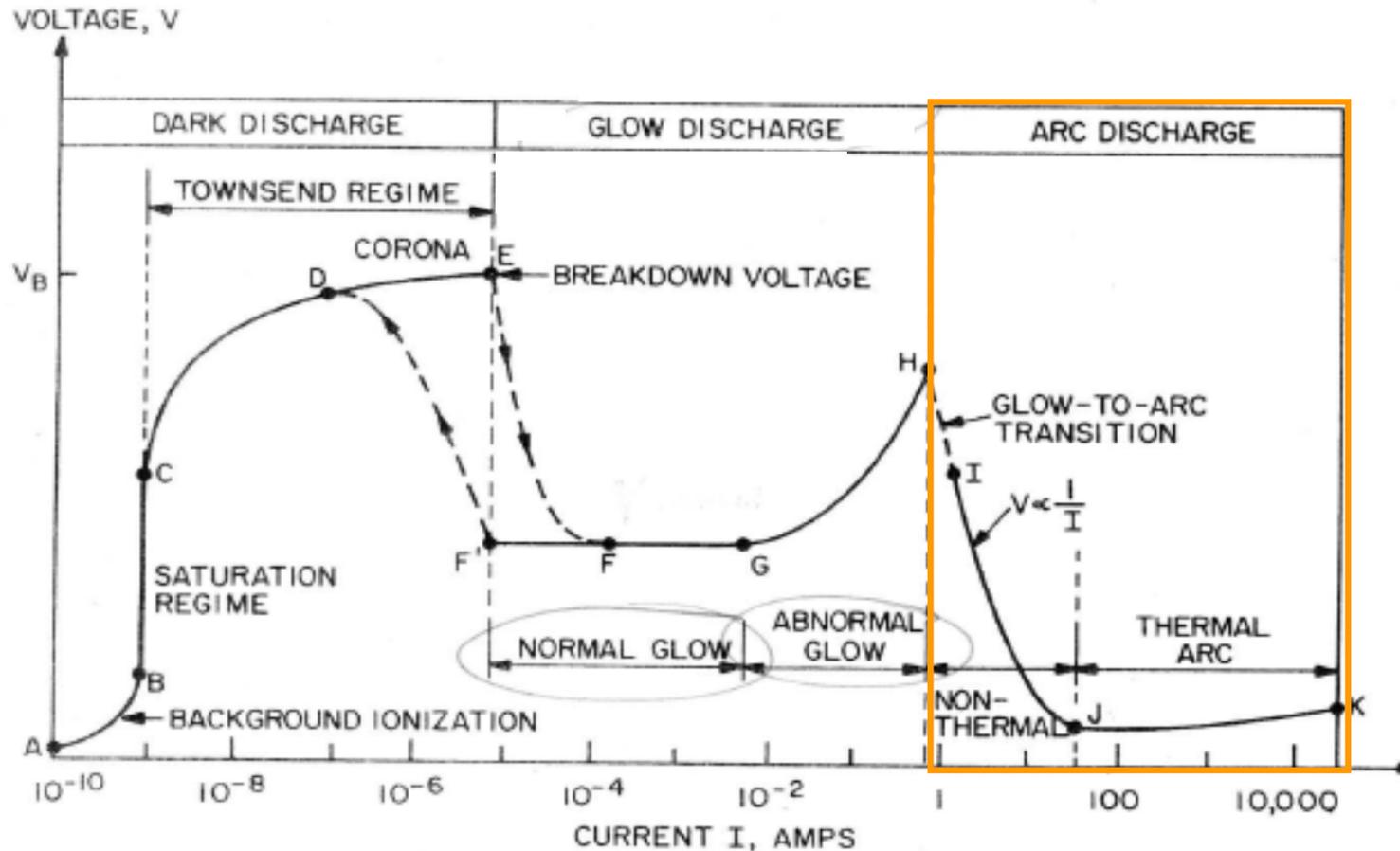
## Spezielle Entladungsformen

- Hohlkathodenentladung
- Koronaentladung (positive/negative Korona)

Weitere Erhöhung der Stromstärke führt zur starken Aufheizung der Kathode und thermischen Elektronenemission ==> Übergang zur Bogenentladung

# Stationäre Gasentladung

- Typen stationärer Gasentladungen



Spannung  $U$  über einer Gasentladung in Abhängigkeit vom eingepprägten Strom  $i$  durch das Plasma

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Nichtstationäre Entladungen

### **Funken-, Barrieren- und Koronaentladung**

Diese im allgemeinen instationären Entladungsformen erfordern sehr hohe elektrische Feldstärken und werden bei Atmosphärendruck beobachtet.

Durchbruchs - Mechanismus:

Der Mechanismus des elektrischen Durchbruches wie er bei Niederdruckentladungen beschrieben wird (Ladungsträgervielfachung und Sekundärelektronenemission an der Kathode im Bereich  $p \cdot dE < 10^4 - 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm}$ ) muss durch einen anderen Mechanismus, z.B. ein **Streamer-Konzept** ersetzt werden. Dieser Mechanismus basiert auf der Ausbildung eines dünnen Entladungskanals zwischen den Entladungselektroden.

Kathoden-gerichteter Streamer bzw. Anoden-gerichteter Streamer:

- Ausgangspunkt sind freie Elektronen
- im starken elektrischen Feld wird ein lokales Plasma erzeugt, das energiereiche Photonen emittiert.
- Reabsorption der Photonen ! Photoionisation, Wachstum des Streamers, Bildung Sekundärer Streamer
- Hochspannungsdurchbruch innerhalb etwa 10 ns.
- Ausbildung einer **Funkenentladung** (Hochstrombogen, 10<sup>4</sup> . 10<sup>5</sup> A), begrenzt durch die Kapazität der Spannungsquelle (äußere Beschaltung).

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Barrierenentladung

In einer **Barrierenentladung** (stille oder dielektrisch behinderten Entladung) bilden sich dünne Entladungskanäle zwischen den Entladungselektroden (Abstand im Bereich 1mm) aus,

wobei eine oder beide Elektroden mit einem Nichtleiter bedeckt sind.

Bei Atmosphärendruck wird statistisch verteilt eine hohe Zahl von kurzlebigen Entladungskanälen (Mikroentladungen) beobachtet.

Eigenschaften der Mikroentladung:

Spannung 5 . 100 kV; Frequenz 50 Hz . 1 MHz; Dauer 1-10 ns; Durchmesser ~ 0,1 mm;

Stromdichte ~  $10^2 \cdot 10^3$  A/cm<sup>2</sup>

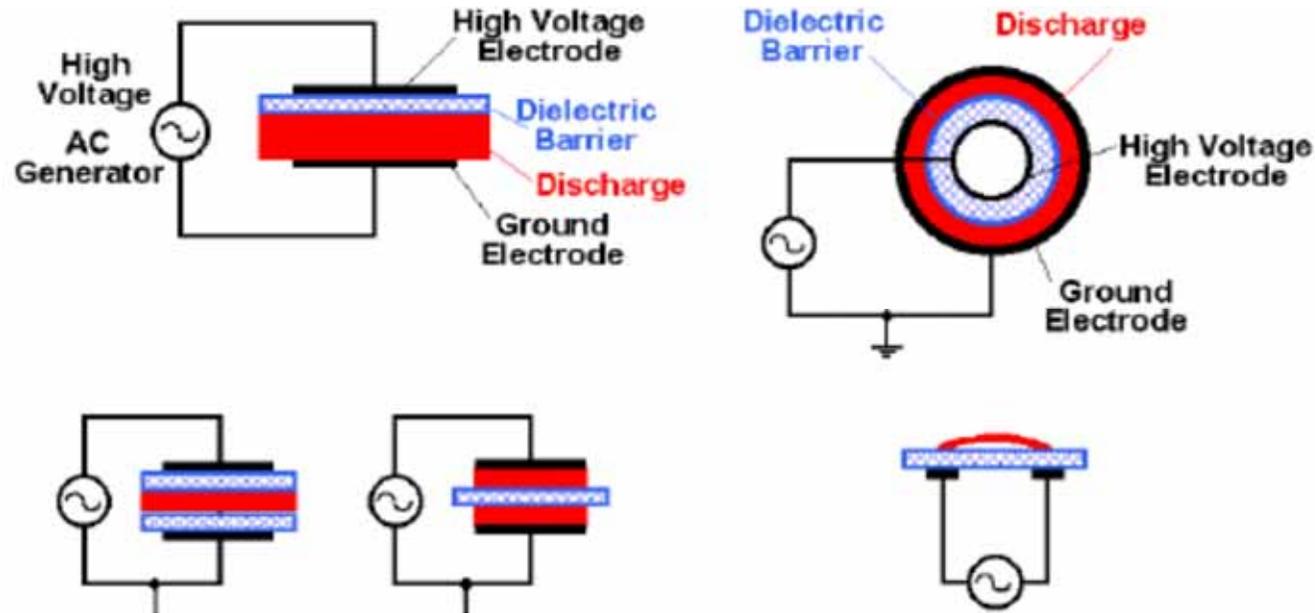
Plasma der Mikroentladung:

Nichtisothermes Plasma;  $T_e \sim 1-10$  eV,  $n_e \sim 10^{14}-10^{15}$  cm<sup>-3</sup>

Die Entladung erlischt durch Aufladung des Nichtleiters (gegebenenfalls Oberflächengleitentladung) und Aufbau eines Gegenfeldes.

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Geometrie der Barrierententladung

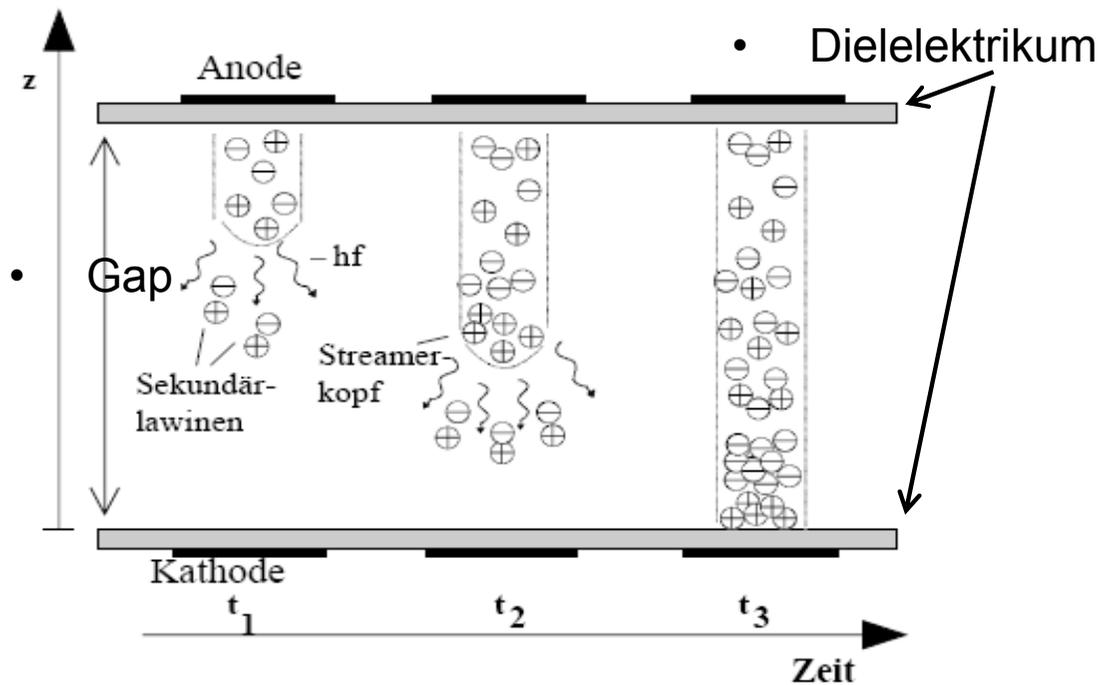


# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Zündmechanismus der DBE I

### Mikroentladung

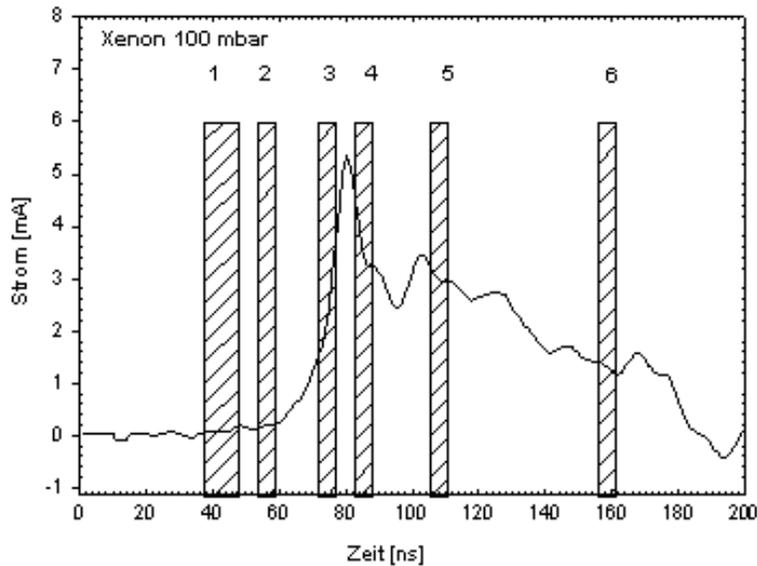
Ausbildung eines Entladungskanals durch Streamerbildung bei planparalleler Entladungsanordnung:



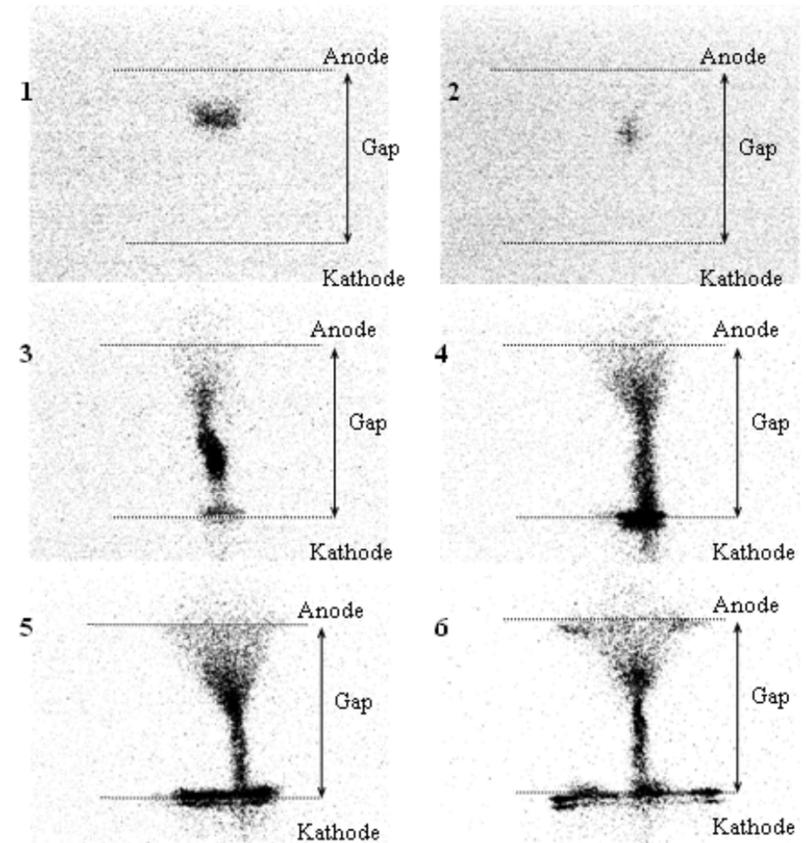
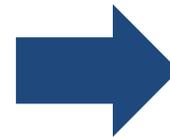
- Streamerentwicklung DBE

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- Zündmechanismus der DBE II
- Kurzaufnahmen: Ausbildung eines Entladungskanals durch Streamerbildung bei planparalleler Entladungs-Anordnung



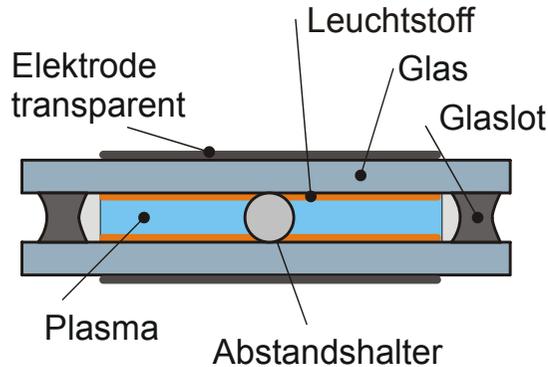
**Abbildung 9.2:** Stromverlauf und Belichtungsfenster, Xe Mikroentladung 100 mbar,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $f = 2 \text{ kHz}$ ,  $A_g = (3 \text{ mm})^2 \pi$ , Flachlampe,  $\hat{U}_m = 1.4U_1$



**Abbildung 9.4:** Kurzaufnahmen 1-6: Xe Mikroentladung  $t_{b1} = 10 \text{ ns}$ ,  $t_{2-6} = 5 \text{ ns}$ ,  $f = 2 \text{ kHz}$  Sinus, Belichter invertiert, vierteltonkorrigiert,  $p = 100 \text{ mbar}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $A_g = (3 \text{ mm})^2 \pi$ , Flachlampe,  $\hat{U}_m = 1.4U_1$

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- Aufbau einer DBE



- Dielektrisch behinderte Entladung

- Elektroden außerhalb des Gasraums (elektrodenlos)
- Dielektrikum im Strompfad
- dielektrische Barriere
- Barriere = Lampenkolben
- min. eine Elektrode transparent für Strahlung
- u.U. Leuchtstoff zur Konversion der UV- VUV Emission in gewünschten Emissionsbereich (UV bis VIS)
- Schlagweiten  $d_{\text{gap}}$  ( $1 \text{ mm} < d_{\text{Gap}} < 5 \text{ mm}$ )

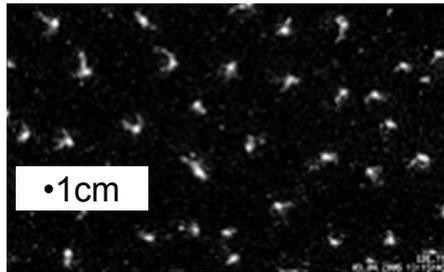


# 3.1 Stationäre Gasentladung

- DBE Charakterisika
  - kurze Entladungsphase (10 ns bis 100 ns)
  - Zeit der Einkopplung zu gering für Thermalisierung
  - Kaum Austausch der Energie zwischen Ion und Elektron, da zu wenig Stöße
  - Hohes elektrisches Feld liefert hohe Elektronenenergien
  - **Nichtgleichgewichtsplasma bei hohem Druck** (100 mbar bis > 1 bar)
  - Hohe Elektronenenergie > 12eV reicht zur Anregung des Gases
  - Hoher Druck führt vermehrt zu Stößen 3.ter Art (Schwerteilchen-Stoß mit 3 Atomen)
  - Leuchtgas = Edelgas oder Edelgas-Halogen-Mischung
  - Bildung von Dimer- Molekül das im angeregten (excited) Zustand metastabil ist (**Excited Dimer** = Excimer)
  - Emission von **Eximerstrahlung** innerhalb 10 – 20 nm breiter Bänder and Dissoziation der Excimermoleküle.

# 3.1 Stationäre Gasentladung

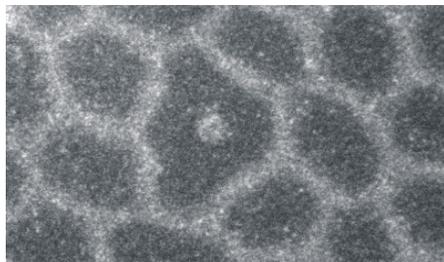
## • DBE - Entladungsformen



### •Filamentiert

#### • Sinus

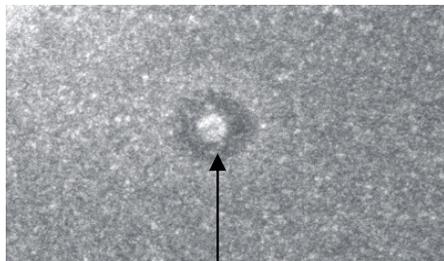
- sinusförmiger Betrieb
  - Einfach zu Erzeugen (LC Resonanz)
  - mäßige Plasma-Effizienz bis 30%
  - Entladungsdauer rund 100 ns
  - **Filamentierter Betrieb**



### •Teilhomogen

#### •Pulsbetrieb

- gepulster Betrieb
  - effizienter Pulsbetrieb mit spannungslosen Pausen
  - $dU/dt > 20 \text{ kV}/\mu\text{s}$
  - Spitzenströme  $> 5 \text{ A}$
  - Pulsdauer der Anregung  $< 2 \mu\text{s}$
  - Entladungsdauer einige 10 ns
  - Plasma-Effizienz bis 65%
  - **Homogener Pulsbetrieb möglich aber nicht zwingend**



### •Homogen

#### •optimaler Pulsbetrieb

•Abstandshalter

•Xe<sub>2</sub>\* - p = 200 mbar - NIR 830nm - ein Entladungspuls -  $t_{\text{Bild}} = 5\mu\text{s}$

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- **Korona Entladungen**

Die **Korona-Entladung** (positive oder negative Korona) wird in Gebieten starker elektrischer Felder beobachtet, d.h. in der Nähe stark gekrümmter Oberflächen (z.B. dünner Draht) wo die Durchbruchbedingungen erfüllt werden.



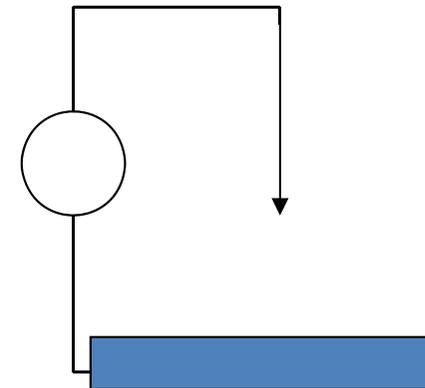
- Fa. Softal Hamburg

# 3.1 Stationäre Gasentladung

- **Korona Entladungen**

Die **Korona-Entladung** (positive oder negative Korona) wird in Gebieten starker elektrischer Felder beobachtet, d.h. in der Nähe stark gekrümmter Oberflächen (z.B. dünner Draht) wo die Durchbruchbedingungen erfüllt werden.

- HV, geringer Strom  
z.B. auch mit Dielektrium
- Inhomogenes E-Feld
  - Feld Erhöhung z.B. Draht oder Spitze
  - “Teil Entladungen”
- Viele verschiedene Korona Formen  
DC, AC, pos./neg. HV .....



# 3.1 Stationäre Gasentladung

- **Korona Anwendungen**
- **Ladungsträger Injektion**
  - Kopierer
  - Van der Graff Generatoren
  - Rauch und Staub Abscheider (elektrostatisch)
- **Plasma Chemie**
  - Ozone Erzeugung
    - Wasser Entkeimung
    - Fingerprint Detektion
  - Emission Verschmutzung Behandlung
- **Energieübertragung**
  - Kosten der Leistung
  - Noise (electrical and auditory)

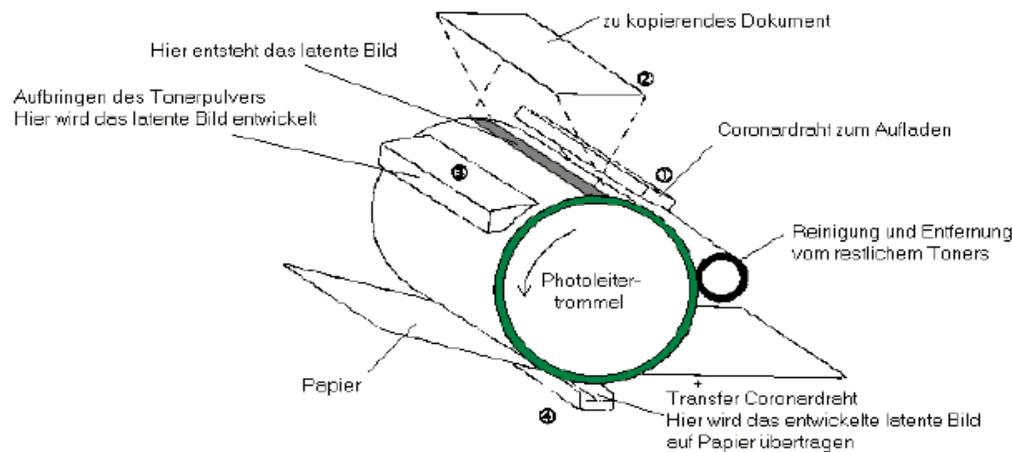
# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Anwendungen Korona

Oberflächenbehandlung (Folien, Papier ..)

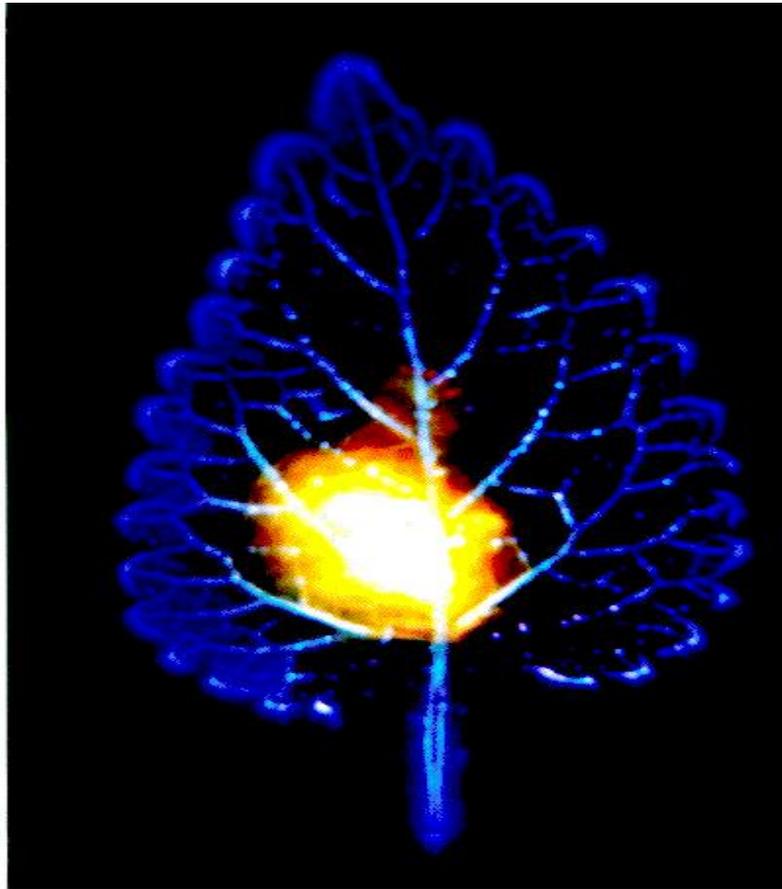
- Verbesserung der Bedruckbarkeit
- Haftverbesserung
- Einstellung der statischen Elektrizität

- Kopierer:

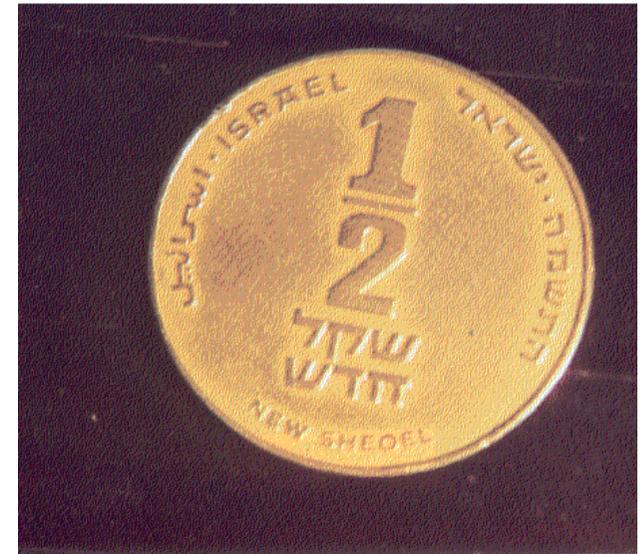


• Funktionsweise Kopierer [R. Wagner]

# Anwendungen Korona



- Fingerprint developed using Corona discharge



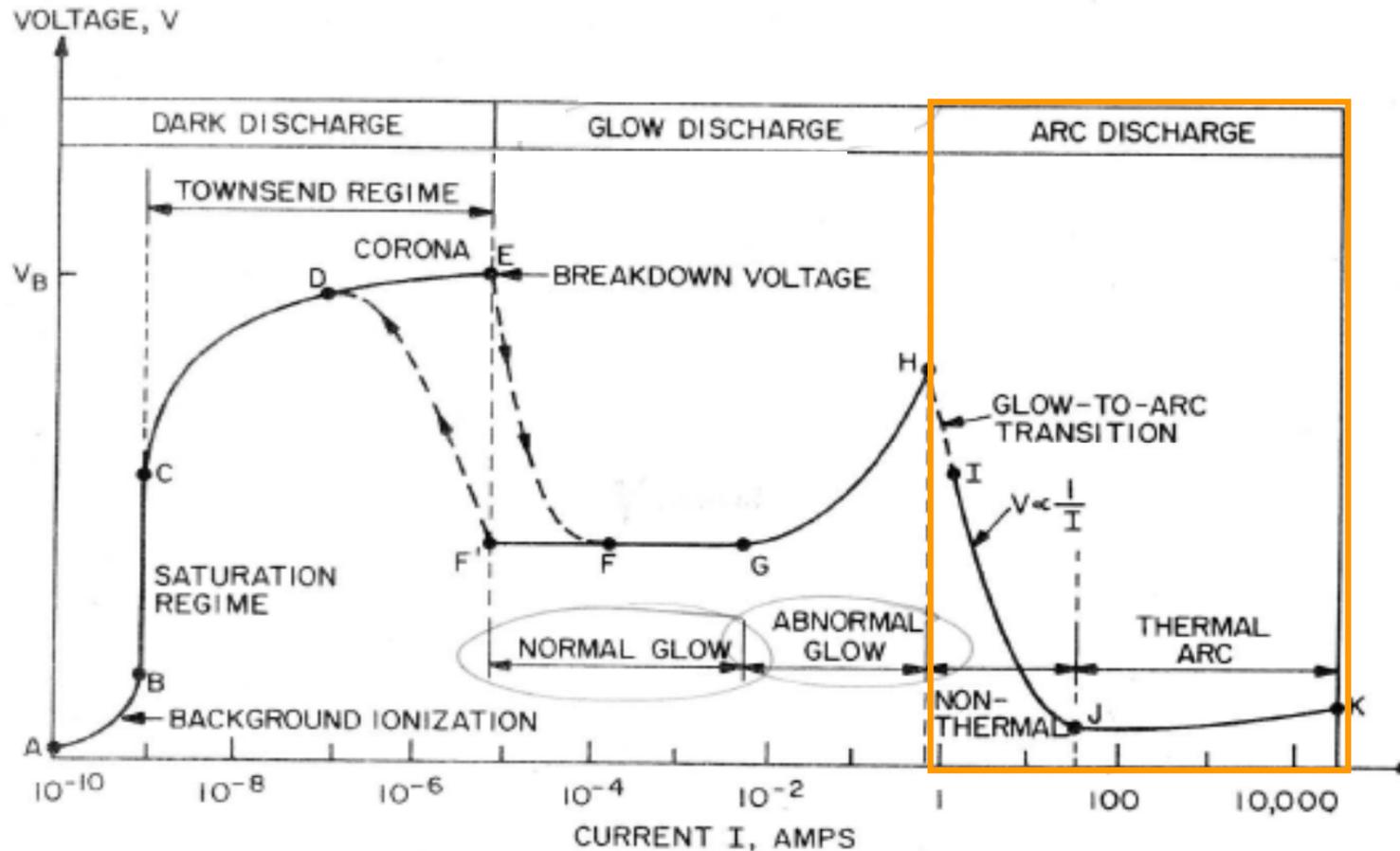
IG. 3a



R.L. Boxman

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Typen stationärer Gasentladungen



Spannung U über einer Gasentladung in Abhängigkeit vom eingepprägten Strom i durch das Plasma

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Bogenentladung

Merkmale:

- hohe Stromstärken  $> 1 \text{ A}$
- niedrige Brennspannung  $10 \dots 50 \text{ V}$
- großer Druckbereich Vakuumbogen ...Hochdruckbogen ( $> 10^5 \text{ Pa}$ )

Ausbildung eines Brennfleckes auf der Kathode

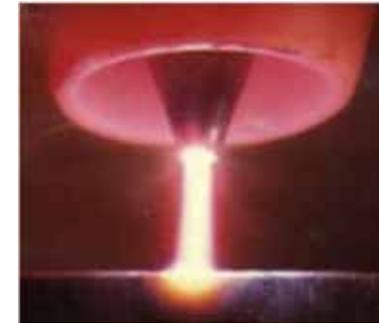
Dunkelräume kaum sichtbar ( $\sim I_D$ )

Bei hohem Gasdruck und großen Elektrodenabstand:  
positive Säule => thermisches Plasma

meist lokales thermodynamisches Gleichgewicht

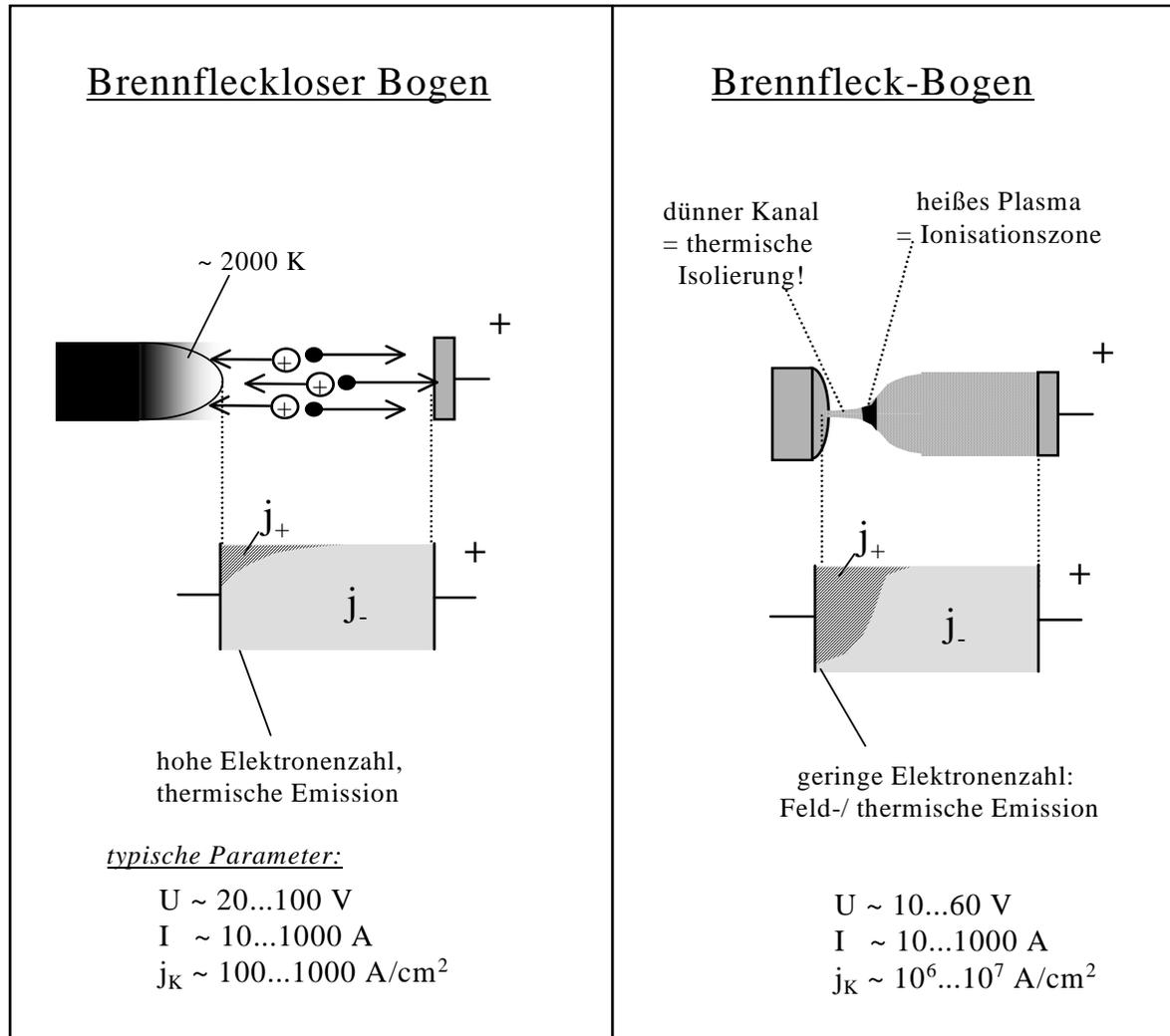
=> Leistungsbilanz Erzeugungsterm: Joulsche Wärme

Verluste: Abstrahlung, Wärmeleitung, Konvektion



# 3.1 Stationäre Gasentladung

## •Bogentladungen



# 3.1 Stationäre Gasentladung

- **Strom-Spannungscharakteristik einer Bogenentladung I**

• Annahme: Plasmakanal konstanter Temperatur  $T_{\text{eff}}$  sowie LTE – **Kanalmodell** eines rotationssymmetrischen Plasmabogens

$$j = \sigma \cdot F \Rightarrow I = E \int_{r=0}^R \sigma(T(r)) \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \approx \pi \cdot R_{\text{eff}}^2 \cdot \sigma(T_{\text{eff}}) \cdot \frac{U}{d}$$

$$\sigma = e \cdot b_e \cdot n_e + e \cdot b_i \cdot n_i \approx e \cdot b_e \cdot n_e \Rightarrow$$

$\swarrow$  •wegen  $b_e \gg b_i$

• Im Gegensatz zum ohmschen Widerstand ist die Elektronendichte  $n_e$  des Plasmas vom Strom  $I$  abhängig!

•  $I \sim U$

$$I \approx \frac{\pi \cdot R_{\text{eff}}^2}{d} \cdot e \cdot b_e \cdot n_e(T_{\text{eff}}) \cdot U$$

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Strom-Spannungscharakteristik einer Bogenentladung II

Annahme: Plasmakanal konstanter Temperatur  $T_{\text{eff}}$  sowie

LTE – **Kanalmodell** eines rotationssymmetrischen Plasmabogens

Ansatz:  $n_e \propto I^m \Rightarrow \boxed{U \cdot I^{m-1} = \text{const}}$

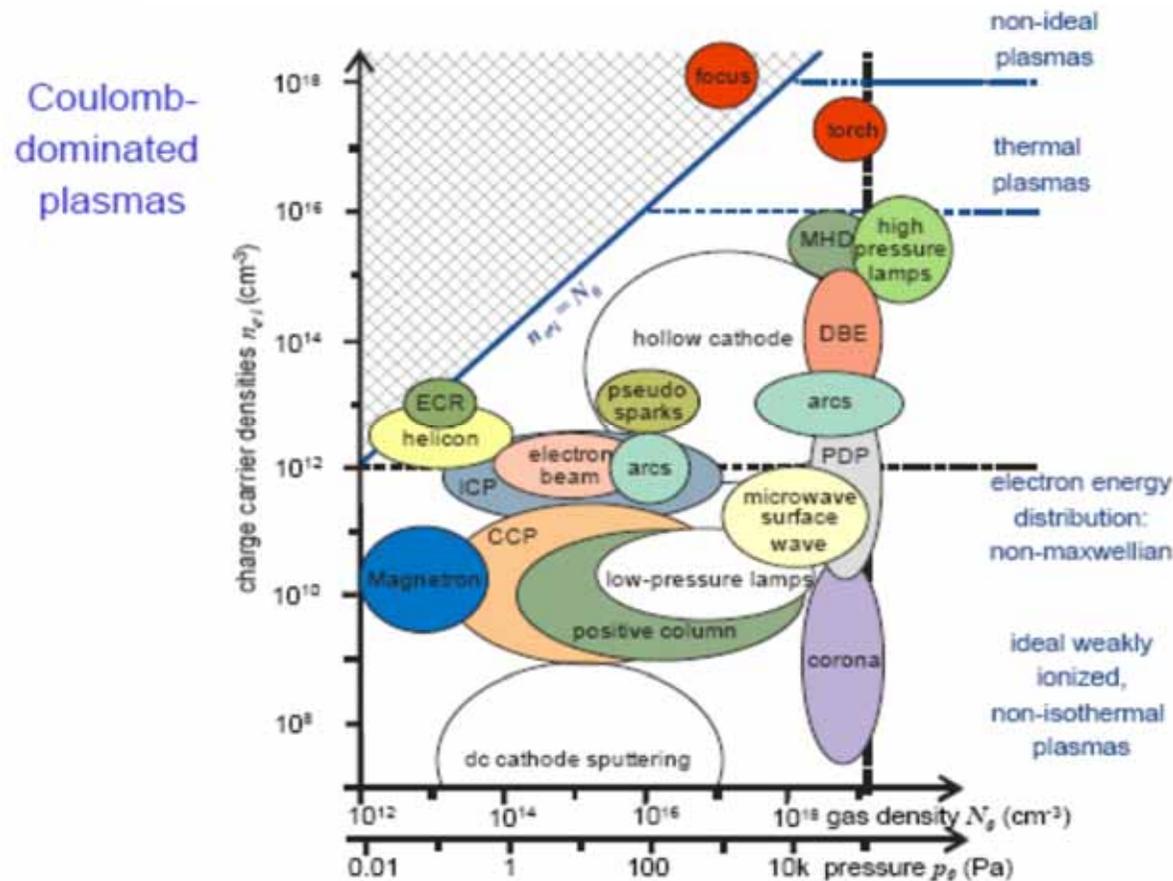
1.  $m=1$  - Einstufenionisierung (vom Grundzustand aus):  $U = \text{const}$
2.  $m=2$  – Zweistufenionisierung über angeregten (metastabilen) Zustand:  
 $U \sim 1/I$
3.  $1 \leq m \leq 2$  – real: Ein- und Zweistufenionisierungen:  $U \sim 1/I^{m-1}$

$\Rightarrow$  **fallende Strom-Spannungscharakteristik**

Charakteristik höchstens leicht positiv bei sehr hohen Stromdichten, bei denen die Coulomb-Streuung der Ladungsträger die Beweglichkeit absenkt!

# 3.1 Stationäre Gasentladung

## Übersicht Plasma- Entladungen bei verschiedenen Gasdichten



# Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
  - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
  - 1.2. Anwendungen
  
2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
  - 2.1. Grundbegriffe
  - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
  - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
  - 2.4. Plasmadynamik
  - 2.5. Transportprozesse
  
3. **Erzeugung eines Plasmas**
  - 3.1. Stationäre Gasentladung
  - 3.2. Entladung im Wechselfeld
  
4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
  4. Überblick
    - 4.1 Niederdruckentladungen
      - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
      - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
      - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
      - 4.1.4 Plasma Sputtern
      - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
      - 4.1.6 Plasma Strahler direkt
    - 4.2. Plasmafusion
  
5. **Diagnostik**
  - 5.1 Überblick Verfahren
    - 5.1.1 Die Plasma Randschicht
  - 5.2 Sondenmessungen
  - 5.3 Mikrowellenmessungen

## 3.2 Entladungen im Wechselfeld

### Entladungen bei zeitabhängigen (harmonischen) Strom- und Spannungsquellen

Das oszillierende elektrische Feld beeinflusst in charakteristischer Weise alle elektrischen Größen und diejenigen, die mit ihnen verbunden sind, so dass eine Reihe von Kenngrößen des Plasmas mehr oder weniger stark moduliert und gegenüber dem angelegten Feld phasenverschoben sind.

Das Verhalten der Entladungen kann eingeordnet werden durch den Vergleich der Periodendauer des angelegten Feldes mit typischen Zeitkonstanten von Elementarprozessen und Zeitkonstanten für den Aufbau stationärer Energieverteilungen sowie Transitzeiten von Ladungsträgern durch Raumladungsgebiete und den Elektrodenzwischenraum.

z. B:

- (a) Entladungen im Bereich von 50 Hz (technischer Wechselstrom)
- (b) Entladungen im Bereich zwischen 10 und 100 kHz (Niederfrequenzentladung)
- (c) Entladungen im Bereich zwischen 1 und 100 MHz (Hochfrequenzentladung)
- (d) Entladungen im Bereich von GHz (Mikrowellenentladung)
- (e) Optische Entladungen (starke Laserfelder)

# 3.2 Entladungen im Wechselfeld

## Entladungen im elektrischen Wechselfeld,

Elektrisches Wechselfeld:  $E = E \exp(i \omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ :

Polarisationsdrift der Ladungsträger

Der elektrische Durchbruch hängt ab von  $p \cdot d$  und  $\omega \cdot dE$

### **Niederfrequenz** $\omega \cdot d_E \ll 1 \text{ MHz} \cdot \text{cm}$ ):

quasistationäre (DC-) Entladung; Elektrischer Durchbruch und Entwicklung der typischen Entladungsgebiete in jeder Halbwelle.

### **Mittlere Frequenzen** ( $\omega \cdot d_E > 1 \text{ MHz} \cdot \text{cm}$ ):

Zeitkonstanten für ambipolare Diffusion und Rekombination sind vergleichbar mit der Periodendauer des elektrischen Feldes; keine Neuzündung notwendig, wechselseitige Ausbildung der Kathodenschichten, quasistationäre (DC-) Entladung

### **Höhere Frequenzen** ( $\omega \cdot d_E > 10 \text{ MHz} \cdot \text{cm}$ ):

Ionen können nicht mehr momentan dem sich zeitlich ändernden elektrischen Feld folgen!

Übergang zur **Hochfrequenzentladung**. Die Sekundärelektronenemission an der Kathode spielt keine entscheidende Rolle mehr zur Aufrechterhaltung der Entladung.

## 3.2 Entladungen im Wechselfeld

Entladungen im Hochfrequenzfeld

Im Hochfrequenzfall ( $\omega \cdot dE > 100 \text{ MHz} \cdot \text{cm}$ ) werden auch Elektronen eingefangen.  
 Die Ladungsträgererzeugung erfolgt durch Elektronenstoßionisation im Plasmavolumen:

Elektronen im Hochfrequenzfeld:

$$m_e \cdot \ddot{x} + \nu_{coll} \cdot m_e \cdot \dot{x} = e \cdot E_0 \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t)$$

$$P = j \cdot E = e \cdot n_e \cdot \dot{x} \cdot E$$

Absorbierte Leistung pro Volumen  $P_{abs} = \text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E})$  :

$$P_{abs} = \frac{n_e \cdot e^2}{m_e \cdot \nu_{coll}} \cdot \frac{(\nu_{coll} / \omega)^2}{1 + (\nu_{coll} / \omega)^2} \cdot \frac{E_0^2}{2}$$

Ohne Stöße  $\nu_{col}=0$  erfolgt keine Leistungseinkopplung (rein imaginärer Anteil!)

Für  $\omega=0$  folgt das klassische DRUDE-Modell für freie Elektronen,  $P_{abs}=P_{DC}$ .

$$P_{abs}^{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_e \cdot e^2}{m_e \cdot \nu_{coll}} \cdot \frac{E_0^2}{2}$$

- Die maximale Leistungseinkopplung ergibt sich für  $\omega = \nu_{col}$

## 3.2 Entladungen im Wechselfeld

### Hochfrequenzentladungen ( $\omega_{\text{ion}} < \omega < \omega_e$ )

- Industriefrequenzen (13.56 MHz or 27.12 MHz)
- äußere oder innere Elektroden möglich
- kapazitive Einkopplung (CCP) über Parallelplattenanordnung
- induktive Einkopplung (ICP) über Spulenordnung möglich;  
Induktion des notwendigen elektrischen Feldes durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld der Spule.

### Kapazitiv gekoppelte Hochfrequenzentladung

- Elektrodenprozesse, Plasmarandschichten (stoßfrei  $\Leftrightarrow$  stoßbestimmt)
- Plasmapotentialverlauf (kapazitive Plasmarandschicht), Self Bias Spannung
- Kapazitive/ohmsche Randschicht
- Anpassungsnetzwerk notwendig (Generator  $50\Omega \Leftrightarrow 10\text{ k}\Omega$  Plasmainpedanz)!
- Plasma der Hochfrequenzentladung ist vergleichbar mit dem Niedertemperaturplasma der positiven Säule einer DC-Glimmentladung

## 3.2 Entladungen im Wechselfeld

### Mikrowellenentladungen

- Industriefrequenzen (z.B. 2.45 GHz)
- Erzeugung höherer elektrischer Feldstärken und damit die Erzeugung dichter Plasmen; In Kombination mit einem Magnetfeld > Elektronenzyklotronresonanz d.h. Elektronenzyklotronbewegung ( $\omega_{ce}$ ) ist in Phase mit dem rotierenden elektrischen Feldvektor einer R-Welle:

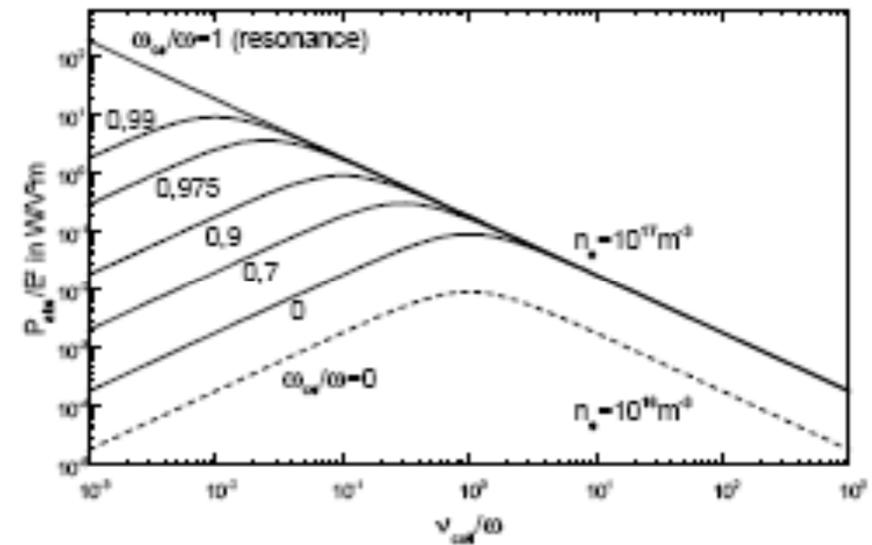
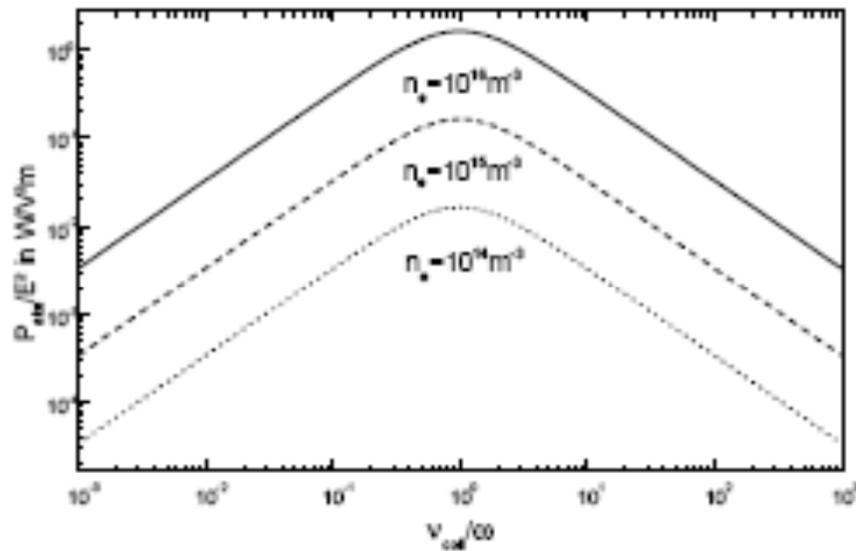
Leistungseinkopplung pro Volumen:

$$P_{abs} = \frac{n_e \cdot e^2}{m_e \cdot v_{coll}} \cdot \frac{(v_{coll} / \omega)^2}{[1 - (\omega_{ce} / \omega)]^2 + (v_{coll} / \omega)^2} \cdot \frac{E_0^2}{2}$$

- Maximalwert bei  $\omega = \omega_{ce}$ , **ECR**-Plasma (ECR = electron cyclotron resonance)
- Bei 2.45 GHz ist ein Magnetfeld von  $B_{ECR} = 87.5$  mT erforderlich.

# 3.2 Entladungen im Wechselfeld

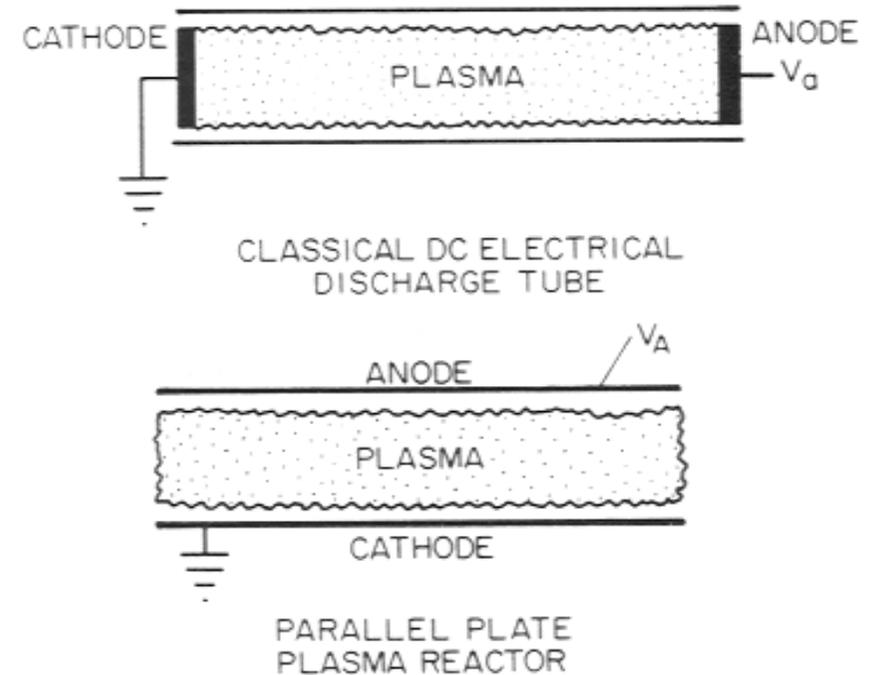
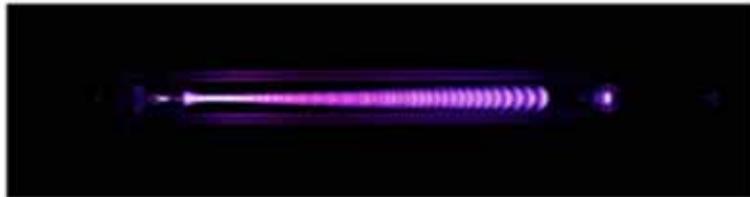
- **Mikrowellenentladungen**
- Leistungseinkopplung pro Volumen über der Frequenz:



## DC Entladungen

### A) Ohne mag. Einschluß

- Entladungsröhren
- Parallele Platten Anordnung
- Hohlkathoden Entladung

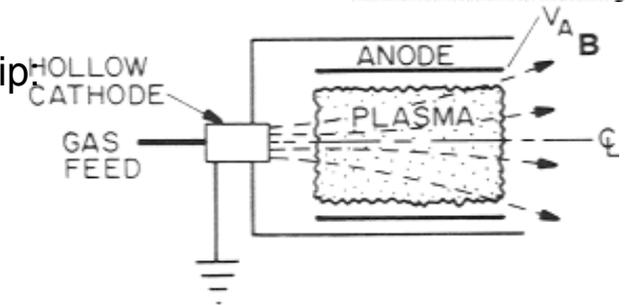


- \* weitere Details in Kap. 4

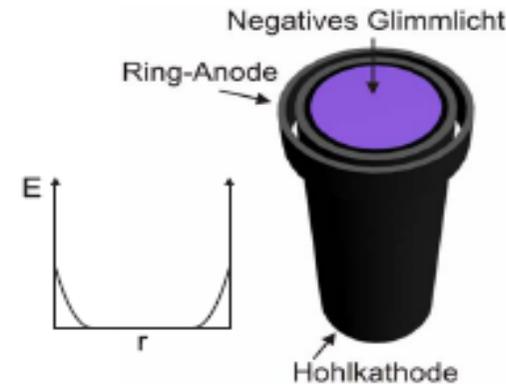
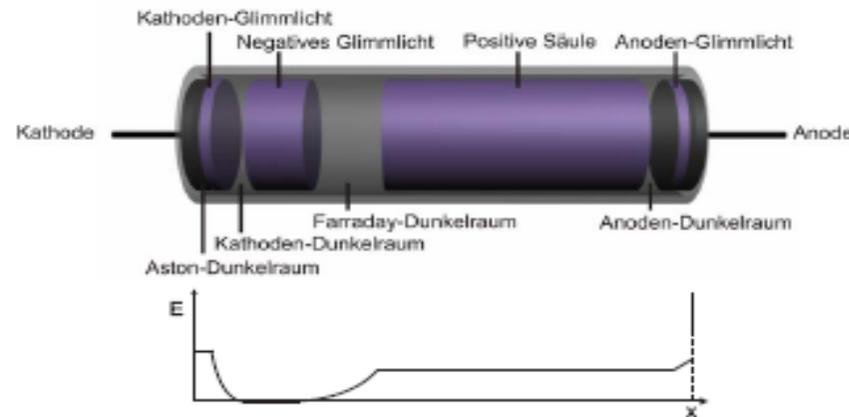
# Plasmaquellen

## Hohlkathodenentladung

• Prinzip



- cylindric cathode, ring shaped anode (at positive potential)
- merging of of glow edge
- „ideal plasma“: only negative glow
- oscillation of electrons → increase of ionization and dissociation
- hollow cathode effect

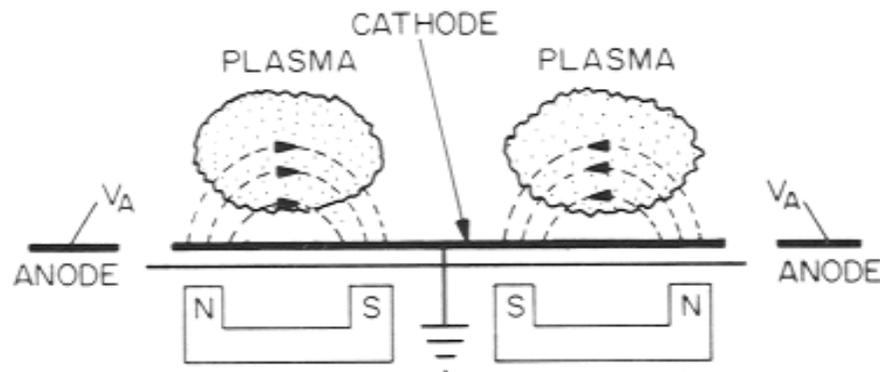


- Reale Hohlkathodenentladung

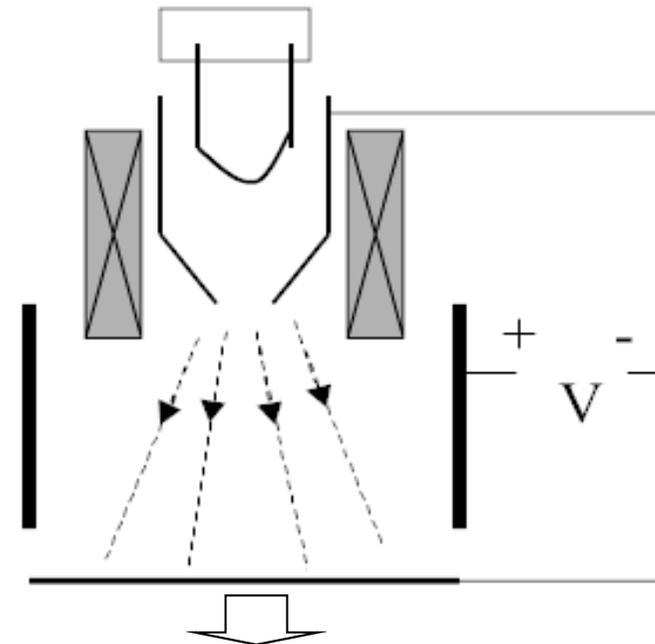
## DC Entladungen

### b) mit mag. Einschluß

- Magnetron



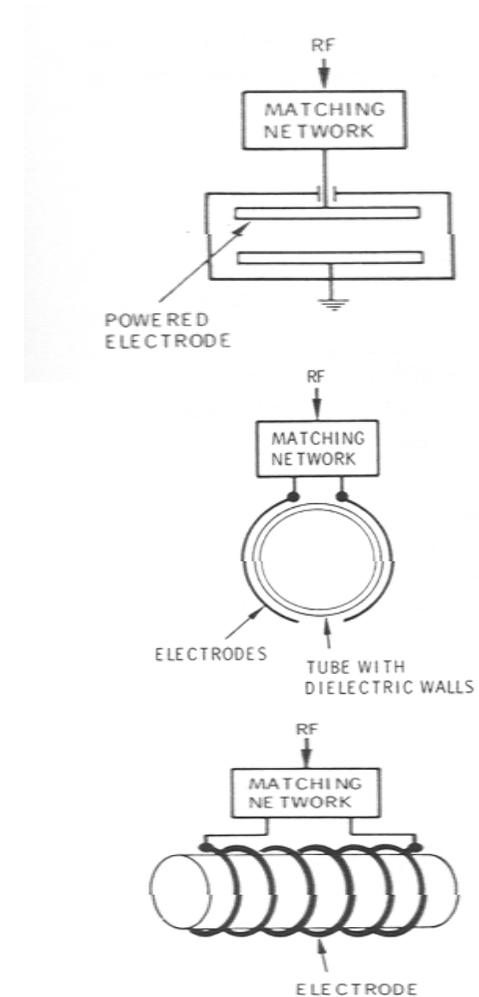
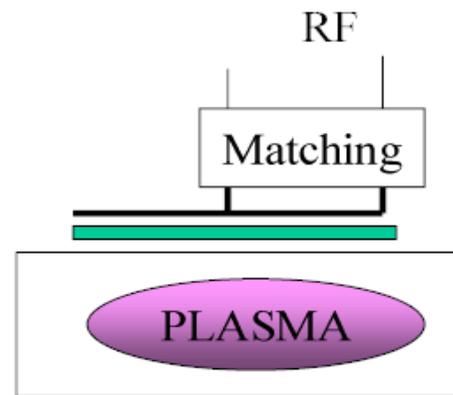
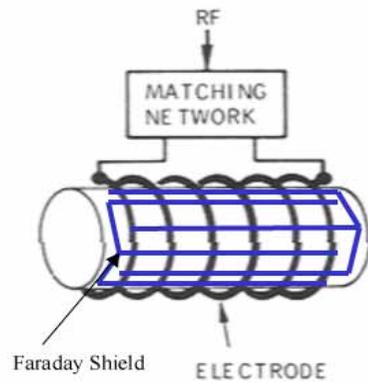
### PIG Discharges



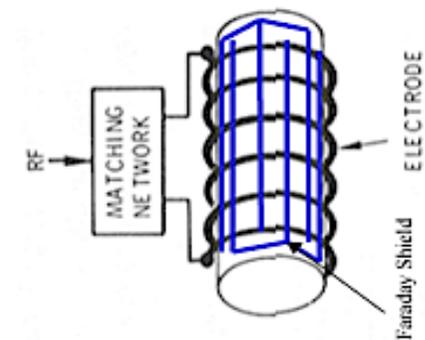
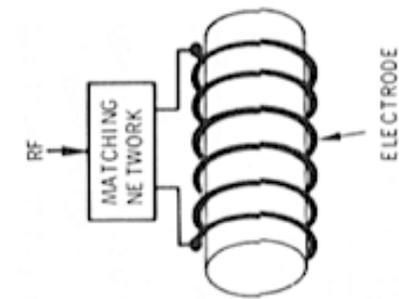
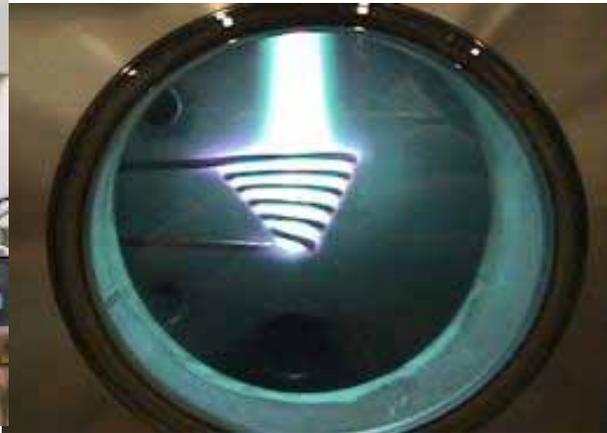
- In the Penning ionization gauge (PIG) geometry, two opposing cathodes terminate the discharge
- at either end and have a magnetic field perpendicular to the cathode surface. Consequently, electrons are
- confined both radially and axially by the magnetic field and the electrostatic well established between the
- two end cathodes, respectively. This makes possible the creation of a self-sustained discharge at pressures
- much lower than the operating pressures of a normal glow discharge (down to  $10^{-8}$  Pa)

## RF Entladungen

- Kapazitiv gekoppelt
- Induktiv gekoppelt

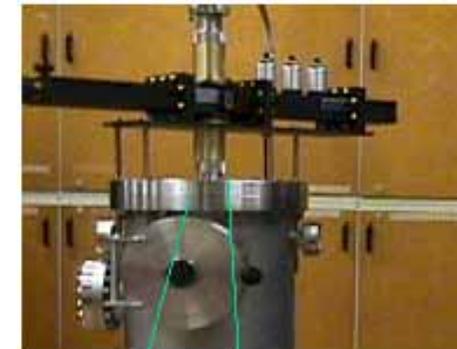
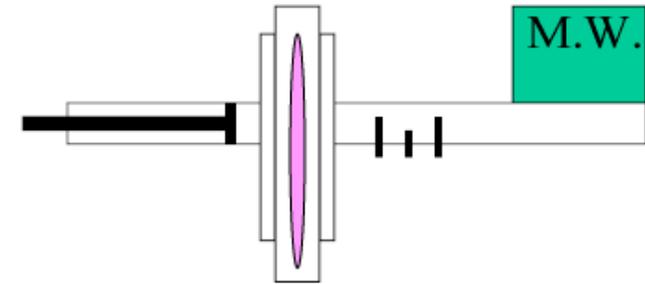
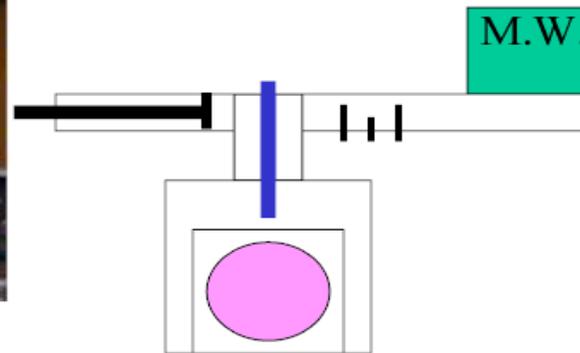


- Beispiele für RF Entladungen



## Mikrowellen Entladungen

- Fern -Plasma
- Mikrowellen Resonatoren



## Mikrowellen Entladung

### – Electron Cyclotron Resonance (ECR)

The condition when electron cyclotron frequency,  $\omega_e = eB/m_e$ , is the same as the frequency of the electric field oscillations is called ECR. The result is that electrons gain energy from the field constantly.

- The resonance condition for electrons at
- 2.45 GHz corresponds to  $B = 875$  Gauss

