

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

4. Anwendungen von Plasmen

Anwendungen von Plasmen

Plasmaeigenschaften

Anwendung	elektrische Leitfähigkeit	Plasmastrahlung	Hohes T und Energiedichte	Stoffwandlung
Plasma-Lichtquellen (Hoch- und Niederdrucklampen, Gaslaser, Plasmadisplay)		X		
Plasmaschalter	X			
Materialbearbeitung (Schweißen, Schneiden, Schmelzen, Spritzen)			X	
Oberflächenbearbeitung (Aktivierung, Modifizierung, Ätzen, Schichtbildung)			(X)	X
Plasmachemie (thermisch, nichtthermisch)			X	X
Teilchenquellen (Ionenquellen)			X	
Antriebsmittel (Ionentriebwerke, thermische Plasma-Triebwerke)			X	
MHD-Generator (thermischer Converter)	X			
Kernfusion			X	

4. Anwendungen von Plasmen

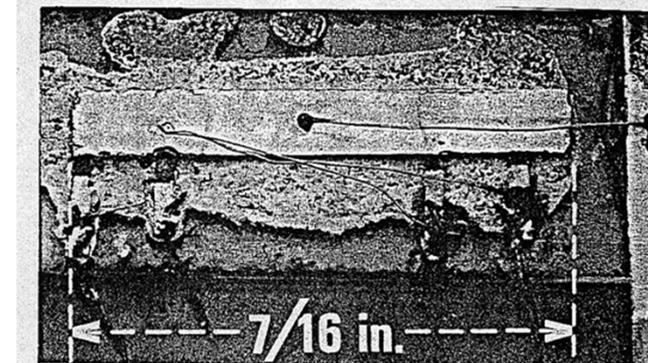
Mikrotechnologie

Niederdruck-Plasmen zur Strukturierung

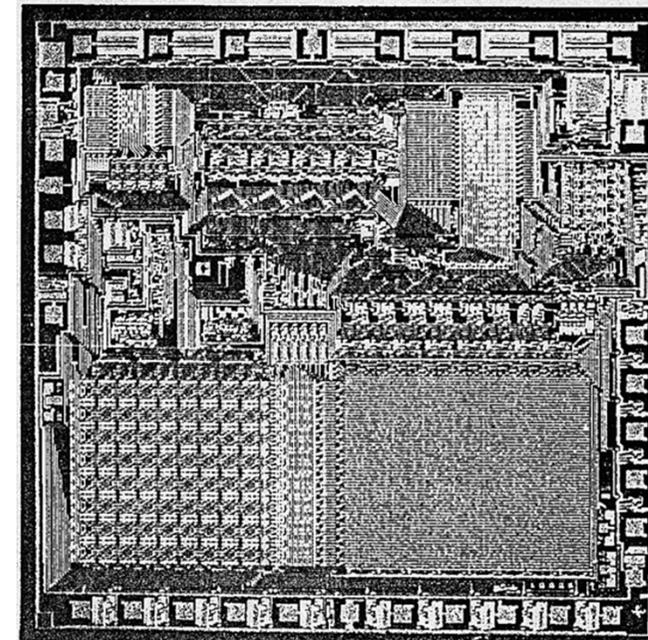
- Auftragen, Ätzen, Dotieren, Abtragen:

-HL Bauelemente, IC,

- “Transistors/chip double every 18 months” — Gordon Moore (1965) (Transistor size shrinking; chip size growing)
- Now a self-fulfilling prophecy



The first integrated circuit was made in 1958 by Jack Kilby of Texas Instruments.

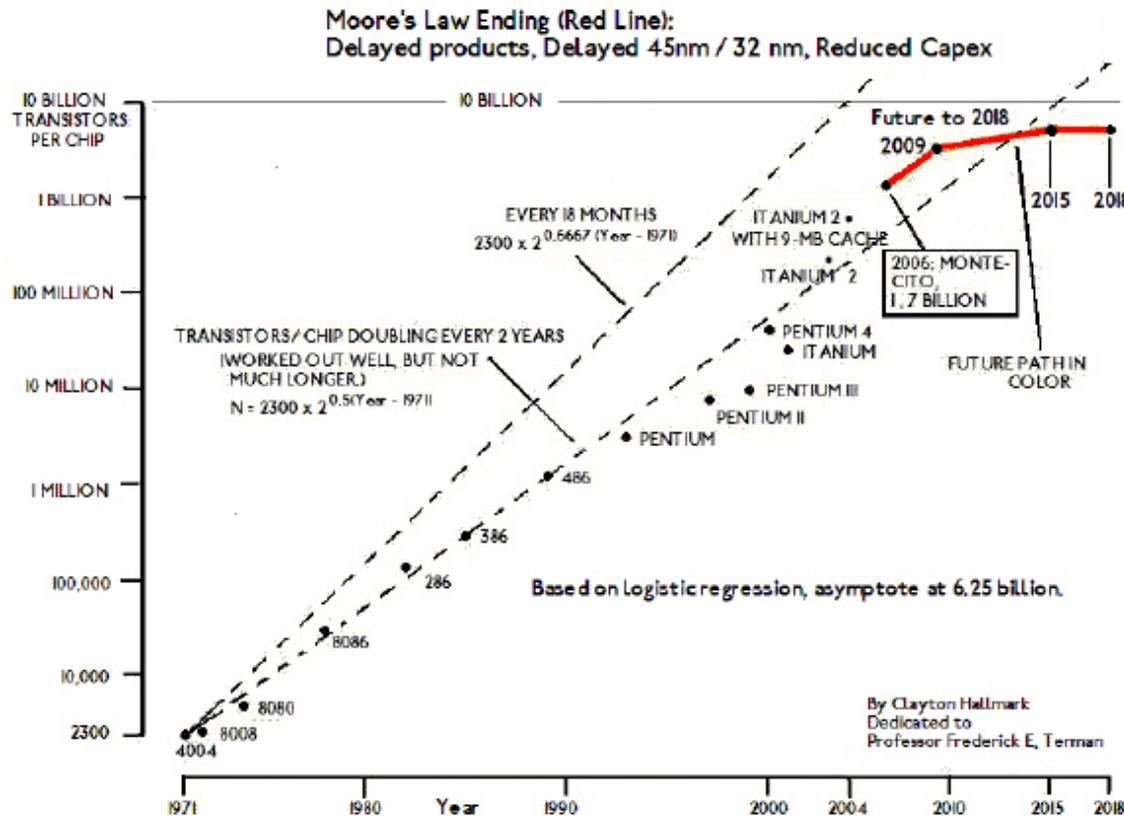


Less than two decades later, engineers put a complete microcomputer on a chip. [Source: Texas Instruments, Inc.]

4. Anwendungen von Plasmen

Mikrotechnologie

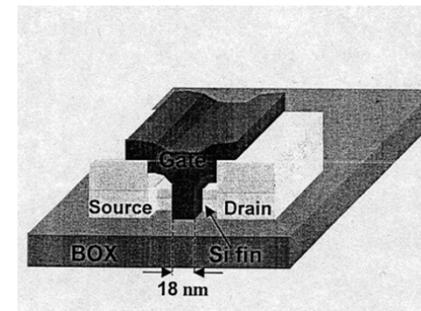
- “Transistors/chip double every 18 months” – Gordon Moore (1965) (Transistor size shrinking; chip size growing)



4. Anwendungen von Plasmen

Mikrotechnologie

- Both structures can be built with current ic fabrication techniques
- CMOS can be scaled another 20 years!
- State of the art (2014):
 - In manufacture:
 - 10 nm (20 atoms) gate length
 - 1.5 nm (5 atoms) gate oxide thickness
 - Smallest fabricated CMOS transistor (FinFET, UC Berkeley): 12 nm (48 atoms) gate length
 - Limiting gate length from simulations (desktop ic): 4 nm (16 atoms) gate length



FinFET (UC Berkeley)



Vertical Transistor (Lucent)

4. Anwendungen von Plasmen

Lichtquellen

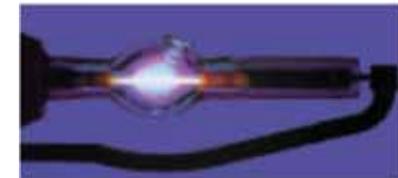
Niederdruck-Lichtquellen

- Leuchtstofflampen (Quecksilber + Edelgas)
- Natrium-Niederdrucklampen (Natrium + Edelgas)
- Leuchtröhren (Edelgas oder Quecksilber + Edelgas)



Hochdruck-Lichtquellen

- Xenonlampen
- Quecksilberlampen
- Natriumlampen
- Halogen-Metall dampflampen



4. Anwendungen von Plasmen

Schalter

Schaltzustände: $< 10^{-3}$ Ohm (geschlossen), $> 10^{18}$ Ohm (offen);
 schneller Übergang,
 100 kA - Bereich

Druckgasschalter

Schaltlichtbogen, Löschgas (z.B. SF_6 , CF_2Cl_2)

Vakuumschalter

Metalldampflichtbogen (Vakuumbogen), Löschung durch
 Kondensation des Metalldampfes

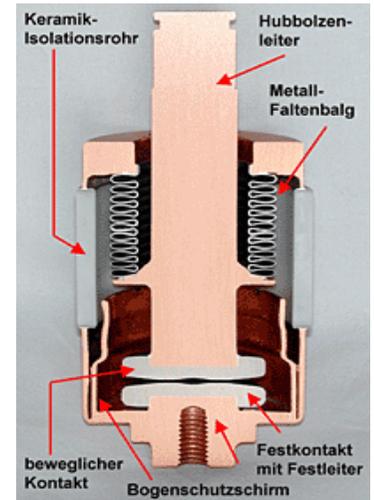
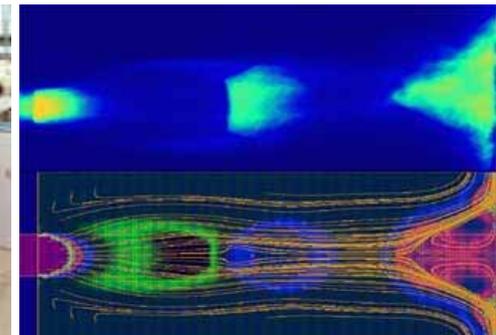


Abb. Fa. ABB 1000MW Schalter



4. Anwendungen von Plasmen

Materialbearbeitung

Lichtbogen, Plasmastrahl (Energieaufwand relativ hoch, 10 kW ... 100 kW ... 1 MW)

- Plasmaverbindungsschweißen
- Mikroplasma-schweißen
- Plasmaauftragsschweißen
- Plasma-schmelzschnitten
- Plasma-schmelzen von Metallen
- Plasma-spritzen



Zugabe von Pulver mit Korngrößen zwischen 10 und 100 μm aus Metallen, Hartstoffen oder Keramiken; Schmelzen im Plasmastrahl; Aufspritzen auf metallische Oberfläche; teilweise poröse Schichten

4. Anwendungen von Plasmen

Plasma-Oberflächenbearbeitung

Plasmaaktivierte Beschichtung (Verdampfung)

-DC-Glimmentladung, HF-Entladung, Hohlkathoden-Glimmentladung

-Hohlkathodenbogen, Niedervoltbogen, thermischer Bogen (Metalldampf)

Beschichtung durch Zerstäuben

DC-Glimmentladung, HF-Entladung, Magnetron (Hochrate-Zerstäubung)

Plasmachemische Schichtherstellung, Plasmapolymerisation

Oberflächenaktivierung/Oberflächenmodifizierung von Polymeren

Materialabtrag

-Ionenstrahlätzen (Ionenstrahlquellen)

-Sputtern mit DC-, HF-Entladungen

-Plasmaätzen

4. Anwendungen von Plasmen

Plasmachemische Stoffwandlung

Thermische Plasmachemie (z.B. Acetylen-Synthese, Recycling)

-Thermodynamische Beschreibung, Reaktionskinetik

-Stoffeinspeisung in Trägergas - plasmapyrolytisches Reaktionssystem,

-Quenching (Abkühlung) des Reaktionssystems mit dem Ziel die gewünschten stabilen

Reaktionsprodukte zu erhalten.

Nichtthermische Plasmachemie (z.B. Ozonsynthese)

-Nichtgleichgewichtskinetik, Elementarprozesse

4. Anwendungen von Plasmen

Gaslaser (Auswahl)

He-Ne-Laser

Glimmentladung: He:Ne = 5:1; $I \sim 100$ mA, $p R \sim 0,015$ kPa cm, $n_e \sim 10^{12}$ cm⁻³, $T_e \sim 2$ eV)

Wellenlänge : 633 nm; 1,15 μ m; 3,39 μ m

Leistung: cw, 1 ... 100 mW

cw-Edelgasionenlaser

Stromstarke Niederdruck-Gasentladung: (Ar, Kr, Ne, Xe; $j \sim 10^3$ A/cm², $p R \sim 5 \cdot 10^{-2}$ kPa cm, $n_e \sim 10^{14}$ cm⁻³, $T_e \sim 5$ eV, ,

Wellenlänge: 331 676 nm

Leistung: cw, 1 ... 10 W

cw-CO₂-Laser (Gasentladungsform)

Glimmentladung: CO₂:N₂:He=1:1:10, p_{CO_2} im kPa-Bereich, $I \sim 100$ mA ,

Wellenlänge: 10,4 ... 11 μ m

Leistung: 1 W ... 10 kW

Eximerlaser (Edelgashalogenidlaser)

Gepulste Gasentladung: Ar, Kr, Xe : F, Cl, Br, z.B. KrF-Laser; Stromanstiegszeiten im ns-Bereich auf $\sim 10^3$ A/cm²

Wellenlänge: 175 ... 353 nm

Impulsenergie: 1 mJ ... 1

4. Anwendungen von Plasmen

Teilchenquelle

Geladene Teilchen (Ionen)

-Glimmentladung

-HF-Entladung

-Penning-Entladung (magnetfeld-gestützt)

-Bogenentladung

-Funkenentladung

Schnelle Neutrale

Neutralisierung von schnellen Ionen (Umladung)

4. Anwendungen von Plasmen

Antriebsmittel

Ionentriebwerke (Satelliten-Lageregelung)

$$F_{schub} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = I \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m_{ion}}{Z \cdot e}}$$

-Kaufmann-Quelle (Glühkathodenglimmentladung)

-HF-Triebwerk



Plasmaantriebe

- thermische Expansion des Treibmittels
- (Joulesche Wärme durch Entladungsstrom)
- eigenmagnetische Kraftwirkung des Stromes auf das Plasma
- Lorentz-Kraft (induzierter Hall-Strom und äußeres Magnetfeld des Antriebes)



Übersicht über die Vorlesung

1. **Einleitung**
 - 1.1. Kenngrößen des Plasmas
 - 1.2. Anwendungen

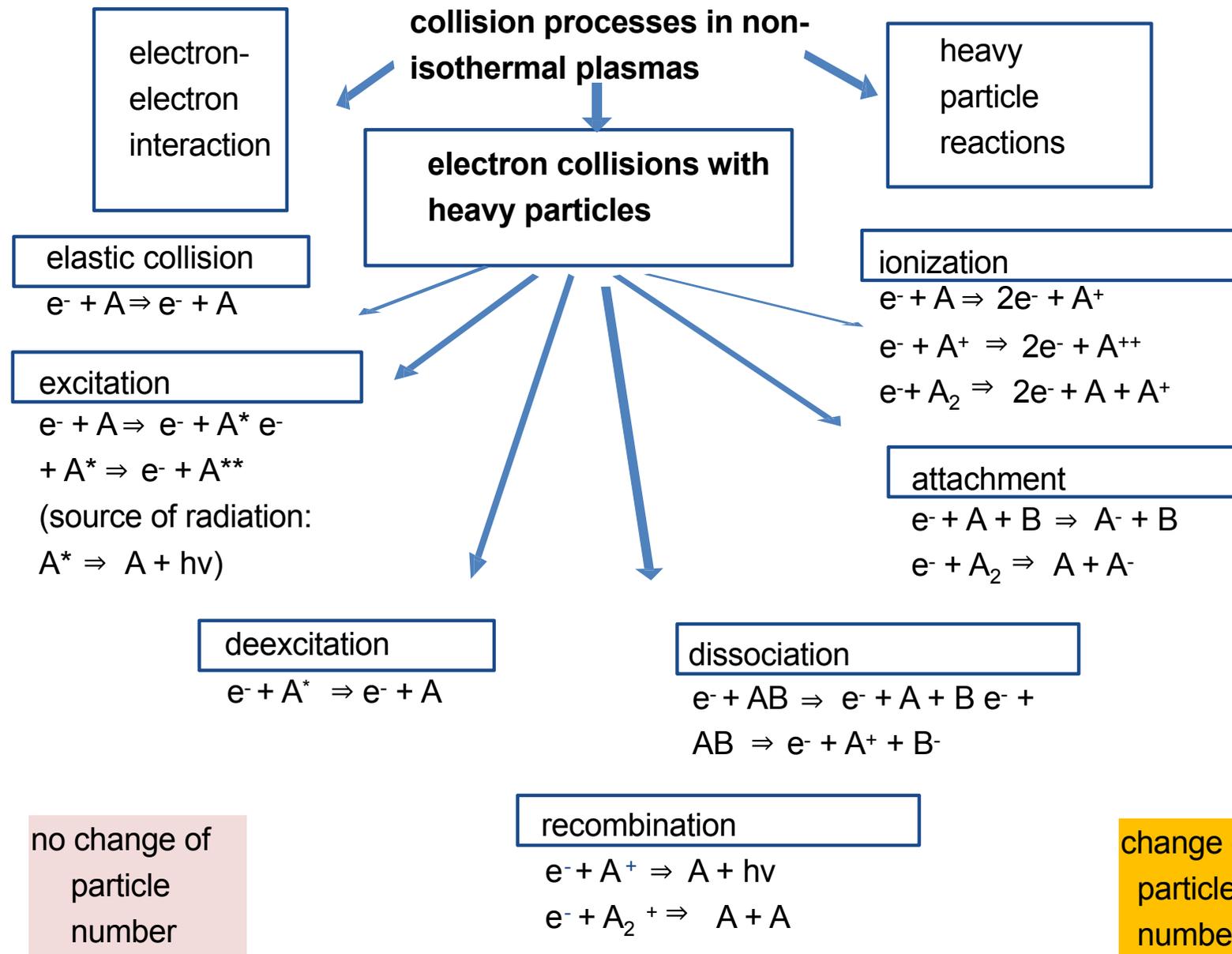
2. **Physikalische Grundlagen des Plasmas**
 - 2.1. Grundbegriffe
 - 2.2. Verteilungen und Gleichgewichtsbedingungen
 - 2.3. Stossprozesse und Strahlung
 - 2.4. Plasmadynamik
 - 2.5. Transportprozesse

3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3.2 Entladung im Wechselfeld

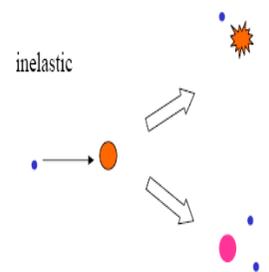
4. **Plasmen in der technischen Anwendung**
 4. Überblick
 - 4.1 **Niederdruckentladungen**
 - 4.1.1 Plasma Oberflächen Prozesse
 - 4.1.2 Dünnschichtbeschichtungen
 - 4.1.3 Plasma Ätzprozesse
 - 4.1.4 Plasma Sputtern
 - 4.1.5 Plasma Funktionalisieren
 - 4.1.6 Plasma Strahler direkt
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.11 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen

4.1 Niederdruck Plasma Prozesse: Überblick

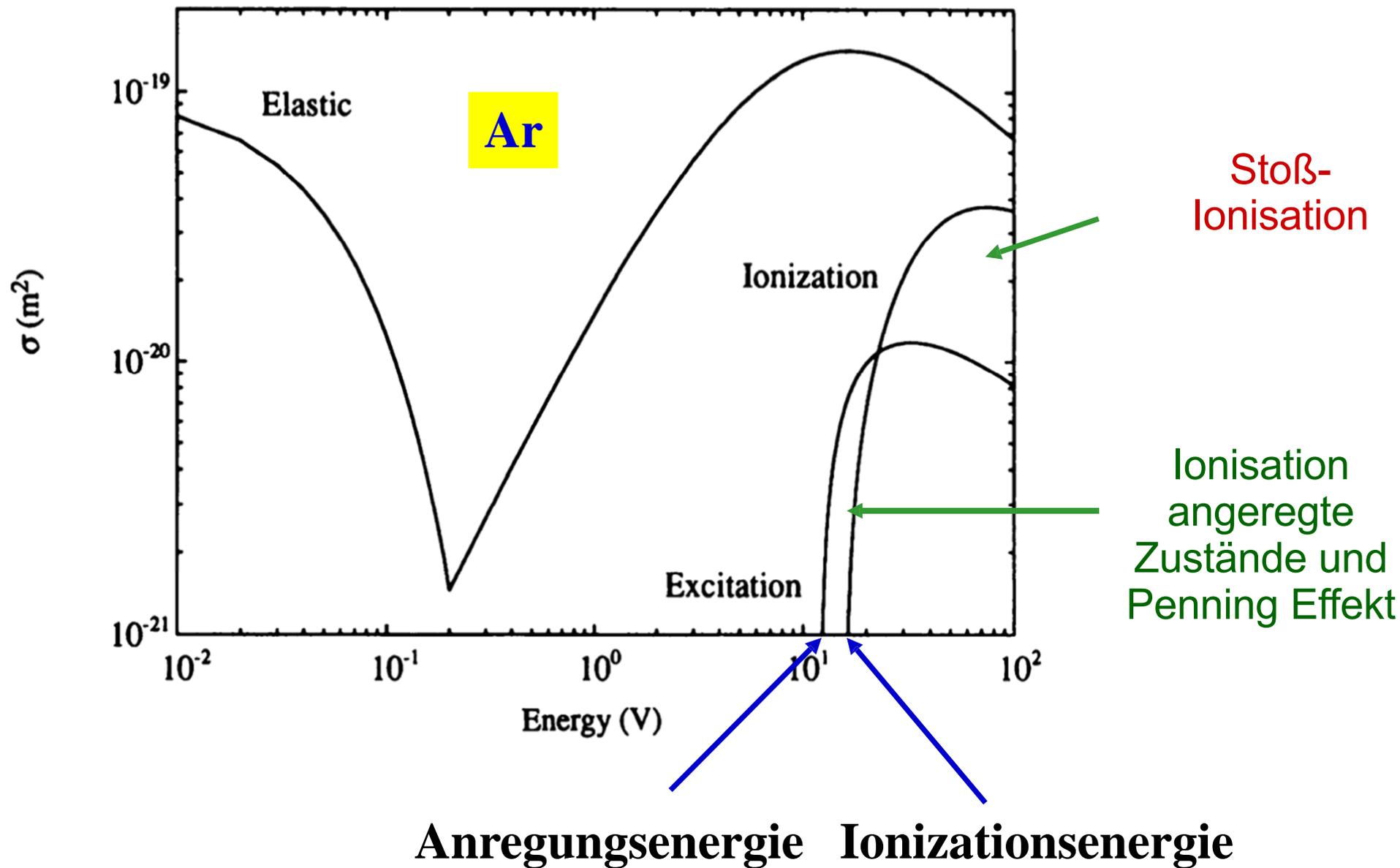


**collision processes :
generation
of charge carriers**



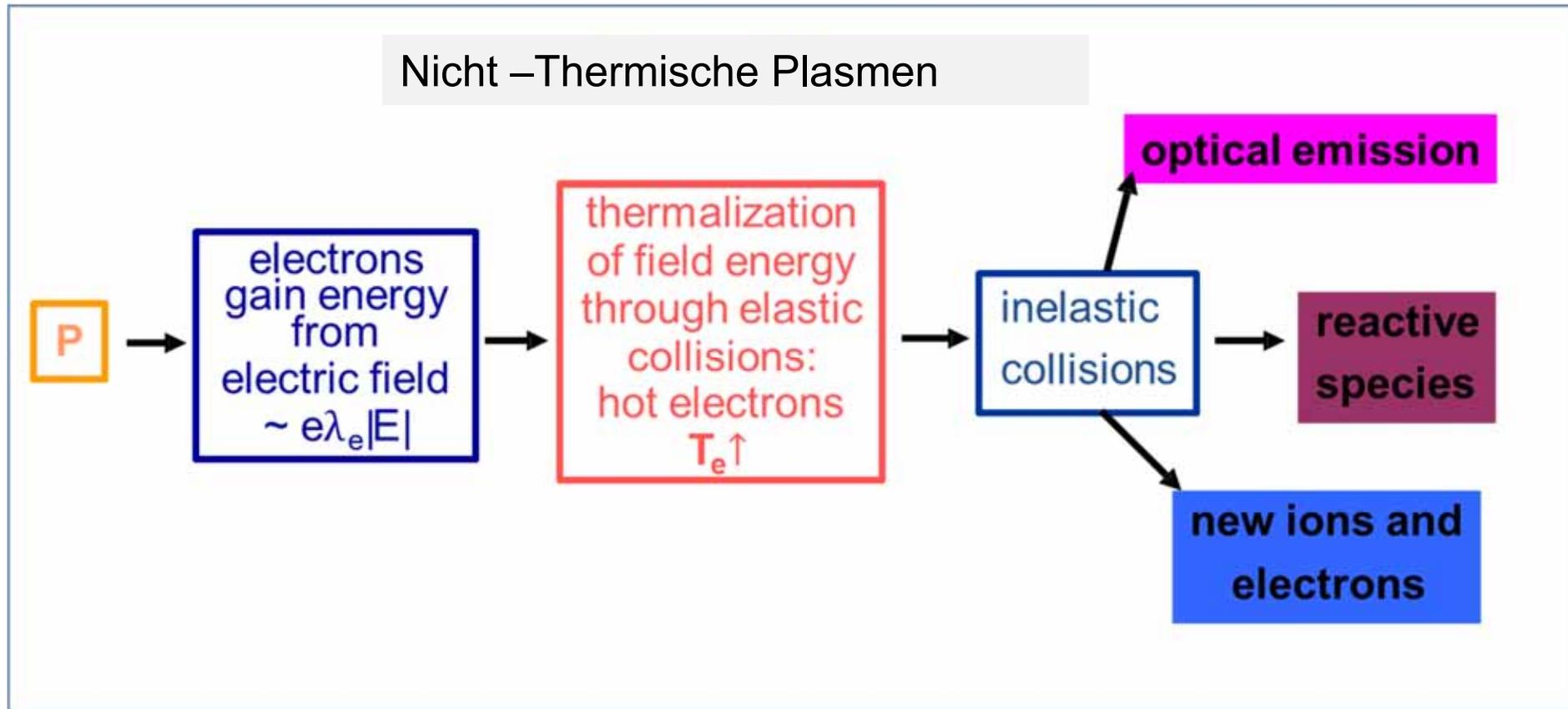
4.1. Niederdruck Prozesse

Kollisionsprozesse: Ladungsträger Erzeugung



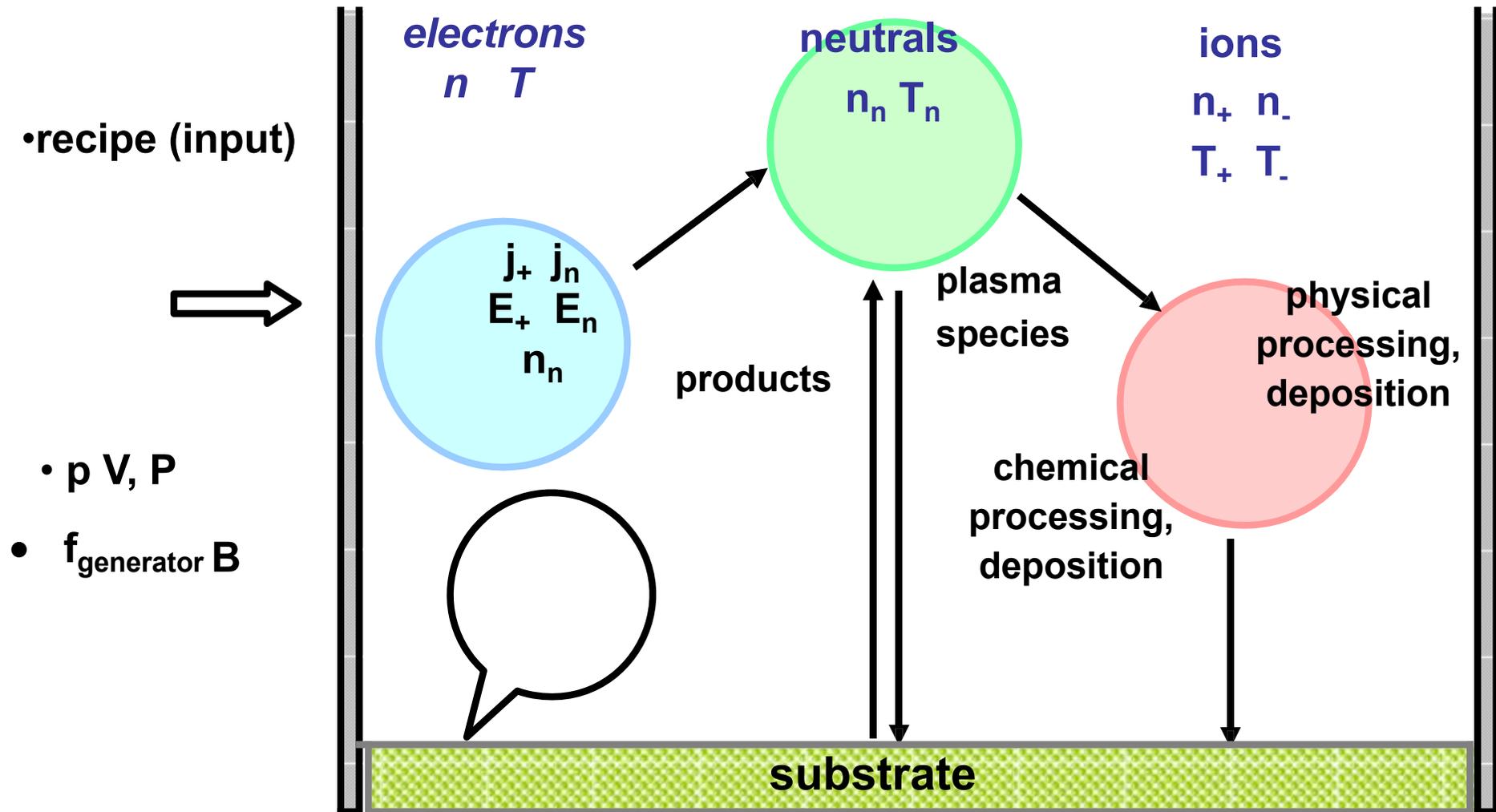
4.1. Niederdruck Prozesse

- Partikel und Aufladung



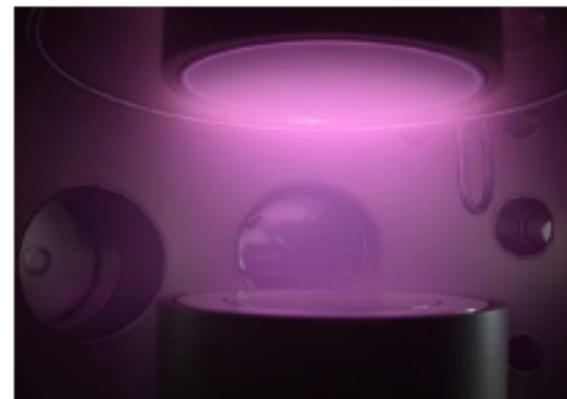
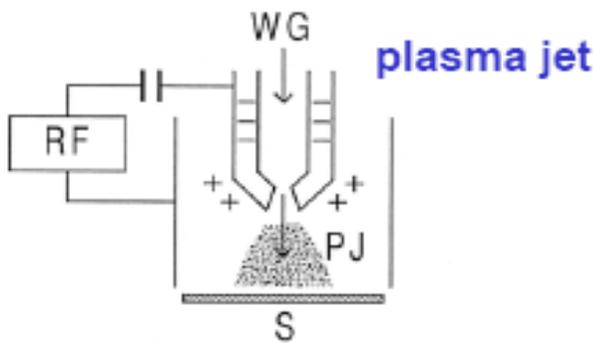
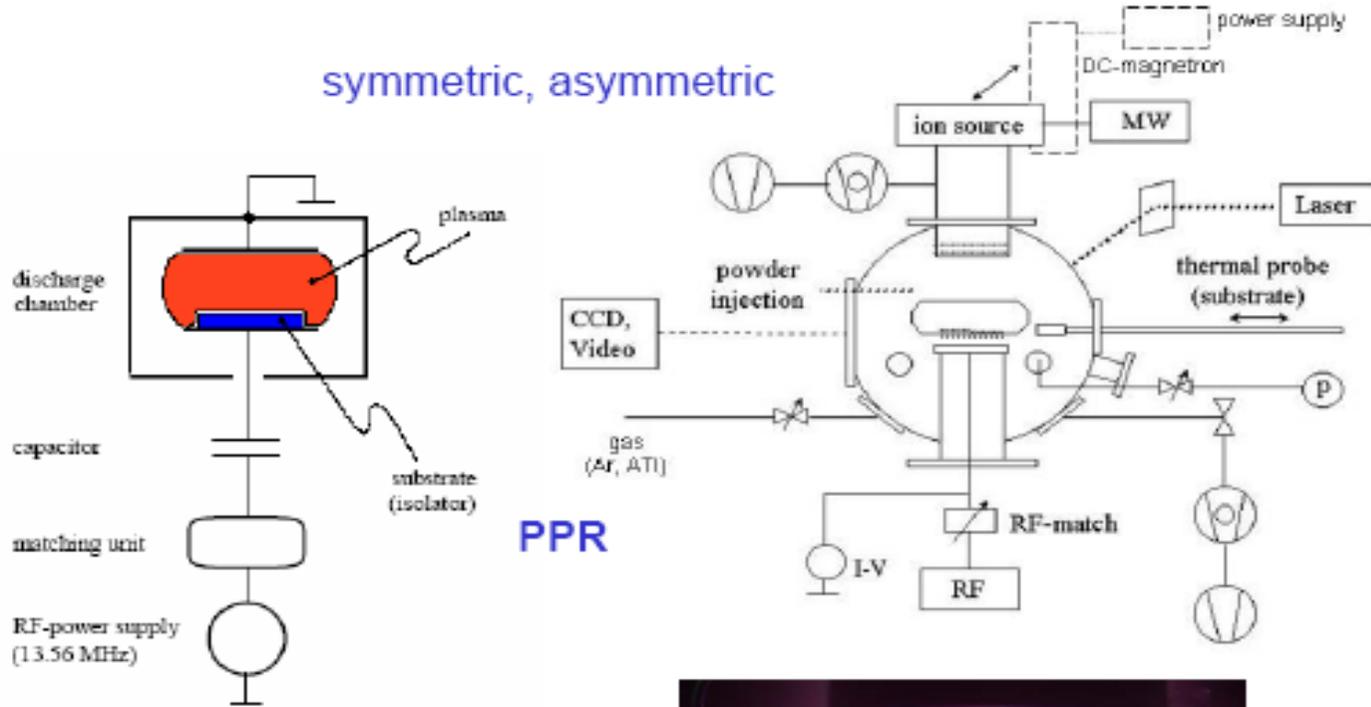
Elektronen und deren Stöße tragen und verteilen die Energie von der Quelle zum Prozess Gas zum Substrat.

4.1 Energie Konversion : Feld, Plasma, Oberfläche



4.1 Niederdruckentladungen

- Rf Plasma Quellen



4.1 Niederdruckentladung

- CCP kapazitiv gekoppeltes HF Plasma

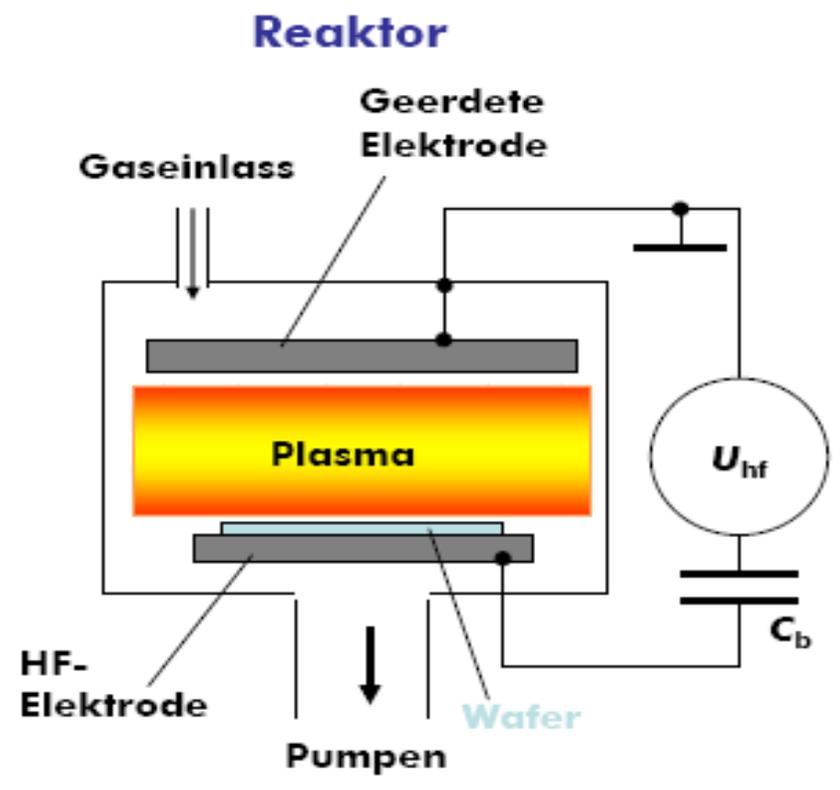
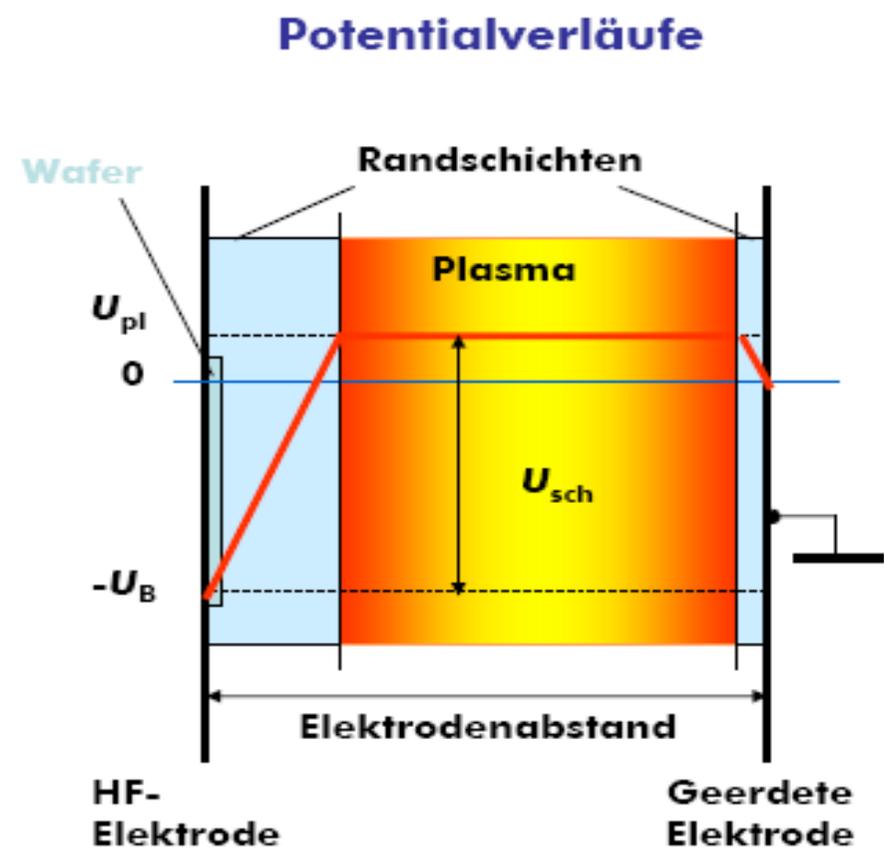


Abb. 2.16

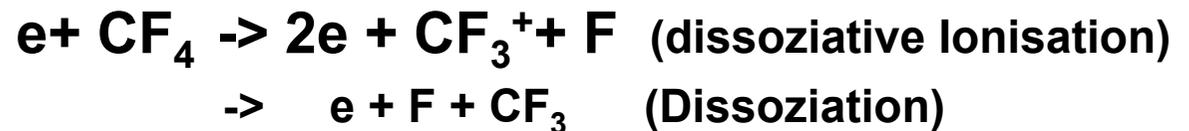


4.1 Niederdruckentladung

Beispiel: Ätzplasma im CCP mit Füllgas z.B. CF₄:

Reaktion im Plasma:

Da die **Elektronen** hohe Energien besitzen, erzeugen diese durch Stoß die **Radikale** (F, CF₃, ...).



Reaktion am Substrat:

Bestimmte Radikale reagieren mit dem Substrat zu **flüchtigen Produkten** (SiF₄), die abgepumpt werden



Bemerkungen:

Si reagiert nicht mit CF₄-Gas (inert!). Der auf F basierende Ätzprozess ist isotrop, da rein chemisch. Um einen anisotropen Prozess zu erhalten, ist ein Ionenätzprozess nötig (siehe „Plasmaätzen“)

4.1 Niederdruckentladung

Beispiel: Ätzplasma im CCP mit Füllgas z.B. CF₄:

Wie hoch ist etwa der Anteil der Ionen in derartigen Plasmen?

Ionisationsgrad ε :

$$\varepsilon = \frac{n_i}{n_g + n_i}$$

n_i : Ionendichte

n_g : Neutralgasdichte

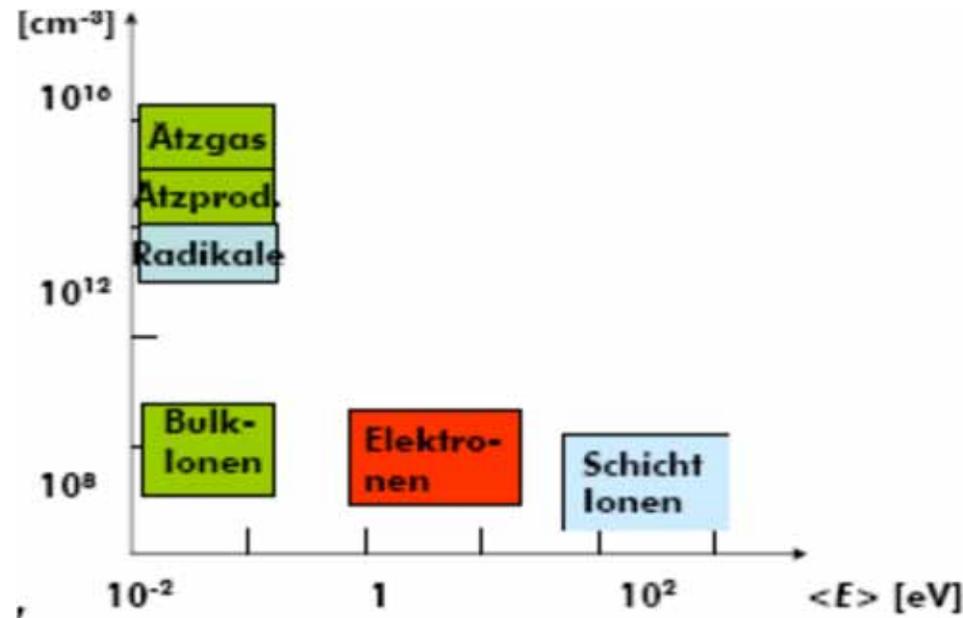
$n_i = n_e$ für hier behandelte Plasmen

Plasmen CF₄ im CCP: $\varepsilon = 10^{-5}$

4.1 Niederdruckentladung

Beispiel: Ätzplasma im CCP mit Füllgas z.B. CF₄:

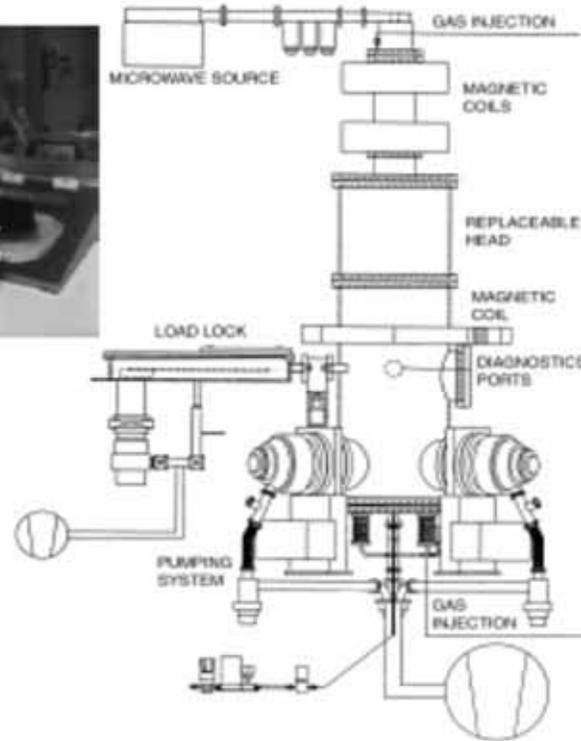
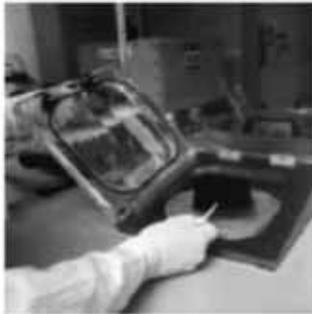
Wie hoch sind die Konzentrationen der verschiedenen Spezies und deren Energien im CCP mit CF₄ als Füllgas?



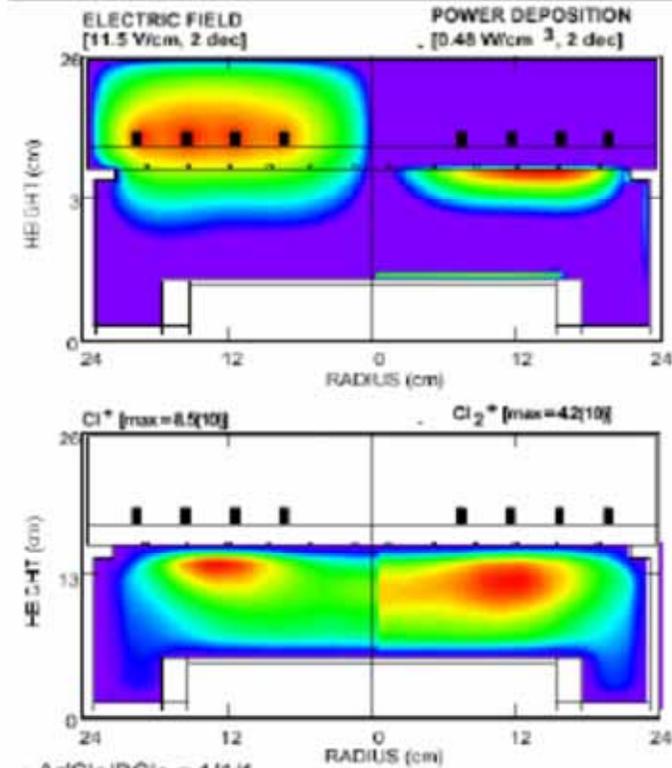
4.1 Niederdruckentladung

ICP Quelle

- plasma excitation by an electric field generated by the transformer principle
- changing magnetic field of the conductor induces an electric field in which the electrons are accelerated
- high plasma density



300 mm ETCH TOOL:
ELECTRIC FIELD, POWER, ION DENSITIES



• Ar/Cl₂/BCl₃ = 1/1/1,
10 mTorr, 600 W ICP,
100 V bias, 150 sccm

UNIVERSITY OF ILLINOIS
OPTICAL AND DISCHARGE PHYSICS

4.1 Niederdruckentladung

ERC und TCP Prinzip:

Principles of high density plasma generation

- ECR (Electron Cyclotron Resonance)
- TCP (Transformer Coupled Plasma)
- Helicon Discharges

- Sufficient electron mean free path ($p \sim 10^{-2}$ Pa) and static magnetic field required for ECR resonance (87.5 mT at 2.45 GHz)
- Circular polarised electrical field of the microwave orthogonal to the magnetic field periodically accelerates the electrons

Interaction of the electrons with the field:

$$m_e \ddot{y} + \nu \cdot m_e \dot{y} = -e \cdot (\mathbf{E}_0 e^{i\omega t} + \dot{y} \times \mathbf{B})$$

Right hand polarise wave driving the resonance

delivers absorbed microwave power:

$$P_{abs} = \frac{n_e e \cdot E_0^2}{4m_e \nu} \left[\frac{\nu^2}{(\omega - \omega_g)^2 + \nu^2} + \frac{\nu^2}{(\omega + \omega_g)^2 + \nu^2} \right]$$

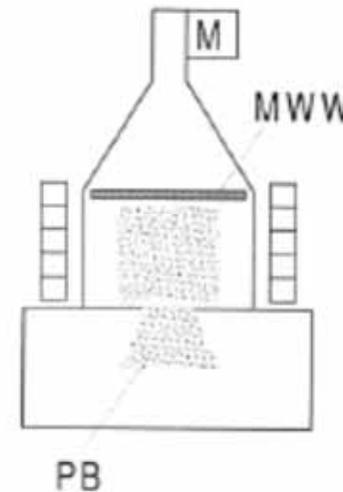
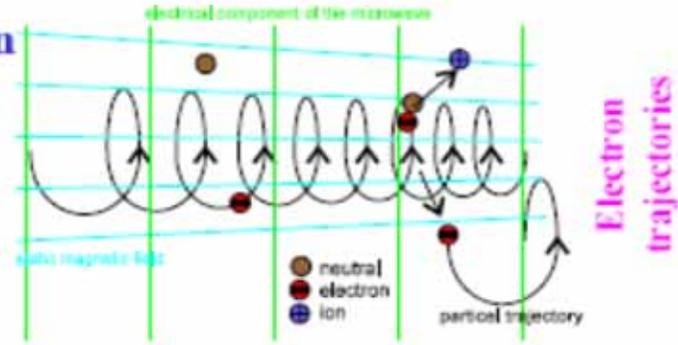
Additional effects supporting the plasma generation :

grad B - Drift

Small electron losses at rear source flange

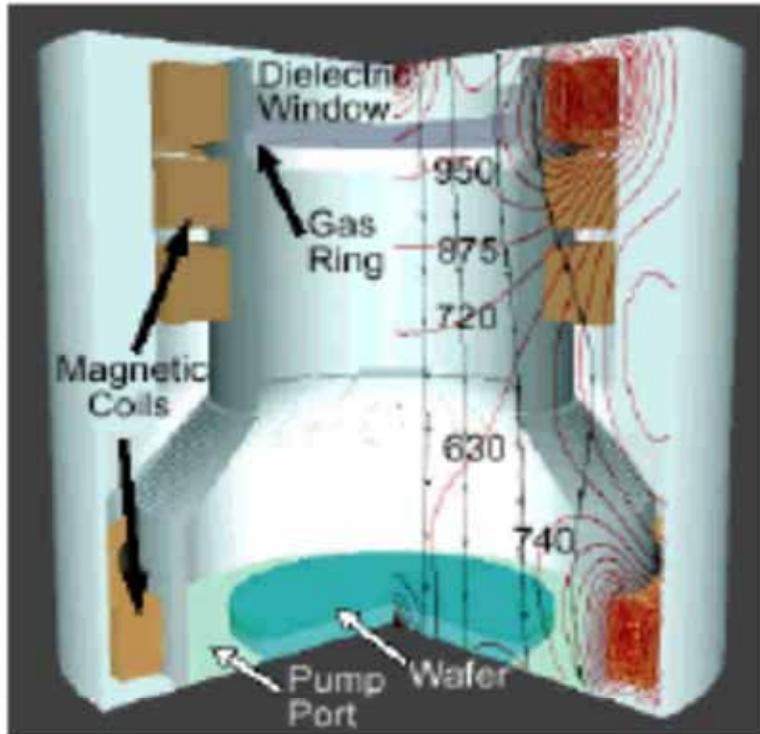
E x B - Drift

Direction of electrons towards antenna region

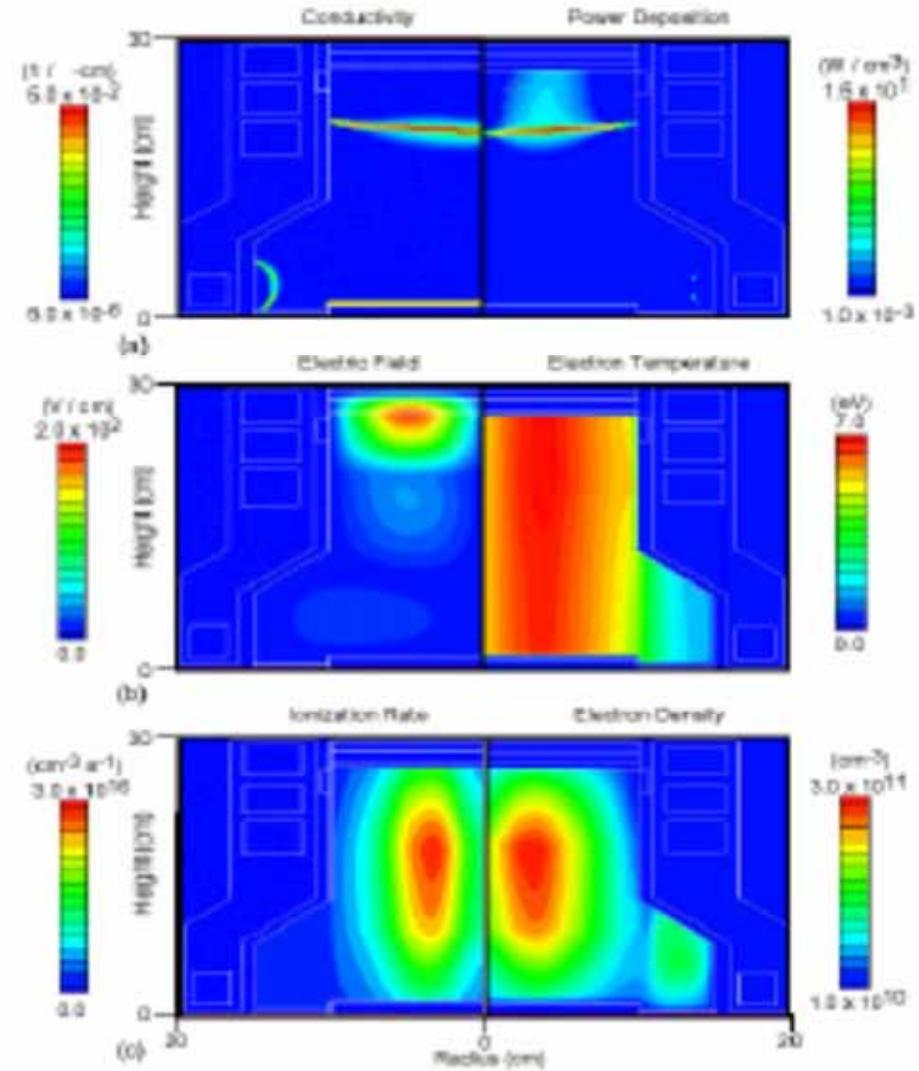


4.1 Niederdruckentladung

ERC Quelle Beispiel:



- high plasma density
- efficient electron-neutral collisions



4.1 Beispiel Niederdruck Ätzen

Applied Materials Si Ätzen mit ICP Puls Plasma

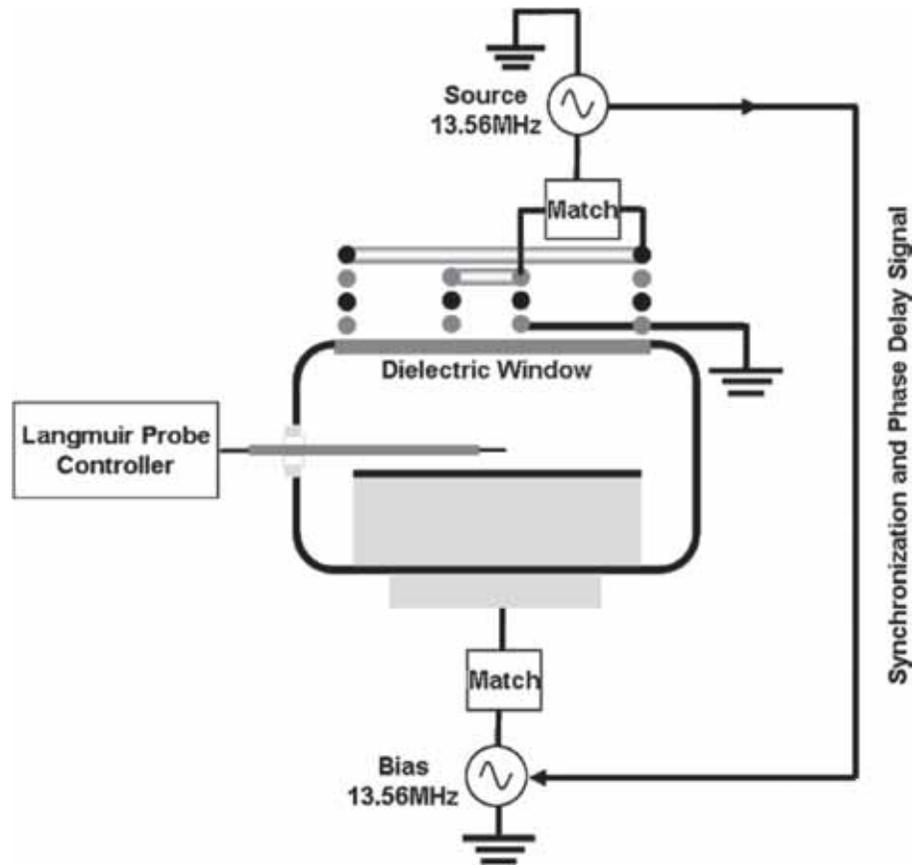


Centris: 22nm, 180 Wafer/h

4.1 Beispiel

Applied Materials: Si Ätzen mit ICP Puls Plasma

Schema Anlage



Ätzprofile

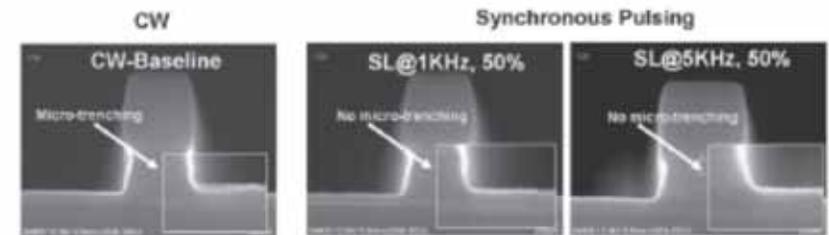
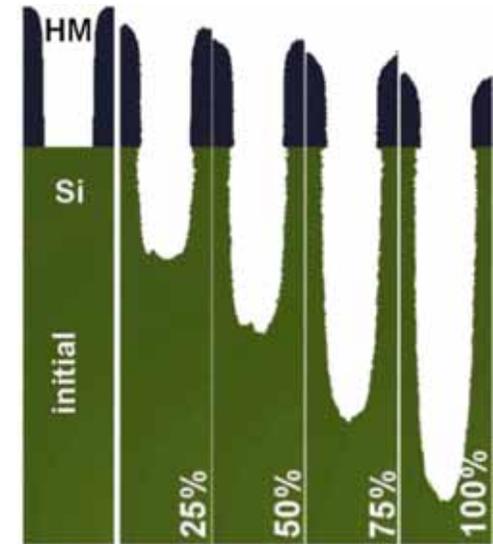


Fig. 13. SEM profiles for 35-nm gate etching. (Left) CW baseline microtrenching occurs. (Right) Synchronous pulsed mode applied for the SL step. No microtrenching is observed.

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

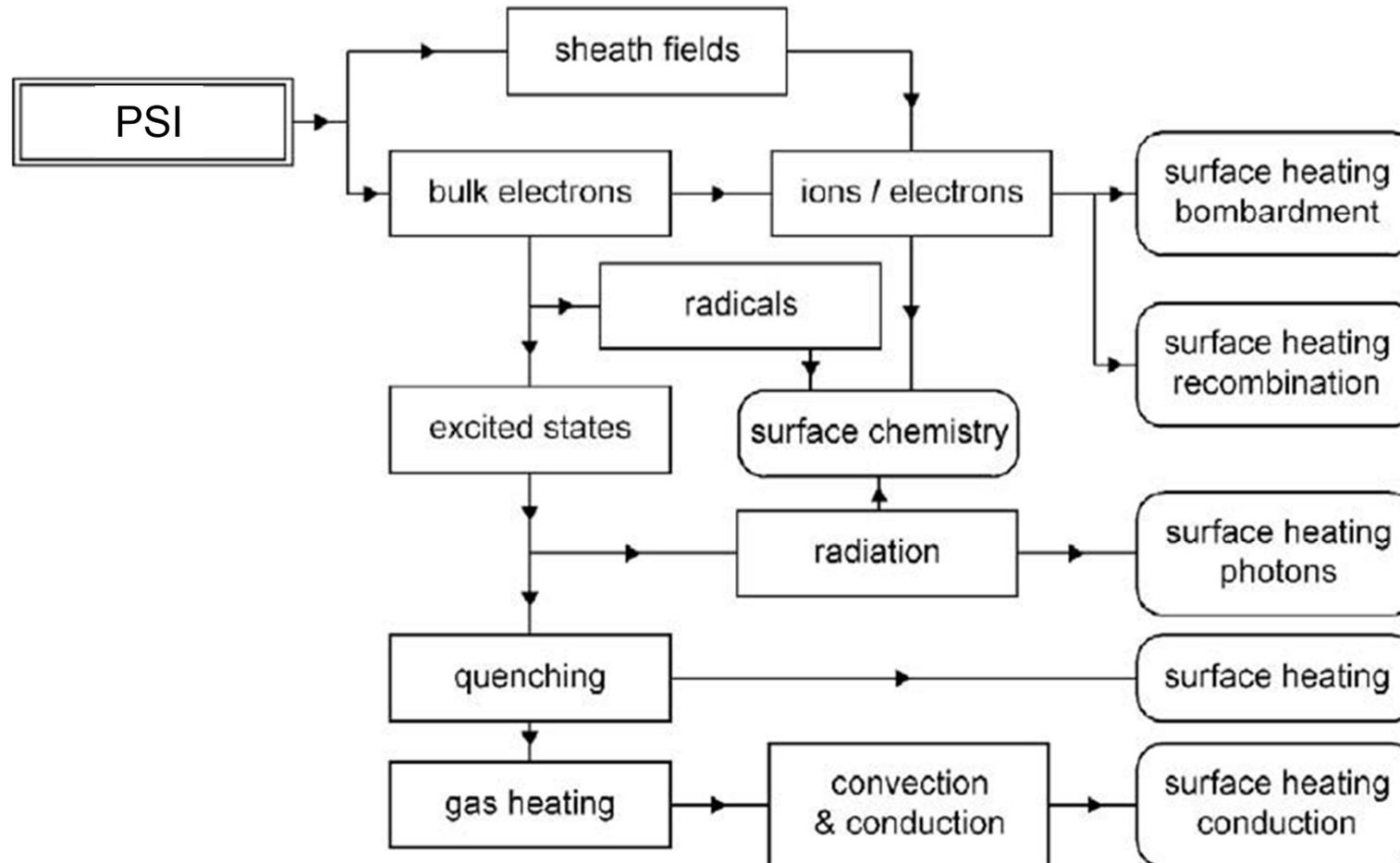
3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

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

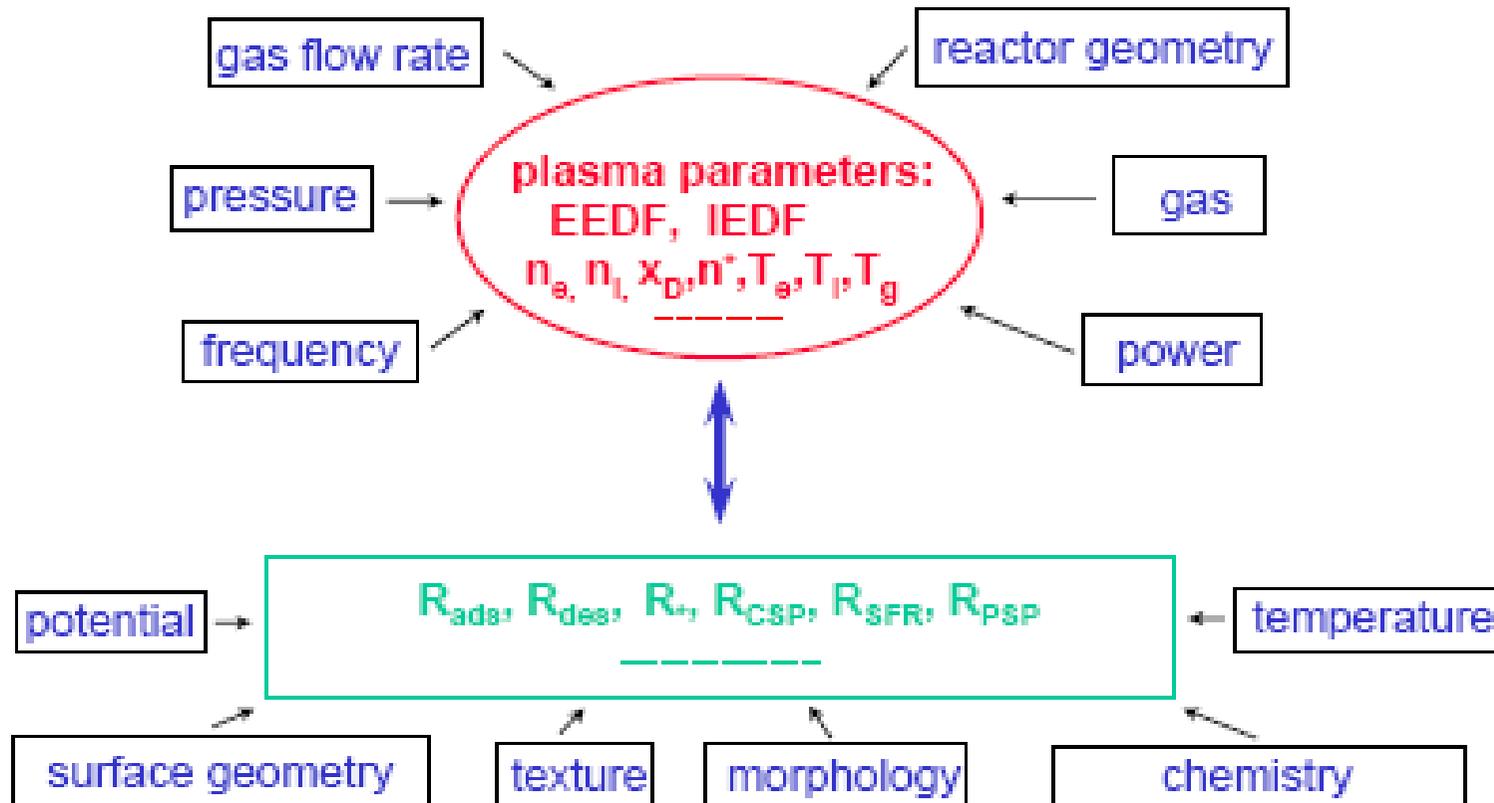
4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma und Oberfläche



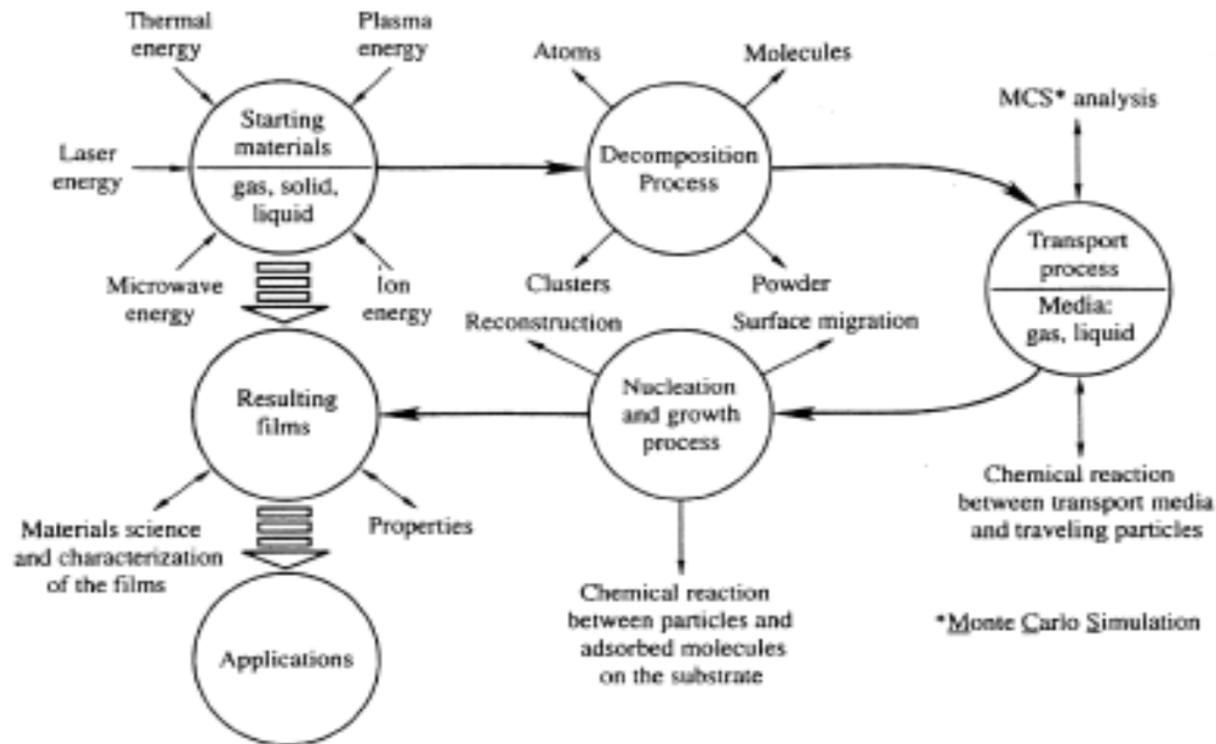
4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma und Oberfläche
Parameterfeld



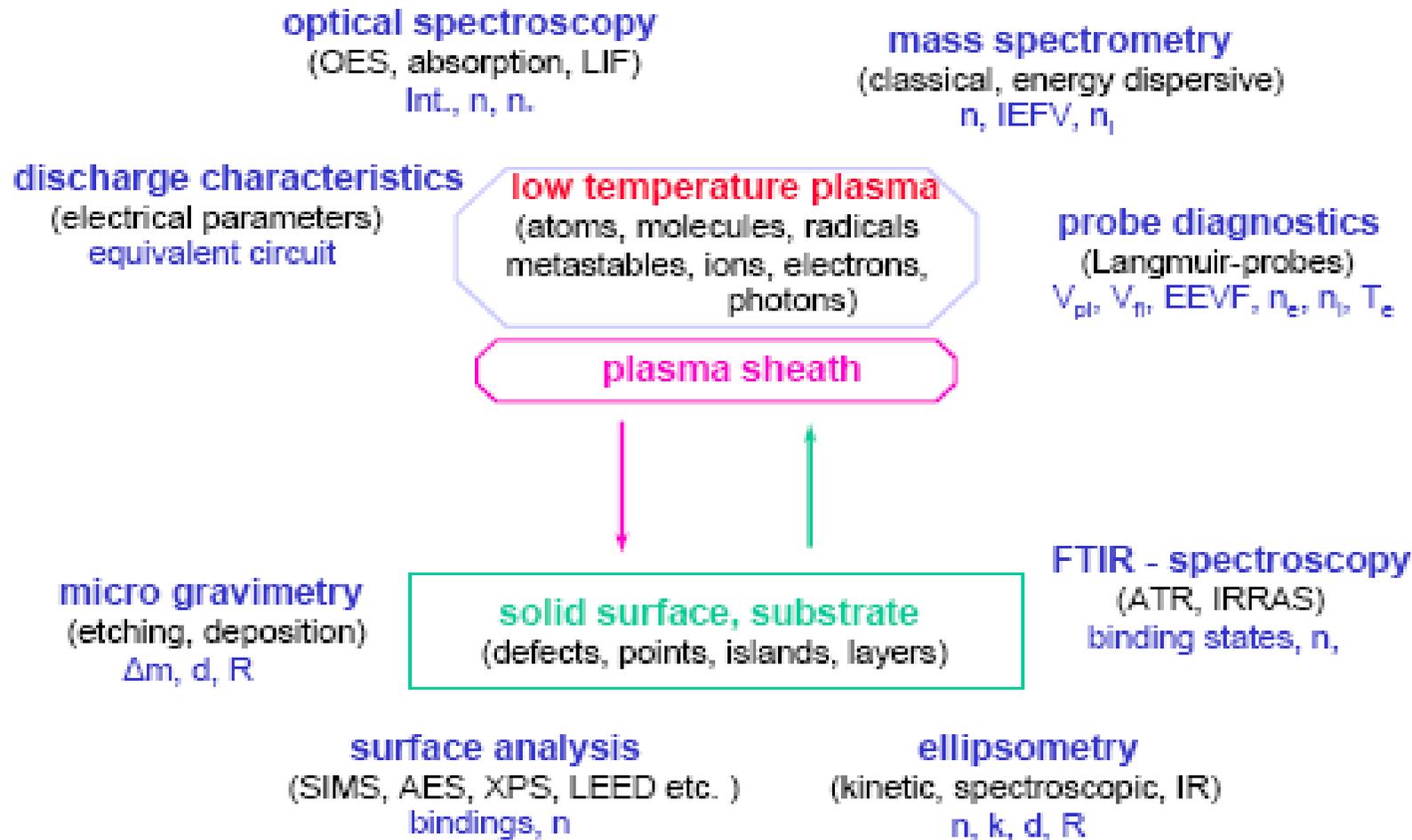
4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma und Oberfläche
Prozesskette



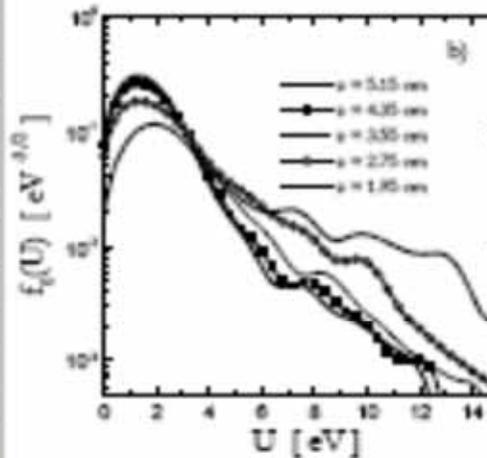
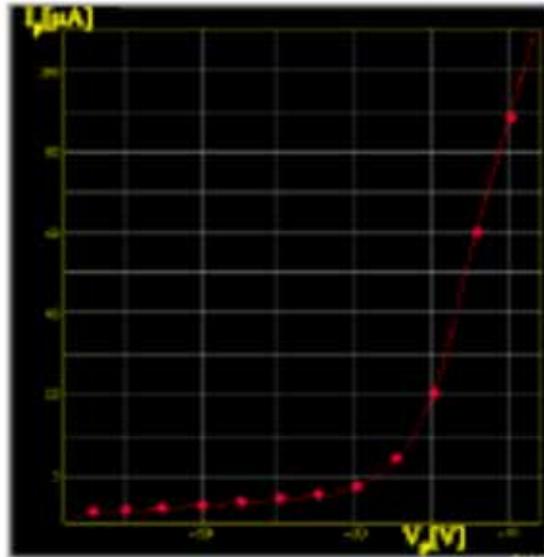
4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma und Diagnostik



4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Partikel Interaktion: geladene Träger

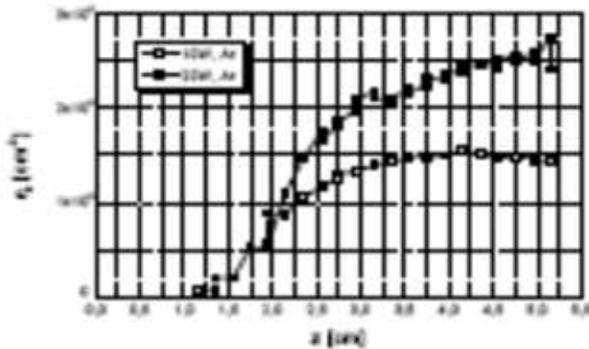


$$\frac{d^2 I}{dU^2} = \text{const} \cdot n_p \cdot A_p \cdot f(U)$$

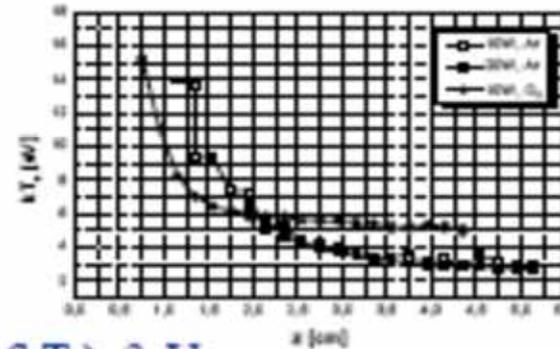
$$\int_0^\infty f(U) \sqrt{U} dU = 1$$

$$n_p = \text{const} \cdot A_p^{-1} \int_0^\infty \sqrt{U} \frac{d^2 I}{dU^2} dU$$

$$u_p = \frac{\int_0^\infty U^{3/2} \frac{d^2 I}{dU^2} dU}{\int_0^\infty \sqrt{U} \frac{d^2 I}{dU^2} dU}$$



$n_p \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$



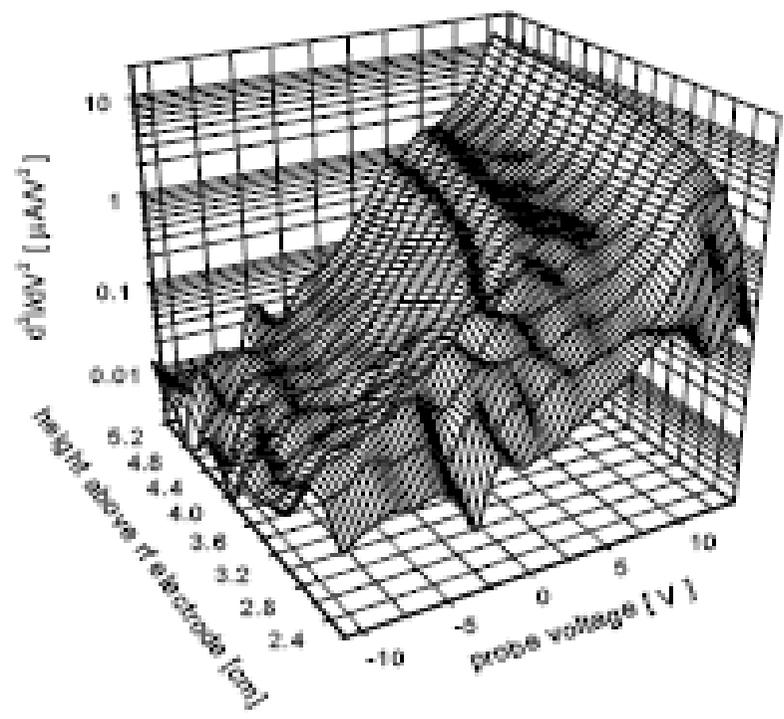
$u_p (kT_e) \sim 3 \text{ eV}$

Dichte und mittlere Energie

Kersten, H., et al., J. Appl. Phys. 87(2000), 3637.

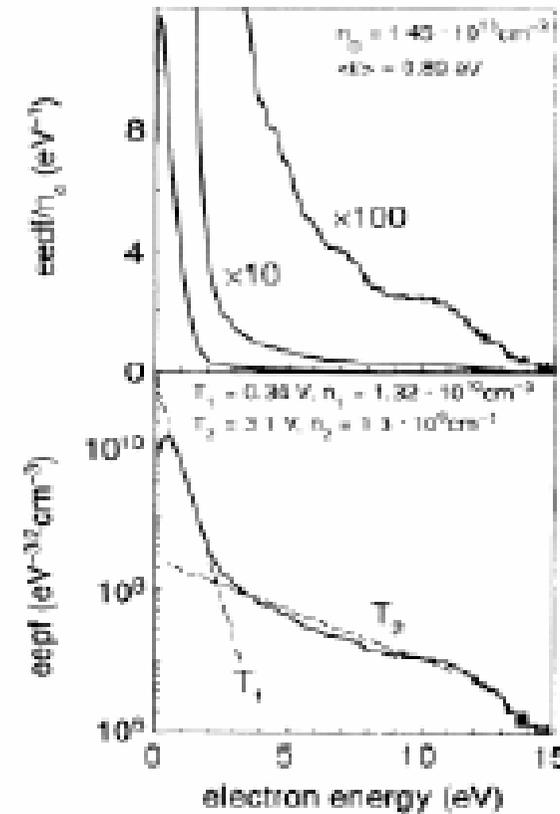
4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Partikel Interaktion: geladene Träger im Plasma



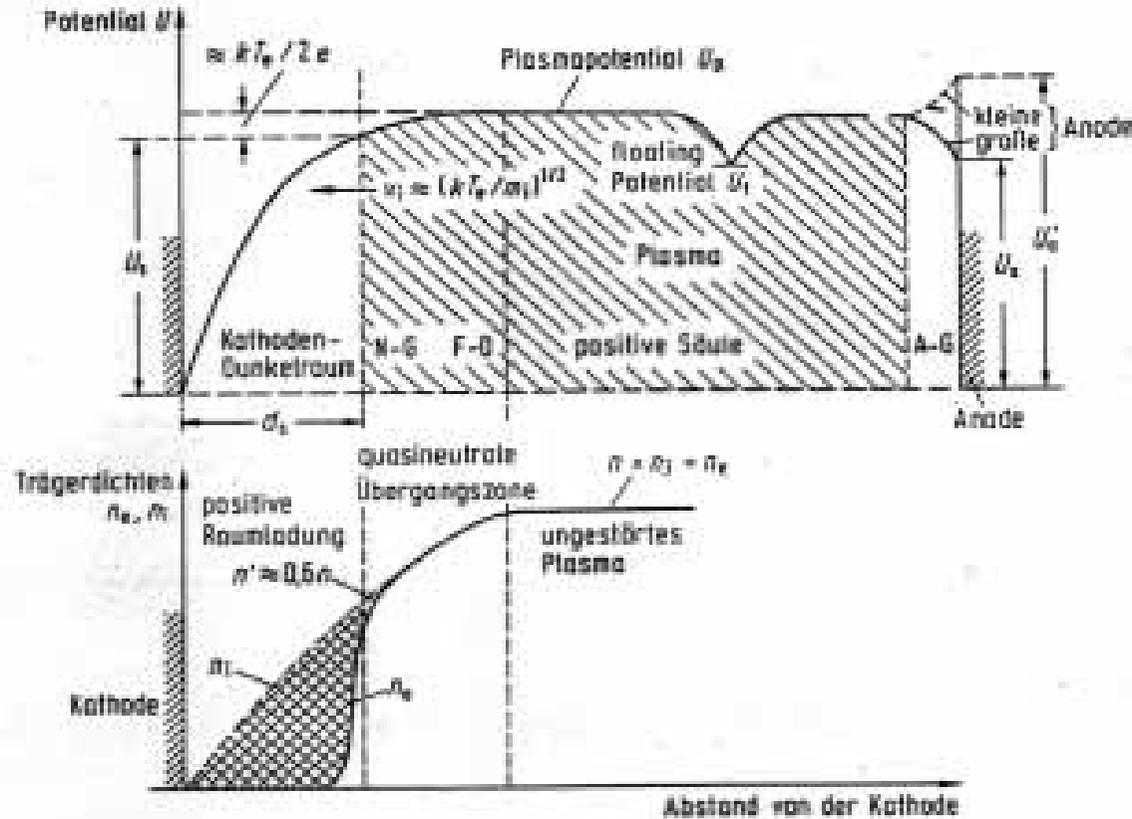
Energiedichteverteilung

Goodyak, V.A., Pijjak, R.B.,
Phys. Rev. Lett. 65(1990), 8.



4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

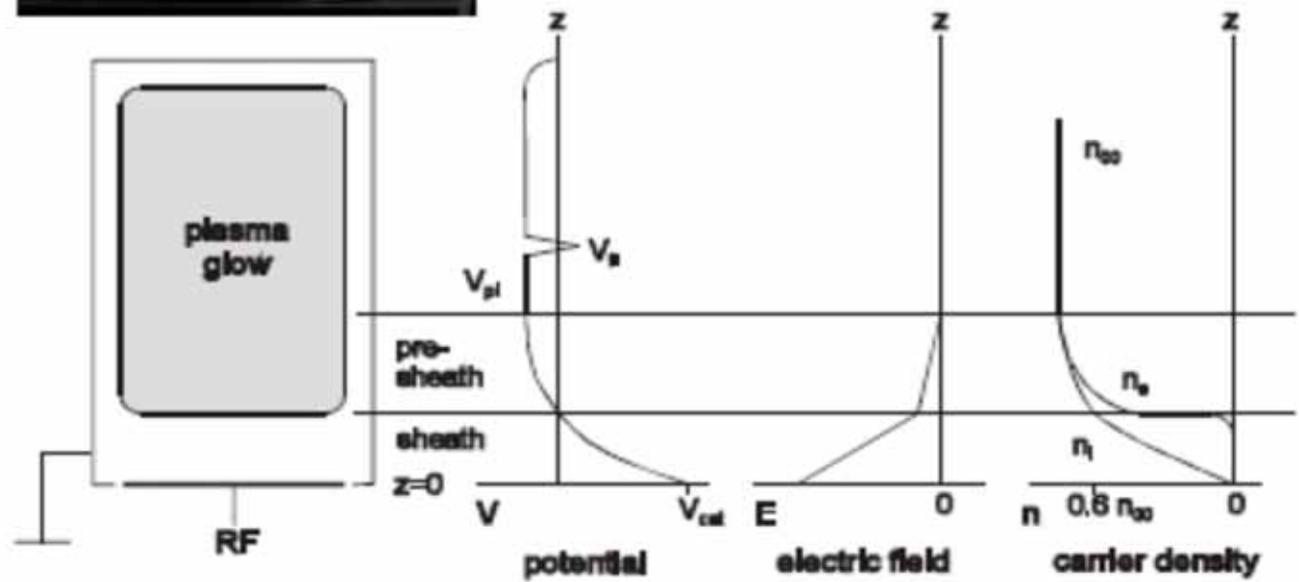
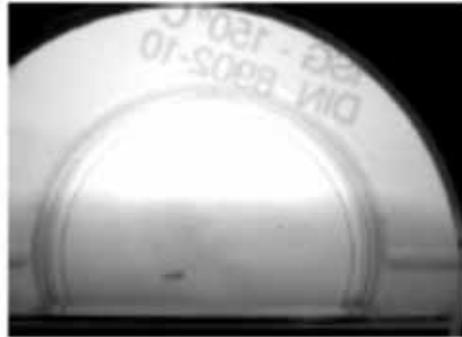
- Plasma Raum (Bulk) und Plasma Hülle (Stealth)



Potential und Ladungsträgerdichte für eine typische Glimmentladung

4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma Raum (Bulk) und Plasma Hülle (Stealth)



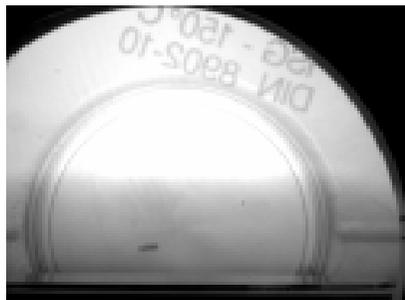
Plasma Raum (bulk)

Elektronendichte (n_e) + negative Ionen (n_-) = Dichte der positiven Ionen (n_+)

4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma Hülle (Stealth)

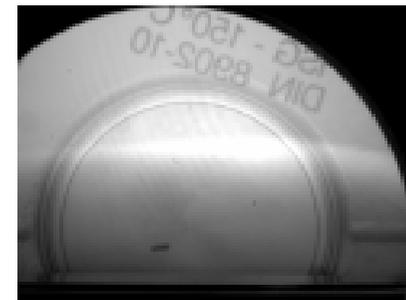
Abhängig von Entladungsleistung und Druck



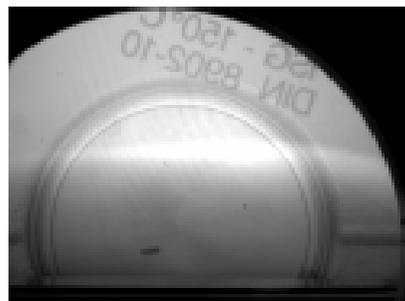
Argon, 0.005mbar, 10W



30W

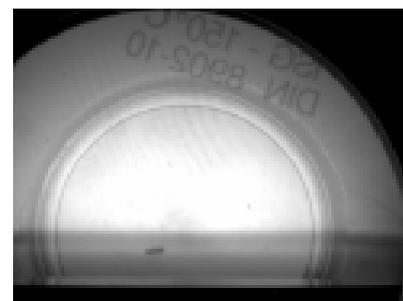


50W



Argon, 50W

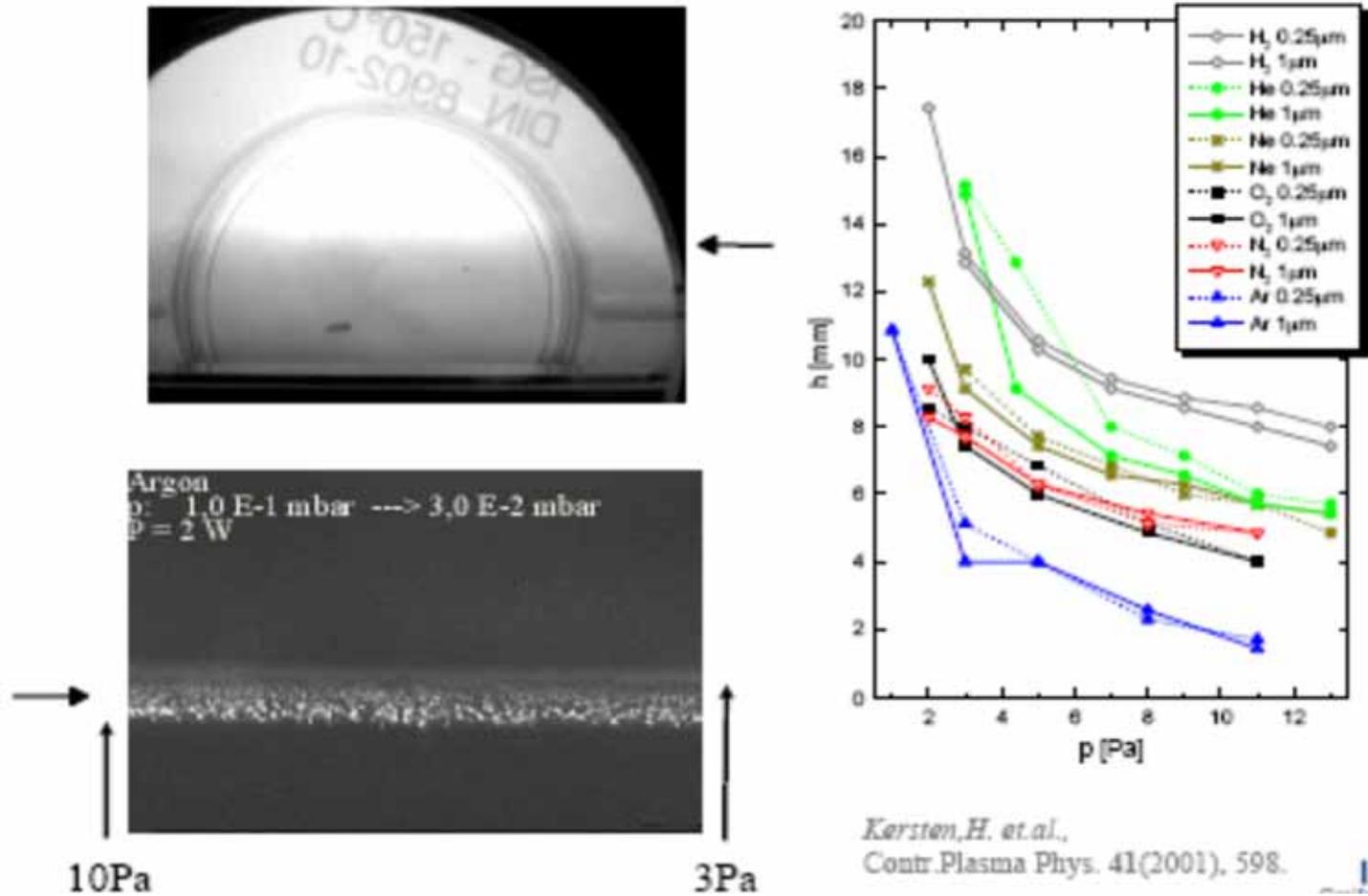
0.005mbar



0.01mbar

4.1.1. Plasma Oberflächen Prozesse

- Plasma Hülle (Stealth)



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

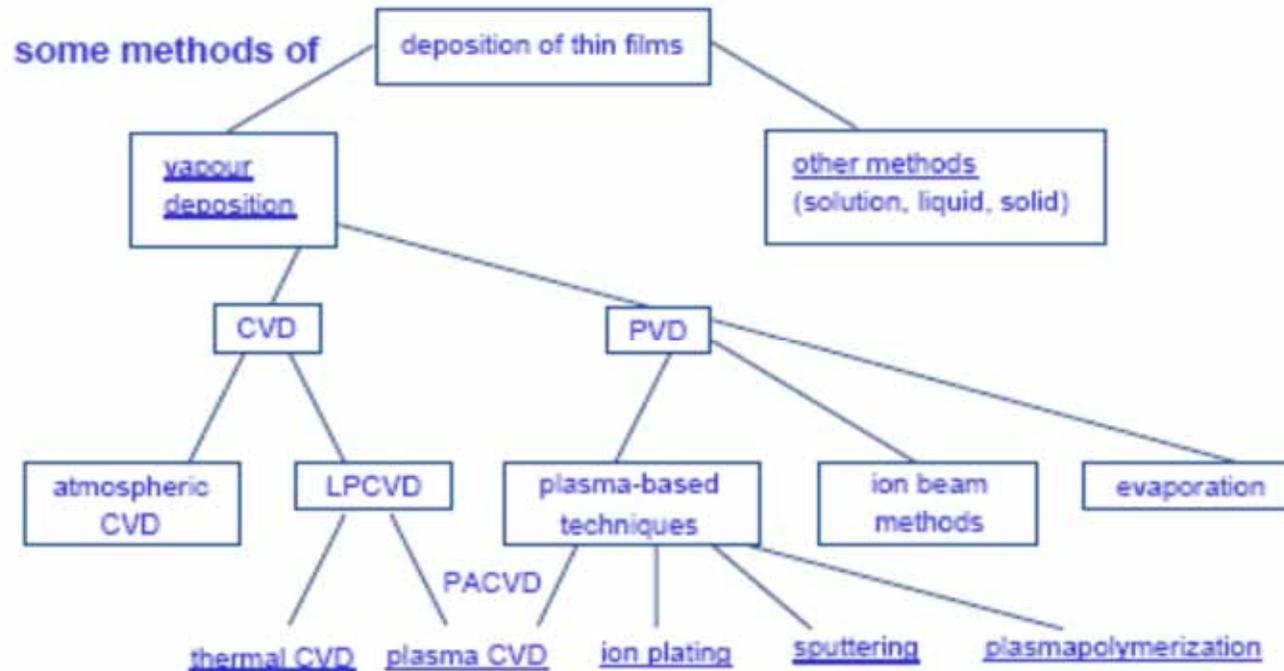
- 3. Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

- 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

4.1.2. Dünnfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) für Dünnfilmbeschichtung

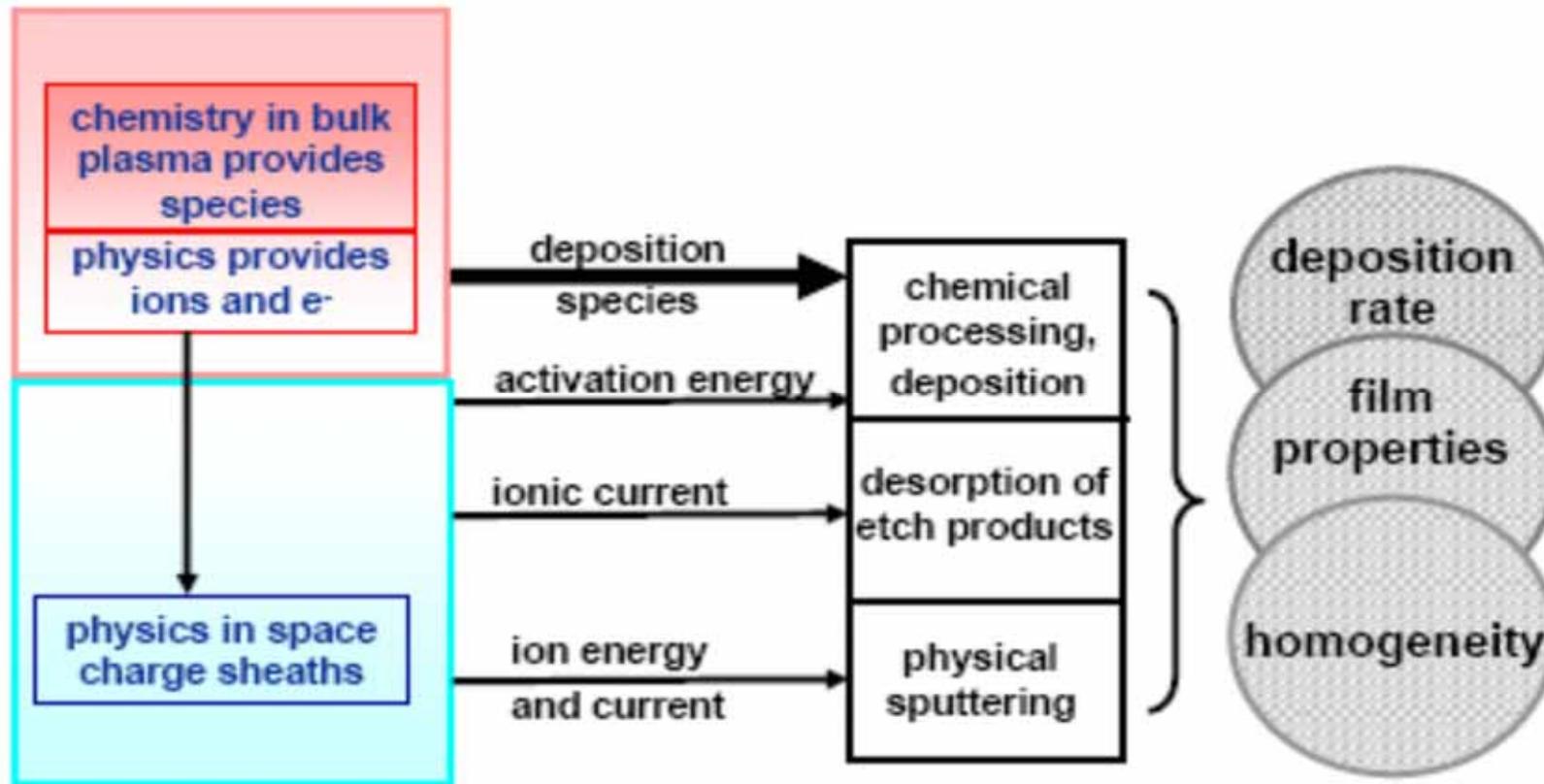


Herausforderungen

- kleiner werdende Device Strukturen
- größere Substrate
- neue Materialien (low k, high ϵ , Cu, Ti, ...)
- komplexere Prozesse
- Umweltaforderungen

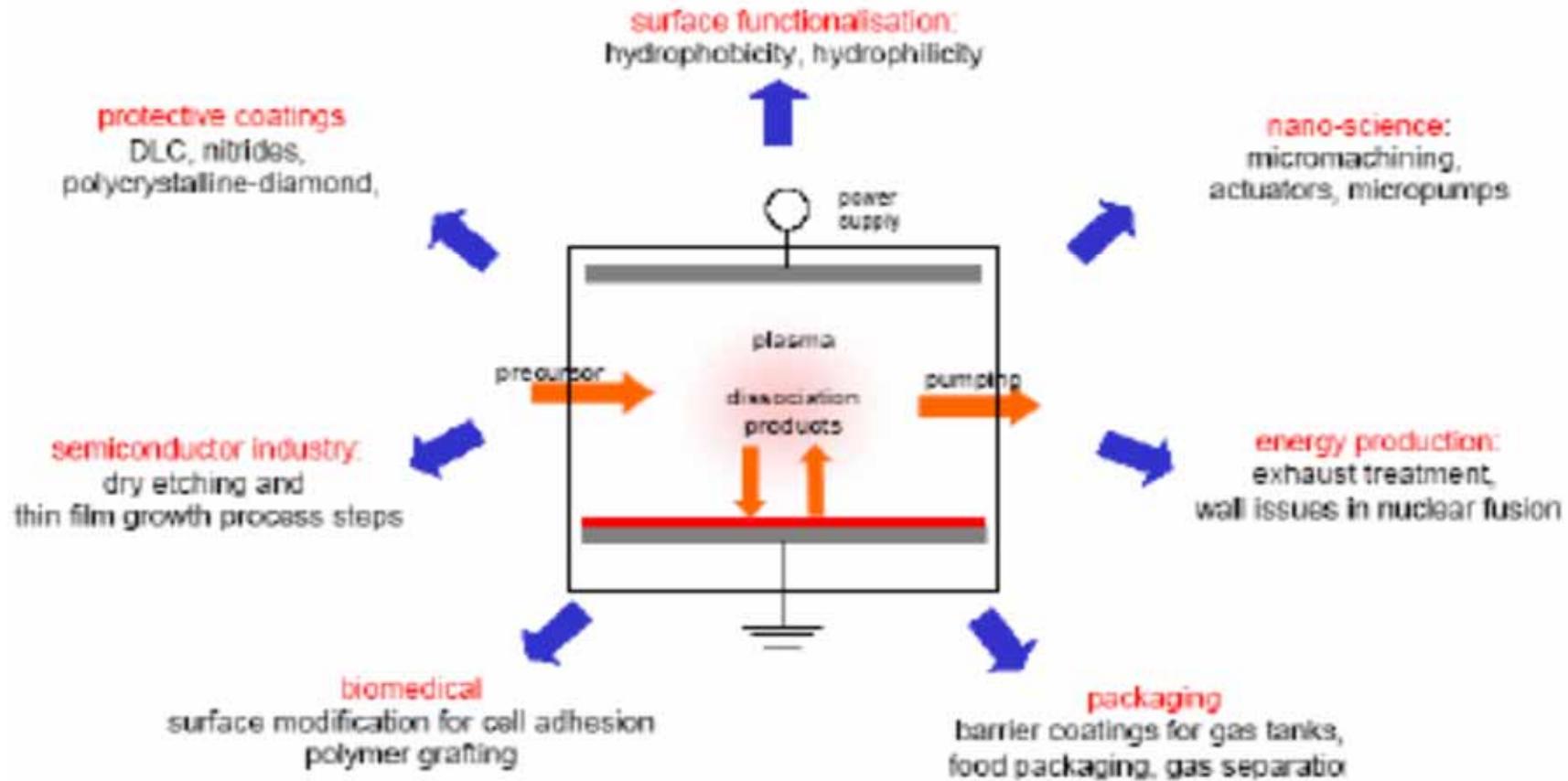
4.1.2. Dünnfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) für Dünnfilmbeschichtung



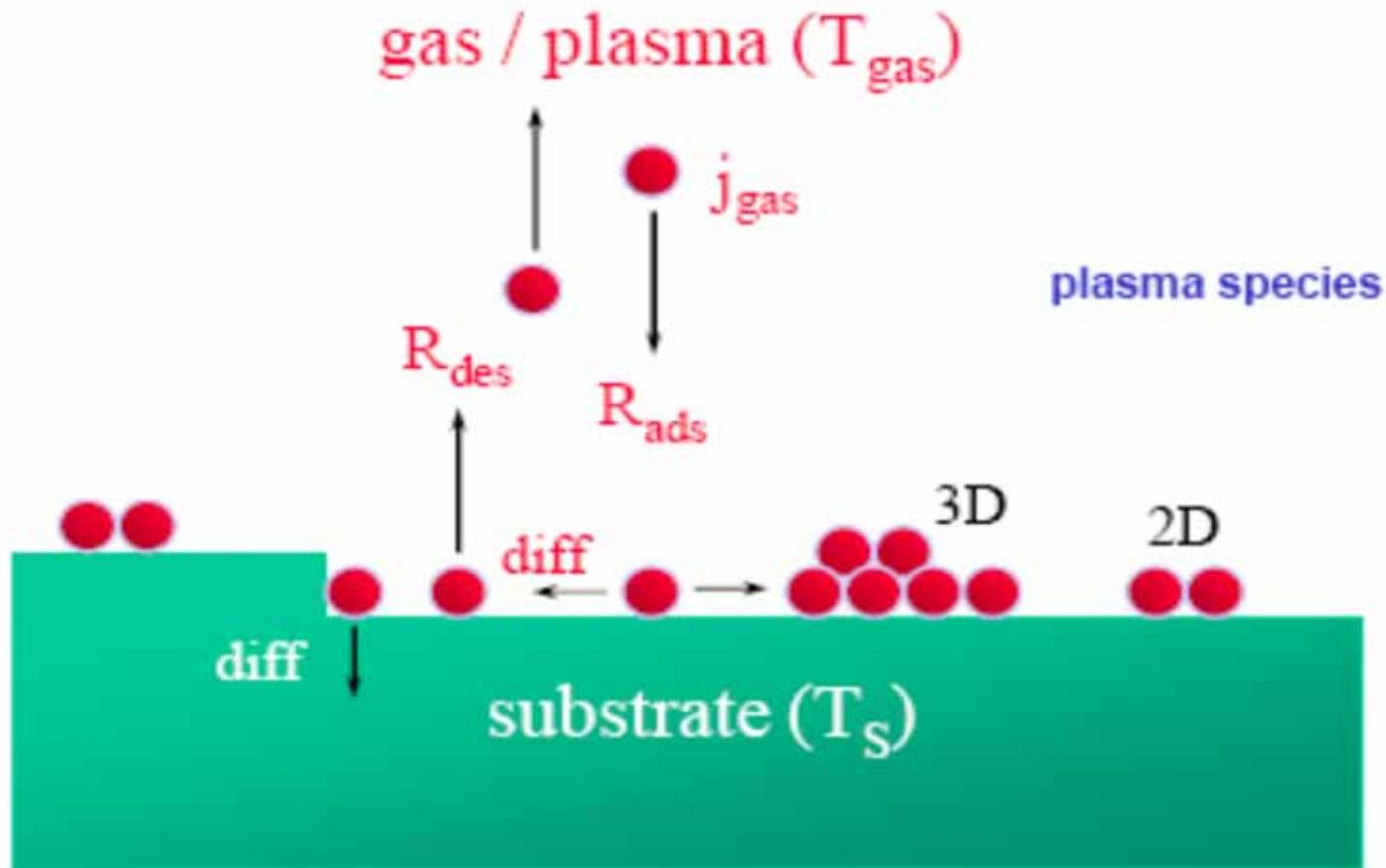
4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

Plasma und Dünnsfilmbeschichtung



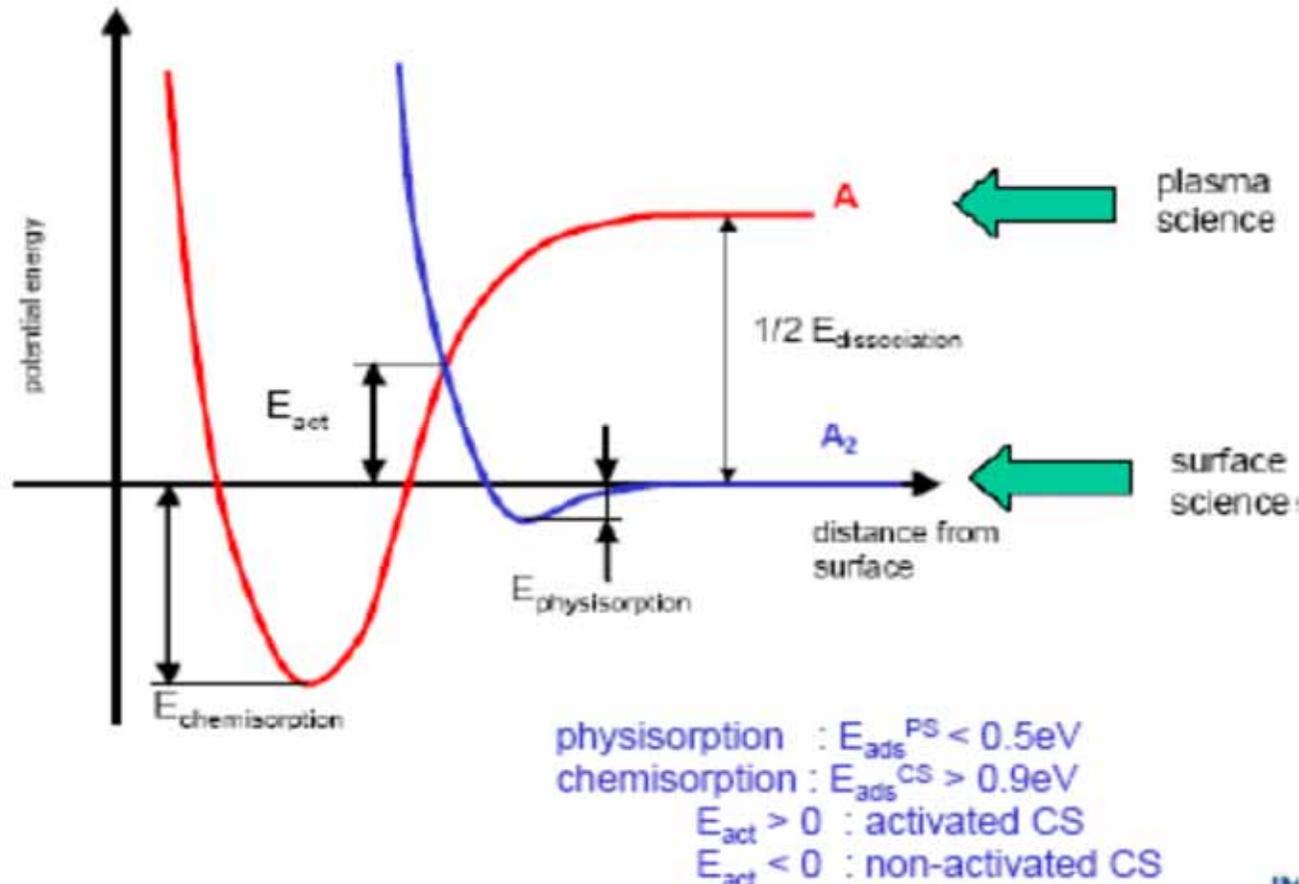
4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) für Dünnsfilmbeschichtung



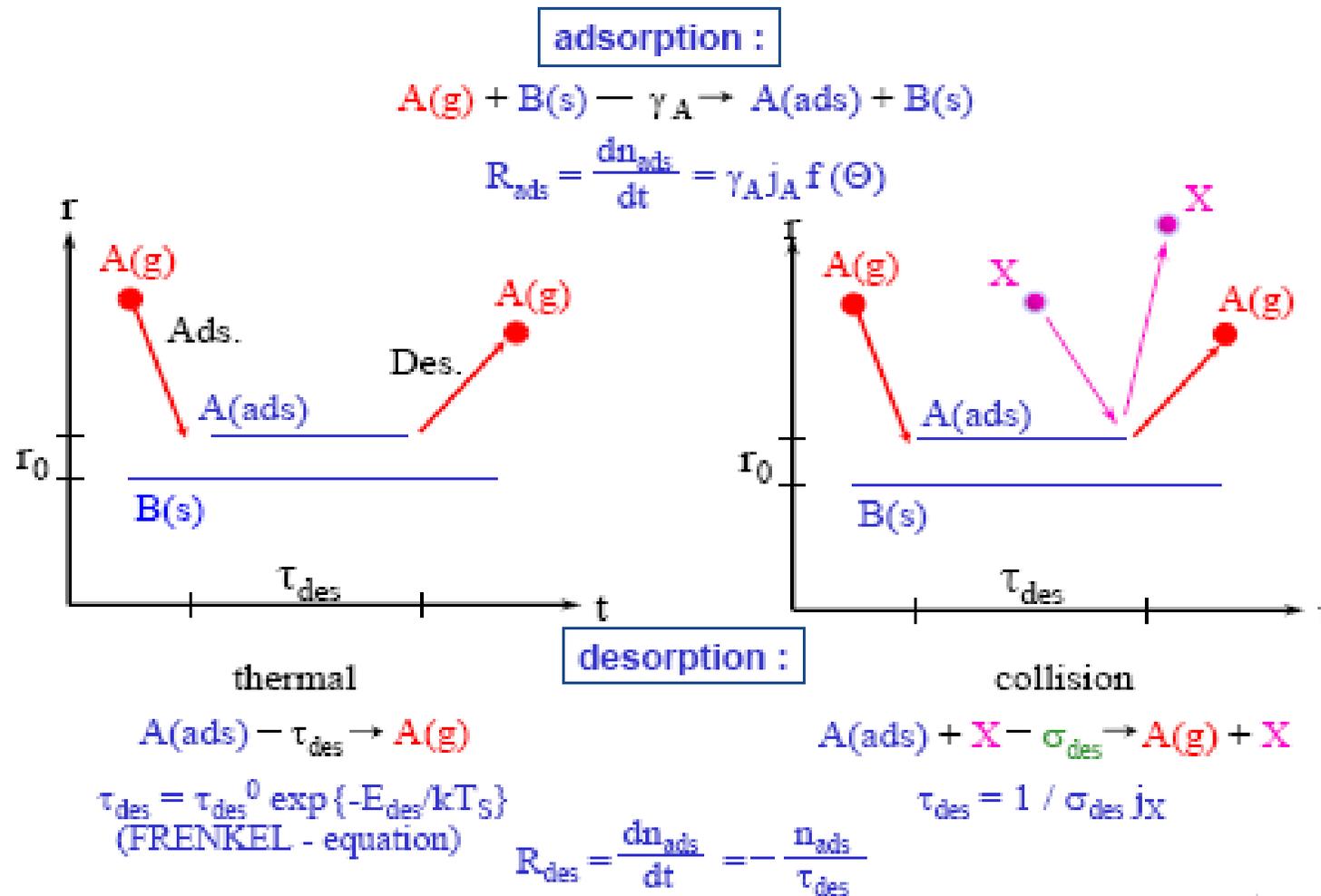
4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) elementare Prozesse



4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) elementare Prozesse



4.1.2. Dünnfilm Beschichtung

PSI (Plasma Surface Interaction) elementare Prozesse

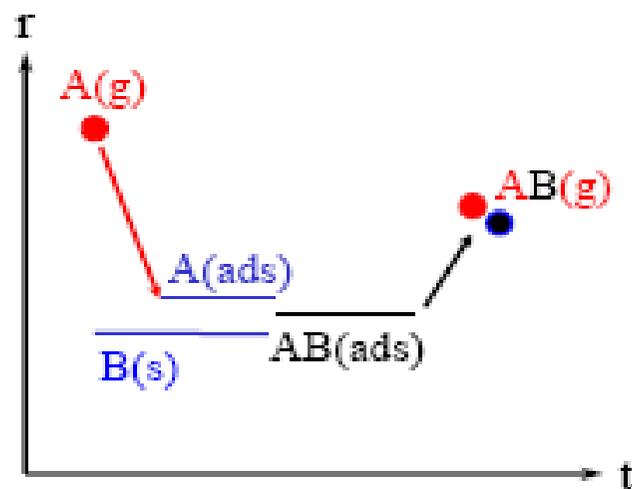
surface film reaction (SFR) :



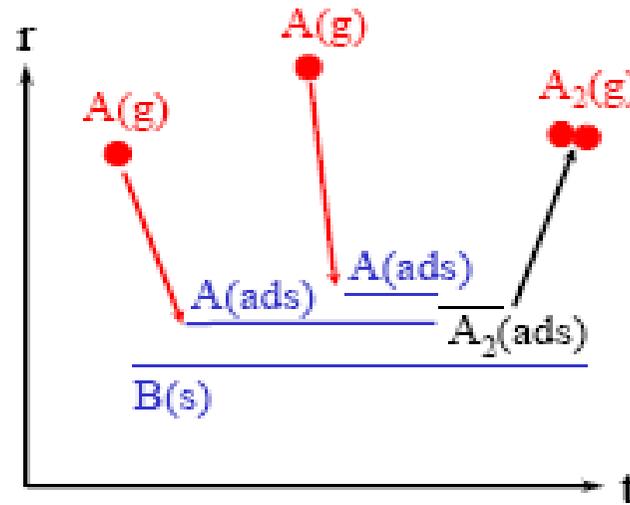
LANGMUIR - HINSHELWOOD - process

$$R_{SFR} = \frac{dn_{AB}}{dt} = k_{SFR} n_A n_B$$

$$R_{SFR} = \frac{dn_{A_2}}{dt} = k_{SFR} n_A^2$$



solid-SFR



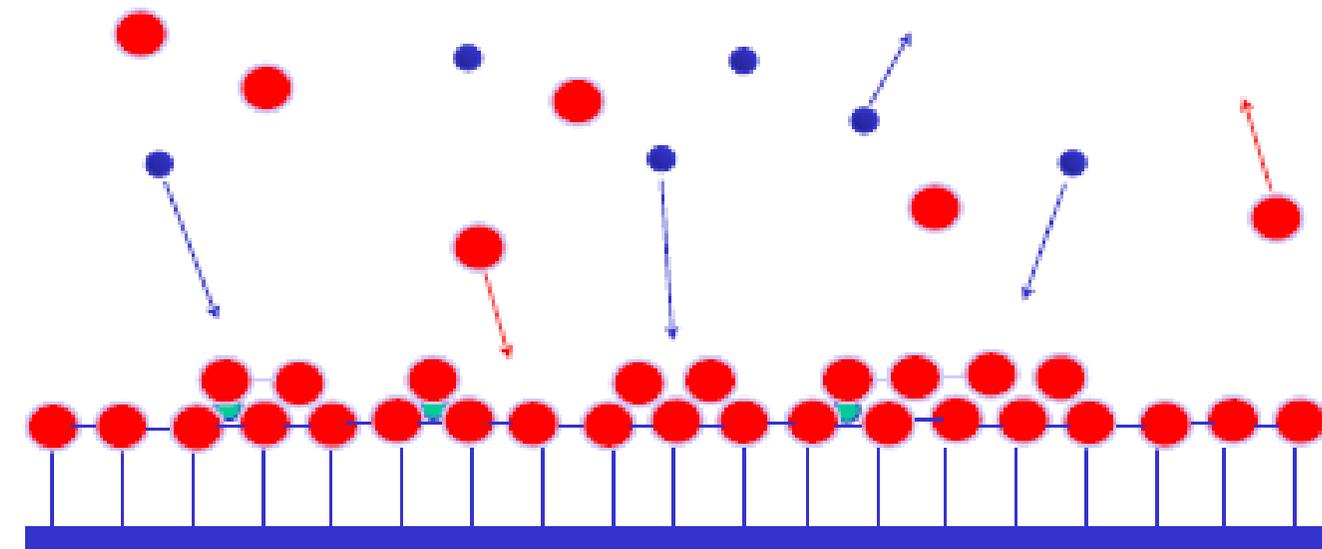
recombination-SFR

$$k_{SFR} = k_{SFR}^0 \exp\{-E_{SFR}/kT_S\}$$

4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

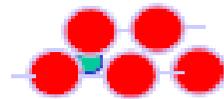
PSI (Plasma Surface Interaction): Plasma Polymerisation

example: plasma polymerization
(cross-linking by ion bombardment)



substrate (T_s) - here : probe

● monomer
here : C_6H_6



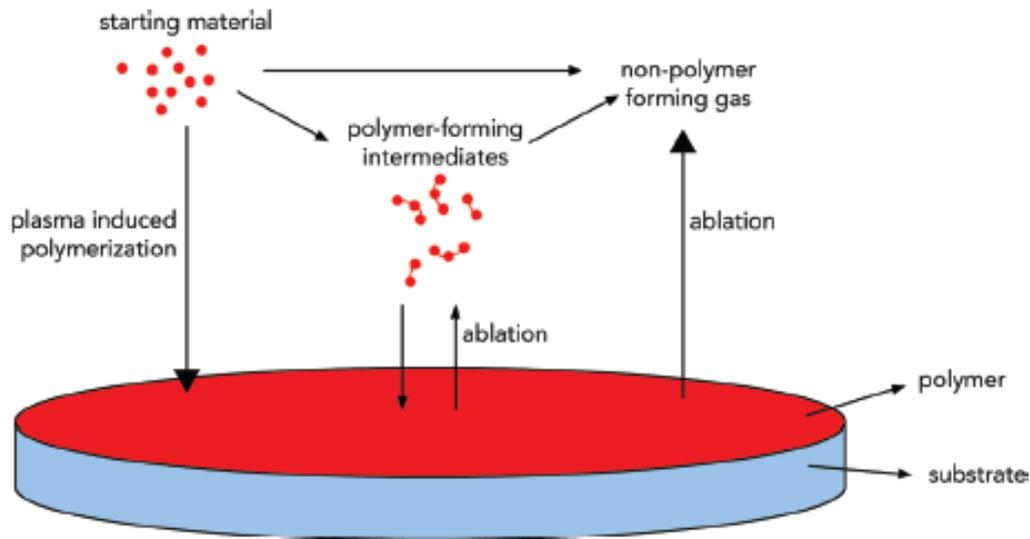
polymer
here: $(C_xH_y)_{pol}$

● ion
here : Ne^+

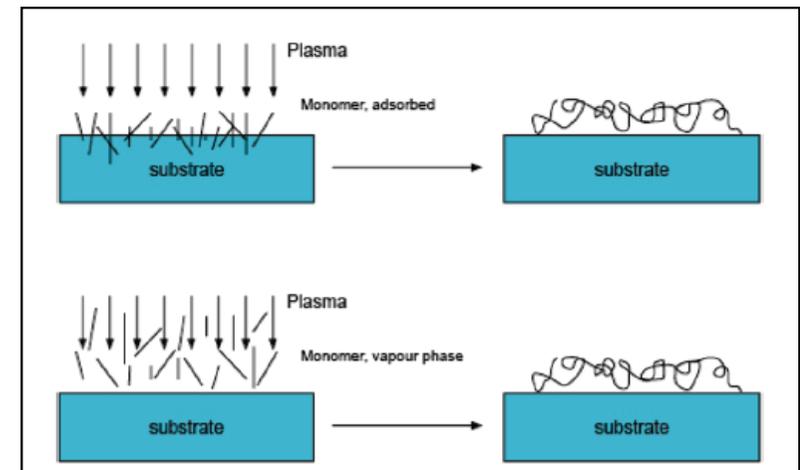
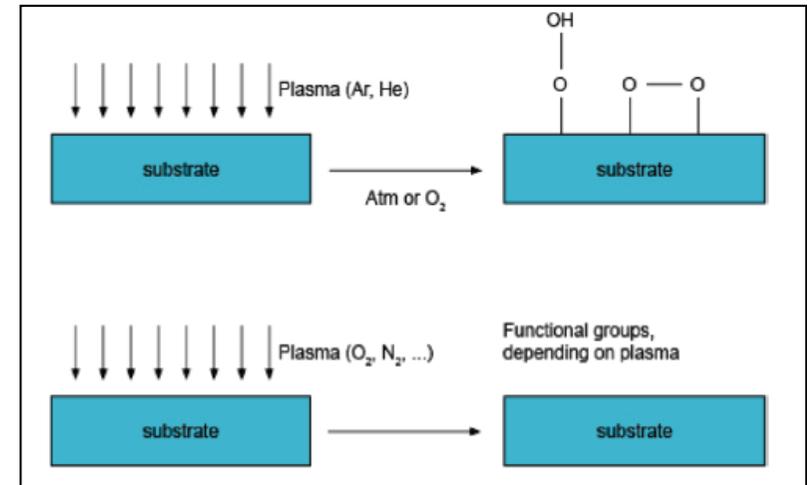
4.1.2. ND Polymer Behandlung

Plasma Übersicht: NON Thermal Surface Treatments Polymers*

Prinzip



Oberflächen Aktivierung/Abtrag



Polymerisation

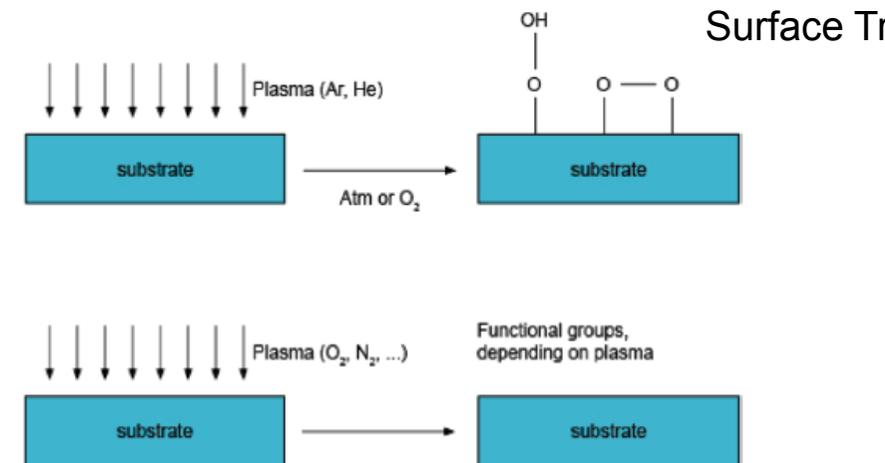
4.1.2. ND Polymer Behandlung

Plasma Übersicht: NON Thermal Surface Treatments Polymers*

Table 3. Representative Overview of Plasma Treatment of Polymer Surfaces*

substrates	plasma	year	reference(s)
PP, poly(vinyl chloride) (PVC), polytetrafluoroethylene (PTFE), polycarbonate (PC), PU, PMMA	NH ₃ and N ₂ /H ₂	1969	333
PE, PP, polyvinyl fluoride (PVF), PS, nylon 6, PET, PC, cellulose acetate butyrate, poly(oxymethylene)	He and O ₂	1969	334
PET, PP	O ₂	1989	335,336
PP	CO ₂	1990	234
polyimide (Kapton film)	Ar, N ₂ , O ₂ , CO, CO ₂ , NO, and NO ₂	1992	337
LDPE	SO ₂	1993	338
LDPE	CO ₂ , NH ₃ with subsequent grafting	1993	339
perfluorinated ethylene-propylene copolymer and PTFE	NH ₃ and H ₂ O vapor	1995	340
PE	CO ₂	1995	341
PP	He, Ne, Ar, H ₂ , N ₂ , O ₂	1995	342
PET	CO ₂	1997	343
PS, LDPE, PP, PET	Ar	1997	256
PS, poly(dimethyl siloxane) (PDMS), phenol-formaldehyde resin	O ₂	1998	257,258
polyvinylidene fluoride (PVDF)	NH ₃ and N ₂ /H ₂	1999	271
polysulfone	CO ₂	1999	344
polysulfone	CO ₂ and N ₂	1999	345
PP, PS, and PTFE	NH ₃ and Ar	2000	263
PS	NH ₃ and N ₂ /H ₂	2003	232
poly(ethylene naphthalate)	N ₂	2003	346
PLLA	O ₂ , N ₂ , Ar and NH ₃	2003	268
PLLA, PLGA	NH ₃	2003	347
polysulfone	NH ₃	2003	205
PP	O ₂ , NH ₃ and N ₂	2004	348
PLGA	O ₂	2004	349
PLA	air or water/ NH ₃ plasma	2005	313
PU	air plasma	2005	350
PS	N ₂ and CO ₂	2005	351
polyethersulfone	N ₂ , NH ₃ , Ar/NH ₃ and O ₂ /NH ₃	2005	352
PCL	air plasma	2005	264
poly[poly(ethylene oxide)terephthalate-co-(butylene)terephthalate (PEOT/PBT)]	Ar	2006	267
PP, LDPE	air plasma	2006	206
PLA	NH ₃	2006	262
PLLA (scaffolds)	Ar	2006	261
PLLA (3D scaffolds)	NH ₃	2007	91
starch	O ₂	2007	223
poly(L/DL-lactide) 80/20%	O ₂ , NH ₃ or SO ₂ /H ₂	2007	265
PU	O ₂	2007	353
PCL nanofibers	Ar (remote plasma)	2007	202
PLLA (scaffold)	O ₂	2007	354
PC	He	2007	193
PE	Ar	2007	355
PLGA	CO ₂	2008	266
PTFE	Ar (remote and direct)	2008	204
PP microporous membrane	Air plasma	2008	211
PP microbeads	He/NH ₃ /H ₂ O and He/O ₂ /H ₂ O	2008	184
PCL	O ₂	2008	221

* The table presents a comprehensive overview of the substrates, the plasma type, and year of publication of the research.



*Desmet 2009

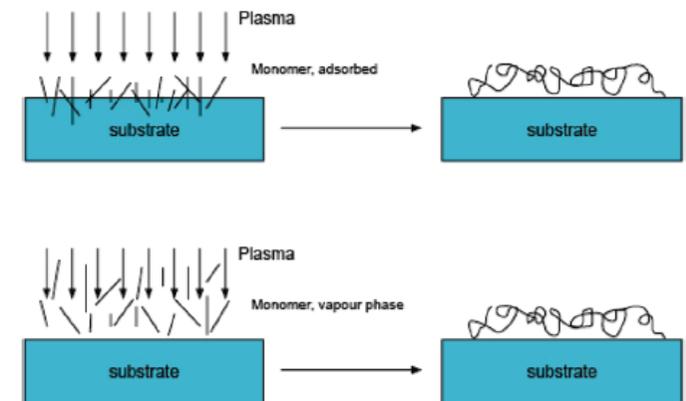
4.1.2. ND Polymer Behandlung

Plasma Übersicht: NON Thermal Treatments Deposition Polymers*

Table 5. Representative Overview of Plasma-Polymerized, Deposited Polymers on Surfaces^a

substrates	monomer	year	reference(s)
PE and mica	AA	1990	296
LDPE	allyl phenyl Sulphone, allyl amine,	1993	338, 339, 359
KBr windows (IR) and silicon wafers covered with gold (XPS)	propylamine, unsaturated allylamine, propargylamine, 1-propanol, allyl alcohol, and propargyl alcohol	1995–1996	360, 361
glass slides and PVC-films	propargyl alcohol, propargyl acid, methylbutynol, allyl alcohol, AA, acrylic aldehyde, furfuryl alcohol, ethylene glycol, ethylene glycol dimethylether	1996	362
silicon, KCl and PET	allyl alcohol	1996	363
glass coverslip, wrapped with an aluminum foil	acrylic (propenoic) acid and propanoic acid	1996	364
aluminum substrate	allyl amine/1,7-octadiene and AA/hexane	1996	365
KBr pellets and silicon wafers	benzene, 1,2,4-trifluorobenzene, and hexafluorobenzene	1998	366
aluminum foil	allyl alcohol/1,7-octadiene	1998	367
(oxidized) aluminum	AA	1998	368, 369
polyimide	1,3-diaminopropane, ethylene diamine	1999	370, 371
6-well tissue culture plates, aluminum foil	AA/1,7-octadiene	1999	305, 372, 373
PTFE	allyl alcohol, AA, allylamine and acrylonitrile	2001	297
stainless steel chips	isopropyl alcohol	2002	295
Ti alloy	allylamine	2002	303
polysulfone membranes, Al foil and glass	ethylenediamine, diaminocyclohexane	2003	300
metal sheet, coated with epoxy resin and aluminum.	allyl alcohol, allylamine, AA/ ethylene or butadiene as initiator	2003	374
polysulfone	<i>n</i> -butylamine, allylamine, and allyl alcohol	2003	205, 375
uncoated silicone, silicone wafers coated with Au or Al, indium tin oxide glass and glass	aniline	2004	376
PS	isopropyl alcohol	2004	304
Silicon	styrene	2004	377
PLA (3D substrate)	allylamine	2005	294
silicon	ethylene	2005	378
silicon	allyl alcohol	2005	379
silicon	tetrafluoroethylene	2005	380
PU	allyl alcohol	2006	381
silicon	allylamine	2006	382
glass	styrene	2007	383
PET	PEO	2007	384
PLLA (3D)	AA	2007	306
PS	AA, HEMA, <i>N</i> -vinyl-2-pyrrolidinone, <i>N</i> -vinylform-amide, allylamine, and hexylamine	2008	385
PLGA (scaffolds)	heptylamine	2008	151
silicone and PP	NH ₂ /ethylene	2008	228
silicone	ethylene and styrene with allylamine or allyl alcohol	2008	386, 387
perfluorinated poly(ethylene-co-propylene) and PET	<i>n</i> -heptylamine or allylamine	2008	225, 226
glass	acetylene and protein [bovine serum albumin–fluorescein isothiocyanate (BSA-FITC)]	2008	220
silicon	allylamine	2008	302
glass	hexane and allylamine	2008	58
PE	maleic anhydride	2008	301

^a The table presents a comprehensive overview of the substrates, the monomer(s) and year of publication of the research.



*Desmet 2009

4.1.2. ND CVD

Plasma Übersicht: Hydrolyse zur Polymer Zersetzung*

Table 1. Hydrolysis: An Overview of Some Interesting Papers Reporting on Surface Hydrolysis by Acid or Basic Degradation

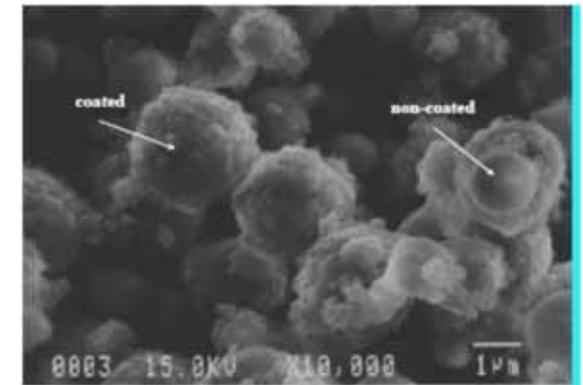
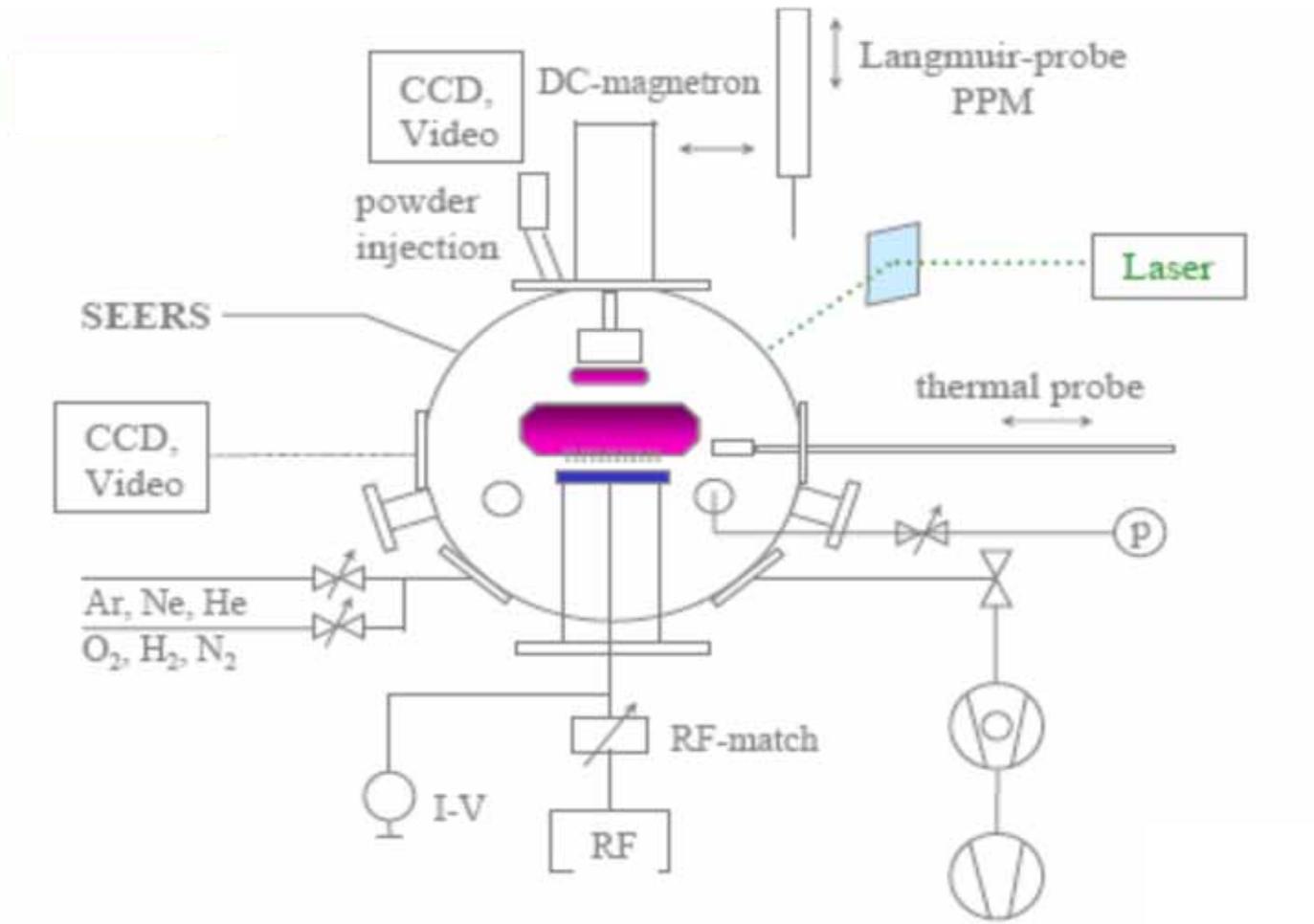
process	year	reference(s)
Hydrolysis of different polymers such as poly(methyl methacrylate) (PMMA), poly(ethyl terephthalate) (PET), and polyamide 6 with HCl.	1995	316
poly(glycolic acid) (PGA) was treated with NaOH solution. A better cell adhesion was found for vascular smooth muscle cells.	1998	317
Poly(D,L-lactic-co-glycolic acid) (PLGA) and PLA were treated in NaOH solution and hepatocytes showed better adhesion properties.	1999	318
PCL films treated with NaOH showed enhanced cell attachment. In vivo experiments were performed.	2000	319
Surface hydrolyzed sutures were functionalized by attaching (+)-biotinyl-3,6,9-trioxaundecanediamine.	2003	170
PMMA films were exposed to methanol/NaOH hydroxide and then treated with adenosine triphosphate.	2003	320
PCL membranes were prepared by solvent casting and biaxial stretching. The membranes which were treated with NaOH were more hydrophilic and showed better cellular proliferation.	2006	321
A comparative study for PCL-based films and scaffolds which were treated with NaOH or KOH solution for endothelialization. Coculture study showed that gelatin-coated and hydroxyapatite-coated systems were superior.	2006	94
PCL surfaces were hydrolyzed with NaOH solutions and subsequent immobilization of RGD-peptide.	2006	322
A comparative study concerning the bonding of substrate and a cover plate. PMMA was exposed to air plasma treatment, acid catalyzed hydrolysis and aminolysis.	2006	323
PLGA sutures were hydrolyzed and grafted with collagen. A collagen-PLGA scaffold is prepared from a blend of PLGA and modified PLGA with collagen.	2006	324
Poly(L-lactic acid) (PLLA) films were immersed in high-strength simulated body fluid based mixtures (pH 6.4) in order to achieve an apatite and/or an apatite/collagen coating.	2006	325, 326
PCL substrates were hydrolyzed with NaOH or coated with collagen (plasma-method). Results indicate that substrates which were hydrolyzed significantly lose mechanical strength and that collagen-immobilized substrates are more favorable for cell-culture.	2007	93
Poly(glycolide-co-ε-caprolactone) (PGCL) was incubated in 0.1 M NaOH	2008	291

*Desmet 2009

4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln

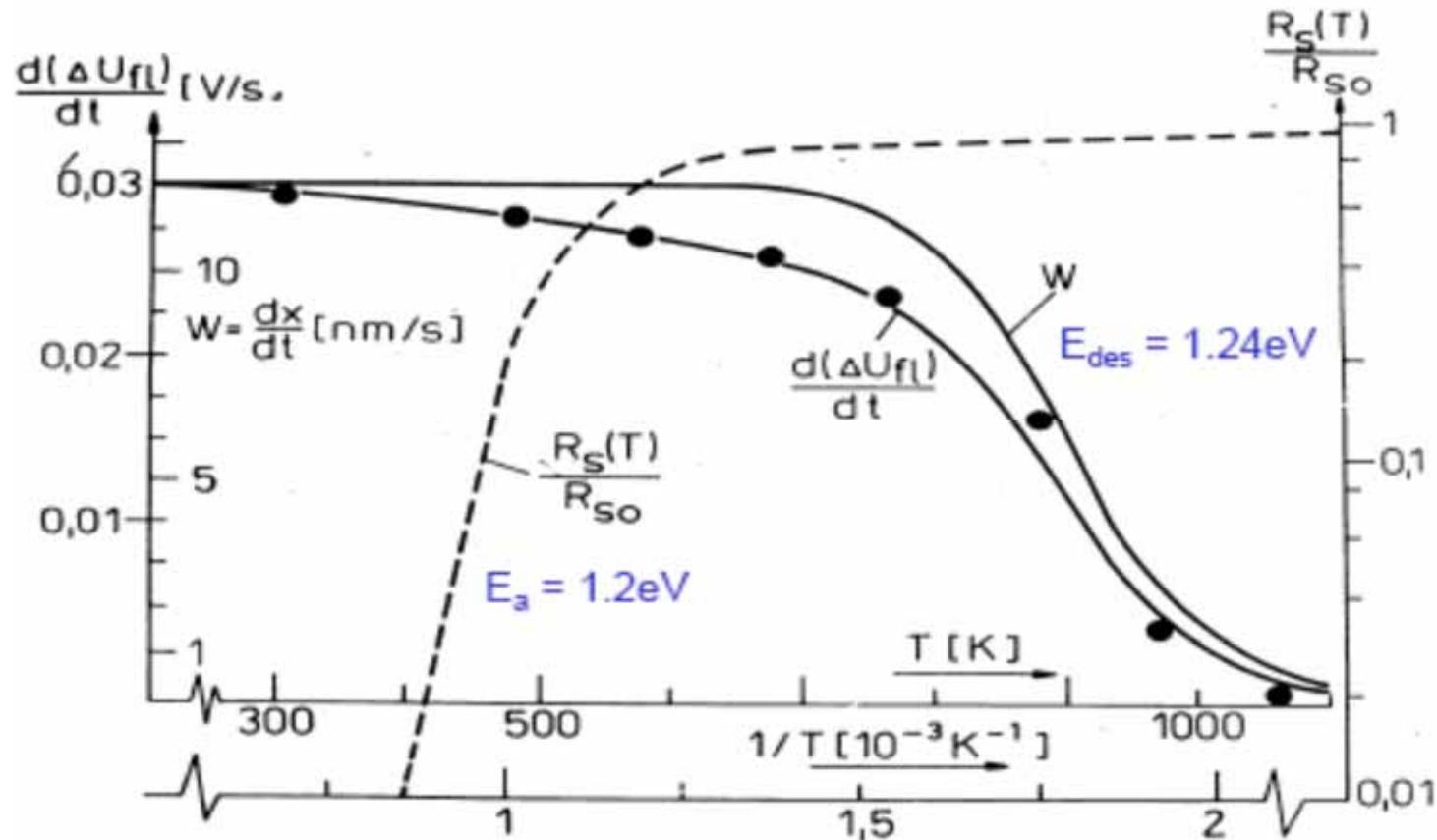
- Beschichtungsanlage mit DC Magnetron und RF Plasma



- zB Beschichtung mit AL

4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

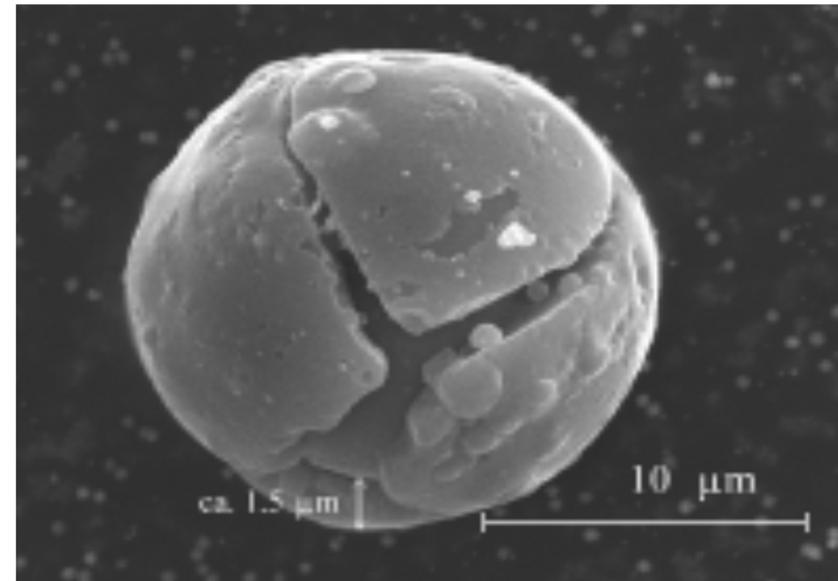
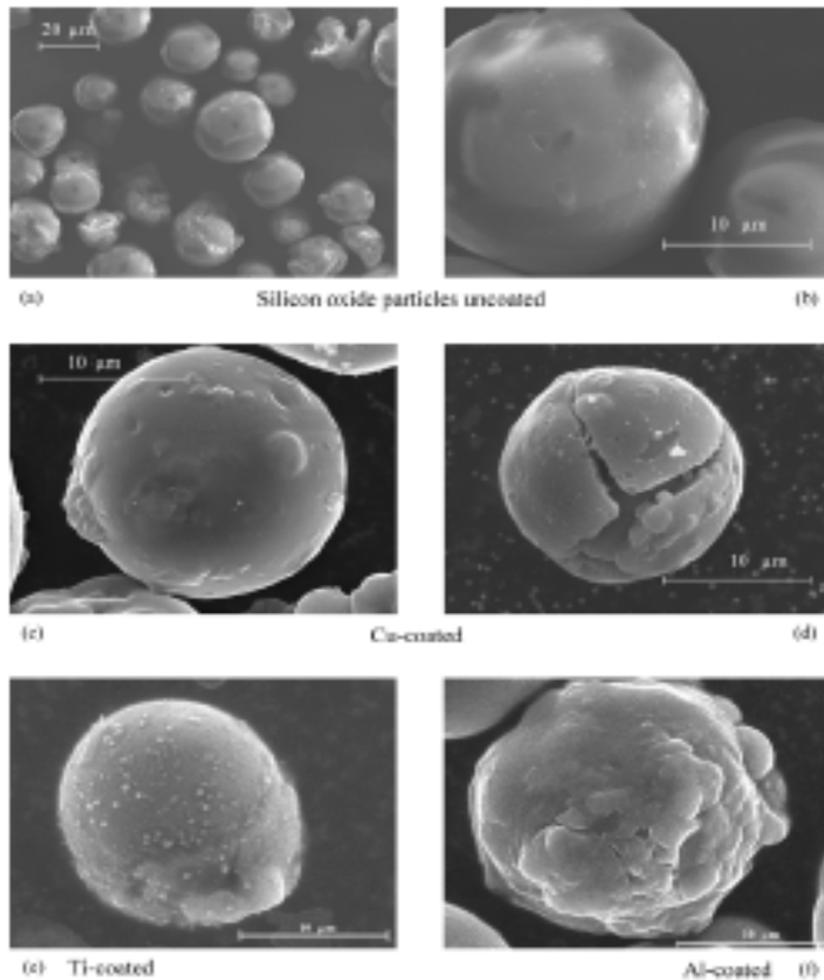
PSI (Plasma Surface Interaction): Plasma Polymerisation



- *Deutsch, H., Kersten, H., Klagge, S., Rutscher, A., Contr. Plasma Phys. 28(1988), 149.*

4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln



- Kersten, H., et al., New J. Phys. 5(2003), 93.

4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln

a) Si-wafer

AFM

*large, flat
floatend at substrate holder*

$$Q_{out} \sim J_{ext} dA \sim Q_{in}$$

$$\Delta T_s \sim 0$$

dc-magnetron

rf-plasma

?

surface morphology
affected by T_s

b) micro-disperse Fe-powder

SEM

*microscopic (1 μm), spherical
floatend in volume*

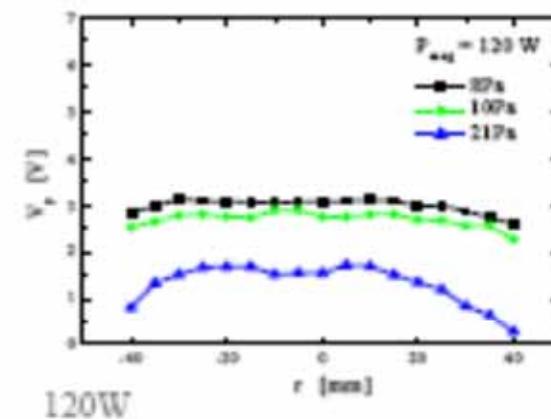
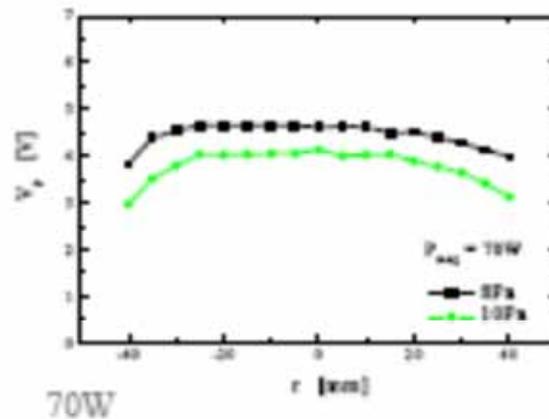
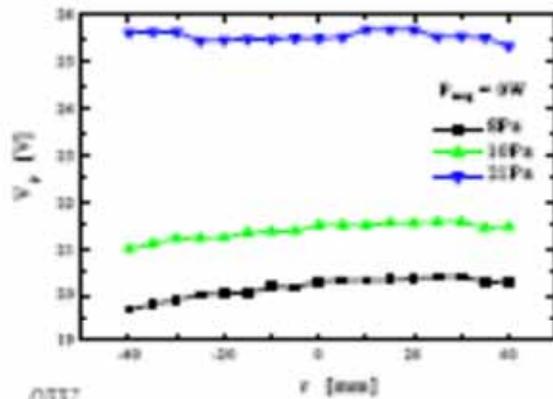
$$Q_{out} \sim J_{rad} dA \ll Q_{in}$$

$$\Delta T_s > 0$$

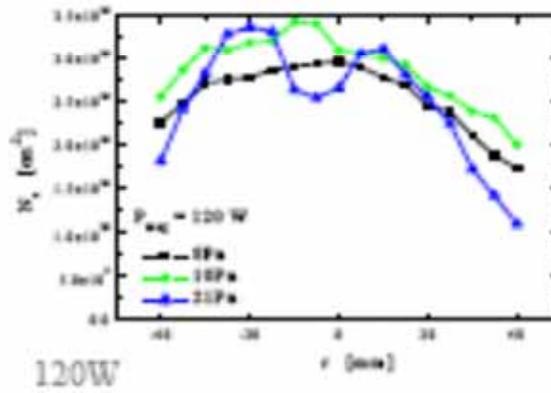
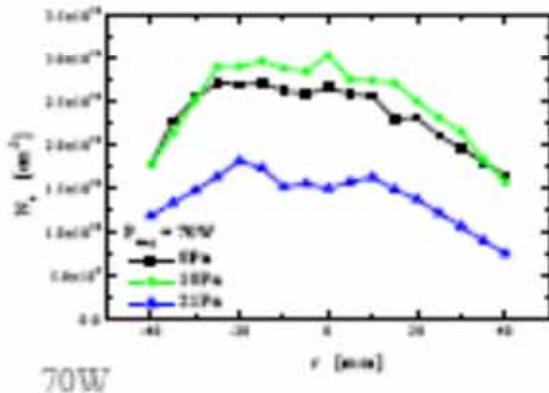
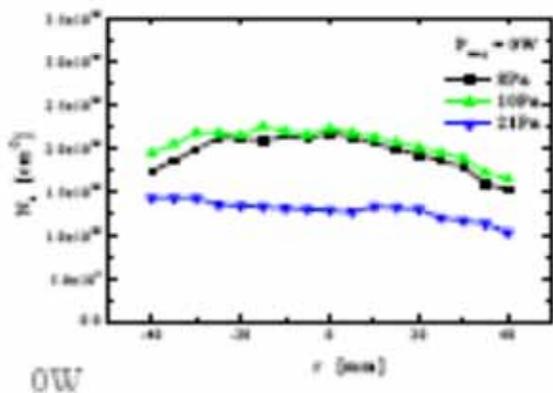
4.1.2. Dünnschicht Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln

- Gemessenes Plasmapotenzial :



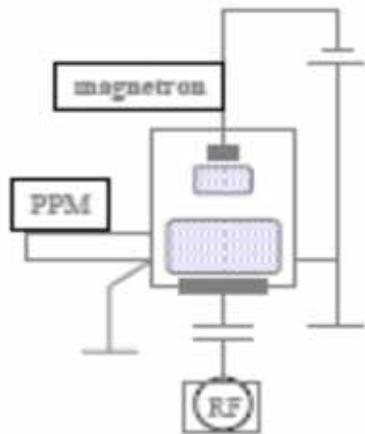
- Elektronendichte:



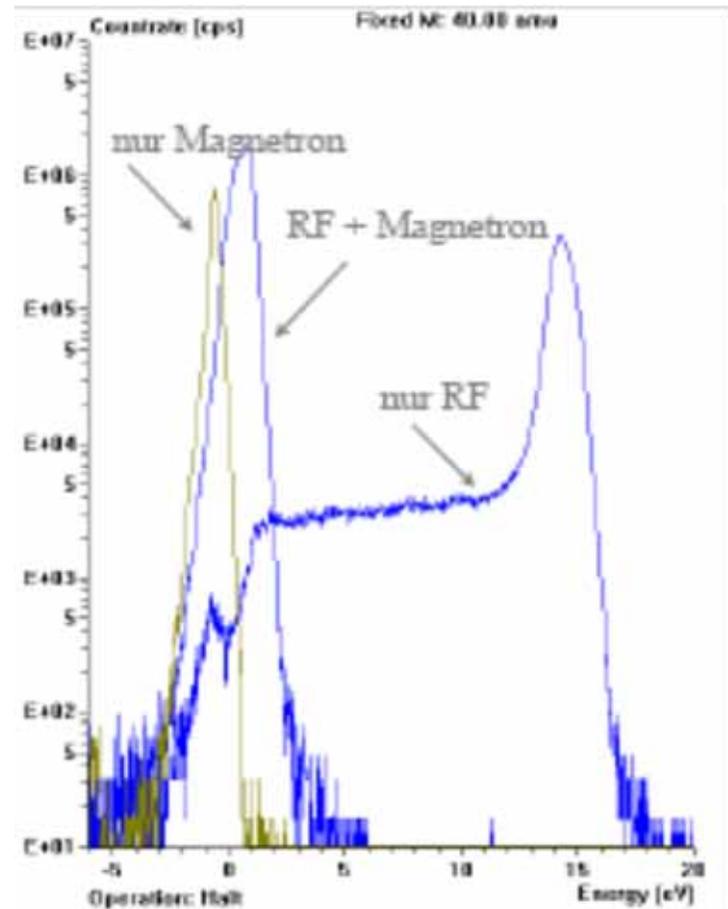
4.1.2. Dünnsfilm Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln

- Aufbau Prinzip:
- DC Magnetron und RF Plasma



Messung Ionenenergien :

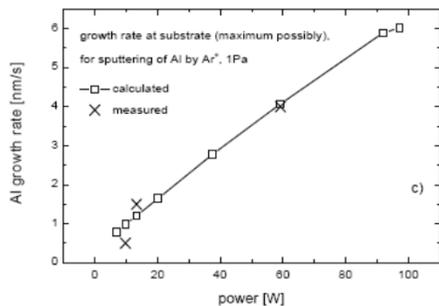
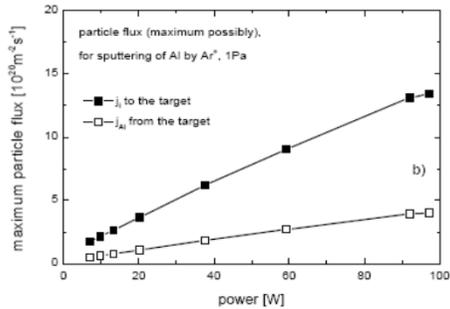
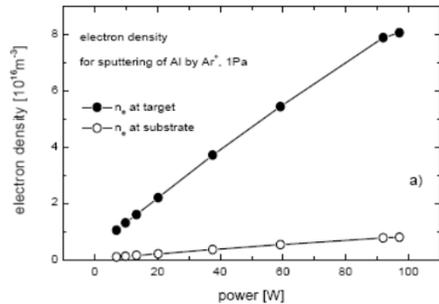


- Ar: $p = 10^{-2}$ mbar, $V_{RF} = 340V$

4.1.2. Dünnschicht Beschichtung

PSI: Beschichtungen auf Pulver Partikeln

- Teilchendichten:



- Prozesskette:

$$n_e = n_e(U, I, p)$$



$$j_i = j_i(n_e, A_{\text{eff}})$$



sputter yield, TRIM

$$j_{\text{Al}} = Y j_i$$



$\gamma = 1$, geometry

Al film thickness

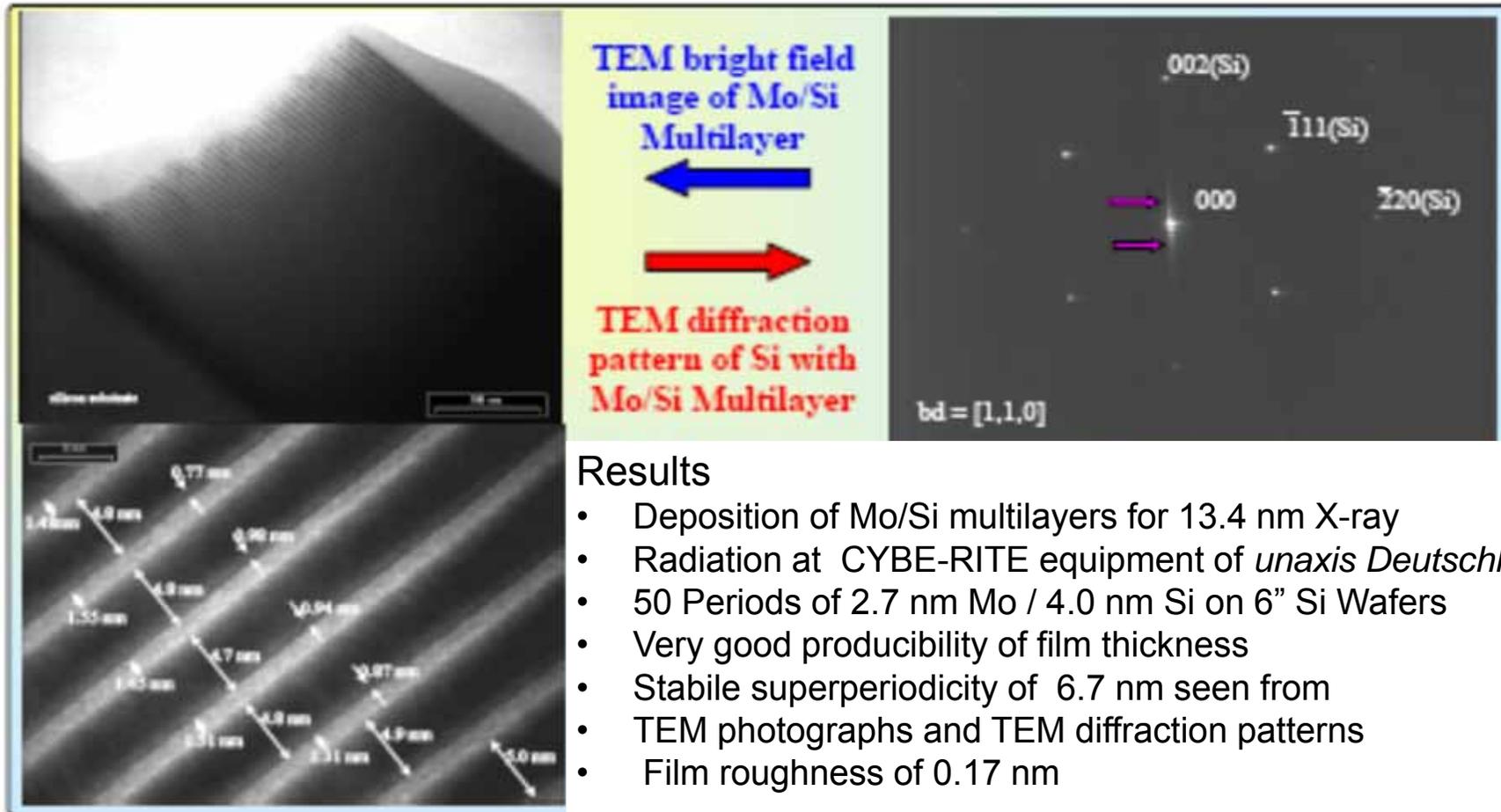


deposition rate R_{dep}
(maximum estimation)

- Ar: $p = 10^{-2}$ mbar,
- Al Beschichtung

4.1.2. Dünnschicht Beschichtung

Dünnschichtbeschichtung: Multilayer für optische Komponenten



- Chasse, T., et.al., Vacuum71(2003), 347

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

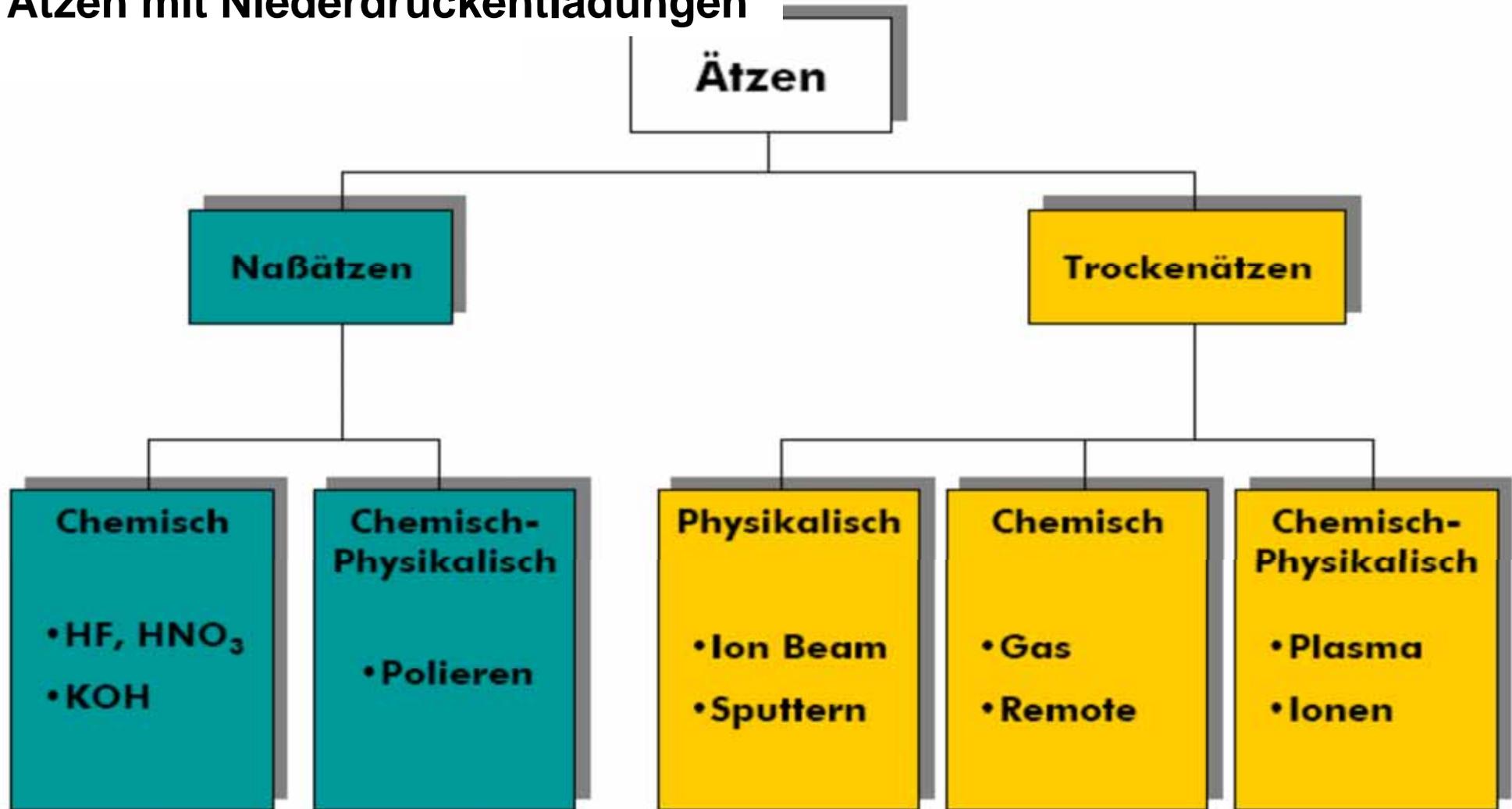
3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1 Stationäre Gasentladung
 - 3..2 Entladung im Wechselfeld

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

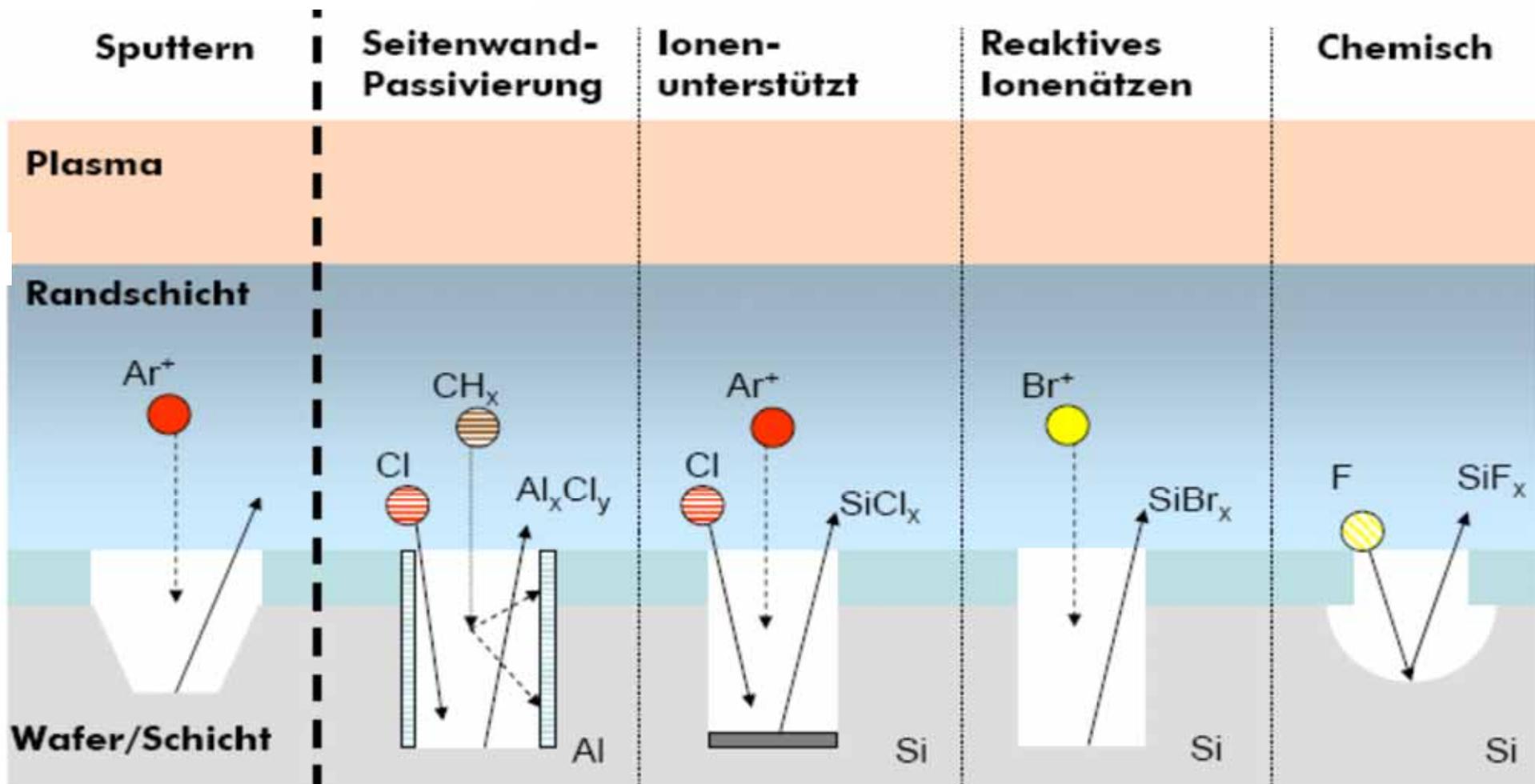
4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Ätzen mit Niederdruckentladungen



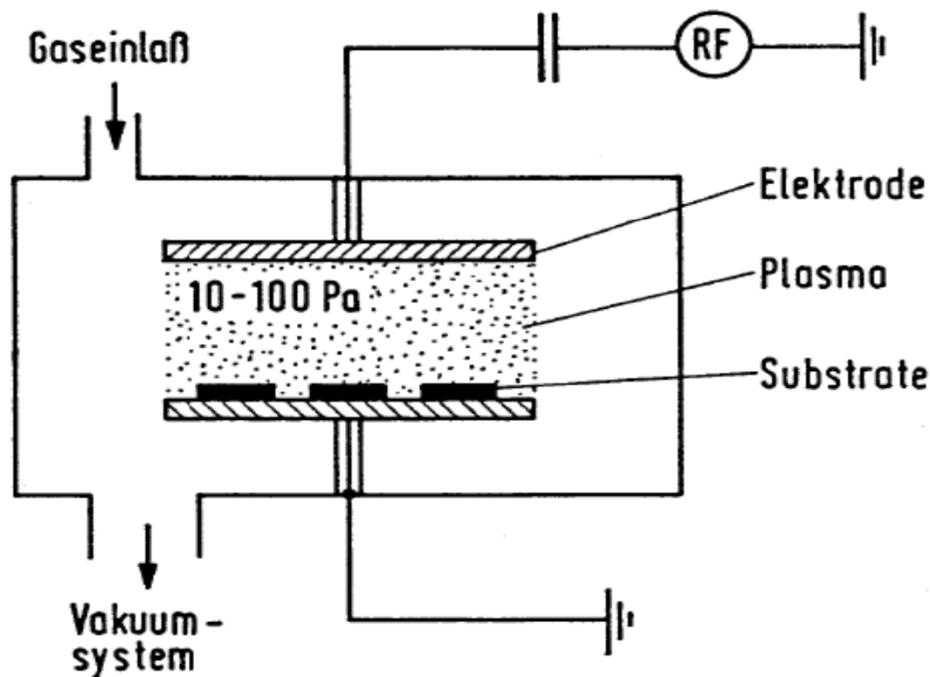
4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Mechanismen des Ätzens



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Plasma - Ätzen



Schema des Plasma-Ätzens im Parallel-Platten-Reaktor

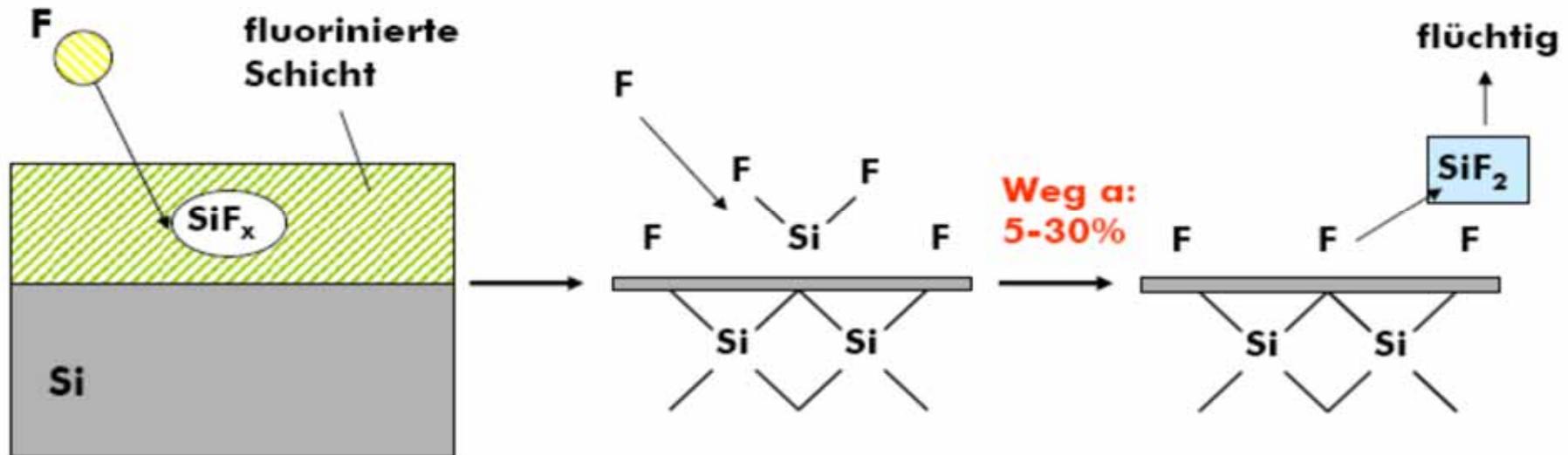
- Aktivierung des Ätzgases im Plasma (13,56 MHz)
- Gegenelektrode ist kapazitiv gekoppelt und lädt sich negativ auf; Substrate sind auf Erdpotential!
- $P \approx 0,1 - 1$ Torr (hoch!)
- Ätzabtrag durch chemische Reaktion mit den Plasmabestandteilen (Elektronen, Ionen, Radikale, Ätzgas) ergibt ähnliche Eigenschaften wie das nasschemische Ätzen
- Isotropes Ätzen
- Hohe Selektivität
- Hohe Ätzrate
- Haupteinsatz: Ätzen geschlossener Schichten auf der Substratrückseite (thermisches Oxid, Poly-Silizium,...)

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Trockenchemisches Ätzen

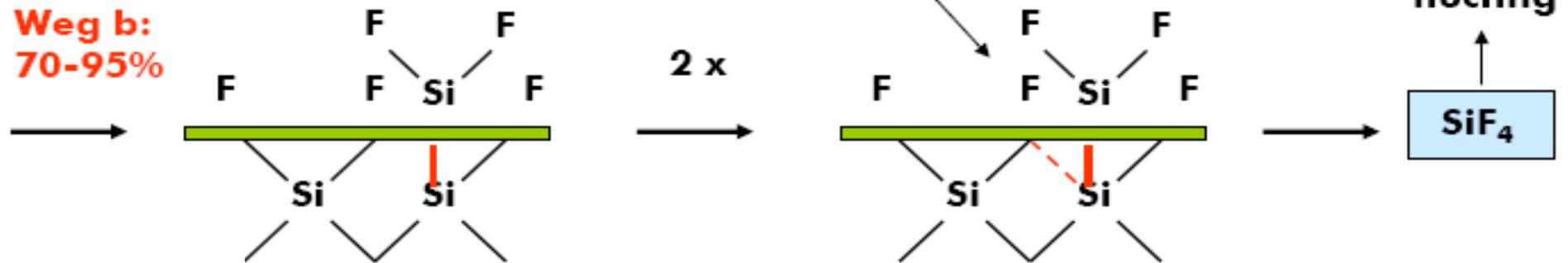
Beispiel: Si-Ätzen mit CF_4

Plasmaprozeß: z.B. $e^- + CF_4 \rightarrow CF_3 + F + e^-$
 (Elektronenstoßdissoziation), Schwelle: 12.5 eV



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

**Weg b:
70-95%**



Viele verschiedene Gase im Plasma
produzieren F-Atome wie z.B. F_2 , SF_6 , NF_3
alle weisen hohe Selektivität für Si
gegen SiO_2 und Si_3N_4 auf

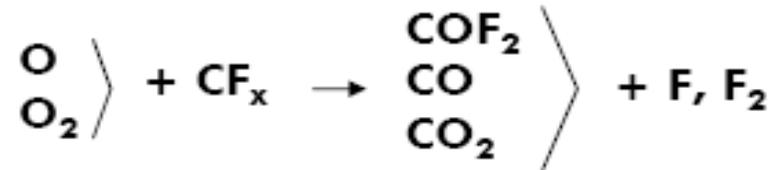
$$(R_e^{Si} \gg R_e^{SiO_2})$$

da F_2 toxisch ist, wird oftmals CF_4 und SF_6
verwendet

Problem:
Ungesättigte Spezies (CF_2 , S_xF_y), können
Polymere bilden und die Fluorkonzentration
erniedrigen

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Abhilfe: O₂ - Zugabe



Bis ca. 16% O₂ - Zugabe steigt die Ätzrate stark an (x 5)

Fazit:

Da CF₄/O₂ - Plasmen praktisch immer isotrop ($R_e^{\text{hor}} = R_e^{\text{ver}}$) aber sehr selektiv ätzen, werden diese verwendet, um

- organische Masken (Resist) zu entfernen,
- „Stringer“ zu vermeiden,
- Wafer und Maschinen zu reinigen.

Reaktor:

Da diese „Aufgaben“ weniger kritisch sind, werden sie in CCP-Maschinen (s.o.) konventioneller Bauart durchgeführt.

Typische Werte: $p_{\text{tot}} = 35 \text{ Pa}$, $P_{\text{in}} = 0.16 \text{ W/cm}^2$, $\Phi = 200 \text{ sccm}$,
 $R_{\text{Si}} = 0.5 \mu\text{m/min}$

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Vereinfachter CF4-Reaktionsmechanismus:

Parameter	Reaktion	z.B. Ratenkonstante
n_{S1}, n_{e1} T_e	$CF_4 + e \rightarrow CF_3 + F^-$	$4.6 \cdot 10^{-9} T_e^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-7}{T_e}\right) \left[\frac{cm^3}{s} \right]$
	$CF_4 + e \rightarrow CF_2 + 2F + e$	
	$CF_3 + e \rightarrow CF_2 + F^-$	
n_{S1}, n_{S2} T_g	$CF_3 + CF_3 + M \rightarrow C_2F_6 + M$	„Volumenprozesse“
	$CF_3 + F + M \rightarrow CF_4 + M$	
	$CF_2 + CF_2 + M \rightarrow C_2F_4 + M$	
	$CF_2 + F \rightarrow CF_3$	
	$CF + F + M \rightarrow CF_2 + M$	
n_{S1}, n_{e1} T_e	$C_2F_6 + e \rightarrow CF_3 + CF_3 + e$	
	$C_2F_4 + e \rightarrow CF_2 + CF_2 + e$	
n_{S1}, T_{surf}	...	„Oberflächenprozesse“
	$F + Si_{surf} \rightarrow SiF$	
	$SiF + F \rightarrow SiF_2$	
	$SiF_2 + F \rightarrow SiF_3$	
	$SiF_3 + F \rightarrow SiF_4$	

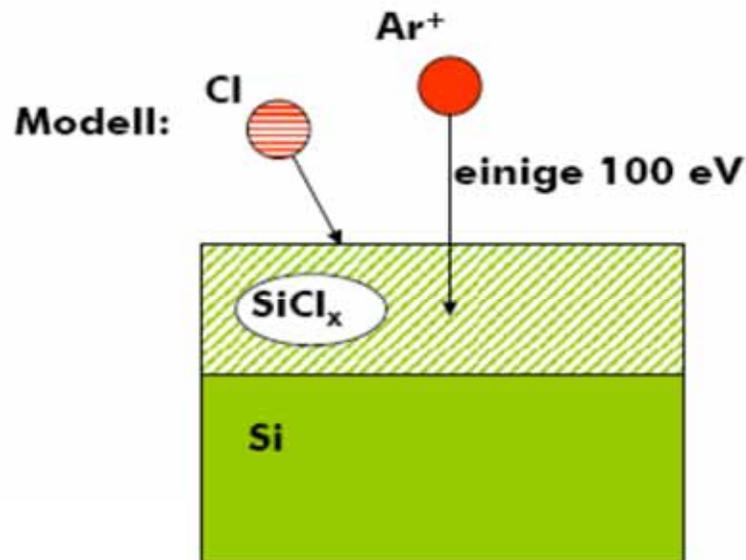
4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Ionenunterstütztes Ätzen

Beispiel: Si-Ätzen mit Cl_2 oder Br_2

a) nicht dotiertes Si:

- Cl und Cl_2 ätzen undotiertes Si mit sehr geringen Raten (10 nm/min bei $T_{\text{sub}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 Pa)
- wird Ionenbeschuß (z.B. 400 eV Ar^+) „zugeschaltet“, erhöht sich die Ätzrate um Faktor 10



Ionenbeschuß

- bricht Si-Bindungen
- schafft „Dangling Bonds“
- hinterläßt in den ersten Monolagen eine modifizierte, am reinen Si adsorbierte Schicht



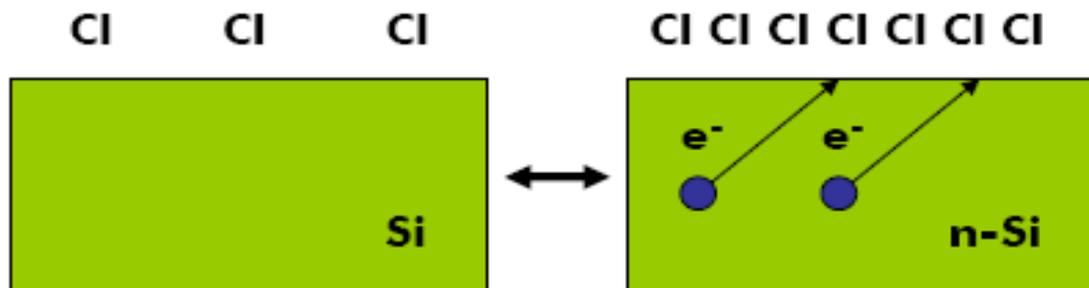
„Transformation“ der oberflächennahen Bereiche in sehr reaktive Schicht

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

b) dotiertes Si:

- n-dotiertes Si (P, As, ...): starke Abhängigkeit der Ätzrate R_e von Donatorkonzentration n_D
- Hohe Ätzraten auch ohne Ionenbeschuß
- p-dotiertes Si (B, In, ...): $R_e \neq f(n_A)$

Modell:



n-Dotierung:

- erhöht Ladungstransfer zu adsorbierten Cl-Atomen
- verändert Bindungsgeometrie
- erhöht adsorbierte Cl-Dichte
- erleichtert Eindringen in Si-Gitter

→ mehr Cl-Atome diffundieren in Si

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Seitenwandpassivierung

- wird induziert durch ungesättigte Spezies von CCl_4 , CHCl_3 , SiCl_4 , ... (z.B. CH).
- Oxidfilm muß vor Ätzprozeß entfernt werden durch Sputtern oder chemisches Reinigen z.B. mit BCl_3
- die Filmdeposition auf horizontalen Flächen wird durch Ionenbeschuß unterbunden

Probleme:

- Wasser im porösen Al (Sauerstoff, Wasserstoff: Oxidation, Reduktion)
- Kupfer legiert in Al (geringe Flüchtigkeit von Cu-Chloriden)
- Photoresist-Degradation in Cl-Plasmen (AlCl_3 zerstört organische Substanzen f. $T_{\text{sub}} \uparrow$)
- Nach Prozeß verbleibendes AlCl_3

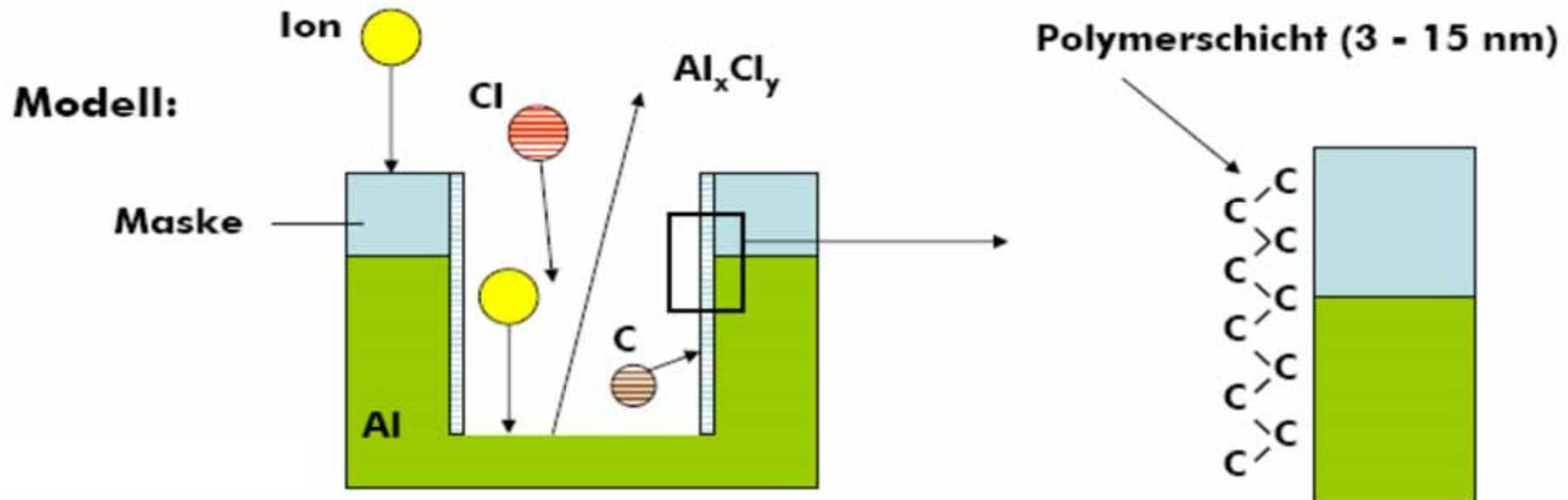
Abhilfe:

- Wasser: Schleusensysteme, BCl_3
- Cu: Erhöhung von T_{sub}
- Cu: Weniger Cu größerer Körnigkeit
- Cu: Höhere Beschußenergie
- AlCl_3 : O_2 -Plasma, C_2F_6 -Plasma

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

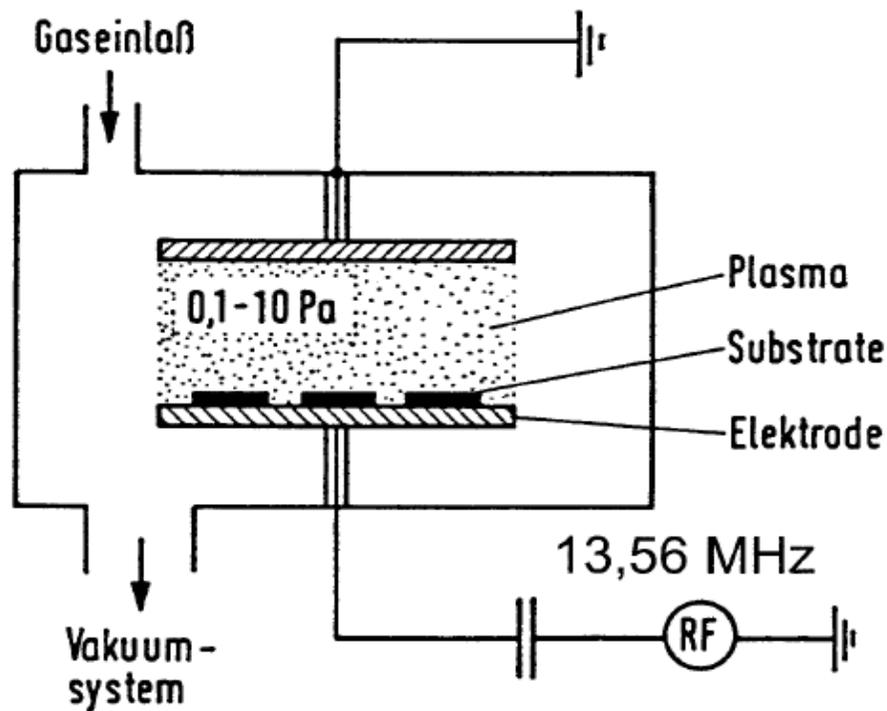
- Ätzen durch Seitenwandpassivierung
- Beispiel: Al Ätzen mit Cl_2 und CCl_4

- Al + F: nicht-flüchtige Verbindungen → Al kann in F-Plasmen nicht geätzt werden
- Cl, Br ätzen reines Al stark; Endprodukt: Al_2Cl_6 (T = 300 K), AlCl_3 (T = 500 K)
- Ionenbeschuß hat keinen Einfluß auf Ätzrate



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- **Reaktives Ionenätzen**



RIE ist Stand der Technik für das Ätzen feinsten senkrechter Strukturen und für das anisotrope Trockenätzen von Silizium.

Unterschiede zum Plasma - Ätzen:

- Die Substrate sind kapazitiv an RF-Quelle gekoppelt und laden sich negativ auf: Die Bias-Spannung sorgt für einen gerichteten Beschuss der Substrate mit den positiv geladenen Ionen.
- Gleichzeitiges Sputter-Ätzen und Chemisches Ätzen in einem Reaktor.
- $p \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ Torr (x 1/100)

Merkmale:

- Selektivität, Anisotropie und Ätzrate sind durch "Prozess - Chemie" (Gase) und Prozessparameter (RF-Leistung, Druck, Plattenabstand, Gasfluss,...) einstellbar !
- Die Anisotropie wird durch eine Seitenwandpassivierung erreicht!

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- **Reaktives Ionenätzen (Reactive Ion Etching = RIE)**
- Vorüberlegung: Si mit Cl_2

Annahmen für Standard-Plasmaquelle (CCP):

$p = 1 \text{ Pa}$, $T_g = 300 \text{ K}$, 1 % Diss., $n_e = n_i = 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 5 \text{ eV}$,
 $\text{Cl} = 35 \text{ amu}$

Daraus Flußdichten:

• Cl-Atome: $i_{\text{atom}} \approx 2.4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 • Cl-Ionen: $i_{\text{ion}} \approx 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Ätzrate (Ausbeute = 1):

• Atome: $R_e^{\text{atom}} \approx 300 \text{ nm min}^{-1}$
 • Ionen: $R_e^{\text{ion}} \approx 4.6 \text{ nm min}^{-1}$

Annahmen für hochdichte Plasmaquelle (z.B. ICP):

wie oben, außer $n_e = n_i = 10^{17} \text{ m}^{-3}$

Flußdichten:

• Cl-Atome: $i_{\text{atom}} \approx 2.4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 • Cl-Ionen: $i_{\text{ion}} \approx 3.7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

**Erst mit HD-Plasmaquellen
 ist „RIE“ möglich**

• $R_e^{\text{ion}} \approx 460 \text{ nm min}^{-1}$

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Beispiel: Silizium RIE für Kontaktlöcher**

Schichtaufbau: 0,8 μm SiO_2 über Si für Kontakte zu Transistoren, Dioden, Widerstände
 0,8 μm PSG über AlSiCu bei mehrlagigen Verdrahtungen (Metall 2)

	Variante I	Variante II
Anlagenaufbau	Planparallele Platten mit Graphit - Anode	RIE mit Magnetfeldunterstützung
Druck	1 - 2 Torr	10^{-2} - 10^{-3} Torr
Ätzgase	CHF_3 , C_2F_6 , He_2 , O_2	CHF_3 / Ar
Selektivität zu Silizium	Plasma - Polymerbildung 7 : 1	Plasma - Polymerbildung 20 : 1
Selektivität zur Lackmaske	2 : 1	6 : 1
Entfernen des geschädigten Silizium	Überätzen mit O_2	Überätzen mit NF_3
Ätzrate	500 nm / min	500 nm / min
Kosten	niedriger	hoch (Turbopumpe, ...)

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- **Beispiel: Al-Si-Cu - RIE für Leiterbahnen**

Schichtaufbau: 1,0 μm dickes AlSiCu über einer Barriere aus 100 nm Ti/TiN oder TiW auf SiO_2

- Ätzgase / Druckkase: BCl_3 , SiCl_4 , Cl_2 , N_2 / 15 mTorr
- Ätzrate / Homogenität: 300 nm / min / 2-5% über den Wafer
- Selektivität Fotolack: 2 : 1
- Reaktive Spezies: Cl
- Reaktionsprodukte: AlCl_3 , SiH_xCl_y , TiCl_x sind alle flüchtig / gasförmig
- Cu-Problematik: Bei Cu ist nur Sputter-Ätzen möglich, da es keine flüchtigen Verbindungen gibt. Daher darf der Cu-Gehalt höchstens 1 % sein.
- Natürliche Al_2O_3 - Schicht: Entfernen durch Sputter-Ätzen (Ionen Ätzen)
- Seitenwandpassivierung: Polymerbildung durch Reaktion mit Fotolack
- Reaktorwände: Heizen, sonst Chlor-Kondensation
- Substrat: Kühlen, sonst Fotolackverbrennung
- Für die Ätzanlage entstehen Korrosionsprobleme durch adsorbiertes Cl !

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Beispiele für Gase für das RIE Ätzen

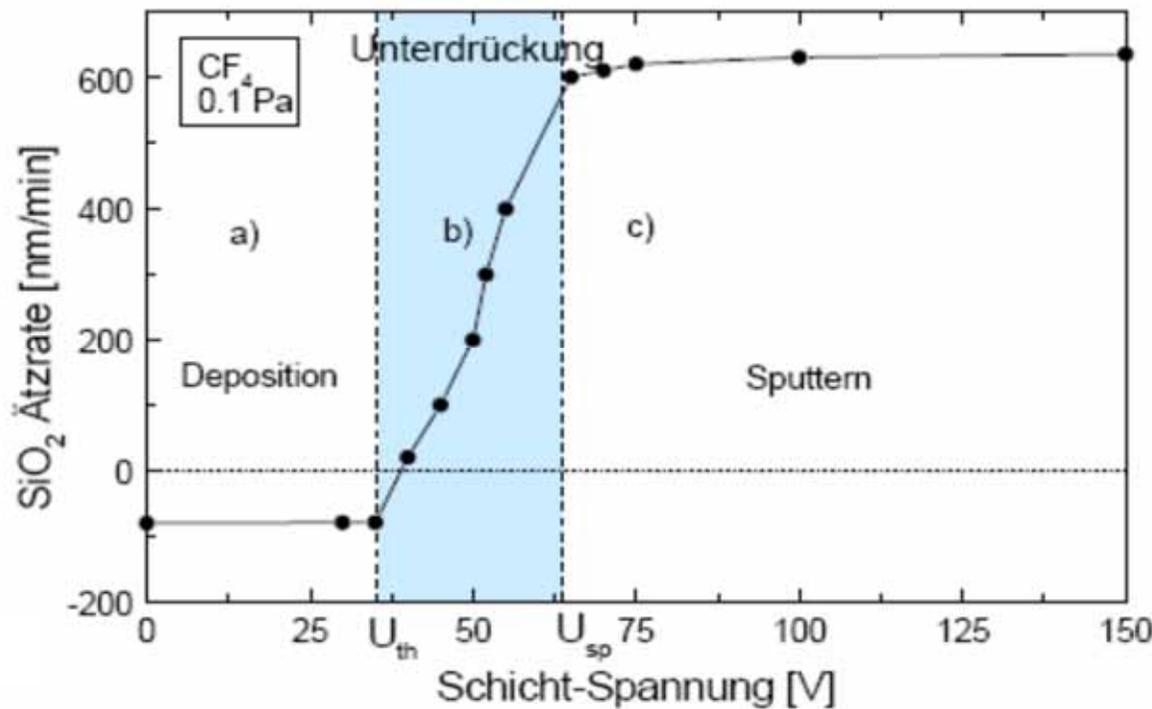
Schicht	Ätz-Gas	Kommentar
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ / O ₂ CHF ₃ / O ₂ CHF ₃ / CF ₄ CH ₃ F C ₂ F ₆ ; SF ₆ C ₃ F ₈	F ätzt Si, O ₂ entfernt C CHF ₃ wirkt als Polymer und erhöht Selektivität gegen Si verbesserte Selektivität von Si ₂ N ₄ über SiO ₂ erhöhte Ätzrate gegenüber CF ₄
Poly-Si	BCl ₃ / Cl ₂ SiCl ₄ / Cl ₂ ; HCl / O ₂ ; SiCl ₄ / HCl HBr / Cl ₂ / O ₂ SF ₆ NF ₃ HBr / Cl ₂	keine Kontamination durch C verbesserte Selektivität gegenüber Fotolack und SiO ₂ hohe Ätzrate, gute Selektivität gegen SiO ₂ hohe Ätzrate, isotrop
monokristallines Si	BCl ₃ / Cl ₂ ; HBr / NF ₃ HBr / NF ₃ / O ₂ ; CF ₃ Br	höhere Selektivität gegen SiO ₂
Al-Legierungen	Cl ₂ BCl ₃ BCl ₃ / Cl ₂ / CF ₄ BCl ₃ / Cl ₂ / CHF ₃ BCl ₃ / Cl ₂ / N ₂	isotrop geringe Ätzrate anisotrop bessere Seitenwandpassivierung höhere Ätzrate, kein C

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Beispiel: SiO_2 -Ätzen mit CF_4

Wichtige Anwendungen: Ätzen von Gate-Oxid, Dielektrikum zwischen Metallisierungsebenen, ...

Drei Bereiche (a) - c) in allen HD-Plasmaätzern (ECR, ICP, Helicon):

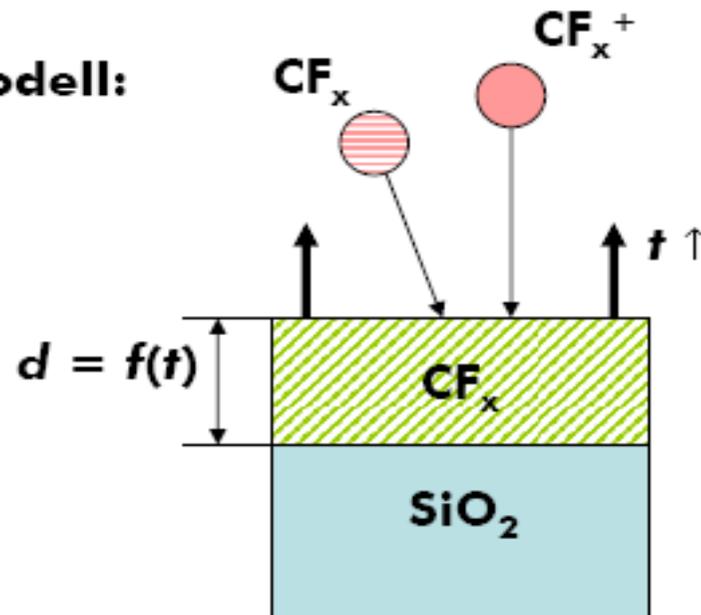


4.1.3 Plasma Ätzprozesse

a) Abscheidebereich ($0 \leq U_{sch} \leq U_{th}$)

- Unterhalb einer Schwellenspannung U_{th} wächst ein Fluor-Kohlenstoff-Film (Polymer: CF_x)
- Wachstumsrate steigt linear mit Ionenflußdichten
- U_{th} hängt von externen Parametern ab (Leistung, Druck, Gase, usw.)

Modell:

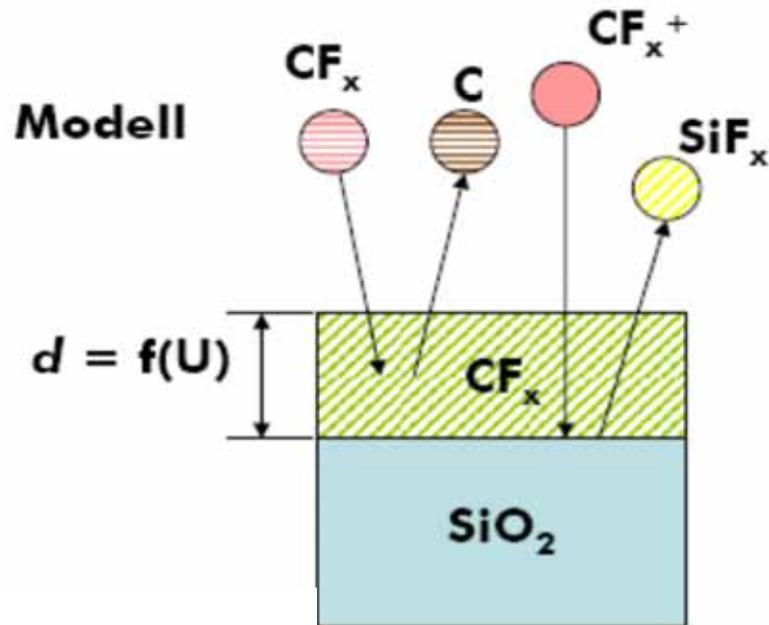


- Beschußenergie der Ionen zu gering, um Wachstum zu unterdrücken
- Ionen tragen zum Wachstum bei
- Schichtdicke d nimmt zu (als Funktion der Zeit: $d=d(t)$)

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

b) Unterdrückungsbereich ($U_{th} \leq U_{sch} \leq U_{sp}$)

- CF-Ätzen dominiert über CF-Abscheidung
- Dünner CF-Film bedeckt das Oxid mit $d \neq f(t)$
- Mit steigender Spannung nimmt Filmdicke ab, d.h. $d = f(U)$
- Mit abnehmender Filmdicke steigt Ätzrate: $d = 1.1 \text{ nm}$,
 $R_e = 100 \text{ nm/min}$, $d = 0.5 \text{ nm}$, $R_e = 500 \text{ nm/min}$, bei ca. 1.5 nm stoppt Ätzvorgang



Mögliche Erklärung:

- Nimmt Dicke d zu, wird Ionenenergie im Film zunehmend dissipiert, d.h. Energie reicht nicht mehr, um Si-O Bindung zu brechen
- Im Fall von Si-Ätzen (mit F) sind viel dickere Filme möglich, d.h. hier reicht Diffusion zum Oxid aus
- $d > 0$ wenn $j_{\text{CF}} \downarrow > j_{\text{C}} \uparrow$

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Fazit:

- Ein realer Ätzvorgang ist oftmals eine Überlagerung verschiedener Mechanismen.
- Das ionenunterstützte Ätzen, das Ätzen mittels Seitenwand-passivierung sowie das reaktive Ionenätzen ermöglichen ein hohes Maß an Anisotropie.
- Grundregel: Mit zunehmender Anisotropie nimmt die Selektivität ab, daher sind oftmals Zwischenschichten notwendig.
- Das reaktive Ionenätzen wird erst durch moderne HD-Plasmaanlagen Realität, wirft aber durch völlig veränderte Ionen- zu Neutralflußdichteverhältnisse neue Probleme auf.

Anwendungsbeispiele:

- Tiefe Gräben (Trench) f. DRAM-Speicherzellen(vgl. REM-Aufnahme)
- Kontaktlöchern(interconnectholes) zur Verbindung mehrlagiger Metallisierungsebenen
- Mikro-Elektromechanische Strukturen: MEMS
- GaAs-HL-Laser (vertikale On-Chip Laser)

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

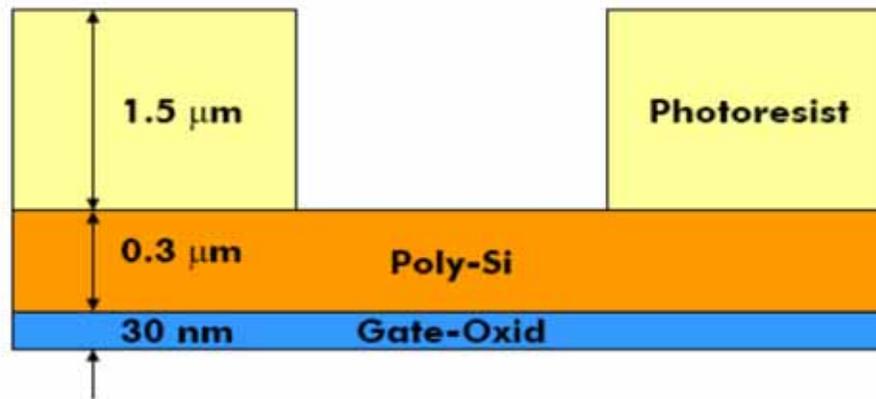
Selektivität, Anisotropie und Uniformität

Forderungen: hoher Selektivität <-> großer Anisotropie

Uniformität: - bestimmt durch Variation der Dicke der zu ätzenden Schicht
 - Ätzrate selbst.

Gründe: - nicht konstantes Profil der Elektronendichte
 - nicht gleichmäßige Verteilung der Teilchenflussdichten

Um Einfluß der Größen auszuzeigen: Beispiel aus dem Bereich des Poly-Si-Ätzens:



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Im Rahmen eines Single-Wafer Prozesses müssen in der Fab Ätzzeiten im Bereich von ca. 3 Minuten erreicht werden, um kommerziell interessant zu sein. Damit sind typische Ätzraten für die verschiedenen Materialien vorgegeben:

$$R_{\text{pr}} = 500 \text{ nm/min}$$

$$R_{\text{ox}} = 10 \text{ nm/min}$$

$$R_{\text{poly}} = 100 \text{ nm/min}$$

Die daraus notwendige Forderung an die Selektivität lautet:

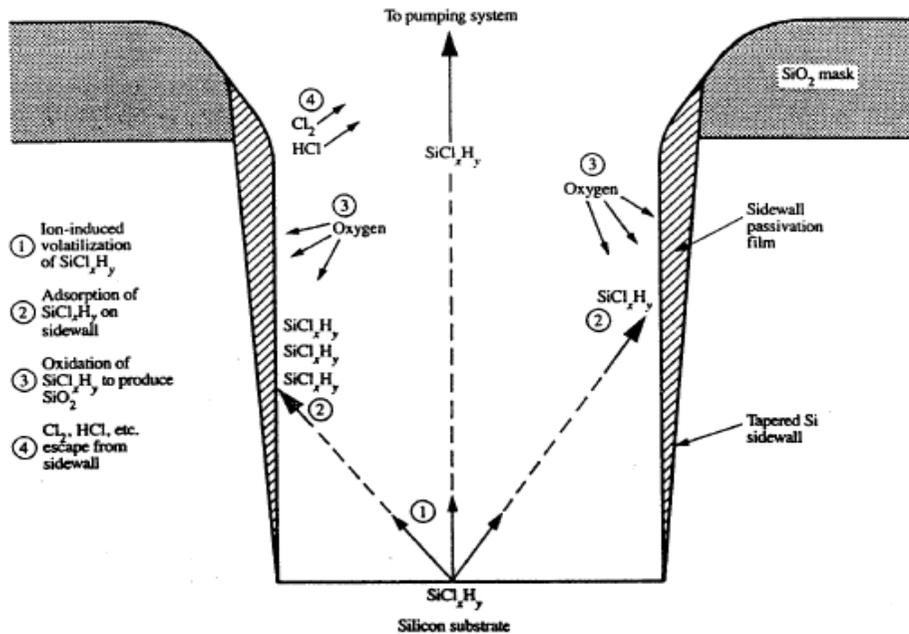
$$s = \frac{R_{\text{poly}}}{R_{\text{pr}}} \gg \frac{300}{1500} = 0.2 \quad ,$$

um den Polysiliziumfilm komplett zu ätzen ohne die Photoresist-Maske nennenswert zu beschädigen. Damit wird hierfür eine Selektivität von 2 bis 3 ausreichend sein. Allerdings gibt es einen zweiten Aspekt, der durch die fehlende Uniformität des Plasmas und damit des Prozesses bedingt ist (vgl. z.B. Elektronendichteprofil über dem Radius).

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

• Anisotropie bei Silizium RIE durch SiO₂ Seitenwandpassivierung

1. Beispiel: RIE von Silizium-Trenches mit HCl/O₂/BCl₃-Ätzgas und SiO₂-Ätzmaske



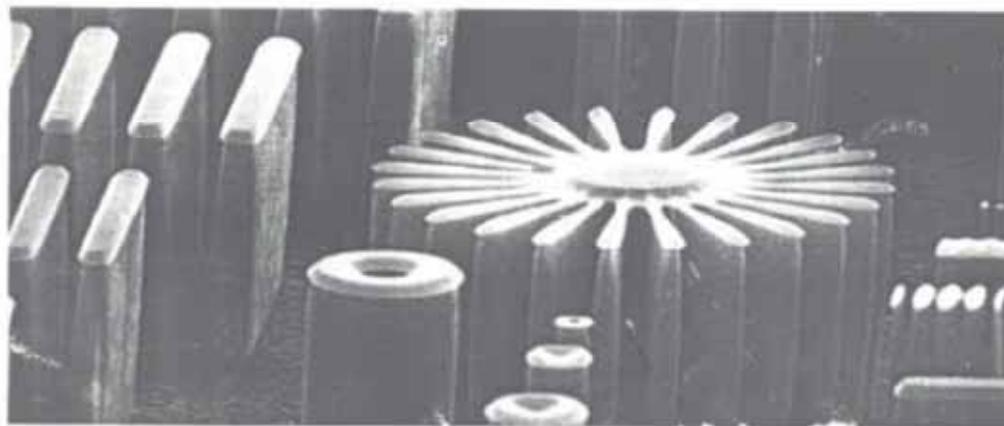
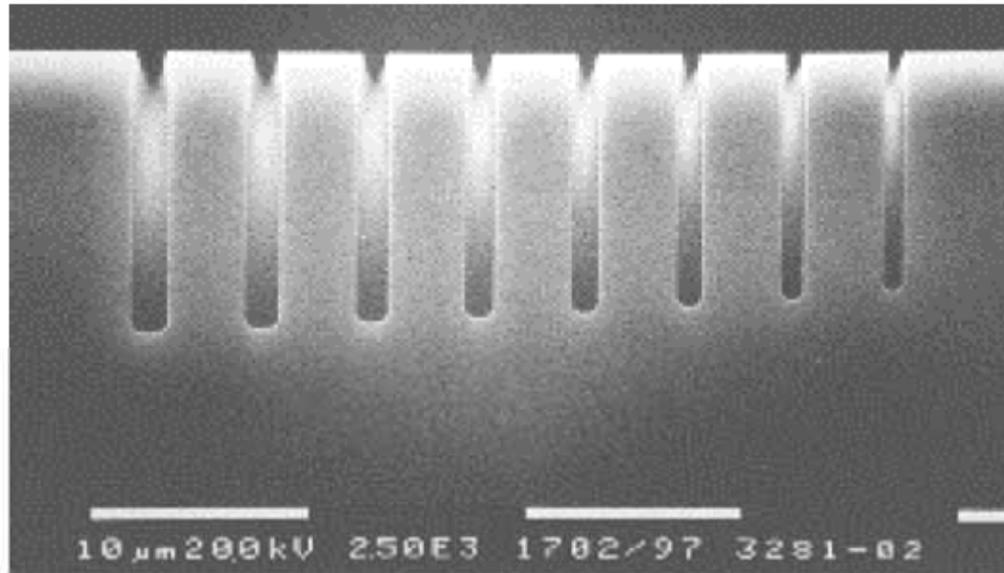
Bildung der Seitenwandschutzschicht:

1. Ioneninduzierte Erzeugung von gasförmigem SiCl_x H_y
2. Adsorption des SiCl_x H_y auf der Seitenwand
3. Oxidation des SiCl_x H_y zur SiO₂ - Schutzschicht
4. Verflüchtigung von Cl₂, HCl

Die Anisotropie des Ätzprozess entsteht, weil die Seitenwände der Struktur durch die Bildung einer SiO₂-Schutzschicht vor dem chemischen Ätzangriff durch das Plasma geschützt wird. Andererseits wird die SiO₂-Schutzschicht am Boden durch die gerichteten Ionen zerstört, so dass der Ätzangriff in die Tiefe fortschreiten kann.

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- **Anisotropie bei Silizium RIE durch SiO₂ Seitenwandpassivierung**



20 µm

2. Beispiel: RIE von Silizium -Trenches mit SF₆ / C₄F₈ und Fotolackmaske

- Bildung einer Polymer-Passivierungsschicht durch Betrieb als PECVD-Reaktor.
- Abtrag der Polymerschicht durch Sputtern bevorzugt am Trench-Boden.
- Wechsel zwischen Ätzprozeß und Polymerabscheidung.
- Verarmung des Plasmas in den schmälere Gräben (Loading Effekt).
- Design mit möglichst gleichen Trenchbreiten anstreben.

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Technologische Probleme des Plasmaätzens

a) „Damage“

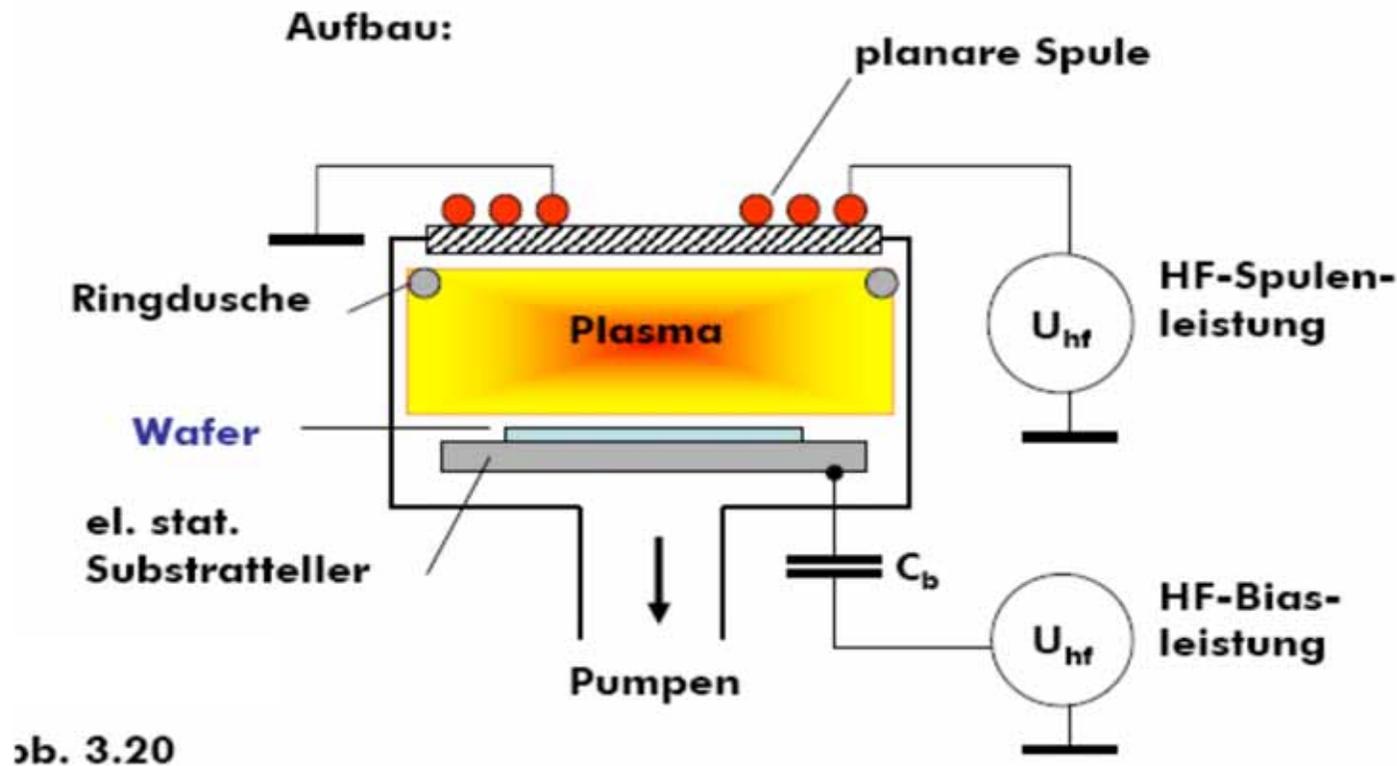
- **Ursache: Hochenergetische Ionen (bis zu 1000 eV), Photonen im UV, weiche Röntgenstrahlung**
- **Ionen: Versetzen von Gitteratomen bis in Tiefen von 15 nm (Gateoxid < 15 nm !), Änderung der Stöchiometrie**

Abhilfe bzw. Verbesserung:

- **früher (bis 90iger Jahre): Ausheizen bei ca. 650 -950 °C**
- **seither: ICP-Quellen > dadurch geringere Beschussenergie**

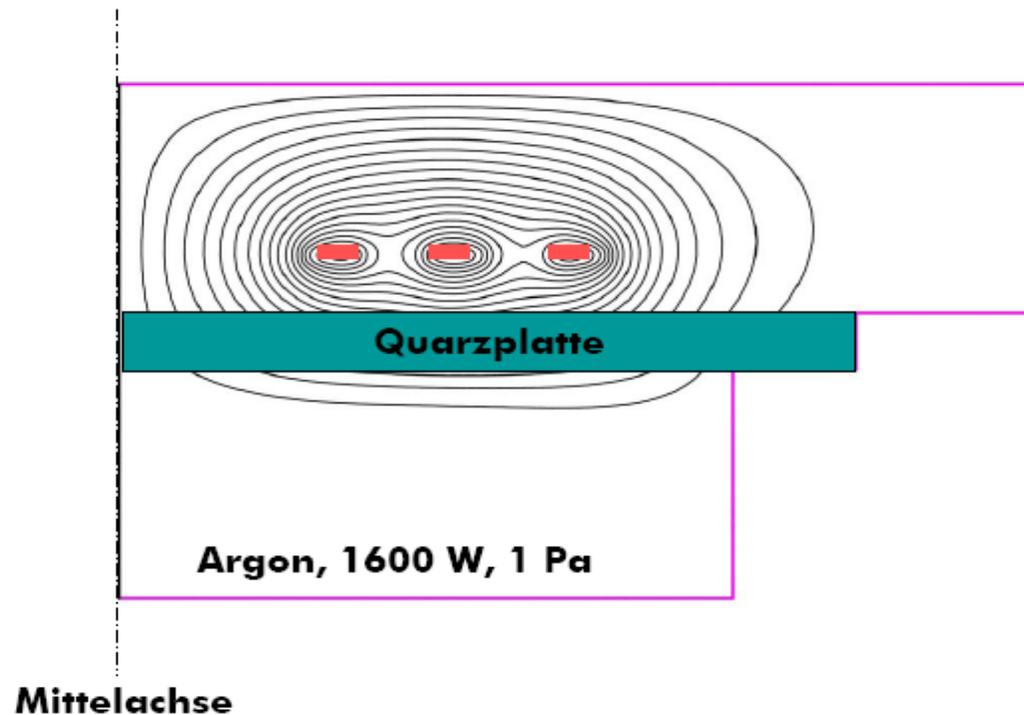
4.1.3 Plasma Ätzprozesse

Verbesserung : Ätzen mit HF- Niederdruck Plasmen (z.B. ICP)



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

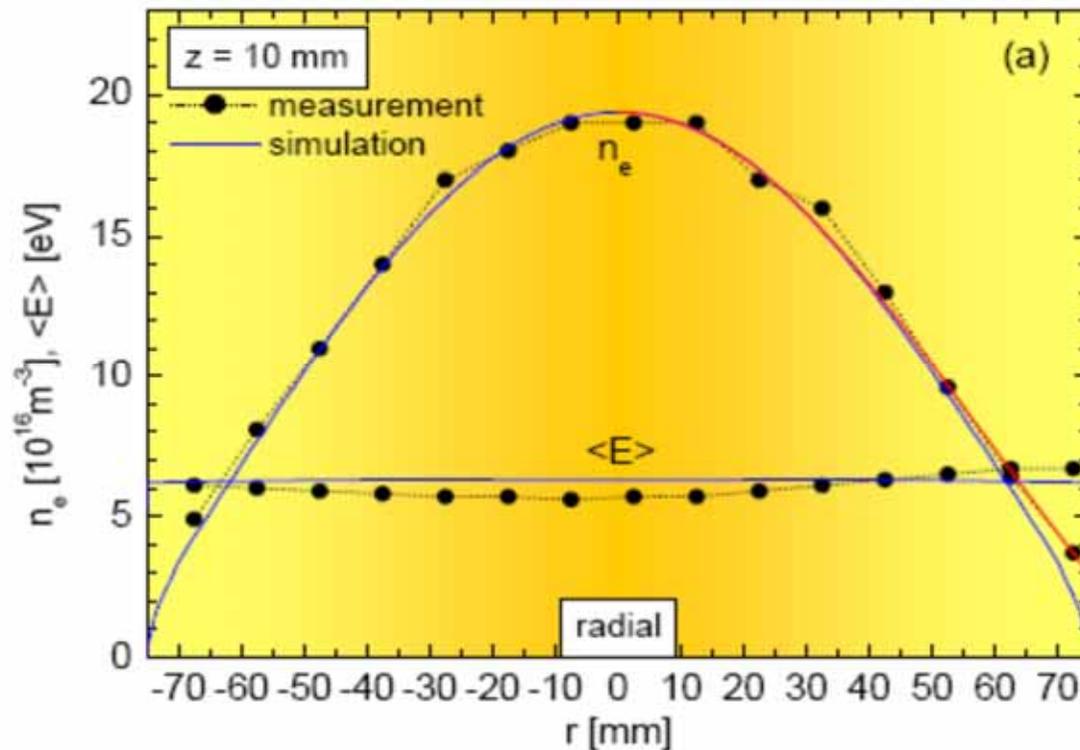
- Induziertes elektrisches Feld:
- Hydrodynamisches Plasmamodell für Argon



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

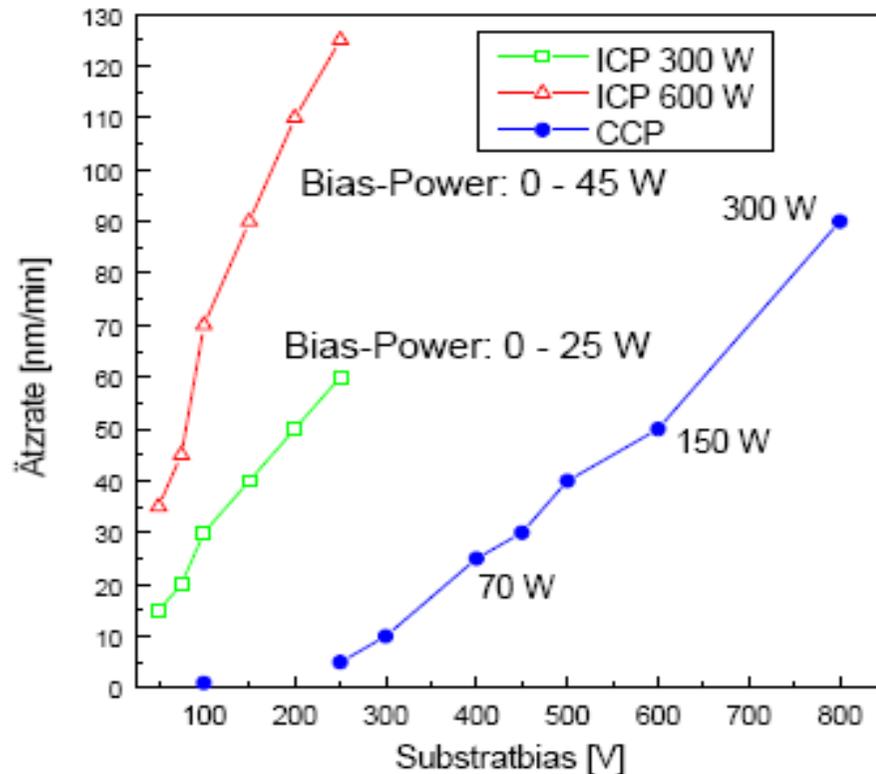
ICP-Plasma: Radialverteilung von n_e^+ $\langle E \rangle$

- He , 20 Pa, 250 W

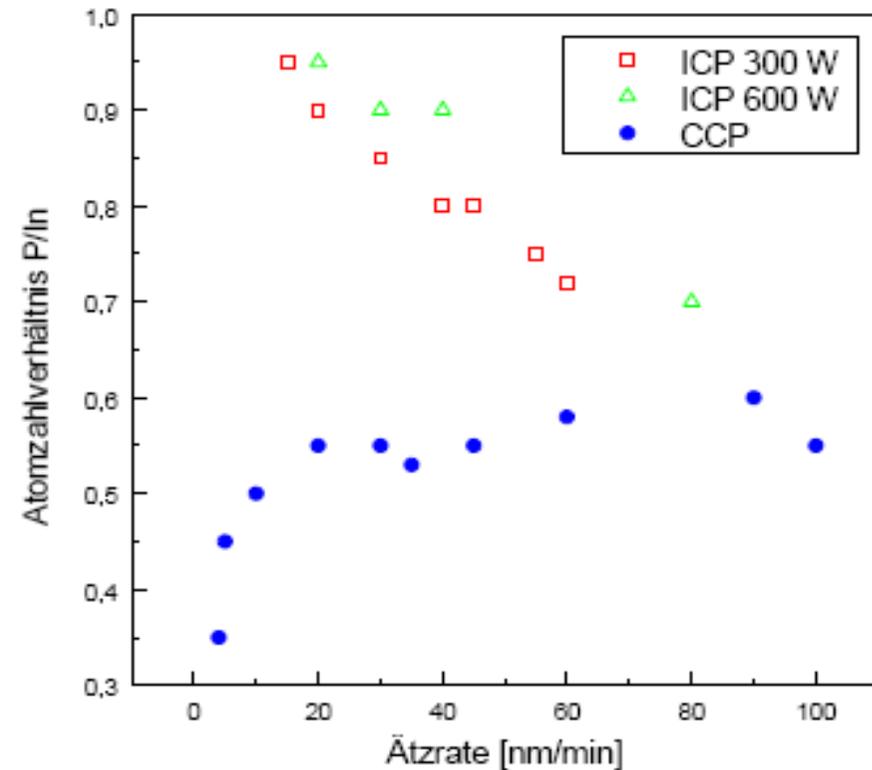


4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- Vergleich von ICP- und CCP-Ätzplasmen

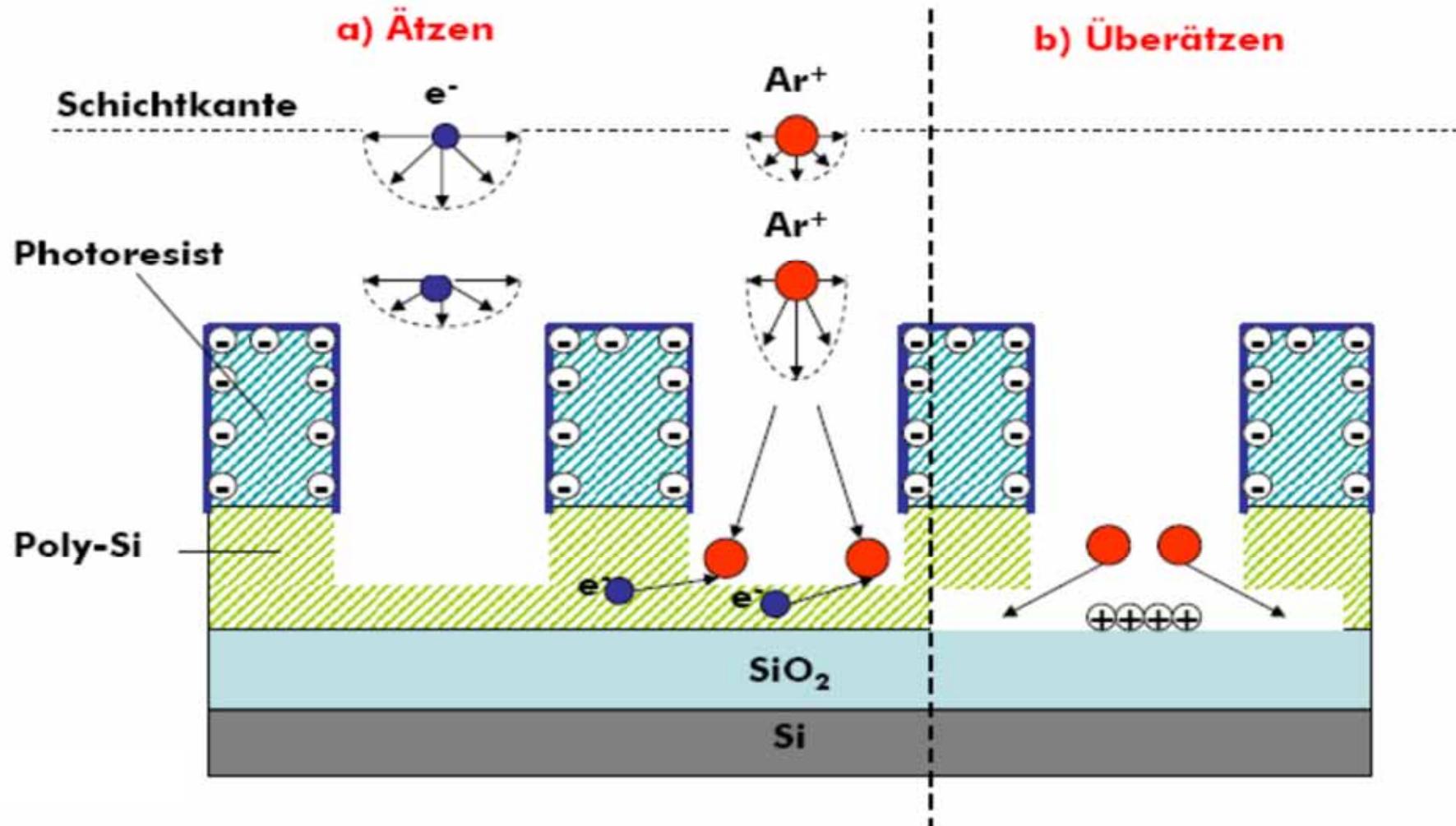


• Bei gleichen Ätzraten hat CCP mehr Beschußenergie



• Bei vergleichbaren Ätzraten ist der P-Verlust beim CCP höher

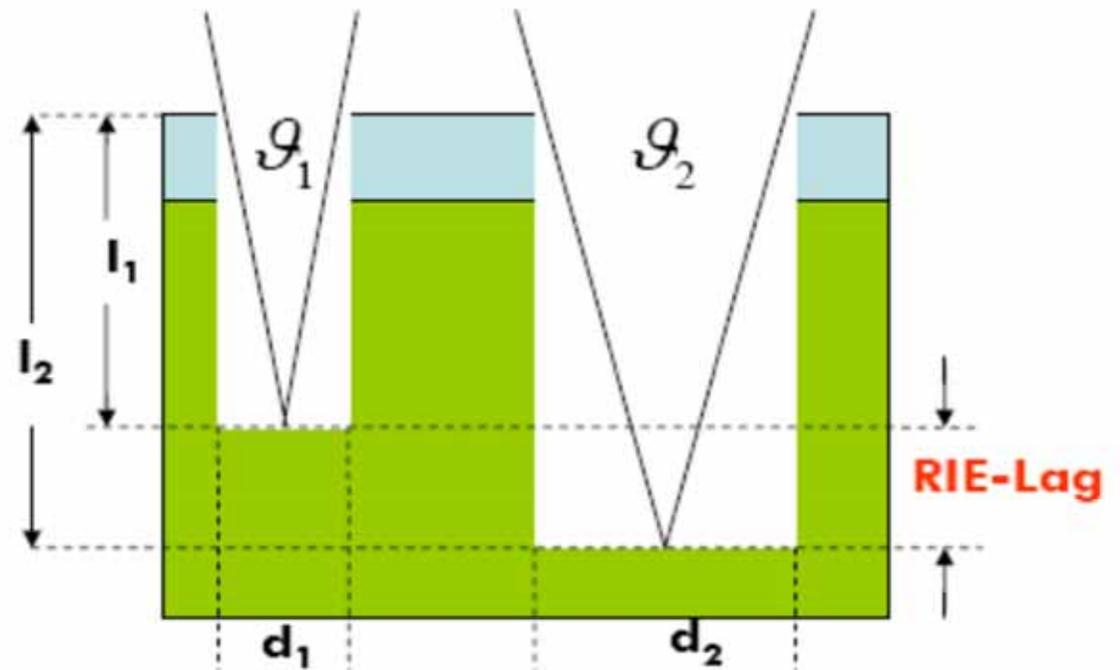
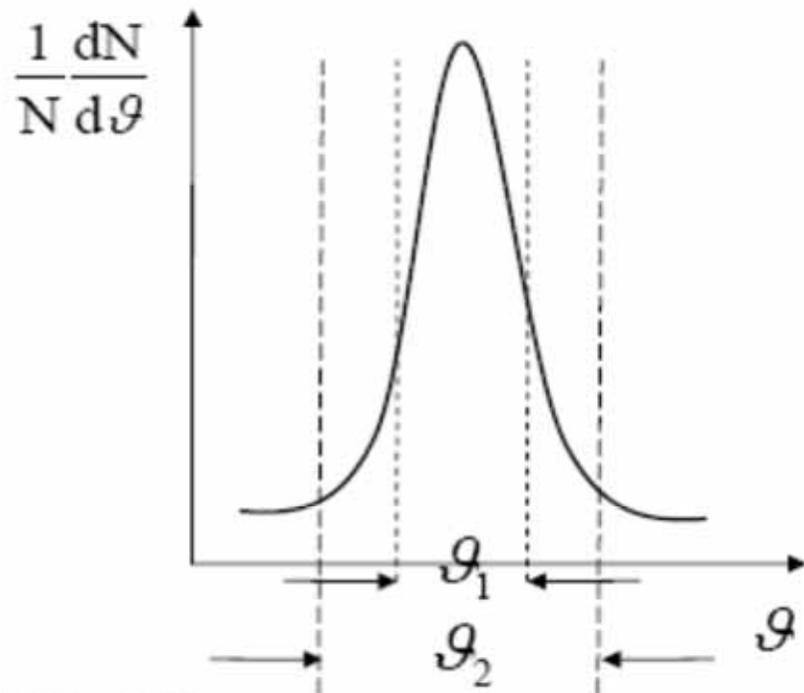
- b) „Notching“ Beispiel: Poly-Si Gate Ätzen



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

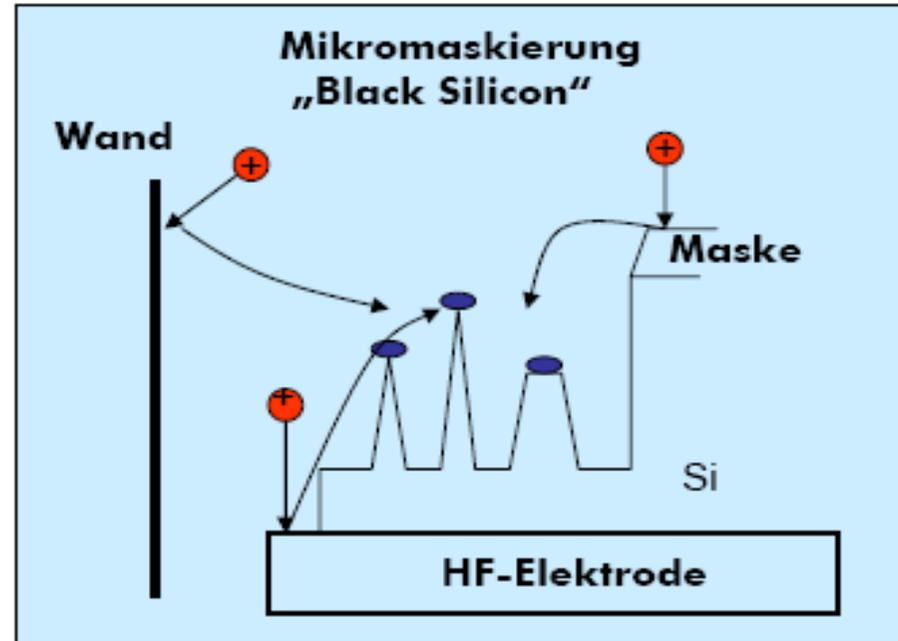
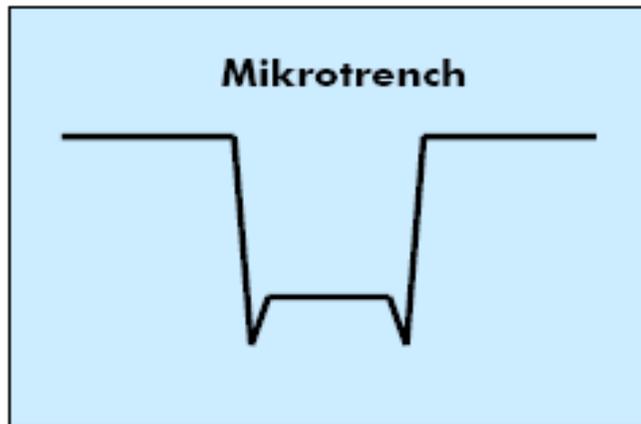
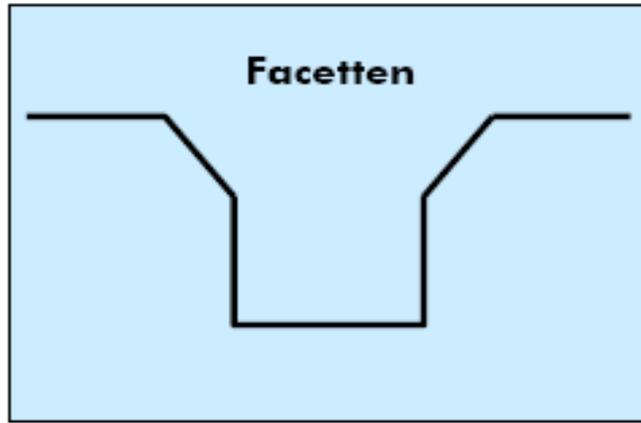
- C) „RIE Lag“

Aufgrund der Winkelverteilung der Ionen durch Streuung in der Randschicht kommt es zu einer vom Aspektverhältnis (l/d) abhängigen Ätzrate $R_e = f(l/d)$:



4.1.3 Plasma Ätzprozesse

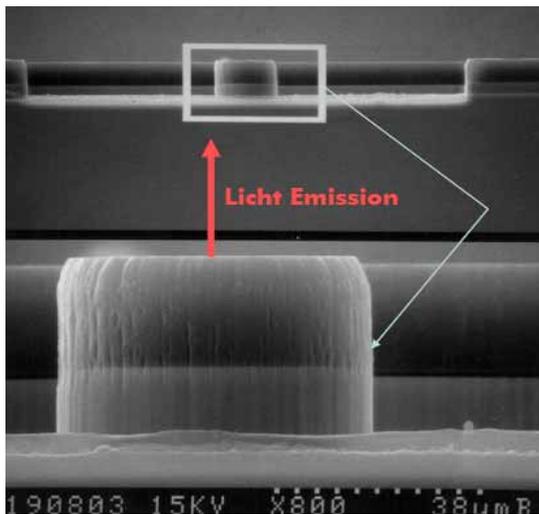
- d) Weitere Probleme



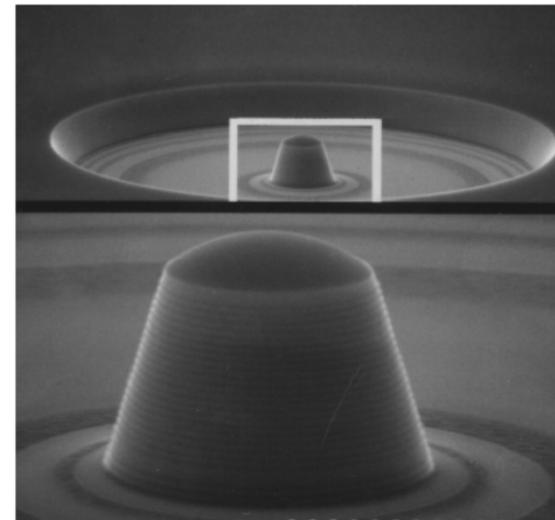
„Microloading“, SiC-Bildung, H-Eindringen, Gateoxidzerstörung, Redeposition, Durchbruch ...

4.1.3 Plasma Ätzprozesse

- **Beispiel:**
- **Dünne, runde Ätzmaske ist erodiert: Zylinder wird zum Kegelstumpf**
- **Abbildungen: surface emitting laser**



- **Steile Flanken**



- **Ätzfehler: abgeflachte Flanken**

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 Kein Thema
 - 4.2. Plasmafusion

5. **Diagnostik**
 - 5.1 Überblick Verfahren
 - 5.1 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

4.1.4 Plasma Sputtern

Schichtabscheidung durch Sputtering

Die Deposition von dünnen Schichten spielt in der modernen Mikroelektronik, in der Displaytechnologie aber auch in der Architekturglasbeschichtung eine wesentliche Rolle.

Mikroelektronik: Aluminium / Kupferschichten als Metallisierungsschichten (horizontale Leiterbahnen) und als Interconnect-Beschichtungen (vertikale Leiterbahnen bei mehreren Metallisierungsebenen) benötigt. Diese werden typischerweise mit Aluminium- bzw. Kupfertargets erzeugt, wobei die Substrattemperatur nahe bei Raumtemperatur bleibt.

Zu diesem Zweck könnten auch thermische Verdampfungsquellen verwendet werden, allerdings ist die Kontrolle der Filmuniformität und der Schichtzusammensetzung deutlich schwieriger.

Beim reaktiven Sputtering, das z.B. benötigt wird, um Oxide abzuscheiden, wird ein Hintergrundgas verwendet, dessen Dissoziationsprodukte mit dem Targetmaterial chemisch reagieren, wobei gleichzeitig auch die hochenergetischen Ionen eine wichtige Rolle spielen.

In folgender Tabelle sind einige Beispiele von gesputterten Schichten und deren Anwendungen aufgeführt.

4.1.4 Plasma Sputtern

Beispiele von gesputterten Schichten und Anwendungen

Anwendung		Material
Elektronik:	Elektroden/Interconnects	Au, Al, Cu, Cr, Ti, Pt, Mo, W, Al/Si, ...
	Widerstände	Cr, Ta, Re, TaN, TiN, NiCr, SnO ₂ , ...
	Dielektrika	HfO ₂ , PbO, AlN, Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ...
	Isolatoren	Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , Ta ₂ O ₅ , ...
	Supraleiter	Nb, NbN, La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-O, ...
	Halbleiter	Ge, Si, Se, Te, SiC, ZnO, ZnSe, CdSe, ...
	Passivierung	Si ₃ N ₄ , SiO, SiO ₂
Optik:	Beschichtung	SiO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , In ₂ O ₃
Sonstiges	Härtung	Cr, TiN, SiC, WC
	Dekoration	Al, Zn, Cd, Cr, Ti, Ta, W, TiN, TiC, SiC, Ag, Au, ...

1 Physikalisches Sputtern

Beim physikalischen Sputtern schlagen Ionen aus einem Target Atome heraus, die ballistisch, d.h. ohne weitere Stöße, auf ein Substrat fliegen und dort eine Schicht bilden (z.B. Argonionen von etwa 500 bis ca. 1000 eV)

Physikalisches Sputtern von reinen Metallen ist ein gut verstandener Prozess, der für viele Anwendungen relativ einfache Sputtersysteme zulässt. Brauchbare Abscheideraten vereint mit sehr guter Filmqualität, d.h. mit sehr guter Uniformität, geringer Rauigkeit und guter Adhäsion werden heute über große Flächen erzielt.

Bei Multikomponententargets würde man zunächst annehmen, dass aufgrund der unterschiedlichen Zersteubungsausbeuten die Zusammensetzung des abgeschiedenen Films vom Target verschieden ist. Tatsächlich jedoch bildet sich auf der Oberfläche eines Multikomponententargets während des Sputtervorganges eine Schicht aus, die gegenüber der ursprünglichen Targetzusammensetzung verändert ist. Und zwar werden die Komponenten angereichert, deren Zersteubungsausbeute geringer ist als die der anderen.

4.1.4 Plasma Sputtern

- Beispiele für Nitrierungen. TiN



4.1.4 Plasma Sputtern

- Depositionsrates:

$$R_{\text{deposition}} = \frac{\gamma_{\text{sput}} \Gamma_{\text{ion}}}{n_{\text{film}}} \frac{A_{\text{target}}}{A_{\text{substrat}}} \quad [\text{cm/sec}] \quad (2.2.1)$$

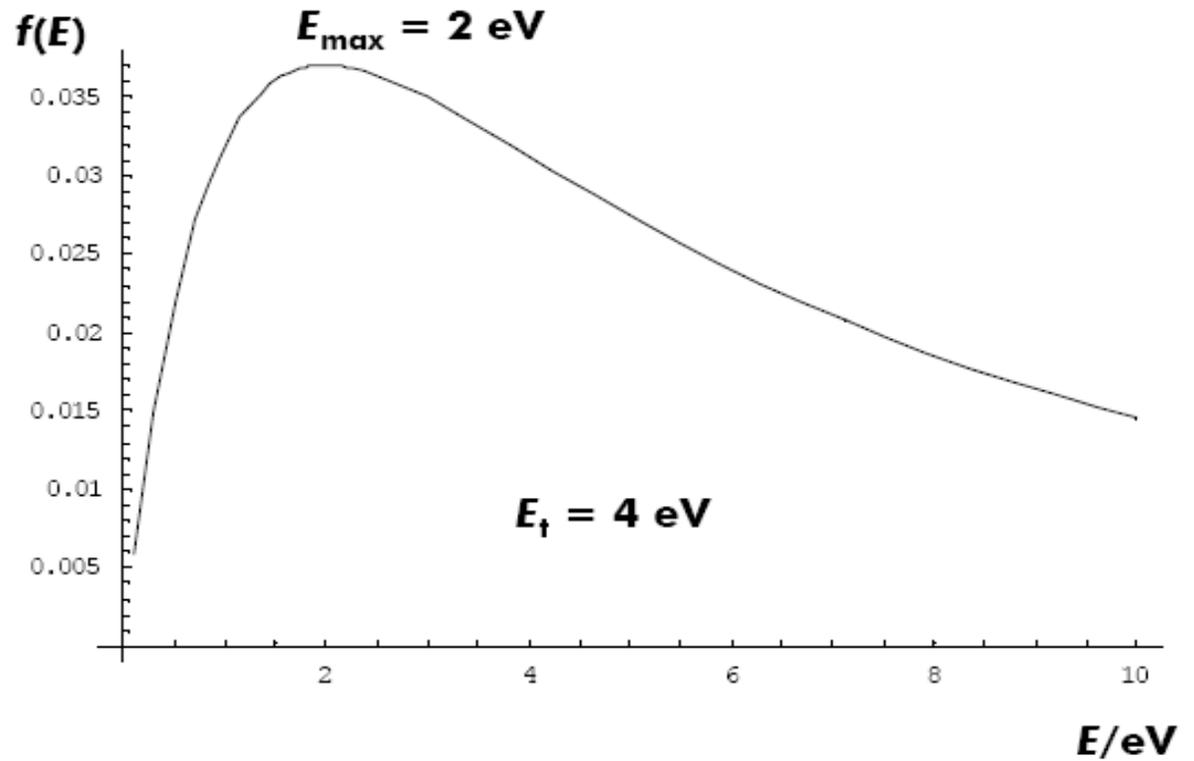
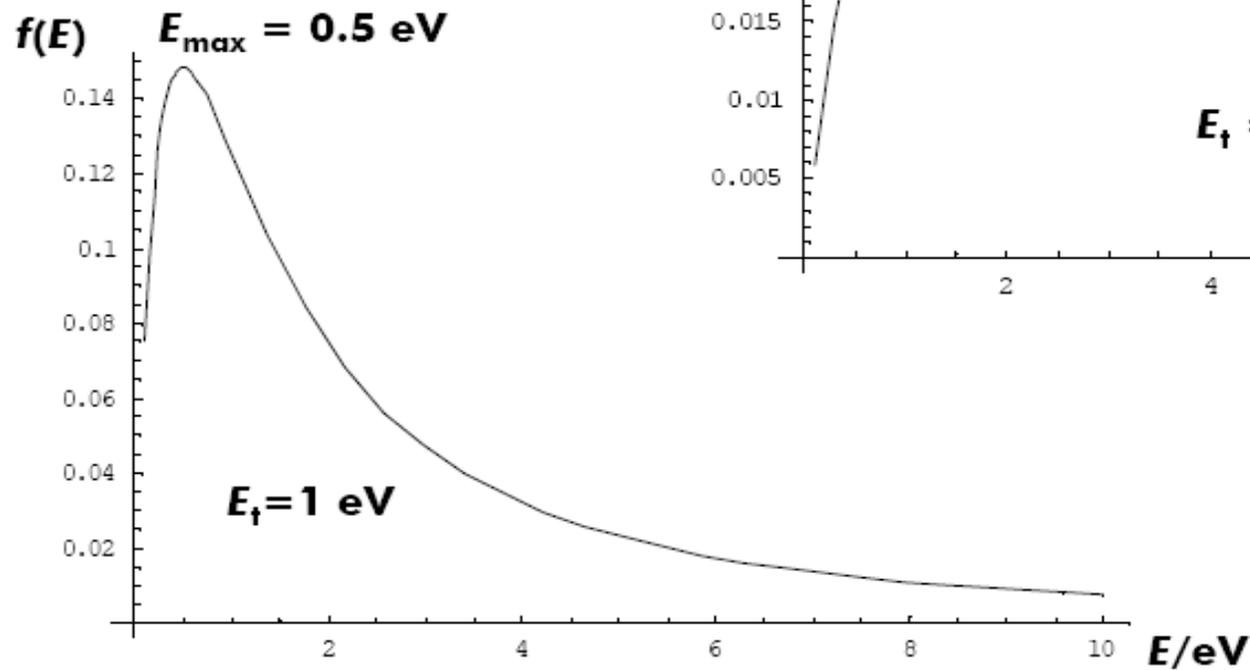
mit dem Ionenfluss Γ_{ion} in $[\text{1/cm}^2\text{sec}]$, der Zerstreubungsausbeute γ_{sput} , der Dichte des deponierten Films n_f in $[\text{1/cm}^3]$, der Target- und der Substratfläche A_t und A_f .

- Energieverteilung

$$f(E) \propto \frac{E_t E}{(E_t + E)^3}$$

4.1.4 Plasma Sputtern

Energieverteilung der
gesputterten Atome



4.1.4 Plasma Sputtern

Beispiel:

Verwendet man z.B. 1 kV Argonionen mit $\gamma_{\text{sput}} = 0.83$ bei einer Filmdichte von $n_f = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ und einer Ionenstromdichte von 1 mA/cm^2 (d.h. $\Gamma_{\text{ion}} = 6.25 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), dann ergibt sich mit $A_i/A_f = 1$:

$$R_{\text{dep}} = \frac{0.83 \cdot 6.25 \cdot 10^{15}}{5 \cdot 10^{22}} \approx 100 \frac{\text{nm}}{\text{min}}$$

liegt der Prozessdruck bei 0.1 Pa (typisch), dann ist die Argonkonzentration für eine Gastemperatur von 300 K:

$$p = nkT \Rightarrow n = \frac{p}{kT} = \frac{0.1}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \frac{1}{\text{m}^3} = 2.42 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{m}^3} = 2.42 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

mit dem gaskinetischen Querschnitt (Tab. 1.4, S 90) f. Aluminium in Argon $\sigma \approx 5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ erhält man die **mittlere freie Weglänge** der Al-Atome:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \approx \frac{1}{2.42 \cdot 10^{13} \cdot 5 \cdot 10^{-15}} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2} \approx 8.3 \text{ cm}$$

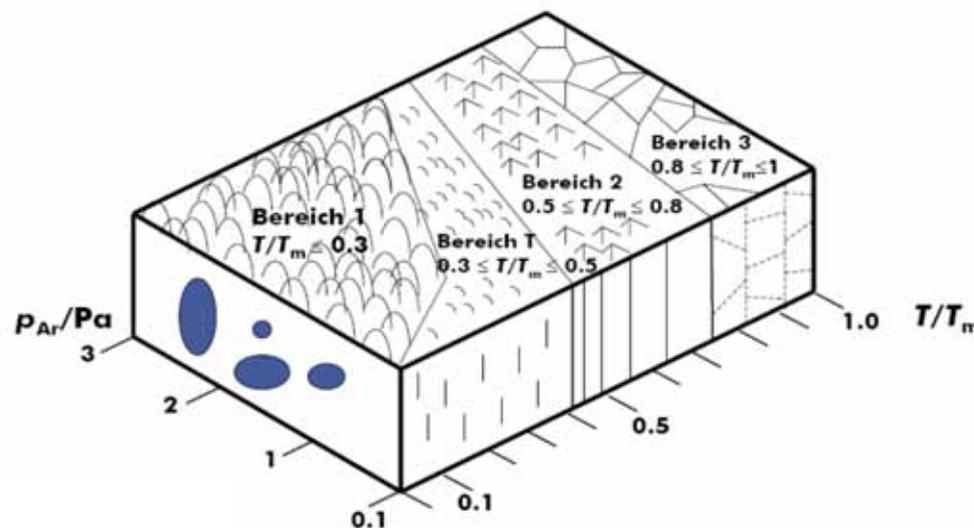
4.1.4 Plasma Sputtern

Die Morphologie (Beschaffenheit) der gesputterten Schichten ist eine Funktion der Substrattemperatur. Diese wird üblicherweise getrennt geregelt.

Sind die atomaren Flüsse sehr hoch, muss das Substrat gekühlt werden.

Eine nicht ganz so wichtige Rolle spielt der Prozessdruck. In folgender Abb. sind die verschiedenen Prozessbereiche in Abhängigkeit vom Argondruck und von der Substrattemperatur, bezogen auf die Schmelztemperatur T_m des abgeschiedenen Metallfilms, dargestellt.

Dabei unterscheidet man 4 Bereiche:



4.1.4 Plasma Sputtern

2. Reaktives Sputtern

Im Gegensatz zum rein physikalischen Sputtern, benötigt das reaktive Sputtern ein Hintergrundgas, das im Plasma dissoziiert wird und dessen Dissoziationsprodukte mit dem Target chemisch reagieren während dieses gleichzeitig von hochenergetischen Ionen beschossen wird.

Auf Substrat deponierte Film ist eine Kombination, gebildet aus dem gesputterten Target und Komponenten des Reaktivgases.

Typische Anwendungen sind durch Sputtering abgeschiedene Filme, deren Komponenten deutlich unterschiedliche Dampfdrücke und daher auch deutlich unterschiedliche Sticking-Koeffizienten auf dem Substrat besitzen.

Will man z.B. SiO₂ Schichten mit einem SiO₂ Target erzeugen, dann führt dies zu einer Anreicherung von Si im abgeschiedenen SiO_x-Film (d.h. $x < 2$). Setzt man dem Hintergrundgas (Ar) Sauerstoff (O₂) zu, kann man die Stöchiometrie von Si:O=1:2 erreichen. Ebenso kann auch ein reines Si-Target verwendet werden, um mit zugemischtem Sauerstoff SiO₂ Schichten abzuscheiden.

Siliziumdioxidschichten werden z.B. in der Mikroelektronik als Isolatorschichten und auch als Maskenmaterial verwendet. In der Lebensmitteltechnik beschichtet man PET-Flaschen, um die Diffusionsbarriere zu verbessern.

4.1.4 Plasma Sputtern

Reaktivgassputtering wird an vielen Stellen verwendet, um Oxide und Nitride herzustellen. Weiterhin werden auch Karbide (z.B. WoC : Wolframkarbid) und Silizide (z.B. WoSi : Wolframsilizid) abgeschieden.

Hochtemperatur-supraleitende Filme wie z.B. YBaCuO werden abgeschieden, indem ein z.B. YBaCuO -Target verwendet und mit O_2 -Zusatz gesputtert wird. Die Beimischung folgender Zusätze (oftmals zum Hintergrundgas Ar) erzeugt durch Dissoziation im Plasma die entsprechenden Reaktivgaskomponenten:

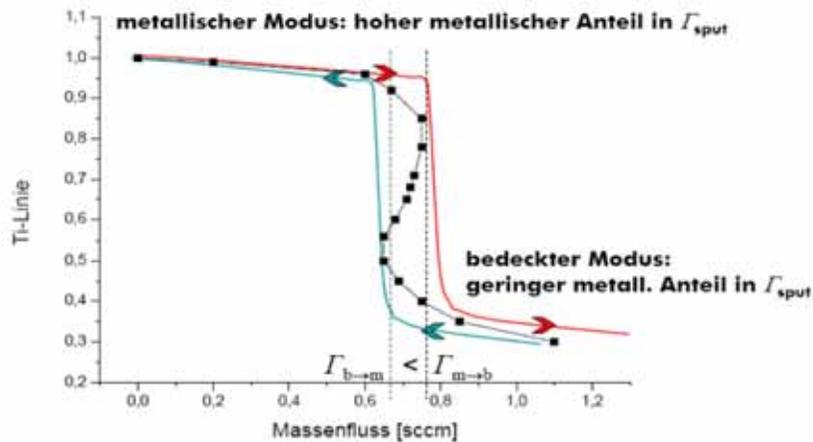
- O_2 und H_2O > O-Atome
- N_2 und NH_3 > N-Atome
- CH_4 und C_2H_2 > C-Atome
- SiH_4 > Si-Atome

Prinzipiell könnten auch Keramiken als Targets verwendet werden. Doch diese sind gegen hohe Leistungsflüsse empfindlich (brechen bei inhomogenem Wärmeeintrag). Daher werden i.d.R. Metalltargets in Kombination mit einem reaktiven Hintergrundgas verwendet.

4.1.4 Plasma Sputtern

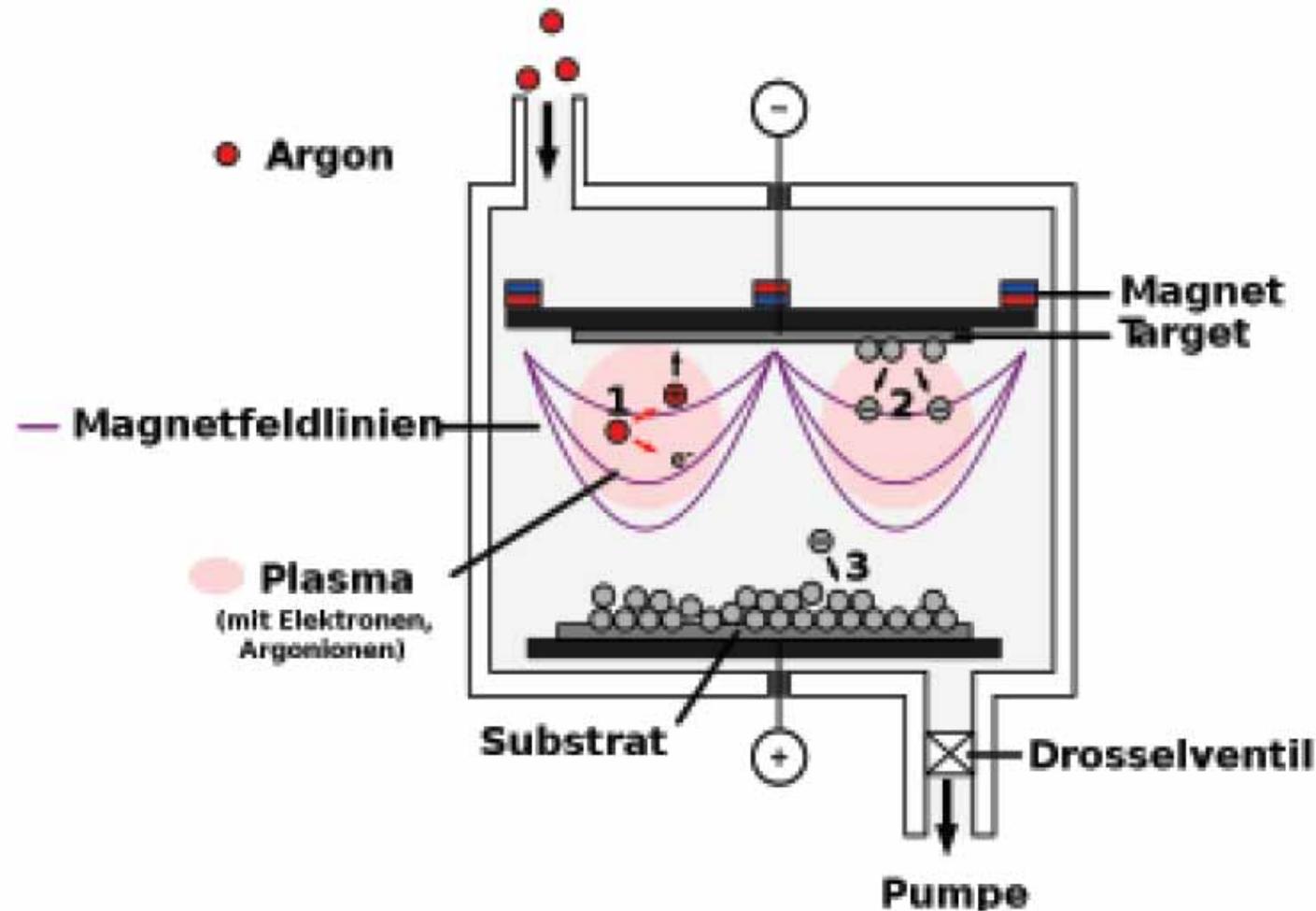
Beispiel: TiN

Beim realistischen Reaktivgasputtering von TiN-Filmen wird eine Ti-Target mit einem Ar/N₂-Gasgemisch zersteubt. Dabei zeigt sich, dass die Strahldichte (PT1) einer Ti-Linie proportional zum metallischen Anteil des Flusses Γ_{sput} (2.2.6) ist. Trägt man die maximale Strahldichte der Ti-Linie gegen den Reaktivgasfluss auf, ergibt sich im unregelmäßigen Fall eine Hysterese, die für kleinere Gasflüsse einen höheren Peak (d.h. einen höheren Sputterfluss) ergibt als für größere Reaktivgasflüsse. Regelt man den Fluss aus, kann man, wie in Abb. 2.3 gezeigt, die Hysterese vermeiden.



Mittels einer Ti-Linie ausgeregelte Hysterese bei der reaktiven Sputterdeposition von TiN-Filmen

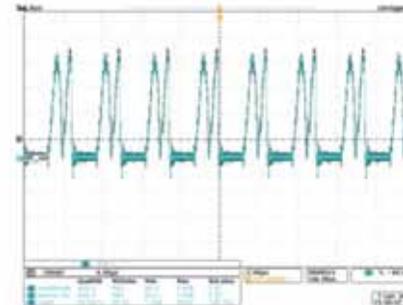
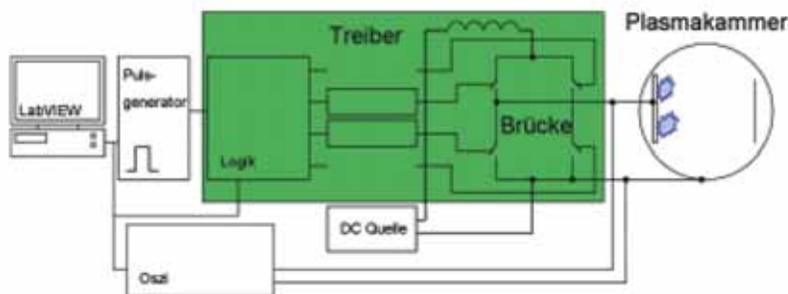
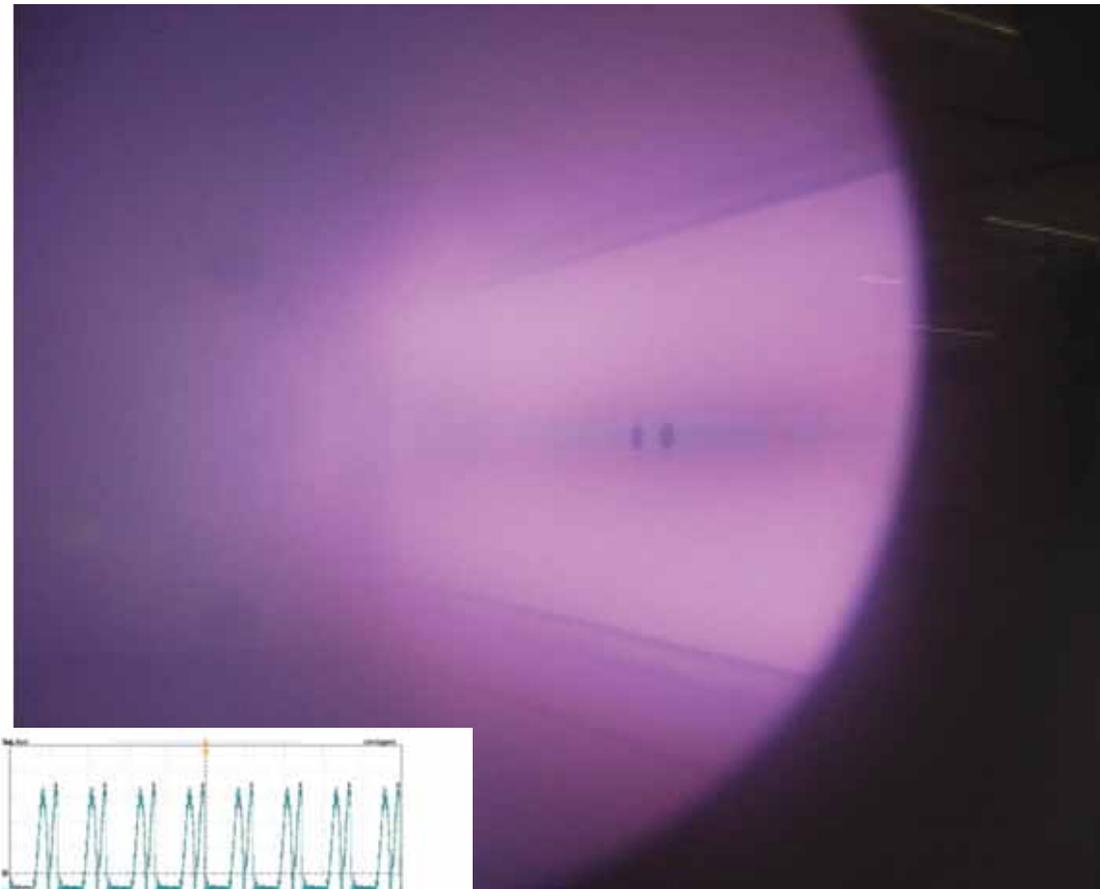
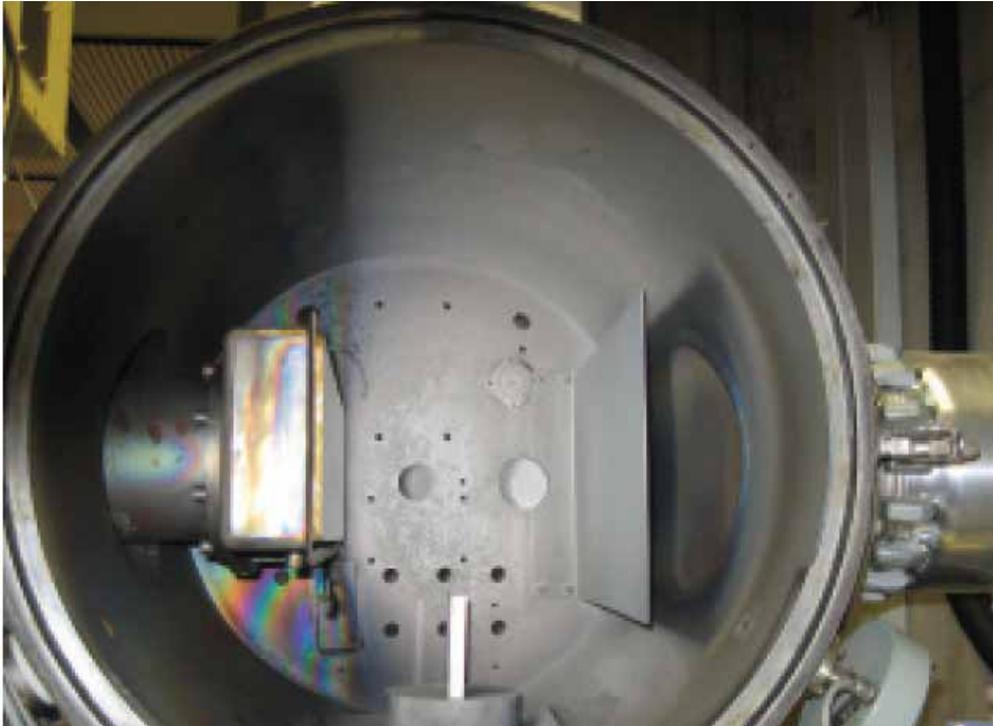
Plasma Sputteranlage Fa. Hüttinger



Zusatz aktuelle Arbeiten

Plasma Sputteranlage Fa. Hüttinger

Argonplasma 2 mbar



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 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

4.1.5 Plasma Funktionalisierung

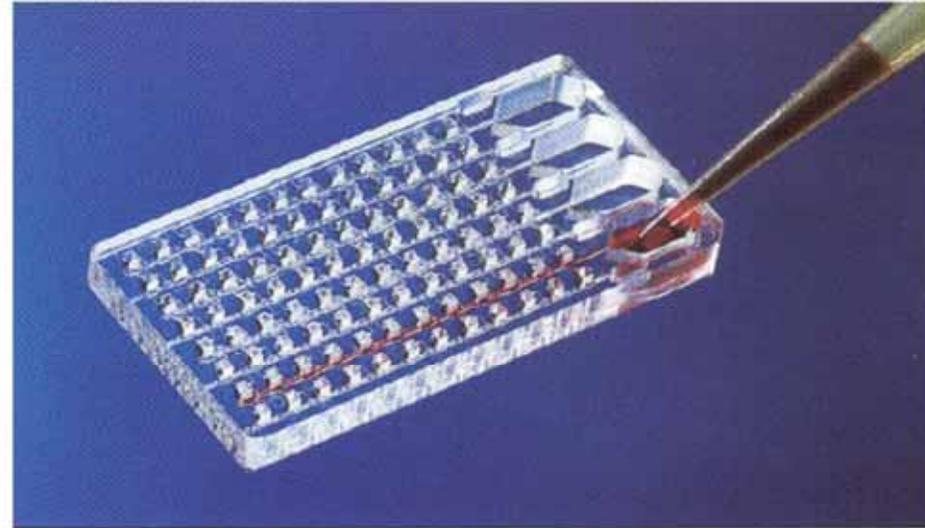
functionalisation - to achieve fluidic properties

coating has to be biological compatible

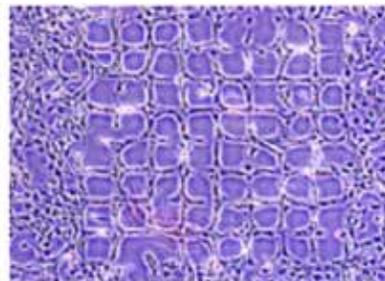
modification of plastics for medical applications

generation of specific properties e.g.: growth of cells

bioartificial systems

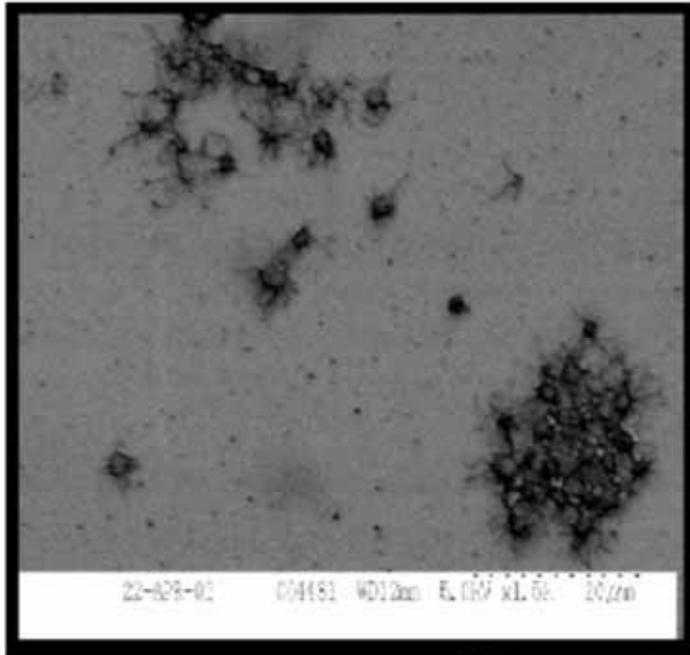


chip for diagnostics (plasma functionalisation)
photo: Steag Microparts GmbH



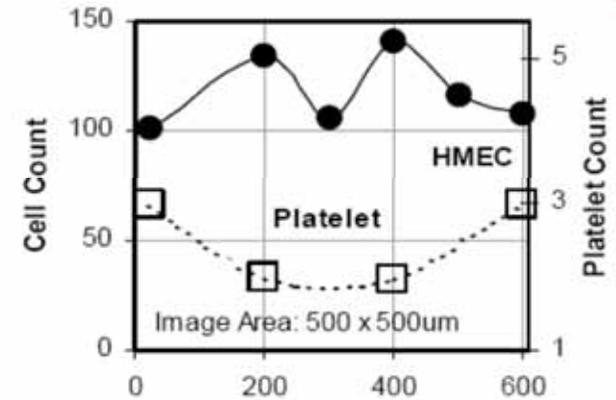
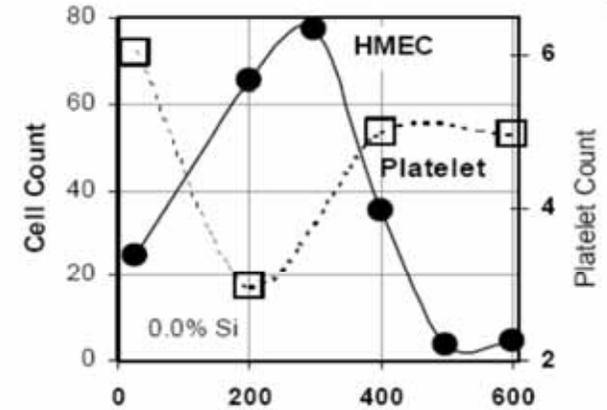
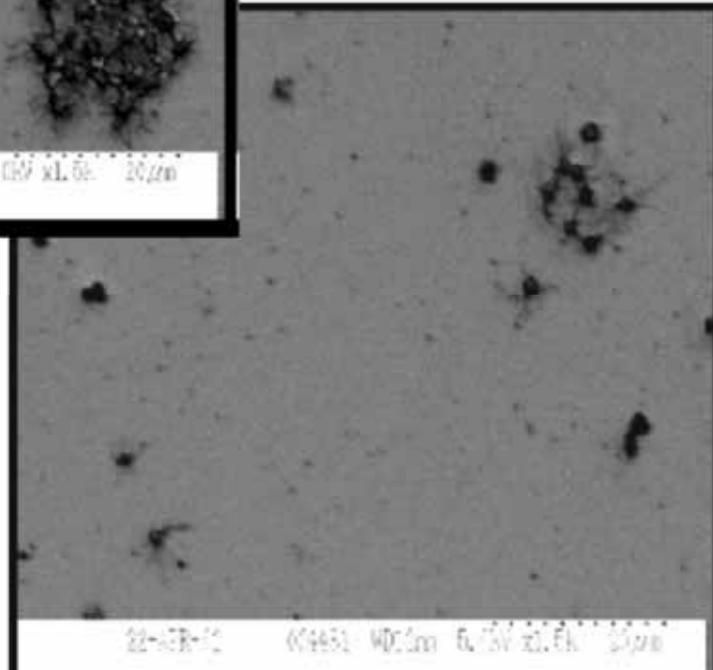
cell growth on plastics
photo: INP Greifswald

4.1.5 Plasma Funktionalisierung



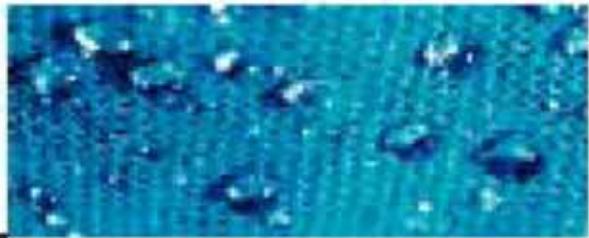
Planar substrates

Reduced Platelet Aggregation



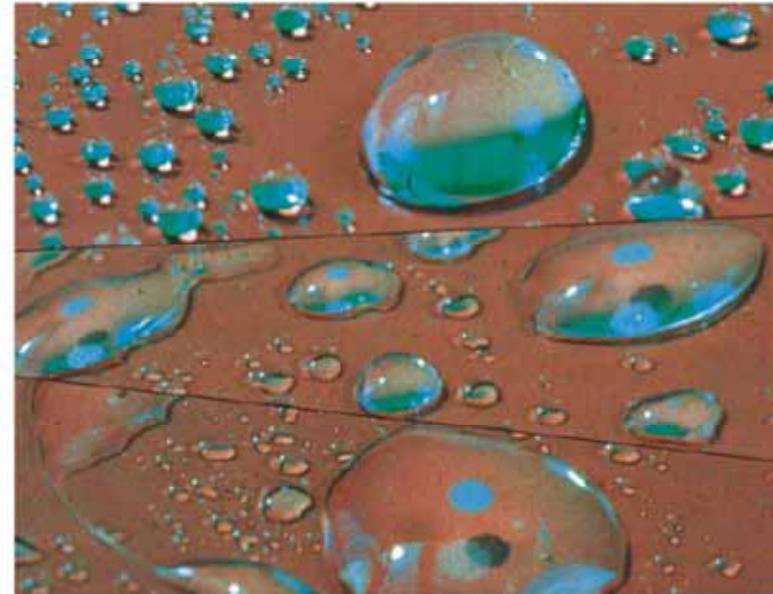
4.1.5 Plasma Funktionalisierung

Plasma treatment of cellulose fibers and technical textiles



change of wettability and felt properties

-> less energy consumption, reduction of sewages by improved dyeing and printing properties

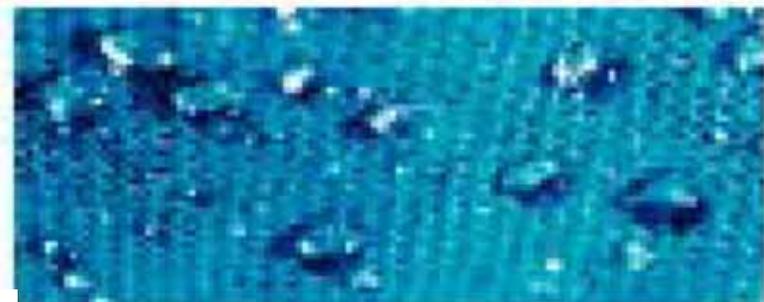


hydrophobe equipped textiles
(photo: fmt Wuppertal)

4.1.5 Plasma Funktionalisierung



. hydrophile, hydrophobe



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

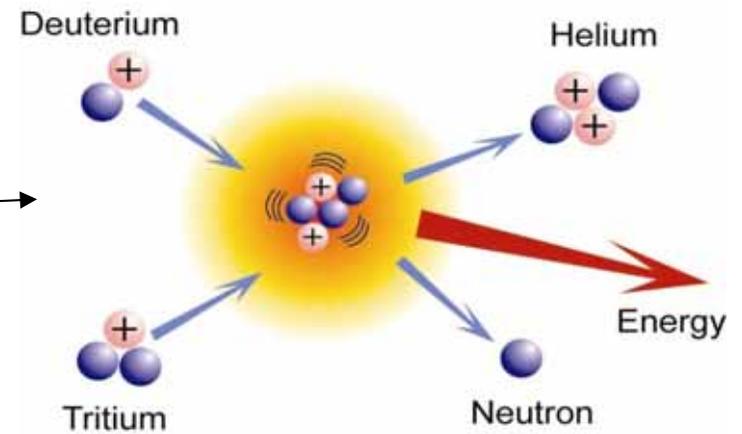
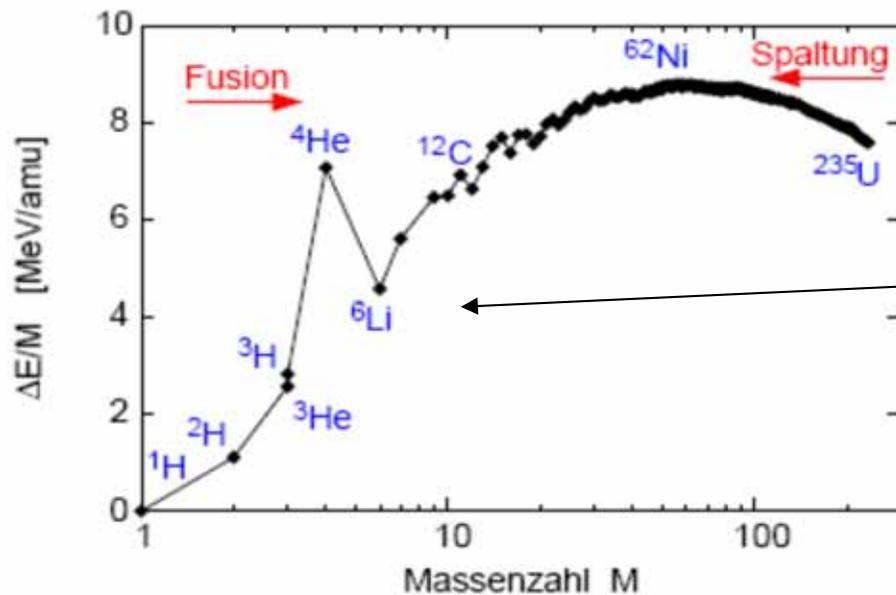
3. **Erzeugung eines Plasmas**
 - 3.1. Stationäre Gasentladung
 - 3.2. Entladung im Wechselfeld

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 Die Plasma Randschicht
 - 5.2 Sondenmessungen
 - 5.3 Mikrowellenmessungen
 - 5.4 **Analytische Verfahren** Beispiel TIMS Messung

4.2 Plasmafusion

Kernfusion



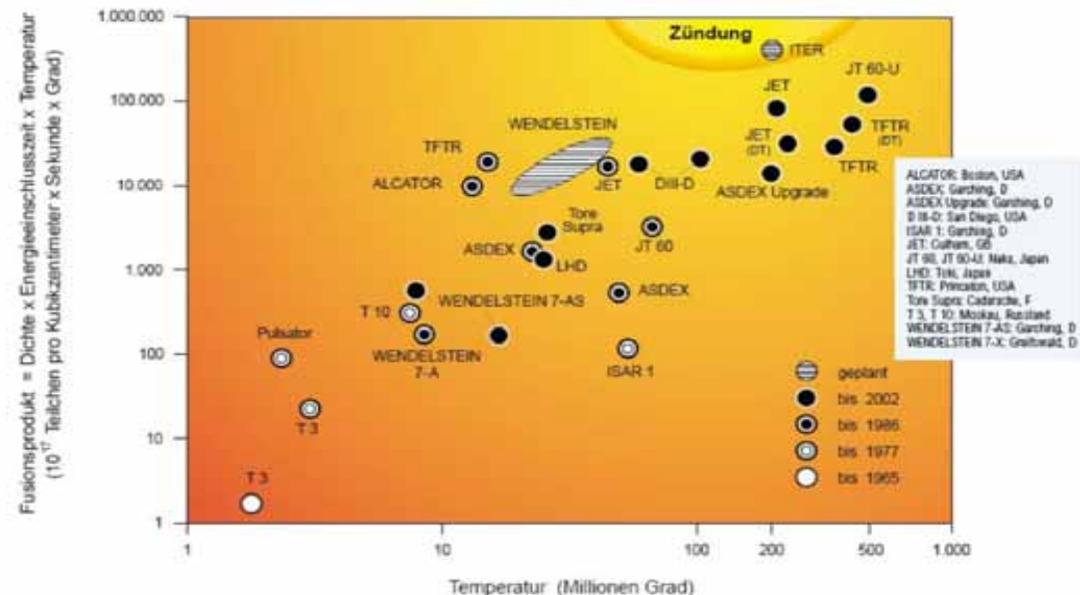
•Verlauf der Bindungsenergie pro Nucleon im Kern als Funktion der Atommasse

4.2 Plasmafusion

Thermonukleare Plasmen

- die Entwicklung in der Plasmaphysik wurde im wesentlichen durch die *Erforschung der kontrollierten Kernfusion* vorangetrieben
- um aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie zu gewinnen, muss ein Plasma bei ausreichender Temperatur lange genug eingeschlossen bleiben
- erst dann findet die Energiefreisetzung bei Fusionsreaktionen mit einer Rate statt, die das Aufrechterhalten des Plasmas gewährleistet
- dieses gezündete thermonukleare Plasma ist bislang noch nicht experimentell realisiert

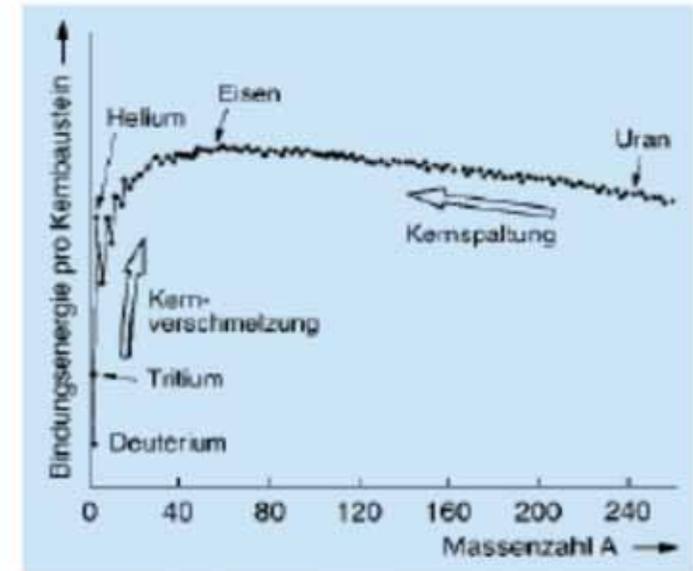
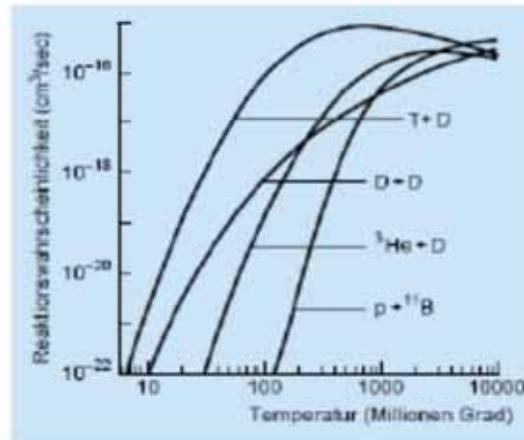
Zündbedingungen	
Plasmatemperatur	100 - 200 Millionen Grad
Plasmedichte	ca. 10^{14} Teilchen pro Kubikzentimeter
Energieeinschlusszeit	1 bis 2 Sekunden



4.2 Plasmafusion

Thermonukleare Fusionsreaktionen

der „Energiegewinn“ bei der Kernfusion basiert auf der *Fusion leichter Atomkerne* hierbei wird eine große Menge an Energie freigesetzt, da sich die Bindungsenergie pro Nukleon im Fusionsprodukt erhöht (Potentialtopf tiefer)



damit Fusion stattfindet, müssen die Atomkerne sich nahe genug kommen bei einem Stoß, um durch den Coulomb-Wall tunneln zu können und um in den Bereich der starken Wechselwirkung zu gelangen

Fusionsreaktionen mit hohem Wirkungsquerschnitt sind:



4.2 Plasmafusion

Zündkriterium I

- *Rate der Fusionsreaktionen* ist gegeben als $R = n_1 n_2 \langle \sigma v_R \rangle = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v_R \rangle$

$$\langle \sigma v_R \rangle = A \int \sigma(v) \exp \left[\frac{mv^2}{2k_B T_i} \right] v^3 dv$$

$$\langle \sigma v_R \rangle = \frac{1}{(m\pi)^{1/2}} (k_B T_i)^{3/2} \int \sigma(\epsilon) \exp \left[\frac{\epsilon}{k_B T_i} \right] \epsilon d\epsilon$$

- bei vollständig ionisierten Plasmen sind die Strahlungsverluste im wesentlichen *Bremsstrahlung* der Elektronen, die im Coulomb-Feld der Ionen abgelenkt werden

$$P_{br}(b) = \frac{1}{4\pi\sqrt{3}\epsilon_0^3} \frac{e^6}{m_e^{3/2} c^3 h} (k_B T_e)^{1/2} n_e n_i Z^2 \propto (k_B T_e)^{1/2} n^2 Z^2$$

- die *Linienstrahlung* spielt eine untergeordnete Rolle
- allerdings können Verunreinigungen, die durch Wandprozesse in das Plasma getragen werden, die Leistungsbilanz stark beeinflussen

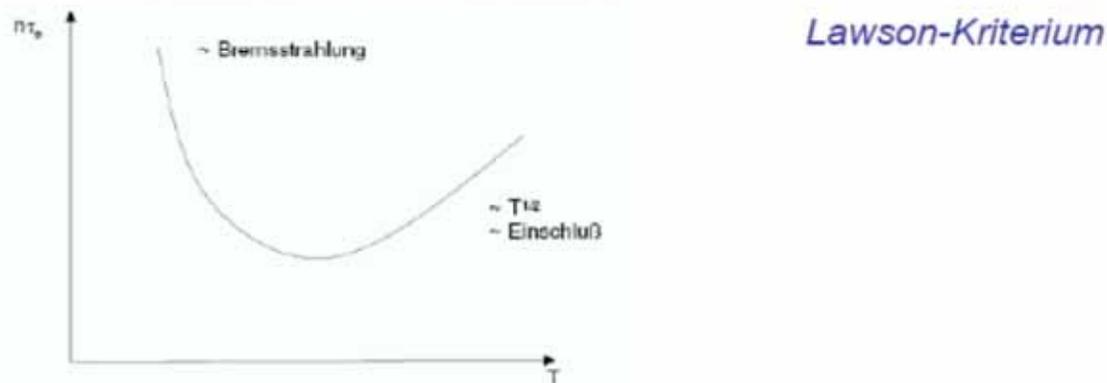
$$P_{Linien} \propto \epsilon \exp \left[-\frac{\epsilon}{k_B T_i} \right] \simeq \epsilon^2 \propto Z^4$$

4.2 Plasmafusion

Zündkriterium II

- für die Leistungsbilanz ist schließlich noch die Isolation des Plasmas wesentlich
- dies wird in einem einfachsten Ansatz mit einer *Energieeinschlusszeit* ausgedrückt

$$n\tau_e = \frac{3k_B T(1 - \eta)}{\eta \left[\frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle \epsilon_{Fusion} - \xi (k_B T)^{1/2} \right] - \xi (k_B T)^{1/2}}$$



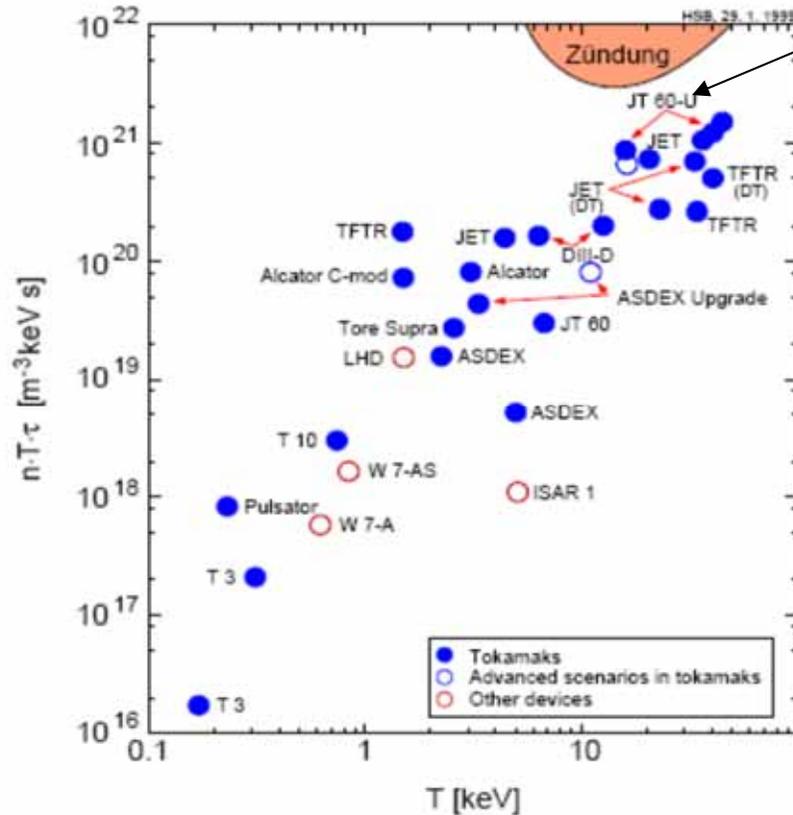
- um das thermonukleare Zünden des Plasmas zu erreichen, wird im wesentlichen an einer Verbesserung des Einschlusses gearbeitet
- dementsprechend gibt es unterschiedliche Konzepte, ein heißes Fusionsplasma zu erzeugen
- es lassen sich zwei Klassen unterscheiden: die *magnetische Fusion* (Tokamak, Stellarator) und die *Trägheitsfusion*, bei der ein Brennstoffgemisch aus Deuterium und Tritium mittels Laserstrahlung zur Implosion gebracht wird

4.2 Plasmafusion

Zündkriterium III

Zünden für mag. Plasmen reale Experimente:

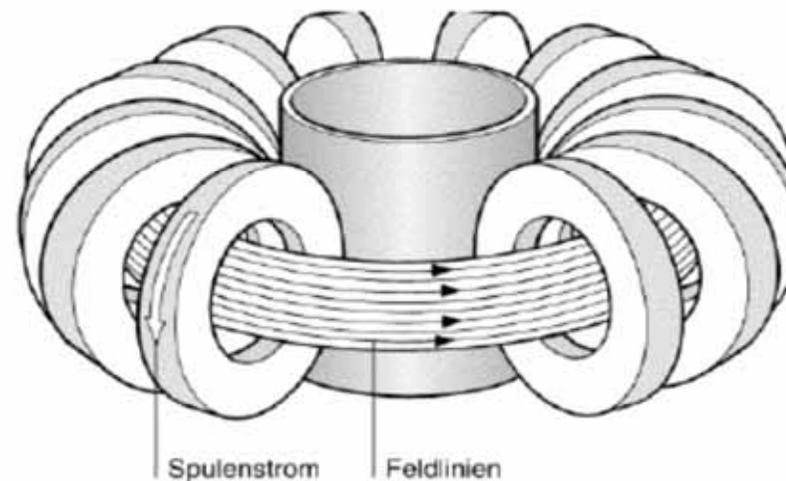
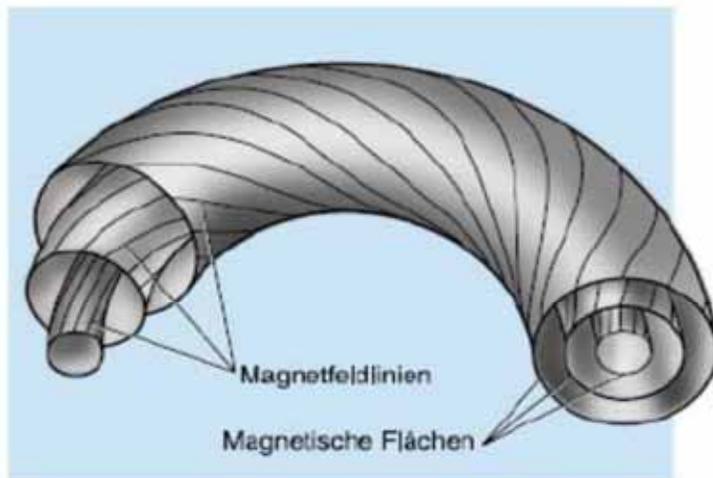
- www.itter.org
- Stand: 6/2015



4.2 Plasmafusion

Plasmaeinschluss

- die Halterung des thermonuklearen Plasmas kann wegen seiner hohen Temperatur nicht mehr durch substantielle Wände erfolgen
- jedoch eröffnet die Anwendung magnetischer Felder eine Möglichkeit zur Einschließung der Plasmen mittels des magnetischen Druckes (magnetische Halterung)
- ein Zusammenhalt des Plasmas infolge der Gravitationskräfte, wie er z.B. auf der Sonne auftritt, ist unter irdischen Maßstäben nicht realisierbar



4.2 Plasmafusion

Plasmaheizung

für die Erzeugung bzw. Heizung thermonuklearer Plasma kommen folgende Methoden in Frage:

- Elektrischer Stromdurchgang (Stromtrieb, Ohm'sche Heizung)
- Magnetische Kompression (Pinch)
- Injektion energiereicher Wellen- oder Teilchenstrahlen (Wellenheizung, Neutralteilcheninjektion)

