

Abscheide (Additive) (Schicht) Verfahren

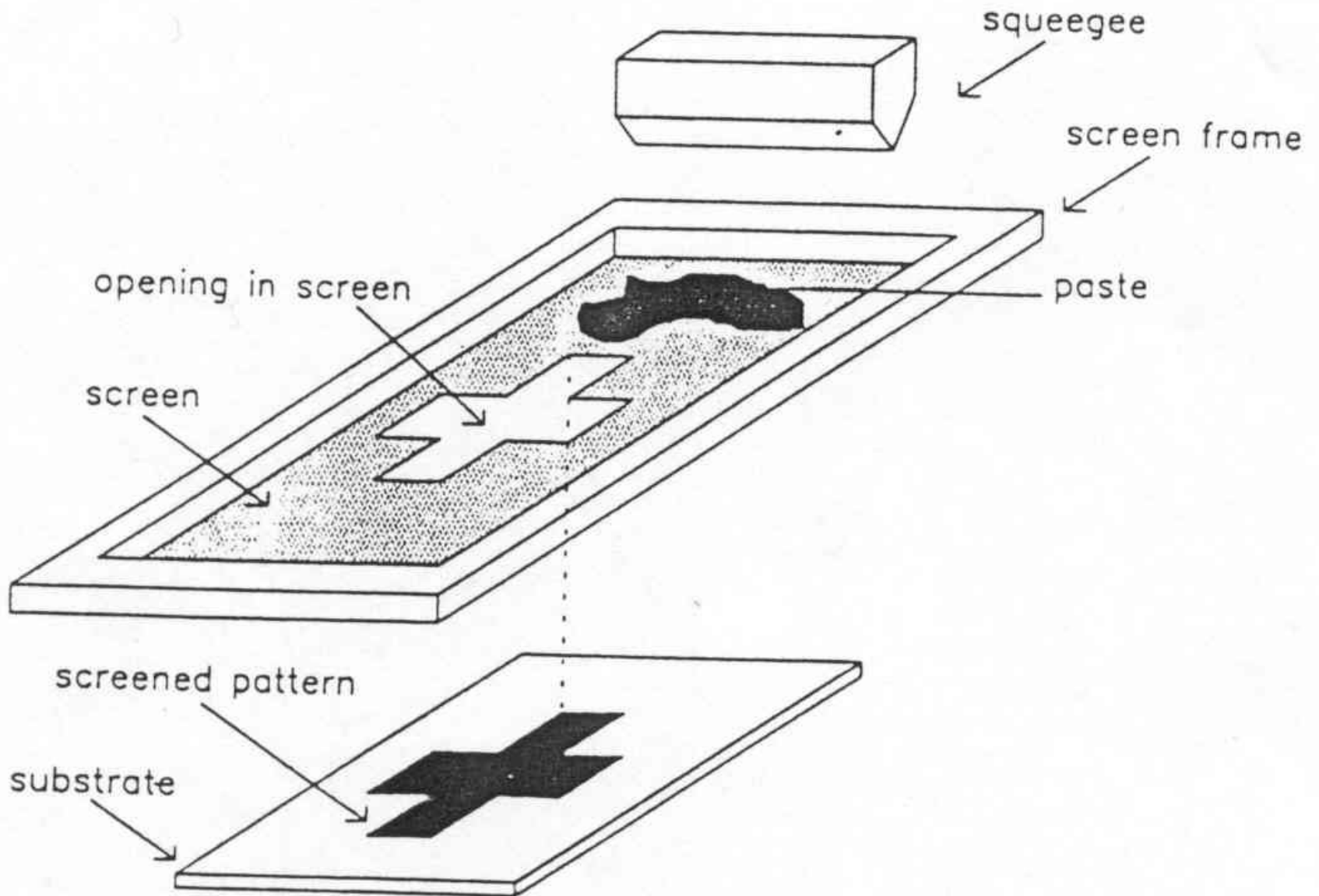
- **Dickfilmtechnik**

- **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
-

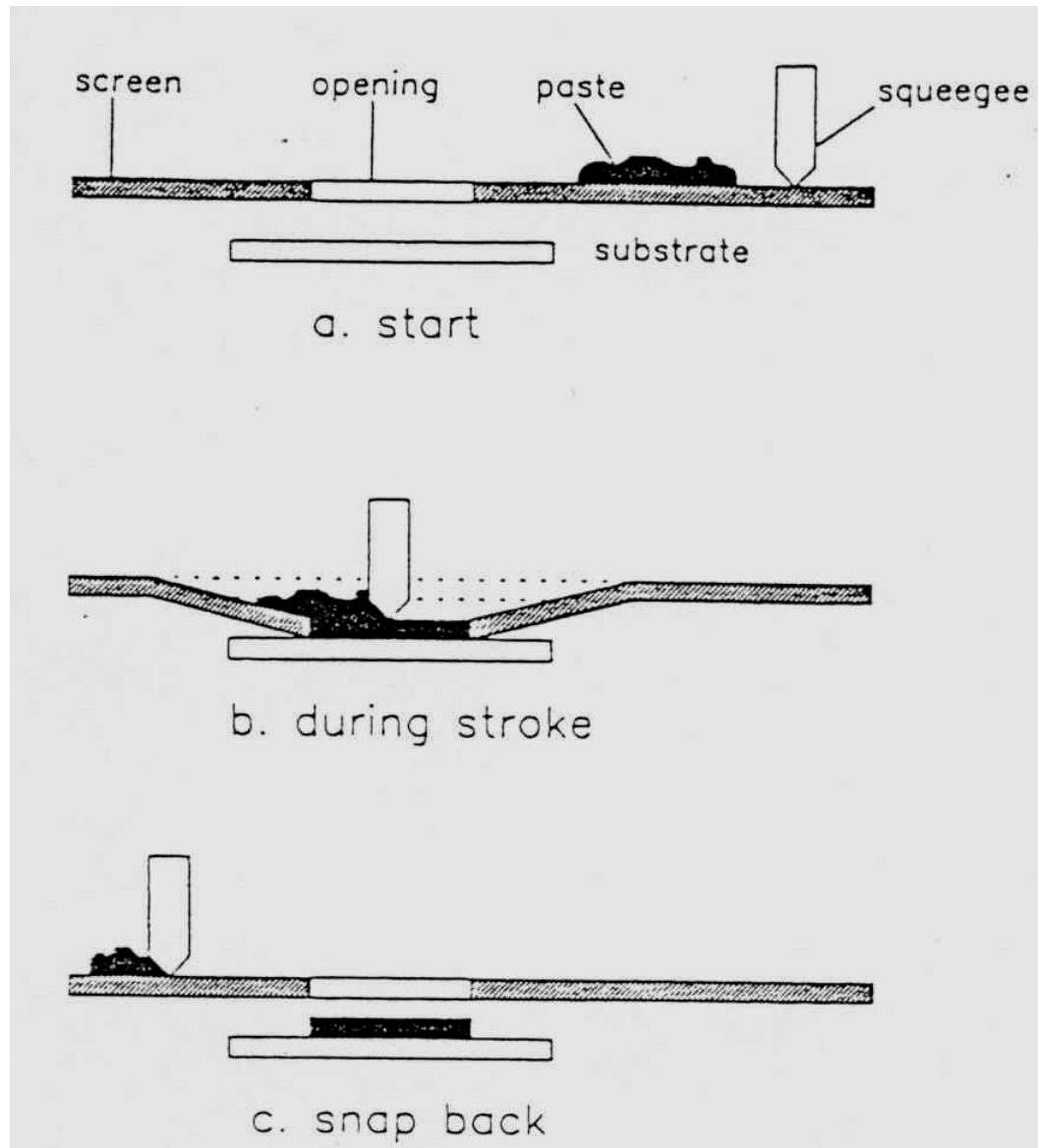
Dickfilmtechnik



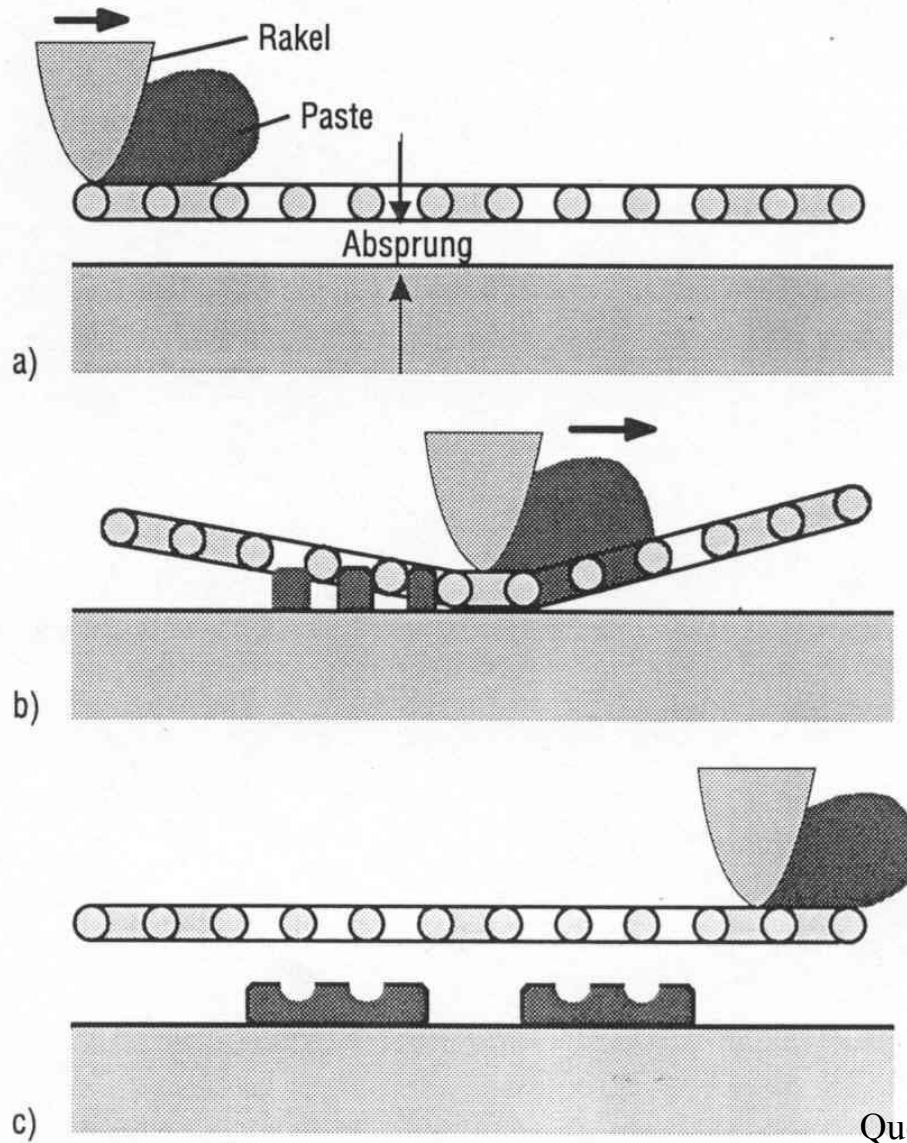
Prozessablauf beim Siebdruck

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

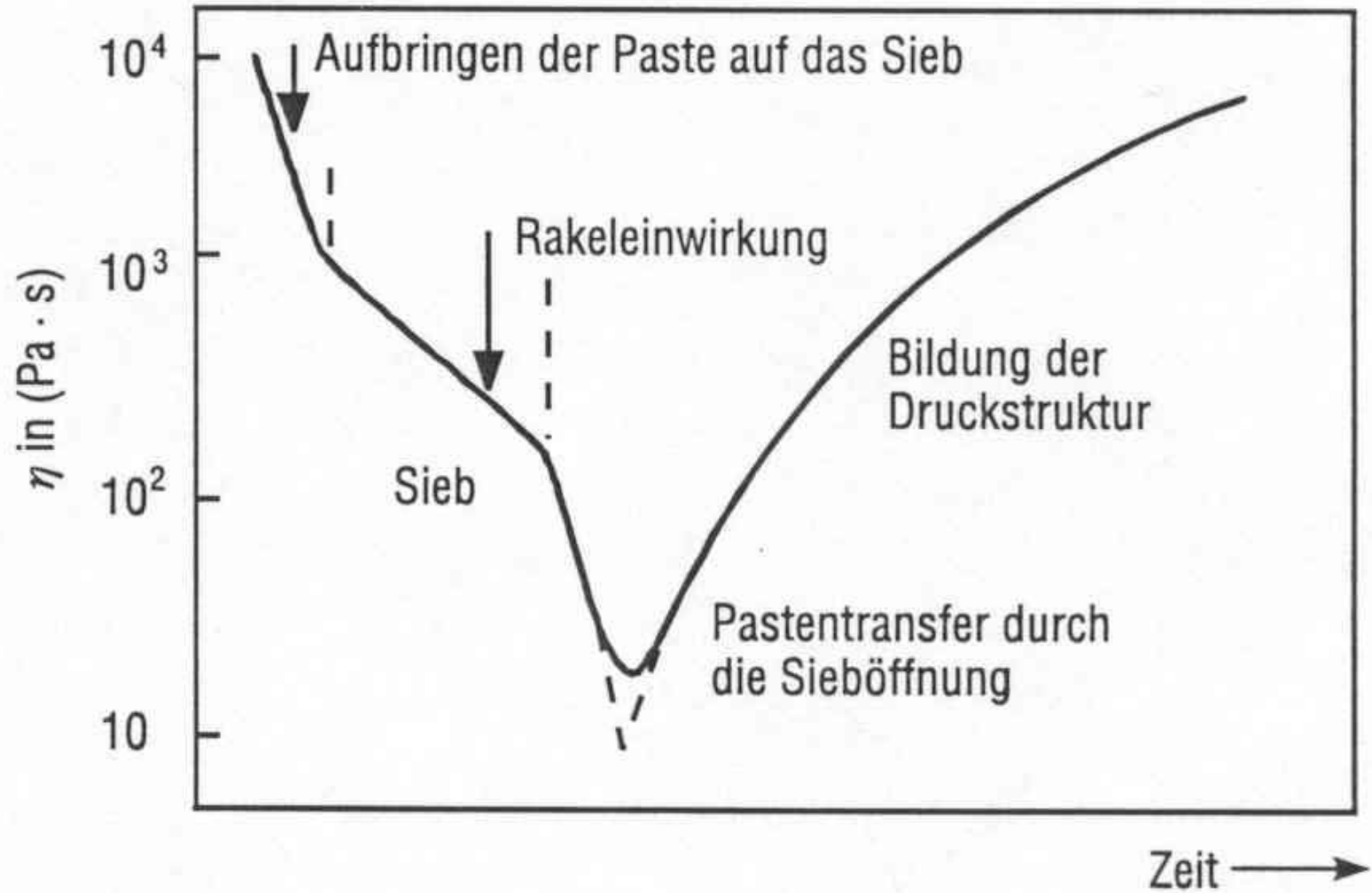
Dickfilmprozessablauf grafisch



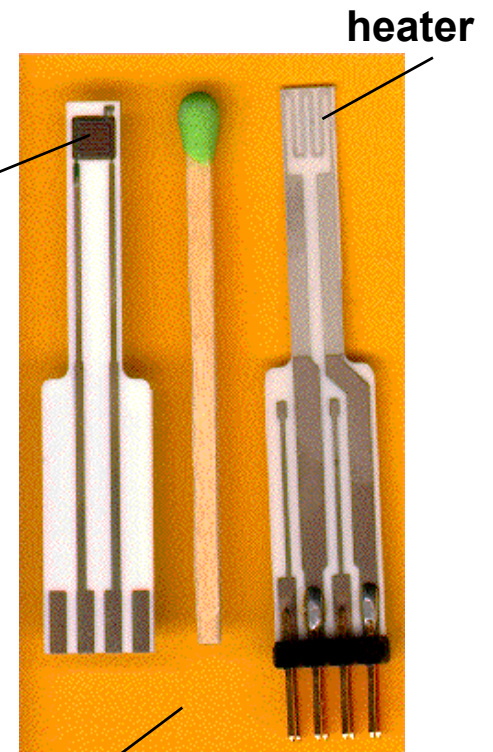
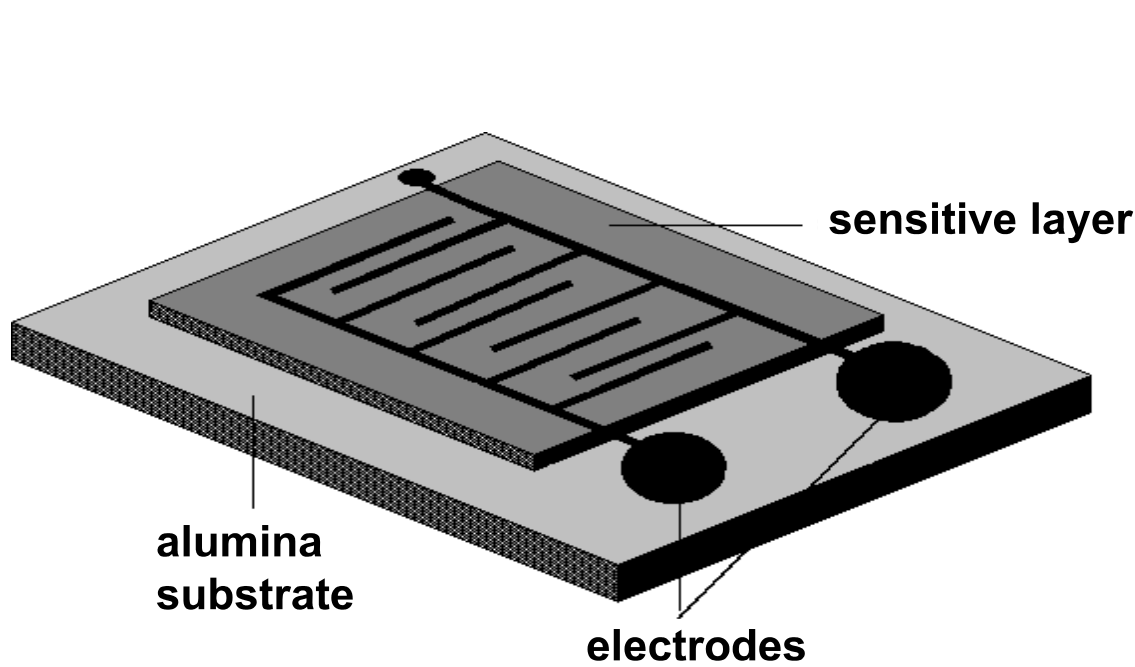
Dickschicht Rakelprozeß



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)

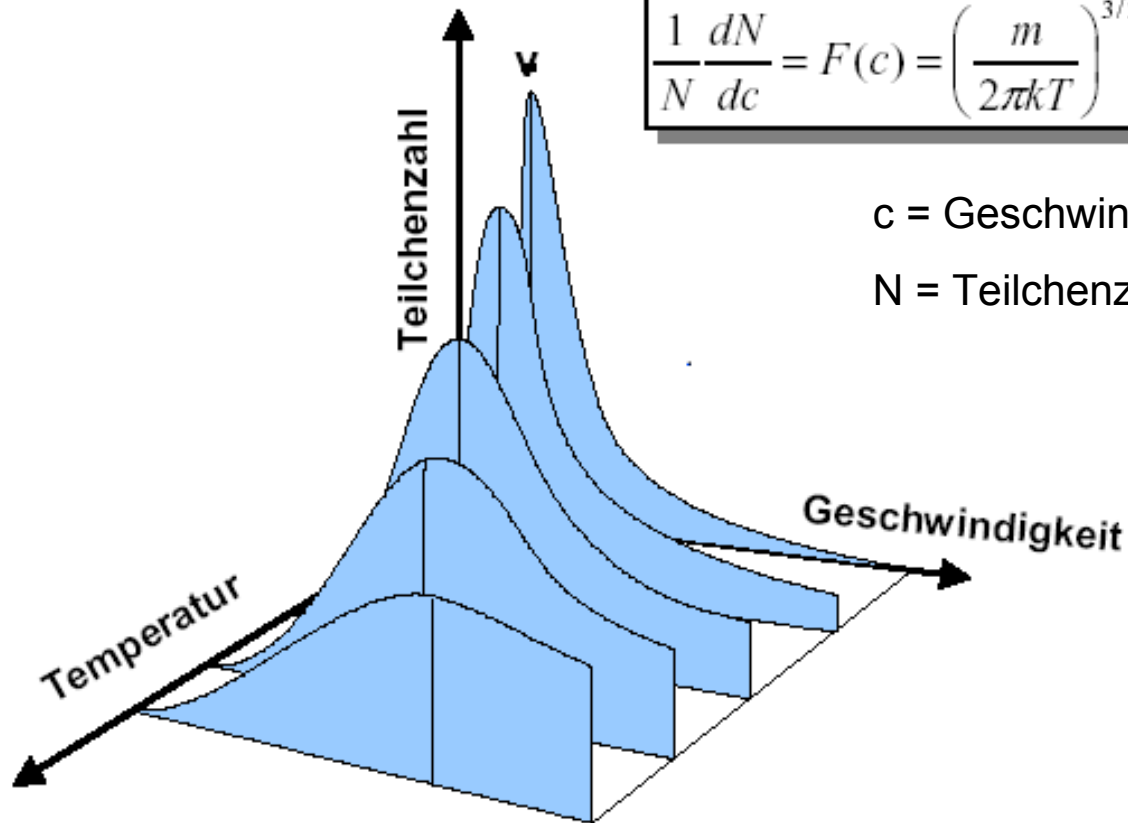
Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

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 λ als f(Behälterdurchmesser b)

Mittlere freie Weglänge: zurückgelegter Weg zwischen zwei Stößen

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

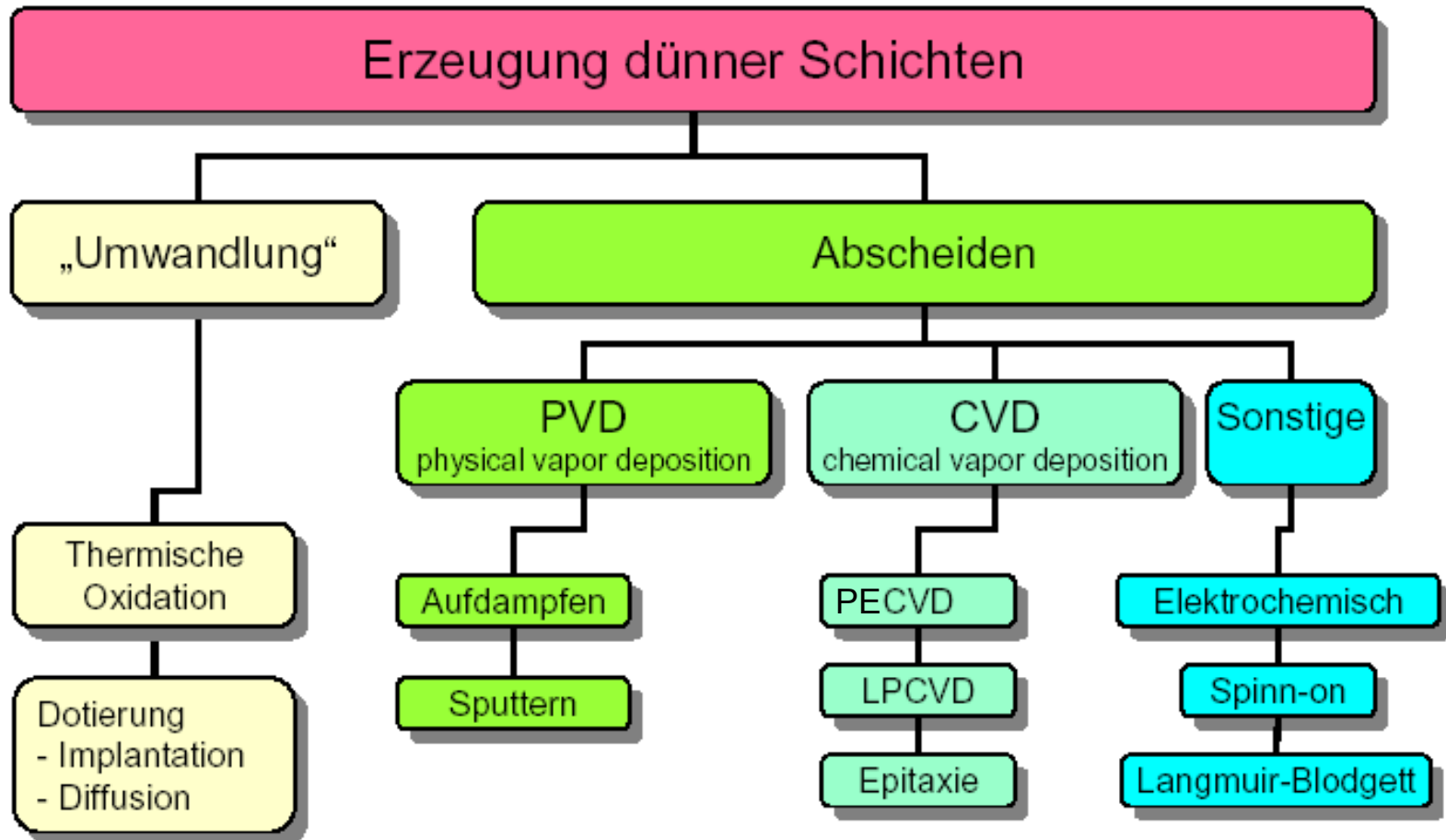
(Näherung für Luft: $t_{\text{mono}} = 1/p * 3,6 * 10^{-6}$ (p in mbar)

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

(Menz, MST)

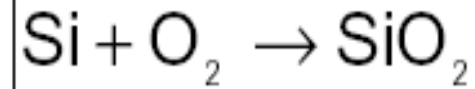
Druckbereich	Druck		freie Weglänge	Monozeit
	[mbar]	[Pa]		
Großvakuum	10 ¹³ -1	10 ⁵ -10 ²	$\lambda \ll b$	$\tau \ll 1$
Feinvakuum	1-10 ⁻³	10 ² -10 ⁻¹	$\lambda = b$	$\tau \ll 1$
Hochvakuum	10 ⁻³ -10 ⁻⁷	10 ⁻¹ -10 ⁻⁵	$\lambda \gg b$	$\tau < 1$
Ultrahochvakuum	< 10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁵	$\lambda \gg b$	$\tau > 1$

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 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 SiO_2

Prozessvarianten der thermischen Oxidation

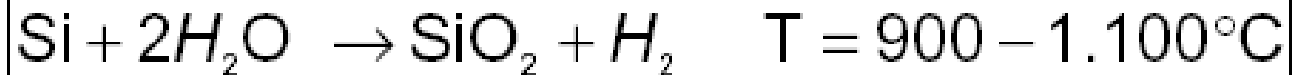
(1) Trockene Oxidation mit Sauerstoff



- Sehr gute Qualität des Oxides
- Leider geringe Aufwachsrate
- Eigenschaften von bei 800°C hergestelltem Oxid:
 - elektrisch stark belastbar (Durchbruchfeldstärke 550 V / μm)
 - starke inneren Druckspannungen

Prozessvarianten der thermischen Oxidation

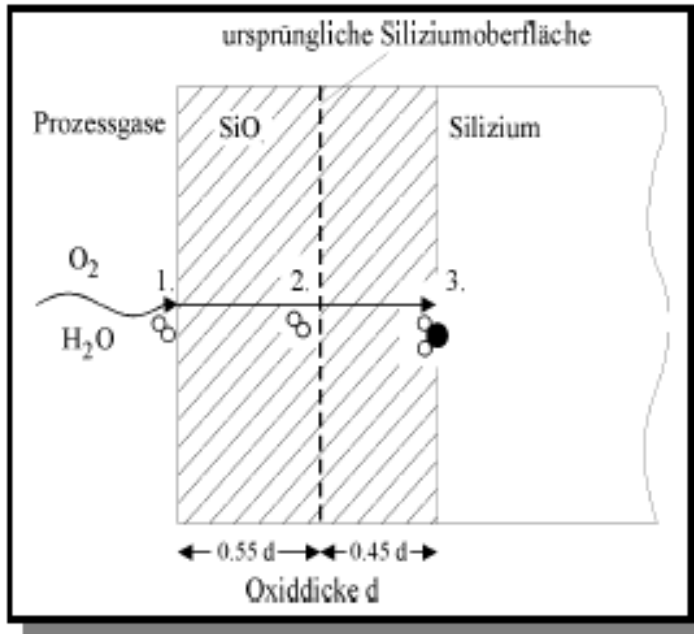
(2) Nasse Oxidation mit angefeuchtetem Sauerstoff



- H_2O –Molekül ist kleiner als 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

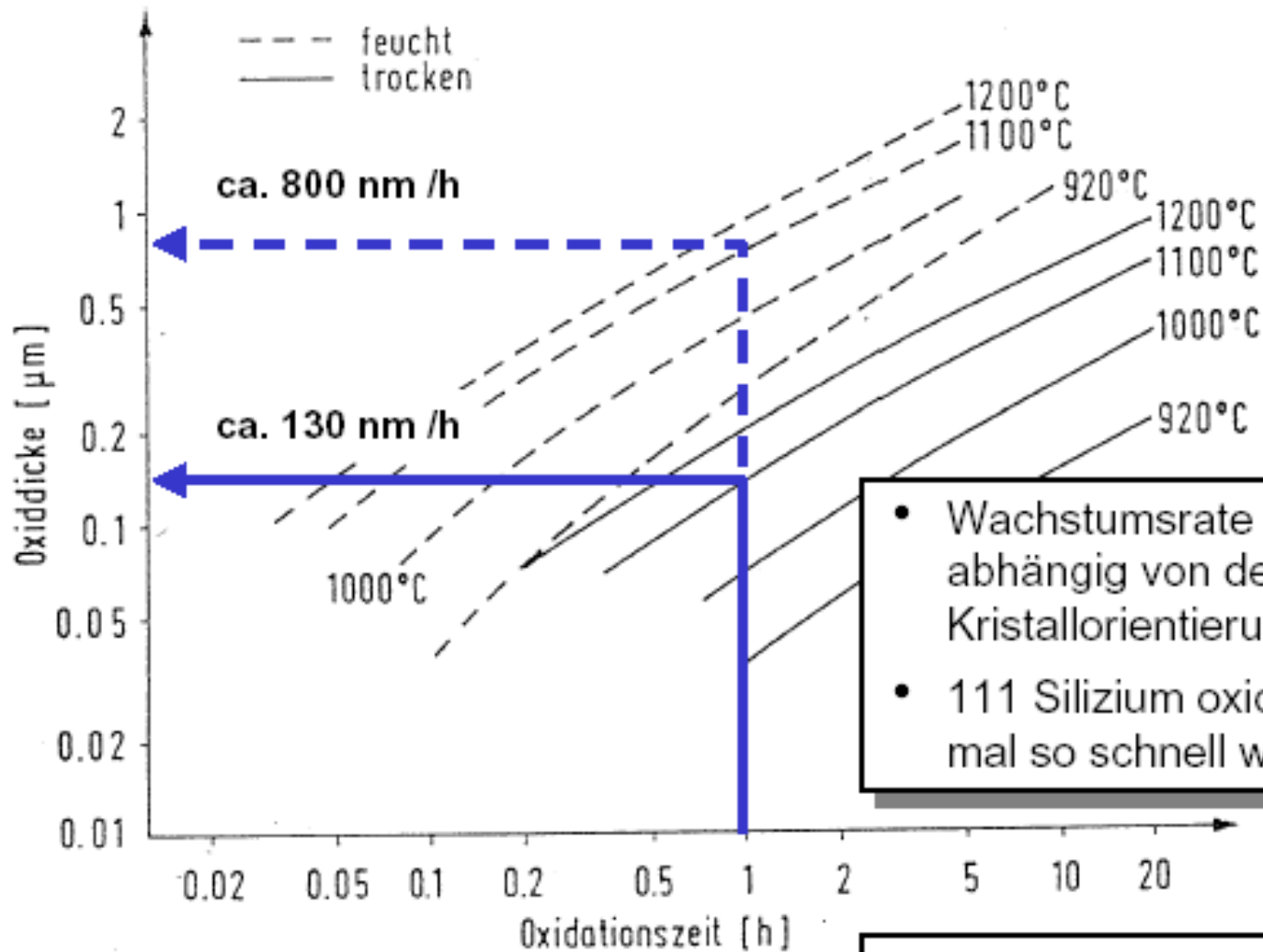
Zur Bildung von Oxid der Dicke d_{ox} wird Silizium der Dicke $0,44 d_{\text{ox}}$ verbraucht

Oxidationsrate bestimmt durch:

SiO₂ ist amorph !

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

Wachstumsrate des thermischen Oxids

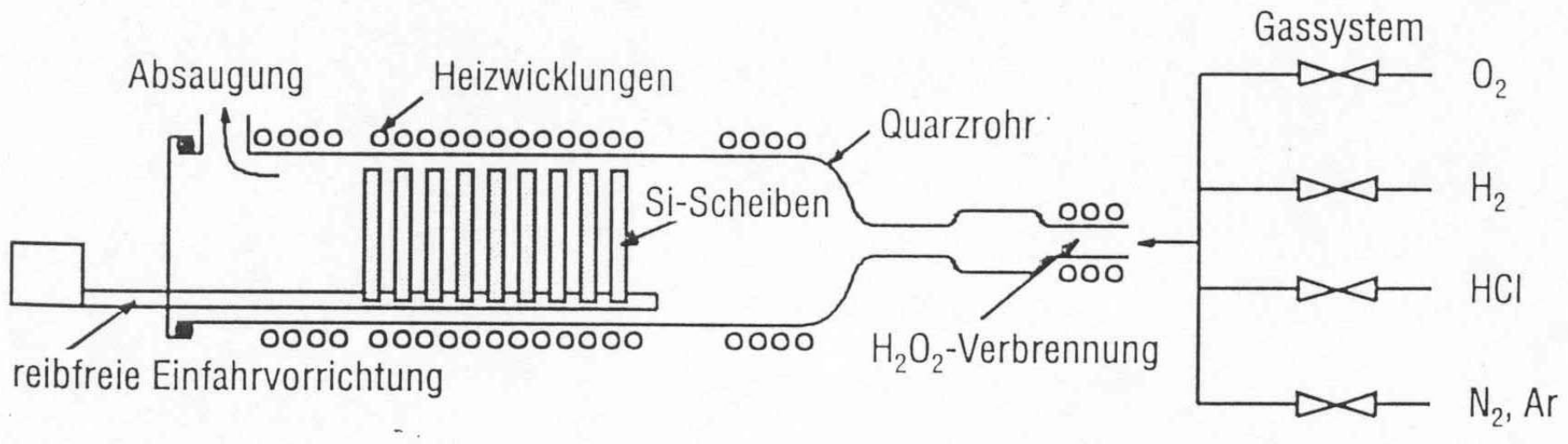


- Wachstumsrate ist auch abhängig von der Kristallorientierung
- 111 Silizium oxidiert 1,7 mal so schnell wie 100 Si

Quelle: Büttgenbach, Mikromechanik

Thermische Oxidation

Prinzip eines Oxidationsofens



Thermische Oxidation

**Bilder: Oxidationsofen
(3 Rohre)**



Waferboot aus Quarzglas



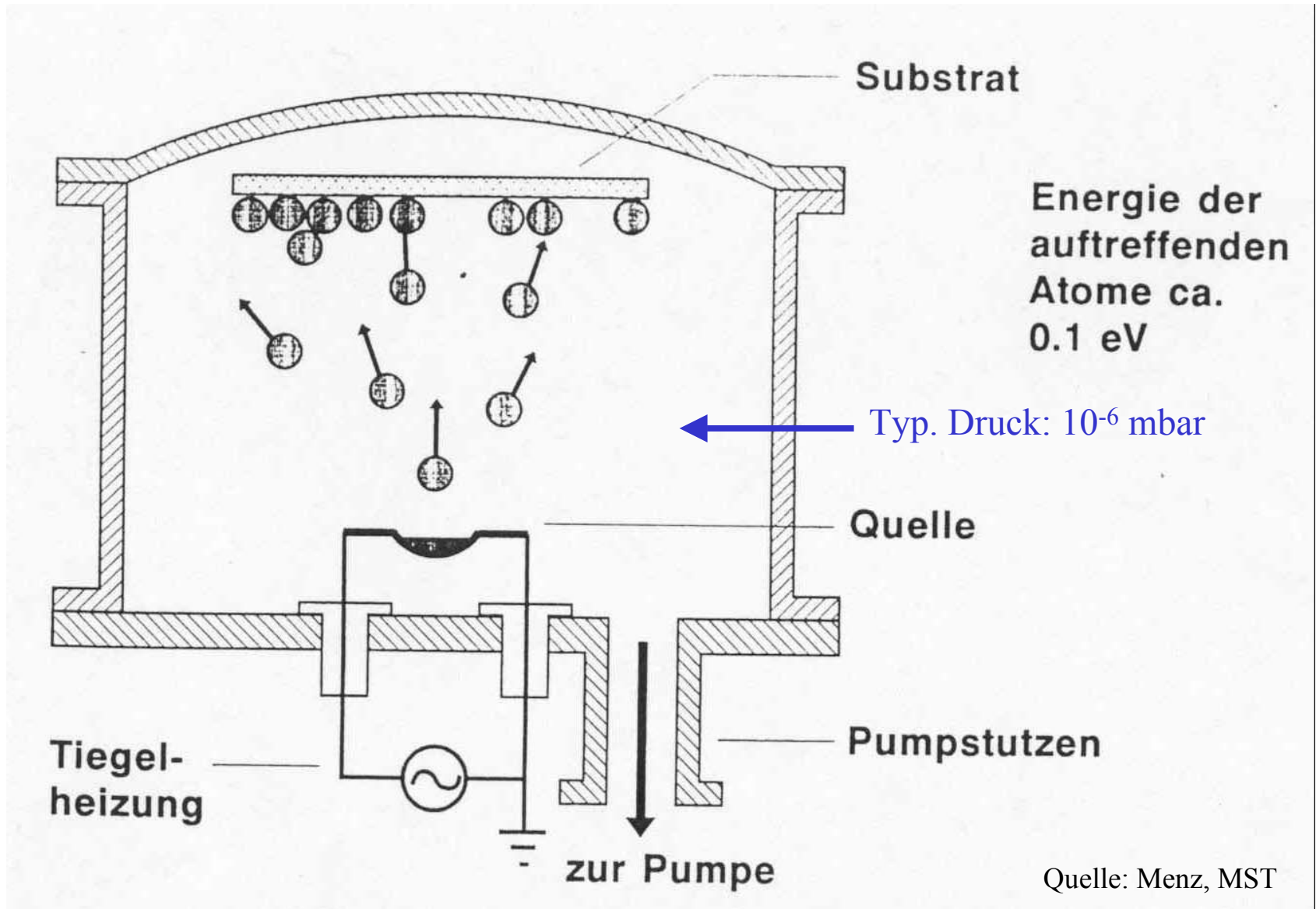
PVD-Verfahren: Aufdampfen

PVD = Physical Vapor Deposition

Prinzip des Aufdampfens (Evaporation):

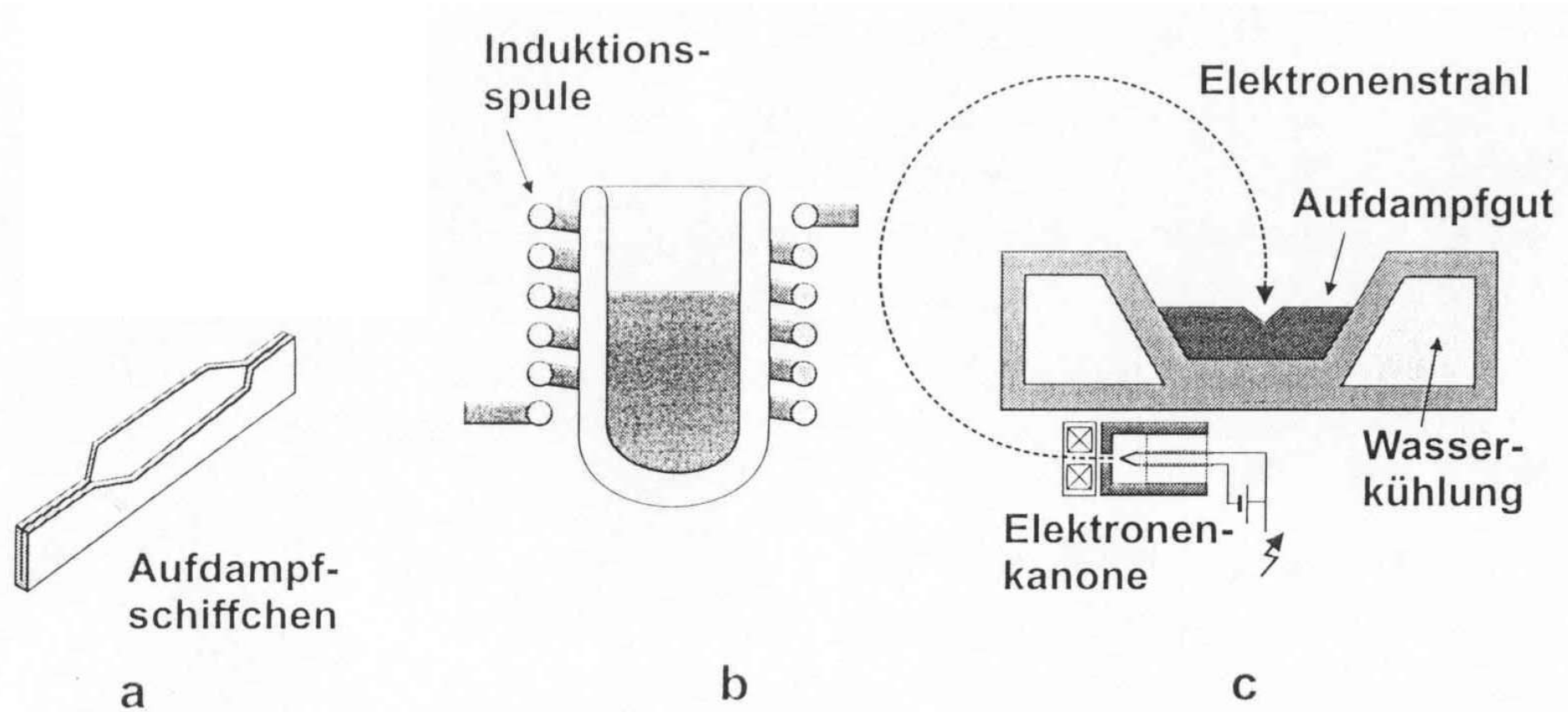
- Thermisches Verdampfen von Material (1000 – 3500°C)
 - Transfer der Dampfteilchen zum Substrat (im Vakuum)
 - Niederschlag (Kondensation) auf kühlem Substrat (100 – 400°C)
-

Aufdampfanlage

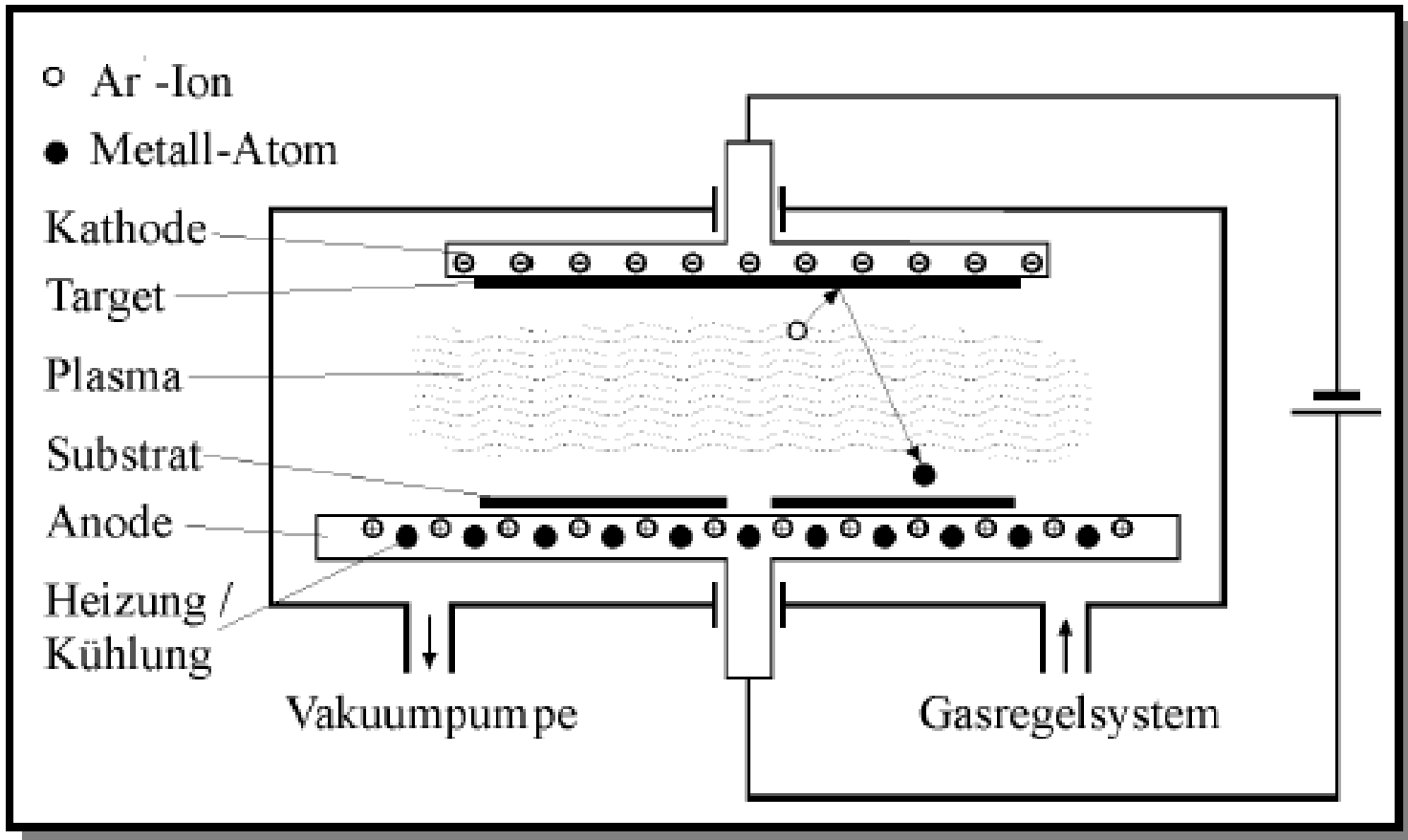


Quelle: Menz, MST

Verdampfungsquellen



Kathodenzerstäuben (Sputtern)

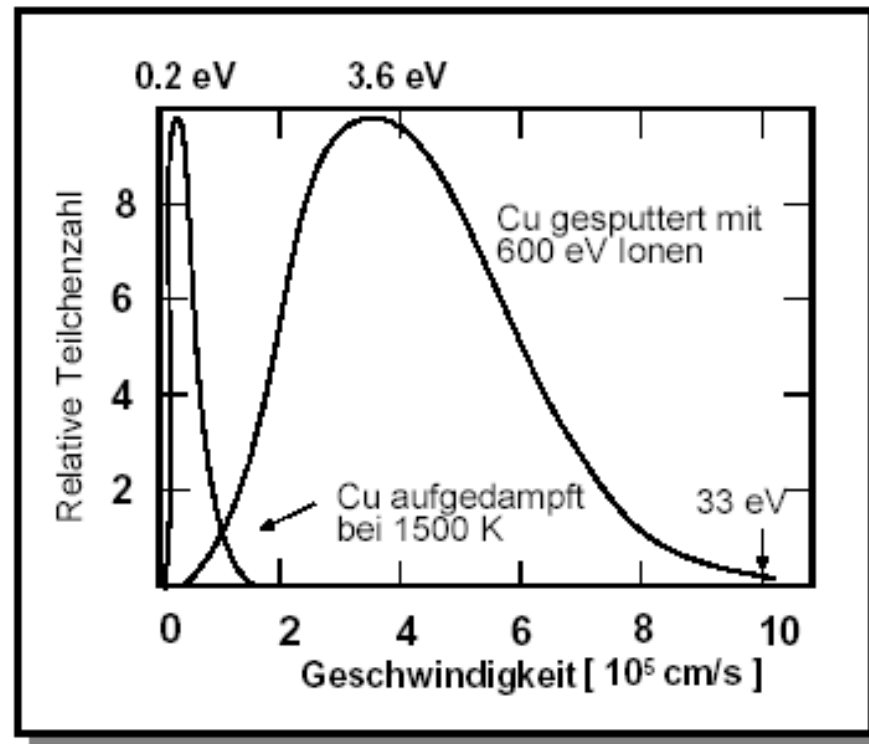


Prinzip der Kathodenzerstäubung (Sputtern)

- 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. : ~ 40 eV; mittel: ~ 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: Al_2O_3 : Target = Al; Im Prozessgas ist O_2 .
 - Beispiel 2: TiN (sehr hart): Target = Ti; im Prozessgas ist N_2 .
-

Anlagen- und Prozessvarianten beim Sputtern

- Sputterätzen

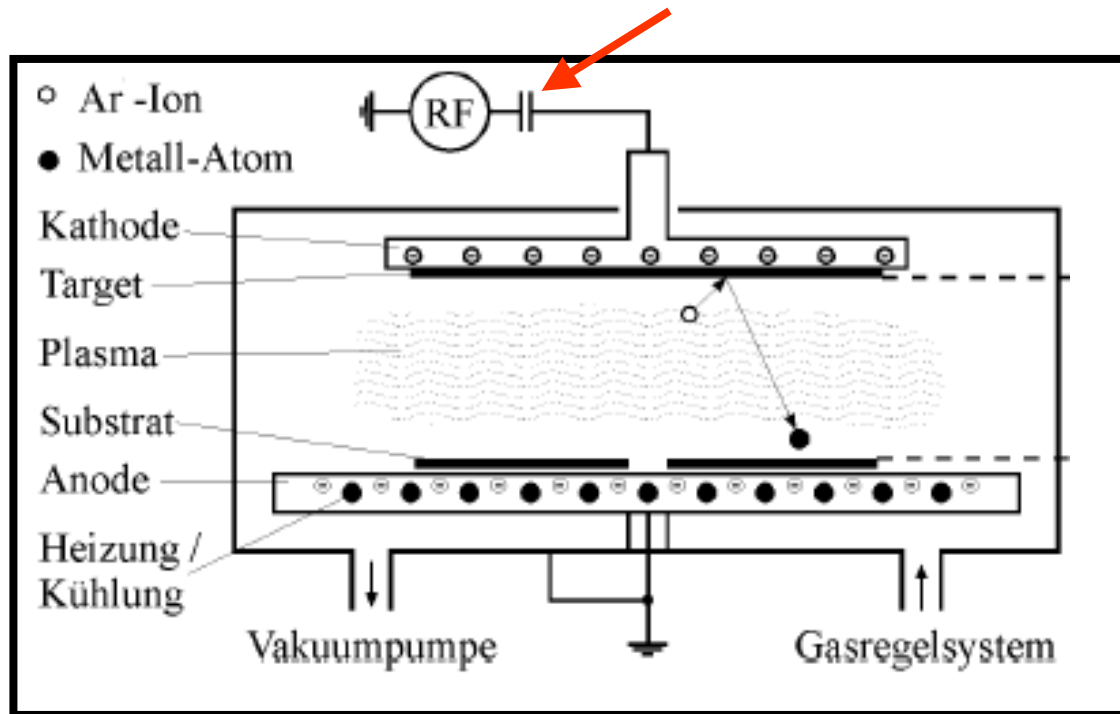
- Vor dem Start des Beschichtungsprozess wird die Polarität der Spannung umgedreht und das Substrat abgesputtert
 - entfernt mehrere Atomlagen der Oberfläche
 - Kontamination wird reduziert, extrem gute Reinigung
 - erzeugt zusätzliche Kondensationskeime

- 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)
-

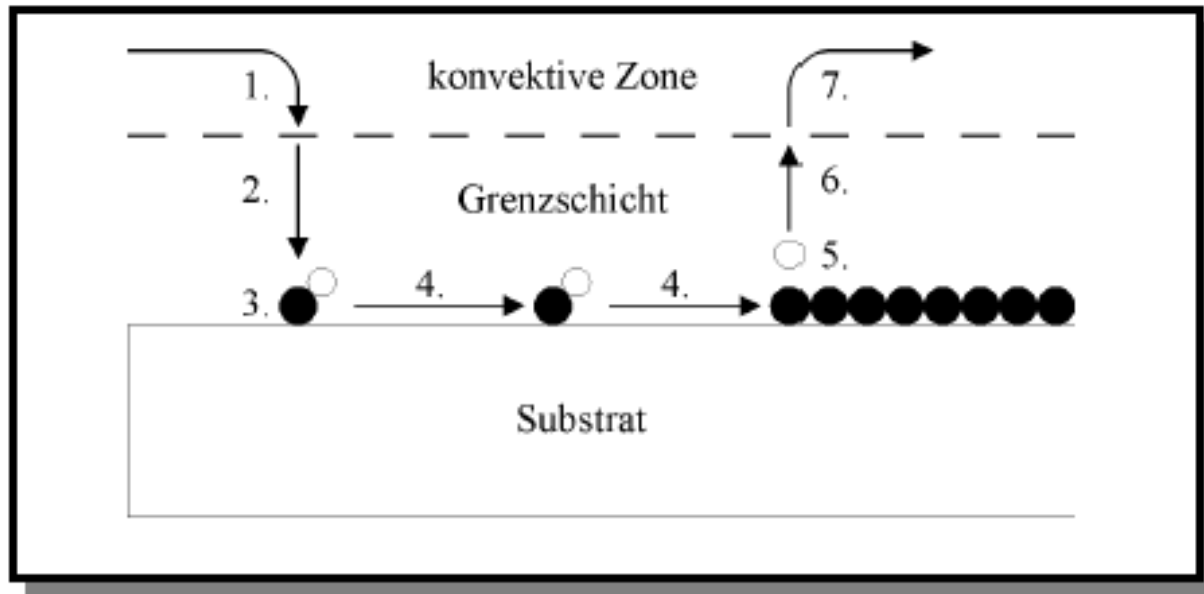
Nachteile des Sputterns gegenüber Aufdampfen

- 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

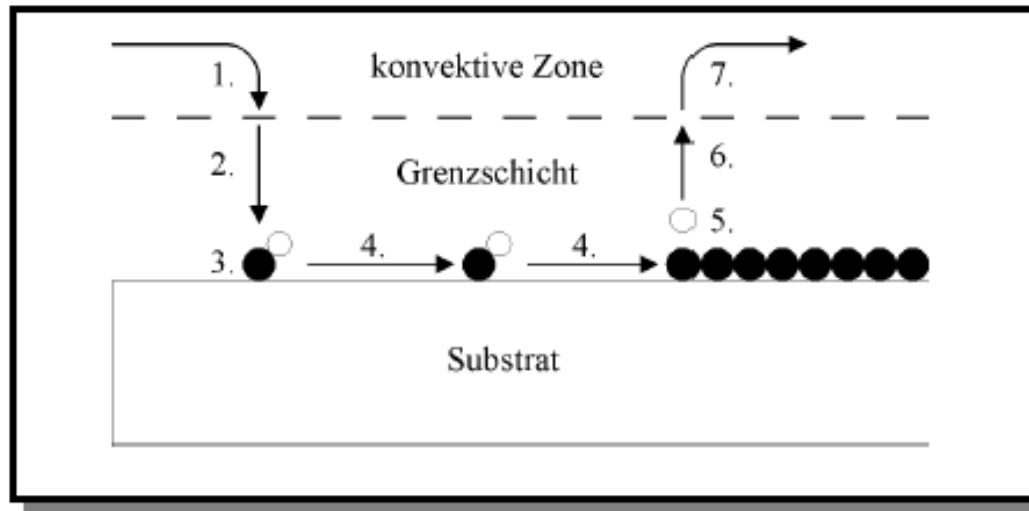
- Reaktionsgase werden **gasförmig (vapor)** zugeführt
 - Abgeschiedene Schicht ist Ergebnis einer **chemischen Reaktion** dieser Gase
 - Weitere Rahmenbedingungen
 - Reaktion wird durch **Energiezufuhr** angeregt
 - Prozesschemie muss so gestaltet werden, dass die Reaktionsnebenprodukte gasförmig sind,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

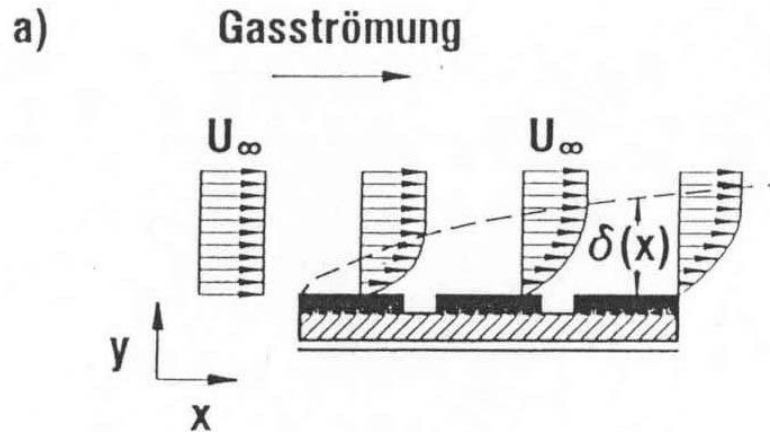


4. **Oberflächenreaktion**: Dissoziation der Moleküle, Oberflächen-diffusion der Radikale, Einbau der Radikale in den Festkörperverband (bevorzugt an Stufen), Bildung der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
5. **Desorption** der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
6. Transport der Reaktionsnebenprodukte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

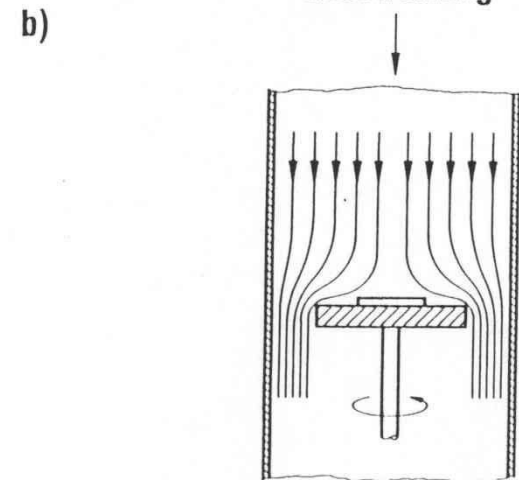
CVD - Prozesse

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:**

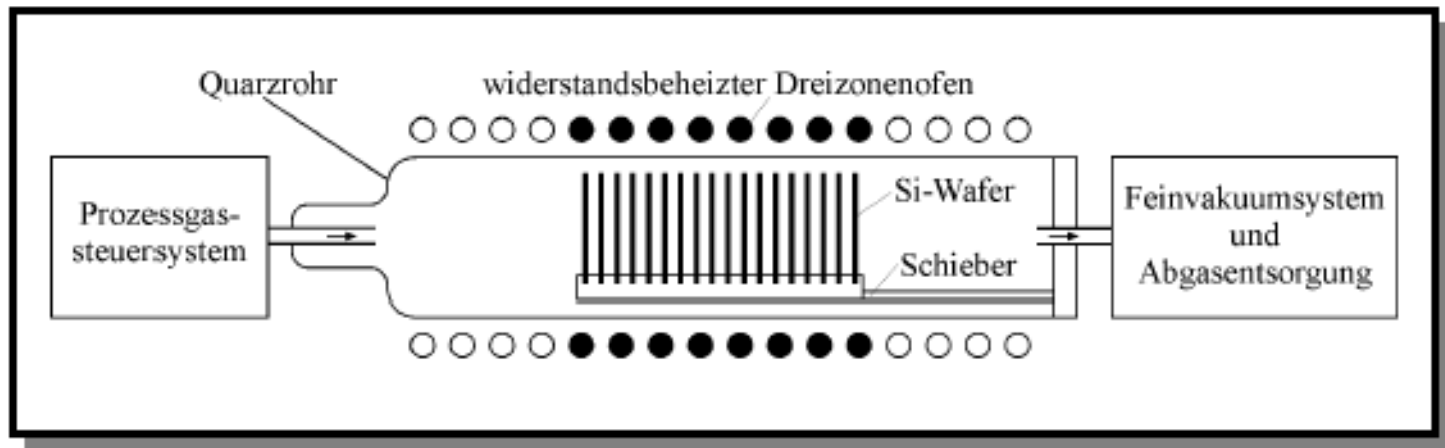
Thermische CVD (APCVD, LPCVD)

Plasmainduzierte CVD

Laserinduzierte CVD

Beispiel LPCVD

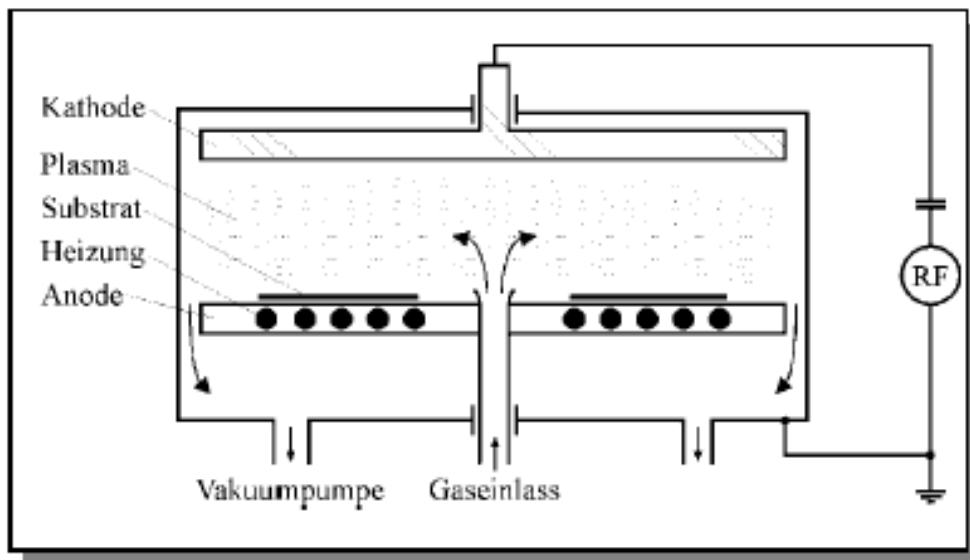
- Prozessdruck 10 – 100 Pa
 - Diffusionskoeffizient groß, daher **reaktionslimitierte Prozessführung**
 - Dichte Waferpackung ohne QualitätseinbuÙe möglich



- 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; Hohe Rate ; geringe Temperatur	Schlechte Kantenbedeckung ; Partikelkontamination	Dotierte & undotierte Oxide; Epitaxie	Diffusionslimitierte Prozessführung	100 kPa – 10 kPa 350 °C – 400 °C
LPCVD	Exzellente Homogenität und Reinheit; konforme Kantenbedeckung ; hoher Wafer-Durchsatz	Hohe Temperatur ; Geringe Abscheiderate	Dotierte & undotierte Oxide; Siliziumnitride Polysilizium	Reaktionslimitierte Prozessführung	100 Pa – 10 Pa 550 °C – 600 °C
PECVD	Geringe Temperaturen ; Hohe Raten; gute Adhäsion; gute Kantenbedeckung ; geringe pin-hole Dichte	Chemische Verunreinigung (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 ₃ N ₄	$3 \text{ SiH}_4 + 4 \text{ NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12 \text{ H}_2$	280	29	30
LPCVD	Si ₃ N ₄	$3 \text{ SiH}_2\text{Cl}_2 + 4 \text{ NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6 \text{ HCl} + 6 \text{ H}_2$	730	85	2,5
PECVD	SiO ₂	$\text{SiH}_4 + 4 \text{ N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Gase}$	280	40	55
LPCVD	SiO ₂	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{ H}_2$	430	20	8

NH₃ = Ammoniak
 N₂O = Distickstoffoxid = Lachgas
 SiH₂Cl₂ = Dichlorsilan
 SiH₄ = 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 ₄ + H ₂
Poly-Si	APCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	910	SiH ₄ + H ₂ , (PH ₃ , B ₂ H ₆)
	LPCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	625	SiH ₄
a-Si	LPCVD	Anti-Reflexionsschicht	560	SiH ₄
	PECVD	Anti-Reflexionsschicht	250...400	SiH ₄
SiO ₂	APCVD	Dielektrikum	910	SiH ₄ + CO ₂ + H ₂
	PECVD	Dielektrikum	250...400	SiH ₄ + N ₂ O
LTO SiO ₂	LPCVD	Dielektrikum	410	SiH ₄ + O ₂
TEOS SiO ₂	LPCVD	Abstandshalter, Dielektrikum	650...750	Si(OC ₂ H ₅) ₄
PSG	APCVD	Dielektrikum, Passivierung	450	SiH ₄ + PH ₄ + O ₂
	LPCVD	Dielektrikum, Passivierung	410	SiH ₄ + PH ₄ + O ₂
BSG	APCVD	Dielektrikum	420	SiH ₄ + O ₂ + B ₂ H ₆
BPSG	LPCVD	Dielektrikum	650...750	TEOS + TMB + TMPI + O ₂
Si ₃ N ₄	APCVD	LOCOS	910	SiH ₄ + NH ₃ + H ₂
	LPCVD	LOCOS	830	SiH ₂ Cl ₂ + NH ₃
	PECVD	Dielektrikum, Passivierung	250...400	SiH ₄ + NH ₃
SiO _x N _y	PECVD	Dielektrikum	250...400	SiH ₄ + NH ₃ + N ₂ O
W / Mo	LPCVD	Leitbahn	450...500	WF ₆ / MoF ₆ + H ₂ + (Ar)
W (selektiv)	LPCVD	Kontaktlochfüllung	250...300	WF ₆ + SiH ₄
WSi ₂ / MoSi ₂ / TaSi ₂ / TiSi ₂	LPCVD	Leitbahn, Gate-Elektrode	330...750	WF ₆ / MoCl ₅ / TaCl ₅ / TiCl ₄ + SiH ₄ + H ₂
Al	LPCVD	Leitbahn	220...300	Al(C ₄ H ₉) ₃
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(OCH₃)₃; TMPI Trimethylphosphit P(OCH₃)₃

Ende
