

# **Metallische Werkstoffe: Metalle und Legierungen**

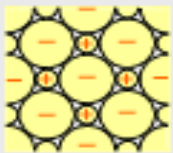
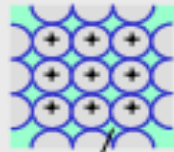
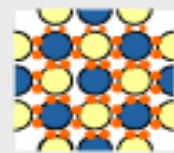
## **Die metallische Bindung**

# Metalleigenschaften


- **Typische Metalleigenschaften sind**
  - **Elektrische Leitfähigkeit**
  - **Wärmeleitfähigkeit**
  - **Reflexion von Licht an oxidfreien Oberflächen**
  - **Festigkeit und Duktilität**
  - **Reaktionsfähigkeit**

# Hauptbindungsarten

aus: [http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/lehre/AWS-Vorlesungen/chemie/2007\\_08/20071008%20VO%20Chemie%20Teil%201b%20HZ.pdf](http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/lehre/AWS-Vorlesungen/chemie/2007_08/20071008%20VO%20Chemie%20Teil%201b%20HZ.pdf)

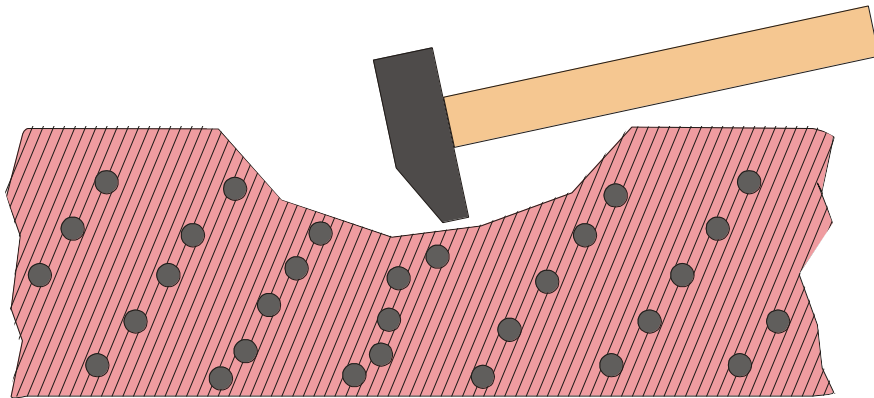
Hauptbindungsarten		
<p><b>Ionenbindung</b></p> <p>Metall + Nichtmetall = Salz</p> <p>1 oder wenige Valenzelektronen werden abgegeben bzw. aufgenommen zur Erlangung einer Edelgashülle.</p> <p>elektrisch geladene Atome durch Überschussladungen positiv - Kation (+) negativ - Anion (-)</p> 	<p><b>Metallbindung</b></p> <p>Metall + Metall = Metallgitter</p> <p>Valenzelektronen werden abgegeben zu gemeinsamem „Elektronengas“ leicht verschieblich, dazwischen positiv geladene „Atomrümpfe“ auf den Gitterplätzen des Metallgitters.</p>  <p>„Elektronengas“</p>	<p><b>Kovalente Bindung</b></p> <p>Nichtmetall + Nichtmetall = Molekül oder Atomgitter</p> <p>1 oder mehr Elektronen jedes Atoms bilden miteinander gemeinsames Elektronenpaar (doppelt besetzte Elektronenwolke), sie gehören gleichzeitig beiden Atomen an.</p> <p>kein Ladungsaustausch, keine Ionenbildung. Neutrale Atome bleiben erhalten.</p> 

Vorlesung Chemie für Bauingenieure

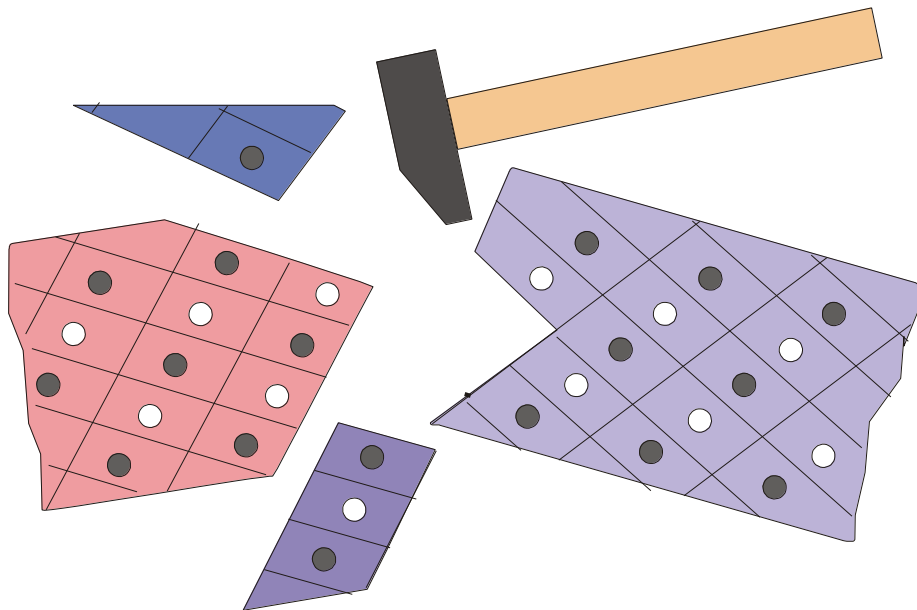


- Wir befassen uns zunächst mit der metallischen Bindung

# Bruchfestigkeit von metallischen und ionischen Festkörpern



Metall: gut verformbar



Salz aus Kationen ● und Anionen ○ :  
gut spaltbar, bricht entlang der Gitterebenen

Metall ist verformbar. Was passiert bei einer allfälligen Beanspruchung von außen? Die Elektronen gleichen sich einfach den Änderungen an. Eine Ladungsausbildung wird sofort kompensiert durch den Elektronenfluss. Die Atomrümpfe bewegen sich auch etwas, sie bleiben aber mehr oder weniger immer im selben Abstand voneinander. So wird der neue Bindungstyp eingeführt: die Metallbindung oder die metallische Bindung.

Aus: [http://www.educ.ethz.ch/lehrpersonen/chemie/unterrichtsmaterialien\\_che/atombaubindungslehre/metallbindung/index](http://www.educ.ethz.ch/lehrpersonen/chemie/unterrichtsmaterialien_che/atombaubindungslehre/metallbindung/index)

# Metallische Bindung

- Metallatome bauen eine **Elektronenschale** mit größerem Abstand vom **Kern** auf, deshalb sind
  - **wenige Elektronen in der energiereichen Außenhülle (Valenzelektronen)**
  - **schwache Bindungen an den Kern, die Valenzelektronen werden an Atome abgegeben, welche eine stärkere Anziehung auf Elektronen, d.h. höhere Elektronegativität besitzen (“Elektronengas”)**

# Atomaufbau

Atomkern: Protonen (+) und Neutronen  
Atomhülle: Elektronen (-)

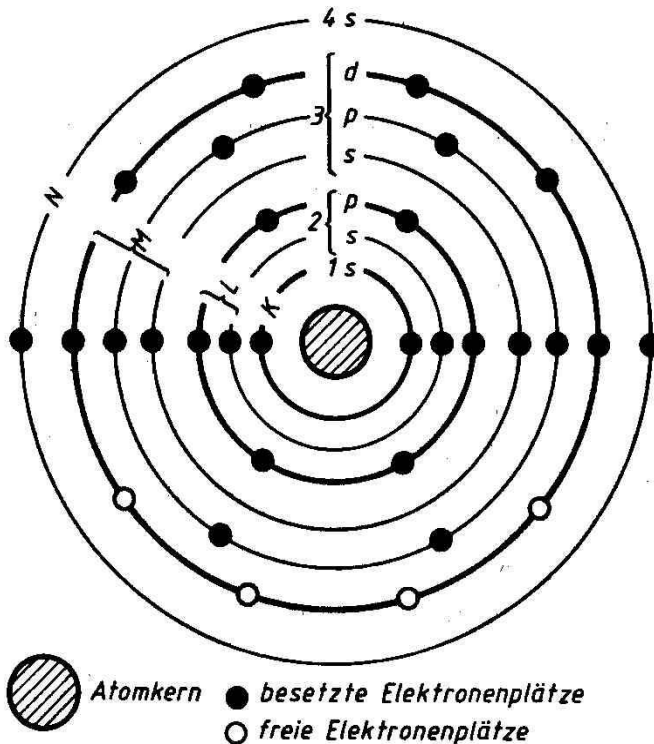
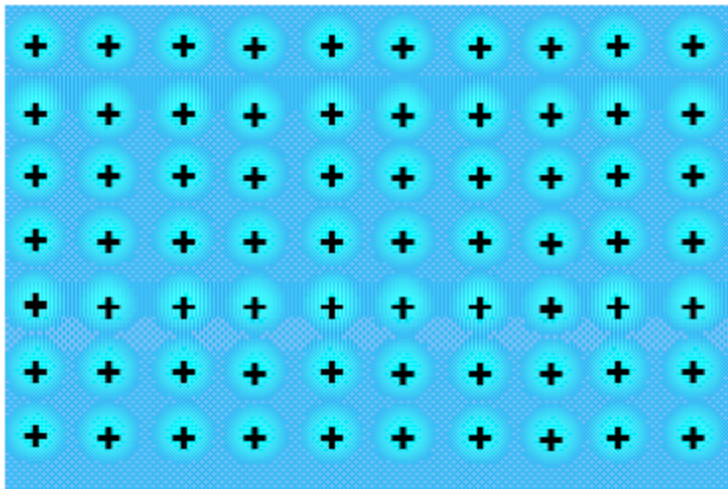


Bild 1.1-1 Atomaufbau (schematisch)

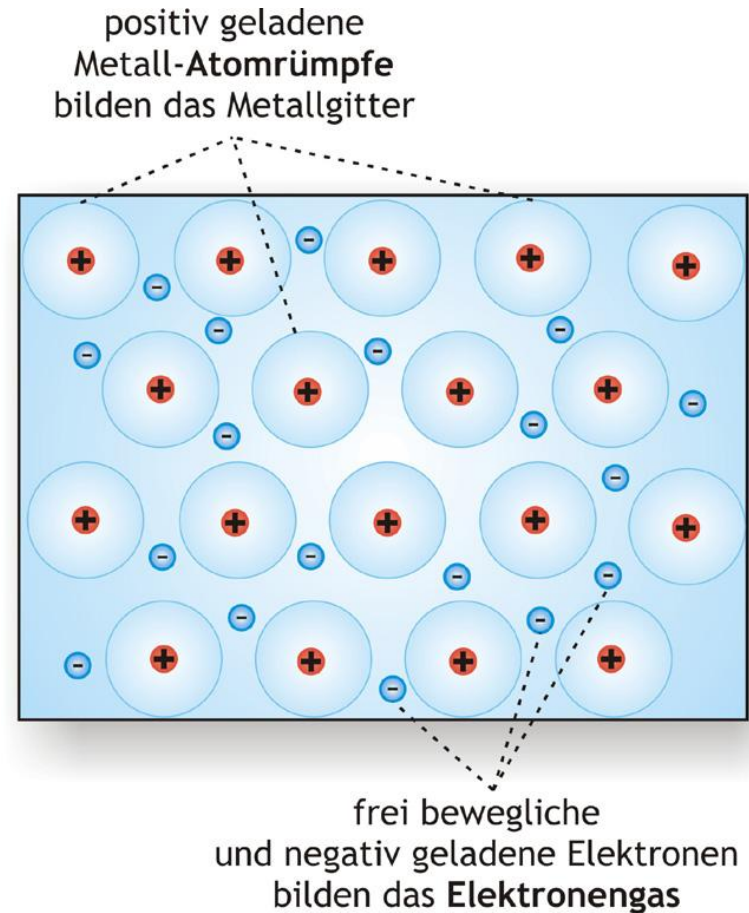
- Die Werkstoff-Eigenschaften werden fast ausschließlich durch die Atomhülle bestimmt. Für chemische und elektrische Eigenschaften sind insbesondere die Valenzelektronen verantwortlich.

# Elektronengas-Modell (schematisch)

aus: [http://www.ksh.edu/uploads/media/4.5\\_Metallbindung.pdf](http://www.ksh.edu/uploads/media/4.5_Metallbindung.pdf)  
<http://www.landshut.org/bnla06/HLG/chemie/lehre/ntg832.html>



**Abb. 1**  
Elektronengas-Modell eines Metalles der ersten Hauptgruppe; positiv geladene Atomrümpfe und frei bewegliche Aussenelektronen (als „Elektronenwolke“ dargestellt).



# Metallaufbau: Atomrümpfe und Elektronengas

Quelle: VOESTALPINE-STAHL, CD ABENTEUER STAHL

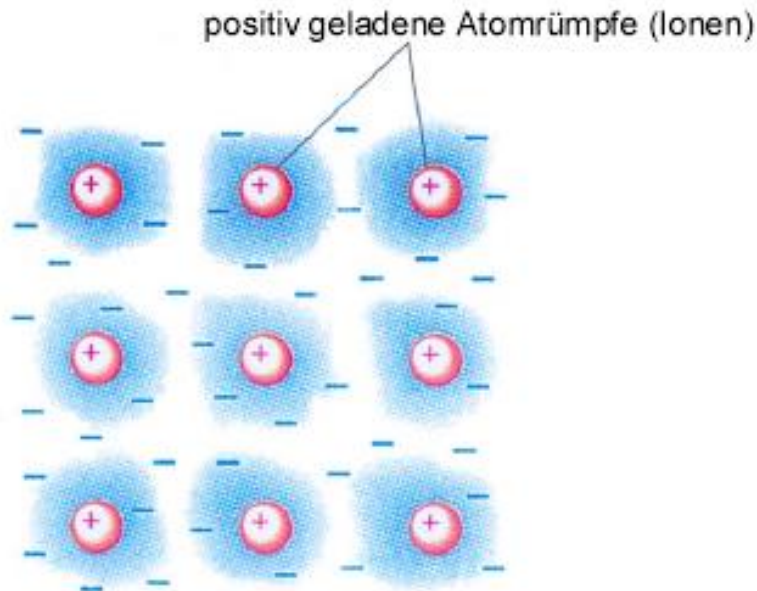


Abb.: Aufbau eines Metalls im festen Zustand. Eines oder mehrere Elektronen spalten sich von dem Atom ab und „wandern“ als Elektronengas frei im Kristall herum

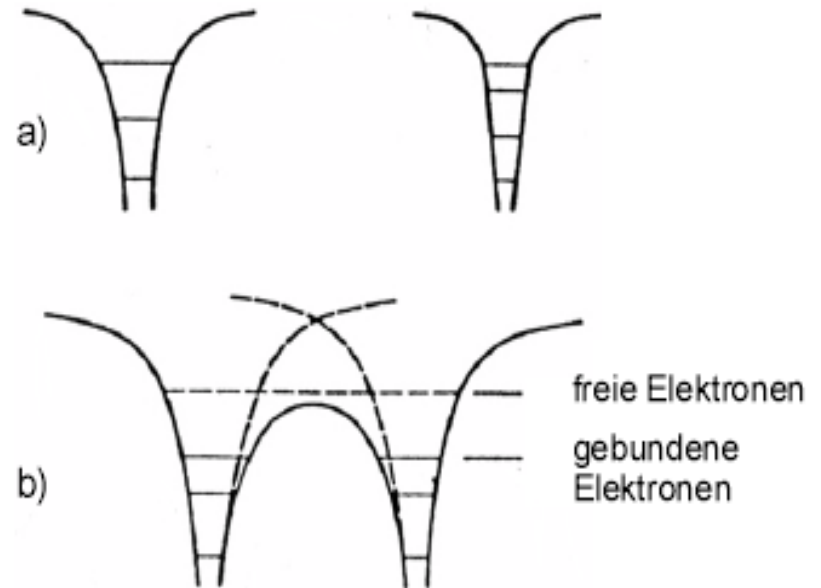


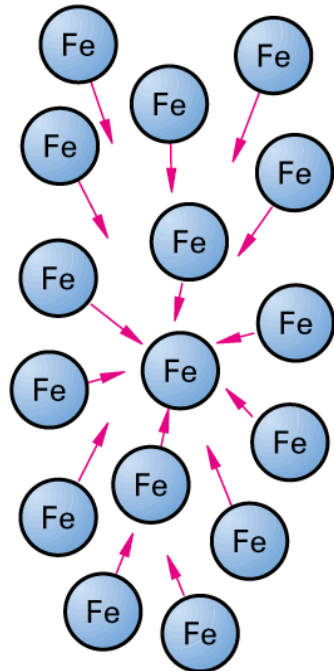
Abb.: Potentialtopfmodell

- a) Einzelne Atome ohne Wechselwirkung
- b) Erniedrigung des Potentials bei Wechselwirkung

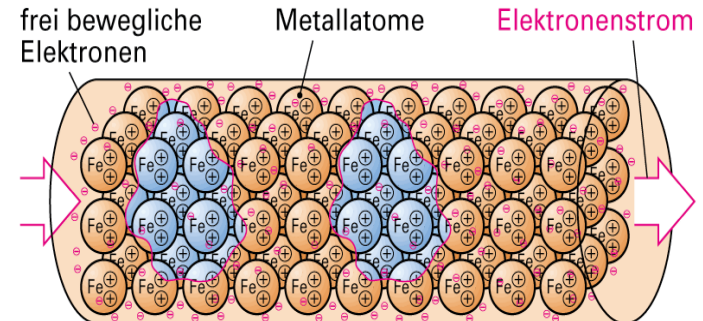
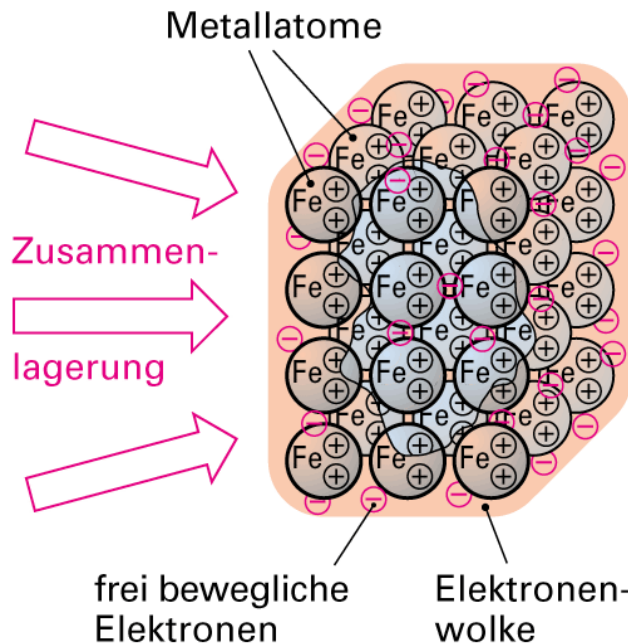


# Beispiel Eisen: Metallatom-Verband und frei bewegliche Elektronen

aus dem Erz reduzierte Metallatome  
(z.B. Eisenatome Fe)



**Metallatom-Verband**



Metallatome geben grundsätzlich Elektronen ab: „Elektronengas“ – das sind frei bewegliche Elektronen



# Literatur / Einige Internetlinks

<http://www.iwt-bremen.de/wt/wt/vorlesungen/dl/wtwing1.pdf>  
[http://www.infochembio.ethz.ch/links/werkstoffe\\_metallurgie.html](http://www.infochembio.ethz.ch/links/werkstoffe_metallurgie.html)

- **Einige zusätzliche Internetlinks (Aktualität überprüfen!) zur metallischen Bindung:**
  - <http://www.iwt-bremen.de/wt/wt/vorlesungen/>
  - <http://www.uni-weimar.de/Bauing/bauchemie/Downloads/Praktikum3S/Versuch4.pdf>
  - [http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/1-zustandsdiagramm\\_1.pdf](http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/1-zustandsdiagramm_1.pdf)
  - <http://www.tfh-berlin.de/~schaller/ws-phystechneik-1.pdf>
  - <http://www.piet.gmxhome.de/data/wk1-ws0102.pdf>
  - [http://www.ksh.edu/uploads/media/4.5\\_Metallbindung.pdf](http://www.ksh.edu/uploads/media/4.5_Metallbindung.pdf)
  - <http://www.landshut.org/bnla06/HLG/chemie/lehre/ntg832.html>
  - [http://www.fam-isenschmid.ch/download/Bindungslehre\(neu\).doc](http://www.fam-isenschmid.ch/download/Bindungslehre(neu).doc)

# Charakteristische Metalleigenschaften

- **Kristallgitter**: kfz, krz, hdP, Rhomb., Tetr.
- **Dichte** (Leichtmetalle - Schwermetalle)
  - Mg (1,75), Al (2,7), Ti (4,5), Fe: (7,85), Au, W (19,3 kg/dm<sup>3</sup>)
- **Schmelzpunkt** (Sn: 232°C – Fe: 1536°C, W: 3400°C)
- **Leitfähigkeit** (Strom, Wärme)
- **Elastizitätsmodul** (16 bis 415 GPa)

# Umform-Eigenschaften von Metallen



- Beste **Umform-**  
**eigenschaften** bei  
Raumtemperatur:  
**kfz-Gitter**  
**(Al, Cu, Ag, Au, ...)**

z.B. für die Karosserie:  
**Auch spezielle gut**  
**kaltumformbare**  
**kohlenstoffarme**  
**Stahlwerkstoffe mit**  
**krz-Gitter**  
**(Tiefziehgüten)**

# Elektrische Leitfähigkeit

vgl. auch: <http://info.tuwien.ac.at/echem/education/164021/LF/leitfaehigkeit.html>  
<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0201116.htm>

- Die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle beruht auf der freien Beweglichkeit der Valenzelektronen
- elektrische Leitfähigkeit in  $\text{m} / \text{mm}^2 \cdot \text{Ohm}$ 
  - Ag (67)
  - Cu (64)
  - Au (48)
  - Al (35)

# Elektrische Leitfähigkeit von Quecksilber

<http://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber>

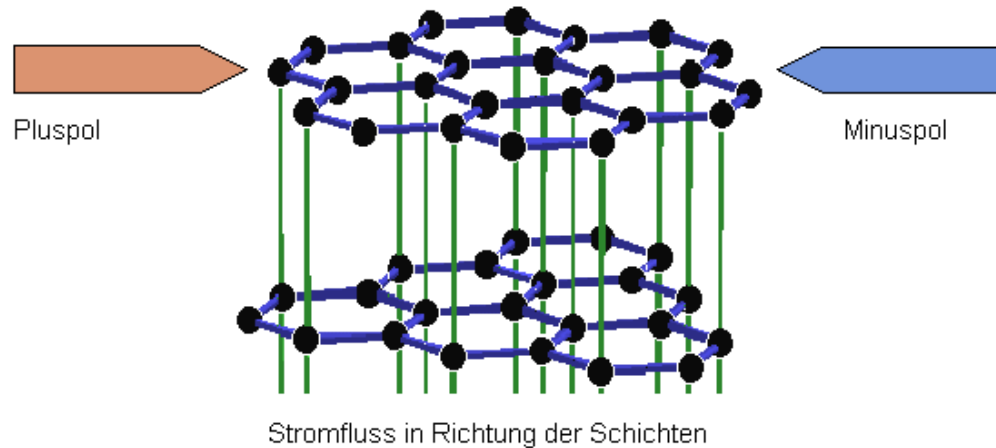


- **Quecksilber** (gr., lat. *hydrargyrum*, Name gegeben von Dioskurides) ist ein chemisches Element im Periodensystem der Elemente mit dem Symbol Hg und der Ordnungszahl 80. Es ist das einzige Metall und neben Brom das einzige Element, das bei Normalbedingungen flüssig ist.
- Aufgrund seiner hohen Oberflächenspannung benetzt Quecksilber seine Unterlage nicht, sondern bildet wegen seiner starken Kohäsion linsenförmige Tropfen. Es ist wie jedes andere Metall elektrisch leitfähig.
- Quecksilber bedeutet ursprünglich lebendiges Silber (althochdeutsch *quecsilbar* zu germanisch *kwikw* „(quick)lebendig“). Das Wort Hydrargyrum ist zusammengesetzt aus den griechischen Wörtern *hydor* „Wasser“ und *argyros* „Silber“ sowie dem lateinischen Suffix *-um*. Der Ausdruck ist somit latinisiertes Griechisch und kann mit „flüssiges Silber“ übersetzt

Am Quecksilber wurde vom niederländischen Physiker Heike Kamerlingh Onnes im Jahre 1911 das erste Mal das Phänomen der Supraleitung entdeckt. Ab einer Temperatur von 4,2 Kelvin (−268,9 Grad Celsius) verschwindet dabei der elektrische Widerstand vollständig.

# Leitfähigkeit von Graphit

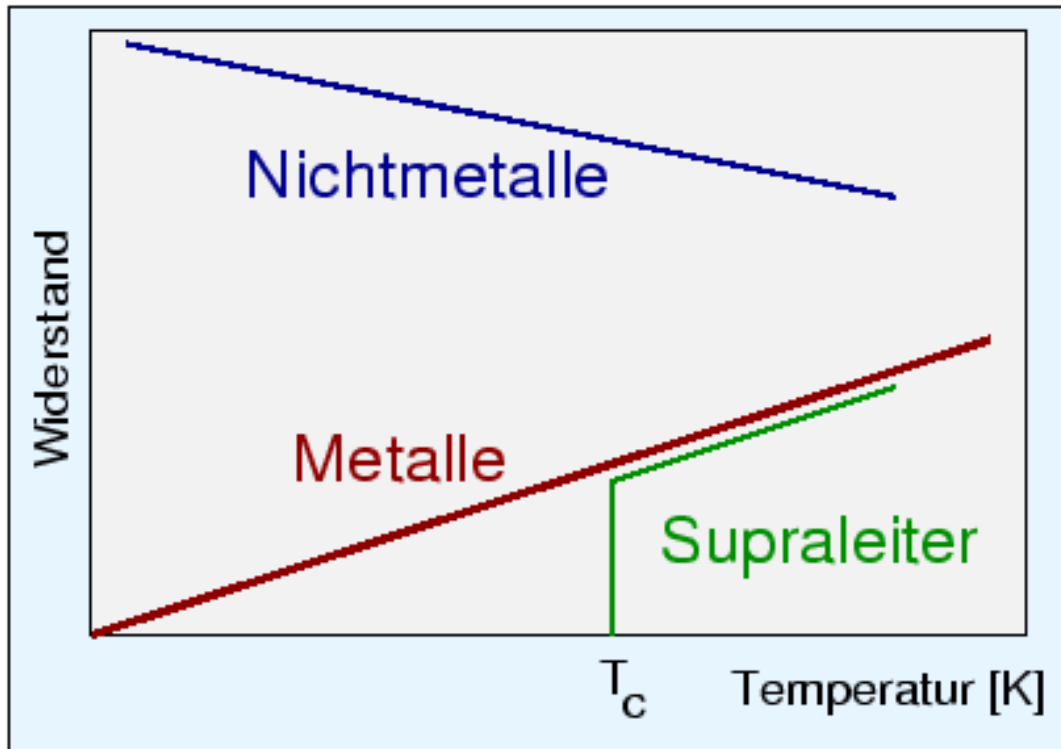
[http://www.cumschmidt.de/s\\_leitf\\_el01.htm#thema\\_graphit](http://www.cumschmidt.de/s_leitf_el01.htm#thema_graphit)



- Der Graphitkristall ist aus Schichten aufgebaut. Jede Schicht besteht aus unendlich vielen sechsgliedrigen Ringen aus Kohlenstoffatomen. Jedes Kohlenstoffatom benutzt 3 seiner Valenzelektronen, um Bindungen zu den Nachbaratomen auszubilden. Die übrigen, „vierten“ Valenzelektronen bilden ein System delocalisierter Molekülorbitale, das heißt, sie sind in der gesamten Schicht frei beweglich, und es findet Stromleitung statt.

# Elektrischer Widerstand

<http://www.bzeeb.de/index.php?f=arbeiten&pid=1>

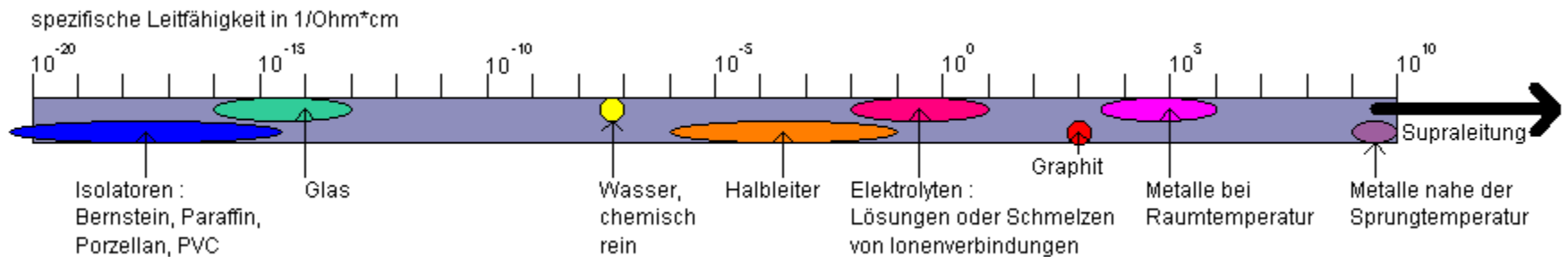


- Legt man an ein Metall (Leiter 1. Klasse) eine äußere Spannung an, so können sich die Elektronen frei im Metall bewegen und an anderer Stelle die Energie in Form von elektrischer Energie wieder abgeben. Bei Temperaturerhöhung geraten die Atomrümpfe infolge höherer kinetischer Energie in stärkere Schwingungen, es kommt vermehrt zu Zusammenstößen zwischen Atomrümpfen und Elektronen, was letztlich dazu führt, dass die Elektronen in ihrer Beweglichkeit gehemmt werden, das Metall leitet den Strom schlechter.



# Elektrische Leitfähigkeit im Überblick

[http://www.cumschmidt.de/s\\_leitf\\_el01.htm](http://www.cumschmidt.de/s_leitf_el01.htm)



- Die Leitfähigkeit verschiedener Stoffe ist sehr unterschiedlich. Sie erstreckt sich über viele Zehnerpotenzen. Die Graphik gibt nur einen ungefähren Überblick, in welcher Größenordnung die Leitfähigkeiten einzelner Stoffklassen liegen.

# Zusatzinfos zur Elektrische Leitfähigkeit

- Einige Zusatzinformationen zur elektrischen Leitfähigkeit aus dem Internet
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/Metall>
  - [http://de.wikipedia.org/wiki/Leiter\\_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Leiter_(Physik))
  - [http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische\\_Leitf%C3%A4higkeit](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Leitf%C3%A4higkeit)
  - [http://www.cumschmidt.de/s\\_leitf\\_el01.htm](http://www.cumschmidt.de/s_leitf_el01.htm)
  - <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0201116.htm>
  - <http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/physik/ws95/w95e0dir/w95e1000.htm>
  - <http://www.quantenwelt.de/atomphysik/modelle/bindungen/metallisch.html>
  - [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw2\\_ge/kap\\_2/illustr/r2\\_8\\_1.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw2_ge/kap_2/illustr/r2_8_1.html)

# Wärmeleitfähigkeit

<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>

- Die gute Wärmeleitfähigkeit der Metalle beruht ebenso wie die elektrische Leitfähigkeit auf dem Vorhandensein und der Beweglichkeit der freien Elektronen
- Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ebenfalls mit zunehmender Temperatur ab
- bei gleicher Temperatur besteht zwischen Wärmeleitfähigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit ein Zahlenverhältnis:
  - WIEDEMANN-FRANZsches Gesetz

# Wärmeleitfähigkeit von technischen Metallen

<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>

Metall	Wärme- Leitfähigkeit $\lambda$ [W / (m · K)]
<u>Kupfer</u>	<u>401</u>
<u>Aluminium</u>	<u>237</u>
<u>Messing</u>	<u>120</u>
<u>Zink</u>	<u>110</u>
<u>Stahl unlegiert</u>	<u>48-58</u>
<u>Stahl</u> niedrig legiert (z.B. 42CrMo4)	<u>42</u>
<u>Edelstahl</u> rostfrei „V2A“	<u>15</u>
<u>Blei</u>	<u>35</u>

- Die **Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$**  ist eine Stoffkonstante bei einem definierten Umgebungs-klima (Temperatur und bei Stoffen, die Feuchtigkeit aufnehmen auch von der Luftfeuchte)

# Kristallsysteme / Wichtige Kristallgitter

[http://www.ds.mw.tu-darmstadt.de/services/education/MaWi\\_Physik\\_WS2003/021029\\_Vorlesung\\_1.pdf](http://www.ds.mw.tu-darmstadt.de/services/education/MaWi_Physik_WS2003/021029_Vorlesung_1.pdf)

- **Elementarzelle**

- kubisch: Würfel ( $a = b = c$ )

- **kfz**: kubisch flächenzentriert
- **krz**: kubisch raumzentriert

- hexagonal: Sechsecksäule

- **hdP**: hexagonal dichteste Packung

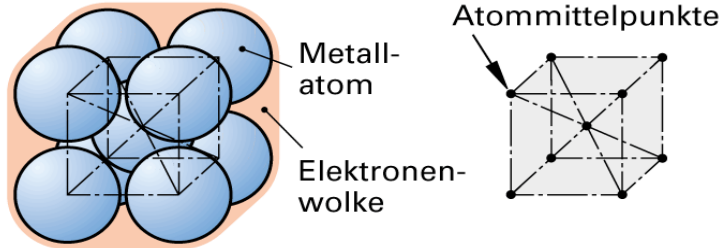
- tetragonal (Quadratische Säule)

Kugelmodell-  
Darstellung

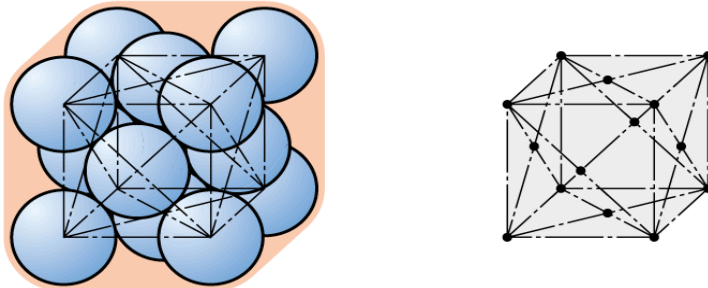
Strichmodell-  
Darstellung

# Häufige Metall- Kristallgitter

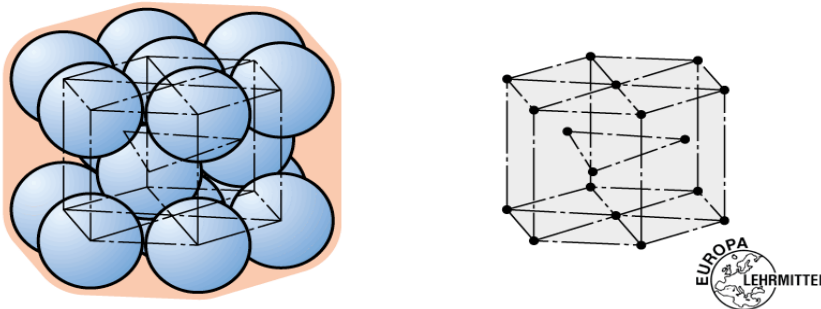
kubisch raumzentriertes Kristallgitter (krz)



kubisch flächenzentriertes Kristallgitter (kfz)



hexagonales Kristallgitter (hex)



- **krz-Gitter**
- **kfz-Gitter**
- **hdP-Gitter**
  - (hexagonal dichteste Packung)



# Metall-Kristallgitter (b bis d) als Modell

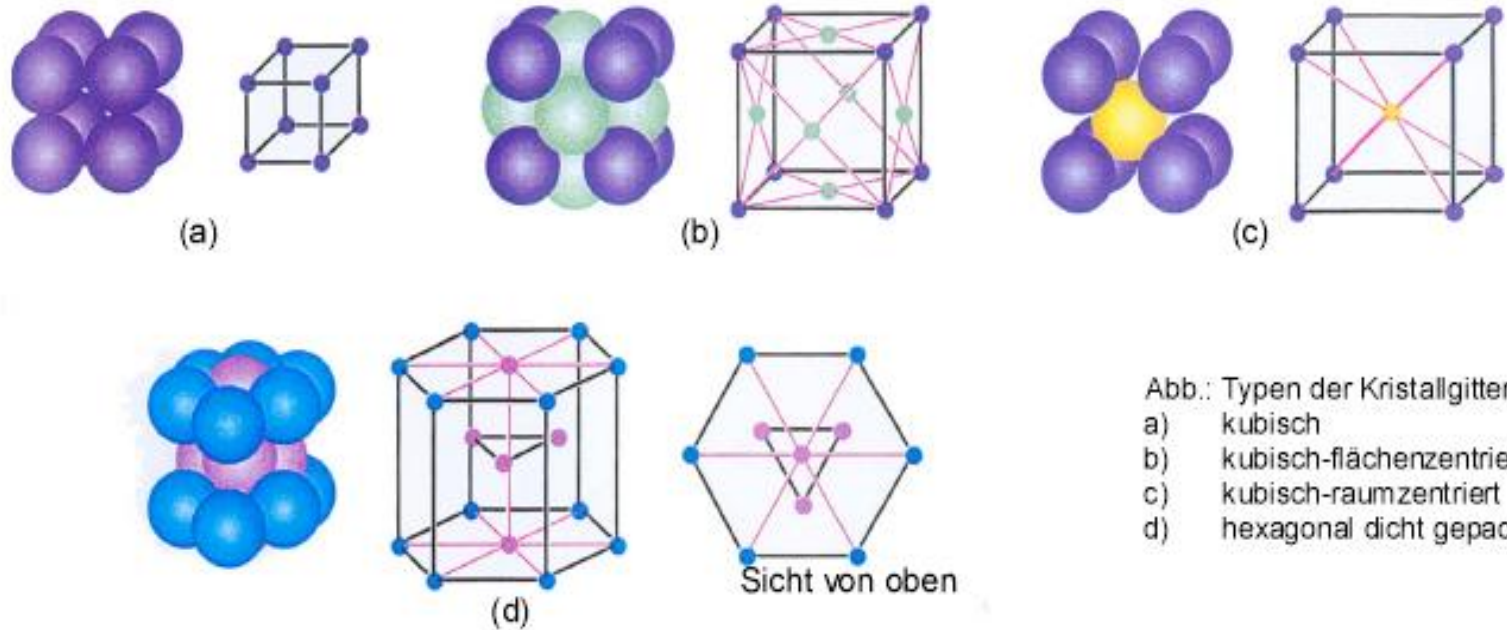


Abb.: Typen der Kristallgitter  
a) kubisch  
b) kubisch-flächenzentriert  
c) kubisch-raumzentriert  
d) hexagonal dicht gepackt

**Rund 75 % der Metalle**, darunter die meisten technischen Metalle, kristallisieren zu etwa gleichen Teilen in kubisch-raum- (**krz**), in kubisch-flächenzentrierten (**kfz**) und in hexagonalen (**hex bzw. hdP**) Gittern (Abb.: Typen der Kristallgitter).

Quelle: VOEST-ALPINE STAHL, CD ABENTEUER STAHL

# Polykristall – Einkristall

[http://www.mpie-duesseldorf.mpg.de/fileadmin/pics/MU-pics/lectures/GeschMet/Dierk\\_Raabe - Was ist ein Metall.pdf](http://www.mpie-duesseldorf.mpg.de/fileadmin/pics/MU-pics/lectures/GeschMet/Dierk_Raabe_-_Was_ist_ein_Metall.pdf)

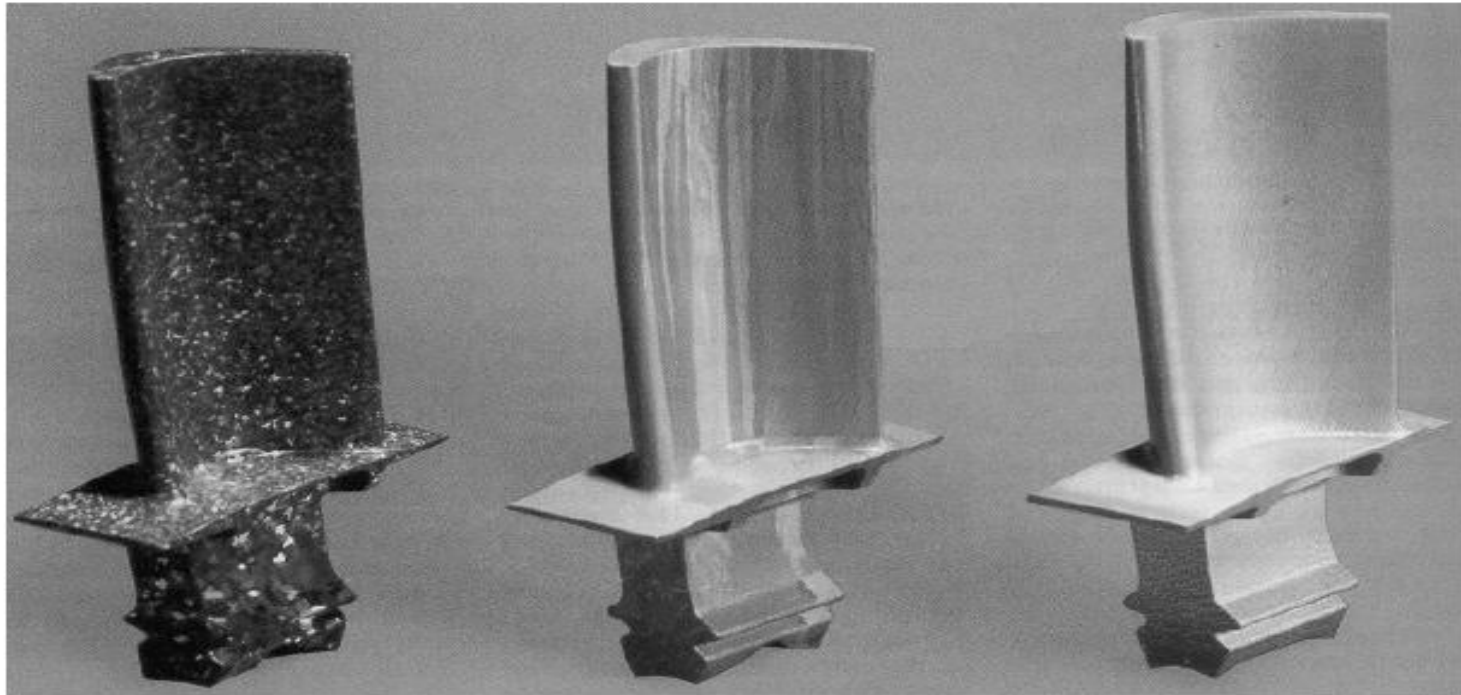
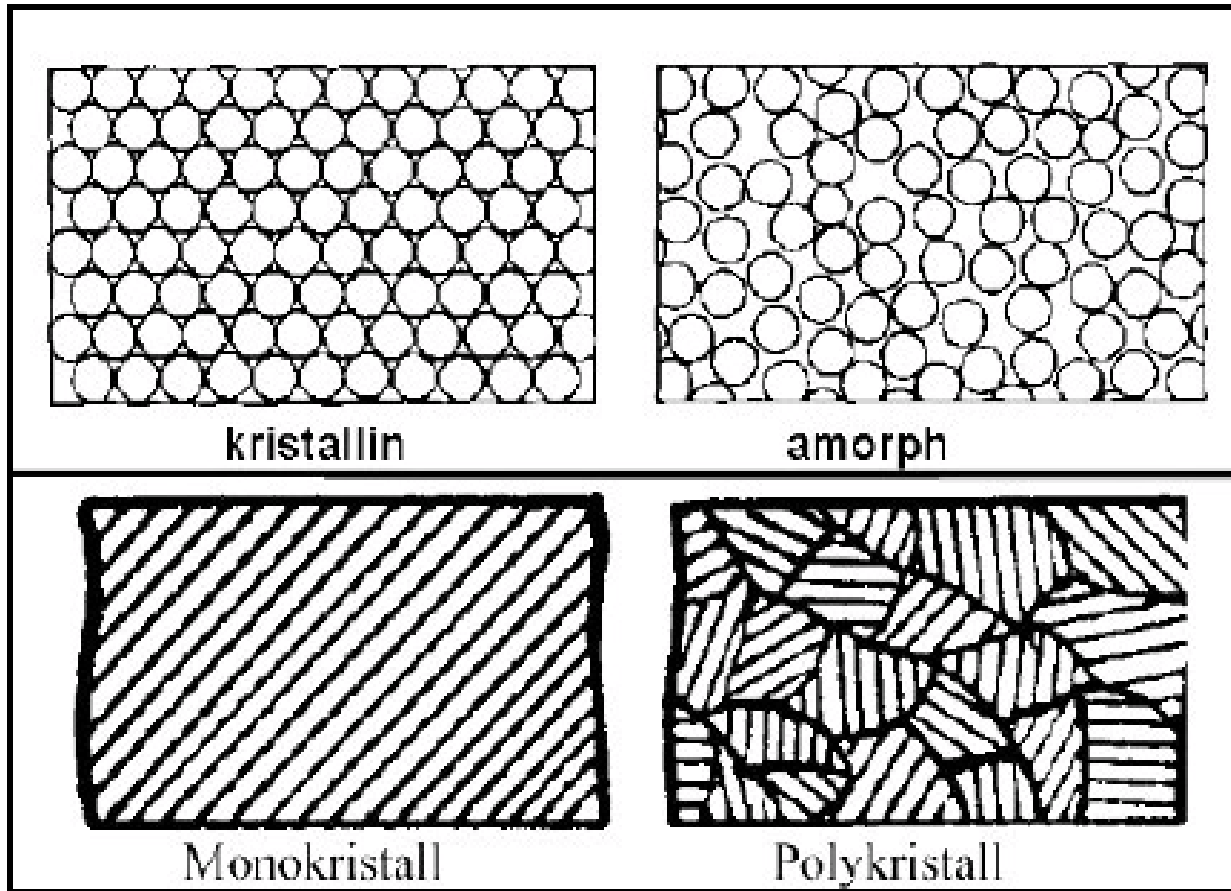


Bild 1.4: Turbinenschaufeln aus einer Nickellegierung. Die Teile bestehen aus einem Polykristall mit vielen kleinen Kristallen ähnlicher Größe (links); einem Polykristall mit einer kleinen Anzahl von Stengelkristallen (Mitte) und einem Einkristall (rechts).



# Begriffe: kristallin – amorph

aus: <http://www.tfh-berlin.de/~schaller/ws-phystechnik-1.pdf>



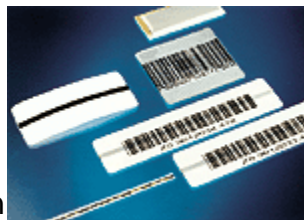
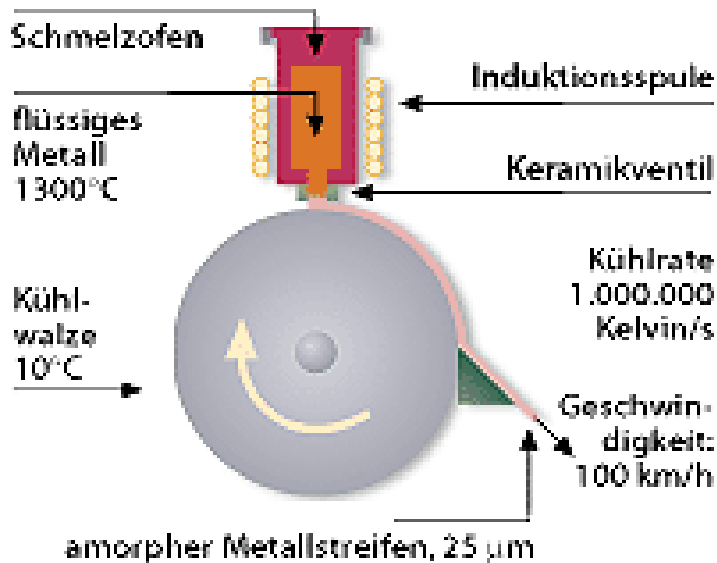
- Metalle erstarren im Regelfall kristallin; für bestimmte Anwendungen werden jedoch auch amorphe Metalle (auch metallische Gläser genannt) hergestellt.

# Amorphe Metalle (metallische Gläser)

- **haben nur in kleinen Bereichen eine Nahordnung**
- **es gibt kein zusammenhängendes Kristallgitter**
- **werden durch extrem schnelle Abkühlung der Schmelze hergestellt**
- **beim Wiedererwärmen: Kristallite**

# Amorphe Metalle

<http://www.materialmagazin.com/wk2/wk.asp>



Sicherungsetiketten

- Amorphe Metalle sind eine relativ junge Werkstoffgruppe mit speziellen chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften. In herkömmlichen Metallen sind die Atome regelmäßig angeordnet, diese Metalle sind kristallin. **Die Atome amorpher Metalle sind dagegen völlig ungeordnet, ähnlich wie in einer Flüssigkeit oder Schmelze.**
- Da das auch für Glas zutrifft, bezeichnet man amorphe Metalle auch als metallische Gläser. Es werden gegenüber den kristallinen Metallen veränderte interessante Eigenschaften erzielt z. B. höhere Festigkeit, größere Korrosionsbeständigkeit oder sehr gutes weichmagnetisches Verhalten. Für eine amorphe Erstarrung sind besonders geeignet bestimmte Legierungen aus Übergangsmetallen oder Edelmetallen mit Nichtmetallen oder Halbmetallen.
- Die günstigen Legierungsbereiche befinden sich im Zustandsdiagramm i. A. in der Nähe von eutektischen Zusammensetzungen. Die Streifen in **Sicherungsetiketten** bestehen typischerweise aus einer **Eisen-Nickel-Kobalt-Silizium-Bor-Legierung**. Der amorphe Zustand für Metalle ist bei höheren Temperaturen instabil. Durch Erwärmung tritt oberhalb einer legierungsspezifischen Temperatur (40-60% der Schmelztemperatur) Kristallisation ein.

Metalle sind normalerweise **kristallin**.

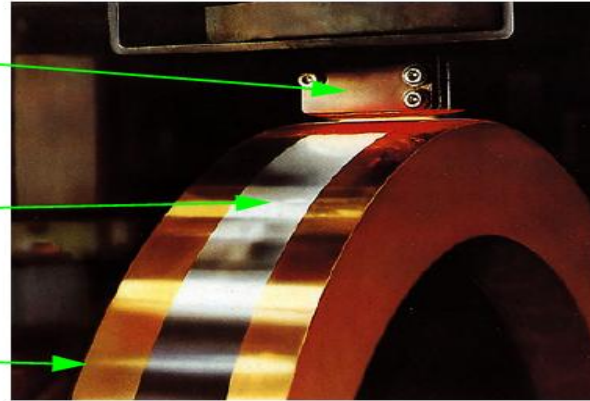
Kristallite (Körner) bilden sich durch  
Diffusion der Atome beim Erstarren

Abkühlrate  $\cong 10^6$  K/s  $\Rightarrow$  **amorphe Struktur**

Düse

amorphes  
Metallband  
< 0.1 mm

gekühltes  
Cu-Rad



## Amorphe Metalle

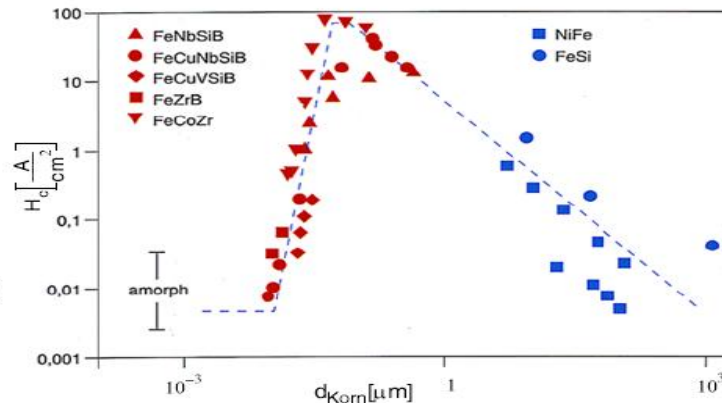
– Einsatz auch als  
weich-  
magnetisches  
Material

**Verwendung:** Weichmagnetische Materialien mit niedriger Koerzitivfeldstärke  $H_c$

z.B. für hoch-  
empfindliche  
Antennen

Bemerkung:

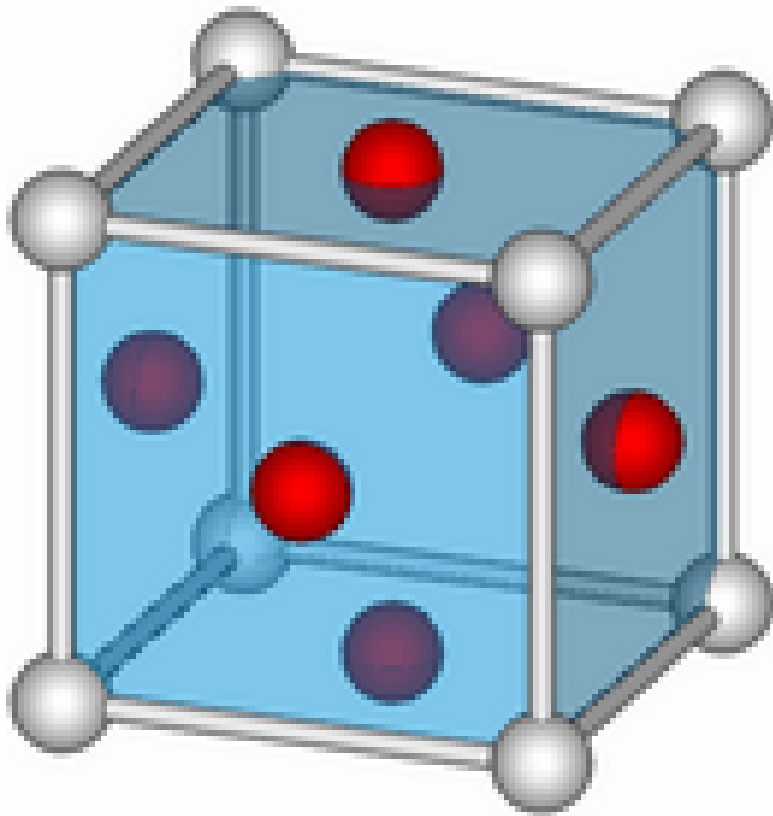
$\rho_{el} \sim 1,5 \cdot 10^6 \Omega m$



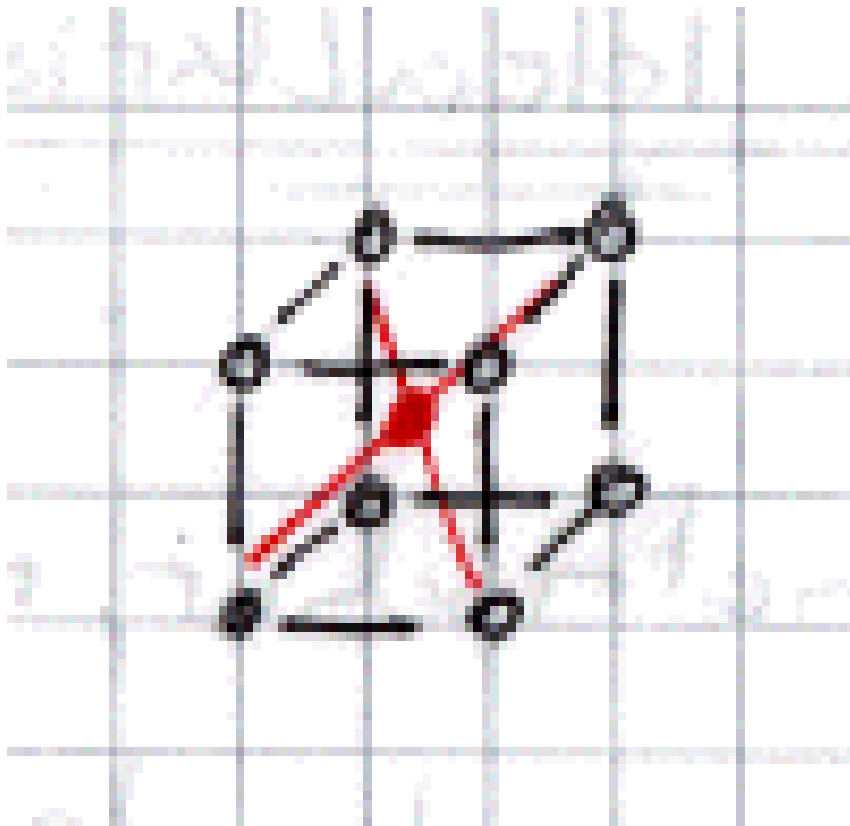
# Beispiel: kfz – Gitter (kubisch-flächenzentriert)

[http://de.wikipedia.org/wiki/Kubisches\\_Gitter](http://de.wikipedia.org/wiki/Kubisches_Gitter)

Beispiele: Ag, Au, Al, Cu, Ni, Pb, austenitische nichtrostende Stähle, ...



# kubisch-raumzentriertes Gitter

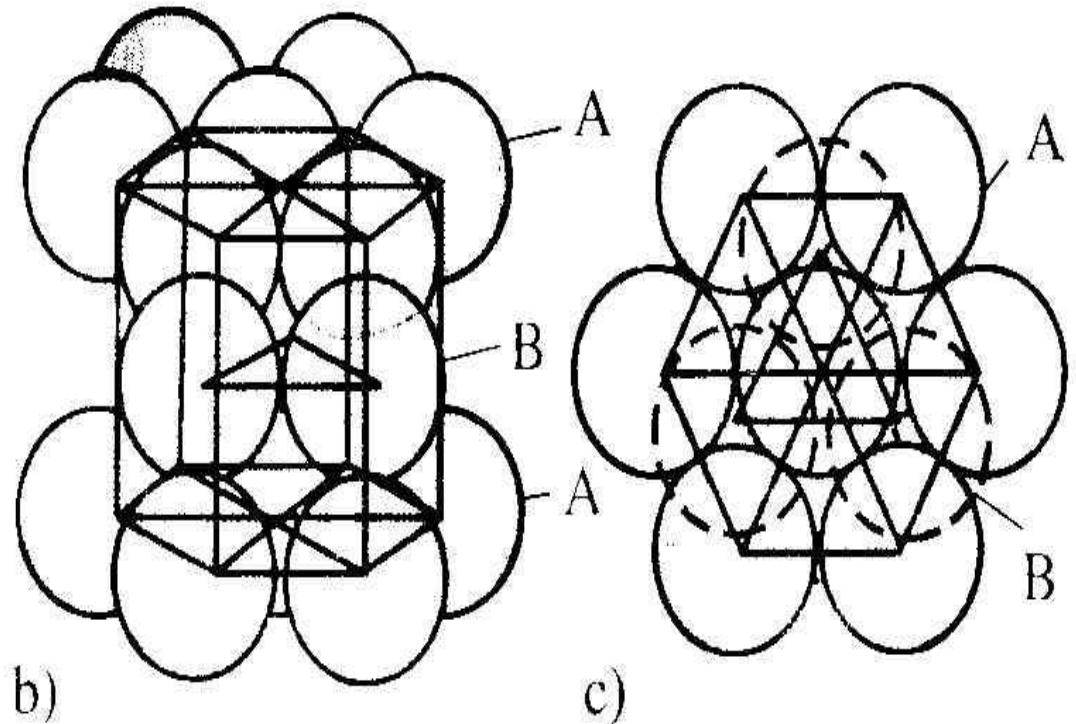
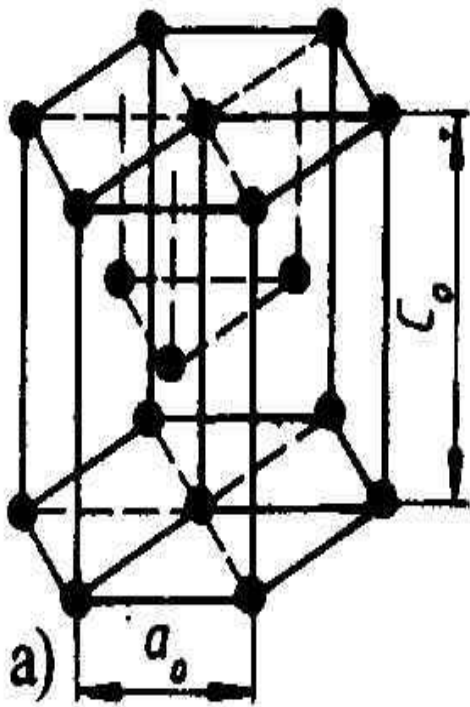


- **Ferrit ( $\alpha$ -Eisen)**
- **Cr**
- **W**
- **Mo**
- **Nb**
- **Ta**
- **$\beta$ -Ti**

# hexagonal dichteste Packung

z.B.: Be, Cd, Mg, Zn,  $\alpha$ -Ti, ...

- hdp-Gitter



# Kristallgitter wichtiger Metalle

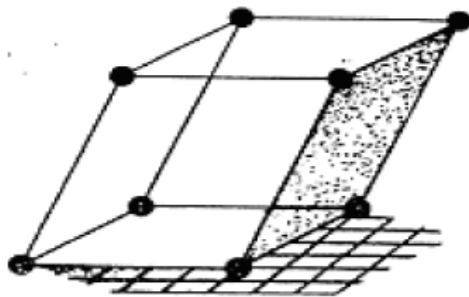
<b><u>kfz</u></b>	<b><u>krz</u></b>	<b><u>hdP</u></b>
<b>Ag</b>	<b>Cr</b>	<b>Be</b>
<b>Al</b>	<b>Mo</b>	<b>Cd</b>
<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Mg</b>
<b>Ni</b>	<b>Ta</b>	<b>Zn</b>
<b><math>\gamma</math>-Fe</b>	<b><math>\alpha</math>-Fe</b>	<b><math>\alpha</math>-Ti</b>



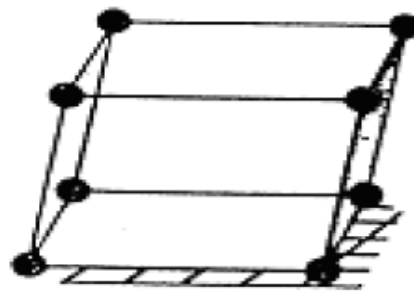
# Weitere Gittertypen

aus: <http://www.iwt-bremen.de/wt/wt/vorlesungen/dl/wtwing2.pdf>

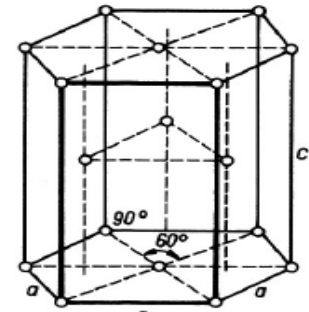
Weitere Gittertypen:



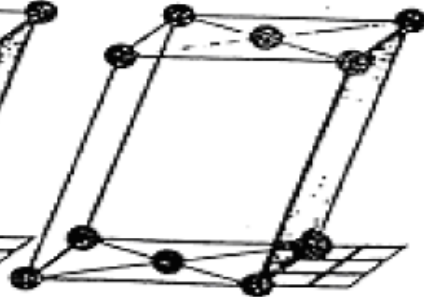
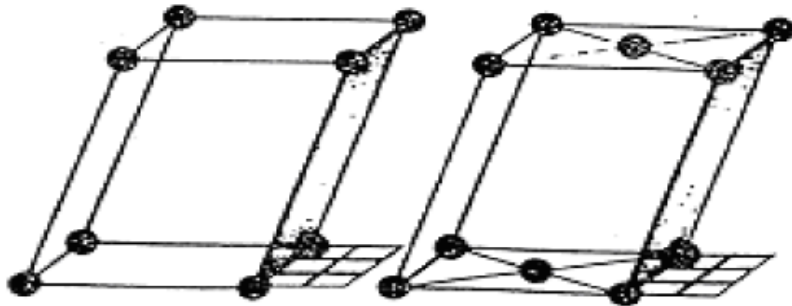
triklin



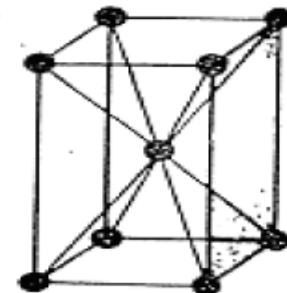
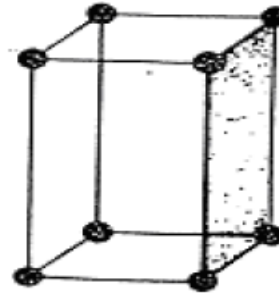
rhomboedrisch



hexagonal



monoklin prim., basiszentriert



tetragonal prim., raumzentriert

# Kristallsysteme und –strukturen

Detailinformationen siehe u.a.:

- <http://www.tfh-berlin.de/~juekue/wk1v.htm>
- <http://www.tfh-berlin.de/~schaller/Scha-WT1-Festkoerper.pdf>
- [http://www.ifb.ethz.ch/education/werkstoffe2/Vorlesung5\\_18Apr07](http://www.ifb.ethz.ch/education/werkstoffe2/Vorlesung5_18Apr07)
- [http://www.gaerber.com/studium/WSTK\\_1/WSTK\\_1\\_Skript.pdf](http://www.gaerber.com/studium/WSTK_1/WSTK_1_Skript.pdf)
- <http://www.materialmagazin.com/wk2/dateien/A/A04-Grundlagen%20der%20Metallkunde.pdf>
- [www.fh-bielefeld.de/filemanager/download/3536/Übungsaufgaben\\_WE%20WS05%20SS06.pdf](http://www.fh-bielefeld.de/filemanager/download/3536/Übungsaufgaben_WE%20WS05%20SS06.pdf)
- [http://www.philipp-ivic.de/uni/werkstofftechnik/werkstofftechnik\\_1\\_sem.pdf](http://www.philipp-ivic.de/uni/werkstofftechnik/werkstofftechnik_1_sem.pdf)
- [http://chemie-mainz.de/content/ac/ac\\_festkoerper.pdf](http://chemie-mainz.de/content/ac/ac_festkoerper.pdf)
- <http://www.bzeeb.de/index.php?f=arbeiten&pid=1>

# Weitere Infos zum Kristallgitter / Kristallaubau

- <http://www.uni-stuttgart.de/imtk/lehrstuhl1/Scripte/WWI.pdf>
- [http://www.tu-chemnitz.de/fsrmb/Downloads/Werkstofftechnikzeugs/WERKSTOFF\\_TEIL2.PDF](http://www.tu-chemnitz.de/fsrmb/Downloads/Werkstofftechnikzeugs/WERKSTOFF_TEIL2.PDF)
- [http://www.ifb.ethz.ch/education/werkstoffe2/Vorlesung5\\_18Apr07](http://www.ifb.ethz.ch/education/werkstoffe2/Vorlesung5_18Apr07)
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Kubisches\\_Kristallsystem](http://de.wikipedia.org/wiki/Kubisches_Kristallsystem)
- [http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/Innerer\\_Aufbau/Gitterfehler](http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/Innerer_Aufbau/Gitterfehler)
- <http://www.physik.fu-berlin.de/~brewer/Festkoerperphysik01-BW.pdf>
- [http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources//2\\_Kristallstrukturen.pdf](http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources//2_Kristallstrukturen.pdf)
- <http://chemie.fb2.fh-frankfurt.de/ACH-Vorlesung/43Festkoerper.htm>
- [http://www.uni-magdeburg.de/imos/mst/vorlesung/Grundlagen\\_MST/Materialien/Kristallographie\\_neu.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/imos/mst/vorlesung/Grundlagen_MST/Materialien/Kristallographie_neu.pdf)
- [http://www.rene-toepfer.de/studium/werkstofftechnik/01\\_kristallaufbau.pdf](http://www.rene-toepfer.de/studium/werkstofftechnik/01_kristallaufbau.pdf)
- <http://www.wissenschaft-online.de/spektrum/projekt/quasi16.htm>
- <http://www.koerbernet.de/Werkstoffkunde/kristallsysteme.html>
- <http://www.iwt-bremen.de/wt/wt/vorlesungen/dl/wtwing2.pdf>
- [http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst\\_A21\\_aufbau\\_kristall\\_Mecha.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst_A21_aufbau_kristall_Mecha.pdf)

# Entstehung des Gefüges

**Gefüge ist der Oberbegriff für den  
Verband der Kristallite =  
Kristallkörnern / Kristalle**

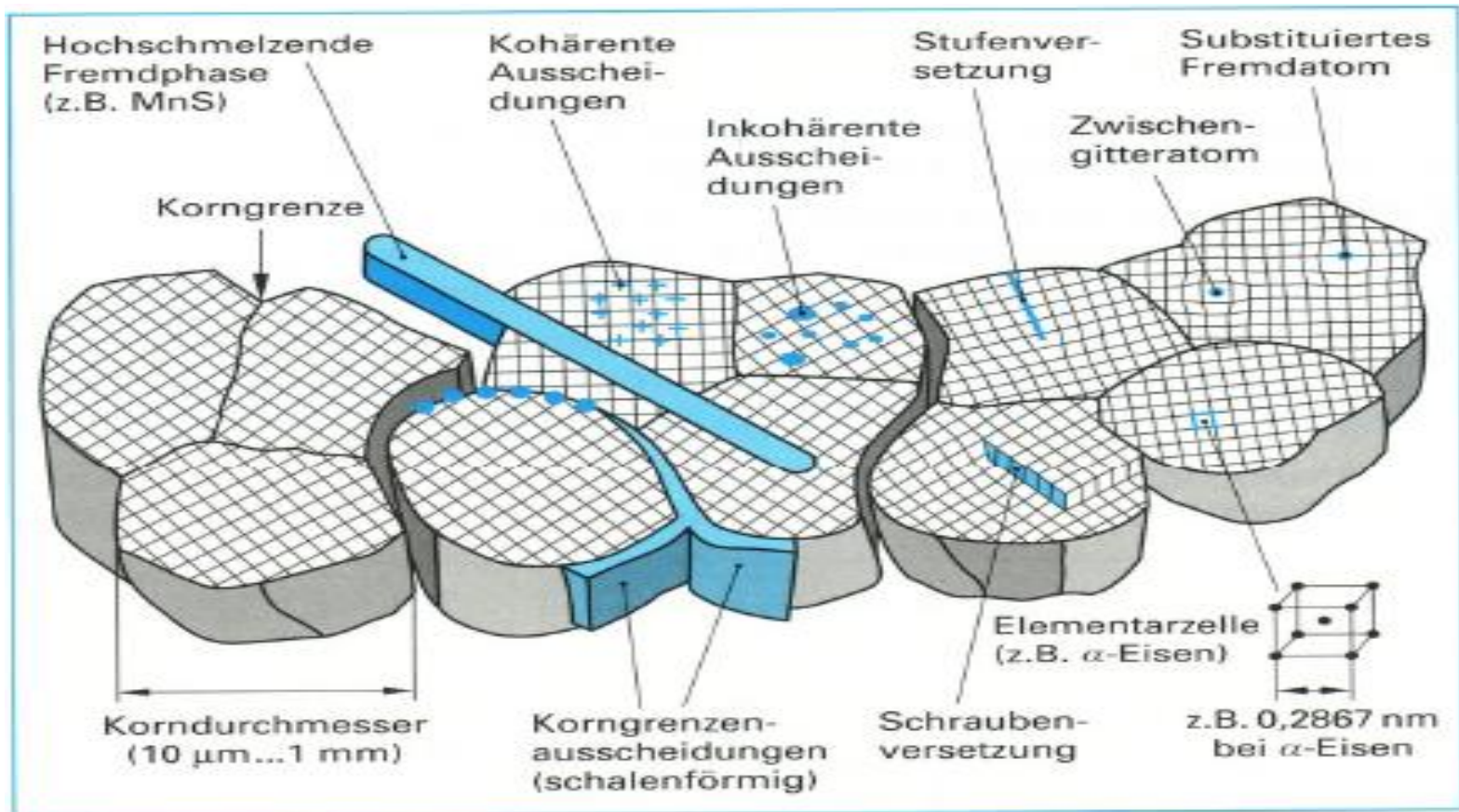
# Gefüge: Verband der Körner (Kristallite)

[http://www.brr.ch/web4archiv/objects/publikationen/2/03\\_d.pdf](http://www.brr.ch/web4archiv/objects/publikationen/2/03_d.pdf)

[http://www.chemie.de/lexikon/d/Gef%C3%BCge\\_\(Werkstoffkunde\)?PHPSESSID=360e21993654531e6e7c826f20312e8c%5BL%5D](http://www.chemie.de/lexikon/d/Gef%C3%BCge_(Werkstoffkunde)?PHPSESSID=360e21993654531e6e7c826f20312e8c%5BL%5D)

- Das Gefüge gibt Aufschluß über Größe und Form der Kristallite und weiterer Gefügebestandteile:
  - **Korngrenzen und Versetzungen**
  - **Ausscheidungen**
  - **ungewollte Einschlüsse**

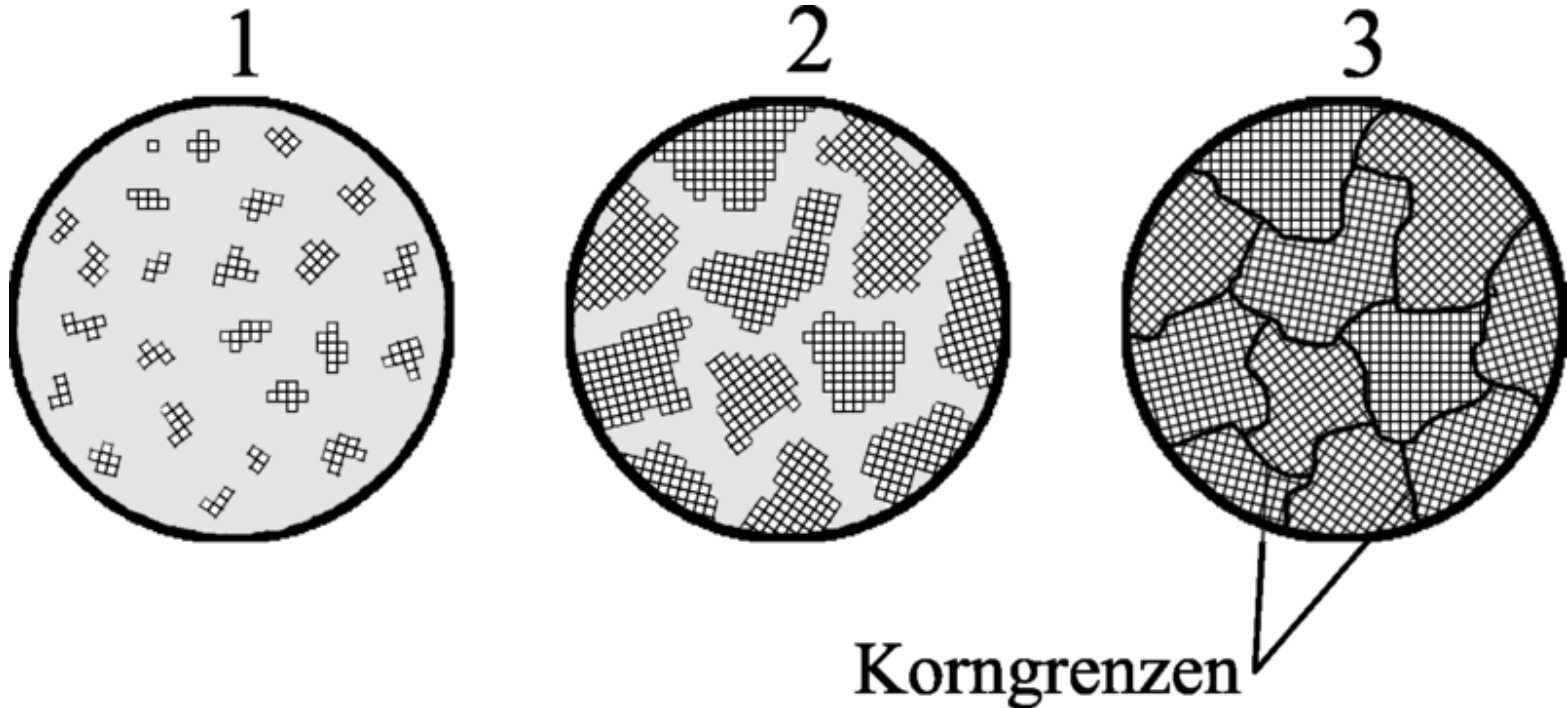
# Reales Gefüge (schematisch)



Aufbau eines Metallgefüges (schematisch)

# Primärgefüge

[http://de.wikipedia.org/wiki/Gef%C3%BCge\\_\(Werkstoffkunde\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Gef%C3%BCge_(Werkstoffkunde))



- Das Primärgefüge entsteht, wenn die Schmelze eines kristallinen Stoffes abkühlt. Beim Erreichen der Erstarrungstemperatur kommt es an vielen Stellen innerhalb der Schmelze, ausgehend von zufällig entstandenen Kristallisationskeimen, zur Kristallbildung.

# Primär- und Sekundärgefüge

[http://www.tu-dresden.de/mwiwwpww/metallo\\_unt\\_2.pdf](http://www.tu-dresden.de/mwiwwpww/metallo_unt_2.pdf)

- **Primärgefüge** entsteht  
z.B. beim Urformen durch
  - Erstarrung einer Schmelze
  - Sintern von Pulvern (Pulvermetallurgie)
  - Kristallisation z.B. aus dem Plasmazustand
- **Sekundärgefüge** entsteht z.B.
  - durch Umformen
  - durch eine Wärmebehandlung

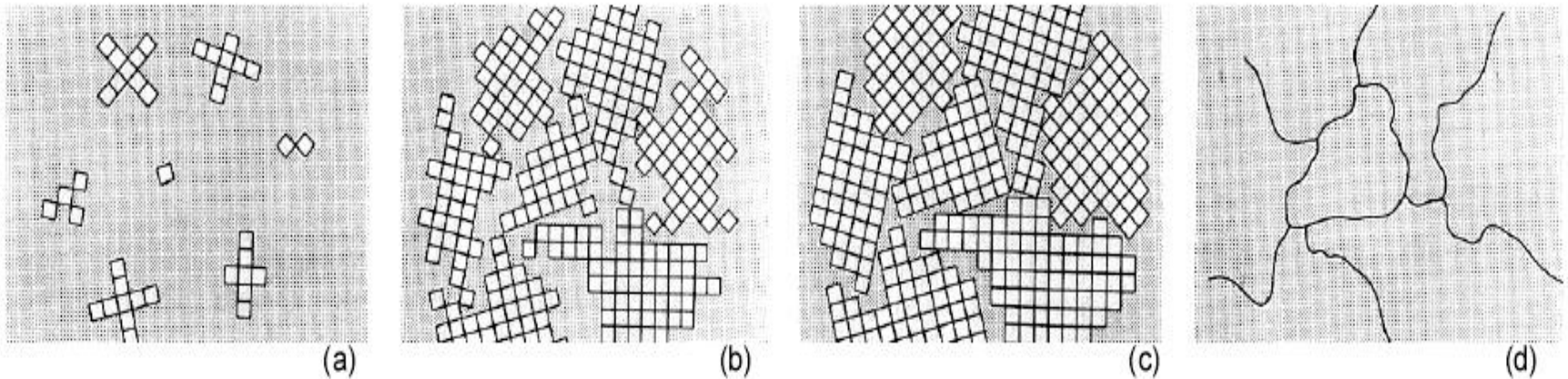


# Erstarrungsvorgang

- Das Wachstum der Kristalle ist an zwei Bedingungen geknüpft:
  - **Kristallkeime**
    - um die Keime lagern sich die träger gewordenen Atome zu einem Kristallgitter an
      - viele Keime: **Feinkorn**
      - wenig Keime: **Grobkorn**
  - **Unterkühlung** der Schmelze und Abfuhr der entstehenden Kristallisationswärme

# Entstehen des Primärgefüges aus der Schmelze

aus CD Adenteuer Stahl; VOEST-ALPINE STAHL GmbH



- **Abb.: Schematische Darstellung der verschiedenen Stufen der Erstarrung eines polykristallinen Werkstoffes**
  - a) kleine Kristallkeime
  - b) Wachstum der Kristalliten mit gegenseitiger Behinderung
  - c) irreguläre Kornform bei Abschluss der Erstarrung
  - d) Kornstruktur im Mikroskop

# Primärgefüge

<http://www.mf.mpg.de/de/zwe/mg/Gefuegeinterpretation/ppframe.htm>



## 2. Erstarrung von Metallen

Bei normaler Gießtemperatur sind in der Schmelze Keime aus wenigen Elementarzellen vorhanden. An diese lagern sich Atome an - es bilden sich Dendriten oder Zellen. Stoßen diese aneinander, bilden sich Körner (Kristallite) mit Korngrenzen (Abb. 2). Bild 1 zeigt Aluminium-Dendriten (durch Tiefätzung sichtbar gemacht), wie sie in einer teilweise erstarrten Schmelze vorliegen.

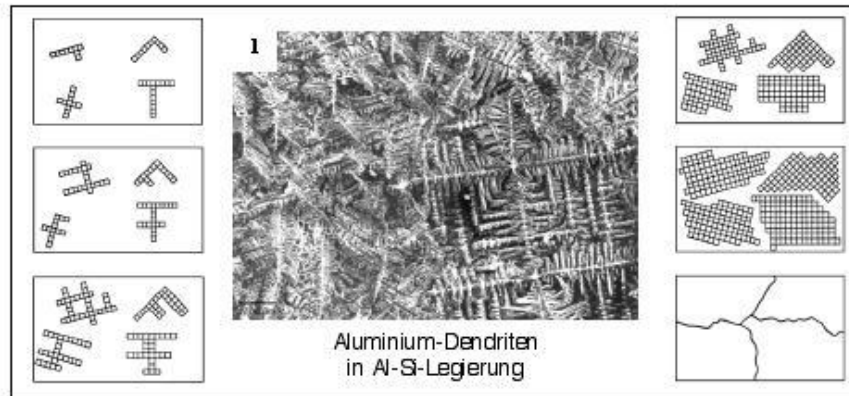


Abb. 2: Erstarrung von Metallen

# Kristallisationswärme / Keime

- **Wärmeableitung** ist wichtig für
  - **Unterkühlung zur Keimbildung**
  - **Entzug der Kristallisationswärme**
- Für das **Wachstum** von Kristalliten müssen **Keime** vorhanden sein. Bei der Kristallisation wird Wärme frei. Diese muss ständig abgeführt werden. **Keimzahl und Wachstumsgeschwindigkeit steigen mit der Unterkühlung.** Gute Wärmeabfuhr begünstigt die Unterkühlung der Schmelze.

# Isotropie / Anisotropie

- **Isotropie** (isos = gleich; tropos = Richtung)
  - Eigenschaften sind **richtungsunabhängig**
- **Anisotropie**
  - Eigenschaften sind **richtungsabhängig**
- **Für den Einzelkristall (zB kfz-Gitter) sind viele Eigenschaften von der Richtung abhängig!**

# Hysterese

- Die Trägheit der Teilchen führt bei schneller Abkühlung zur **Unterkühlung**, bei schneller Erwärmung zum Überschreiten des Schmelzpunktes, ohne dass die Schmelze entsteht = **Hysterese**
- Hysterese z.B. auch bei Federn: Ein- und Rückfedern verlaufen nach verschiedenen Kennlinien
- Es gibt auch eine magnetische Hysterese

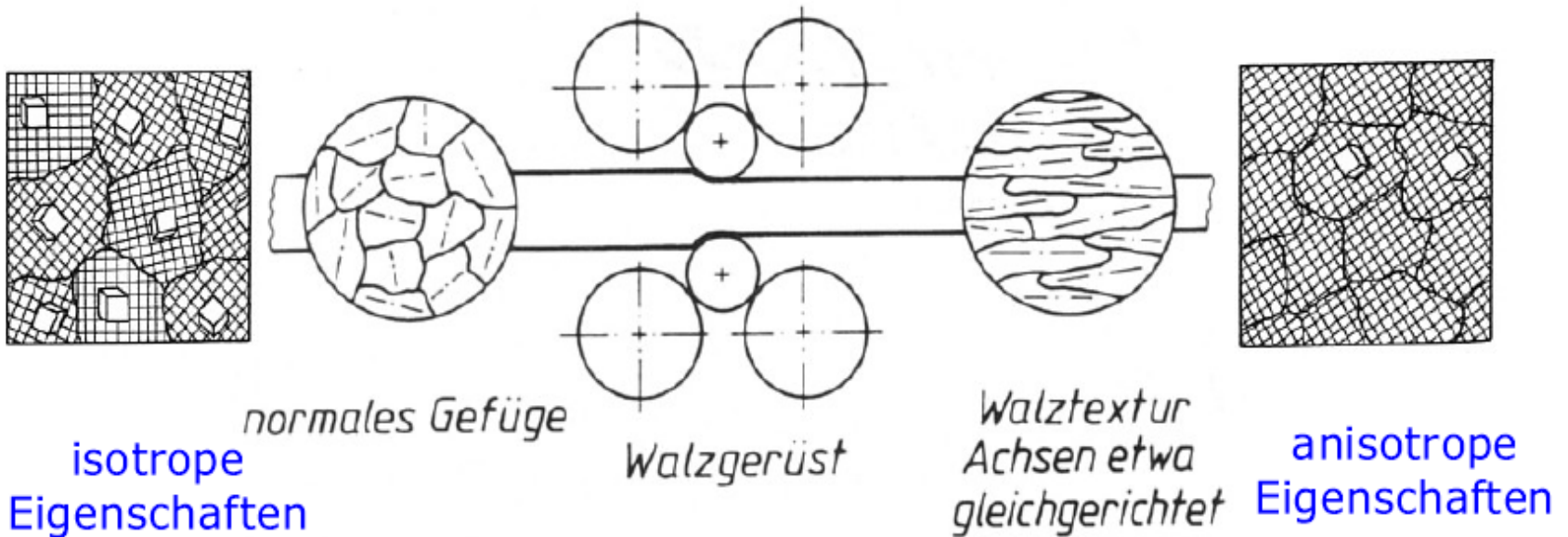
# Texturen

(Ausrichtung von Kristalliten)

- Einige Formgebungsverfahren erzeugen Kristallite, die in eine **Vorzugsrichtung** gedrängt worden sind. Diese Ausrichtung heißt **Textur**
- **Textur**: Gleichrichtung der Kristallachsen. Führt zu **anisotropem** Verhalten des Werkstoffes

# Walztextur / anisotrope Eigenschaften

## Entstehung einer Walztextur



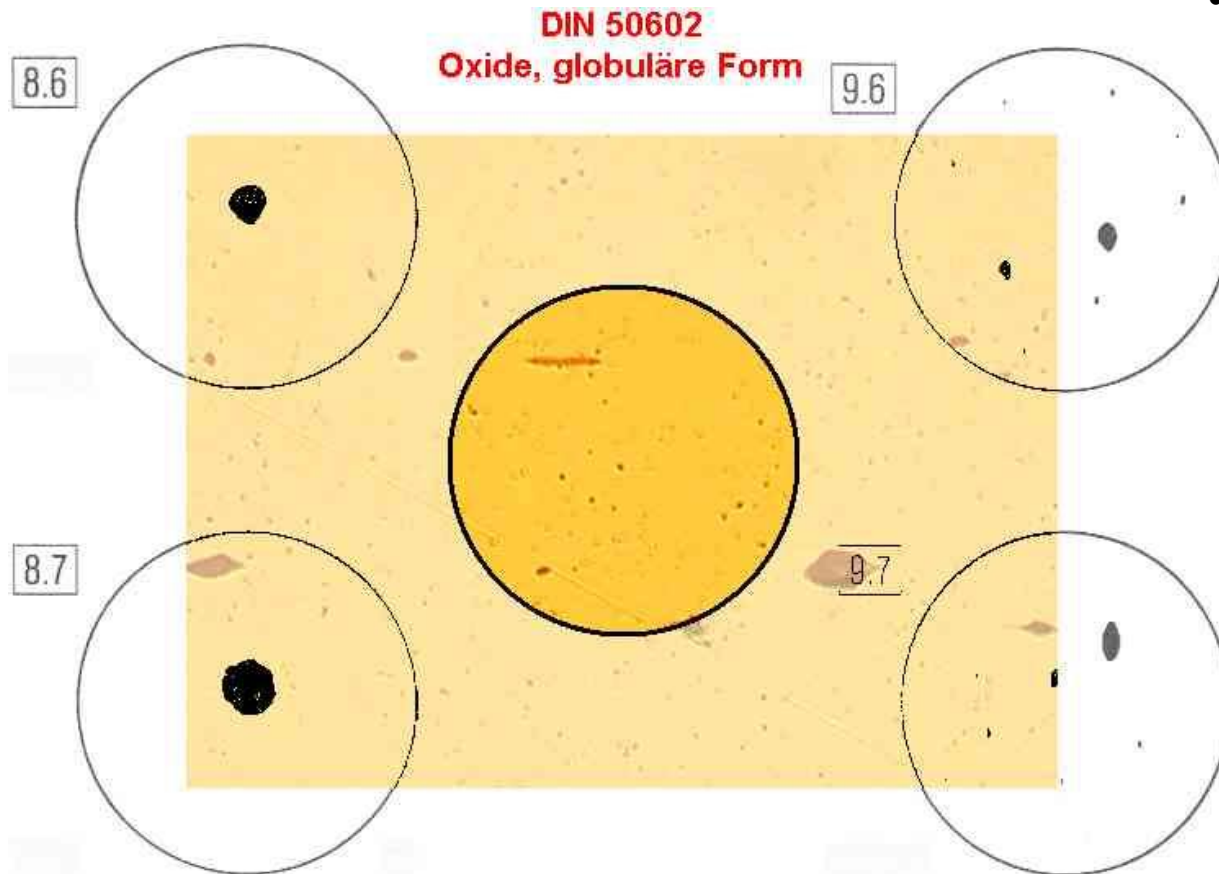


# Ausrichtungen im Gefüge

- entstehen auch durch die **Schlackenteilchen** (**Oxide**, **Sulfide** u.a. = **NME** = **NichtMetallische Einschlüsse**)
- sie werden z.B. bei der Warmumformung **gestreckt (Faserverlauf)**
- dadurch kann auch ein sogenanntes **Zeilengefüge** entstehen

# NME = Nichtmetallische Einschlüsse

[http://www.jomesa.com/deu/bildanalyse/metallographie/metallographie\\_din50602.htm](http://www.jomesa.com/deu/bildanalyse/metallographie/metallographie_din50602.htm)



## • Schliffbild:

- Bewertung der nichtmetallischen Einschlüsse durch Vergleich mit Bildreihen nach verschiedenen Normen
- Bei herkömmlicher Arbeitsweise werden die Richtreihenbilder meist auf Papier (und an der Wand hängend) mit dem Okularbild am Mikroskop verglichen und dadurch der Schliff bewertet.
- Moderne Bildanalyse kann diese Art der Bewertung wesentlich erleichtern, indem die Richtreihenbilder in das vom Mikroskop abgegriffene Videobild eingeblendet werden. Dadurch sieht der Betrachter Schliffbild und Richtreihenbilder in einer Ebene.

# Nichtmetallische Einschlüsse

[http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/09\\_Metallographie/Metallographie.htm#eim](http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/09_Metallographie/Metallographie.htm#eim)

<http://www.metallograf.de/start.htm?begriffe/begriffe.htm>

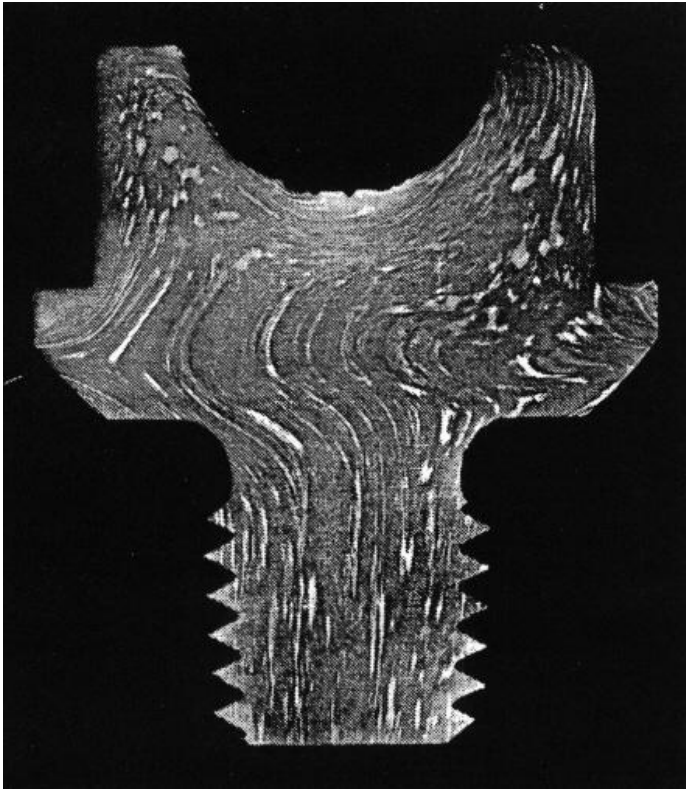


- Abgeschmolzene oder mitgerissene Teilchen der Ausmauerung, nicht aufgelöste Reste von Legierungselementen, Reaktionsprodukte in der Schmelze, z.B. Sulfide, Carbide und Oxide, bilden die Einschlüsse.

**Oxidschlacken + MnS;  
Automatenstahl**

# Faserverlauf bei einer Schraube

[http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/09\\_Metallographie/Metallographie.htm#ano](http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/09_Metallographie/Metallographie.htm#ano)

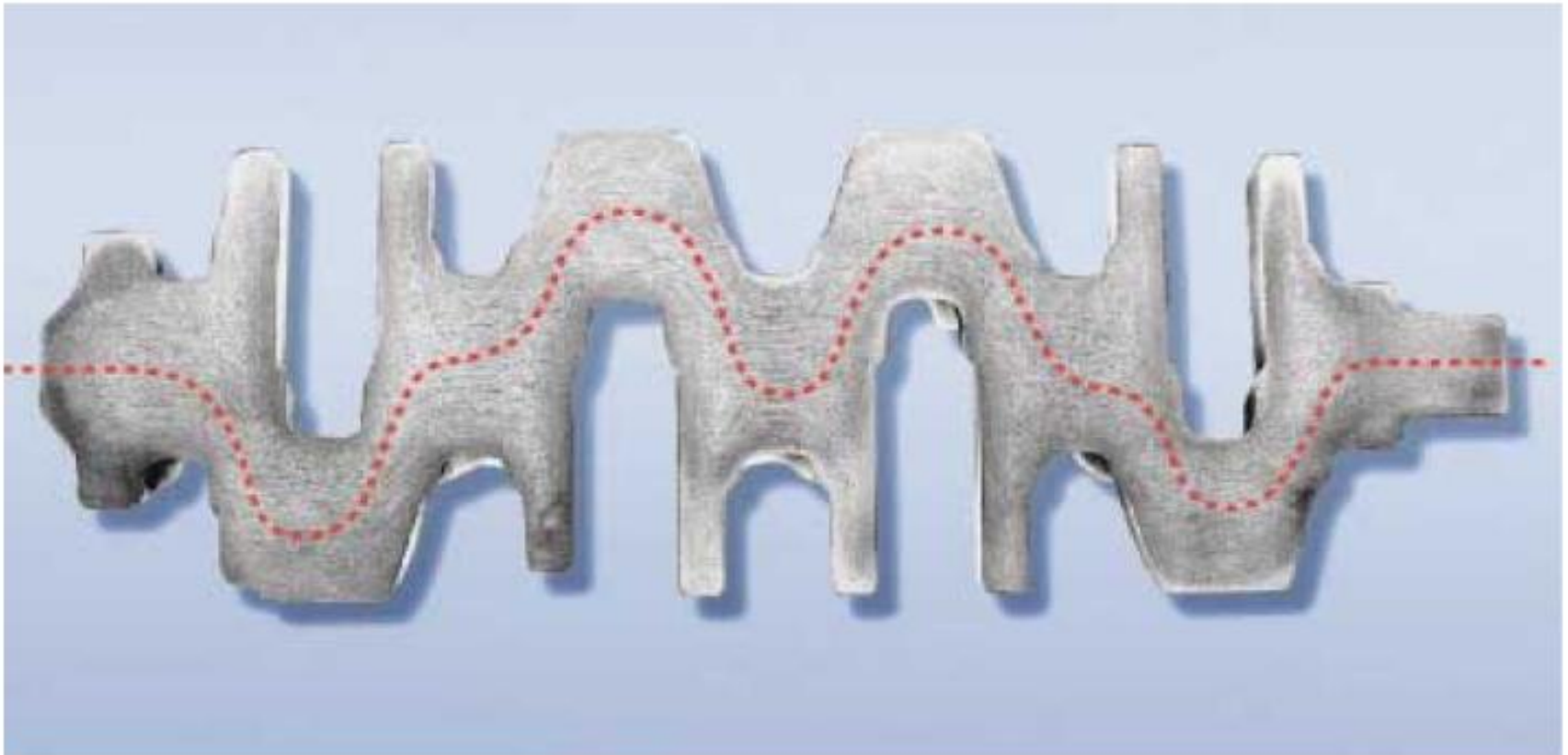


- Das Ätzmittel nach Oberhofer wird angewendet, um Phosphoranreicherungen, und damit den Faserverlauf, sichtbar zu machen. Der Faserverlauf ist bei Maschinenteilen, die sehr hoch beansprucht werden, wichtig, denn senkrecht zum Faserverlauf ist die Festigkeit höher als bei Querrichtung (Kurbelwellen, Schraubenköpfe).

**Ätzung nach Oberhoffer, Seigerung und Faserverlauf bei angestauchten Schrauben**

# Faserverlauf – geschmiedete Kurbelwelle

<http://www.metalfarm.de/internet/periodica/00000737.pdf>



*Faserverlauf in einer geschmiedeten Kurbelwelle*

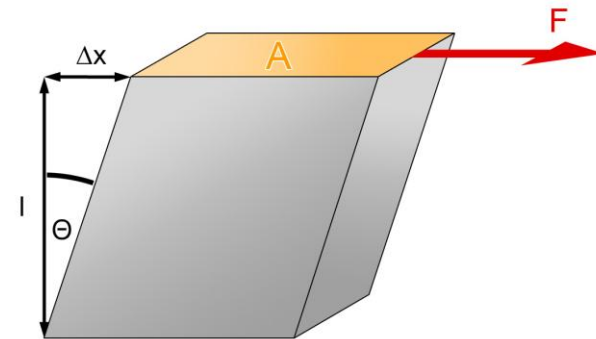
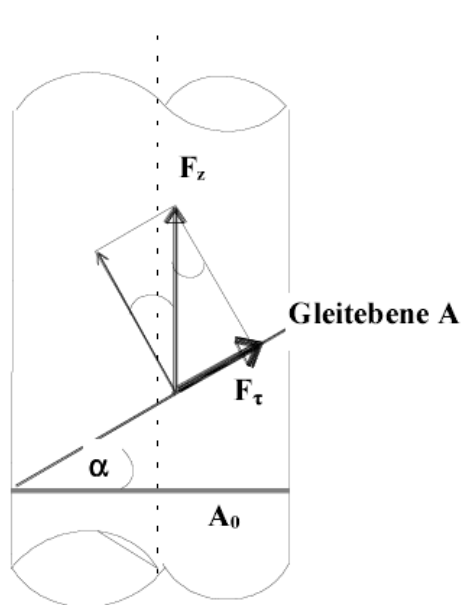
*Quelle: ThyssenKrupp*

# Verformung und mechanische Eigenschaften

- Verformung bei Raumtemperatur
  - **Elastische** Verformung
  - **Plastische** Verformung
- **Elastische Verformung**: Bei niedrigen Belastungen verformt sich ein Bauteil, z.B. eine Blattfeder, sodass die Verformung bei Entlastung wieder zurückgeht

# Elastische und plastische Verformung

[http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/IWS/PDF/Skript\\_teil02.pdf](http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/IWS/PDF/Skript_teil02.pdf)



Gleitung wird in dem Gleitsystem zuerst einsetzen, in dem die Schubspannungskomponente aufgrund einer günstigen Orientierung den höchsten Wert besitzt

Bild 3: Kraftzerlegung zur Bestimmung der Schubspannung

- Bezogen auf eine vorgegebene **Zugspannung**  $\sigma$  ergibt sich eine größtmögliche Schubspannung  $\tau$  im Gleitsystem, wenn die Winkel zwischen Zug- und Gleitrichtung und zwischen Zugrichtung und Gleitebenennormale gerade  $45^\circ$  betragen.

# Plastische Verformung

[http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/Innerer\\_Aufbau/Gitterfehler](http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/Innerer_Aufbau/Gitterfehler)  
[http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/IWS/PDF/Skript\\_teil02.pdf](http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/IWS/PDF/Skript_teil02.pdf)

- **Gleiten:** Zum Gleiten muss die **kritische Schubspannung** überwunden werden
- Die kleinste kritische Schubspannung innerhalb eines Gitters liegt in den sog. **Gleitebenen** vor
- Bevorzugte Gleitebenen: **dichtest** gepackte Gitterebenen im kfz- und h**d**P-Gitter



# Gleitebenen / Gleitsysteme

- **kfz-Gitter (Ag, Au, Cu, Ni, Al, Pb, ...)**
  - 4 Tetraederflächen dichtest gepackt
  - 4 Gleitebenen x 3 Richtungen = 12 Gleitsysteme
- **hdP-Gitter (Be, Cd, Mg,  $\alpha$ -Ti, Zn, ...)**
  - 1 Basisebene dichtest gepackt

# Gleitsysteme

- **kfz-Gitter**: hat 4 Hauptgleitebenen: **Beste Gleiteigenschaften bei Raumtemperatur**
- **krz-Gitter**: Keine Hauptgleitebenen: **Mit größeren Kräften aber auch gut verformbar**
- **hdp-Gitter**: Mit niedrigen Kräften nur **gering verformbar**

# Gitterfehler

## Kristallbaufehler

[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1\\_ge/kap\\_4/backbone/r4\\_1\\_3.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_4/backbone/r4_1_3.html)

<http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/skript/teil2/node4.html>

<http://www.fh-augsburg.de/~michi-k/WSTT/WSTT%20Gitterfehler.pdf>

[http://www.klinik.uni-frankfurt.de/zsmk/prothetik/Links/WSK%20Vorlesungen/Eigenschaften%20von%20Metallen\\_2005-2.pdf](http://www.klinik.uni-frankfurt.de/zsmk/prothetik/Links/WSK%20Vorlesungen/Eigenschaften%20von%20Metallen_2005-2.pdf)

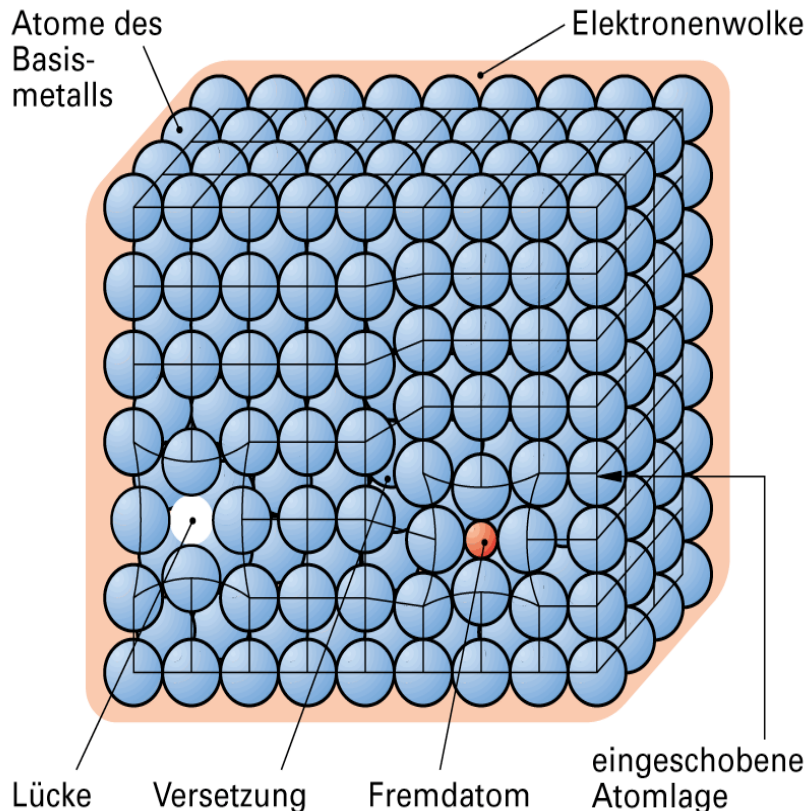
Reale Metalle bestehen aus **Kristalliten**  
**mit Baufehlern**, die zu  
Gitterverzerrungen führen

# Punktförmige Fehler

(nulldimensionale Fehler)

- **Unbesetzte Gitterplätze, Leerstellen**
  - Leerstellen sind wichtig für die Diffusion
  - Leerstelle + Atom auf Zwischengitterplatz:  
FRENKEL-Defekt
- **Fremdatome**
  - Fremdatome erhöhen die Festigkeit, z.B. durch Mischkristallverfestigung

# Baufehler in Metall-Kristallen (Beispiele)



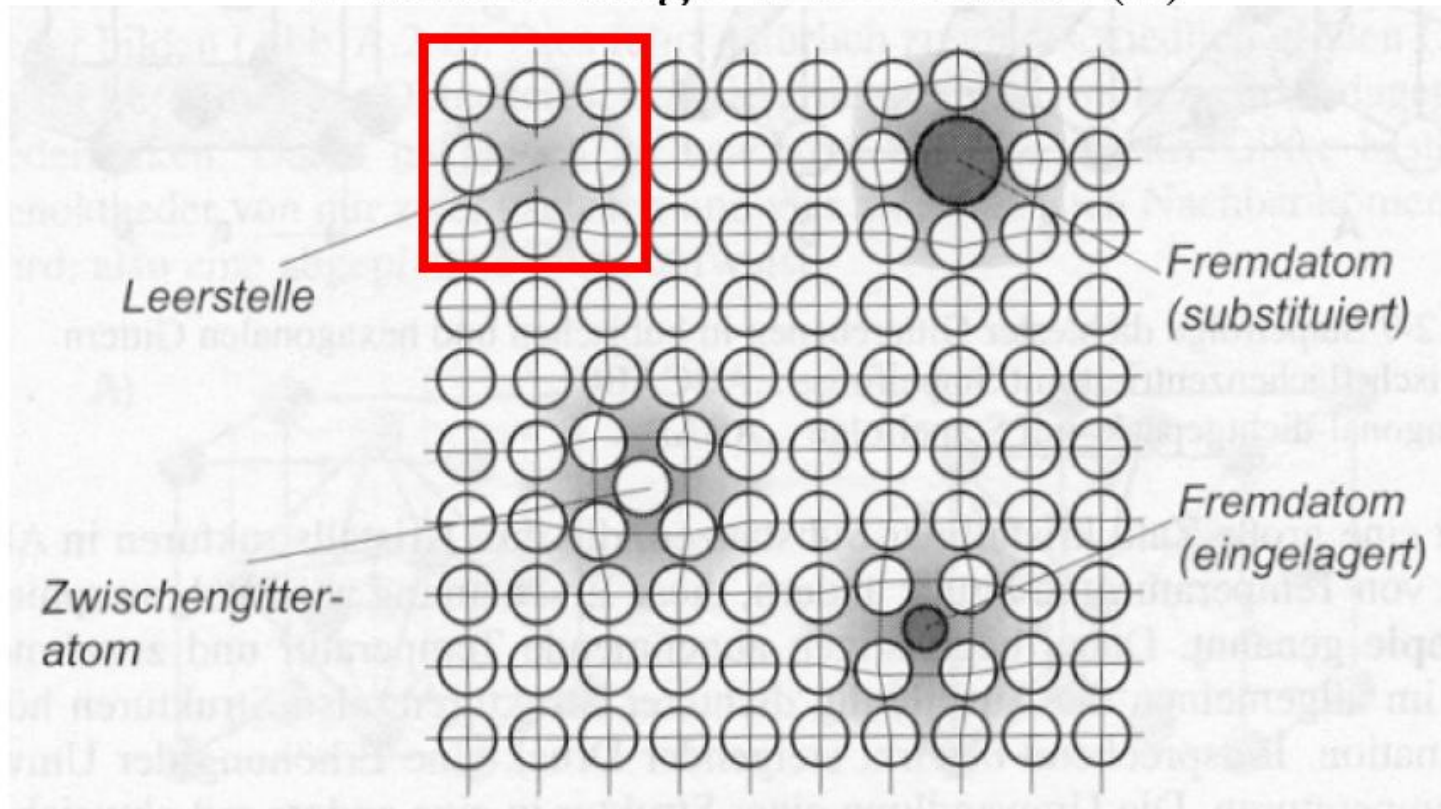
- Beispiele:
  - **Lücke = Leerstelle**
  - **Fremdatom**
    - **Einlagerungsmischkristall**
    - **Austauschmischkristall**



# Punktförmige Gitterfehler schematisch

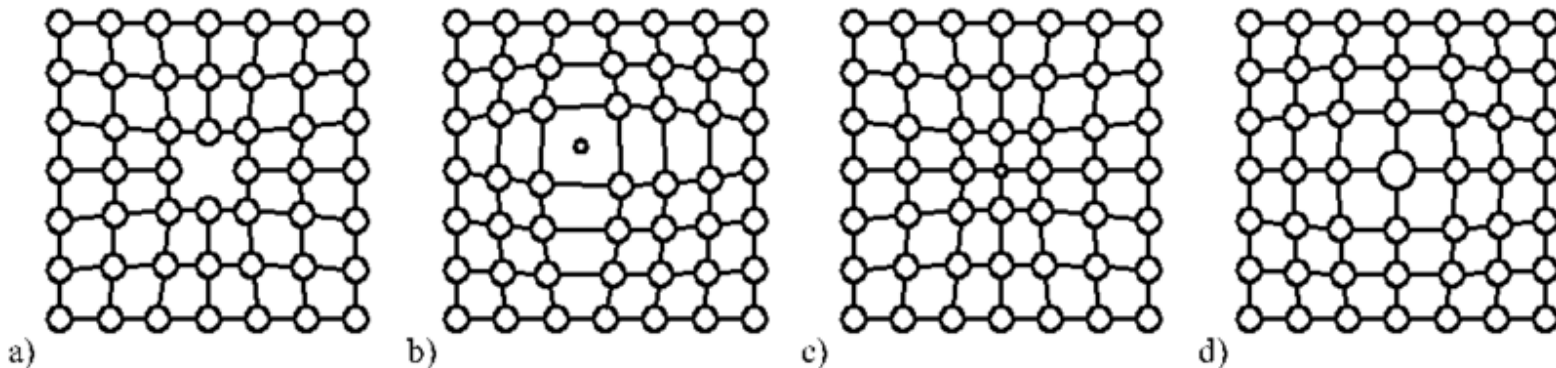
[http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst\\_A22\\_aufbau\\_gitterfehler\\_mecha.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst_A22_aufbau_gitterfehler_mecha.pdf)

## Punktförmige Gitterfehler (1)



# Beispiele für punktförmige Fehler

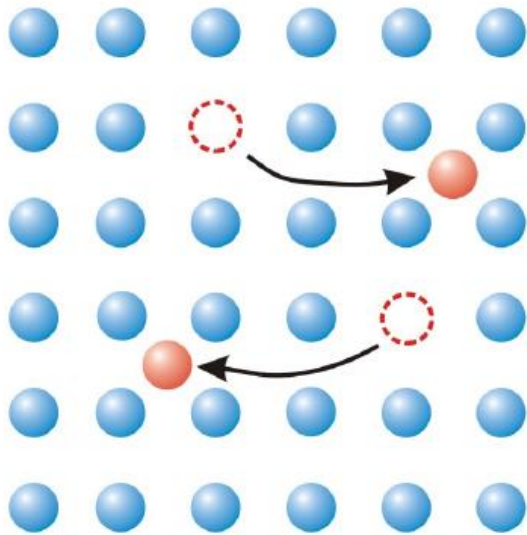
<http://de.wikibooks.org/wiki/Bild:Gitterst%C3%B6rung-Punkt.png>



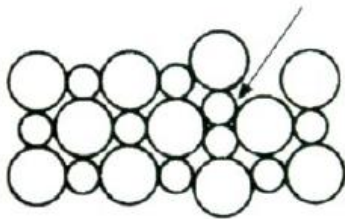
- a) - Leerstelle
- b) - Zwischengitteratom (Einlagerungs-Atom)
- c) - Substitutions-Atom (zu klein)
- d) - Substitutions-Atom (zu groß)

# Beispiel: Punktförmiger Fehler

aus: <http://www.haw-hamburg.de/uploads/media/GitterfehlerundVerformung.pdf>



Frenkel - Defekte



- **Frenkel-Defekte** (auch: **Frenkel-Fehlordnung** oder **Frenkel-Paare**) sind bestimmte, in **Kristallgittern** vorkommende **Punktfehler**. Sie sind nach dem russischen Physiker **Jakow Iljitsch Frenkel** benannt, der sie erstmals beschrieb.
- Ein Frenkel-Defekt entsteht dadurch, dass ein **Atom** seinen regulären Gitterplatz verlässt und auf eine normalerweise nicht besetzte Position im Kristallgitter wandert. Dadurch entsteht jeweils eine **Leerstelle** und ein **Zwischengitteratom**. Zwischen dem Zwischengitteratom und der Leerstelle besteht eine anziehende Wechselwirkung.



# Linienförmige Fehler

(eindimensionale Fehler)

- Versetzungen

- Stufenversetzungen

- Schraubenversetzungen

- ❖ **Bedeutung für die Kaltumformung**

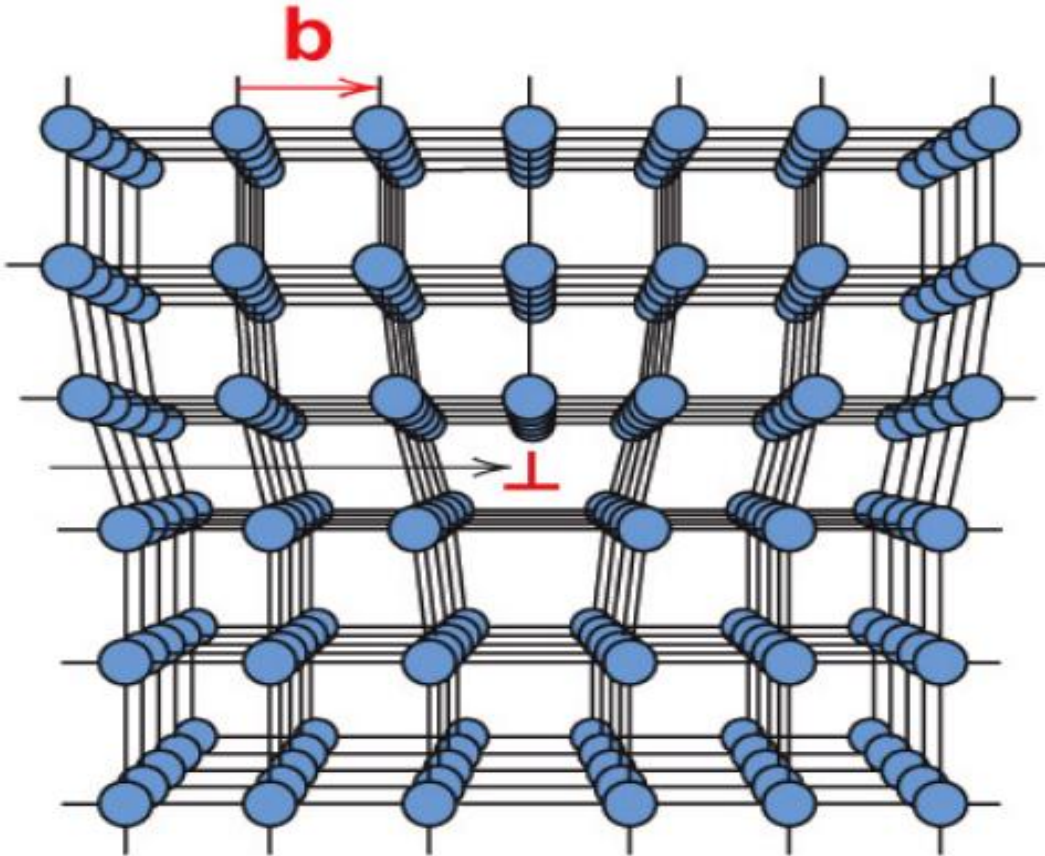
- Senken des inneren Widerstandes gegen Abscheren

- Beweglichkeit ist Grundlage für die plastische Verformung

- die auftretende Kaltverfestigung beruht auf Neubildung weiterer Versetzungen

# Stufenversetzung schematisch

aus: <http://www.haw-hamburg.de/uploads/media/GitterfehlerundVerformung.pdf>

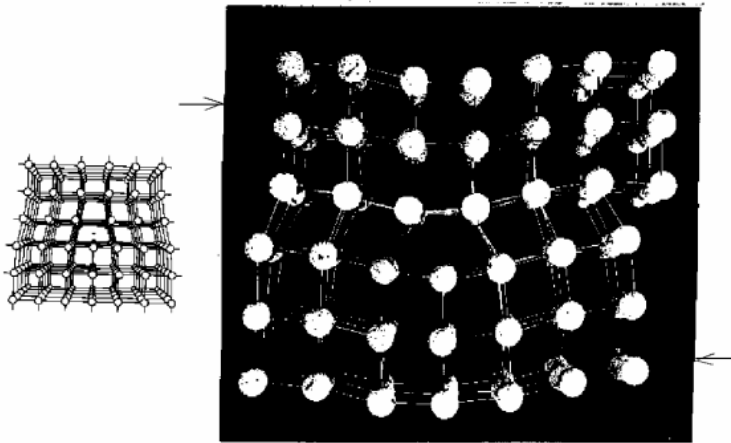


- Wenn der Burgersvektor und die Versetzungslinie senkrecht zueinander stehen, so spricht man von einer **Stufenversetzung**; liegen sie parallel, so handelt es sich um eine Schraubenversetzung. Es gibt jedoch auch beliebige Mischformen zwischen diesen beiden Grundtypen, wenn der Burgersvektor und die Versetzungslinie weder parallel noch senkrecht sind.

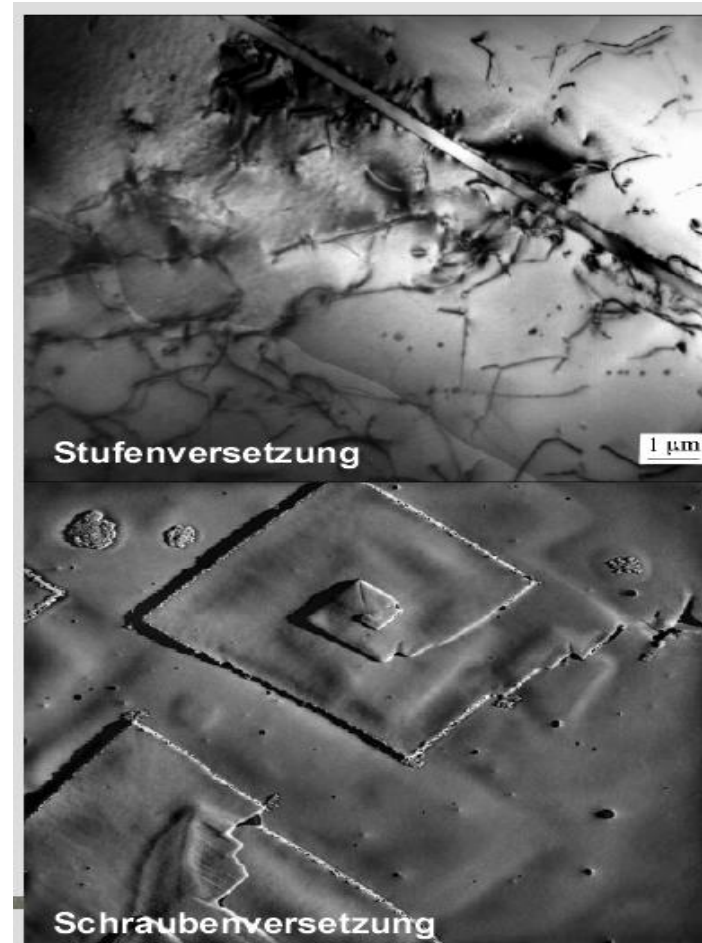
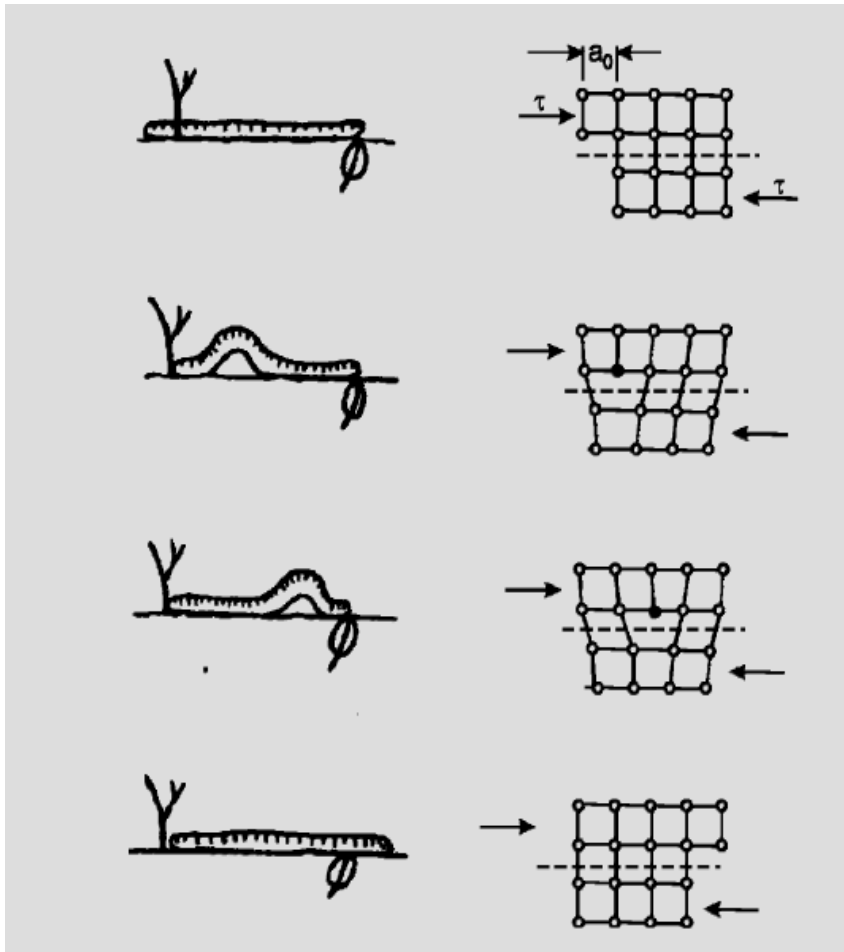
# Stufenversetzung: Zusätzliche Halbebene

- Beispiel für einen linienförmigen Fehler:
  - Stufenversetzung:
    - Man kann sich eine Versetzung als eine zusätzliche Halbebene von Teilchen (Atome, Ionen) vorstellen, die in einen perfekten Kristall eingeschoben ist.

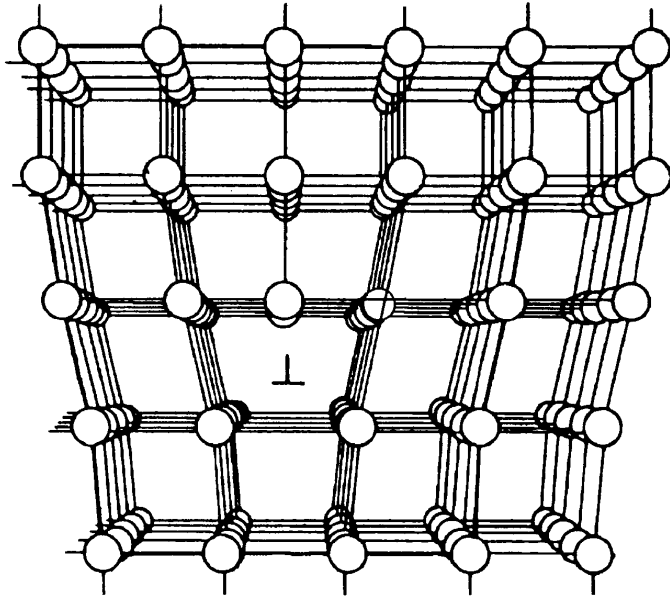
Dislocations (line defects) motion allows *slip* (plastic deformation wherein interatomic bonds are ruptured and reformed).



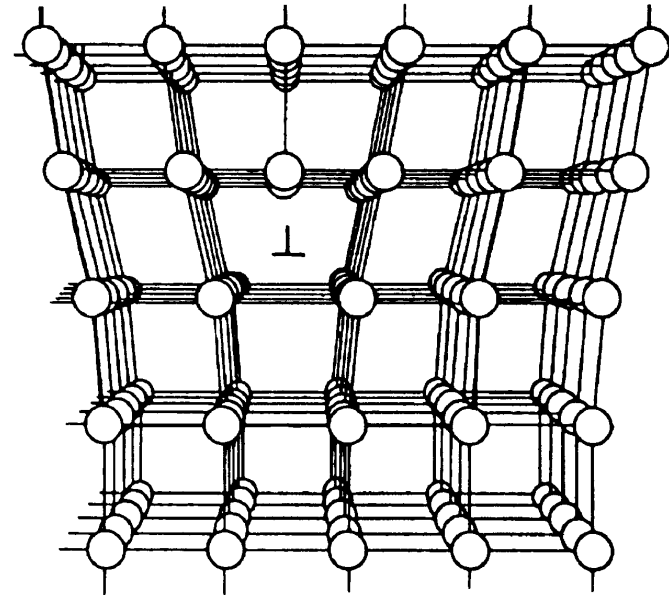
# Gitterbaufehler: Versetzungswanderung



# Klettern einer Stufenversetzung



Versetzung in einem kubisch-primitiven Gitter mit benachbarter Leerstelle

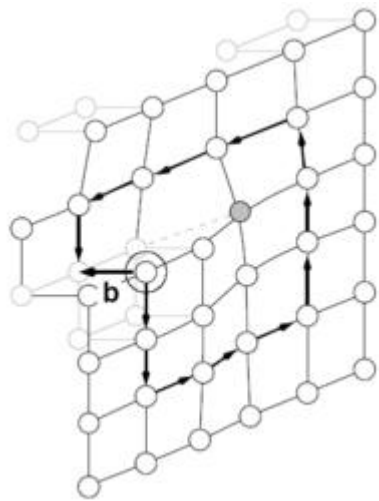


Versetzung in einem kubisch-primitiven Gitter nach dem Klettern um eine Gitterkonstante

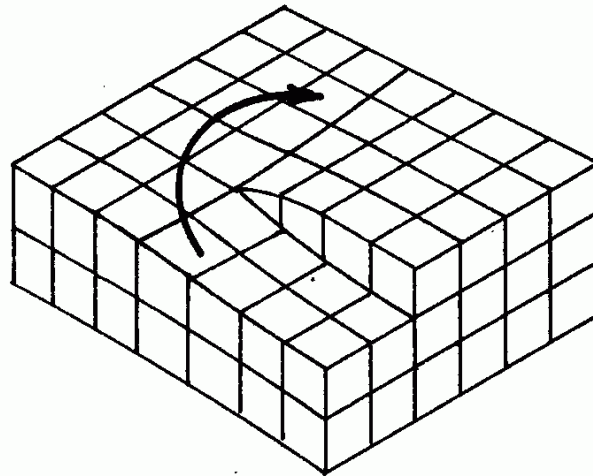
**Klettern einer Stufenversetzung durch Diffusion von Leerstellen zur Versetzungslinie**

# Schraubenversetzung

<http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/skript/teil2/node4.html>



Burgersvektor einer Schraubenversetzung

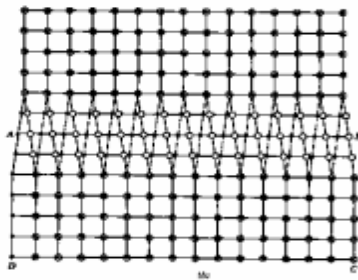
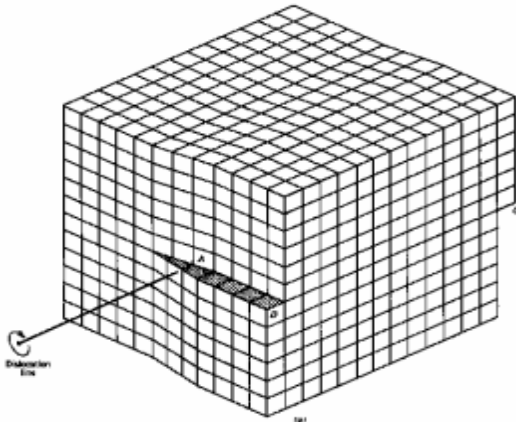


- **Schraubenversetzungen**
  - Bei Schraubenversetzungen liegt die Versetzungslinie parallel zur angreifenden Schubspannung und parallel zum Burgersvektor

# Linienförmiger Fehler: Schraubenversetzung

## Screw Dislocation

Der Burgersvektor einer Schraubenversetzung liegt parallel zur Versetzungslinie.



Screw Dislocation viewed from above

Dislocation along line AB

open circles: atoms above slip plane  
closed circles: atoms below slip plane

William D. Callister, Jr. Materials Science and Engineering, An Introduction. John Wiley & Sons, Inc. 1985

# **Flächenförmige Fehler**

(zweidimensionale Fehler)

- **Korngrenzen**

- Korngrenzen stellen Hindernisse für das Gleiten von Versetzungen dar

- **Stapelfehler**

- sind Bereiche mit anderer Schichtfolge wie die Umgebung



# Klein- und Großwinkelkorngrenze / Phasengrenze

<http://de.wikipedia.org/wiki/Korngrenze>

<http://www.imm.rwth-aachen.de/hp/institut/public/Vollversion/index/k/korngrenze.htm>

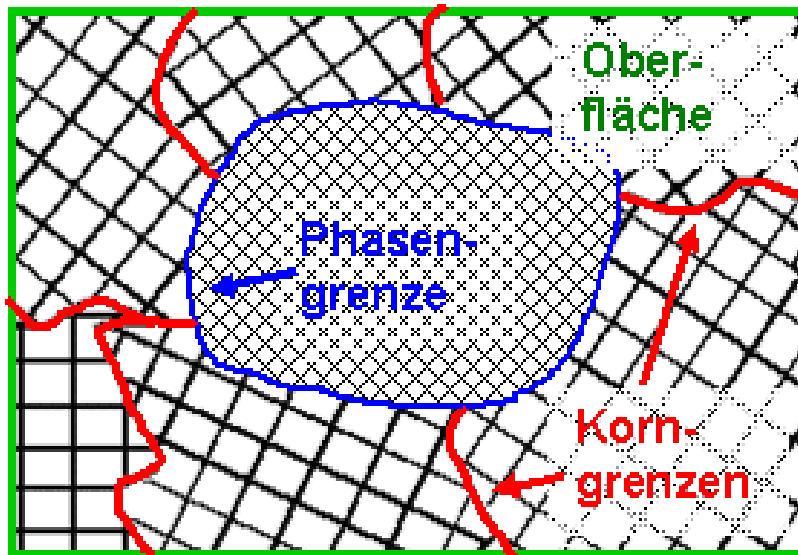


Abbildung aus::

[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1\\_ge/kap\\_4/backbone/r4\\_1\\_5.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_4/backbone/r4_1_5.html)

- Haben zwei Körner nur einen kleinen Orientierungsunterschied (Desorientierung  $Q < 15^\circ$ ) zueinander spricht man von einer **Kleinwinkelkorngrenze**. Kleinwinkelkorngrenzen sind vollständig aus Versetzungen aufgebaut.
- Korngrenzen mit Drehwinkeln über  $15^\circ$  werden als Großwinkelkorngrenzen bezeichnet. Die Struktur der Großwinkelkorngrenze erscheint bei oberflächlicher Betrachtung wie eine regellose, gestörte Zone.

# Kleinwinkel- und Großwinkelkorngrenze

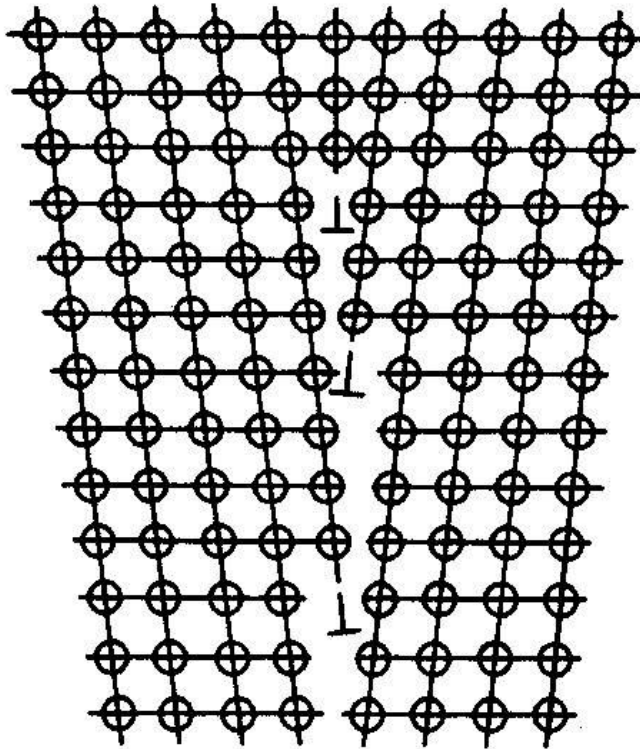


Bild 1.1–17 Kleinwinkelkorngrenze

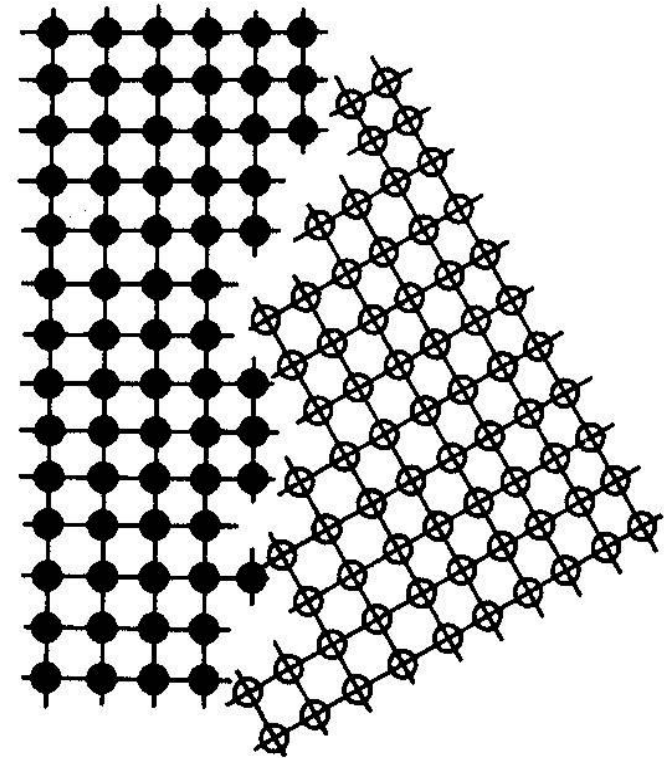
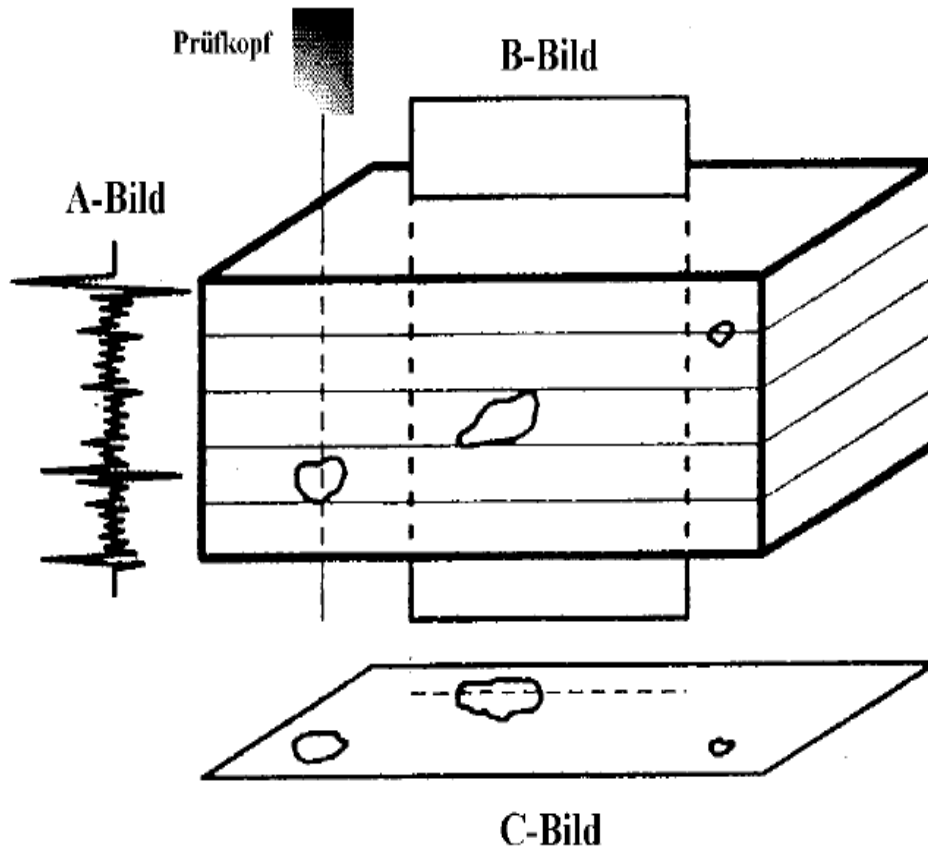


Bild 1.1–18 Großwinkelkorngrenze

# Dreidimensionale Fehler (Volumenfehler)

- **sind kleinste Körper (oder Poren) mit anderer Struktur als die Matrix**
  - **NICHTMETALLISCHE Einschlüsse (NME)**
    - z.B. auch inkohärente Teilchen
  - **Poren, Mikrorisse**
  - **Ausscheidungen**
    - kohärente Ausscheidungen (z.B. Dispersion)

# Dreidimensionale Volumenfehler



- Vgl. auch Volumenfehler und ZfP

Dreidimensionale Volumenfehler sind z.B.:

**Poren**

**Lunker**

**Risse usw.**

# Gitter und Gitterfehler: Infos aus dem Internet

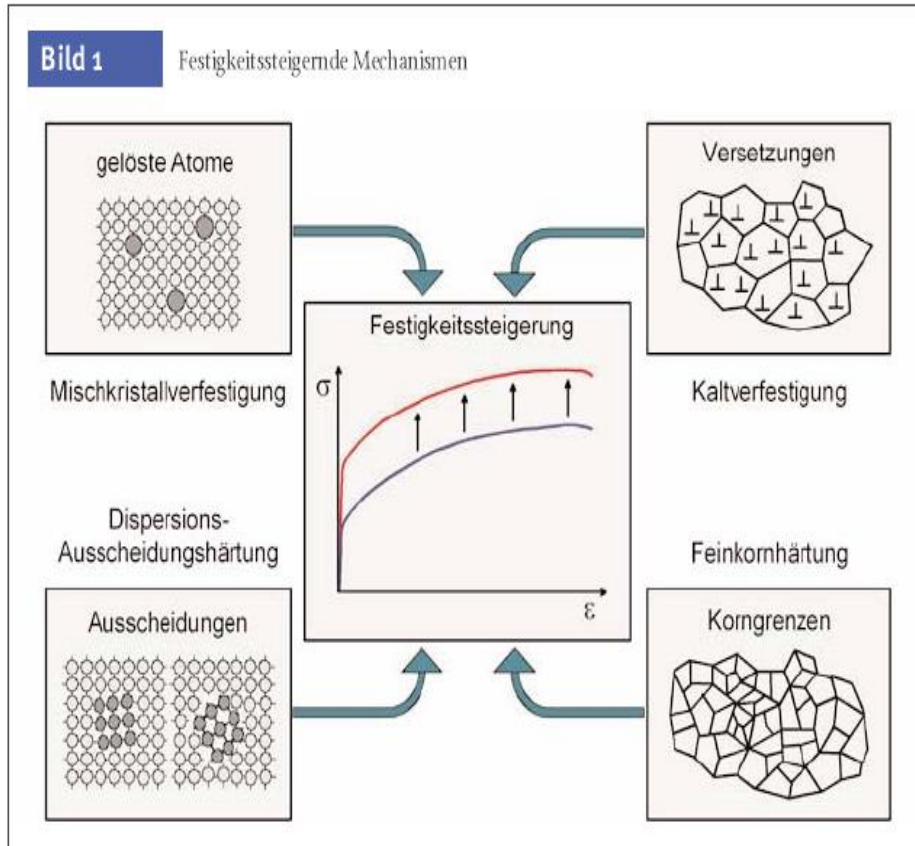
- <http://www.kgu.de/zzmk/werkstoffkunde/WK-V4-SS-2003-D.pdf>
- <http://www.mb4us.de/MB/WK/WKGrundlagen.doc>
- [https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/Grundlagen\\_der\\_MaWi.pdf](https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/Grundlagen_der_MaWi.pdf)
- <http://www.uni-due.de/imperia/md/content/werkstofftechnik/praktikum-ss-07.pdf>
- [http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Metalle\\_Aufbau\\_TA.pdf](http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Metalle_Aufbau_TA.pdf)
- [http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsaeetze/g\\_fehler.pdf](http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsaeetze/g_fehler.pdf)
- [http://files.hanser.de/files/docs/20040401\\_2445154311-24640\\_3-446-22135-2.pdf](http://files.hanser.de/files/docs/20040401_2445154311-24640_3-446-22135-2.pdf)
- [http://www.iskp.uni-bonn.de/gruppen/material/public/works/2000\\_Diplom\\_Bommas.pdf](http://www.iskp.uni-bonn.de/gruppen/material/public/works/2000_Diplom_Bommas.pdf)
- [http://iws.tugraz.at/IWS\\_tree/Lehre/Vorlesung/303\\_004/Download/EB\\_ARB.pdf](http://iws.tugraz.at/IWS_tree/Lehre/Vorlesung/303_004/Download/EB_ARB.pdf)
- [http://hrz.upb.de/hfe/lehre/Script\\_wks\\_1b.pdf](http://hrz.upb.de/hfe/lehre/Script_wks_1b.pdf)

# Einige weitere Internetlinks zu Kristallbaufehlern etc.

- [http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsaetze/g\\_fehler.pdf](http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsaetze/g_fehler.pdf)
- <http://www.fh-augsburg.de/~michi-k/WSTT/WSTT%20Gitterfehler.pdf>
- [http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/IWS/PDF/Skript teil03.pdf](http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/IWS/PDF/Skript teil03.pdf)
- [http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/Innerer\\_Aufbau/Gitterfehler](http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/Innerer_Aufbau/Gitterfehler)
- <http://www.uni-due.de/imperia/md/content/werkstofftechnik/praktikum-ss-07.pdf>
- [http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst\\_A22\\_aufbau\\_gitterfehler\\_mecha.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-wst-wing-mecha/wst_A22_aufbau_gitterfehler_mecha.pdf)
- [http://www.iul.uni-dortmund.de/pages/de/textonly/content/lehre/lehrveranstaltungen/uft\\_ws0708/UFT\\_1\\_Skript.pdf](http://www.iul.uni-dortmund.de/pages/de/textonly/content/lehre/lehrveranstaltungen/uft_ws0708/UFT_1_Skript.pdf)
- <http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/lectures/lectures/pwe/pwe-default-page/c11-kribafe.pdf>
- <http://mitglied.lycos.de/janliese/Downloads/Microsoft%20Word%20-%20Metalle.pdf>
- [http://www.old.uni-bayreuth.de/departments/metalle/Publikationen/Technologiefhrer\\_01\\_Metalle.pdf](http://www.old.uni-bayreuth.de/departments/metalle/Publikationen/Technologiefhrer_01_Metalle.pdf)

# Verfestigungsmechanismen

[http://www.utfscience.de/pdf/60330\\_UT-06-01\\_004xx0106ut.pdf](http://www.utfscience.de/pdf/60330_UT-06-01_004xx0106ut.pdf)



- Über die Art und Menge von Legierungsbestandteilen, wie z. B. Silizium, Mangan oder Phosphor, lässt sich der durch **Mischkristallbildung** erzielbare Verfestigungseffekt beeinflussen.
- Bei der Verfestigung durch **Ausscheidung** von Teilchen aus einer spröden Zweitphase in eine Grundmatrix entstehen Partikel, die die Bewegung von Versetzungen behindern. Die verfestigende Wirkung dieser Ausscheidungsteilchen hängt sehr stark von deren Größe ab. Je kleiner die Ausscheidungsteilchen sind und je feiner ihre Verteilung in der Grundmatrix ist, desto größer ist die Behinderung der Gleitung von Versetzungen und damit die **Verfestigung** des Materials.
- Die Verfestigung durch Ausscheidung kann wie die Mischkristallverfestigung durch die Zugabe von Legierungselementen, wie z. B. Vanadium, Niob und Titan, begünstigt werden.
- Bei der **Kaltverfestigung** ist eine Festigkeitssteigerung durch plastische Verformung auf die Entstehung neuer **zusätzlicher Versetzungen** aufgrund verschiedener Mechanismen zurückzuführen.

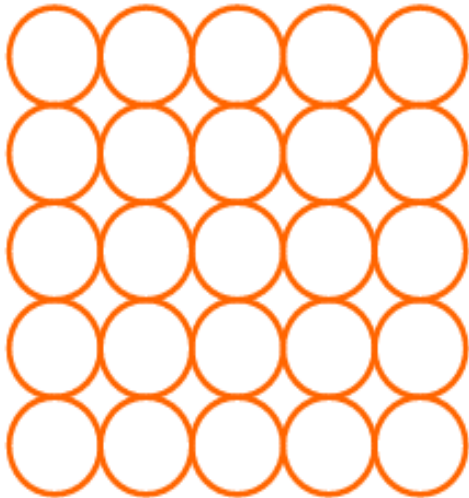
# Legierungsstrukturen

- ❖ **Reine Kristalle** (eine Komponente)
- ❖ **Mischkristalle (MK)**, feste Lösungen
  - ❖ **Austausch-MK** (z.B. **Cu - Ni**)
  - ❖ **Einlagerungs-MK** (z.B. **B, C, N, O** in **Fe**)
- ❖ **Intermetallische Phasen**, z.B. Cu-Zn:  
Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, CuZn<sub>3</sub>, oder bei aushärtenden Al-Legierungen: z.B. Mg<sub>2</sub>Si

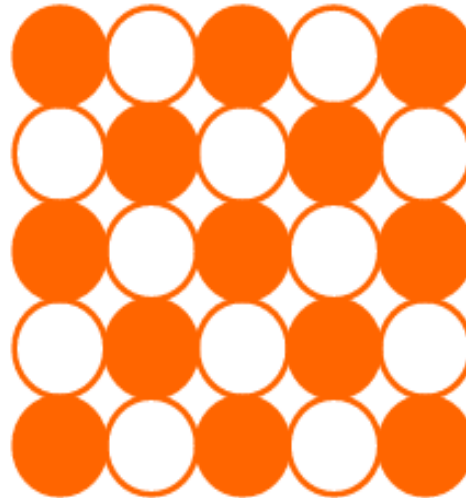


# Reinelement / Mischkristalle

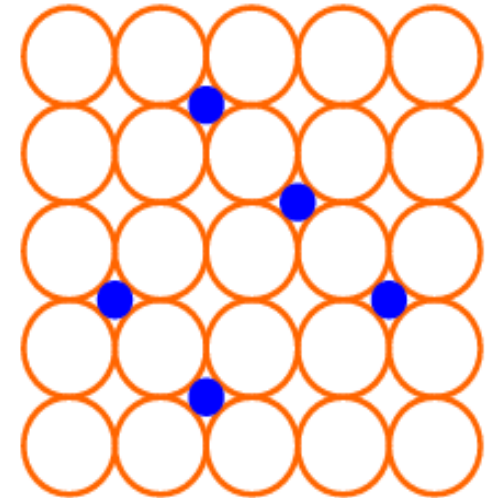
nach prof. Thienel, Bundeswehr-Universität München



Reinelement



Austausch



Einlagerung

Elemente mit sehr kleinen Atomradien haben die Fähigkeit, sich in Zwischengitterplätze einzubauen und interstitielle (eingelagerte) **Einlagerungs-Mischkristalle** zu bilden, z. B. Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff in Eisen.

# Austausch- oder Substitutionsmischkristall

aus: [http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen\\_legierungsbildung.pdf](http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen_legierungsbildung.pdf)

[http://www.teubner.de/freebook/978-3-8351-0052-7\\_1.pdf](http://www.teubner.de/freebook/978-3-8351-0052-7_1.pdf)

[http://www.fh-brs.de/data/anna\\_/Lehrveranstaltungen/SuE%20der%20Materialien/2%20SEM-Zweistoffsysteme.ppt](http://www.fh-brs.de/data/anna_/Lehrveranstaltungen/SuE%20der%20Materialien/2%20SEM-Zweistoffsysteme.ppt)

## Substitutionsmischkristall

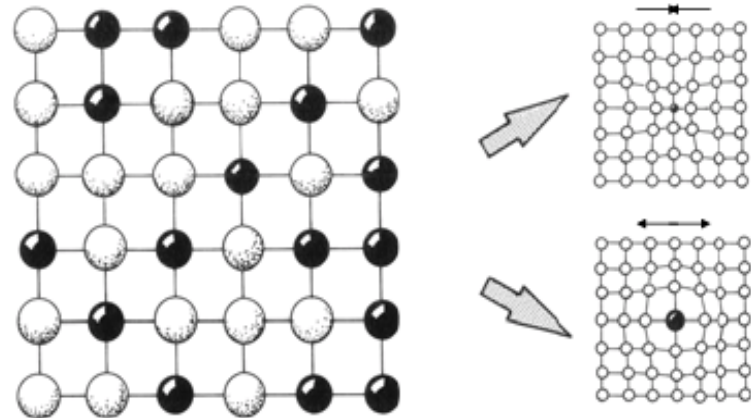
- Beide Komponenten sind am Gitteraufbau beteiligt, weil beide einen ähnlichen Gittertypus besitzen.
- Eine Komponente bildet die Gitterstruktur und die Atome setzen sich auf reguläre Gitterplätze. Es entsteht ein **Austausch-** oder **Substitutionsmischkristall**.

OA Klinke

Beispiel: Cu-Ni-Münzlegierung

75% Cu – 25% Ni

## Substitutionsmischkristall



Substitutionsmischkristalle weisen lokale Spannungen innerhalb des Gitters auf, die zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften führen.

OA Klinke

# Einige Kupferlegierungen

- **Messing (Kupfer-Zink-Legierungen)**
- **Bronzen**
  - **Zinnbronze: Cu-Sn-Legierungen**
  - **Aluminiumbronze: Cu-Al-Legierungen**
- **Neusilber**
  - **Cu-Sn-Zn-Legierungen**
- **Münzlegierungen**
  - **Cu75-Ni25**

# Münzlegierungen

[http://www.bam.de/pdf/service/referenzmaterialien/zertifikate/nichteisen/erm\\_eb389\\_report\\_bam.pdf](http://www.bam.de/pdf/service/referenzmaterialien/zertifikate/nichteisen/erm_eb389_report_bam.pdf)  
<http://www.oeaw.ac.at/esi/deutsch/forschung/materialien/met/>  
[http://www.oenb.at/de/img/muenzbroschuere\\_ausgabe\\_2007\\_tcm14-52628.pdf](http://www.oenb.at/de/img/muenzbroschuere_ausgabe_2007_tcm14-52628.pdf)



- **1 Euro:** Außen **CuZn20Ni5**,  
Innen **CuNi25** auf Ni-Kern



- **2 Euro:** Außen **CuNi25**, Innen  
Innen **CuZn20Ni5** auf Ni-Kern

# 10 Cent – Münzlegierung $\text{CuAl5Zn5Sn1}$

aus: <http://htl17.at/Teatime/Projekte/Projekte2004/10Cent/Munzanalyse.doc>  
[http://www.waldecker-muenzfreun.de/munzmetalle\\_legierungen.html](http://www.waldecker-muenzfreun.de/munzmetalle_legierungen.html)



Vorderseite



Länder-  
spezifische  
Rückseite

Die neuen Euro-Münzen zu 10, 20 und 50 Cent werden aus „**Nordischem Gold**“ hergestellt, da man auf das möglicherweise allergieauslösende Nickel verzichten wollte.

- „**10 Cent**“-  
**Münzlegierung:**
  - Diese Legierung wird auch als „**Nordisches Gold**“ bezeichnet und weist die Sollzusammensetzung **89%Cu, 5%Al, 5%Zn, 1%Sn auf.**

# Stahl: Legierung aus Fe + Fe<sub>3</sub>C

<http://de.wikipedia.org/wiki/Stahl#Definition>

<http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/shop.php?c=3&startpos=15>

- **Stahl:**
  - **Stahl** ist eine metallische Legierung, deren Hauptbestandteil Eisen ist.
- Nach der klassischen Definition ist Stahl eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung, die weniger als 2,06 % (Masse) Kohlenstoff enthält (Ausnahme: hochlegierte Kaltarbeitsstähle). Dieser Definition folgt auch die DIN EN 10020, nach der *Stähle Werkstoffe, deren Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elements, dessen Kohlenstoffgehalt im allgemeinen kleiner als 2 Gew.-% C sind.* Chemisch betrachtet handelt es sich bei dem Werkstoff Stahl um eine Legierung aus Eisen und Eisenkarbid.
- Vgl. auch: Stahl und Edelstahl
  - <http://www.old.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/stahl2/stahl2.htm>

# Legierungsbeispiel: Nichtrostende Stähle

<http://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl>

<http://www.edelstahl-rostfrei.de/>

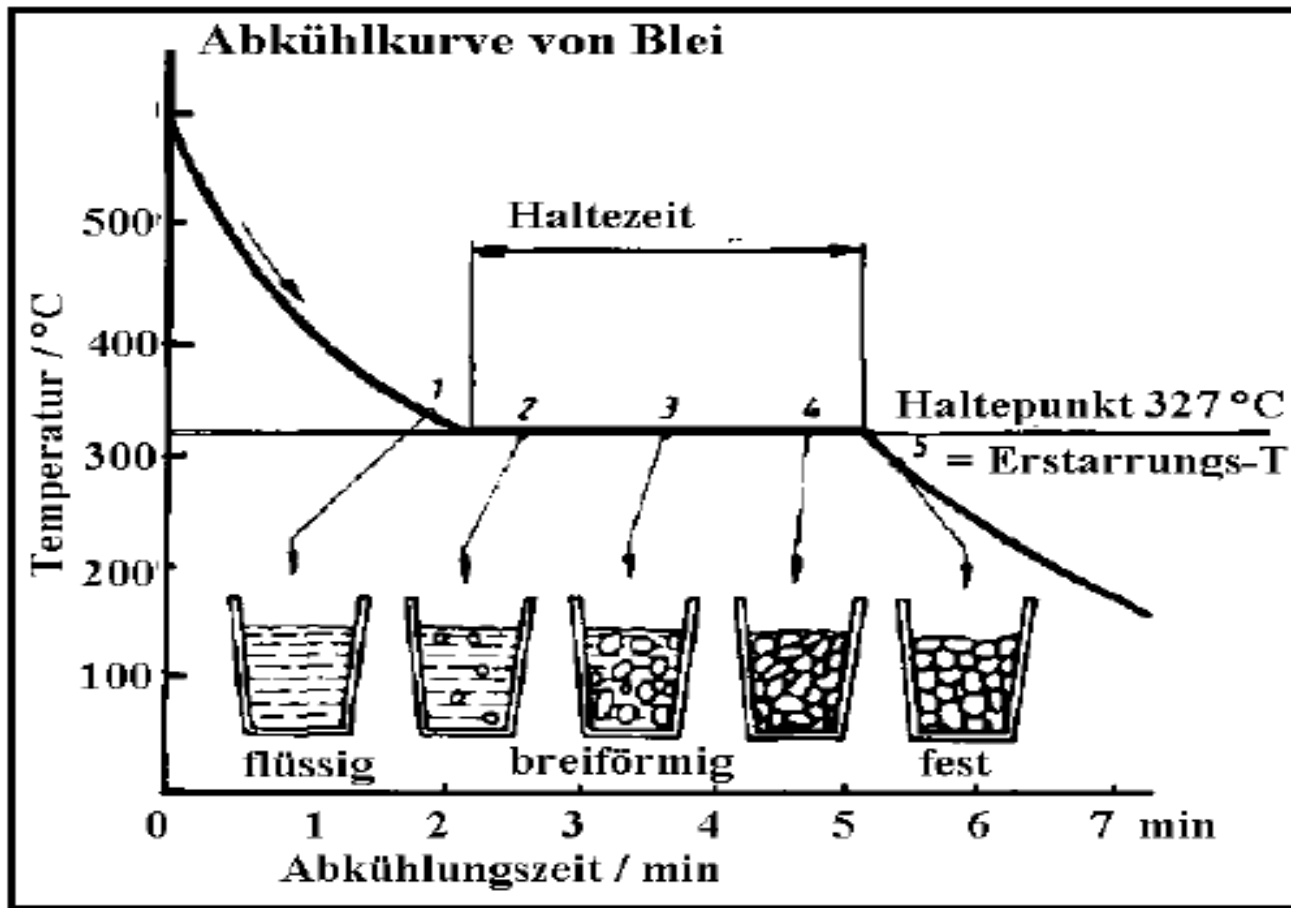


- **Nichtrostende Stahlgruppen**  
(nach dem Gefüge):
  - **Ferritische Stähle**
  - **Austenitische Stähle**
  - **Austenitisch-ferritische Duplex-Stähle**
  - **Martensitische Stähle**

Kunstwerk aus Edelstahl rostfrei (Berkenthin)

# Abkühlkurve von Blei (Pb)

aus: <http://www.tfh-berlin.de/~schaller/Scha-WT2-Zustandsdiagramme.pdf>

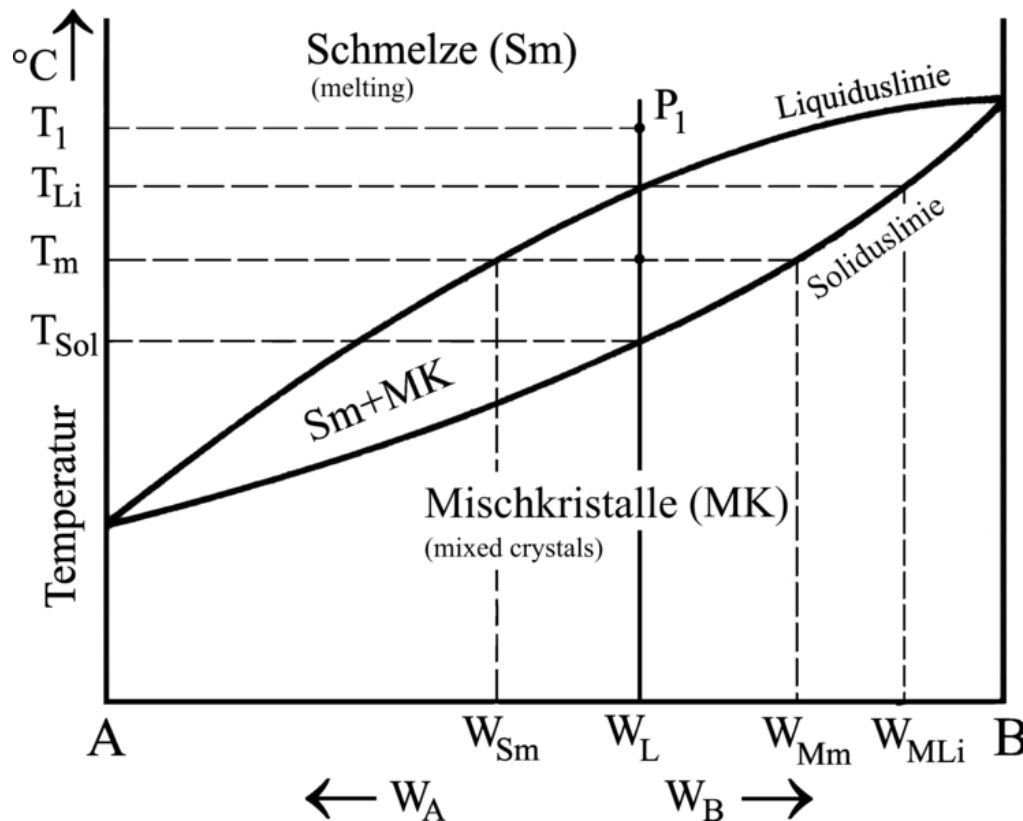




# Zweistoffsysteme mit vollkommener Löslichkeit

[http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/\\_Innerer\\_Aufbau/\\_Legierung](http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Innerer_Aufbau/_Legierung)

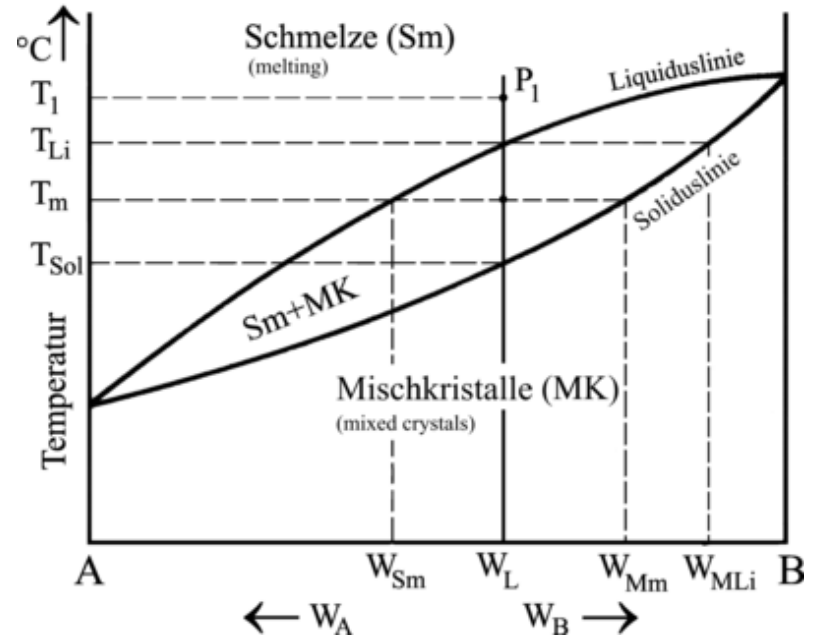
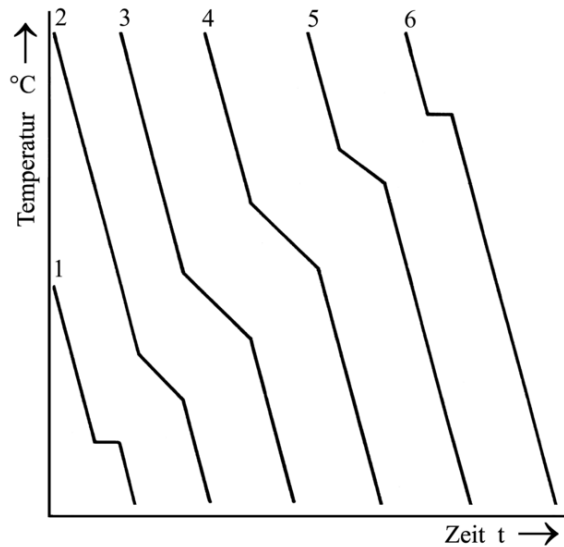
[http://de.wikibooks.org/wiki/Bild:Alloy\\_diagram\\_mixed\\_crystal\\_building.png](http://de.wikibooks.org/wiki/Bild:Alloy_diagram_mixed_crystal_building.png)



- Bei vollständiger Löslichkeit im festen Zustand bilden sich in jeder Zusammensetzung Mischkristalle.
- Typische **Substitutions-MK-Bildner** sind die Legierungen
  - Fe – Cr
  - Fe – Ni
  - Au – Cu
  - Au – Ag
  - Cu – Ni

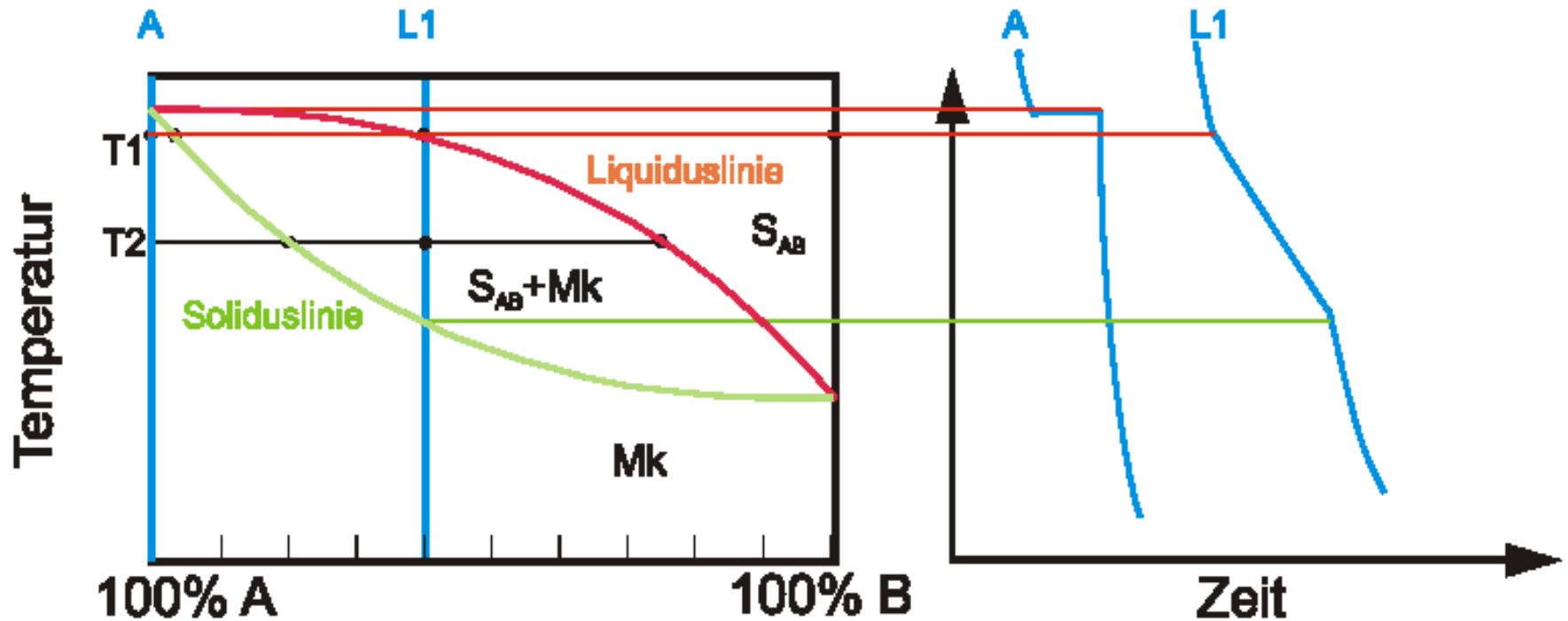
# Abkühlungskurven und Zustandsschaubild

<http://de.wikipedia.org/wiki/Legierung>



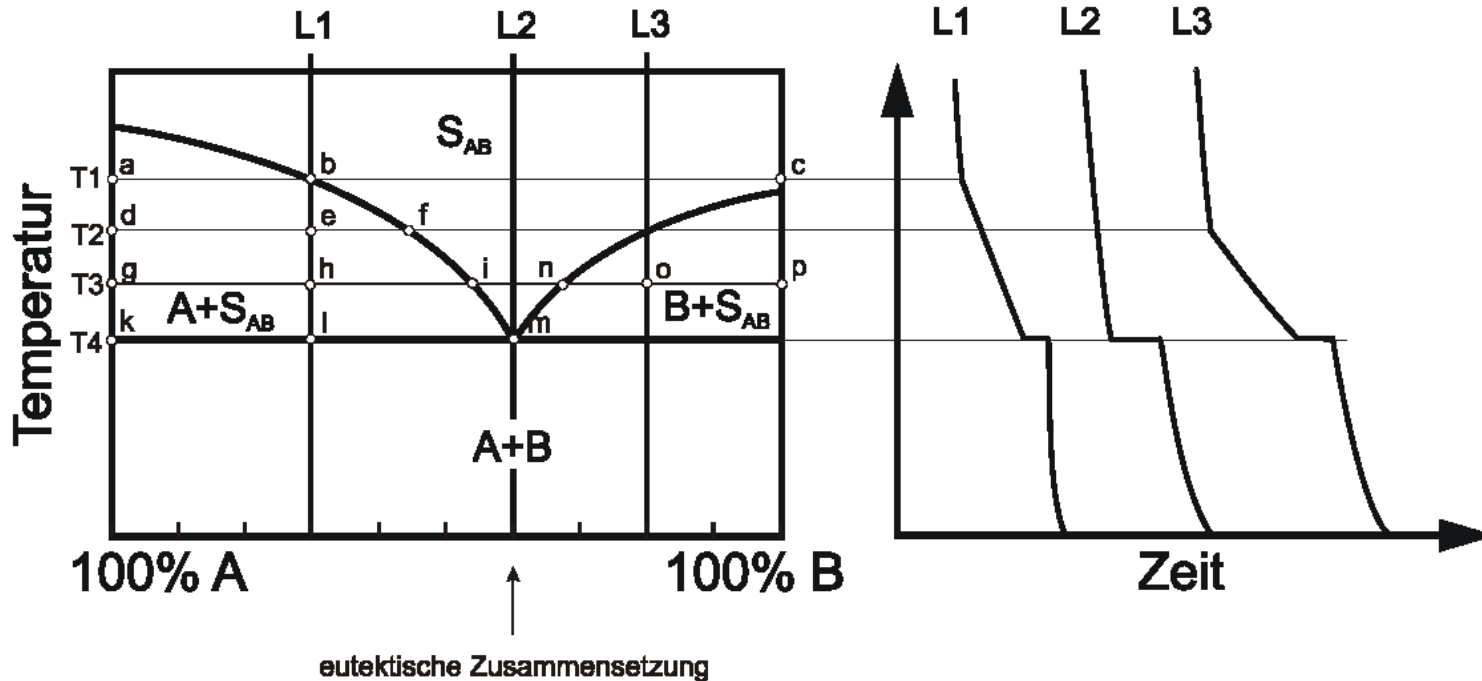
*Abkühlkurven und Zustandsschaubild einer Legierung (vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand) – bei verschiedener Zusammensetzung mit Mischkristallbildung*  
**Austausch- oder Substitutions-MK (Mischkristall), z.B. Cu - Ni)**

# Vollkommene Löslichkeit im festen und im flüssigen Zustand



- Phasendiagramm mit **Abkühlungskurven**
- Aus: [mitglied.lycos.de/fpgc/downs/WK1\\_Kapitel\\_3.doc](http://mitglied.lycos.de/fpgc/downs/WK1_Kapitel_3.doc)

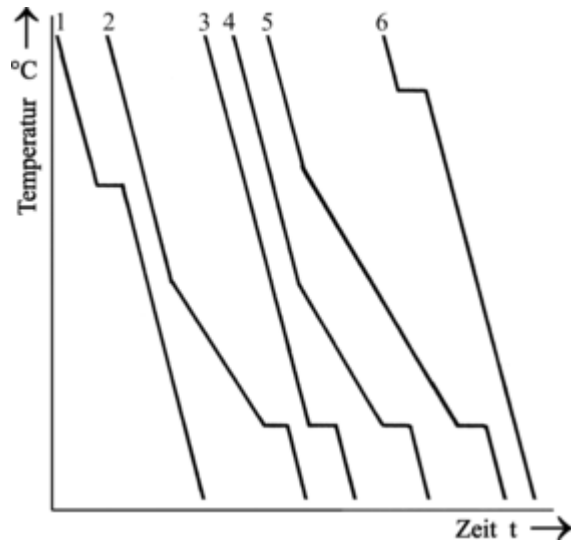
# Eutektische Systeme



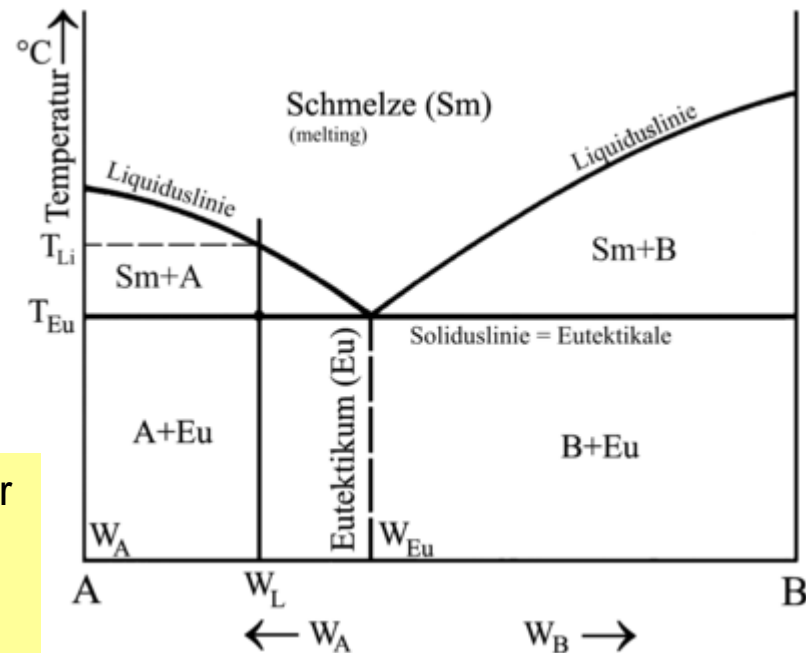
- Vollkommene **Löslichkeit im flüssigen Zustand**, vollkommene **Unlöslichkeit** (Kristallgemisch) im festen Zustand, z.B. **Cd -Bi**

# Zweistoffsystem mit vollständiger Unlöslichkeit im festen Zustand

<http://de.wikipedia.org/wiki/Legierung>

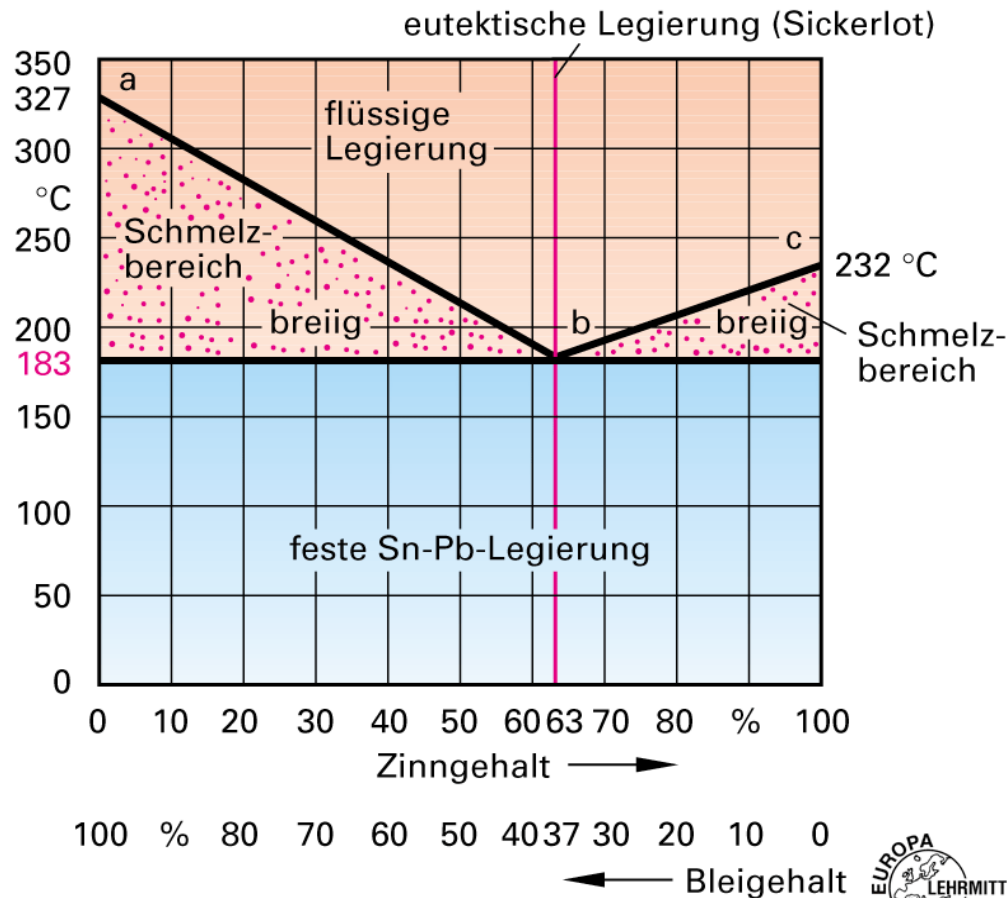


Legierungen dieser Art sind zwar in der Schmelze ineinander gelöst, entmischen sich jedoch während der Kristallisation vollständig. Es entsteht ein **Kristallgemisch** der reinen Komponenten im festen Zustand.



# Zinn-Blei-Zustandsschaubild

siehe auch: [http://de.wikipedia.org/wiki/Lot\\_\(Metall\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Lot_(Metall))



- Eine eutektische Legierung hat oft die niedrigste Schmelztemperatur und schmilzt bzw. erstarrt bei einer festen Temperatur wie ein Reinstoff, z.B. Sn62Pb38 bei ca. 183°C. Dies ist bei Elektronikloten erwünscht.



# Beschränkte Löslichkeit im festen Zustand

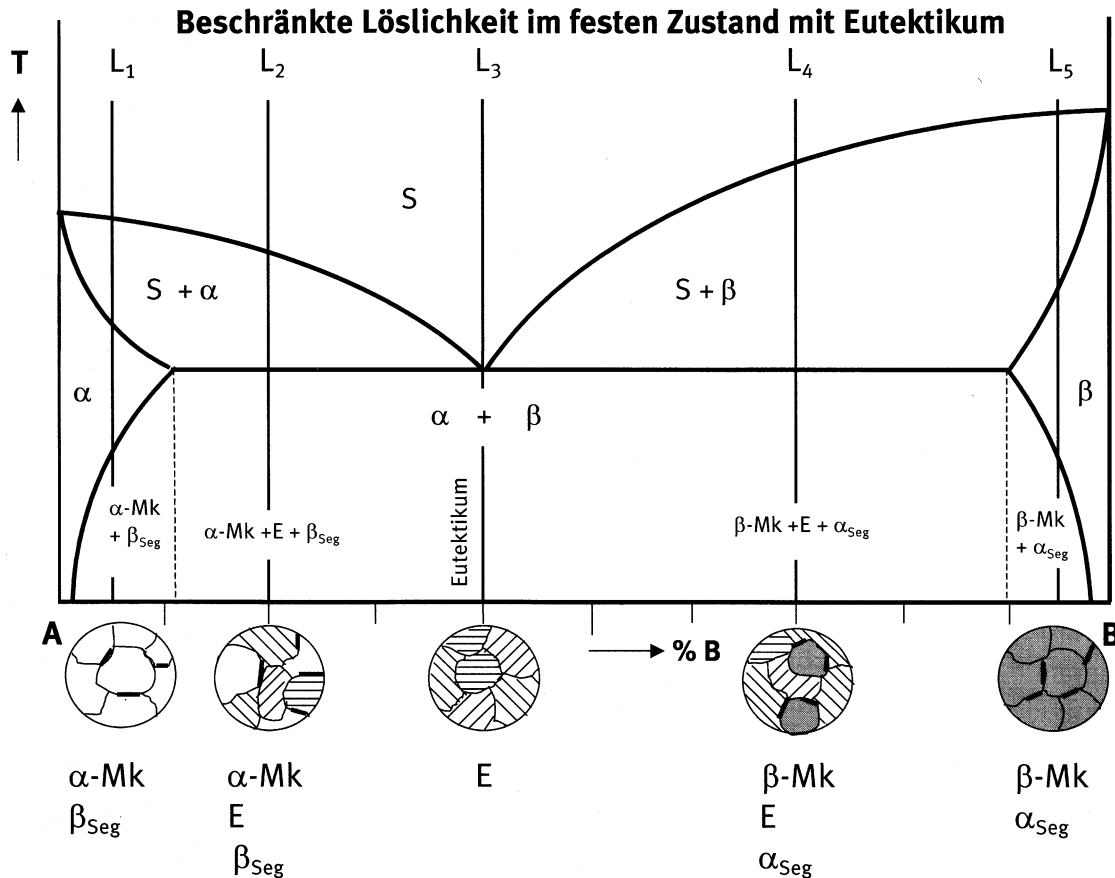


Diagramm aus:

<http://www.mb4us.de/MB/WK/WKGrundlagen.doc>

**Eutektikum:**  
 Als **Eutektikum** (griech.: εϋ=gut τεκτεiv=bauen) wird eine **Legierung** oder **Lösung** bezeichnet, deren Bestandteile in einem solchen Verhältnis zueinander stehen, dass sie als Ganzes bei einer bestimmten Temperatur (**Schmelzpunkt**) flüssig bzw. fest wird.

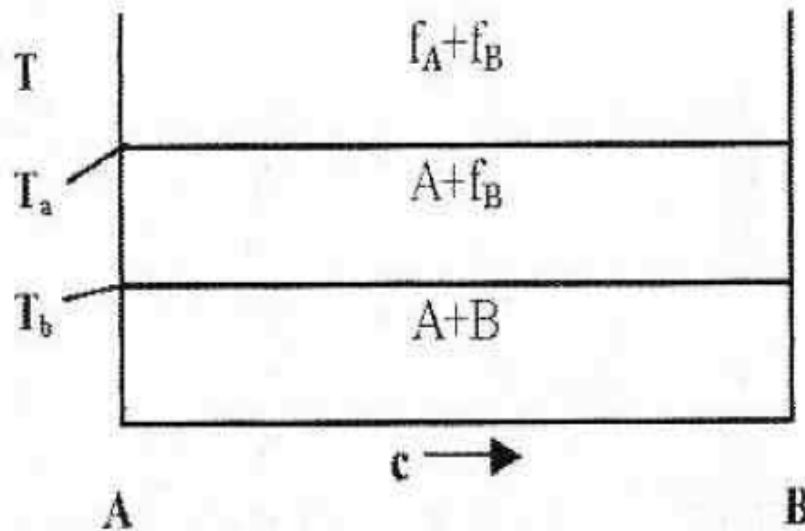
Vgl. auch:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>

# Zustandsdiagramm: völlige Unlöslichkeit im flüssigen und festen Zustand

aus: [http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/1-zustandsdiagramm\\_3.pdf](http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/1-zustandsdiagramm_3.pdf)

a) *Völlige Unmischbarkeit der Komponenten im flüssigen und kristallinen Zustand*



Beispiel Fe-Pb: Früher gab es bleilegierte Stähle (Automatenstähle). Die Pb-Einlagerungen dienen als Spanbrecher. Pb-Dämpfe entstehen aber bei der Zerspanung. Diese sind giftig, sodass Pb-legierte Stähle in der westlichen Welt kaum mehr hergestellt bzw. eingesetzt werden.

Das Diagramm zeigt drei voneinander getrennte Bereiche, die durch die Schmelztemperaturen der Komponenten A und B getrennt sind. Beispiele für diese Art von Zustandsdiagrammen sind Fe-Pb und Fe-Mg. Betrachten wir das Diagramm



# Einige weitere Details zu Metallen und Legierungen

<http://www.ifb.ethz.ch/education/werkstoffe2/vorlesung6> 25Apr07

- Weitere Infos u. a. unter:

- [http://www.charite.de/zwbmf/Praktikum/WWW\\_PDFSkripte/VL1Semester/03\\_1\\_Metalle%20-%20Legierungen.pdf](http://www.charite.de/zwbmf/Praktikum/WWW_PDFSkripte/VL1Semester/03_1_Metalle%20-%20Legierungen.pdf)
- [http://heidi.in-ulm.de/studium/skripte/werk\\_9.pdf](http://heidi.in-ulm.de/studium/skripte/werk_9.pdf)
- [http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/3-erstarrung\\_von\\_metallen\\_1.pdf](http://cgi.tu-harburg.de/~fsmwww/download/werkstoffkunde/3-erstarrung_von_metallen_1.pdf)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Legierung>
- [http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen\\_legierungsbildung.pdf](http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen_legierungsbildung.pdf)
- <http://www.old.uni-bayreuth.de/departments/metalle/Lehre/Phasendiagramm.doc>
- [http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/Script\\_pdf/05\\_Thermische\\_Analyse.pdf](http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/Script_pdf/05_Thermische_Analyse.pdf)
- [http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Zweistofflegierung\\_TA.pdf](http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Zweistofflegierung_TA.pdf)
- <http://www.ippt.tu-clausthal.de/fileadmin/homes/agkip/vorlesungen/ex5/E5-Kap7.pdf>
- <http://www.uni-weimar.de/Bauing/bauchemie/Downloads/Praktikum3S/Versuch4.pdf>
- <http://www.physik.tu-dresden.de/praktikum/gpnp/Anleitungen/TH.pdf>
- [http://www.fh-gelsenkirchen.de/werkstoffkunde/Deutsch/Lehrveranstaltung/Studenten/PRAK-Met-Teil\\_1-Versuch\\_3.pdf](http://www.fh-gelsenkirchen.de/werkstoffkunde/Deutsch/Lehrveranstaltung/Studenten/PRAK-Met-Teil_1-Versuch_3.pdf)
- <http://www.hh.schule.de/metalltechnik-didaktik/literatur/ew/2.2.pdf>

# Zweistoff- und Mehrstoffsysteme

- **Weitere Infos zu Legierungssystemen:**
  - [http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Zustandsdiagramme\\_AB.pdf](http://www.ulrich-rapp.de/stoff/werkstoff/Zustandsdiagramme_AB.pdf)
  - <http://www.stalinstadt.de/bilder/uni-blog/main.php/d/2162-1/TH+Karlsruhe.pdf>
  - [http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen\\_legierungsbildung.pdf](http://www.dental.uni-greifswald.de/studium/pdf1/werkstoffkunde/legierungen_legierungsbildung.pdf)
  - [http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/Innerer\\_Aufbau/Legierung](http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/Innerer_Aufbau/Legierung)
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/Legierung>
  - [http://www.fh-brs.de/data/anna\\_/Lehrveranstaltungen/SuE%20der%20Materialien/2%20SEM-Zweistoffsysteme.ppt](http://www.fh-brs.de/data/anna_/Lehrveranstaltungen/SuE%20der%20Materialien/2%20SEM-Zweistoffsysteme.ppt)
  - <http://www.uni-weimar.de/Bauing/bauchemie/Downloads/Praktikum3S/Versuch4.pdf>
  - [https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/laboratorien/ac/V2\\_Versuchsvorschrift\\_Legierung-DTA.pdf](https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/laboratorien/ac/V2_Versuchsvorschrift_Legierung-DTA.pdf)
- **Heterogene Gleichgewichte:**
  - <http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources/lehveranstaltungen/Ergaenzungen2007-k.pdf>