

# Abscheide (Additive) (Schicht) Verfahren

---

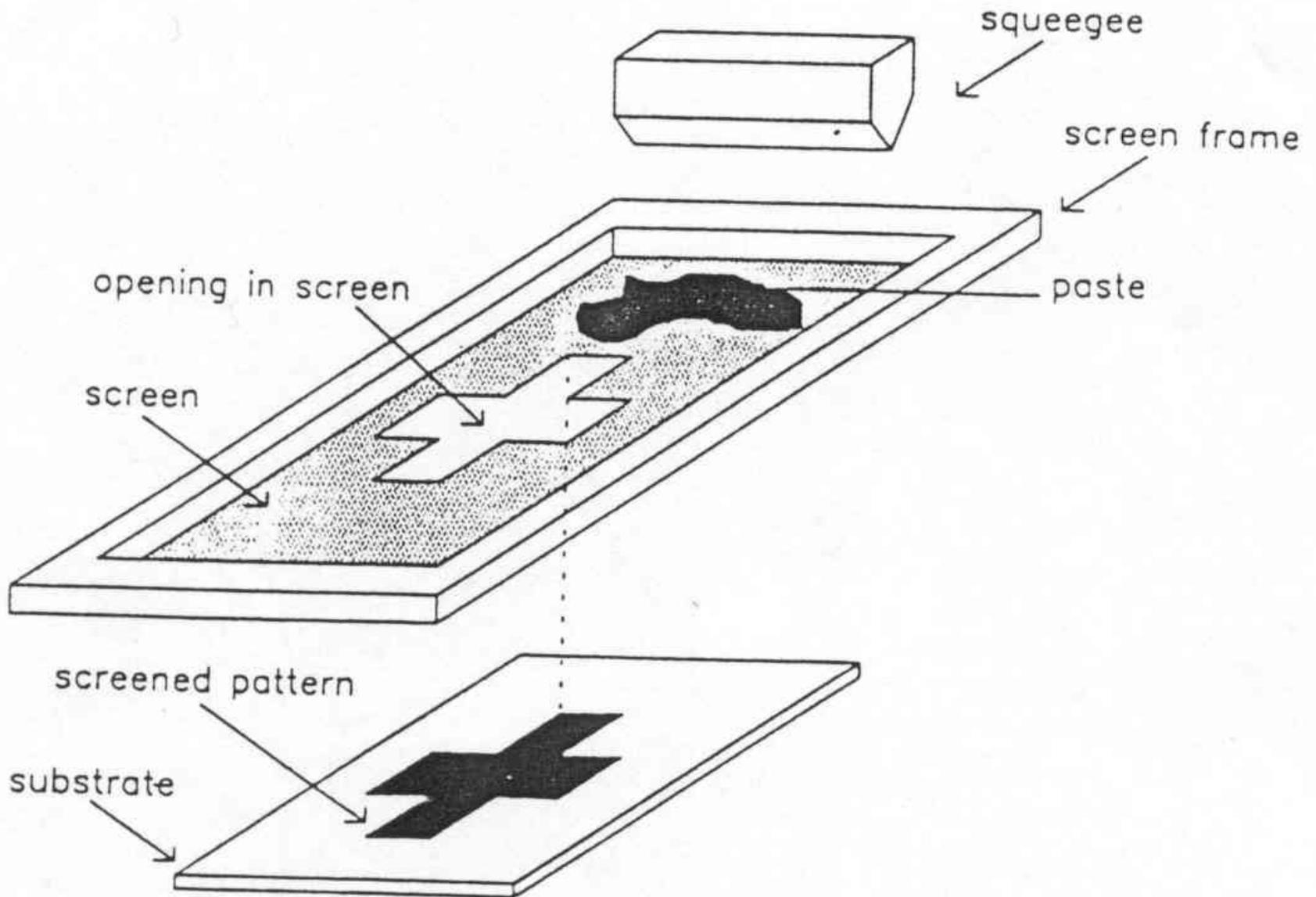
- **Dickfilmtechnik**

- **Drucktechnik (Screen-Printing)**
- **Beispiele**

- **Dünnschicht (Vakuum-Techniken)**

- **Vakuum, mittlere freie Weglänge, Unterdruck-Erzeugung**
  - **Thermische Oxidation von Silizium**
  - **Physikalische Gasphasen Abscheidung (PVD)**
    - Aufdampfen
    - Sputtern
  - **Chemische Gasphasen Abscheidung Verfahren (CVD)**
    - LPCVD
    - PECVD
-

# Dickfilmtechnik

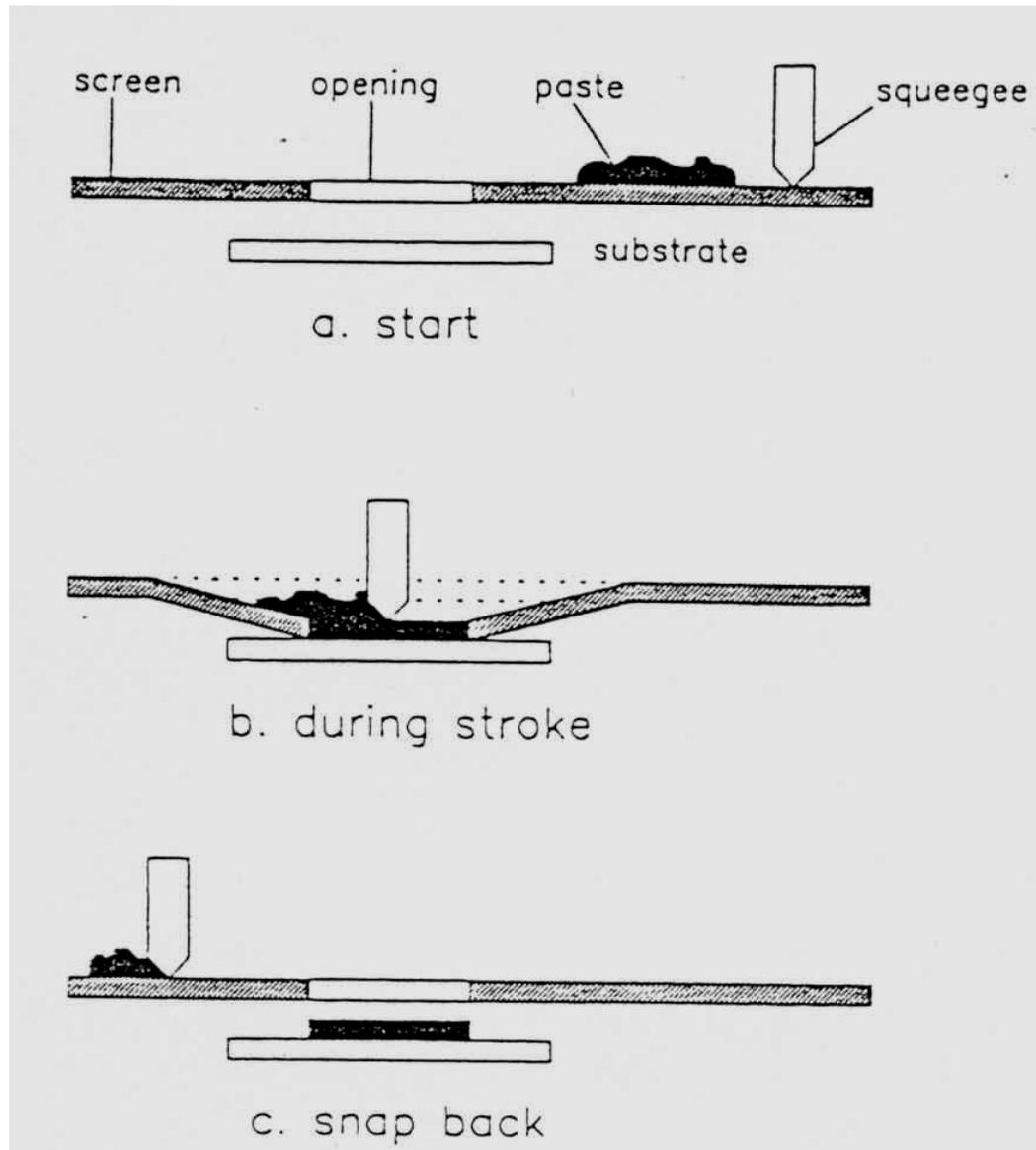


## Prozessablauf beim Siebdruck

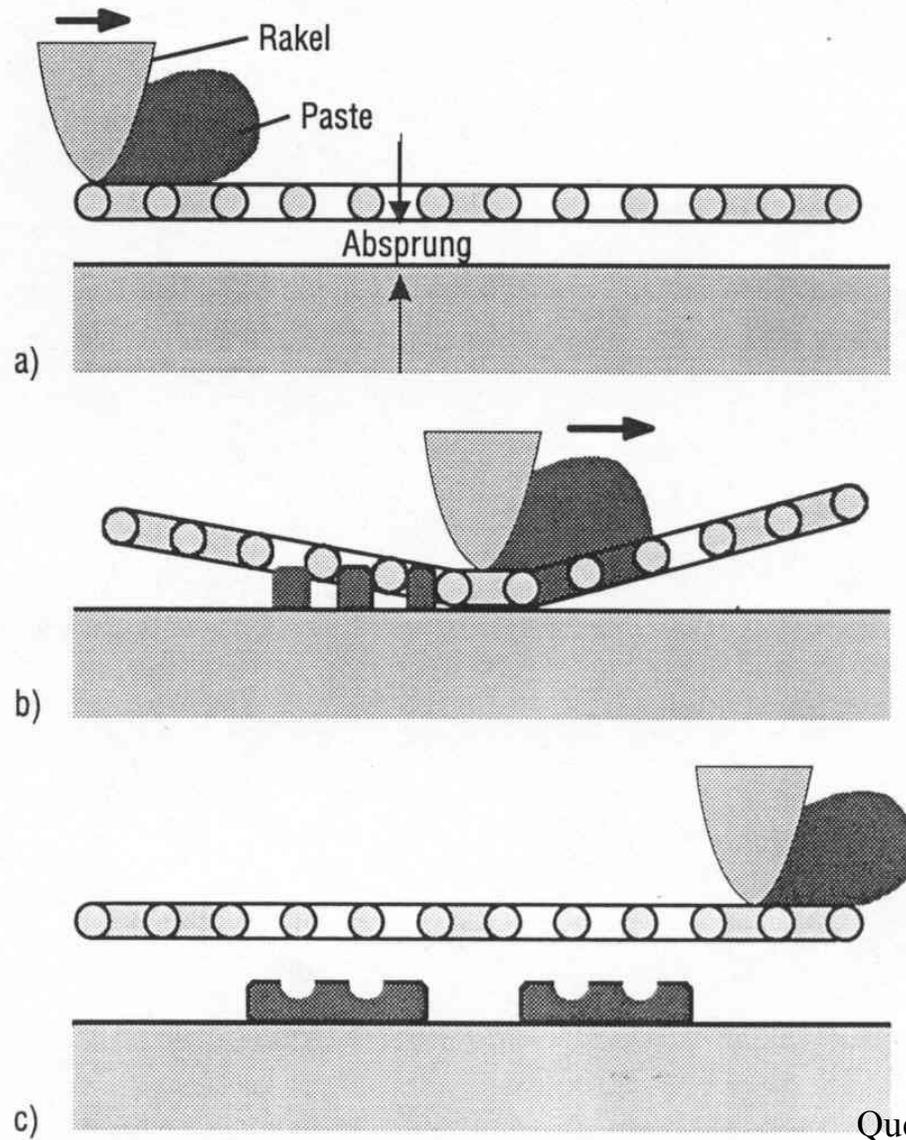
---

- Sieb herstellen (photolithographisch): 80 – 400 Maschen pro Zoll
  - Paste aufbringen und drucken (Schichtdicke ca. 25 – 50  $\mu\text{m}$ )
  - Paste trocknen (erst Raumtemperatur, dann 80 – 150°C)
  - Paste einbrennen bei meist  $>800^\circ\text{C}$  (resultierende Schichtdicke: ca. 10 – 20  $\mu\text{m}$ )
-

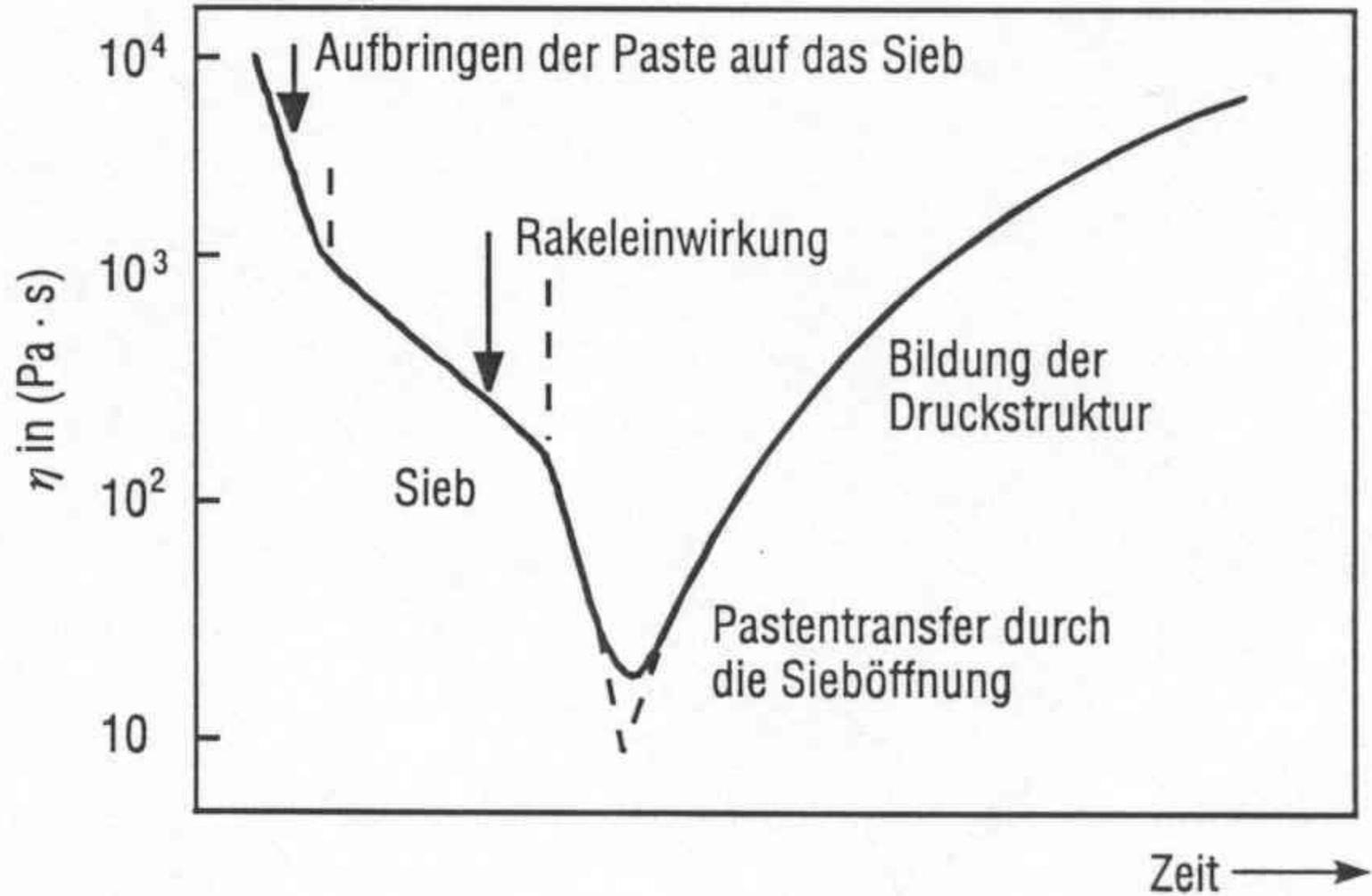
# Dickfilmprozessablauf grafisch



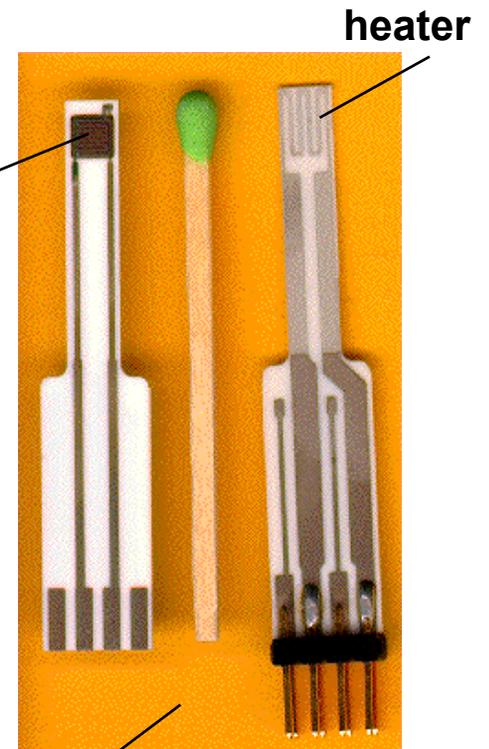
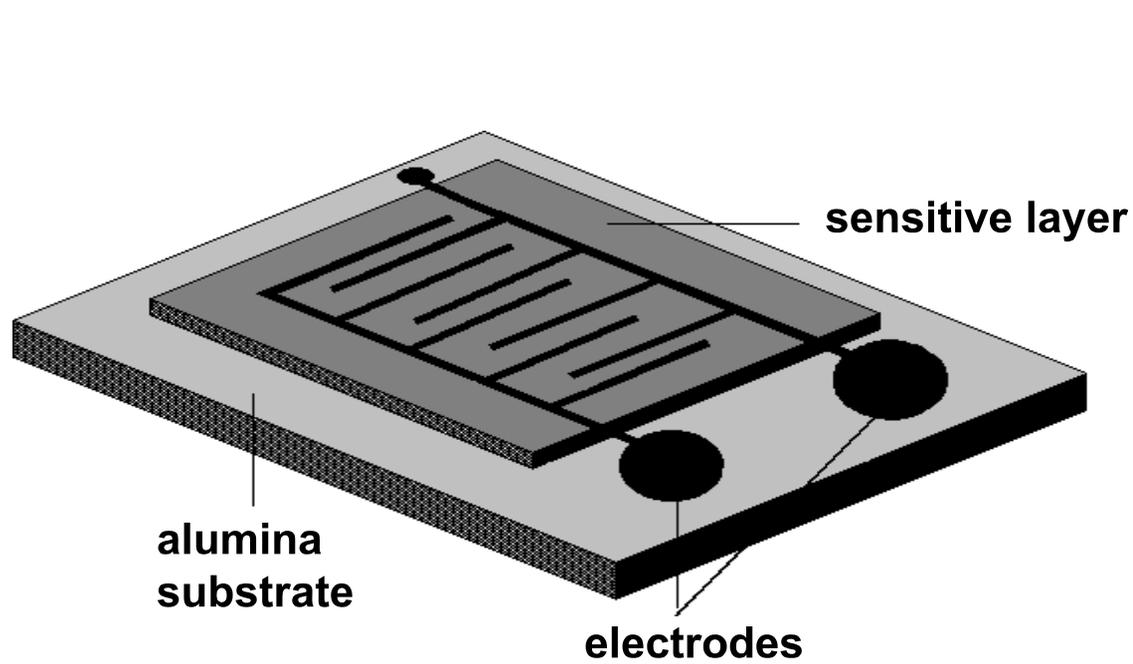
# Dickschicht Rakelprozeß



# Viskositätsänderung beim Pastendruck



# Gassensoren als Interdigital Transducer



standardisierte Sensor-Fingerstruktur

# Drücke als f(Höhe) und mittlere freie Weglänge als f(Höhe)

	Höhe [m]	Druck [mbar]
Luftdruck in Meereshöhe	0	1000
Gipfel des Mt. Blanc	4807	560
Gipfel des Mt. Everest	8848	350
Space Shuttle	$250 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-4}$ *
geostationärer Satellit	$36.000 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-10}$ *

**Tabelle 4.2** Mittlere freie Weglänge von Molekülen bei verschiedenen Drücken.

Druck	Luft	Wasserstoff
1000 mbar ( $10^5$ Pa)	$6 \cdot 10^{-6}$ cm	$2 \cdot 10^{-5}$ cm
1 mbar ( $10^2$ Pa)	$6 \cdot 10^{-3}$ cm	$2 \cdot 10^{-2}$ cm
$10^{-3}$ mbar ( $10^{-1}$ Pa)	6 cm	20 cm
$10^{-6}$ mbar ( $10^{-4}$ Pa)	60 m	200 m
$10^{-9}$ mbar ( $10^{-7}$ Pa)	60 km	200 km

(Nenz, PST)

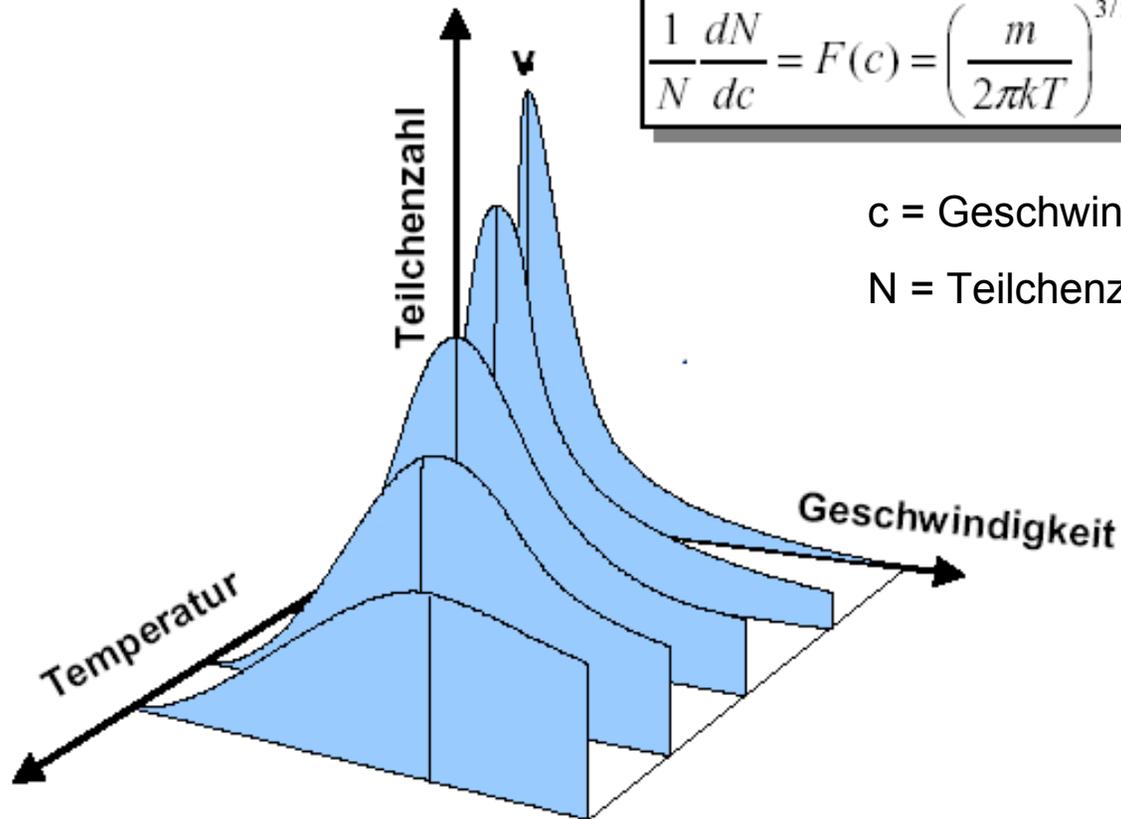
# Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

Modell von Maxwell und Boltzmann:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dc} = F(c) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} 4\pi c^2 e^{-mc^2 / (2kT)}$$

$c$  = Geschwindigkeit

$N$  = Teilchenzahl



# Freie Weglänge $\lambda$ als f(Behälterdurchmesser b)

**Mittlere freie Weglänge:** zurückgelegter Weg zwischen zwei Stößen

**Monozeit:** Zeit zur Bedeckung einer freien Oberfläche mit einer Monolage Atome

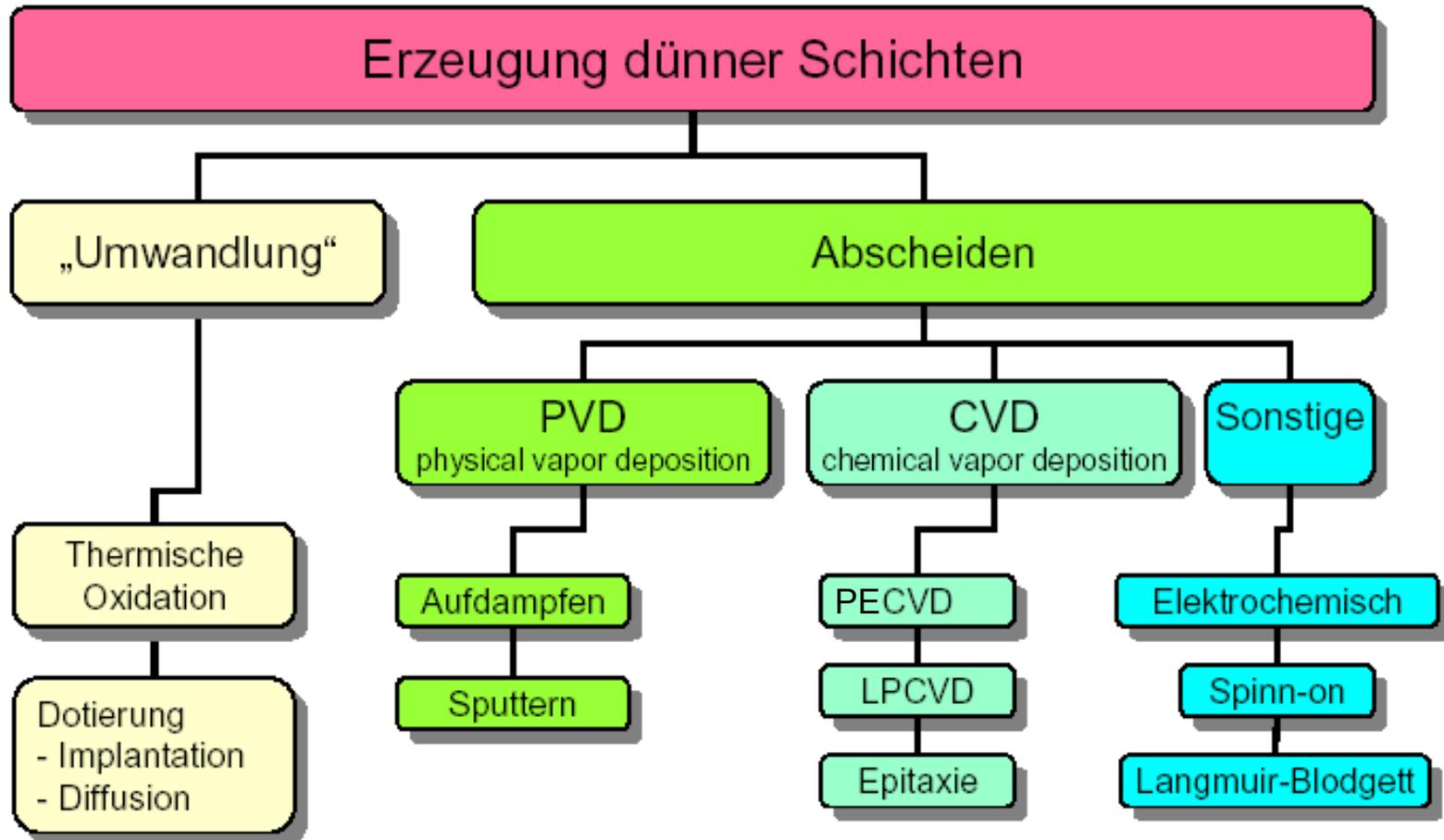
(Näherung für Luft:  $t_{\text{mono}} = 1/p * 3,6 * 10^{-6}$  (p in mbar)

**Tabelle 4.4** Die Unterteilung der technischen Vakuumbereiche (b = Behälterdurchmesser).

(Menz, MST)

Druckbereich	Druck		freie Weglänge	Monozeit
	[mbar]	[Pa]		
Großvakuum	10 <sup>13</sup> -1	10 <sup>5</sup> -10 <sup>2</sup>	$\lambda \ll b$	$\tau \ll 1$
Feinvakuum	1-10 <sup>-3</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>-1</sup>	$\lambda = b$	$\tau \ll 1$
Hochvakuum	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-5</sup>	$\lambda \gg b$	$\tau < 1$
Ultrahochvakuum	< 10 <sup>-7</sup>	< 10 <sup>-5</sup>	$\lambda \gg b$	$\tau > 1$

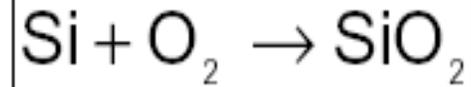
# Verfahren zum Erzeugen dünner Schichten



# Thermische Oxidation von Silizium

---

- Bei Raumluft wächst ein circa 2 nm dickes „natürliches“ Oxid auf
- Die Oxidation von Silizium läuft dabei nach:



## Prozessvarianten für die Herstellung von Siliziumoxid – Schichten :

- **Thermische Oxidation** bei hohen Temperaturen
    - thermische Zufuhr der Energie nicht immer möglich, z.B. Metallisierungen
  - Alternative 1: **LPCVD (Low Pressure CVD)**
  - Alternative 2: **PECVD (Plasma Enhanced CVDeposition)**
-

# Thermische Oxidation von Silizium

---

- Das Wachstum von  $\text{SiO}_2$  auf Si spielt wegen der hohen Güte der Grenzschicht eine große Rolle in der Halbleiterindustrie
- Das Siliziumoxid ist ein sehr wichtiger Werkstoff in der Mikrostrukturtechnik

Aus ihm werden hergestellt:

- Ätzstoppschichten
- Ätzmaskierschichten
- Isolierschichten
- Dielektrische Schichten
- Passivierungsschichten
- Haftsichten
- Stressausgleichsschichten
- Freitragende Membrane
- Opferschichten
- Diffusionsbarrieren

Die thermische Oxidation ist das wichtigste Verfahren zur Herstellung von  $\text{SiO}_2$

---

# Prozessvarianten der thermischen Oxidation

---

## (1) Trockene Oxidation mit Sauerstoff

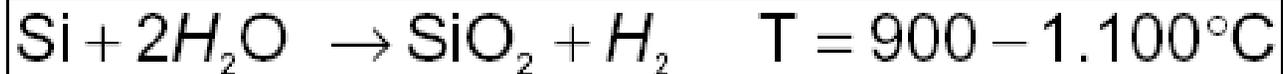


- Sehr gute Qualität des Oxides
- Leider geringe Aufwachsrate
- Eigenschaften von bei 800°C hergestelltem Oxid:
  - elektrisch stark belastbar (Durchbruchfeldstärke 550 V /  $\mu\text{m}$ )
  - starke inneren Druckspannungen

# Prozessvarianten der thermischen Oxidation

---

## (2) Nasse Oxidation mit angefeuchtetem Sauerstoff

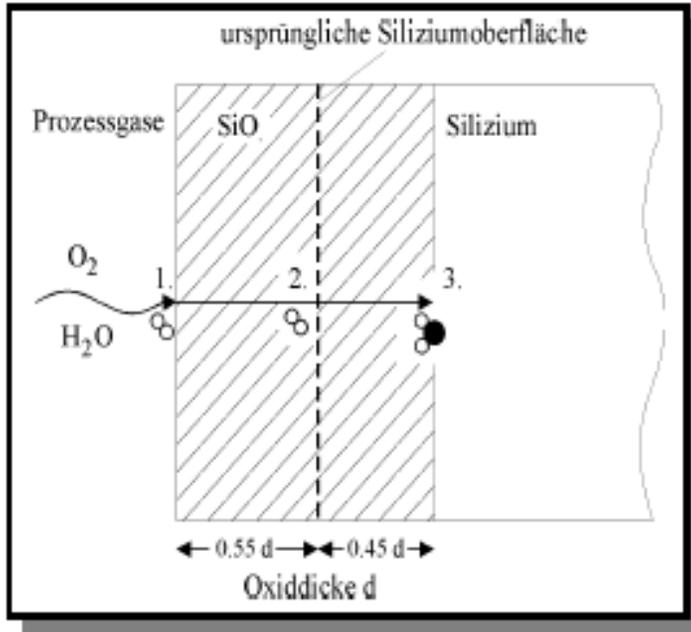


- $\text{H}_2\text{O}$  –Molekül ist kleiner als  $\text{O}_2$  Molekül und diffundiert leichter durch die Grenzschicht → höhere Reaktionsrate
- Verunreinigung des Oxides mit Wasser:  
→ Durchbruchfeldstärke ist geringer

Feuchtoxidation wird aufgrund des schnelleren Schichtwachstums zur Erzeugung dickerer Schichten eingesetzt

---

# Teilprozesse der thermischen Oxidation



Quelle: Zengerle, Mikrosystemtechnik 1

1. Diffusion des Sauerstoffes / Wassers bis zur Oxidoberfläche
2. Diffusion des Sauerstoffes / Wassers durch das bereits gebildete Oxid bis zur Grenzschicht
3. Chemische Reaktion an der Grenzschicht

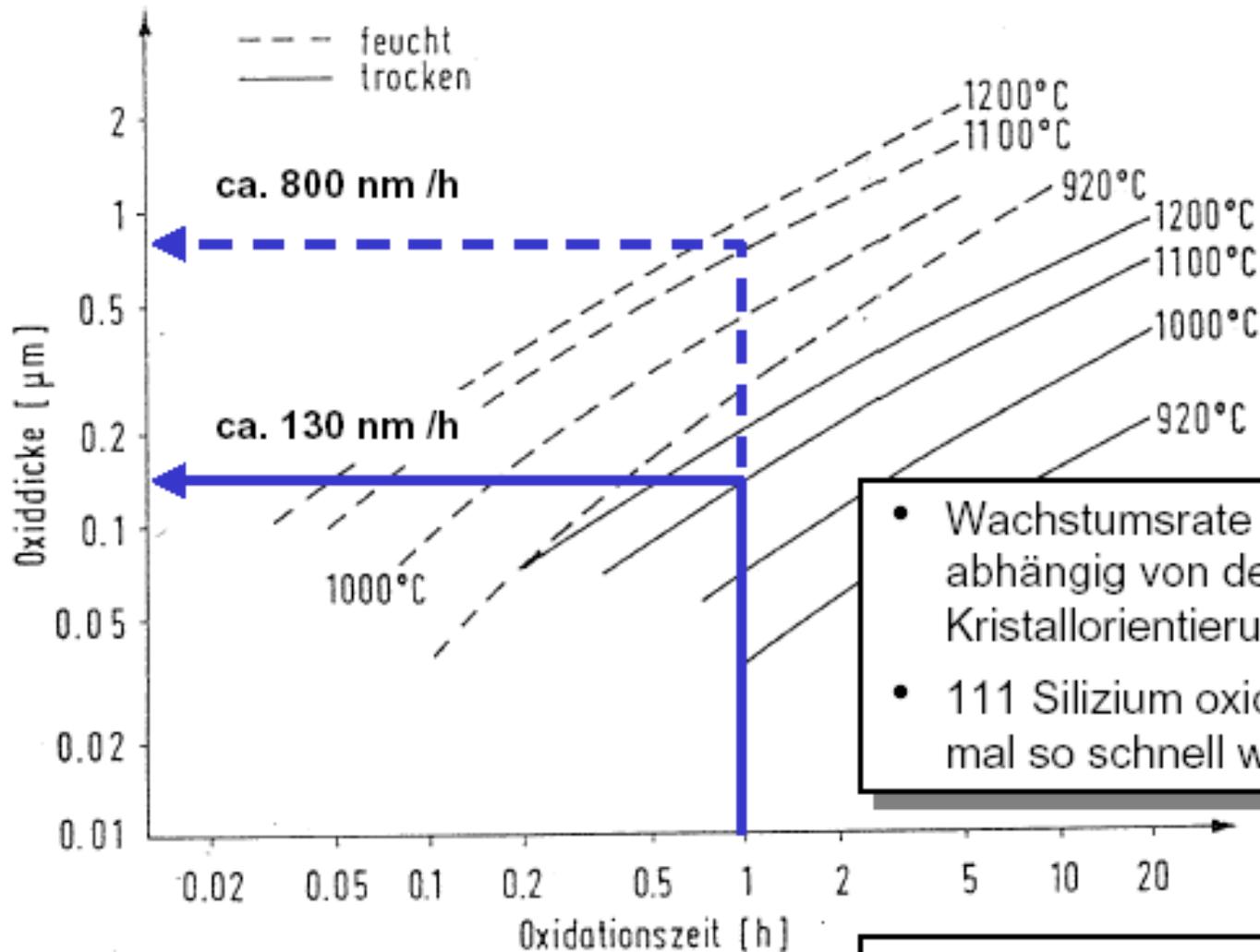
Zur Bildung von Oxid der Dicke  $d_{\text{ox}}$  wird Silizium der Dicke  $0,44 d_{\text{ox}}$  verbraucht

**Oxidationsrate bestimmt durch:**

**SiO<sub>2</sub> ist amorph !**

- Oberflächenreaktion (bei dünnen Schichten)
- Diffusion durch vorhandenes Oxid (bei dicken Schichten)

# Wachstumsrate des thermischen Oxids

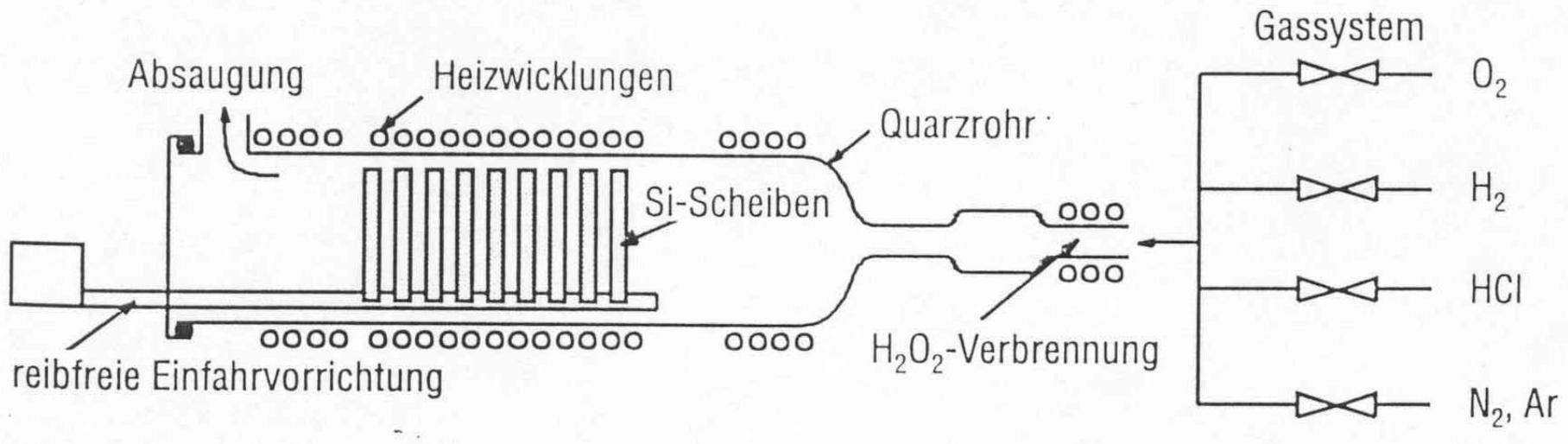


- Wachstumsrate ist auch abhängig von der Kristallorientierung
- 111 Silizium oxidiert 1,7 mal so schnell wie 100 Si

Quelle: Büttgenbach, Mikromechanik

# Thermische Oxidation

## Prinzip eines Oxidationsofens



# Thermische Oxidation

---

**Bilder: Oxidationsofen  
(3 Rohre)**



**Waferboot aus Quarzglas**



# PVD-Verfahren: Aufdampfen

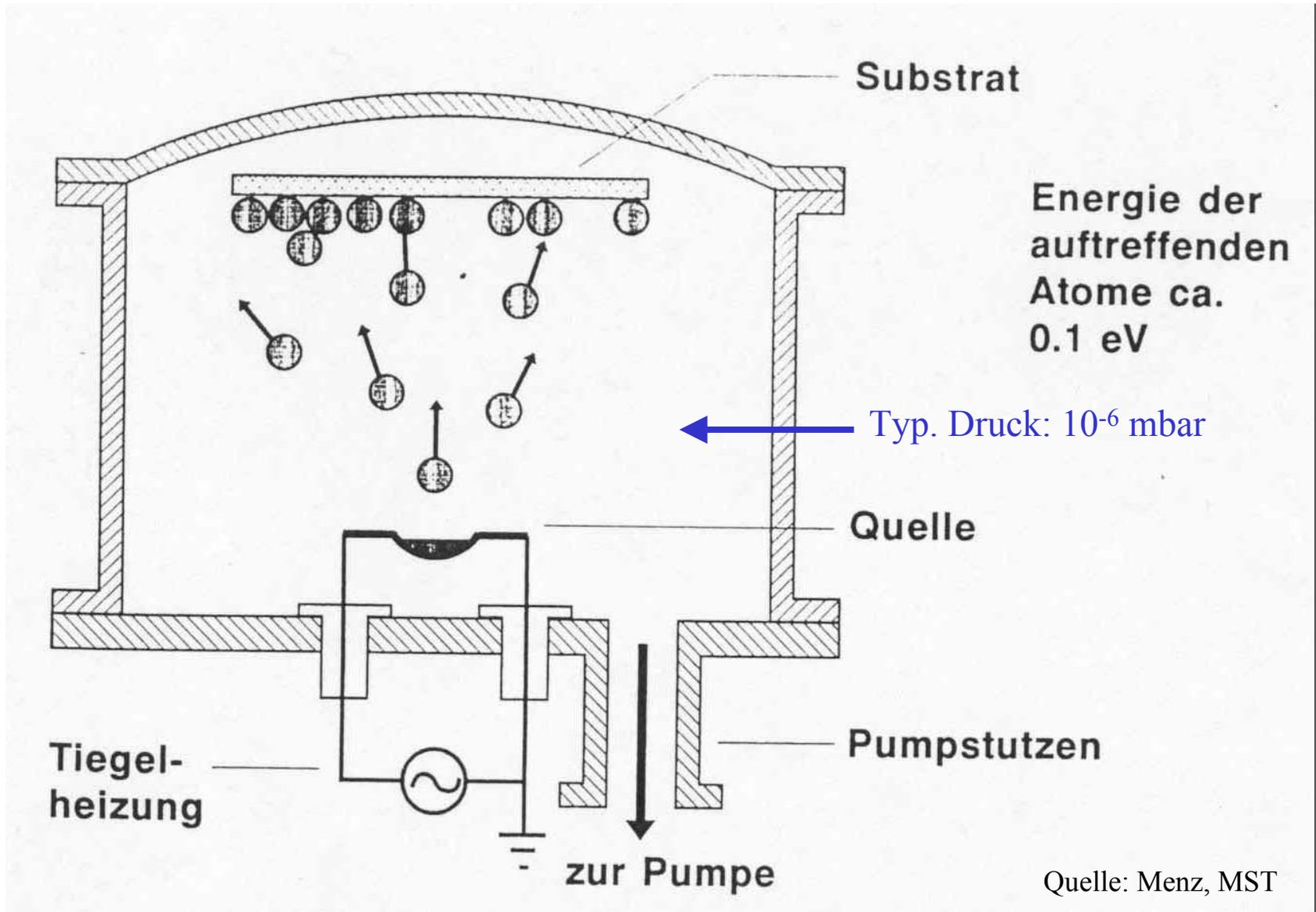
---

PVD = Physical Vapor Deposition

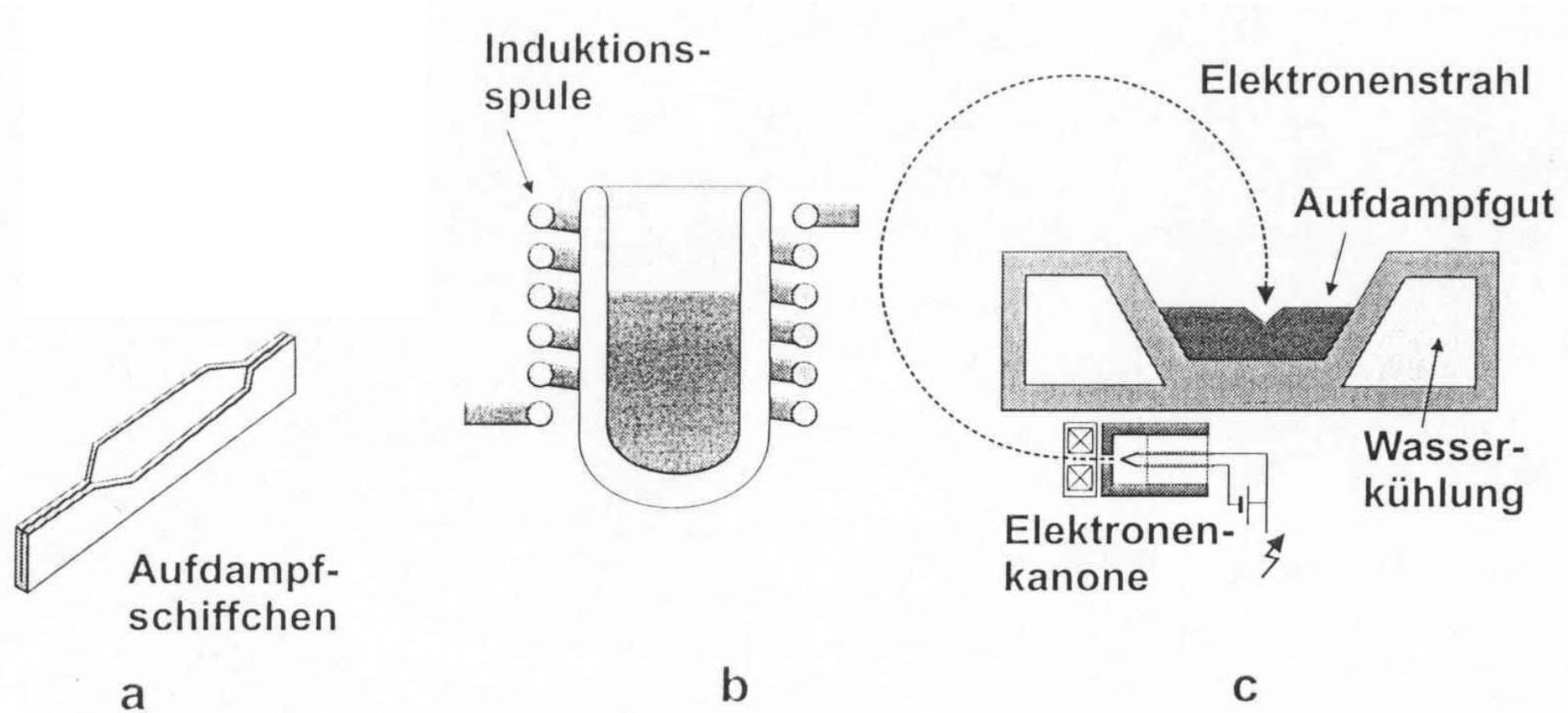
## Prinzip des Aufdampfens (Evaporation):

- Thermisches Verdampfen von Material (1000 – 3500°C)
  - Transfer der Dampfteilchen zum Substrat (im Vakuum)
  - Niederschlag (Kondensation) auf kühlem Substrat (100 – 400°C)
-

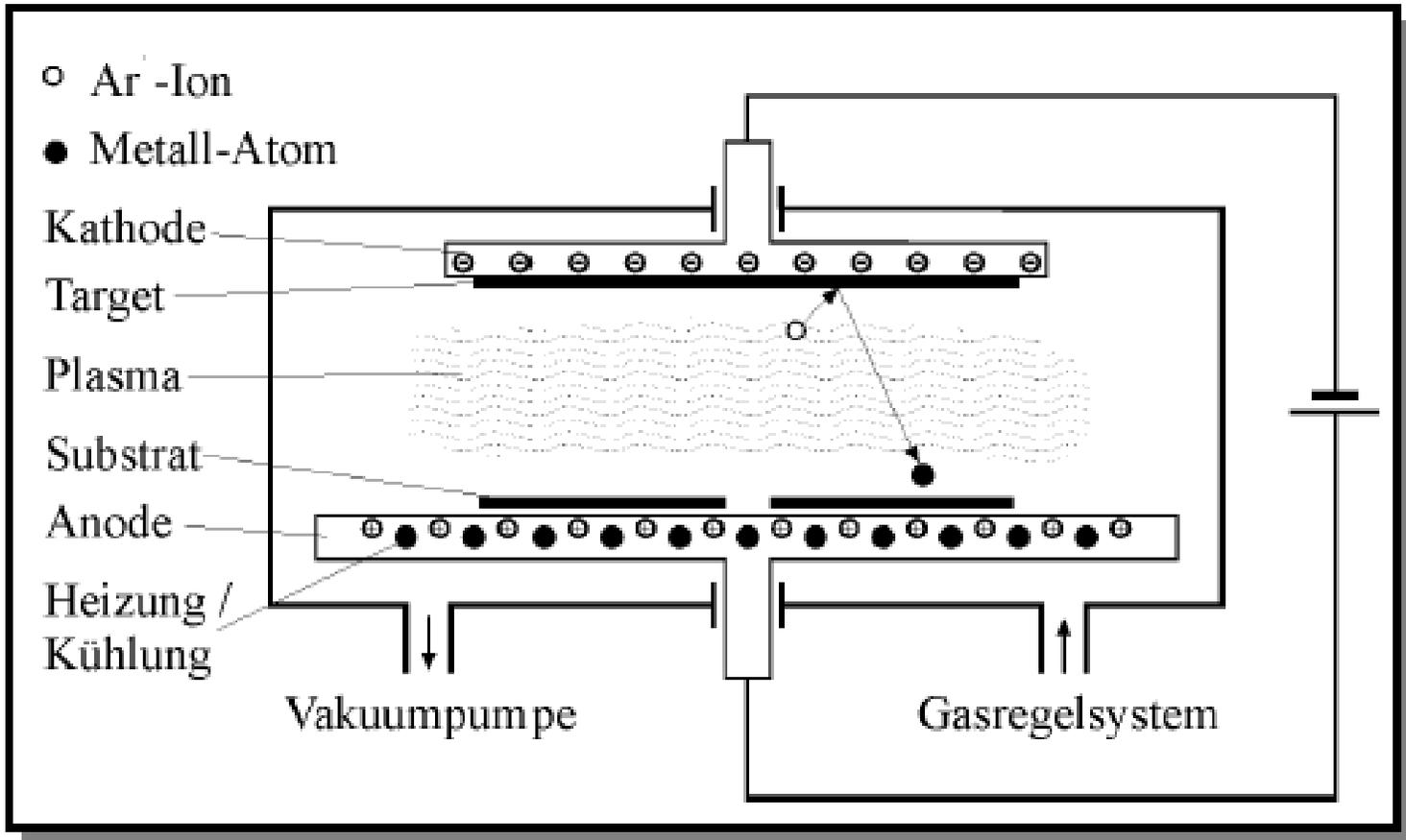
# Aufdampfanlage



# Verdampfungsquellen



# Kathodenzerstäuben (Sputtern)



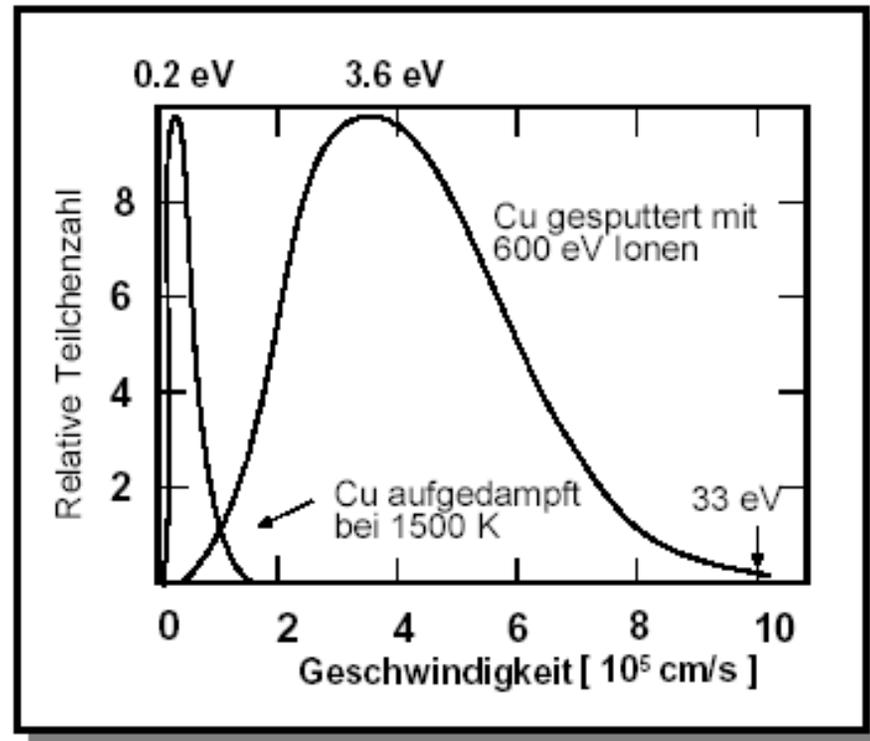
# Prinzip der Kathodenzerstäubung (Sputtern)

---

- Ionen werden in einem Plasma erzeugt
    - *Ionen eines Inertgases (z.B. Argon)*
    - *Partialdruck des Inertgases liegt bei typisch einige  $10^{-2}$  mbar*
  - Beschleunigung der Ionen im elektr. Feld in Richtung Target
  - Aufprall der Ionen auf Target (abzuscheidendes Schichtmaterial)
    - *Ionenbombardement ( $Ar^+$  Ionen) des Targets*
    - *Atomares Herausschlagen von Targetatomen*
    - *Targetatome schlagen sich als feine **Stäube** auf Substrat nieder (Kathodenzerstäuben)*
      - **Ungerichtetes Abscheiden**
      - (im Gegensatz zu Aufdampfen) !!!**
-

# Kathodenzerstäuben (Sputtern)

- Herausgeschlagene Teilchen fliegen vom Target zum Substrat
  - Stöße der Targetatome mit Prozessgas ...
  - ... führen zu Energieverlust (Energie max. :  $\sim 40$  eV; mittel:  $\sim 4$  eV)
  - ... führen zu Streuung der Einfallswinkel auf das Substrat
- Teilchen treffen aus allen Raumrichtungen auf das Substrat auf



Quelle: Zengerle, Mikrosystemtechnik 1

# Anlagen- und Prozessvarianten beim Sputtern

---

- **Sputtern mit Gleichspannung (DC-Sputtern)**
    - Target muss elektrisch leitfähig sein, sonst Aufladung
    - Nur für Metalle oder Halbleiter geeignet
  - **Sputtern mit Wechselspannung (AC-Sputtern)**
    - für alle (auch elektrisch isolierende) Materialien geeignet
    - Wo kommt die beschleunigende Spannung her? → siehe nächste Folien
  - **Reaktives Sputtern**
    - Abscheidung von chemischen Verbindungen möglich
    - eine Komponente stammt vom Target, die andere vom Prozessgas:
    - Beispiel 1:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Target = Al; Im Prozessgas ist  $\text{O}_2$ .
    - Beispiel 2: TiN (sehr hart): Target = Ti; im Prozessgas ist  $\text{N}_2$ .
-

# Anlagen- und Prozessvarianten beim Sputtern

---

- Sputterätzen

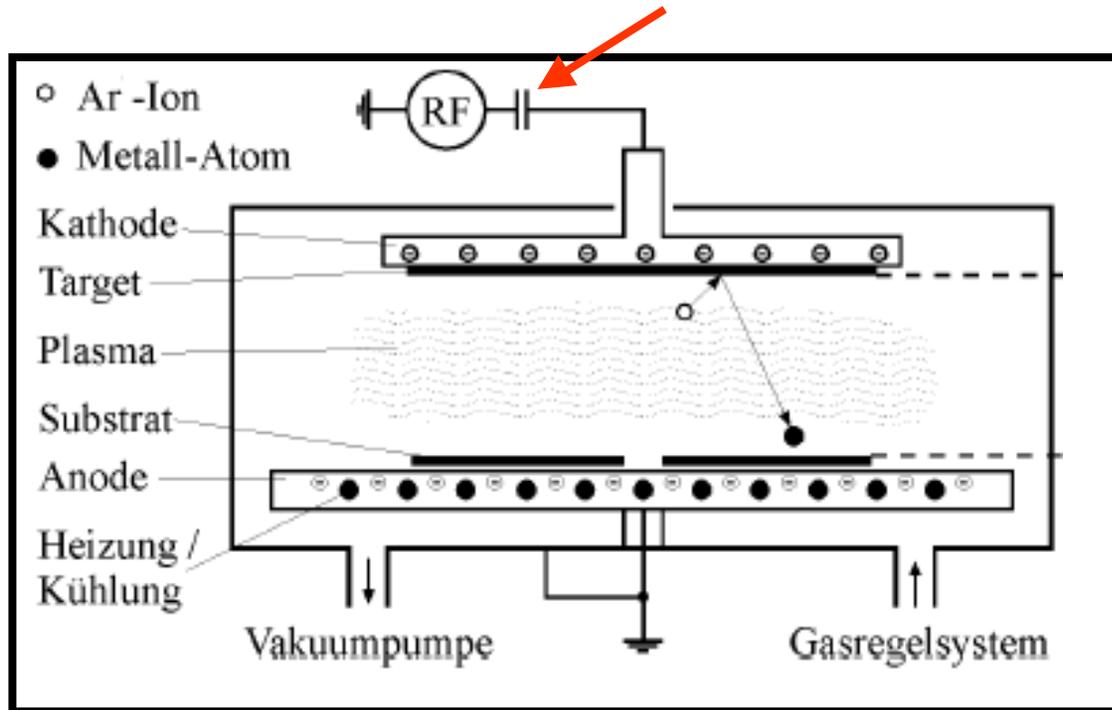
- Vor dem Start des Beschichtungsprozess wird die Polarität der Spannung umgedreht und das Substrat abgesputtert
  - entfernt mehrere Atomlagen der Oberfläche
  - Kontamination wird reduziert, extrem gute Reinigung
  - erzeugt zusätzliche Kondensationskeime

- Magnetron-Sputtern:

- magnetisches Feld erhöht Verweildauer der Elektronen im Plasma
- größere Anzahl der Stöße zwischen Elektronen und Prozessgas
- höherer Ionisierungsgrad
- Abscheiderate steigt um bis zu einer Größenordnung
  - Sputtern ohne Magnetron: ~ 1 Atomlage / Sekunde
  - Sputtern mit Magnetron: ~ 10 Atomlagen / Sekunde
  - Vergleich Aufdampfen: ~ 1.000 Atomlagen / Sekunde

# Sputtern mit Wechselspannung

- Frequenzbereich:
  - 0,1 ... 13,56 ... 30 MHz
  - 13,56 MHz ist von der Telekom freigegeben
- Alternative Bezeichnungen:
  - AC-Sputtern
  - RF-Sputtern



Quelle: Zengerle, Mikrosystemtechnik 1

# Sputtern mit Wechselspannung

---

## Was beschleunigt die Ionen zum Target ?

- Elektronenmasse  $\ll$  Masse der positiven Ionen
    - *Elektronen erreichen Elektroden (Target, Substrat)*
    - *positive Ionen pendeln im Wechselfeld*
  - Positive Halbwelle der HF an Target
    - *Elektronen erreichen Target und werden gesammelt (wegen Kondensator)*
      - *Abschwächung der positiven Halbwelle; positive Ionen werden kaum vom Target abgestoßen*
  - Negative Halbwelle der HF an Target
    - *Elektronen erreichen Substrat und fließen über Masse ab (kein Kondensator)*
      - *keine Abschwächung der negativen Halbwelle*
-

# Sputtern mit Wechselspannung

---

Was beschleunigt die Ionen zum Target ?

**Resultat:**

Nettofluss der positiven Ionen zum Target  
(Elektrode mit Kondensator)

---

# Aufdampf- und Sputteranlage IBMT



Aufdampfanlage



Sputter-Anlage

# Vorteile des Sputterns gegenüber Aufdampfen

---

- „Sputtern“
    - ist besser kontrollierbar als Aufdampfen
    - ermöglicht integrierte Reinigung des Substrats (Sputterätzen)
  - Alle Materialien können gesputtert werden
    - Metalle (DC-Sputtern), Dielektrika (AC-Sputtern), ...
  - Keine Fraktionierung bei Legierungen aufgrund geringer Selektivität der hochenergetischen Ionen
    - Abgeschiedene Schicht hat immer dieselbe Zusammensetzung wie das Target
  - Bessere Kantenbedeckung und höhere Dichte aufgrund
    - höherer Energie einfallender Teilchen
    - homogenere Winkelverteilung auftreffender Teilchen (Stöße mit Restgas)
-

# Nachteile des Sputterns gegenüber Aufdampfen

---

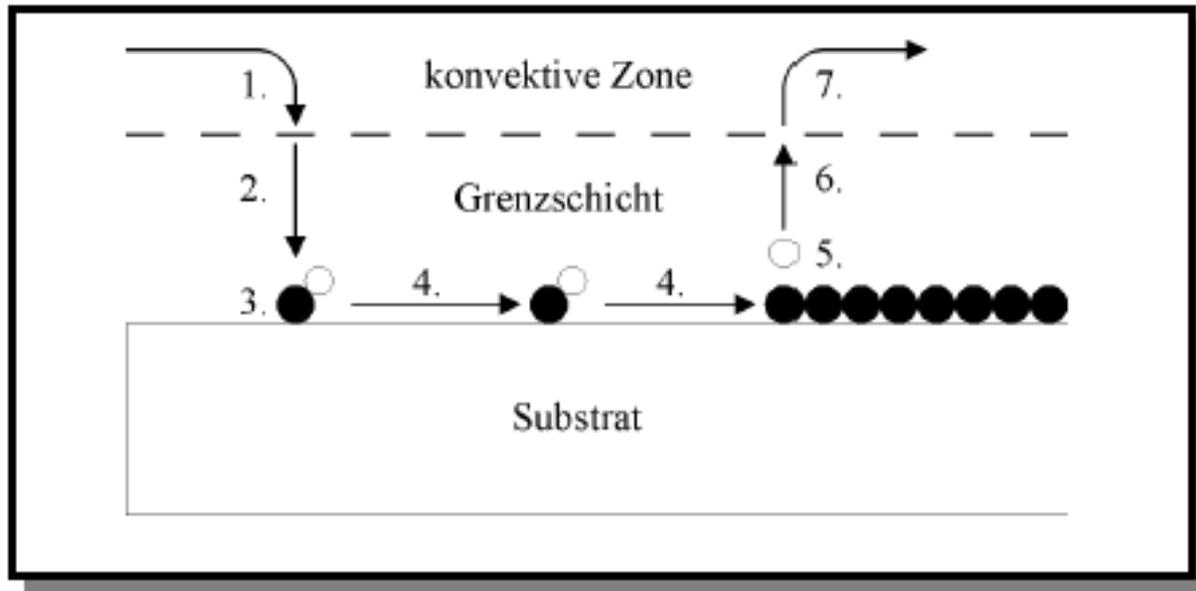
- Höhere Prozessdrücke (5 Pa) als beim Aufdampfen ( $10^{-4}$  Pa) führen zu stärkeren Gaseinschlüssen
    - Höhere Prozessdrücke sind aufgrund der notwendigen Gasentladung zwingend
  - Aufwendigere Anlagentechnik
  - Targets sehr teuer
    - Targetgröße > Substratgröße, daher ...
    - ... größere Mengen als bei Aufdampfen notwendig
    - ... führt zu großen Investitionskosten bei exotischen Materialien
    - ... Batchgröße ist deutlich geringer als beim Aufdampfen
-

# Übersicht CVD Prozesse

---

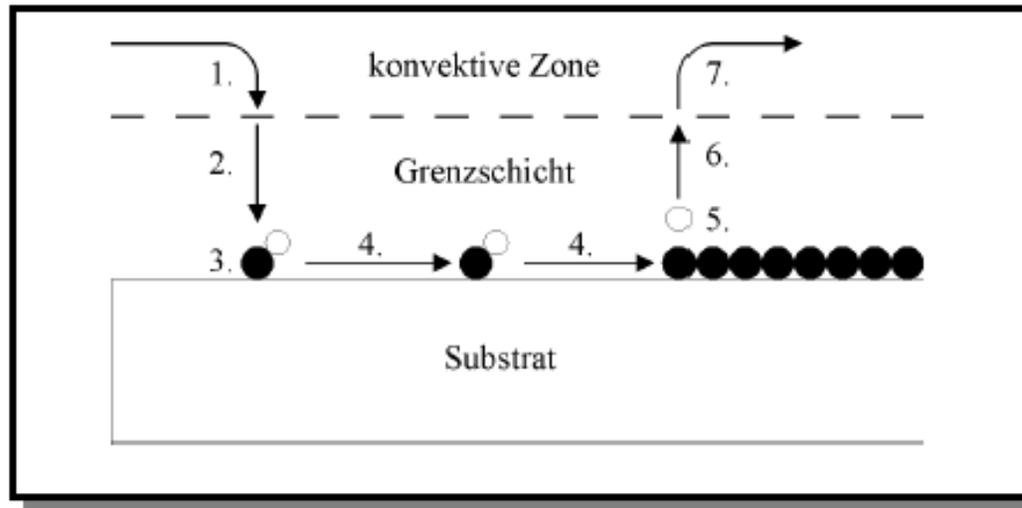
- Reaktionsgase werden **gasförmig (vapor)** zugeführt
  - Abgeschiedene Schicht ist Ergebnis einer **chemischen Reaktion** dieser Gase
  - Weitere Rahmenbedingungen
    - Reaktion wird durch **Energiezufuhr** angeregt
    - Prozesschemie muss so gestaltet werden, dass die Reaktionsnebenprodukte gasförmig sind, und somit durch das Gasregelsystem oder das Vakuumsystem abtransportiert werden können
-

# CVD - Teilprozesse



1. Transport der Reaktanten (ggf. im Inertgas) durch **erzwungene Konvektion** in die Abscheide-Region
2. Transport der Reaktanten durch **Diffusion** durch die Grenzschicht hindurch zur Substratoberfläche
3. **Adsorption** der Reaktanten an der Substratoberfläche

# CVD - Teilprozesse

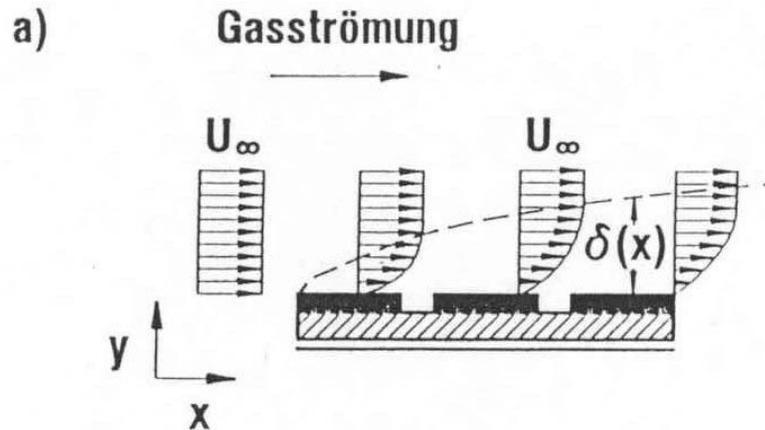


4. **Oberflächenreaktion**: Dissoziation der Moleküle, Oberflächen-diffusion der Radikale, Einbau der Radikale in den Festkörperverband (bevorzugt an Stufen), Bildung der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
5. **Desorption** der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
6. Transport der Reaktionsnebenprodukte mittels **Diffusion durch Grenzschicht**
7. Abtransport der Reaktionsnebenprodukte (ggf. mit Inertgas) durch erzwungene **Konvektion**

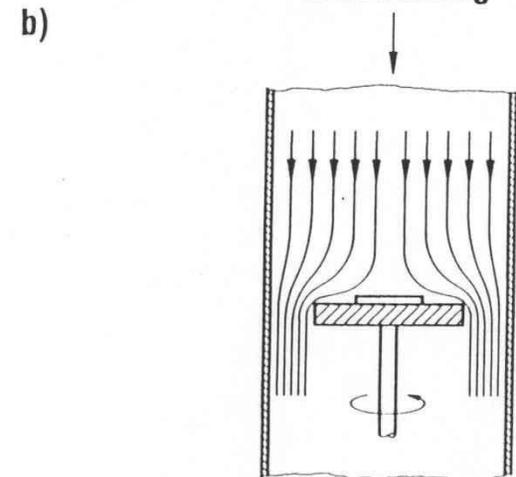
# CVD - Prozesse

## Woher kommt die Grenzschicht ?

- Geschwindigkeit einer (konvektiven) Strömung fällt an der Oberfläche zu einem Festkörper grundsätzlich auf Null ab (übliche Randbedingung)
- Reaktionspartner können daher durch konvektive Strömung nur in die Nähe der Grenzschicht transportiert werden und müssen den Rest des Weges durch Diffusion zurücklegen



parallel angeströmte Substrate



senkrecht angeströmte Substrate

# CVD - Verfahren

---

- **Unterteilung nach Art der Energiezufuhr:**

Thermische CVD (APCVD, LPCVD)

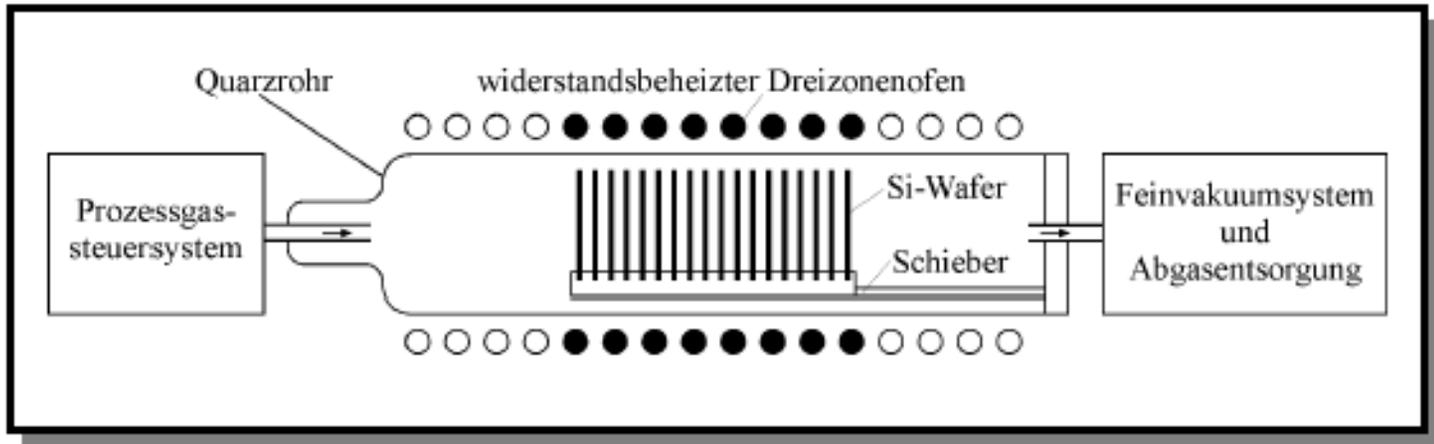
Plasmainduzierte CVD

Laserinduzierte CVD

---

# Beispiel LPCVD

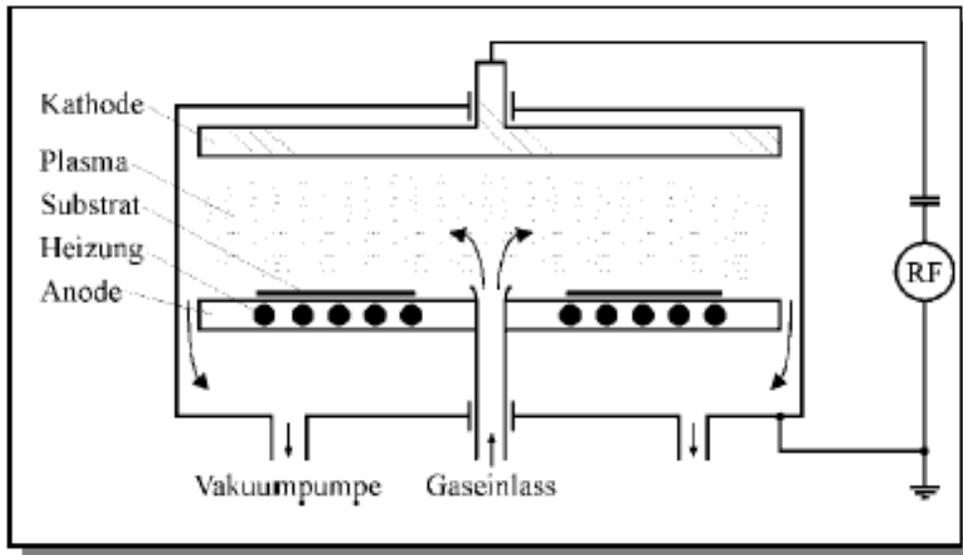
- Prozessdruck 10 – 100 Pa
  - Diffusionskoeffizient groß, daher **reaktionslimitierte Prozessführung**
  - Dichte Waferpackung ohne Qualitätseinbuße möglich



- Reaktionslimitierung führt zu starker Temperaturabhängigkeit

# Beispiel PECVD

- Einkopplung der Reaktionsenergie über Plasma ...
  - Erlaubt Reduktion der Prozesstemperaturen:  $T = 250 - 400^{\circ}\text{C}$
  - Passivierungen, Ätzstoppschichten und Isolationsschichten können nach oder zwischen Metallisierungen abgeschieden werden



- Prozessdruck: 10 - 500 Pa
- Rate: 20 - 70 nm/min
- Substrathalter geerdet
  - reduziert Ionen-Bombardement

# Zusammenfassung der CVD - Prozesse

Prozess	Vorteile	Nachteile	Anwendung	Anmerkung	Druck/ Temp.
APCVD	Einfach; <b>Hohe Rate</b> ; geringe Temperatur	<b>Schlechte Kantenbedeckung</b> ; Partikelkontamination	Dotierte & undotierte Oxide; Epitaxie	Diffusionslimitierte Prozessführung	100 kPa – 10 kPa 350 °C – 400 °C
LPCVD	<b>Exzellente Homogenität</b> und Reinheit; <b>konforme Kantenbedeckung</b> ; hoher Wafer-Durchsatz	<b>Hohe Temperatur</b> ; Geringe Abscheiderate	Dotierte & undotierte Oxide; Siliziumnitride Polysilizium	Reaktionslimitierte Prozessführung	100 Pa – 10 Pa 550 °C – 600 °C
PECVD	<b>Geringe Temperaturen</b> ; Hohe Raten; gute Adhäsion; <b>gute Kantenbedeckung</b> ; geringe pin-hole Dichte	<b>Chemische Verunreinigung</b> (Wasserstoff); Verunreinigung durch Partikel	Niedrigtemperatur Isolatoren über Metalle; Passivierung (Nitride)		200 Pa – 600 Pa; 300 °C – 400 °C

# Wichtige CVD - Prozesse

---

Verfahren	Abgeschiedene Schicht	Reaktionsschema	Temp. (°C)	Druck (Pa)	Rate (nm/min)
PECVD	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	$3 \text{ SiH}_4 + 4 \text{ NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12 \text{ H}_2$	280	29	30
LPCVD	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	$3 \text{ SiH}_2\text{Cl}_2 + 4 \text{ NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6 \text{ HCl} + 6 \text{ H}_2$	730	85	2,5
PECVD	SiO <sub>2</sub>	$\text{SiH}_4 + 4 \text{ N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Gase}$	280	40	55
LPCVD	SiO <sub>2</sub>	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{ H}_2$	430	20	8

NH<sub>3</sub> = Ammoniak  
 N<sub>2</sub>O = Distickstoffoxid = Lachgas  
 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> = Dichlorsilan  
 SiH<sub>4</sub> = Silan

---

# PECVD und RIE Anlage am IBMT



# Anwendung von CVD Verfahren

**Tafel 3.3** Anwendung von CVD-Verfahren (Auswahl)

(Gerlach, Grundlagen der NST)

Schicht	Verfahren	Anwendungsbeispiel	Temperatur in °C	Prozeßgase
Si-Epitaxie	APCVD	aktives Gebiet	1150	SiCl <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>
Poly-Si	APCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	910	SiH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> , (PH <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
	LPCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	625	SiH <sub>4</sub>
a-Si	LPCVD	Anti-Reflexionsschicht	560	SiH <sub>4</sub>
	PECVD	Anti-Reflexionsschicht	250...400	SiH <sub>4</sub>
SiO <sub>2</sub>	APCVD	Dielektrikum	910	SiH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>
	PECVD	Dielektrikum	250...400	SiH <sub>4</sub> + N <sub>2</sub> O
LTO SiO <sub>2</sub>	LPCVD	Dielektrikum	410	SiH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>
TEOS SiO <sub>2</sub>	LPCVD	Abstandshalter, Dielektrikum	650...750	Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>
PSG	APCVD	Dielektrikum, Passivierung	450	SiH <sub>4</sub> + PH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>
	LPCVD	Dielektrikum, Passivierung	410	SiH <sub>4</sub> + PH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>
BSG	APCVD	Dielektrikum	420	SiH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub> + B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
BPSG	LPCVD	Dielektrikum	650...750	TEOS + TMB + TMPI + O <sub>2</sub>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	APCVD	LOCOS	910	SiH <sub>4</sub> + NH <sub>3</sub> + H <sub>2</sub>
	LPCVD	LOCOS	830	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> + NH <sub>3</sub>
	PECVD	Dielektrikum, Passivierung	250...400	SiH <sub>4</sub> + NH <sub>3</sub>
SiO <sub>x</sub> N <sub>y</sub>	PECVD	Dielektrikum	250...400	SiH <sub>4</sub> + NH <sub>3</sub> + N <sub>2</sub> O
W / Mo	LPCVD	Leitbahn	450...500	WF <sub>6</sub> / MoF <sub>6</sub> + H <sub>2</sub> + (Ar)
W (selektiv)	LPCVD	Kontaktlochfüllung	250...300	WF <sub>6</sub> + SiH <sub>4</sub>
WSi <sub>2</sub> / MoSi <sub>2</sub> / TaSi <sub>2</sub> / TiSi <sub>2</sub>	LPCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	330...750	WF <sub>6</sub> / MoCl <sub>5</sub> / TaCl <sub>5</sub> / TiCl <sub>4</sub> + SiH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>
Al	LPCVD	Leitbahn	220...300	Al(C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>3</sub>
Cu	LPCVD	Leitbahn, Kontaktlochfüllung	160...200	CupraSelect

BPSG Borphosphorsilikatglas; BSG - Borsilikatglas; CupraSelect Trimethylvinylsilyl-Kupfer(I)-hexafluoroacetylacetonat; LOCOS Local Oxidation of Silicon; LTO Low Temperature Oxide; PSG Phosphorsilikatglas; TEOS Tetraethylorthosilikat; TMB Trimethylborat B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>; TMPI Trimethylphosphit P(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

**Ende**

---

---