

# Vorlesung Werkstofftechnik

## - Vorlesung Reale Strukturen und Eigenschaften

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg<sup>id</sup>

Hochschule Magdeburg-Stendal

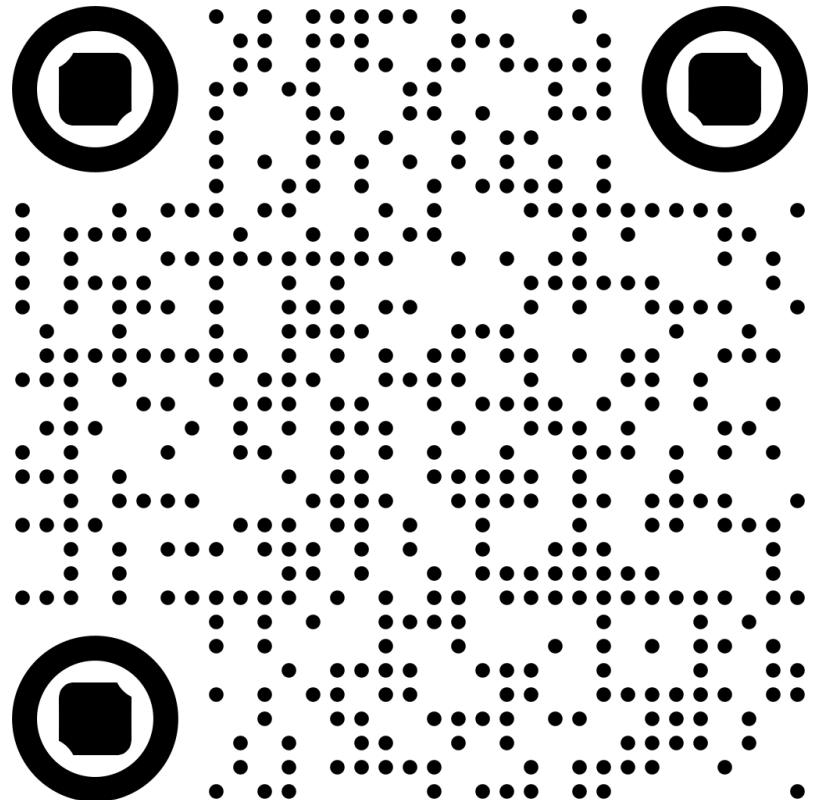
Kontakt: [christian.willberg@h2.de](mailto:christian.willberg@h2.de)

Teile des Skripts sind von  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Häberle  
übernommen



# Inhalte

- Fehler in Kristallen
- Plastizität
- Grundlagen mechanischer Eigenschaften



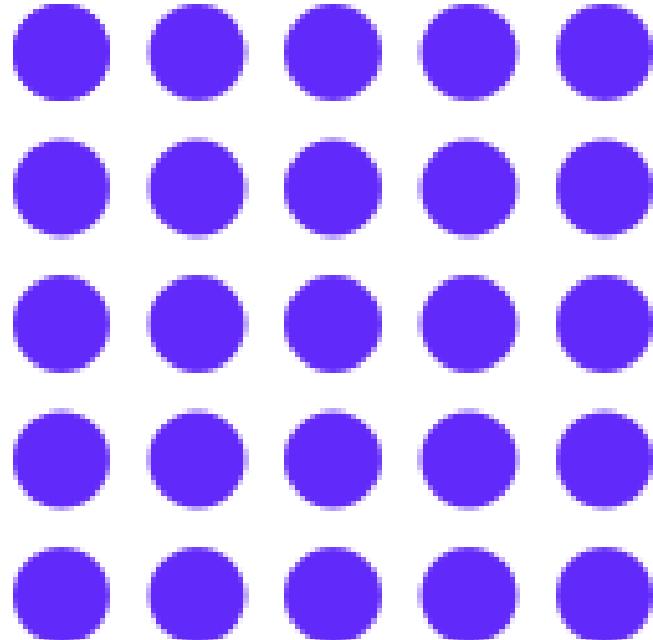
# Realstruktur von Kristallen

## Gitterbaudefekte

- Nulldimensionale Fehlstellen (Punktdefekte): Leerstellen, Zwischengitteratom, Zwischengitter-Fremdatome, Substitutions-Fremdatom
- Eindimensionale Fehlstellen (Liniendefekte): Versetzungen
- Zweidimensionale Fehlstellen (Flächendefekte): Stapelfehler, Korngrenzen, Subkorn-grenzen, Phasengrenzen

## Nulldimensionale Fehlstellen

- Was gibt es für mögliche Varianten?



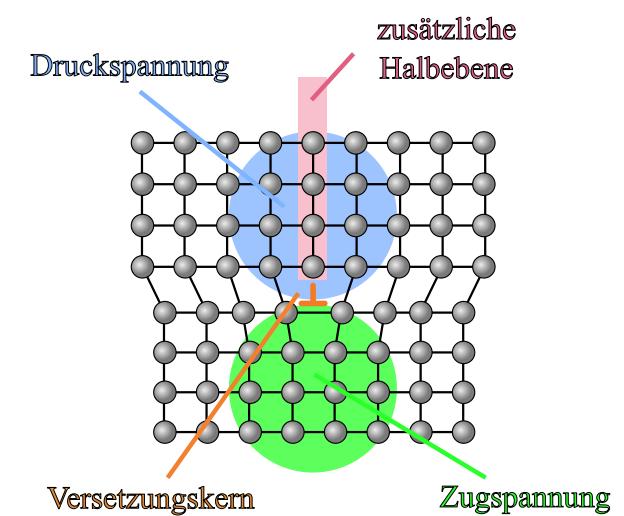
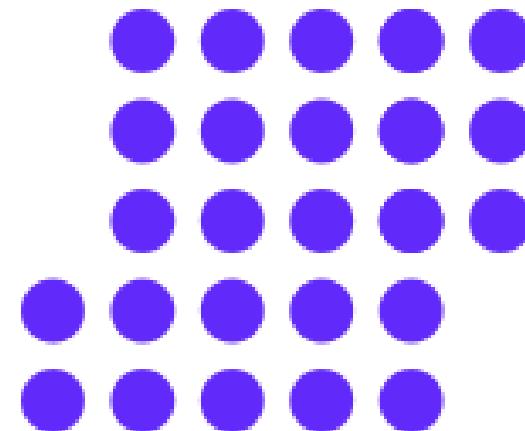
# Fremdatome

- Wie lassen sich Fremdatome nutzen?

# Versetzungen

Versetzungen entstehen

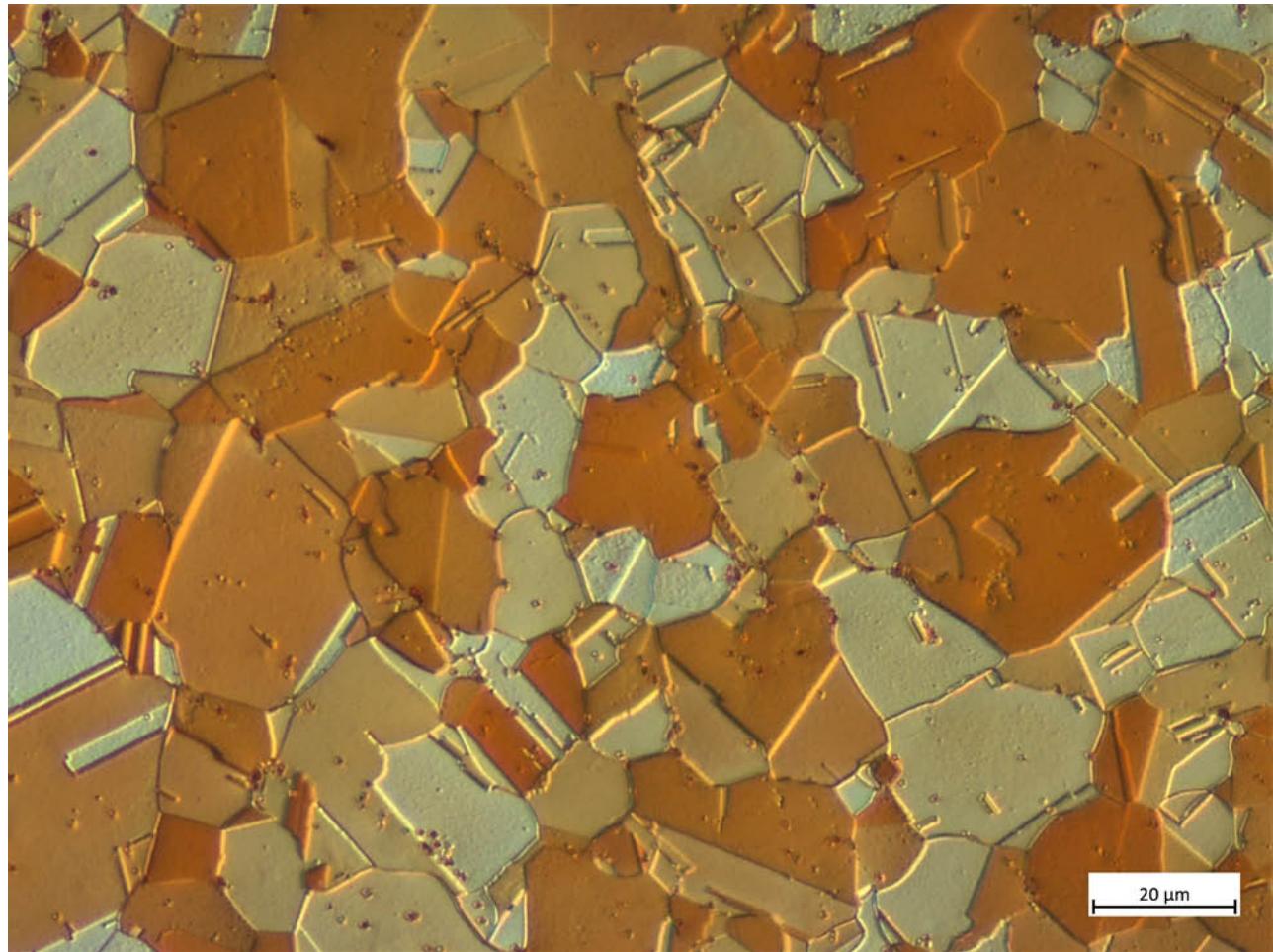
- beim Kristallwachstum
- aufgrund von Eigenspannungen
- durch plastische Verformungen



# Zweidimensionale Fehlstellen - Korngrenzen

- Korngrenzen
- Phasengrenzen
- Subkorngrenzen

Skript



# Plastizität

Gut oder Schlecht



# Beispiele

## Hohe Plastizität:

- Knete
- feuchter Ton
- Metalle und Metallegierungen mit geeignetem Atomgitter:
  - glühender Stahl beim Schmieden
  - Kaltumformung von Blechen

## Geringe Plastizität:

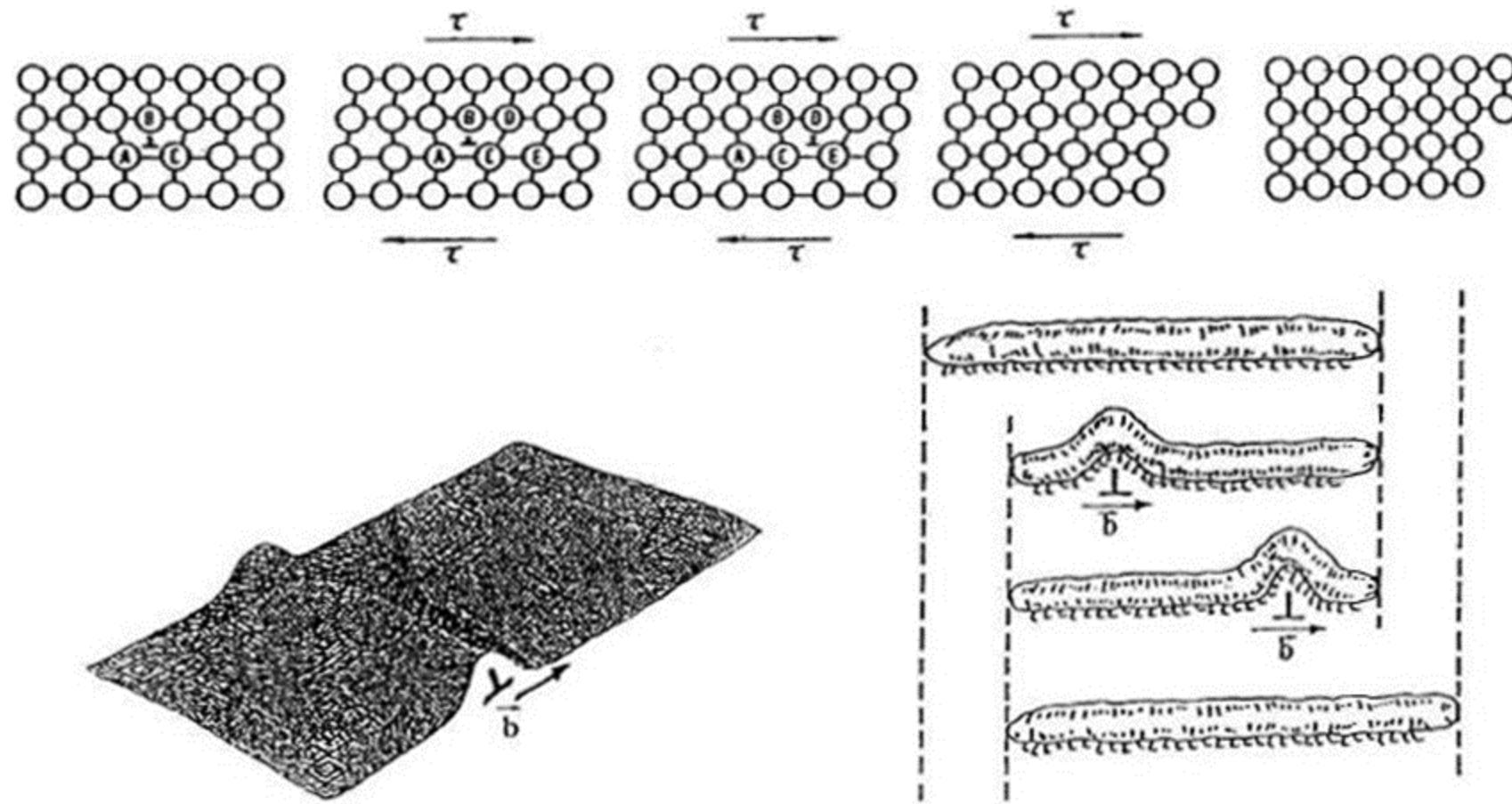
- Gummi
- Keramik
- Faserkunststoffverbunde (Epoxid-Glasfaser oder Epoxid-Kohlefaser)

## Plastizität - Einkristall

Die plastische Verformung eines Kristalls vollzieht sich im Wesentlichen durch Abgleiten von Atomschichten entlang bestimmter kristallographischer Ebenen und Richtungen unter Einwirken von Schubspannungen.

- Gleitsystem besteht aus Gleitebene und Gleitrichtung
- kritische Schubspannung ( $\tau_{K_r} \approx G/10$  - Abschätzung oder theoretische Schubfestigkeit)
- Realität um Faktor  $\sim 100$  niedriger durch Versetzungen

# Bild



# Plastische Verformung des polykristallinen Werkstoffs

- Mikro- und Makroplastizität
  - Plastische Verformung beginnt bei "ungünstigen" Orientierungen
- Korngrenzen
  - Barriere für Versetzungsbewegung
  - bei hohen Temperaturen können Korngrenzen gleiten (Kriechen)
  - gezielte Fertigung kann durch Korngrenzen Zähigkeit erhöhen
- Heterogenität
  - Mehrphasigkeit
  - inhomogene Verteilung der Spannungen und Verformungen
- Anisotropie

# Polykristall Plastizität

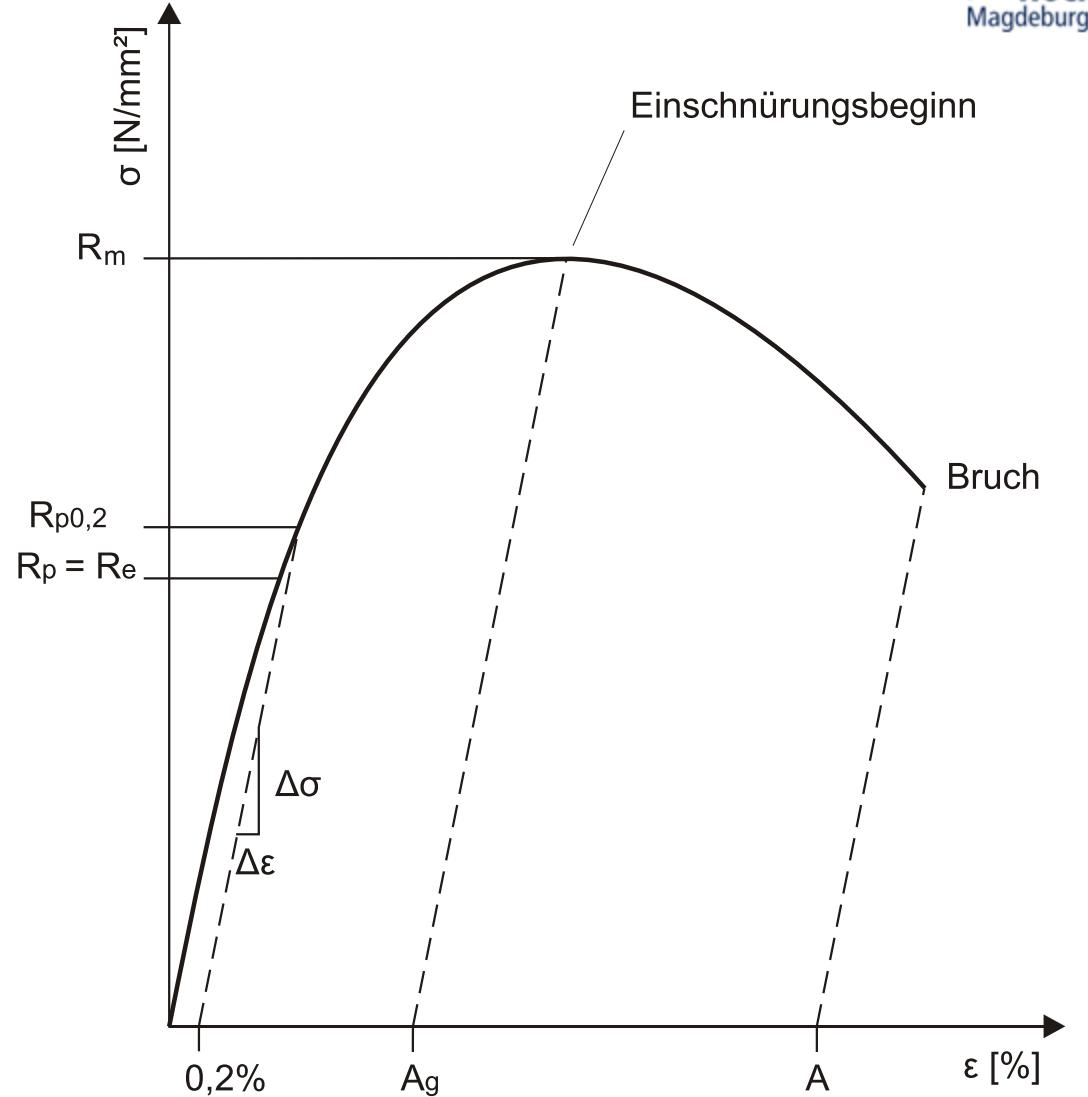
Beispiel aus einer Simulation

# Konzept Spannung - Dehnung

- Geometriefreie Kennwerte
- Diskussion: Wie kann man einen Kennwert bestimmen, der nur durch das Material bestimmt ist?
- Beispiel: Dichte

# Streckgrenze

- $R_m$  - Zugfestigkeit
- $R_e$  - Streckgrenze
- Dehngrenze oder  
Elastizitätsgrenze  $R_{p0,2}$ 
  - Belastung und dann  
Entlastung 0.2% Dehung  
verbleibt
- Dehngrenze wird als  
Ersatzstreckgrenze verwendet

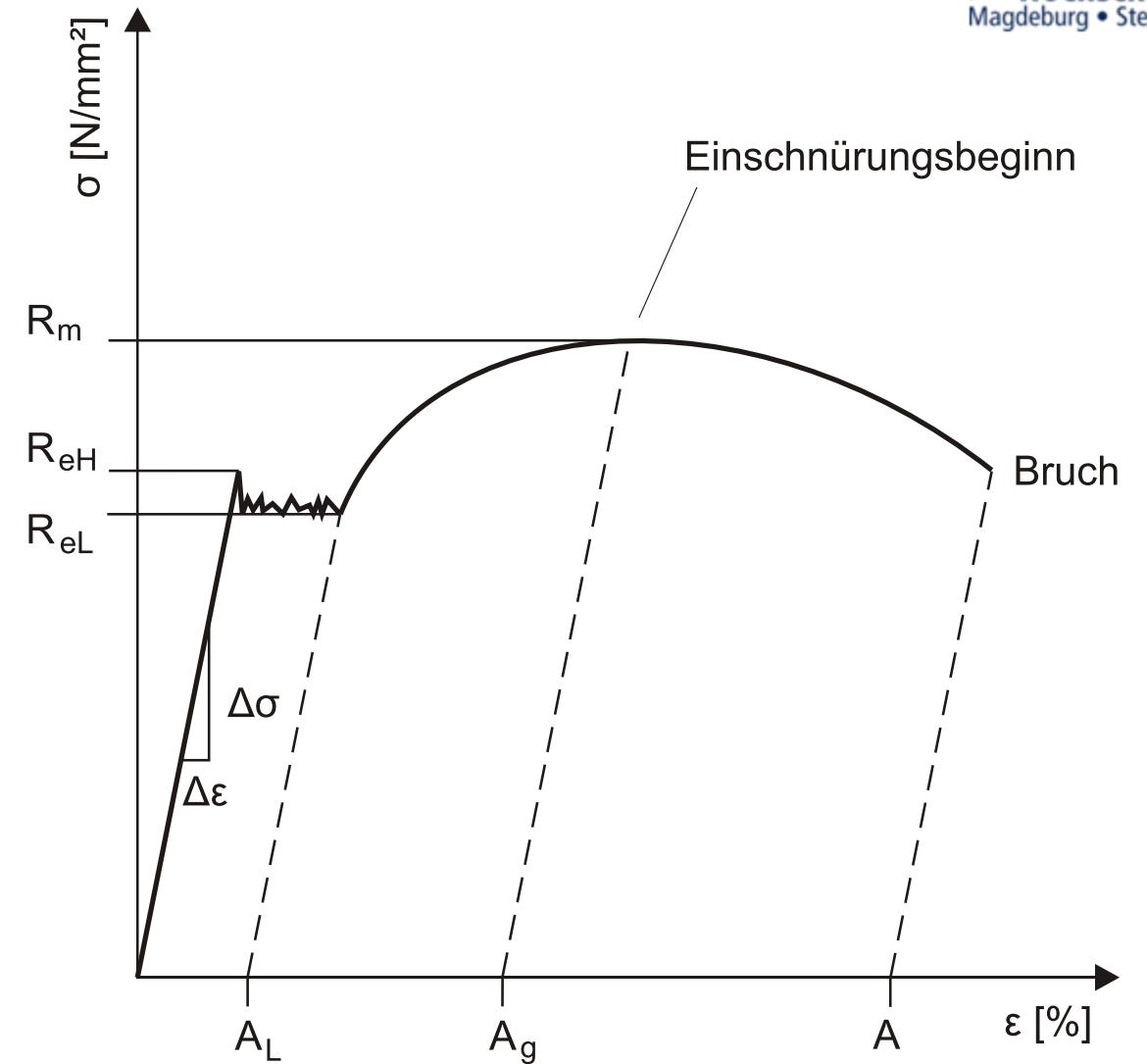


# Streckgrenze

- obere Streckgrenze  $R_{eH}$
- untere Streckgrenze  $R_{eL}$

gezackter Bereich:  
Lüdersbereich

[Beispielvideo](#)



# Plastizität - Umformen

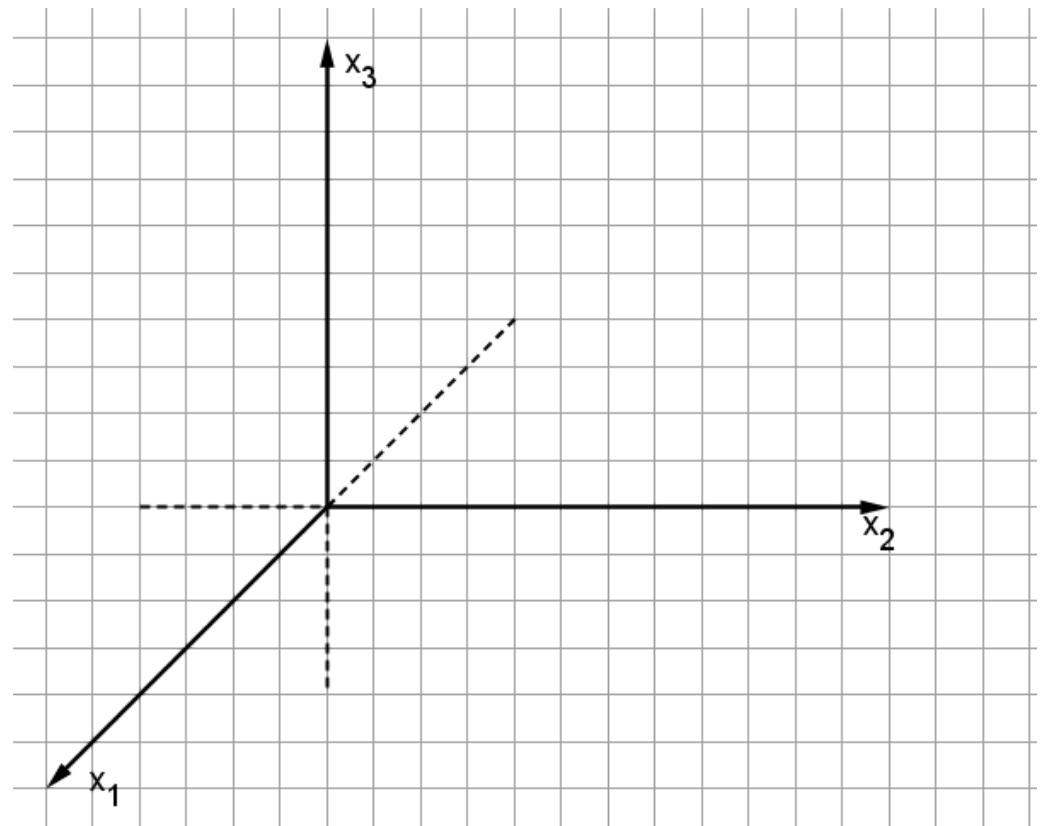
- Tiefziehen Prinzip
- Tiefziehen Real

# Werkstoffeigenschaften

Was sind Werkstoffeigenschaften?

# Symmetrien

- isotropie
- transversale isotropie
- orthotropie
- ...
- anisotropie



# Mechanische Eigenschaften

- die **reversible** Verformung, bei der sofort bzw. eine bestimmte Zeit nach dem Einwirken der äußeren Belastung der verformte Werkstoff seine ursprüngliche Form zurückhält: elastische und viskoelastische Verformung;
- die **irreversible (bleibende)** Verformung, bei der die Formänderung auch nach dem Einwirken der äußeren Belastung erhalten bleibt: plastische und viskose Verformung;
- der Bruch, d.h. eine durch Entstehen und Ausbreiten von Rissen bewirkte Trennung des Werkstoffes.

# Simulationsbeispiel

[External Link](#)

# Elastizität

- reversibel, energieerhaltend
- Hooksches Gesetz 1D

Normalspannung  $\sigma = E\varepsilon$

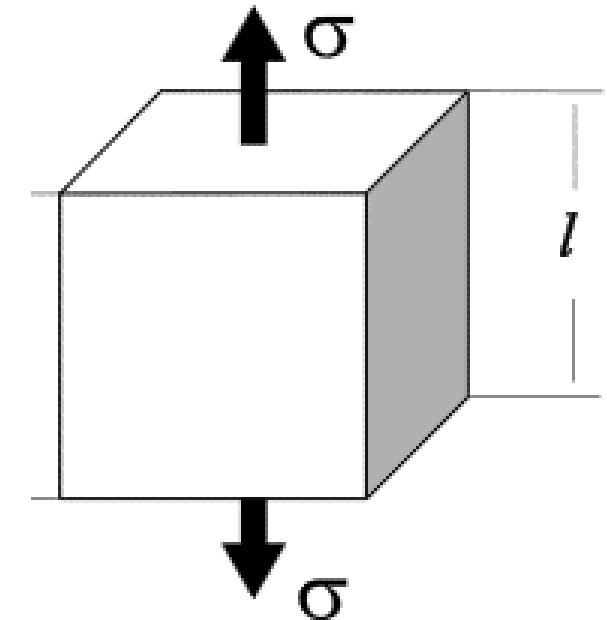
Schubspannung  $\tau = G\gamma$

# Grundlagen

- Normaldehnung [-]  
 $\varepsilon_{mechanisch} = \frac{l-l_0}{l_0}$
- Normalspannung  $\left[ \frac{N}{m^2} \right], [Pa]$

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon$$

E - Elastizitätsmodul, Young's modulus  $\left[ \frac{N}{m^2} \right]$

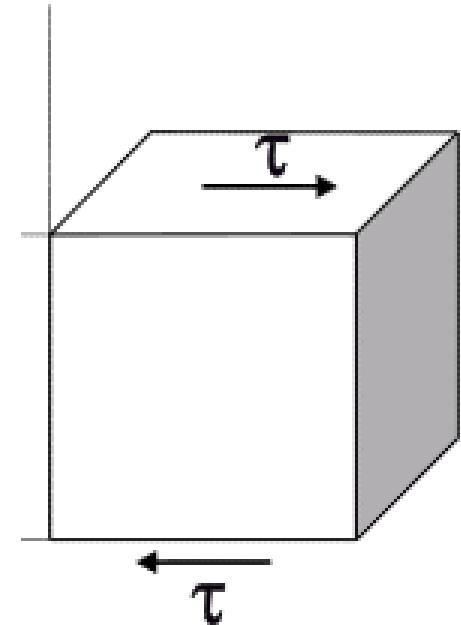


.



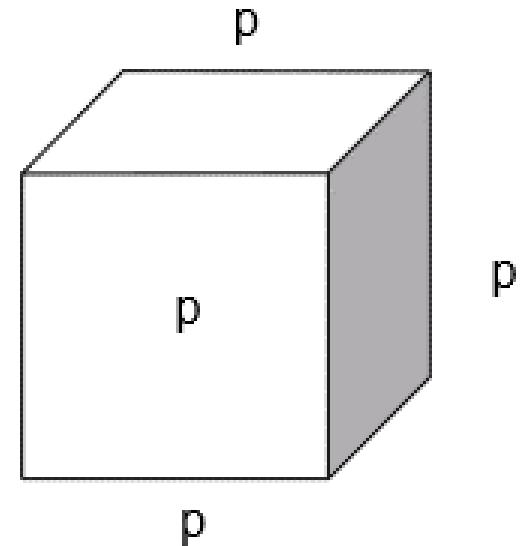
# Grundlagen

- Schubdehnungen [-]  
$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( \frac{u_x}{l_0} + \frac{u_y}{b_0} \right) = \frac{\gamma}{2}$$
- Schubspannung  $\left[ \frac{N}{m^2} \right], [Pa]$   
$$\tau = \frac{F_s}{A} = G\gamma$$
- Normal- und Schubspannungen sind nicht kompatibel;  
daher die Vergleichsspannungen -> Technische  
Mechanik
- G - Schub-, Gleitmodul, Shear modulus  $\left[ \frac{N}{m^2} \right]$



# Grundlagen

- Querkontraktionszahl [-]
- $\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$ 
  - für homogene Werkstoffe  $0 \leq \nu \leq 0.5$
  - für heterogene Werkstoffe sind anderen Konstellationen denkbar
- Kompressionsmodul  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
- Schubmodul  $K = \frac{E}{2(1+\nu)}$



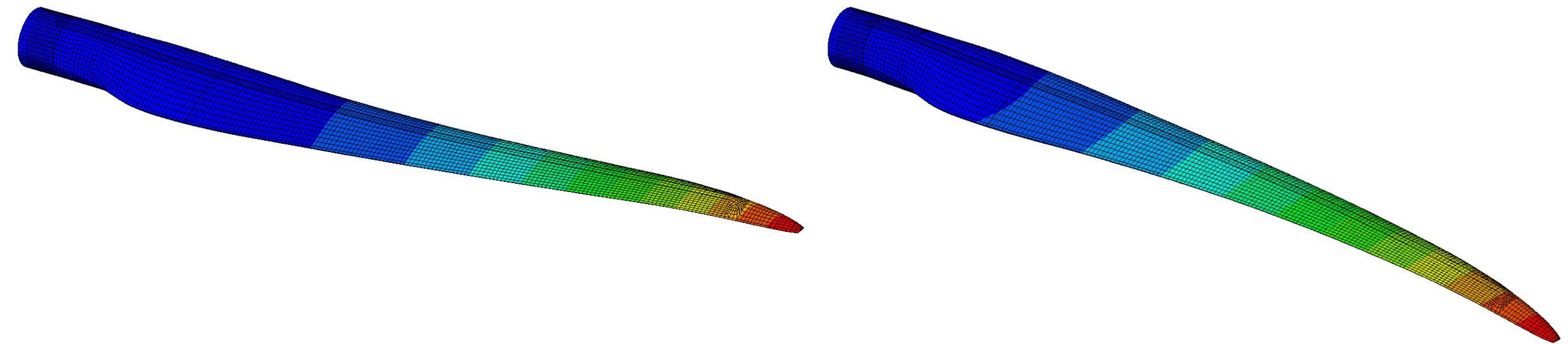
# Werkstoffbeispiele

Werkstoff	E [GPa]	G [GPa]	$\nu[-]$
Stahl unlegiert	200	77	0.30
Titan	110	40	0.36
Kupfer	120	45	0.35
Aluminium	70	26	0.34
Magnesium	45	17	0.27
Wolfram	360	130	0.35
Gusseisen mit lamellarem Graphit	120	60	0.25
Messing	100	35	0.35

# Steifigkeiten

- Wie Materialeigenschaften den Steifigkeiten zusammen?



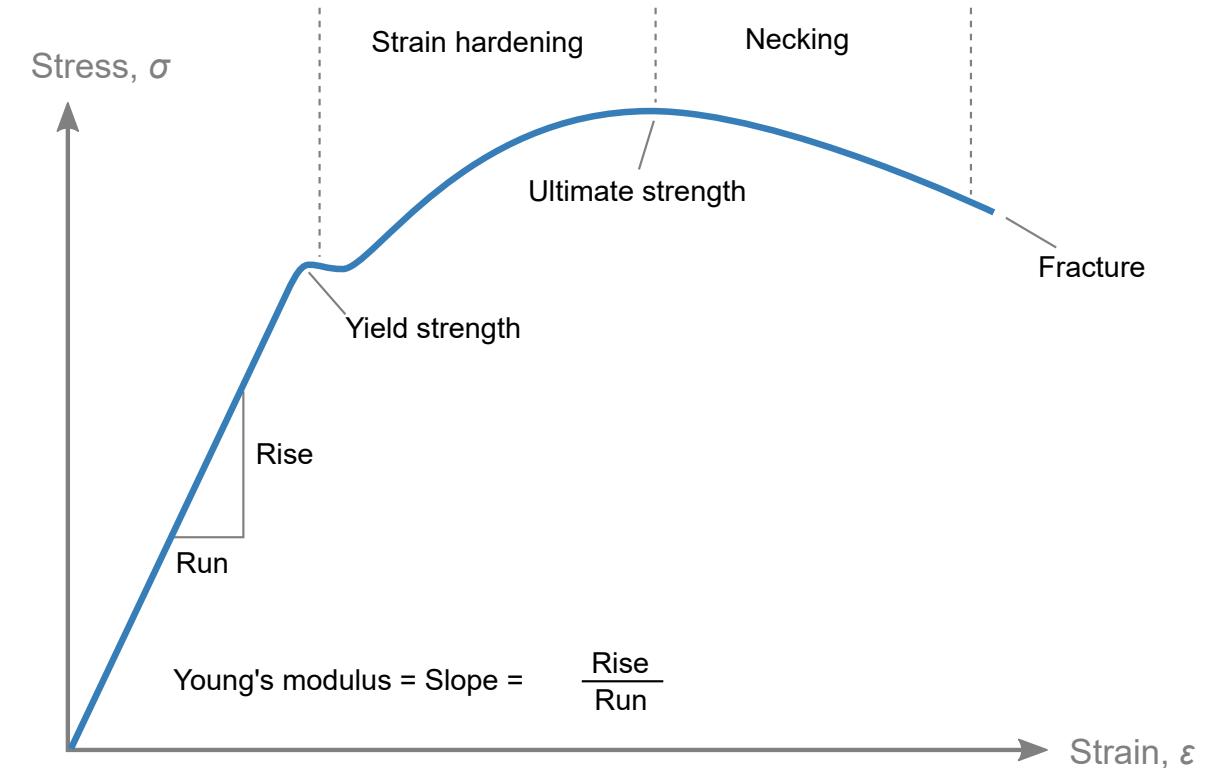


# Festigkeit

Die Festigkeit eines Werkstoffes beschreibt die Beanspruchbarkeit durch mechanische Belastungen, bevor es zu einem Versagen kommt, und wird angegeben als mechanische Spannung [ $N/m^2$ ]. Das Versagen kann eine **unzulässige Verformung** sein, insbesondere eine **plastische (bleibende) Verformung** oder auch ein **Bruch**.

Wichtig: Festigkeit  $\neq$  Steifigkeit

# Plastische Versagen



# Viskoses Verhalten

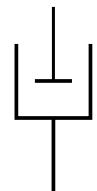
- reversibel
- zeitabhängig

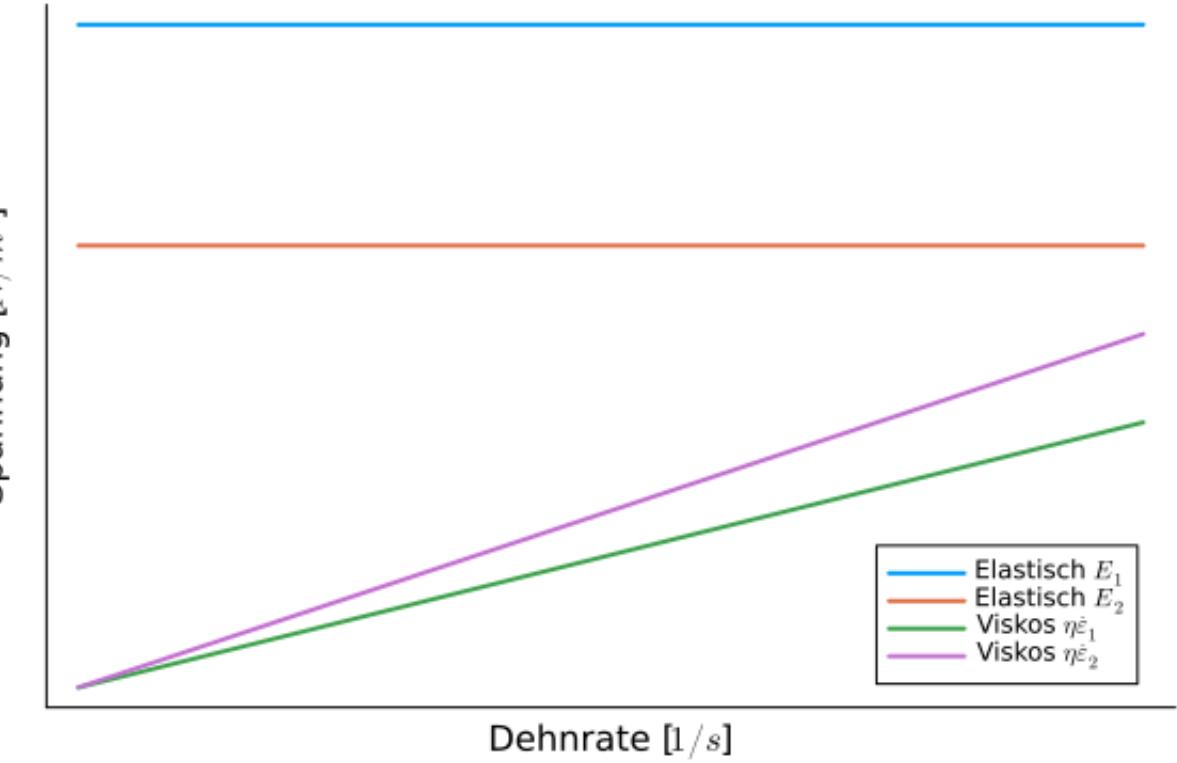
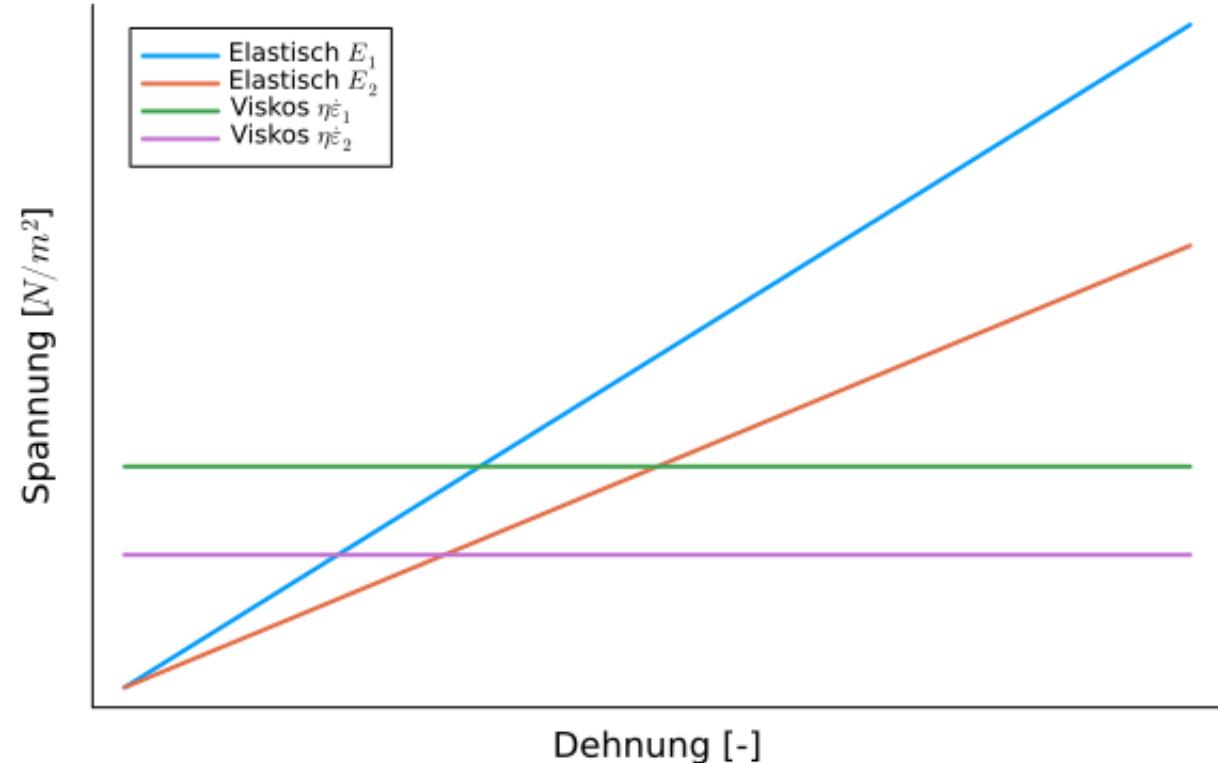
Federmodell  $\sigma = E\epsilon$

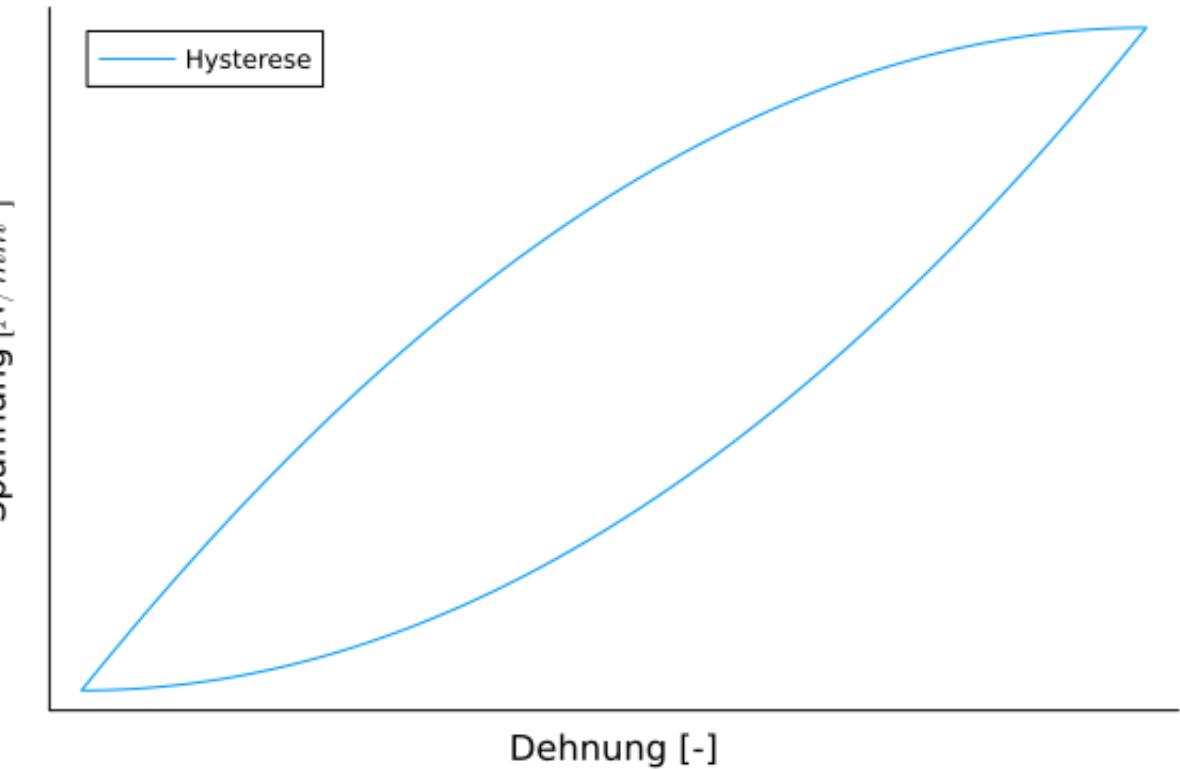
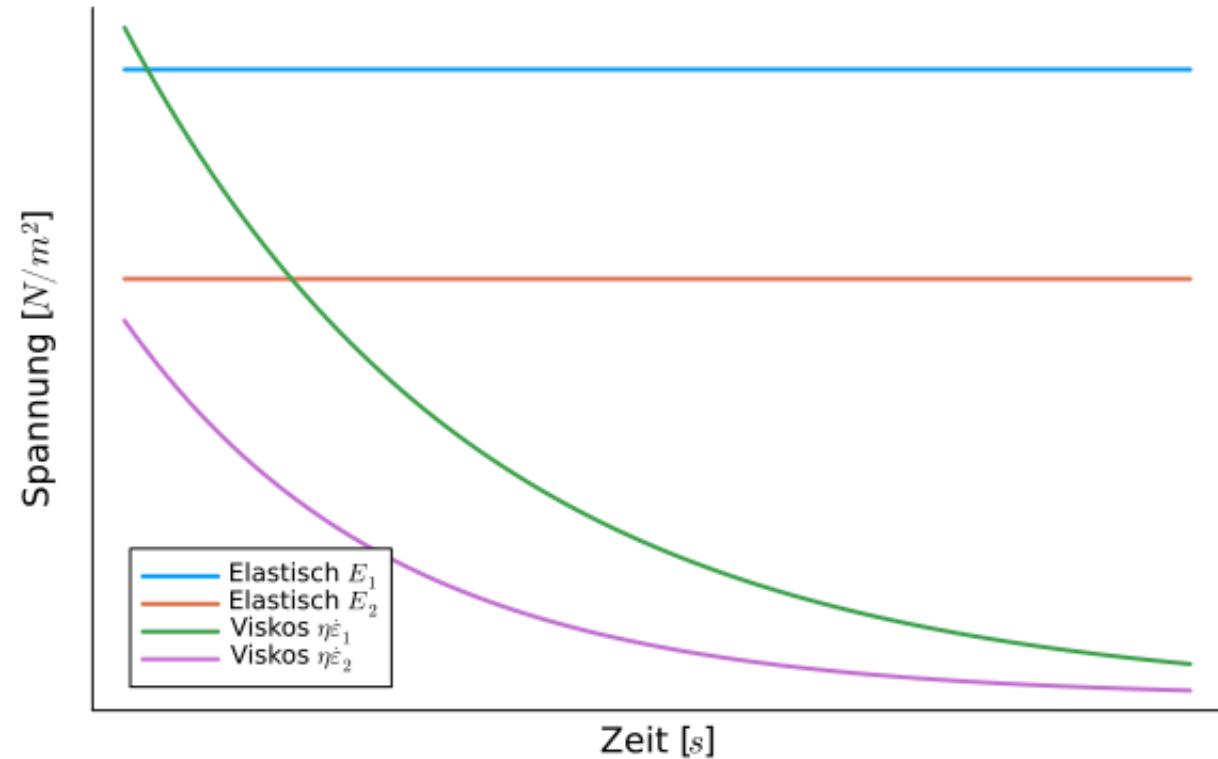
- Elastischer Anteil
- Dargestellt durch Federlemente

Dämpfer  $\sigma = \eta \dot{\epsilon} = \eta \frac{\partial \epsilon}{\partial t}$

- Viskoser Anteil
- Dargestellt durch Dämpferelemente







# Wärmedehnung

$$\varepsilon_{thermisch} = -\alpha \Delta T$$

Wärmeausdehnungskoeffizientenmatrix

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

1D oder isotropisch

$$\varepsilon_{thermisch} = -\alpha \Delta T$$

| Beispiel -> Paraview

Symmetrie	Modell	Beispiele
Isotropie	$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$ und $\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 0$	Metalle, Kunststoffe
transversale Isotropie	$\alpha_{22} = \alpha_{33}$ und $\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 0$	Einzellage Faserverbund
Orthotropie Isotropie	$\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 0$	Mehrlagiger Faserverbund
Anisotropie	beliebige $\alpha_{ij}$	homogenisierte Betrachtung eines unysmmetrischen Mehrlagen-Verbunds

# Thermische Eigenschaften

- Bi-Metall Streifen
- Brücken
- Schienen
- Hochpräzisionsmessgeräten
- Schweißen, Löten, etc.
- ...

Kann u.a. zu thermischen Eigenspannungen, Verzug führen.

## Beispiel: Thermische Spannungen 1D

$$\sigma = E\varepsilon = E(\varepsilon_{mechanisch} + \varepsilon_{thermisch}) = E(\varepsilon_{mechanisch} - \alpha\Delta T)$$

| Durch eine Vordehung kann die Belastung auf ein Bauteil reduziert werden

## Beispiel: Thermische Längenänderung 1D

$$\Delta l = l_0\varepsilon_{mechanisch}$$

| Für freie eine Dehnung, d.h. es wirken keine Spannungen

$$0 = E\varepsilon = E(\varepsilon_{mechanisch} + \varepsilon_{thermisch}) = E(\varepsilon_{mechanisch} - \alpha\Delta T)$$

$$\varepsilon_{mechanisch} = \alpha\Delta T$$

$$\Delta l = l_0\varepsilon_{thermisch} = l_0\alpha\Delta T$$

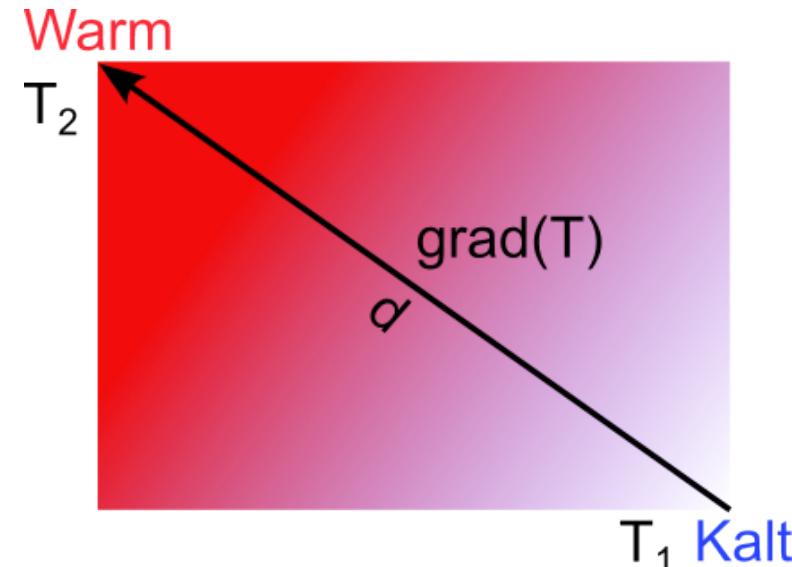
# Wärmeleitung

- auch Konduktion und Wärmediffusion
- $T_{hoch} \rightarrow T_{niedrig}$  (2. Hauptsatz der Thermodynamik).
- es geht keine Wärme aufgrund der Energieerhaltung (1. Hauptsatz) verloren.

## Wärmestrom [ $W$ ]

$$\dot{q} = -\lambda \text{grad}(T)$$

- $\text{grad}(T)$  ist der Gradient der Temperaturänderung  
 $\frac{\partial T}{\partial d x_i};$
- im linearen Fall  $\text{grad}(T) = \Delta T/d = \frac{T_2 - T_1}{d}$



$$\dot{\mathbf{q}} = -\boldsymbol{\lambda} \operatorname{grad}(T)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t}$$

- zeigt an das sich etwas ändert ->  $dt$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{bmatrix}$$

ist die Matrix der Wärmeleitfähigkeit.

### Sonderfälle

- wenn  $T_1 = T_2$  gibt es keine Leitung
- wenn  $\boldsymbol{\lambda} = 0$ ; perfekte Isolation und keine Wärmeleitung

Symmetrie	Modell	Beispiele
Isotropie	$\lambda_{11} = \lambda_{22} = \lambda_{33}$	Metalle, Kunststoffe
transversale Isotropie	$\lambda_{22} = \lambda_{33}$	Einzellage Faserverbund
Anisotropie	beliebige $\lambda_{ij}$	Mehrlagen Faserverbund

Beispiel -> Paraview

# Wärmeübergang

Übertragung der Wärme von einem Festkörper in ein Fluid oder Gas.

| Wichtig, wenn Maschinen gekühlt oder erwärmt werden sollen.

Wird durch den Wärmeübergangskoeffizient beschrieben  $\alpha_{Übergang}$ . Er hängt unter anderem von der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte und dem Wärmeleitkoeffizienten des wärmeabführenden sowie des wärmeliefernden Mediums ab.

$$\dot{q} = \alpha_{Übergang} A \Delta T$$

| Beispiel Wärmepumpe und Fußbodenheizung

## Spezifische Wärmekapazität

sagt aus wieviel Energie in Form von Wärme in einen Stoff "stecken" muss, um die Temperatur zu erhöhen.

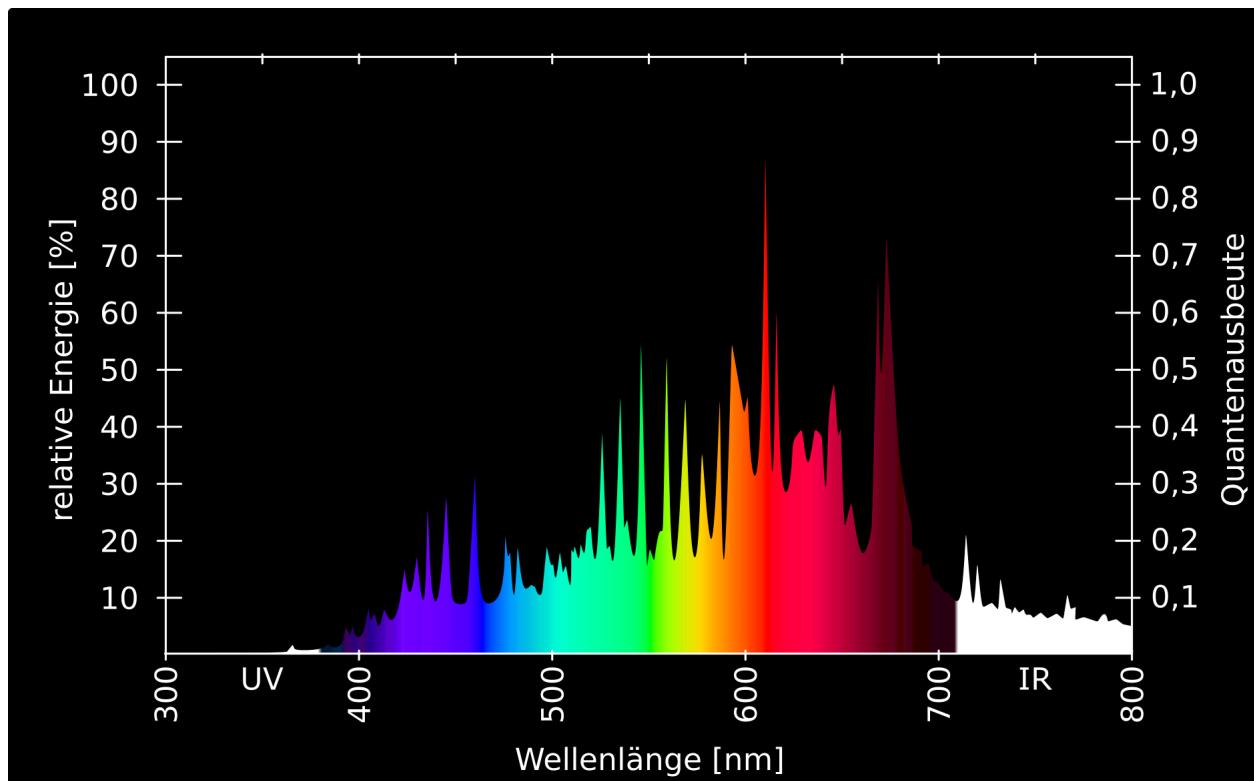
$$C_p = \frac{\Delta q}{m\Delta T}$$

# Wärmestrahlung

$$\dot{q} = \epsilon_{Emissionsgrad} \sigma_{Stefan-Boltzmann} A T^4$$

Emissiongrad  $\epsilon_{Emissionsgrad}$  liegt zwischen 0 (perfekter Spiegel) und 1 (idealer Schwarzer Körper) und ist in Teilen materialabhängig.

nutzbar für Spektralanalysen, um die Zusammensetzung von Werkstoffen zu bestimmen.



# Spezielle Temperaturen

## Phasenübergangstemperatur

Temperatur wo ein Phasenübergang in einer Kristallstruktur stattfindet (siehe [Phasendiagramme](#)). Wird maßgeblich durch beigesetzte Stoffe beeinflusst (siehe [Legierungen](#))

## Schmelztemperatur

Als Schmelztemperatur bezeichnet man die Temperatur, bei der ein Stoff vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht.

## Siedetemperatur

Temperatur des Phasenübergangs von flüssig zu gasförmig. Für Schmierstoffe ggf. relevant.

## Curie Temperatur

Nach Pierre Curie benannt. [Bezeichnet](#) die Temperatur, bei deren Erreichen ferromagnetische bzw. ferroelektrische Eigenschaften eines Materials vollständig verschwunden sind, so dass sie oberhalb nur noch paramagnetisch bzw. paraelektrisch sind.