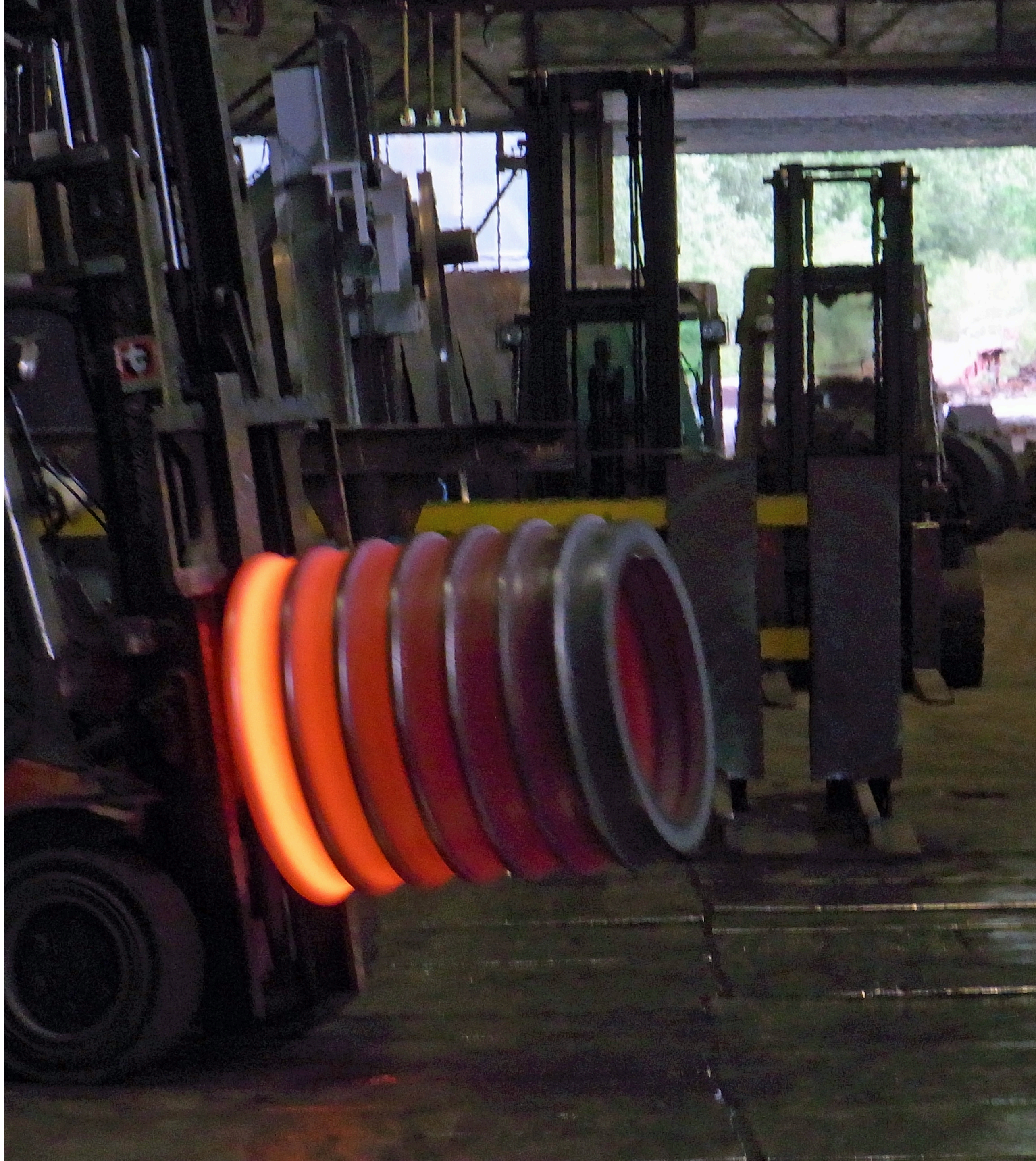
Werkstoffeigenschaften

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg
Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de

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



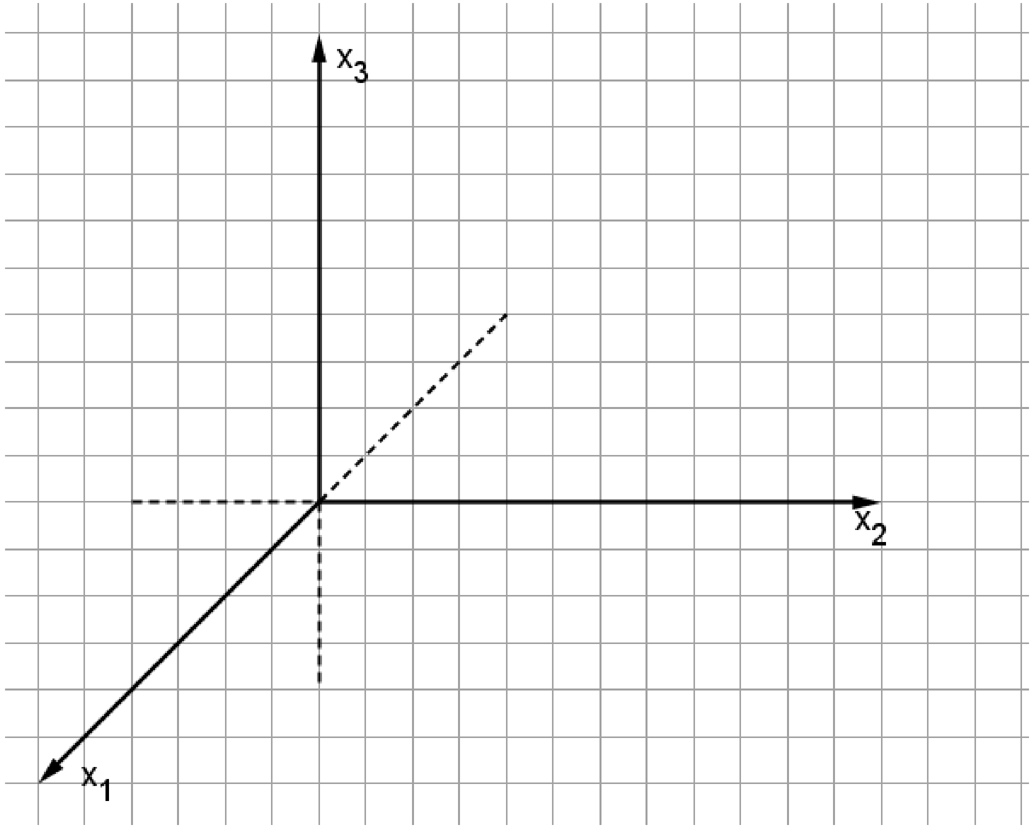
Inhalte

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 zurückerhält: 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.

Elastizität

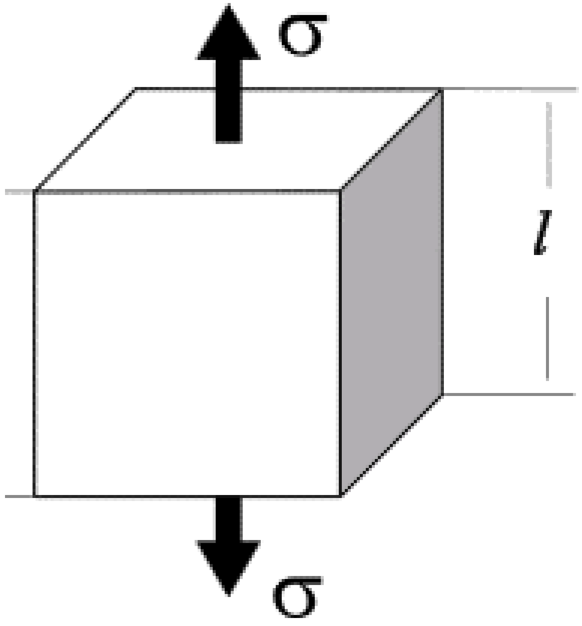
- reversibel, energieerhaltend
- Hooksches Gesetz 1D

  Normalspannung $\sigma = E\varepsilon$

  Schubspannung $\tau = G\gamma$

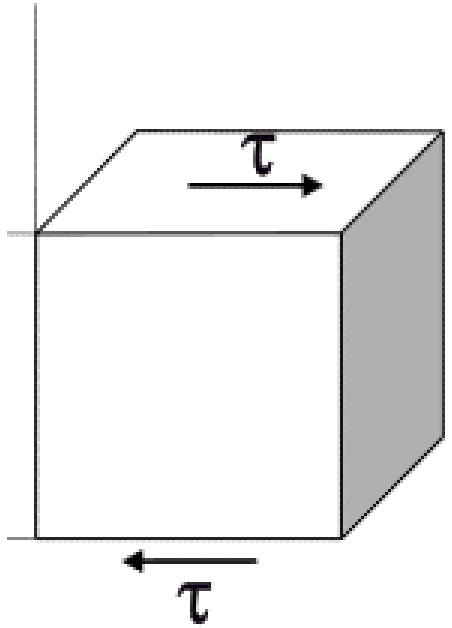
Grundlagen

- 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 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$\



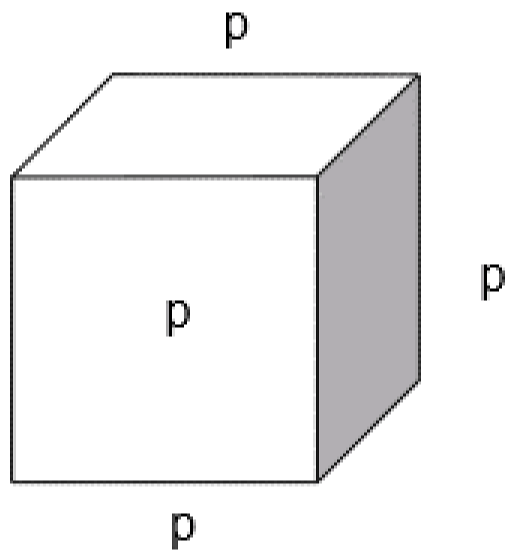
Grundlagen

- Schubdehnungen [-]
  $\varepsilon = \frac{1}{2}(\frac{u_x}{l_0} + \frac{u_y}{b_0}) = \frac{\gamma}{2}$
- 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 Mechnanik
- 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?

Bildreferenz

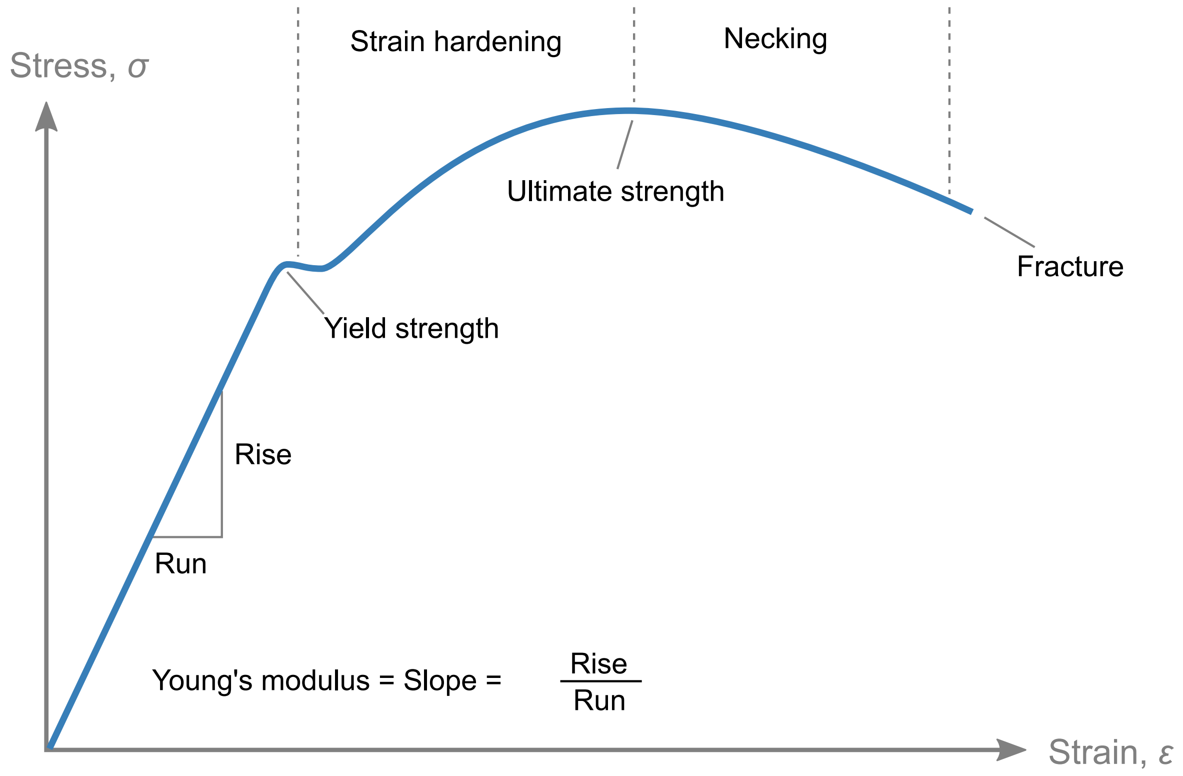
Festigkeit

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

> Wichtig: Festigkeit $\neq$ Steifigkeit

Plastische Versagen

Datenblatt Stahl

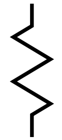


Viskoses Verhalten

- reversibel
- zeitabhängig

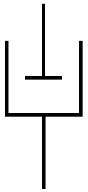
Federmodel $\sigma = E\epsilon$

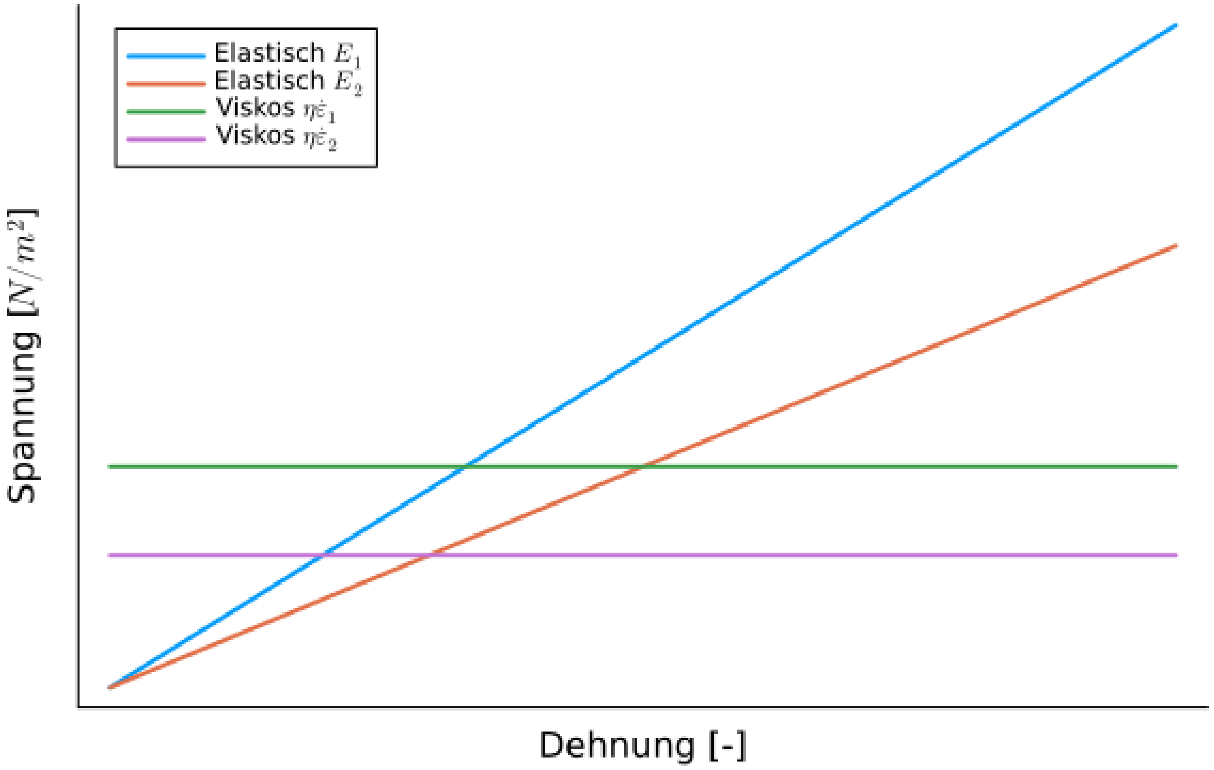
- Elastischer Anteil
- Dargestellt durch Federlemente

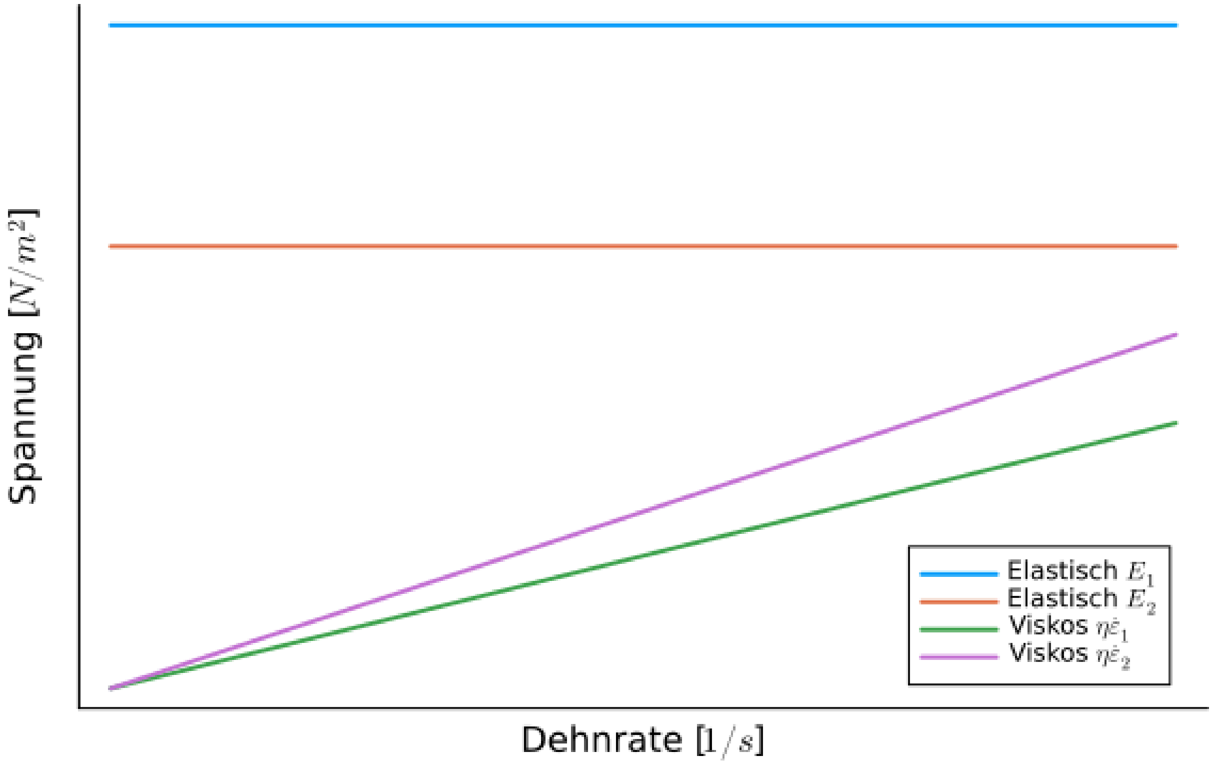


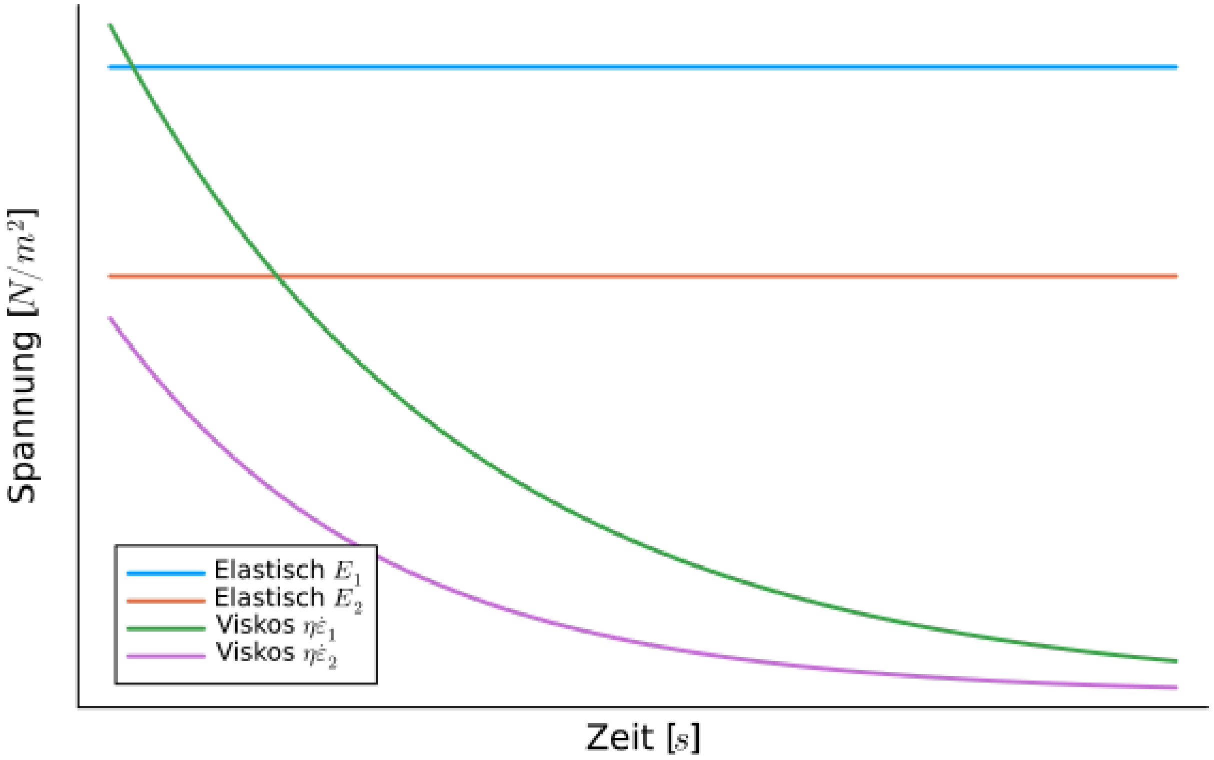
Dämpfer $\sigma = \eta\dot{\epsilon} = \eta\frac{\partial\epsilon}{\partial t}$

- Viskoser Anteil
- Dargestellt durch Dämpferelemente

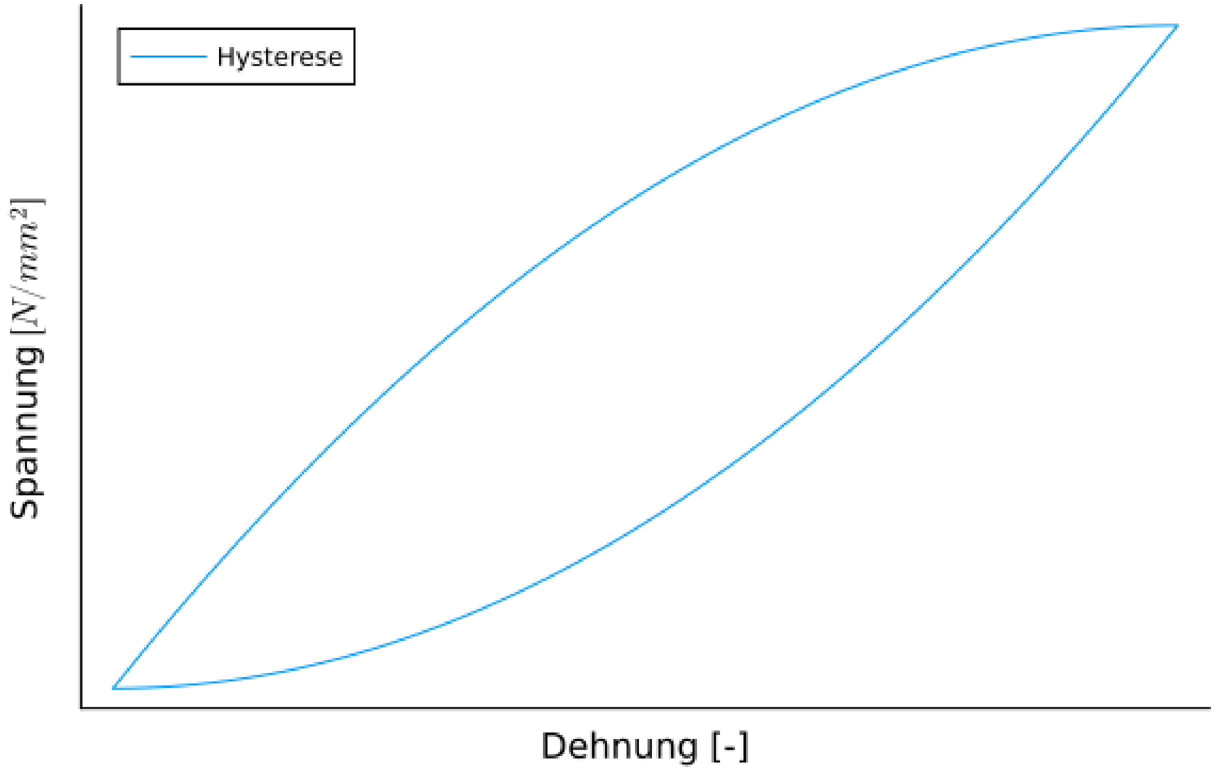



Elastisch E_1
Elastisch E_2
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_1$
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_2$
Spannung $[N/m^2]$
Dehnung [-]


Spannung $[N/m^2]$
Elastisch E_1
Elastisch E_2
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_1$
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_2$
Dehnrate $[1/s]$



Spannung $[N/m^2]$
Zeit $[s]$
Elastisch E_1
Elastisch E_2
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_1$
Viskos $\eta\dot{\varepsilon}_2$



Hysterese
Spannung $[N/mm^2]$
Dehnung [-]

Thermische Eigenschaften

Wärmedehnung

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{thermisch} = -\boldsymbol{\alpha}\Delta T$$

Wärmeausdehnungskoeffizientenmatrix

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

1D oder isotrop

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

> 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 α_{ij}	homogenisierte Betrachtung eines unysmmetrischen Mehrlagen-Verbunds

Anwendungen

- 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

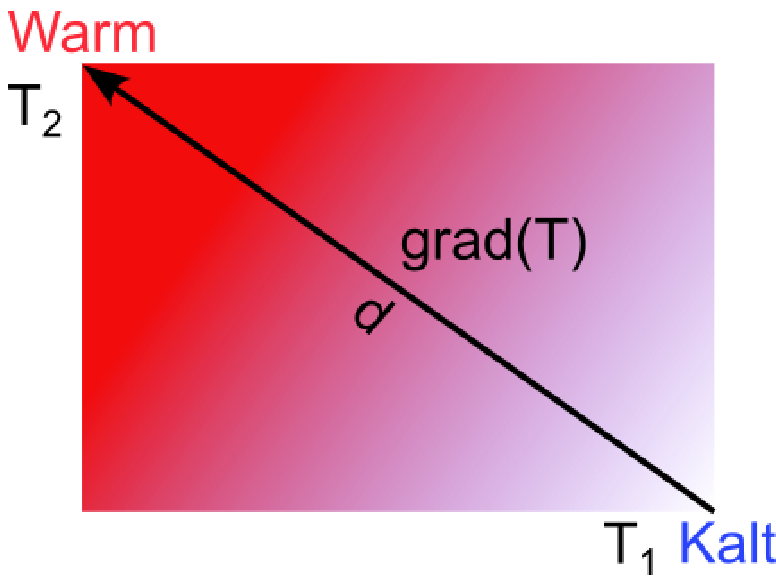
$$\Delta l = l_0\varepsilon_{mechanisch}$$

> 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 $[W]$

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

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

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

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

- 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 λ_{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.

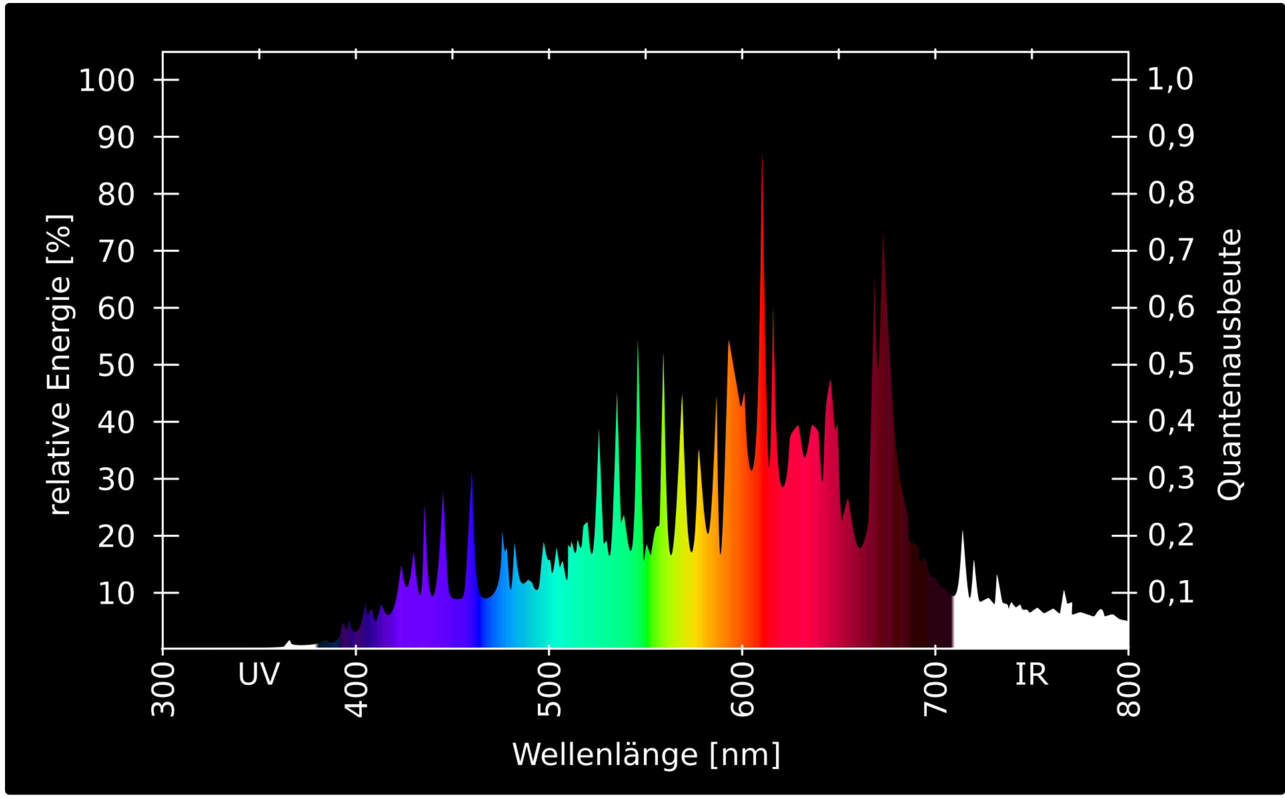
$$C_p = \frac{\Delta q}{m \Delta T}$$

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 Piere 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.

Eigenspannungen

- Thermisch
- Verformung
- Gefügeumwandlung
- Chemisch

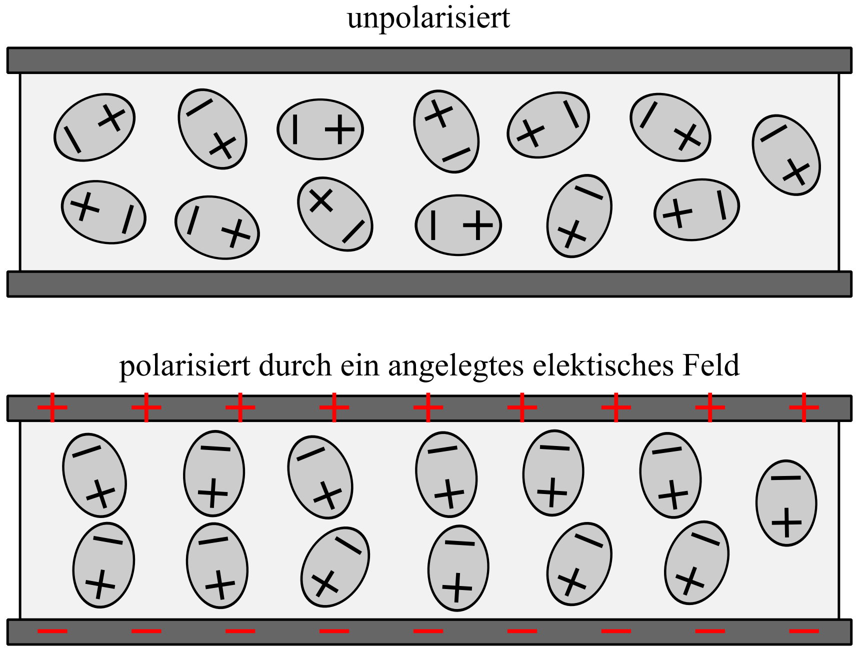
> Positive Beispiele: ??
>
> Negative Beispiele: ??

Elektrische und magnetische Eigenschaften

Die elektrischen und magnetischen Eigeschaften hängen in der Regel eng zusammen und beeinflussen sich gegenseitig.

Permittivität

- beschreibt wie stark die innere Struktur der äußeren Ladung entgegenwirkt



- mathematisch Verhältnis zwischen der elektrischen Flussdichte und dem elektrischen Feld.

ε_0 ist dabei die Permitivität im Vakuum.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_{Permitivit\ddot{a}t} \mathbf{E}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{Permitivit\ddot{a}t} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Je nach Mikrostruktur ist die Permittivität richtungsabhängig.

Symmetrie	Modell
Isotropie	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ und $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0$
transversale Isotropie	$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ und $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0$
Orthotropie Isotropie	$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0$
Anisotropie	beliebige ε_{ij}

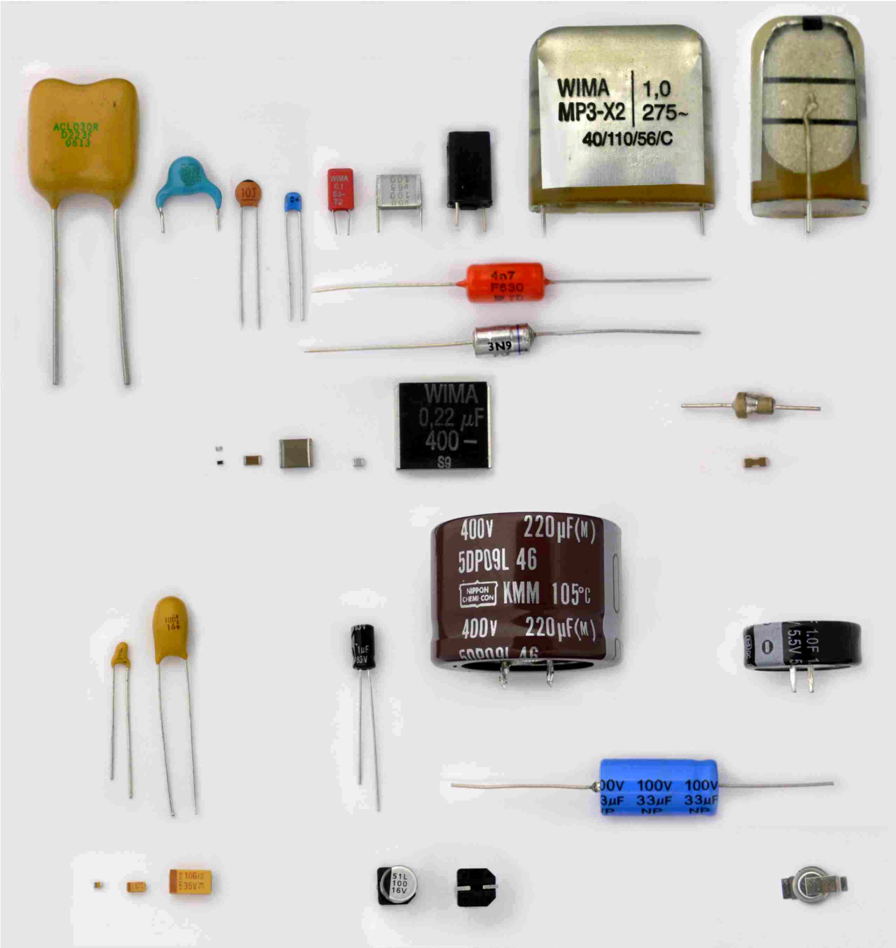
Oft angeben als relative Permittivität

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{Permittivit\ddot{a}t}}{\varepsilon_0}$$

- Kapazität eines Plattenkondensatorsn

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

- Eine hohe Permittivität erlaubt stärkere Kondensatoren



Elektrische Leitfähigkeit

- Die Leitfähigkeit eines Stoffes oder Stoffgemisches hängt von der Verfügbarkeit und Dichte beweglicher Ladungsträger ab.
- In Metallen sind diese in Form von Elektronen sehr locker gebunden. Jedes Material ist in einem Gewissen Maß leitfähig.

Einheit $\left[\frac{S}{m}, \frac{\Omega}{m}\right]$

$$\mathbf{J} = \sigma_{elektrische\ Leitfähigkeit}\mathbf{E}$$

- Supraleiter besitzt unendliche Leitfähigkeit.

Elektrischer Widerstand

- Spezialfall konstanter elektrischer Leitfähigkeit entspricht dies dem Ohmschen Gesetz

Ohmschen Gesetzes

$$R = \frac{U}{I} = \rho_{spezifisch}\frac{l}{A}$$

- Der spezifische Widerstand $\rho_{spezifisch}$ ist ein Materialkennwert. Er ist temperaturabhängig.
- wird für Thermoelemente genutzt

Leiter - Metalle (Kupfer, Silber, ...), Graphit

$$\rho_{spezifisch} < 100 \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Halbleiter - Silizium, Bor, Selen, ...

$$100 < \rho_{spezifisch} < 10^{12} \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Isolator - Aluminiumoxidkeramik, Epoxidharze

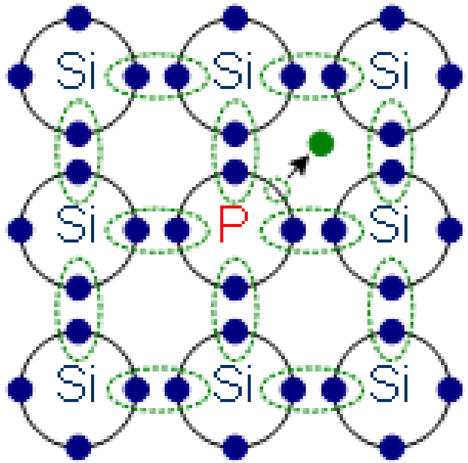
$$\rho_{spezifisch} > 10^{12} \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Dotierungen

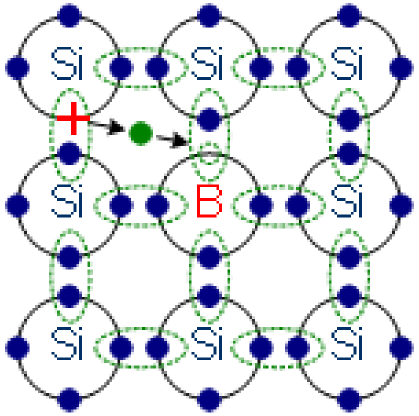
- Durch Dotierung lässt sich die Leitfähigkeit von Halbleitern stark beeinflussen, oft um mehrere Zehnerpotenzen.
- hochreines Material ist erforderlich

n-Dotierung - Zugabe von Elektronendonatoren (überzählige Elektronen)
p-Dotierung - Zugabe von Elektronenakzeptoren

- durch p-Dotierung entstehen Elektronenfehlstellen, auch Löcher oder Defektelektronen genannt
- diese ermöglichen die Leitung des elektrischen Stroms
- Die Leitfähigkeit entsteht dadurch, dass die Löcher bzw. Elektronen beweglich sind – wenn auch nicht so beweglich wie die Elektronen in Metallen.



The phosphorus atom donates ist fifth valence electron. It acts as a free charge carrier.



The free place on the boron atom is filled with an electron. Therefore a new hole („defect electron") is generated. This holes move in the opposite direction to the electrons

Magnetismus

Arten des Magnetismus

Diamagnetismus

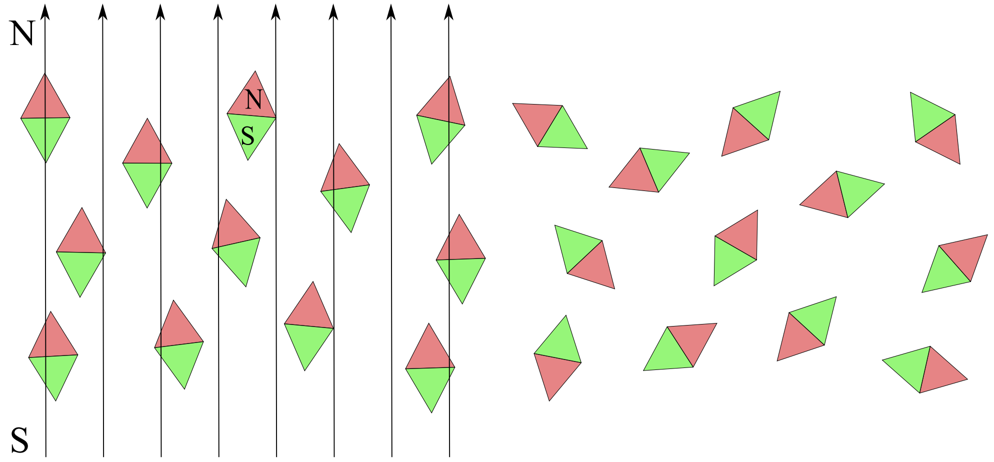
Führt zu einer Abschwächung des Magnetfeldes durch die Wirkung der Lenzschen Regel in der Atomhülle (lokal induziertes Magnetfeld wirkt dem äußeren entgegen).

Beispiele: Alle Materialien

Paramagnetismus

- Atome, Ionen oder Moleküle besitzen ein magnetisches Moment, das sich nach dem äußeren Magnetfeld ausrichtet und das Magnetfeld verstärkt
- Höhere Temperaturen verringern den Effekt, da sich die Atome, Ionen oder Moleküle stärker bewegen

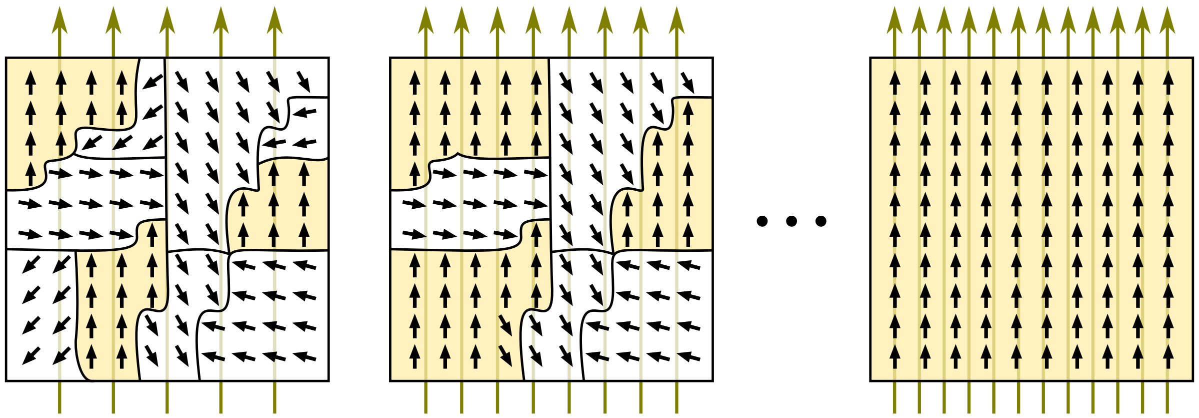
Beispiele: Lithium, Natrium, Metalle der Seltenen Erden (Scandium, Neodym, Holmium)



Ferromagnetismus

- die magnetischen Momente richten sich spontan parallel aus
- kleinste kristalline Einheit wird als **weissscher Bezirk** bezeichnet
- der Effekt kann durch die Curie-Temperatur zerstört werden

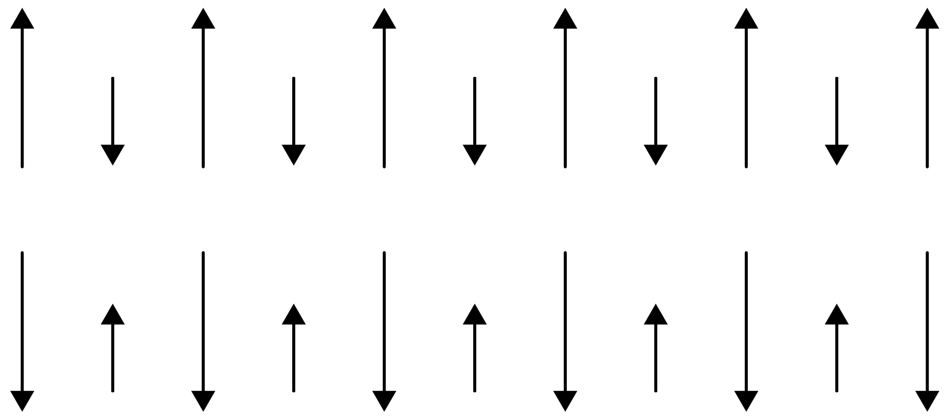
Beispiele: Eisen, Nickel, Alnico (Eisen-, Aluminium-, Nickel-, Kobalt-, Kupferlegierungen)



Ferrimagnetismus

- die magnetischen Momente der Atome mikroskopisch wechselweise antiparallel ausgerichtet und löschen sich nicht vollständig aus
- wirkt wie eine abgeschwächte Form des Ferromagnetismus

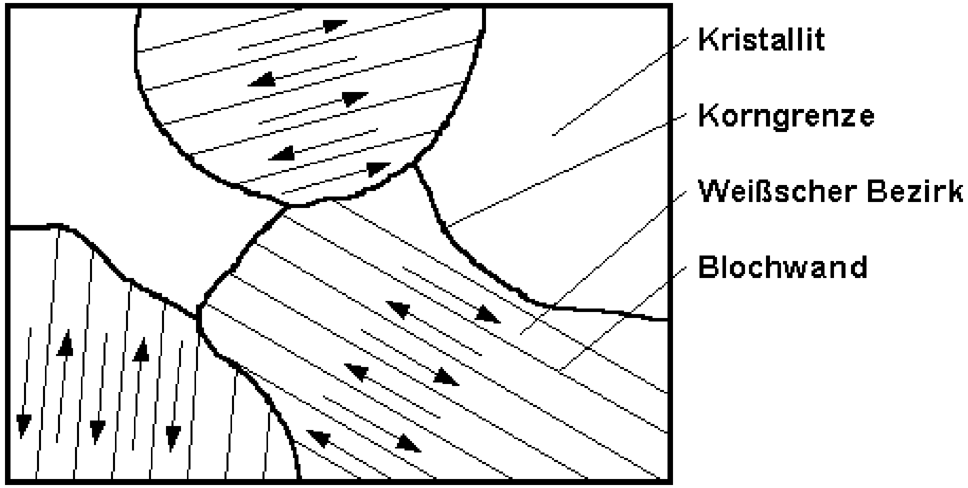
Beispiele: Nickel, Kupfer, Magnesium



Antiferromagnetismus

- ähnlich dem Ferrimagnetismus, jedoch löschen sich die antiparallelen magnetischen Pole vollständig gegenseitig aus
- idealer Antiferromagnet zeigt nach außen kein magnetisches Verhalten
- bei Erhitzung über die Néel-Temperatur wird das Material paramagnetisch

Beispiele: Einige Nickelverbindungen, Chrom



antiferromagnetischer Werkstoff

Permeabilität

Ist das Verhältnis zwischen magnetischer Flussdichte und magnetischer Feldstärke.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \boldsymbol{\mu} \mathbf{H}$$

Ähnelt der Permittivität. Auch hier gibt es eine Konstante, die magnetische Feldkonstante μ_0, welche die Permeabilität im Vakuum beschreibt.

Im Allgemeinen gilt

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{12} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{13} & \mu_{23} & \mu_{33} \end{bmatrix}$$

Die relative Permeabilität

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Diamagnetische Stoffe $0 \leq \mu_r < 1$

Paramagnetische Stoffe $\mu_r > 1$

Superparamagnetische Stoffe $\mu_r \gg 1$

Ferrimagnetische Stoffe $ 20\lessapprox \mu_{r} \lessapprox 15000$

Ferromagnetische Stoffe $\mu_r \gg 1$; $40 \lessapprox \mu_r \lessapprox 10^6$

Supraleiter 1. Art $\mu_r = 0$.