

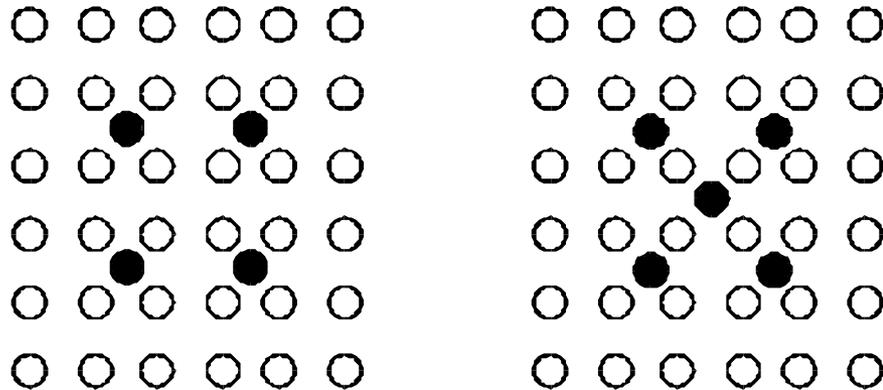
# Wiederholung: Epitaxie

**Epitaxie ist die Herstellung von Schichten, welche in grossen Bereichen einkristallin sind**

- **Homoepitaxie:**  
**Substratmaterial = Schichtmaterial**
- **Heteroepitaxie:**  
**Substratmaterial  $\neq$  Schichtmaterial**

# Wiederholung: Heteroepitaxie I

## Epitaktische Relation:



○ Substratmaterial

● Schichtmaterial

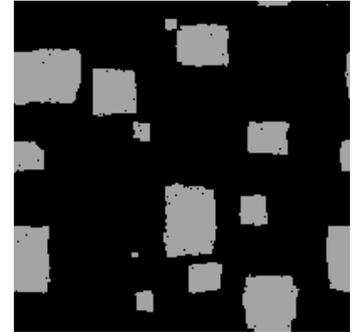
## Van-der-Waals Epitaxie:

**Die Wechselwirkung zwischen Substratmaterial und Schichtmaterial ist so gering, dass sich die Schichtatome selbstständig kristallographisch anordnen.**

# Wiederholung: Heteroepitaxie II

## Hochtemperaturepitaxie:

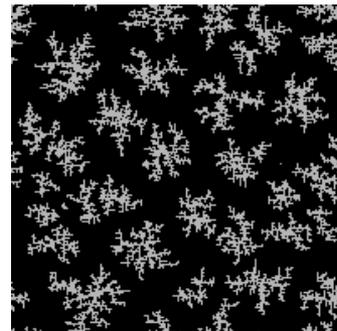
Die kristallographisch günstige Anordnung der Atome wird durch eine hohe Substrattemperatur erreicht



## Niedertemperaturepitaxie:

Die kristallographisch günstige Anordnung der Atome wird durch lokale Defektstrukturen erreicht

- Vicinalflächen
- Dendritische Inseln



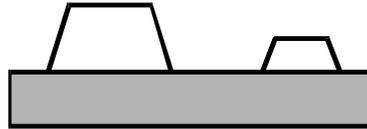
# Wiederholung: Wachstumsmoden

## Wachstumsmoden:

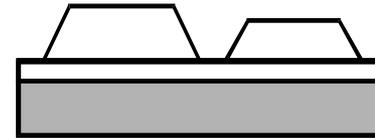
A: Substratmaterial  
B: Schichtmaterial



Frank-Van der Merwe:  
Lagenweise,  $W_{AB} > W_{BB}$



Volmer-Weber:  
Inseln,  $W_{AB} < W_{BB}$



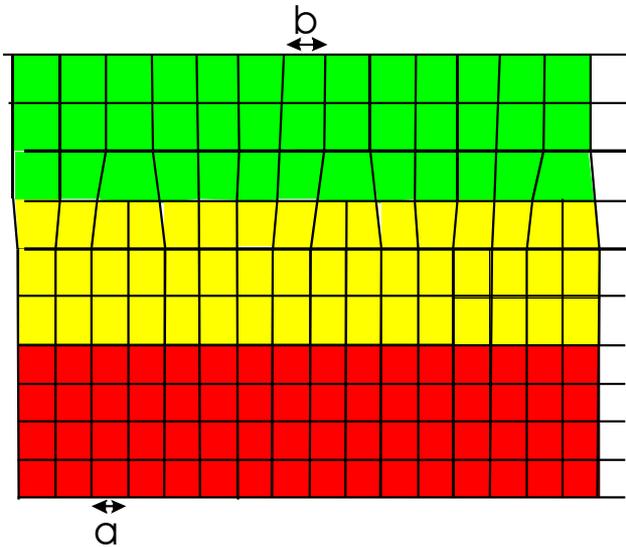
Stranski-Krastanov:  
Lagen-Inseln,  $W_{AB} > W_{BB}$   
Spannungsabbau durch 3d-Inseln

**Während die Frank-van der Merwe und Volmer-Weber Wachstumsmoden weitgehend spannungsfreie Schichten erzeugen, kommt es beim Stranski-Krastanov-Modus zum Aufbau signifikanter Spannungen in den ersten Wachstumsphasen.**

# Wiederholung: Spannungen/Schichtwachstum

**Gitterfehlanpassung (Lattice Mismatch)  $\Delta$ :**

$$\Delta = \frac{a - b}{a} \cdot 100[\%]$$

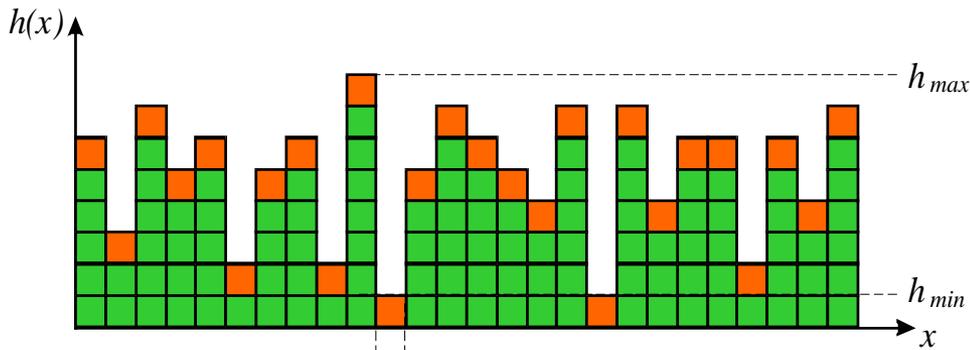


**Schicht, Gitterkonstante b**

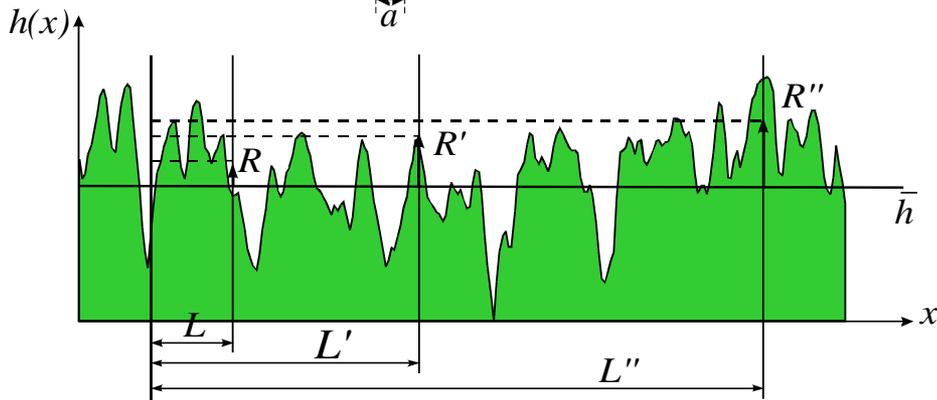
**Pseudomorphe Übergangszone**

**Substrat, Gitterkonstante a**

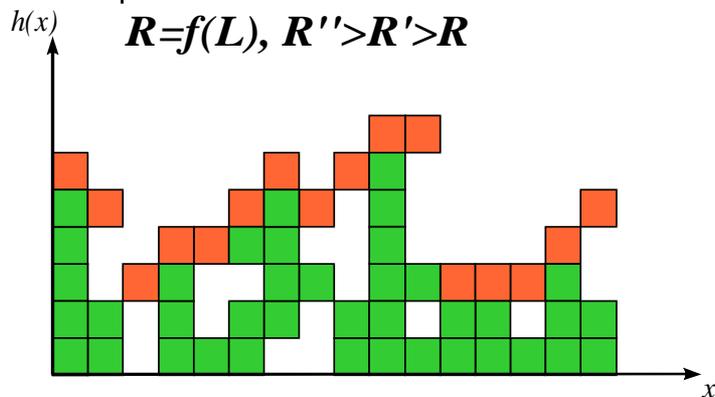
# Wiederholung: Rauigkeitstypen



**Stochastische  
Rauigkeit**



**Selbstähnlichkeit**

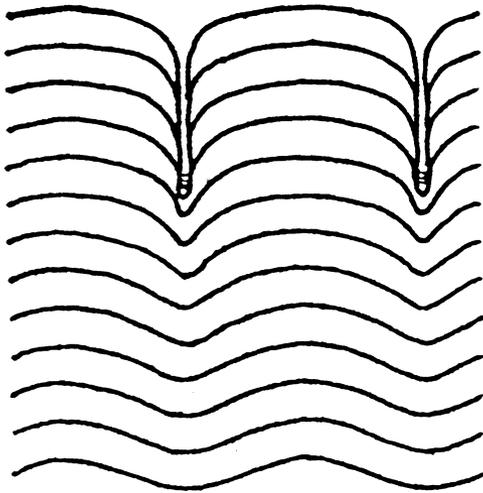


**Ballistisches  
Aggregat**

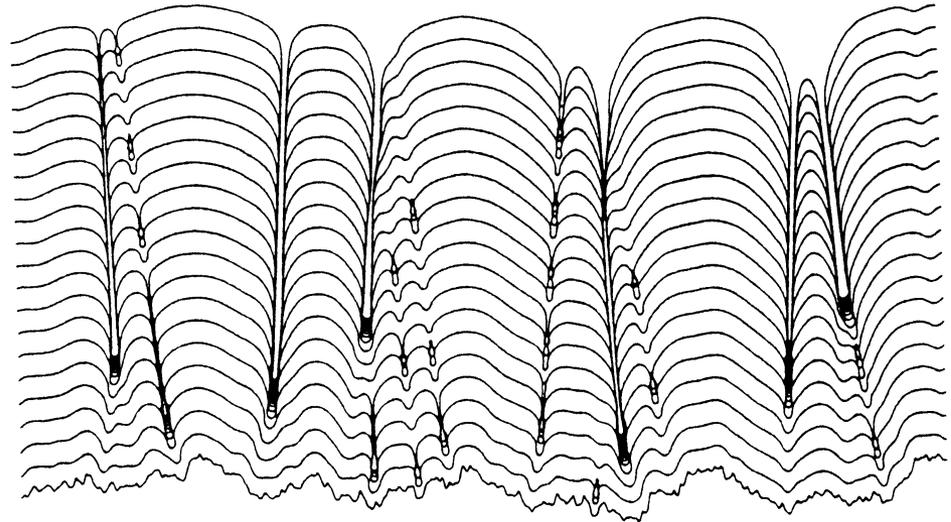
# Wiederholung: Abschattung

## Spitzen wachsen schneller als Täler

- + Bildung Kolumnarer Strukturen (a)
- + Porenbildung in Kombination mit Oberflächendiffusion (b)



(a)



(b)

# Wiederholung: Rauigkeitswerte

**$R_a$ -Wert: Mittlere absolute Abweichung**

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\bar{h} - h_i|$$

**$R_q$ -Wert oder RMS-Wert:  
Mittlere quadratische Abweichung**

$$R_q = R_{\text{RMS}} = \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{h} - h_i)^2}$$

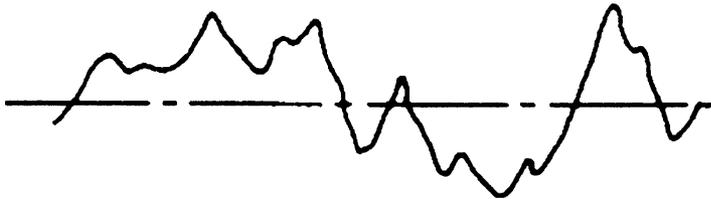
# Wiederholung: Korrelationsfunktionen

<b>Nicht normierte Größen</b>	<b>Normierte Größen</b>
<b>Autokovarianzfunktion</b> $R(\tau) = \langle h(x) \cdot h(x + \tau) \rangle dx$	<b>Autokorrelationsfunktion</b> $\rho(\tau) = R(\tau) / R(0)$
<b>Strukturfunktion</b> $S(\tau) = \langle [h(x) - h(x + \tau)]^2 \rangle$ $S(\tau) = 2R_q^2 [1 - \rho(\tau)]$	

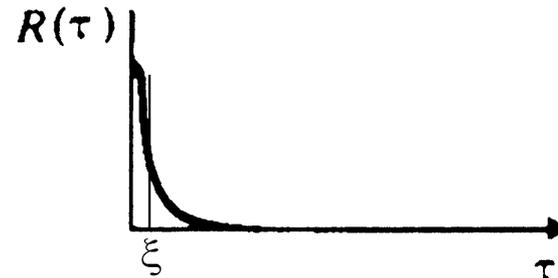
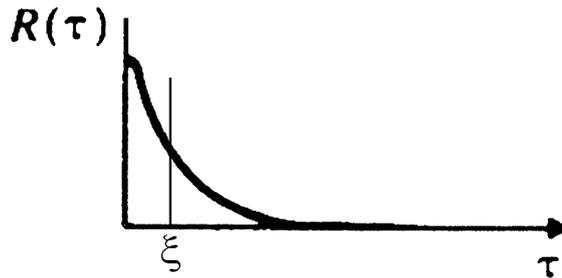
**Man beachte: Alle Höhenwerte werden von der mittleren Höhe  $\bar{h}$  aus gemessen.**

# Wiederholung: Korrelationslänge $\xi$

## Oberflächenprofil



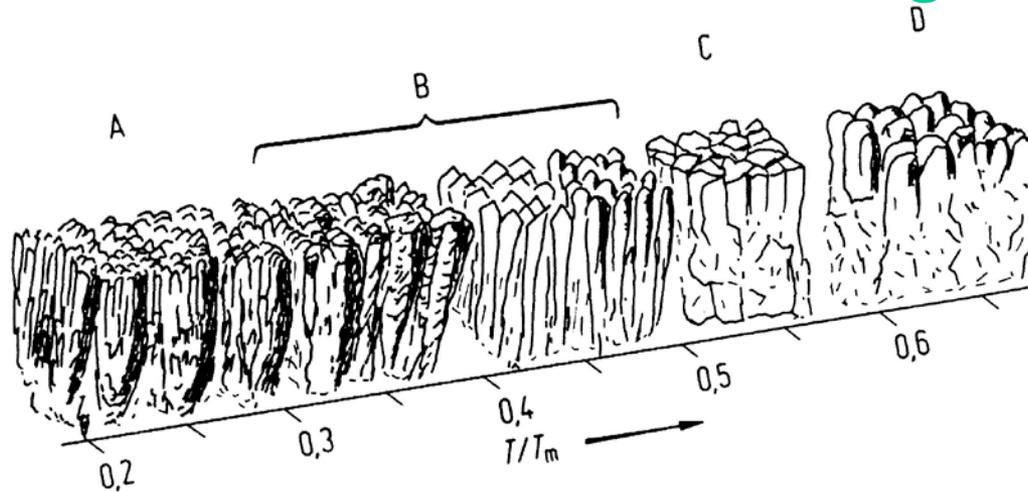
## Autokovarianzfunktion



***Innerhalb von  $\xi$  weist das Profil ähnliche Höhenwerte auf.***

***Periodizitäten liegen vor, wenn  $R(\tau)$  maxima bei  $\tau \neq 0$  aufweist.***

# Schichtstruktur und Schichteigenschaften



## Die Schichtstruktur beeinflusst:

- + Dichte
- + Mechanische Eigenschaften
- + Elektrische Eigenschaften
- + Magnetische Eigenschaften
- + Elektronische Eigenschaften

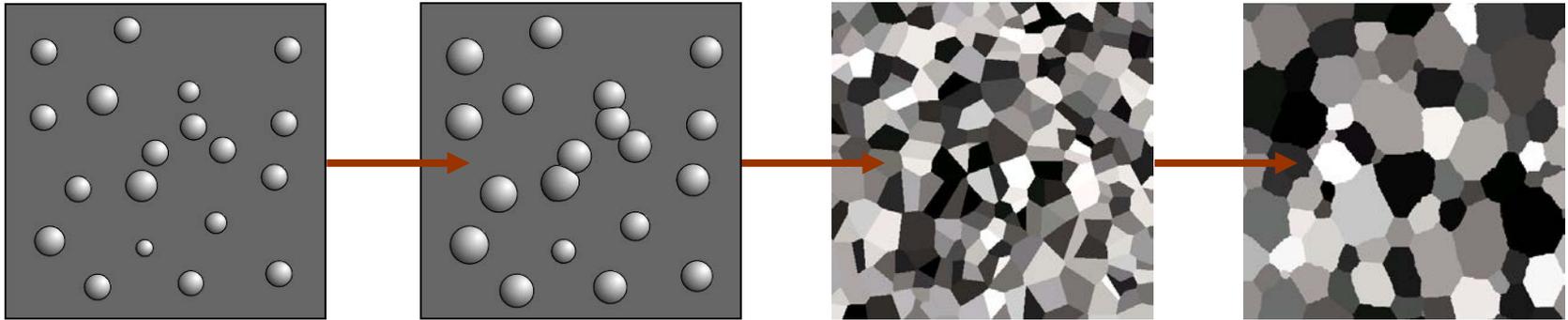
# Anwendungsprofile

**Je nach Anwendung kann eine bestimmte Schichtstruktur von Vorteil oder von Nachteil sein:**

- + Werkzeug  $\Rightarrow$  dicht, feinkörnig**
- + Biolog. Material  $\Rightarrow$  porös, weich**
- + Elektronik  $\Rightarrow$  dicht, monokristallin**
- + Therm. Barrieren  $\Rightarrow$  porös, hart**

# Strukturzonenmodelle

## Ergebnis der Wachstumsphasen einer Schicht



Nukleation  
am Substrat

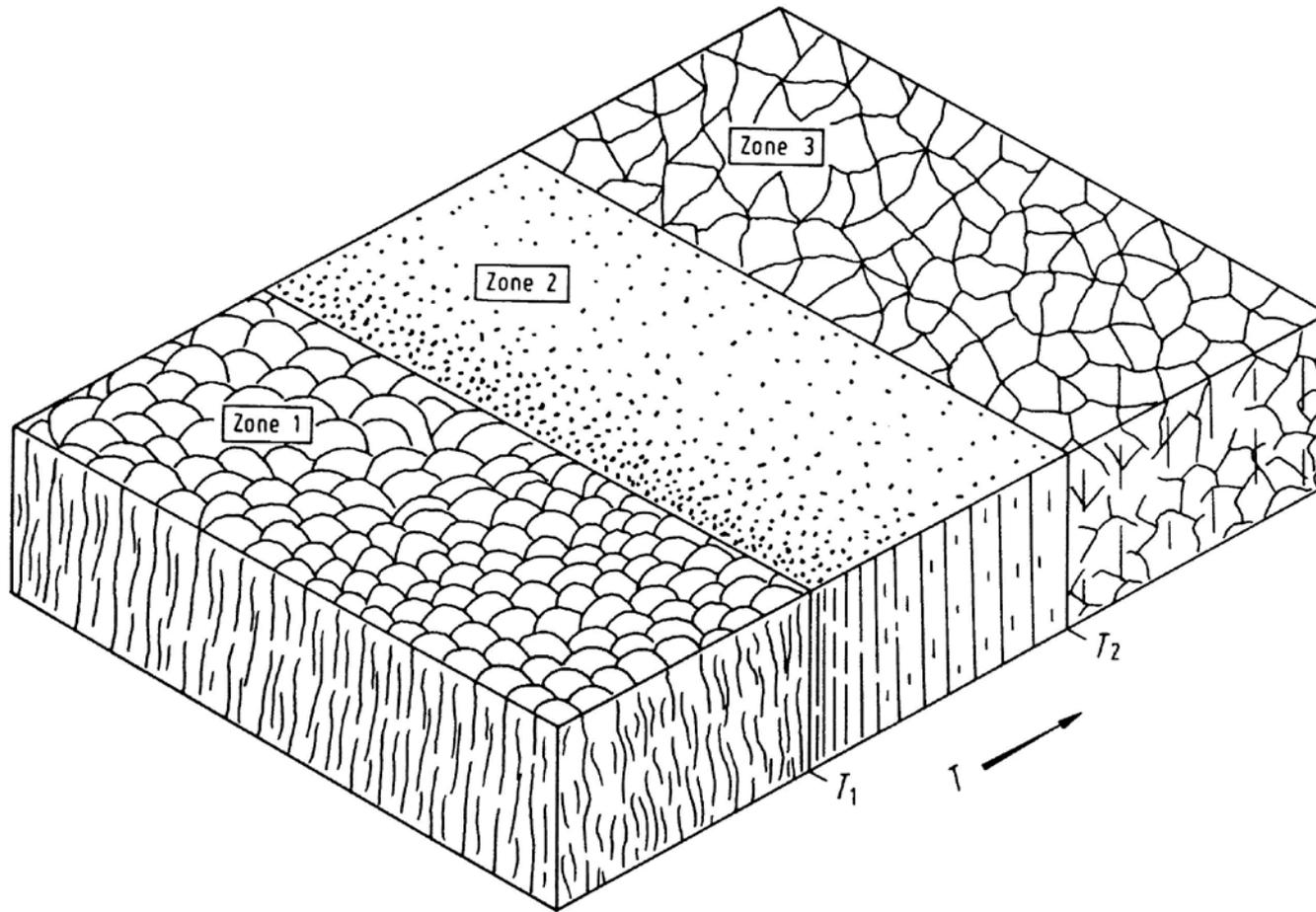
Teilweise  
Koaleszenz  
und Grenzflä-  
chenbildung

Totale  
Koaleszenz  
und Bildung  
eines Poly-  
kristalls

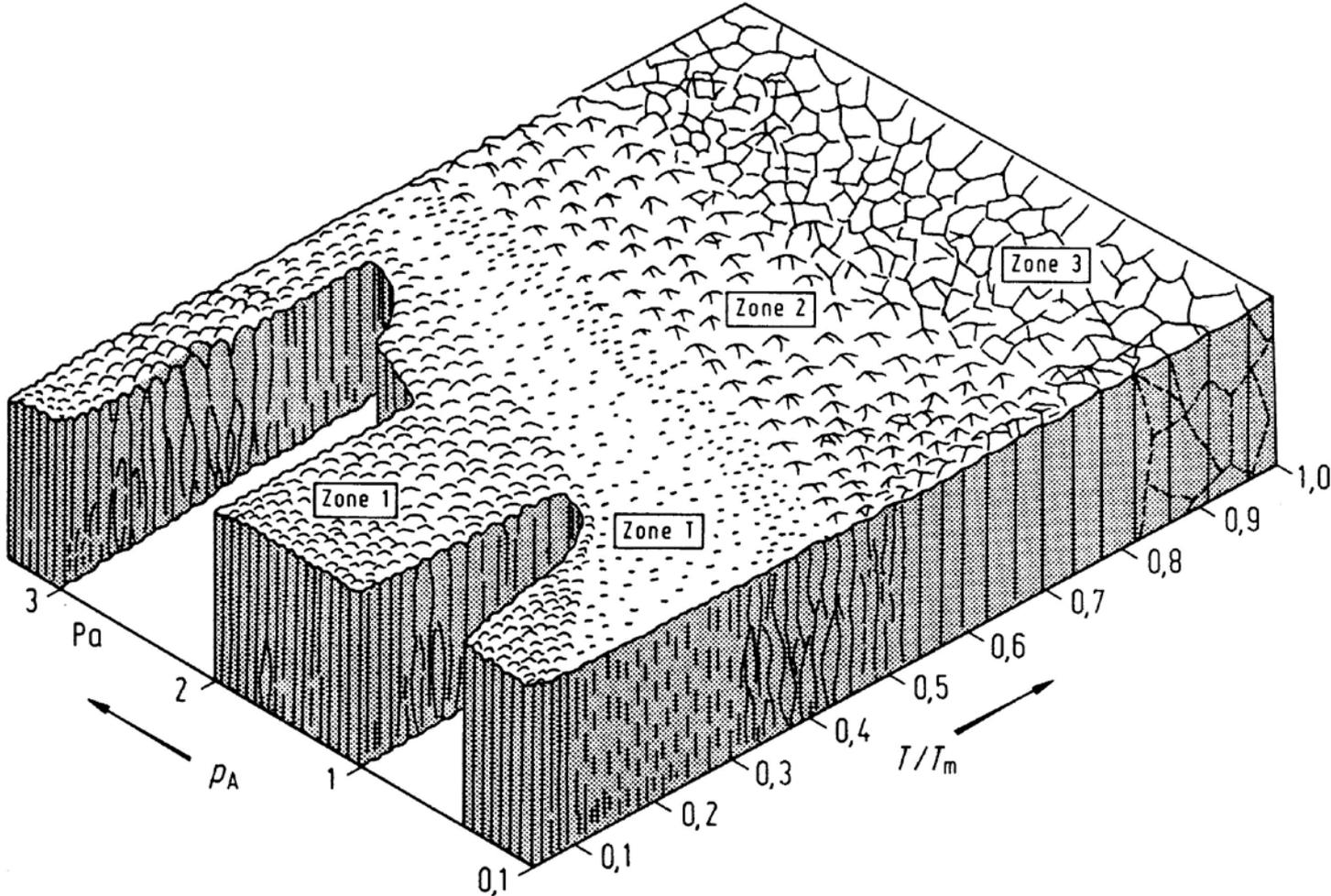
Wachstum der  
Körner des  
Polykristalls

***Strukturzonenmodelle liefern den qualitativen Schichtaufbau in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern.***

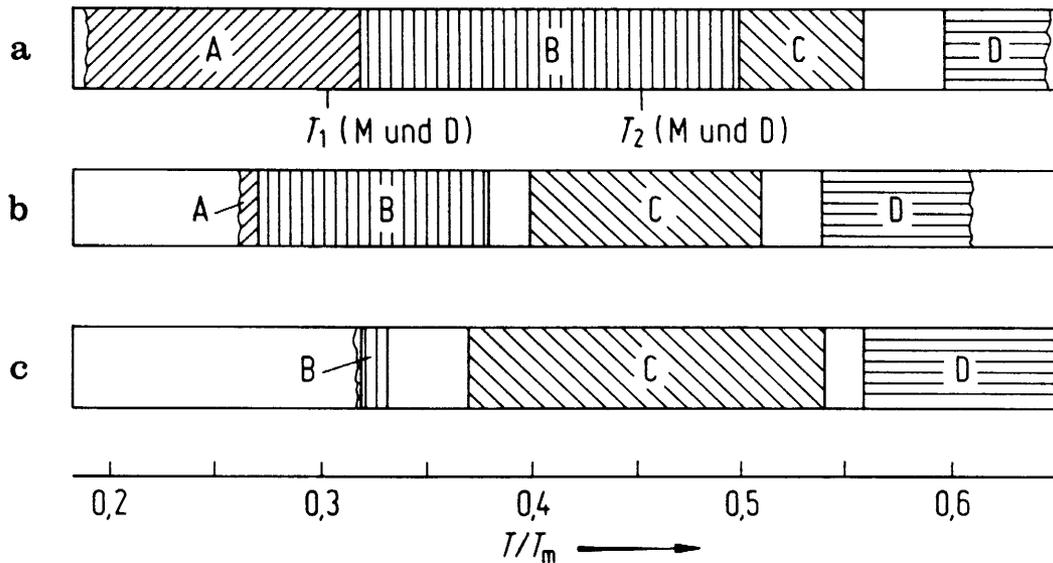
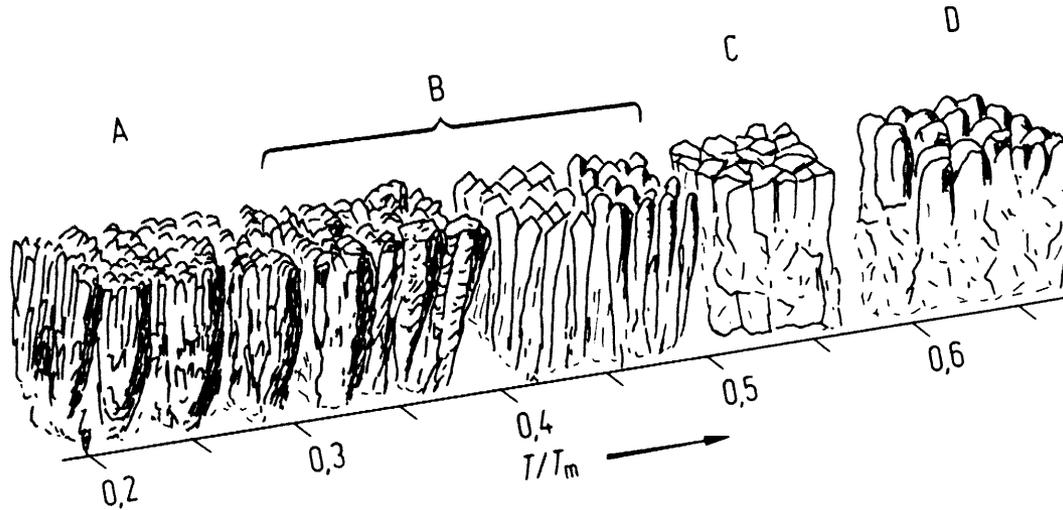
# Movchan-Demchishin: Aufdampfprozesse



# Thornton: Sputterprozesse



# Ionenplattieren



# Zonen und Wachstumsmechanismen

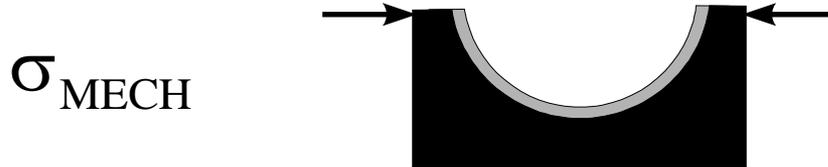
<b>Zone</b>	<b>Mechanismus</b>	<b>Merkmal</b>
<b>1: <math>T/T_M &lt; 0,2</math></b>	<b>Abschattung</b>	<b>Fibern, Poren</b>
<b>T: <math>T/T_M &lt; 0,4</math></b>	<b>Teilchenenergie</b>	<b>Nanokörner</b>
<b>2: <math>T/T_M &lt; 0,8</math></b>	<b>Oberflächendiffusion</b>	<b>Säulige Kristalle</b>
<b>3: <math>T/T_M &gt; 0,8</math></b>	<b>Volumsdiffusion</b>	<b>3d - Körner</b>

# Spannungen

## Arten von Spannungen:

$$\sigma = \sigma_{\text{MECH}} + \sigma_{\text{T}} + \sigma_{\text{I}}$$

## Mechanische Spannung:



Erzeugt durch Einspannung des Substrates und nachfolgendes entspannen

## Thermische Spannung:

$$\sigma_{\text{T}} = E_{\text{S}} (\alpha_{\text{S}} - \alpha_{\text{U}}) (T_{\text{B}} - T_{\text{M}})$$

$E_{\text{S}}$  ... E-Modul Schicht

$\alpha_{\text{S}}$  ... Ausdehnungskoeff. Schicht

$\alpha_{\text{U}}$  ... Ausdehnungskoeff. Substrat

$T_{\text{B}}$  ... Beschichtungstemperatur

$T_{\text{M}}$  ... Messtemperatur

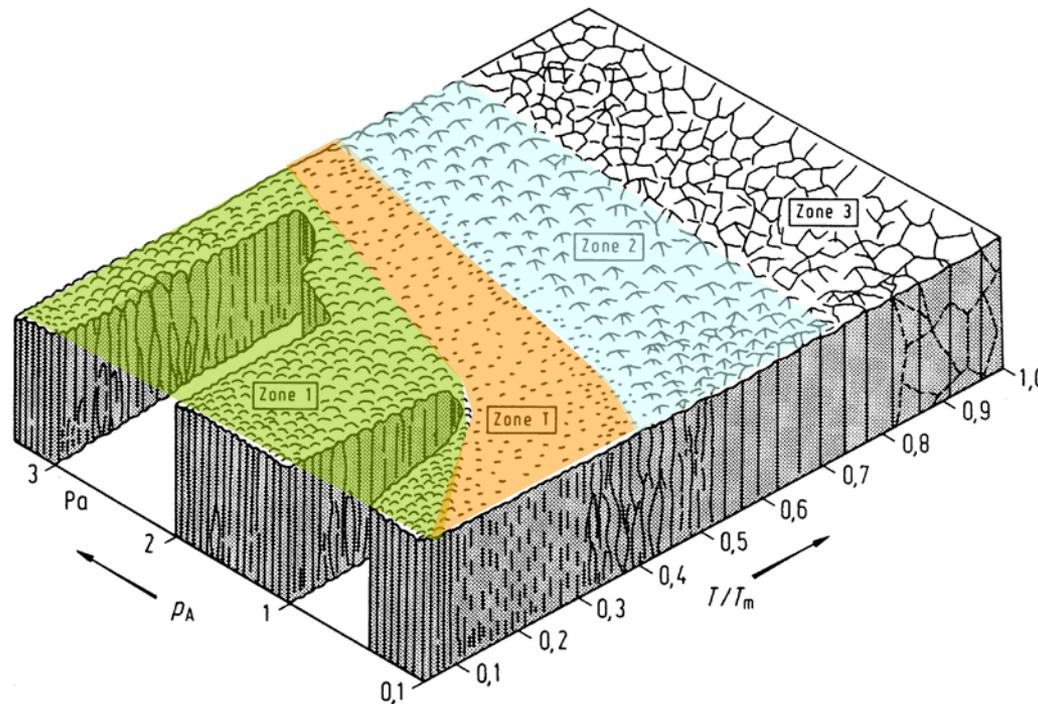
Erzeugt durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Schicht

# Spannungen und Schichtstruktur

## Intrinsische Spannung:

$\sigma_I$

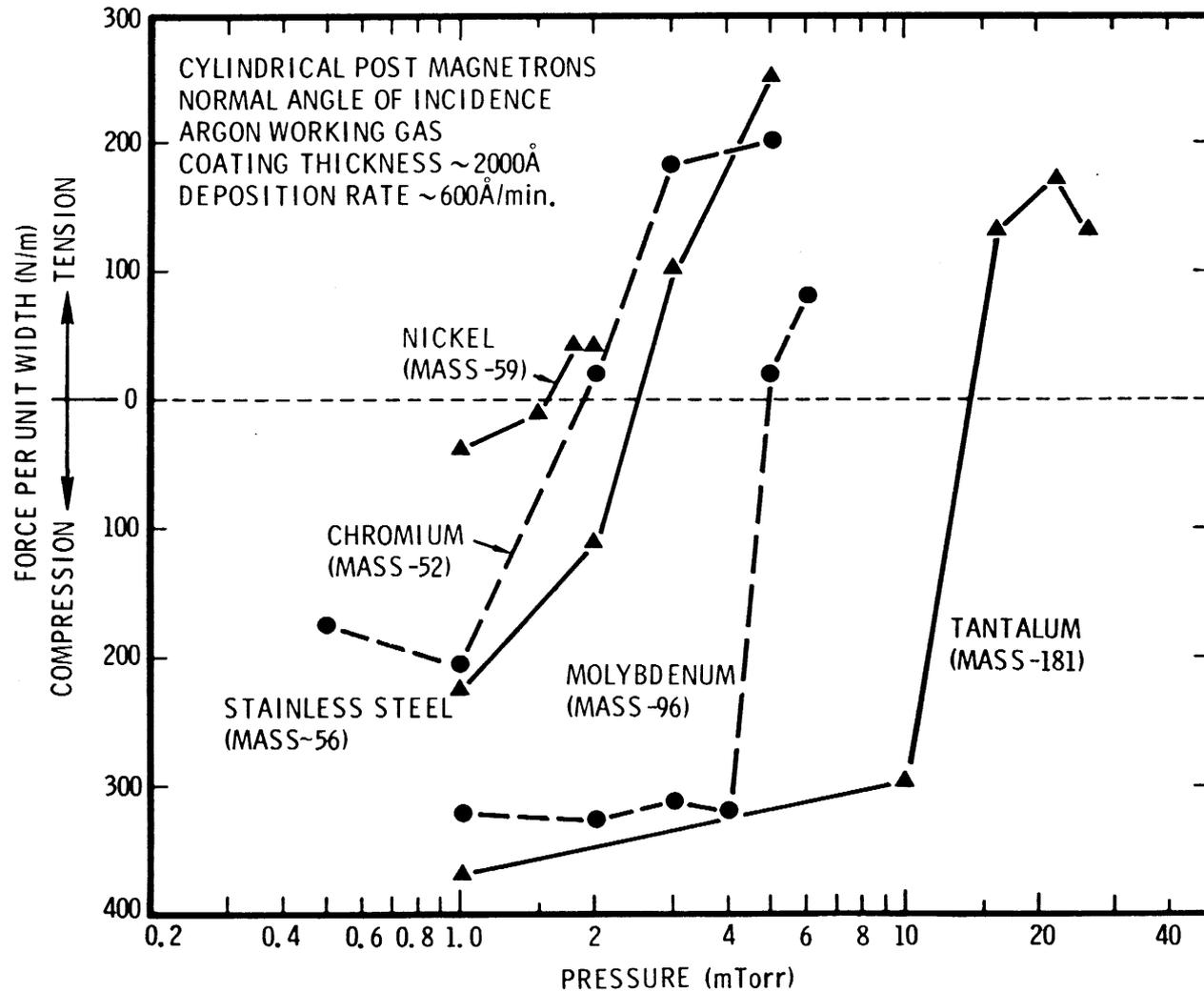
Intrinsische Spannungen sind eine direkte Folge der Schichtstruktur und der Depositionsbedingungen.



- Zugspannung
- Druckspannung
- Variabel



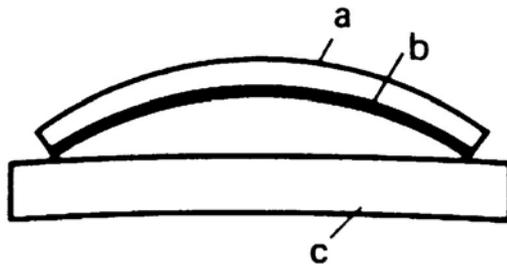
# Intrinsische Spannungen: Sputtern



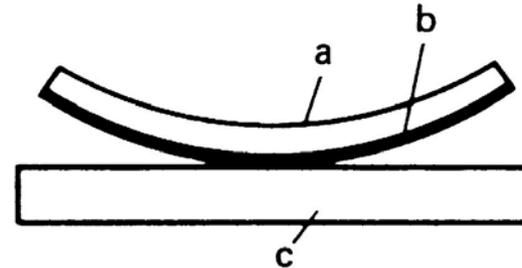
# Spannungsmessung: Grundlagen

## Gekrümmtes Substrat:

Zugspannung



Druckspannung



Gesamtspannung  $\sigma$  einer dünnen Schicht:

$$\sigma = \frac{E_s d_s^2}{6(1 - \nu_s) d_F} \left( \frac{1}{R_{s1}} - \frac{1}{R_{s2}} \right)$$

- a) Substrat
- b) Schicht
- c) Referenzplättchen

$E_s$  ... E-Modul Substrat

$\nu_s$  ... Poisson-Konstante Substrat

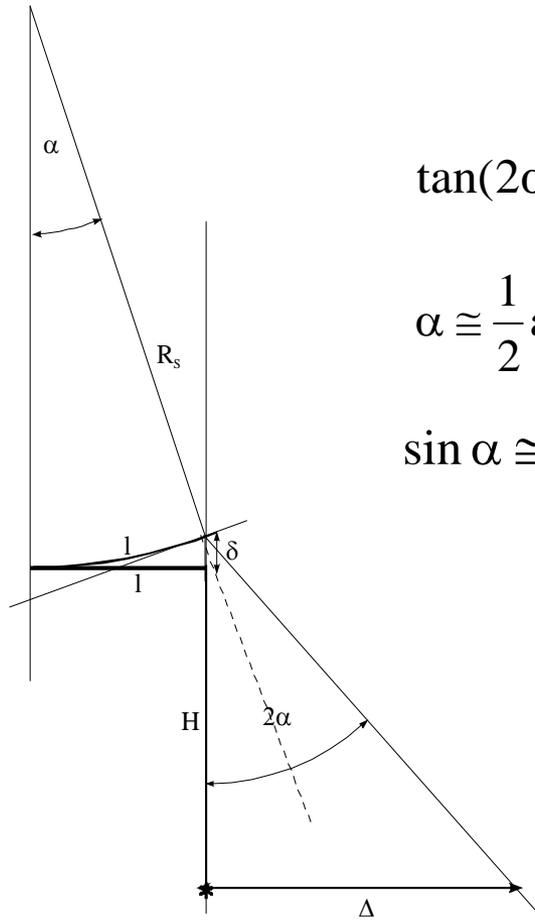
$d_s$  ... Dicke des Substrates

$d_F$  ... Schichtdicke

$R_{s1}, R_{s2}$  ... Krümmungsradius vor bzw. nach der Beschichtung

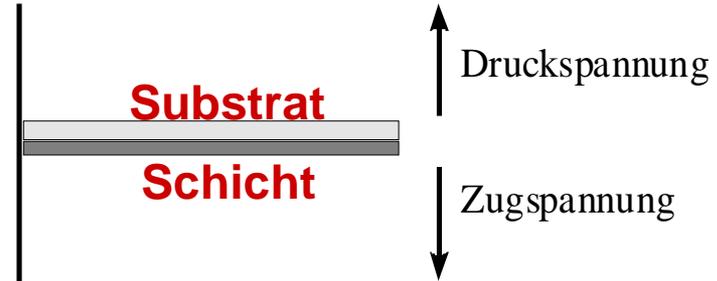
# Spannungsmessung: Biegearm (Cantilever)

## Geometrie:



$$\tan(2\alpha) \cong \frac{\Delta}{H}$$
$$\alpha \cong \frac{1}{2} a \tan\left(\frac{\Delta}{H}\right)$$
$$\sin \alpha \cong \alpha = \frac{1}{R_s}$$

## Prinzip:



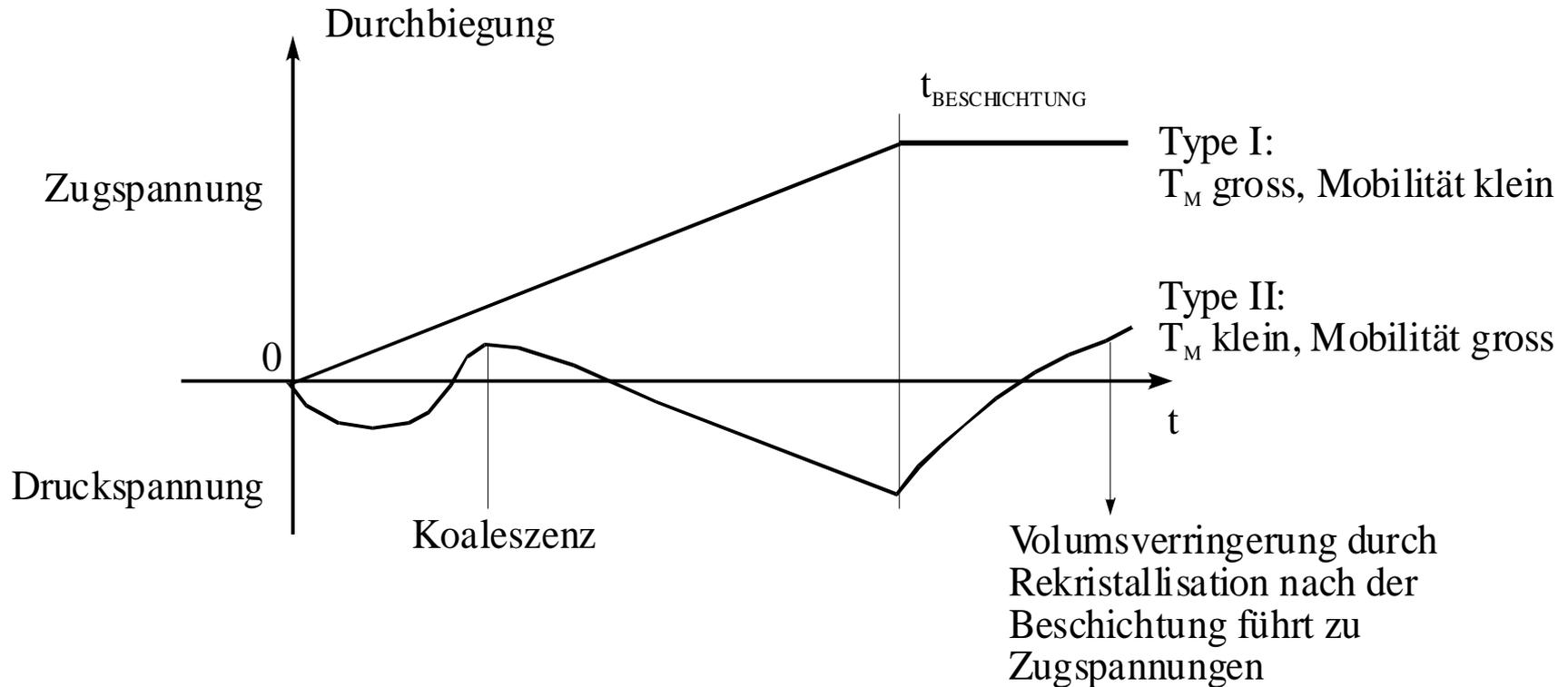
$$R_s \cong 2 \frac{1}{a \tan\left(\frac{\Delta}{H}\right)} \cong \frac{2lH}{\Delta}$$

## Vernachlässigungen und Voraussetzungen:

- a) laterale Versetzung des Biegebalkens
- b) vertikale Versetzung des Biegebalkens ( $\delta$ )
- c) geringe Verhältnisse  $\Delta/H$

# Spannungen und Schichtwachstum I

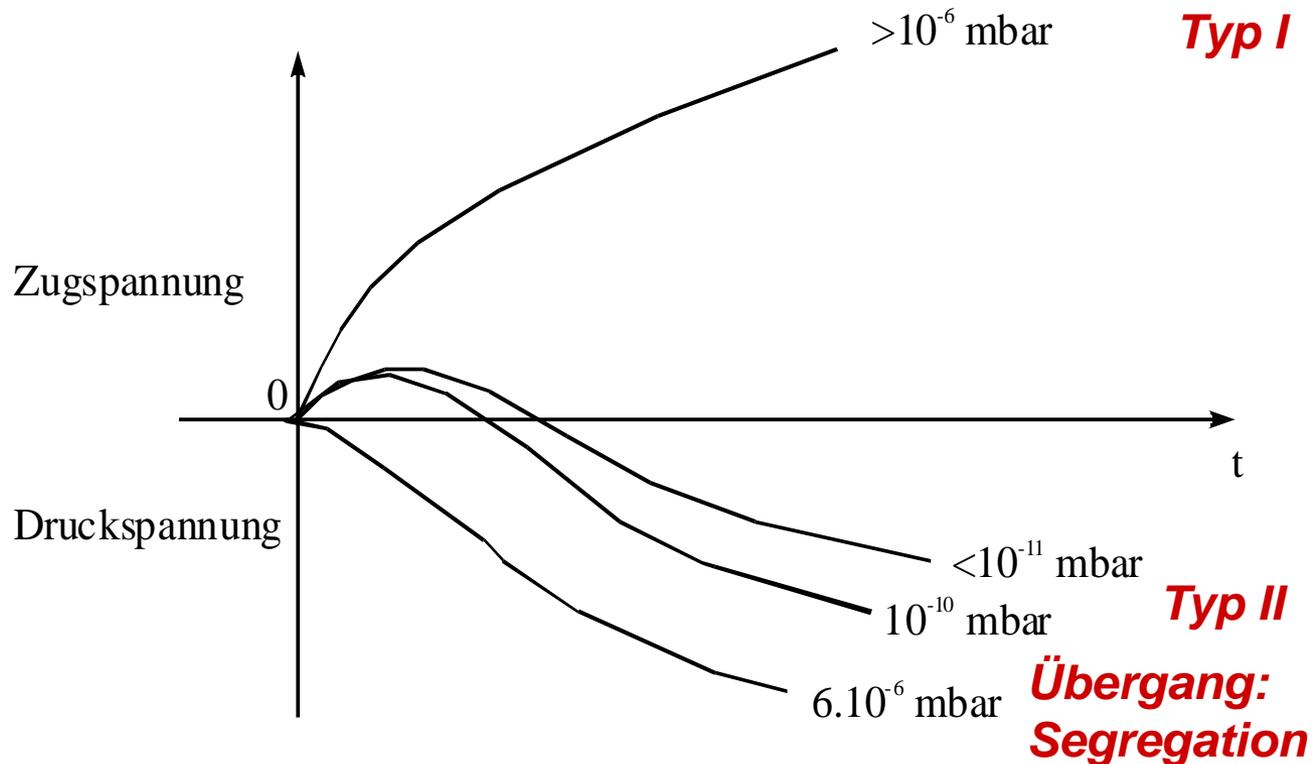
## In-Situ-Messungen mittels Biegearmmethode:



***Einfluss der Schichtdicke auf  $\sigma_l$***

# Spannungen und Schichtwachstum II

## In-Situ-Messungen mittels Biegearmmethode: Aufdampfen von Al



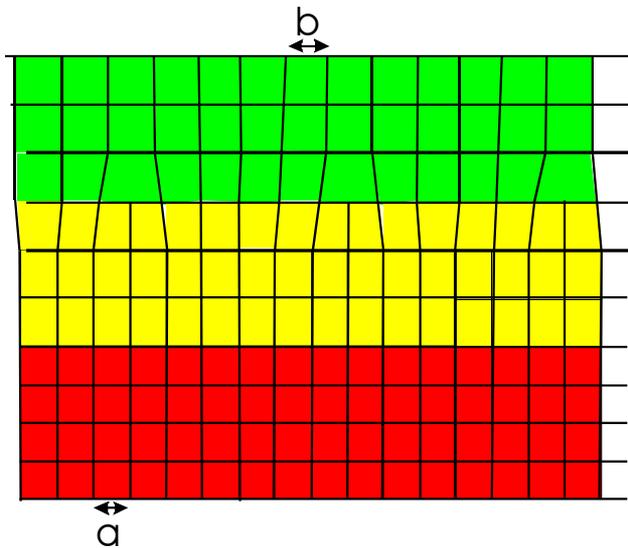
***Einfluss von Verunreinigungen im Restgas  
während des Aufdampfprozesses auf  $\sigma_t$***

# Gitterfehlanpassung und Selbstorganisation I

## Detaillierter Mechanismus:

Gitterfehlanpassung (Lattice Mismatch)  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{a - b}{a} \cdot 100[\%]$$



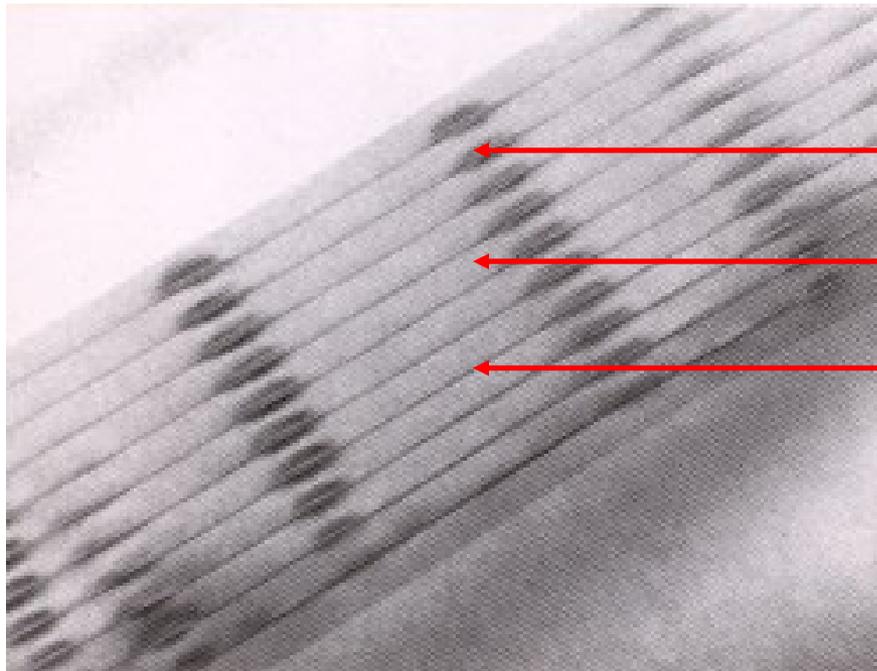
Schicht, Gitterkonstante b

Pseudomorphe Übergangszone

Substrat, Gitterkonstante a

# Gitterfehlanpassung und Selbstorganisation II

**Beispiel: Selbstorganisation von Inselpositionen in InAs/GaAs Multilayern:**



**Quantenpunkt**

**Zwischenlage**

**Stranski-Krastanov  
Benetzungsfilm**

**Die Gitterverzerrung in der Zwischenlage erzeugt einen bevorzugten Nukleationsplatz direkt über einer Insel.**

# Röntgenographische Spannungsmessung

## Prinzip:

**Messung der globalen Verzerrung der Elementarzelle durch:**

- + Zwischengitteratome
- + Fehlstellen

## Vorteile:

- + Zerstörungsfrei
- + In Situ möglich

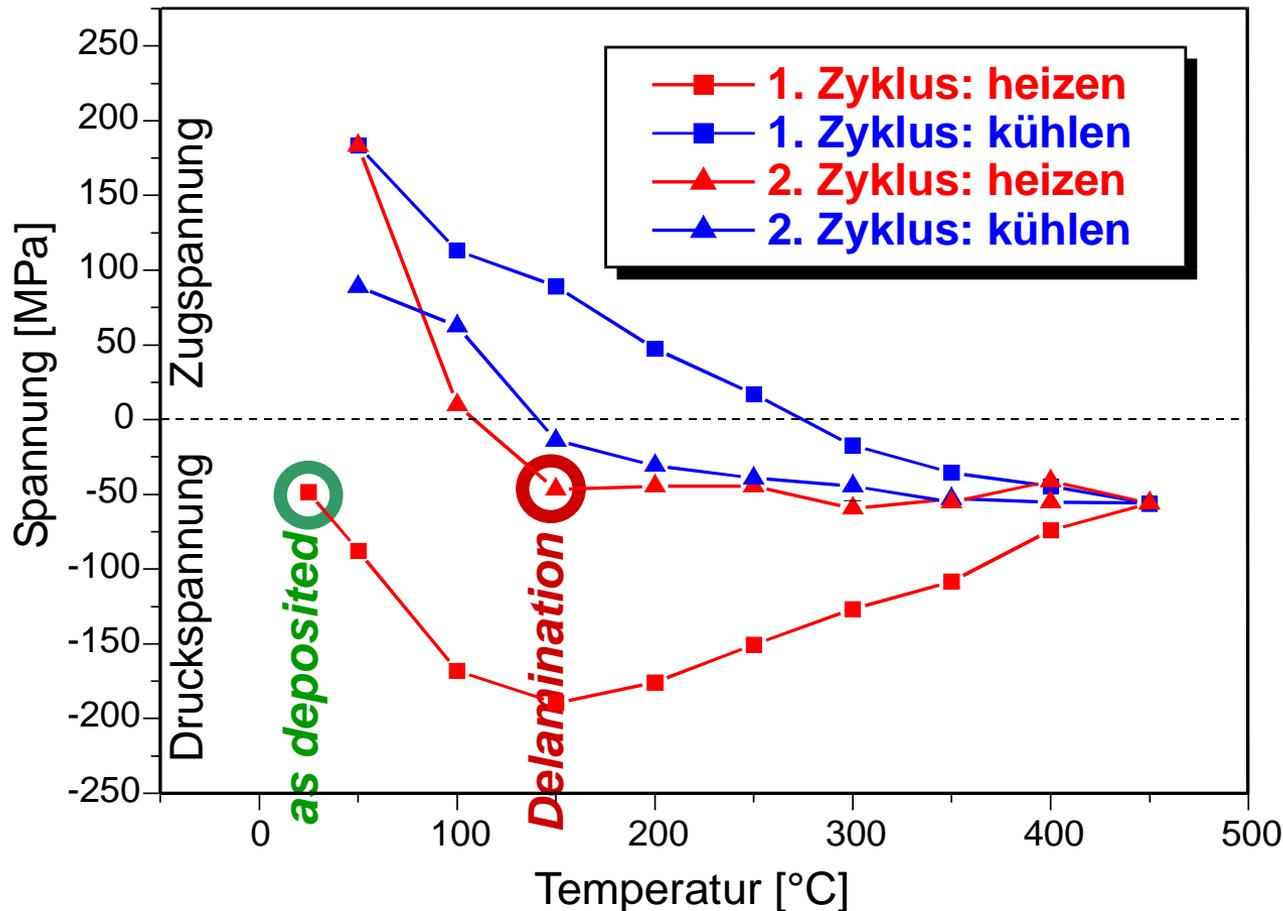
## Nachteile:

**Zahlreiche Einflussgrößen:**

- + Gitterdefekte
- + Versetzungen
- + Verunreinigungen
- + Fremdphasen

# Beispiel: Temperaturvariation

## Röntgenographische Spannungsmessung bei variabler Temperatur:



**Kohlenstoff-**  
**substrat be-**  
**schichtet mit**  
**4  $\mu\text{m}$  Cu**

$$\alpha_{\text{Cu}} = 16 \text{ ppm/K}$$
$$\alpha_{\text{C}} = 2 \text{ ppm/K}$$