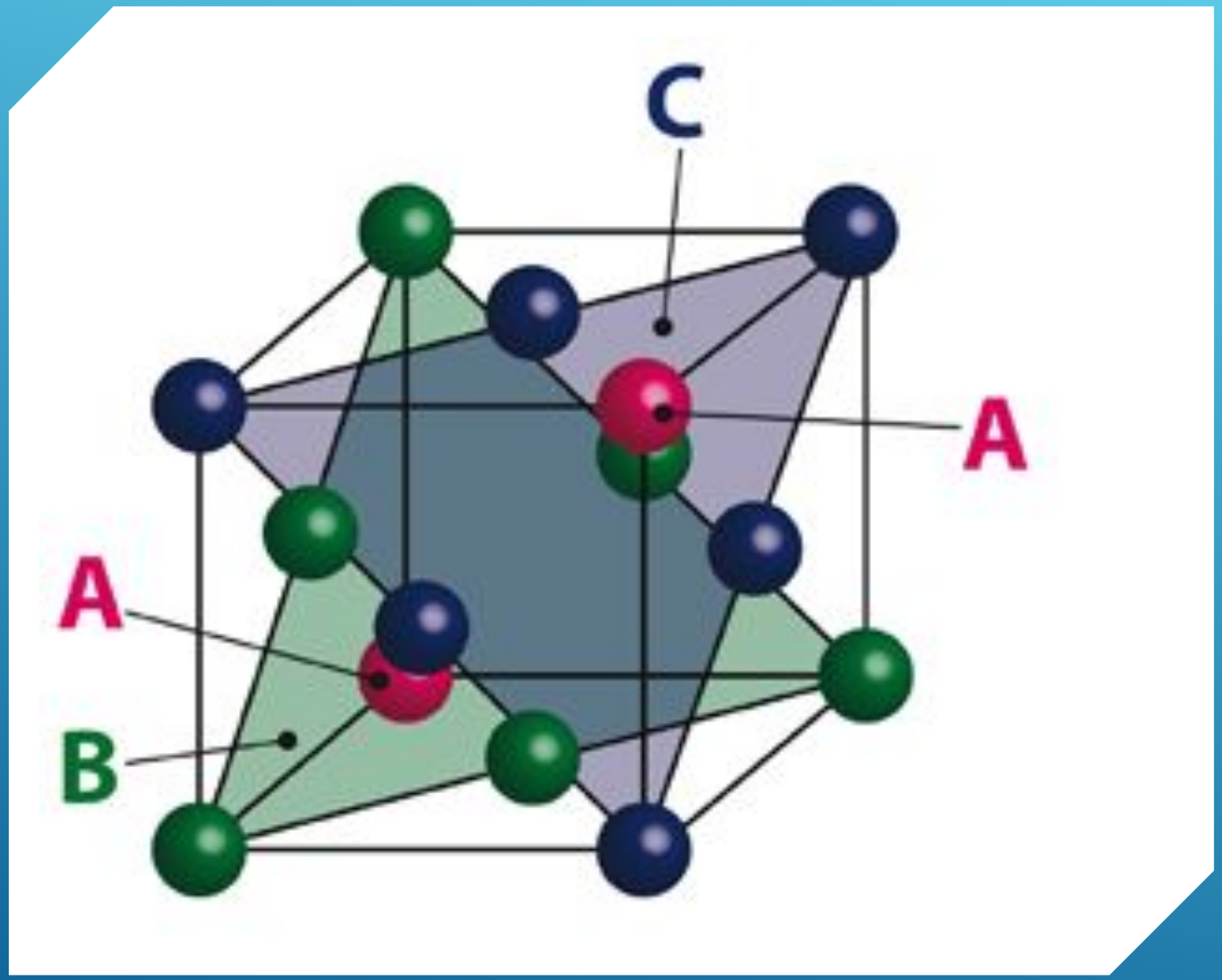


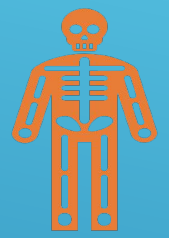
WERKSTOFFKUNDE 2020-2021 DHBW

Mannheim 2020

Dr. Ravi Bactavatchalou

INHALT

- Einleitung: Definitionen, Werkstoffgruppen, Physikalische Eigenschaften
- Metalle
- Legierungen
- Eisenlegierung



Werkstoffe sind beispielsweise

…

…

…

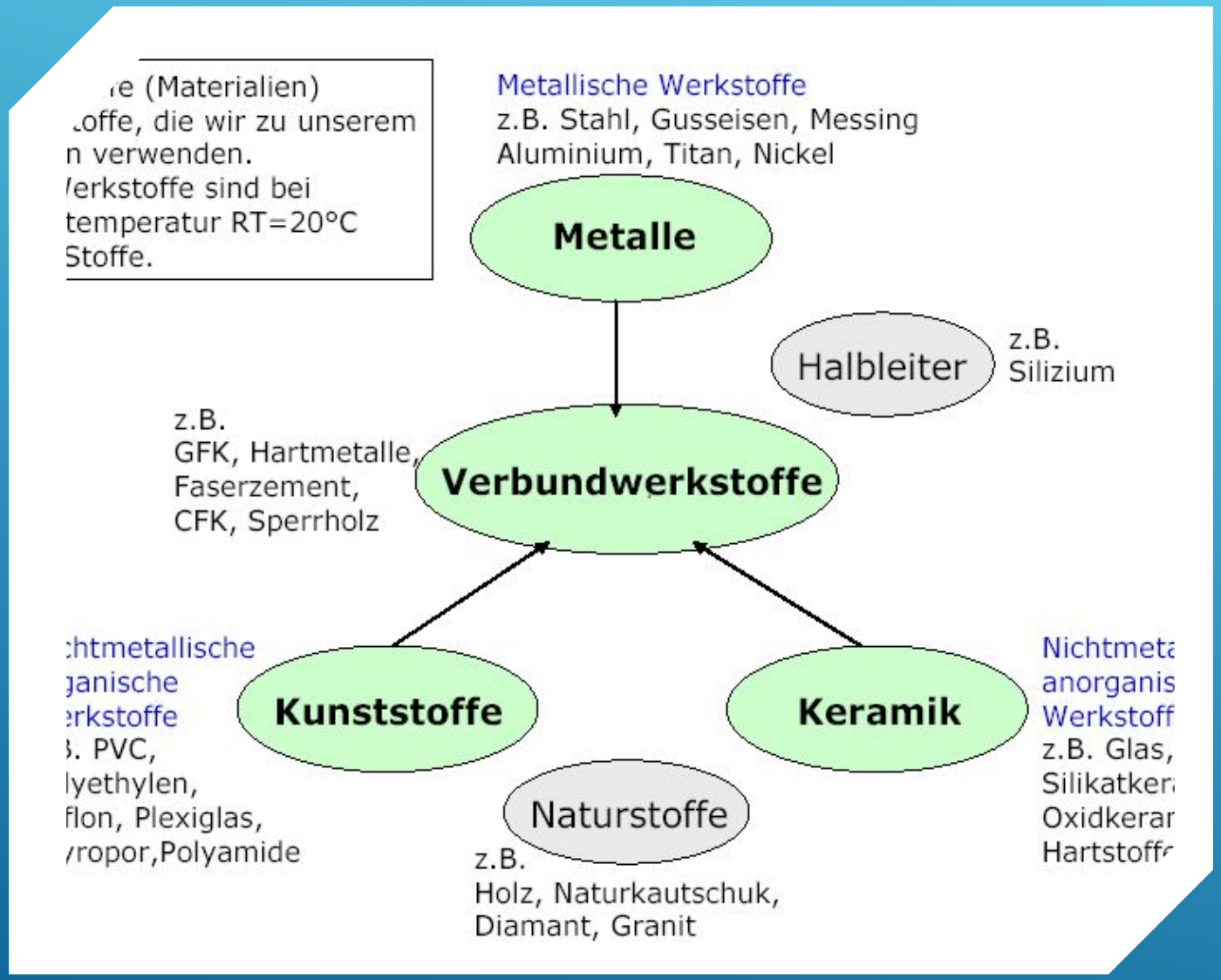
…

- …also Feststoffe (bei Raumtemperatur)

“die Werkstoffkunde beschreibt die Eigenschaften von Werkstoffen”

DEFINITION: WERKSTOFFKUNDE

WERKSTOFF-GRUPPEN



Metalle

- Bekanntester Vertreter aus dieser Gruppe ist … mit seinen Legierungen …… und ……..
- Zu den metallischen Eigenschaften zählen:
  - hohe ……. bei gleichzeitig guter……
  - gute …….. und …… Leitfähigkeit

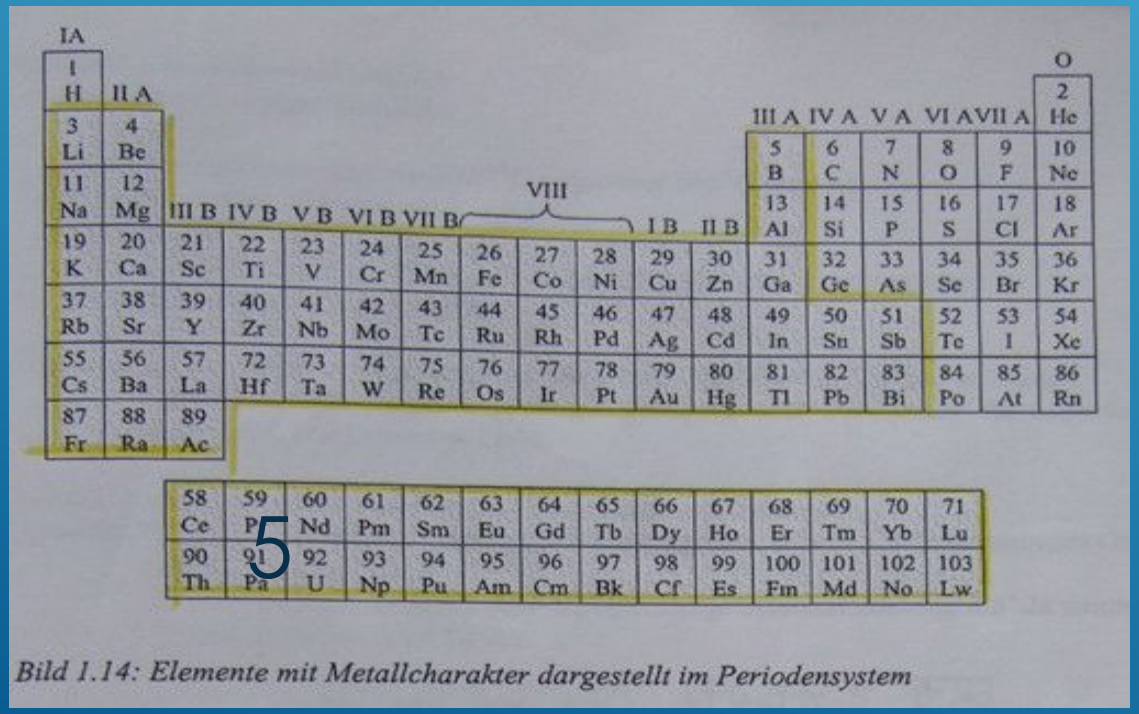


Bild 1.14: Elemente mit Metallcharakter dargestellt im Periodensystem

Neben den Eisenlegierungen (……. und ……) sind die
- die ……legierungen
- die ……legierungen
- …
- die ……legierungen als wichtigster Vertreter

Metall oder Nichtmetall, das ist hier die Frage

Nichtmetallcharakter nimmt zu →

Metall-charakter nimmt zu ↓

	Hauptgr. I	Hauptgr. II	Hauptgr. III	Hauptgr. IV	Hauptgr. V	Hauptgr. VI	Hauptgr. VII
Periode 1	$_{1}$H 1,01						
Periode 2	$_{3}$Li 6,94	$_{4}$Be 9,01	$_{5}$B 10,81	$_{6}$C 12,01	$_{7}$N 14,01	$_{8}$O 16,00	$_{9}$F 19,00
Periode 3	$_{11}$Na 22,99	$_{12}$Mg 24,31	$_{13}$Al 26,98	$_{14}$Si 28,08	$_{15}$P 30,97	$_{16}$S 32,06	$_{17}$Cl 35,45
Periode 4	$_{19}$K 39,10	$_{20}$Ca 40,08	$_{31}$Ga 69,72	$_{32}$Ge 72,79	$_{33}$As 74,92	$_{34}$Se 78,96	$_{35}$Br 79,90
Periode 5	$_{37}$Rb 85,47	$_{38}$Sr 87,62	$_{49}$In 114,82	$_{50}$Sn 118,69	$_{51}$Sb 121,75	$_{52}$Te 127,60	$_{53}$I 126,90
Periode 6	$_{55}$Cs 132,91	$_{56}$Ba 226,03	$_{81}$Tl 204,38	$_{82}$Pb 207,20	$_{83}$Bi 208,98	$_{84}$Po 210	$_{85}$At 210
Periode 7	$_{87}$Fr 223	$_{88}$Ra 226,01					

Nicht-metall-charakter nimmt zu ↑

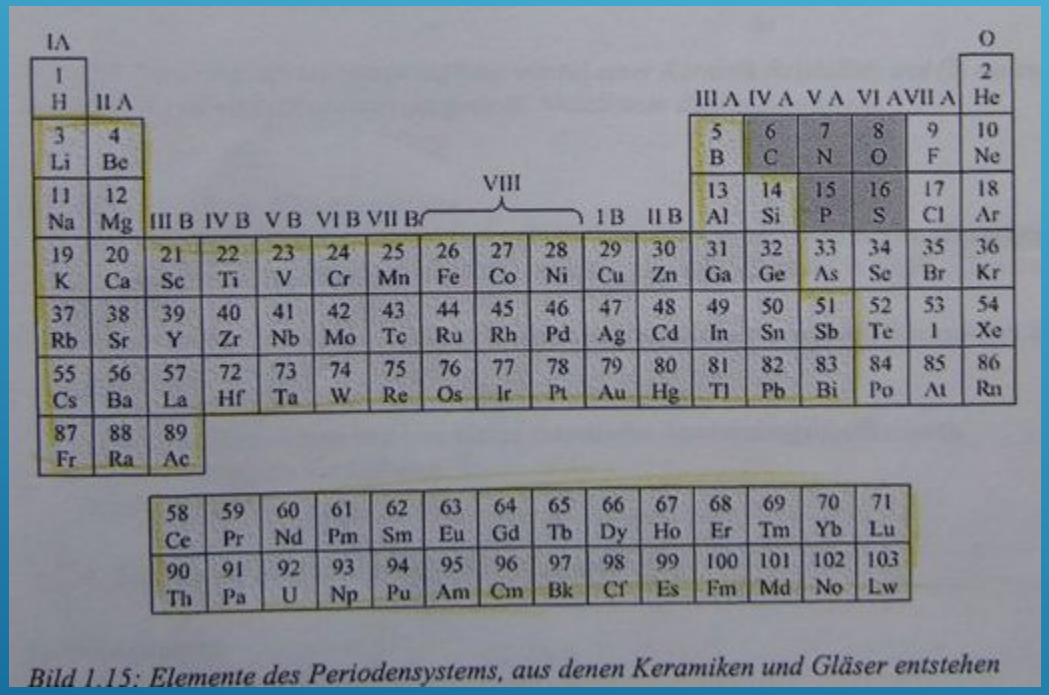
← Metallcharakter nimmt zu

Metalle | Halbmetalle | Nichtmetalle

iedergabe (k)

Keramiken und Gläser

- Keramiken und Gläser sind Verbindungen von den Nichtmetallen C, N, O, P, S und Metalle.
- Typische Vertreter: Al_2O_3, ZrO_2, MgO, SiO_2, SiC



IA	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII			I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	O
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

Bild 1.15: Elemente des Periodensystems, aus denen Keramiken und Gläser entstehen

Bsp.: Al_2O_3

-Vorteile gegenüber Al-Metall
- chemisch inert
- hohe Schmelztemperatur von 2020°C gegenüber 660°C von Al

-Nachteile gegenüber Aluminium:
- -höhe Sprödbruchanfälligkeit
- -keine plastische Verformbarkeit => Einsatzgebiete sind eingeschränkt

- Gläser bestehen aus einer Mischung von SiO_2, CaO, Na_2O.
  - Eigenschaften: Vergleichbarkeit mit Keramiken, aber durchlässig für ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht

Wodurch unterscheiden sich Keramiken von Gläsern?

- Keramiken sind wie Metalle ……. aufgebaut, d.h. in einem bestimmten Gitter
- Gläser dagegen besitzen eine ……. Atomanordnung, die als …… bezeichnet wird.

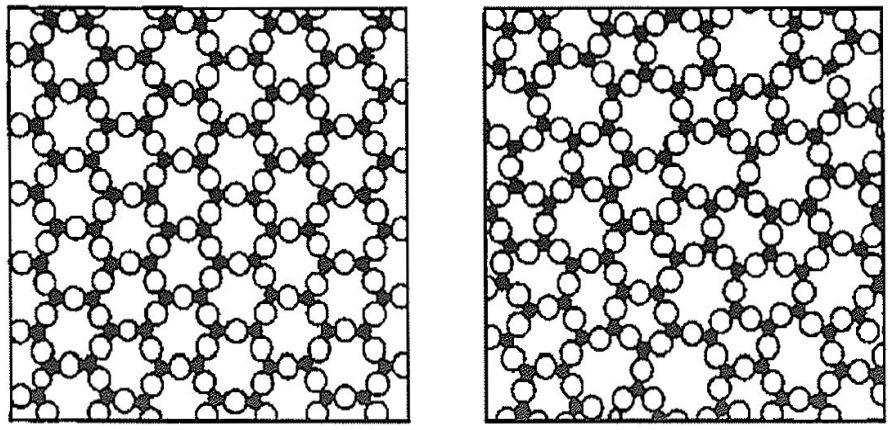


Bild 1.16: Vergleich des atomaren Aufbaus von (a) einer Keramik (kristallin) und (b) einem Glas (amorph). Nichtmetallatome hell dargestellt, Metallatom dunkel dargestellt.

- neue Entwicklung: Glaskeramiken

Hochpolymere Werkstoffe (Kunststoffe)

- bestehen aus Nichtmetallen.
- Das Grundgerüst ist immer eine ……- Kette
- die übrigen Nichtmetalle findet man z.B. in Acrylen (Sauerstoff), in Polyamiden (Stickstoff), in Silikonen (Silizium)

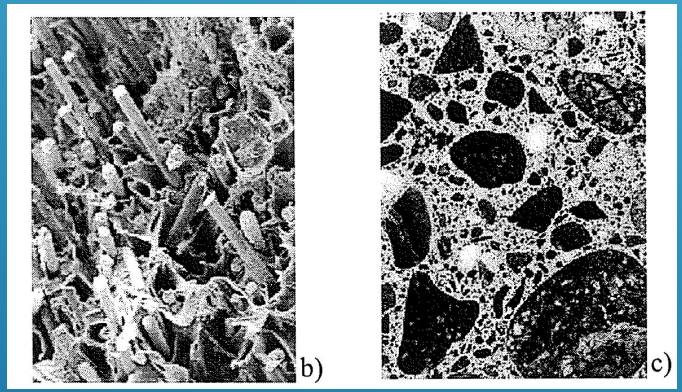
Eigenschaften:
- …… wie Metalle, aber sehr geringere ……
- ……
- niedriger ……
- chemischer leichter angreifbar als Keramiken
=> kann als Ersatz für Metalle verwendet werden, wenn …….. und …… ausreichen

- VW entstehen durch Kombination von unterschiedlichen/unterschiedlich strukturierten Werkstoffen aus einer oder mehreren Werkstoffhauptgruppen

- Ziel: ……

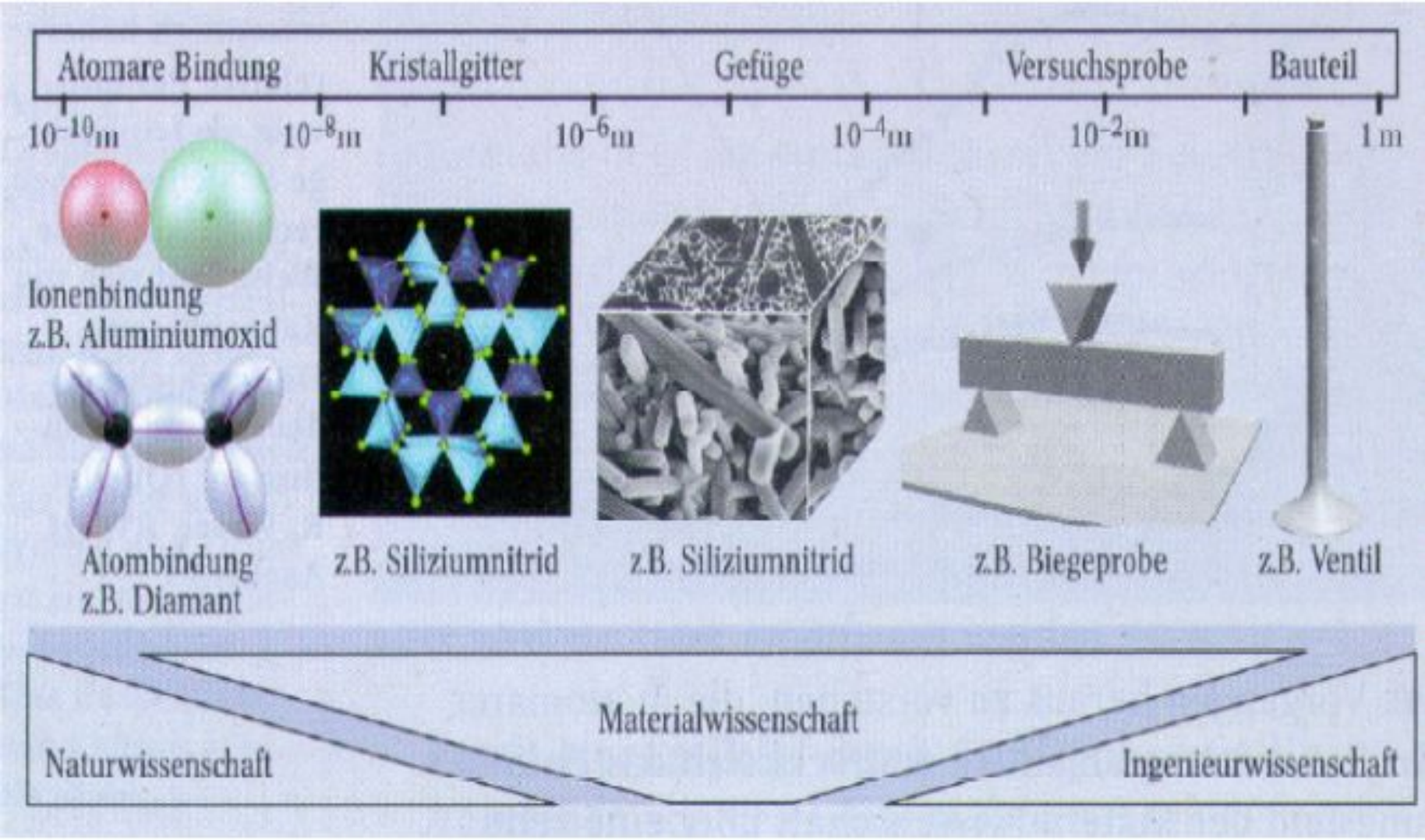
- Beispiel:

GfK (Glasverstärker Kunststoff) – links / Beton (Aggregatverbundwerkstoff) - rechts



VERBUNDWERKSTOFFE

Dimensionen in der Werkstoffkunde



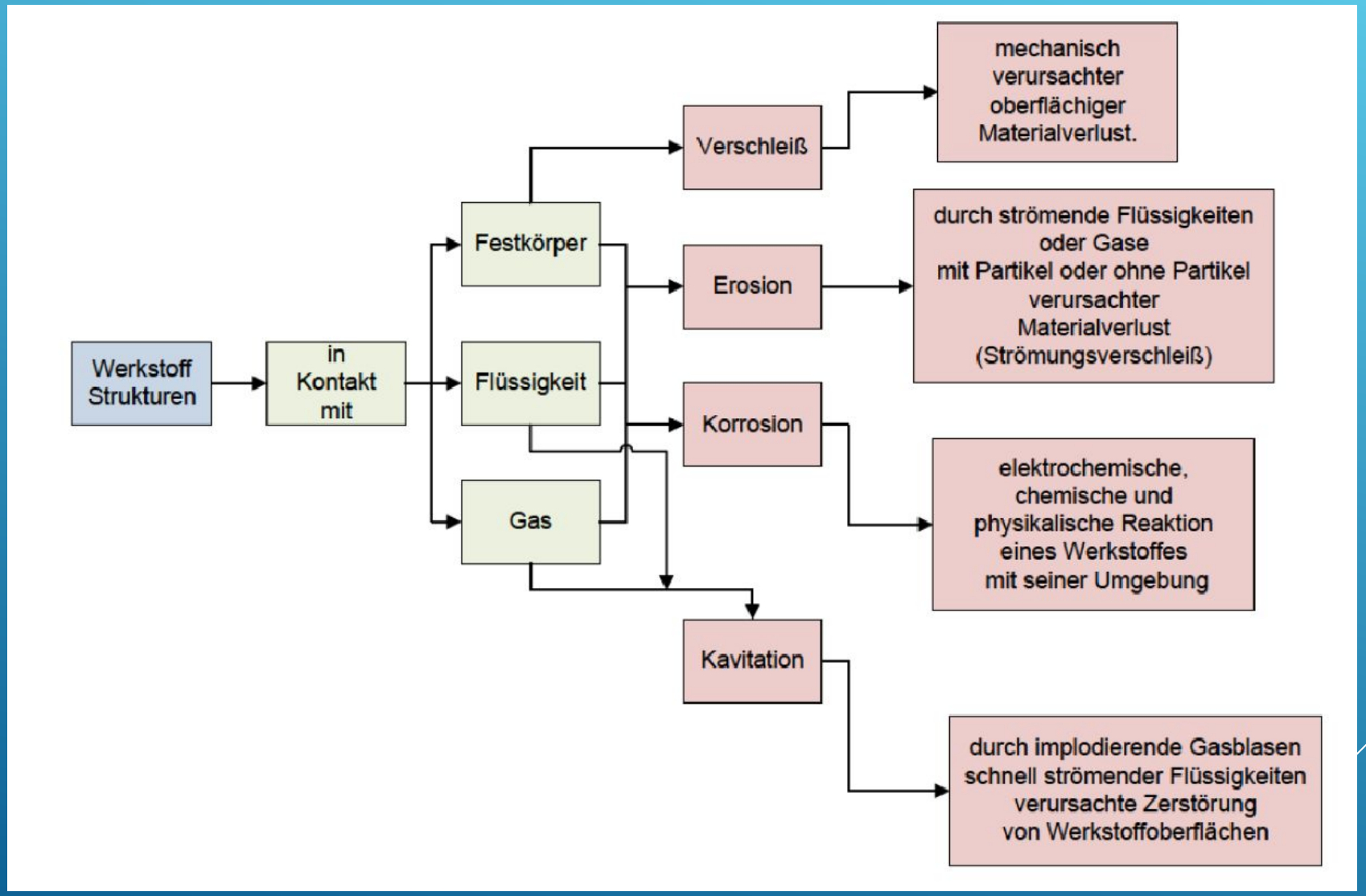
Werkstoffauswahl

Werkstoffauswahl - Fragestellungen	
Forderungen aus der Anwendung	**Erforderliche Eigenschaften**
Ist der Werkstoff z. B.. aufgrund seines Gewichts, seiner Schmelztemperatur oder seines elektrischen Leitvermögens für diese Aufgabe geeignet?	.....
Kann der Werkstoff den auf das Bauteil einwirkenden Kräften standhalten?	
Verschleißt der Werkstoff an Gleitflächen?	
Mit welchem Fertigungsverfahren lässt sich das Bauteil kostengünstig fertigen?	
Wird der Werkstoff des Bauteils bei seinem vorgesehenen Verwendungszweck von umgebenden Stoffen oder bei erhöhter Temperatur angegriffen?	

Nach Abwägung aller Gesichtspunkte wird für ein Bauteil **der Werkstoff** ausgewählt,

- der die Funktion des Bauteils und die technischen Anforderungen am besten erfüllt,
- dessen Fertigung und Werkstoffpreis am günstigsten ist und der bei der Fertigung
- und nach dem Gebrauch keine Belastung für die Umwelt darstellt.

VERHALTEN DER WERKSTOFF IN KONTAKT MIT



Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe

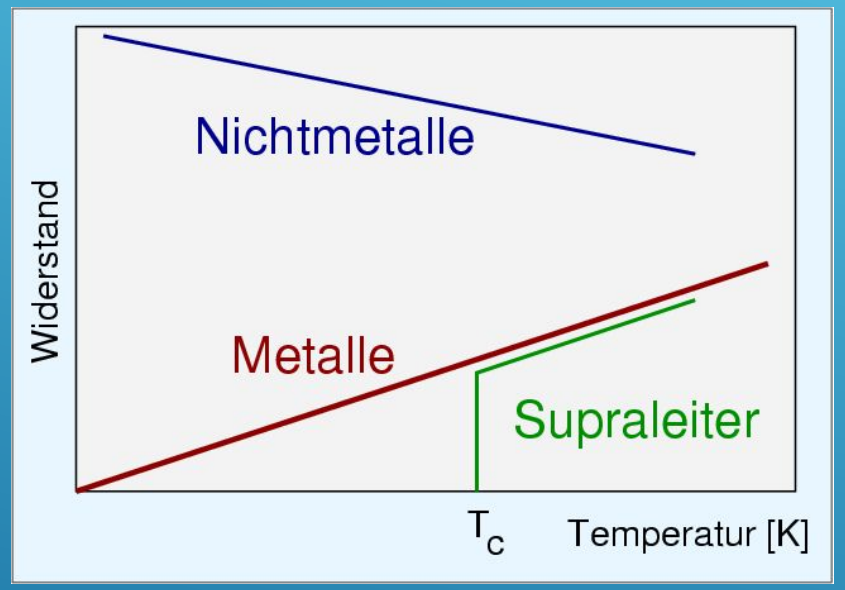
Dichte

Schmelzpunkt (Schmelztemperatur)

Elektrische Leitfähigkeit

Elektrische Leitfähigkeit in Prozent der Leitfähigkeit von Kupfer			
Stoff	**Prozent**	**Stoff**	**Prozent**
Kupfer	100%	Zink	
Silber		Eisen	
Aluminium		Blei	

Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe



Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands ρ

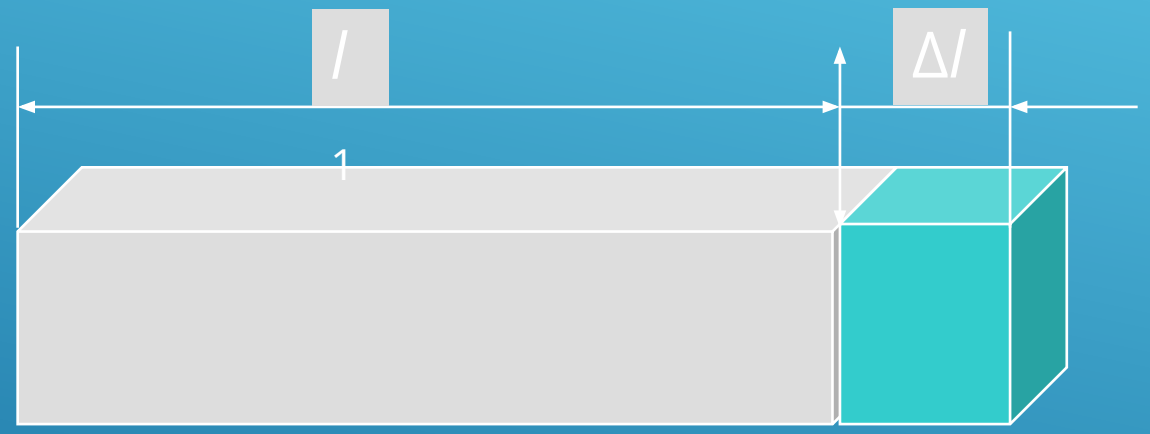
- **Leiter 1. Klasse** (z. B.. Metalle oder Halbmetalle), bei denen eine Temperaturerhöhung zu einer Verringerung der Leitfähigkeit.
- **Leiter 2. Klasse** (z. B.. Isolatoren oder Halbleiter), bei denen genau die umgekehrten Effekte auftreten. Mit der Temperatur nimmt die Leitfähigkeit zu, der Widerstand entsprechend ab.

Einleitung der Leiter in Klassen

Leiter	Stoffklasse	Substanz	spezifischer elektr. Widerstand [OHM.m] bei 25°C
1. Klasse	Metalle	Cu	$1.7 * 10^{-8}$
		Li	$8.6 * 10^{-8}$
	Halbmetalle	As	$3.5 * 10^{-7}$
		Bi	$1.2 * 10^{-6}$
		C (Graphit)	$0.8 * 10^{-5}$
		Te	$2 * 10^{-3}$
2. Klasse	Halbleiter	Si	$1 * 10^{1}$
	Nichtmetalle	Glas	10^{9}
		S	10^{14}

Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe

Thermische Längenausdehnung:



l_1 = Ausgangslänge
Δl = Längenänderung
α = Längenaus-Dehnungskoeffizient
ΔT = Temperaturänderung $T_2 - T_1$

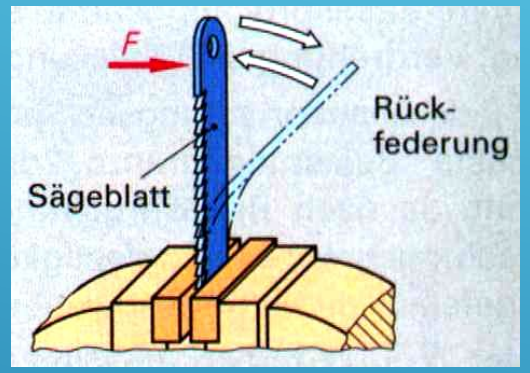
Definition des thermischen Längenausdehnungskoeffizient α:

Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe

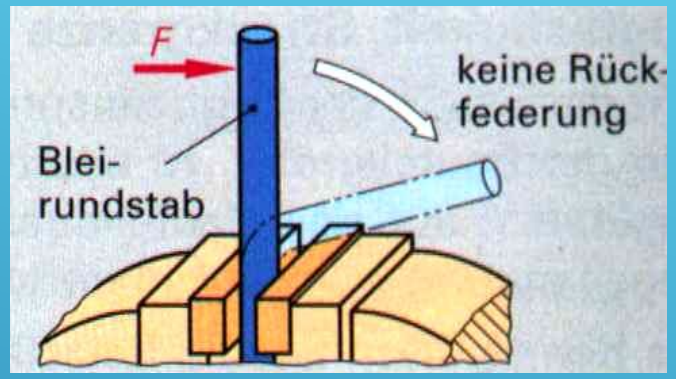
Wärmeleitfähigke
it

Definition der
Wärmeleitfähigkeit:

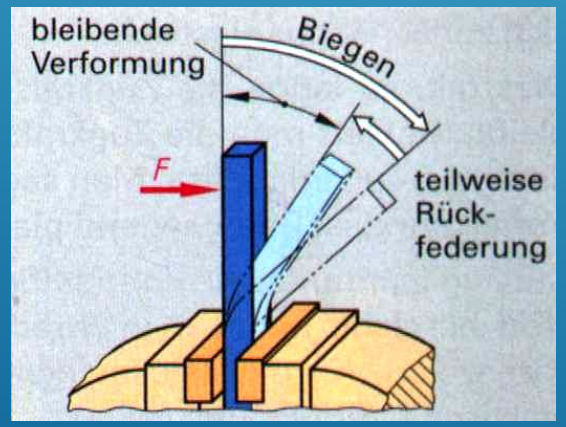
Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe



Elastizität eines Sägeblattes



Plastizität eines Bleistabes



Elastisch-plastische Verformung eines Stabstahls

INHALT

- Einleitung: Definitionen, Werkstoffgruppen, Physikalische Eigenschaften
- Metalle
  - Kristallzustand der Metalle
  - Legierungskunde – Zustandsdiagramme
  - Kristallplastizität
  - Diffusion
  - Kristallerholung und Rekristallisation
  - …

METALLE - ALLGEMEIN

- Typische Metalle Eigenschaften sind:
  -
  -
  -
  -

METALLE – KRISTALLZUSTAND DER METALLE - LERNZIELE

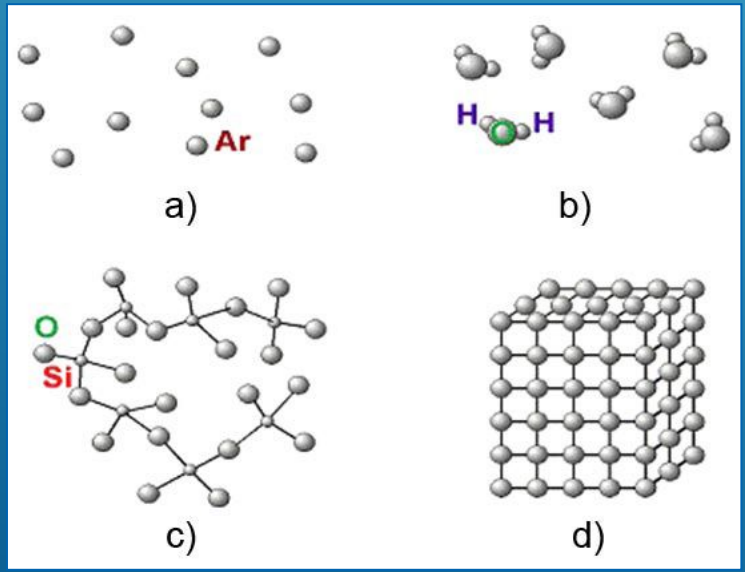
- Das Raumgitter als Idealstruktur bestimmt viele Eigenschaften und Vorgänge von Werkstoffen.
- Charakterisierung durch Packungsdichte
- Beschreibung durch Millersche Indizes
- Zusammenhang zwischen Kristallanisotropie und Textur
- Der Gitterbaufehler als Realstruktur ist verantwortlich für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften.
- Definition von Leerstelle, Zwischengitteratom, Versetzung, Stapelfehler und Korngrenze
- Burgersvektor und Stapelfehlerenergie als Grundkenngrößen eines Festkörpers
- Unterschied zwischen Mischkristall und Kristallgemisch

IDEALSTRUKTUR – ANORDNUNG DER ATOME

Die Werkstoffeigenschaften werden bestimmt durch

- Art und Anordnung der Atome
- Störungen des Gleichgewichtszustandes

- Die Anordnung von Atomen erfolgt mit unterschiedlichen Ordnungsgrad. Es lassen sich unterschiede Ordnungsstufen unterscheiden.



a/.

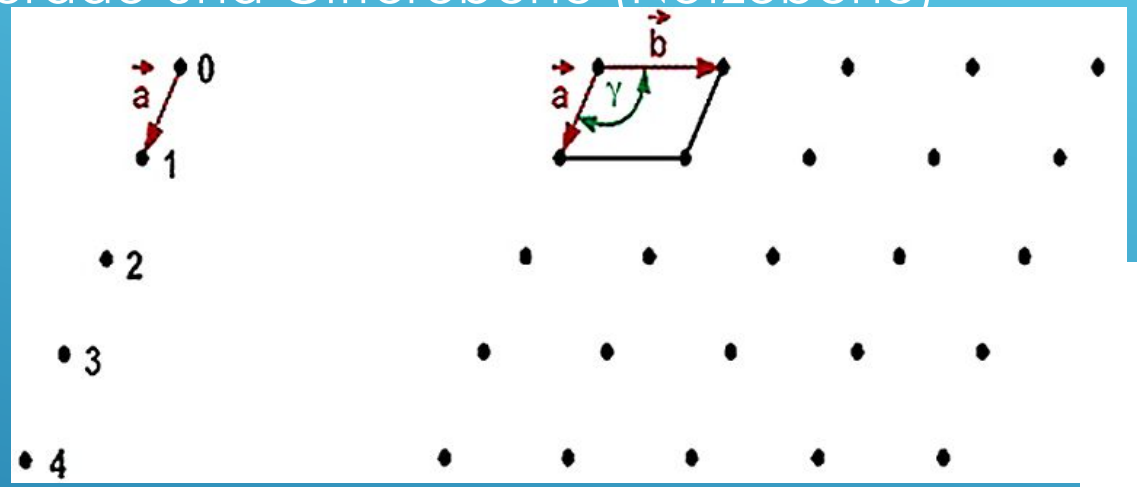
b/.

c/.

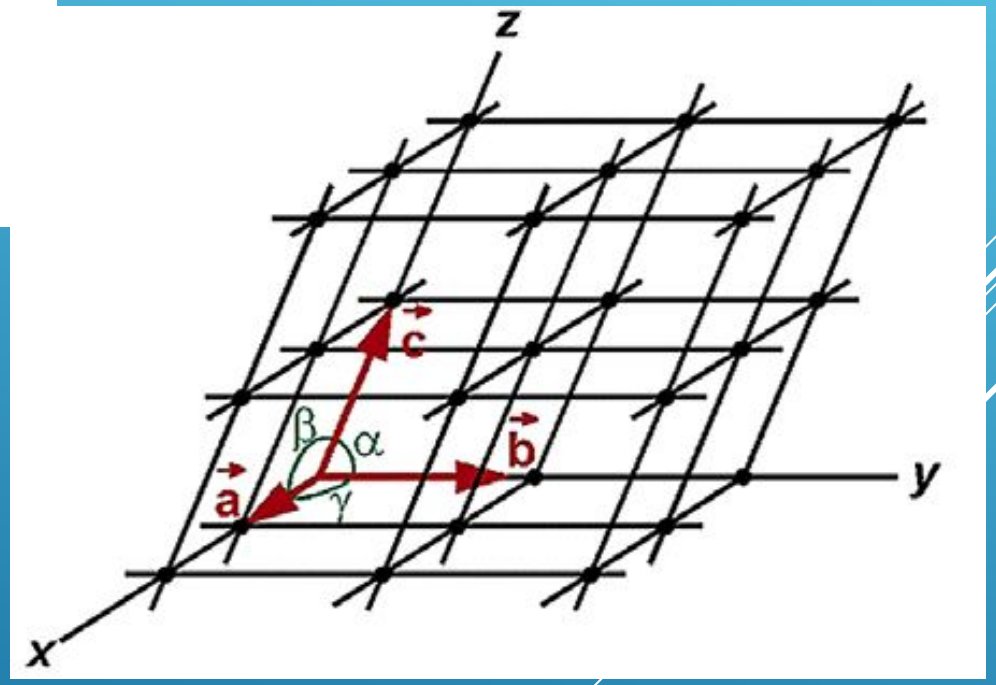
d/.

RAUMGITTER UND KRISTALLSYSTEME

- Gittergerade und Gitterebene (Netzebene)



- Raumgitter und Elementarzelle (EZ)
  - Vektoren **a**, **b** und **c** spannen die EZ ein
  - 6 Gitterkonstante:
    - Translationsbeträge
    - Winkel zwischen den Vektoren

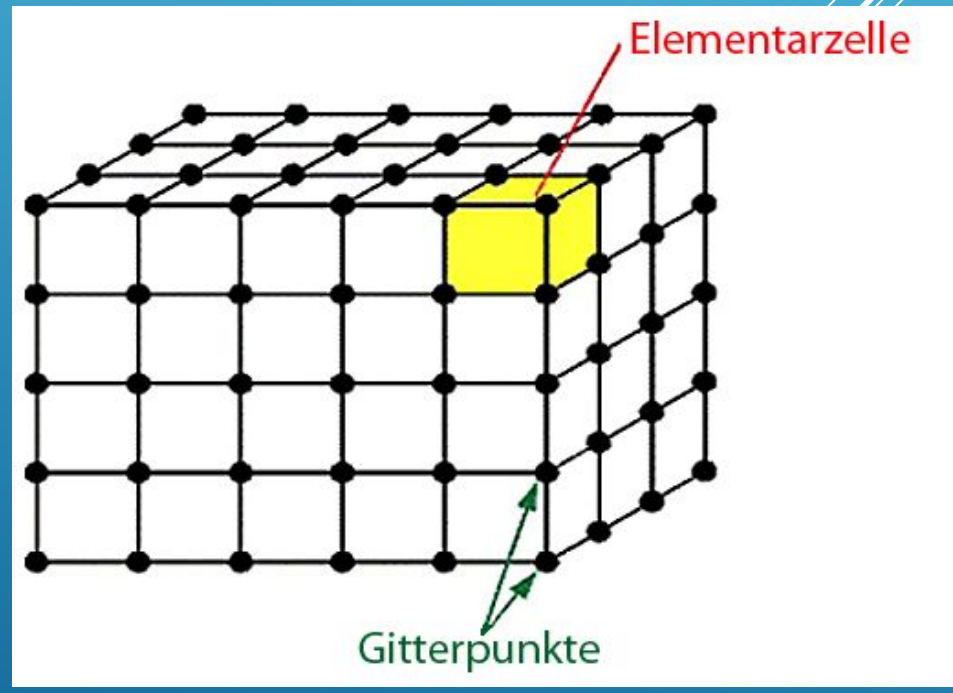


RAUMGITTER UND KRISTALLSYSTEME

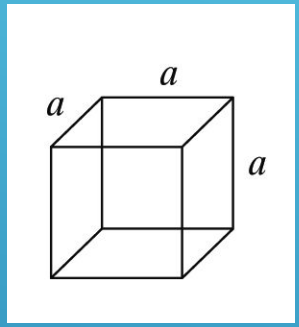
- 7 Kristallsysteme

Kristallsystem	Achsenlänge	Winkel zwischen den Achsen
triklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$
monoklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \gamma = 90°, \beta \neq 90°$
rhombisch (orthorhombisch)	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
hexagonal und trigonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$
rhomboedrisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
tetragonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$
kubisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$

- Definition einer EZ

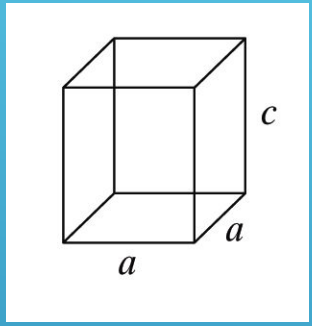


Grundlegende Kristallsysteme



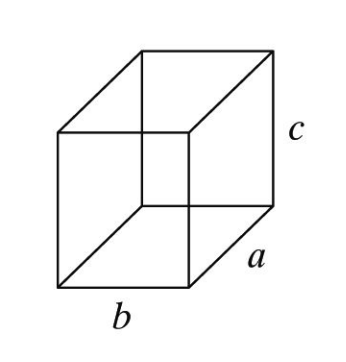
kubisch

$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



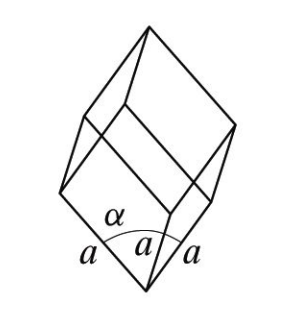
tetragonal

$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



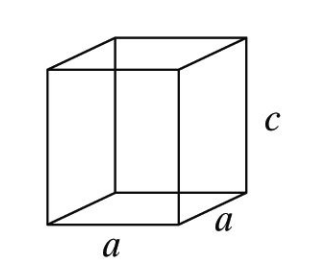
orthorhombisch

$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



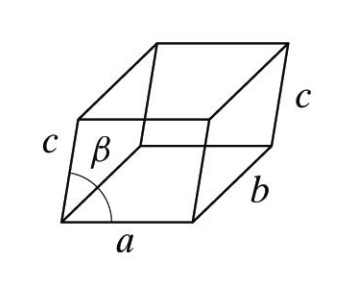
rhomboedrisch

$\alpha = \beta = \gamma = 90°$



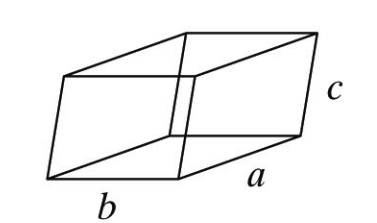
hexagonal

$\alpha = \beta = 90°$ $\gamma = 120°$



monoklin

$\alpha = \gamma = 90°$ $\beta \neq 90$



triklin

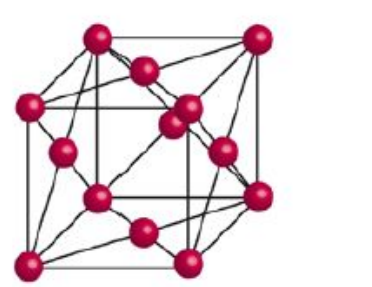
$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$

GITTERAUFBAU

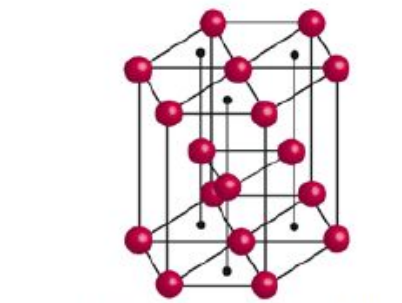
- Gitteraufbau der Metalle (Legierungen) wird durch die Angabe der EZ und Ihrer Größe charakterisiert.
- Die Metalle kristallisieren häufig in dichtester Kugelpackung:
  - Wichtigste Gittertypen (EZ) der Metalle

- Kenngrößen der EZ:
  - Atomanzahl je EZ
  - Koordinationszahl KZ
  - Gitterkonstante
  - Packungsdichte

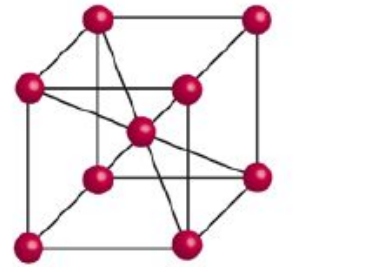
- Übung: Was sind die mögliche Gitteraufbau? Wie sind sie genannt? Zeichnen sie bitte die EZ dieser Gitter?



kubischflächenzentriert (kfz)

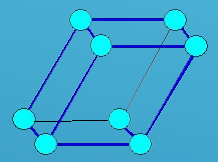


hexagonaldichtest (hdP)

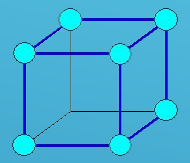
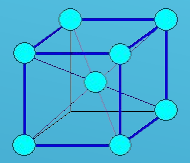
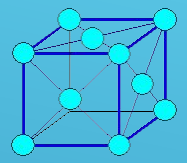
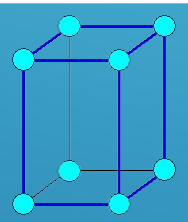
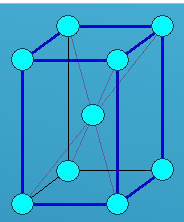
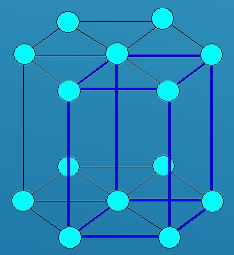


kubischraumzentriert (krz)

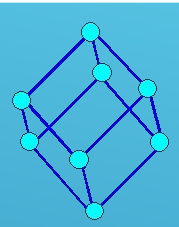
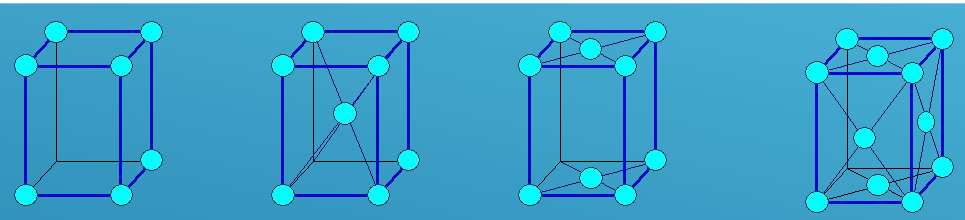
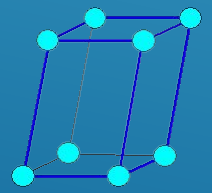
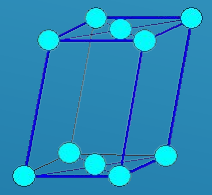
Die 14 Bravais-Gitter

Triklin $a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0$	 **triklin**

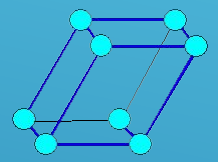
Die 14 Bravais-Gitter

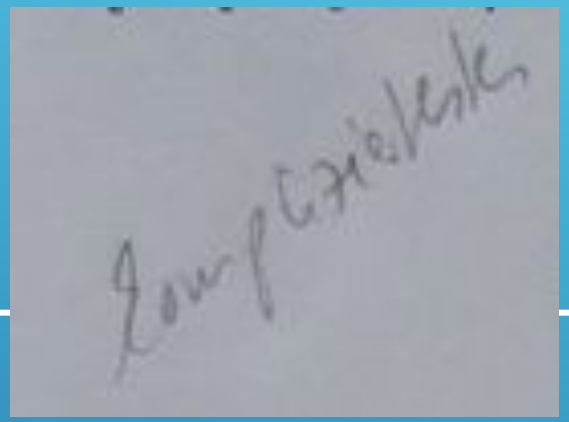
Kubisch $a_1 = a_2 = a_3 = a$ = Gitterkonstante	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	   kubisch: primitiv raumzentriert flächenzentriert
Tetragonal $a_1 = a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	  Tetragonal: primitiv raumzentriert
Hexagonal $a_1 = a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = 90^0$, $\gamma = 120^0$	 **Hexagonal** (**EZ** ist ergänzt um hex. Symmetrie zu zeigen)

Die 14 Bravais-Gitter

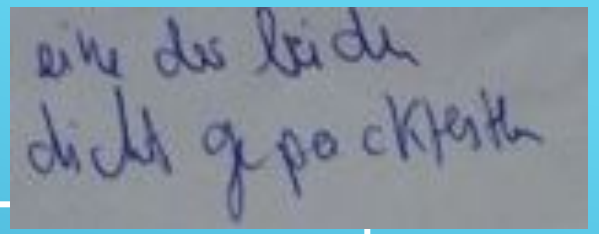
Rhomboedrisch oder **Trigonal** $a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0$	 **rhomboedrisch**
Othorhombisch $a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	 **Orthorhombisch:** **primitv** **raumzentriert** **basisflächen-zentriert** **flächenzentriert**
Monoklin $a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = 90^0$, $\gamma \neq 90^0$	  **Monoklin:** **primitiv** **basisflächenzentriert**

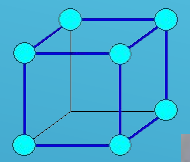
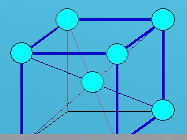
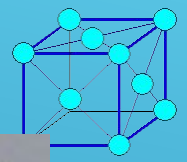
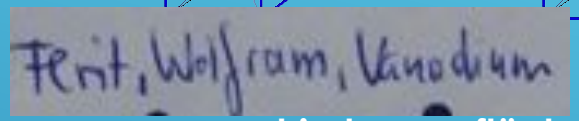
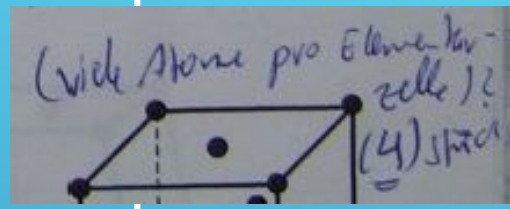
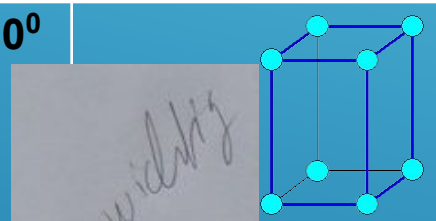
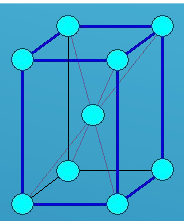
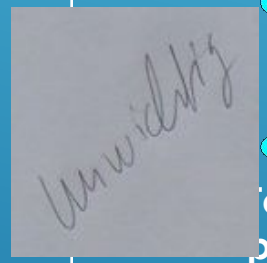
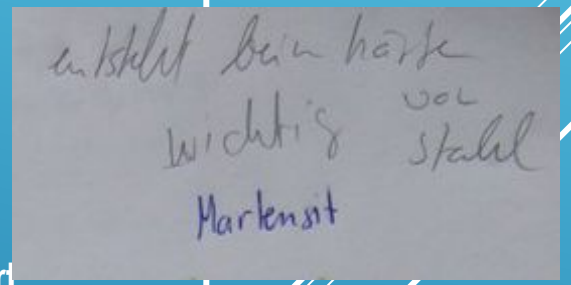
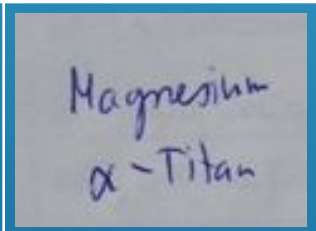
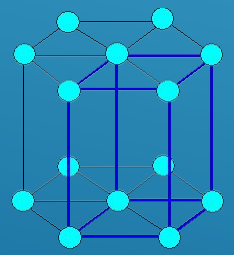
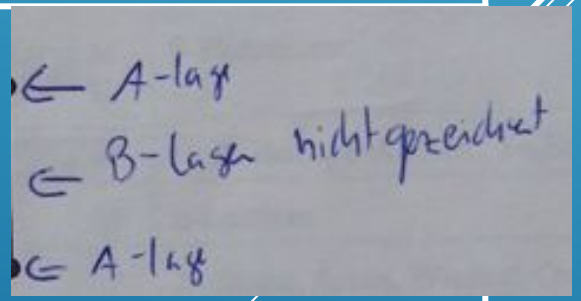
Die 14 Bravais-Gitter

Triklin $a_1 \neq a_2 \neq a$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0$	 **triklin**

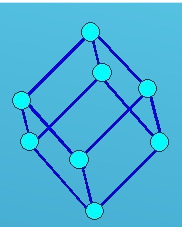
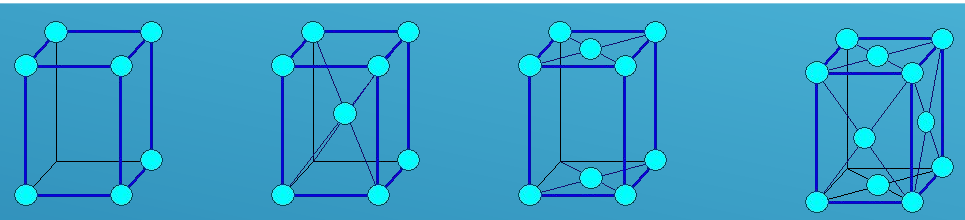
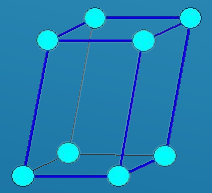
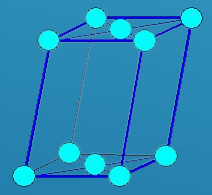


Die 14 Bravais-Gitter



Kubisch **$a_1 = a_2 = a_3 = a$** **= Gitterkonstante**	**$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$**	     **kubisch: primitiv** **raumzentriert** **flächenzentriert**
Tetragonal **$a_1 = a_2 \neq a_3$**	**$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$**	    **Tetragonal: primitiv** **raumzentriert**
Hexagonal **$a_1 = a_2 \neq a_3$**	**$\alpha = \beta = 90^0$,** **$\gamma = 120^0$**	   **Hexagonal** (**EZ** ist ergänzt um hex. Symmetrie zu zeigen)

Die 14 Bravais-Gitter

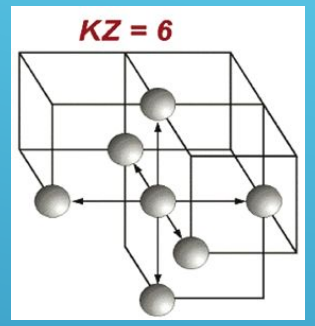
Rhomboedrisch oder **Trigonal** $a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0$	 **rhomboedrisch**
Othorhombisch $a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	 **Orthorhombisch:** **primitv** **raumzentriert** **basisflächen-zentriert** **flächenzentriert**
Monoklin $a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = 90^0$, $\gamma \neq 90^0$	  **Monoklin:** **primitiv** **basisflächenzentriert**

KENNGRÖSSEN DER KRZ-EZ

- Atomzahl je Elementarzelle:
- KZ gibt die Anzahl der Atome an, die von einem Atom den kürzesten gleich großen Abstand haben.

KZ (krz)=

Beispiel
KZ des kubisch-primitiven Kristalls:



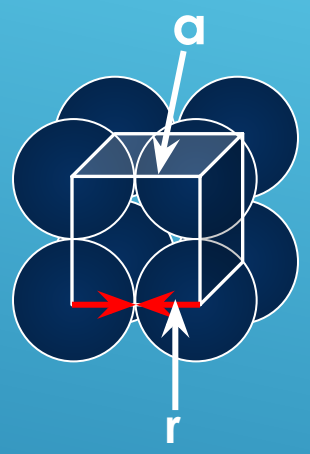
-

- Die Raumerfüllung einer EZ mit Atomen wird als PD bezeichnet.

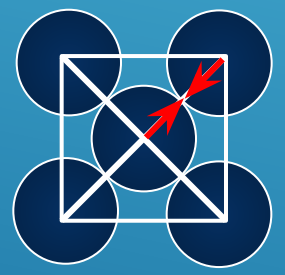
$$PD = \frac{Atomvolumen\ innerhalb\ der\ EZ}{Volumen\ der\ EZ}$$

Für das krz Gitter ist das Atomvolumen innerhalb der EZ: $\frac{2a^3}{16}\sqrt{3\pi}$ und das Volumen der EZ: a^3 => PD (krz)= 0,68

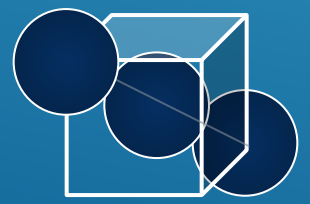
Zusammenhang: Atomradius – Gitterparametern



kubisch primitiv: $a = 2r$

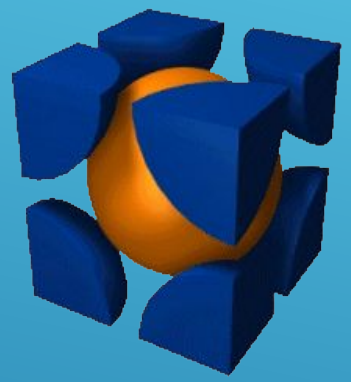


Kubisch flächenzentriert: $a = 4r/\sqrt{2}$



Kubisch raumzentriert: $a = 4r/\sqrt{3}$

Packungsdichte – kubische Gitter



$$2 \cdot V_{Kugel} = 2 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3$$

$$R_{Kugel} = \frac{\sqrt{3} \cdot a}{4}$$

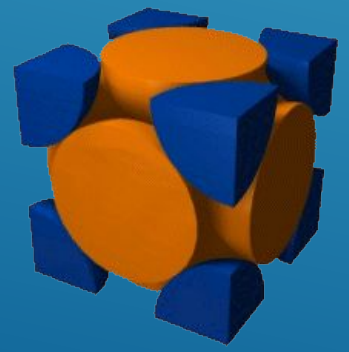
$$\frac{2 \cdot V_{Kugel}}{V_{Zelle}} = 2 \cdot \frac{4}{3} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot a}{4} \right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi}{8} = 0.6798$$

$$\frac{2 \cdot V_{Kugel}}{V_{Zelle}} = 68.0\%$$

kubisch-raumzentrierte Elementarzelle

---

kubisch-flächenzentrierte ElementarzellePackungsdichte



?

3

6

Beim kubisch-raumzentrierten Gitter sind die Würfelecken anteilig mit Atomen besetzt. Da jedes Eckatom gleichzeitig am Aufbau von insgesamt 8 Elementarzellen beteiligt ist, ergibt sich die Atomzahl je Elementarzelle zu

$$A/E = 8\frac{1}{8} + 1 = 2\ \text{Atome}/\text{Zelle}$$

Die **Koordinationszahl** gibt die Anzahl der Atome an, die von einem Atom den kürzesten gleich großen Abstand haben. Die Koordinationszahl beim krz-Gitter ist
KZ = 8.

Die Raumerfüllung einer Elementarzelle mit Atomen wird als **Packungsdichte** PD bezeichnet.

$$PD = \frac{\text{Atomvolumen innerhalb der Elementarzelle}}{\text{Volumen der Elementarzelle}} = \frac{A/E}{V/E}$$

Für das krz-Gitter ist das Atomvolumen innerhalb der Elementarzelle

$$\frac{2a_0^3}{16}\sqrt{3\pi}$$

und das Volumen der Elementarzelle a_0^3.

Somit beträgt die **Packungsdichte**

$$PD = \frac{2a_0^3}{16a_0^3}\sqrt{3\pi} = 0{,}68$$

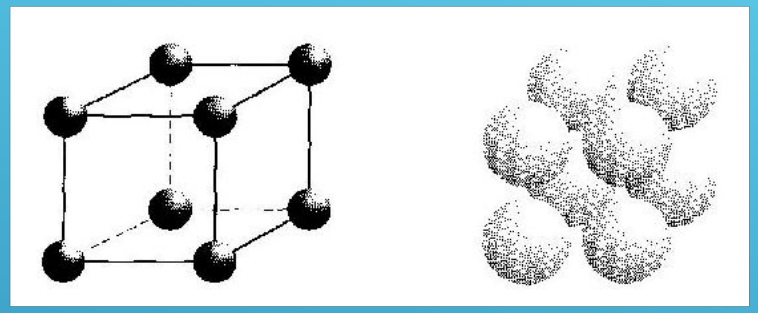
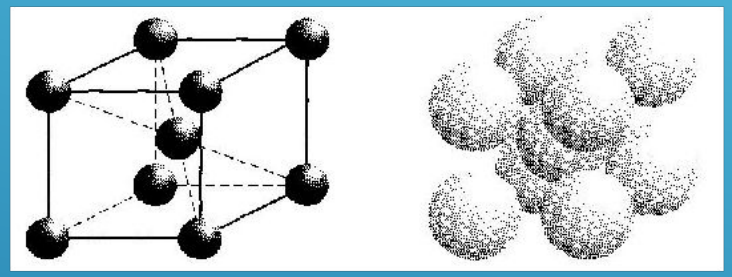
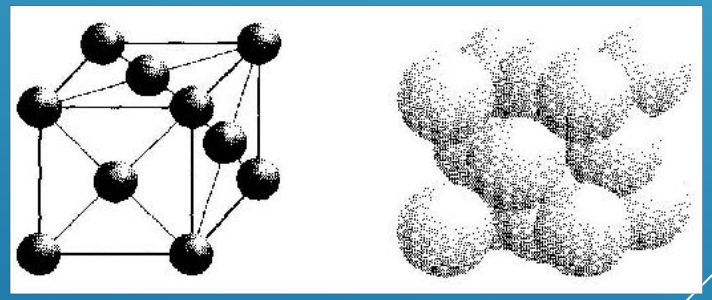
Der Zusammenhang zwischen Gitterkonstante a_0 und Atomradius r_0 ist im krz durch $a_0\sqrt{3} = 4\,r_0$ gegeben.

KENNGRÖSSEN DER WICHTIGSTEN EZ

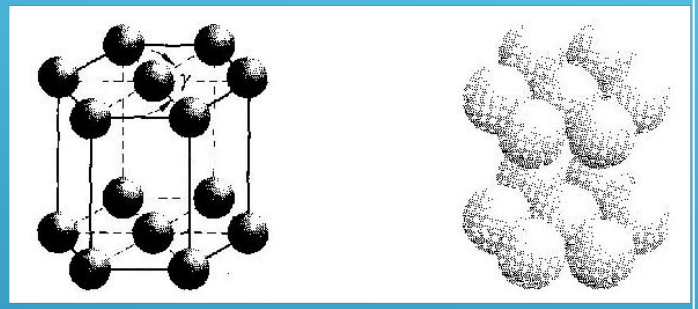
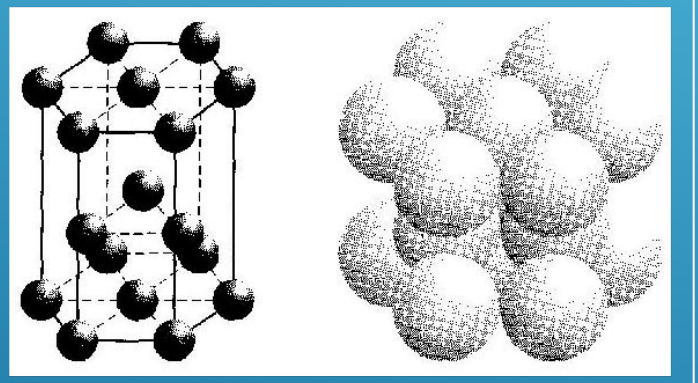
Gittertyp	A/E	KZ	PD
kubisch-primitiv		6	
kubisch-raumzentriert		8	
kubisch-flächenzentriert		12	
hexagonal-dichtest-gepackt	12 x 1/6 + 2 x1/2 +3 = 12	12	0,74

- Übung Kenngrößen der
  - Kubisch raum zentriert
  - Kubisch flächenzentriert

Kristalline Elementstrukturen - Metalle

Gittertyp	n bzw. PD	Beipiele	
***kp*:** **kubisch primitiv**	PD = 0,52 n = 1 Zahl der Eckatome: 8 x 1/8 = 1	Polonium (bedeu-tungslos)	
krz: **kubisch raumzentri ert**	PD = 0,68 n = 2 Zahl der Eckatome: 8 x 1/8 = 1 + 1 innenzentriertes Atom	Cr, α-Fe, Mo, Ta, W, V	
kfz: **kubisch flächenzen triert**	PD = 0,74 n = 4 Zahl der Eckatome: 8 x 1/8 = 1 (rein kubisch) + 6 x 1/2 (3 flächenzentr. Atome)	Al, Cu, Au, Pb, Ni, Ag, γ - Fe	

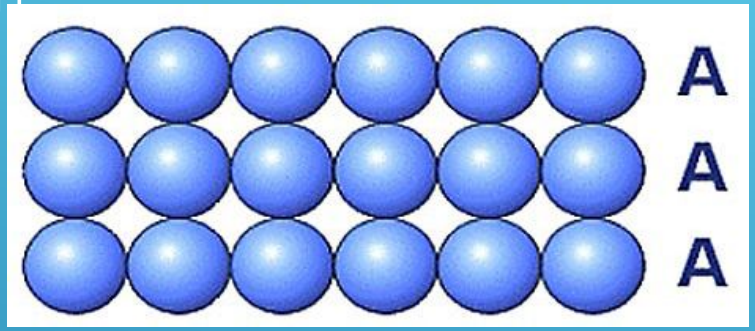
Kristalline Elementstrukturen - Metalle

Gittertyp	n bzw. PD	Beipiele	
hp: **hexagonal primitiv**	n = 3 Zahl der Eckatome: 12 x 1/6 = 2 + 2 x 1/2 (2 flächenzentr. Atome)	Graphit	
hdp: **hexagonal dichtest**	PD = 0,74 n = 6 Zahl der Eckatome: 12 x 1/6 = 2 + 2 x 1/2 (2 flächenzentr. Atome) + 3 innliegende Atome	α-Ti, Zn, Mg, Cd	

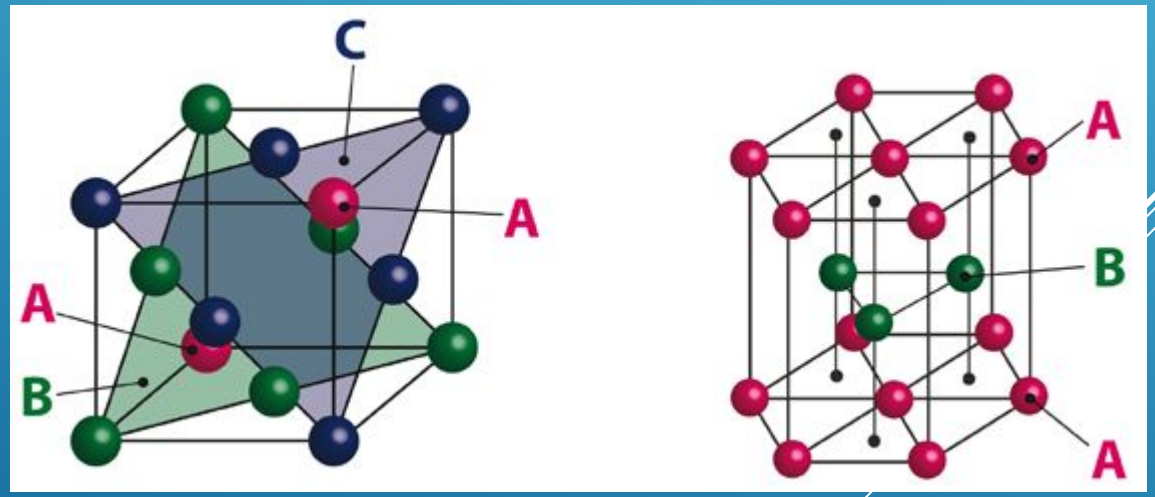
STAPELFOLGE

- Die Raumgitter lassen sich auch als eine Schichten – oder Stapelfolge von in Gitterebenen regelmäßig angeordneten Atomen – als starre Kugeln aufgefasst - darstellen

- Stapelfolge im kubisch-primitiven Gitter

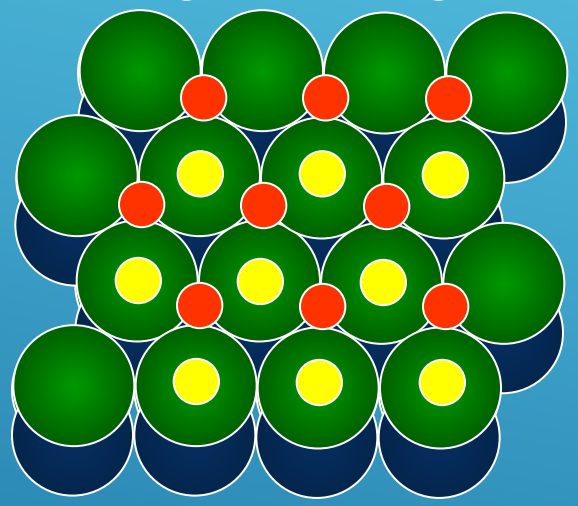


- Am dichtest gepackten Ebenen:
  - kfz
  - hdP

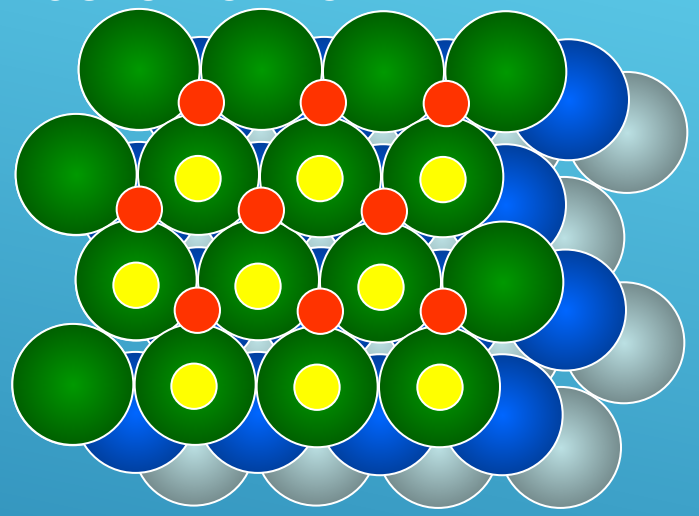


Stapelfolge – kfz ⇔ hdp

Hexagonal dichteste Kugelpackung



Kubisch flächenzentriert

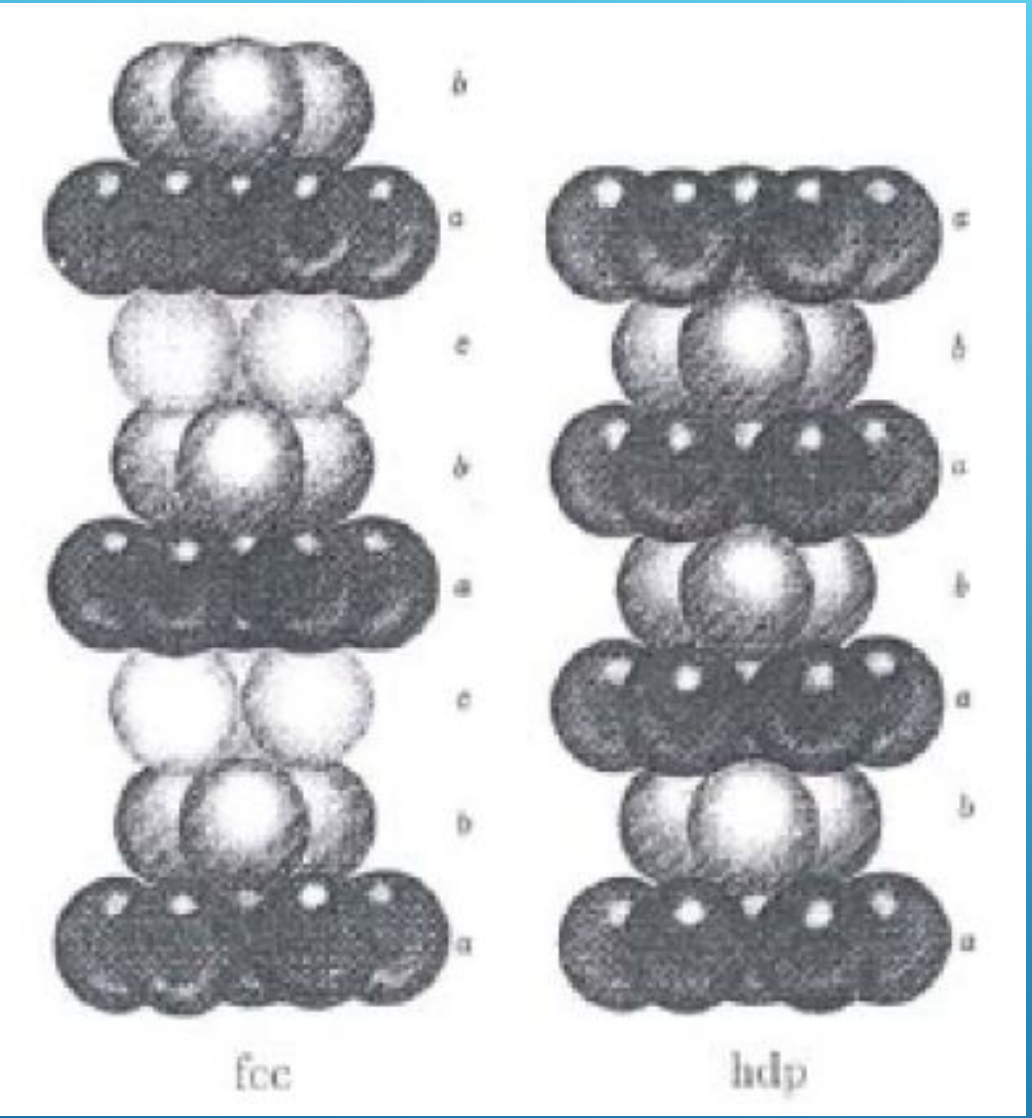


Stapelfolge:

A
B
A
B
A
B

A
B
C
A
B
C
A
B
C

Stapelfolge – kfz ⇔ hdp



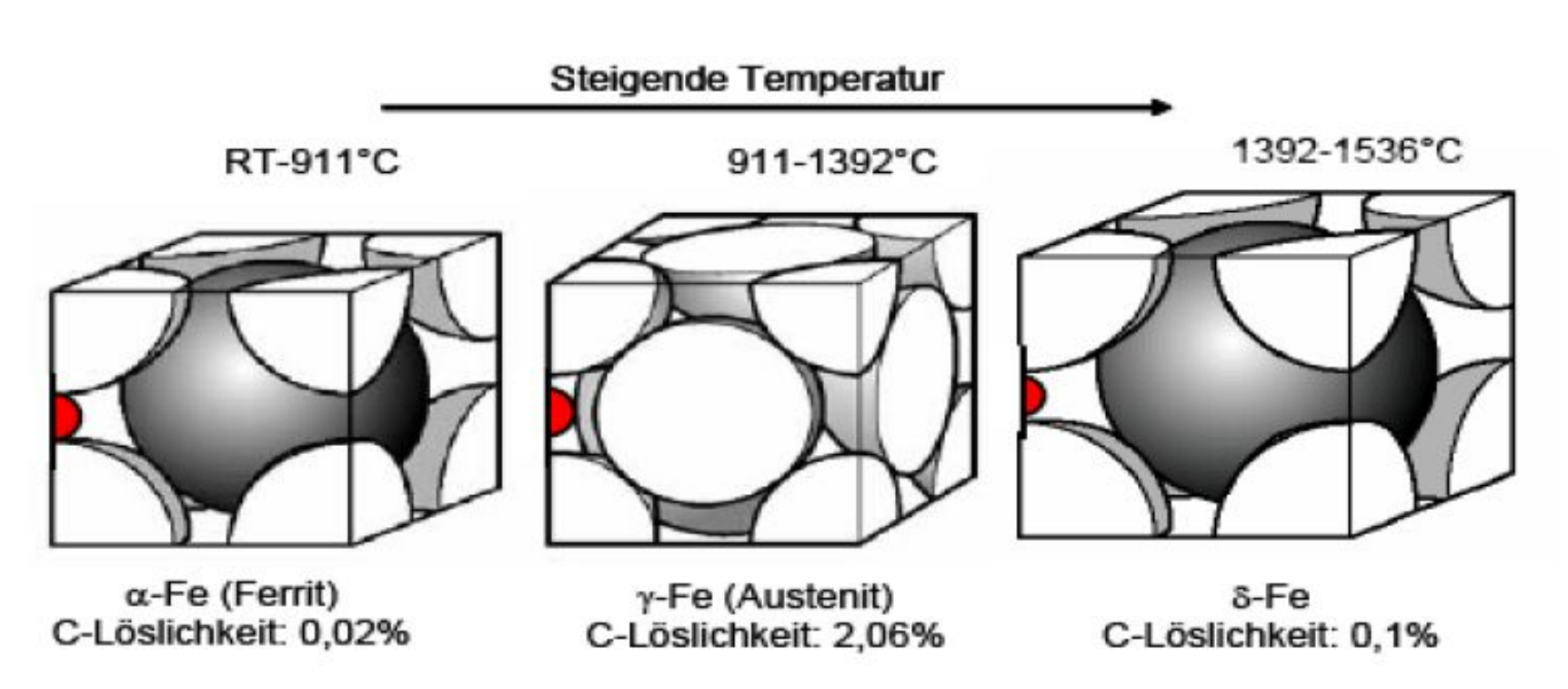
ALLOTROPE UMWANDLUNGEN

- Unter allotrope Umwandlungen versteht man die in bestimmten Temperatur- und Druckbereichen auftretenden Änderungen des Gittertyps

Metall	Struktur	Strukturänderung	Umwandlungs-temperatur [°C]	Atomradius r_0 [10^{-9} m]
Ag	kfz			0,144
Al	kfz			0,143
Au	kfz			0,144
Co	hdP	hdP - kfz	417	0,125
Cr	krz			0,125
Cu	kfz			0,128
Fe		krz - kfz kfz - krz	911 1392	0,124
Na	krz	krz - kfz	bei tiefen Temperaturen	0,185
Mg	hdP			0,165
Mo	krz			0,136
Ni	kfz			0,124
Pb	kfz			0,175
Sn	kub	kub-tetragonal	13	0,151
Ti	hdP	hdP-krz	882	0,146
V	krz			0,131
W	krz			0,137
Zn	hdP			0,133

Kristalline Elementstrukturen - Polymorphie von Metallen

Modifikation	Temperaturbereich	Gittertyp
α - Fe	bis 911°C	krz
γ - Fe	911°C bis 1392°C	kfz
δ - Fe	1392°C bis 1536°C	krz
α - Ti	bis 882°C	hdp
β - Ti	882°C bis 1668°C (1668°C = Tm)	krz



Gittertypen

Kubisch-raumzentriert	Kubisch-flächenzentriert	Hexagonal	Tetragonal
Eisen	Eisen		
	Titan	Titan	
Zinn			Zinn
Molybdän	Aluminium	Cadmium	Antimon
Niob	Blei	Cobalt	Bismut
Tantal	Silber	Magnesium	Germanium
Vanadium	Gold	Zink	Lithium
Wolfram	Kupfer		
Chrom	Mangan		
	Nickel		
	Palladium		
	Platin		

METALLE – KRISTALLZUSTAND DER METALLE - LERNZIELE

- ✓ Das Raumgitter als Idealstruktur bestimmt viele Eigenschaften und Vorgänge von Werkstoffen.
- ✓ Charakterisierung durch Packungsdichte
- Beschreibung durch Millersche Indizes
- ▸ Zusammenhang zwischen Kristallanisotropie und Textur
- ▸ Der Gitterbaufehler als Realstruktur ist verantwortlich für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften.
- ▸ Definition von Leerstelle, Zwischengitteratom, Versetzung, Stapelfehler und Korngrenze
- ▸ Burgersvektor und Stapelfehlerenergie als Grundkenngrößen eines Festkörpers
- ▸ Unterschied zwischen Mischkristall und Kristallgemisch

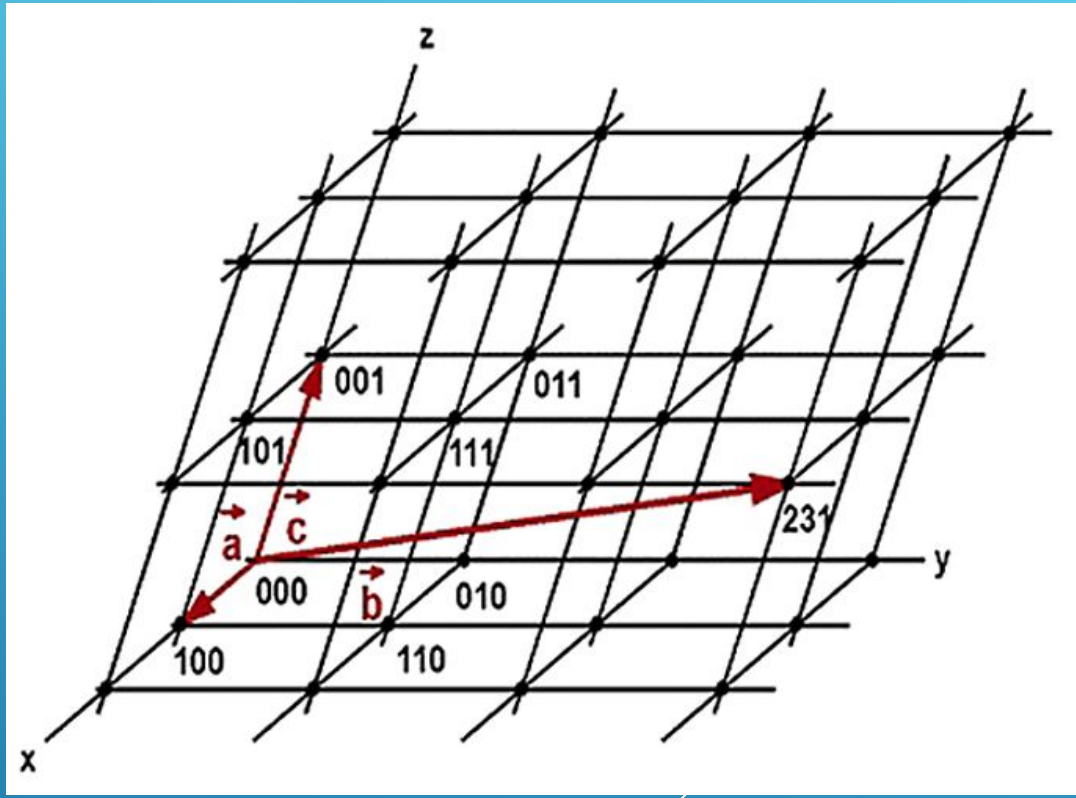
BEZEICHNUNG VON PUNKTEN UND EBENEN IM RAUMGITTER (MILLERSCHE INDIZES)

- Jeder Gitterpunkt kann durch den vom Nullpunkt ausgehenden zu ihm führenden Vektor bezeichnet werden:

$$\vec{r} = u.\vec{a} + v.\vec{b} + w.\vec{c}$$

- $|\vec{a}|$, $|\vec{b}|$, $|\vec{c}|$ sind die Gitterkonstante
- die Richtungsfamilie wird durch <uvw> angegeben.

  (Das sind alle Geraden mit gleichen Atomabstand)

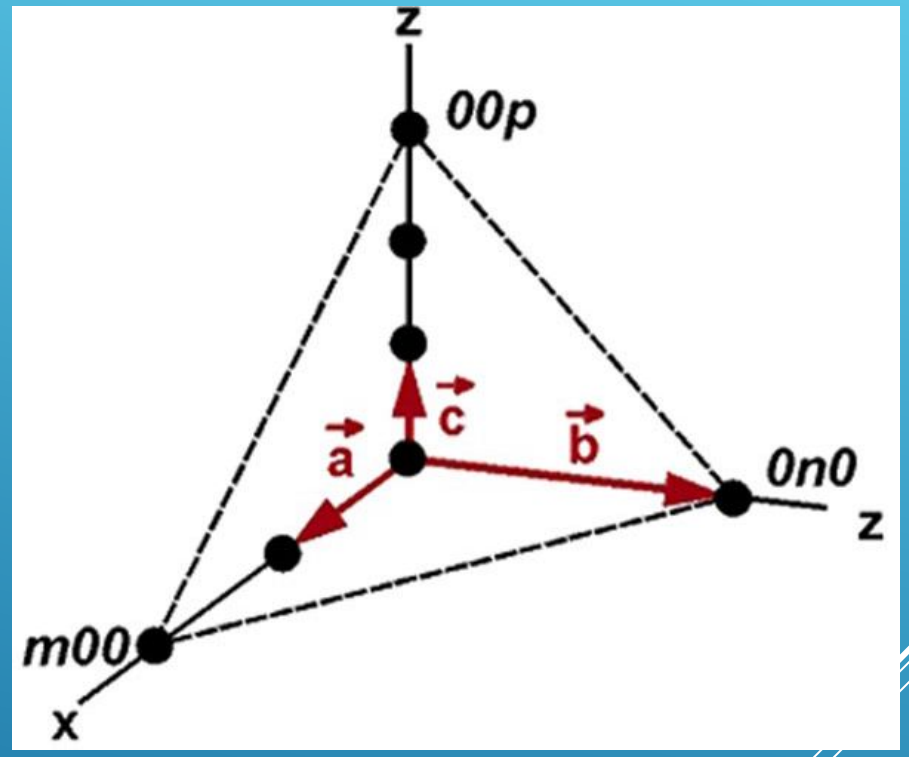


BEZEICHNUNG VON PUNKTEN UND EBENEN IM RAUMGITTER (MILLERSCHE INDIZES)

- Eine Gitterebene schneidet die Achsen x, y, z in den punkten mit den Koordinaten auf der x-Achse m00, auf der y-Achse 0n0 und auf der z-Achse 00p

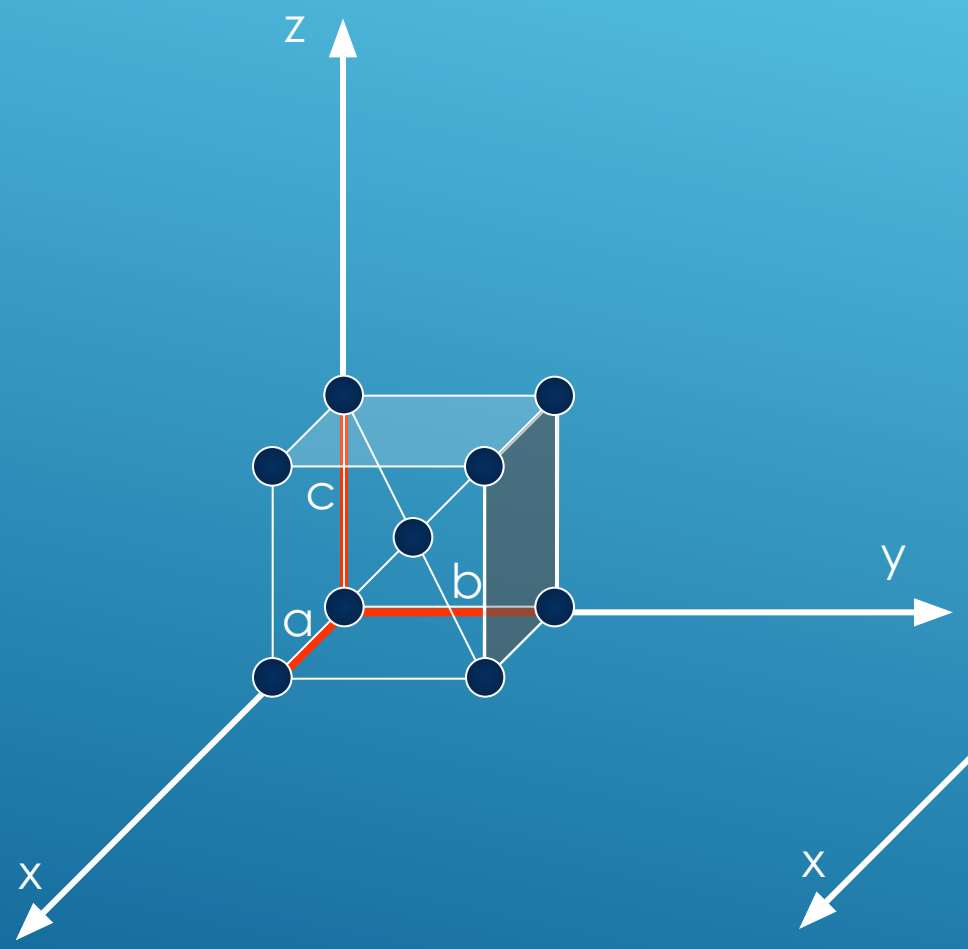
- Ziel: Lage der Ebene zu definieren
  - Annahme:
    - Vermeidung großer Zahlen und um für
    - Um für parallele Ebenen die gleichen Indizes zu
- bekommen

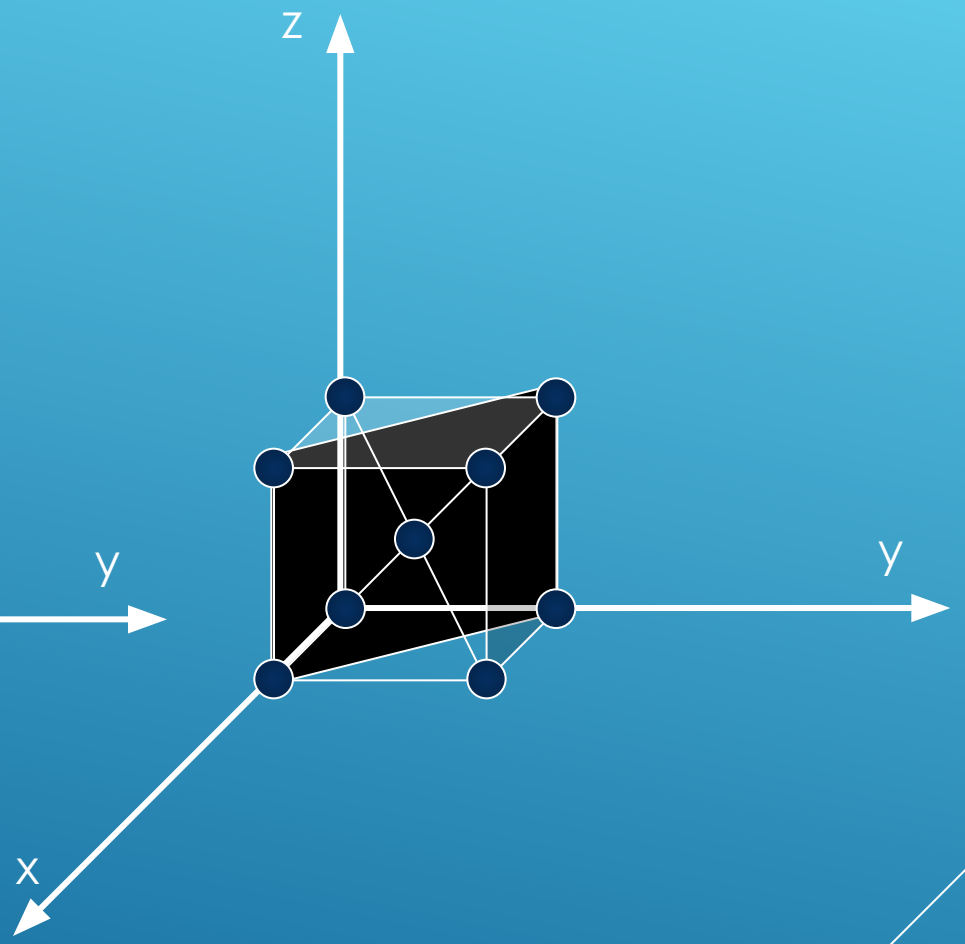
  - benutzt: Reziproken Koordinaten
  - Millersche Indizes
    - X-Achse: $h \sim \frac{1}{m}$
    - Y-Achse: $k \sim \frac{1}{n}$
    - Z-Achse: $l \sim \frac{1}{p}$



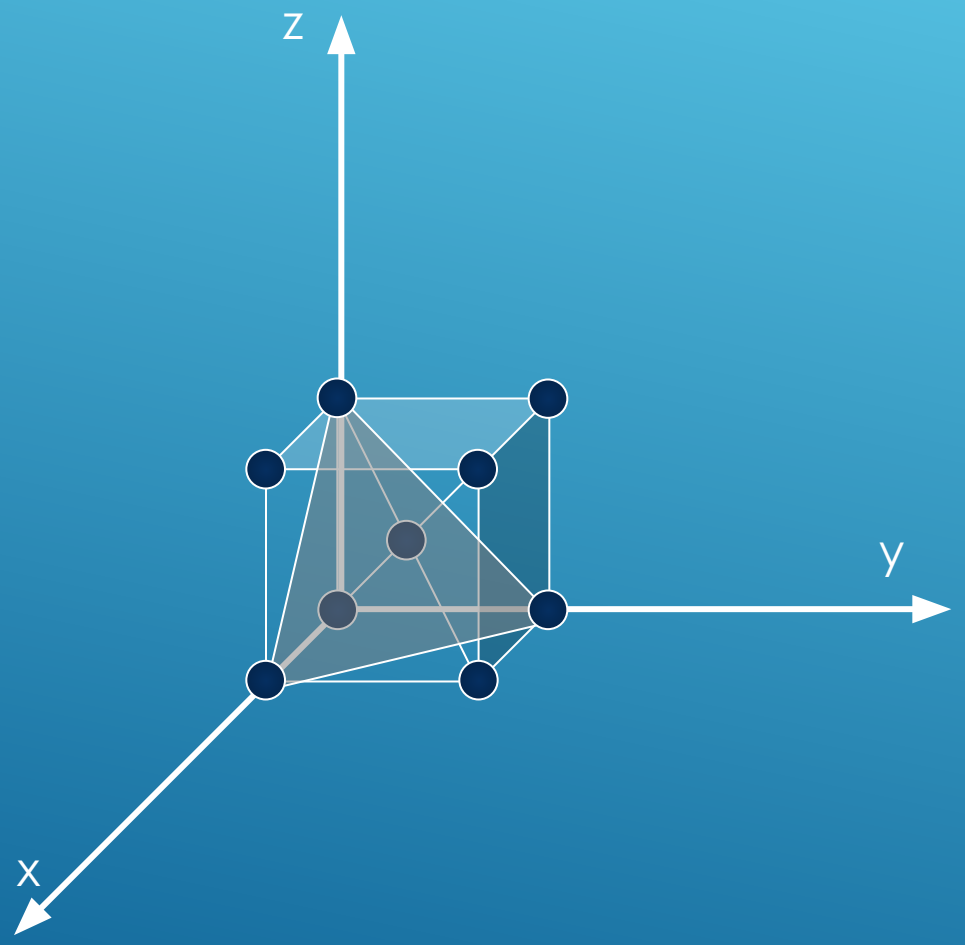
(hkl) wird als Millersche Indizes bezeichnet
Definition der MI: das kleinste ganzzahlige Vielfache der reziproken Abschnitte

Beispiele





Beispiele



Die Millerschen Indizes zur Bestimmung der Kristall-Gitterebenen

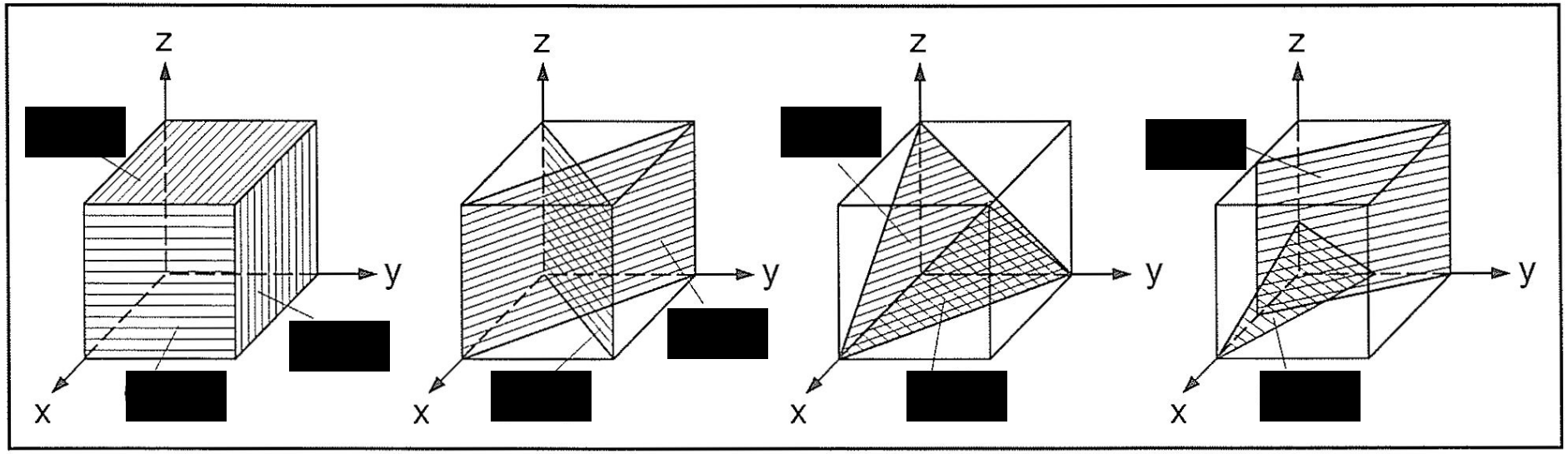


Bild 3.6: Wichtige Ebenen im kubischen Gitter

Die Millerschen Indizes zur Bestimmung der Kristall- Gitterebenen

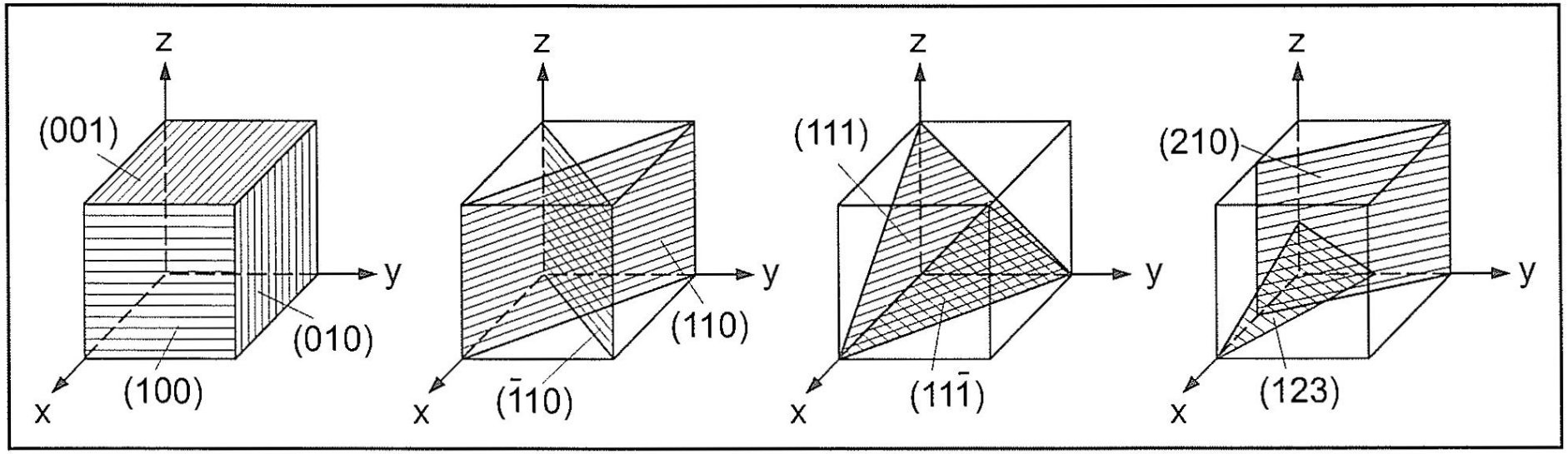


Bild 3.6: Wichtige Ebenen im kubischen Gitter

BESTIMMUNG DER GITTERRICHTUNGEN

1) Negative Indizes werden durch Überstreichen gekennzeichnet, z. B. $[11\bar{1}\,.]$
2) Richtungen gleichen Typs sind kristallographisch gleichwertig und werden in ihrer Gesamtheit durch spitze Klammern gekennzeichnet, z. B. Würfelkanten [100], [010], [001] etc. entspricht <100>.
3) Es gelten die Regeln der Vektorrechnung.

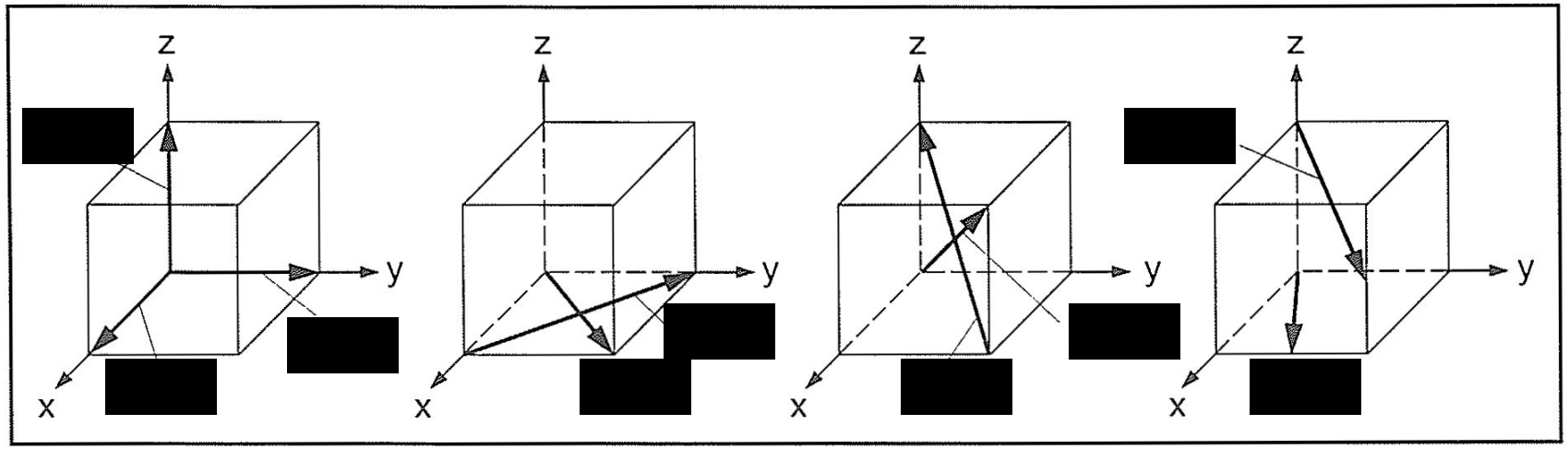


Bild 3.4: Wichtige Richtungen im kubischen Gitter

BESTIMMUNG DER GITTERRICHTUNGEN

1) Negative Indizes werden durch Überstreichen gekennzeichnet, z. B. $[11\bar{1}\,.]$
2) Richtungen gleichen Typs sind kristallographisch gleichwertig und werden in ihrer Gesamtheit durch spitze Klammern gekennzeichnet, z. B. Würfelkanten [100], [010], [001] etc. entspricht <100>.
3) Es gelten die Regeln der Vektorrechnung.

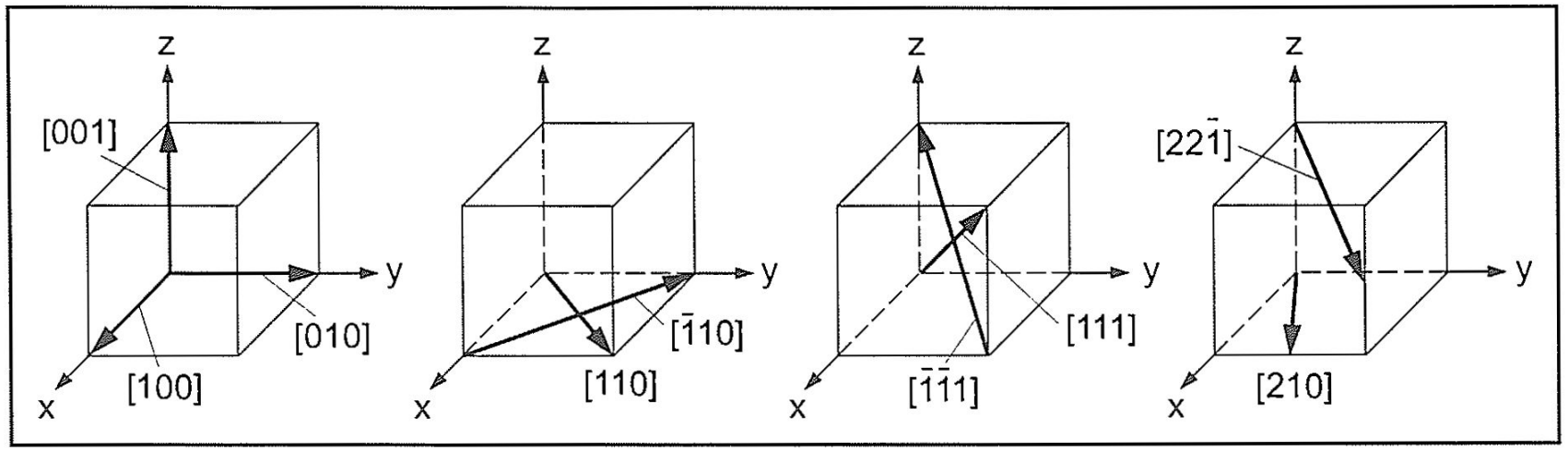


Bild 3.4: Wichtige Richtungen im kubischen Gitter

Die Millerschen Indizes zur Bestimmung der Kristall-Gitterebenen, -richtung

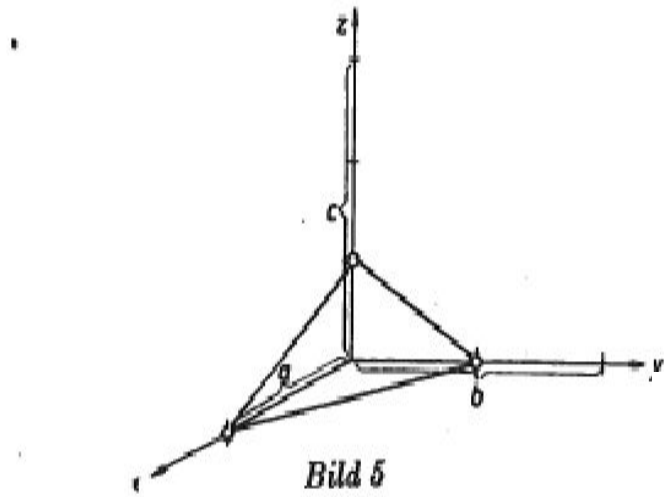


Bild 5
Darstellung der (1 2 3)-Ebene

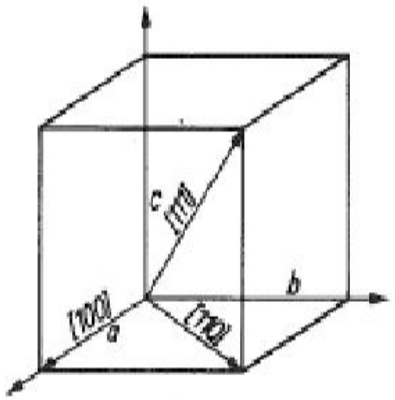


Bild 10
Indizes für Gitterrichtungen

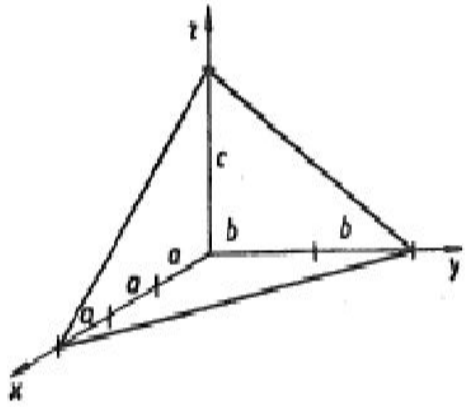
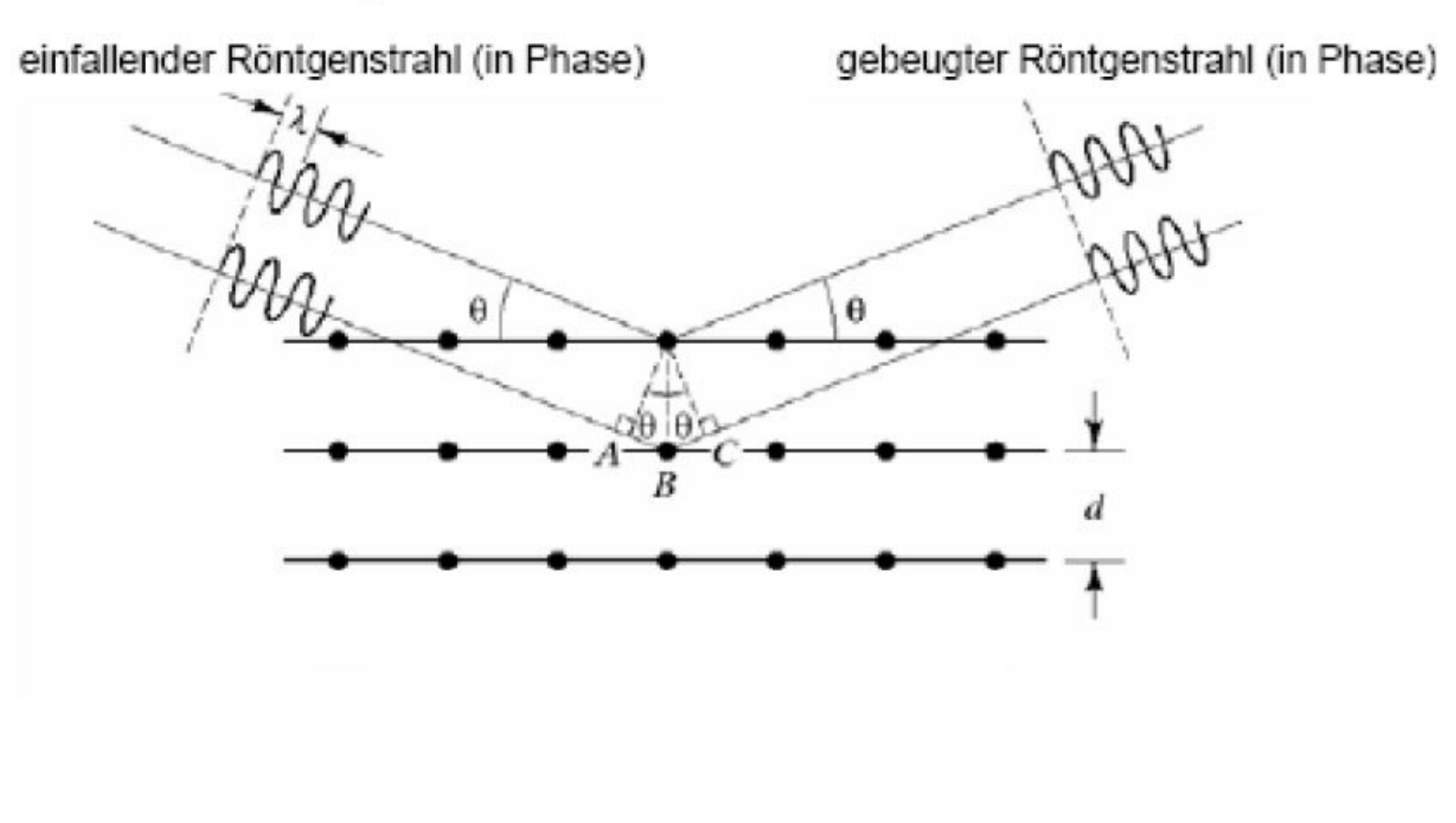


Bild 9
Darstellung der (2 3 6)-Ebene

Röntgenographische Untersuchungen an Kristallen

- Kristalle zeigen beim Bestrahlen mit Röntgenstrahlen Interferenzerscheinungen, da die Wellenlängen in der Größenordnung der Atomabstände liegen.



d?

Gleichung nach Bragg:

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$$

Θ: Winkel
λ: Wellenlänge
d: Netzebeneabstand
n: Beugungsordung (1,…n)

Röntgenographische Untersuchungen an Kristallen

Die Ebenenbezeichung mittels Millerschen Indizes ist praktisch für die Auswertung von Messergebnissen. Es wird mit ihrer Hilfe ein sogenanntes „reziprokes Gitter“ erzeugt. Der Zusammenhang zwischen den Indizes h, k, l, dem Ebenenabstand d_{hkl} und der Gitterkonstanten a lautet im kubischen Gitter:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a}$$

ANISOTROPIE UND TEXTUR

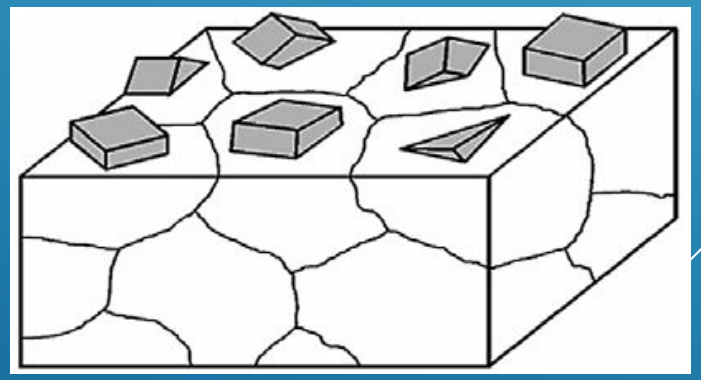
- Definition Anisotropie eines Körpers

- Kristall – Richtungsabhängigkeit der Kristalleigenschaften

  - EZ – Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften
  - Korn – Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften

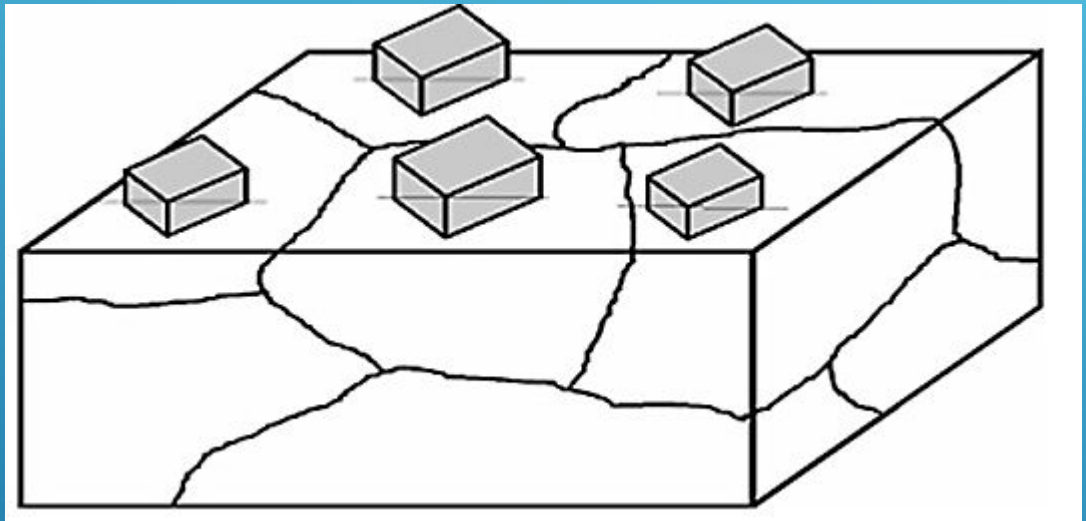
- Metallstück besteht aus vielen Körner, die in der Regel unterschiedliche Richtungen annehmen

  => Es verhält sich quasi-isotrop

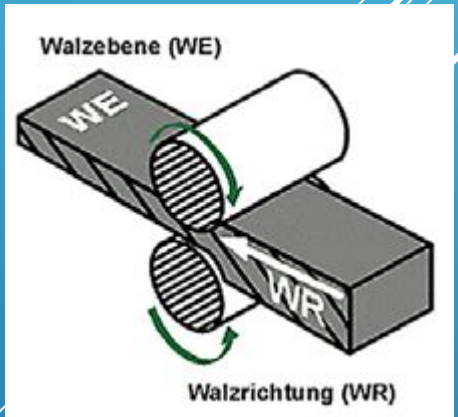


ANISOTROPIE UND TEXTUR

- Treten im Material die Körner in bestimmten Richtungen bevorzugt auf, so nennt man dies die Textur des Materials



- Texturen entstehen durch Verformung (Walzen) z.B.

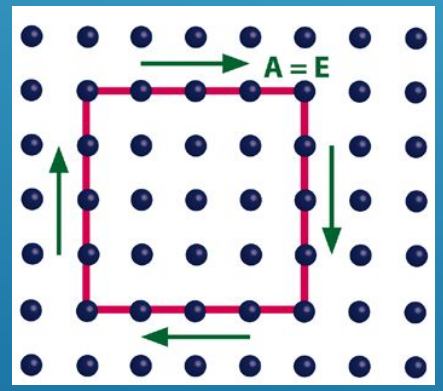


REALSTRUKTUR: KRISTALLBAUFEHLER

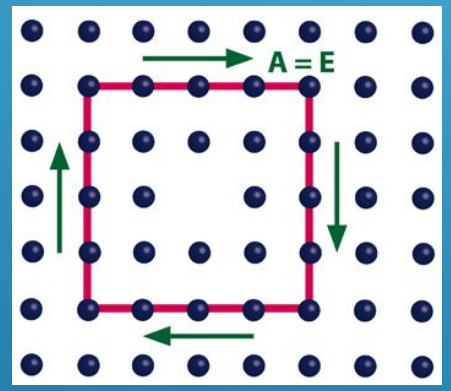
- Im Gegensatz zu den Idealkristallen sind die existierenden Realkristalle mit Fehler behaftet.
- Man unterscheidet:
  - Strukturelle Fehlordnung (Gitterbaufehler)
  - Chemische Fehlordnung
- Gitterbaufehler:
  - 1. Punktförmige Fehler – 0. dimensionale
  - 2. Linienförmige Fehler – 1. dimensionale
  - 3. Flächenhafte Fehler – 2. dimensionale
- Zur Unterscheidung der Gitterfehler bedient man sich des Burgervektors.

REALSTRUKTUR: KRISTALLBAUFEHLER - BURGERVERKTOR

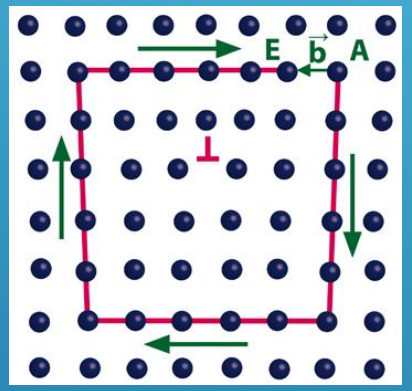
- Burgervektor
  - Ist die Verbindung zwischen Ausgangspunkt A und Endpunkt E des Burgersumlaufes



Burgersumlauf im ungestorten Kristall



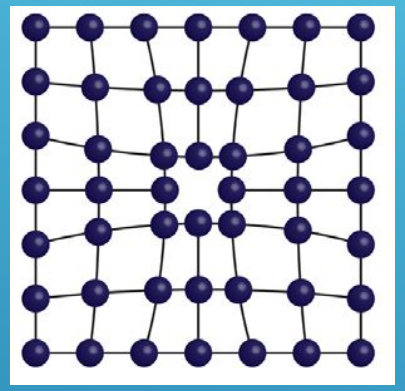
Burgersumlauf um Leerstelle; A=E



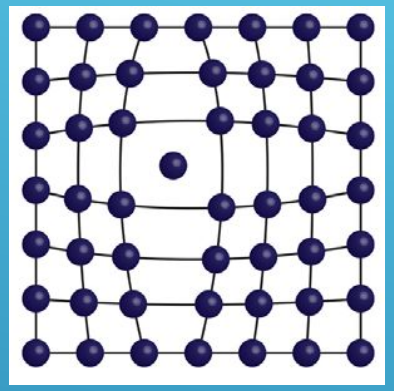
Burgersumlauf um Versetzung; A≠E

NULL-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – THERMISCHE GITTERFEHLER

- Auch Gitterlücken oder Schottky Defekte genannt
- Die Entstehung einer Leerstelle kann man so beschreiben, dass ein Atom aus einem Gitterplatz entfernt und in der freien Oberflache des Kristalls wieder eingebaut wird



Leerstellen

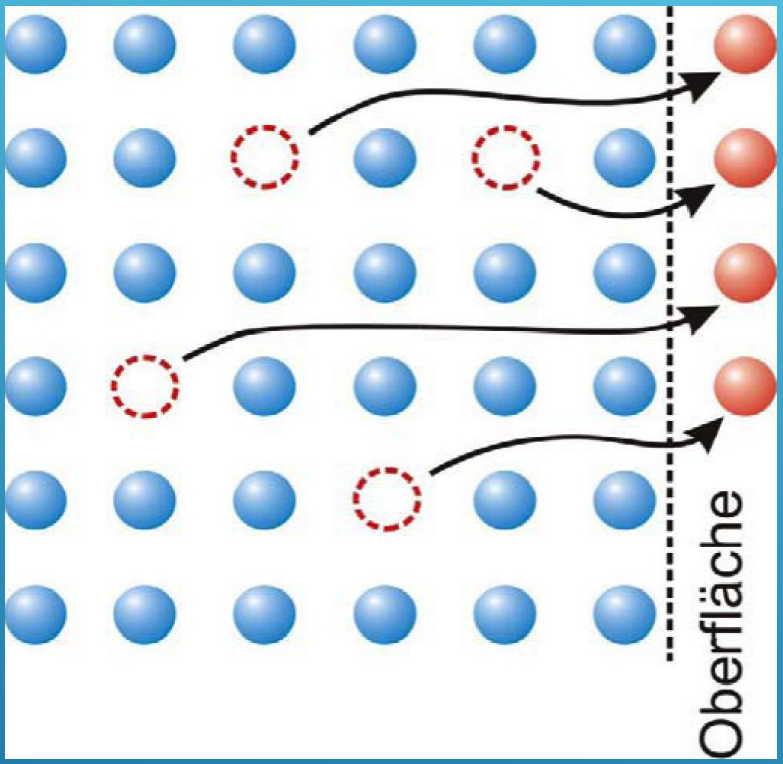


Zwischengitteratom

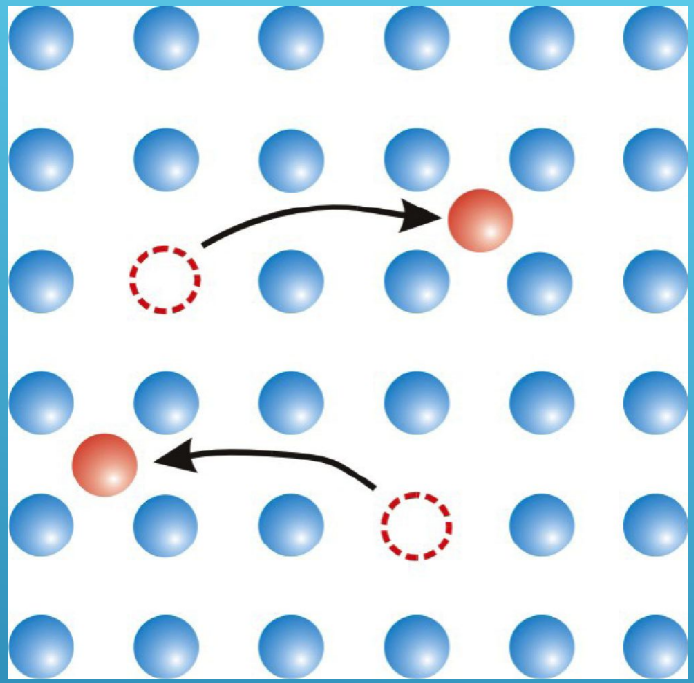
- Diese Fehler: thermisch in GW
- Mechanismen zur Erzeugung von Fehlstellen (aus dem thermischen Gleichgewicht)
  - Abschrecken von höhen Temperaturen
  - Bestrahlung mit energetischen Teilchen

- Zwischengitteratome entstehen dadurch, dass innerhalb des Gitters ein Atom von einem normalen Gitterplatz auf einen Zwischengitterplatz springt. Ein Fehlstellenpaar, Leerstelle-Zwischengitteratom, wird Frenkel-Defekt genannt.

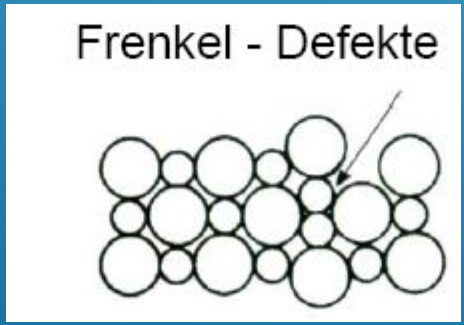
Null-dimensionale Gitterfehler – thermische Gitterfehler



Schottky Defekte



Frenkel Defekte



THERMISCHE ERZEUGUNG VON LEERSTELLEN

- Wahrscheinlichkeit, dass ein Gitterplatz vakant ist: Arrhenius-Gleichung: $p = A \times \exp(-E/kT)$

  A: Normierungsfaktor

  E: Anregungsenergie

  k: Boltzmannkonstante

  T: Temperatur

- z.B. Kupfer
  - 300K: $p = 3 \times 10^{-15}$
  - 1000K: $p = 3 \times 10^{-5}$

Leerstellenkonzentration als Funktion der Temperatur

THERMISCHE ERZEUGUNG VON LEERSTELLEN

- Wahrscheinlichkeit, dass ein Gitterplatz vakant ist:
  Arrhenius-Gleichung: $p = A \times \exp(-E/kT)$

  A: Normierungsfaktor

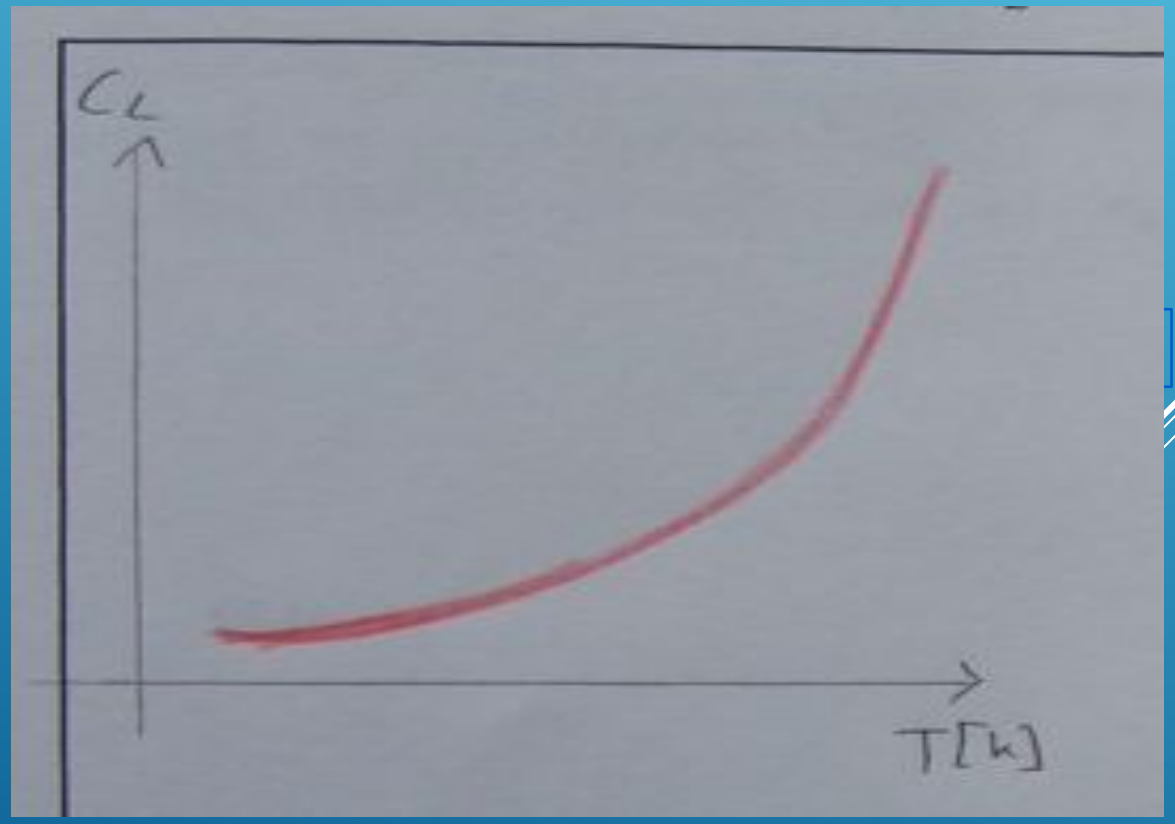
  E: Anregungsenergie

  k: Boltzmannkonstante

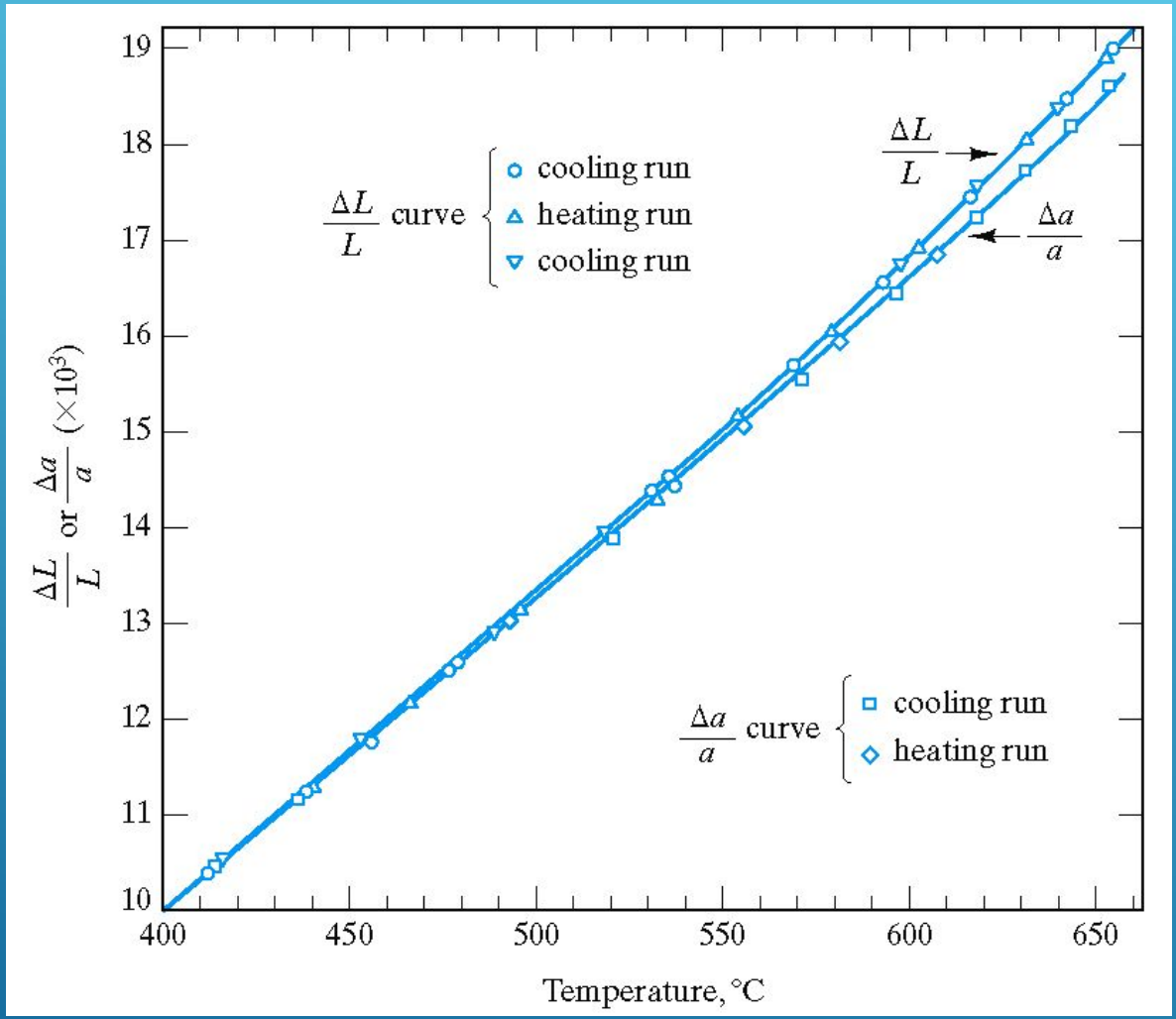
  T: Temperatur

- z.B. Kupfer
  - 300K: $p = 3 \times 10^{-15}$
  - 1000K: $p = 3 \times 10^{-5}$

Leerstellenkonzentration als Funktion der Temperatur



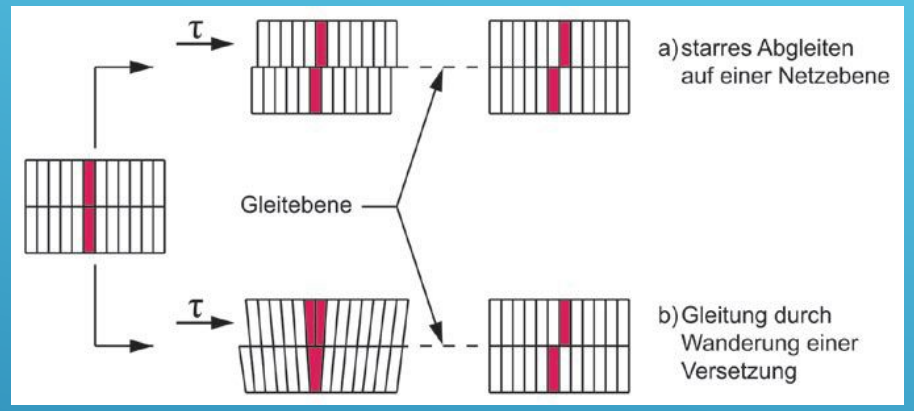
TEMPERATURABHÄNGIGKEIT VON GITTERKONSTANTE UND LÄNGE DES KRISTALLS IN ALUMINIUM



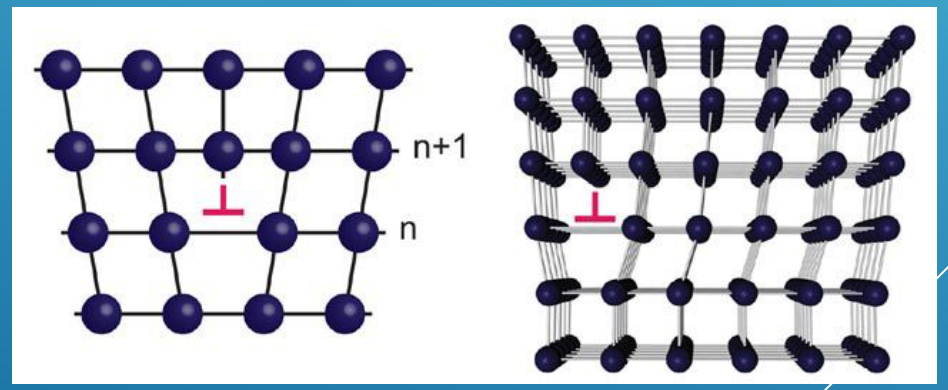
Durch die Entstehung von Leerstellen ist die thermische Ausdehnung des Kristalls größer als das Wachstum der Gitterkonstante

EIN-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – VERSETZUNGEN

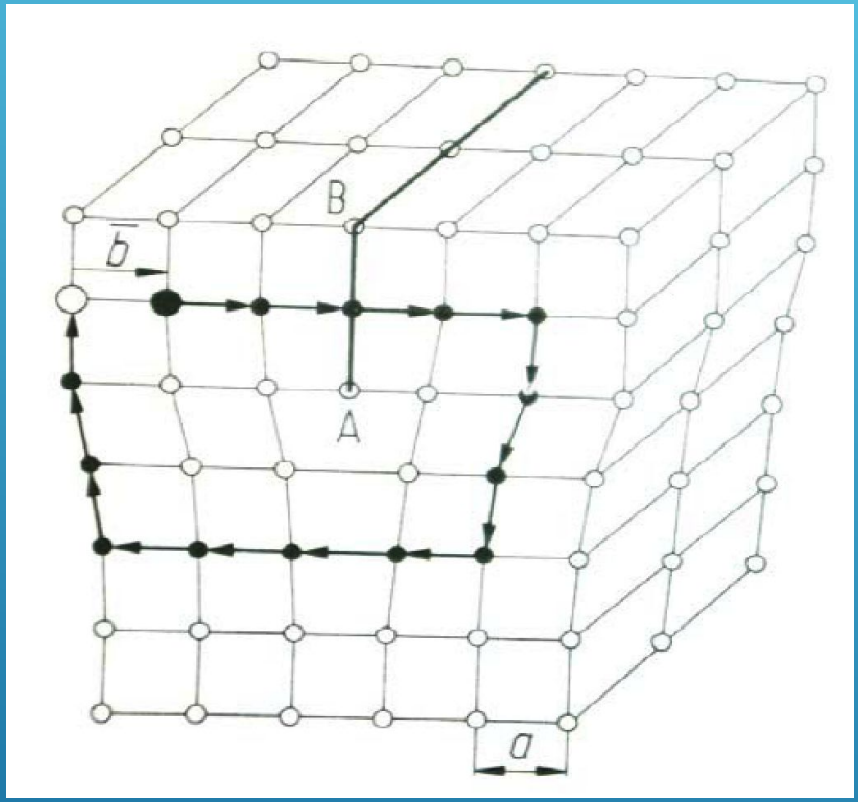
- Abgleitung in einem Kristall: Die Versetzungen erlauben es, dass sich eine Gleitung schrittweise über die Netzebenen fortsetzt.

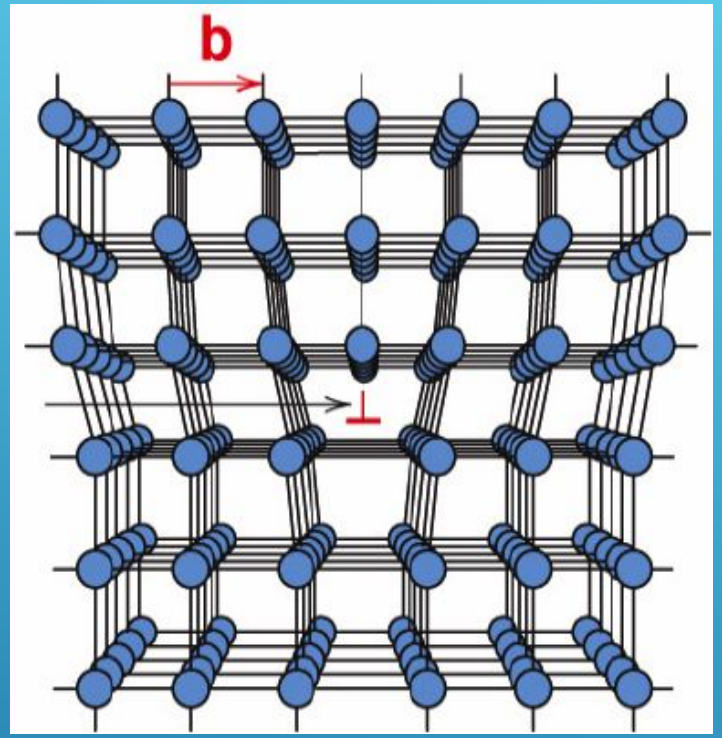


- Stufenversetzung
  - Geometrisch lasst sich eine Stufenversetzung durch Einfugen oder Herausnehmen einer Halbebene darstellen.



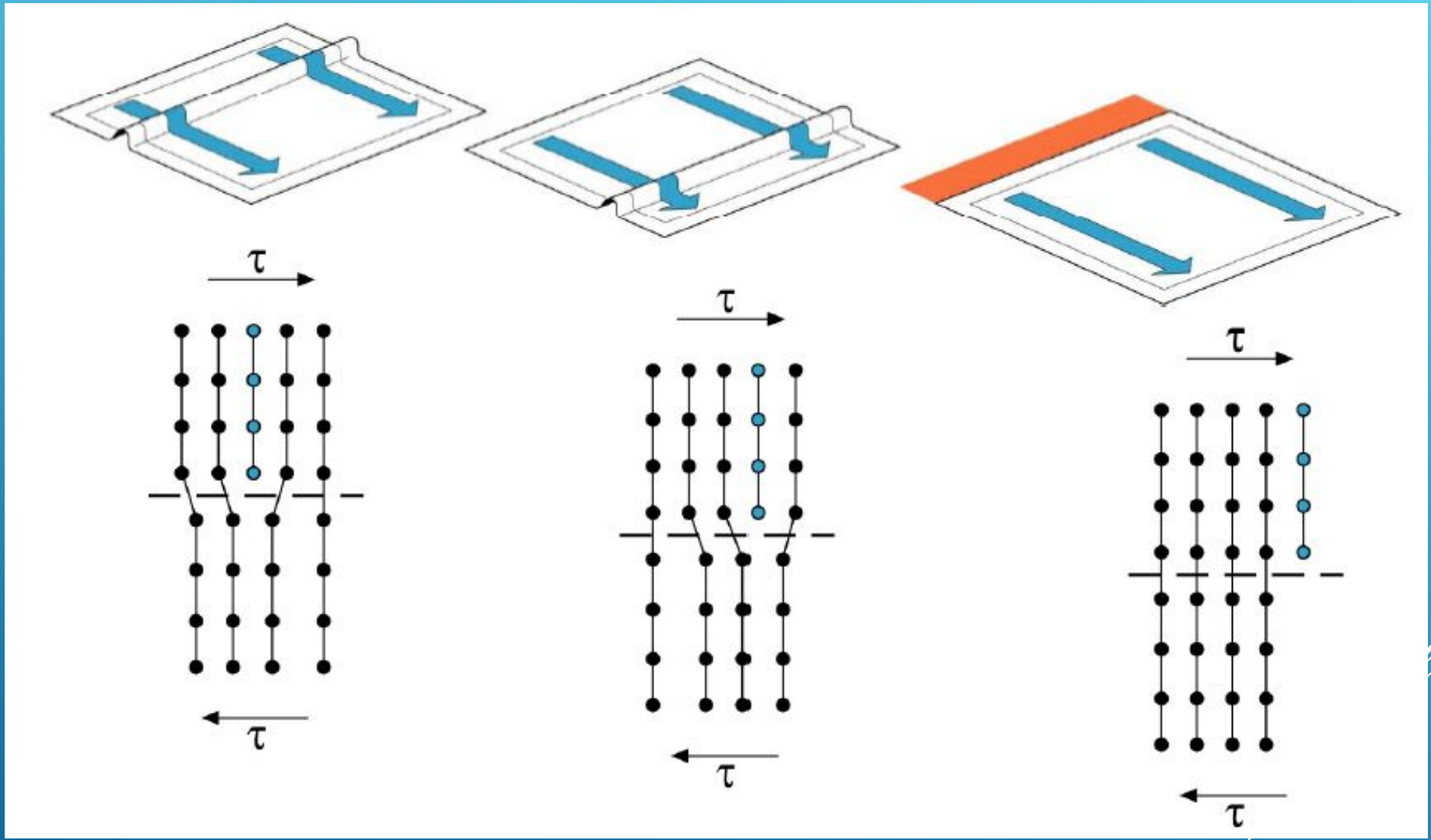
Stufenversetzung 1-dimensionaler Fehler





Burgervektor senkrecht zur Versetzung

WANDERUNG EINER STUFENVERSETZUNG



Stufenversetzung- Definition des Burgers-Vektors

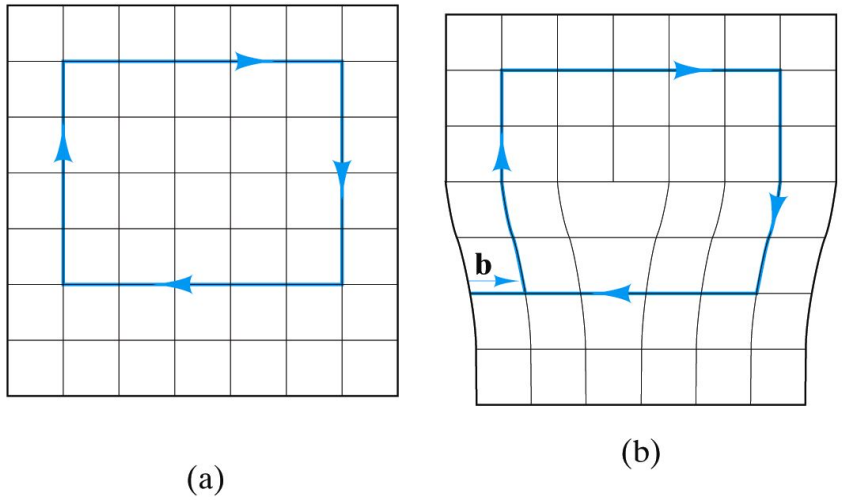


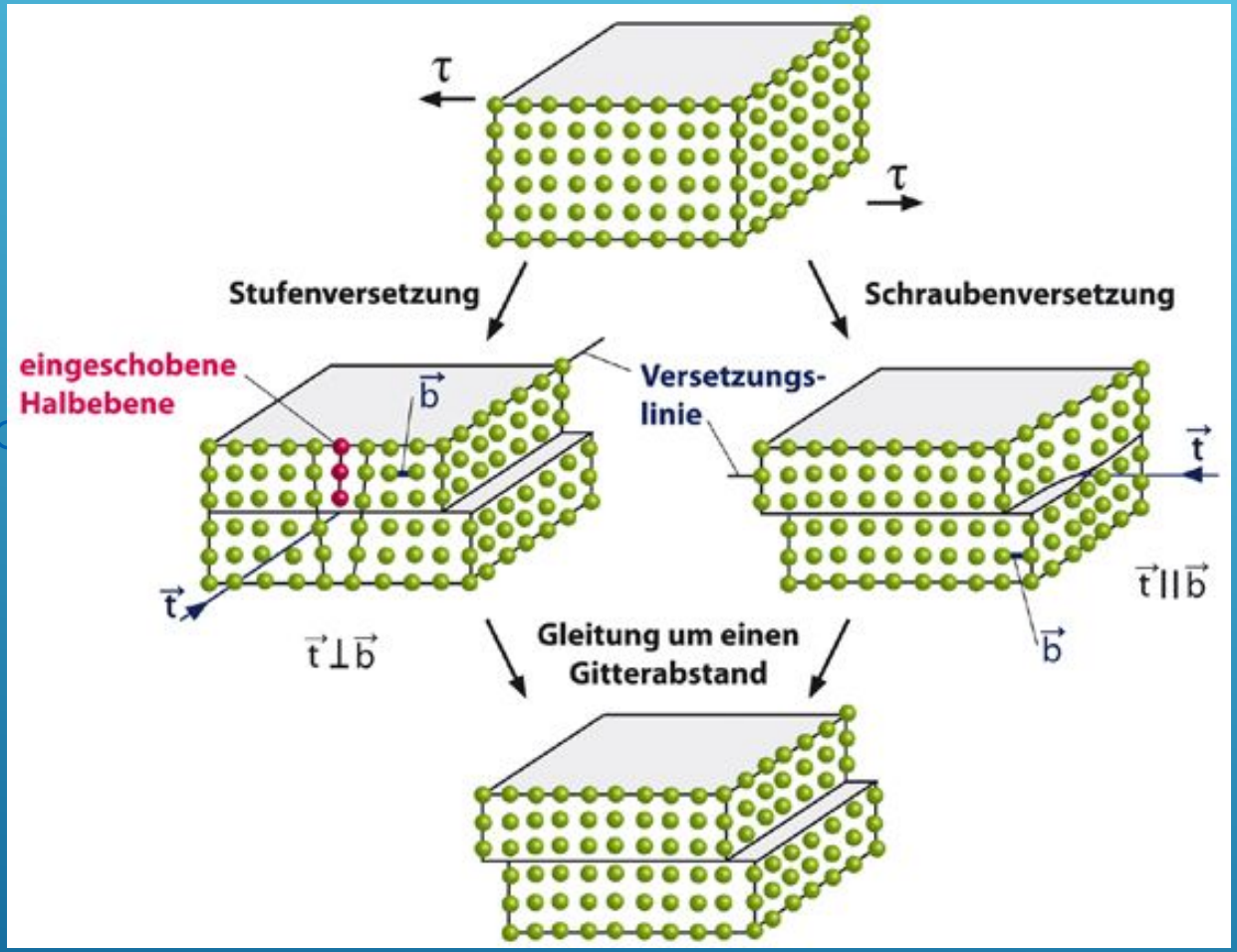
Figure 4.11

Definition of the Burgers vector, **b**, *relative to an edge dislocation. (a) In the perfect crystal, an m × n atomic step loop closes at the starting point. (b) In the region of a dislocation, the same loop does not close, and the closure vector* **(b)** *represents the magnitude of the structural defect. For the edge dislocation, the Burgers vector is* perpendicular *to the dislocation line.*

bei der Stufenversetzung steht der Burgersvektor senkrecht zur Versetzungslinie

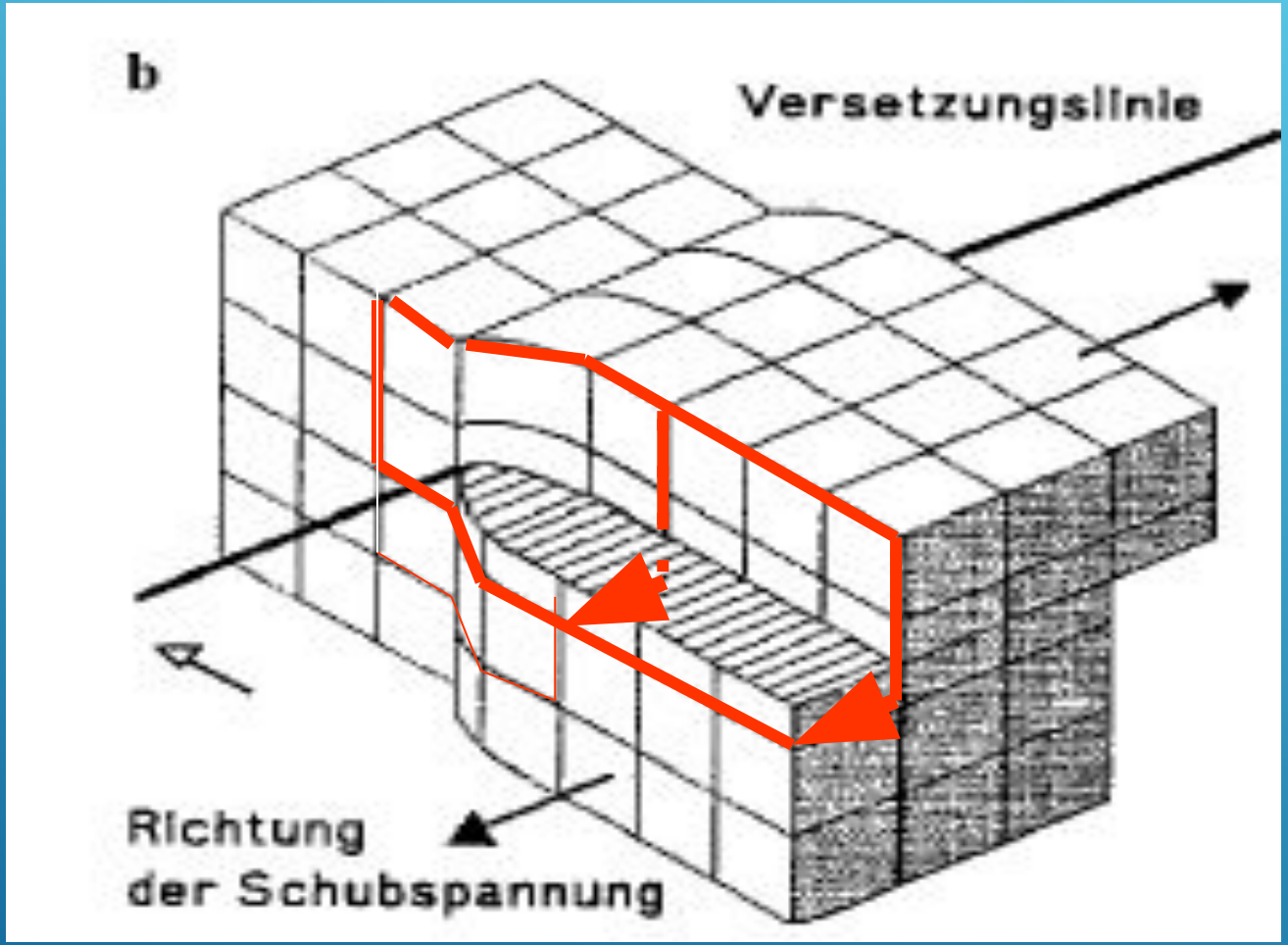
EIN-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – VERSETZUNGEN - SCHRAUBENVERSETZUNG

- Sc



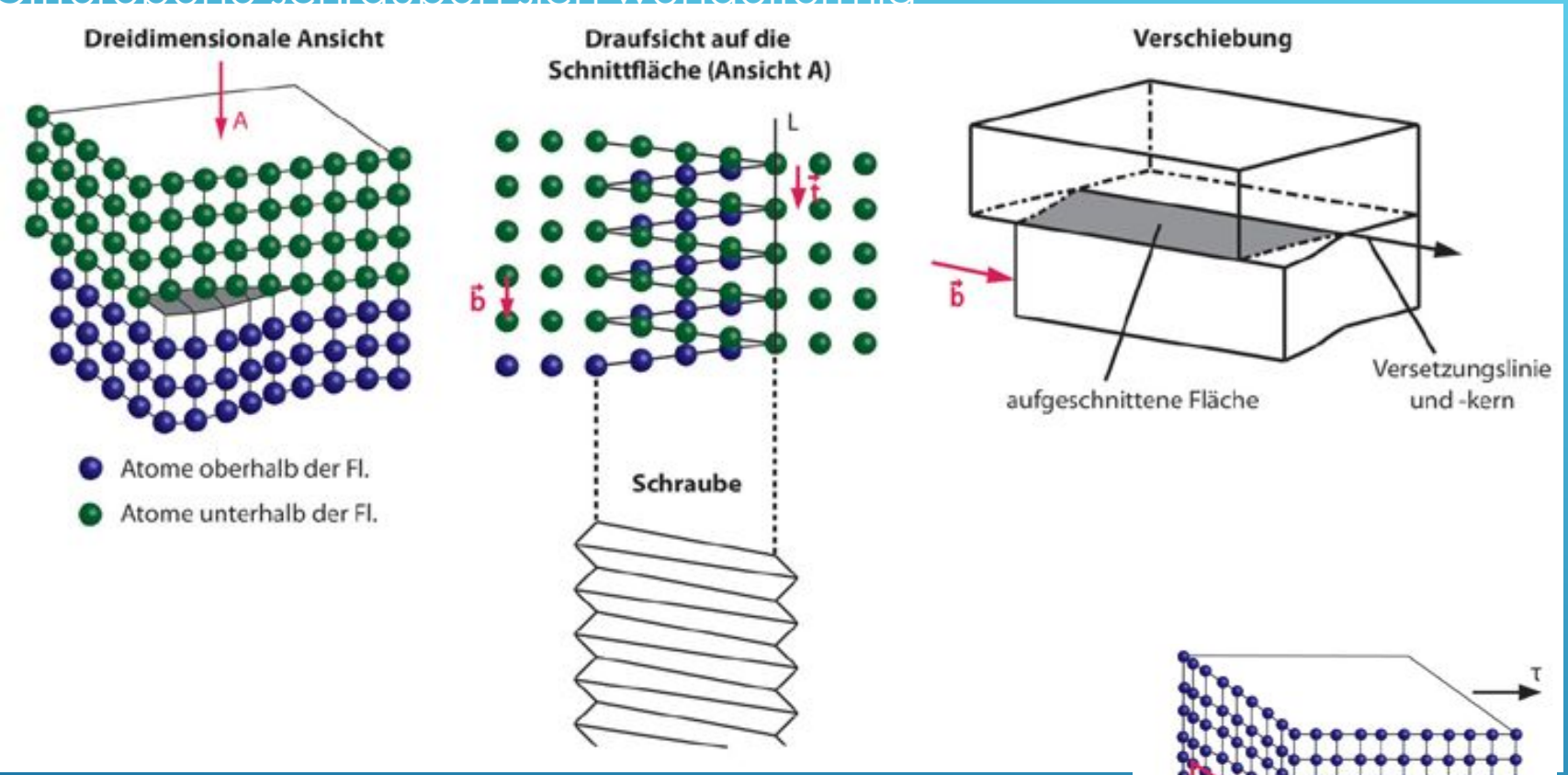
Zwischenschritte bei Versetzungs-bewegungen

Schraubenversetzung - 1-dimensionaler Fehler

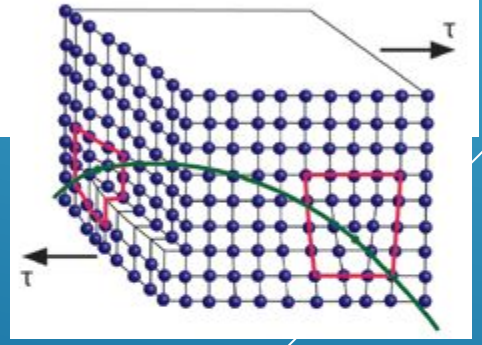


EIN-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – SCHRAUBENVERSETZUNG

- Gitterebene schrauben sich wendelförmig



- In Realität: gemischte Versetzungen, sowohl Stufen als auch Schraubenkomponente

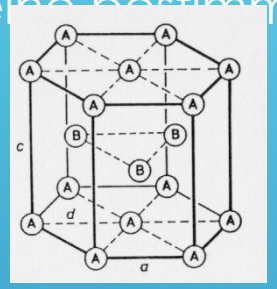


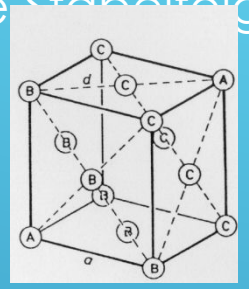
EIN-DIMENSIONALE GITTERFEHLER

- Ursprung von Versetzungen
  - Zufällige Missorientierung beim Wachstum von Kristallen
  - Ausscheiden von überschüssigen Leerstellen
  - Abbau von Spannungen durch Bildung von Versetzungen

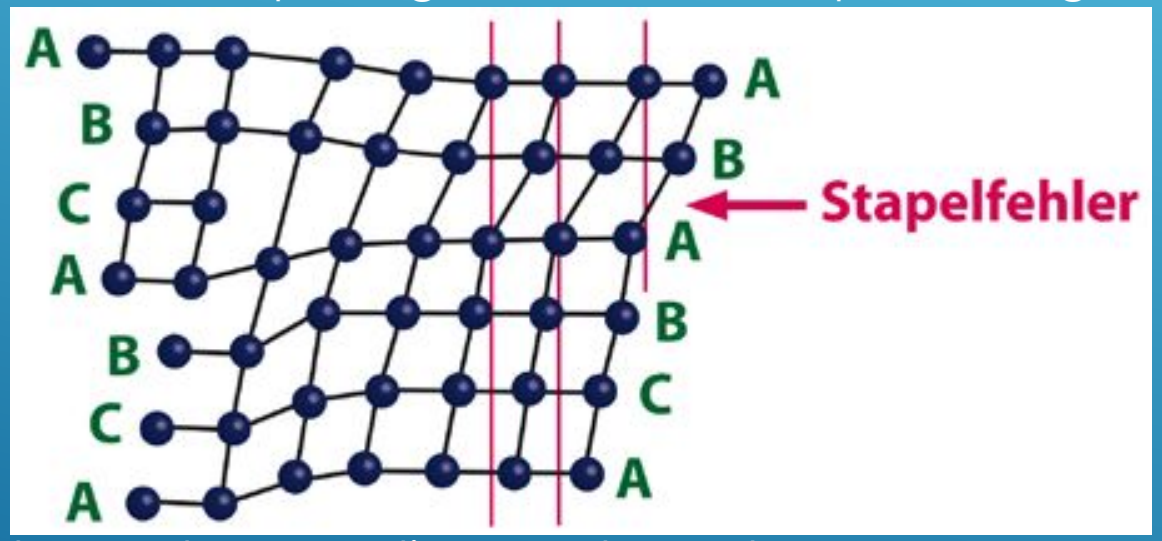
ZWEI-DIMENSIONALE GITTERFEHLER - STAPELFEHLER

- Der Aufbau der Kristallgitter lässt sich als eine bestimmte Stapelfolge von Gitterebenen denken
  - hdP Gitter: Stapelfolge ABABABABABA
  - kfZ Gitter: Stapelfolge ABCABCABCABC





- Störungen dieser Stapelfolge werden als Stapelfehler gezeichnet



- Stapelfehler erschweren die Versetzungsbewegungen

ZWEI-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – KORNGRENZEN UND PHASENGRENZFLÄCHEN

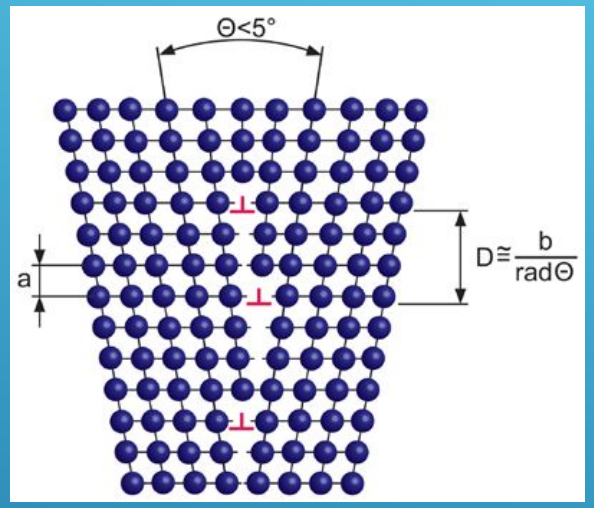
- Unter Korngrenze im engeren Sinn versteht man die Grenzfläche zwischen Kristallen einer Phase.

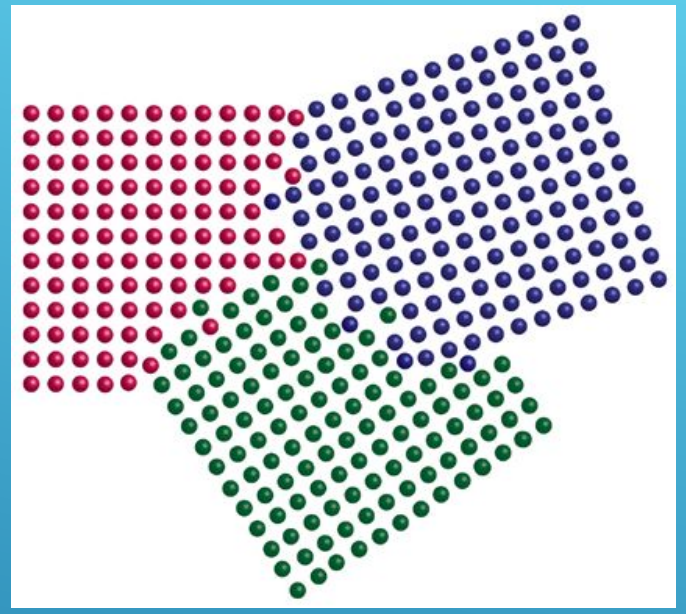
- Phasengrenzflächen oder Korngrenzen im weiteren Sinn sind Grenzflächen zwischen Phasen unterschiedlicher Struktur und Zusammensetzung.

- Die Korngrenzen werden nach der Hohe des Orientierungsunterschiedes eingeteilt:
  - Kleinwinkelkorngrenze (Subkorngrenze): Bei diesen weisen die Kristalle Orientierungsdifferenzen von bis zu 5° auf.
  - Großwinkelkorngrenze: für größere Abweichungen

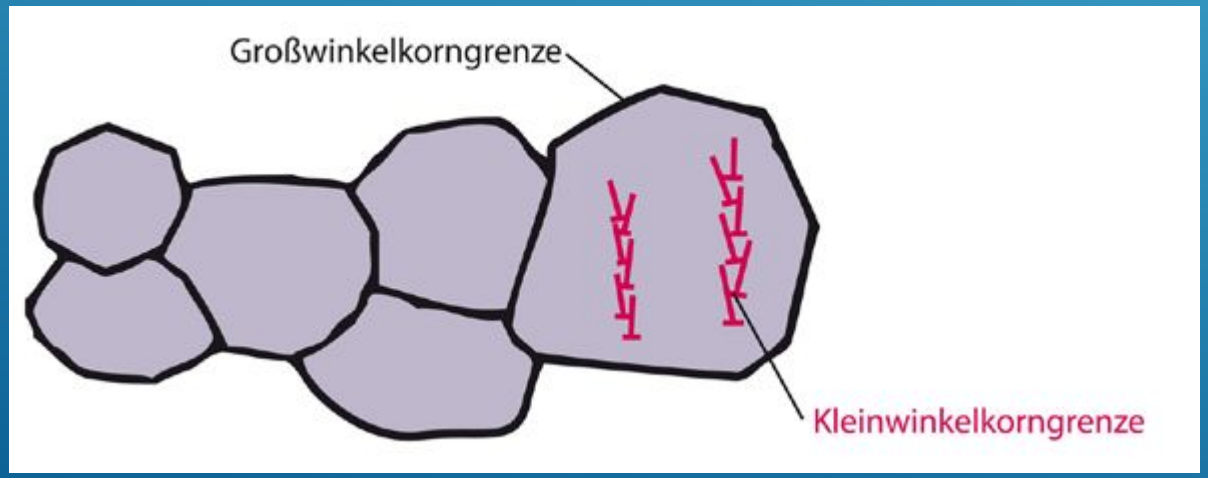
ZWEI-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – KORNGRENZEN UND PHASENGRENZFLÄCHEN

Aufbau einer Kleinwinkelkorngrenze





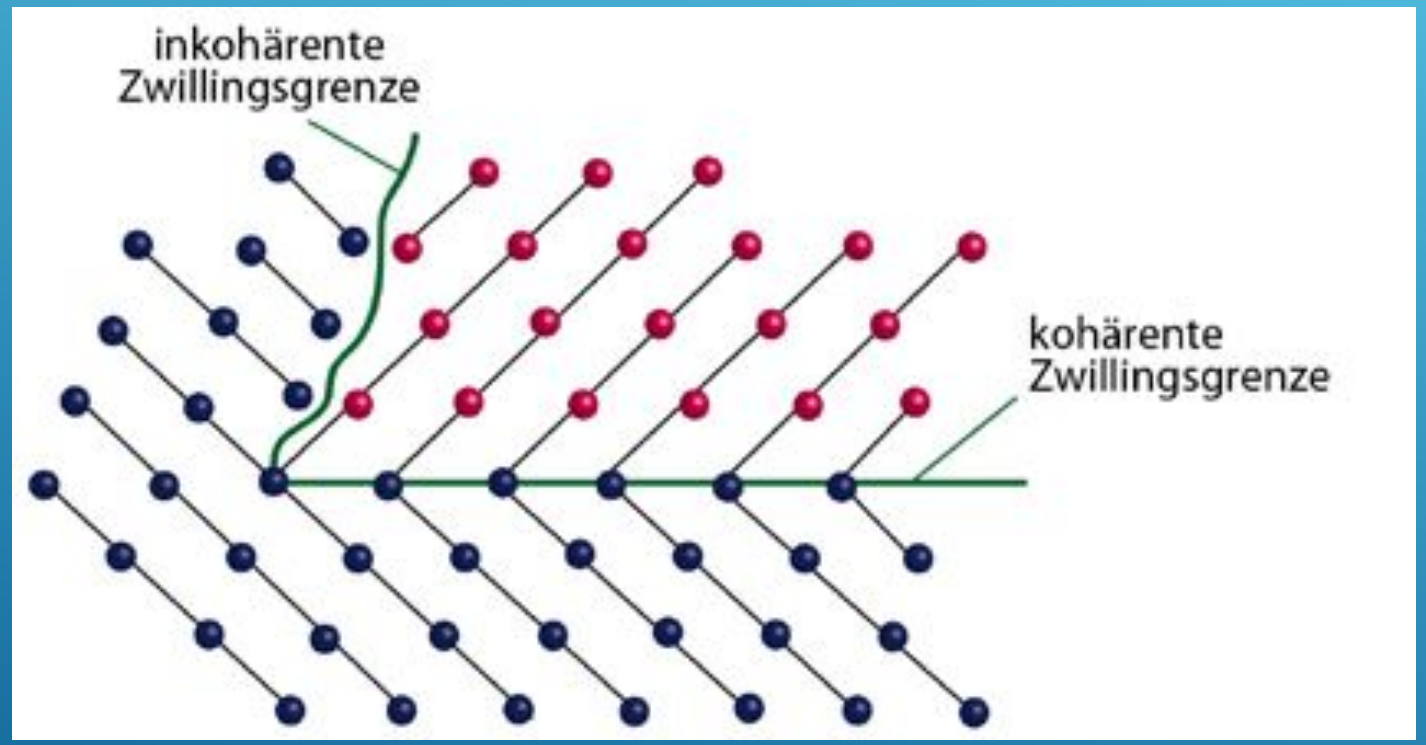
Aufbau einer Grosswinkelkorngrenze meist > 20°



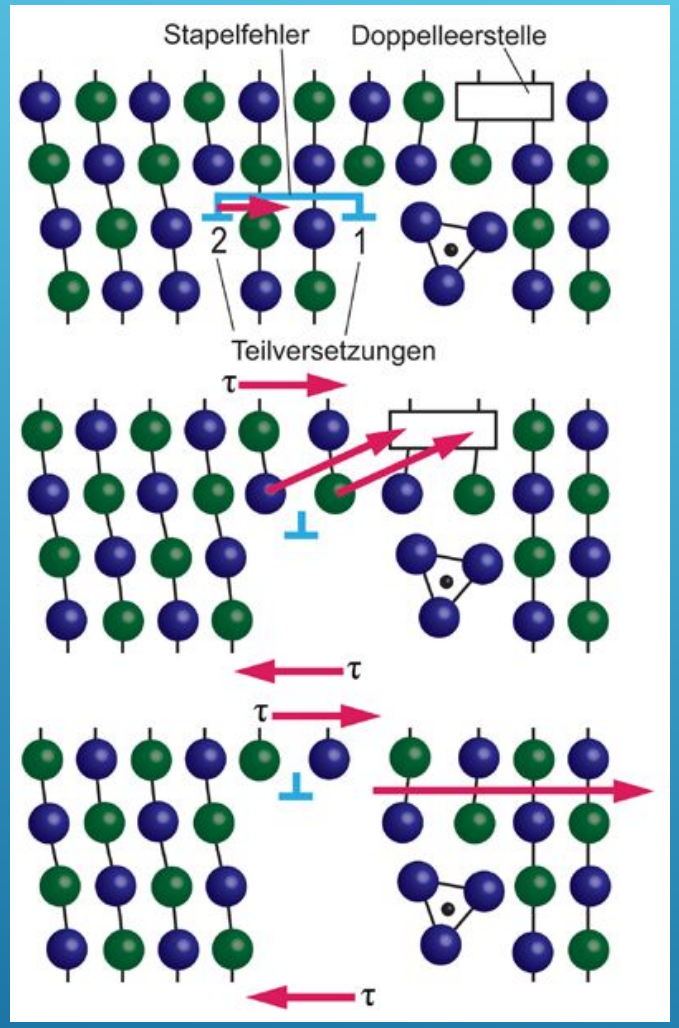
Korngrenzen im Gefügebild:
Die Kleinwinkelkorngrenzen sind nur im Elektronenmikroskop sichtbar.

ZWEI-DIMENSIONALE GITTERFEHLER – ZWILLINGSGRENZEN

- Zwillingskorngrenzen: wenn die Orientierung des einen Kristalls durch Spiegelung an einer Ebene in die Orientierung des andern übergeführt werden kann



0, 1 UND 2-DIMENSIONALE GITTERFEHLER



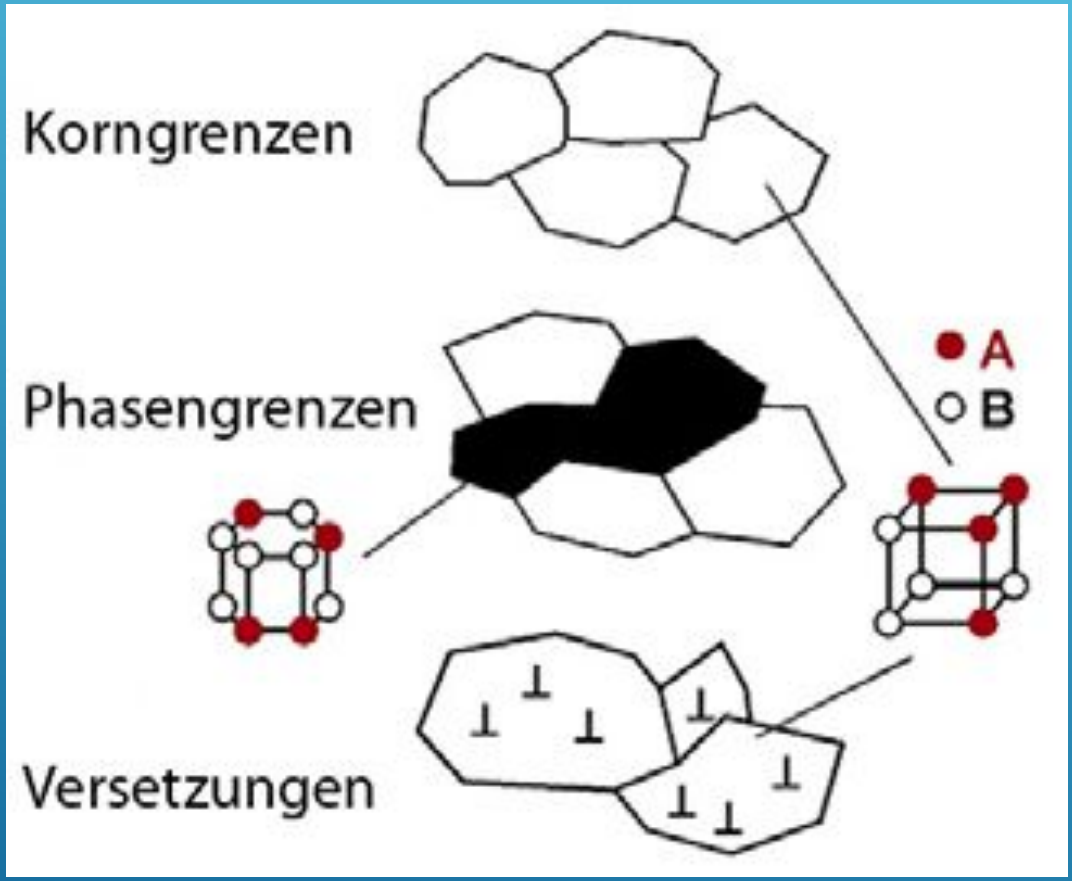
- Zusammenspiel von Versetzungsbewegungen, Leerstelle

METALLE – KRISTALLZUSTAND DER METALLE - LERNZIELE

- ✓ Das Raumgitter als Idealstruktur bestimmt viele Eigenschaften und Vorgänge von Werkstoffen.
- ✓ Charakterisierung durch Packungsdichte
- ✓ Beschreibung durch Millersche Indizes
- ✓ Zusammenhang zwischen Kristallanisotropie und Textur
- Der Gitterbaufehler als Realstruktur ist verantwortlich für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften.
- ✓ Definition von Leerstelle, Zwischengitteratom, Versetzung, Stapelfehler und Korngrenze
- ✓ Burgersvektor und Stapelfehlerenergie als Grundkenngrößen eines Festkörpers
- Unterschied zwischen Mischkristall und Kristallgemisch

GEFÜGE UND LEGIERUNGSSTRUKTUREN

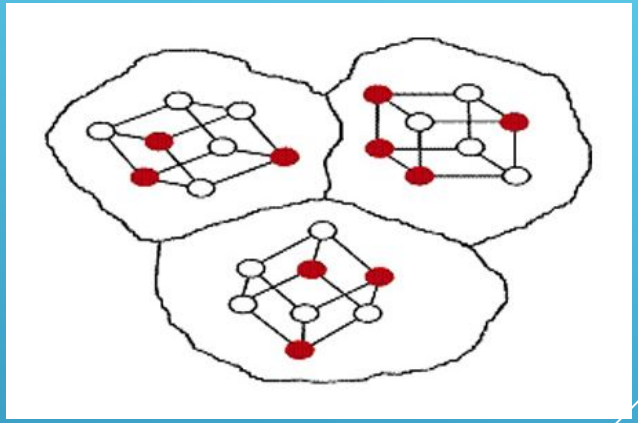
- Gefüge: Anordnung von Gitterbaufehler, die nicht im thermodynamischen Gleichgewicht sind: Korngrenzen, Phasengrenzen oder Versetzungen



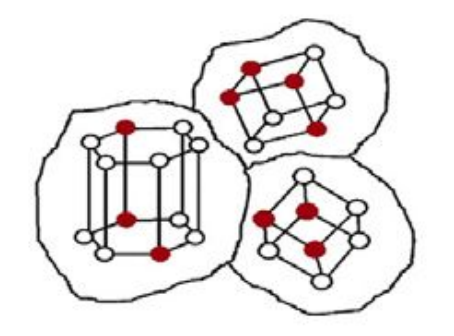
- Legierung: besteht aus Mischung eines Metalls mit einem oder mehrerer anderen Metallen oder Nichtmetallen.

GEFÜGE UND LEGIERUNGSSTRUKTUREN

- Beim Abkühlen können die Bestandteilen der Legierung
  - sich entmischen
  - sich entmischen teilweise
  - chemische Verbindungen bilden
  - sind vollständig mischbar.



- Mischkristall: Wenn ein Kristall nicht aus einer einzigen Atomart, sondern aus mehreren Atomarten besteht.
- Kristallgemisch: Ein Kristallgemisch besteht aus mindestens zwei verschiedenen Phasen, von denen jede für sich betrachtet entweder Mischkristalle oder reine Kristalle darstellt.

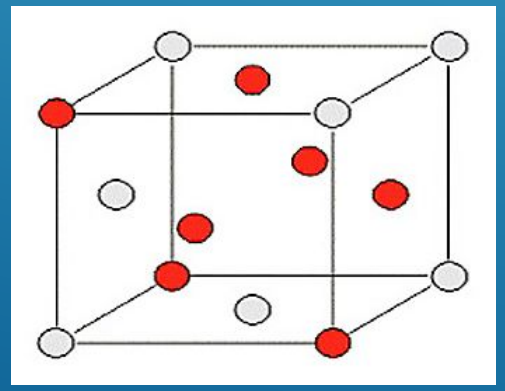


MISCHKRISTALLE

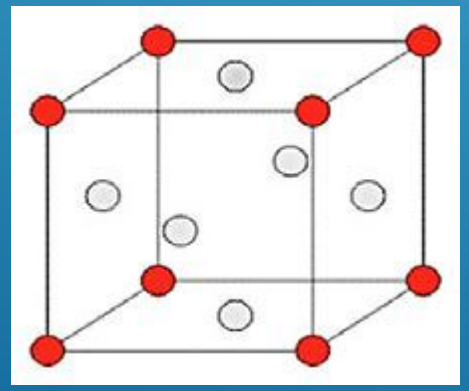
- Man unterscheidet zwischen 2 Arten von MK: je nachdem, ob das gelöste Atom
  - Auf einem regulärem Gitterplatz (Austausch-MK)
  - Oder auf einem Zwischengitterplatz (Einlagerung-MK)

eingebaut wurde.

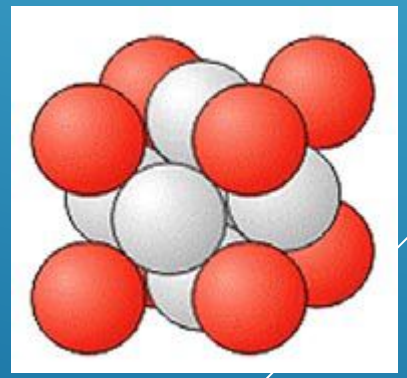
- Substitutions (Austausch-)Mischkristall
  - Die Fremdatome sitzen auf Gitterplätzen



unregelmäßig



regelmäßig

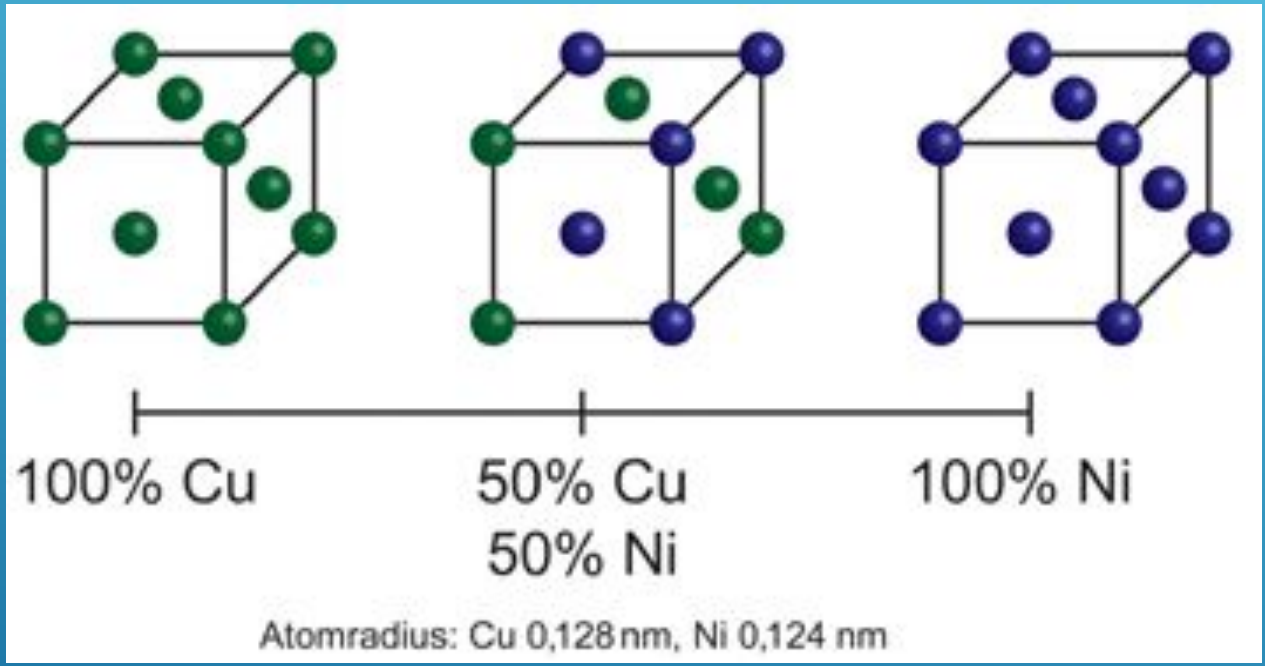


Überstruktur

AUSTAUSCH-MISCHKRISTALLE

- Lückenlose Mischkristalle Reihe:

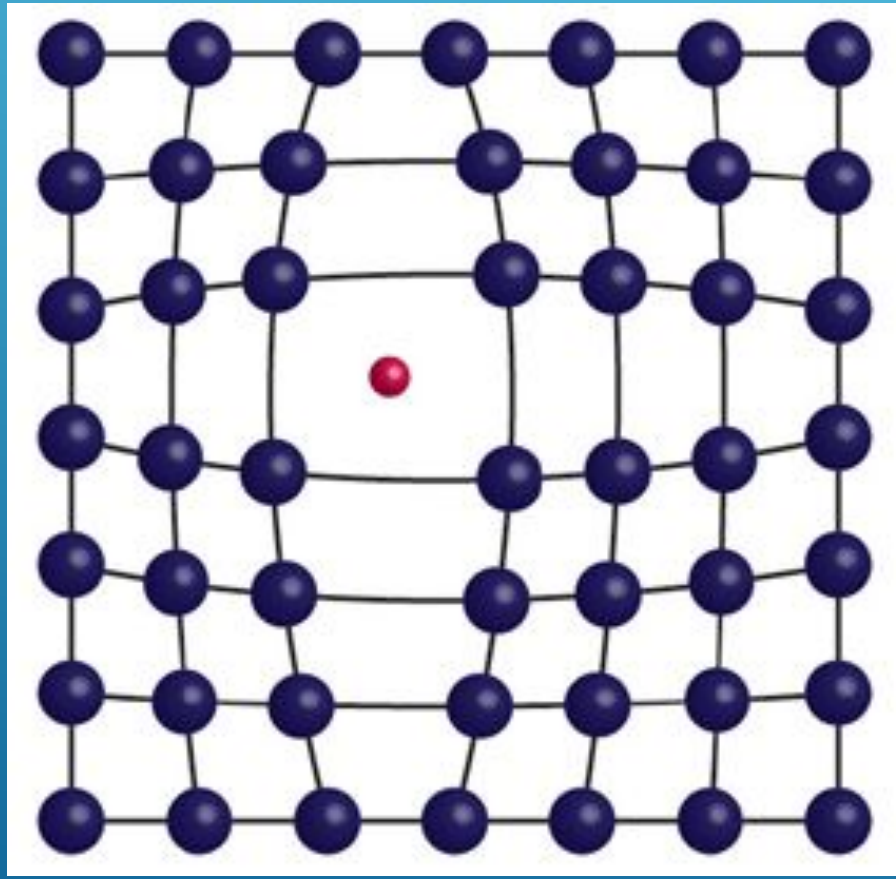
  Meistens tritt nur eine beschränkte Löslichkeit auf. Aber unter bestimmten Bedingungen ist auch eine unbeschränkte Löslichkeit möglich



- Bedingungen für eine lückenlose Mischkristallreihe
  -
  -
  -

EINLAGERUNGS-MISCHKRISTALL

- Die Fremdatome sitzen auf Zwischengitterplätzen
- Bedingung: Sind Legierungsatome (Radius r_1) im Verhältnis zum Atomradius r_2 des Grundmetalles kleiner 0.58, so können sie in die im Gitter des Grundmetalles noch vorhandenen Zwischenräume eingelagert werden.
- N, O, C, H-Atome sind dafür besonders geeignet.



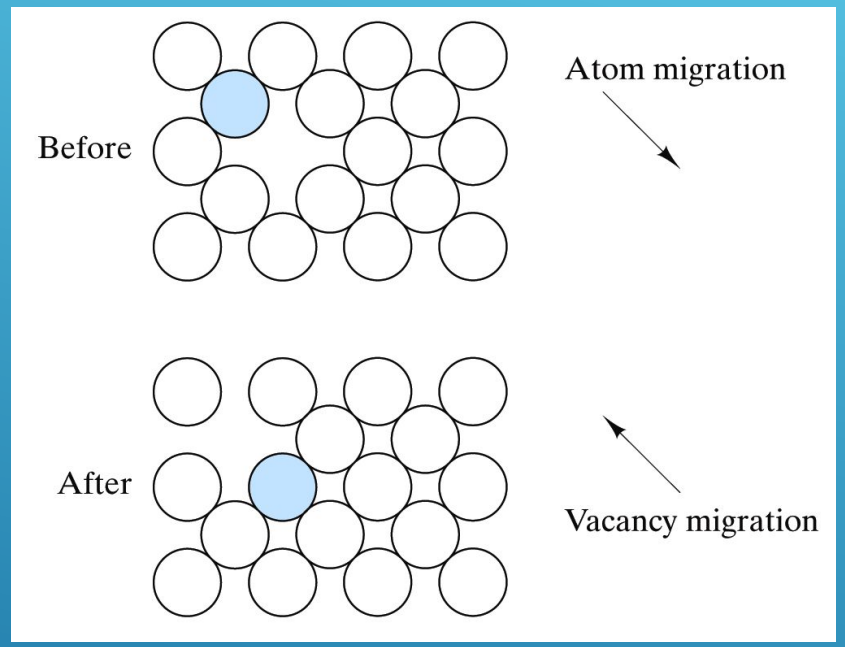
Strukturen und technischen Eigenschaften

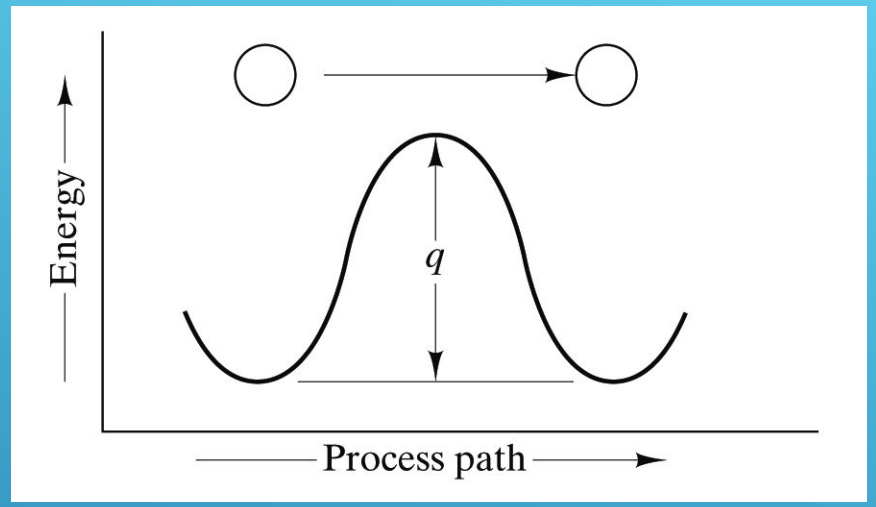
- Allgemeines: Die physikalische und technische Eigenschaften sind sowohl vom
  - Grundgitter
  - Art, Anzahl der Anordnung der Gitterfehler
  - Und Gitterfremde Bausteine

bestimmt.

- Physikalische Eigenschaften die vom Gitterstruktur und Fehlordnung beeinflusst sind:
  - Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme
  - Wärmedehnung
  - Verformbarkeit (Fliessverhalten)
  - Festigkeitseigenschaften
  - Diffusionsvorgänge

DIFFUSION – ENERGETISCHE BETRACHTUNG

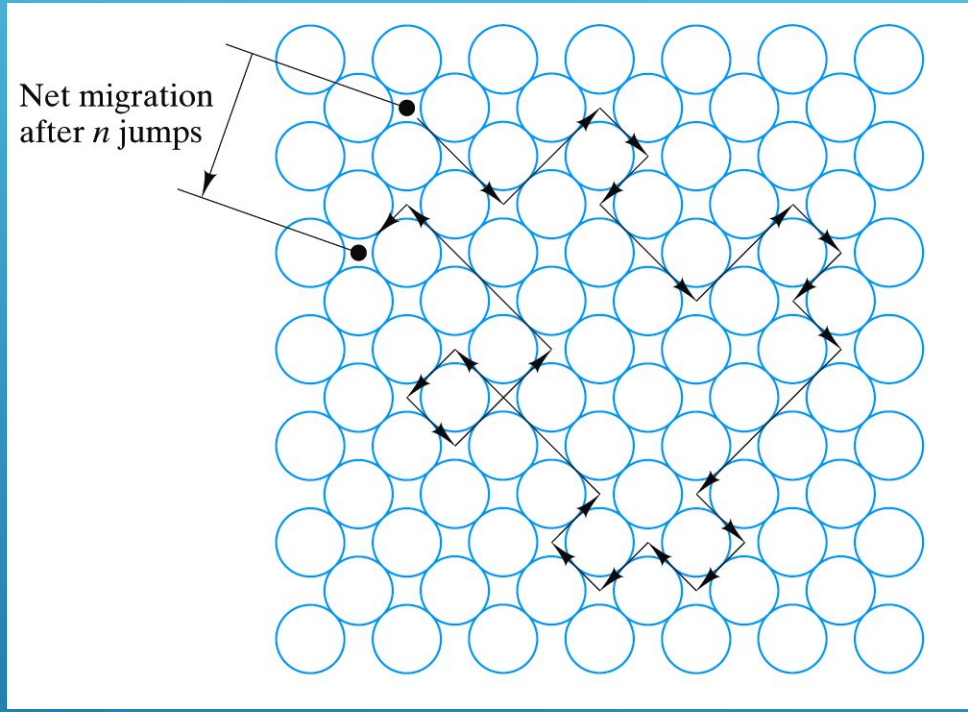




- Diffusion eines (Fremd)atoms bzw. einer Leerstelle
- Diffusion erfordert die Überwindung einer Energiebarriere mittels thermischer Anregung
- auch die **Diffusionswahrscheinlichkeit** folgt einer **Arrheniusgleichung**:

  $p = A \times \exp(-E/kT)$

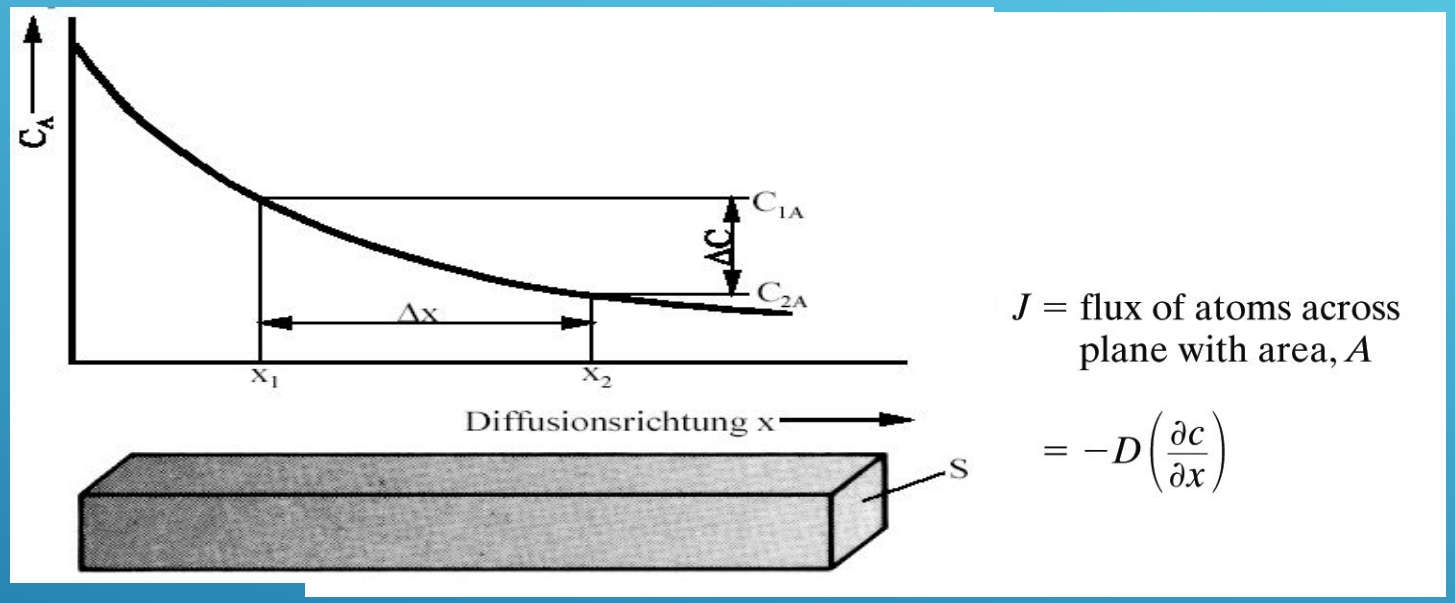
DIFFUSION – BEWEGUNG IM GITTER



Diffusion

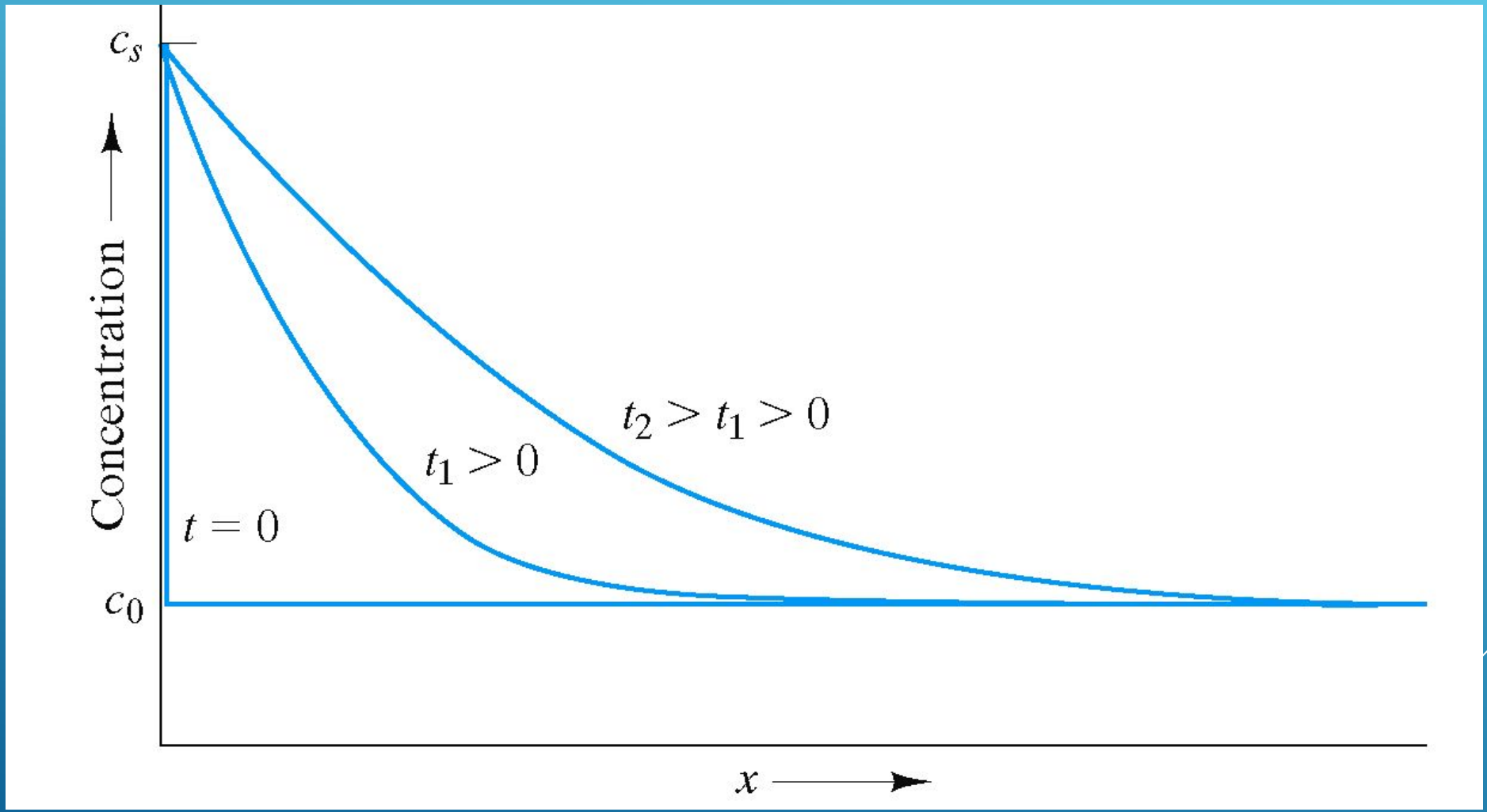
- die thermische Anregung bestimmt die Häufigkeit der Diffusionsschritte
- die Richtung der Diffusionsschritte ist willkürlich

DIFFUSION – FICK´SCHES GESETZ



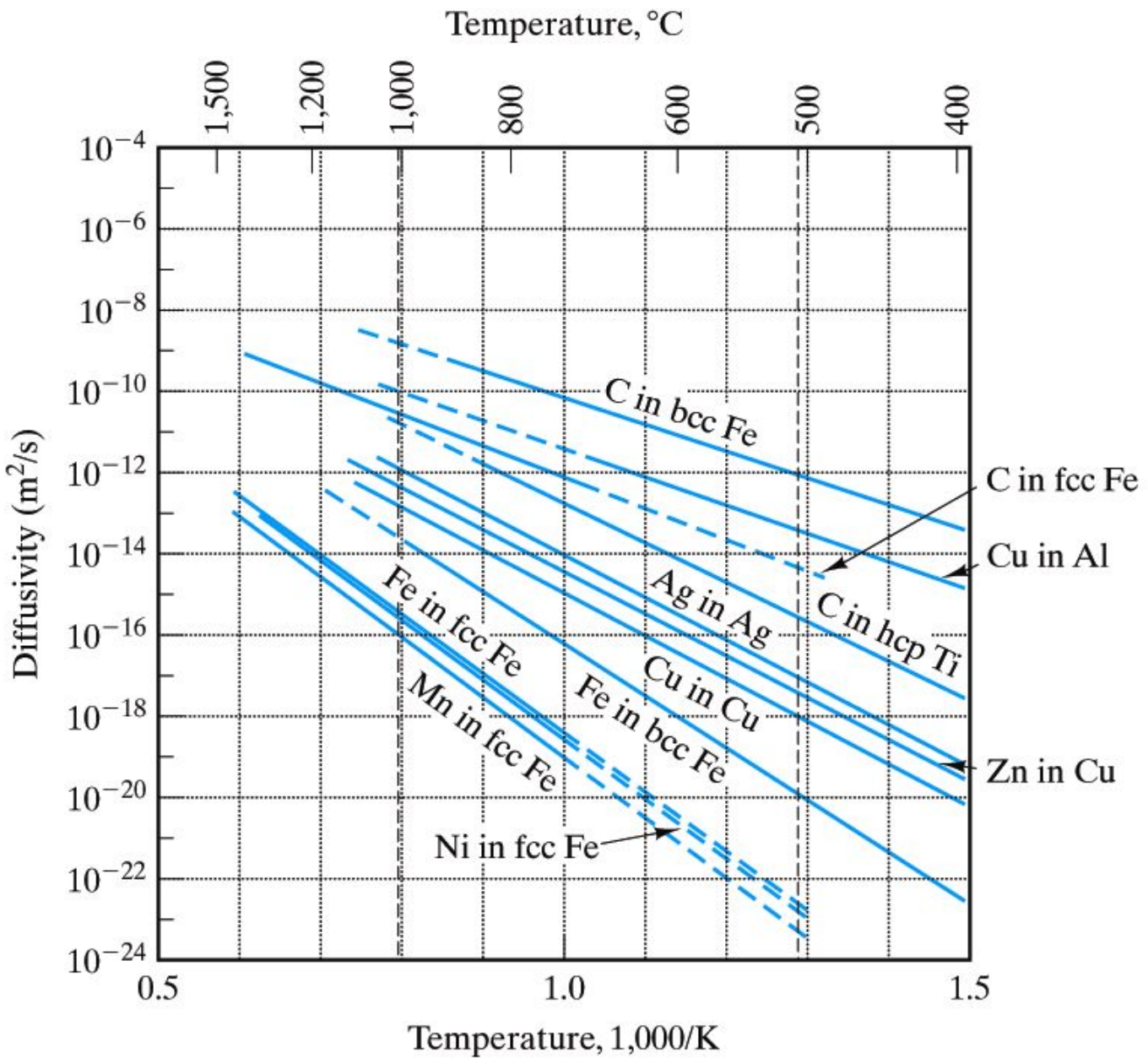
- J: Stofffluss durch Diffusion -Teilchenfluss
- D: Temperaturabhängige Diffusionskonstante
- $\partial c / \partial x$: Gradient der Konzentration senkrecht zur Fläche

DIFFUSION – FICK´SCHES GESETZ

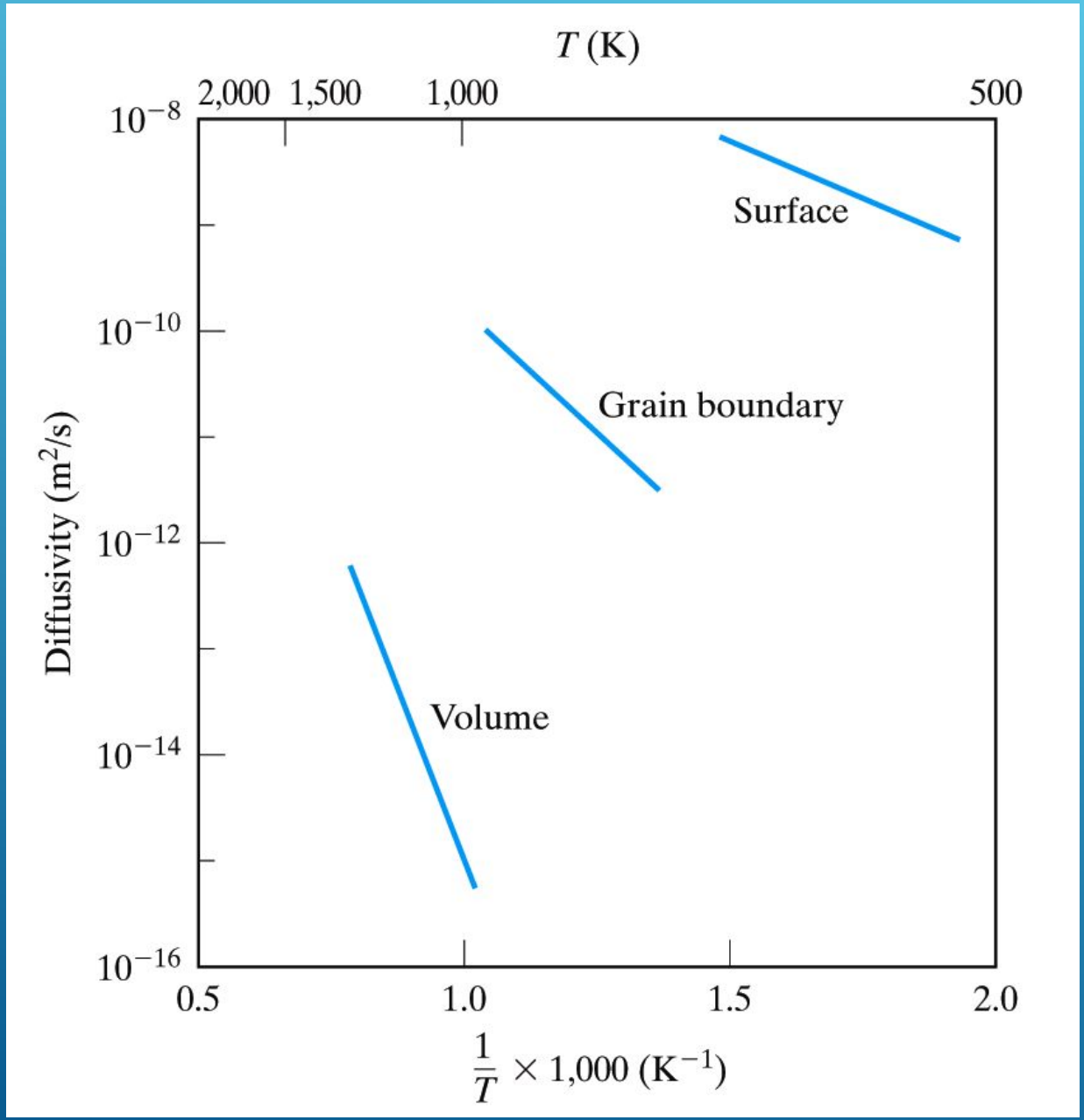


DIFFUSIONSKONSTANTEN

Darstellung der Diffusionskonstante D für verschiedene metallische Systeme



ABHÄNGIGKEIT DER DIFFUSION VON DER DIMENSION



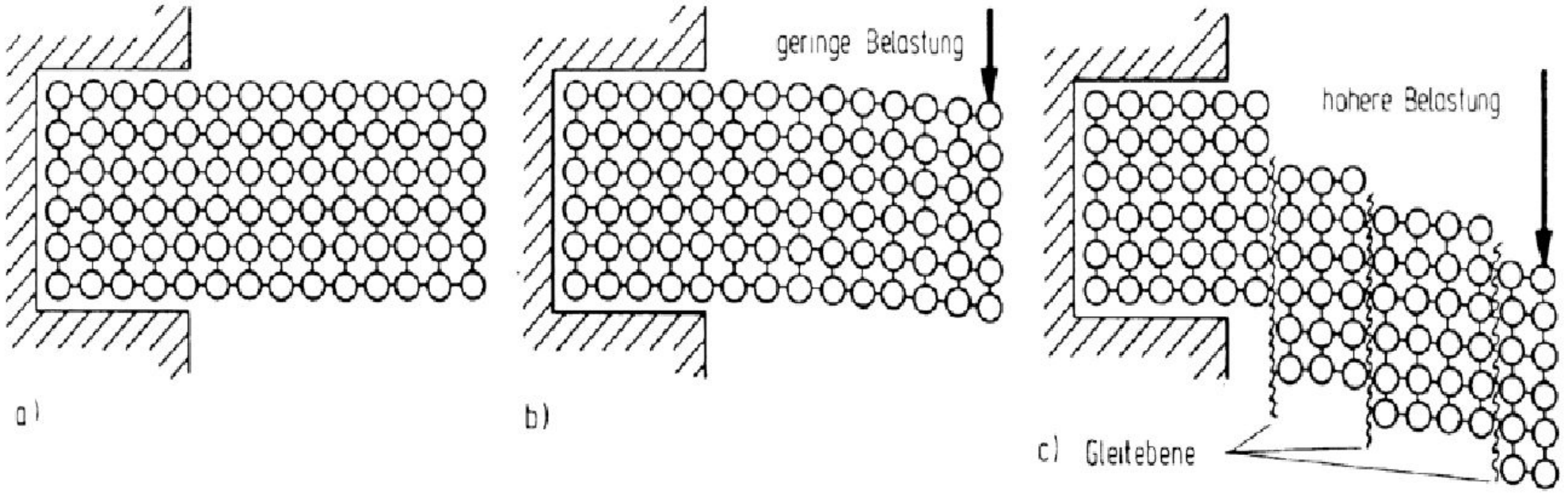
an Korngrenzen schreitet die Diffusion schneller voran als im Vollmaterial

Fliesseigenschaften des Kristalls

- plastische Verformbarkeit der Metall ⇔ Versetzungen in bevorzugten Gleitebenen ermöglicht!
- Gleitebenen und Gleitrichtungen ermöglichen das Fließen.
- Gitterdeformationen (Gitterdefekte und Fremdatome) blockieren die Bewegung der Versetzungen, sie verhindern die Ausbildung von Gleitebenen

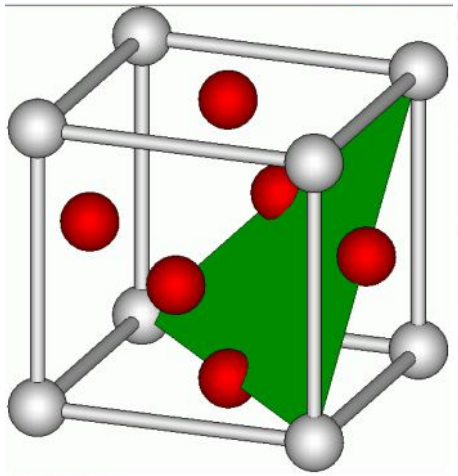
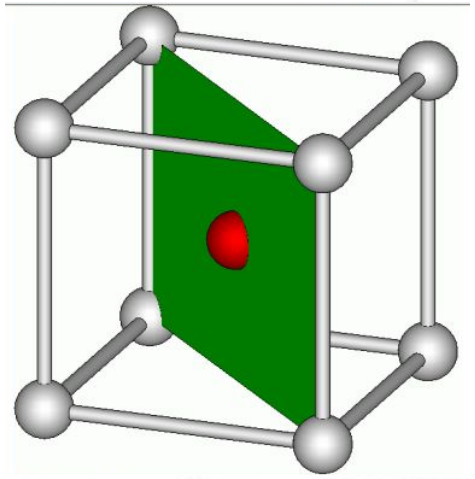
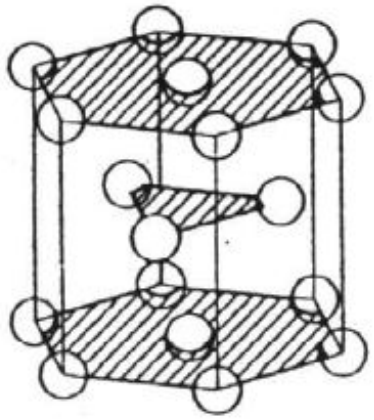
=> Mindestspannung zur Auslösung des Fliessvorganges

Metallverformung beispielhaft anhand eines Biegebalkens



a) unverformt	b) elastisch verformt	c) elastisch und plastisch verformt
regelmäßiges Gitter	Winkeländerung reversible Abstandsänderung	zusätzlich: irreversible Gleitung durch Versetzungsbewegung

Gleitebenen von Metallen

	Gitter		
	kubisch		
	flächenzentiert	raumzentiert	hexagonal
E-Zelle und Gleitebenen			
Gleitebenen	4	4 [1]	1
Gleitmöglichkeiten	12	8	3
Kaltformbarkeit	sehr gut	gut	gering
Metalle	Al, γ-Fe, Cu, Pb	α-Fe, Cr, Mo, V	Mg, Zn, Ti

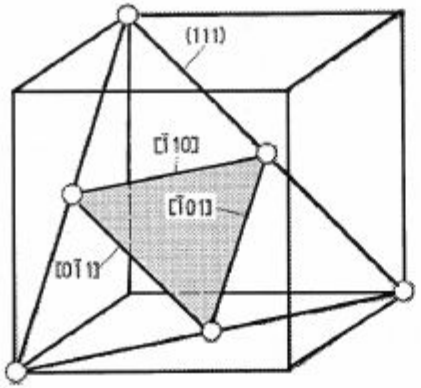
1) Gleitebenen sind die Flächen, welche die Raumdiagonale enthalten, zusätzlich also noch die auf den schraffierten Ebenen senkrecht stehenden. Jede Ebene hat 2 Gleitrichtungen in den Raumdiagonalen

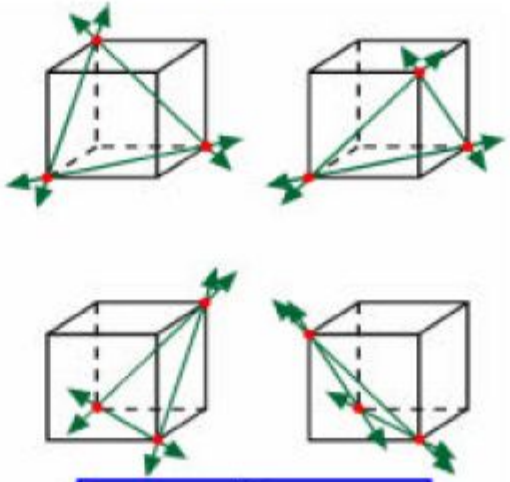
6.Mechanische Eigenschaften

6.3. Plastische Verformung

Gleitsysteme: Gleitebene + Gleitrichtungen

kfz-Gitter





{111}-Gleitebene

<110>-Gleitrichtung

12 {111}<110>-Gleitsysteme

kfz			
4E (111)	x	3R [110]	= 12

6.Mechanische Eigenschaften

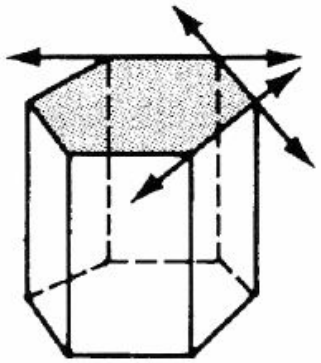
6.3. Plastische Verformung

Gleitsysteme in hcp-Struktur

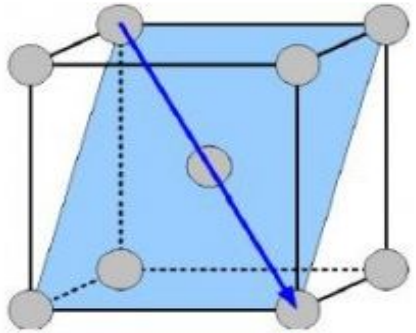
(0001)-Gleitebene

<1120>-Gleitrichtung

3 (0001)<1120>-Gleitsysteme



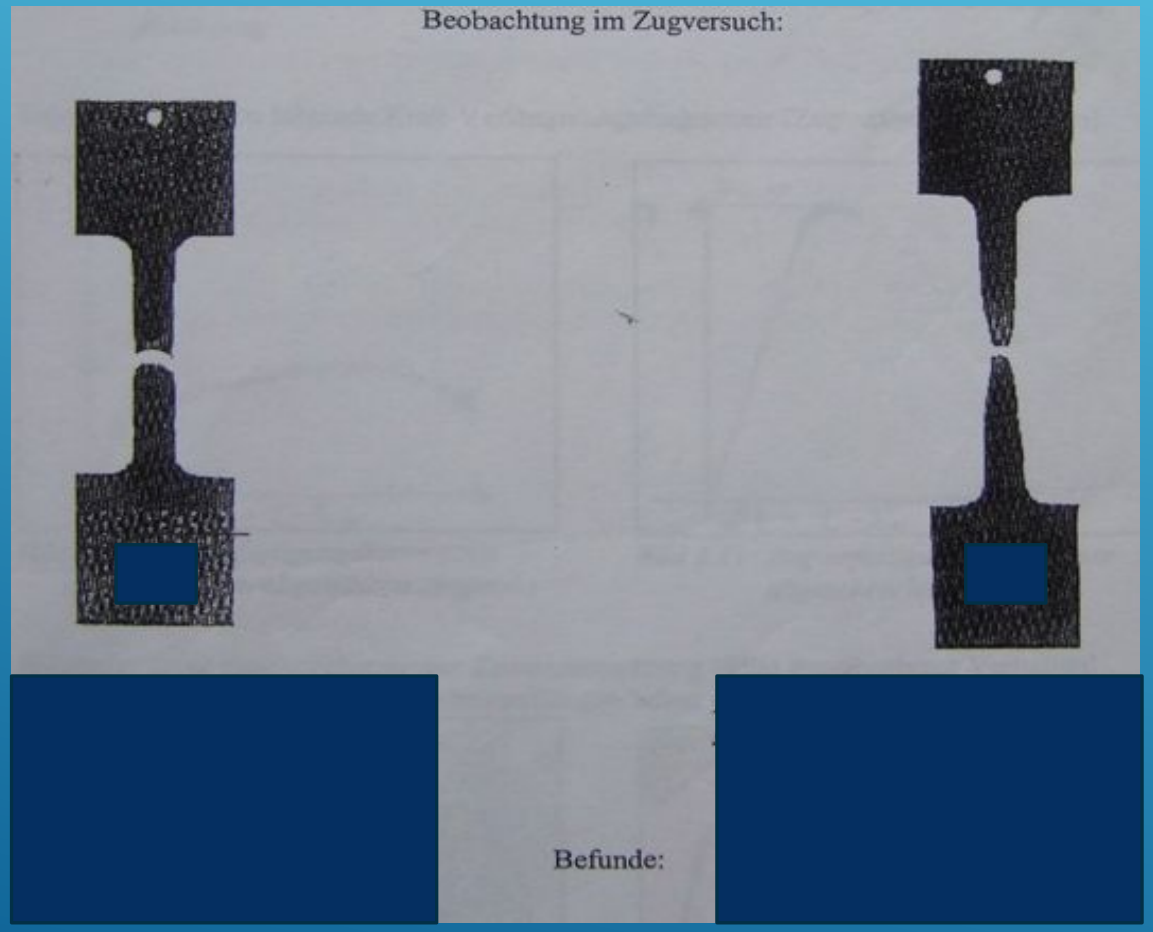
nur für dichtest gepackte hexagonale Kristalle oder hexagonale Kristalle mit Achsenverhältnis c/a ≥ 1,63



Und nun ist es noch wichtig, dass E
Vorzeichen unterscheiden, zu einer
je Kristallgitter angegeben wird (s.o
nicht auf der Ebene liegt.. dieser gel

Übungen: Einfluss auf der mechansiche Eigenschaften

- 2 Zugstäbchen: 1 Alu (kfz) und 1 Mg (hex.)
- Frage: Zugversuch (s.u.) - Ordnen den Stab nach Material.



Übungen: Einfluss auf der mech. Eigenschaften

Beobachtung im Zugversuch:

Bild 1.6: Ergebnis eines Zugversuches mit einer Mg-Probe

Bild 1.7: Ergebnis eines Zugversuches mit einer Al-Probe

Befunde:

Magnesium ist relativ spröde

Aluminium ist relativ duktil

- Legierung
- Abkühlungskurve
- Zustandsdiagramm
  - vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand
  - vollständige Löslichkeit im flüssigen und vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand
  - vollständige Löslichkeit im flüssigen und teilweise Löslichkeit im festen Zustand
- Legierungseigenschaften
- Materietransport und Umwandlung im festen Zustand
- Ausscheidungsbildung
- Erholung und Rekristallisation

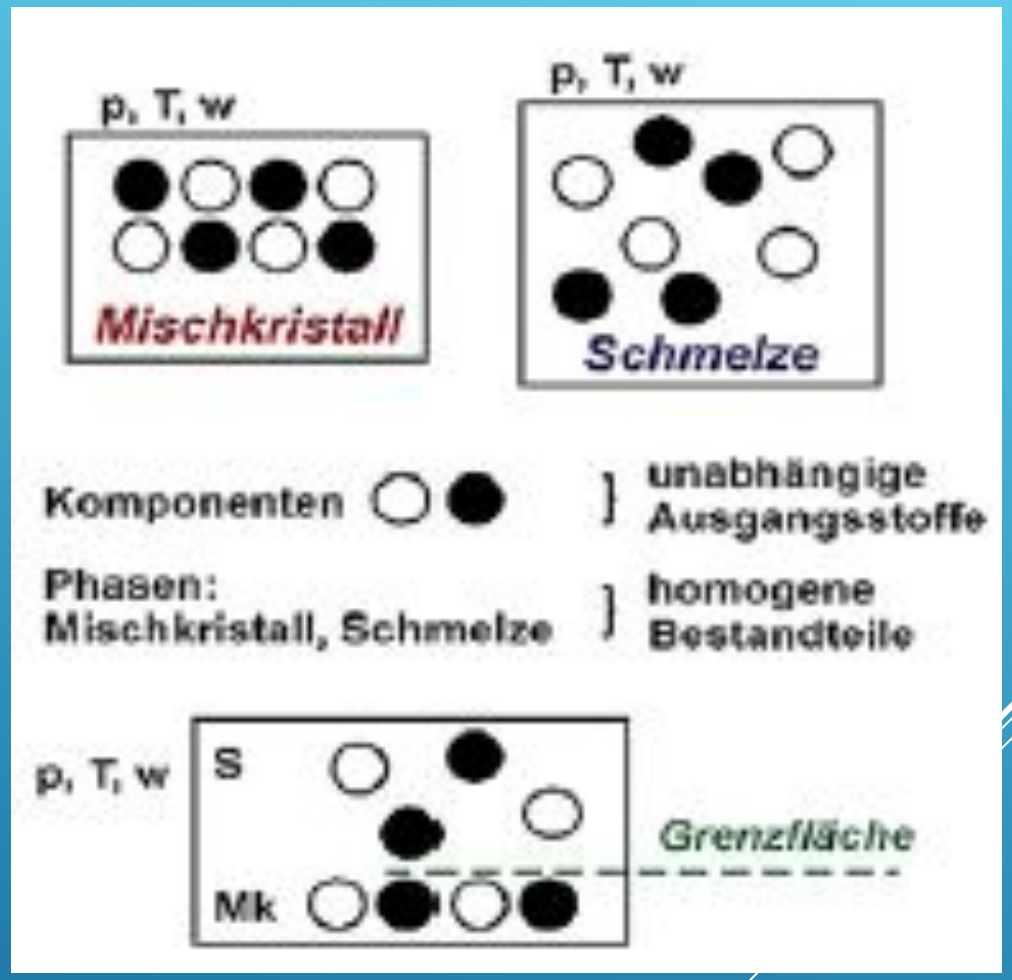
INHALT

Legierungskunde – Zustandsdiagramme - Lernziel

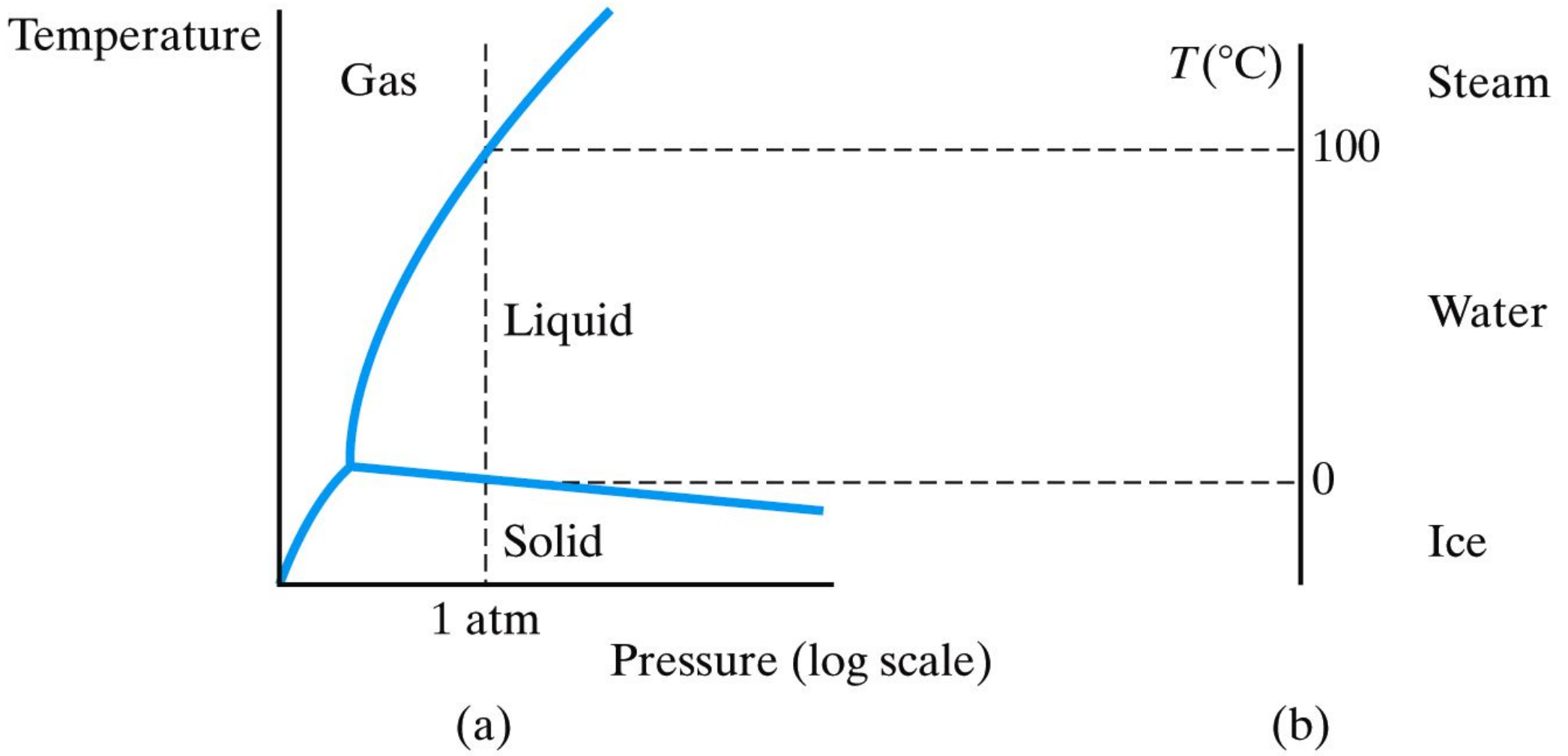
- Bestimmung des Komponentengehalts der Phasen in Zweistoffsystemen mit Ein-, Zwei- und Dreiphasenräumen mithilfe des Hebelgesetzes und des Gesetzes der wechselnden Phasenzahl
- Erkennen und Zeichnen typischer Gefüge (z. B. eutektisch, peritektisch)
- Aufstellen von Mengendiagrammen
- Anwendung auf das Fe-Fe3C-Diagramm

MEHRPHASIGE WERKSTOFFE - DEFINITIONEN

- Komponenten: sind die verschiedenen chemischen Elemente, aus denen das System bzw. die Legierung zusammengesetzt ist.
- Phasen: bezeichnen die einzelnen homogenen Bestandteile des Systems.
- Gleichgewichtzustand: herrscht dann, wenn bei konstanten p, T, w, sich die Anzahl , die Art und das Mengenverhältnis der vorhandenen Phasen auch nach beliebig langer Zeit nicht ändert.

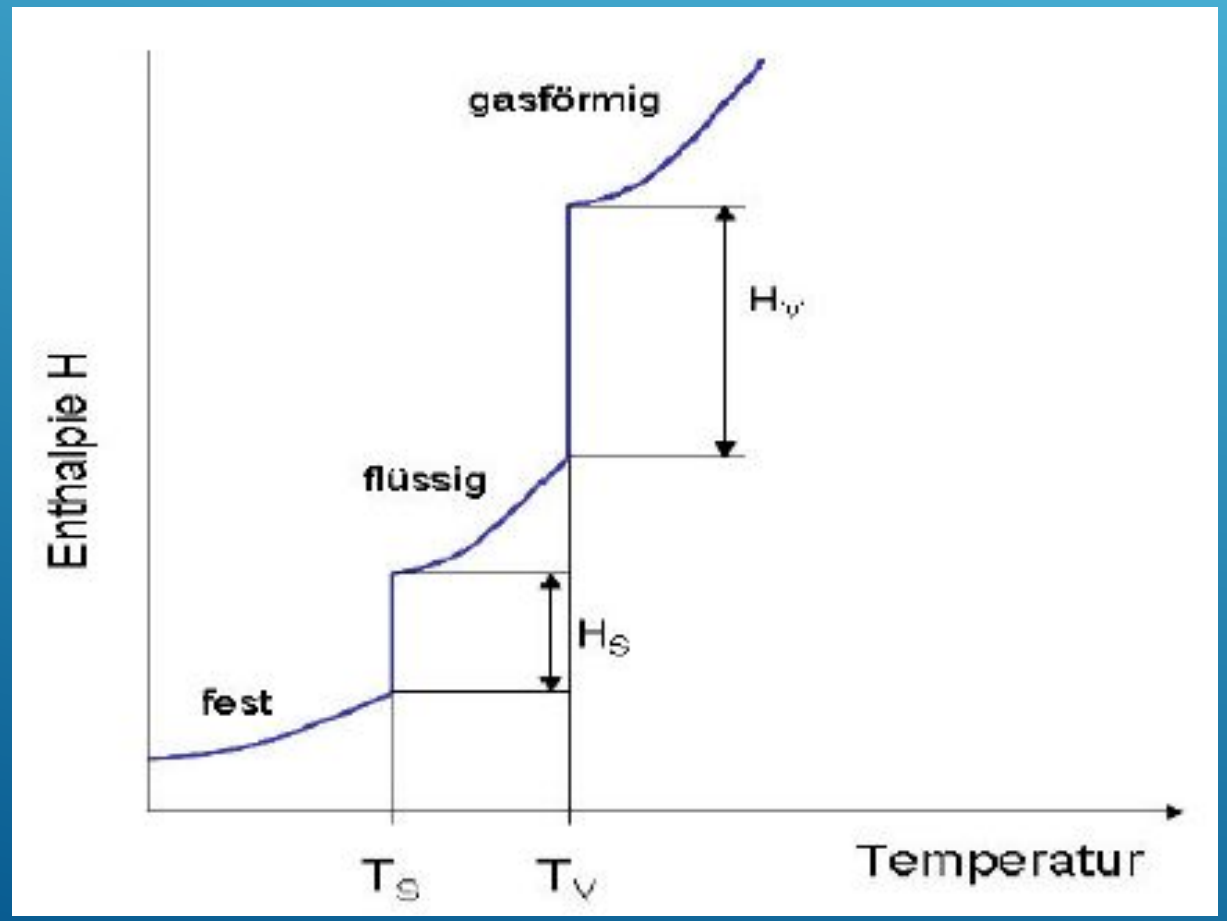


PHASENUMWANDLUNGEN – BEISPIEL EIS/WASSER/DAMPF



GRUNDLAGEN -THERMODYNAMIK

- Enthalpie: Wärmeinhalt eines stofflichen Systems bei konstantem Druck.
- Hs: Wärmeinhalt zum Erstarren (Schmelzen)
- Hv: Wärmeinhalt zum Kondensieren (Verdampfen)



ENERGIE EINES WERKSTOFFSYSTEMS

- Gesamtenergieinhalt E eines Systems
  - $E = E_{pot} + E_{kin} + E_{ch} + E_{th}$
- Im System gespeicherten ΔE bei zugeführtem ΔH:
  - $\Delta E = \Delta H - A$ mit $\Delta E = E_{ch} + E_{th}$
- Erfolgt die Zustandsänderung eines Werkstoffs @ p = konstant, nennt man
  - die aus der Umgebung zugeführte Energie: Enthalpie ΔH
  - die im System gespeicherte Energie: freie Enthalpie ΔG
    - $\Delta G = \Delta H - A$
- Mit $A = \Delta Q \sim T$
- So ist $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$

Ein Werkstoff ist dann im thermodynamischen ΔG, wenn seine frei Enthalpie gegenüber benachbarten Zuständen minimal ist ($\Delta G \leq 0$)

KONSTRUKTION EIN T-W DIAGRAMMES

- Tangentenbedingung:

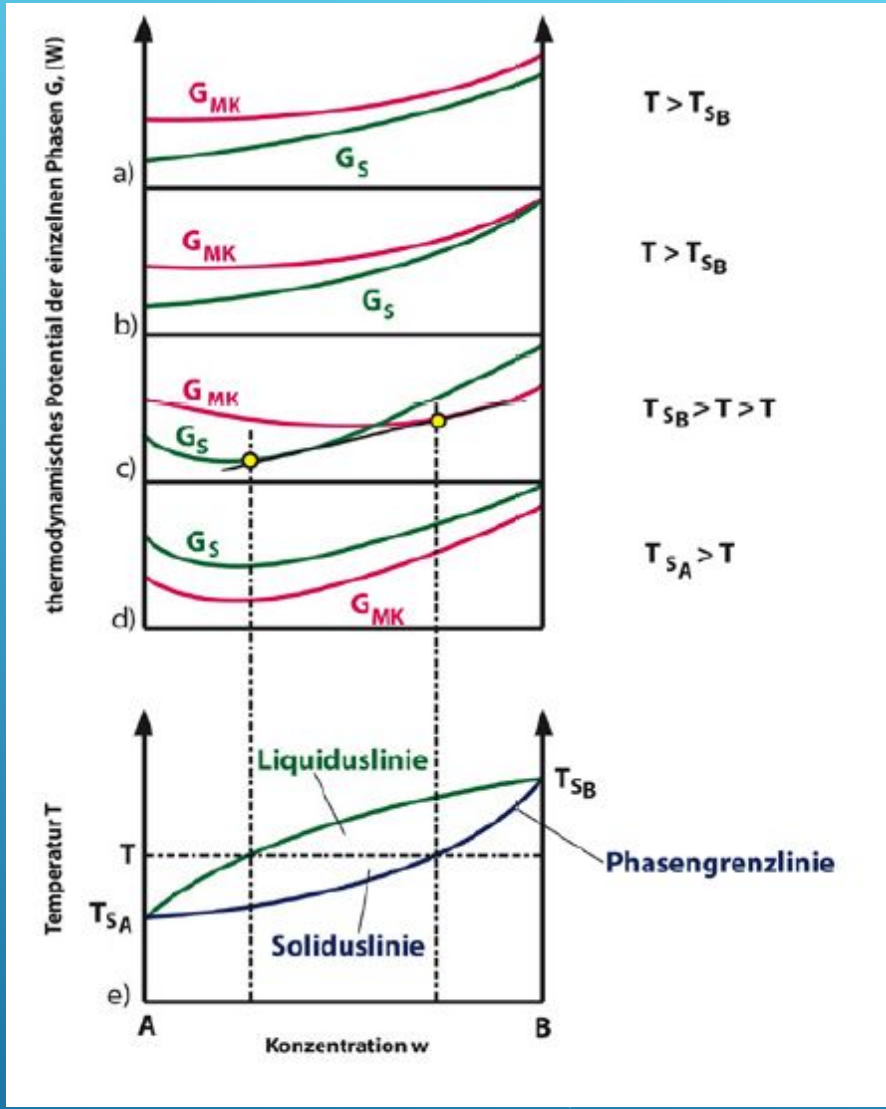
Die Komponente A wird so lange aus der Phase S in die Mk übergehen oder umgekehrt,

bis die auf die Änderung des

Komponentengehaltes bezogene

Änderung der freien Enthalpie gleich ist:

$$\frac{dG_s}{dw} = \frac{dG_{Mk}}{dw}$$



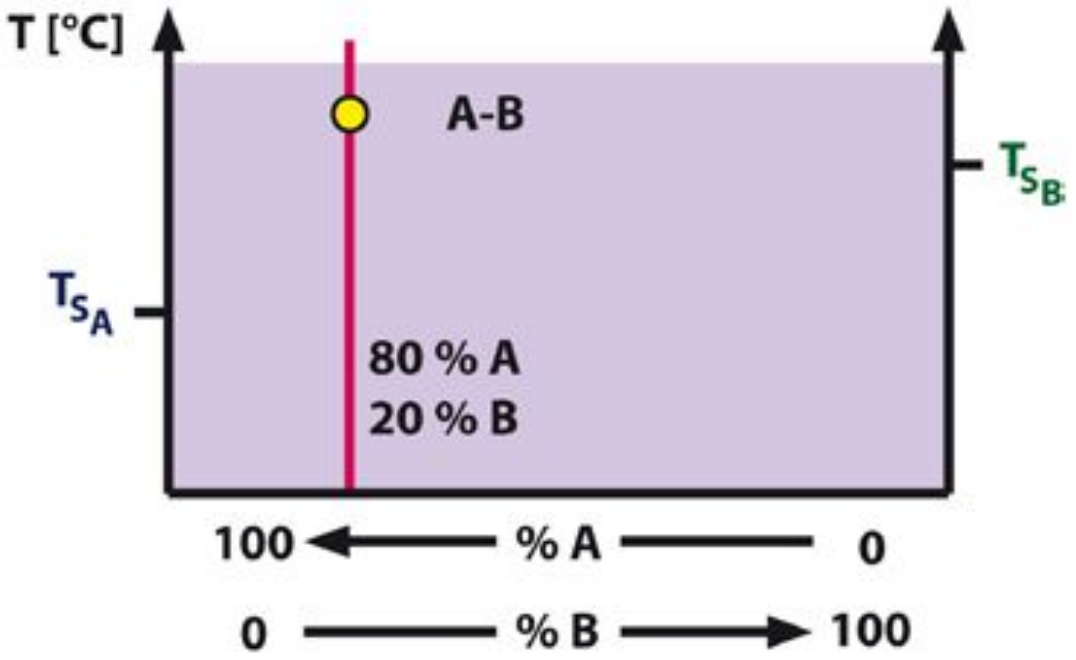
BINÄRES ZUSTANDSDIAGRAMM

- In metallischen Systemen werden die Verhältnisse in Abhängigkeit von Gehalt und Temperatur sogenannte

  „Gehalts-Temperaturschaubilder“ oder „Zustandsschaubilder“

  dargestellt.

- Das Zusandsschaubild besteht aus 3 Teilen:
  - Reiner Stoff A (Schmelzpunkt T_{SA})
  - Reiner Stoff B (Schmelzpunkt T_{SB})
  - Bereich zwischen A und B

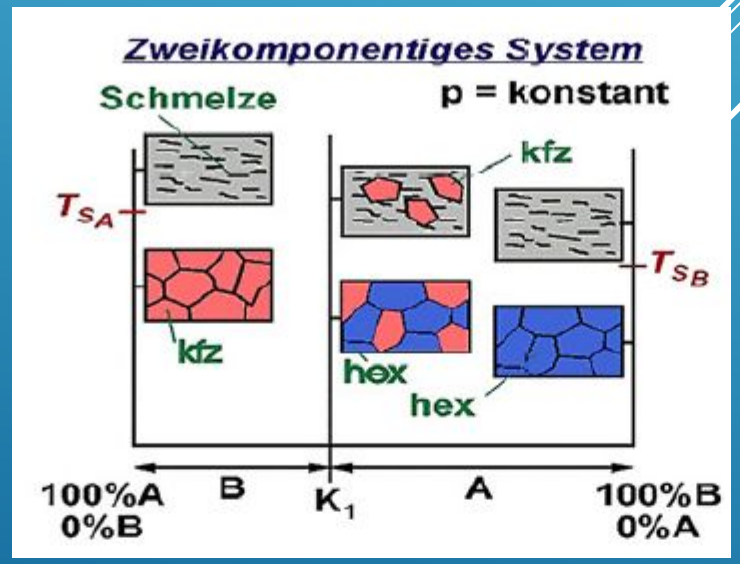


KONVENTION FÜR DIE PHASENBEZEICHNUNGEN

- Reine Stoffe: A, B
- Mischkristall: α, β, γ, ε
- Schmelze: S
- Komponentengehalt der Phasen: w_A^{α}, W_A^{S}

- Phasengehalt: Mithilfe des Zustandsschaubildes ist es möglich, den Gleichgewichtzustand einer Legierung K1 zu definieren

- Komponentengehalt
- Fragen:
  - Welche und wie viele Phasen?
  - Wie groß sind die Phasengehalte?
  - Wie groß sind die Komponentengehalte?



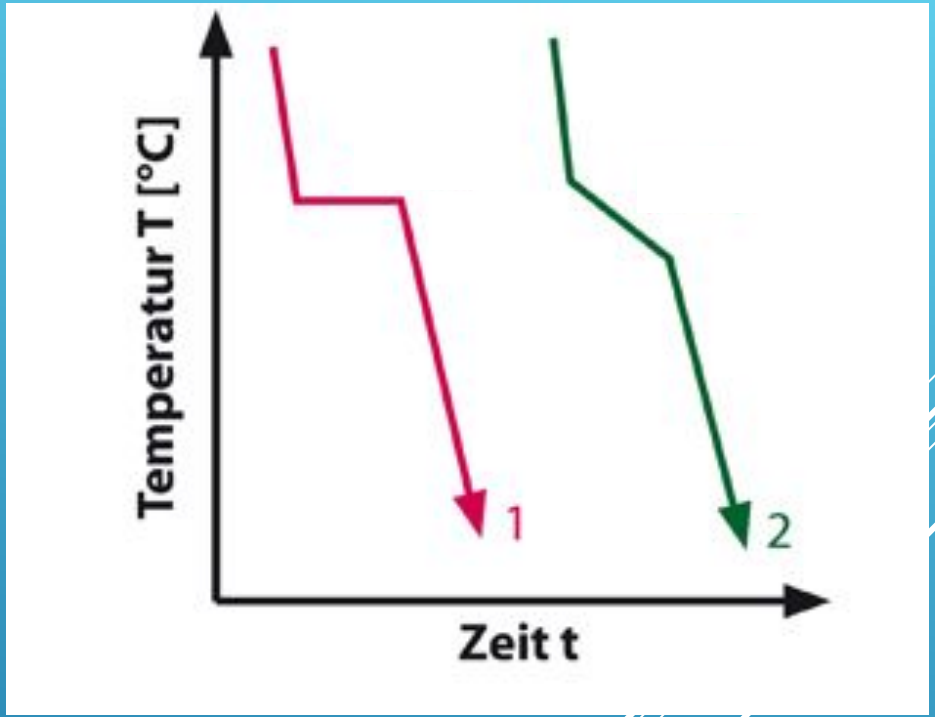
AUFSTELLEN VON ZUSTANDSDIAGRAMMEN

- Ziel: Ermitteln der Phasengrenzlinien im T-w Schaubild

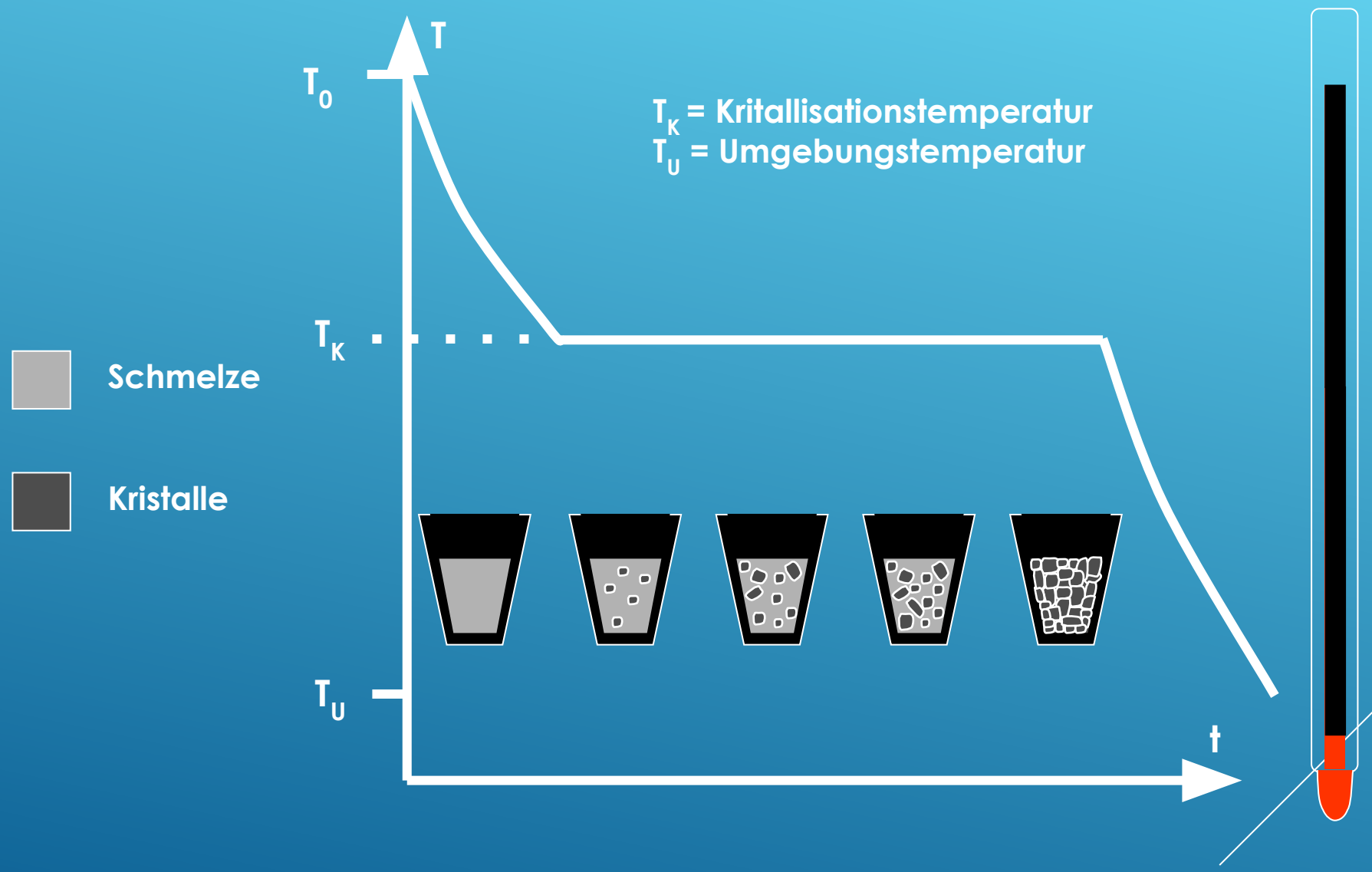
- Beim Abkühlen:

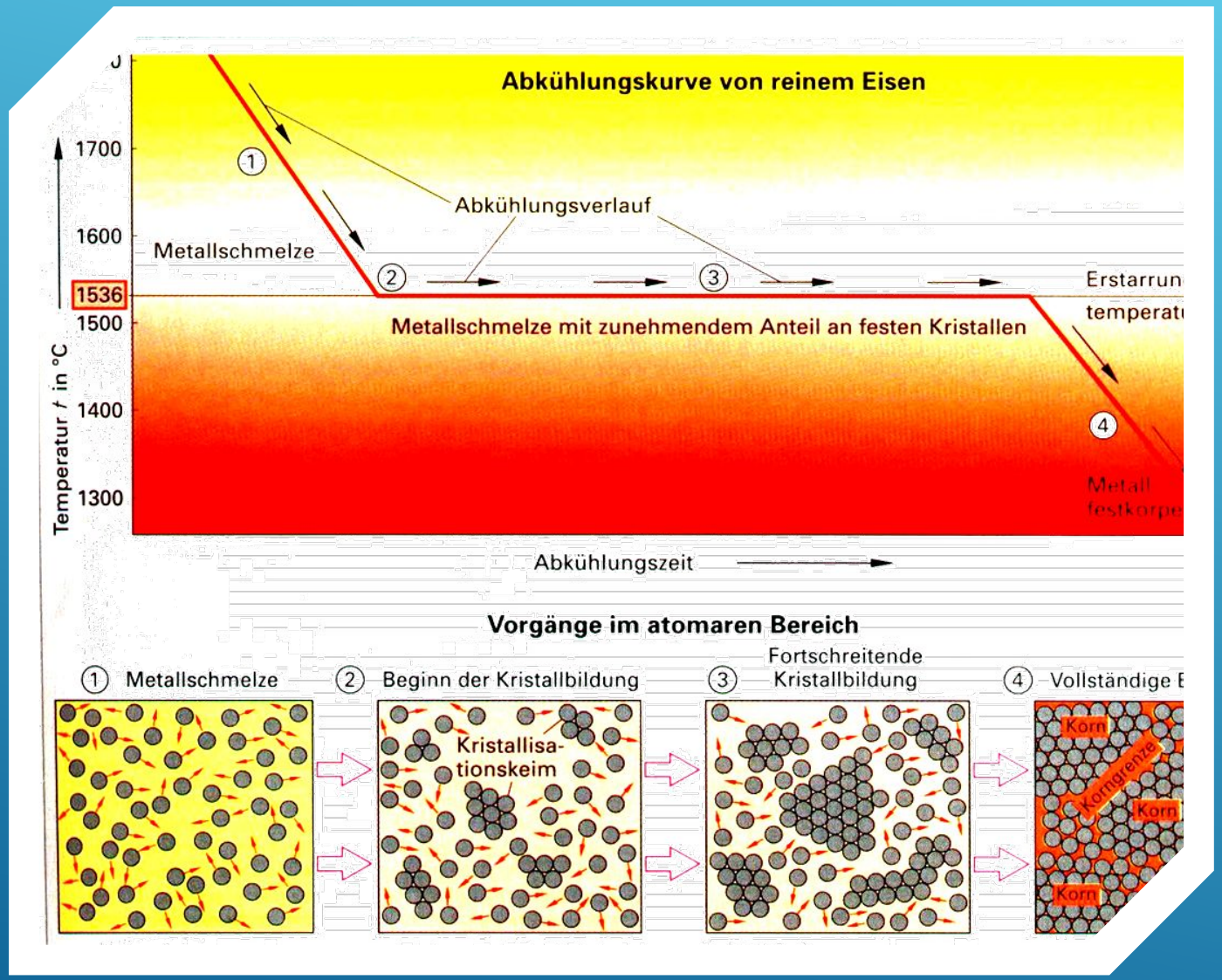
  - Haltepunkt (1): die Temperatur der Legierung bleibt bis zur vollständigen Phasenänderung Konstant.

  - Knickpunkt (2): sind typisch für Zustands-Änderung im Bereich Schmelze/fester Bestandteile von Legierungen.
    Sie entstehen durch die bei der Erstarrung frei werdende Kristallisationswärme.



Abkühlungskurve – reines Metall





ABKÜHLUNGSKURVE

Übergang flüssig → kristallin:

Haltepunkt:
Temperatur bleibt am Schmelzpunkt konstant bis alles erstarrt ist

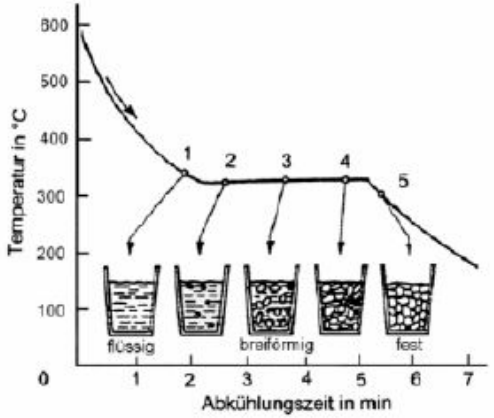


Bild 3.5.1 Abkühlkurve Metall am Erstarrungspunkt

Keimbildung und Kristallwachstum (siehe Bild 3.5.1):

1. Bildung von **Kristallisationskeimen** oder **-Kernen** in regelloser Anordnung der Schmelze *durch Unterkühlung*

2. **Kristallwachstum** durch Ankristallieren

3. **Energiegewinn** E_G durch Kristallisationswärme~Erstarrungswärme (Schwingungsenergie der Atome nimmt durch Kristallisation ab)
→ Aufheizen der Schmelze: *Behinderung weiterer Keimbildung*

4. **Energiebedarf** E_B zur Bildung der Oberfläche des Kristalls -->"Abkühlen der Schmelze".

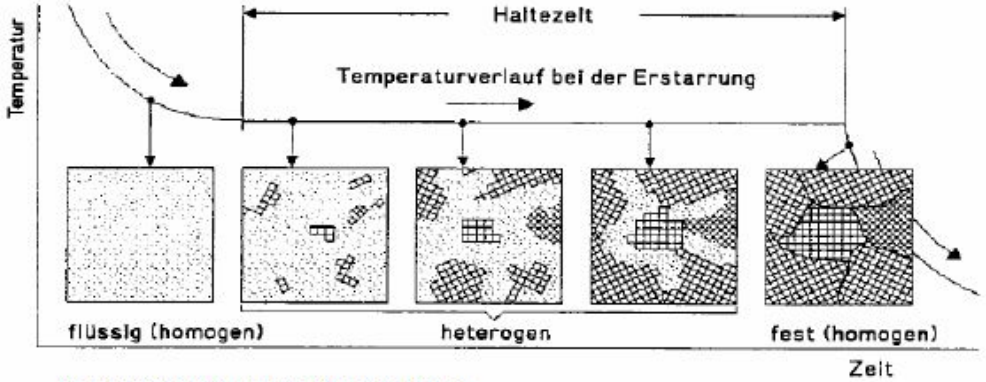


Bild 3.5.2 Keimbildung und Keimwachstum

Die gebildeten Keime wachsen frei in der Schmelze bis:
•sie zusammenstoßen
•sich wieder auflösen

Technische Bedeutung der Kornbildung:

•Gießen in Metallform (Kokille)

- Abkühlgeschwindigkeit↑ , ΔT↑
  Keimzahl↑
- Körner wachsen bis zur Berührung mit anderen und bleiben klein
- Feinkorn: +Zähigkeit ~*Verformbarkeit*
  +Festigkeit

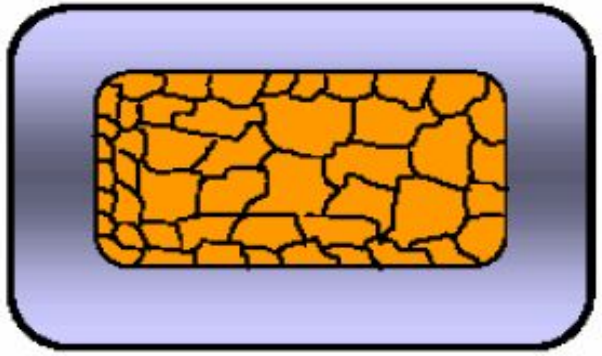


Bild 3.5.6 Gefügebildung beim Gießen in Metallform

•Gießen in Sandform

-Abkühlgeschwindigkeit ↓, ΔT↓
Keimzahl ↓

- Körner wachsen bis zur Berührung mit anderen oder werden in größere umgeformt
- Grobkorn: + Zerspanbarkeit
  + elektrische Eigenschaften
  + magnetische Eigenschaften

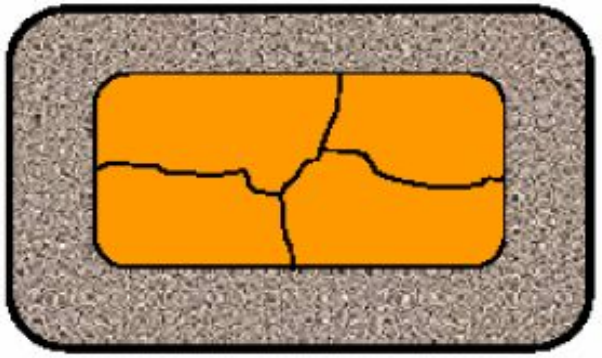


Bild 3.5.7 Gefügebildung beim Gießen in Sandform

Gefügeänderungen im festen Zustand:

1. bei Änderung der Gitterstruktur
   Beispiel: Eisen bei 906 °C kfz ⇔ krz

2. je näher die Temperatur am Schmelzpunkt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, daß kleine Körner von großen Körnern übernommen werden
   --> Gefüge wird grobkörniger

er Große frißt den Kleinen"

ABKÜHLUNGSKURVE – REINES METALL

- Wie sehen die Abkühlkurven eines reinen Materialles
  - Gleichgewicht
  - Beschleunigte Abkühlung
  - Stark beschleunigte Abkühlung?

- Einfluss der Keimzahl auf die Korngrösse

- Einfluss der Unterkühlung (=Temperaturdifferenz zwischen Ts un der vorhandenen Temperatur) auf die Anzahl n der Keime

- Herstellung fein-, Grobkörniges Gefüge => Einfluss auf die Festigkeit

Erstarrungsvorgang (Kristallisation):
Bild 1.2–7
Wird bei der Abkühlung der Schmelze der Haltepunkt erreicht, so entstehen kleine Bereiche, in denen sich die Atome zum Gitter ordnen. Diese ersten Anfänge des kristallinen Zustandes nennt man *Keime*. Dieser der Biologie recht treffend entlehnte Begriff wird für jede Art der Phasenumwandlung verwendet. Von den Keimen ausgehend, wachsen die Kristalle nach allen Richtungen, d. h., die Atome der Schmelze lagern sich an. Stoßen die Kristalle aneinander und ist die Schmelze „aufgezehrt", so ist die Erstarrung beendet. Im Normalfall liegt nun ein polykristallines, quasiisotropes Gefüge vor. Es wird aus den *Kristalliten* (Körner), den *Korngrenzen* und der *Korngrenzensubstanz* (Verunreinigungen, Einlagerungen) gebildet. Man unterscheidet *homogene Keimbildung* (Eigenkeimbildung) und *heterogene Keimbildung* (s. Übersicht folgende Seite). Die Anzahl der Keime ist, ebenso wie die Geschwindigkeit, mit der der Kristallisationsprozess abläuft (Kristallisationsgeschwindigkeit), technisch sehr wichtig. Diese Parameter bestimmen die Korngröße des Gefüges und damit in erheblichem Maße die mechanischen Eigenschaften des Stoffes (Bild 1.2–10).

Haltepunkte sind leicht messbare Temperaturen bei Phasenumwandlungen beliebiger Stoffe,
z. B. 0 °C Kristallisation von Wasser
419 °C Schmelzen von reinem Zink
Voraussetzung: Gleichgewicht.

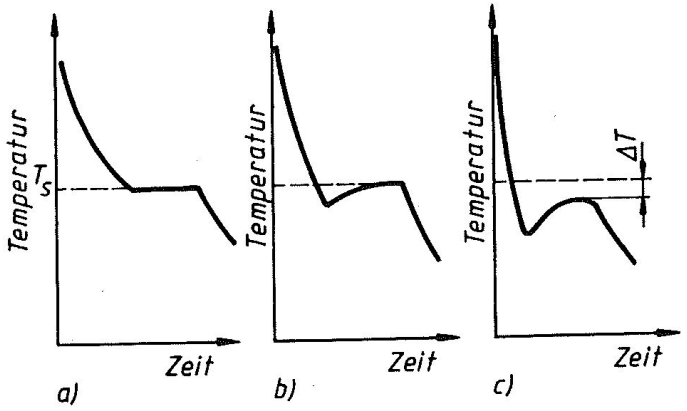


Bild 1.2–8 Abkühlkurven eines reinen Metalles
a) Gleichgewicht
b) beschleunigte Abkühlung
c) stark beschleunigte Abkühlung
T_S Erstarrungstemperatur
ΔT Temperaturdifferenz (thermische Hysterese)

Rasche Abkühlung oder extrem rasche Erwärmung (Erhitzung) verschieben Umwandlungstemperaturen (Haltepunkte) zu niedrigeren bzw. höheren Werten, da die Bedingung Gleichgewicht nicht mehr erfüllt ist.

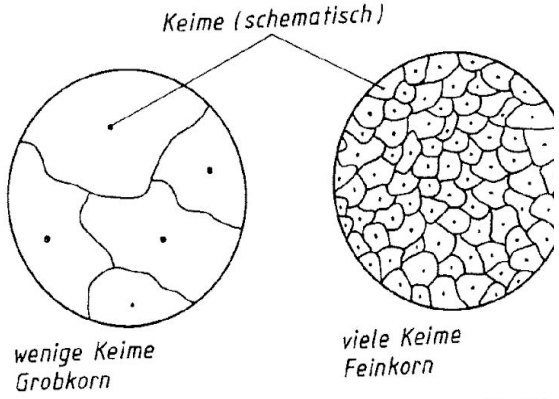


Bild 1.2–9 Einfluss der Keimzahl auf die Kc
größe

Bild 1.2–11 zeigt, dass mit zunehmender Unterkühlung (= Temperaturdifferenz zwischen T_s und der vorhandenen Temperatur)

a) die *Anzahl n der Keime* stetig zunimmt,
b) die *Beweglichkeit der Atome* stetig abnimmt (diese Größe lernen Sie noch als *Diffusionskoeffizient D* kennen),
c) durch die Tendenzen von n und D die *Kristallisationsgeschwindigkeit* steigt.

Praktisch wird ein feinkörniges Gefüge angestrebt. Dazu muss die Keimzahl möglichst hoch sein. Das erreicht man durch eine rasche Abkühlung (z. B. Gießen in Metallformen; rasche Wärmeableitung – Druckguss, Schleuderguss) und/oder durch *Impfen* der Schmelze (Beeinflussung der Keimbildung durch Zugabe geeigneter Substanzen).

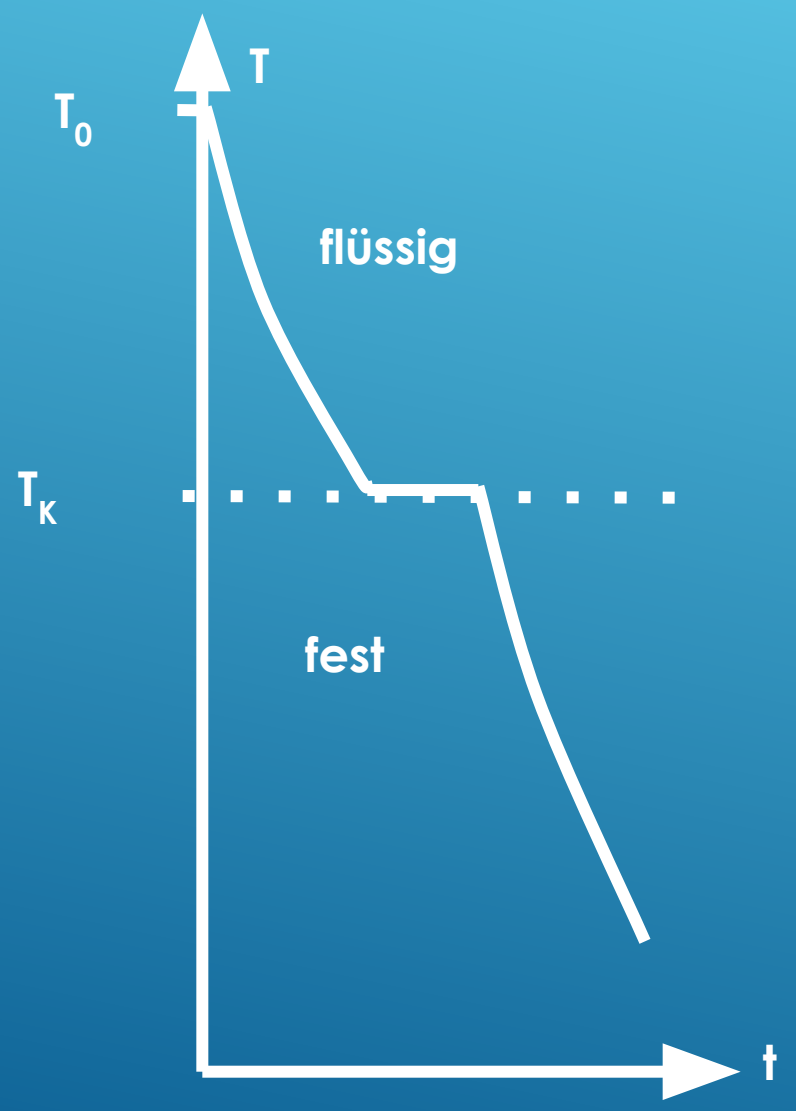
Langsames Abkühlen (z. B. Gießen in Sandformen; längeres Warmhalten aus gießtechnischen Gründen) begünstigt die Bildung von Grobkorn. Diese Teile haben eine geringere Festigkeit. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass eine zu hohe Erwärmung der Schmelze (Schmelzüberhitzung) vor dem Abguss zu grobem Korn bei der Erstarrung führt. Ebenso ist ein längeres Halten dicht unterhalb der Erstarrungstemperatur unbedingt zu vermeiden.

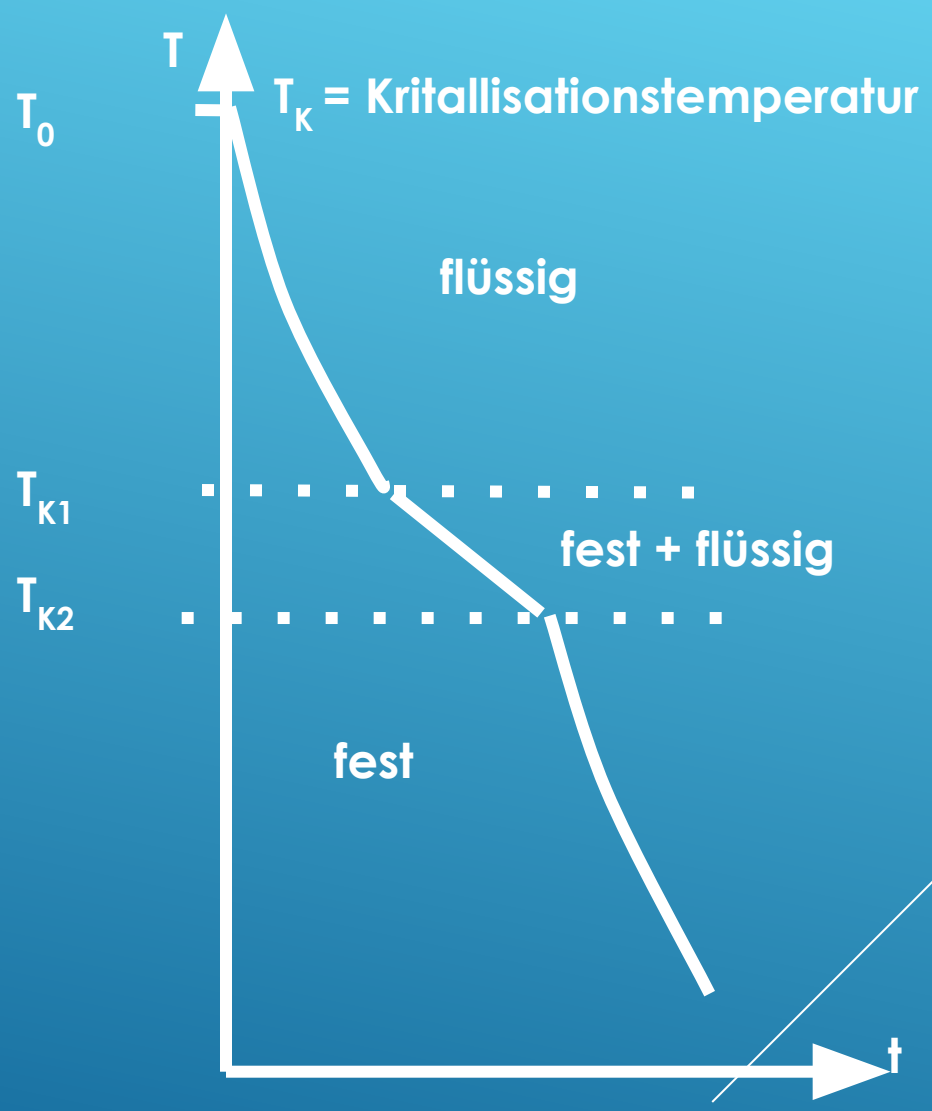
Keime sind erste Anfänge des Endzustandes (bei der Umwandlung flüssig–kristallin: des festen Zustandes).

Man unterscheidet:

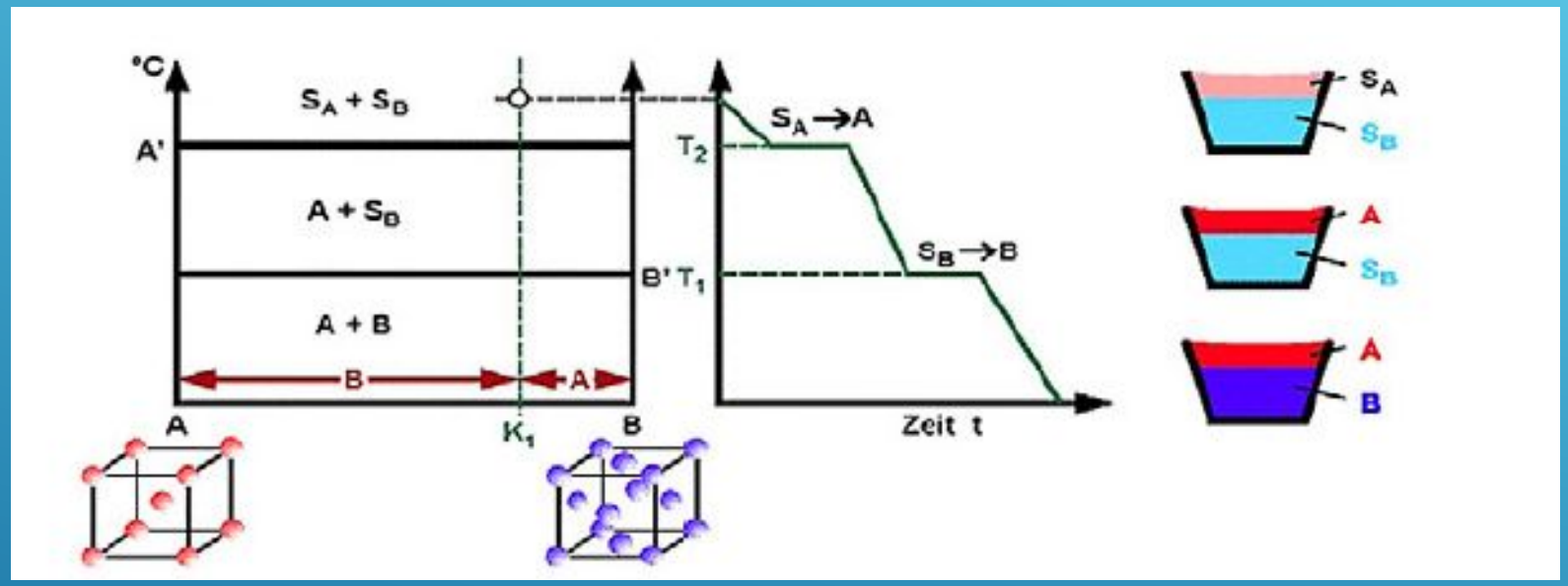
- *homogene Keimbildung* (Eigenkeimbildung)
  gilt für den absolut reinen Stoff
- *heterogene Keimbildung*
  Fremdsubstanzen (Verunreinigungen, Begleitelemente, Legierungselemente) steuern ihre Oberflächenenergie zur Keimbildung bei; erleichtern sie damit!

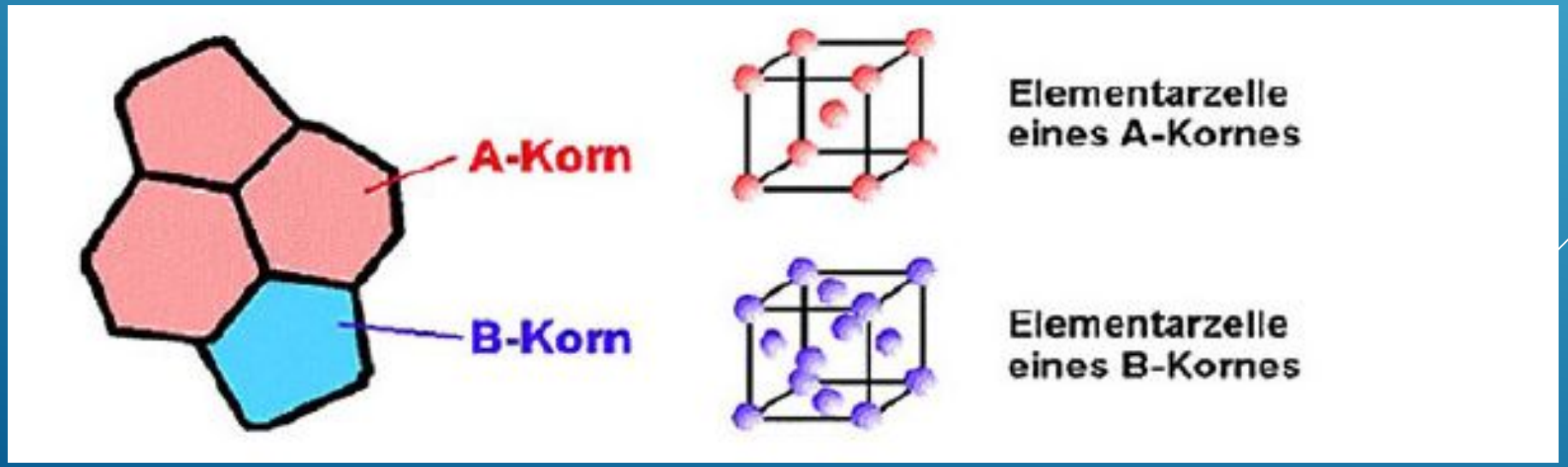
Vergleich der Abkühlungskurven: reines Metall – Legierung



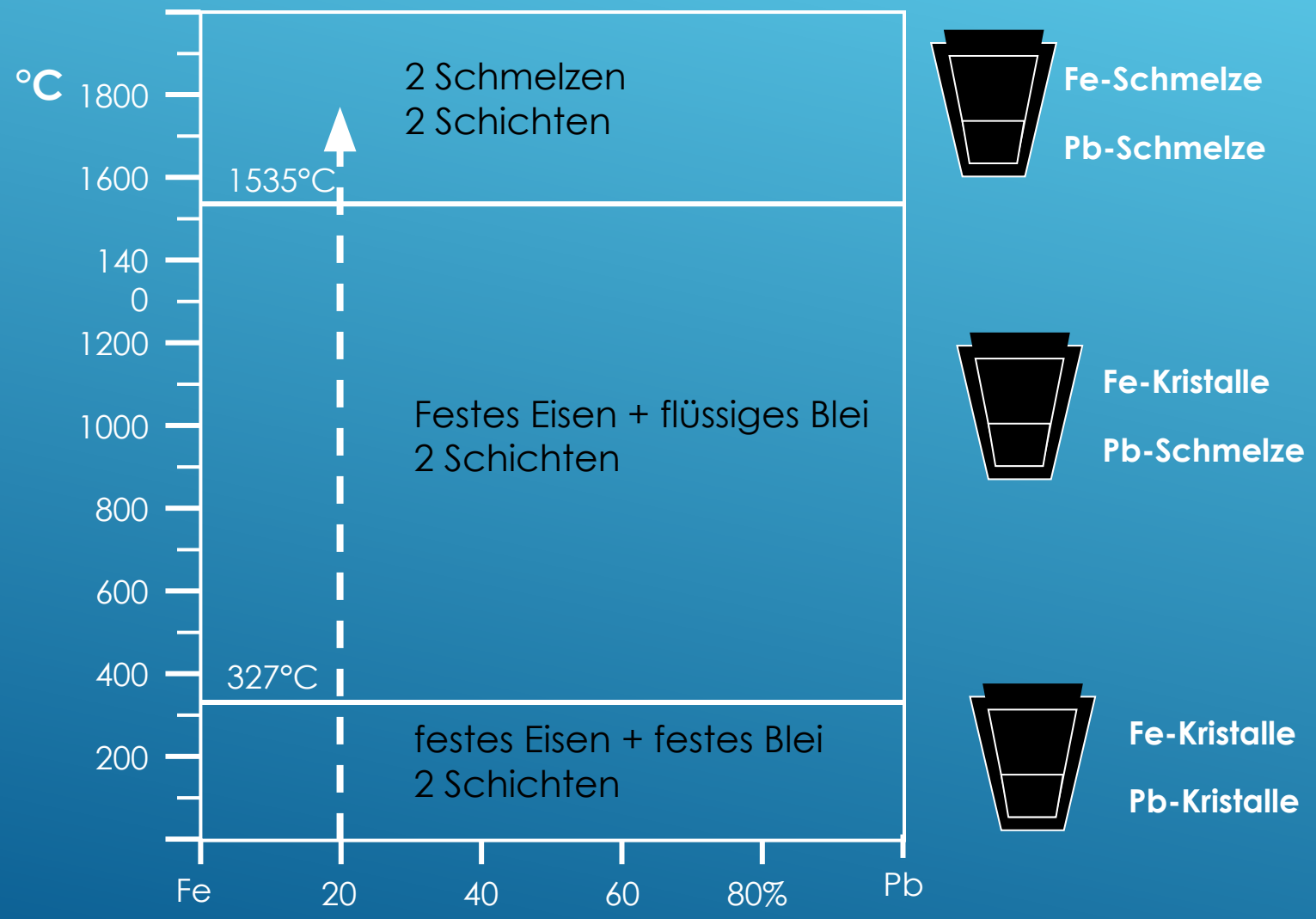


LEGIERUNG ZUSTANDSDIAGRAMM - VOLLSTÄNDIGE UNLÖSLICHKEIT IM FESTEN UND FLÜSSIGEN ZUSTAND





Zustandsschaubild – Eisen-Blei – vollständige Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand



Fe-Schmelze

Pb-Schmelze

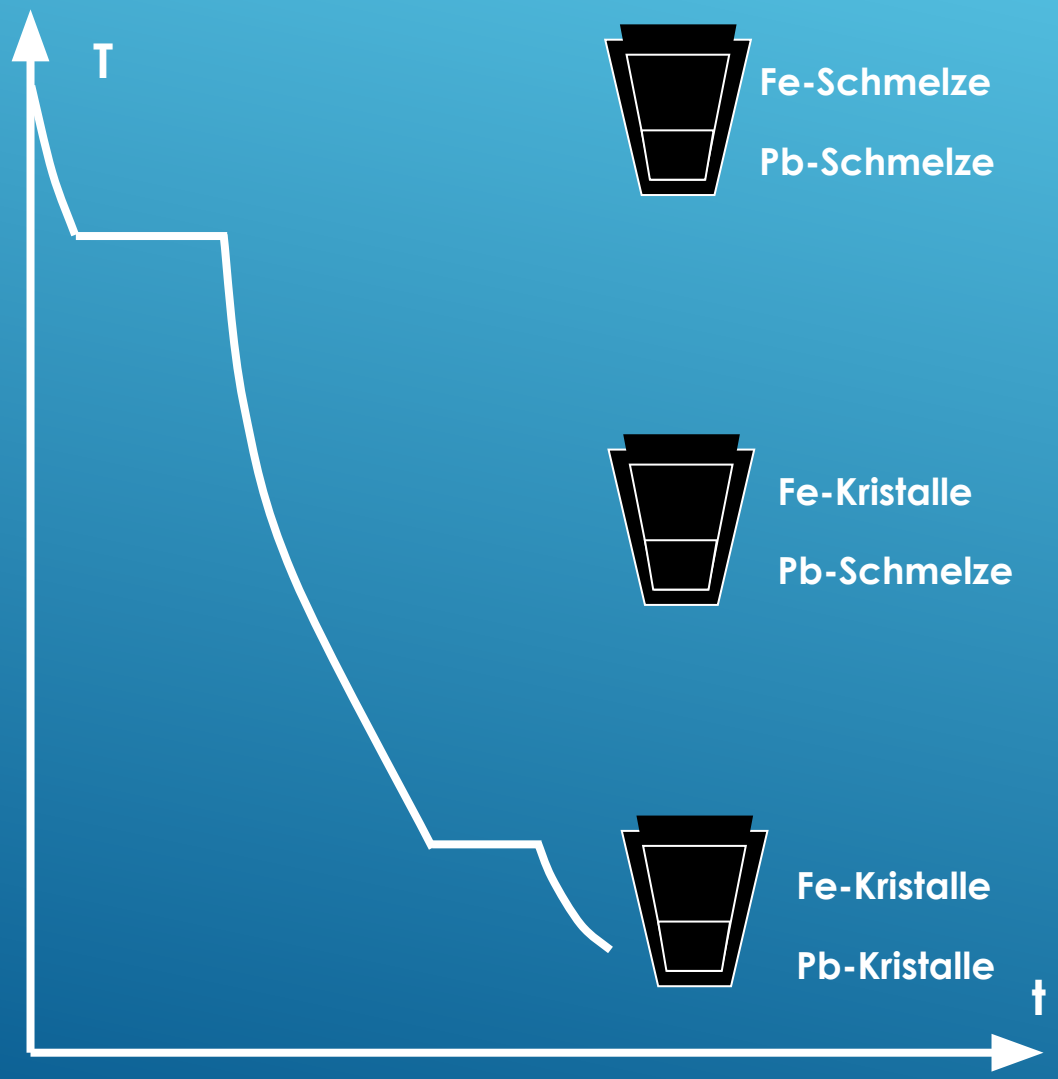
Fe-Kristalle

Pb-Schmelze

Fe-Kristalle

Pb-Kristalle

Abkühlungskurve – Eisen-Blei Mischung



keine Legierungsbildung - keinerlei Wechselwirkungen

- Keine Änderung der Erstarrungs- bzw. Schmelztemperaturen im Gemisch gegenüber reiner Form
- Festigkeit, Dehnung, Aussehen und Dichte der Komponenten bleiben unverändert

Stoffsystem mit Unlöslichkeit im flüssigen Zustand ist für Werkstoffkunde ohne Bedeutung

Legierung = - Metall + mind. ein weiteres chemisches Element, welches bewußt hinzugefügt wurde
(Stoffgemenge) - keine chemische Verbindung, es entstehen keine neuen Moleküle

abhängig von:
- Auswahl der Komponenten
- Konzentration der Komponenten
- Verarbeitungstechnik

lassen sich gezielt Werkstoffe mit einer Vielzahl verschiedenster Eigenschaften herstellen

Grundbestandteile heißen Komponenten: evtl. physikalische Reaktion ->Bildung neuer Gefüge

Gefüge:

Einphasige, homogene Legierung

Bild 3.6.1 Mischkristall

Gefüge:

Zweiphasige, heterogene Legierung

Bild 3.6.2 Kristallmischung

Mischkristalltyp (MK)	Kristallgemischtyp (KM)
Löslichkeit der Komponenten	Unlöslichkeit der Komponenten
Die Atome bleiben auch im Kristallgitter feinst miteinander vermengt	Jede Atomart bildet eigene Kristalle, die miteinander verwachsen sind
Voraussetzung für das Verhalten von zwei Komponenten zueinander	
Gleichheit der Komponenten (evtl. kleine Unterschiede)	Ungleichheit der Komponenten

Substitutionsmischkristall:

•gleicher Gittertyp
•ähnliche Atomgröße (+/-15 %)

bei Fe: Cr, Ni, Mn, Si, Al, Co, W
bei Al: Cu, Mg, Si, Zn

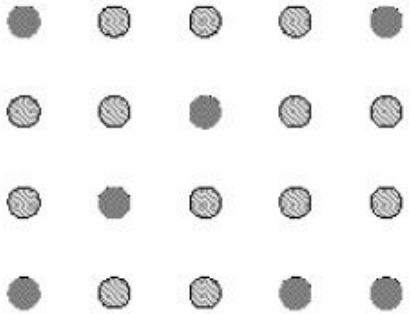
Einlagerungsmischkristall:

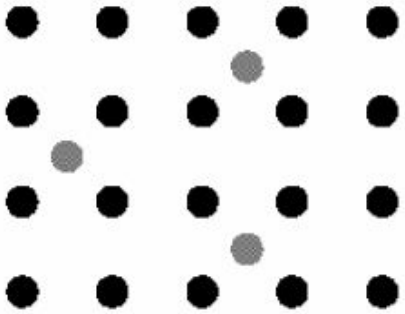
•rel. kleine Abmessungen der einzulagernden Atome
•im Verhältnis dazu große Gitterlücken

bei Fe: N, H, B. C in hohen Maß, wenn Gitter kfz (Bild 3.7.1)

Bsp.: Cd-Bi

- Wismuth kristalliert rhomboetrisch
- Cadmium kristalliert hexagonal





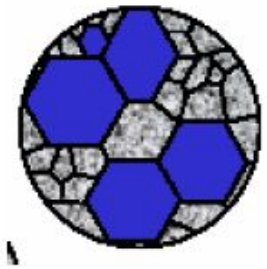


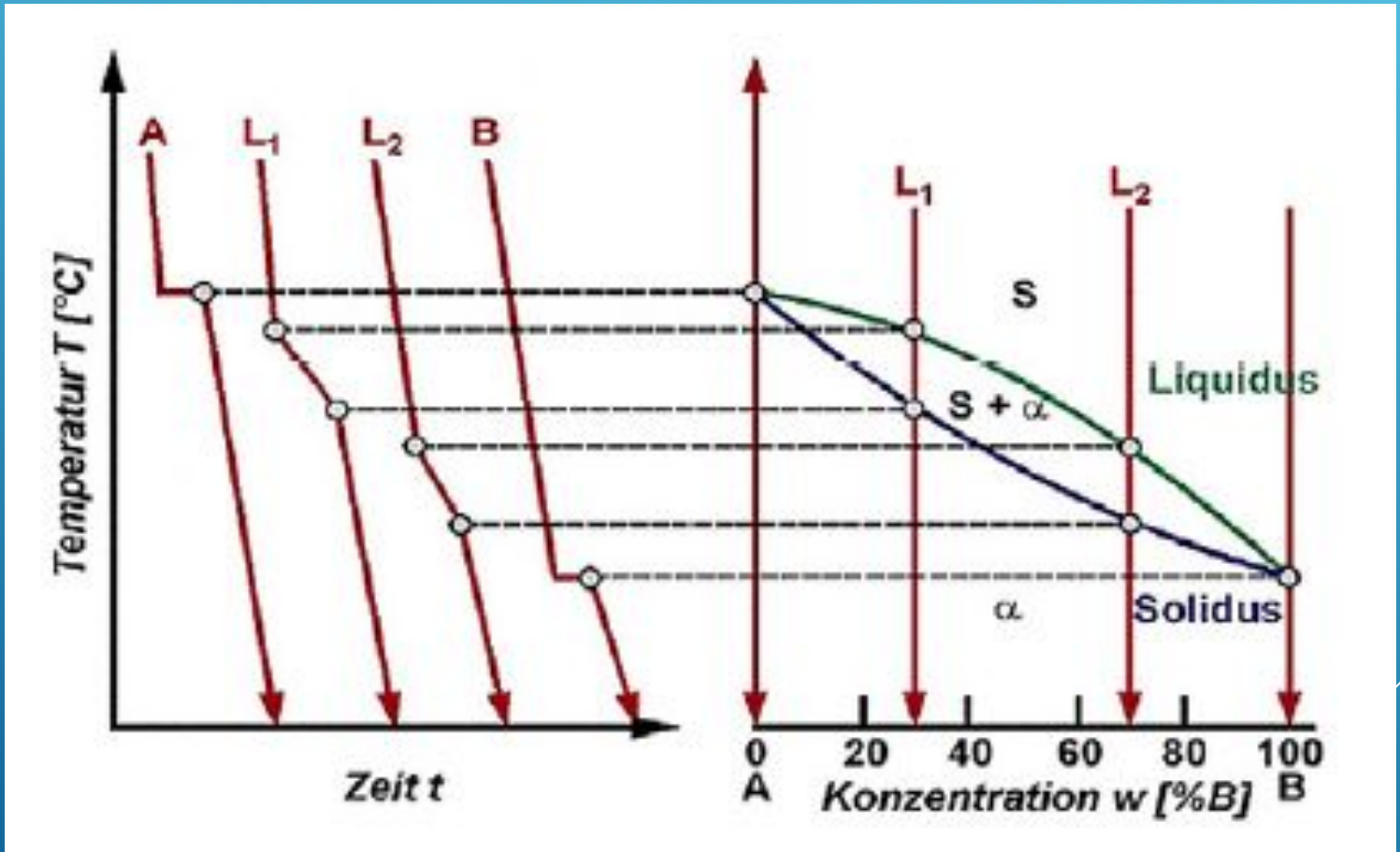
Bild 3.6.5 Kristallgemisch

Bild 3.6.3 Substtutions-Mischkristall

Bild 3.6.4 Elinlageungs-mischkristall

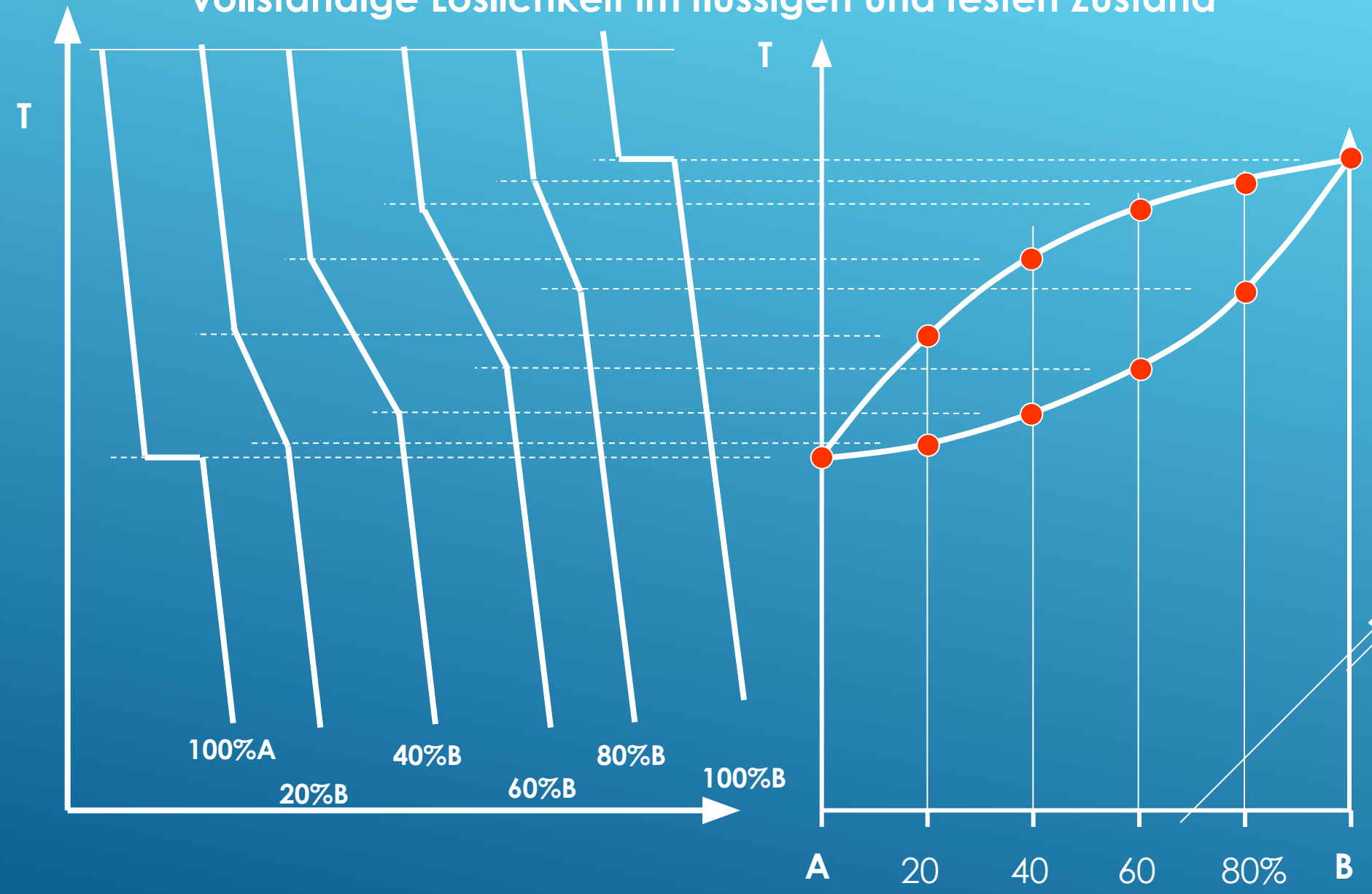
AUFSTELLEN VON ZUSTANDSDIAGRAMMEN

- Die Phasengrenzen entstehen, indem die von einer Vielzahl von Legierungen gemessen Knick und Haltepunkt in das T-w Diagramm eingetragen werden:

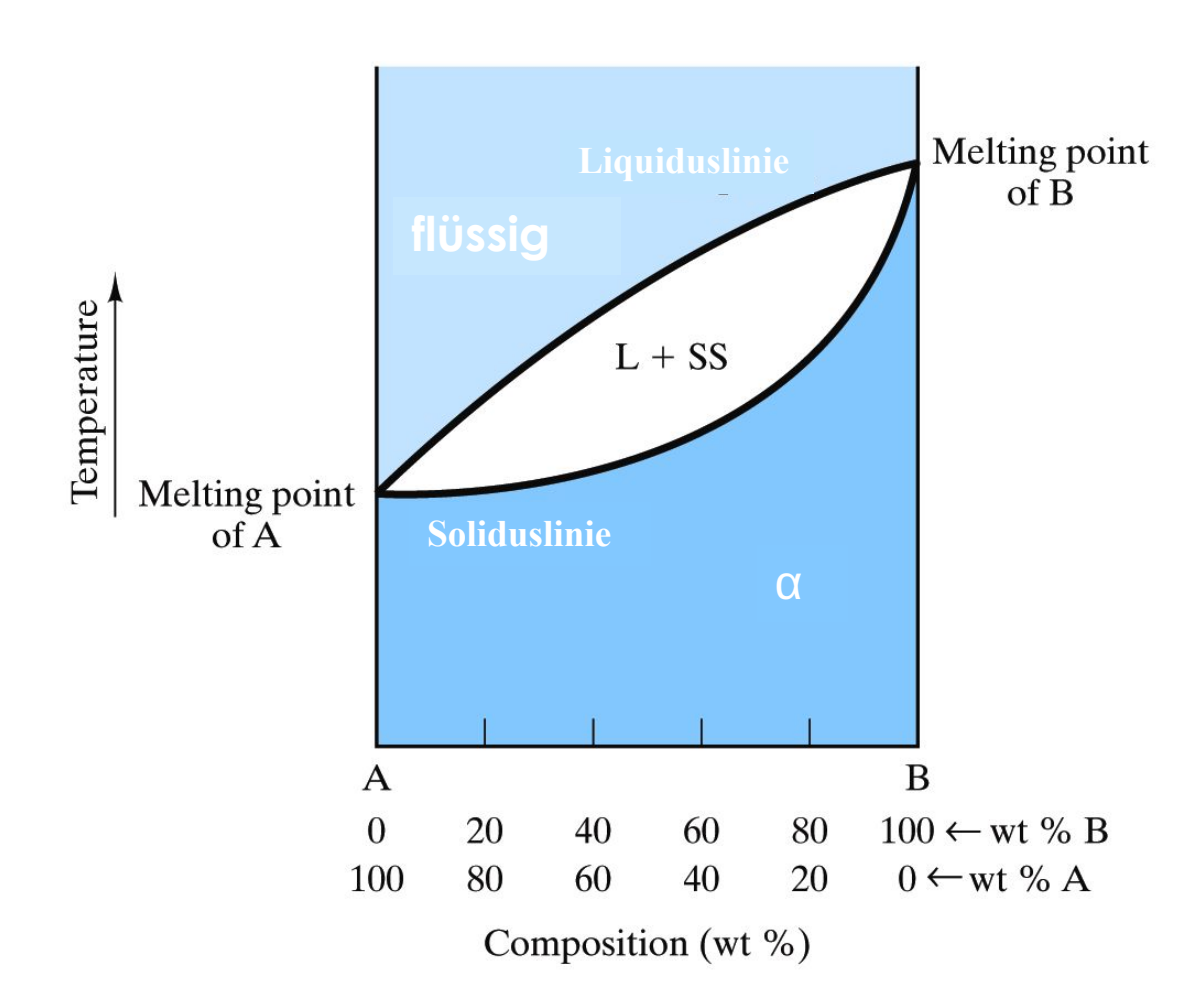


Erstarrungskurven und Zustandsschaubild

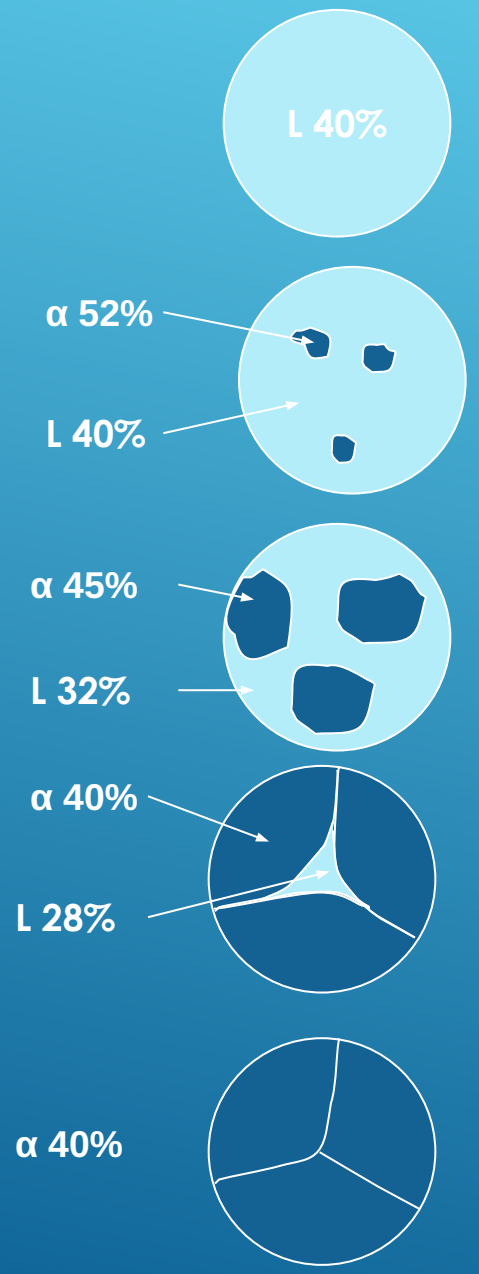
vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand

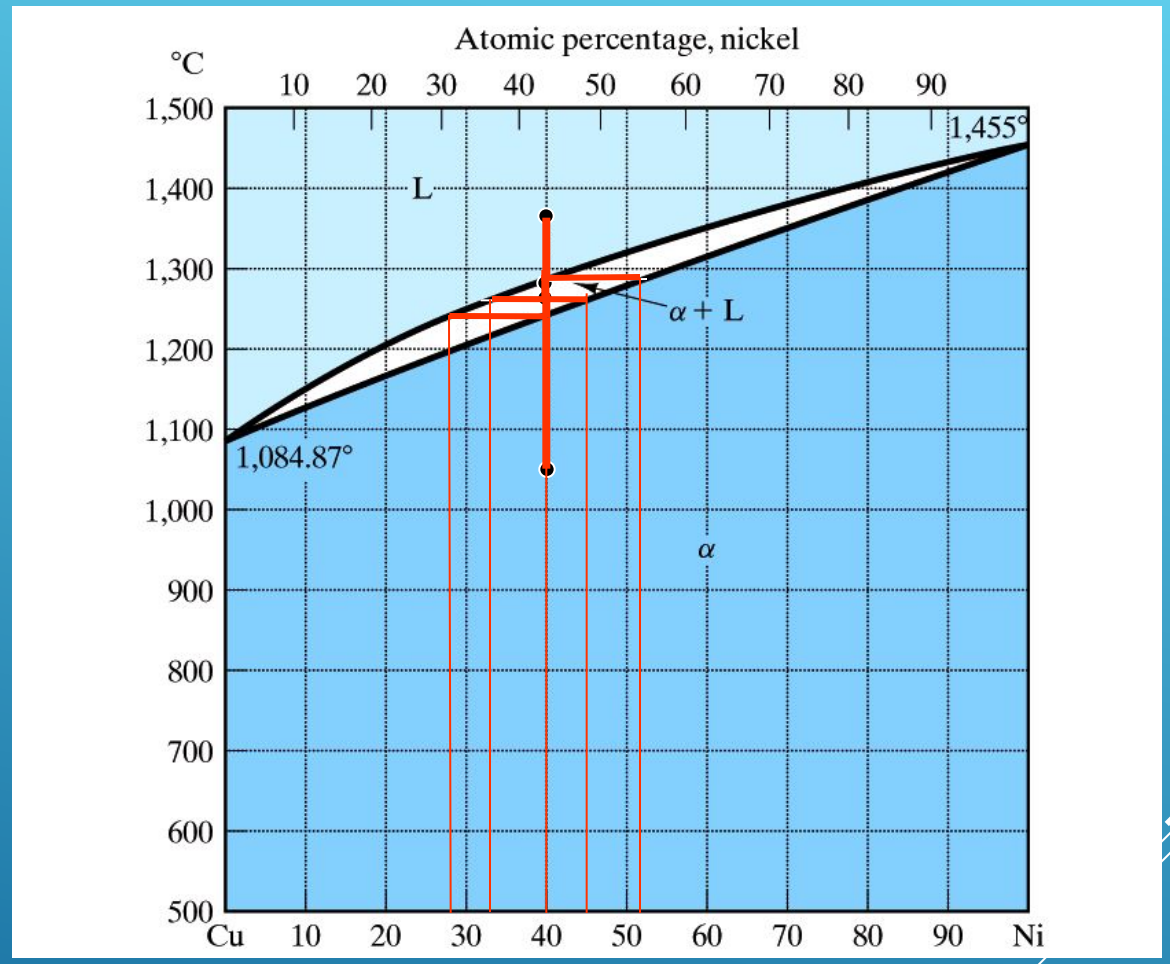


Grundsystem I: vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand



Beispiel Grundsystem I: Legierung Cu-Ni





Ni

Gewichtsprozent

Cu

Das Hebel Gesetz

- Ziel: Ermittlung der Massenanteile der beiden Phasen mit Hilfe des Hebelgesetztes

Hebelgesetz: (anwendbar auf Mischkristallbildung und Kristallmischung)

•geometrische Verhältnisse im Phasenzustandsdiagramm zeigen Mengenverhältnisse von zwei Phasen
•Voraussetzung: Gleichgewicht der Phasen im betrachteten Zustandspunkt
•anwendbar auf alle Stoffsysteme
•anwendbar auf beliebig viele Systemkomponenten

mit:

c_0 :	Konzentration der Mischung
c_K :	Konzentration des Kristallisats
c_S :	Konzentration der Schmelze
m_m:	Mischungsmenge
m_K:	Kristallisatmenge
m_S:	Menge Restschmelze

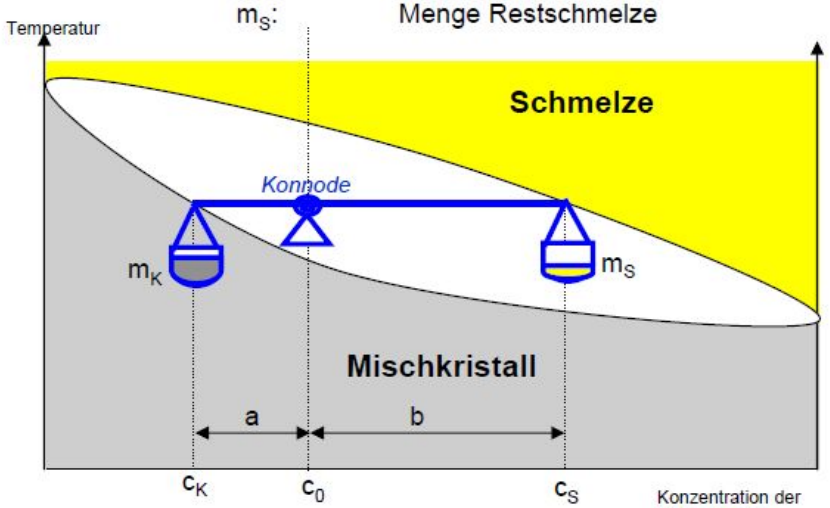


Bild 3.7.6 Darstellung der Hebelbeziehung

Regeln:

1. Die Schnittpunkte der Konnode mit den beiden Gleichgewichtslinien geben die **Zusammensetzungen** der beiden Phasen an

2. Die **Massen** der beiden Phasen verhalten sich wie die Längen der abgewandten Konnodenabschnitte

mit:

$$m_m = m_K + m_S \quad (1)$$

$$m_m * c_0 = m_K * c_K + m_S * c_S \quad (2)$$

folgt:

$$m_K * (c_0 - c_K) = m_S * (c_S - c_0)$$

$$\boxed{m_K * a = m_S * b}$$ *Hebelgesetz*

$$\frac{\text{Kristallisatmenge}}{\text{Mischungsmenge}} = \frac{m_K}{m_m} = \frac{b}{a+b}$$

$$\frac{\text{Menge Restschmelze}}{\text{Mischungsmenge}} = \frac{m_S}{m_m} = \frac{a}{a+b}$$

$$\frac{\text{Menge Restschmelze}}{\text{Kristallisatmenge}} = \frac{m_S}{m_K} = \frac{a}{b}$$

Das Hebel Gesetz (2/2)

- Quantitative Ermittlung der Massenanteil

Für T = T gilt mit Massenkonstanz

$$m = m_\alpha + m_s$$

$l = l_\alpha + l_s = c_s - c_\alpha$

die Beziehung

$$m_\alpha \cdot c_\alpha + m_s \cdot c_s = m\, c_o$$

Gl. (1) in (2):

$$m_\alpha \cdot c_\alpha + m_s \cdot c_s = (m_\alpha + m_s)\, c$$

bzw.:

$$m_\alpha \underbrace{(c_o - c_\alpha)}_{l_\alpha} = m_s \underbrace{(c_s - c_o)}_{c_s}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{m_\alpha}{m_s} = \frac{c_s - c_o}{c_o - c_\alpha} = \frac{l_s}{l_\alpha}$$

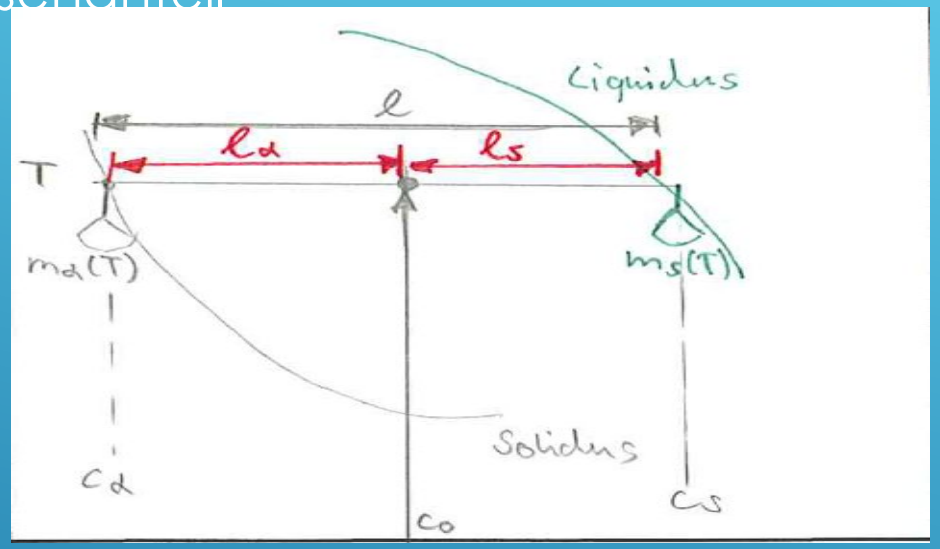
$$\frac{m_\alpha}{m_s} \quad 1 + \frac{m_\alpha}{m_s} = \frac{l_s}{l_\alpha} + 1 \quad \frac{l_s + l_\alpha}{l_\alpha} \quad \frac{l_\alpha}{l_\alpha}$$

mit $l = l_\alpha + l_s$

und $m = m_\alpha + m_s$

$$m_s = \frac{l_\alpha}{l}\, m$$

$$m_\alpha = \frac{l_s}{l}\, m$$



GRUNDSYSTEM II: VOLLSTÄNDIGE LÖSLICHKEIT IM FLÜSSIGEN UND VOLLSTÄNDIGE UNLÖSLICHKEIT IM FESTEN ZUSTAND

a) Keine Löslichkeit im festen Zustand

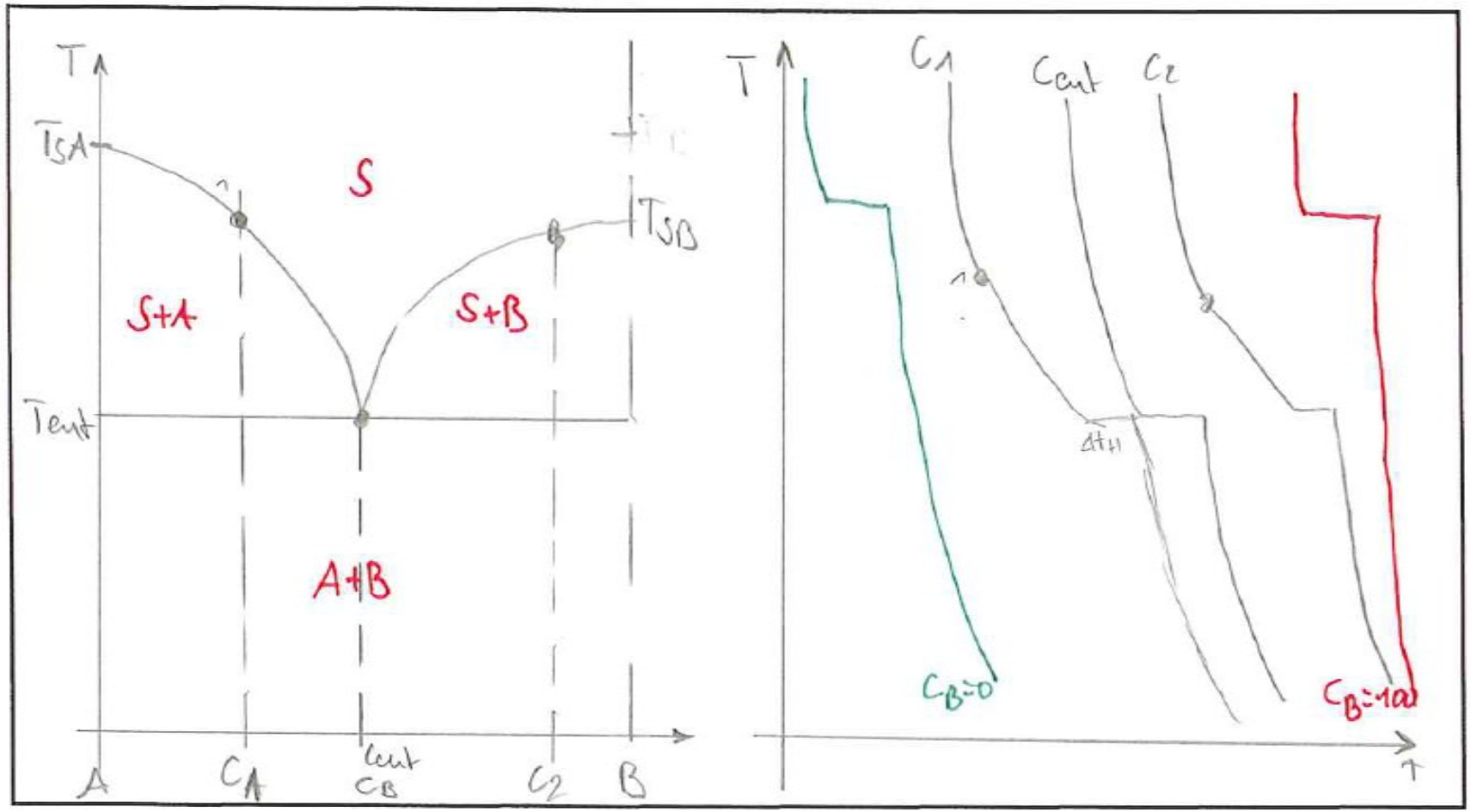
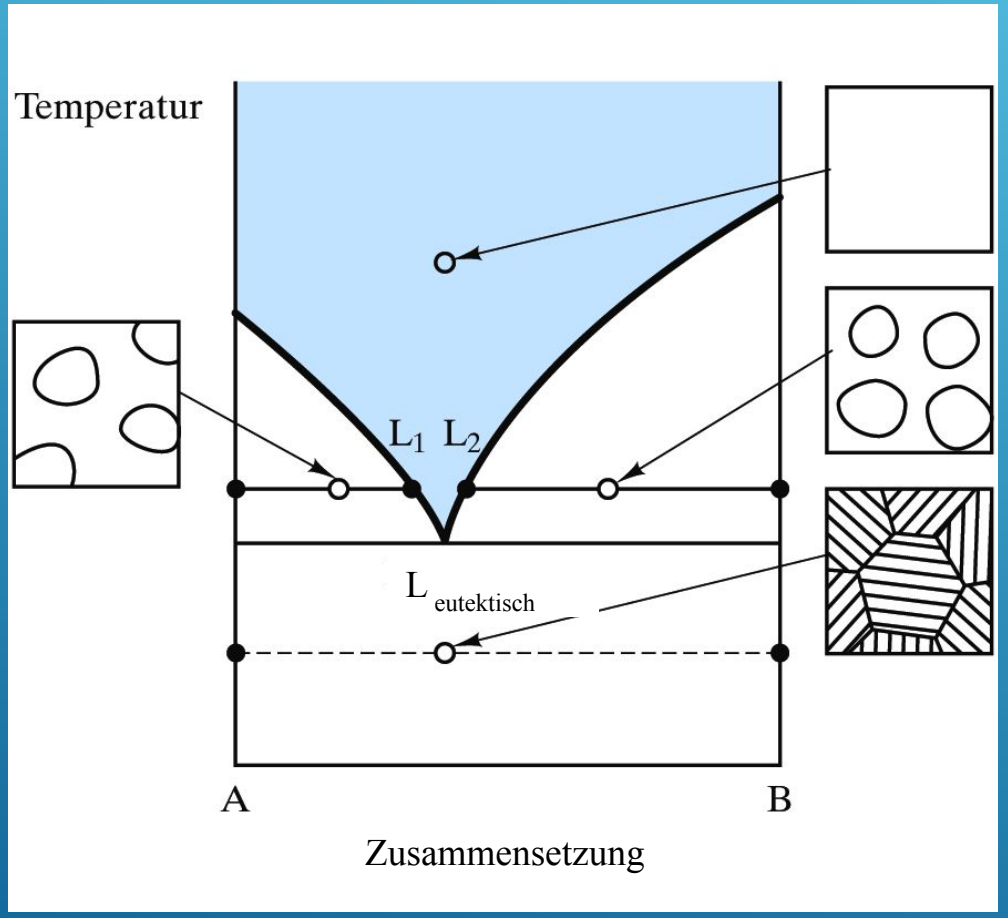


Bild 6.15: Links: Schematisches Zustandsdiagramm mit eutektischer Reaktion ohne Löslickeit im festen Zustand. Rechts: T,t-Kurven für einige Legierungskonzentrationen

Zustandsdiagramm Grundsystem II

Kristallite von A in L

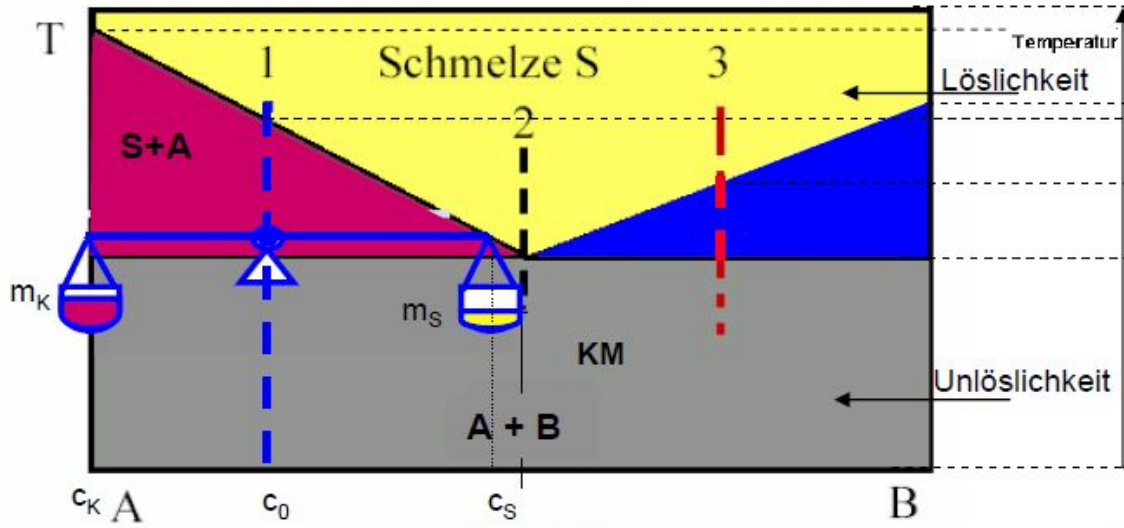


Alles flüssig

Kristallite von B in L

Eutektische Mikrostruktur - feine, abwechselnde Schichten von A und B

Zustandsdiagramm Grundsystem II



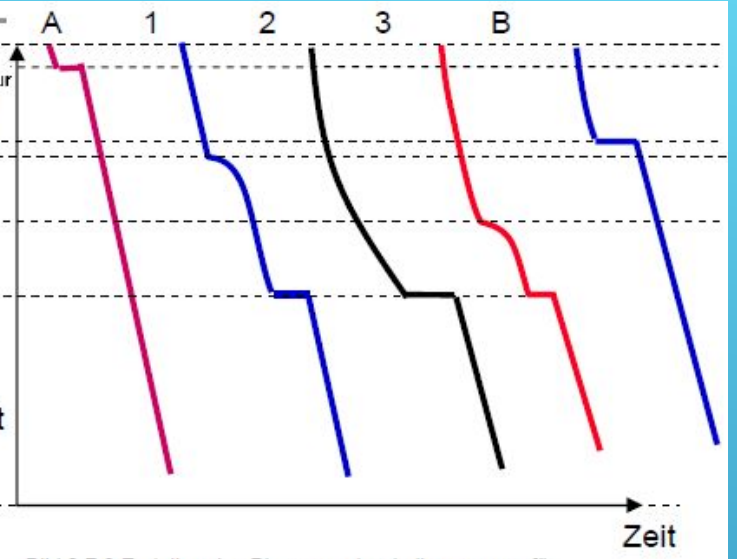


Bild 3.7.8 Erstellen des Phasenzustandsdiagrammes für Kristallmischung

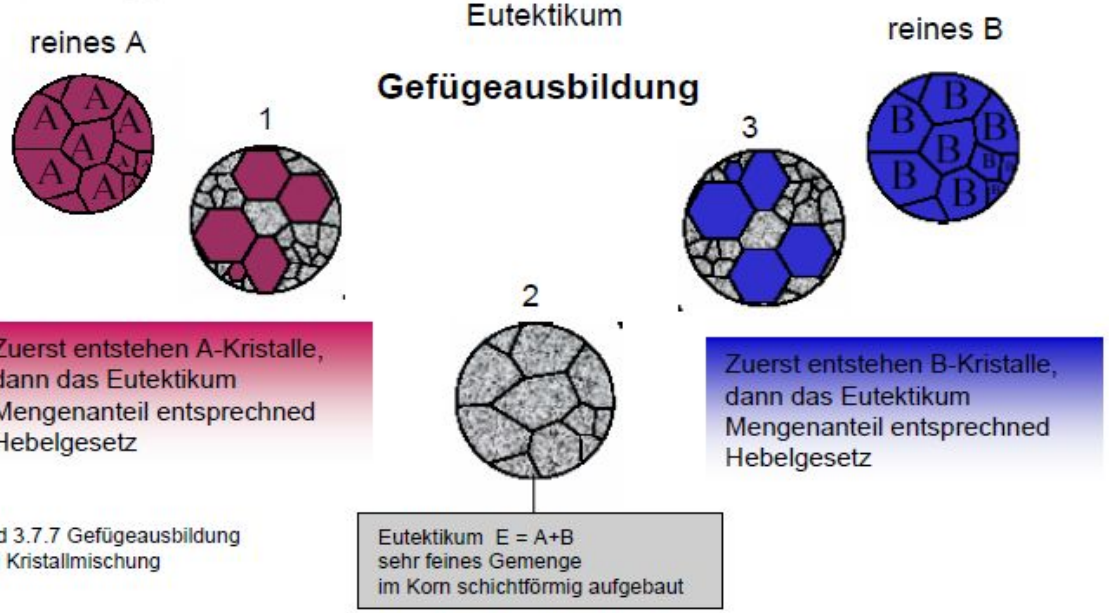


Bild 3.7.7 Gefügeausbildung bei Kristallmischung

Eutektikum: tiefer Schmelzpunkt
sehr fein miteinander verzahnte Kristalle A und B
„gut fließend"

Merkmale:

1. Bei Abkühlung entmischen sich die beiden Komponenten
2. T_S der Legierung ist niedriger als T_S von A bzw. B
3. T_{Smin} im Eutektikum
4. Eutektikum erstarrt wie reiner Stoff
5. Es gilt das Hebelgesetz:

$$m_K * (c_0 - c_K) = m_S * (c_S - c_0)$$

Grundsystem III: einseitig beschränkte Löslichkeit im Festenzustand

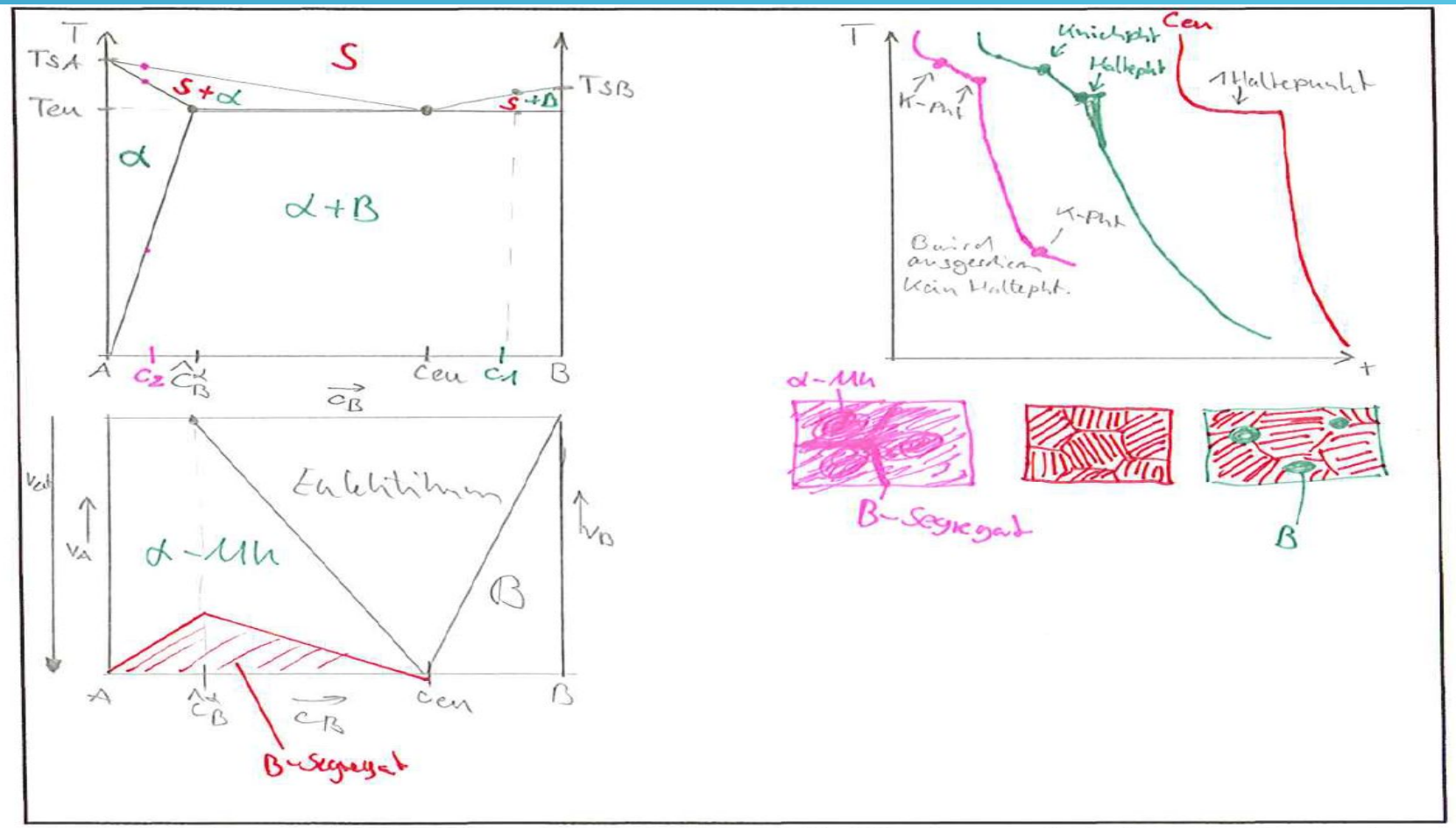
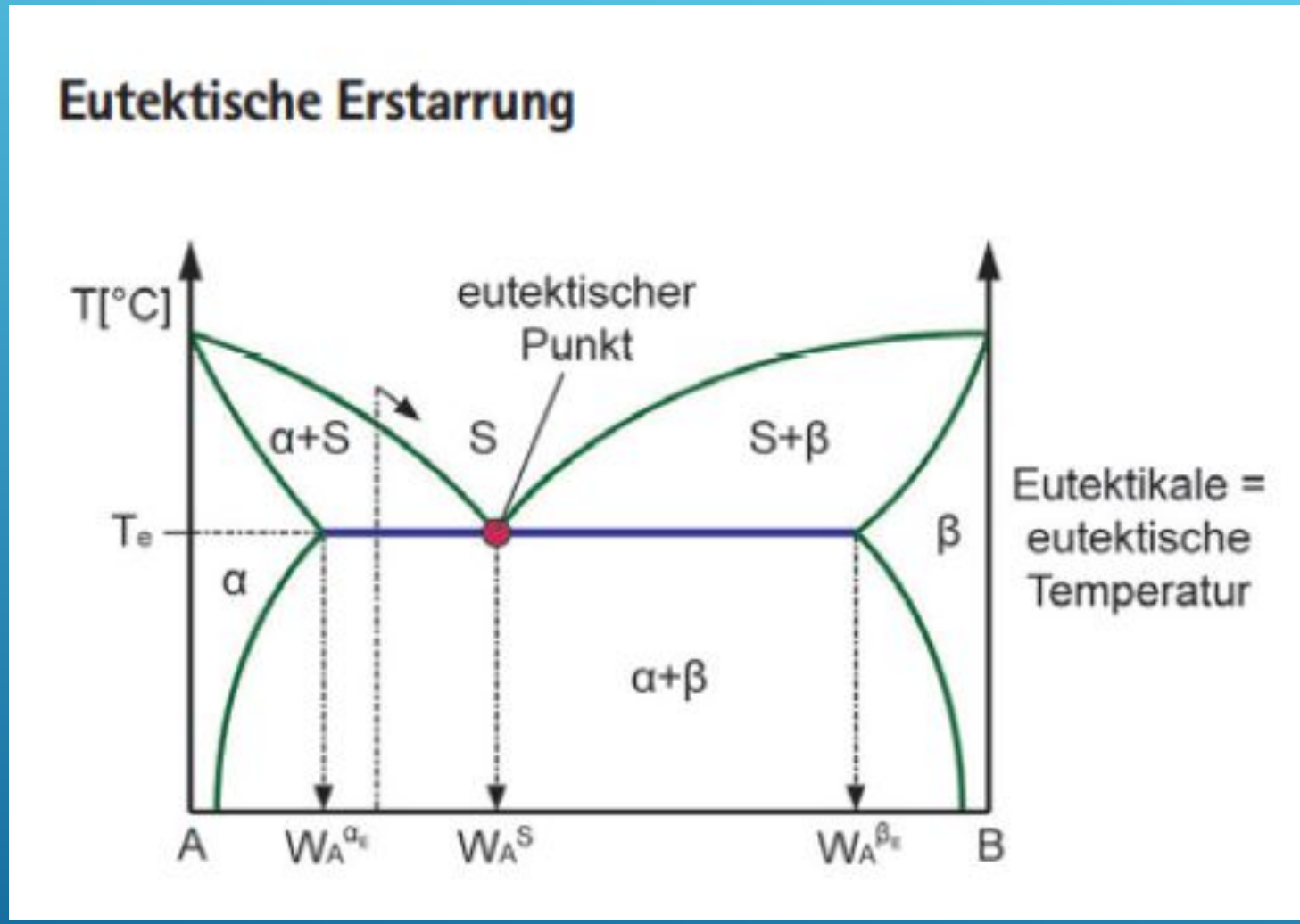


Bild 6.17: Schematisches Zustandsdiagramm, Abkühlkurven und Gefügeanteile im festen Zustand von Legierungen mit eutektischer Reaktion und einseitig beschränkter Löslichkeit im festen Zustand

GRUNDSYSTEM IV: VOLLSTÄNDIGE LÖSLICHKEIT IM FLÜSSIGEN UND BEIDSEITIG BESCHRÄNKTE LÖSLICHKEIT IM FESTE ZUSTAND

Bei eutektischer Zusammensetzung und bei Te findet die folgende Reaktion statt:

$S \rightarrow \alpha_e + \beta_e$ (1 Phase in 2 Phasen)



GRUNDSYSTEM IV: VOLLSTÄNDIGE LÖSLICHKEIT IM FLÜSSIGEN UND BEIDSEITIG BESCHRÄNKTE LÖSLICHKEIT IM FESTE ZUSTAND

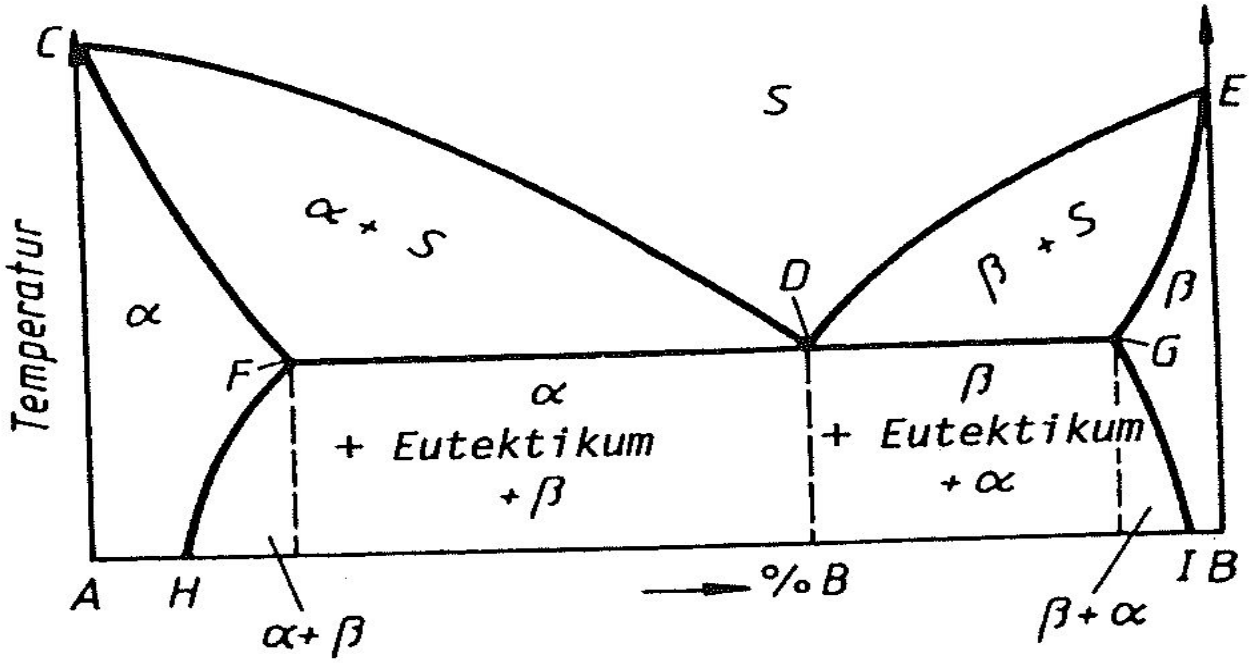
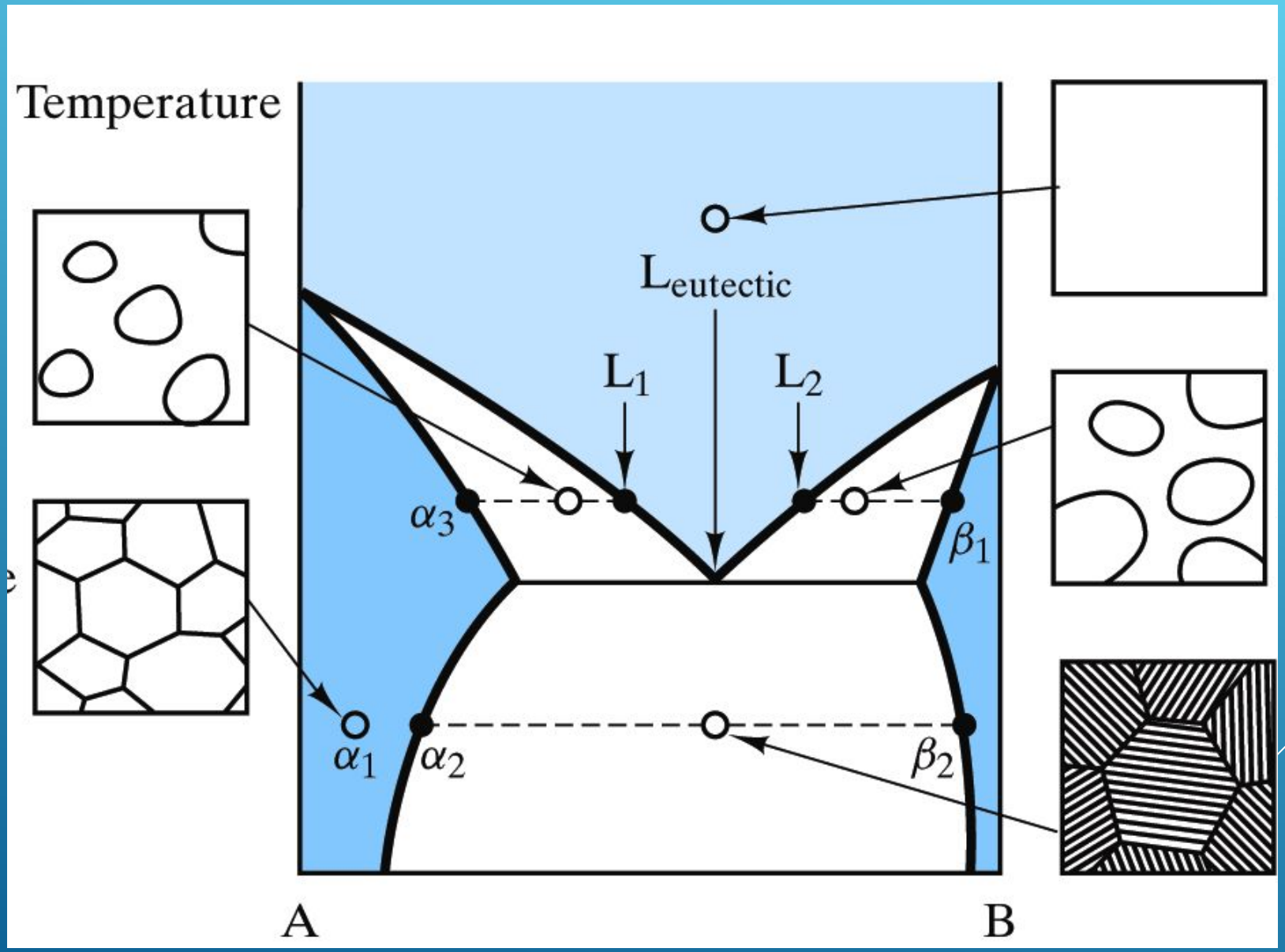
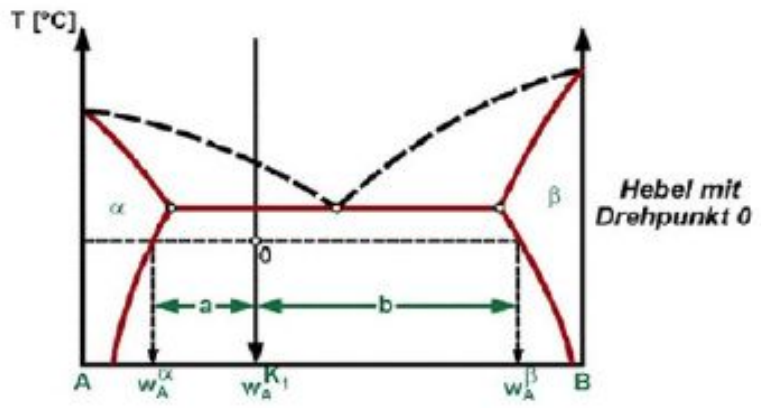


Bild 2.2–9 System mit Mischungslücke (mit Gefügebezeichnungen)

CDE	Liquiduslinie (oberhalb: Schmelze S)
CFDGE	Soliduslinie (unterhalb: alles fest)
FDG	Eutektikale
FH und *GI*	Löslichkeitslinien (Sättigungs-grenzen, Segregatlinien)

Zustandsdiagramm Grundsystem IV





Außer der Zusammensetzung, Anzahl und Art der Phasen können aus dem Zustandsschaubild auch die Mengen der im Zweiphasenraum vorhandenen Phasen ermittelt werden.

Dabei geht man davon aus, dass der Gehalt z. B. an A im α-Mischkristall (Menge m_α, Konzentration w_A^α,) und im β-Mischkristall (m_β, w_A^β) bei jeder Temperatur im Zweiphasenfeld zusammen genau so groß sein muss wie in der ursprünglichen Legierungsschmelze K_1(m_{K_1}, $w_A^{K_1}$).

Ist die Gesamtmenge (2.14)

$$m_\alpha + m_\beta = m_{K_1} \tag{2.14}$$

dann gilt, bezogen auf den A-Gehalt bei der Temperatur T_2 (2.15):

$$m_\alpha \cdot w_A^\alpha + m_\beta \cdot w_A^\beta = m_{K_1} \cdot w_A^{K_1} \tag{2.15}$$

Daraus ergeben sich (2.16) und (2.17):

$$m_\alpha = \frac{w_A^\beta - w_A^{K_1}}{w_A^\alpha - w_A^\alpha} m_{K_1} = \frac{b}{a+b} m_{K_1};\ m_\beta = \frac{a}{a+b} m_{K_1} \tag{2.16}$$

$$\frac{m_\alpha}{m_\beta} = \frac{b}{a} \tag{2.17}$$

Diese Beziehung wird in Anlehnung an die Mechanik als Hebelgesetz bezeichnet. Anstelle von Kräften werden hier Mengen eingesetzt.

HEBELGESETZ - GRUNDSYSTEM III

GRUNDSYSTEM IV- ABKÜHLUNGSKURVE DER LEGIERUNGEN K1 UND K2 SOWIE GEFÜGE VON K1

Abkühlungskurven der Legierungen K_1 und K_2 sowie Gefüge von K_1 (Bild 2.18)

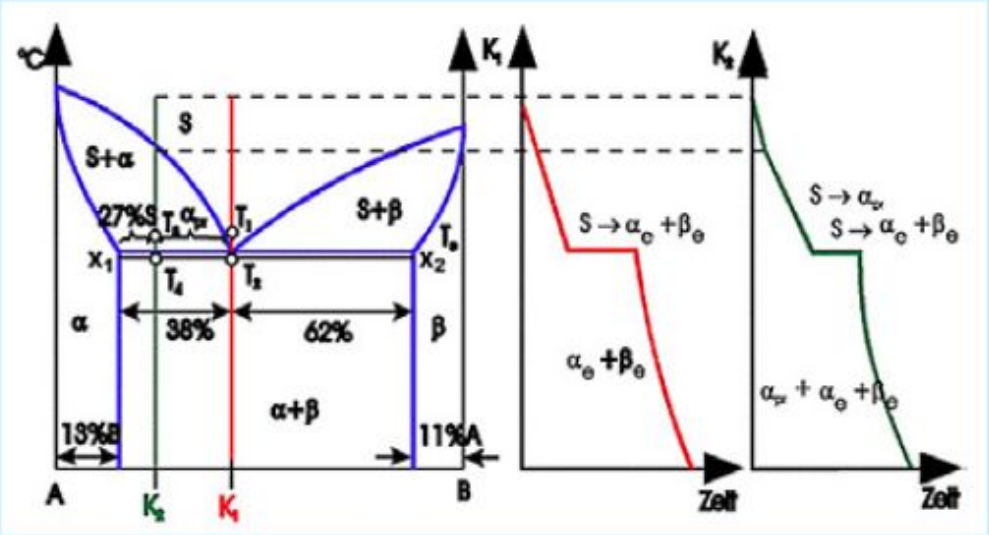


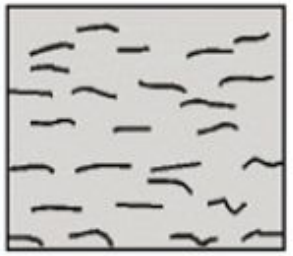
Bild 2.18
Eutektische Umwandlung

Legierung K_1 (59 % A, 41 % B)

Bei T_1 haben wir 100 % S bestehend aus 59 % A und 41 % B (Bild 2.19).

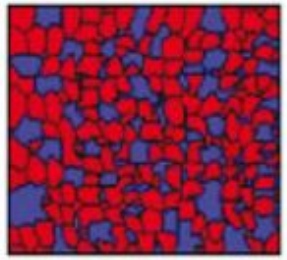
Die homogene Schmelze zerfällt bei der Erstarrung (T_e) in ein Gemenge von α_e und β_e.

Bei T_2 liegen 62 % α_e (87 % A, 13 % B) und 38 % β_e (89 % B, 11 % A) vor (Bild 2.20).



K_1 T_1

100 % S



K_1 T_2

62 % α_e

38 % β_e

Bild 2.19
Schmelze

Bild 2.20
Eutektisches Gefüge

Abkühlungskurven der Legierungen K_1 und K_2 sowie Gefüge von K_1 (Bild 2.18)

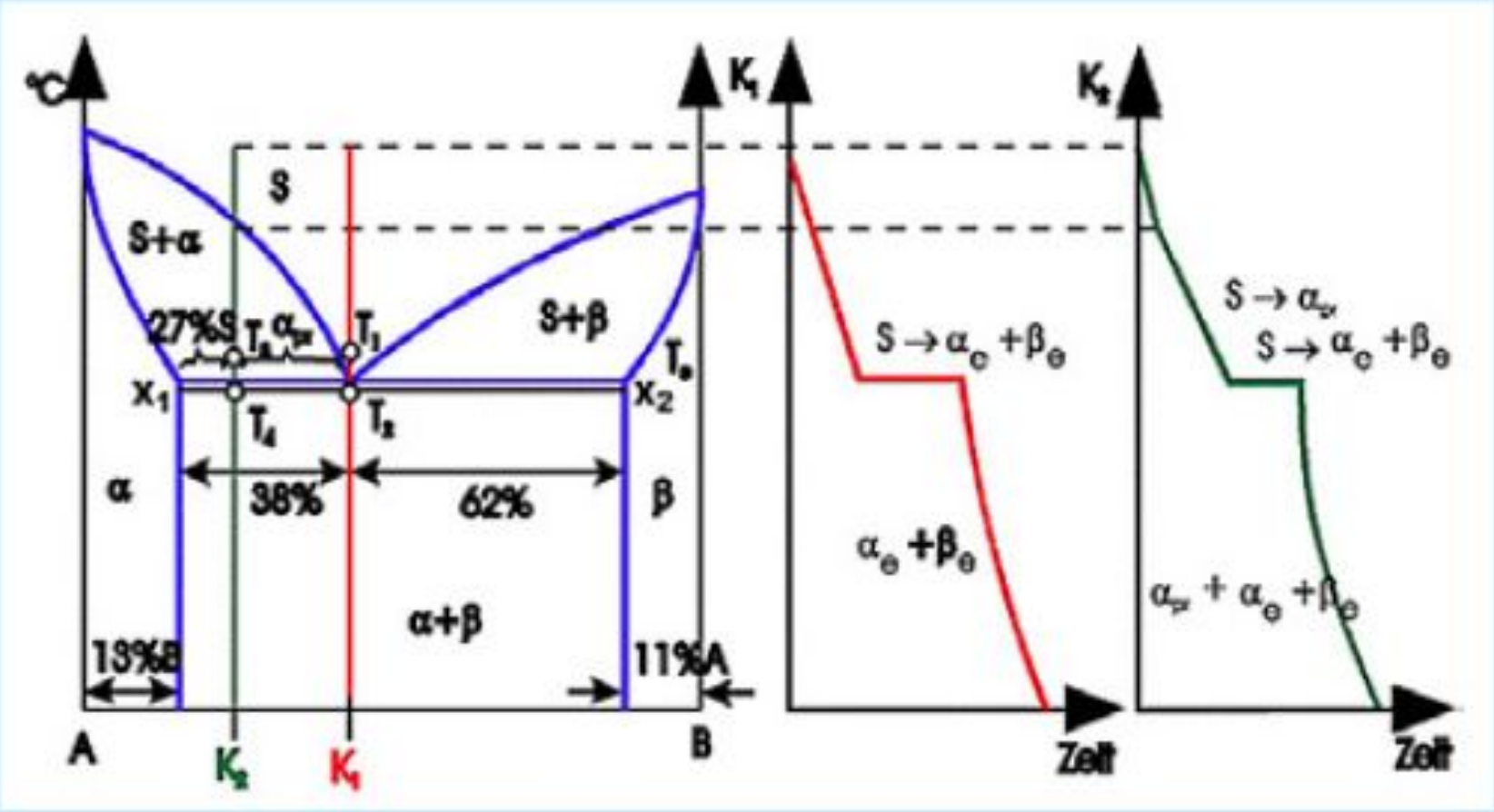


Bild 2.18
Eutektische Umwandlung

GRUNDSYSTEM IV-PHASENREAKTION UND GEFÜGE DER ERSTARRUNG DER LEGIERUNG K2

Phasenreaktionen und Gefüge der Erstarrung der Legierung K_2

Bei T_3 scheiden sich aus der Schmelze entsprechend den Hebeln 73 % α_{pr} (primär, wenn direkt aus der Schmelze) aus. Der Rest ist 27 % S (Bild 2.21.).
Diese 27 % Schmelze erstarren bei T_e eutektisch, also zu 62 % in α_e und 38 % in β_e, sodass bei T_e rund 73 % α_{pr}, 17 % α_e und 10 % β_e vorliegen (Bild 2.22).

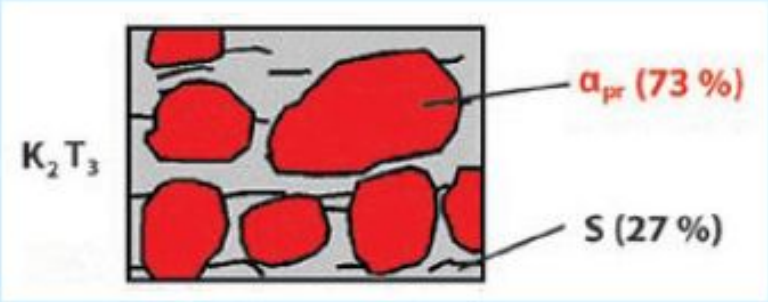


Bild 2.21
Schmelze und primäre Mischkristalle

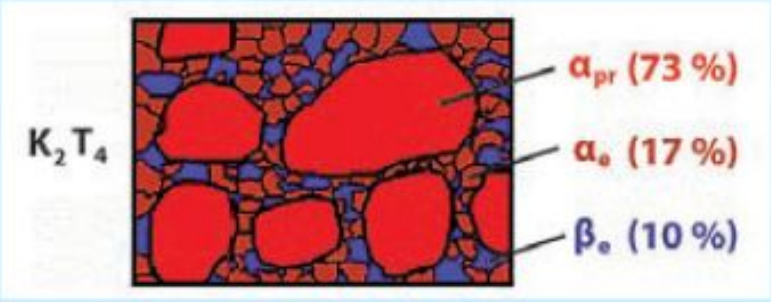


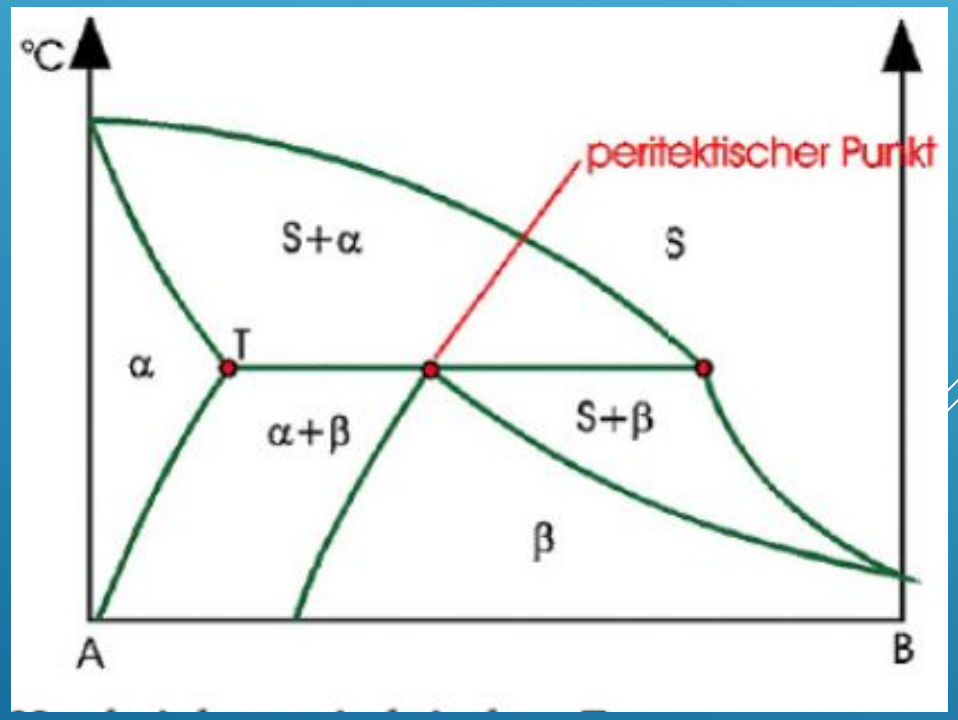
Bild 2.22
Primärmischkristalle und Eutektikum

Alle α (sowohl α_{pr} als auch α_e zwischen x_1 und x_2) in Bild 2.15 bestehen aus 87 % A und 13 % B.
Die β-Mk aus 89 % B und 11 % A.

GRUNDSYSTEM V - PERITEKTISCHE ERSTARRUNG

- Wenn die Schmelztemperaturen der Komponenten sehr verschieden hoch sind, liegt meist die Temperatur des Dreiphasengleichgewichtes dazwischen. Das 3-Phasengleichgewicht wird als peritektisch bezeichnet.

$S + \alpha_{pr} = \beta_{pr}$ (2 Phasen in 1 Phase)



GRUNDSYSTEM V – ABKÜHLUNGSKURVEN DER LEGIERUNGEN K1 UND K2

Abkühlungskurven der Legierungen K_1 und K_2

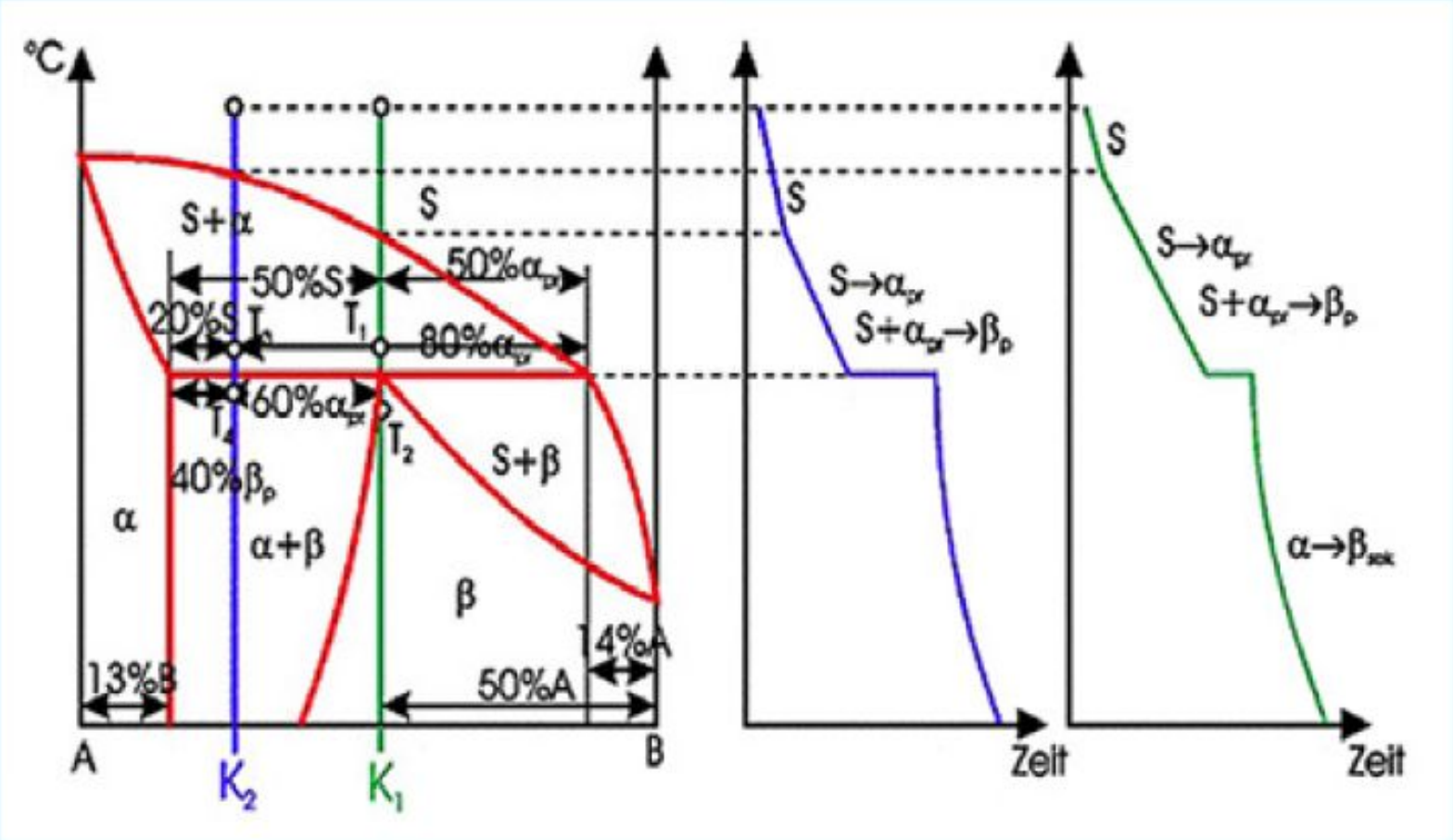


Bild 2.24 Peritektische Erstarrung

PHASENREAKTIONEN UND GEFÜGE DER LEGIERUNG K1

Phasenreaktionen und Gefüge der Legierung K_1

Aus der Schmelze scheidet sich α_{pr} aus. Bei T_1 liegen 50 % α_{pr} und 50 % S vor. Diese Schmelze reagiert bei T_p mit dem α_{pr} unter Bildung von β peritektisch (β_p). Bei T_2 sind 100 % β-Mk.

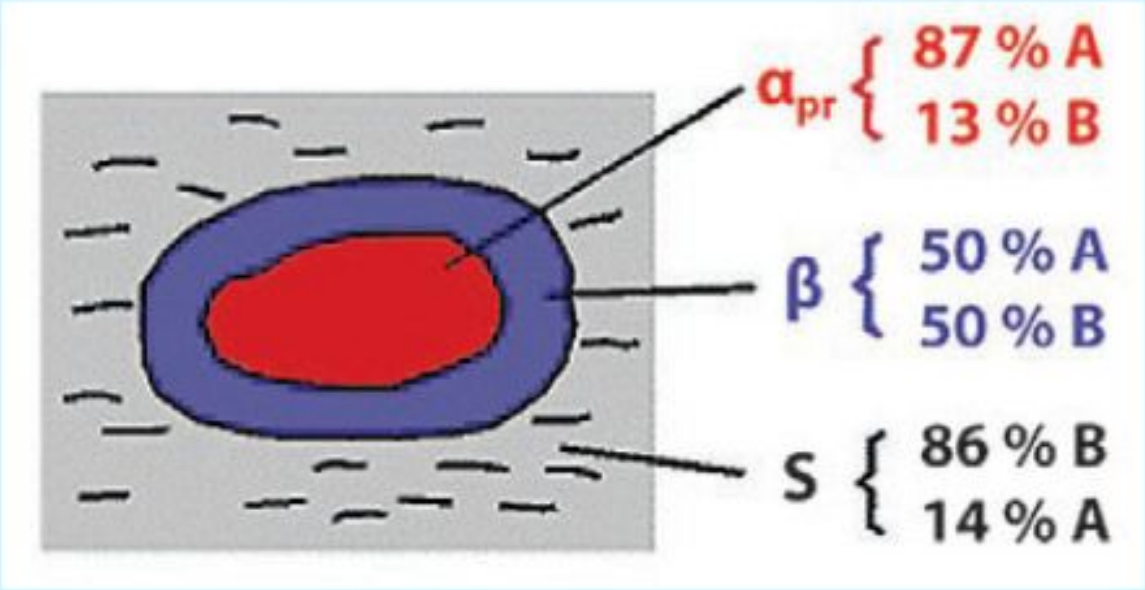
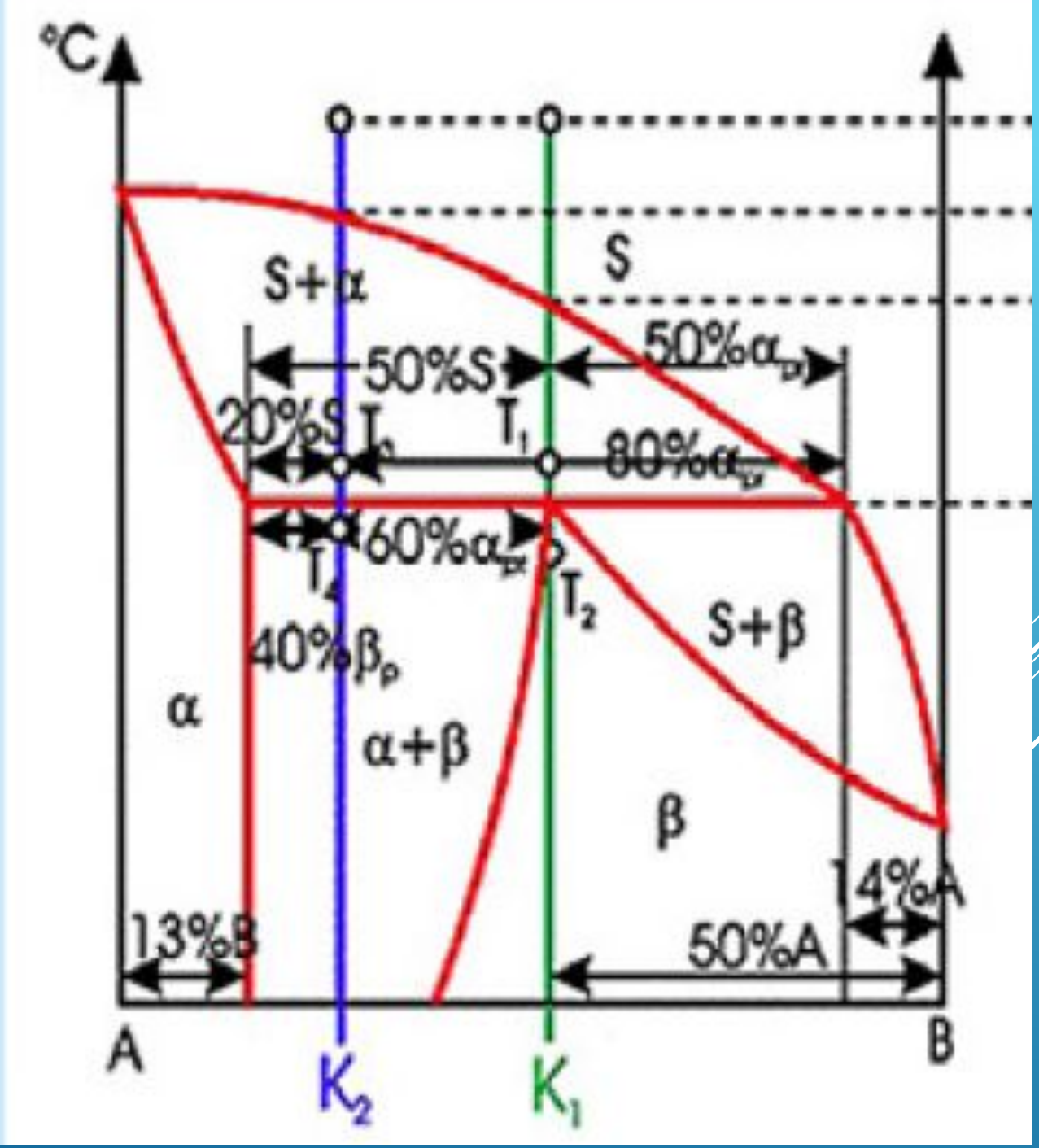


Bild 2.25
Peritektische Reaktion

Die Umsetzung der Schmelze mit dem α muss durch die β-Hüllen erfolgen.

GRUNDSYSTEM V – ABKÜHLUNGSKURVEN DER LEGIERUNGEN K1 UND K2



PHASENREAKTIONEN UND GEFÜGE DER LEGIERUNG K2

Phasenreaktionen und Gefüge der Legierung K_2

Bei T_3 liegen 80% α_{pr} und 20% S vor. Die Schmelze mit peritektischer Zusammensetzung wandelt sich teilweise unter Aufzehrung von α_{pr} in β_p um (Bild 2.26). Bei T_4 liegen 60% α_{pr} und 40% β_p vor (Bild 2.27).

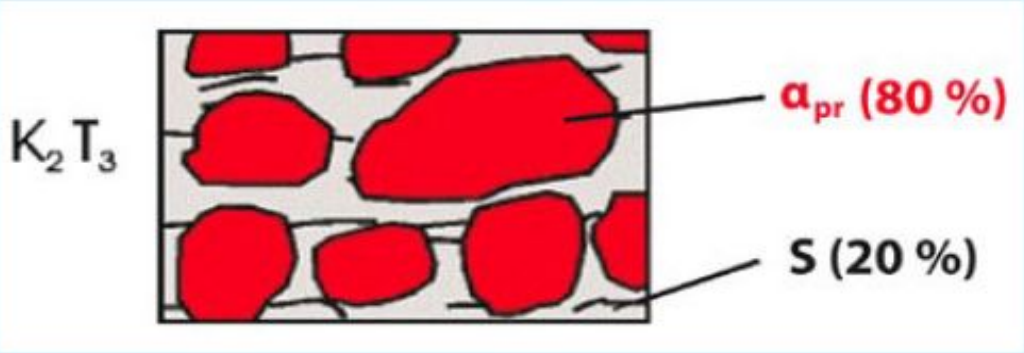


Bild 2.26
Primärumwandlung

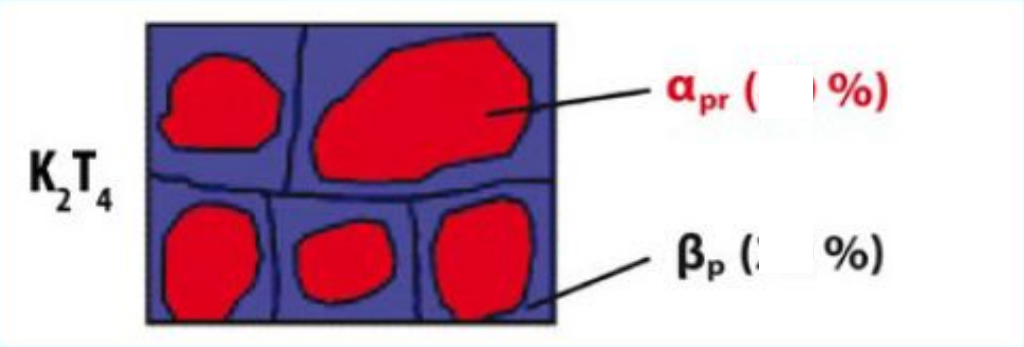


Bild 2.27
Peritektisches Gefüge

Typisch für die Gefügeänderung ist der Hof aus β_p-Mk um die α_{pr} herum (peritektisch = ringsum schmelzend).

Umwandlungen in festen Zustand

Eutektoide Reaktion

- **Analogie zur eutektischen Reaktionen**

Statt Zerfall der Schmelze in 2 feste Phasen

$$S \Rightarrow \alpha + \beta$$

jetzt

Zerfall einer festen Phase in 2 andere feste Phasen

$$\gamma \Rightarrow \alpha + \beta$$

Peritektoide Reaktion

- **Analogie zur periktischen Reaktionen**

Statt Übergang aus Schmelze und fester Phase in eine feste Phase

$$S + \alpha \Rightarrow \beta$$

jetzt Übergang von 2 festen Phasen in eine andere feste $\gamma + \beta \Rightarrow \alpha$

EUTEKTOIDE REAKTION

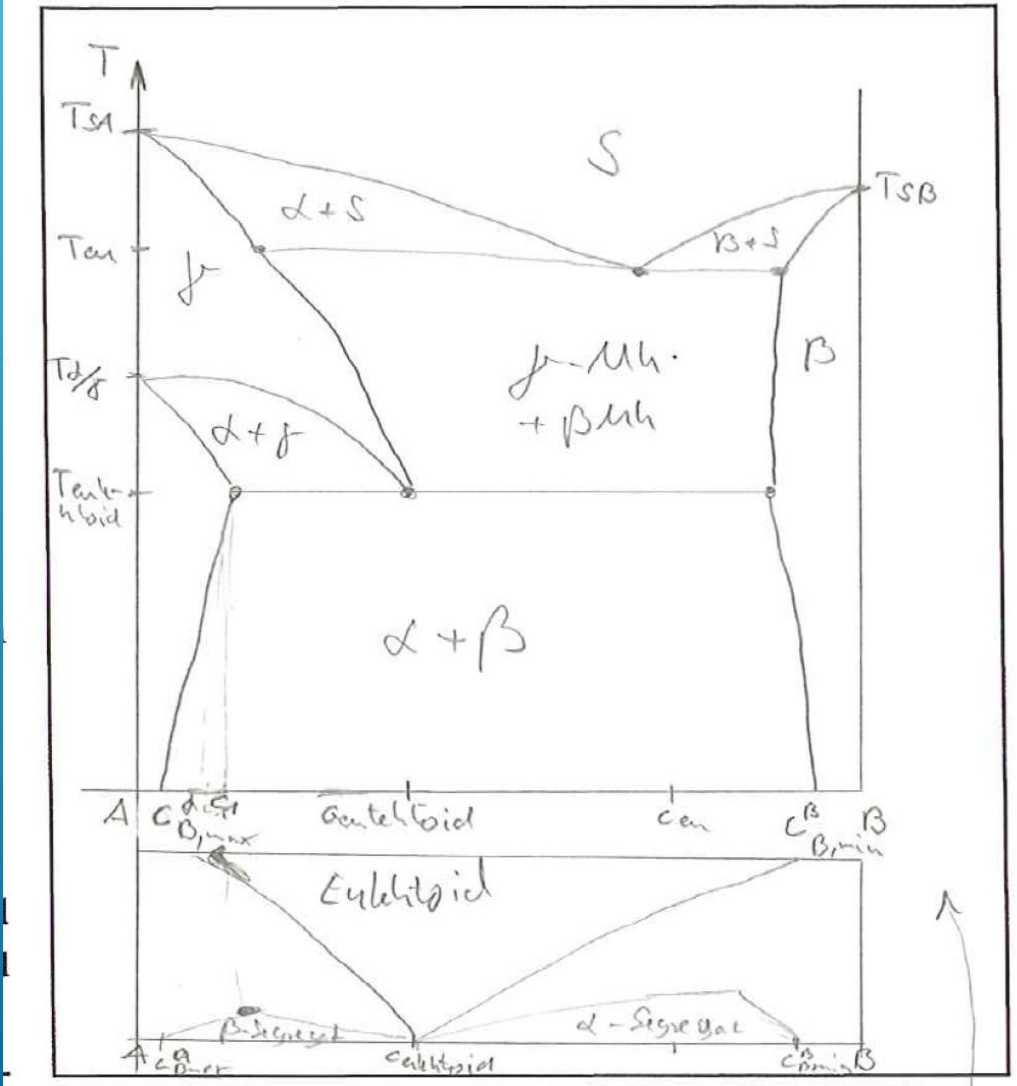


Bild 6.21: Zustandsdiagramm mit eutektoider Reaktion

PERIKTOIDE REAKTION

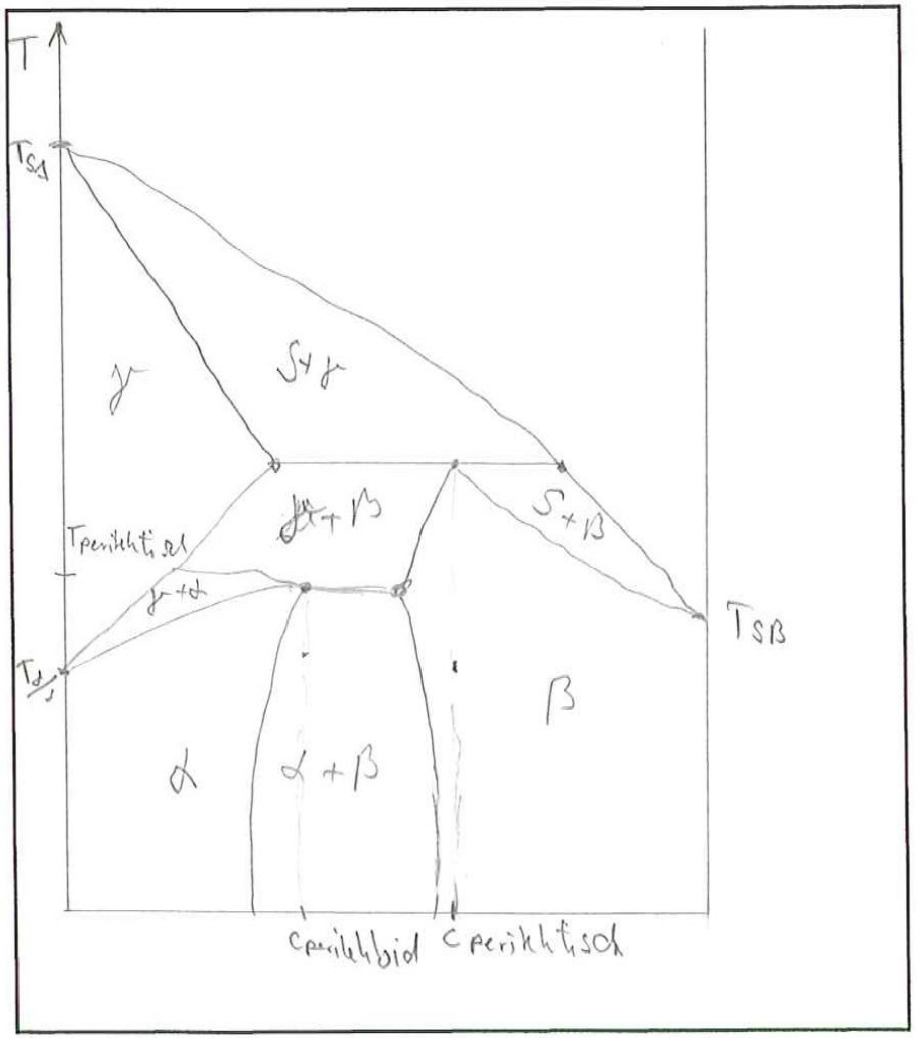


Bild 6.22: Zustandsdiagramm mit peritektoider Reaktion

ZUSTANDSDIAGRAMME CU-NI UND NIO-MGO

➡ vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand

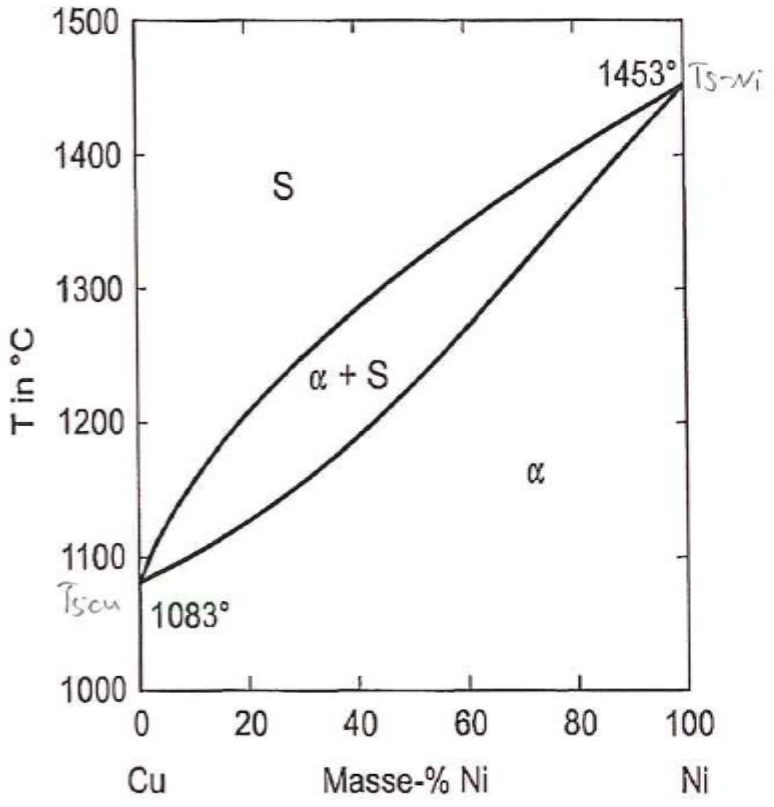


Bild 6.26: Zustandsdiagramm des Systems Cu-Ni

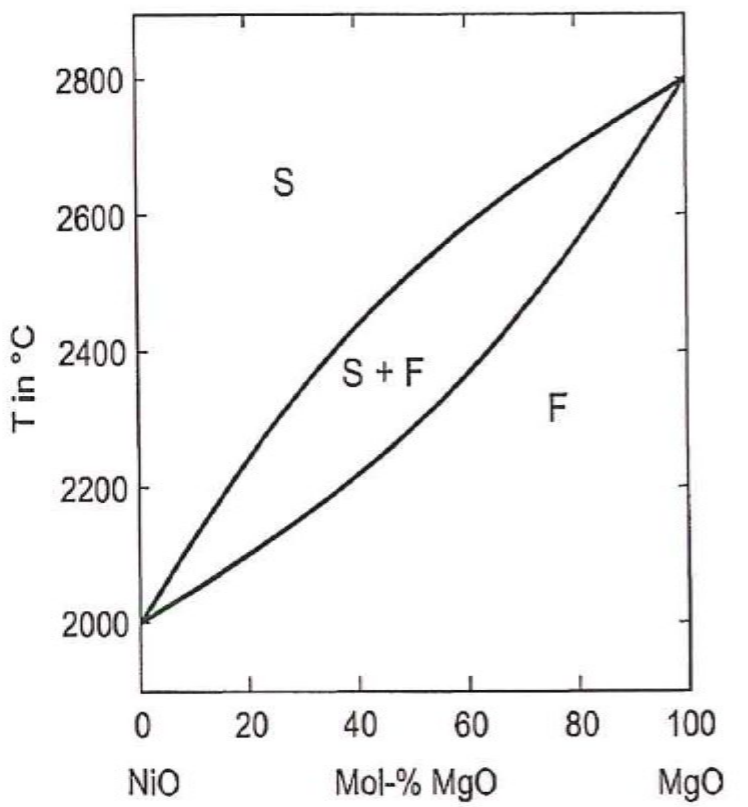


Bild 6.27: Zustandsdiagramm des Systems NiO-MgO

ZUSTANDSDIAGRAMME PB-SN UND AL2O3-Z

➡ eutektische Reaktionen und beidseitig beschränkte bzw. keine Löslichkeit im festen Zustand

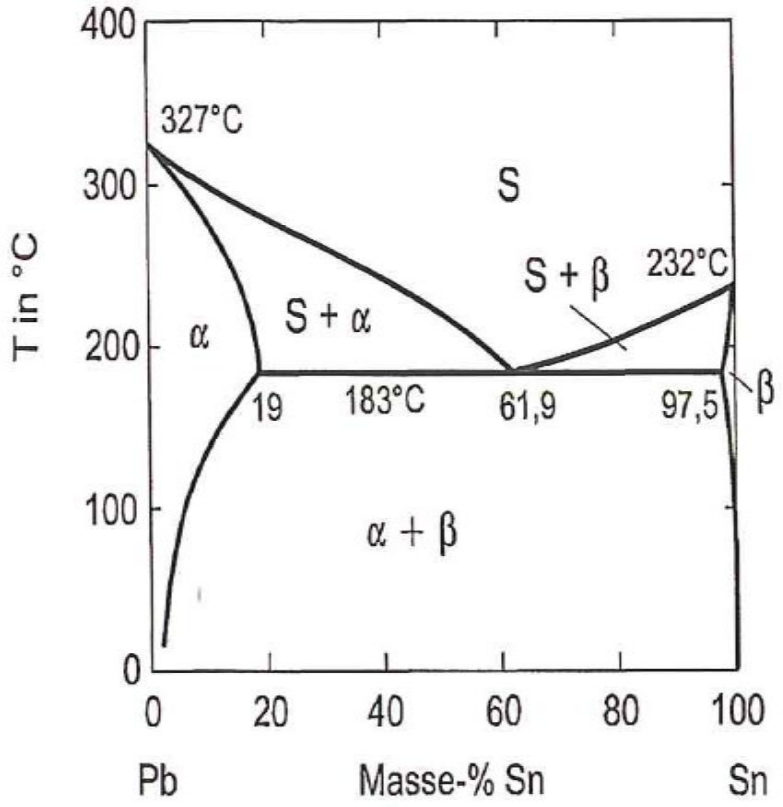


Bild 6.28: Zustandsdiagramm des Systems Pb-Sn

ZUSTANDSDIAGRAMME PB-SN UND AL2O3-ZRO2

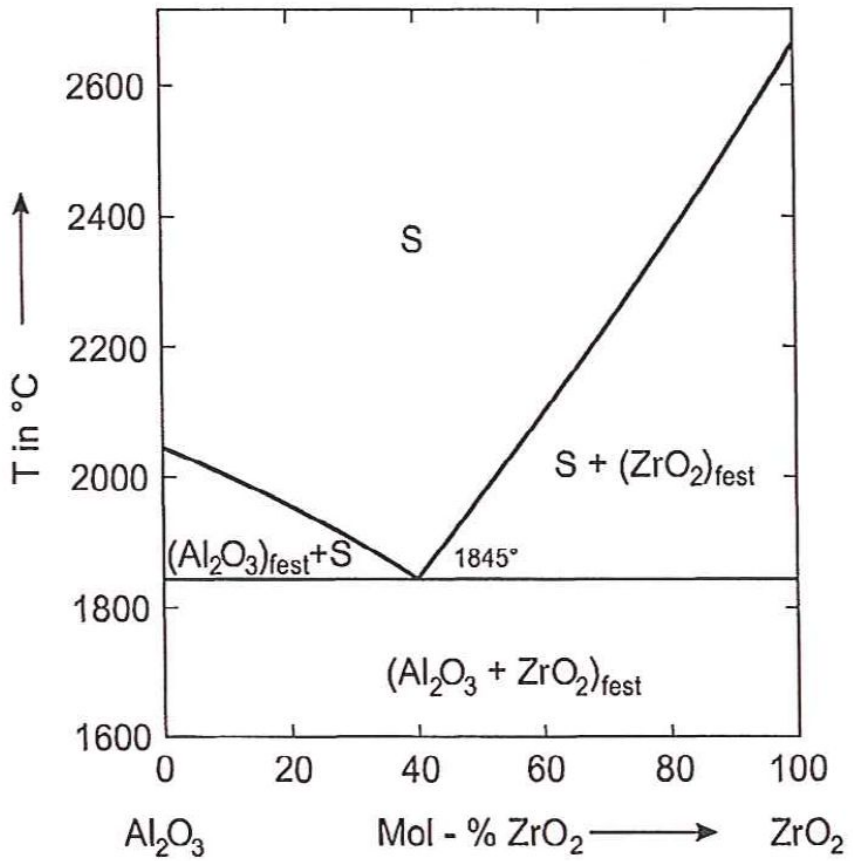


Bild 6.29: Zustandsdiagramm des Systems Al_2O_3-ZrO_2

ZUSTANDSDIAGRAMME AG-PT

peritektische Reaktion

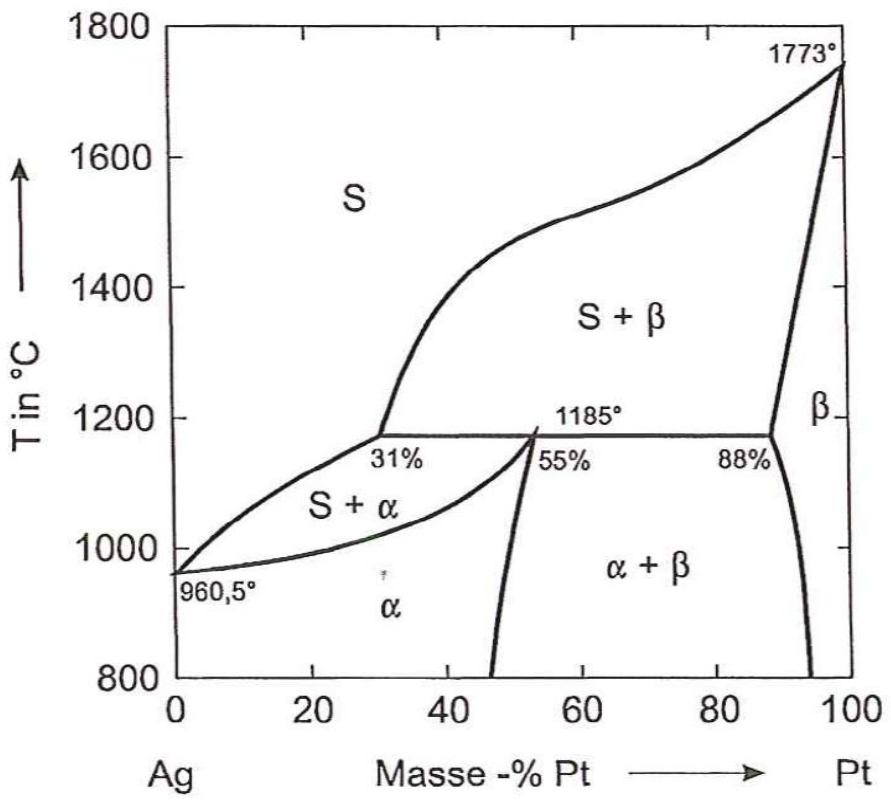


Bild 6.30: Zustandsdiagramm des Systems Ag-Pt

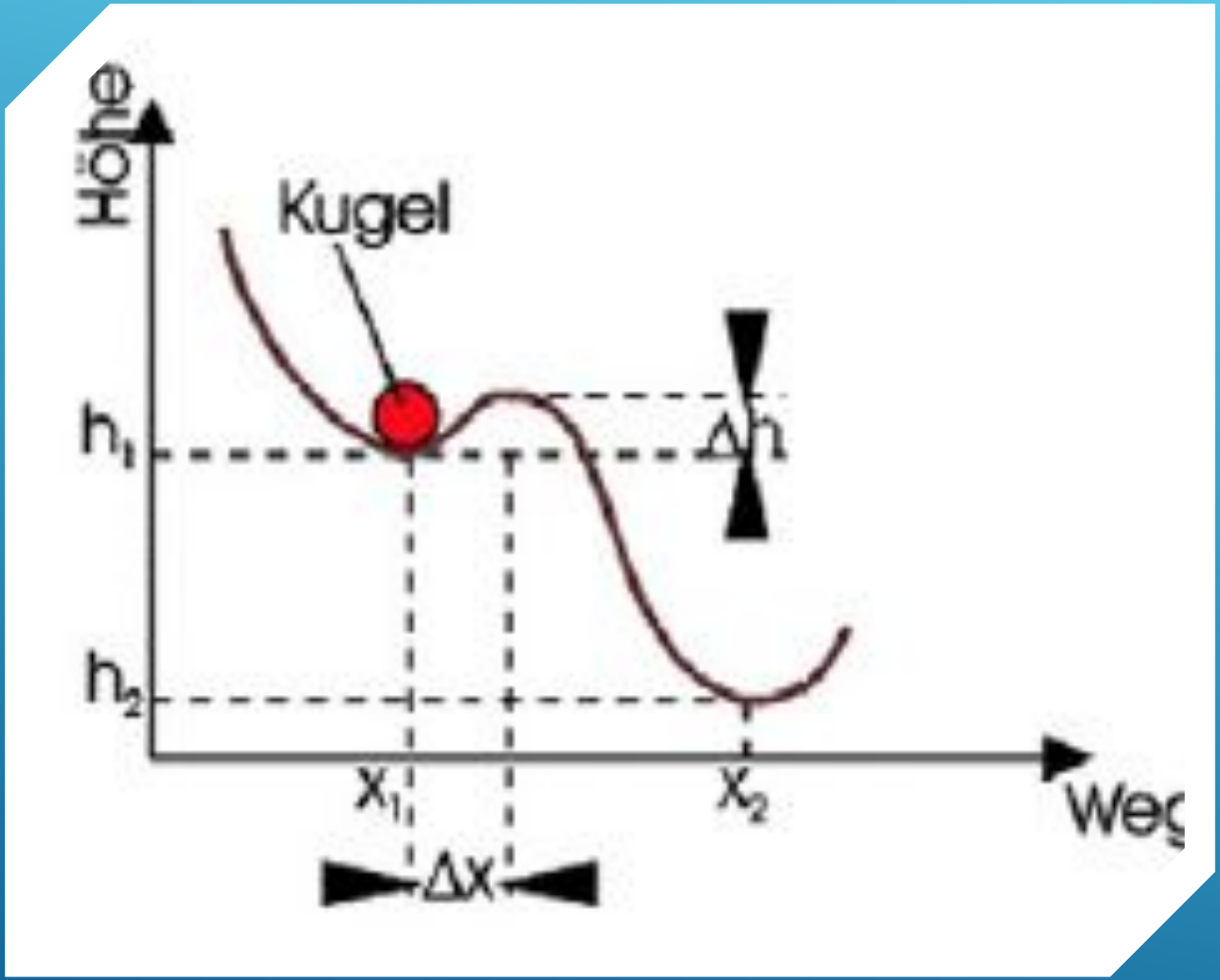
ÜBUNGEN

α-Fe Ferrit	911 °C (A_3) ⇄	γ-Fe Austenit
γ-Fe Austenit	1392 °C (A_4) ⇄	δ-Ferrit
δ-Ferrit	1536 °C ⇄	Schmelze

	α-Fe	γ-Fe	δ-Ferrit
Kristallgitter	krz	kfz	krz
Gitterparameter	0,286 nm bei 20 °C	0,3649 nm bei 950 °C	0,293 nm bei 1425 °C
Atomdurchmesser	0.254 nm		
Magnetische Eigenschaften	bis 768 °C ferromagnetisch	para-magnetisch	para-magnetisch

REALES ZUSTANDSDIAGRAMM: FE-FE_3C

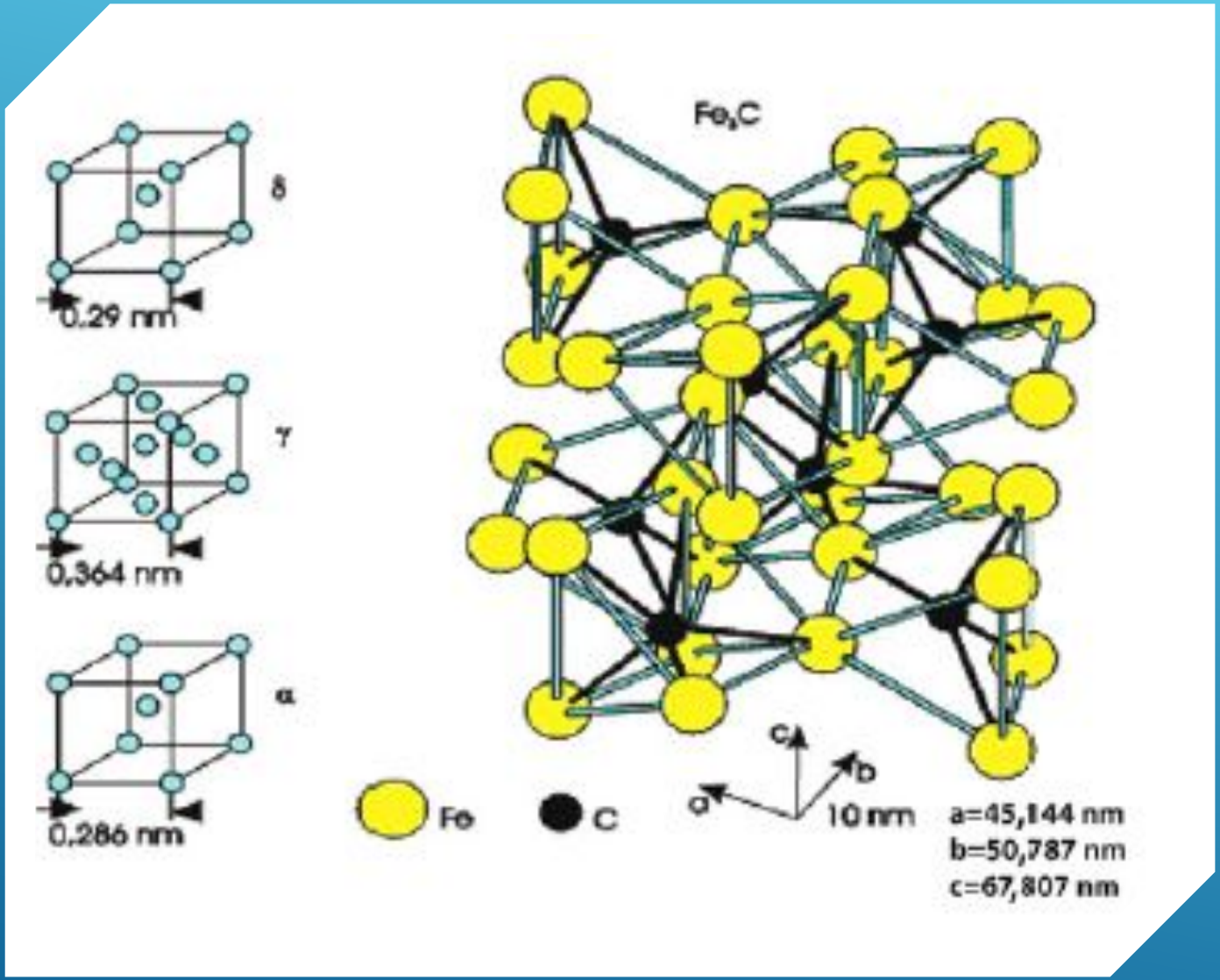
- Eisen
  - Das Eisen ist das 26.Element im Periodensystem der Elemente
  - Es gehört zu den Übergangsmetallen
  - @p=1atm, schmilzt das Eisen bei …….°C und verdampft bei …….°C
- Allotrope Formen des Eisen



METASTABILES FE-C-SYSTEM ODER STABILES : FE-FE_3C SYSTEM

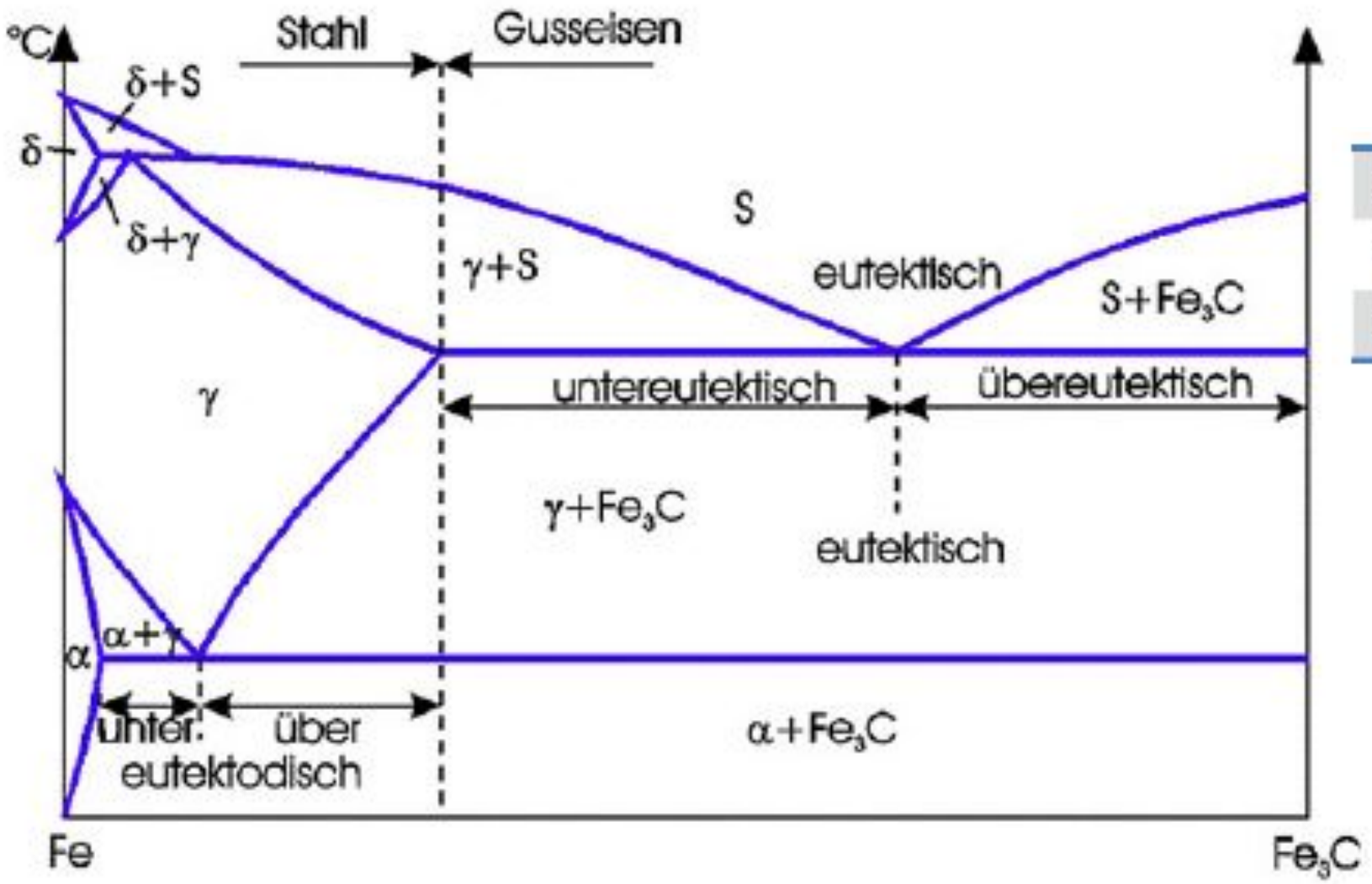
- Fe kann mit Kohlenstoff sowohl
  - ein metastabiles GG (Zementit)
  - ein stabiles GG (Graphit) bilden

- Obwohl Graphit die stabile Form ist, scheidet sich leichter Fe_3C aus, da die Bildung von Zementit durch Diffusion auf viel kürzeren Wegen als bei der Graphitbildung erfolgt.



METASTABILES FE-C-SYSTEM ODER STABILES FE-FE_3C SYSTEM

- Im Gegensatz zum stabilen System tritt im metastabilen System der Kohlenstoff in der intermetallischen Verbindung Fe3C



- Dreiphasenräume

Peritektikum	$\delta + S$	1493 °C	$\rightarrow$	γ
Eutektikum	S	1147 °C	$\rightarrow$	$\gamma + Fe_3C$
Eutektoid	γ	723 °C	$\rightarrow$	$\alpha + Fe_3C$

METASTABILES FE-C-SYSTEM ODER STABILES : FE-FE_3C SYSTEM

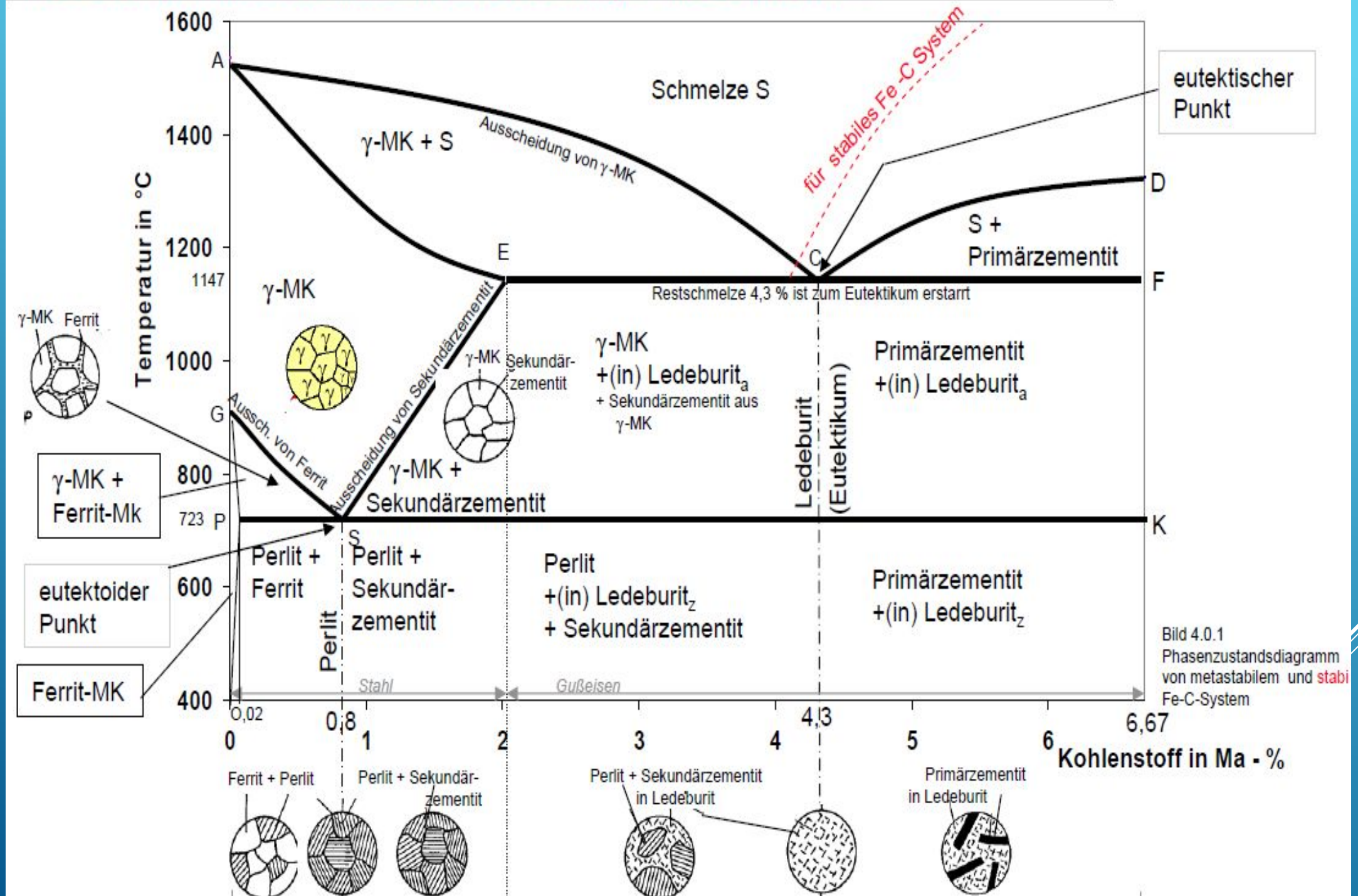


Bild 4.0.1
Phasenzustandsdiagramm von metastabilem und stabi
Fe-C-System

WÄRMEBEHANDLUNG DER EISENWERKSTOFFE

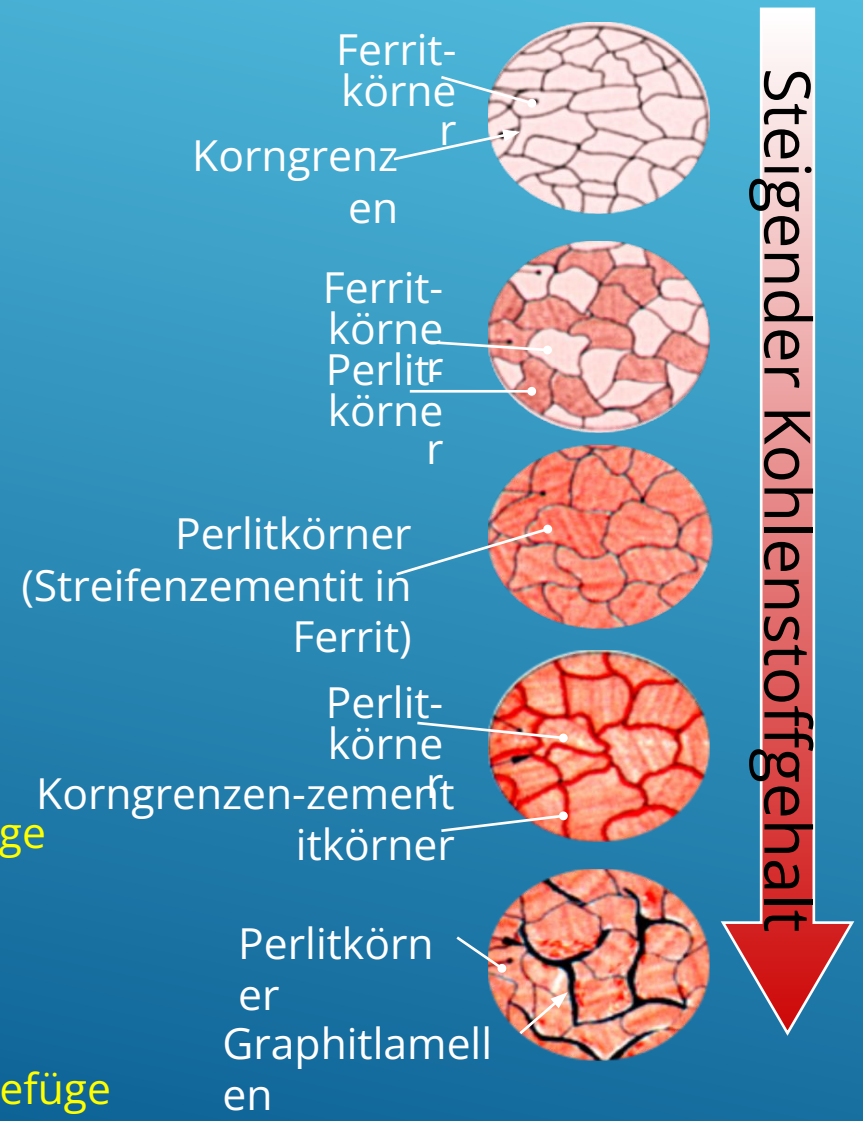
a) technisch reines Eisen
Ferrit-Gefüge

b) Eisen mit 0,5% Kohlenstoff
Ferrit-Perlit-Gefüge

c) Eisen mit 0,8% Kohlenstoff
Perlit-Gefüge

d) Eisen mit 1,6% Kohlenstoff
Perlit-Zementit-Gefüge

e) Eisen mit 3,5% Kohlenstoff
Graphitlamellen in perlitischem Grundgefüge



Eisen mit bis zu 2,06% C nennt man Stahl

Eisen mit mehr als 2,06% C wird Gusseisen genannt.

Austenit:

•feste Lösung des γ-Fe

•Mischkristall aus Eisen und Kohlenstoff; der Kohlenstoff ist gelöst (maximale Löslichkeit beträgt 2,06 % bei 1147 °C)

•Gitter: kfz

•technologische Eigenschaften:
- geringe Festigkeit
- geringe Härte
- sehr gute Zähigkeit

•unmagnetisch

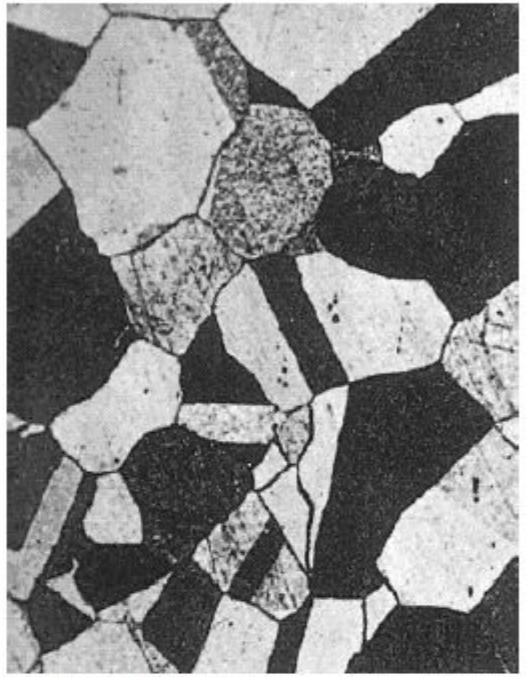


Bild 4.0.2 Gefüge von Austenit

Ferrit:

•feste Lösung des α-Fe

•Mischkristall aus Eisen und Kohlenstoff; der Kohlenstoff ist gelöst (maximale Löslichkeit beträgt 0,02 % bei 723 °C)

•Gitter: krz

•technologische Eigenschaften:
- geringe Festigkeit
- geringe Härte
- sehr gute Zähigkeit

•magnetisch

Zementit:

•auch genannt: Eisenkarbit

•feste Verbindung aus Eisen und Kohlenstoff mit der Formel Fe_3C

•bildet eine molekulare Verbindung aus Eisen und Kohlenstoff

•Gitter: orthorhombisch

•technologische Eigenschaften: - sehr hohe Festigkeit und sehr hohe Härte
- geringe Zähigkeit
- gute Verschleißbeständigkeit

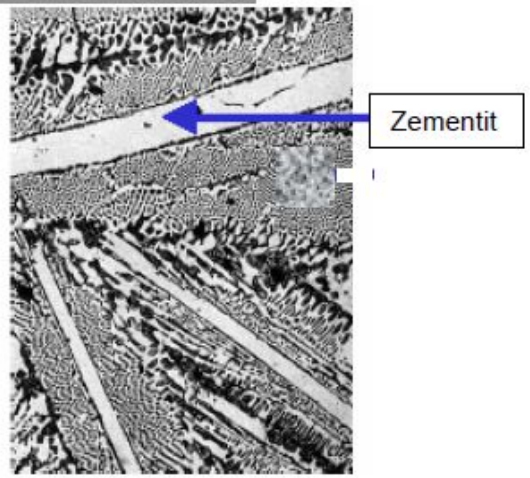


Bild 4.0.4 Gefüge von Zementit

Perlit:

•lamellares Gefüge aus Ferrit und Zementit in streifenförmiger Anordnung

•entsteht durch eutektoiden Zerfall des Austenits bei 723 °C

•mit steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt der Anteil an Perlit zu

•reiner Perlit entsteht bei einer Legierung mit 0,8 % C bei 723 °C

•technologische Eigenschaften: - hohe Festigkeit
- hohe Härte
- mittlere bis gering Zähigkeit
- gute Verschleißbeständigkeit

Bild 4.0.5 Gefüge von Perlit

Ledeburit:

•entsteht aus der Schmelze bei 1147 °C und 4,3 Ma-% C

•eutektisches Gefüge aus Austenit und Zementit für T>723 °C
mit steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt der Anteil an Ledeburit zu

•eutektisches Perlit und Zementit für T<723 °C

•technologische Eigenschaften:
- höchste Festigkeit
- höchste Härte
- geringe Zähigkeit

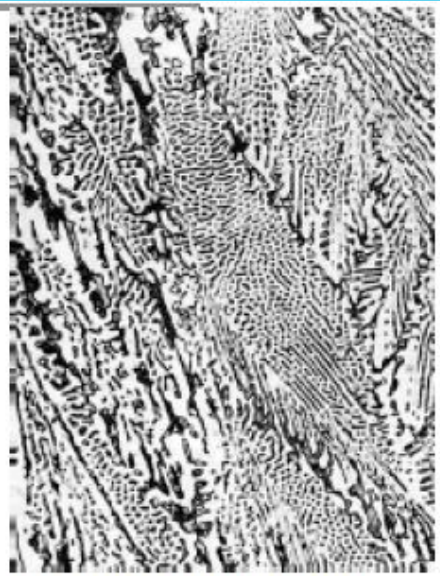


Bild 4.0.6 Gefüge von Ledeburit

Graphit:

C (elementar); hexagonales Molekülgitter; Festschmierstoff

Stoffwerte der Gefügebestandteile:

Gefüge	C-Gehalt in Ma - %	Brinellhärte	Zugfestigkeit in N/mm²	Bruchdehnung in %
Ferrit	~ 0	70	250	50
Perlit 1)	0,8	300	800	5
Ledeburit 2)	4,3	450	1.200	1
stab. Eutektikum 3)	4,3	120	200	2
Zementit 4)	6,7	>600	2.000	0

1) nur bei metastabiler Erstarrung - also nur als Bestandteil von Stahl
2) nur bei metastabiler Erstarrung - also nur Bestandteil von Weißguss
} α-Fe + Fe_3C

3) Bestandteil stabil erstarrten grauen Gusseisens
95,7 % α-Fe + 4,3 % Graphit

4) nur bei metastabiler Erstarrung - also nur als Bestandteil von Stahl und Weißguss

•Beschreibt Struktur und Gefüge von Stahl und Gusseisen bei langsamer Abkühlung

•Stahl (unlegiert): C<2 % (nur geringe Mengen Begleitstoffe), ohne Nachbehandlung schmiedbar

•Gusseisen: C = 2...4,5 (6,67)%, mit Eutektikum (Ledeburit)

•Wichtige Kenndaten der beiden Fe-Modifikationen

- γ-Fe (Austenit) kfz
  - maximale C-Löslichkeit 2 % bei 1147 °C
  - C- Löslichkeit fällt mit T
  - viele Gleitsysteme, deshalb (oberhalb 723 °C) gut verformbar
- α-Fe (Ferrit) krz
  - maximale C-Löslichkeit 0,02 % bei 723 °C (10^{-7} % bei 20 °C)
  - weniger Gleitsysteme, versprödet bei Kälte

•bei Abkühlung unter: - eutektischen Punkt → Ledeburit
- eutektoiden Punkt → Perlit

feinkristallines zwei-phasiges Gemenge

•Verringerung der C-Löslichkeit mit fallender Temperatur führt zu Ausscheidungen mit zwei Möglichkeiten:

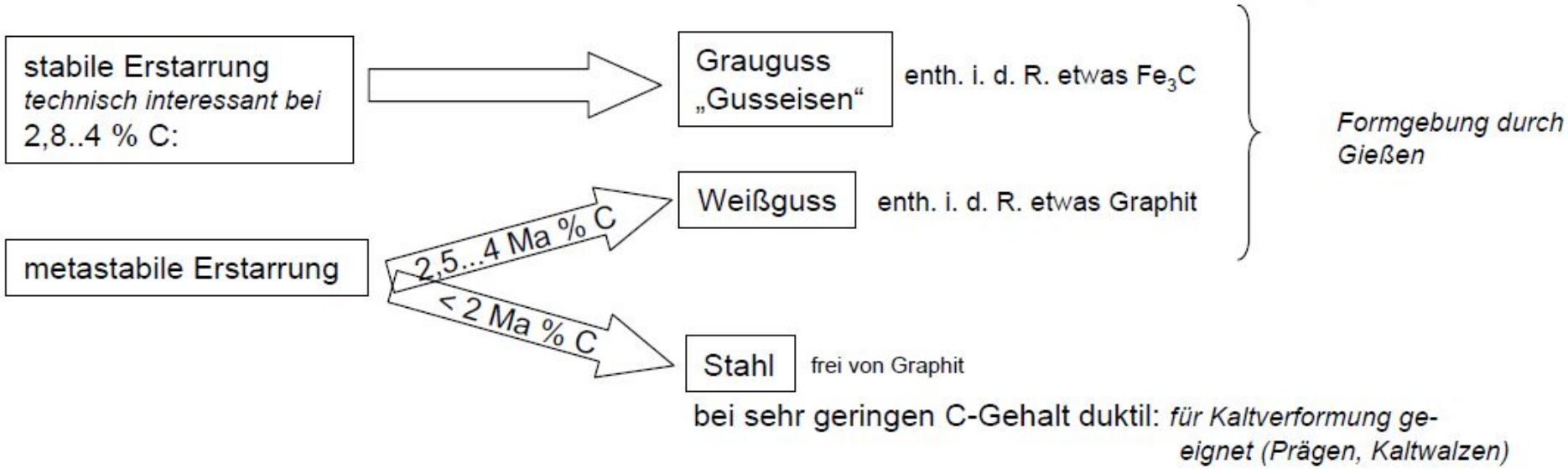
Stabilität

- als Fe_3C = Eisencarbid (Zementit) wenn Si niedrig und Mn hoch ist:
  metastabiles Diagramm
  Stähle, weißes Roheisen, Hartguss, Temper(roh)guss

- als Fe und C (Graphit) wenn Si hoch und Mn niedrig ist
  stabiles Diagramm:
  graues Roheisen, Grauguss, Kugelgraphitguss

wenn C>2% kann Fe_3C nach langen Glühzeiten in Fe und C zerfallen;
wenn C<2% ist Fe_3C beständig

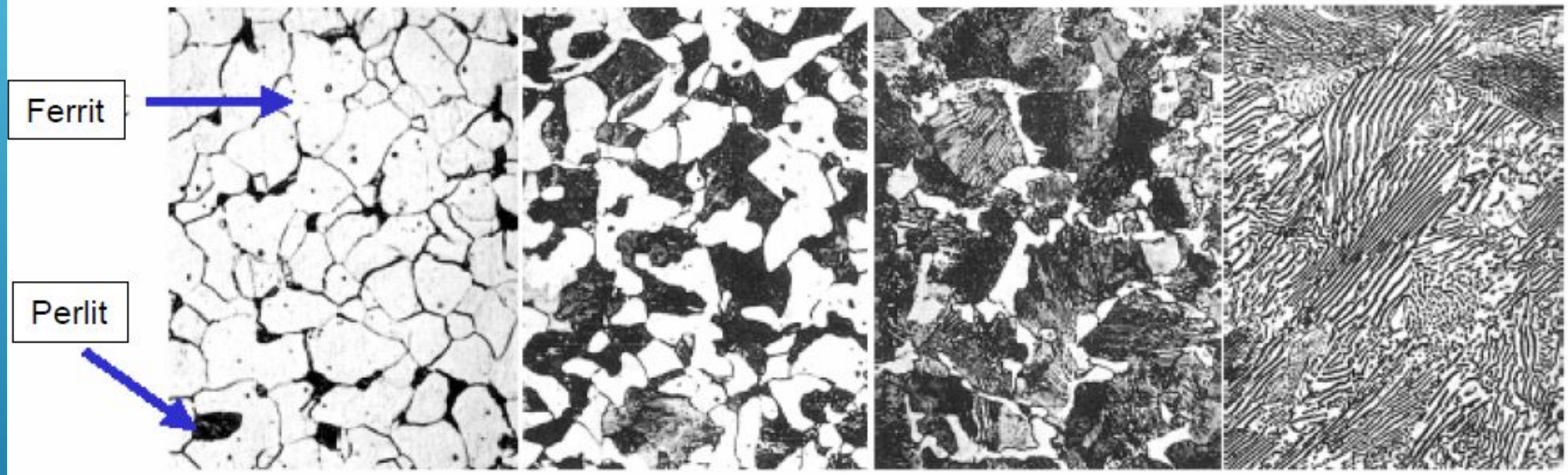
stabile Erstarrung - metastabile Erstarrung



Eisensorte	üblicher C-Gehalt in Ma - %	übliche Wärmebehandlung
Stahl für allgemeinen Stahlbau	0,1 ...0,4	keine
Maschinenbaustahl	0,15...0,6	keine
Einsatzstahl	0,06...0,18	eingesetzt und gehärtet
Vergütungsstahl	0,18...0,6	gehärtet und hoch-angelassen
Werkzeugstahl	0,6...1,3	gehärtet und angelassen
Stahlguss	0,1...0,4	spannungsarm geglüht
Gusseisen	2,5...4,5	i.d.R keine
Temperguss, weiß	2,5 ...4,5/~0,8	getempert mit O_2 -Zufuhr
Temperguss, schwarz	2,5...4,5	getempert, gasdicht

Tafel 4. 1 ausgewählte unlegierte Eisenwerkstoffe

Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt C < Ma - 0,8 %

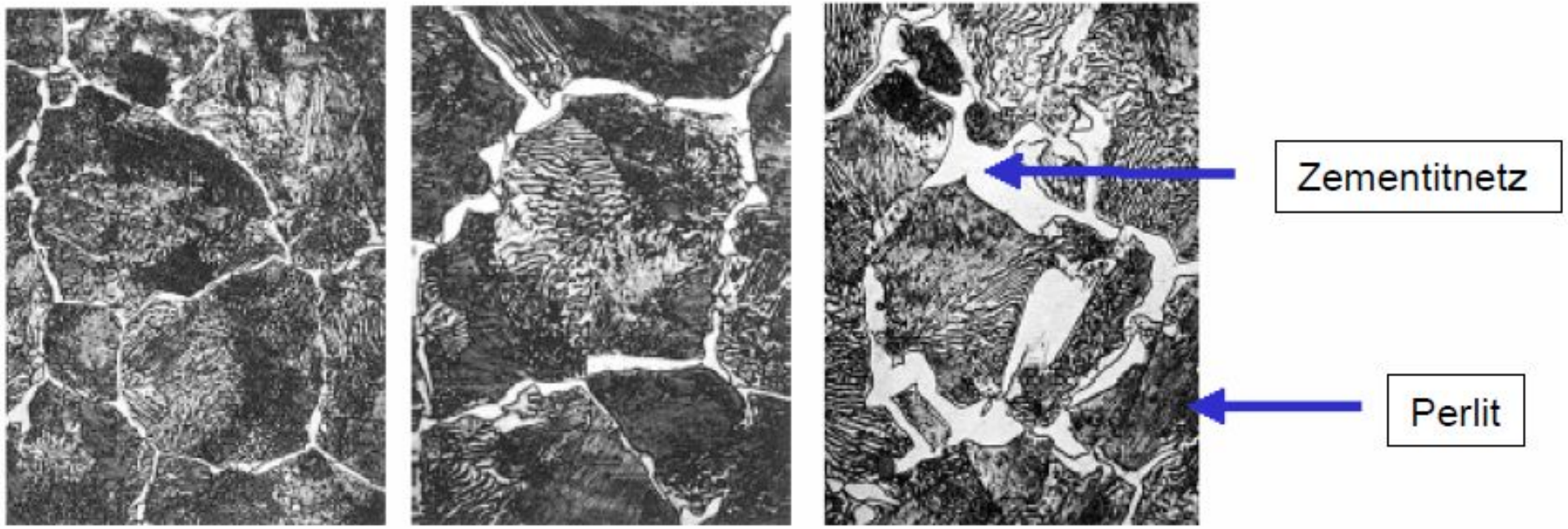


0,1 % C	0,4 % C	0,6 % C	0,8 % C
12,5 % Perlit	50 % Perlit	75 % Perlit	100 % Perlit

Bild 4.1.1 Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt < 0,8 Ma - %

- bei untereutektoiden Stählen mit C < 0,8 % entstehen zuerst Ferritkörner dann Perlit
- gute Festigkeit und Zähigkeit
- Anwendung als Bau- und Rohrstahl

Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt C > Ma -0,8 %

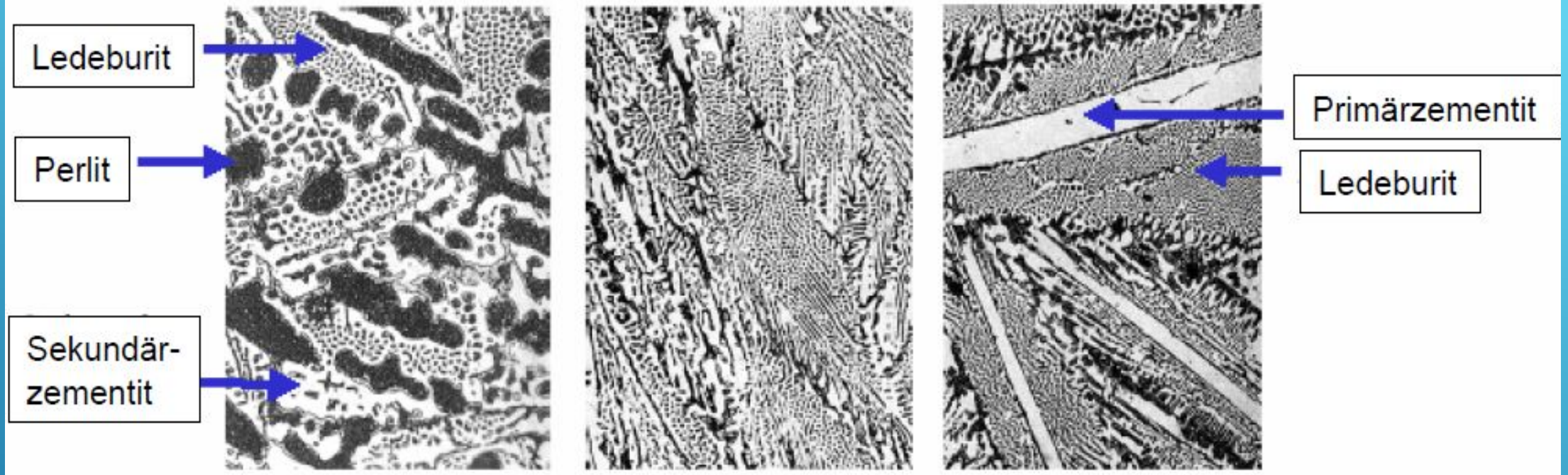


1,1 % C 1,3 % C 1,5 % C

Bild 4.1.2 Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt > 0,8 Ma - %

- bei übereutektioiden Stählen mit C > 0,8 % entsteht zuerst ein Netzwerk aus Sekundärzementit an den Austenitkorngrenzen
- dann entsteht bei 723 °C Perlit
- Anwendung als Werkzeugstähle

Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt C > Ma - 2 %



3 % C	4,3 % C	5,0 % C
untereutektisches	eutektisches Roheisen	übereutektisches

Bild 4.2.1 Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt > 2 Ma - %

- nicht bearbeitbar, verschleißfest - Hartguss
- Fe_3C kann durch Tempern in Graphit umgewandelt werden

4.2 Roh- und Gusseisen mit mehr als 2 % C

•Vorteil gegenüber Stahl: tiefer Schmelzpunkt → Kosteneinsparung bei:
(→ 2,8... 4 Ma-%)

- Öfen
- Einrichtungen
- Energieeinsatz

•Erstarrung:

stabile Erstarrung

- langsame Abkühlung
- Si (Silizium)-Gehalt hoch

Grauguss „Gusseisen“ *graue Bruchfläche:* Graphit

enth. i. d. R. etwas Fe_3C

metastabile Erstarrung

- schnelle Abkühlung
- Mn (Mangan)-Gehalt hoch

Weißguss *weiße Bruchfläche:* Fe_3C

enth. i. d. R. etwas Graphit

jede Mischung möglich

•Werkstück mit 2 Zonen:
- verschleißfeste Außenfläche: durch schnelle Abkühlung
- zähe Innenzonen: durch langsame Abkühlung