

WuF Zusatzinformationen:

Basisjahr 2011

Werkstoffe und Fertigung - Formelsammlung

Basisjahr 2010

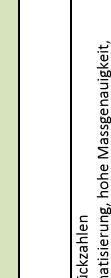
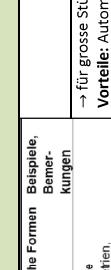
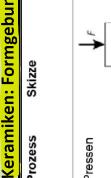
Wärmebehandlungen:

Verfahren	Festigkeit	Wann machen?	Phasenumwandl.?	Notizen
Rekratall.-Glühen	I: zerstörung Verfest.	Nach Kaltverformung (Aufhebung Effekte)	Nein	
Normalglühen	I: feines Korn	Nach Walzen → Feinkorn	Ja	Heute schwierig: Multifunktionsbauteile
Weichglühen	I: weicher Zustand	Vor Walzen, Stanzen → besser verformbar	Beides möglich	
Spannungsarmgl.	→ kein Einfluss	Nach Walzen, Schweißen (Vor Zerspanung)	Nein	
Diffusionsglühen	I: Schalenz. weg	Nach Gießen gegen Segerung	Ja	
Härteln	I: Prinzip	Je nach Verfahren, oft gegen Verschleiss	Immer (per Def.)	

Eigenschaften verschiedener Typen C

Ferrit: relativ weich und korrosionsanfällig. Unterhalb der Curie-Temperatur (T_c für Stahl: 768°C) ferromagnetisch, darüber paramagnetisch
Perlit: lamellar angeordnetes, eutektoides Phasengemisch aus Ferrit und Zementit. Bildet sich durch abwechselnd C-arme/reiche Lamellen
Sorbit: Veralteter Begriff, feinstreifiger Perlit, entsteht beim Anlassen von Martensit, feines nadelförmiges Strukturbild, Eigensch. ähnlich Bainit
Toosott: Begriff veraltet, entsteht bei hohem ν_{bulk} (zu schnell für Diff., zu langsam für Martensit), rosettenförmige Struktur
Bainit: Zwischenstufengefüge zw. Perlit und Martensit; besteht aus Ferrit und Zementit. Verminderte Eigenspannungen, Erhöhung Zähigkeit → Unterer Bainit: niedriger Ferritanteil, Carbid in 60° Winkel dazu
C-Martensit: Ferromagnetisches, metastabiles Gefüge, entsteht diffusionslos durch Abschrecken von Austenit. Sehr hart
Graphit: Kohlenstoff in Reinform, säurebeständig, diamagnetisch, stark anisotrop bez. Härte und elektrischer Leitfähigkeit
Austenit: Nichtrostende Wirkung in Stählen, geringe Härite, Festigkeit steigt stark durch Kaltverf., schlecht zerspanbar
Zementit: metastabile Verbindung Fe_3C in Stahl und weissem Gusseisen. Sehr hart, verschleißfest, spröde, schlecht verformbar, Dichte geringer als Eisen, magnetisch, Magnetische Wirkung geht bei Erwärmung über 215°C verloren

Keramiken: Formgebungsverfahren für Sintern

Prozess	Skizze	Prozessbeschreibung	Ausgangsmaterial	Typische Formen Beispiele, Bemerkungen
Pressen		Pulverhaft wird durch einrichtigen Druck verdichtet und in Form gebracht	Granulat (Pulver)	einfache Geometrien, Dicke > 0,5 mm
Isostatiche Pressen		Pulverhaufwerk in Gummidruck durch allseitigen Druck in Flüssigkeit	Granulat (Pulver)	einfache Geometrien, Teile mit Ausdehnung in einer Richtung
Strangpressen		Plastische Masse wird durch ein Rohr mit definiter Öffnung ausgespreßt; Materialflusskopf H₂O oder Schnecke	plastische Masse (Tonkeramik oder Pulver mit Polymerbindern)	prismatische Geometrien (Tonkeramik oder Pulver mit Polymerbindern)
Spritzguss		Plastische Masse wird durch Druck in geschlossene Form eingebracht	Plastische Masse (s. Strangpressen)	kleine Teile mit hohen Anforderungen an die Massengenauigkeit
Schlackerguss		Schlicker wird in poröse Form gegossen durch Wasserdruck entsteht festes Teil	Hohlkörper mit konstanter Wandstärke, relativ komplizierte Geometrien möglich	Humanimplantate, Isolatoren; Formen (teure Formen) Sanitätkeramik

Vorteile: nicht zu teuer, komplexe Formen möglich
Nachteile: Vorgegebene und Sintern erfolgt in einem einzigen Schritt, Druck erhöht die Triebkraft für Sintern, daher wird der Vorgang effizient

Nachteile: Teuer, da hohe Werkzeuganforderung

Vorteile: Hohe Genauigkeit, schnell, Werkzeuge lange brauchbar
Nachteile: Werkzeug teuer → gross Stückzahlen

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

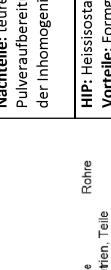
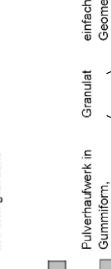
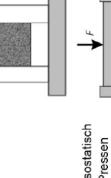
Wärmebehandlungen:

Verfahren	Festigkeit	Wann machen?	Phasenumwandl.?	Notizen
Rekratall.-Glühen	I: zerstörung Verfest.	Nach Kaltverformung (Aufhebung Effekte)	Nein	
Normalglühen	I: feines Korn	Nach Walzen, Stanzen → besser verformbar	Ja	Heute schwierig: Multifunktionsbauteile
Weichglühen	I: weicher Zustand	Vor Walzen, Stanzen → besser verformbar	Beides möglich	
Spannungsarmgl.	→ kein Einfluss	Nach Walzen, Schweißen (Vor Zerspanung)	Nein	
Diffusionsglühen	I: Schalenz. weg	Nach Gießen gegen Segerung	Ja	
Härteln	I: Prinzip	Je nach Verfahren, oft gegen Verschleiss	Immer (per Def.)	

Eigenschaften verschiedener Typen C

Ferrit: relativ weich und korrosionsanfällig. Unterhalb der Curie-Temperatur (T_c für Stahl: 768°C) ferromagnetisch, darüber paramagnetisch
Perlit: lamellar angeordnetes, eutektoides Phasengemisch aus Ferrit und Zementit. Bildet sich durch abwechselnd C-arme/reiche Lamellen
Sorbit: Veralteter Begriff, feinstreifiger Perlit, entsteht beim Anlassen von Martensit, feines nadelförmiges Strukturbild, Eigensch. ähnlich Bainit
Toosott: Begriff veraltet, entsteht bei hohem ν_{bulk} (zu schnell für Diff., zu langsam für Martensit), rosettenförmige Struktur
Bainit: Zwischenstufengefüge zw. Perlit und Martensit; besteht aus Ferrit und Zementit. Verminderte Eigenspannungen, Erhöhung Zähigkeit → Unterer Bainit: niedriger Ferritanteil, Carbid in 60° Winkel dazu
C-Martensit: Ferromagnetisches, metastabiles Gefüge, entsteht diffusionslos durch Abschrecken von Austenit. Sehr hart
Graphit: Kohlenstoff in Reinform, säurebeständig, diamagnetisch, stark anisotrop bez. Härte und elektrischer Leitfähigkeit
Austenit: Nichtrostende Wirkung in Stählen, geringe Härite, Festigkeit steigt stark durch Kaltverf., schlecht zerspanbar
Zementit: metastabile Verbindung Fe_3C in Stahl und weissem Gusseisen. Sehr hart, verschleißfest, spröde, schlecht verformbar, Dichte geringer als Eisen, magnetisch, Magnetische Wirkung geht bei Erwärmung über 215°C verloren

Keramiken: Formgebungsverfahren für Sintern

Prozess	Skizze	Prozessbeschreibung	Ausgangsmaterial	Typische Formen Beispiele, Bemerkungen
Pressen		Pulverhaft wird durch einrichtigen Druck verdichtet und in Form gebracht	Granulat (Pulver)	einfache Geometrien, Dicke > 0,5 mm
Isostatiche Pressen		Pulverhaufwerk in Gummidruck durch allseitigen Druck in Flüssigkeit	Granulat (Pulver)	einfache Geometrien, Teile mit Ausdehnung in einer Richtung
Strangpressen		Plastische Masse wird durch ein Rohr mit definiter Öffnung ausgespreßt; Materialflusskopf H₂O oder Schnecke	plastische Masse (Tonkeramik oder Pulver mit Polymerbindern)	prismatische Geometrien (Tonkeramik oder Pulver mit Polymerbindern)
Spritzguss		Plastische Masse wird durch Druck in geschlossene Form eingebracht	Plastische Masse (s. Strangpressen)	kleine Teile mit hohen Anforderungen an die Massengenauigkeit

Vorteile: nicht zu teuer, komplexe Formen möglich
Nachteile: Vorgegebene und Sintern erfolgt in einem einzigen Schritt, Druck erhöht die Triebkraft für Sintern, daher wird der Vorgang effizient

Nachteile: Teuer, da hohe Werkzeuganforderung

Vorteile: Hohe Genauigkeit, schnell, Werkzeuge lange brauchbar
Nachteile: Werkzeug teuer → gross Stückzahlen

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Vorteile: komplizierte Geometrien, gleichmässige Dichteverteilung
Nachteile: geringere Festigkeit als Trockenpressteile

Wärmebehandlungen:

Verfahren	Festigkeit	Wann machen?	Phasenumwandl.?	Notizen
Rekratall.-Glühen	I: zerstörung Verfest.	Nach Kaltverformung (Aufhebung Effekte)	Nein	
Normalglühen	I: feines Korn	Nach Walzen, Stanzen → besser verformbar	Ja	Heute schwierig: Multifunktionsbauteile
Weichglühen	I: weicher Zustand	Vor Walzen, Stanzen → besser verformbar	Beides möglich	
Spannungsarmgl.	→ kein Einfluss	Nach Walzen, Schweißen (Vor Zerspanung)	Nein	
Diffusionsglühen	I: Schalenz. weg	Nach Gießen gegen Segerung	Ja	
Härteln	I: Prinzip	Je nach Verfahren, oft gegen Verschleiss	Immer (per Def.)	

Eigenschaften verschiedener Typen C

Ferrit: relativ weich und korrosionsanfällig. Unterhalb der Curie-Temperatur (T_c für Stahl: 768°C) ferromagnetisch, darüber paramagnetisch
Perlit: lamellar angeordnetes, eutektoides Phasengemisch aus Ferrit und Zementit. Bildet sich durch abwechselnd C-arme/reiche Lamellen
Sorbit: Veralteter Begriff, feinstreifiger Perlit, entsteht beim Anlassen von Martensit, feines nadelförmiges Strukturbild
Toosott: Begriff veraltet, entsteht bei hohem ν_{bulk} (zu schnell für Diff., zu langsam für Martensit), rosettenförmige Struktur
Bainit: Zwischenstufengefüge zw. Perlit und Martensit; besteht aus Ferrit und Zementit. Verminderte Eigenspannungen, Erhöhung Zähigkeit → Unterer Bainit: niedriger Ferritanteil, Carbid in 60° Winkel dazu
C-Martensit: Ferromagnetisches, metastabiles Gefüge, entsteht diffusionslos durch Abschrecken von Austenit. Sehr hart
Graphit: Kohlenstoff in Reinform, säurebeständig, diamagnetisch, stark anisotrop bez. Härte und elektrischer Leitfähigkeit
Austenit: Nichtrostende Wirkung in Stählen, geringe Härite, Festigkeit steigt stark durch Kaltverf., schlecht zerspanbar
Zementit: metastabile Verbindung Fe_3C in Stahl und weissem Gusseisen. Sehr hart, verschleißfest, spröde, schlecht verformbar, Dichte geringer als Eisen, magnetisch, Magnetische Wirkung geht bei Erwärmung über 215°C verloren

Keramiken: Formgebungsverfahren für Sintern

Prozess	

Gläserbildung:

Für Kristallisation braucht man hohe Keimzahl n und hohe Kristallisationsgeschwindigkeit KG

→ Metalle haben es in einem hohen Temperaturintervall

→ Silikatschmelzen schon bei kleinen Abkühlgeschwindigkeiten

Gießverfahren		Basisjahr 2010	
Verlorene Formen	Leerstelle	Dauerform	Basisjahr 2010
Fehler:			
Zw. Gitteratom	1ev		
Versetzung pro Atomlage	4ev		
Herdformen		Druckgießen	
Schablonenformen		Warmkammer-Verfahren	
Kastenformen		Kaltkammer-Verfahren	
Kastenlose Formen		Kokillengießerei:	
Maskenformen		Vol.-Halb-, Ganzkokillen	
Croning-Verfahren		Schleudergießen und Stranggießen	
Verbundgieße		horizontal	
		Verbundgießen	

Schwerkraftverfahren: Schmelze durch Schwerekraft in Form gebracht

Versetzungsdichte: $\rho_v = \frac{1}{V} \sum I_i = \frac{N}{A} [\text{mm}^{-2}]$

i) Summe längen aller Versetzungslinien pro Volumen

ii) # Durchgangspunkte durch Kontrollfläche

Eindimensionale Gitterfehler: Durch t und \bar{b} gegeben $\underline{b} \parallel t \rightarrow \underline{b} \cdot \underline{t} = \max$

Stufenversetzung: Gleitebene durch b festgelegt! $\underline{b} \perp \underline{t} \rightarrow \underline{b} \cdot \underline{t} = 0$

Gleitebene + Ebene + Ebene → auslösen: Gleicher Vektor/unterschiedliche Ebene → günst. Zustand Kleinkinkelkongruenz

Schraubenversetzung: Ebene nicht def., kann Quergleiten!

Versetzungsbewegungen auf dichtest gepackten Ebenen, weil dort die Potentiialberge aufgrund der Bindungskräfte zwischen Gleitgewichtszuständen minimal sind!

Allgemein: Bei Angabe a_0 nicht vergessen!!

Druckspannung oberhalb Gleitebene:

Anlagerung kleiner Fremdatome

Zugspannung unterhalb Gleitebene:

Anlag. grosser Atome und ganz kleiner Zw-Gitteratome

Fremdatomwellen behindern die Gleitung und somit die plastische Verformung! (benötigte Versetzennergie steigt)

Klettern: * Körngrenzen: Orientierungsgrenze der Phasenstruktur

Phasengrenzfläche: nicht nur Orientierungs-, aber auch Kristallstrukturänderung

Grosswinkelkongru.: Dicke $2-5 \Delta_\theta$, $\phi > 5^\circ$

Kleinwinkelkongru.: Bis $\phi = 5^\circ$ (nur e-Mikros.)

Grosswinkelkongruenz: Ansammlung von Versetzungen in unterschiedlichen Ebenen, günstiger Zustand der Spannungsfelder

Kleinwinkelkongruenz: Ansammlung von wachsenden Kristalle zusammenstoßen

Zweidimensionale Gitterfehler: → Stapelfehler, durch Teilversetzungen oder Störung bei Kaltverformung

Yst klein = neigt zu Teilversetzungen (schnell bei Kaltverformung)

1. Ausgedehnte Stapelfehler bei Kaltverformung

2. Verfestigung gross, gleichmäss. Fließen/Verform. bei Tiefziehen

3. Bereich Gleichmassdehn. grösser; Rissbildung wird vermieden.

Zwillingsgrenze: Orientierung eines Kristalls durch Spiegelung an Ebenen

Kohärent, wenn Atomabstände beider „Seiten“ an Grenze übereinstimmen, sonst inkohärent

Gefüge und Legierungsstrukturen

Gefüge: Gesamtheit des Materials mit Korngrenzen, Phasengrenzen, Versetzungen

Phase: Bereiche mit gleichen physikalischen und chemischen Eigenschaften und gleicher Struktur ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)

Überstruktur: Über dem Kristallschema weiteres Ordnungsprinzip

Mischkristall: Kristall aus mehreren Atomarten

Kristallgemisch: Kristall aus mind. 2 Phasen

Interstitieller (Einalagerungs-) Mischkristall

Fremdatome auf Zwischengitterplätzen: (oft B, N, O, C, H)

Legierungsatome sehr klein vs. Grundatome ($r_2/r_1 < 0.58$)

Bedingungen für unbeschränkte Löslichkeit (lückenlose Mischkristallreihe) nur Substitutions-MK:

1. Beide Komponenten gleicher Gittertyp

2. Differenz Atomradien max. 15%

3. Keine zu grosse chem. Affinität (d.h. im Periodens. benachbart)

Vollkommenen Unlöslichkeit: Horizontale Linien bei T_s

Stoffe reagieren erst gasförmig miteinander, wichtig für Guss

Bestimmung für Anlagen mit Weißblautastatik:
Mit $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 0$:
$$\frac{1}{\eta} = \frac{\ln(\frac{1}{1-f})}{\ln(\frac{1}{1-f_0})} = \frac{\ln(\eta)}{\ln(\eta_0)}$$

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Bei gleicher Festekeit erhält man $\frac{W}{V} = 1$ und $\eta = 1$:

Bestimmen Sie den Weißblautmodul und die nominelle Festigkeit G_0 :

Keramische Werkstoffe – Herstellung: Pulver → Formgebung → Erhitzen		Basisjahr 2011	
Keramische Produkte fast ausschließlich pulvermetallurgisch hergestellt: Pulver zu Form verdichtet und dann gebrannt (gesintert)			
Bindemittel: Zement	Glas		
Erhitzen → Sintern → Mahlung	Pulver → Formgebung → Gemenge von Quarzsand, Kalkstein	Pulver → Erhitzen → Schmelzen Rohstoffe	Formgebung → Erhitzen Sintern, Brennen
Pulvermetallurgische Verfahren		Keramik	
Wichtigste Komponenten der klassischen Keramiken: Ton (für Plastizität), Feldspat und Quarz (sonst noch Sand, Kalk/Sandstein, ...)		Pulver → Formgebung → Mischung z.B. Trockenpressen	
Pulverherstellung: Herstellung verarbeitbarer Masse, Einstellung Körnung und Fließfähigkeit, Zugabe von Bindern		Ton-Feldspat-Quarz Dreistoffsystem	
Formgebung: Verdichtung Pulver, muss fest genug sein für Transport in Ofen		Bsp.: 35% Ton (Pulver + org. Zusatz) Post-Schlicker (Pulver + H ₂ O)	Formgebung → Gießen, Schmelzen, Extrudieren, Spritzguss
Ausgangsmaterial → Formgebungsverfahren → Pulver → Produkt		Ton → Feldspat → Quarz	Produkt → Schleifen → Pulver → Flüssigkeitsdruck
Formgebungsverfahren: Isostatisch Pressen, Schnellpressen, Schleuderpressen		Feldspat → Densitatemerkmal	Produkt → Schleifen → Pulver → Flüssigkeitsdruck
Ablauf: Pulver → Flüssigkeitsdruck		Ton → Feldspat → Quarz	Linien parallel ziehen → Anteil vom Material gegenüber Pulversynthese → Massenaufbereitung → Formgebung → Sintern → Endbearbeiten
Sintern – Verfestigung & Verdichtung eines Pulvers oder porösen Körpers durch Temp.-/Druckbehandlung ohne Formänderung		Watum pulvermetallurgische Verfahren?	
Prinzip des Sinterns: System will Zustand mit $\min(\Delta G = \Delta H - T\Delta S)$. Pulver → grosse Oberfläche → beim Sintern: Oberfl.-Energie verringert → mehr Bindungen → Verfestigung		- Keramik → sehr hoher T_s → nur Sintern möglich	
Bei allen Sinter / Heisspressverfahren sinkt das Volumen stark!		Technisch:	
Pulverherstellung: Ausgangsstoffe werden nach Reinheit, Feinheit und Reaktivität charakterisiert und portioniert. Mischung Rohstoffe in Kugelmühlen.		- Phasenkombination, die über Schmelze unmöglich	
Formgebungsverfahren: Verdichtung Pulver in gewünschter Form Werkstoff kann als Pulver, plastische Masse (Ton, Zugabe von Plastifizierern), oder als Schlicker (Suspension flüssig-Pulverteilchen) vorliegen.		- Porosität (z.B. für Filter)	
Sinterverfahren:		- Keine Segerung (Isotropie & Homogenität)	
a) Festphasen-/Trockensintern (herkömmlich): Keramiken sintern erst bei sehr hohen T. Vorgang in 3 Stufen:		- Manipulation des Gefüges (Komgrösse) möglich	
- Reaktion mit Kokillenmaterial wird vermieden		- Reaktion mit Reinheit, Feinheit und Reaktivität charakterisiert	
- Wirtschaftlichkeit:		- niedriger Energiebedarf	
- Materialeinsparung		- niedrigere Energieaufwand	
b) Halswachstum (I): keramiken sintern erst bei sehr hohen T. Vorgang in 3 Stufen:		- Sintergleichungen	
- Halswachstum		$\frac{d}{dt} = \frac{C}{a_m^n} = \frac{C \cdot t}{a_m^n}$	
- Zentrum-annäherung:		$\left(\frac{h}{a}\right)^2 = \frac{C}{2\pi a_m^n}$	
- Nach Arrhenius:		$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$	
α : Teilcherradius, x: Halfradius, h: halbe Annäherung		$\alpha = (2\pi/7).r_m$ (1-4) je nach Transportmechanismus	
C : n (2-7).r_m		Dichteänderung (mit $\varepsilon = -h/a$ und $h/a \approx 0.03$)	
$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - 3 \left(\frac{C \cdot t}{2\pi a_m^n} \right)^{\frac{2}{n}} \approx 1 + 3\varepsilon$		$\frac{G_f - G_k}{\Delta H} = \frac{T_s - T}{\Delta S}$	
(i) Bildung von Werkstoffbrücken:		Porenvolumenanteil: $P = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{ges}}} = \frac{\rho_{\text{th}} - \rho}{\rho_{\text{ges}}} = \frac{\rho_{\text{th}} \cdot (1 - P)}{\rho}$	
- Halswachstum zwischen Pulverteilchen		Abnahme Porosität: $\left(\frac{P}{P_0}\right)^n = 1 + kt$	
- Abrundung Teilchen/Poren		P (t) = 0	
Halsbildung abgeschlossen bei $\frac{h}{a} = 0.3$		(ii) Verkleinerung der offenen Porosität:	
- Einschnürung Poren → Netz von kanalförmigen Poren (keine einzelnen Teilchen mehr unterscheidbar)		- Erschlaffung Poren: schnelles Kornwachstum: Poren bleiben hinter KG zurück. Sintergeschw. kann durch Additive erhöht werden. Diese bilden Defektstellen oder sinteraktive Phasen an den KG. Dadurch auch möglich → Steuerung Gefügeentwicklung	
Sinterprozess abgeschlossen bei		b) Flüssigphasensintern: Kovalente Stoffe sind reaktionsträge → Trockensintern unmöglich: Zugabe von Legierungselementen (Al ₂ O ₃) → eutektische Zusammensetzung → Flüssige Phase: erhärtet und dient als Bindung	
Nach Arhenius: $K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{Rt}\right)$		Stadien: (1) Teilchenumlagerung, (2) Abnehmende Löslichkeit mit T ↓; Lösung und Wiederausscheidung, (3) Skelettsintern (Trgererust über Körner)	
c) Reaktionsintern: Chemische Reaktion im Pulver überlagert sintern			

Legierungskunde – Zustandsdiagramme (im Gleichgewicht!)		Basisjahr 2010	
Prozessgrößen: frei wählbar	Systemantwort: messbare Eigenschaften	Massen- gehalt: $W_A = \frac{m_A}{m} = \frac{\text{Masse der Komponente A}}{\text{Gesamtmasse Legierung}}$	
Zustandsvariablen für Werkstoff: p, T, w _i (Zusammensetzung)	Ist ein System aus mehreren unterschiedlichen Bestandteilen aufgebaut, ist es heterogen. Die einzelnen homogenen Bestandteile sind dann die Phasen .	Oder als Stoffmengengehalte (#Atome A/#total)	
Freie Enthalpie $\Delta G = \Delta H - TS \rightarrow \Delta G$ erreicht im Gleichgewicht immer ein lok. Minimum! Alle von selber ablaufenden Vorgänge wie Atomumlagerungen genügen diesem Prinzip → Tangentenbedingung im G-T Diagramm	Beschreibung/Benennung:	Komponenten: A, B	
Phasen: α, β, γ, S	Überstruktur: α', β'	$W_x^y \rightarrow \text{Bezugssystem}$	
→ Phasen im Gleichgewicht nennt man stabile Phasen		$W_x^y \rightarrow G = \text{Gehalt von was?}$	
Gesucht:	Frage/Formulierung:		
α, β, S	Welche Phasen?		
w_A^K, w_B^K mit Hebelgesetz (! immer „Gegenseite“ / Total)	Welche Phasen in der Legierung?		
w_A^K, w_B^K : Wie viel % Komp. in Phase? $\rightarrow w_A^K + w_B^K = 1$	Welches sind die Phasengehalte?		
w_A^K, w_B^K : Nachrechnen z.B. $w_A^K = w_A^\alpha \cdot w_A^\beta + w_B^K \cdot w_A^\beta$	Welches sind der Komponentengehalt in der Phase?		
Gibbsche Phasenregel:	Komponentengehalt der Legierung, nachrechnen		
Allgemein: $p = \text{const.} (\text{bei uns})$	Kondole: Isotherme durch Zweiphasengebiet	$P + F = K + 2$	
		$P + F = K + 1$	
Dreiphasräume (Prozessrichtung jeweils Abkühlung):			
Eutektisch: $S \rightarrow \alpha_e + \beta_e$		Peritektisch: $S \rightarrow \alpha_p + \beta_p \rightarrow \beta_p$	
Gute Gusslegierungen: Niedrige T_s , feines Gefüge		Off bei Bronze oder Messinglegierungen	
Ähnliche Schmelztemp. K		Untersch. Schmelztemp. K	
Eutektoid: $\gamma \rightarrow \alpha_e + \beta_e$		Peritektoid: $\gamma \rightarrow \alpha_{pr} + \beta_{pr}$	
→ Leopardenfell		→ Hof	
Intermetalliche Verbindung: Nicht im Gittertyp einer der beiden Komponenten, sondern eigenen.		Die Stabilität eines Alters ist abhängig:	
Bindungscharakter eher kovalent. Feste stöchiometrische Zusammensetzung, deshalb meist nur Vertikale Linie.		• vom Energieniveau	
		• vom Ordnungsgrad der atomaren Bausteine	
		G = Stabilitätsmass	
		ΔG = Mass für die Triebkraft der Umwandlung	
		Gf(G) → Stabilitätsgebiet	
		Gt(G) → 2 Phasen	
		Gk(G) → 1 Zweiphasengebiete	
		Gm(G) → 2 Phasen	
		Gd(G) → 1 Zweiphasengebiete	
		Gf(G) = GFL	
		Gt(G) = GFL	
		Gk(G) = GFL	
		Gm(G) = GFL	
		Gd(G) = GFL	
		Gf(G) = Gk(G)	
		Hf - TSf = Hk - TS	
		ΔH = TΔS	
		Im Ungleichgewicht:	
Diejenige Phase mit der tiefsten freien Enthalpie vorhanden.		Bei 2 Phasen: Tangente und „Randpunkte“	
Bei allen Sinter / Heisspressverfahren sinkt das Volumen stark!		Ternäre/Quaternäre Systeme:	
Pulverherstellung: Ausgangsstoffe werden nach Reinheit, Feinheit und Reaktivität charakterisiert und portioniert. Mischung Rohstoffe in Kugelmühlen.		Woodsches Metall:	
Formgebungsmethode: Verdichtung Pulver in gewünschter Form		Kombination von Komp. mit eutaktischen Eigenschaften für möglichst tiefe Schmelztemp.	
Werkstoff kann als Pulver, plastische Masse (Ton, Zugabe von Plastifizierern), oder als Schlicker (Suspension flüssig-Pulverteilchen) vorliegen.		Stadien: (1) Teilchenumlagerung, (2) Abnehmende Löslichkeit mit T ↓; Lösung und Wiederausscheidung	
Sinterverfahren:		(3) Skelettsintern (Trgererust über Körner)	
a) Festphasen-/Trockensintern (herkömmlich): keramiken sintern erst bei sehr hohen T. Vorgang in 3 Stufen:			
Halswachstum (I):			
- Halswachstum			
- Zentrum-annäherung:			
- Nach Arrhenius:			
α : Teilcherradius, x: Halfradius h: halbe Annäherung			
C : n (2-7).r _m			
$C_n (2-7).r_m (1-4)$ je nach Transportmechanismus			
Dichteänderung (mit $\varepsilon = -h/a$ und $h/a \approx 0.03$)			
$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - 3 \left(\frac{C \cdot t}{2\pi a_m^n} \right)^{\frac{2}{n}} \approx 1 + 3\varepsilon$			
b) mit Zentrumannäherung			
Zwei Teilchen Sintern mit Schwindung			
- Abrundung Teilchen/Poren			
Halsbildung abgeschlossen bei $\frac{h}{a} = 0.3$			
(i) Bildung von Werkstoffbrücken:			
- Halswachstum zwischen Pulverteilchen			
- Abrundung Teilchen/Poren			
Halsbildung abgeschlossen bei $\frac{h}{a} = 0.3$			
(ii) Verkleinerung der offenen Porosität:			
- Einschnürung Poren → Netz von kanalförmigen Poren (keine einzelnen Teilchen mehr unterscheidbar)			
b) Flüssigphasensintern: Kovalente Stoffe sind reaktionsträge → Trockensintern unmöglich: Zugabe von Legierungselementen (Al ₂ O ₃) → eutektische Zusammensetzung → Flüssige Phase: erhärtet und dient als Bindung			
Stadien: (1) Teilchenumlagerung, (2) Abnehmende Löslichkeit mit T ↓; Lösung und Wiederausscheidung			
Über Körner			
c) Reaktionsintern: Chemische Reaktion im Pulver überlagert sintern			

Meist sind es Verbindungen zwischen Metallen und Elementen der Hauptgruppen II bis VII (z.B. B, N, O, C, Halbleiter).

→ nur ionische und kovalente Bindungsteile, oft Mischbindungen

Elektronengesetzmässigkeit → Ionengröße & -ladung bestimmen die Bindungsart.

	H	Li	Be	B	C	N	O	F	% Ion	4	15	30	46	63	89
		Li	Al	Si	P	S	Cl								
		Na	Mg	Al	Si	P	S								
		Ca	Ca	Ge	As	Se	Br								
		Rb	Sr	In	Sn	Sb	I								
		Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At							
		0.7	0.9	1.8	1.8	1.9	2.0	2.2							

Strukturbestimmung → Betrachtung als Ionengitter mit Kationen und Anionen (Anionen meist grösser), nie perfekt wie Metallgitter!

Nahordnung: Wird mit dem Koordinationspolyeder beschrieben. Wird bestimmt durch:

- Bindungsart (ionisch, kovalent), Größenverhältnis & Anzahl versch. Ionen, Bestreben nach möglichst dichter Packung

Fernordnung: Verknüpfung von Koordinationspolyedern über Ecken, Kanten oder Flächen

#Eckpunkte Polyeder = Koordinationszahl

Stabile Anordnung: -Anionen berühren Kationen (oft $r_{Kation} < r_{Anion}$) -Anionen berühren keine Anionen

Faustregel: Koordinationszahl = Stabilität ↑

Gittertyp? → Geom. Figur durch Verbindung der Anionen

Bauprinzipien von Keramiken:

(1) Geom. Stabile Anordnung (Radien)

(2) elektrische Neutralität

$r_{I,Kat} / r_{A,An}$ Koord.-Polyeder KZ Ideales Verhältnis

< 0.155 Linear: O-o-O

0.155 ... 0.255 Dreieck

0.225 ... 0.414 Tetraeder

0.414 ... 0.732 Oktaeder

0.732 ... 0.904 Hexaeder

0.904 ... 1.000 Ikosaeder

Meist: AX / A_mX_n Meist: AX / A_mX_n

X = Anion oder Sauerstoff

A_mB_nX_p

Wichtigsten 4 Typen AX

- Anionen auf 1 oder mehreren Zw.-Gitterpl.

AX-Gitter: Nach wichtigen Bsp. benannt

Oktader → NaCl-Struktur ($r_{Na} / r_{Cl} = 0.56$)

Hexaeder → CsCl-Struktur ($r_{Cs} / r_{Cl} = 0.94$)

Tetraeder → ZnS-Struktur ($r_{Zn} / r_{S} = 0.38$)

A_mB_nX_p - Gitter:

AB₃-Perowskit-Struktur: Supraleiter: CaTiO₃, BaTiO₃, SrSnO₃, YAlO₃

AB₂X₄ - Spinell-Struktur: X meist Sauerstoff, ähnlich Metallionen, hex. kfz

Speziell: Kationen auf Zwisch.-Gitterplätzen Bsp: MgAl₂O₄, FeAl₂O₄

Silikate (O₂ + Si): Etwa 50% ionisch, 50% kovalent, Si₄⁺-

→ Letztere sehr stark, da aufgrund der Größenverhältnisse der gleiche Polyyeder entsteht wie er aufgrund der Orbitalstruktur vorliegen müsste

Dimension der Fernordnung = (#Ecken verkürzt - 1)

Polymorphie: Quarz, Tridymit, Cristobalit (Gerietskilitat)

→ Räumliche Anordnung in alle Richtungen, wobei auf der Oberfläche die freien Valenzen durch andere Kationen abgesättigt werden

Kohlenstoff: Dank Hybridisierung 100% kovalente Struktur möglich

- ähnliche Kristallformen wie bei Silikaten, Diamantsstruktur

Fullerene

Diamant

Graphit

Wärmeleiter

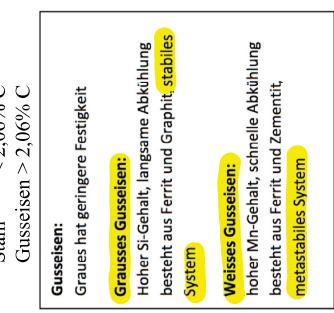
sehr gutes Wärmeführer

Isolator

Halbleiter

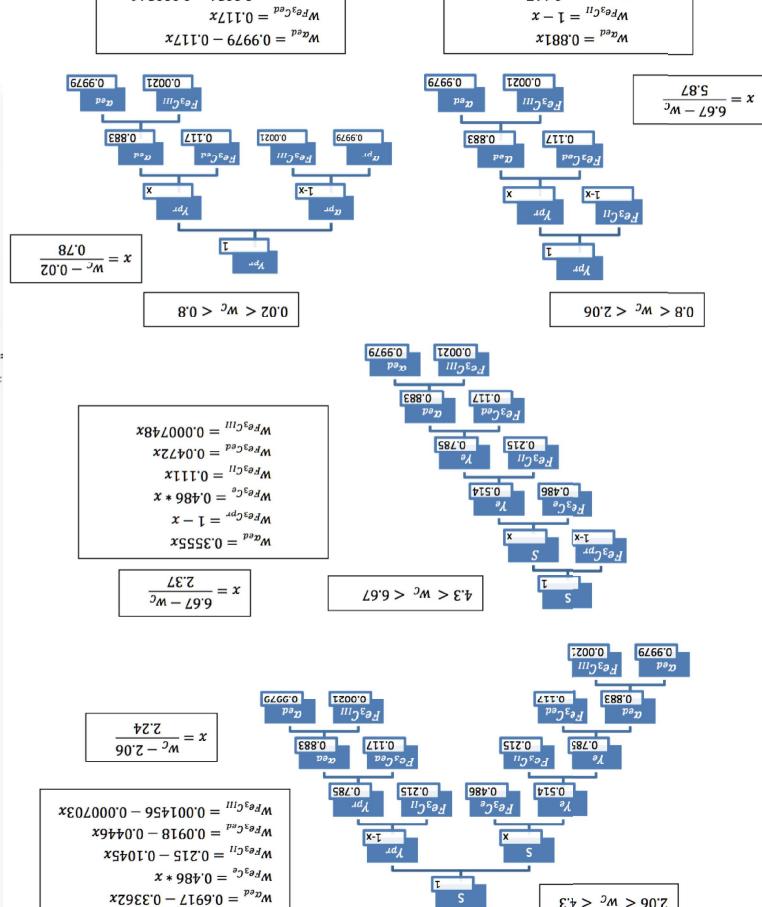
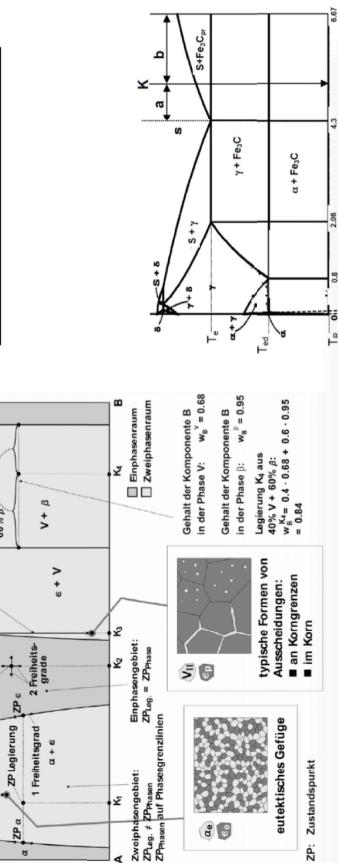
Supraleiter

C-Modifikationen



Auscheidung im festen Zustand: Bei Abkühlung in das Zinn aus, wird V ausgeschieden.

Wechselnde Phasenzahl: Beim Überschreiten einer Phasenzahl nimmt um 1.



Polymerne – Mechanische Eigenschaften im festen Zustand

Streckgrenze R_p bei viel höherer Dehnung als bei Metallen
(ausgeprägt: $\varepsilon > 1\%$, sonst $R_{p2}/R_p \approx 1\%$)
Dehnungsprozesse sind allerdings **viskos**, nicht elastisch!
Streckgrenze \rightarrow Kaltverformung (Thermoplast) \rightarrow oft Einschnürung, Orientierung Moleküle \rightarrow Primärbindungen stärker belastet \rightarrow **Steifigkeit steigt**

Zeitabhängiges (viskos) Verhalten – Rheologische Modelle mit Federn (Hooke) und Dämpfern (Newton)

Wichtigster Unterschied zwischen elastischem und viskoelastischem Verhalten: Bei Beanspruchung dehnt sich elastisches Material zeitgleich, während sich beim viskoelastischen erst verzögert eine Verformung einstellt.
Serieschaltung: Dehnungen addieren: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$
Parallelschaltung: Spannungen addieren: $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$

Maxwell-Modell:
Formeln siehe Tabelle

Serieschaltung:
 $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{vis}$
 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{el} + \dot{\varepsilon}_{vis} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$

1. Relaxation:
 $\varepsilon_0 = \varepsilon_e + \varepsilon_v = \text{const}, \text{d.h. } \dot{\varepsilon} = 0$
Ab $t=0$ wird Bauteil $\varepsilon_0 = \text{const}$ unterworfen, die zunächst **elastisch** aufgenommen wird \rightarrow **verzögerte Spannungsaufnahme**

$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right)$
Relaxationszeit: $\lambda = t$
 \rightarrow Zeit bis $\sigma = e^{-1}, \sigma_0 = 0,37 \cdot \sigma_0$ (bei Metallen $\sigma = 0,5 \cdot \sigma_0$)

$\lambda = t = \frac{\eta}{E} \left| \frac{N \cdot s / m^2}{N / m^2} \right| = -\frac{E}{\eta} \cdot t = -1$
Nach 4-facher Relaxationszeit: $\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-4} = 0,018$

Beispiel Superpositionsprinzip:
Geg:
Polymer nach Voigt-Kelvin
 $E_r = 1900 \text{ MPa}, \eta_r = 5,5 \cdot 10^9 \text{ Pas}$
Belastung: 40 MPa für 2s, dann 80 MPa

Ges: Dehnung nach 4s
 $\varepsilon = 0,0158 + 0,0105 = 0,0263 = 2,63\%$

Wichtig: horizontale Aufteilung! η in MPas!
 $\sigma = \varepsilon(\sigma_1, 4s) + \varepsilon(\sigma_2 - \sigma_1, 2s)$

Periode T:
 $\tan(\varphi) = \frac{\eta \cdot \omega}{E}$

Phasenverschiebung φ :
 $\varepsilon(t) = \hat{\varepsilon} \cdot \cos(\omega t - \varphi)$

Maxwell-Modell:
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \left(\frac{1}{\eta} \cdot (1 - \exp\left[\frac{-(t-2s)\omega}{\eta_r}\right]) \right)$

$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{t-2s}{\eta}\right) \right)$

Bei sinusförmiger Beanspruchung: Phasenverschiebung
 $\varepsilon(t) = \hat{\varepsilon} \cdot \cos(\omega t)$

Parallelenschaltung:
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon} + E \cdot \varepsilon$

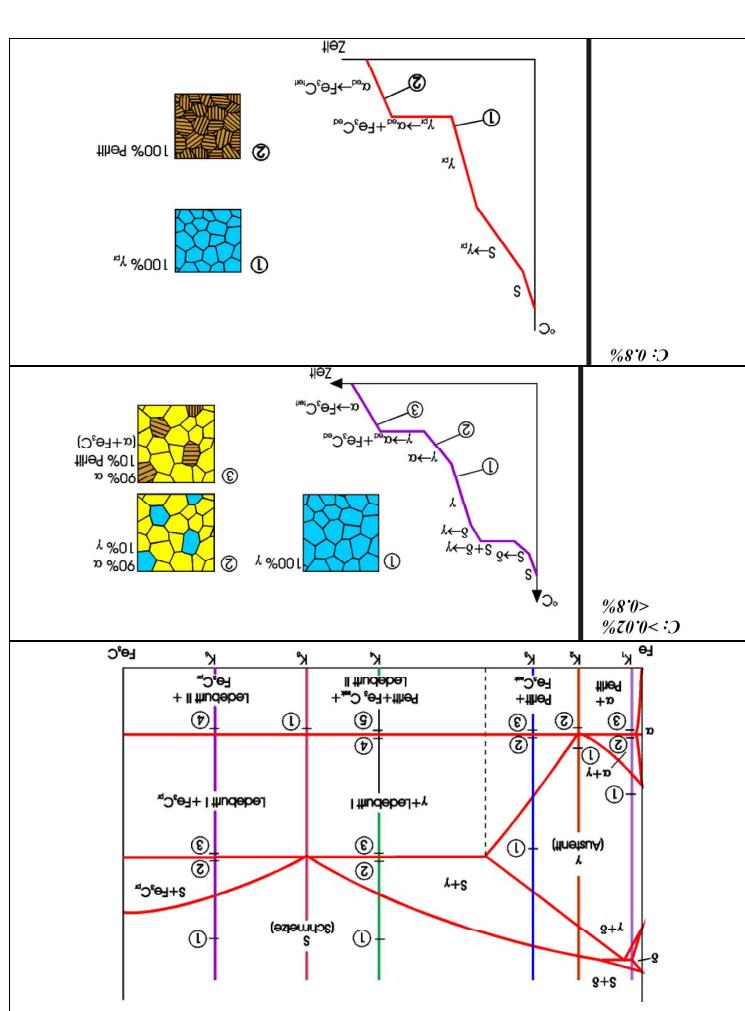
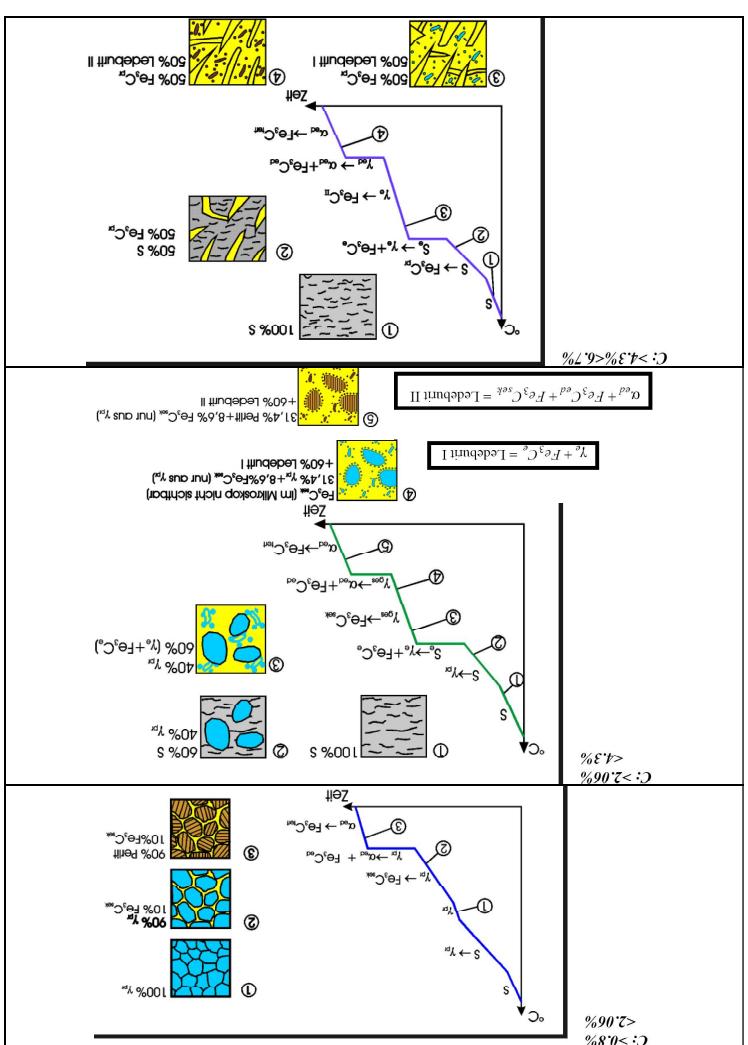
2. Retardation:
 $\sigma_0 = \text{const}$
Ab $t=0$ wird Bauteil durch $\sigma_0 = \text{const}$ belastet \rightarrow **verzögerte Formänderung**

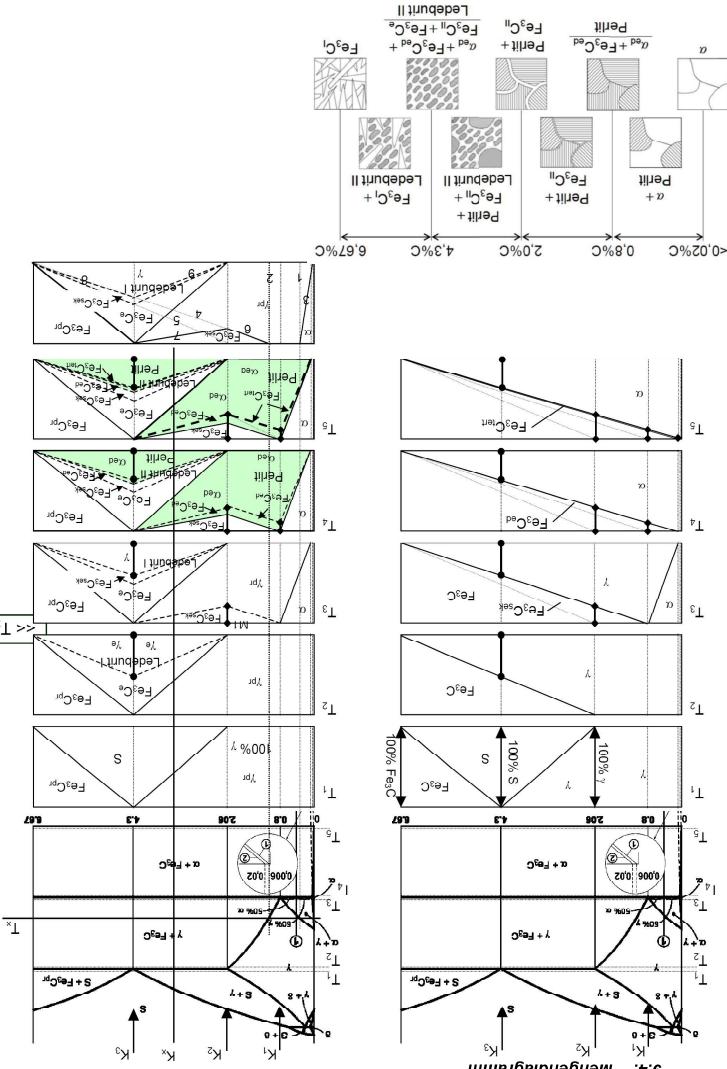
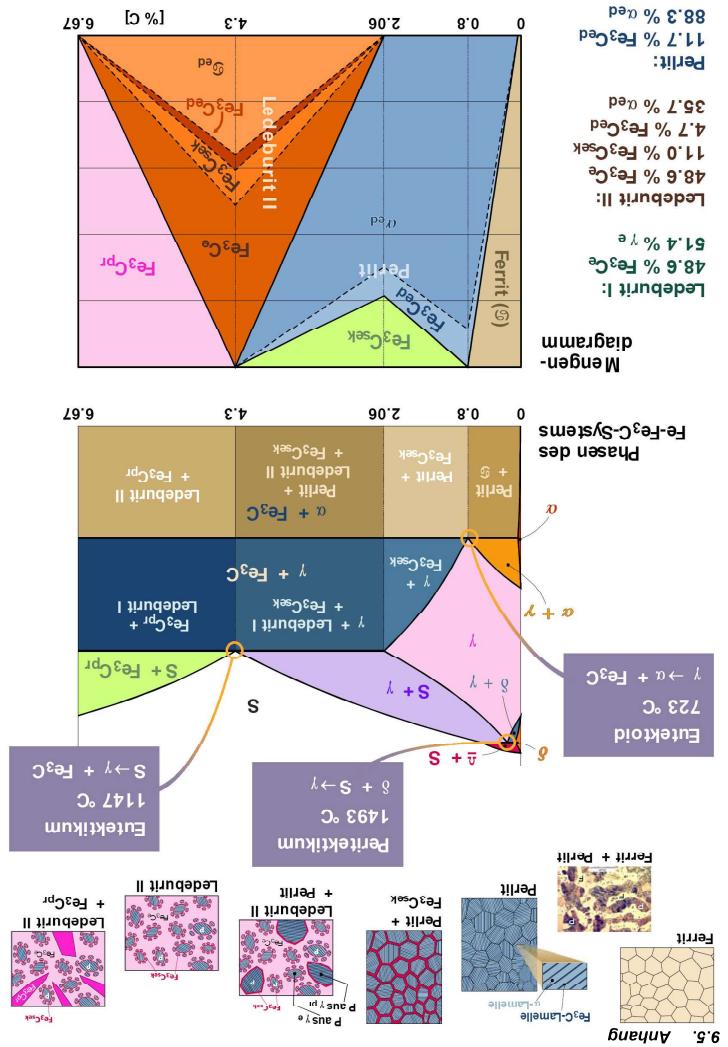
$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right) \right)$

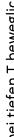
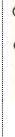
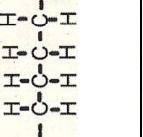
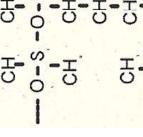
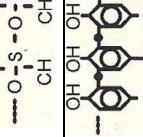
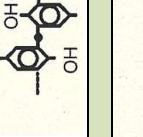
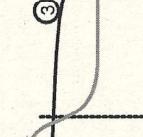
Aufgaben: $\varepsilon \leq \varepsilon_{F\infty} = \varepsilon_{Zul} [\%]$
Mit Tabelle rheologischer Modelle

Faser verstärkte Kunststoffe

2,0% $\leq \varepsilon \leq 0,5\%$





Thermisch-mechanisches Verhalten, nach Stoffen sortiert (Für Bsp. siehe Polymere Struktur 1)															
(4) Amorphe Thermoplaste:	Gebrauchs bereich: -60 ... +80°C G-Modul: 10 ² -10 ³ MPa Anwendung: Für bestimmte Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen - energetisch, Anwendung größer i.e. „amorph“, - Steigerung Molekulargewicht → entropielastischer Bereich vergrößert - Keine scharfe Fließgrenze, in beide Rtg. überschreitbar: Verarbeitung!	 													
Weichmacher: Für amorphe Stoffe im ZUZUSTAND	- Durch die Moleküle werden Wechselwirkungen unterbunden → Makromoleküle auch bei tiefen T beweglicher → Zustand lässt sich mit Menge gezielt einstellen (T_g verschieben))	Außere Weichmacher: - polare, niedermolekulare Substanz → Durch die Moleküle werden Wechselwirkungen unterbunden → Makromoleküle auch bei tiefen T beweglicher Innerne Weichmacher: - Makrom. eingebaut (z.B. Copolymerisation), schwingen wegen geringem Platzbedarf auch unterhalb T_g , frieren erst im Nebenerweichungsbereich ein	 												
(3) Teilkristalline Thermoplaste:	Gebruchs bereich: Entropielastisch Glastemperatur: ≈ -50°C → darunter: spröde, Weichmacher nötig G-Modul: ≈ 100 ... 5.000 MPa Anwendung: elastisch-biegarmes Verhalten von amorphen, gute Festigkeit von kristallinen Bereichen (Lunzenbrechlich) - Bei T_g nur amorphe Bereiche entropielastisch, krist. noch energielastisch - relativ geringer Schmelzbereich (gleichmässiger Aufbau der krist. Bereiche), dennoch kein scharfer Kristallenschmelzpunkt (T_m) wegen dem Angliegen einzelner Ketten in den amorphen Bereichen und dem Schmelzen kleinerer Kristalle	 	 												
(2) Duromere: Bsp: Ungesätt. Polyester Epoxydharze (EP) Pheno Harze (PF) Silikonharze (Si)	Gebruchs bereich: Glaszustand Glastemperatur T_g : ≈ +100°C G-Modul: 5-15.000 MPa Anwendung: - harte Formmassen und Reaktionsharze - hohe Festigkeit und gute Steifigkeit ohne Versprödung bei tiefen T Wegen Engmaschigkeit: - T_f - Festigkeit sinkt wenig, Dehnung steigt wenig - Erweichung vor Zersetzung, Fließbereich inexistent - Formgebung vor Aushärtung, danach nur noch spanabhebende Verarb.	 	 												
(1) Elastomere:	Gebrauchs bereich: entropielastischer Zustand Glastemperatur T_g : ≈ -80° ... -10°C G-Modul: < 100 MPa Anwendung: grosses elastisches Verformungsverhalten oder Dämpfung - loser Zusammenhalt und gekrümmte Moleküle geben entropielastisches Verhalten, verhindern viskoses Fließen und Aufschmelzen - Festigkeitssteigerung durch Verformung - Wegen Vernetzung nicht schmelzbar, kein Fließen (gleich Zersetzung)	 													
Thermisch-mechanische Kurven (siehe auch eine Seite vorher)															
(1) Elastomere:		(2) Duromere: 	(3) Teilkristalline Thermoplaste: 												
		(4) Amorphe Thermoplaste: 													
Weisbruch	Teilkristalline Stoffe weisen ein spezielles Verhalten auf. Ist die Dehngrenze überschritten, sind einzelne Risse nicht mehr erkennbar, man bemerkt eine weiße Dehnfärbung	<table border="1"> <tr> <td>Schmelzbar</td><td>Löslich</td><td>Quellbar</td></tr> <tr> <td>Thermoplast</td><td>Ja</td><td>Ja/Nein</td></tr> <tr> <td>Elastomer</td><td>Nein</td><td>Nein</td></tr> <tr> <td>Duromer</td><td>Nein</td><td>Nein</td></tr> </table>	Schmelzbar	Löslich	Quellbar	Thermoplast	Ja	Ja/Nein	Elastomer	Nein	Nein	Duromer	Nein	Nein	
Schmelzbar	Löslich	Quellbar													
Thermoplast	Ja	Ja/Nein													
Elastomer	Nein	Nein													
Duromer	Nein	Nein													

Diffusion: Reduktion freier Enthalpie

Def: Irreversible Platzwechselvorgänge von Teilchen zur Minimierung der freien Enthalpie: hier in fester Phase

Thermodiffusion: Bestreben der Atome, Ausgleich von E_{kin} durch Platzwechseln innerhalb eines Kristallgitters

Selbstdiffusion:	Thermodiffusion mit nur 1 Art Atomen (z.B. reines Metall)
Fremddiffusion, normale Diff.:	Minimierung ΔG über Entropieterm, Ausgleich Konzentrationsunterschiede

I Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: Alles was rein geht und nicht raus ist, ist drin.
 $C_a = \text{const. Konz. an Oberfläche}$
 $C_0 = \text{Ausgangskonz. im Innern}$
 $C_x = \text{Konzentration an Stelle } x \text{ nach Zeit } t$ Ausscheidung B aus α an Korngrenze \rightarrow neuen Phase, Rand c_a aussen B-verarmt; C_0 innen; $x = r_{\text{Korn}}$ \rightarrow bis C_a homogenFür $In(D \cdot 1/T)$ Graph: $In(D) = In(D_0) - \frac{Q}{R \cdot T}$
 \rightarrow Steigung: $-\frac{Q}{R}$ und Schnittpunkt y-Achse: $In(D_0)$ Was diffundiert besser in was? \rightarrow Vergleich D bei geg. T (mit Tab.)Für Diffusion: Q grösser in dichtgepackten Kristallstrukt. $Q_{\text{dichtestenf}} > Q_{\text{Zwischenlagen}}$ Für $D_0 = Freqenzfaktor$
 \rightarrow Mass für die Häufigkeit, mit der das Atom seine Extremlage mit Sprungmöglichkeit erreicht.Frenkel: über thermisch bedingte Leerstellen \rightarrow tiefe Q-Energie Leerstellenstrom entgegen Diff. Strom

Diffusions-Mechanismen:

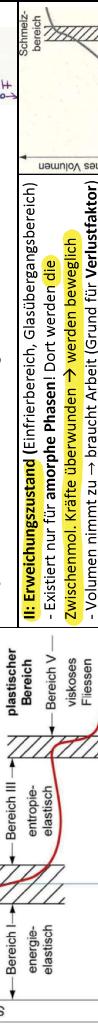
Allgemein: Q klein \rightarrow D gross

Übergang flüssig-fest/Nah-Fernordnung

i) Keimbildung an Grenzfläche fest(k)-flüssig(S) wird ΔG frei, da dort $C_k(T) = C_S(T)$, dann aber $\Delta G_k(T) < C_S(T)$ ii) Wachstum \rightarrow $\Delta G_k(T) = \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{r^2}{r^2 - r_s^2}$ Energie \sim Masse $\Delta H = \text{Erstarrungswärme}$ Positive Volumenenergie $= \frac{4\pi r^3 \rho}{3} \cdot \frac{\sigma}{r^2 - r_s^2}$ Für $r > r^*$: Oberflächenergie für Kärm \rightarrow Wachstum grösser als freiNegative Volumenenergie $= \frac{4\pi r^3 \rho}{3} \cdot \frac{\sigma}{r^2 - r_s^2}$ Radus von Volumen und Kärm \rightarrow Volumen grösser als frei

Vorkeime wegen Käster Zusammensetzung von Atomen in der Schmelze

Homogene Keimbildung: Keimbildung in reiner Schmelze ohne Fremdkörperoberflächen (braucht grosse Unterkühlung)

Heterogene Keimbildung: Startet an Verunreinigungen (Kornfeinern, Fremdpartikel, Wand). Da die Grenzflächenenergie kleiner ist, ist die für die Keimbildung: \rightarrow Abkühlkurve: Knickpunkt, gleichmassigere Temp.-Abnahme, da Kristallisation früher.Mit Kornfeiner: \rightarrow Abkühlkurve: grössere Unterkühlung, ev. steigt die Temperatur nach der Keimbildung wieder.Keimzahl $\sim \Delta T$ \rightarrow Korngrösse $\sim \frac{1}{\Delta T}$ Feines Korns: Unterkühlung \uparrow , Fremdpartikel \uparrow je grösser σ Abkühlung, desto grösser ΔT ! Einheiten der Angaben # der im kritischen Keim vorhandenen Atome = $\frac{V_F}{V_{\text{Zelle}}} \cdot \left(\frac{\# \text{Atome}}{\text{Zelle}} \right)^3 = \frac{\left(\frac{\# \text{Atome}}{\text{Zelle}} \right)^3}{\left(\frac{V_F}{V_{\text{Zelle}}} \right)}$ **Klassifizierung nach physikalischen Eigenschaften – Thermomechanische Kurven für den Schubmodul Basisjahr 2011**Bei Polymeren spielt die Temperatur stets eine Rolle. Anders als bei Metallen \rightarrow keine genaue Schmelztemperatur \rightarrow alles in Bereichen Elastische Verformung nur bei Durometern (engmaschig vernetzt), bei Thermoplasten zähflüssiges Flüssigen (viskoelastisches Verhalten) \rightarrow Thermisch-mechanische Betrachtung gilt für elastische und viskoelastische BereicheI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: Alles was rein geht und nicht raus ist, ist drin.
 $C_a = \text{const. Konz. an Oberfläche}$
 $C_0 = \text{Ausgangskonz. im Innern}$
 $C_x = \text{Konzentration an Stelle } x \text{ nach Zeit } t$ Ausscheidung B aus α an Korngrenze \rightarrow neuen Phase, Rand c_a aussen B-verarmt; C_0 innen; $x = r_{\text{Korn}}$ \rightarrow bis C_a homogenII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: Räumlich: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot t}\right)$ III Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c)$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) = -D \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x} = -D \cdot \frac{\Delta C \cdot g}{\Delta t \cdot s}$ IV Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ V Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ VI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ VII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ VIII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ IX Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^5}{120000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ X Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^5}{120000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^6}{1200000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ XI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} + \frac{\partial^9 c}{\partial x^9}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^5}{120000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^6}{1200000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^7}{12000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ XII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} + \frac{\partial^9 c}{\partial x^9} + \frac{\partial^{10} c}{\partial x^{10}}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^5}{120000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^6}{1200000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^7}{12000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^8}{120000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$ XIII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} + \frac{\partial^9 c}{\partial x^9} + \frac{\partial^{10} c}{\partial x^{10}} + \frac{\partial^{11} c}{\partial x^{11}}$ Lösung der Diff-GG: $\frac{C_a - C_x}{C_a - C_0} = \frac{\omega_a - \omega_a(x,t)}{\omega_a - \omega_0} = erf\left(\frac{x}{\sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x}{6 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^2}{120 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^3}{1200 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^4}{12000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^5}{120000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^6}{1200000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^7}{12000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^8}{120000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t} + \frac{\Delta x^9}{1200000000 \sqrt{D} \cdot \Delta t}\right)$

(zu nächsten Zeile)

Klassifizierung nach physikalischen Eigenschaften – hier in fester PhaseBei Polymeren spielt die Temperatur stets eine Rolle. Anders als bei Metallen \rightarrow keine genaue Schmelztemperatur \rightarrow alles in Bereichen

Elastische Verformung nur bei Durometern (engmaschig vernetzt), bei Thermoplasten zähflüssiges Flüssigen (viskoelastisches Verhalten)

 \rightarrow Thermisch-mechanische Betrachtung gilt für elastische und viskoelastische BereicheI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: Alles was rein geht und nicht raus ist, ist drin.
 $C_a = \text{const. Konz. an Oberfläche}$
 $C_0 = \text{Ausgangskonz. im Innern}$
 $C_x = \text{Konzentration an Stelle } x \text{ nach Zeit } t$ Ausscheidung B aus α an Korngrenze \rightarrow neuen Phase, Rand c_a aussen B-verarmt; C_0 innen; $x = r_{\text{Korn}}$ \rightarrow braucht Arbeit (Grund für Verlustfaktor)II Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c)$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) = -D \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} = -D \cdot \frac{\Delta C \cdot g}{\Delta t \cdot s}$ III Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ IV Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ V Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ VI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ VII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ VIII Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ IX Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ X Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\partial c}{\partial t} = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} + \frac{\partial^9 c}{\partial x^9}$ Lösung der Diff-GG: $j = -D \cdot grad(c) + \Delta x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} + \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} + \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} + \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} + \frac{\partial^9 c}{\partial x^9} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^5 c}{\partial x^5} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^6 c}{\partial x^6} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^7 c}{\partial x^7} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^8 c}{\partial x^8} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + D \cdot \frac{\partial^9 c}{\partial x^9} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$ XI Ausscheidung im festen Zustand \rightarrow Aufbau Konzentrationsuntersch.Bilanzgleichung: $\frac{\$

Seigerung:	Konzentrationsunterschiede beim Erstarren → führt zu inhomogenem Gefüge
Kristallseigerung:	Grund: Löslichkeit v. Stoffen oft grösser in flüssigem als festem Metal (und $v_{Diffusion} < v_{Erstarrung}$)
→ reiner Mischkristall	Blockseigerung: Verunreinigungen in der Schmelze (von Kristallseigerung) erstarren am Schluss konzentriert im Innern des Blocks; Verstärkt durch Kochen
→ verunreinigte Schm.	
Seigerung vermeiden: Kristalls.: langsame Abkühlung o. danach Homogenisierungsgängen; Blockseigerung: durch Beruhigung	

Umgekehrte Blockseigerung (Cu- und Al-Legierungen): Teil der verunreinigten Schmelze wird (div. Grinde) an Oberfläche gedrückt.

Wegen der Δc zw. idealer Erstarrung und mit Seigerung entstehen neue Verläufe → **scheinbare Soliduslinie/liquiduslinie**

Wachstum hängt vom Abtransport der freie. Wärme ab:

i) spezifische Wärme der Schmelze (wegen tieferer T)

ii) latente Erstarrungswärme (wegen Phasenwechsel fl-fk)

Planar: Erstarrungsfront verschiebt sich gleichmässig.

Latente Wärme durch Festkörper

$\frac{dV}{dt}$ begr. durch Wärmeabfuhr + hängt ab von: ΔG_{fk-f} und Bewegl. Atome (mit D) → beide abh. von ΔT

V-Erstarrung = $\frac{dV}{dt}$ bei ΔG_{fk-f} und Bewegl. Atome (mit D) → beide abh. von ΔT

Abstand von der Grenzflichte fest/füssig

Abstand von der Grenzflichte fest/füssig

Temperaturverlauf

Erstarrungstemperatur

Unterkühle Schmelze

Erstarrungswärme (wegen Anlagerungsflächen)

Ende: keine Schmelze mehr, nur Anlagerungsflächen

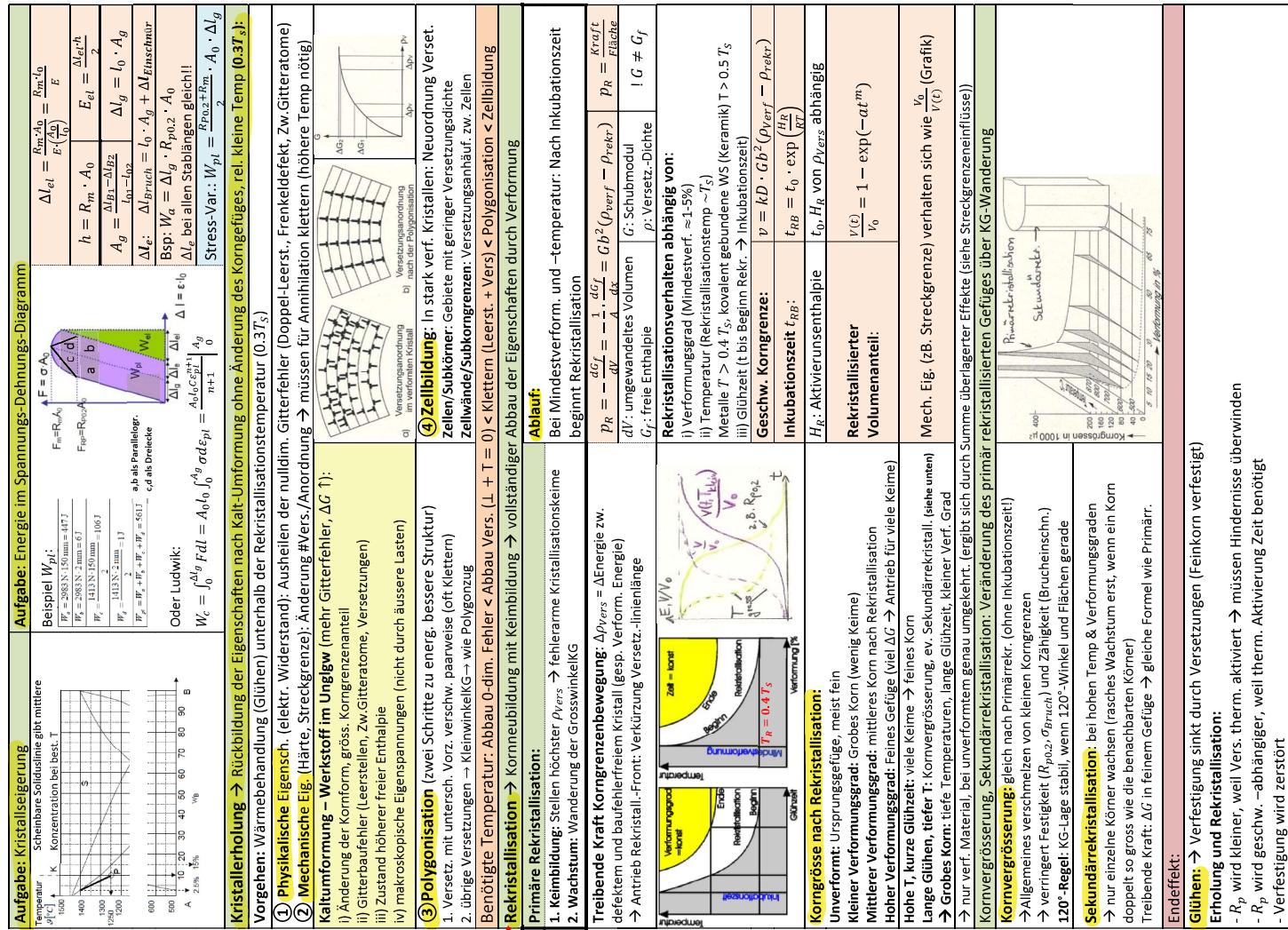
Abstand von der Grenzflichte fest/füssig

Temperatur

Erstarrungswärme

Polymerne – Struktur (a: amorph, tk: teilkristallin, d: Duromere)

Polymerne: Materialien, deren wesentliche Bestandteile aus makromolekularen Verbindungen bestehen, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten entstehen, die Vorteil: Material kann präzis bestimmt werden			
Code	Bezeichnung	Anwendung	Monomere & reaktionsfähige Endgruppen
PVC	Polyvinylchlorid	Fussbodenbeläge	der Wassersofft bei Atomaten —H —OH —C=O
PET	Polyethylenterephthalat	Getränkeflaschen	die Hydroxygruppe von Alkoholen die Aldehydgruppe des Formaldehyds
PE (tk)	Polyethylen	Kunststoffverpackungen, Folien	die Carboxylgruppe von organischen Säuren —COOH
PS (a)	Polytetrafluorethylen	Gehäuse, Plastikmodelle, Schaum	die Isocyanatgruppe von Isocyanaten —N=C=O
PTFE (tk)	Polyamid	Pfannenbeschichtung, Gleitbeschichtungen	die Epoxidgruppe von Polyepoxidien —CH=C—CH ₂
PA (tk)	Polypropylen	Air Bag, Maschinenteile	→ Gut für Polyaddition
PP (tk)	Polyester	Gehäuse, Koffer, Gartenmöbel	die Aminogruppe von Amiden und Polyamiden —CO-NH ₂
SP, UP (d)	PU	Gewebebestandteil	die Aminogruppe
PU	Polyurethan	Beusbaum	—NH ₂
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	Dichtungen	
PMMA (a)	Polymethylmethacrylat	Klarichtscheiben (Plexiglas)	
PC (a)	Polykarbonat	Schutzscheiben, CD, Glasesatz	
Chemischer Aufbau – Polymere basieren auf der Fähigkeit von C, sich zu Ketten (oder Ringen) zu binden:			
→ Pauli Prinzip (max. 2 pro Orbital) mit Hund'scher Regel „normal“: Orbitale ($1s^2$; $2s^2$; $2p^2$), Winkel 109°			
→ Hybridisierung: Energiediagramm → 1 vom (2s) in dritte p → 4 ungepaarte e → starke Bindung, viel Bindungsenergie wird frei → sp ³ : 4 gleichwertige Orbitale, oft sp ² : 3sp ² und 1 p-Orb.			
Ungesättigte Bindungen (C-C-Bindungen): Doppel- und Dreifach-Bindungen möglich, aber zwei Einfachbindungen stärker als 1 Doppel-Bindung			
Bsp.: Polyethylen: $nA - \text{C}=\text{C}- \text{A}_n -$			
Bsp.: Polyvinylchlorid: $nA + nB \rightarrow -[\text{C}]_n - + (2n-1)D$			
Aufspaltung von Mehrfachbindungen von gleichen niedermolekularen Monomeren und chem. Verknüpfung zu Polymeren (makromoleküle), meist über einen Katalysator. (Aktivierungsenergie nötig.)			
Polykondensation über Endgruppen → 140°C (Polyamide)			
Verknüpfung gleicher oder verschiedener Moleküle unter Abspaltung eines niedermolekularen Stoffes (oft H_2O , HCl , ...). Verknüpfung durch reaktionsfähige Endgruppen der Monomere.			
Polyaddition über Endgruppen (Epoxidharze), Verknüpfung gleicher oder versch. Moleküle ohne Abspaltung eines Stoffes, sondern durch intramolekulare Umlegung . H-Atome leicht aus OH, NH ₂ , COOH-Gruppen lösbar, werden verschoben.			
Mischungstyp Phase A (Matrix) und B (Partikel) Weiche Matrix + weiche disperse Phase Weiche Matrix + harte disperse Phase Harte Matrix + weiche disperse Phase			
Technische Produkte Elastomer-Blends Polymergeléfüllte Elastomere (Vermischung) Hartschäume (Thermoplaste)			
IPN: interpenetrierende Netzwerke: Vernetzung zweier Polymerarten, aber nur untereinander (bessere mech. Eig. selten) (thermoplastisch Nicht verarbeitbar)			
Copolymerisate: Polymerisation von zwei oder mehr verschiedenen Monomeren für spezielle Eigenschaften			
2 Grundarten von Gemischen: - Partikel von Polymer B als disperse Matrix in Phase von A eingelagert - Bildung von Durchdringungsgenetzwerkten (selten)			
Gestalt der Makromoleküle von Polymeren			
I. Rekristallisationsverhalten abhängig von: i) Verformungsgrad (Mindestwert: $\approx 1-5\%$) ii) Temperatur (Rekristallisationsystems $\sim T_s$) Metalle $T_s > 0.4 \cdot f_s$, kovalent gebundene WS (Keramik) $T > 0.5 \cdot T_s$ iii) Glühzeit: $> 0.4 \cdot f_s$ Rektifikation → Inkubationszeit			
Geschw. Korngrenze: $v = kD \cdot G^b (\rho_{verf} - \rho_{rekr})$			
Inkubationszeit $t_{RB} = t_0 \exp(\frac{H_R}{RT})$			
H_R : Aktivierungsenthalpie			
Rekristallisierte Volumenanteil: $\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \exp(-\alpha t^m)$			
Korngrößen nach Rekristallisation: Unverformt: Ursprungsgefüge, meist fein Kleiner Verformungsgrad: mittleres Korn nach Rekristallisation Mittlerer Verformungsgrad: erhält sich durch Summe überlagerter Effekte (siehe Streckgrenzeinflüsse))			
Kornvergrößerung: gleich nach Primärkorn (ohne Inkubationszeit!)			
Mech. Eig. (z.B. Streckgrenze) verhalten sich wie $\frac{V(t)}{V(t)}$ (Grafik)			
Allgemeines verschmelzen von kleinen Körnern → Grobes Korn (wenig Keime) Mittlerer Verformungsgrad: erhält sich durch Summe überlagerter Effekte (siehe Streckgrenzeinflüsse))			
Kornvergrößerung: gleich nach Primärkorn (ohne Inkubationszeit!)			
→ verringert Festigkeit (ρ_{verf} , Bruch) und Zähigkeit (Bruchhörschn.)			
120°-Repel: (KG-Lage stabil, wenn 120°-Winkel und flächenferade)			
Sekundärrekristallisation: bei hoher Temp & Verformungsgraden			
→ nur einzelne Körner wachsen (rasches Wachstum erst, wenn ein Korn doppelt so gross wie die benachbarten Körner)			
Treibende Kraft: ΔG in einem Gefüge → gleiche Form wie Primär.			
Glühen: → Verfestigung sinkt durch Versetzungen (Feinkorn verstetigt)			
Endeffekt: - R_p wird kleiner, weil Vers. therm. aktiviert → müssen Hindernisse überwinden - R_p wird geschw. abhängiger, weil therm. Aktivierung Zeit benötigt - Verfestigung wird zerstört			
Verarbeitung: hochviskos (hoch Mol. -Massen) im Extruder, Kalandrier; niederviskos Spritzgussverarbeitung			
Thermoplaste: Schmelzflüssiges Endprodukt; Spritzguss, Extrudieren, Verschäumen, Kalandrieren			
Duroplaste: Vorpunkt unverarbeitet, Vulkanisation durch z.B. S. Metallocide, Strahlung; Formpressen, Strangpressen, Giessen			
Elastomere: Nachbearbeitung: spanende Bearbeitung			
Extruder: Lange Maschine für Profile, Granulat wird eingeschüttet, verdichtet, und durch eine Düse gedrückt			
Kalandrier: Zuerst extrudieren, dann Verformung über Walzensystem			

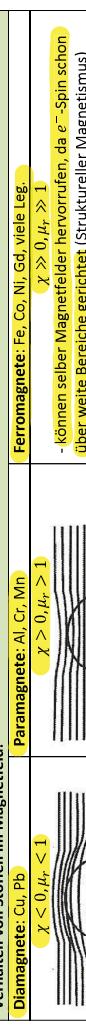


Physikalische Eigenschaften der Metalle

Magnetische Eigenschaften	
Magnetismus:	Eigenschaft eines Magneten, magnetische Stoffe wie Eisen, Nickel, Kobalt sowie deren Legierungen anzuziehen.
Felder: die Vektoren der Feldstärke H und Induktion B sind parallel zueinander.	
Magnetische Feldstärke einer Spule:	$H = \frac{\varnothing}{L} = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{A}{m}$
Flussdichte (H):	$B = \mu \cdot H = \mu_0 (H + M)$ in $[T] = \frac{Vs}{m^2} = \text{Tesla}$
Verhalten von Stoffen im Magnetfeld:	Diamagnete: Cu, Pb Paramagnete: Al, Cr, Mn Ferromagnete: Fe, Co, Ni, Gd, viele Leg. - können selber Magnete werden, da e^- -Spün sich an Über weite Bereiche reichten (struktureller Magnetismus) - physikalische Eigenschaft, tritt bei verschiedenen Metallverbindungen und in Sinterwerkstoffen auf

Von Magnetfeldern angezogen
- Dichte Feldlinien im Innern kleiner als im freien Raum
- Spinnmomente der Elektronen heben sich auf (gleich viele e^- mit Linkssinn wie mit Rechtsinn)
- Richten sich an äusserem Feld aus.

Magnetische Beeinflussbarkeit: Eine magnetische Beeinflussbarkeit besteht also nur dann, wenn ein Orbital mit nur einem Elektron besetzt ist.



Struktureller Magnetismus: Werkstoff hat die Fähigkeit, die Elementarmagnete (d.h. Spins), auch ohne äußere magnetische Einwirkung zu ordnen.

Weisssche Bezirke: Geordnete Bereiche, desto höher muss die Wärmebewegung sein, um den Solche geordnete Strukturen zu stören (Ferromagnetische Weißorganisation)

Tritt also bei unregelmäßigen Schalen auf, z.B. 3d Schale der Übergangsmetalle (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) und 4f und 5d Schale der Seitenen in den (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, ... Yb) → Besetzung der Orbitale nach der Hund'schen Regel (zuerst alle mit 1 Spin, erst dann 2. Elektron)

Austauschenergie: Arbeit, die es braucht, um Spins zweier e^- aus Parallelstellung um α zu drehen → Je grösser Austauschenergie, desto höher muss die Wärmebewegung sein, um den Selbstorganisationseffekt zu stören (Ferromagnetische Weissorganisation)

Blochwand: Grenze zwischen den Weissischen Bezirken (10^{-15} Atome) der Ferromagnetika. (kontinuierlicher Übergang)

In jedem Bereich existiert eine am leichtesten magnetisierbare Richtung vor (z.B. Fe [100], Ni [111]). Im Einfluss eines Magnetfelds richten sich allmählich alle Elementarmagnete aus. Zu Beginn (Bsp.: Fe): Rgt. um $90^\circ/180^\circ$ versch.

- Kleine Feldstärke: 90° Wandverschiebung in Richtung des äusseren Feldes → reversibel (a)
- Stärkeres Feld: 180° Verschiebung (Barkhausen-Sprung, hörbar)

→ irreversibel (b) → mag. hart
3. noch stärker: Rotation → reversibel (c)

Hysteresis: Da gewisse Bereiche nicht zurückklappen, geht die Magnetisierungskurve bei Verringerung von H nicht gleich zurück.

Koerzitivfeldstärke (H_c): Magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, um die 180°-Verschiebungen rückgangig zu machen (d.h. B auf Obringen)

Magnetische Härte:
hart
- Fläche innerhalb Hystereseschleife → möglichst klein
- hoher Sättigungswert für hohe Kraftwirkung bei Abwesenheit eines äusseren Magnetfeldes
- hohe Koerzitivkräfte H_c , damit Eigenschaften auch bei Störfeldern bleiben
- Sättigungswert der Magnetisierung möglichst hoch $M_s = \frac{B_s}{\mu_0} - H$

weich
- Fläche innerhalb Hystereseschleife → Ummagnetisierungsverlust möglichst gross
- hoher Sättigungswert für hohe Kraftwirkung
- Blochwände leicht beweiblich; grobkörniges Gefüge mit wenig magnetischer Speicherzellen
- Grobkörnung ermöglichen: bis 4% Si
- beste weichmagn. Stoffe: amorphe Fe-B-Si Werkstoffe

Magnetisch weich:
- Längerränderung eines Materials bei spontaner Magnetisierung. Effekt durch Feldstärken unterhalb H_c werden aus dem Leiter gedrückt.

Lippmann-Effekt: Supraleiter ideal diamagnetisch → Magnetfelder mit Feldstärken unterhalb H_c werden in dünne Schicht verdrängt → Induktionsströme auch

Weissner-Ochsenfeld-Effekt: Eisenmagnetfeld des Stroms wird bei Supraleiter in dünne Schicht verdrängt → Induktionsströme auch

Basisjahr 2011

Elastizität - Spannung

Kontinuumstheorie erlaubt Bauteilestrukturen innerseits mit den Randbedingungen zu berechnen.

Kleinste zulässiges Kontrollvolumen meist ca. 10^3 Atome Kantenlänge: Bsp. $\rho = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{dm}{dv}$ (Schwankung 10^{-3} ok)

Spannungsvektor $\underline{\Sigma} = \lim_{da \rightarrow 0} \left(\frac{d\underline{F}}{da} \right)$ → Zerlegung Kraftvektor in \underline{n} und \underline{t} Komp: $d\underline{F} = d\underline{F}_n + d\underline{F}_t = d\underline{F}_n \cdot \underline{n} + d\underline{F}_t \cdot \underline{t}$

Konvention: Zugspannung > 0 , hydrostatische Spannung < 0 , aber auch positiv sein möglich: $\sigma_{xx} = -p$ Bsp. Wurzel in sehr grosser Tiefe: $\underline{\Sigma} = -p \cdot \underline{1}_n$

Dehnung $\varepsilon = \Delta/l_0$

Verschiebungssänderung bewirkt Dehnung und Scherung:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{u_x(x+\alpha x, y) - u_x(x, y)}{dx} = \frac{du_x}{dx} \rightarrow \text{Verschiebung in x-Rtg pro dx}$$

Aufspaltung Spannungsvektor

Deformation

Elastische Konstanten E, G, v, K

Charakteristik von elastischem Materialverhalten:

- elast. Formänderungsbereich bei geringster Belastung
- Dehnung setzt spontan ein (nicht zuerst Spannung, dann Dehnung)

- Bei Entlastung → vollständig „Formrückänderung“

- lineare Beziehung zwischen Spannung und Formänderung

Längsdehnung: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ **Volumendehnung:** $\nu = \frac{\Delta V}{V_0}$ **Scherung:** $\gamma = \frac{dy}{dx}$

Poisson-Zahl ν : Zug in z-Rtg: $-\varepsilon_x = -\varepsilon_y = \nu \cdot \varepsilon_z$

Gibt an, wie sich die Dimensionen eines Körpers quer zur Zugrichtung bei Zugdehnung verhält; $\nu < 0.5$

Querdehnung: $\nu = \frac{\Delta w}{\Delta l}$ **Längsdehnung**: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ **Widerstand**: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Mit Betrachtung Querkontraktion (z.B. bei Widerstand): $\sigma = \frac{E}{1-\nu} \cdot \varepsilon$

* $\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_{xx} - \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_{yy} - \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_{zz}$ $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2G} \cdot \gamma_{xy}$

Für Isotropie: $K = \frac{E}{3(1-\nu)}$ **Materialien:** $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

* Formel, falls z.B. Zug in z-Rtg, aber Dehnung ν gegeben ist: zur Berechnung von σ_x ist dann $\nu = 0$, außer ebenfalls gehemmt!

Im Leichtbau: Statt $E \rightarrow E/\rho$ steif, aber möglichst leicht → Bsp. $[E/F_e = 3 \cdot [E/\rho]/[Fe]]$

Atomare Bindungskräfte: Elastische Dehnung → Vergrösserung Atomabstände

Wchselwirkungskraft zwischen zwei Atomen ist die Summe der anziehenden und abstoßenden Kraft. (ggw. ist Potentialminimum):

Manchmal einfacher, mit Potentiale zu arbeiten: $U(r) = \int_{\infty}^r F_{at} dr + \int_{\infty}^r F_{ab} dr$

Die Bindungsenergie $U_{B0} = U(r_0)$ = Arbeit, um Atome zu trennen Sie bestimmt:

i) T_E : Schmelzpunkt
ii) T_E : Rekristallisations temperatur
iii) T_E : Erstarrungstemperatur
iv) Q: Aktivierungsentnergie Diffusion

Elastische Verformung: $F_N = F_{an} + F_{ab}$ Im Gleichgewichts-Abstand: $F_N = 0$

Elastische Konstante: $F(r) = \frac{dU(r)}{dr}$

Graphenanalyse:
- Grosse Bindungsenergie $U_0 \rightarrow$ hohe Schmelztemperatur
- kleiner Krümmungsradius → hoher E-Modul

- r_0 : Gleichgewichtsabstand → Gitterkonstante $a_0 \sim r_0$

- Je grösser r_s , desto kleiner α (Wärmeausdehn.-koeff.)

- Bei asymmetrischem Potentialverlauf: $T \uparrow - r \uparrow$

Basisjahr 2010

Elastizität - Spannung

Kontinuumstheorie erlaubt Bauteilestrukturen innerseits mit den Randbedingungen zu berechnen.

Kleinste zulässiges Kontrollvolumen meist ca. 10^3 Atome Kantenlänge: Bsp. $\rho = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{dm}{dv}$ (Schwankung 10^{-3} ok)

Spannungsvektor $\underline{\Sigma} = \lim_{da \rightarrow 0} \left(\frac{d\underline{F}}{da} \right)$ → Zerlegung Kraftvektor in \underline{n} und \underline{t} Komp: $d\underline{F} = d\underline{F}_n + d\underline{F}_t = d\underline{F}_n \cdot \underline{n} + d\underline{F}_t \cdot \underline{t}$

Konvention: Zugspannung > 0 , hydrostatische Spannung < 0 , aber auch positiv sein möglich: $\sigma_{xx} = -p$ Bsp. Wurzel in sehr grosser Tiefe: $\underline{\Sigma} = -p \cdot \underline{1}_n$

Dehnung $\varepsilon = \Delta/l_0$

Verschiebungssänderung bewirkt Dehnung und Scherung:

$\varepsilon_{xx} = \frac{u_x(x+\alpha x, y) - u_x(x, y)}{dx} = \frac{du_x}{dx} \rightarrow$ Verschiebung in x-Rtg pro dx

Aufspaltung Spannungsvektor

Deformation

Elasticitontensor: $\underline{\Sigma} = \sigma \cdot \underline{n} + \underline{t} \cdot \underline{d} A$

Normalspann.: $\Sigma_i = \sigma_i \cdot n_i$ und $\Sigma_i = \sigma - \sigma \cdot \underline{n}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Spannungsgrenzen: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \frac{\sigma}{3}$ und $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \frac{\sigma}{3}$

Elastizität - Spannung

Kontinuumstheorie erlaubt Bauteilestrukturen innerseits mit den Randbedingungen zu berechnen.

Kleinste zulässiges Kontrollvolumen meist ca. 10^3 Atome Kantenlänge: Bsp. $\rho = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{dm}{dv}$ (Schwankung 10^{-3} ok)

Spannungsvektor $\underline{\Sigma} = \lim_{da \rightarrow 0} \left(\frac{d\underline{F}}{da} \right)$ → Zerlegung Kraftvektor in \underline{n} und \underline{t} Komp: $d\underline{F} = d\underline{F}_n + d\underline{F}_t = d\underline{F}_n \cdot \underline{n} + d\underline{F}_t \cdot \underline{t}$

Konvention: Zugspannung > 0 , hydrostatische Spannung < 0 , aber auch positiv sein möglich: $\sigma_{xx} = -p$ Bsp. Wurzel in sehr grosser Tiefe: $\underline{\Sigma} = -p \cdot \underline{1}_n$

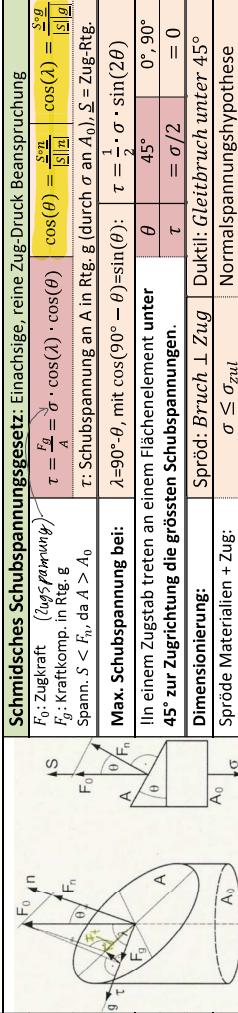
Dehnung $\varepsilon = \Delta/l_0$

Verschiebungssänderung bewirkt Dehnung und Scherung:

$\varepsilon_{xx} = \frac{u_x(x+\alpha x, y) - u_x(x, y)}{dx} = \frac{du_x}{dx} \rightarrow$ Verschiebung in x-Rtg pro dx</p

Plastisches Verhalten der Metalle $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$ immer vorhanden [egal ob ε_{pl} oder nicht])

Bruch vs. **Schubspannung** τ gross; plastische Verformung



Schmidches Schubspannungsgesetz: Einachsige, reine Zug-Druck Beanspruchung

$$F_0: \text{Zugspannung} \quad (Auszählung) \quad \tau = \frac{F_0}{A} = \sigma \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\theta) \quad \cos(\lambda) = \frac{\Sigma \Delta}{|\Sigma| g} \quad \cos(\theta) = \frac{\Sigma \Delta}{|\Sigma| g}$$

r: Schubspannung an A in Rtg. g durch σ an A_0 , $\Sigma = \text{Zug-RG}$.

Max. Schubspannung bei: $\lambda=90^\circ-\theta$, mit $\cos(90^\circ-\theta) = \sin(\theta)$: $\tau = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \sin(2\theta)$

Dimensionierung: Spröde Materialien + Zug: $\sigma \leq \sigma_{zul}$ Normalspannungshypothese

Duktile Materialien + Druck: $\tau \leq \tau_{zul}$ Schubspannungshypothese

Erweitertes SSSG: $\tau = \sum_i \sigma_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \cos(\theta_i)$; Gleitrichtung als Vektor \vec{g} auf $\vec{\sigma}$: $\lambda_i = \angle \text{zw. } \vec{\Sigma} \text{ und } \vec{g}$! (mehrere Spannungen)

Einkristallverformung → je mehr aktivierbare Gleitsysteme, desto besser verformbar

Theoretische Schubspannung $\tau_{th} = \tau_{th} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$ Schubspannung für Ableitung ohne Versetzung

Plastische Verformung → Abgleiten von Kristallen auf bevorzugten Ebenen (dichtest gepackte Ebene in dichtest gesp. Richtung)

Gleitebene+Gleitrichtung = Gleitsystem → außer bei reinen Schraubenversetz. durch Tangenten- und Burgersektor bestimmt.

Gleitmöglichkeiten in einem kfz-Gitter

Kfz: 12 leicht aktivier. hex: 3 leicht, 6 schwer aktivierbare

4E: $\{111\}^* 3R < 110>$

1E: $\{110\}^* 3R < 1120>$

6E: $\{110\}^* 3R < 111>$

Fcc: W, Mo, Nb, Ta

3E: $\{112\}^* 4R < 111>$

=12GS

Al, Cu, Ni, Ag, Au

Gleitmöglichkeiten in einem kfz-Gitter (110)-Ebene

Kfz: 12 ok, 36 schwer

Miller-Bravais-Indizes für hex. Gitter $\rightarrow \{x_1, x_2, x_3, z\}$:

$x_1 = \frac{1}{3}(2x'_1 - x'_2), x_2 = \frac{1}{3}(2x'_2 - x'_1), x_3 = -\frac{1}{3}(x'_1 + x'_2)$

$z = z'$ unter Bedingung: $x_3 = -x_1 - x_2$

Versetzungsbewegung:

i) Gleitsysteme mit grösster Spannung werden aktiviert nach:

$\tau = \sigma \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\theta) \geq \tau_c$

ii) plastische Grenze → tiefste Aktivierungsspannung τ_c

iii) Ab τ_c neue Versetzung in Versetzungssquellen (Dichte: 10^{15})

Fe_{el}, W, Mo, Nb

6E: $\{123\}^* 4R < 111>$

=24GS

Fe_{el}, W_{el}, Mo

Gleitmöglichkeiten in einem kfz-Gitter (123-Ebene)

Frank Reed Quelle

pin points: Hindernisse (Korngrenzen, Teilchen, Versetzungen...)

Schubspannung, um Versetzungslinie durch Feld der Teilchen mit Abstand D zu treiben:

$$\tau_c = \sum_i \Delta a_i \cdot \frac{G b}{D}$$

Mehr Hindernisse ⇒ grösser mögliche Spannung, die zu plast. Verform. führt \Rightarrow Festigkeit höher

Zusammenhang #Versetzung und plastischen Scherung: Verformungsgeschwindigkeit

$$\dot{\rho}_V = \frac{N}{l h}$$

Abgleitbetrag aller Gleitebenen: $\Delta a = \sum_i \Delta a_i = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij}}{l} b$

Mittlere Lauflänge der Versetzungen: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_{ij}$

Scherwinkel: $\gamma = \frac{\Delta a}{h} = b \bar{x} \frac{N}{l h} = b \bar{x} \rho_V$

N: #Versetzung; b: Burgersvektor; h*: betrachtete Schnittfläche*

Mobile und immobile Versetzungen (immobile Vers.: = Walldversetzungen): Versetzungstrau → Verfestigung

Bei einer Schubspannung $\tau > \tau_{c0}$ Gleiten:

1) Versetzungen produziert und bewegt, bis sie in Hindernissen steckenbleiben (Zunahme $\rho_V \cdot 10^4$)

2) immobilierte Versetzung bilden Pin-Punkte und steigern τ_c . Sie sind Träger der Kaltverfestigung (Verfest. durch Verformung).

Zeitliche Änderung Scherung \rightarrow $\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \rho_V m \cdot b \cdot v$

Geschwindigkeit $V_{mob} \leftrightarrow v = k_2 (\tau - \tau_c)^{1/m}$

Überspannung $\tau - \tau_c$:

Eine Gleitung auf einer Gleitebene sowie eine Scherverformung um γ verändern das Volumen **nicht!**

Basisjahr 2011

Physikalische Eigenschaften der Metalle

Thermische Eigenschaften – durch thermische Gitterschwingungen induziert

Wärmeschwingungen haben Quantencharakter (elastische Wellen und Teilchen) → Phononen

Molare Wärmekapazität (Molwärmе): Energie, um T um 1° zu erhöhen.

Bei hohen T (Metall bei RT, Keramik ca. 1000°): $C_{\text{litm}} = 3R = 25J/mol \cdot K$

Metall Fe Al Cu Ti Ni Mg Aufgaben mit Mischung von Stoffen: $\Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_f - T_i)}{m_1 + m_2}$

Spezifische Wärmekapazität: $C_p = \frac{Molwärme}{kg \cdot K}$

Wärmenenge Q: $Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T = m \cdot \Delta H$

Es wird immer das $C_p(T)$ der zu untersuchenden Phase betrachtet.

Wärmeausdehnung: Bei asymmetrischem Potentialverlauf: $T_1 > T_2$

→ Wärmeausdehnungskoeffizient nimmt mit steigendem T zu.

Wärmeleitung: Transport von Wärme (über Elektronen, Phononen) in einem Festkörper wegen Temp.-Gradient.

λ_p : über Phononen λ_e : über Elektronen $\rightarrow \lambda = \lambda_p + \lambda_e$ (je grösser λ, desto besser Leitung)

Gute Wärmeleiter sind meist auch gute elektrische Leiter

Wärmestrom: $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \dot{q} \cdot A \cdot [W]$

Wärmestromdichte: $\dot{q} = \frac{q}{A} = \frac{W}{m^2}$

Leitfähigkeit λ: Diamant (2000) > Silber (428) > Eisen (76) > X5CrNi18-8 (14)

Elektrische Eigenschaften ($\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$)

Elektronengasmode (klassische Theorie: Metallatome geben Valenzelektronen ab → Elektronengas um Atomrumpf)

Leitungselektronen: Elektronen im Elektronengas → transportieren Strom

Elektrisches Feld E: Bei Spannung: Technischer Strom in Rtg. des Fiedes

Driftgeschw. $v \approx 0.1 \frac{m}{s}$

Stromdichtevektor: $\vec{j} = \frac{1}{e} \cdot \vec{E} = \frac{p \cdot q \cdot n e}{A} \cdot \vec{E}$

Elektrische Flussdichte: $D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E$

Bändermodell: Elektronen werden nicht einheitlich auf Orbitale ausser wenn Photonen von Bedeutung sind (bei Leserungen der Fall)

Grund-/Valenzband: Als letztes mit Elektronen besetztes Band (d.h. Energiedieband der äussersten Schale)

Verbundenes Band: Bandgap: Nicht abgedeckter Energiediebereich zw. Valenz- und Leitungsband → ie grösser Bandgap, desto schlechter Leiter

Leitungsband: Erstes elektronenfreies Energiedieband

Fermi-Energie E_F : Energie, die die Elektronen bei 0 K maximal besitzen. (hochstens bei 0 besetztes Energieniveau). Bei T 1 bleibt E_F gleich.

Elektronen in den höheren Schalen interagieren mehr mit Nachbaratomen und weichen stärker von ihrer Grw.-Lage ab → breitere Bänder

Isolatoren: Leitungsband nicht besetzt, auf bei hohen T zu grosser Bandgap (> 3ev) → hoher spezifischer Widerstand

Halbleiter: Voll besetztes Valenzband und leeres Leitungsband, durch Bandgap getrennt. Energiedifferenz jedoch klein genug, um überwunden zu werden.

Leiter: Valenzband ist fast gleich dem Leitungsband, Elektronen können sich schon bei sehr kleiner Spannung frei bewegen.

Bandgap E_g ist so schmal, dass einige thermische Energie benötigt, um ins Leitungsband zu kommen. Diese hinterlassen im Gitter „Löcher“, in welche andere Elektronen springen. Bei Elektronen und Löchern“

Bei sehr tiefen Temperaturen verschwindet elektrischer Widerstand (T_c : Sprungtemperatur). Auch wichtig seind das äusserre Magnetfeld (kritisch, H_c) und die Dichte des im Leiter fließenden Stroms (krit. j_c). Bei Supraleitern entsteht der Strom nicht mehr wegen Einzel-elektronen, sondern Cooper-Paaren (e-Paare mit entgegengesetztem Spin). Bei diesen verschwindet Streuung an Verunreinigungen und die Kollision mit schwingenden Gitteratomen.

Probleme: spröde, kritische Stromdichte

Einflüsse auf Leitfähigkeit: Metalle I (viel Kollisionen) – Halbleiter und Isolatoren (Wahrnehmleistung grösser, ins Leitungsband zu kommen)

Leg.-Elemente: Gitterfehler (gelöst, Gitteratome, Versetzungen, etc.) senken die elektrische Leitfähigkeit enorm.

Schlecht: Mischkristallbildung, bessere Teilchenhärtung mit im Grundgitter nicht löschlichen Teilchen

Supraleiter: Durch Gitterdefekte Änderung $\Delta \rho_T$: Änderung durch Gitterschwingungen (temp)

Austauschenergie – Arbeit, die es braucht, um Spins zweier e- aus der Parallelstellung (mag. Effekt)

→ je grösser Austauschenergie, desto höher muss die Wärmebewegung sein, um den Selbstorganisationseffekt zu stören (Ferromagnetismus)

Wärmedehnung: Ein Atom befindet sich gegenüber einem Nachbaratom nicht im Gleichgewichtsabstand ℓ_0 , sondern es führt seiner Temperatur und dem zugehörigen Energieniveau \underline{U}_f entsprechend. Schwingungen aus. Da der Anstieg der austostenden Kräfte steiler ist als diejenige der anziehenden Kräfte, ist der Mittelpunkt der Positionen des Atomes grösser als es dem Gleichgewichtszustand entspricht. Würde $\underline{U}_0 > \underline{U}_f$ Das heisst, das Material dehnt sich auf Erhöhung der Temperatur.

Al-Mg-Legierung NICHT Aushärtbar:

Aluminium und Aluminium-legierungen

Allgemein: AlU ist guter Leiter, an der Luft und in Wasser sehr beständig (nicht Seewasser)

Festigkeitssteigerung AlU:

- Mg-Härtung: geöst Fremdatome
- KG-Härtung: Feinkorn
- Versetzungs-Härtung: Kaltverfest., Konfeinung
- Teileinhärtung → nur bei aushärtbaren Leg.

→ Verfestigung durch Ausscheidung v. Teilchen, Ausscheidungshärtung möglich Teilchen, die Plus-Minus-Regel genügen, um die Teilchen dort genug hohe Scherfestigkeit.

→ siehe auch Kapitel „Teileinhärtung“

Nichtaushärtbare Legierungen (nur MK, Versetzungs- und KG-Härtung)

Fast alle WS auf Aluminiumbasis bilden bei RT einen fast reinen Alumischkristall (α), die übrigen Leg.-Elemente werden zu einer zweiten Phase auscheidend bis 5% Mg

β : hohe Oberflächenergie bez. Matrix, Ausscheidung metastabil → Keine Festigkeitssteigerung durch diese β – Ausscheidung!

\rightarrow je tiefer T_f , desto größer: Bruchdehnung, Zugfestigkeit, Streckgrenze (Bei allen anderen Legierungen/Metallen andersrum)

Mit-Härtung sehr gut bei AlMg-Leg.: keine Ausscheidung bis 5% Mg

Kaltverfestigung, enthalten max. 5-8% Leg.-El. wegen Duktilität.

Aluminüm-knetlegierungen:

Für Kaltumformung, enthalten max. 5-8% Leg.-El. wegen Duktilität.

Al-Mg-Cr-Legierung:

\rightarrow Keine Festigkeitssteigerung durch Kaltverfestigung (Werkstoffgruppe: (Versetzungsgleitebenen))

Zustände hart und halbhart eingeteilt durch Kaltverfestigung. (Werk-Härte): Hartes Blech, bis 90% verformt, halbhart: <10% Material erreicht werden.

Ausscheidungshärtung/Ausdhärtung (Teileinhärtung)

Bildung Überstruktur: Benötigte Versetzungsentfernung 4 mal grösser (b_0) doppelt so lang) → Festigkeitssteigerung

Kombination von kleinen (Cu, Si, Zn) Atomen mit grossen (Mg, Li)

Bsp: Distanz Li-Cu gleich wie Al-Al, aber Überstrukturen: Burgersvektor verdoppelt.

Aushärtbare Legierungen → wichtigste Form der Festigkeitssteigerung:

Beste T/Leg. für Lösegangslinien: Von $\alpha + \beta$ so hohe T und weit „rechts“ durch α wie möglich, aber nicht über Eutektikale!

Festigkeitssteigerung hängt von der Art der Ausscheidung ab: Gleichgewichphasen nie Grund für Steigerung: (Al,Cu, Mg₂₃, Mg₂Zn) Braucht meist metastabile Phasen

Ablauf der Aushärtung: Glühen, Abschrecken (überätz. MK), Auslagnern (Keimbildung, Teilchenwachstum und Ostwaldreifung)

1. Lösungsglühen: (siehe oben)

$\alpha + \beta \rightarrow \alpha$ (reine Phase unter Eutektikalen)

T muss sehr genau eingehalten werden.

Zu hoch: Ausschwitzungen, Abfall der Festigkeit Zu tief: unvollständige Lösung, tiefer Festigkeit

Ausnahme: Al-Zn-Mg₁ Da Material meist gleich rekristallisiert, möglichst rasch Aufheizen für feines Korn

2. Abschrecken: Von der Glühtemp. aus wird abgeschreckt (meist Wasser), um Diffusionsgänge zu verhindern, wodurch ein übersättigter Kristall entsteht.

Keine Zeit zw. Glühen und Abschrecken, sonst sinkt Festigkeit.

(Außer Al-Zn-Mg₁)

3. Warmauslagern (Kaltaushärtten)

$\frac{\sigma}{\sigma_B} \approx 0.5$

Auslagern über 150°C: - Auslagerung schneller Kaltausläfern:

- Bruchdehnung ≈ const. Wärmausläfern:

- Bruchdehnung ↓ - $\sigma_S \uparrow$

Gefahr: Überhärten = zu lange Auslagnern → Teilchenzahl nimmt ab (Ostwaldreifung) → Härte- und Festigkeitsabfall

Glühen von Alu-Werkstoffen

Barren-Hochglühen: Barren aus Stranggießen vor Weiterverarbeitung hochglühen → Abbau Korrozeigering und Übersättigungen

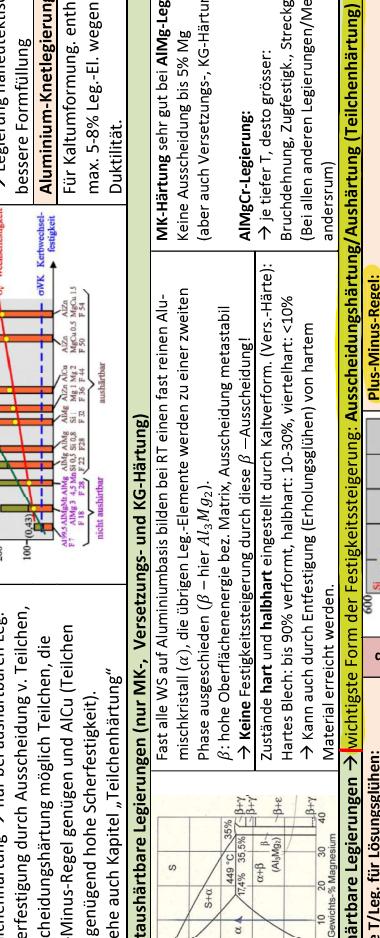
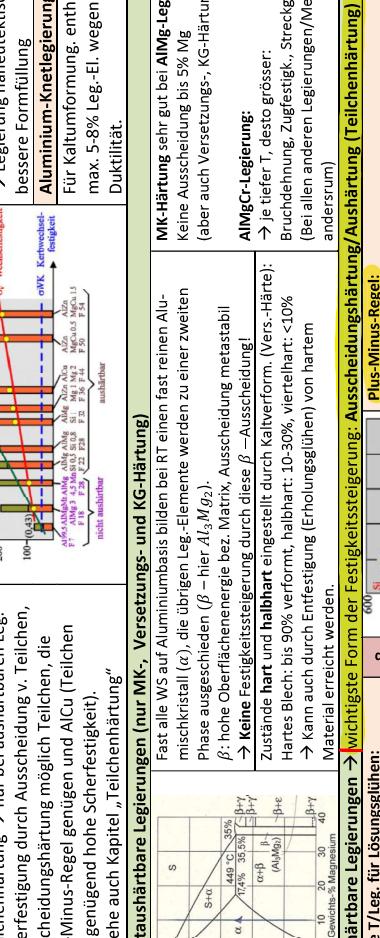
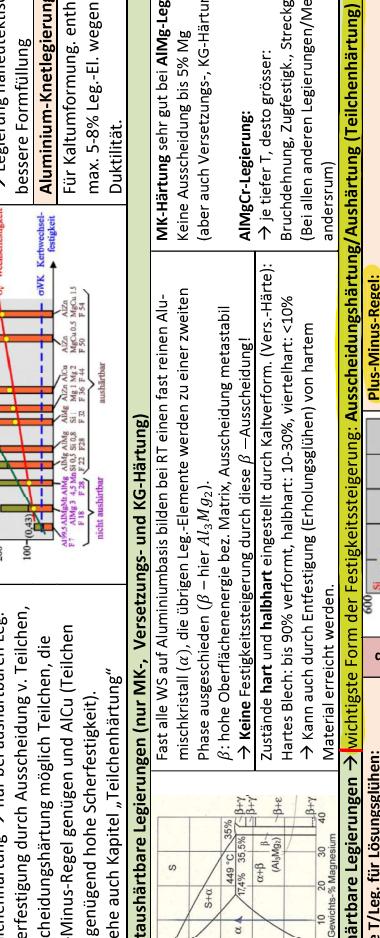
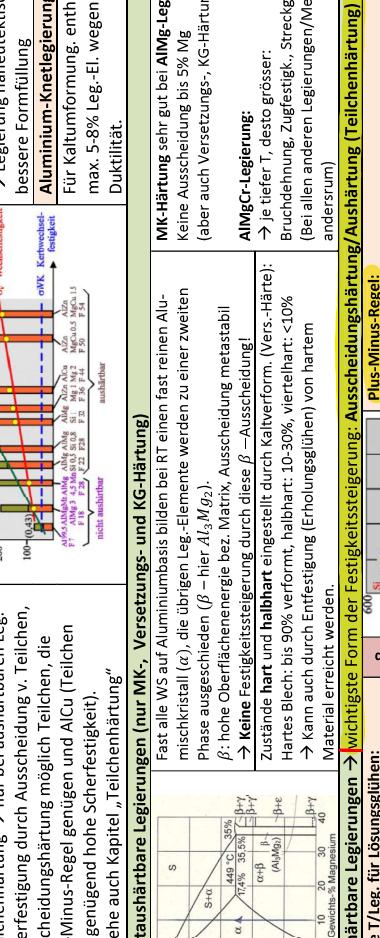
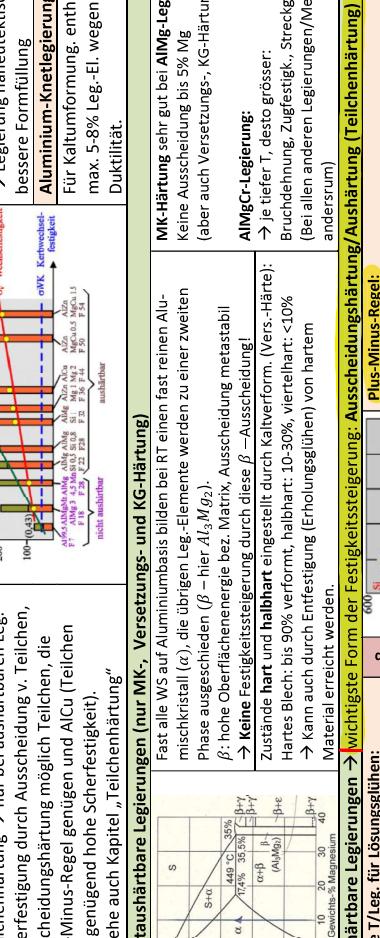
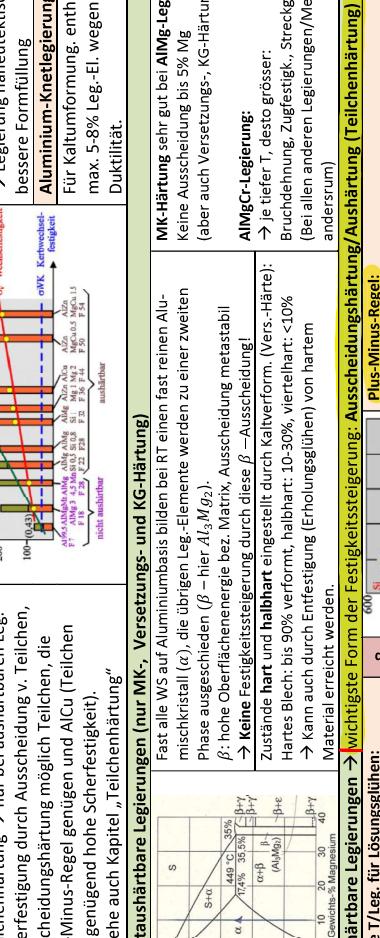
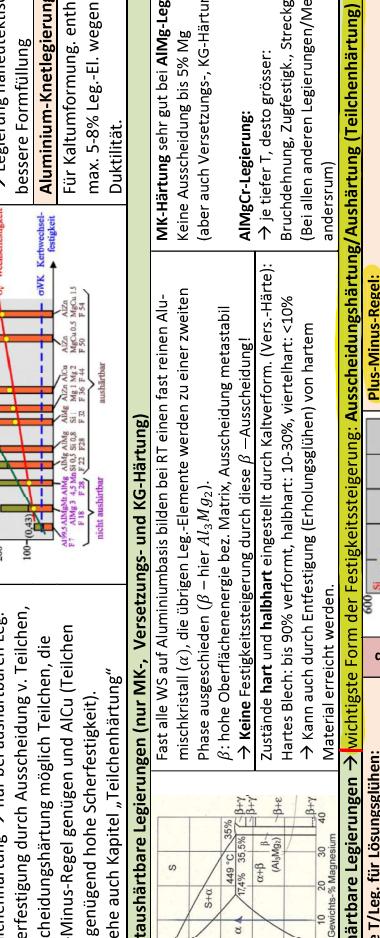
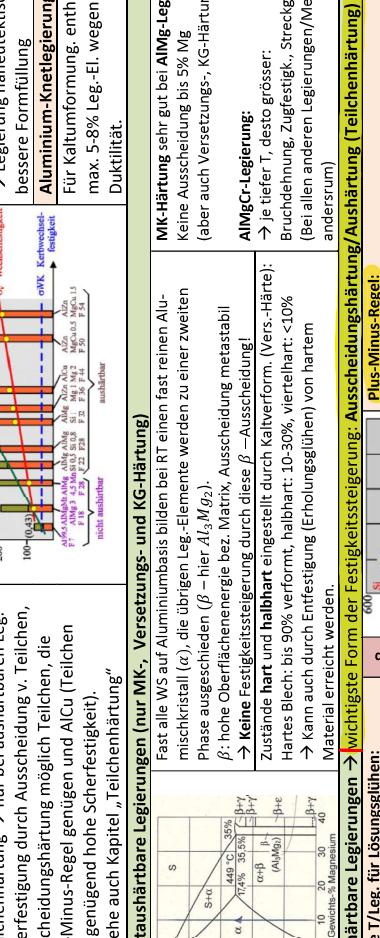
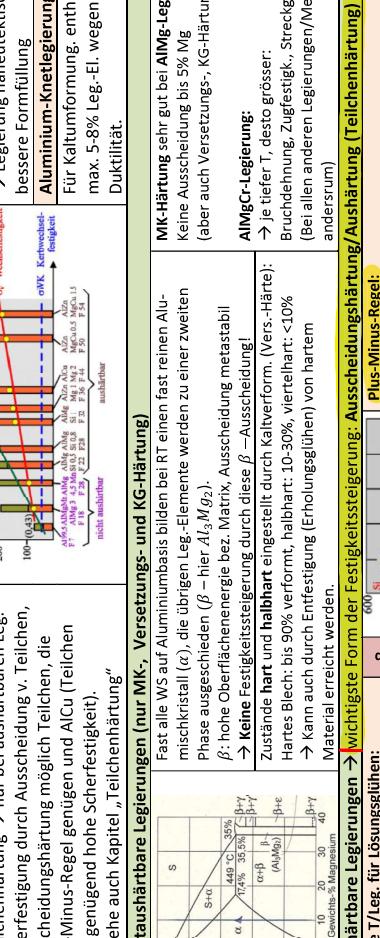
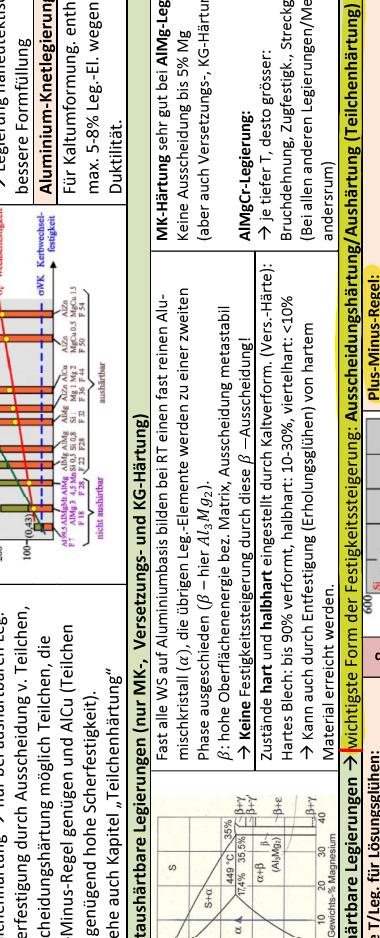
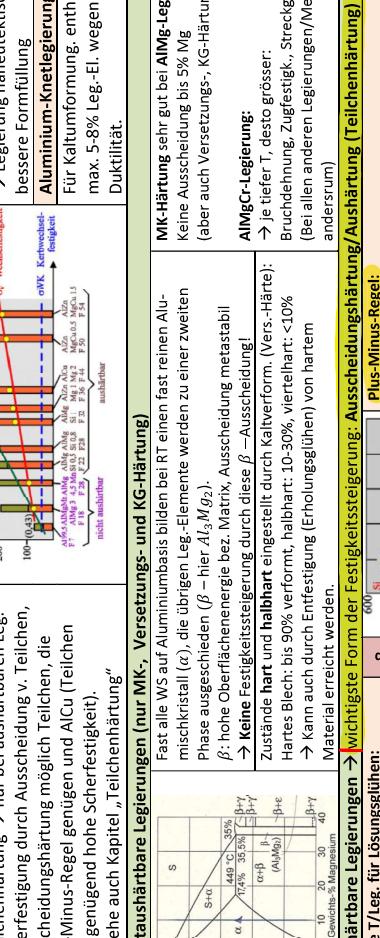
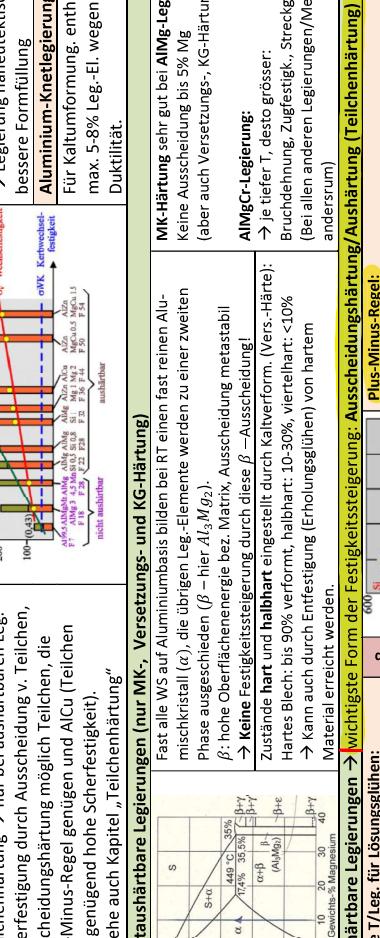
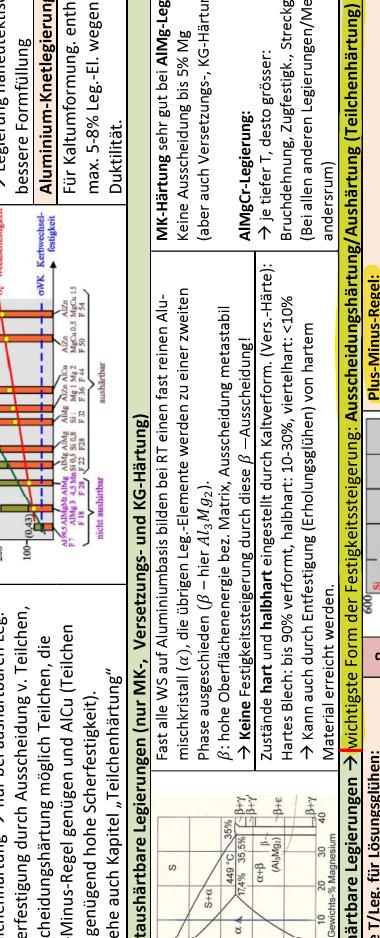
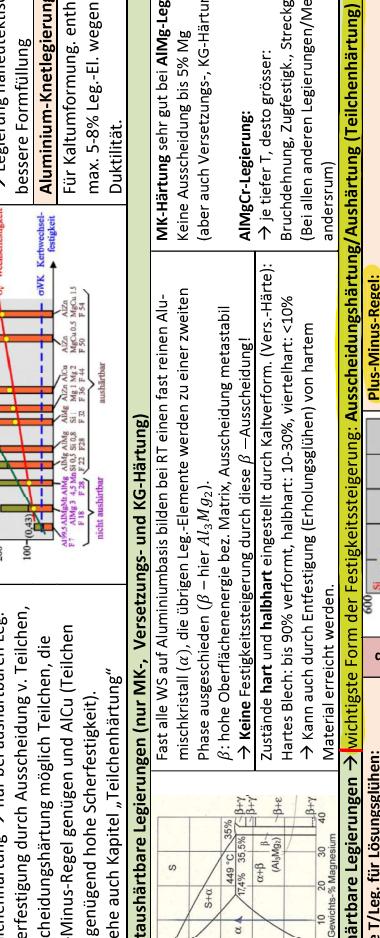
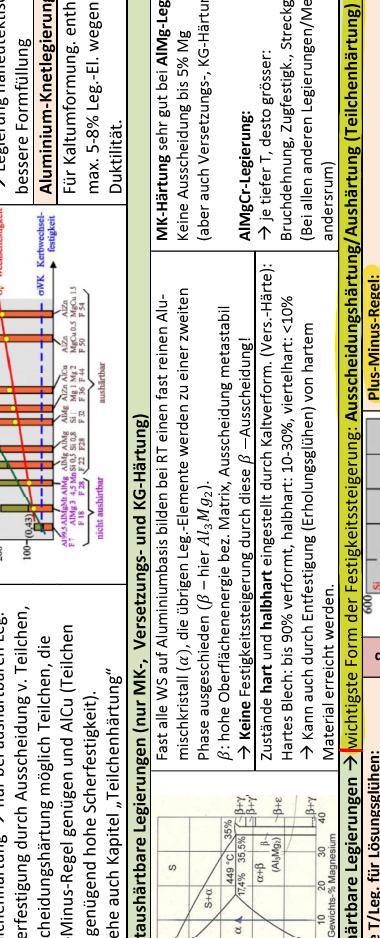
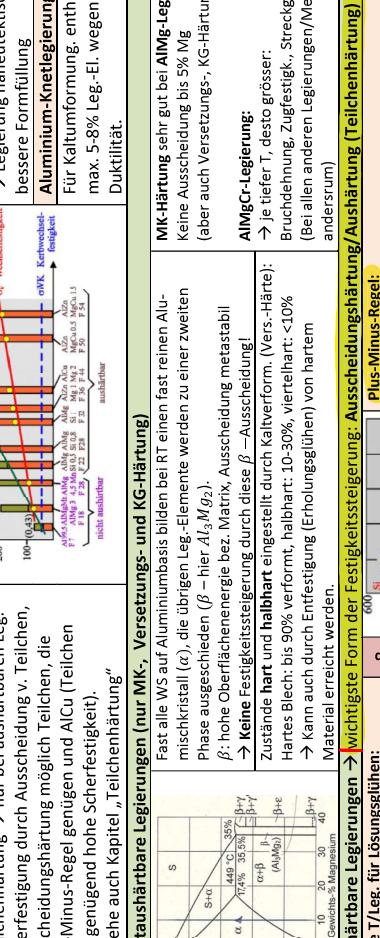
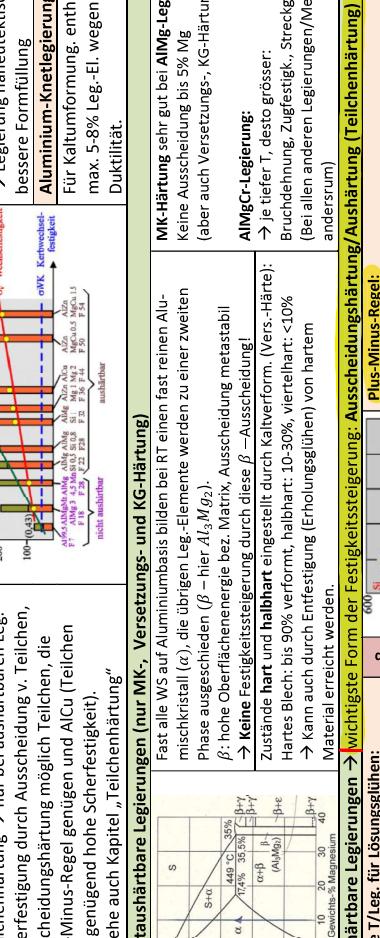
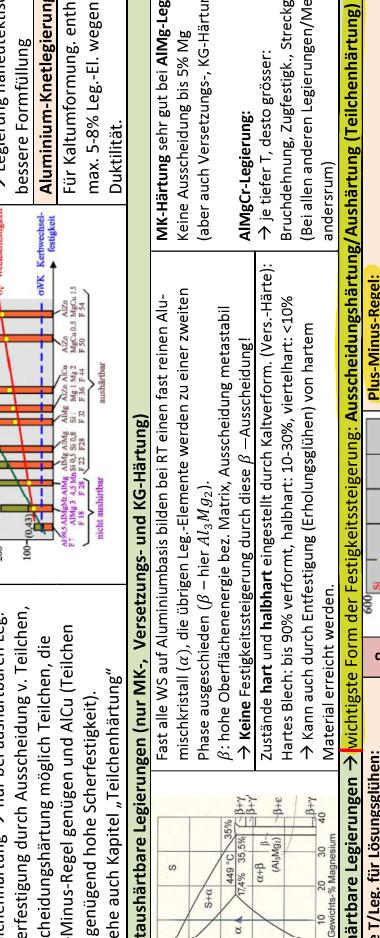
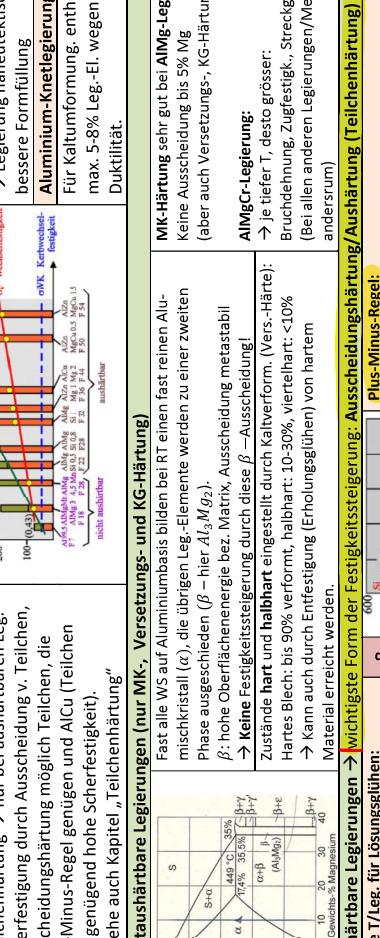
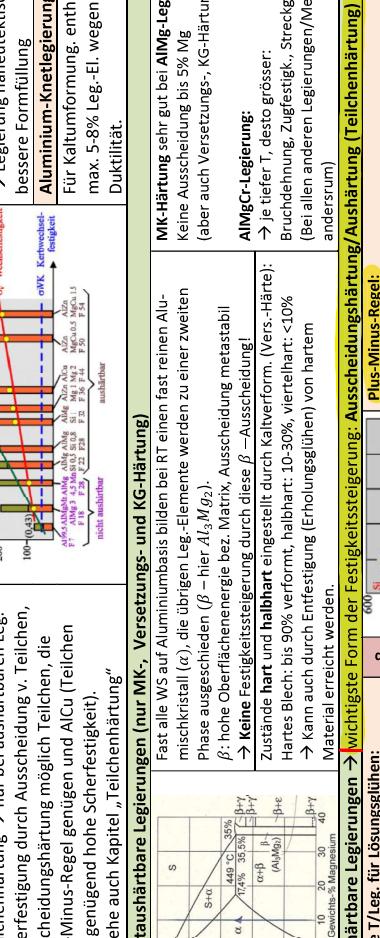
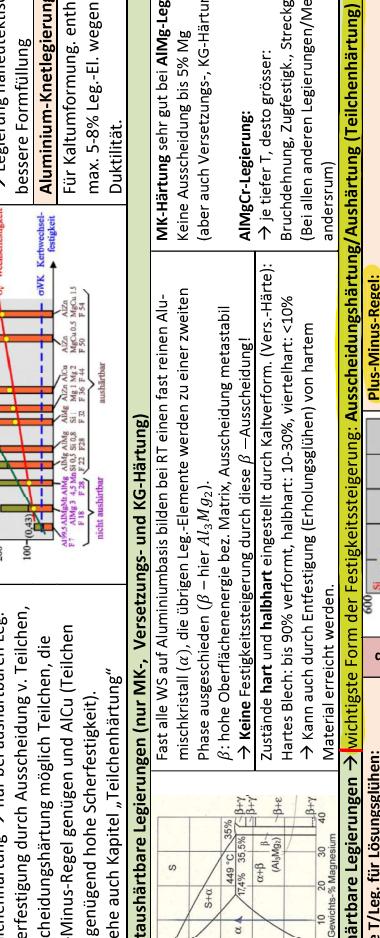
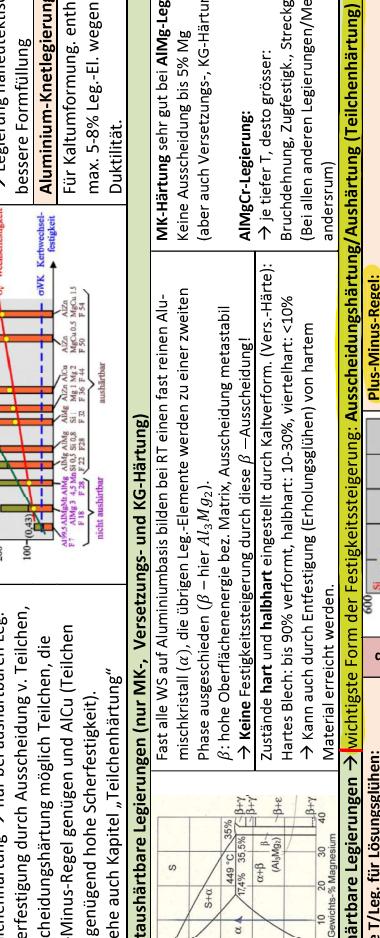
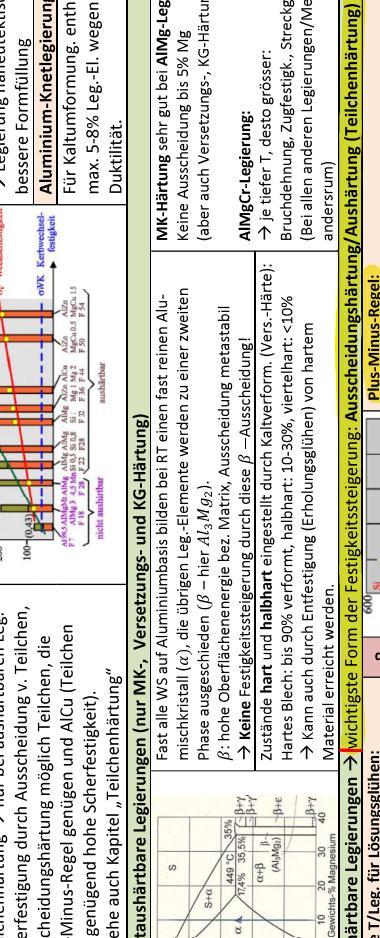
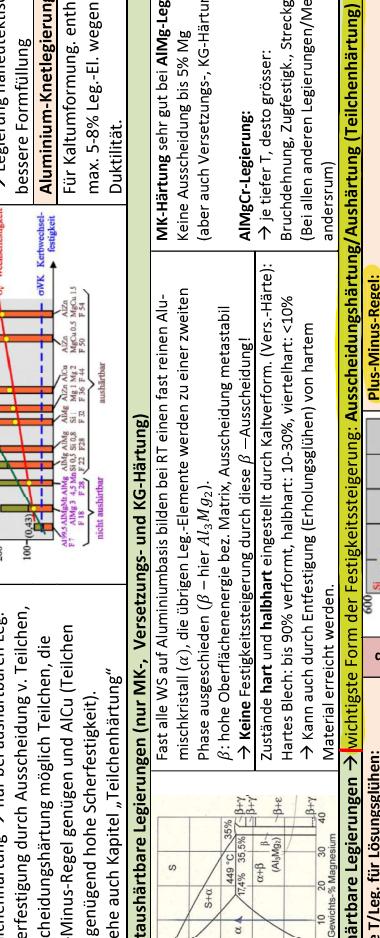
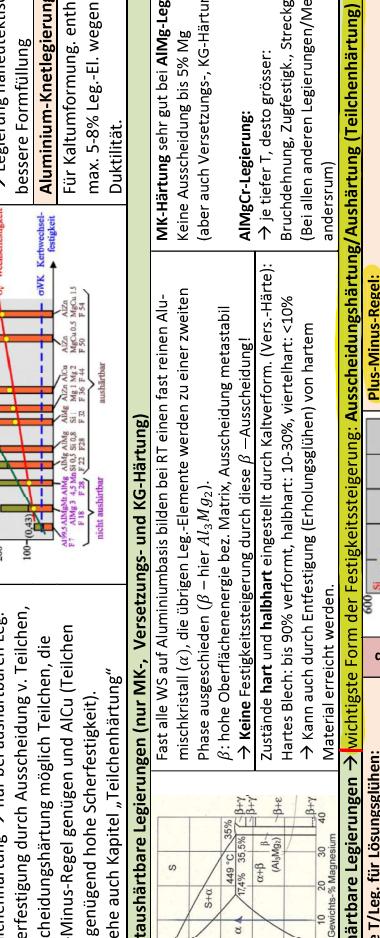
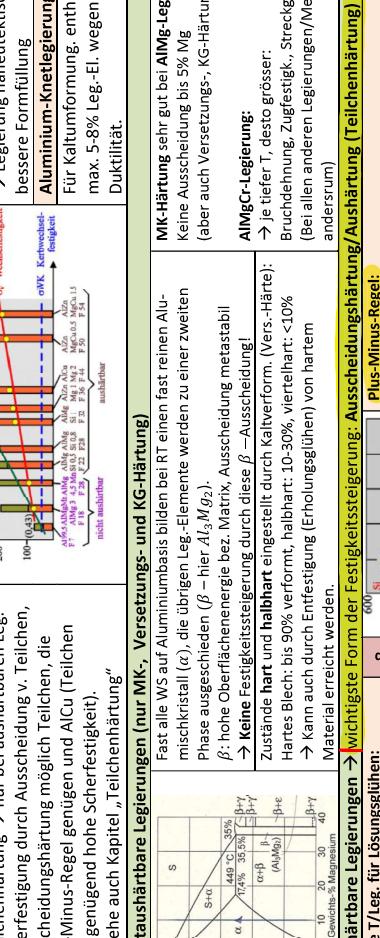
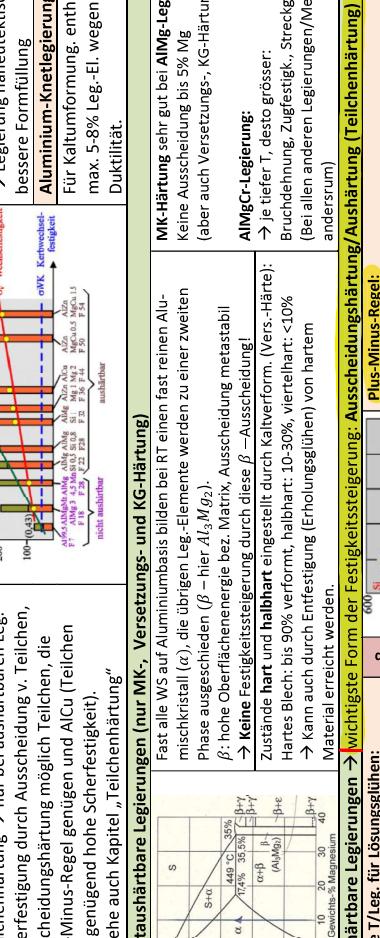
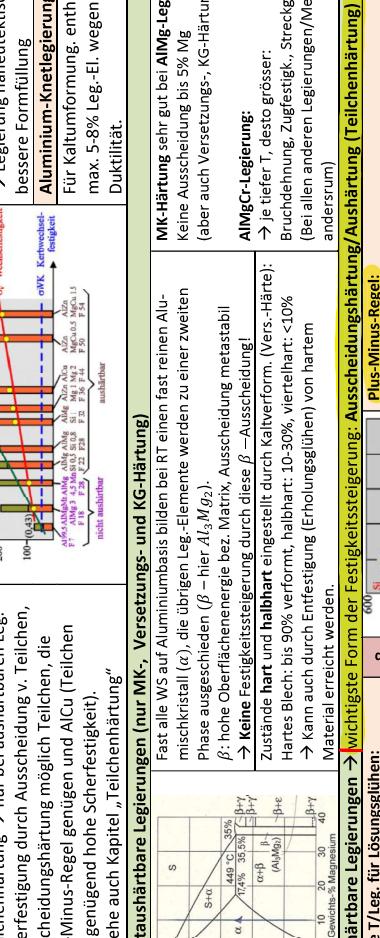
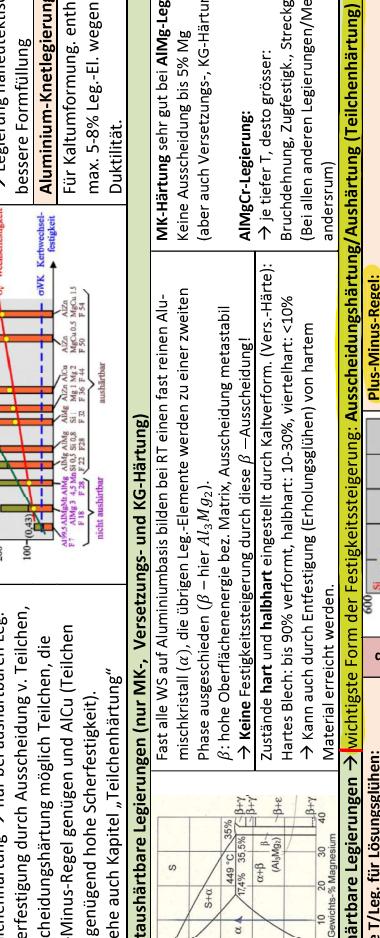
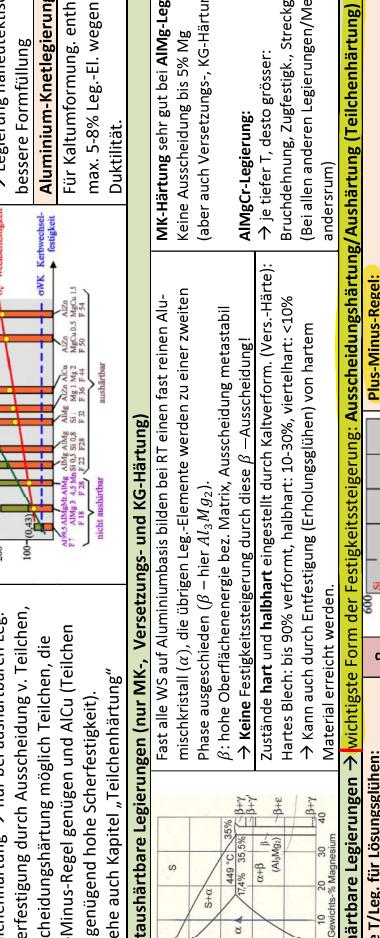
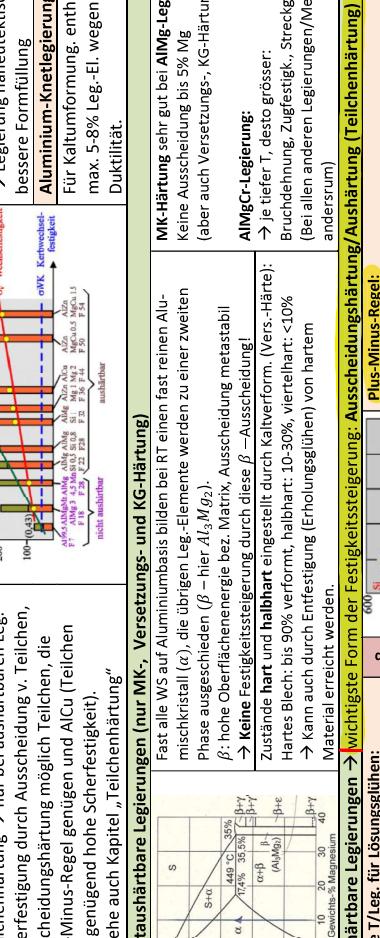
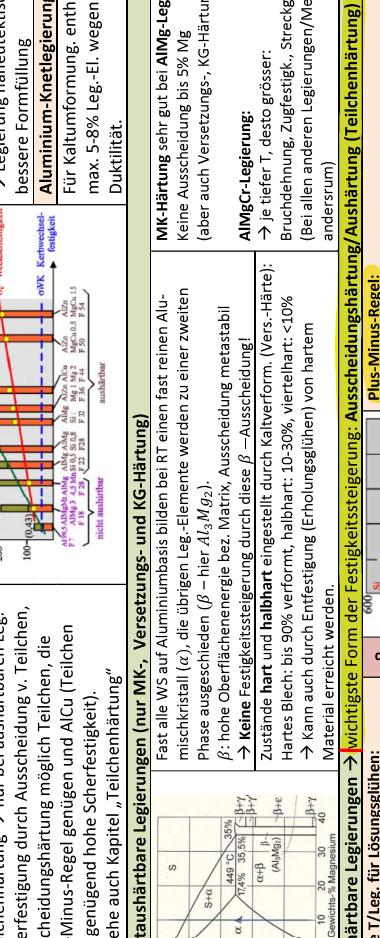
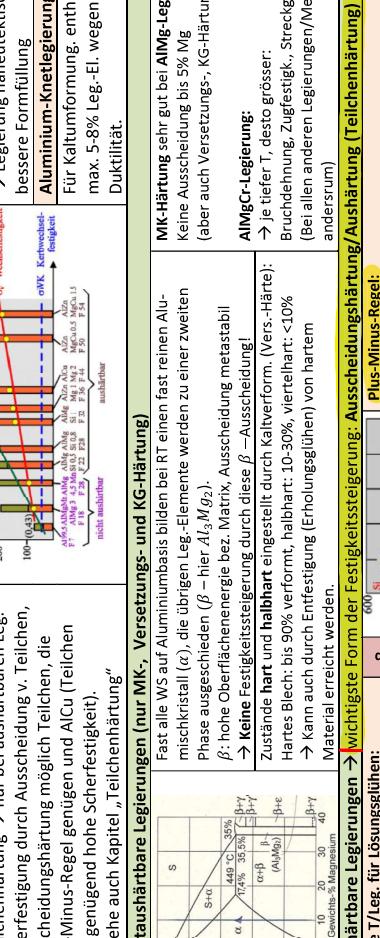
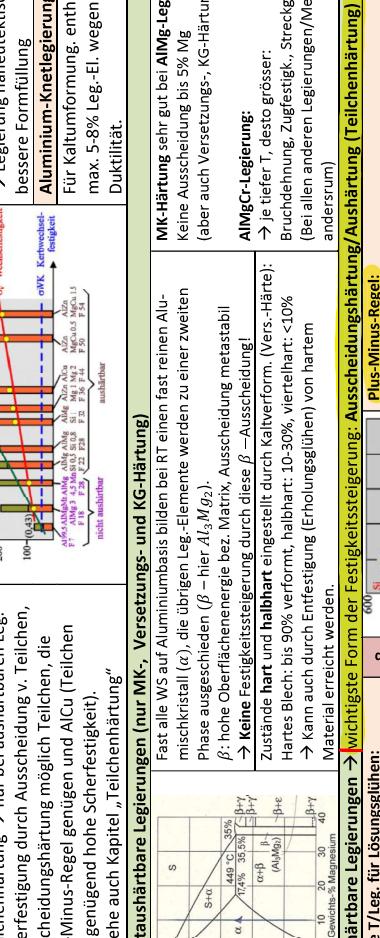
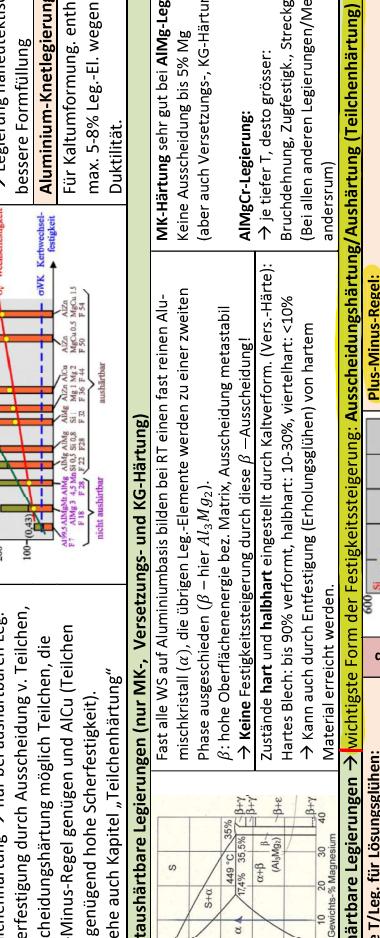
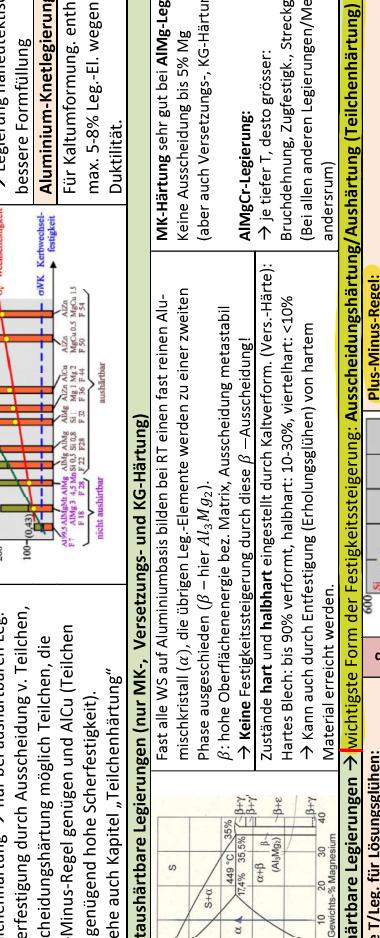
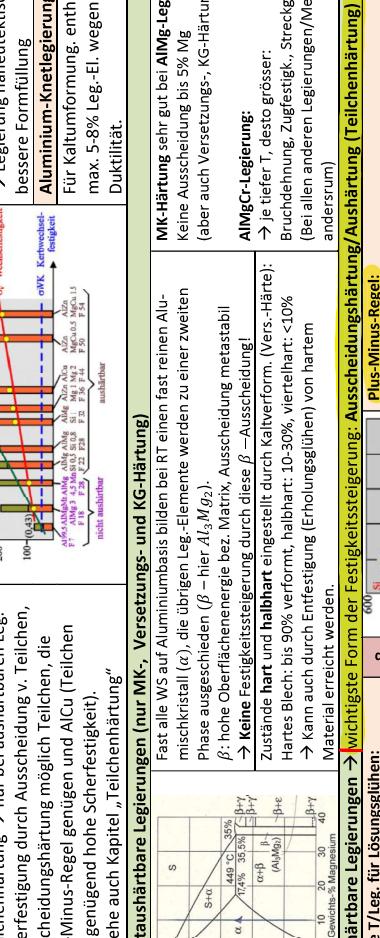
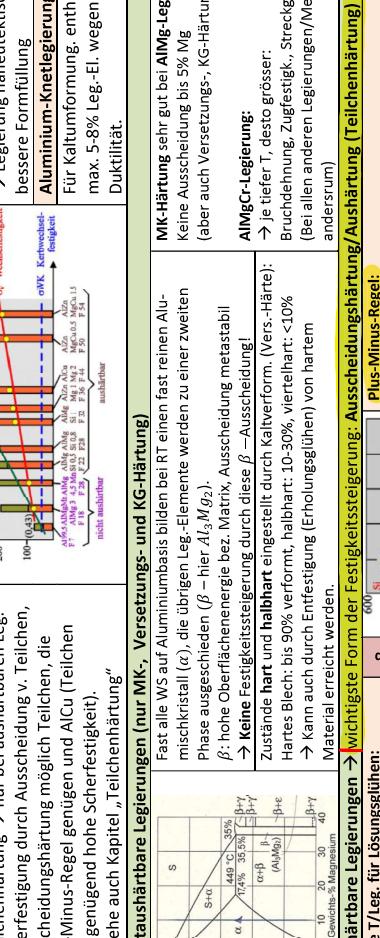
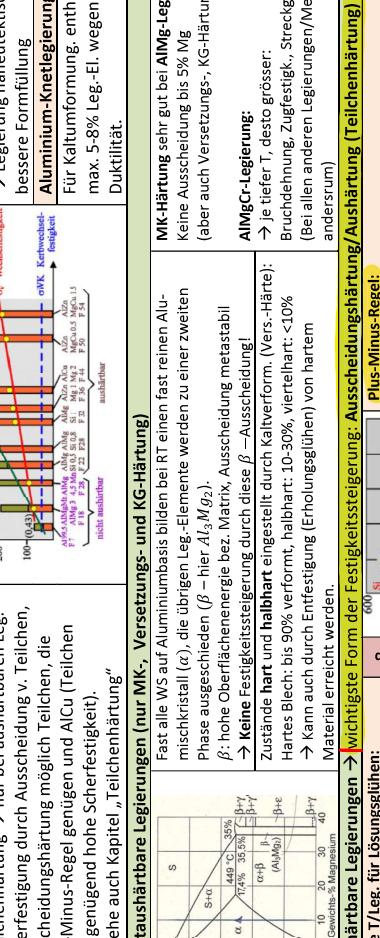
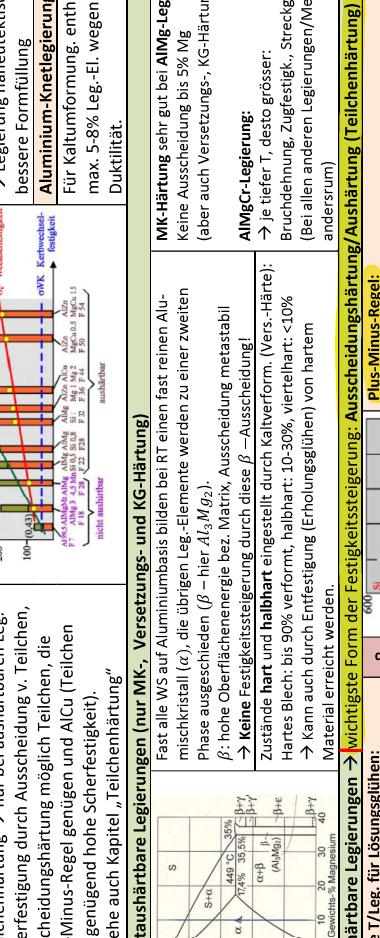
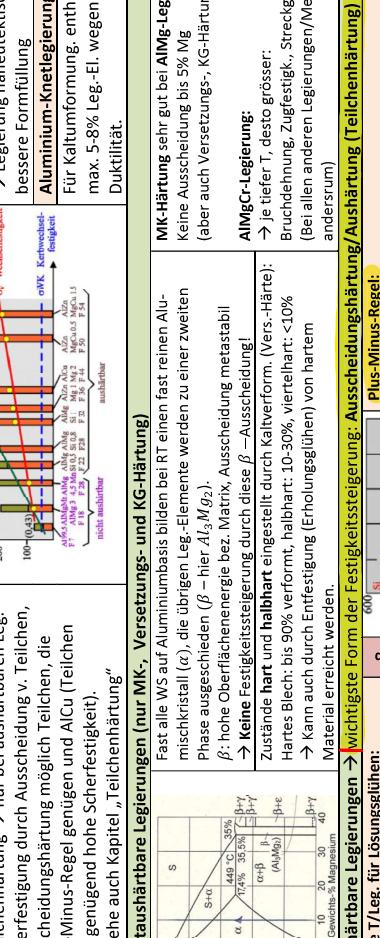
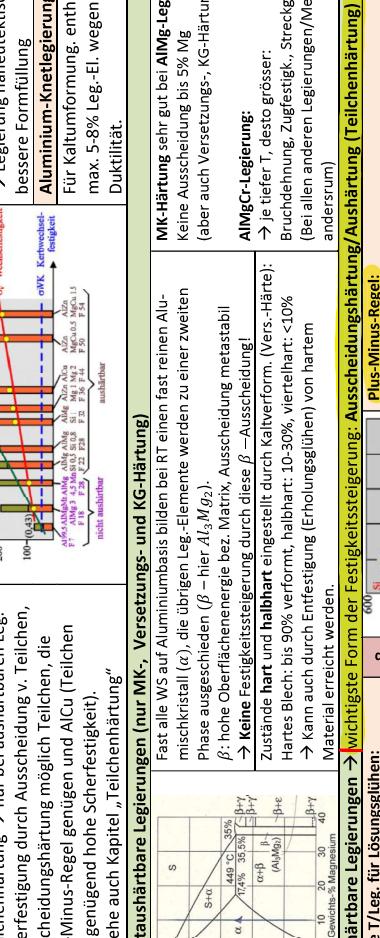
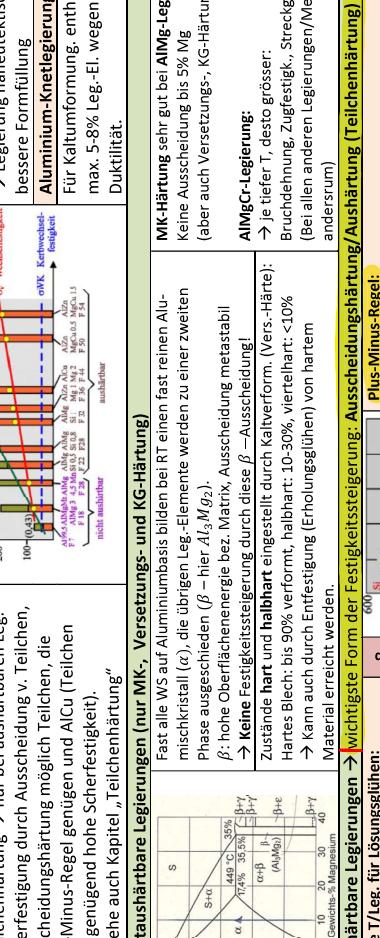
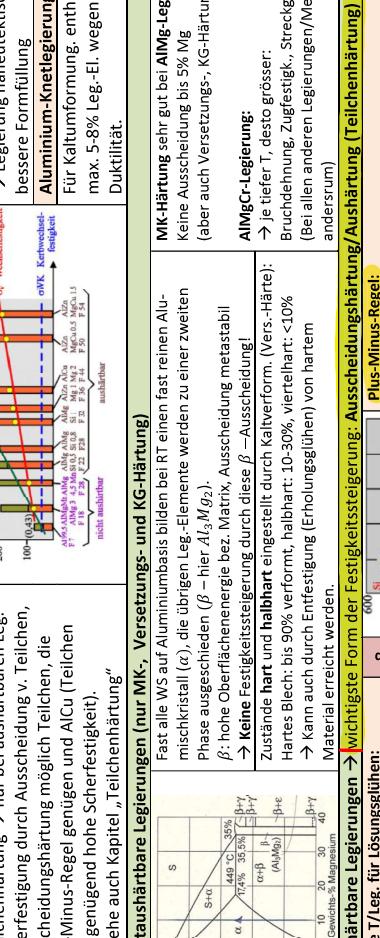
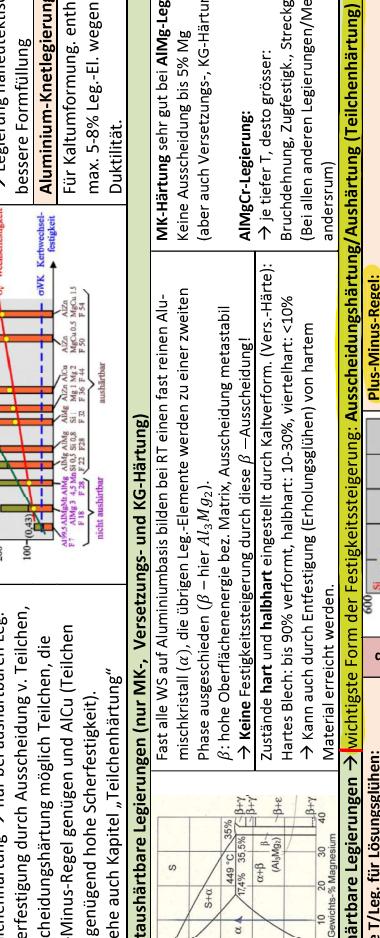
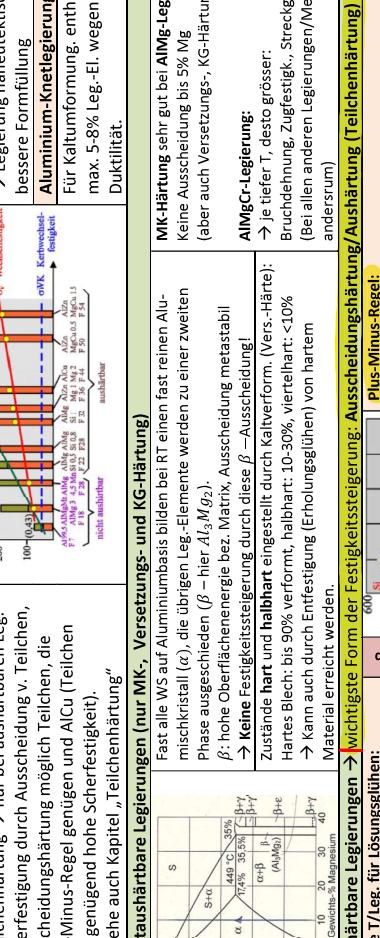
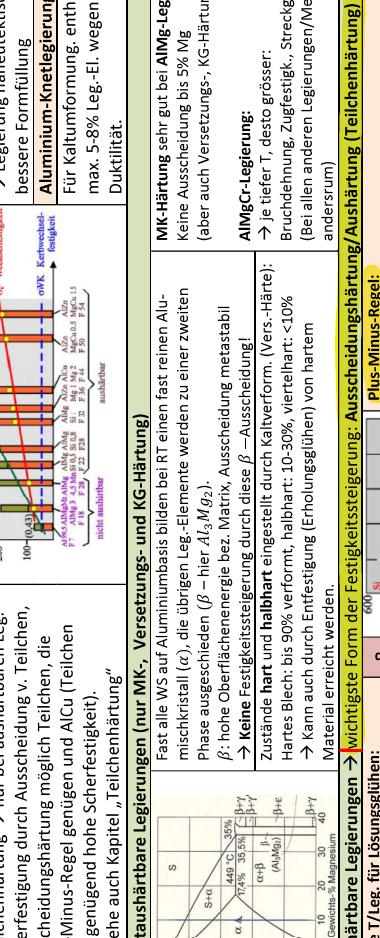
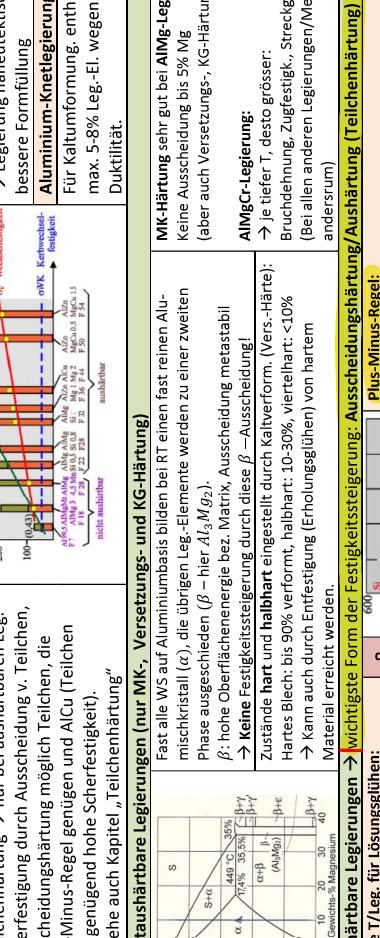
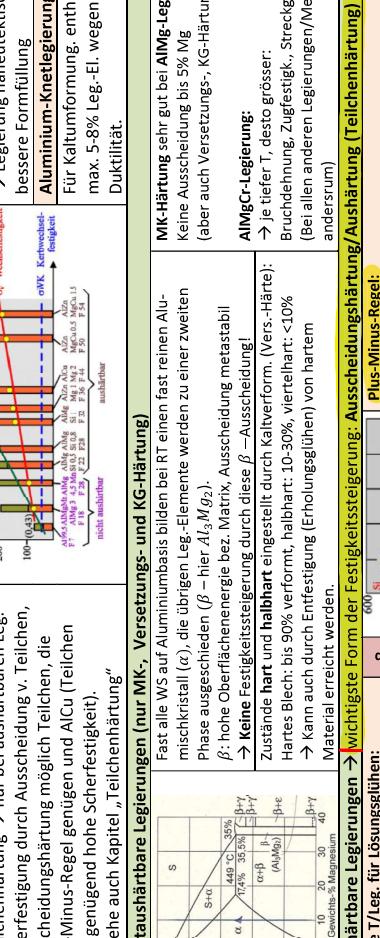
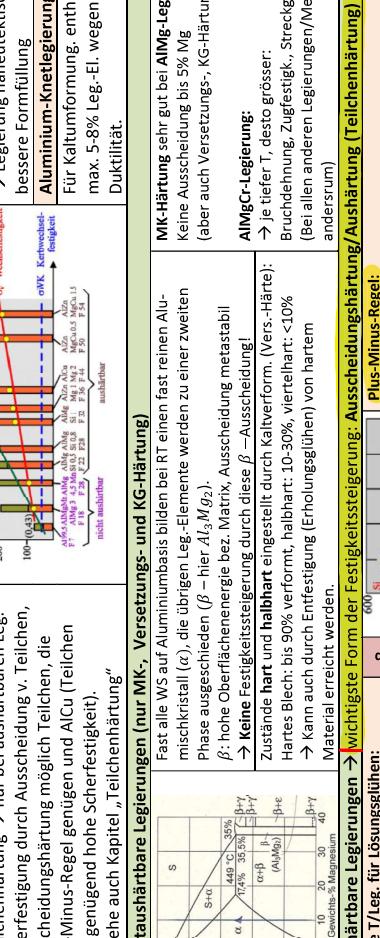
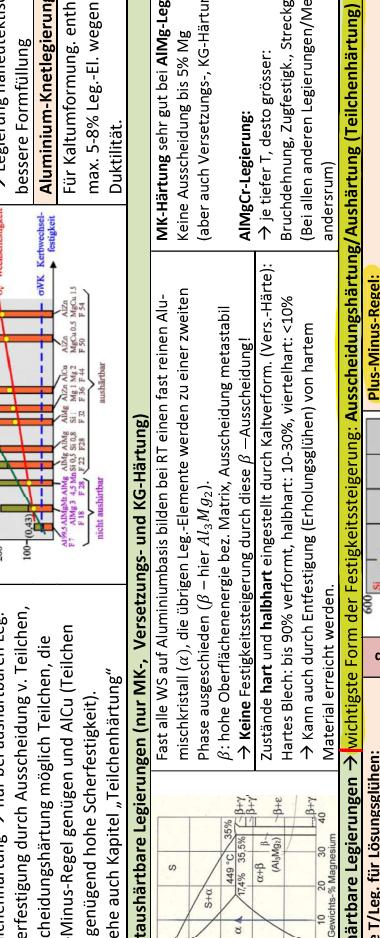
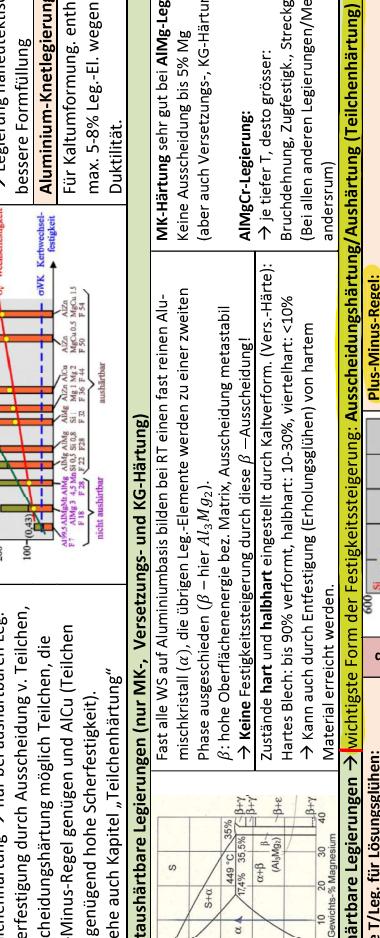
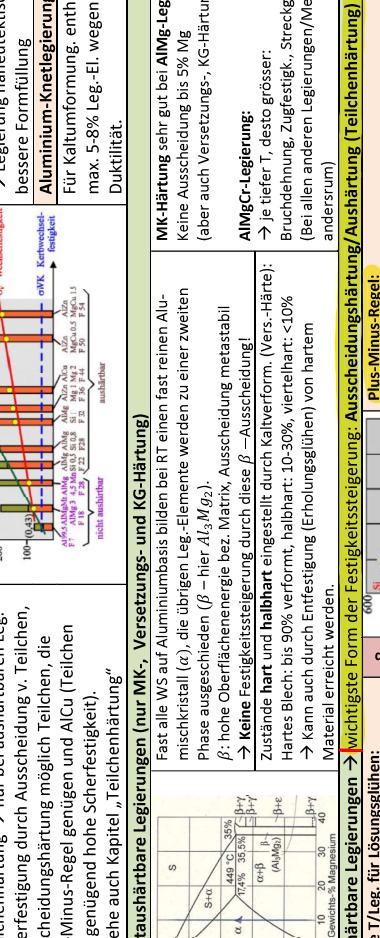
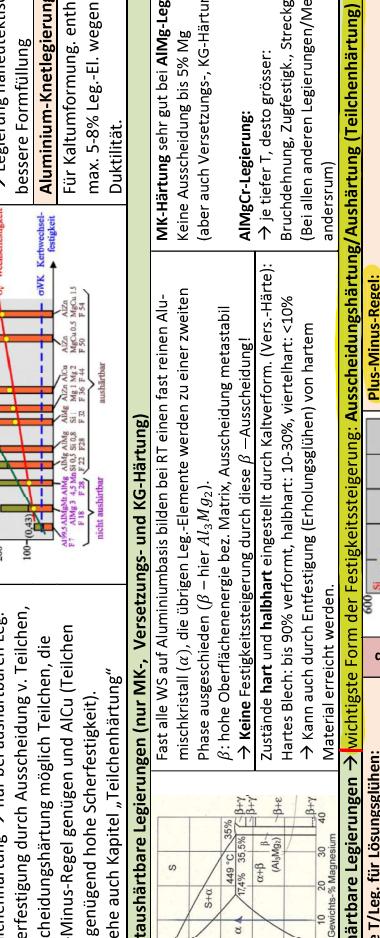
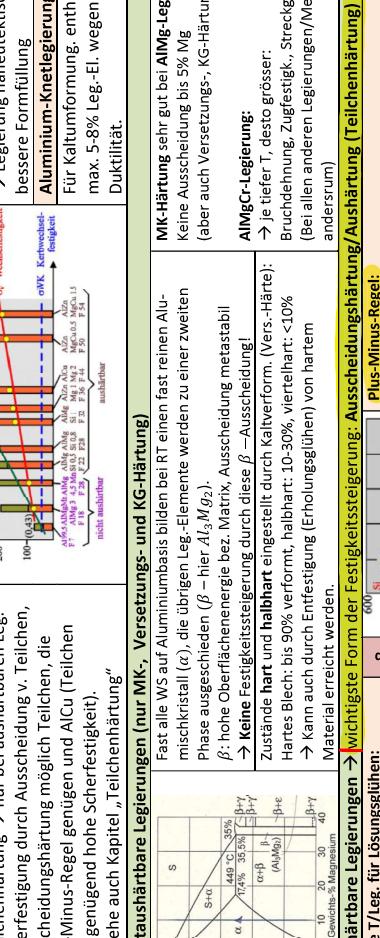
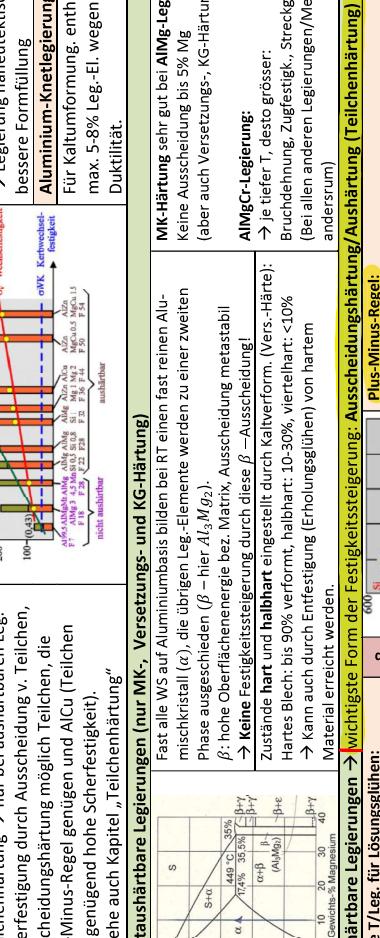
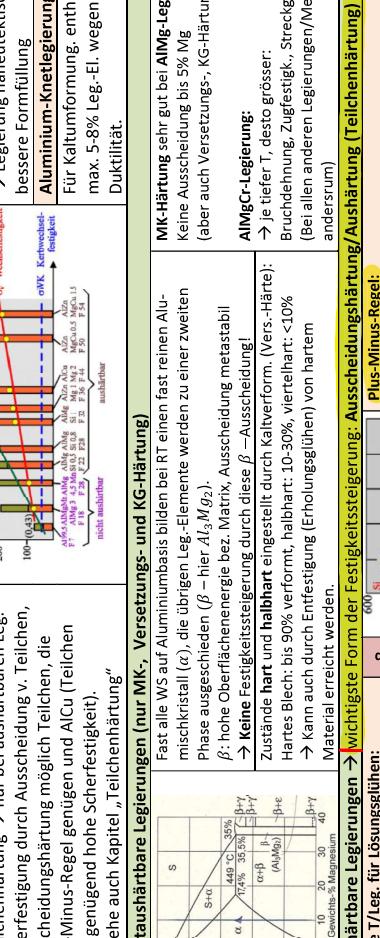
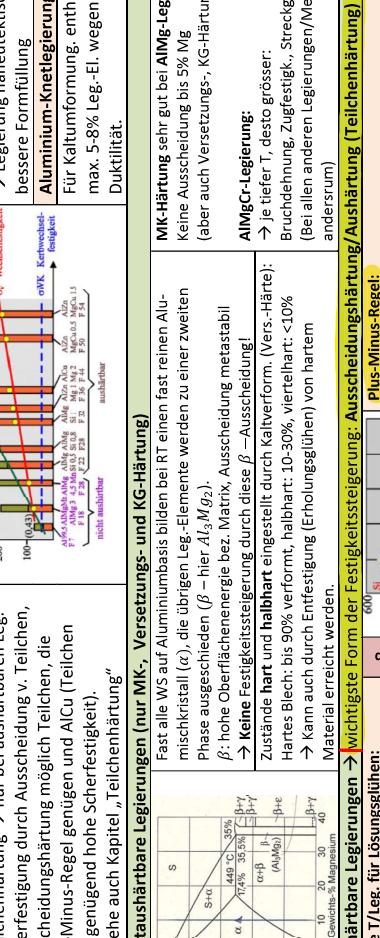
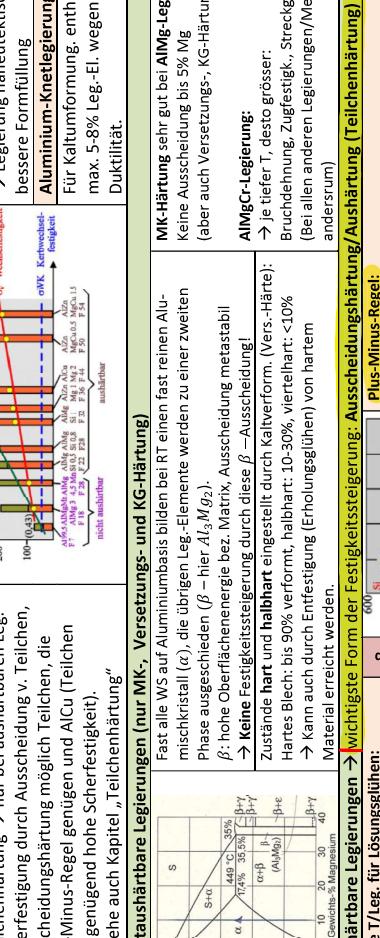
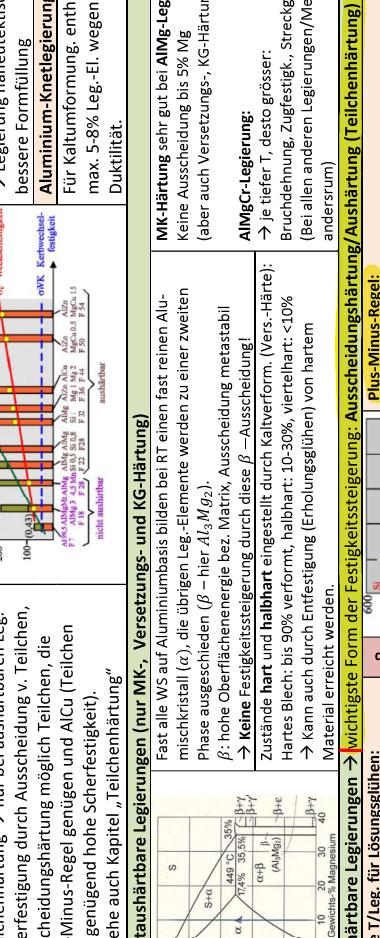
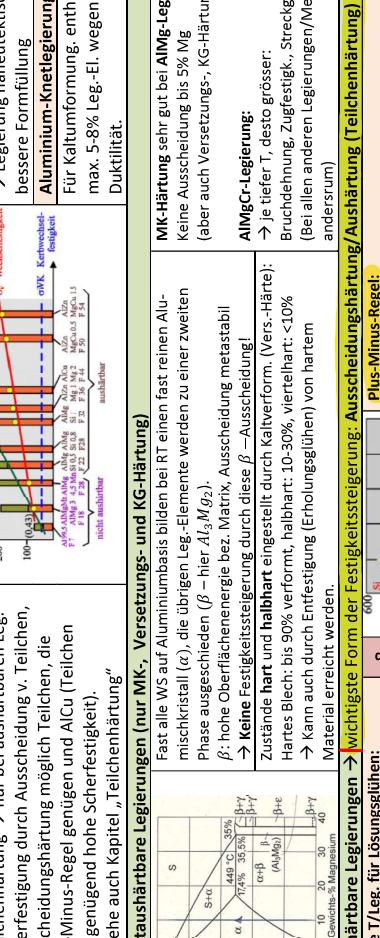
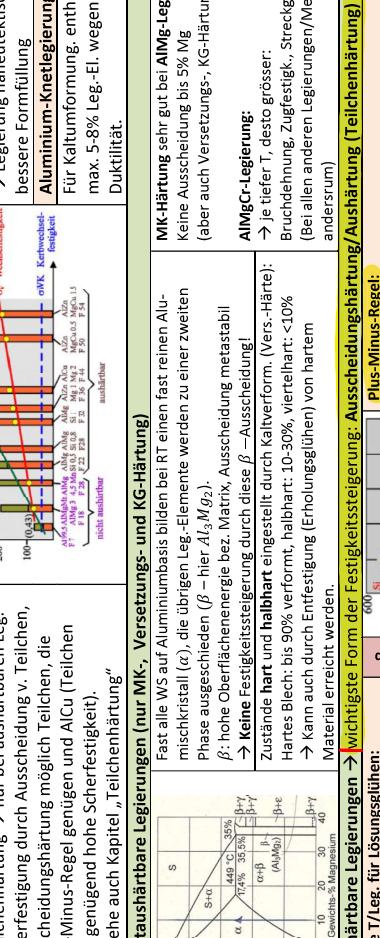
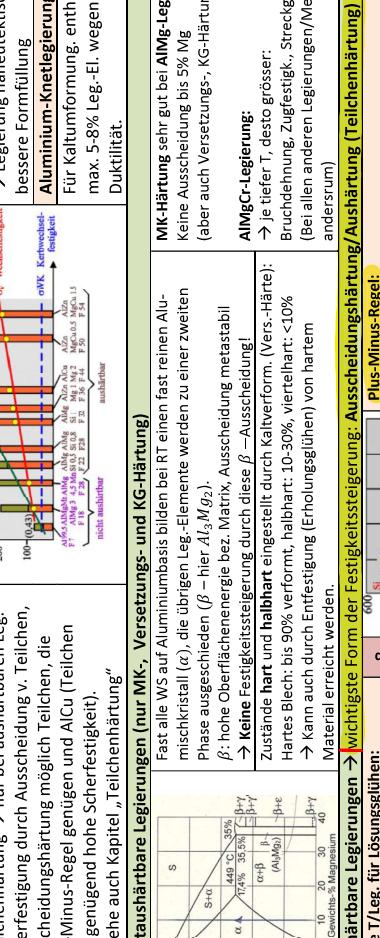
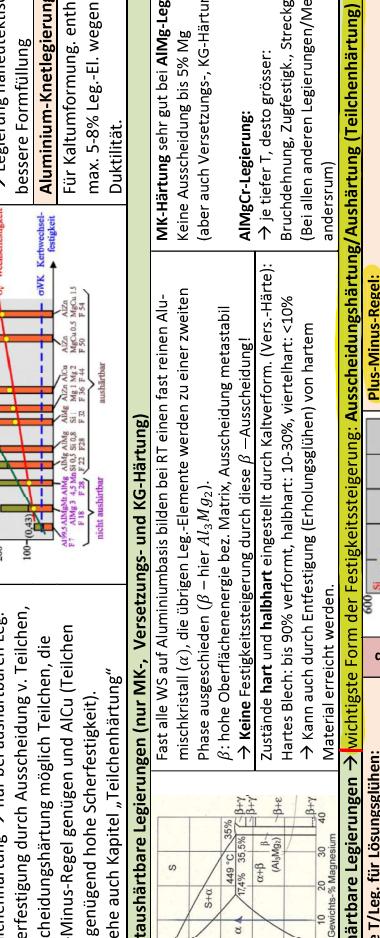
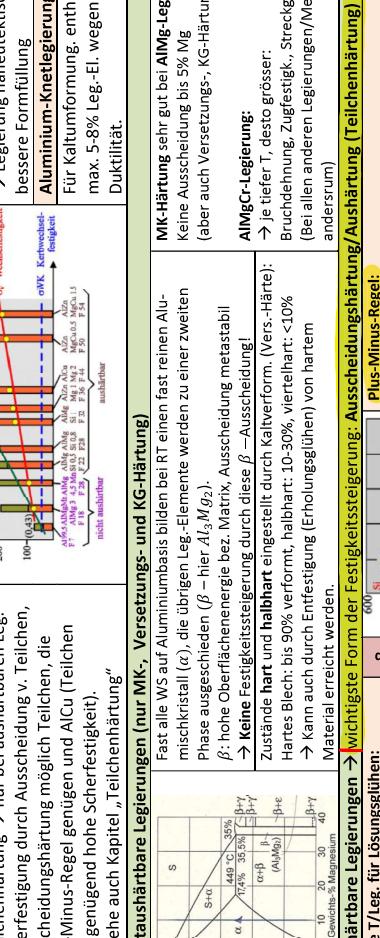
Weichglühen: Werkstoffe in leichter verformbarem Zustand zurückführen. Aushärtbare Legierungen langsam abkühlen, nicht abschrecken!

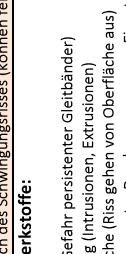
Al-U-Gusslegierung: → Al-Si, Al-Cu, Al-Zn-Mg, Al-Br. Gut Messbarkeit für Zerspanbarkeit (Automatenlegierung)

Korrosionsverhalten von Aluminium: trotz unedlem elektrochem. Potential mit Wasser → Dank Oxidschicht korrosionsbeständig

Natürlicher Schutz: (Widerstandsfeste Oxidhaut von 25 Å Atomabständen ($\approx 0.01\mu m$), regeneriert sich bei Verletzung sehr schnell).

→ Bei aus härtbaren Al-Cu-Leg. wege inhomogenität (viel Cu) keine solche Oxidschicht → korrosionsanfällig.



Basisjahr 2011			
Betriebsfestigkeit:			
Belastungskollektive: Wie oft wird best. Spannung erreicht? Ausschläge werden Spannungsklassen (Laststufen) zugeteilt, man zählt nur noch die Maxima.			
Gestaltfestigkeit: Begriffe und Einflüsse auf Dauerfestigkeit			
Gestaltfestigkeit: Stützwirkung: Oberfläche b_s : Größenfakt. b_0 : Kerbwirkung:	<p>Dynamische Festigkeit eines Bauteils beliebiger Gestalt und ungleichförmiger Belastung</p> <p>Je steiler Spannungsanstieg, desto stützt Umgebung (Fließgrenze steigt)</p> <p>Statische: Einfluss Bruch-, Fließgrenze; Wechselseitigkeitsverhältnis δ_{Wk}: Erhöhung Kerbwandsfestigkeit</p> <p>Rauhe Oberflächen erleichtern Risinitiierung, wirken wie Mikrorisse.</p> <p>Große Teile halten σ_w schlechter aus, da eher Fehler (Poren, Mikrorisse,...)</p> <p>Spannungsumberhöhung bei Kerbe</p>		
Zugsspannung immer gefährlicher als Druckspannungen	<p>Reibungsüberlagerung bei σ_{max}-Zone, Dauerfestigkeit stark ↓</p> <p>Korrosion verhindert über schlechte Oberfläche Dauerfest.</p> <p>Temperatur $\uparrow - \sigma_W \downarrow$ (Ausnahme mache Stoffe: Blausprödigkeit)</p> <p>Massnahmen um Dauerfestigkeit steigern: weiche Überhänge, grosse Übergänge, grosse Übergangsradien, Verringerung Untersch. Steifigkeit</p>		
Ermüdungsbruch – 4 Bereiche: Stabilität ist Frage der Energieaufnahme			
a) Lokalisierung, Verfestigung : $\sigma < \sigma_c$, Rissbildung ausschlaggebend, Verteilung Vers. inhomogen → Gleitbahnen (Gleitverform. lokalisiert)			
b) Risskeimbildung (Schadenslinie): Bei wiederholtem Gleiten der gleichen Verformung entstehen persistente Gleithänder Risskeime entstehen durch: Extrusionen und Intrusionen mit Bildung von Kerben, Inkompatible Verformung benachbarter Körner, Debonding von harten Einschlüssen, Brechen harter Einschlüsse			
c) Stabile Rissausbreitung: Riss geht immer von Ort mit Spannungskonz. aus, hier: pro Zyklus um konstanten Betrag (Ripples, ev. Rastlinie)			
d) Instabile Rissausbreitung: durch Ø verändert sich Belastung auf Querschnitt → Riss breite sich unkontrolliert aus → Restgewaltriss	<p>Charakteristiken für Ermüdungsbruch:</p> <ul style="list-style-type: none"> i) feine Rissflächenstruktur, & rauher Rissbruch (spröder Gewaltbr.) ii) Bruchfläche ⊥ Hauptzugrichtung iii) fehlende makroskopische Verformung iv) Rastlinien im Bereich des Schwingungsrisses (können fehlen) 		
Ermüdungsfeste Werkstoffe:			
Rissbildung: $\text{zust } 45^\circ$, dann \perp Zugrichtung	<p>1) hohe Zähigkeit</p> <p>2) tiefe γ_{cr}, kleinere Gefahr persistenter Gleithänder</p> <p>3) feine Gleitverteilung (Intrusionen, Extrusionen)</p> <p>4) fehlerfreie Oberfläche (Riss gehen von Oberfläche aus)</p> <p>5) Oberflächenschichten unter Druckschichten → Einschlüsse</p> <p>6) porenfreier Werkstoff, Durchschmieden zur Verschließung Poren</p>		
Rastlinien: \neq Ripples!			
Schwingungsstreifen (Ripples):			

Wärmebehandlung Anforderung

Gut giessbar	Schlechte mechanisc Eigenschaften	Nicht schweissbar
--------------	--------------------------------------	-------------------

Verguss als weisses Gusseisen
Anstellung stahlähnlicher Eigenschaften
durch thermische Nachbehandlung:
Tempering

Schwarzer Temperguss GJMB
Glühen ca. 20h bei 905°C in
neutraler Atmosphäre

Stahl	< 2,06% C
Gusseisen	> 2,06% C

HCF: Spannungen unterhalb Fließgrenze
LCF: Spannungen oberhalb der Fließgrenze
Kurzfestigkeit

ζ : --> Tabelle \checkmark

Stahltypen		Basisjahr 2010	
Baustähle	- tragende Stähle, nur Festigkeitswerte ausschlaggebend (oft mit C-Gehalt eingestellt, $0 < C < 0.6\%$)		
Einsatzstähle: $(0.1 < C < 0.25\%)$	<ul style="list-style-type: none"> - narte, verschleissfeste Oberfläche - Aufkohlen, Einsatzhärten - Kern hohe Zähigkeit nach Wärmebehandlung - Festigkeitsteigerung mit Mn, Cr, Mo, Ni 	Automatenstähle: <ul style="list-style-type: none"> Spanbearbeitung → Material, nicht Klinge! - niedriger C-Gehalt: für Einsatzhärten - hoher C-Gehalt: Zum Vergüten 	<ul style="list-style-type: none"> - PB → Selbstschmierung - S → kurzbrechende Späne, geringer Werkzeugverschleiss bei span. Bearb. - Bolzen, Stifte, Schrauben, Wellen, Muttern
Beispiele:	C10, 16MnCr5, 17CrNiMo6 Hebel, Zahnräfen, Kollbenbohlen, Zahnräder, Spindeln	Beispiele:	95 Mn Pb28, 10S Pb20, 45S Pb20
Vergütungsstähle $(0.25 < C < 0.55\%)$	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Festigkeit mit guter Zähigkeit - Legierungselemente, damit kritische v_{Akhkt} ↓ → Durchhärtbarkeit, Festigkeit ↑ Ni für Zähigkeit ↑, Übergangstemperatur ↓ 	Korrosionsbeständige Stähle ($C > 12\%:$	<ul style="list-style-type: none"> - Ferritische Stähle: billig, aber interkr. K.! → können aber gehärtet werden - Ni > 8% → austenitische Stähle, resistent gegen interkristalline Korrosion - viel Ni & Mo: säurebeständiger Stahl - S: gute Zerspanbarkeit
Beispiele:	C45, 42CrMo4, 30CrNiMo6 Bolzen, Achsen, Wellen, Getriebe, Zahnräder	Beispiele:	X6Cr17, X5CrNi18-10, X5CrNiMo17-12-2 Nahrungs- und chemische Industrie u.v.m.
Nitrierstähle: (Elektrolytverfahren)	<ul style="list-style-type: none"> - verschleissfeste Oberfläche (Fressen), Kern zäh - Leg.-El. für Festigkeit ↑, Zähigkeit ↑ - Al und V als Nitridbildner 	Warmfeste Werkstoffe (meist auch verzunderungsbest.)	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Standzeiten im Kriechversuch bei möglichst hohen Temperaturen - Ni → senkt ν_{Akhkt} (allg. Therm. Vorg.) - Ni + (Al, Si, Ti, V, Mo, W) → Ausscheid. aus Überstruktur gegen Kriechen
Beispiele:	34CrAl6, 34CrAlMo5, 31CrMoV9 Warm-, verschleissfeste Teile bis 100mm Dicke	Beispiele:	X15CrMo 12-1 (1.4930) Druckbehälter, Gasturbinen, Ventile
Werkzeugstähle (Umwandlungshärtbare Stähle) – arbeitende Stähle → verschleißende Beanspruchung			
Anforderungen und Massnahmen:			
Festigkeit:	- hoher C-Gehalt & Leg-Zusätze für Mik- und Feinfeinährtung, Durchhärtbarkeit	Zähigkeit:	- Lokale Überlastung abbauen durch lokales Fließen
Verschleiss- widerstand:	- hängt direkt von der Härt'e ab	Durchhärtung:	- Cr, Mo, V, W, (Mn): verbessert Durchhärtung & auch Sonderkarbide
Formhaltigkeit (massbeständig)	- viel C & Sonderkarbide (W, Cr, Mo, V)	Schneidhaptigkeit:	- feinkörniges Gefüge
	- verliert Form: Gefüge-/Korngrößenänderung, pl. Verformung, Resty-zerfall		
	- sehr gut: 12% Cr		
Werkzeugstahltypen (meist je nach Härt'e)			
Werkzeugstähle (26-50 HRC) – < 0.5% C zur Vermeidung Randentkohlung bei hohen Temp.			
Zur Wärmebehandlung von Metallen, Schmieden & Gießen (Gesetzmäßigkeiten, Warm- und Halbwarmfließpressen, Druckgusswerkzeug)			
<ul style="list-style-type: none"> → Festigkeit und Verschleisswiderstand auch bei hohen Temp → Sonderkarbide mit geringer Verschweissneigung (W, Mo, V, Cr) → Ni: Zähigkeit und Durchhärtung, Si: Dauerfestigkeit und Anlassbeständigkeit → Hohe Wärmeleitfähigkeit & Zunderfestigkeit (wegen Thermoschock) 			
Kaltarbeitsstähle (54-64 HRC) X210Cr12			
Uhrriegelt	<ul style="list-style-type: none"> - gute Verschleissfestigkeit - hohe Kernzähigkeit - hoher C-Gehalt überreutektoid: harter Zementit) - Anlassen bis 200°C (Karbide + Rest-y-Zerfall 	Legiert:	<ul style="list-style-type: none"> - Für Umformung unterhalb 200°C → Cr, Mo, V, W → Bildung von Sonderkarbiden: Anlassbeständigkeit, Schneidhaptigkeit, Härte, Verschleisfestigkeit
			→ Zähigkeit ↑ durch Kornfeinung und Ni
Schnellarbeitsstähle (65+ HRC) – Zerspanen unter hohen Schnittgeschwindigkeiten			
<p>Um benötigte Härt'e zu erreichen: Sekundärhärte beim Anlassen durch Sondercarbidausscheidung</p>		HRC:	
Anlass - Teufel			
Wärmebehandlung der Werkzeugstähle – Spannungsarmglühen, Härtens und Anlassen / Vergüten			
Unlegierte Werkzeugstähle: $0.5\% < C < 1.5\%$			
Warum nicht höhere Legierungsgehalte?			
Legierungselemente senken Wärmeleitfähigkeit			
Schlecht wegen Thermoschock, sehr hohe Zugspannungen (Werkzeug wird stark erhitzt, abgeschrackt, erhitzt, etc.)			

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU)		Basisjahr 2010	
ZTU: Diagramm, in welchem die Phasen- bzw. Umwandlungsgrenzen eingetragen sind und mit Abkühlkurven verglichen werden.			
Kinetik der Umwandlung			
$\Delta T \uparrow (d, h, \Delta G \uparrow)$ – Triebkraft ↑ VS. Temp ↓ – $v_{diff} \downarrow$	Triebkraft (ΔG) * Mobilität (D)	$v_{Umwandlung}$:	Avrami-Gleichung: $y = 1 - \exp(-(\kappa t)^n)$
Nase: bei best. Temperatur minimale Umwandlungszeit	C-Gehalt über 0,9% → senkt nur noch M_S		Anteil ungewandelter Material y
Bedingung: Genug Keime $f(\Delta G)$ und $v_{diffusion}$ gross genug			
Konvention: Umwandlungsbeginn bei 1% umgew. Material, Ende Gesamtumwandlung bei 99%			
Isothermes ZTU – Temperatur konstant, entlang Temperaturhorizontalen lesen		Zeit logarithmisch!	
t_0 beim 1. Abschrecken → Linien nur vertikal/horizontal!	Einflüsse auf ZTU (allg.):	Leg.-Elemente (C bis 0,9%), Steigerung Schubspannung, Vergrößerung γ-Korn; Bereiche nach rechts unten	
Gefüge: Perlit (ev. als Sorbit, Troostit), Bainit, Martensit	ZTU (allg.):	C-Gehalt über 0,9% → senkt nur noch M_S	
Abschmelzen, Rest Martensit			
Resultierende Härte: $T \downarrow$ – Härte ↑			
Kontinuierliches ZTU – Austenisierte Proben kontinuierlich verschoben schnell abgekühlt, entlang einer Abkühlungskurve zu lesen			
t_0 Durchgang durch den Ac3-Punkt	Bsp: Abkühlkurve 1: Gefüge mit 30% Ferrit, 15% Perlit, 55% Bainit, 0% Martensit (Rest), Härt. 233 HV	Ferrit-Start: Asynptote Ac3	
- Gilt nur für EINE Legierungszusammensetzung		Perlit-Start: Asynptote Ac1	
- t_{B_5} : Zeit für Abkühlung von 800°C auf 500°C			
Selbstabschreckung (Bsp. Schweißen):			
Abschreckung durch Wärmeleitfähigkeit des Materials, viel schneller als was man mit Abschreckmitteln erreichen kann.			
Wärmeeinflusszone (WBZ):			
Bereich um Schweißnaht mit Gefügeumwandlung			
Beeinflussung durch äussere Einflüsse → siehe isothermes ZTU			
ZTU bei weichem C-Gehalt? (auch isotherm)	Ferrit: $C < 0,8\%$ Nur Perlit: $C = 0,8\%$ $F_{e,C}: C > 0,8\%$	Diagramm gut anschauen, manchmal steht oben Werkstoffbezeichnung (mit genauem C-Gehalt)!	
Härtens von Stählen – Wärmebehandlung	→ Härtesteigerung durch Bildung des tetragonal aufgeweiteten Martensits (Siehe letzte S.)		
Härtens von Stählen – Wärmebehandlung		Durchhärtbarkeit:	
1. Ins Austenitgebiet erwärmen und halten, bis alles austenisiert (30° oberhalb Ac3 für untererkeite, oberhalb Act Übererkeitektode Stähle)	→ 1 C-Gehalt (bis 0,8%) – Härt. 1	- Abkühlgeschwindigkeit sinkt im Innern des WS. → Härte nur am Rand!	
2. Abschreckung, so dass M_S erreicht, bevor Diffusionsprozesse mit Ferrit, Bainit etc. einsetzen. (kritische $v_{diffusion}$)	- Stähle für Härtbehandlung deshalb viel C	- verbessern durch Zugabe von Leg.-Elementen	
3. ev. Anlassen → Details siehe letzte Seite	- Max. Härte bei unregierten Stählen ≈ 65 HRC	- höhere Materialdichte: $v_{diffusion}$ ↓	
Vergüten von Stählen – Optimum: hohe Zähigkeit & Festigkeit: Beurteilung gemäß σ_s/σ_B , Kerbschlagarbeit α_K , Bruchdehnung + Beurellung geringer Strenggrenzenverhältnis σ_s/σ_B , Kerbschlagzähigkeit, Bruchdehnung + Blumeinschnürung		- Anlassspannungen	
Anlassvergüten:	Erwärmung: oberhalb Ac3, Austenitisierung, Kohlenstoff wird in Austenit gelöst	Problem: Anlassspannungen: → bei 450-600° sehr spröde, Umformung dann nicht möglich Lösung: Zwischenstufenvergüten (isothermes Vergüten)	
	Abschrecken: Kohlenstoff verbleibt im Gitter: Martensit. Hart und spröde	Anlassen: wieder erwärmen, Härte & Festigkeit Nehmen etwas ab, Zähigkeit nimmt zu	
		Aufgekörnter Draht (0,7%) wird in Salz- oder Bleibad auf 500°C abgeschr.	
		→ Sorbitgefuge mit feinsten Zementitlamellen	
		→ Für Kaltverformung sehr gut geeignet	
Thermochemische Behandlung → sehr hohe Festigkeiten bei begrenzter Duktilität			
Kontrolliertes Walzen:		Austenitformhärtens (Ausformstählen):	
Herstellung von Blech aus hochfestem, schweißbarem Stahl		Ziel: Gefüge mit möglichst vielen Vers.-Hindernissen	
i) über Ac3 erwärmen		1. Über Ac3 erwärmen, unterkühlen zw. Perlit & Bainit	
ii) plastische Verformung mit Rekristallisation		2. Dort plastisch. Verform. ohne Rekristallisation (zu tief)	
iii) Umwandlung und Ausscheidung bei $ii \& iii$: $\gamma_{verformt} = \sigma_{rekrist} + Teilchen$		3. Umwandlung zu Martensit	
		Deshalb geeignet: Stähle mit grosser Einbuchtung zw. P & B. Rekristallisierender Martensit 300–700 MPa bessere Zugfestigkeit, aber auch bessere Zähigkeit!	
Oberre / Intere kritische Abkühlgeschw. – kleinste Abkühlgeschw. wo noch 10% // 1% Martensit			

Wärmebehandlung der Oberflächen – Ziel: Außen hart, fest, verschleissfest, Kern weich und duktil

Selektives Erwärmen der Oberfläche → Nur Oberfläche wird erwärmt und anschließend abgeschreckt

Für Stähle mit mittlerem C-Gehalt (muss für Aushärtungen reichen): Oberfläche wird bis über Ac₃ Temperatur erhitzt, während das Innere unterhalb Ac₁ bleibt. Innen: Ferrit-Perlit-Gemisch, aussern Martensit

Härtetiefe: Dicke der Martensitschicht aussen. (Bsp.: Laserhärtung)

→ Durch Glühen diffundiert C (oder N, B) in die Oberfläche, anschliessend Härtung (gegen Verschleiss) und Anlassen (Duktilität)

Einsatzhärtungen (oder Aufkohlen):

- C-armer Stahl (0.02-2%)

- C-haltige Atmosphäre, ca. 900°C

→ Diffusion von C in Randschicht

→ Abschreck: C-reiche Martensitschicht

- Ziel: C Gehalt Rand 0.8%

- Härtetiefe je nach Glühtemp. und -dauer

Borieren:

- möglichst viele Teilchen der optimalen Größe im MK zu haben

Zwischenbadharten: C und N aus Gas

Karbonitrieren: C und N aus Ammoniak

Gasanalysieren: nur Stickstoff (Ammoniak)

Schichtdicken: Nitriertiefe, lange Nitrierzeiten, geringe Nacharbeiten:

- tiefere Temperatur ($\approx 550^\circ\text{C}$)

- Härtsteigerung durch MK und Nitridbildung (d.h. Teilchenhärtung)

Vorteil: weniger Verzug, hohe Härte, Härte stabl bis 400°C

→ Verfahren führen durch Druckspannungen an Oberfläche zu sehr guter Ermüdungsfestigkeit

Ausscheidung, Aushärtung (Teichenhärtung) → Immer ins Gebiet einer Reinhärtase, dann abkühlen (nicht durch z.B. Eutektikum)

→ Mechanismus zur Festigkeitssteigerung v. Al-Legierungen (siehe auch empir. Kapitel), einzige Methode für hochwarmfeste Legierungen

Prinzip: Bei Abkühlung sinkt die Löslichkeit von Stoffen → Ausscheidungen. Diese haben oft eine Ausschärtung zur Folge, da die Teilchen Versetzungsbewegungen blockieren → Streckgrenze erhöht → für plast. Deformation müssen sie verschnitten oder umgangen werden.

Aushärtung:

- WS muss aus mind. 2 Komponenten bestehen

- Durch Warm- oder Kaltauslagen wird die gew. Teilchenmenge und -Größe reduziert

- Gefahr: zu lange Auslagern: Ostwaldreifung

→ Teilchen fressen andere auf

→ Neuanordnung der Teilchen wegen ΔG

→ Teilchenabstand sinkt, Streckgrenze auch

Kohärente, teilweise kohärente und inkohärente Teilchen → Art & Geschwindigkeit der Ausscheidungen ist T-abhängig

Gitterverwandtschaft Matrix-Teilchen: (Matrix: zusammenhängende (meist überwiegende) Phase)

b) **kohärent:** gleiches Gitter & Orientierung

c) **teilweise kohärent:** gew. Gittergeraden durchgehend

d) **inkohärent:** untersch. Gitter, Orientierung unabhängig, Festigkeit meistens höher

→ keine homogene Keimbildung bei inkohärenten Grenzfläche (KG, Vers.)

→ Umgangechanismus

→ Kohärente Teilchen führen nicht zu Anrisse → **Schniedelmechanismus**

→ Bei der homogenen Keimbildung ist keine Aktivierung (I_{krit}) notwendig

→ Verschleißerscheinung wegen Oxidschicht (Oxidationsverschleiss)

→ Schicht: keramisch, spröde, andere Wärmeausdehnung als Stahl, hättet schlecht.

→ Fallt bei Beschädig. ab → noch mehr Korrosion

T ↑ → $\nu_{Wachstum}$ der Oxidschicht

Hitzeständige Verzunderung Verzundern wenn es gar nicht bei hohen Temperaturen (Zusätzl: Cr, Al, Si)

Stähle: Hohe Zeit im Kerbschlagsversuch (Cr, Ni, W, V, Mo)

Warmfester Stahl: Hohe Beständigkeit UND warmfest (Cr, Ni, Mo)

Hochwarmfest: Hitzebeständig UND warmfest (Cr, Ni, Mo)

1. Austenitgebiet: Einstichnuren: Cr, Mo, V, W, Ti, Nb, Si, Al, P

2. Martensitgebiet: - höhere Löslichkeit im Ferrit (meist kristall. krz wie α)

Ausdehnen: Ni, Mn, Cu, Co, C, N

- höhere Löslichkeit im austenit (kristallisiert kfz wie γ)

- grössere Zw-Gitterplätze (können besser C aufnehmen)

2. Affinität zu C: Keine: Ni, Co, Cu, Si, Al, P, N

↔ -> Mn, Fe, Cr, W, Mo, V, Ti, Ta, Nb, Zr → ⊕

Steigende Affinität: Carbide, kovalent (keramisch)

Sondercarbidbildner: Cr und alle darüber (sind hohe Temperaturbeständig, sehr hart & verschleissfest)

Nickel (Ni)

- Erweitert γ-Gebiet:

- 1.8% Cr und 8% Ni: umwandlungsfrei austenitisch

- verhindert Ausscheidung v. KG-Karbiden, somit interkr. Kor.

Cr & Ni → umformbar und korrosionsbeständig, stark verfestigt, aber schlechter Wärmeleiter (deshalt für Turbinen ungeeignet → zu krasse Temp.-Differenz

Kosten aufsteigend: Mn, Si, Cr, Ni, Rest

Zähigkeit: Widerstand gegen Bruch oder Rissausbreitung//Energie aufzunehmen ohne zu versagen

Stähle – schmiedbare Eisenwerkstoffe (d.h. < 2.06% C) → nach Eigenschaften klassifiziert

Zwei Hauptgruppen: Baustähle (Festigkeit wichtig), Werkzeugstähle (Verschleissfestigkeit wichtig)

Allgemeine Einteilung: Baustähle → Zähigkeitsmaß wichtig, da Material je nach Umgebung anders reagieren kann

Aufgenommene Energie: $E_k = mg \cdot (h_1 - h_2)$

h₁: Starthöhe, h₂: Höhe nach Schlag

Beanspr.-Geschw. ↑ → Stoßabfall →

Kerbshlagbiegeversuch → Zähigkeitsmaß wichtiger, da Material je nach Umgebung anders reagieren kann

Kerbshlagbiegezähigkeit a_k :

Beanspr.-Geschw. ↑ → Stoßabfall →

Übergangstemperatur (A_{lu} ≈ Gerade):

T mit $a_k = 35 \frac{1}{T - T_0}$ (bei $A_0 = 0.8 \text{ cm}^2$)

All Massnahmen, um Streckgrenze zu steuern, erhöhen die Übergangstemperatur! ($\Delta a_{MK}, \Delta \sigma_{cr}$)

Ausnahme: Feinkornhärtung: Mn, Si, Ni (1.5-9%)

Bezeichnungssystematik Stahlwerkstoffe (0.02% < C < 2.06%) → Genauer: siehe separate Tabelle

Beste für Kurznamen [3]:

Basisjahr 2010

Verfahren mit Änderung der Legierung

BERECHNUNG: Formeln aus Diffusion

Durchglühen diffundiert C (oder N, B) in die Oberfläche, anschliessend Härtung (gegen Verschleiss) und Anlassen (Duktilität)

Einsatzhärtungen (oder Aufkohlen):

- C-armer Stahl (0.02-2%)

- C-haltige Atmosphäre, ca. 900°C

→ Diffusion von C in Randschicht

→ Abschreck: C-reiche Martensitschicht

- Ziel: C Gehalt Rand 0.8%

- Härtetiefe je nach Glühtemp. und -dauer

Borieren:

- möglichst viele

Teilchen der optimalen Größe im MK zu haben

Zwischenbadharten: C und N aus Gas

Karbonitrieren: C und N aus Ammoniak

Gasanalysieren: nur Stickstoff (Ammoniak)

Schichtdicken: Nitriertiefe, lange Nitrierzeiten, geringe Nacharbeiten:

- tiefere Temperatur ($\approx 550^\circ\text{C}$)

- Härtsteigerung durch MK und Nitridbildung (d.h. Teilchenhärtung)

Vorteil: weniger Verzug, hohe Härte, Härte stabl bis 400°C

→ Verfahren führen durch Druckspannungen an Oberfläche zu sehr guter Ermüdungsfestigkeit

Ausscheidung, Aushärtung (Teichenhärtung) → Immer ins Gebiet einer Reinhärtase, dann abkühlen (nicht durch z.B. Eutektikum)

→ Mechanismus zur Festigkeitssteigerung v. Al-Legierungen (siehe auch empir. Kapitel), einzige Methode für hochwarmfeste Legierungen

Prinzip: Bei Abkühlung sinkt die Löslichkeit von Stoffen → Ausscheidungen. Diese haben oft eine Ausschärtung zur Folge, da die Teilchen Versetzungsbewegungen blockieren → Streckgrenze erhöht → für plast. Deformation müssen sie verschnitten oder umgangen werden.