

Materialwissenschaften–

Eigenschaften, Verarbeitung und Praxistauglichkeit

Prof. Dr.-Ing. Volker Siegismund



0. Organisatorisches

Ablauf der Veranstaltung:

Skript:

Folien aus der Vorlesung
(liegen auf Moodle)

Prüfungsleistung:

gemäß SPO: Klausur (benotet ohne Hilfsmittel)

weiterführende Literatur:

- Seidel, Hahn; Werkstofftechnik; Hanser Verlag
- Ross, Maile; Werkstoffkunde für Ingenieure; Springer Verlag



Motivation: **Warum müssen sich konzeptionell arbeitende Ingenieur (Planung/Entwicklung) mit Werkstoffen beschäftigen?**

Warum beschäftigen wir uns mit Materialwissenschaften?

Warum müssen wir die Eigenschaften von Materialien einschätzen und beurteilen können?

Warum müssen wir die Verarbeitbarkeit von Materialien einschätzen können?



Irgendwann soll aus einem Plan / Konzept / Idee ein Stück Hardware werden, und spätestens dann braucht es Werkstoffe, die den Plan auch körperlich-physikalisch realisieren können.



Werkstoffe sind die Basis aller technischen Systeme

3

**Was wird in unseren Fachgebieten alles gebaut?
Wofür brauchen wir also Werkstoffe?**

Komponenten und Einzelteile: Schrauben, Wellen, Achsen, Stromkabel, Rohre, Behälter, Turbinenschaufeln, ...

Maschinen und Anlagenteile: Motoren, Generatoren, Brenner, Ventile, Fassaden...

Anlagen und Systeme: Kraftwerke, Staudämme, Hochspannungsmasten, ...

Gebäude und Ingenieurbauten

Infrastruktur: Straßen, Pipeline, Überlandleitungen, Nahwärmeversorgung, ...

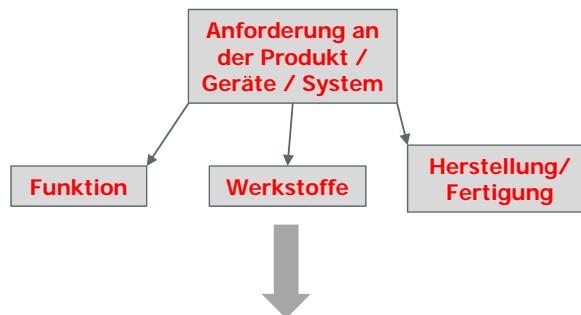


laufende Frage:

**Aus welchem Werkstoff bauen wir das jeweilige Teil?
Welcher Werkstoff ist am geeignetsten?**

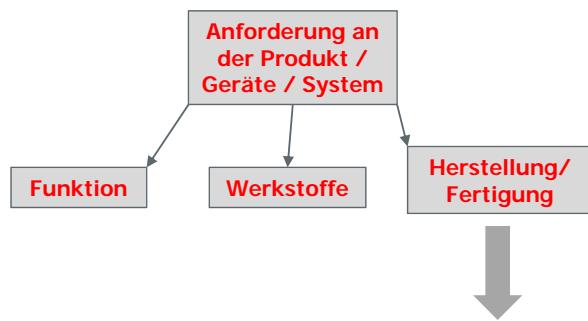
4

Grundsatzfrage: Wie wird richtig konstruiert und gebaut?



- mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Verformung, Härte, ...)
- elektrische Eigenschaften (Leitung, Widerstand, ...)
- optische Eigenschaften (Transparenz, Lichtbrechung, Farbe, ...)
- chemische Eigenschaften (Löslichkeit, Stabilität, Brennbarkeit, Korrosionsbeständigkeit, ...)
- biologische Eigenschaften (Toxizität, Verstoffwechselbarkeit, biologische Abbaubarkeit, Ökorelevanz, ...)
- Verfügbarkeit und Kosten

...
→ **Werkstoffkunde**



Wie soll bzw. kann Werkstoff verarbeitet werden?

Urformen (Gießen, Extrudieren, Sintern, ...)
Umformen (Schmieden, Walzen, Ziehen, Biegen, ...)
Zerspanen (Drehen, Fräsen, Hobeln, ...)
Fügen (Schrauben, Nieten, Schweißen, Löten, Kleben, ...)
Aufbauen (Montage in Werkstatt, Teilmontage in Werkstatt, Montage vor Ort, Einzel- oder Serienfertigung, ...)
etc.



Fertigungstechnik



Welche Werkstoffe gibt es?

Wie können Werkstoffe eingeteilt werden?

Werkstoffklassen:

Metalle	Eisenmetalle (Stähle, Stahllegierungen, Gusseisen) Nicht-Eisen-Metalle (Kupfer, Aluminium, Titan, Nickel, Magnesium, etc. und ihre Legierungen)
Kunststoffe (Polymere)	Thermoplaste (PE, PP, PS, PVC, ...) Duroplaste (Epoxidharze, PUR, Acrylate, ...) Elastomere (Kautschuk, ...)
keramische Werkstoffe:	Silikatkeramik (Tonhaltige Massen) Oxidkeramik (ZrO_2 , Al_2O_3 , ...) Nicht-Oxidkeramik (Silizium-Karbide (SiC), Silizium-Nitride (Si_3N_4), ...)



Welche Werkstoffe gibt es?
Wie können Werkstoffe eingeteilt werden?

Werkstoffklassen:

Gläser	Boro-Silikat-Gläser Quarzgläser Glaslegierungen (Bleiglas, ...)
mineralische Werkstoffe	Natursteine (Granit, Marmor, Schiefer, ...) Zemente Kalke, etc.
Verbundwerkstoffe:	Sandwich-Elemente faserverstärkte Kunststoffe (CFK, GFK, ...) Stahlbeton Schichtholzplatten und Leimbinder Amalgam, etc.



Welche zusätzliche Anforderungen?

Recycling:	Wie können einzelne Werkstoffe von System wieder getrennt werden? (Beispiel: geklebte Sandwichpaneele aus PUR und Alu-Blechen vs. Ständerkonstruktion mit eingelegten PUR-Platten und geschraubte Alu-Planken)
	Wie und durch welche Technologie sind einzelne Werkstoffe wiederverwertbar? (Beispiel: gleichbleibende Qualität bei Einschmelzen von Metallen vs. abnehmende Qualität bei Recycling von vielen Kunststoffen)
Entsorgung:	Wie können / dürfen Werkstoffe nach Gebrauch deponiert / verbrannt werden? (Beispiel: problemlose Deponierbarkeit von Glas vs. problematische Deponierung von Kunststoffen)
	Welche Kosten sind damit verbunden (Beispiel: Hausmüllentsorgung vs. Sondermüllentsorgung)
Umweltbelastung:	Gehen schädliche Wirkungen von Werkstoff aus? (Beispiel: Bleirohre für Wasserversorgung vs. Kunststoff- oder Edelstahlrohre für Wasserversorgung)



Wie können Werkstoffe eingeteilt werden?

Einteilung der Werkstoffe nach der primären Anwendung:

medizinische Werkstoffe	Implantatwerkstoffe (Titan, ...), Nahtmaterial (Kunststoffe, ...), Verbandsmaterial (Baumwolle, ...), etc.
Baustoffe	Zemente, Kalke, Betone, Stähle und Kunststoffe für Bewehrung, HD-Rohre, Bitumen, Tafelglas, etc.
Industriewerkstoffe	Werkzeugstähle, Bandstahl, Quarzgläser, GFK, CFK, keramische Schneidwerkstoffe und Beschichtungen (ZrO ₂ , SiC), etc.
Automobilwerkstoffe	Tiefziehbleche, Alu-Guss-Werkstoffe, etc.
Chemiewerkstoffe	Alu-Werkstoffe, Titan-Werkstoffe, Cr-Ni-Stähle, keramische Beschichtungen
marine Werkstoffe	Stähle, Expoxidbeschichtungen, CFK, GFK, etc.



Nach welchen Kriterien können Werkstoffe ausgewählt werden?

technischen Eigenschaften und Funktion:

- Beispiele: Festigkeit (Stahl hoch vs. Kunststoff gering)
- elektrische Leitfähigkeit (Kupfer hoch vs. Keramik gering)
- Korrosionsbeständigkeit (Fe-C-Stahl gering vs. Gusseisen hoch)

Verarbeitbarkeit:

- Beispiele: Biegen, Rollen, Tiefziehen (Fe-C-Stahl gut vs. Keramik schlecht)
- Schweißen (Thermoplaste gut vs. Duroplaste schlecht)
- Verarbeitung vor Ort (Schweißen gut vs. Laminieren von CFK schlecht)

Herstellungskosten:

- Beispiele: Kosten für Metalle (Stahl gering vs. Titan hoch)
- Kosten für Kunststoffe (Thermoplaste gering vs. CFK hoch)



Nach welchen Kriterien können Werkstoffe ausgewählt werden?

weitere Kriterien:

Möglichkeiten von Wartung, Instandsetzung und Austausch

Beispiel: Abdichten vor Ort (Schweißen von Fe-C-Stahl einfach vs. Kleben von CFK schwierig)

Austausch vor Ort (geschraubte Konstruktion einfach vs. geklebte Konstruktion)

Lebensdauer

Beispiel: Korrosion (Eisenmetalle korrosionsanfällig vs. Aluminium korrosionsbeständig)

Alterungsbeständigkeit (viele Natursteine und Keramik sehr hoch vs. Stähle und viele Kunststoffe gering)

Ökologie, Entsorgung und Umweltbelastung

Beispiel: Toxizität (Blei hoch vs. Kunststoff gering)

Verstoffwechselbarkeit (Baumwolle hoch vs. Kunststoffe gering)

umweltneutrale Entsorgbarkeit (Holz hoch vs. Kunststoff gering)

Recyclebarkeit (Stähle hoch vs. Keramik gering)

15

Beispiele für besondere Werkstoffauswahl:

Pipeline:

Beispiel für mögliche Werkstoff-Auswahl



Quelle: hicker.de

Anforderungen (Auswahl)	Werkstoffe			
	Stahl	Kunststoff	Beton	Kupfer
hohe Temperatur-wechselfestigkeit	++	0	--	++
hohe Schlagfestigkeit	++	+	--	++
einfache und sichere Fügeverfahren vor Ort	++	++	++	+
schnelle Reparatur von Leckagen	++	++	0	+
korrosionsbeständig	-	--	++	+
geringe spezifische Materialkosten	+	0	++	--

16

Beispiele für besondere Werkstoffauswahl:

Wandkonstruktion:

Beispiel für mögliche Werkstoff-Auswahl



Quelle: schwerlastaustria.at

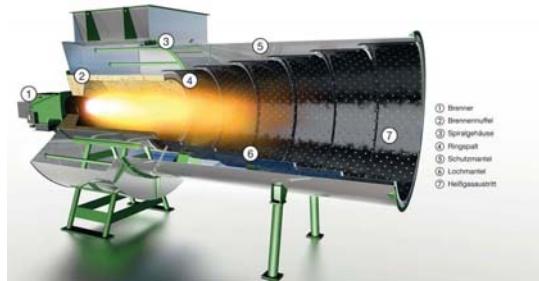
Anforderungen (Auswahl)	Werkstoffe			
	Beton	Naturstein	Holz	Sandwich- elemente
hohe Stabilität	++	++	+	+
hohe Flexibilität hinsichtlich Form und Gestalt	++	0	++	+
einfache und preiswerte Erstellung vor Ort	++	-	++	++
umweltneutral	0	++	++	--
langlebig	+	++	+	0
geringe spezifische Materialkosten	++	--	--	--



Beispiele für besondere Werkstoffauswahl:

Quelle: loesche.com

Brennkammer:



Beispiel für mögliche
Werkstoff-Auswahl

Anforderungen (Auswahl)	Werkstoffe			
	hochwarm- fester Stahl	Gusseisen	Kunststoff (CFK)	Keramik
hohe Stabilität	++	+	++	0
hohe Temperaturfestigkeit	+	+	--	++
hohe Dauerschwingfestigkeit	++	++	++	--
flexible Verarbeitungsmöglichkeiten	++	--	++	0
chemisch nicht reaktiv	+	+	-	++



Beispiele für besondere Werkstoffauswahl:

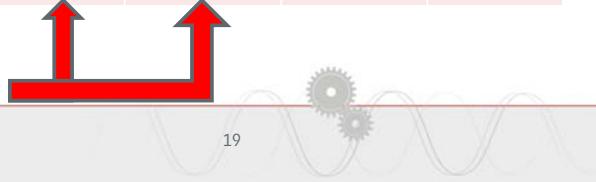
Turbinenschaufel

Beispiel für mögliche Werkstoff-Auswahl



Quelle: steigerwald-eb.de

Anforderungen (Auswahl)	Werkstoffe			
	Titan-legierung	hochwarm-fester Stahl	Kunststoff (CFK)	Keramik
hohe Zugspannung	++	++	+	-
hohe Temperaturfestigkeit	++	+	--	++
geringes Gewicht	++	-	++	-
hohe Dauerschwingfestigkeit	+	++	++	0
hohes Maß an Formgebung	+	++	++	+



Beispiele für besondere Werkstoffauswahl:

Windrotor

Beispiel für mögliche Werkstoff-Auswahl



Quelle: elektro-zimmer.ne

Anforderungen (Auswahl)	Werkstoffe			
	Stahl	Kunststoff (GFK)	Holz-Leinwand	Alu
hohe Zugspannung	++	++	--	0
hohe Steifigkeit	++	+	-	+
hohe Korrosionsbeständigkeit	0	++	+	++
geringes Gewicht	0	++	+	++
hohes Maß an Formgebung	+	++	0	++



Folgerungen:

es gibt keinen allgemein verwendbaren Werkstoff für alles

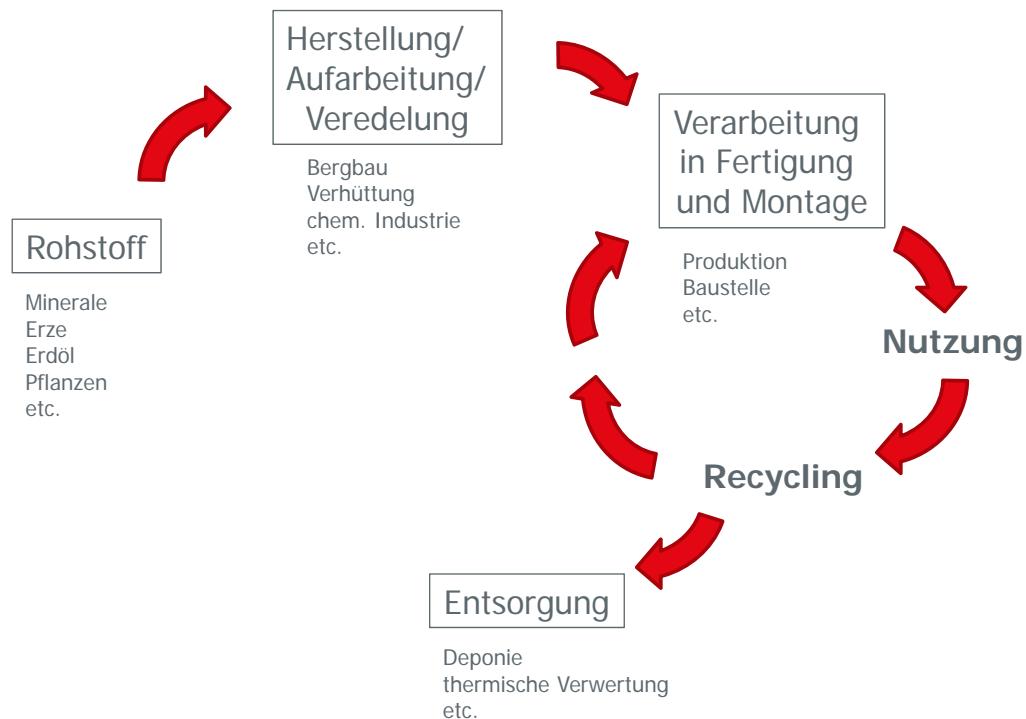
Werkstoffe sollten immer nach der speziellen Anforderungen der vorliegenden Anwendung ausgewählt werden

es ist daher wichtig, zuerst ein Lastenheft zu den benötigten Eigenschaften und Merkmalen des Werkstoff zu erstellen; dabei sollten die einzelnen Eigenschaften und Merkmale der Anwendung gewichtet werden

es gilt: **der Werkstoff ergibt sich aus der Funktion,
nicht die Funktion aus dem Werkstoff**

21

Lebenszyklus von Werkstoffen



22

weitere Themen der Vorlesung:

- 2. Struktur und Ausbau realer Werkstoffe (Strukturen, Gitteraufbau, Gitterfehler, Beispiele)
- 3. Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen (Grundbegriffe der Festigkeitslehre, Zugspannung, Härte, Zähigkeit, Manipulationsmöglichkeiten bei Werkstoffen, Anwendungsbeispiele)
- 4. Eisenwerkstoffe (Aufbau und Struktur, Legierungen und ihre Wirkungsweisen, Fe-C-Systeme, Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, Stähle und Stahllegierungen, Eisengusswerkstoffe, Anwendungsbeispiele)
- 5. Nicht-Eisen-Metalle (Struktur und Eigenschaften von Aluminium-, Titan-, Kupfer-Legierungen, Anwendungsbeispiele)
- 6. Kunststoffe (Aufbau, Struktur und Eigenschaften von Thermoplasten, Duroplasten, Elastomeren und Klebstoffen, Anwendungsbeispiele)
- 7. Keramische und mineralische Werkstoffe und Gläser (Struktur, Eigenschaften, Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren; Anwendungsbeispiele)
- 8. Verbundwerkstoffe (Arten, Strukturen und Eigenschaften, Anwendungsbeispiele)

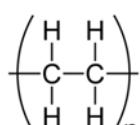
2. Struktur und Aufbau idealer und realer Werkstoffe



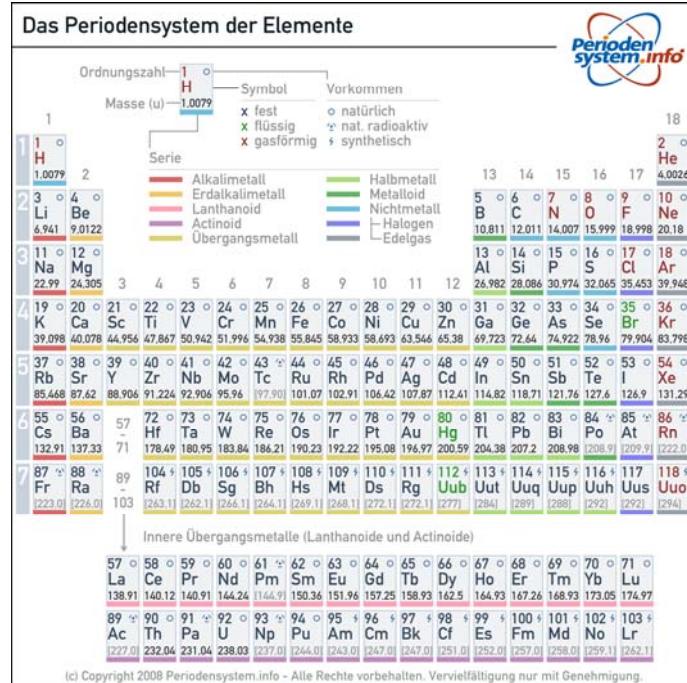
Struktur von Werkstoffen:

Basis aller Materialien sind die chemischen Elemente
systematische Ordnung der Elemente:
Periodensystem der Elemente (PSE)
Werkstoffe bestehen aus

- » einzelnen Elementen, d.h. Atomen
(Bsp.: Metalle)
 - Stahl: Fe + C
 - Aluminium: Al + Mg
 - Bronze: Cu + Sn
 - » Elementverbindungen , d.h. Molekülen
(Bsp.: Kunststoffe)
 - Polyethylen (PE)



Quelle: wikipedia.org



Quelle: periodensystem.info

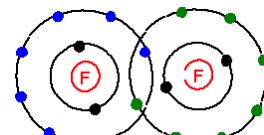


Struktur von Werkstoffen:

Verbindungarten der einzelnen Atome: Wie werden die Atome und Moleküle zusammengehalten?

- » Elektronenpaarbindung (gemeinsame Elektronenpaare der äußeren Valenzelektronen)

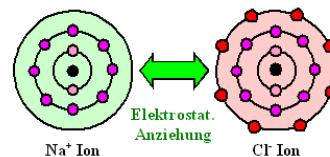
Bsp.: Sauerstoff O₂; Fluor F₂



Quelle: daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de

- » Ionenbindung (Abgabe bzw. Einnahme von Valenzelektronen; dadurch elektrische Ladung und gegenseitige Anziehung der Partner)

Bsp.: Kochsalz NaCl



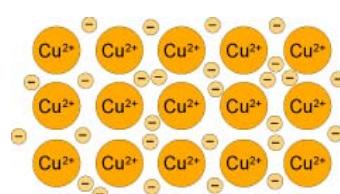
Quelle: tf.uni-kiel.de

Struktur von Werkstoffen:

Verbindungarten der einzelnen Atome: Wie werden die Atome und Moleküle zusammengehalten?

- » Metallbindung (frei bewegliche Wolke aus Valenzelektronen und positive Metallionen)

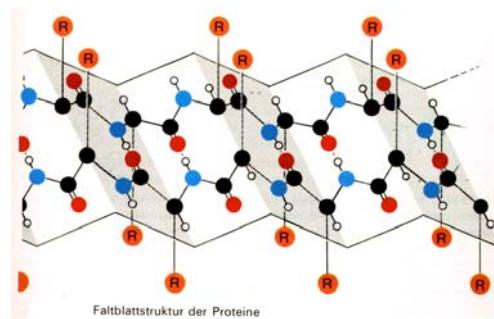
Bsp.: Eisen, Kupfer



Quelle: metall-web.de

- » Van der Waal'sche Bindung (gegenseitige Anziehung polarer, d.h. asymmetrischer Moleküle)

Bsp.: Wasser, Makromoleküle über Wasserstoff-Brücken-Bindung, Kunststoffe (PVC, PE, ...)



Faltblattstruktur der Proteine

Quelle: idn.uni-bremen.de

Struktur von Werkstoffen:

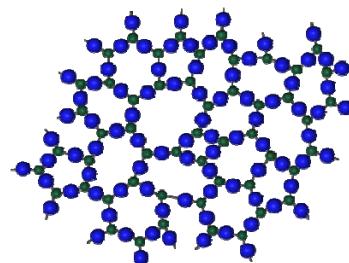
Wie sind die Atome und Moleküle im Material angeordnet?

- » regellose Anordnung der Atome und Moleküle (nur Nahordnung):



amorphe Struktur

Bsp.: Thermoplaste, Glas, Obsidian, Magnetwerkstoffe,



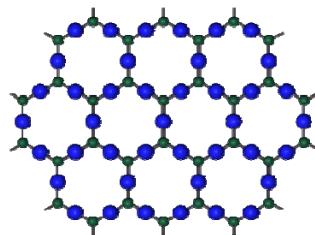
Quelle: chemgapedia.de

- » regelmäßige Anordnung der Atome und Moleküle (Fernordnung):



kristalline Struktur

Bsp.: Metalle, Quarz, Kristalle



Quelle: chemgapedia.de

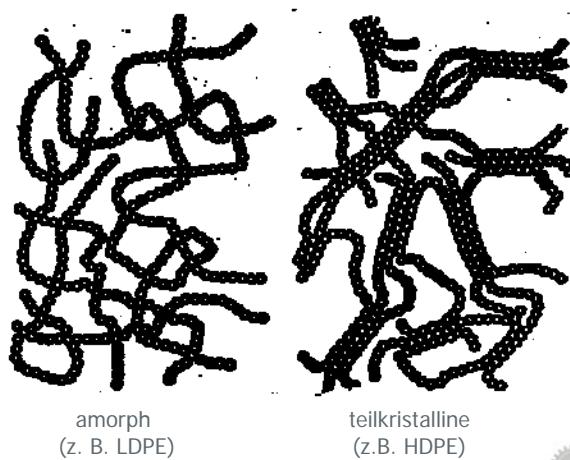
Struktur von Werkstoffen:

Wie sind die Atome und Moleküle im Material angeordnet?

- » teilweise Mischformen bei Kunststoffen möglich



teilkristalline Struktur



amorph
(z. B. LDPE)

teilkristalline
(z.B. HDPE)

Quelle: mhaebel.de

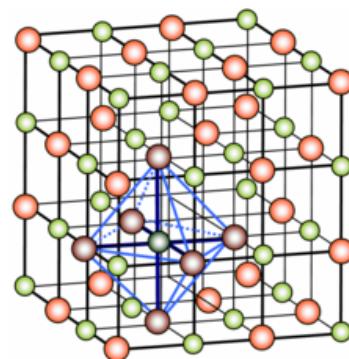
Kristallstrukturen - Gitterstrukturen:

geometrische Anordnung von Atomen und Molekülen, die sich regelmäßig im Raum wiederholt
 die Anordnung erfolgt in einer räumlichen Gitterstruktur
 Einteilung der unterschiedlichen in der Natur vorkommenden Gitterstrukturen erfolgt in

Translationsgitter (Elementargitter),



geordnet im Kristallsysteme

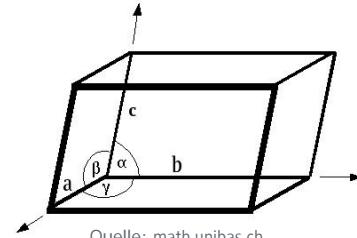


Beispiel: NaCl-Kristallstruktur
 Quelle: de.wikipedia.org

Ausgangsbasis: Elementargitter (Translationsgitter)

gekennzeichnet durch:

- geometrische Grundform,
- Kantenlängen a , b und c ,
- Achswinkel α , β und γ



Quelle: math.unibas.ch

Gitterstrukturen:



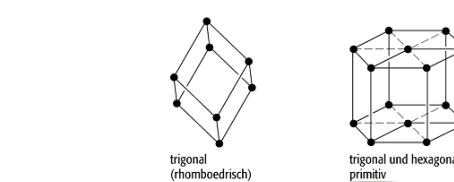
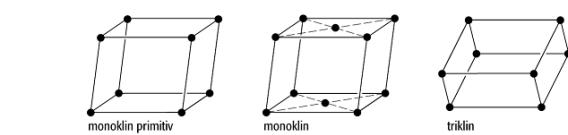
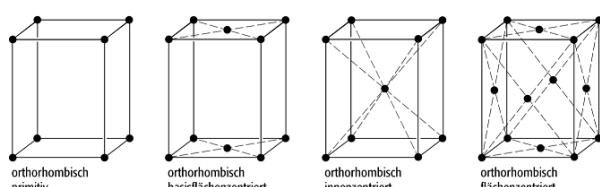
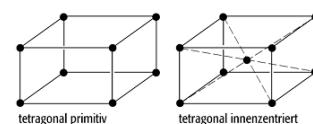
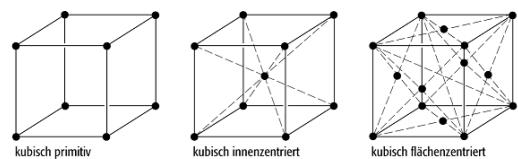
Translationsgitter, geordnet nach Kristallsystemen

Kristallsysteme:

- kubisch
- tetragonal
- orthorombisch
- rhomboedrisch
- hexagonal
- monoklin
- triklin

für Metalle wichtigsten Translationsgitter:

- kubisch-raumzentriert (krz)
- kubisch-flächenzentriert (kfz)
- hexagonal dichtest gepackt (hdp)



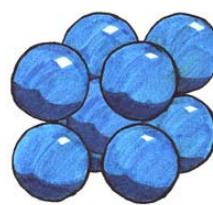
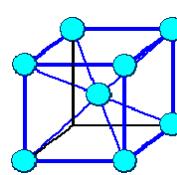
Quelle: techniklexikon.ne

Gittertypen:

für Metalle wichtigsten Translationsgitter:

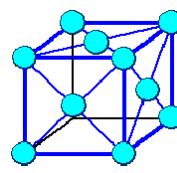
kubisch-raumzentriert (**krz**):

Beispiele: α -Fe (< 911°C), Cr, Mo, W, V, ...



kubisch-flächenzentriert (**kfz**):

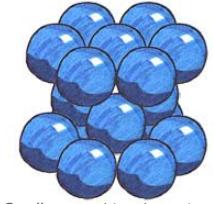
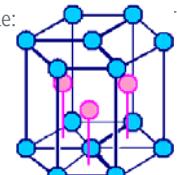
Beispiele: γ -Fe (> 911°C), Cu, Al, Ni, Pb, ...



hexagonal dichtest gepackt (**hdp**):

885°C), Mg, Cd, Zn, ...

Beispiele: Ti (<



Quelle: tf.uni-kiel.de

Quelle: maschinenbau-wissen.de

Gittertypen:

der Typ des Translationsgitters, d.h. die räumliche Anordnung der Atome gibt Auskunft über:

Packungsdichte (d.h. u.a. Information über Dichte des Werkstoffs)

Anzahl und Lage der Gleitebenen (d.h. u.a. Maß für Verformungsverhalten)

$$\text{Packungsdichte} = \frac{\text{Volumen der Atomkugel in Elementarzelle}}{\text{Volumen der Elementarzelle}}$$

- kubisch-primitiv (**kp**): Packungsdichte: 0,52
- kubisch-raumzentriert (**krz**): Packungsdichte: 0,68
- kubisch-flächenzentriert (**kfz**): Packungsdichte: 0,74
- hexagonal dichtest gepackt (**hdp**): Packungsdichte: 0,74

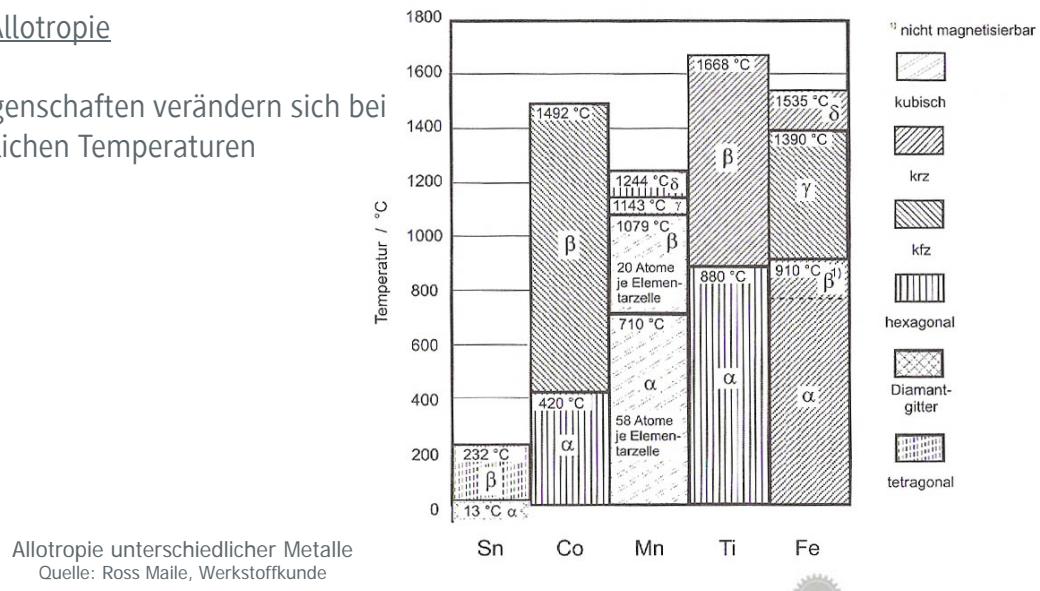
Maximum!

Allotropie (Polymorphie):

Metalle (und Nichtmetalle) können, abhängig von der Temperatur, in unterschiedlichen Gitterstrukturen vorliegen  **Allotropie**

Folgen der Allotropie

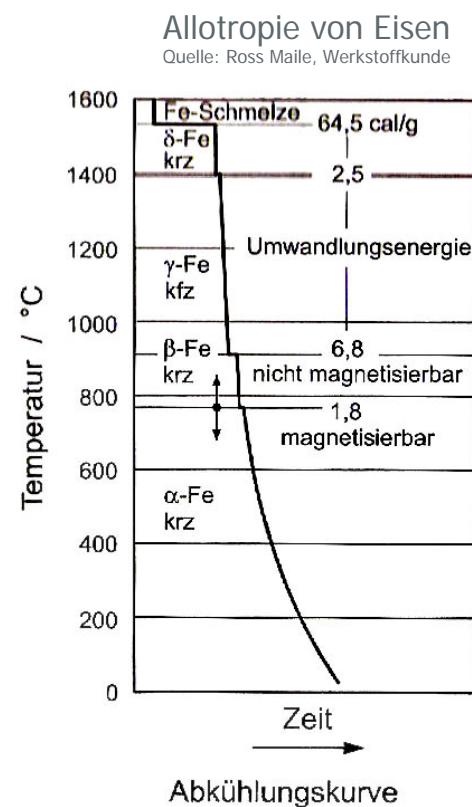
Werkstoffeigenschaften verändern sich bei unterschiedlichen Temperaturen



Allotropie (Polymorphie):

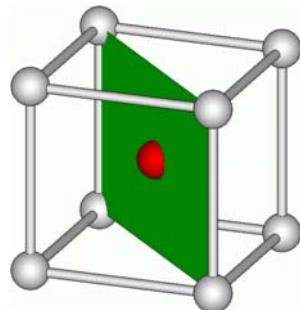
Folgen der Allotropie

bei Abkühlvorgängen kann es zu spontanen Volumenänderungen bei Übergang von kfz zu krz kommen



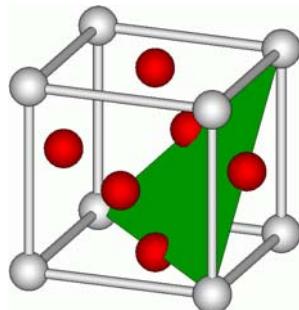
Kristallographische Ebenen (Gleitebenen)

Gleitebenen sind die Ebenen in der Gitterstruktur mit der größten Atombelegung; entlang der Gleitebenen können die Atome am einfachsten gegeneinander verschoben werden (= Verformungsrichtung)



Gleitebene bei krz-Gitter

Quelle: de.wikipedia.org



Gleitebene bei kfz-Gitter

Quelle: de.wikipedia.org

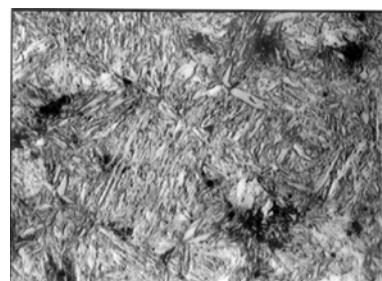
14

Reale Gitterstrukturen

Abweichungen von idealer, mathematisch exakter Anordnung der Atome im Kristallgitter

Fehlordnungen im Kristall aufgrund von

- » unregelmäßigen Kristallwachstum
- » unreinen Kristallsubstanzen
- » Einwirkung äußerer Einflussfaktoren (Verformung, Temperatursprünge, etc.)



Mikroschliff von martensitischem Stahl
Quelle: de.wikipedia.org



Mikroschliff von Metall-Legierung
Quelle: fotofinder.com

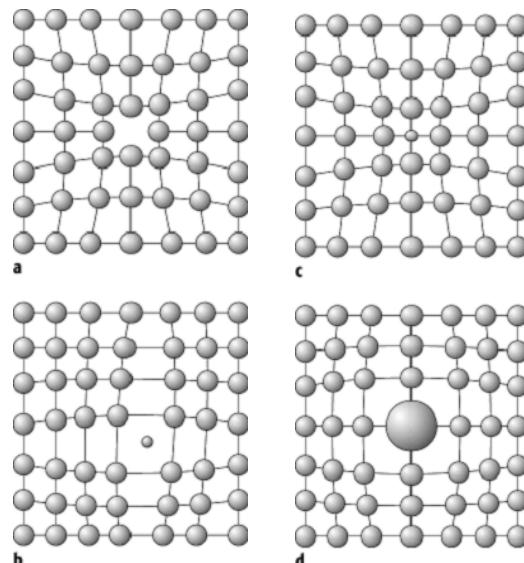
16

Reale Gitterstrukturen: Punktdefekte (0-dimensionale Fehler)

0-dimensionale Gitterfehler sind punktförmige Störungen im atomaren Gitteraufbau durch

- » Leerstellen (Bild a)
- » Substitutionsatome (Fremdatome auf Gitterplätzen) (Bild c und d)
- » Zwischengitteratome (Fremdatome auf Zwischengitterplätzen) (Bild b)

Wirkung von Punktdefekten: Verzerrung der Gitterstruktur und Ausbildung von Gitterspannungen



Quelle: techniklexikon.net

17

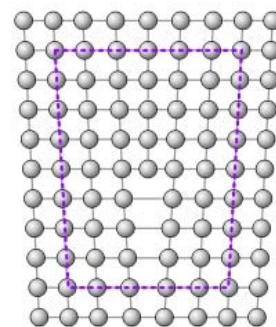
Reale Gitterstrukturen: Liniendefekte (1-dimensionale Fehler)

1-dimensionale Gitterfehler sind **Versetzungen** in der Gitterebene

(Modellvorstellung: eingeschobene Gitterebene)

Versetzungslinien können auftreten als

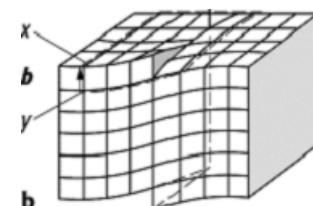
- » Stufenversetzung
- » Schraubenversetzung
- » Kombination aus Schrauben- und Stufenversetzung (= Regelfall)



Stufenversetzung
Quelle: techniklexikon.net

Wirkung von Versetzungen: „großräumige“ Ausbildung von Gitterspannungen und dadurch Beeinflussung von Werkstoffeigenschaften

(Festigkeit, Verformbarkeit, Leitfähigkeit, etc.)



Schraubenversetzung
Quelle: techniklexikon.net

18

Reale Gitterstrukturen: Liniendefekte (1-dimensionale Fehler)

Versetzungen können unter dem Einfluss von Schubspannungen innerhalb der Gitterstruktur wandern
 (Wanderung erfolgt entlang der Gleitebenen der Kristallgitter)

Versetzungen entstehen

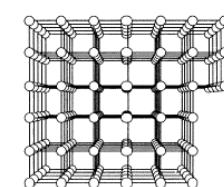
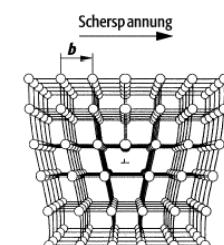
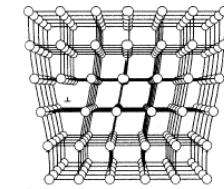
- » bei der Kristallisation
- » bei der plastischen Verformung

Versetzungsdichte (Anzahl von Versetzungen):

- » normaler Metalle: $\sim 10^6/\text{cm}^2$
- » stark verformte Metalle: $\sim 10^{11}-10^{12}/\text{cm}^2$

mit steigender Versetzungsdichte

- » steigt Festigkeit
- » sinkt Verformbarkeit (Versprödung)



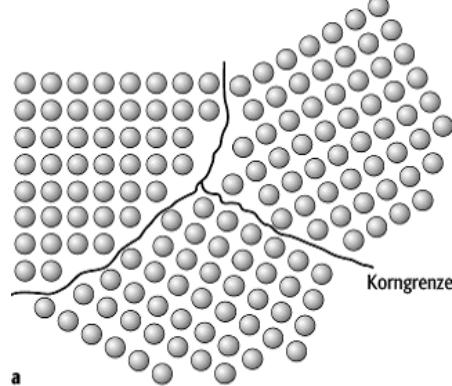
Wanderung von Stufenversetzung
 Quelle: techniklexikon.net

19

Reale Gitterstrukturen: Flächendefekte (2-dimensionale Fehler)

Flächendefekte sind die Grenzflächen von Kristalliten und bilden somit die **Korngrenzen** im Metallgefüge

Versetzungen können maximal bis zu einer Korngrenze wandern
 je kleiner die Kristallite (**Feinkorngesetz**)
 desto höher ist die Festigkeit
 je größer die Kristallite (**Grobkorngefüge**)
 desto höher ist plastische Verformbarkeit



Quelle: techniklexikon.net



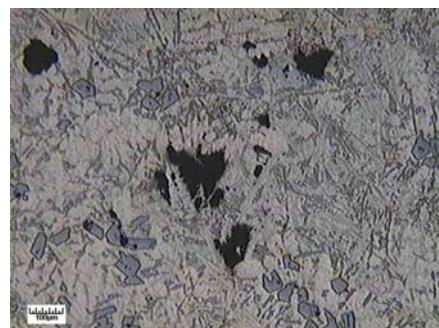
Gefügeschliffbild einer Messinglegierung (Cu + Zn)
 Quelle: bluebrass.com

20

Reale Gitterstrukturen: Raumdefekte (3-dimensionale Fehler)

Raumdefekte sind makroskopisch und treten auf als:

- » Lunker
- » Poren
- » Risse
- » Einschlüsse
- » Ausscheidungen



Lunker in Aluminiumprobe
Quelle: jomesa.com

Raumdefekte wirken in der Regel schwächend auf das Material und sollten vermieden werden



Lunker in Gussteil
Quelle: giessereilexikon.de

21

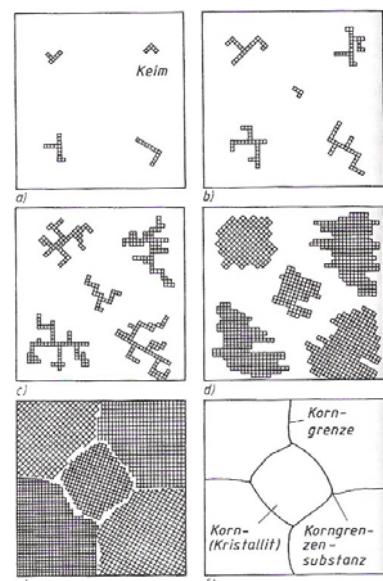
Kristallisation: Bildung von Kristallen

Kristalle bilden sich aus der Schmelze der Ausgangsmaterialien

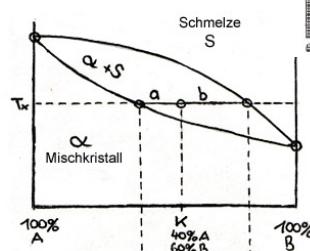
Nach Unterschreiten der **Liquiduslinie** lagern sich an Keimen (**Keimstellen**) Atome und bilden Kristallite (Mischkristall + Schmelze)

Zusammenwachsen der Kristallite zu Gefüge

Nach Unterschreiten der **Soliduslinie** kann bei hoher Temperatur weiteres Kornwachstum durch Diffusionsvorgänge eintreten
(→ Grobkornbildung)



Schema des Kristallisationsvorgangs
Quelle: Seidel, Hahn, Werkstofftechnik



Zweistoffdiagramm zur Bildung eines Mischkristalls aus Komponenten A und B
Quelle: maschinenbau-wissen.de

23

Gefügeveränderungen: Vorgänge beim plastischen Verformen

bei der plastischen Verformung nimmt Versetzungsdichte stark zu ($\sim 10^5\text{-}10^6$ - fache) dadurch

- » steigt Festigkeit
- » sinkt Duktilität (Zähigkeit)
- » sinkt Verformbarkeit
- » steigt Versprödung

(Beispiel: Treiben von Kupfer: nach bestimmter Verformung wird Kupferblech sehr spröde und kann reißen)

Abbau der hohen Versetzungsdichte durch Rekristallisation

- » „Neuordnung“ des Kristallgitters
- » Vergrößerung der Körner / Neukorn-Bildung
- » Abbau / Reduktion von Gitterfehlern

24

Rekristallisation

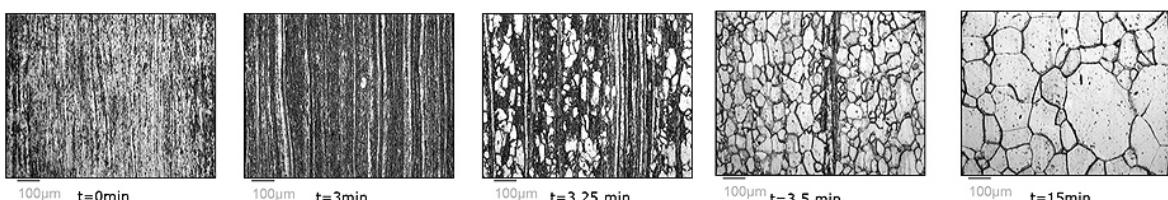
Rekristallisation erfolgt unterhalb der Schmelztemperaturen

Beispiele für Rekristallisationstemperaturen nach der Kaltumformung:

- » Stahl: 450 – 650°C
- » Kupfer: 200 – 250°C
- » Kupferlegierungen: 450 – 650°C
- » Aluminiumlegierungen: 250 – 450°C

Erfolg der Rekristallisation hängt ab von

- » Rekristallisationstemperatur
- » Rekristallisationszeit



25

Rekristallisation

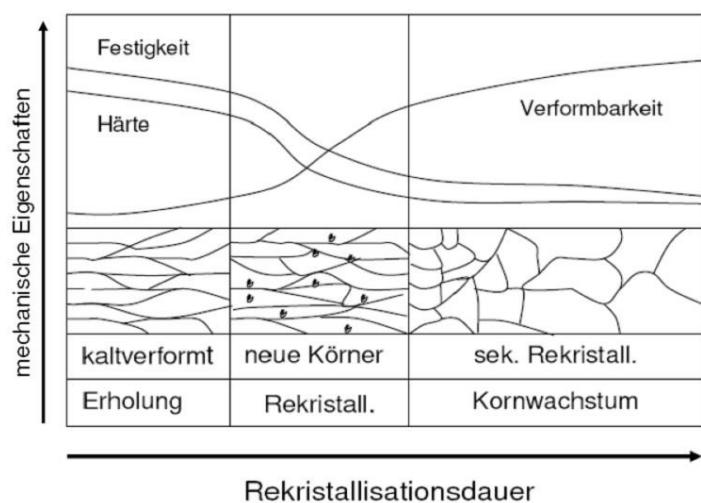
Rekristallisation bewirkt

- » Abbau der Versetzungsdichte
- » Verringer der Gitterfehler
- » Grobkornstruktur (Zunahme der Korngröße)

dadurch werden

Materialeigenschaften verändert:

- » Verformbarkeit (Plastizität) nimmt zu
- » Festigkeit nimmt ab



Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

Zusammensetzung der Schmelze: in der Regel Mischung mehrere Metalle / Elemente; dabei ein Hauptbestandteil und ein bis mehrere Nebenbestandteile:



Legierungen

Beispiele für Legierungen:

- Cu + Sn (10-30%) → Bronze
- Fe + C (0,1-2,1%) → Stahl
- Cu + Zn (20 – 45%) → Messing
- Al + Mg (3%) → AlMg3

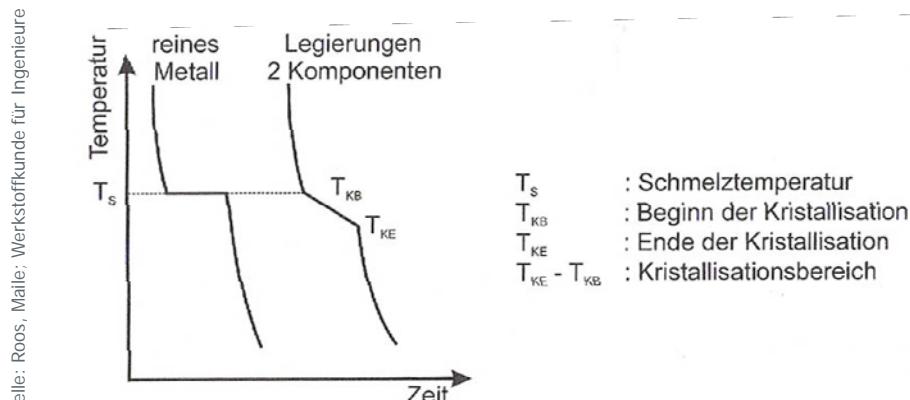
Dies bedeutet: Mischkristalle entstehen / wachsen aus einem „Cocktail“ flüssiger Legierungs-Bestandteile

dabei haben Legierungs-Bestandteile in der Regel unterschiedliche Schmelzpunkte (vergleichbar zu zeotrope Gemischen)

Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

Temperatur T über der Zeit t, wenn Metall-Schmelze erstarrt?

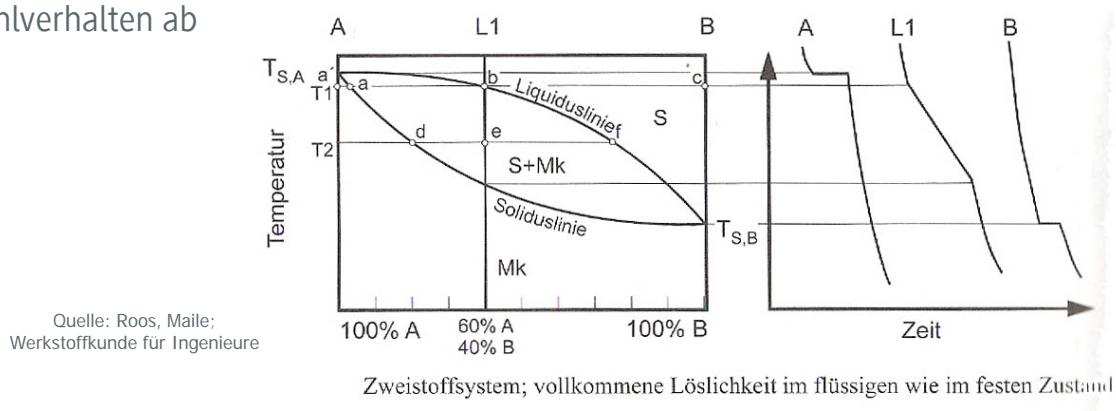
- » Fall 1: reines Metall: Temperatur während Erstarrungsvorgang bleibt konstant
- » Fall 2: Metallgemisch (Legierung): Temperatur während Erstarrungsvorgang ändert sich; d.h. Schmelze und Mischkristall liegen zeitgleich vor



29

Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

Von der Art der Löslichkeit und der Gemischzusammensetzung hängt das Abkühlverhalten ab



Wie können sich die Legierungsbestandteile im flüssigen und festen Zustand ineinander lösen?

- » vollkommene Löslichkeit
- » teilweise Löslichkeit
- » vollkommene Unlöslichkeit

30

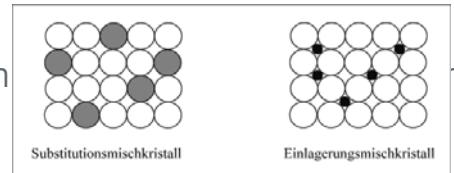
Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

im festen Zustand setzt sich das Gefüge aus Mischkristallen zusammen
in einem Mischkristall liegen im Kristallgitter Atome von 2 oder mehr Elementen als Substitutions- oder Zwischengitteratome vor

(Beispiel: homogene Mischkristalle: Fe + C; Cu + Sn)

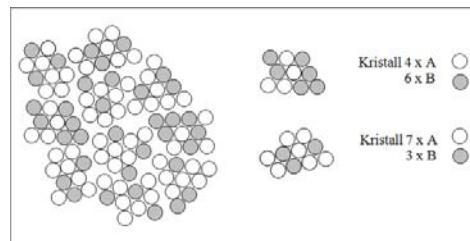
je nach Löslichkeit der beteiligten Elemente im Gefüge mehrere Mischkristalltypen bilden

Mischkristall-Typen
Quelle: wikichemie.de



(Beispiel: bei begrenzter Löslichkeit im festen Zustand: a-Mischkristall mit wenig Komponente B in Kristallstruktur von A + b-Mischkristall mit wenig Komponente A in Kristallstruktur von B)

heterogene Mischkristalle
Quelle: wikichemie.de



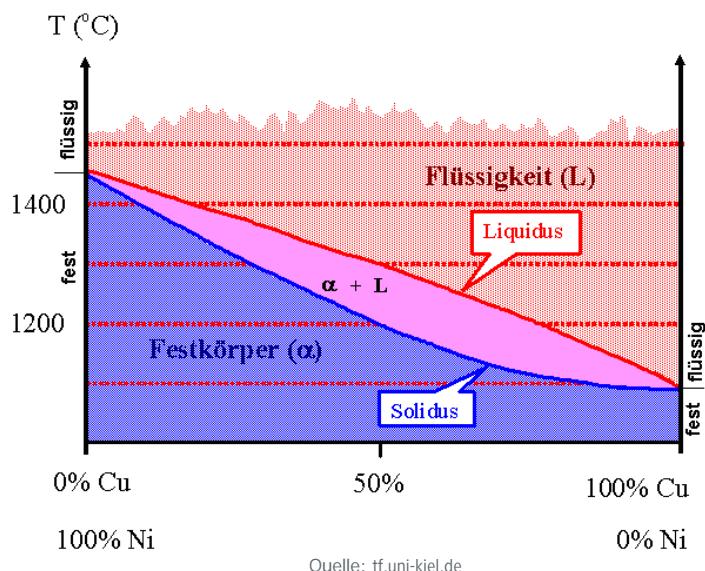
31

Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

Beispiel für **vollkommene Löslichkeit** Legierung Cu-Ni im flüssigen und festen Zustand:

wichtige Bereiche:
Liquiduslinie: Beginn des Erstarrens
Soliduslinie: Ende des Erstarrens
unterhalb Soliduslinie: Mischkristalle

vollkommene Löslichkeit
bedeutet: Mischkristall
kann aus beliebigen
Konzentrationen der
Komponenten Cu und Ni
bestehen (α -Mischkristall)



32

Mischkristallbildung: Abläufe beim Erstarren

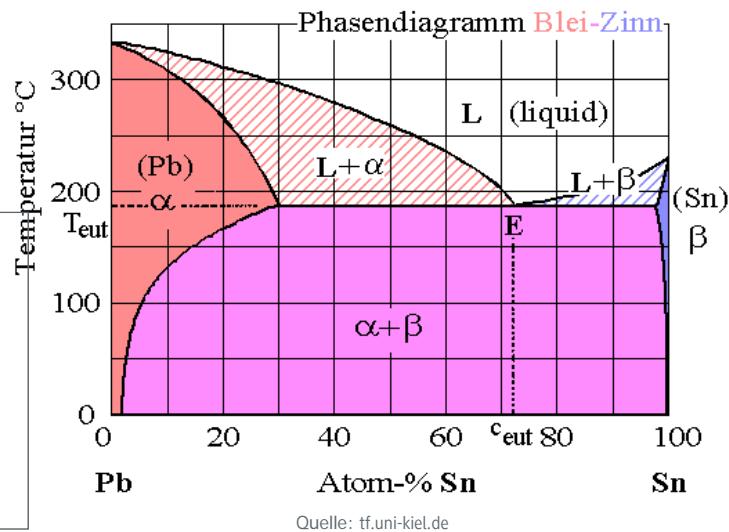
Beispiel für **teilweiser Unlöslichkeit im festen Zustand einer Legierung Pb-Sn : eutektisches System**

wichtige Bereiche:

Liquiduslinie: Beginn des Erstarrens
 Soliduslinie: Ende des Erstarrens
 unterhalb Soliduslinie: Mischkristalle
 eutektischer Punkt (E): direkter Übergang von Schmelze in 2 feste Phasen (α -MK + β -MK)

teilweise Löslichkeit im festen Zustand bedeutet: es bilden sich zwei oder mehr Mischkristall-Typen mit jeweils unterschiedlichen Zusammensetzungen:

- α -Mischkristall: wenig Sn in Pb-MK gelöst
- β -Mischkristall: wenig Pb in Sn-MK gelöst



Quelle: tf.uni-kiel.de

Gefügebildung:

die Gefügebildung und damit die Gefügestruktur sind wesentliche Parameter für die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Werkstoffen
 bei Metallen sind dabei die Löslichkeit der beteiligten Elemente und damit die Bildung der Mischkristalle von entscheidender Bedeutung
 Mischkristalle können sich auch im Gittertypus unterscheiden

Beispiele:
 α -Mischkristalle von Fe: krz
 γ -Mischkristalle von Fe: kfz

Vorgänge zur Verbesserung der Materialeigenschaften durch Wärmebehandlung, wie zum Beispiel Härtung, Anlassen, Auslagern, aber auch Aufkohlen, Nitrieren, etc. zielen darauf ab, das Verhältnis der Mischkristalle im Gefüge zu verändern

Beispiele:
 oder mehr β -MK statt α -MK durch Zugang von Kohlenstoff in Fe-C-Legierung (Aufkohlen von Stahl)
 γ -MK statt α -MK durch rasches Abkühlen von austenitischem Stahl (Härtung von Stahl)

die treibende Kraft der Veränderung der Mischkristalle ist dabei die Diffusion der Elemente innerhalb des Gefüges (**Festkörper-Diffusion**)

3. Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen



mechanische Anforderungen an Werkstoffe:

Werkstoff muss notwendige Festigkeit und Elastizität bei der Einwirkung äußerer statischer und dynamischer Kräften haben

→ **Zug-, Druck- und Torsionsfestigkeit**

Verschleißfestigkeit bezüglich Verformung und Abrasion aufweisen

→ **Härte**

Werkstoff muss notwendige Festigkeit und Elastizität bei schlagartiger Krafteinwirkung aufweisen

→ **Kerbschlagfestigkeit**



mechanische Anforderungen an Werkstoffe:

Werkstoff muss hinreichende Festigkeit bei dauerhaft einwirkenden Wechselbelasten haben

→ **Dauerschwingfestigkeit**

Werkstoff muss hinreichende Verformbarkeit bzw. Formstabilität aufweisen

→ **Plastizität**

Werkstoff muss hinreichend mechanisch bearbeitbar sein

→ **Zerspanbarkeit, Verformbarkeit, etc.**



Grundbegriffe der Festigkeitslehre

Die Festigkeitslehre bietet Methoden und Berechnungsansätze zu Bestimmung von:

- » maximal möglichen Längs- und Querkräften bis zur Verformung bzw. bis zum Bruch eines Bauteils
- » maximal möglichen Druckkräften auf ein Bauteil
- » Durchbiegung von Balken und Platten
- » Kräften und Längenänderungen bei plastischer Verformung (Biegen, Walzen, Schmieden, etc.)
- » Spannungsverläufen in Bauteilen und Baugruppen
- » Lebensdauer von mechanisch beanspruchten Bauteilen



Zugspannungen

Zugspannungen können im Werkstoff auslösen:

- » elastische Verformung (reversible Verformung)
- » plastische Verformung (irreversible Verformung)
- » Bruch des Werkstoffs

elastische Verformung:

bei Rücknahme der Kraft geht der gedehnte Körper vollständig in den Ausgangszustand (Ausgangslänge) zurück

plastische Verformung:

bei Rücknahme der Kraft bleibt die Längendehnung teilweise oder vollständig erhalten



Zugspannungen

Eigenschaft des Werkstoffs wird in Spannungs-Dehnungskurve durch Zugversuch experimentell ermittelt.

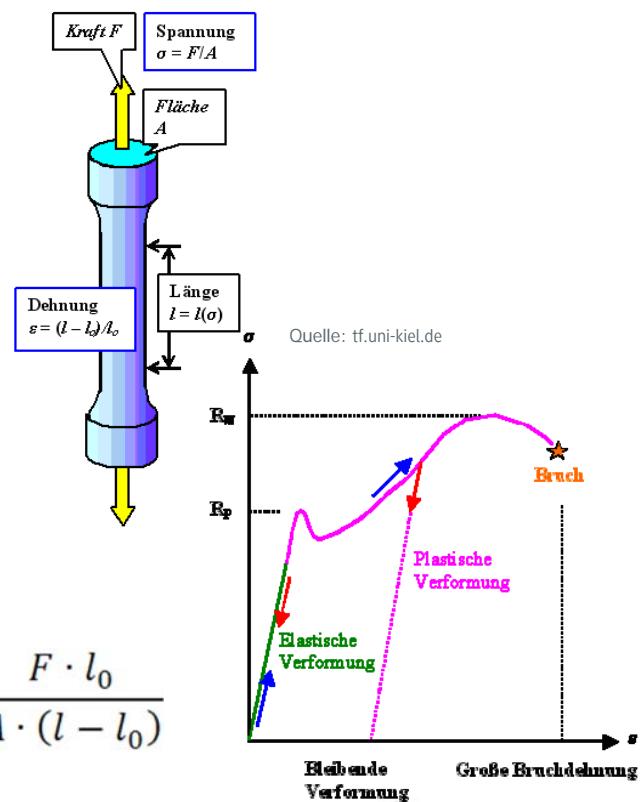
Messung: Kraft-Verlängerung

Umrechnung: Spannung-Dehnung

$$\text{Spannung: } \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\text{Dehnung: } \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

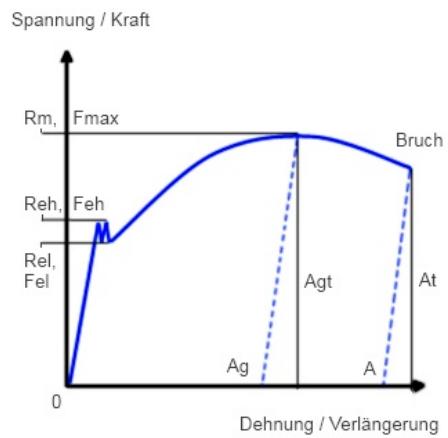
$$\text{Elastizitätsmodul: } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot (l - l_0)}$$



Zugspannungen

Eigenschaft des Werkstoffs wird in Spannungs-Dehnungskurve durch Zugversuch experimentell ermittelt.

- maximale Zugspannung: R_m
(= elastisch-plastischer Bereich)
- obere Streckgrenze: R_{eh}
(= elastischer Bereich)
- untere Streckgrenze: R_{el}
(= elastischer Bereich)
- alternative Bezeichnung: $R_{p;0,2}$ ($\sim R_{el}$)



Quelle: nrw-24.de



Zugspannungen

Beispiele für Zugfestigkeiten unterschiedlicher Werkstoffe

Werkstoff	Streckgrenze R_{el} bzw. $R_{p0,2}$
S355JR (unlegierter Baustahl)	355 N/mm ² (MPa)
S550QL (vergüteter Baustahl)	550 N/mm ² (MPa)
31CrMo12 (Nitrierstahl)	800 N/mm ² (MPa)
Reinaluminium (kaltverfestigt)	100 N/mm ² (MPa)
AlMg3 (kaltverfestigt)	260 N/mm ² (MPa)
CuSn20 (Bronze)	350 N/mm ² (MPa)



Zugspannungen

Beispiele für Zugfestigkeiten unterschiedlicher Werkstoffe

Werkstoff	Streckgrenze R_{el} bzw. $R_{p0,2}$
Zirconiumoxid (Oxidkeramik)	500 - 1000 N/mm ² (MPa)
Siliciumcarbid (Karbidkeramik)	350 N/mm ² (MPa)
Quarzglas	50 N/mm ² (MPa)
Polyethylen (HD)	20 – 30 N/mm ² (MPa)
Beton	2 – 5 N/mm ² (MPa)
Fichtenholz	80 N/mm ² (MPa)
Buchenholz	135 N/mm ² (MPa)



Zugspannungen

Berechnungsbeispiel:

Gegeben ist eine handelsübliche Schraube M10,
Festigkeitsklasse 12.9

- M10: Kerndurchmesser $d = 8,5 \text{ mm}$
- 12.9: Streckgrenze $R_{p0,2} = 1105 \text{ MPa}$

Mit welcher Zugkraft kann die Schraube mindestens belastet werden?

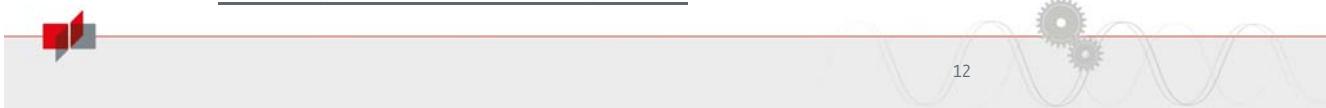


Quelle: ldm-tuning.de

$$F = R_{p;0,2} \cdot A = R_{p;0,2} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

$$F = 1105 \text{ MPa} \cdot \frac{(0,0085 \text{ m})^2 \cdot \pi}{4}$$

$$\underline{F = 0,0627 \text{ MN} = 62,7 \text{ kN}} \quad (\text{Elefant: } 2 - 5 \text{ t} = 20 - 50 \text{ kN})$$



Druckspannungen

Druckfestigkeit ist speziell bei keramischen und mineralischen Werkstoffen von Bedeutung:

- » Aufnahme von Gewichtslasten von Bauwerken
- » Gebirgsdruck in natürlichen Gesteinen (Gebirgsschlag!)
- » Lastabtrag durch Druckkräfte bei echten Bögen und Gewölben

aber auch wichtig bei Kunststoffen hinsichtlich Formstabilität bei Druckbeanspruchung

Beispiele:

Werkstoff	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit
Float-Glas	30 – 50 N/mm ² (MPa)	900 N/mm ² (MPa)
Beton	2 – 5 N/mm ² (MPa)	15 – 100 N/mm ² (MPa)
Karbidkeramik	350 N/mm ² (MPa)	2000 N/mm ² (MPa)



13

Härte

Härte einer Werkstoffoberfläche wird nach den Eindringverfahren geprüft:
wie tief dringt ein Prüfkörper in den Prüfling ein



damit bedeutet Härte:

Widerstand gegen das Eindringen eines härteren Körpers

dabei wird unterschieden,

- » wie die Prüfkraft auf den Prüfkörper wirkt (statische oder dynamisch)
- » welche Form der Prüfkörper hat (Kugel, Kegel, Pyramide)

Besonderheit bei Steinen und Mineralien: Gesteinsritzhärte (Härtegrade nach Mohs 1 – 10)



15

Härte

Verfahren zur Härteprüfung von technischen Werkstoffen Eindringverfahren:

- » **Brinell** ($D=10$ mm Hartmetallkugel, Prüfkraft hängt vom jeweiligen Beanspruchungsgrad ($0,102 \cdot F/D^2$) Werkstoff ab)
- » Härtewert nach Brinell HBW ergibt sich dann zu:

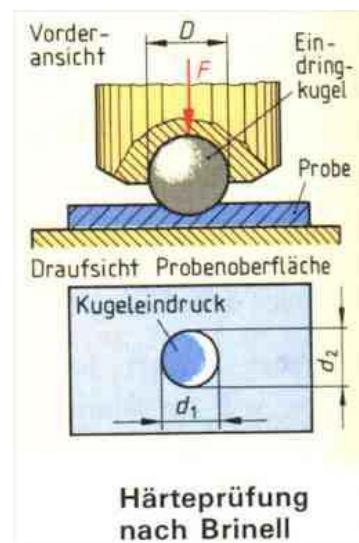


$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

mit: F = Prüfkraft (30 kN bei Stahl; 0,5 kN bei NE-Metallen)

d = mittlerer Durchmesser des Kugeleindruckes

Vorteil: bei mehrphasigen, inhomogenen Legierungen gut geeignet



Quelle: htl-steyr.ac.at

16

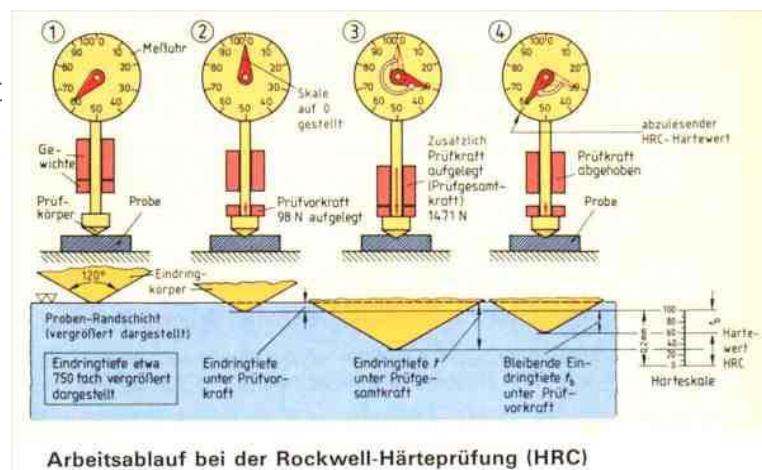
Härte

Verfahren zur Härteprüfung:

Rockwell C (Messung der Eindringtiefe von Diamant-kegel mit Kegelwinkel 120°, Prüfkraft = 1471 N)
Härtewert nach Rockwell HRC ergibt sich dann zu:



$$HRC = 100 - \frac{h}{0,002 \text{ mm}}$$



mit: h = Eindringtiefe

Vorteil: einfaches und schnelles Verfahren

Quelle: htl-steyr.ac.at

17

Härte

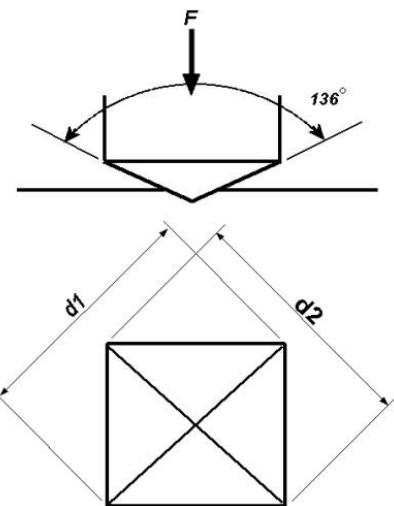
Verfahren zur Härteprüfung:

Vickers (Messung der Diagonallänge des Eindrucks von Diamantpyramide mit Pyramidenwinkel 136°, Prüfkraft abhängig von Messbereich: 0,1 N - 1000 N)
Härtewert nach Vickers HV ergibt sich dann zu:



$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot 136^\circ}{d^2}$$

mit: d = mittlere Diagonallänge



Quelle: nrw-24.de

Vorteil: besonders geeignet bei dünnen Blechteilen im Mikrohärtebereich

18

Härte

Härtewerte nach Brinell, Rockwell und Vickers können miteinander in Korrelation gesetzt werden (s. Tabelle)

in erster Näherung kann die Brinell-Härte über die Zugfestigkeit R_m berechnet werden:



$$HBW = \frac{R_m}{3,5}$$

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Zugfestigkeit R_m N/mm²
20	240	228	770
21	245	233	785
22	250	238	800
23	255	242	820
24	260	247	835
25	265	252	850
26	270	257	865
27	280	266	900
28	285	271	915
29	295	280	950
30	300	285	965
31	310	295	995
32	320	304	1030
33	330	314	1060
34	340	323	1095
35	345	330	1115
36	355	335	1140
37	365	340	1150
38	370	352	1190
39	380	361	1220
40	390	371	1255
41	400	380	1290
42	410	390	1320
43	420	399	1350

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Zugfestigkeit R_m N/mm²
44	430	409	1385
45	445	423	1450
46	460	437	1485
47	470	447	1520
48	480	456	1555
49	500	475	1630
50	510	485	1665
51	520	495	1700
52	545	515	1780
53	560	532	1845
54	580	551	1920
55	600	570	1995
56	610	580	2030
57	630	599	2105
58	650	620	2180
59	670	-	-
60	700	-	-
61	720	-	-
62	740	-	-
63	770	-	-
64	800	-	-
65	830	-	-
66	860	-	-

Quelle: inducetoheat.eufileadminpdfwii.pdf

19

Härte

Messung der Härte für Gesteine und Mineralien erfolgt über die **Härteskala nach Mohs** (Ritzhärte)

weitere Härteprüfverfahren:

- » Shore-Härte (Kunststoffe, Elastomere, Dichtungen)
- » Knoop-Härte (Sinterwerkstoffe, Keramiken, Gläser)
- » Barcol-Härte (GFK)
- » Buchholz-Härte (Lacke)
- » Rosiwal-Härte (Schleifmittel)
- » Martenshärte

Mineral	Mohs relative Härte	Ritzprobe	Rosiwal absolute Härte	Vickers kp / mm ²
Talk	1	mit Fingernagel schabbar	0,03	2,4
Gips	2	mit Fingernagel ritzbar	1,25	36
Calcit	3	mit Kupfermünze ritzbar	4,5	109
Fluorit	4	mit Messer leicht ritzbar	5	189
Apatit	5	mit Messer noch ritzbar	6,5	536
Orthoklas	6	mit Stahlfeile ritzbar	37	795
Quarz	7	ritz Fensterglas	120	1.120
Topas	8	ritz Quarz	175	1.427
Korund	9	ritz Topas	1.000	2.060
Diamant	10	ritz Korund	140.000	10.060

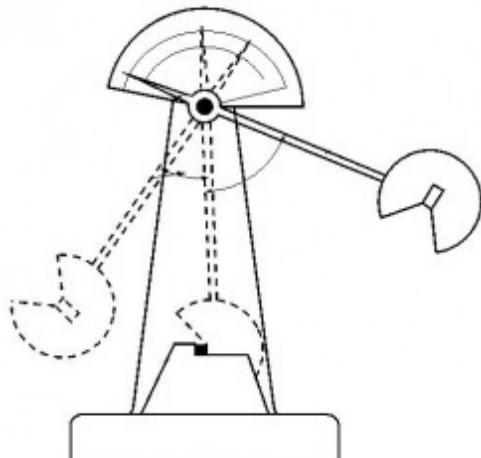
Quelle: realgems.org



Schlagfestigkeit

Widerstand gegenüber stoßartiger Beanspruchung von Werkstoffen (Zähigkeit, Duktilität) wird Pendelschlagversuch ermittelt
Größe für Schlagfestigkeit ist gemessene:

Schlagenergie
(= Lageenergie von Pendelhammer nach Durchschlagen von quadratischem Prüfling mit 10 mm x 10 mm)



Quelle: schraubenfibel.de



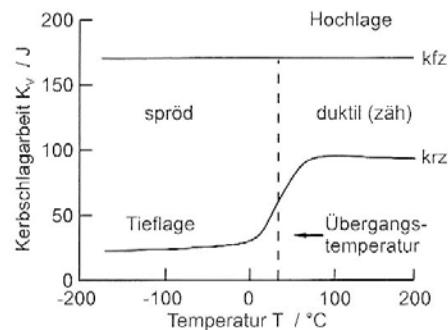
Schlagfestigkeit

Schlagenergie (Schlagfestigkeit) ist abhängig von:

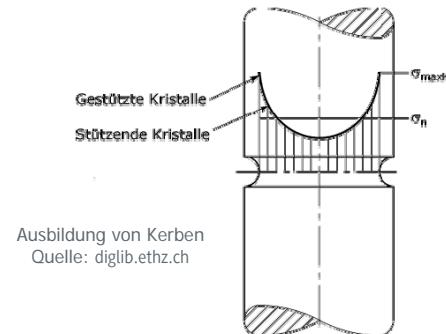
- » Werkstoff
- » Temperatur des Werkstoffs
- » geometrische Form

Achtung:

Kerben erzeugen **Spannungsspitzen** und führen zu verringriger Schlagfestigkeit; daher Kerben und Einstiche in Werkstücken nie scharfkantig sondern **abgerundet** ausführen



Kerbschlagbiegekurve für krz- und kfz - Werkstoffe
Quelle: Ross, Maile Werkstoffkunde für Ingenieure



Ausbildung von Kerben
Quelle: diglib.ethz.ch

23

Dauerschwingfestigkeit

Bestimmung der Festigkeit des Werkstoffs bei dauerhafter dynamischer Belastung

Messung von periodisch angeregten

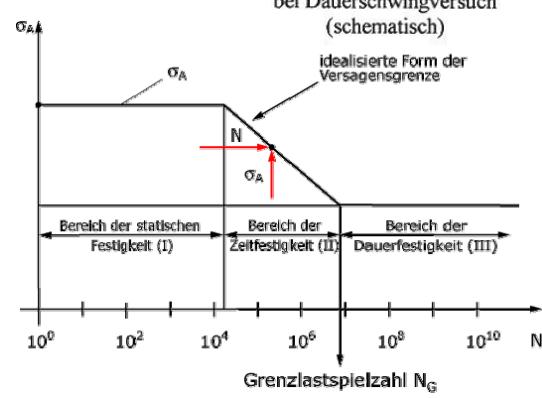
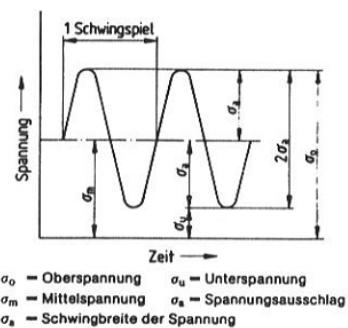
Prüflingen (Schwingspiele)

experimentelle Ermittlung von:

- » Kurzzeitfestigkeit (bis 10^4 Schwingspiele)
- » Zeitfestigkeit (10^4 bis 10^7 Schwingspiele)
- » Dauerfestigkeit (> bis 10^7 Schwingspiele)

Wöhlerkurven

Quelle: lwt.mb.tu-dortmund.de



Quelle: diglib.ethz.ch

24

Dauerschwingfestigkeit

Dauerschwindfestigkeit hängt u.a. ab von:

- » Wärmebehandlungszustand
- » Ausbildung von Kerben
- » Oberflächenrauhigkeit

hohe Dauerschwingfestigkeit wichtig bei periodisch schwingenden Bauteilen
(Tragflügel, Windpropeller,
Turbinenwellen, Brückenwerkstoffe, etc.)



Quelle: kunst-fuer-alle.de

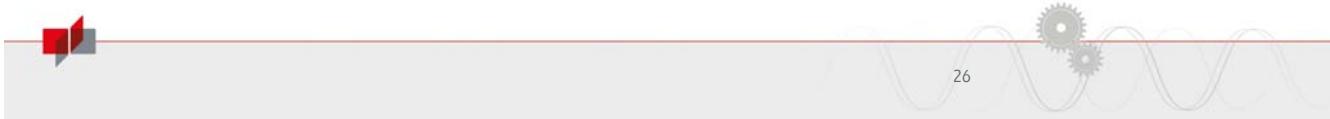


Beeinflussung und Veränderung von Materialeigenschaften

Materialeigenschaften lassen sich verändern durch:

- » Wärmebehandlung (Veränderung der Mischkristalle bzgl. Konzentration, Größe und Zusammensetzung; Ausheilen von Gitterfehlern)
- » Rekristallisation
- » Verformung (Erzeugung von Versetzungen, Feinkorngefüge, ...)
- » Legieren
- » etc.

Materialeigenschaften können mit der Zeit verändern
(→ Alterungsprozesse) besonders problematisch bei dauerhafter
Einwirkung von Wetter (Offshore-Windkraftanlagen, Brücken, Pipelines,
etc.)



4. Eisenwerkstoffe



Aufbau und Struktur von Eisenwerkstoffen:

Eisenwerkstoffe sind alle **Eisen-Kohlenstoff-Legierungen**, d.h. Metalle mit Hauptkomponenten Fe und C bzw. Fe_3C
Eisenwerkstoffe unterteilen sich in

- » Eisengusslegierungen (Grauguss, etc.)
- » Eisennetwerkstoffe (Stahl)
- » Sinterreisen und Sinterstahl

Eisenwerkstoffe sind eine der wichtigsten und verbreitetesten Materialgruppen bei den technischen Werkstoffen, da:

- » hohe Festigkeit und Belastbarkeit
- » hohe Verfügbarkeit
- » gute Verarbeitbarkeit
- » relativ kostengünstig



Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Roheisen als Basis für Eisenwerkstoffe wird in der Regel aus mineralischen Eisenerzen gewonnen
(Ausnahme: Roheisen aus Recycling-Schrott)
wirtschaftlich bedeutende Eisenerze:

- » Magneteisenstein / Magnetit (Fe_3O_4)
- » Roteisenstein / Hämatit (Fe_2O_3)
- » Brauneisenstein / Limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O}$)
- » Spateisenstein / Siderit (FeCO_3)

nach dem Abbau werden Erze zerkleinert
„Brechen“) und von taubem Gestein gereinigt
danach erfolgt Eisenreduktion im Hochofen



Hämatit - Eisenerz (Eisenoxid), Foto und Copyright: T. Sehnacht

Roteisenstein
Quelle: haustechnikdialog.de



Spatiesenstein
Quelle: unbekannter-bergbau.de

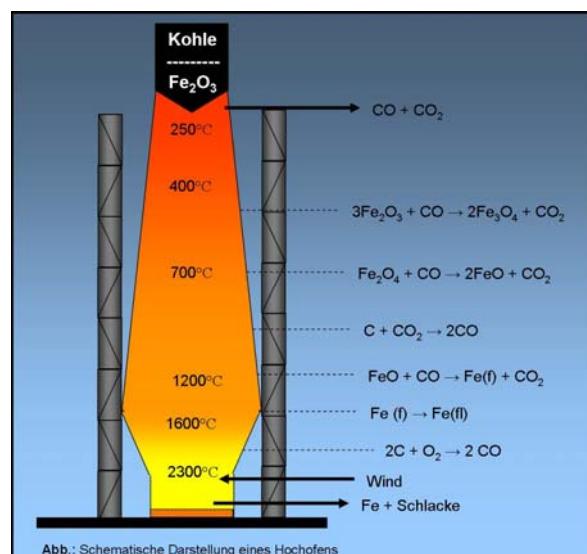


Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

im Hochofen wird Eisenerz mit Kohlenstoff (Koks) reduziert und erschmolzen

- » Reduktionstemperatur ab ca. 600°C
- » Schmelztemperatur ca. 1535°C (sinkt mit steigender Kohlenstoffaufnahme auf ca. 1150°C)
- » während Schmelzvorgang nimmt Eisen freigesetzte Stoffe aus Eisenerz auf (P, Si, Mn)

dabei werden Fremdstoff (Ca-Al-Silikate, S) als Schlacke gebunden



Quelle: chempage.de e

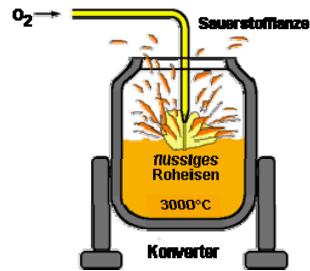


Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Roheisen wird weiterverarbeitet zu Stahl:

→ **Frischen**

- » beim Frischen wird reiner Sauerstoff in die Roheisenschmelze geblasen
- » dabei werden Eisenbegleitstoffe (P, Mn, Si) fast vollständig oxidiert und verschlackt;
- » der Kohlenstoffanteil wird von 3-5% auf maximal 2% durch Oxidation reduziert
- » die Entschwefelung erfolgt durch Beigabe von z.B. Soda (Na_2CO_3), aus dem sich dann Na_2S bildet



Schema Windfrischen
Quelle: seilnacht.com



Konverter
Quelle: chemie-am-auto.de

Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Weiterbearbeitung zu Halbzeugen (z.B.: Brammen, Barren, etc.)

Veredelung der Rohstähle der gezielte Legierungen (erneutes Aufschmelzen)

wichtige Ur- und Umformverfahren zur Weiterverarbeitung von Stahl:

- » Gießen (Herstellen beliebiger geometrische Formen; Gussformen aus Stahl (Kokille), Sand, Keramik)
- » Walzen (Herstellung von Flachmaterial (Blechen) und Stangenmaterial (Rohre, etc.)
- » Schmieden (hohe Festigkeit durch Verdichtung von Stahl und Nahtlose Formübergänge)



Brammen
Quelle: stahl-online.de



Gießerei
Quelle: huhag.de

Grundlagen der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

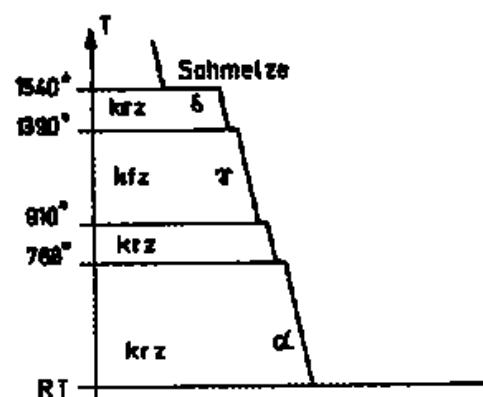
die Hauptkomponenten in Eisenwerkstoffen, Fe und C bilden ein Gefüge aus Mischkristallen
(Achtung: beschränkte Löslichkeit von C in Fe)

der Kohlenstoff in der Eisen-Matrix auf Zwischen-gitterplätzen gelöst (Einlagerungs-Mischkristall)

je nach Temperatur bilden sich dabei unterschiedliche Mischkristall-Typen aus

- $t < 911^\circ\text{C}$: krz $\rightarrow \alpha\text{-Mischkristall}$
- $911^\circ\text{C} < t < 1390^\circ\text{C}$: kfz $\rightarrow \gamma\text{-Mischkristall}$
- $1390^\circ\text{C} < t < 1540^\circ\text{C}$: krz $\rightarrow \delta\text{-Mischkristall}$
 $(=\alpha\text{-Mischkristall})$

Kohlenstoff kann auch gebunden als Fe_3C (Zementit) oder elementar (Graphit) als eigene Phase vorliegen



Quelle: schweissaufsicht.ansa.ch

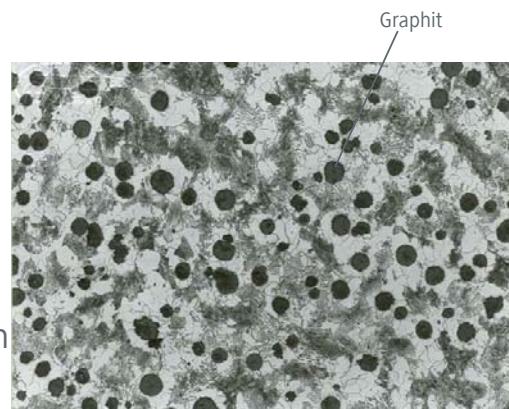
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Bezeichnungen der Mischkristall-Typen:

- » α -Mischkristall: krz; max. 0,02% C gelöst \rightarrow **Ferrit**
- » γ -Mischkristall: kfz; max. 2,06% C gelöst \rightarrow **Austenit**
- » δ -Mischkristall: krz; max. 0,1% C gelöst \rightarrow **δ -Ferrit**
- » Fe_3C : orthorhombisch \rightarrow **Zementit**
- » α -Mischkristall + Fe_3C \rightarrow **Perlit**
- » γ -Mischkristall + Fe_3C \rightarrow **Ledeburit**

Auftreten der einzelnen MK-Typen und Gefügearten abhängig von

- » Kohlenstoffkonzentration
- » Temperatur



Kugelgraphit-Guss (GGG); perlitis-ferritische Matrix mit Kugelgraphit-Phasen
Quelle: a3quattro.de

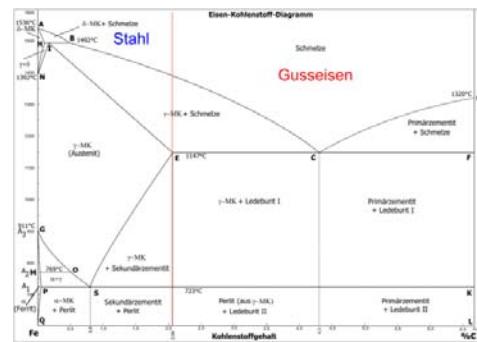
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen werden in einem speziellen Zustandsdiagramm dargestellt

→ Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Darstellung der unterschiedlichen Mischkristalltypen abhängig von

- » Kohlenstoffgehalt
- » Temperatur

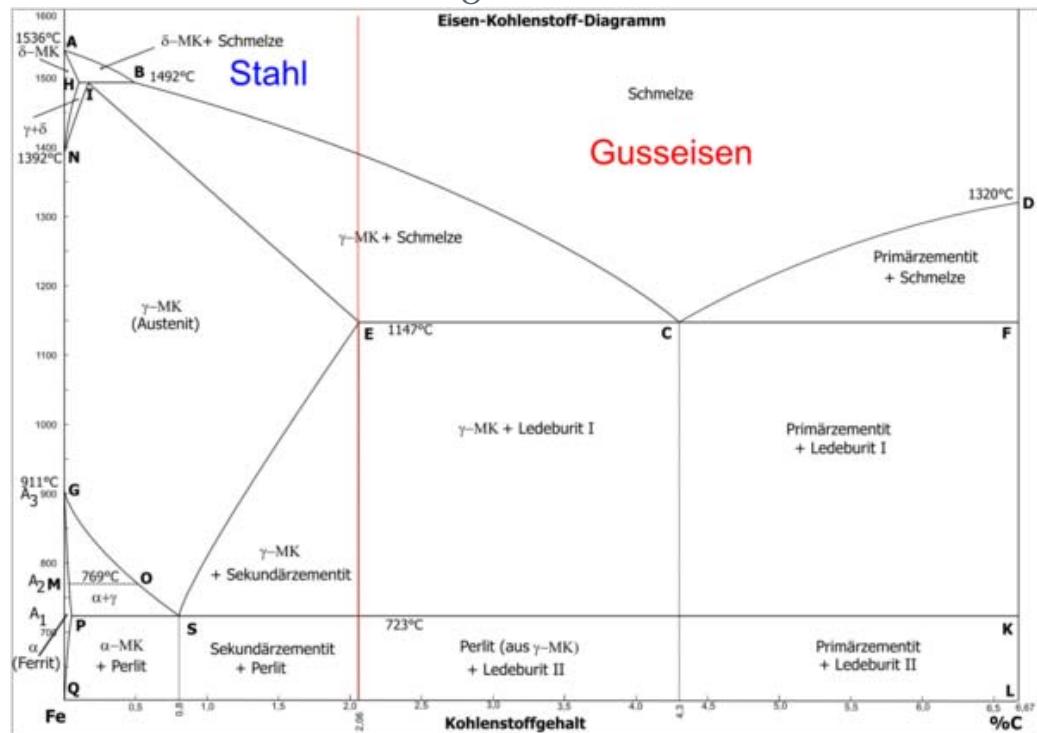


Quelle: mkdoc.de

Kohlenstoff liegt zunächst in Form von Fe_3C vor; durch Glühen wandelt sich Zementit um:



Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm:



Quelle: mkdoc.de



Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Der Kohlenstoffgehalt ist ein maßgebender Faktor für die Eigenschaften von Eisenwerkstoffen;

mit zunehmendem Kohlenstoffanteil:

- » Zunahme von Härte und Festigkeit
- » Zunahme von Verschleißwiderstand
- » Abnahme von Verformbarkeit

die Einteilung von Eisenwerkstoffen erfolgt anhand des Kohlenstoffgehalts im Gefüge:

» C < 0,1%	Reineisen
» 0,1% < C < 0,5%	Baustähle
» 0,25% < C < 0,6%	Vergütungsstähle
» 0,5% < C < 2,06%	Werkzeugstähle
» 2,06% < C < 6,67%	Gusseisen <ul style="list-style-type: none">Fe-C-Gefüge: graues GusseisenFe-Fe₃C-Gefüge: weißes Gusseisen

weitere Legierungszugaben:

neben Kohlenstoff weisen Stähle zum Teil noch weitere Legierungsstoffe auf, die wesentlich auf die Materialeigenschaften einwirken:

- » Cr, Mo, V, Si, Al, Sn:
 - Ferrit-Stabilisierer; erweitern das α -MK-Gebiet; dadurch verbessern sich die Möglichkeiten, durch nachfolgenden Wärmebehandlung und Härteverfahren die Gefügezustände gezielt einzustellen
- » C, Mn, Ni, Cu, Co, Zn:
 - Austenit-Stabilisierer; erweitern das γ -MK-Gebiet; dadurch werden nicht-rostende Stähle erzeugt

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

unter der Wärmebehandlung versteht man Verfahren, bei denen das Gefüge eines Werkstoffes durch zeitlich definierte Aufheiz- und Abkühlvorgänge gezielt verändert bzw. beeinflusst wird

zum reinen Temperatureinfluss können zudem von mechanische und/oder chemische Einflüsse wirken (z.B. Schmieden, Nitrieren)

Ziel der Wärmebehandlung können sein (Achtung: Ziele zum Teil widersprüchlich):

- » Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- » Abbau von Eigenspannungen
- » Erhöhung von Festigkeit und Verschleißwiderstand
- » Homogenisierung von Legierungselementen und Gefügestrukturen

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Wärmebehandlungsverfahren können in drei Gruppen eingeteilt werden:

- » **Thermische Verfahren:** Aussetzen des Werkstücks einem dezidierten Temperatur- Zeit- Verlauf
 - Glühen
 - Härteln
 - Anlassen (Altern)
- » **Thermochemische Verfahren:** zusätzlich werden über chemische Reaktionen an der Werkstückoberflächen bestimmte Elemente entzogen oder angereichert
 - Metalldiffusion
 - Nichtmetall-Diffusion
- » **Thermomechanische Verfahren:** zusätzlich wird das Werkstück umgeformt
 - Schmieden
 - Walzen

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

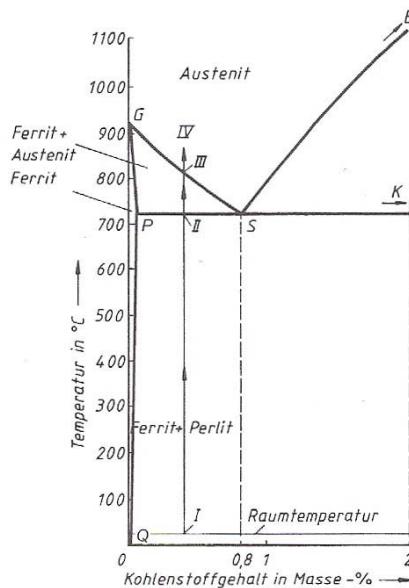
Erwärmung erfolgt bis in das Austenit-Gebiet (γ -Mischkristall; kfz)

Austenit kann mehr Kohlenstoff lösen (in Gitter aufnehmen) als Perlit und Ferrit; dadurch Homogenisierung der Kohlenstoffverteilung (und anderer Legierungsbestandteile) im Gefüge

→ **Austenitisierung**

Grad der Austenitisierung ist abhängig vom

- » Temperatur-Zeit-Verlauf
- » Art und Struktur von Ausgangsgefüge
- » Zusammensetzung von Werkstoff



Quelle: Seidel, Hahn; Werkstofftechnik, Hanser Verlag

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

Bei Wieder-Abkühlen aus dem Austenit-Gebiet erfolgt die Rückumwandlung des Gefüges unterhalb 723°C in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit:

- » bei geringer Abkühlrate (< 3K/min): Umwandlung von Austenit (γ -MK) in Ferrit (α -MK) und Zementit (Fe_3C) → **Perlit**
- » mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird aufgrund der unterdrückten Diffusion die Perlitstruktur eine zunehmend feinere Lamellenstruktur
- » Kohlenstoff ist zudem in einer Zwangslösung im Mischkristall; dadurch wird die Gitterstruktur verzerrt
- » das dabei entstehende metastabile Gefüge heißt

→ **Martensit**

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

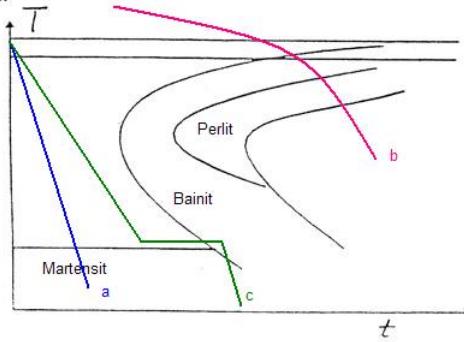
Martensit ist ein hartes und festes Gefüge mit nur geringer Duktilität

martensitisches Gefüge zeichnet gehärtete Oberflächen aus

die Abkühlgeschwindigkeit ist entscheidend für den Anteil an Martensit im Gesamtgefüge

Zeichnen Sie in das untenstehende kontinuierliche ZTU-Diagramm folgende drei Abkühlkurven ein und kennzeichnen Sie diese

- es entsteht nur martensitisches Gefüge
- es entsteht nur normalisiertes Gefüge
- es entsteht ein Gefüge, bei dem ein minimaler Martensiteanteil (>0%) enthalten ist



Zusammenhang zwischen Gefügeart und Abkühlgeschwindigkeit
Quelle: metallographie-ausbildung.de

19

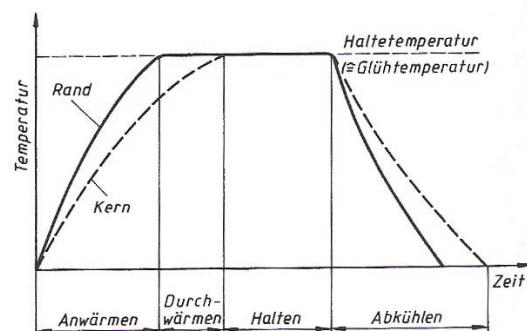
Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Glühen: Erwärmen und Halten auf Glühtemperatur und anschließend langsames Abkühlen

Ziel: Homogenisierung des ferritisch-perlitischen Gefüges; Abbau von Spannungen und Versetzungen

Anwendung: Verbesserung der Zerspanbarkeit und Umformbarkeit



Quelle: Seidel, Hahn; Werkstofftechnik, Hanser Verlag

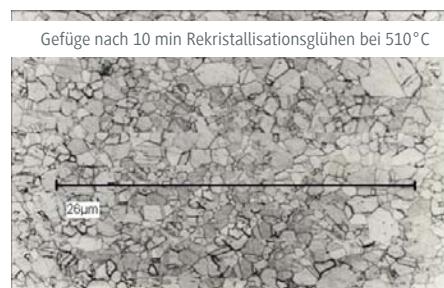
20

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Glühverfahren:

- » Diffusionsglühen (ca. 1100-1200°C;
→ Homogenisierung)
- » Grobkornglühen (ca. 1000-1100°C;
→ verbesserte Zerspanbarkeit)
- » Normalglühen (ca. 800°C;
→ gleichmäßiges Feinkorngefüge)
- » Spannungsarmglühen (ca. 550-650°C)
- » Rekristallisationglühen (ca. 500-700°C)



Quelle: otto-junker.de

21

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Härten : Erwärmen und Halten auf Glühtemperatur
und anschließend schnelles Abkühlen

Ziel: möglichst hohe Martensitbildung

Anwendung: Erhöhung von Verschleißwiderstand,
Festigkeit und Dauerschwingfestigkeit
(Spezialfall: → **Randschichthärtung**)

Anlassen / Vergüten: nach Härten erwärmen auf 400°C – 700°C und
langsam abkühlen zur zusätzlichen Erhöhung der Zähigkeit zur
gezielten Abbau von Martensit

22

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Grundlegende

Idee: Veränderung der chemischen Zusammensetzung
in der Randzone des Werkstücks durch Ein- bzw.
Ausdiffundieren bestimmter Elemente

Ziele:

Verschleißfestigkeit erhöhen
Randzonenhärte erhöhen unter Beibehalt von Kernzähigkeit
Schwingfestigkeit verbessern
Korrosionsbeständigkeit erhöhen



23

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiele thermochemische Verfahren:

» Nichtmetalldiffusion:

- Kohlenstoff (→ Aufkohlen, Zementieren)
- Stickstoff (→ Nitrieren)
- Kohlenstoff und Stickstoff (→ Carbonitrieren, Nitrocarburieren)
- Kohlenstoffentzug (→ Entkohlung)

» Metalldiffusion

- Aluminium (→ Alitieren)
- Chrom (→ Chromatieren)
- Zink (→ Sherardieren)
- Chrom und Aluminium (→ Chromalitieren)

» Metall-Nichtmetall-Diffusion

- Titan und Kohlenstoff (→ Titancarbidbehandlung)



24

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiel: **Einsatzhärten**

Einsatzhärten ist ein Oberflächenhärteverfahren, bestehend aus

» Aufkohlen

- Pulveraufkohlen (Holzkohle, Koks) bei 880-950°C
- Salzbadaufkohlung (Cyanidsalzen (NaCN)) bei 880-930°C
- Gasaufkohlung (CO und CH₄) bei bis zu 1050°C

» Härten

» Anlassen



Einsatzhärten von Zahnrädern
Quelle: haerterei-tandler.de

25

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

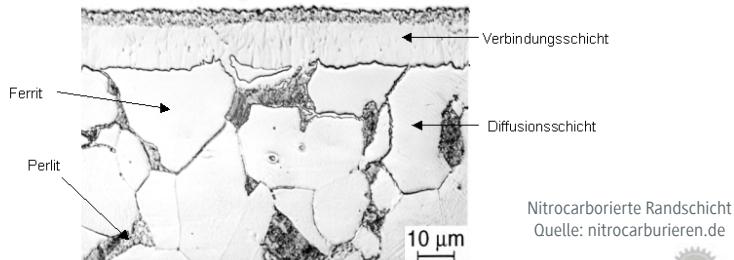
Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiel: **Nitrieren**

Nitrieren ist ein verzugsarmes Verfahren zur Erzeugung sehr hoher Oberflächenhärten; dabei wird das Werkstück in Stickstoff gegläutet:

- Gasnitrieren in NH₃-Strom bei 500°C
- Badnitrieren in Cyanbad bei 570°C
- Nitrocarborisierung bei 500-590°C

» Nitrierzeiten bis zu 100 h



Nitrocarburierte Randschicht
Quelle: nitrocarburieren.de

26

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermomechanische Wärmebehandlungsverfahren:

Grundlegende Idee: gleichzeitiger Umformprozess mit Wärmebehandlung zur Beeinflussung von Form und Eigenschaft des Werkstücks

Verfahren: **Schmieden**
Walzen
Biegen

Vorteil: monolithische Bauteile mit hoher Verdichtung und Festigkeit



Gesenkschmiede
Quelle: georg-umformtechnik.de

27

Klassifikation von Eisenwerkstoffen:

Eisenwerkstoffe unterteilen sich in:

- » Eisenwerkstoffe (Stahl)
 - Baustähle
 - Werkzeugstähle
 - Schweißstähle
 - Behälterbaustähle
 - Maschinenbaustähle
 - chemisch beständige Stähle
 - Spezialstähle
- » Eisengusslegierungen (Guss)
 - Stahlguss ($C < 2,06\%$)
 - Grauguss ($C > 2,06\%$; Fe-C-System)
 - Weisguss ($C > 2,06\%$; Fe- Fe_3C -System)
- » Sinterreisen und Sinterstahl (Sintermetall)
(aus Metallpulver gepresste und gesinterte Bauteile mit hohem Porenanteil;
dadurch leicht und gute Notlaufeigenschaften)

29

Klassifikation von Eisenwerkstoffen:

Stähle können gemäß **DIN EN 10027** Teil 1 und 2 in zweierlei Hinsicht bezeichnet werden:

- a) Kurzname, der einen Hinweis auf die Verwendung und die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs gibt

Beispiele: E360: Maschinenbaustahl mit $R_{p,0,2} = 360 \text{ MPa}$
B500A: Betonstahl mit $R_{p,0,2} = 500 \text{ MPa}$, weichgeglüht
L360Q: Stahl für Rohrleistungen mit $R_{p,0,2} = 360 \text{ MPa}$, vergütet

- b) Kurzname, der Hinweise auf die chemische Zusammensetzung (Legierungselemente) und Wärmebehandlungszustand des Werkstoffs gibt

Beispiele: C45E+N: unlegierter Stahl mit 0,45% C, vorgeschriebener maximaler Schwefelgehalt, normalgeglüht
X5CrNi18-10+U: hochlegierter Stahl mit 0,05% C, 18% Cr und 10%Ni, unbehandelt

- c) Werkstoffnummern, bestehend aus einem 5 bis 7-stelligen Code (s. DIN EN 10027 Teil 2)

Beispiele: 1.4301 legierter Edelstahl (= X5CrNi18-10)
1.0577 unlegierter Qualitätsstahl

Stähle und Stahllegierungen:

Stähle sind Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit weiteren Begleit- und Legierungselementen

der Kohlenstoffgehalt in Stahl: $\leq 2,06\%$

unterhalb der Grenzwertkonzentrationen von Legierungselementen gilt der Werkstoff als unlegierter Stahl

Wirkung von Legierungselementen (LE):

- » Veränderung der Löslichkeit von C, damit Änderung der Phasenverteilung α -MK zu γ -MK
- » Erhöhung der Festigkeit zur Gitterverzerrung (Einlagerungs- oder Substitutionsatome)
- » manche LE wirken als Carbid-Bildner; damit Erhöhung der Festigkeit durch Carbide in Intermetallischer Phase (Ti, Zr, V, Hf, Nb, Ta, Cr, Mo, W)
- » manche LE wirken als Nitrid-Bildner; damit Erhöhung der Festigkeit durch Feinkornbildung (Al, B, Cr, Nb, V, Ti, Zr)

Tabelle 4.1: Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzenanalyse)

LE...	%	LE...	%	LE...	%
Al	0,30	Cr	0,30	Co	0,30
Cu	0,40	Mn	1,65	Mo	0,08
Ni	0,30	Nb	0,06	Pb	0,40
Se	0,10	Si	0,60	Te	0,10
Ti	0,05	V	0,10	Bor	0,0008
W	0,30	Zr	0,05	Sonst.	0,10

Grenzwertkonzentrationen von Legierungselementen (LE)
Quelle: christiani.de

Stähle und Stahllegierungen:

Beispiele typischer Stahlsorten:

unlegierte und legierte Baustähle

- » Kohlenstoffarme Stähle ($C < 0,6\%$), nicht bzw. niedrig legiert, gut zerspan- und schweißbar, gut umform- und gießbar, kostengünstig
- » typischer Eisenwerkstoff im Maschinenbau und Stahlbau
- » Beispiele: S235JO; S355JO, E360

Vergütungsstähle, Nitrierstähle, Einsatzstähle

- » Kohlenstoffgehalt $0,3 - 0,6\%$, wärmebehandelt (vergütet, nitriert, gehärtet) für erhöhte Festigkeit und Zähigkeit
- » Eisenwerkstoff für hochbelastete Bauteile wie Messer, Sägeblätter, Kettenlaschen, Kurbelwellen, Schrauben
- » Beispiele: C45E, 37Cr4, 42CrMo4

Werkzeugstähle

- » unlegiert bzw. legiert (bis zu 30% Legierungsanteil), hohe Festigkeit und hoher Verschleißwiderstand, z.T. hochwärmefest
- » Eisenwerkstoff für Schneidwerkzeuge, (Fräser, Bohrer), Schneidplatten (HSS), Extrudierwerkzeuge, Werkzeugbau, etc.
- » Beispiele: X45NiCrMo16, 40CrMnMo7



33

Stähle und Stahllegierungen:

Beispiele typischer Stahlsorten:

Automatenstähle:

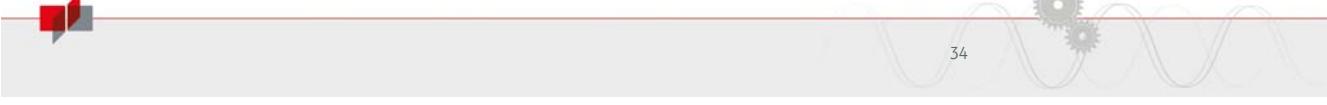
- » geringer Kohlenstoffgehalt $0,05 - 0,12\%$, sehr gut zerspanbar (drehen, bohren); Legierungsbeigaben von S, Pb, P oder Mn bewirken Brechen von Span → damit hohe Schnittgeschwindigkeiten möglich
- » besonders geeignet für Dreh- und Fräsbauten
- » Beispiele: 11SMnPb30, 36SMnPb14

Federstähle:

- » hohe Elastizität und Festigkeit durch Legierungszusätze von Cr, Mo, V, Si, Mn, Ni; hohe Zeitstand- und Dauerfestigkeit
- » geeignet für Federn, Federringe, Blattfedern, Spannstifte
- » Beispiele: 38Si7, 51CrV4, 52CrMoV4

rost- und säurebeständige Stähle:

- » hochlegierte Stähle (mit C, Cr, Ni, Mo, Si, Mn,), Hauptlegierungselemente Chrom und Nickel (z.T. > 20%), hohe chemische Beständigkeit
- » Anwendung in Apparatebau, Rohrleitungsbau, Offshore-Bereich, u.v.m.
- » Beispiele: X1NiCrMoCuN 25-20-7, X10CrNi 18-8



34

Stähle und Stahllegierungen:

typische Verarbeitungsverfahren von Stahlwerkstoffen:

spanende Bearbeitungsverfahren:

- » Bohren, Drehen
 - » Fräsen, Hobeln, Stoßen
 - » Schleifen, Honen
- Ur- und Umformverfahren
- » Gießen
 - » Schmieden
 - » Biegen, Drücken, Ziehen



Fräsen
Quelle: herzog-gmbh.at

Verbindungsverfahren

- » nicht lösbare Verbindungen
 - Schweißen
 - Löten
 - Kleben
- » lösbar Verbindungen
 - Schrauben
 - Nieten
 - ...



Drehen
Quelle: bohinec.si

Eisengusswerkstoffe:

Eisengusswerkstoffe sind Eisen-Kohlenstoff-Silizium-Legierungen

bei Gusseisen liegt der Kohlenstoffgehalt > 2,06%

bei Stahlguss liegt der Kohlenstoffgehalt ≤ 2,06%

Silizium ist dabei entscheidend für die Gefügeausbildung:

- » ohne Silizium bildet sich bei normalen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem gelösten Kohlenstoff → **Zementit Fe₃C** (→ **Weissguss**)
- » mit Silizium bildet sich bei normalen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem gelösten Kohlenstoff → **freier Graphit C** (→ **Grauguss**)

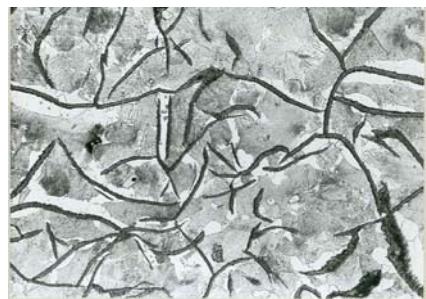
ohne Silizium bildet sich freies Graphit nur bei sehr geringen Abkühlgeschwindigkeiten



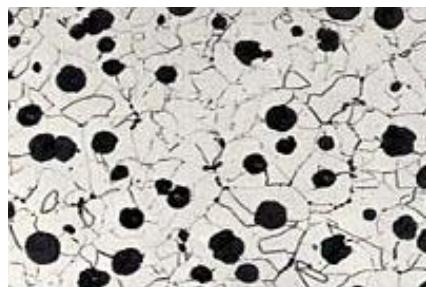
Eisengusswerkstoffe:

Graphit (freier Kohlenstoff) kann im Grauguss in unterschiedlichen Formen im Gefüge vorliegen:

- » **Lamellengraphit (GJL):** spröder Werkstoff mit hoher Schmierwirkung und hoher Schwingungsdämpfung; geringe Zugfestigkeit, hohe Druckfestigkeit
sehr gut gießbar, gut zerspanbar; schlecht schweißbar; hohe Korrosionsbeständigkeit
- » **Kugelgraphit (GJS):** zäher und stabiler Werkstoff mit hoher Schmierwirkung und mittlerer Schwingungsdämpfung (aber besser als Stahl; hohe Zugfestigkeit)
gut gießbar; gut zerspanbar; schlecht schweißbar; hohe Korrosionsbeständigkeit



Lamellengraphit
Quelle: a3quattro.de



Kugelgraphit
Quelle: schonlau-werke.de

38

Eisengusswerkstoffe:

Vergleich der Festigkeit zwischen Lamellengraphit und Kugelgraphit:

	Gusseisen mit Lamellengraphit		Gusseisen mit Kugelgraphit	
	GJL-150	GJL-350	GJS-400-18	GJS-1200-2
Zugfestigkeit R_m	150 – 250 MPa	350 - 450 MPa	400 MPa	1200 MPa
Elastizitätsmodul E	78 – 103 GPa	123-124 GPa	169 GPa	167 GPa

Einflussgrößen auf die Ausbildungsform des Graphits:

- » Si-Gehalt (1 – 3%)
- » bei Zusatz von u.a. Mg (ca. 0,05%) bildet sich Kugelgraphit
- » Abkühlgeschwindigkeit und damit bedingt auch Bauteildicke und Gussform / Formkasten

39

Eisengusswerkstoffe:

typische Anwendungen

Gusseisen mit Lamellengraphit:

- » Bremsscheiben
- » Gehäuse für Getriebe, Pumpen, etc.
- » Kurbelgehäuse für Großdieselmotoren
- » Maschinengestelle
- » etc.



Gehäuse aus Gusseisen
Quelle: aci-industriearmaturen.de

Gusseisen mit Kugelgraphit:

- » Niederdruckzylinder
- » Turboladergehäuse
- » Kurbelwellen
- » Zahl- und Stirnräderräder
- » Pumpenlaufräder
- » Zähne für Baggerschaufeln
- » Turbinenschaufeln
- » etc.



Kurbelwelle aus Gusseisen
Quelle: peugeot-freunde-hannover.de

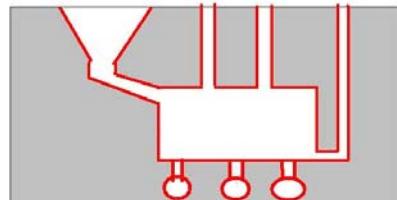


Eisengusswerkstoffe:

Beispiel für Produktionsschritte beim Gießen:

Herstellung der Gießform

- » Modellbau ggf. inkl. Kernmacherei
(Herstellen der Positiv-Formen)
- » Einformen in Formsand (oberer und unterer Formkasten) mit Einlegen und Fixieren der Kerne
- » Anbringen von Eingusstrichter und Eingussystem (Strömungswege für Eisen und Luft)
- » Zusammenfügen von Ober- und Unterkasten inkl. Sichern gegen Verschieben und Aufschwimmen



Schematischer Schnitt durch eine Gussform
Quelle: woodlandforum.com



Gussform mit Kernen
Quelle: burkhard-beyer.net



Eisengusswerkstoffe: Beispiel für Gießen:

Gießen

- » Füllen der Gusspfanne mit flüssigem Eisen aus Schmelzofen
- » langsames und kontinuierliches Eingießen in Gussform
- » Auskühlen der Gussform
- » Auspacken und „Putzen“ des Gussstücks



Füllen der Gießpfanne
Quelle: burkhard-beyer.net



Auskühlen der Gussform
Quelle: burkhard-beyer.net



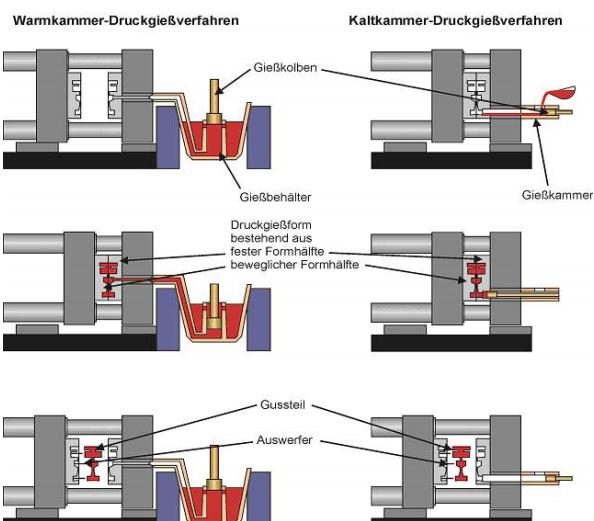
Eingießen
Quelle: burkhard-beyer.net

42

Eisengusswerkstoffe:

- Andere Gießverfahren (auch bei NE-Metallen):

Druckguss
Schleuderguss
Kokillenguss
etc.



Kokillenguss
Quelle: metallgiesserei.biz

43

Werkstofftechnische Zusammenhänge beim Schweißen:

Schweißen ist eine stoffschlüssige und unlösbare Verbindungstechnologie mittels lokalem Aufschmelzen von Eisenwerkstoffen mit oder ohne Zugabe eines Schweißzusatzwerkstoffs („Schweißdraht“; „Schweißelektrode“)

Das Erwärmen des Metalle kann dabei erfolgen durch:

- » Gasflamme ($C_2H_2-O_2$ -Flamme, → Autogen-Schweißen)
- » Lichtbogen zwischen abbrennender Elektrode und Werkstück (→ Elektroschweißen)
- » Lichtbogen zwischen nicht abbrennender Elektrode und Werkstück unter Schutzgas (→ Schutzgasschweißen)
- » etc.

Schutzgasschweißen (MIG)
Quelle: gap-gmbh.at



45

Werkstofftechnische Zusammenhänge beim Schweißen:

in Schmelzzone von Schweißnaht bildet sich neues Gefüge aufgrund von

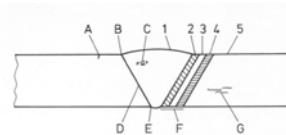
- » Schweißzusatzstoff
- » hoher Abkühlgeschwindigkeit

dadurch können mehrere neue Gefügezonen entstehen:

- » Martensit-Zone in Schweißnaht (hart, spröde)
- » Feinkornbildung im Randbereich der Schweißnaht
- » Anlasszone im Übergangsbereich zwischen Schweißnaht und Grundmaterial



Gefügebild von Schweißnaht
Quelle: uka-online.com



A Riefen
B Einbrandkerben
C Poren
D Flankenbindefehler
E Kontenversatz
F Risse
G Zelligkeiten, Einschlüsse

1 Schweißgut
2 WZ, Grobkorn
3 " , Feinkorn
4 wärmebeeinfl.
Grundwerkstoff
5 Grundwerkstoff

Gefügefehler in Schweißnaht
Quelle: dr-maiko.com

Folgen:

- » Schweißnaht wirkt wie Kerbe; dadurch mögliche Abnahme der zulässigen Belastung und der Zeitstandfestigkeit
- » um dies zu verhindern können Schweißnähte mechanisch und thermisch/metallurgisch nachbearbeitet werden

46

4. Eisenwerkstoffe



Aufbau und Struktur von Eisenwerkstoffen:

Eisenwerkstoffe sind alle **Eisen-Kohlenstoff-Legierungen**, d.h. Metalle mit Hauptkomponenten Fe und C bzw. Fe_3C
Eisenwerkstoffe unterteilen sich in

- » Eisengusslegierungen (Grauguss, etc.)
- » Eisennetwerkstoffe (Stahl)
- » Sinterreisen und Sinterstahl

Eisenwerkstoffe sind eine der wichtigsten und verbreitetesten Materialgruppen bei den technischen Werkstoffen, da:

- » hohe Festigkeit und Belastbarkeit
- » hohe Verfügbarkeit
- » gute Verarbeitbarkeit
- » relativ kostengünstig



Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Roheisen als Basis für Eisenwerkstoffe wird in der Regel aus mineralischen Eisenerzen gewonnen
(Ausnahme: Roheisen aus Recycling-Schrott)
wirtschaftlich bedeutende Eisenerze:

- » Magneteisenstein / Magnetit (Fe_3O_4)
- » Roteisenstein / Hämatit (Fe_2O_3)
- » Brauneisenstein / Limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O}$)
- » Spateisenstein / Siderit (FeCO_3)

nach dem Abbau werden Erze zerkleinert
„Brechen“) und von taubem Gestein gereinigt
danach erfolgt Eisenreduktion im Hochofen



Hämatit - Eisenerz (Eisenoxid), Foto und Copyright: T. Sehnacht

Roteisenstein
Quelle: haustechnikdialog.de



Spat Eisenstein
Quelle: unbekannter-bergbau.de

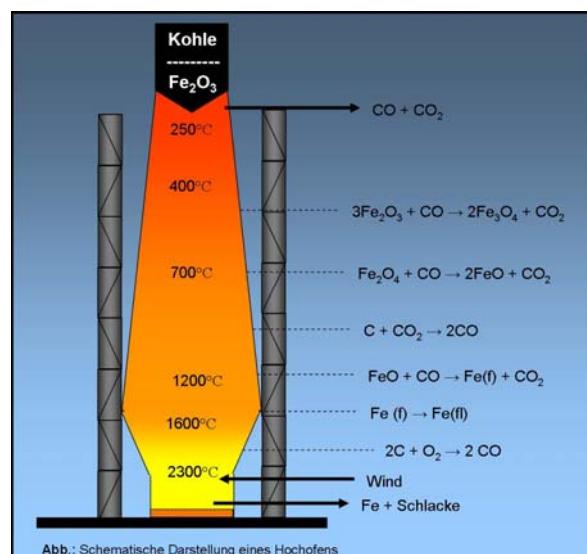


Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

im Hochofen wird Eisenerz mit Kohlenstoff (Koks) reduziert und erschmolzen

- » Reduktionstemperatur ab ca. 600°C
- » Schmelztemperatur ca. 1535°C (sinkt mit steigender Kohlenstoffaufnahme auf ca. 1150°C)
- » während Schmelzvorgang nimmt Eisen freigesetzte Stoffe aus Eisenerz auf (P, Si, Mn)

dabei werden Fremdstoff (Ca-Al-Silikate, S) als Schlacke gebunden



Quelle: chempage.de e

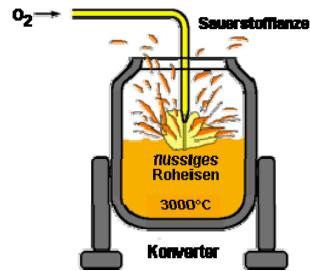


Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Roheisen wird weiterverarbeitet zu Stahl:

→ **Frischen**

- » beim Frischen wird reiner Sauerstoff in die Roheisenschmelze geblasen
- » dabei werden Eisenbegleitstoffe (P, Mn, Si) fast vollständig oxidiert und verschlackt;
- » der Kohlenstoffanteil wird von 3-5% auf maximal 2% durch Oxidation reduziert
- » die Entschwefelung erfolgt durch Beigabe von z.B. Soda (Na_2CO_3), aus dem sich dann Na_2S bildet



Schema Windfrischen
Quelle: seilnacht.com



Konverter
Quelle: chemie-am-auto.de

Herstellungsverfahren von Eisenwerkstoffen:

Weiterbearbeitung zu Halbzeugen (z.B.: Brammen, Barren, etc.)

Veredelung der Rohstähle der gezielte Legierungen (erneutes Aufschmelzen)

wichtige Ur- und Umformverfahren zur Weiterverarbeitung von Stahl:

- » Gießen (Herstellen beliebiger geometrische Formen; Gussformen aus Stahl (Kokille), Sand, Keramik)
- » Walzen (Herstellung von Flachmaterial (Blechen) und Stangenmaterial (Rohre, etc.)
- » Schmieden (hohe Festigkeit durch Verdichtung von Stahl und Nahtlose Formübergänge)



Brammen
Quelle: stahl-online.de



Gießerei
Quelle: huhag.de

Grundlagen der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

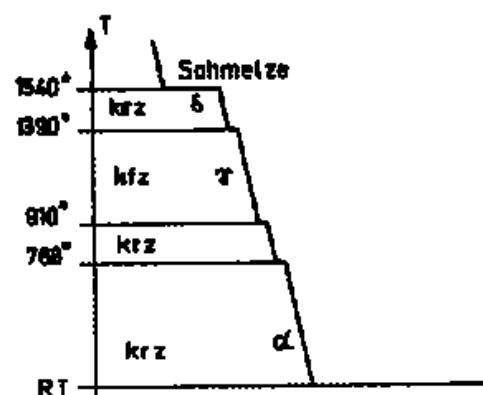
die Hauptkomponenten in Eisenwerkstoffen, Fe und C bilden ein Gefüge aus Mischkristallen
(Achtung: beschränkte Löslichkeit von C in Fe)

der Kohlenstoff in der Eisen-Matrix auf Zwischen-gitterplätzen gelöst (Einlagerungs-Mischkristall)

je nach Temperatur bilden sich dabei unterschiedliche Mischkristall-Typen aus

- $t < 911^\circ\text{C}$: krz $\rightarrow \alpha\text{-Mischkristall}$
- $911^\circ\text{C} < t < 1390^\circ\text{C}$: kfz $\rightarrow \gamma\text{-Mischkristall}$
- $1390^\circ\text{C} < t < 1540^\circ\text{C}$: krz $\rightarrow \delta\text{-Mischkristall}$
 $(=\alpha\text{-Mischkristall})$

Kohlenstoff kann auch gebunden als Fe_3C (Zementit) oder elementar (Graphit) als eigene Phase vorliegen



Quelle: schweissaufsicht.ansa.ch

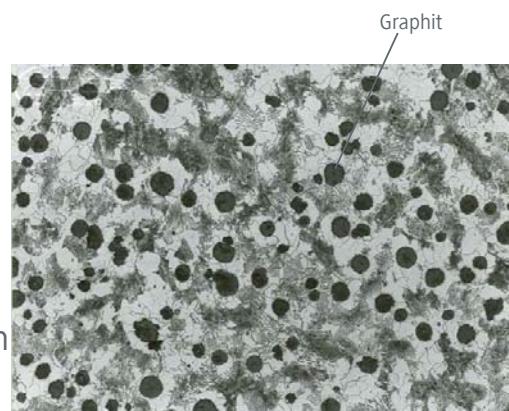
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Bezeichnungen der Mischkristall-Typen:

- » α -Mischkristall: krz; max. 0,02% C gelöst \rightarrow **Ferrit**
- » γ -Mischkristall: kfz; max. 2,06% C gelöst \rightarrow **Austenit**
- » δ -Mischkristall: krz; max. 0,1% C gelöst \rightarrow **δ -Ferrit**
- » Fe_3C : orthorhombisch \rightarrow **Zementit**
- » α -Mischkristall + Fe_3C \rightarrow **Perlit**
- » γ -Mischkristall + Fe_3C \rightarrow **Ledeburit**

Auftreten der einzelnen MK-Typen und Gefügearten abhängig von

- » Kohlenstoffkonzentration
- » Temperatur



Kugelgraphit-Guss (GGG); perlitis-ferritische Matrix mit Kugelgraphit-Phasen
Quelle: a3quattro.de

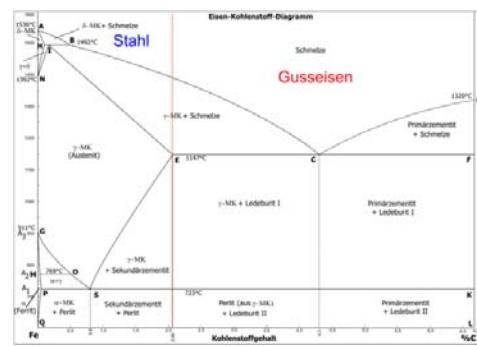
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen werden in einem speziellen Zustandsdiagramm dargestellt

→ Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Darstellung der unterschiedlichen Mischkristalltypen abhängig von

- » Kohlenstoffgehalt
- » Temperatur

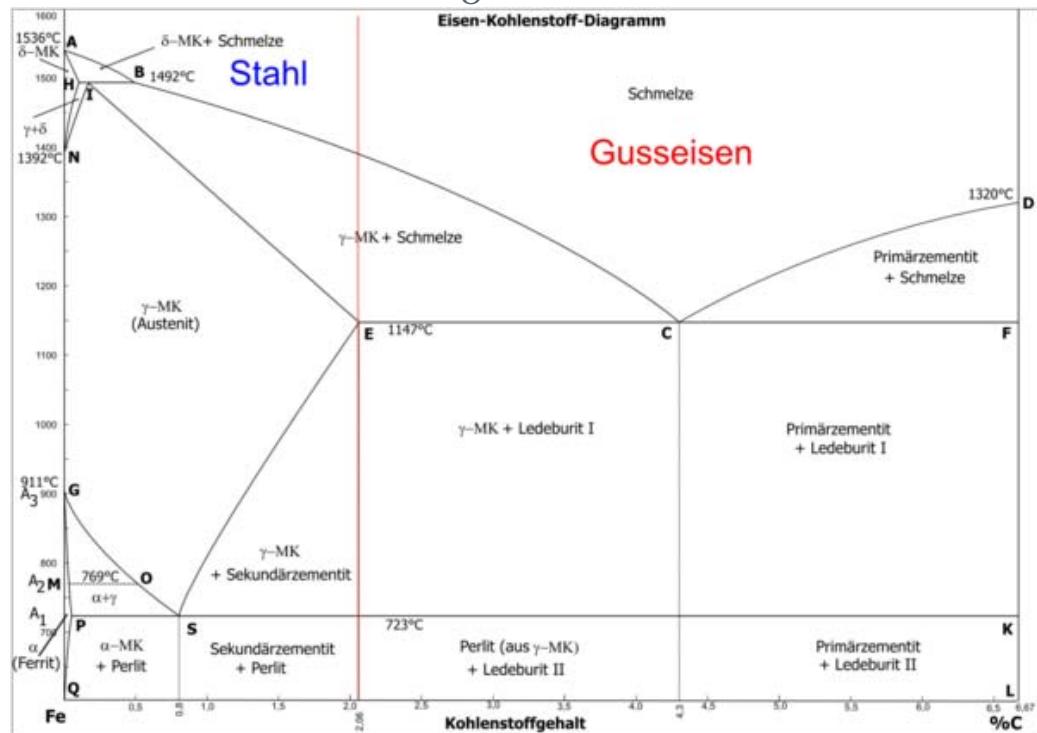


Quelle: mkdoc.de

Kohlenstoff liegt zunächst in Form von Fe_3C vor; durch Glühen wandelt sich Zementit um:



Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm:



Quelle: mkdoc.de



Eisen-Kohlenstoff-Legierungen:

Der Kohlenstoffgehalt ist ein maßgebender Faktor für die Eigenschaften von Eisenwerkstoffen;

mit zunehmendem Kohlenstoffanteil:

- » Zunahme von Härte und Festigkeit
- » Zunahme von Verschleißwiderstand
- » Abnahme von Verformbarkeit

die Einteilung von Eisenwerkstoffen erfolgt anhand des Kohlenstoffgehalts im Gefüge:

» C < 0,1%	Reineisen
» 0,1% < C < 0,5%	Baustähle
» 0,25% < C < 0,6%	Vergütungsstähle
» 0,5% < C < 2,06%	Werkzeugstähle
» 2,06% < C < 6,67%	Gusseisen <ul style="list-style-type: none">Fe-C-Gefüge: graues GusseisenFe-Fe₃C-Gefüge: weißes Gusseisen

weitere Legierungszugaben:

neben Kohlenstoff weisen Stähle zum Teil noch weitere Legierungsstoffe auf, die wesentlich auf die Materialeigenschaften einwirken:

- » Cr, Mo, V, Si, Al, Sn:
 - Ferrit-Stabilisierer; erweitern das α -MK-Gebiet; dadurch verbessern sich die Möglichkeiten, durch nachfolgenden Wärmebehandlung und Härteverfahren die Gefügezustände gezielt einzustellen
- » C, Mn, Ni, Cu, Co, Zn:
 - Austenit-Stabilisierer; erweitern das γ -MK-Gebiet; dadurch werden nicht-rostende Stähle erzeugt

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

unter der Wärmebehandlung versteht man Verfahren, bei denen das Gefüge eines Werkstoffes durch zeitlich definierte Aufheiz- und Abkühlvorgänge gezielt verändert bzw. beeinflusst wird

zum reinen Temperatureinfluss können zudem von mechanische und/oder chemische Einflüsse wirken (z.B. Schmieden, Nitrieren)

Ziel der Wärmebehandlung können sein (Achtung: Ziele zum Teil widersprüchlich):

- » Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- » Abbau von Eigenspannungen
- » Erhöhung von Festigkeit und Verschleißwiderstand
- » Homogenisierung von Legierungselementen und Gefügestrukturen

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Wärmebehandlungsverfahren können in drei Gruppen eingeteilt werden:

- » **Thermische Verfahren:** Aussetzen des Werkstücks einem dezidierten Temperatur- Zeit- Verlauf
 - Glühen
 - Härteln
 - Anlassen (Altern)
- » **Thermochemische Verfahren:** zusätzlich werden über chemische Reaktionen an der Werkstückoberflächen bestimmte Elemente entzogen oder angereichert
 - Metalldiffusion
 - Nichtmetall-Diffusion
- » **Thermomechanische Verfahren:** zusätzlich wird das Werkstück umgeformt
 - Schmieden
 - Walzen

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

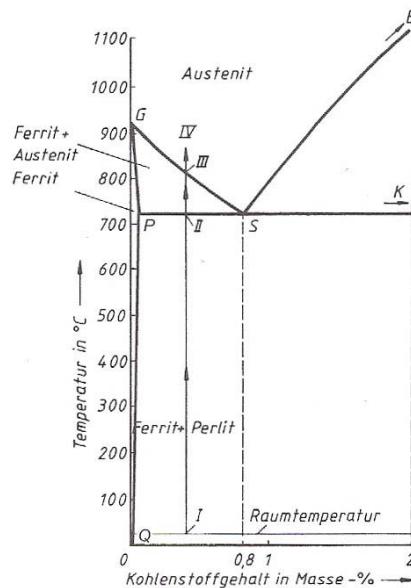
Erwärmung erfolgt bis in das Austenit-Gebiet (γ -Mischkristall; kfz)

Austenit kann mehr Kohlenstoff lösen (in Gitter aufnehmen) als Perlit und Ferrit; dadurch Homogenisierung der Kohlenstoffverteilung (und anderer Legierungsbestandteile) im Gefüge

 **Austenitisierung**

Grad der Austenitisierung ist abhängig vom

- » Temperatur-Zeit-Verlauf
- » Art und Struktur von Ausgangsgefüge
- » Zusammensetzung von Werkstoff



Quelle: Seidel, Hahn; Werkstofftechnik, Hanser Verlag



Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

Bei Wieder-Abkühlen aus dem Austenit-Gebiet erfolgt die Rückumwandlung des Gefüges unterhalb 723°C in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit:

- » bei geringer Abkühlrate (< 3K/min): Umwandlung von Austenit (γ -MK) in Ferrit (α -MK) und Zementit (Fe_3C) → **Perlit**
- » mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird aufgrund der unterdrückten Diffusion die Perlitstruktur eine zunehmend feinere Lamellenstruktur
- » Kohlenstoff ist zudem in einer Zwangslösung im Mischkristall; dadurch wird die Gitterstruktur verzerrt
- » das dabei entstehende metastabile Gefüge heißt

 **Martensit**



Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Vorgänge beim Erwärmen und Abkühlen

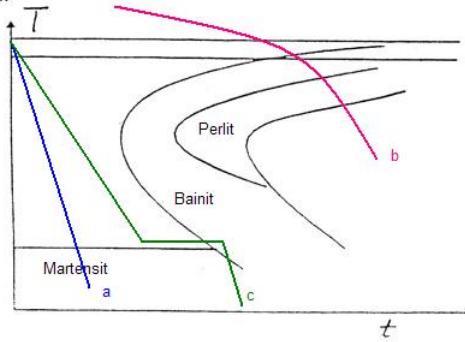
Martensit ist ein hartes und festes Gefüge mit nur geringer Duktilität

martensitisches Gefüge zeichnet gehärtete Oberflächen aus

die Abkühlgeschwindigkeit ist entscheidend für den Anteil an Martensit im Gesamtgefüge

Zeichnen Sie in das untenstehende kontinuierliche ZTU-Diagramm folgende drei Abkühlkurven ein und kennzeichnen Sie diese

- es entsteht nur martensitisches Gefüge
- es entsteht nur normalisiertes Gefüge
- es entsteht ein Gefüge, bei dem ein minimaler Martensiteanteil (>0%) enthalten ist



Zusammenhang zwischen Gefügeart und Abkühlgeschwindigkeit
Quelle: metallographie-ausbildung.de

19

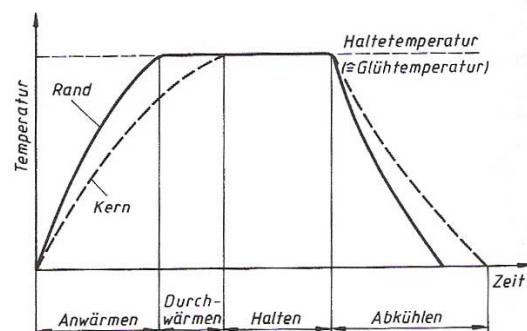
Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Glühen: Erwärmen und Halten auf Glühtemperatur und anschließend langsames Abkühlen

Ziel: Homogenisierung des ferritisch-perlitischen Gefüges; Abbau von Spannungen und Versetzungen

Anwendung: Verbesserung der Zerspanbarkeit und Umformbarkeit



Quelle: Seidel, Hahn; Werkstofftechnik, Hanser Verlag

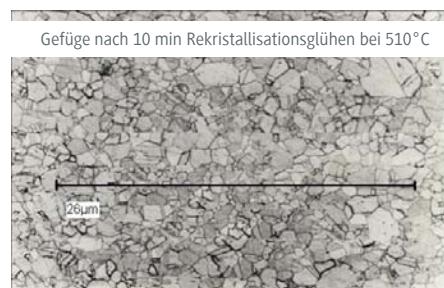
20

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Glühverfahren:

- » Diffusionsglühen (ca. 1100-1200°C;
→ Homogenisierung)
- » Grobkornglühen (ca. 1000-1100°C;
→ verbesserte Zerspanbarkeit)
- » Normalglühen (ca. 800°C;
→ gleichmäßiges Feinkorngefüge)
- » Spannungsarmglühen (ca. 550-650°C)
- » Rekristallisationglühen (ca. 500-700°C)



Quelle: otto-junker.de

21

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermische Wärmebehandlungsverfahren:

Härten : Erwärmen und Halten auf Glühtemperatur
und anschließend schnelles Abkühlen

Ziel: möglichst hohe Martensitbildung

Anwendung: Erhöhung von Verschleißwiderstand,
Festigkeit und Dauerschwingfestigkeit
(Spezialfall: → **Randschichthärtung**)

Anlassen / Vergüten: nach Härten erwärmen auf 400°C – 700°C und
langsam abkühlen zur zusätzlichen Erhöhung der Zähigkeit zur
gezielten Abbau von Martensit

22

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

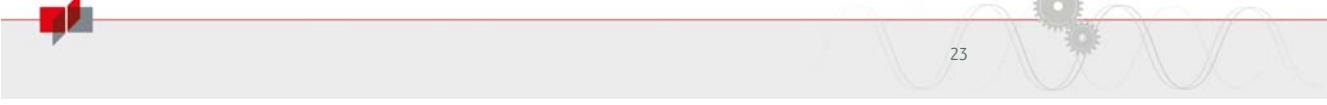
Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Grundlegende

Idee: Veränderung der chemischen Zusammensetzung
in der Randzone des Werkstücks durch Ein- bzw.
Ausdiffundieren bestimmter Elemente

Ziele:

Verschleißfestigkeit erhöhen
Randzonenhärte erhöhen unter Beibehalt von Kernzähigkeit
Schwingfestigkeit verbessern
Korrosionsbeständigkeit erhöhen



23

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiele thermochemische Verfahren:

» Nichtmetalldiffusion:

- Kohlenstoff (→ Aufkohlen, Zementieren)
- Stickstoff (→ Nitrieren)
- Kohlenstoff und Stickstoff (→ Carbonitrieren, Nitrocarburieren)
- Kohlenstoffentzug (→ Entkohlung)

» Metalldiffusion

- Aluminium (→ Alitieren)
- Chrom (→ Chromatieren)
- Zink (→ Sherardieren)
- Chrom und Aluminium (→ Chromalitieren)

» Metall-Nichtmetall-Diffusion

- Titan und Kohlenstoff (→ Titancarbidbehandlung)



24

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiel: **Einsatzhärten**

Einsatzhärten ist ein Oberflächenhärteverfahren, bestehend aus

» Aufkohlen

- Pulveraufkohlen (Holzkohle, Koks) bei 880-950°C
- Salzbadaufkohlung (Cyanidsalzen (NaCN)) bei 880-930°C
- Gasaufkohlung (CO und CH₄) bei bis zu 1050°C

» Härten

» Anlassen



Einsatzhärten von Zahnrädern
Quelle: haerterei-tandler.de

25

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

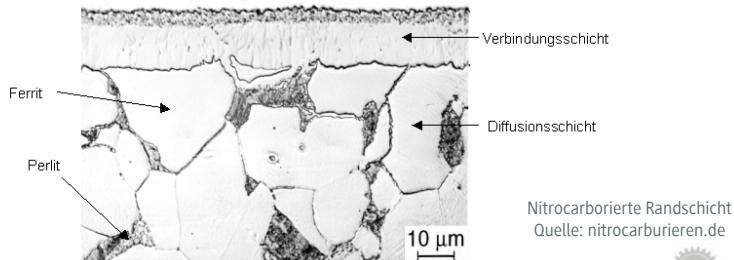
Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren:

Beispiel: **Nitrieren**

Nitrieren ist ein verzugsarmes Verfahren zur Erzeugung sehr hoher Oberflächenhärten; dabei wird das Werkstück in Stickstoff gegläutet:

- Gasnitrieren in NH₃-Strom bei 500°C
- Badnitrieren in Cyanbad bei 570°C
- Nitrocarborisierung bei 500-590°C

» Nitrierzeiten bis zu 100 h



26

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen:

Thermomechanische Wärmebehandlungsverfahren:

Grundlegende Idee: gleichzeitiger Umformprozess mit Wärmebehandlung zur Beeinflussung von Form und Eigenschaft des Werkstücks

Verfahren: **Schmieden**
Walzen
Biegen

Vorteil: monolithische Bauteile mit hoher Verdichtung und Festigkeit



Gesenkschmiede
Quelle: georg-umformtechnik.de

27

Klassifikation von Eisenwerkstoffen:

Eisenwerkstoffe unterteilen sich in:

- » Eisenwerkstoffe (Stahl)
 - Baustähle
 - Werkzeugstähle
 - Schweißstähle
 - Behälterbaustähle
 - Maschinenbaustähle
 - chemisch beständige Stähle
 - Spezialstähle
- » Eisengusslegierungen (Guss)
 - Stahlguss ($C < 2,06\%$)
 - Grauguss ($C > 2,06\%$; Fe-C-System)
 - Weisguss ($C > 2,06\%$; Fe- Fe_3C -System)
- » Sinterreisen und Sinterstahl (Sintermetall)
(aus Metallpulver gepresste und gesinterte Bauteile mit hohem Porenanteil;
dadurch leicht und gute Notlaufeigenschaften)

29

Klassifikation von Eisenwerkstoffen:

Stähle können gemäß **DIN EN 10027** Teil 1 und 2 in zweierlei Hinsicht bezeichnet werden:

- a) Kurzname, der einen Hinweis auf die Verwendung und die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs gibt

Beispiele: E360: Maschinenbaustahl mit $R_{p,0,2} = 360 \text{ MPa}$
B500A: Betonstahl mit $R_{p,0,2} = 500 \text{ MPa}$, weichgeglüht
L360Q: Stahl für Rohrleistungen mit $R_{p,0,2} = 360 \text{ MPa}$, vergütet

- b) Kurzname, der Hinweise auf die chemische Zusammensetzung (Legierungselemente) und Wärmebehandlungszustand des Werkstoffs gibt

Beispiele: C45E+N: unlegierter Stahl mit 0,45% C, vorgeschriebener maximaler Schwefelgehalt, normalgeglüht
X5CrNi18-10+U: hochlegierter Stahl mit 0,05% C, 18% Cr und 10%Ni, unbehandelt

- c) Werkstoffnummern, bestehend aus einem 5 bis 7-stelligen Code (s. DIN EN 10027 Teil 2)

Beispiele: 1.4301 legierter Edelstahl (= X5CrNi18-10)
1.0577 unlegierter Qualitätsstahl

Stähle und Stahllegierungen:

Stähle sind Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit weiteren Begleit- und Legierungselementen

der Kohlenstoffgehalt in Stahl: $\leq 2,06\%$

unterhalb der Grenzwertkonzentrationen von Legierungselementen gilt der Werkstoff als unlegierter Stahl

Wirkung von Legierungselementen (LE):

- » Veränderung der Löslichkeit von C, damit Änderung der Phasenverteilung α -MK zu γ -MK
- » Erhöhung der Festigkeit zur Gitterverzerrung (Einlagerungs- oder Substitutionsatome)
- » manche LE wirken als Carbid-Bildner; damit Erhöhung der Festigkeit durch Carbide in Intermetallischer Phase (Ti, Zr, V, Hf, Nb, Ta, Cr, Mo, W)
- » manche LE wirken als Nitrid-Bildner; damit Erhöhung der Festigkeit durch Feinkornbildung (Al, B, Cr, Nb, V, Ti, Zr)

Tabelle 4.1: Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzenanalyse)

LE...	%	LE...	%	LE...	%
Al	0,30	Cr	0,30	Co	0,30
Cu	0,40	Mn	1,65	Mo	0,08
Ni	0,30	Nb	0,06	Pb	0,40
Se	0,10	Si	0,60	Te	0,10
Ti	0,05	V	0,10	Bor	0,0008
W	0,30	Zr	0,05	Sonst.	0,10

Grenzwertkonzentrationen von Legierungselementen (LE)
Quelle: christiani.de

Stähle und Stahllegierungen:

Beispiele typischer Stahlsorten:

unlegierte und legierte Baustähle

- » Kohlenstoffarme Stähle ($C < 0,6\%$), nicht bzw. niedrig legiert, gut zerspan- und schweißbar, gut umform- und gießbar, kostengünstig
- » typischer Eisenwerkstoff im Maschinenbau und Stahlbau
- » Beispiele: S235JO; S355JO, E360

Vergütungsstähle, Nitrierstähle, Einsatzstähle

- » Kohlenstoffgehalt $0,3 - 0,6\%$, wärmebehandelt (vergütet, nitriert, gehärtet) für erhöhte Festigkeit und Zähigkeit
- » Eisenwerkstoff für hochbelastete Bauteile wie Messer, Sägeblätter, Kettenlaschen, Kurbelwellen, Schrauben
- » Beispiele: C45E, 37Cr4, 42CrMo4

Werkzeugstähle

- » unlegiert bzw. legiert (bis zu 30% Legierungsanteil), hohe Festigkeit und hoher Verschleißwiderstand, z.T. hochwärmefest
- » Eisenwerkstoff für Schneidwerkzeuge, (Fräser, Bohrer), Schneidplatten (HSS), Extrudierwerkzeuge, Werkzeugbau, etc.
- » Beispiele: X45NiCrMo16, 40CrMnMo7



33

Stähle und Stahllegierungen:

Beispiele typischer Stahlsorten:

Automatenstähle:

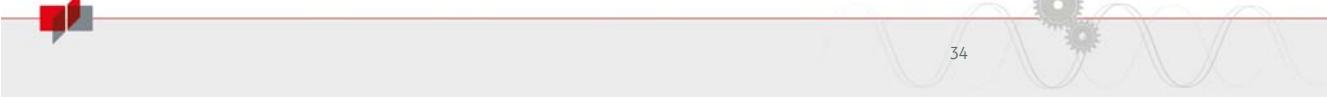
- » geringer Kohlenstoffgehalt $0,05 - 0,12\%$, sehr gut zerspanbar (drehen, bohren); Legierungsbeigaben von S, Pb, P oder Mn bewirken Brechen von Span → damit hohe Schnittgeschwindigkeiten möglich
- » besonders geeignet für Dreh- und Fräsbauten
- » Beispiele: 11SMnPb30, 36SMnPb14

Federstähle:

- » hohe Elastizität und Festigkeit durch Legierungszusätze von Cr, Mo, V, Si, Mn, Ni; hohe Zeitstand- und Dauerfestigkeit
- » geeignet für Federn, Federringe, Blattfedern, Spannstifte
- » Beispiele: 38Si7, 51CrV4, 52CrMoV4

rost- und säurebeständige Stähle:

- » hochlegierte Stähle (mit C, Cr, Ni, Mo, Si, Mn,), Hauptlegierungselemente Chrom und Nickel (z.T. > 20%), hohe chemische Beständigkeit
- » Anwendung in Apparatebau, Rohrleitungsbau, Offshore-Bereich, u.v.m.
- » Beispiele: X1NiCrMoCuN 25-20-7, X10CrNi 18-8



34

Stähle und Stahllegierungen:

typische Verarbeitungsverfahren von Stahlwerkstoffen:

spanende Bearbeitungsverfahren:

- » Bohren, Drehen
- » Fräsen, Hobeln, Stoßen
- » Schleifen, Honen

Ur- und Umformverfahren

- » Gießen
- » Schmieden
- » Biegen, Drücken, Ziehen

Verbindungsverfahren

- » nicht lösbare Verbindungen
 - Schweißen
 - Löten
 - Kleben
- » lösbar Verbindungen
 - Schrauben
 - Nieten
 - ...



Fräsen
Quelle: herzog-gmbh.at



Drehen
Quelle: bohinec.si

35

Eisengusswerkstoffe:

Eisengusswerkstoffe sind Eisen-Kohlenstoff-Silizium-Legierungen

bei Gusseisen liegt der Kohlenstoffgehalt > 2,06%

bei Stahlguss liegt der Kohlenstoffgehalt ≤ 2,06%

Silizium ist dabei entscheidend für die Gefügeausbildung:

- » ohne Silizium bildet sich bei normalen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem gelösten Kohlenstoff → **Zementit Fe₃C** (→ **Weissguss**)
- » mit Silizium bildet sich bei normalen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem gelösten Kohlenstoff → **freier Graphit C** (→ **Grauguss**)

ohne Silizium bildet sich freies Graphit nur bei sehr geringen Abkühlgeschwindigkeiten

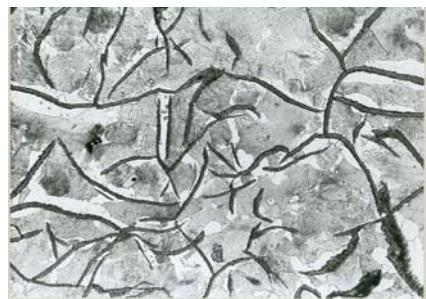


37

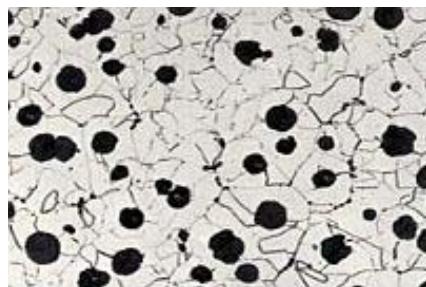
Eisengusswerkstoffe:

Graphit (freier Kohlenstoff) kann im Grauguss in unterschiedlichen Formen im Gefüge vorliegen:

- » **Lamellengraphit (GJL):** spröder Werkstoff mit hoher Schmierwirkung und hoher Schwingungsdämpfung; geringe Zugfestigkeit, hohe Druckfestigkeit
sehr gut gießbar, gut zerspanbar; schlecht schweißbar; hohe Korrosionsbeständigkeit
- » **Kugelgraphit (GJS):** zäher und stabiler Werkstoff mit hoher Schmierwirkung und mittlerer Schwingungsdämpfung (aber besser als Stahl; hohe Zugfestigkeit)
gut gießbar; gut zerspanbar; schlecht schweißbar; hohe Korrosionsbeständigkeit



Lamellengraphit
Quelle: a3quattro.de



Kugelgraphit
Quelle: schonlau-werke.de

38

Eisengusswerkstoffe:

Vergleich der Festigkeit zwischen Lamellengraphit und Kugelgraphit:

	Gusseisen mit Lamellengraphit		Gusseisen mit Kugelgraphit	
	GJL-150	GJL-350	GJS-400-18	GJS-1200-2
Zugfestigkeit R_m	150 – 250 MPa	350 - 450 MPa	400 MPa	1200 MPa
Elastizitätsmodul E	78 – 103 GPa	123-124 GPa	169 GPa	167 GPa

Einflussgrößen auf die Ausbildungsform des Graphits:

- » Si-Gehalt (1 – 3%)
- » bei Zusatz von u.a. Mg (ca. 0,05%) bildet sich Kugelgraphit
- » Abkühlgeschwindigkeit und damit bedingt auch Bauteildicke und Gussform / Formkasten

39

Eisengusswerkstoffe:

typische Anwendungen

Gusseisen mit Lamellengraphit:

- » Bremsscheiben
- » Gehäuse für Getriebe, Pumpen, etc.
- » Kurbelgehäuse für Großdieselmotoren
- » Maschinengestelle
- » etc.



Gehäuse aus Gusseisen
Quelle: aci-industriearmaturen.de

Gusseisen mit Kugelgraphit:

- » Niederdruckzylinder
- » Turboladergehäuse
- » Kurbelwellen
- » Zahl- und Stirnräderräder
- » Pumpenlaufräder
- » Zähne für Baggerschaufeln
- » Turbinenschaufeln
- » etc.



Kurbelwelle aus Gusseisen
Quelle: peugeot-freunde-hannover.de

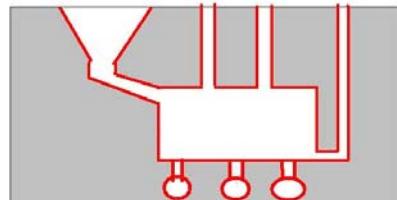


Eisengusswerkstoffe:

Beispiel für Produktionsschritte beim Gießen:

Herstellung der Gießform

- » Modellbau ggf. inkl. Kernmacherei
(Herstellen der Positiv-Formen)
- » Einformen in Formsand (oberer und unterer Formkasten) mit Einlegen und Fixieren der Kerne
- » Anbringen von Eingusstrichter und Eingussystem (Strömungswege für Eisen und Luft)
- » Zusammenfügen von Ober- und Unterkasten inkl. Sichern gegen Verschieben und Aufschwimmen



Schematischer Schnitt durch eine Gussform
Quelle: woodlandforum.com



Gussform mit Kernen
Quelle: burkhard-beyer.net



Eisengusswerkstoffe: Beispiel für Gießen:

Gießen

- » Füllen der Gusspfanne mit flüssigem Eisen aus Schmelzofen
- » langsames und kontinuierliches Eingießen in Gussform
- » Auskühlen der Gussform
- » Auspacken und „Putzen“ des Gussstücks



Füllen der Gießpfanne
Quelle: burkhard-beyer.net



Auskühlen der Gussform
Quelle: burkhard-beyer.net



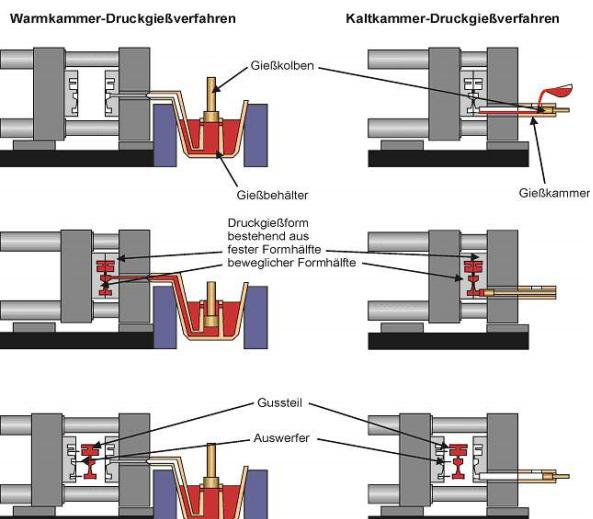
Eingießen
Quelle: burkhard-beyer.net

42

Eisengusswerkstoffe:

- Andere Gießverfahren (auch bei NE-Metallen):

Druckguss
Schleuderguss
Kokillenguss
etc.



Druckguss
Quelle: cct-bw.de

Kokillenguss
Quelle: metallgiesserei.biz

43

Werkstofftechnische Zusammenhänge beim Schweißen:

Schweißen ist eine stoffschlüssige und unlösbare Verbindungstechnologie mittels lokalem Aufschmelzen von Eisenwerkstoffen mit oder ohne Zugabe eines Schweißzusatzwerkstoffs („Schweißdraht“; „Schweißelektrode“)

Das Erwärmen des Metalle kann dabei erfolgen durch:

- » Gasflamme ($C_2H_2-O_2$ -Flamme, → Autogen-Schweißen)
- » Lichtbogen zwischen abbrennender Elektrode und Werkstück (→ Elektroschweißen)
- » Lichtbogen zwischen nicht abbrennender Elektrode und Werkstück unter Schutzgas (→ Schutzgasschweißen)
- » etc.

Schutzgasschweißen (MIG)
Quelle: gap-gmbh.at



45

Werkstofftechnische Zusammenhänge beim Schweißen:

in Schmelzzone von Schweißnaht bildet sich neues Gefüge aufgrund von

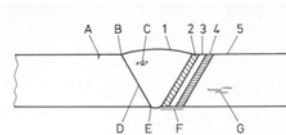
- » Schweißzusatzstoff
- » hoher Abkühlgeschwindigkeit

dadurch können mehrere neue Gefügezonen entstehen:

- » Martensit-Zone in Schweißnaht (hart, spröde)
- » Feinkornbildung im Randbereich der Schweißnaht
- » Anlasszone im Übergangsbereich zwischen Schweißnaht und Grundmaterial



Gefügebild von Schweißnaht
Quelle: uka-online.com



A Riefen
B Einbrandkerben
C Poren
D Flankenbindefehler
E Kontenversatz
F Risse
G Zelligkeiten, Einschlüsse

1 Schweißgut
2 WZ, Grobkorn
3 " , Feinkorn
4 wärmebeeinfl.
Grundwerkstoff
5 Grundwerkstoff

Gefügefehler in Schweißnaht
Quelle: dr-maiko.com

Folgen:

- » Schweißnaht wirkt wie Kerbe; dadurch mögliche Abnahme der zulässigen Belastung und der Zeitstandfestigkeit
- » um dies zu verhindern können Schweißnähte mechanisch und thermisch/metallurgisch nachbearbeitet werden

46

5. Nichteisenmetalle



Arten von NE-Metallen

NE-Metalle sind alle metallischen Materialien, die kein Eisen (Fe) enthalten

NE-Metalle gehören zu den ältesten „technischen“ Werkstoffen seit dem Neolithikum werden NE-Metalle für Gebrauchs- und Kunstgegenstände verwendet:

- » Kupfer
- » Blei
- » Gold
- » Silber

NE-Metalle stellen heute eine wichtige Materialgruppe dar bzgl.:

- » Leichtbau (Luftfahrt, Fahrzeugbau, ...)
- » höchster Korrosionsschutz (Apparatebau, Raumfahrt, Energietechnik, ...)
- » Mikroelektronik und Leistungselektronik
- » Informationstechnik (Dotierung von Si-Chips)



Stiergespann aus Kupfer
(Ende 4. Jahrtausend v Chr.)
Quelle: damals.de



Bronzezeitliche Waffen
(2200 – 800 v Chr.)
Quelle: ludenhausen.de



Arten von NE-Metallen

NE-Metalle weisen keinen gemeinsame Strukturen und Eigenschaften auf, sondern stellen eine hochgradig heterogene Materialgruppe dar:

- » Dichte: 2,7 g/cm³ (Al) bis 19,3 g/cm³ (Au)
- » Zugfestigkeit: 40 MPa (Al) – 1300 MPa (Ni)
- » Mohs-Härte: 1,5 (Pb) – 7,5 (W)
- » Preis: ...ct/kg – ...T€/kg
- » etc.

NE-Metalle lassen sich einteilen nach

- » Dichte
 - Leichtmetalle: < 4,5 g/cm³; Mg, Al, Ti, ...
 - Schwermetalle: > 4,5 g/cm³; Sn, Pb, Zn, Cu, Ni, Mo, Cr, ...
- » Schmelzpunkt
 - Niedrigschmelzend: Mg, Al, Sn, Pb, Zn, ...
 - Hochschmelzend: Ti, Cu, Ni, Co, Cr, Mn, ...
 - Höchstschmelzend: W, Mo, Ta, Nb
- » Vorkommen:
 - Seltene Metalle: Cd, Ga, Zr, Ce, ...



4

Arten von NE-Metallen

technische sehr wichtige NE-Metalle für Bauteile und

Baugruppen:

- » Aluminium
- » Kupfer
- » Titan
- » Magnesium
- » Nickel

im weiteren Verlauf werden näher betrachtet:

- » Aluminium und Aluminiumlegierungen
- » Kupfer und Kupferlegierungen
- » Titan- und Titanlegierungen



Verdichterscheibe aus Titan
Quelle: sandvik.coromant.com



Quelle: iws.fraunhofer.de



5

Herstellung von Aluminium:

Aluminium ist neben O₂ und Si das dritthäufigste Element in der Erdkruste

Aluminium kommt in der Natur nur in chemisch gebundener Form von Oxiden und Mischoxiden vor

» Beispiel für Rohstoff: Bauxit

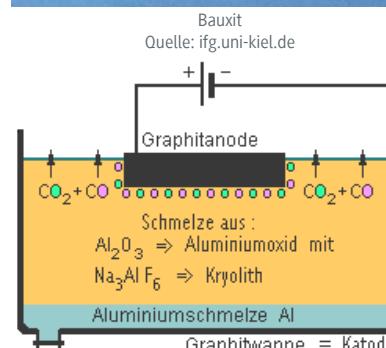
(ca. 60% Al₂O₃; ca. 8% SiO₂, bis 28% Fe₂O₃, Hydratwasser)



Aluminium wird elektrolytisch aus einer Schmelze aus Aluminiumoxid und Kryolith (zur Herabsetzung des Schmelzpunkts von Al₂O₃ von 2045°C auf ca. 960°C) erzeugt



**hoher Stromeinsatz notwendig
(13-16 MWh/to reines
Primäraluminium)**



7

Eigenschaften von Reinaluminium:

Leichtmetall mit $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ (ca. 1/3 von Cu und Fe)

Raumgitter kfv

Zugfestigkeit $R_m = 40 - 80 \text{ MPa}$

Elastizitätsmodul 72.000 N/mm²

Schmelztemperatur 660°C

hohe Korrosionsbeständigkeit

lebensmittelecht

hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit (nur Cu und Ag besser)

sehr gut legierbar

sehr gut umformbar

hohe Verfestigung bei Umformung

schweißbar nur unter Schutzgas

zerspanbarkeit schwierig (zu weich und schmierender Span)



Folie aus Reinaluminium
Quelle: purenature.de

8

Aluminiumlegierungen:

Verbesserung der Eigenschaften durch Zugabe von Legierungselementen; dadurch möglich:

- » Erhöhung der Zugfestigkeit
- » Verbesserung der Zerspanbarkeit
- » Ermöglichung der Härtbarkeit
- » Veränderung von elektrischer Leitfähigkeit, Umformbarkeit, chemischer Beständigkeit, etc.

Beispiele für Legierungselemente:

- » Zugabe von Mg und Cu führt zu Mischkristallbildung; dadurch Erhöhung der Festigkeit und Zerspanbarkeit;

Beispiel: AlMg 3

- » Zugabe von Na und Si erhöht die Feinkornbildung , und damit die Festigkeit bei Alu-Guss
- » etc.

9

Aluminiumlegierungen und deren Eigenschaften:

Al-Knetlegierungen			Al-Guss-Legierungen		
Werkstoff	Zugfestigkeit (weich)	Zugfestigkeit (verfestigt)	Werkstoff	Zugfestigkeit (weich)	Zugfestigkeit (verfestigt)
AlMn 1	100 N/mm ²	160 N/mm ²	AC-AlSi12	170 N/mm ²	---
AlMg3	180 N/mm ²	260 N/mm ²	AC-AlSi10Mg	180 N/mm ²	260 N/mm ²
AlCu4Mg1	180 N/mm ²	440 N/mm ²	AC-AlSi5Cu1Mg	230 N/mm ²	280 N/mm ²
AlZn5,5MgCu	---	520 N/mm ²	AC-AlCu4Ti	---	330N/mm ²

Verarbeitung von Aluminiumlegierungen:

- » Zerspanung: Drehen, Bohren, Fräsen, etc.
- » Umformen (Biegen, Tiefziehen, ...)
- » Schweißen (nur unter Schutzgas: WIG, MIG)
- » Gießen (Alu-Schmelz-Guss)



Aluminiumgießen
Quelle: alu-menzen.com

10

Herstellung von Kupfer:

Kupfer kommt in der Natur zum geringen Teil gediegen, zumeist aber in chemisch gebundener Form in Kupfererzen vor;

» Beispiel für Kupfererze:

- Kupferkies CuFeS_2
- Kupferglanz Cu_2S
- Rotkupfererz Cu_2O
- Malachit $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$



Kupfererz (Kupferkies CuFeS_2)
Quelle: www2.ufg.uni-freiburg.de

sulfidische Kupfererze werden vor dem Schmelzen geröstet (damit Oxidieren von Fe und Austreiben von SO_2)



Röstprodukte und oxidische Kupfererze werden zunächst in Ofen mit Sand, Quarz und Kalk aufgeschmolzen → Kupferstein mit 40% Cu danach durch Einblasen von Sauerstoff zu Rohkupfer (ca. 98% Cu) reduziert

Reinkupfer (> 99,9% Cu) wird elektrolytisch von Fremdstoffen gereinigt



Reinkupfer
Quelle: lieberwaich.de



12

Eigenschaften von Reinkupfer:

Schwermetall mit Raumgitter	$\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$
Zugfestigkeit (je nach Behandlung)	kfz
Elastizitätsmodul	$R_m = 200 - 400 \text{ Mpa}$
Schmelztemperatur	125.000 N/mm ²
	1083°C

sehr hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
(ist stark von Reinheitsgrad abhängig)

sehr gut legierbar

sehr gut umformbar

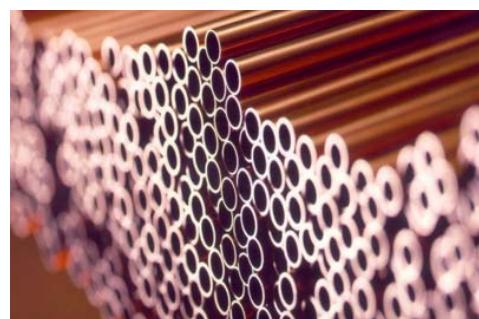
hohe Verfestigung bei Umformung
geringe Korrosionsbeständigkeit

bildet Patina: $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$
bzw. Grünspan: $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

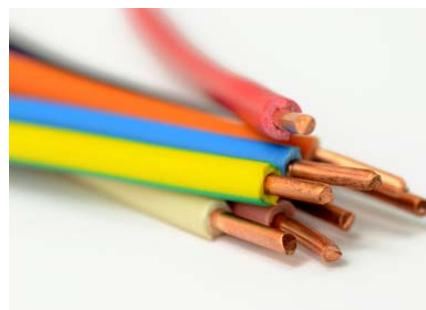
gut schweiß- und lötbar

gute Zerspanbarkeit

schlecht gießbar



Kupferrohre
Quelle: baulinks.de



Quelle: metallankauf24.de



13

Anwendungen von Reinkupfer:

stromführende Teile (Kabel, Stromschienen, Platinen, etc.)
Tiefziehteile (Kessel, Pfannen, Schalen, etc.)
Dichtungen (Dichtringe, Dichtscheiben, etc.)
Apparatebau (Rohre, Kühlschlangen, Heizungsrohre, Kältemittelleitungen, Kessel, Wärmetauscher, etc.)
Bautechnik (Regenrinnen, Dachbeplankung, etc.)
Kunstgewerbe (Schmuck, etc.)



Beispieldfoto

Kupferdichtringe
Quelle: grafe-shop.de



Kupferrohr-Wärmetauscher
Quelle: xn--wrmetauscher-online-gwb.de

14

Kupferlegierungen:

Verbesserung der Eigenschaften durch Zugabe von Legierungselementen
durch Mischkristallbildung

unerwünschte Bei-Elemente:

- » Wasserstoff H: führt bei Reinkupfer zu Versprödung (bei Sauerstoff-freiem Reinkupfer kein Problem)
- » Bi, Pb, Se, Te, Sb führen zu Versprödung bei Temperaturen zwischen 300°C und 600°C (→ Rotbrüchigkeit)

häufige Legierungselemente: Ni, Sn, Zn, Al, Mn, Be, Ag, Au

Legierungen bewirken:

- » Verbesserung der Umformbarkeit
- » Erhöhung von Korrosionsbeständigkeit
- » Herstellung von Gießbarkeit

15

Typische Kupferlegierungen:

Kupfer-Zink-Legierung (Messing)

- » bis zu 45% Zink-Anteil
- » hohe Festigkeit
- » sehr gute Zerspan- und Gießbarkeit
- » hoher Korrosionsbeständigkeit
- » Anwendungen:
 - nichtmagnetische, korrosionsbeständige Bauteile in der Optik, Elektrotechnik, Maschinenbau
 - Beschläge und Armaturen
 - etc.



Schlauchfülle aus Messing
Quelle: wokasu.de

Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze)

- » bis zu 30% Zinn-Anteil
- » hohe Festigkeit und gute Umformbarkeit
- » sehr hohe Korrosionsbeständigkeit
- » sehr gute Gießbarkeit
- » Anwendungen
 - hochbeanspruchte Gleitlager und Schneckenräder
 - Gehäuse und Armaturen
 - etc.



Bronzefitting
Quelle: asia.ru

Typische Kupferlegierungen:

weitere Bronzelegierungen

(dabei Cu-Anteil immer > 60%):

- » Aluminiumbronze CuAl
- » Silberbronze CuAg
- » Berylliumbronze CuBe
- » Manganbronze CuMn
- » etc.



Wärmetauscher aus Manganbronze
Quelle: sms-vt

Beispiele für Kupferlegierungen und deren mechanische Eigenschaften:

Werkstoff	Zugfestigkeit (weich)	Zugfestigkeit (verfestigt)	Werkstoff	Zugfestigkeit (weich)	Zugfestigkeit (verfestigt)
Elektrolytkupfer E-Cu 58	200 N/mm ²	300 N/mm ²	Messing CuZn37	320 N/mm ²	610 N/mm ²
O ₂ -freies Kupfer SW-CuF 25	240 N/mm ²	440 N/mm ²	Bronze CuSn12	260 N/mm ²	ca. 600 N/mm ²

Herstellung von Titan:

Titan ist ein sehr häufiges Metall in der Erdkruste (bis zu ca. 0,5%)

Titan liegt chemisch gebunden in Erzen vor:

- » Rutil (TiO_2)
- » Anatas (TiO_2)
- » Ilmenit (FeTiO_3)

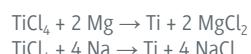
Herstellung von Titan:

» mechanische Zerkleinerung von Erzen (Mahlen); Aufschwemmen mit Wasser und Abtrennen von TiO_2 bzw. TiO_3

» Reduzieren mit C und Cl bei $800^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$



» Entchloren mit Na (ca. 850°C) oder Mg (ca. 1000°C) unter Schutzgas



Rutil (TiO_2)

Quelle: mineralogische.staatssammlung.userweb.mwn



Ilmenit (FeTiO_3) auf Quarz

Quelle: mineralium.com



Anatas (TiO_2) auf Quarz

Quelle: chemie.degruyter.de

Ti-Gehalt in Erzen ist sehr gering, daher hoher Kapitalaufwand

19

Eigenschaften von Titan:

Leichtmetall mit $\rho = 4490 \text{ kg/m}^3$

Raumgitter hdp (oberhalb 882°C : krz)

Zugfestigkeit $R_m = 250 - 700 \text{ Mpa}$

(je nach Bearbeitungsart und Fremdstoffanteil)

Reinst-Titan (99,98%): 235 MPa

Fein-Titan (0,2 %Fe; 0,18% O)): 240 MPa

Fein-Titan (0,3 %Fe; 0,25% O)): 345 MPa

Fein-Titan (0,4 %Fe; 0,35% O)): 450 MPa

Fein-Titan (0,5 %Fe; 0,40% O)): 550 MPa

Elastizitätsmodul 115.000 N/mm²

Schmelztemperatur 1690°C

hohe Korrosionsbeständigkeit (unter 535°C)

gut umformbar und schmiedbar

hohe Festigkeit

problematisch bei Schweißen und Warmumformen, da es bei

Kontakt mit Sauerstoff über 950°C zu Versprödung kommt;

Abhilfe: Arbeiten unter Schutzgas (z.B. WIG-Schweißen)



Reintitan

Quelle: chemie-master.de

20

Anwendungen von Reintitan:

Apparatebau in der chemischen Industrie

- » Reaktoren
- » Rohrleitungen und Behälter

Verfahrenstechnik

- » Wärmeübertrager
- » Meerwasserentsalzungsanlagen

Medizintechnik

- » Implantate
- » Hüftgelenke

Luft- und Raumfahrt

Schmuck



Reaktor

Quelle: sms-vt.com



Zahnimplantat aus Titan

Quelle: zahnarzt-spandau-berlin.de

21

Titanlegierungen:

Bildung von Mischkristallen

Verbesserung der Festigkeit durch Zugabe von

- » Fe, Cr, Mo, Al, V, Sn

dadurch aber spröder und Verschlechterung der Schweißbarkeit
durch verbesserte Aufnahmemöglichkeit von Wasserstoff und
Sauerstoff



Fahrwerk

Quelle: dw-online.de

Beispiele für Ti-Legierungen und deren Anwendungen :

Werkstoff	Zugfestigkeit	Anwendung	Werkstoff	Zugfestigkeit	Anwendung
Ti-5Al-2,5Sn	860 N/mm ²	Flüssigwasser- stofftanks	Ti-10V-Fe2-3Al	bis 1400 N/mm ²	Flugzeug- fahrwerke
Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr- 0,5Mo-0,7Nd-0,35Si- 0,06C	1030 N/mm ²	Hochtemperatur- Turbinschaufeln	Ti-6Al-4V	bis 1200 N/mm ²	Turbinen- schaufeln

22

weitere NE-Metalle

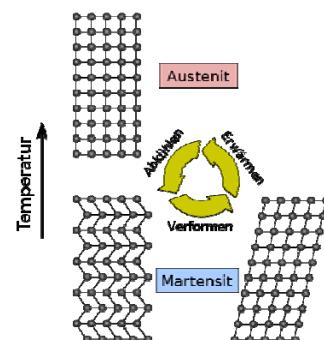
Nickel und Nickellegierungen

- » Ni-Mn-Legierungen haben hohe Beständigkeit gegenüber Schwefel
- » Ni-Ti-Legierungen: **Formgedächtnislegierungen** (FGL)
- » Ni-Be-Legierungen haben sehr hohe Korrosionsbeständigkeit und sehr hohe Festigkeit (R_m bis 1800 N/mm²)
- » etc.

Magnesium und Magnesiumlegierungen

- » korrosionsbeständig
- » mittlere Festigkeiten (bis 250 N/mm²)
- » warmfest bis ca. 300°C
- » sehr leichter und gut dämpfender Werkstoff für Bauteile von Flugzeugen- und Hubschraubern, Automobilbereich (Getriebegehäuse, Felgen, ...)

etc.



Gefügewchsel bei Formgedächtnislegierungen Ti-Ni
Quelle: de.wikipedia.org



Kameragehäuse aus Magnesiumlegierung
Quelle: imaging.nikon.com

6. Kunststoffe



Aufbau von Kunststoffen:

Kunststoffe sind hochmolekulare organische Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen → **Polymere**

Kunststoffe werden durch chemische Verkettungsreaktionen aus niedermolekularen Verbindungen (**Monomere**) gewonnen

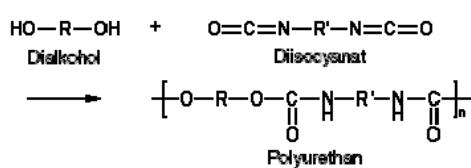
- » Polymerisation
- » Polyaddition
- » Polykondensation

Ausgangsbasis für die Kunststoffherstellung sind

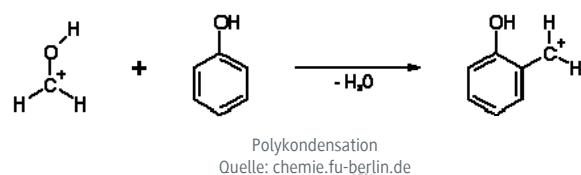
- » Erdöl und Erdgas
- » Kohle
- » pflanzliche Stoffe (z.B. Cellulose)



Polymerisation
Quelle: chemie.fu-berlin.de



Polyaddition
Quelle: chemie.fu-berlin.de



Polykondensation
Quelle: chemie.fu-berlin.de

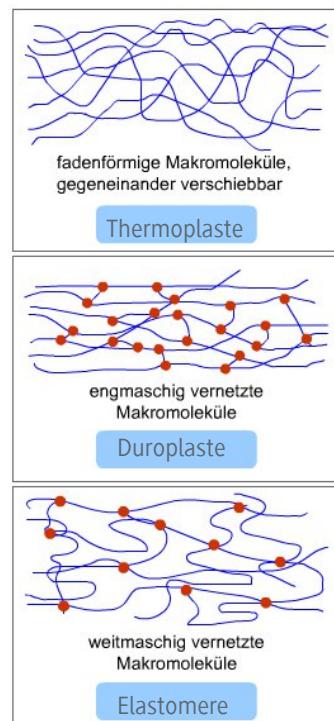


Struktur von Kunststoffen:

die Eigenschaften von Kunststoffen werden u.a. über die räumliche Anordnung der Makromoleküle bestimmt

Thermoplaste: unvernetzte Polymer-Fäden, die über mechanische Verschlaufung und vergleichsweise schwache Nebenvalenzbindungen zusammenhalten;
» dadurch starke Temperaturabhängigkeit der Festigkeit und der Verformbarkeit

- (Temperaturzunahme → Abstandserhöhung → Dipol-Kräfte der Nebenvalenzbindungen nehmen ab)
- » Umformen von Thermoplasten z.B. mit Heißluft
 - » Möglichkeit von Auf- und Umschmelzen von Thermoplasten (→ wichtig für Recycling)



Quelle: chemgapedia.de

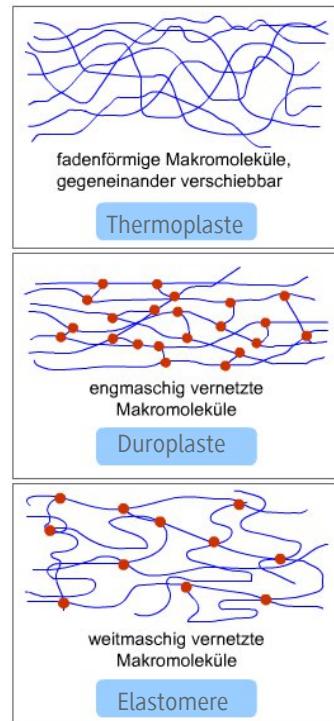
Struktur von Kunststoffen:

Duroplaste: engmaschige und räumlich vernetzte Polymer-Fäden, die über vergleichsweise starke Atombindungen zusammenhalten; dadurch

- » hohe Festigkeit und Sprödigkeit nach abgeschlossener Vernetzung („Aushärtung“)
- » kein Aufschmelzen und Umformen nicht möglich
- » hohe Temperatur führt zu Zersetzung

Elastomere: weitmaschige räumliche vernetzte Polymer-Fäden mit mechanischer Verschlaufung ;dadurch
» sehr hohe Elastizität (Temperaturabhängigkeit)

- » kein Aufschmelzen und plastische Verformung möglich



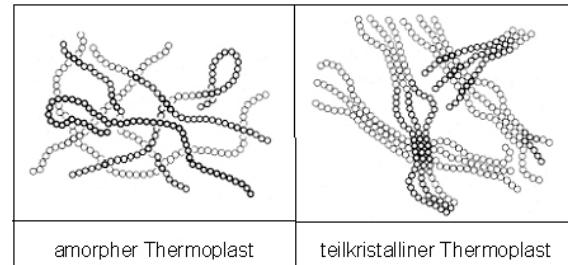
Quelle: chemgapedia.de

Struktur von Kunststoffen:

Polymere können in unterschiedlichen Gefügestrukturen vorliegen:

- » **amorphe** Struktur: regellose Ansammlung von Polymer-Fäden
- » **teilkristalline** Struktur: Teile der Polymer-Fäden liegen geordnet vor

mechanische Eigenschaften von Thermoplasten werden von teilkristallinen Bereichen bestimmt



Quelle: isovolta.de

Duroplaste und Elastomere weisen in der Regel amorphe Strukturen auf



„Legieren“ von Kunststoffen:

Eigenschaften von Kunststoffen können durch Zugabe von Hilfsstoffen verändert werden (→ **Legieren**):

- » Weichmacher: Verbesserung der Zähigkeit und Flexibilität , auch bei niedrigen Temperaturen (Beispiel: Gebrauchsfähigkeit von PVC)
- » Füll- und Verstärkungsstoffe: Erhöhung von Festigkeit, Steifigkeit und Masse bzw. Volumen, etc.
 - Graphit: Erhöhung von elektrischer Leitfähigkeit
 - Fasern aus Glas, Amid, etc. : Erhöhung von Festigkeit
 - Gesteinsmehl: kostengünstige Möglichkeit zur Volumenvergrößerung (d.h. Einsparung von Polymeren)
 - etc.
- » Farbstoffe
- » Stabilisatoren (für UV-Stabilität, Farbbeständigkeit, ...)
- » Treibmittel (für Aufschäumen, ...)
- » etc.



6. Kunststoffe

Allgemeine Eigenschaften:

Kunststoffe zeichnen sich aufgrund ihrer „Polymer-Faden-Struktur“ im Allgemeinen aus durch:

- » geringe Dichte
- » elektrische und thermische Isolierwirkung (Ausnahme: Zugabe spezieller Hilfsstoffe)
- » deutliche Wärmeausdehnung
- » relativ geringe Festigkeit, verglichen mit Metallen (Ausnahme: Zugabe von Fasern)
- » relativ geringe Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen und damit Einsatztemperaturen ($55^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$); gering verglichen mit Metallen und keramischen Materialien

Werkstoff Kurbelbeschaffung	Art/Qualität, Beschichtung	Dichte [g/cm^3]	Farbe	Modifizierung, Zusatz- und Verstärkungsmittel		Einsatztemperatur Temperatur [°C]
				Modifizierung Zusatz- und Verstärkungsmittel	Einsatztemperatur kurzeigig Temperatur [°C]	
Thermoplaste						
SB	SB	1,05	weiss			-500 -400 -300 -200 -100 0 +100 +200 +300 +400 +500
PVC-U	PVC-U	1,42	grau, rot, transparent			
	PVC-U/FO	0,55	weiss, grau	geschüttet ¹		
PVC-U mod.	PVC-U/FO COLOR	0,60	farbig	geschüttet ²		
	PVC-U/FO ED	0,55	weiss	geschüttet ¹ , elektrostatisch ableitend		
	PVC-U/FO UV	0,67	weiss	geschüttet ¹ , witterungsstabilisiert		
PE-LD	PE-LD	0,92	natur			
PE-HD	PE-HD	0,95	schwarz			
PE-HMW	PE-HMW	0,95	natur, rohren und anderes			
PE-UHMW	PE-UHMW	0,93	natur, schwarz und farbig			
PE-UHMW mod.	PE-UHMW ED	0,93	schwarz	elektrostatisch ableitend		
	PE-UHMW ED FDA	0,94	schwarz	elektrostatisch ableitend		
	PE-UHMW FR	1,05	schwarz	flammenhemmend		
PP	PP	0,91	grau, farbig			
	PP LSG ¹	0,92	natur, schwarz	wärmestabilisiert		
PP mod.	PP GM40	1,21	schwarz	glasmattenverstärkt		
	PP GF30	1,14	schwarz	30% GF		
ABS	ABS	1,06	grau			
Thermoplaste - transparent						
PMMA	PMMA-XT	1,19	transparent, farbig			
	PMMA-GS	1,19	transparent, farbig			
PMMA mod.	PMMA-XT ED	1,19	transparent	elektrostatisch ableitend ¹		
PET-A	PET-A	1,26	transparent			
PET-G	PET-G	1,27	transparent			
PC	PC	1,20	natur, transparent	glykolemodifiziert		
	PC LSG ¹	1,20	natur (für Scheibenend)			
PC mod.	PC EC	1,20	transparent	elektrisch leitfähig ²		
	PC FR	1,20	transparent	flammenhemmend		
Duroplaste - Schichtpressstoffe						
PF CP	Hg 206 ¹	PF CP 201	1,35	dunkelbraun	Papier	
	MKHP ¹	PF CP MP	1,40	grau	Papier und Melamin	
PF CC	Hgw 2082	PF CC 201	1,35	braun	Baumwollgewebe	
	Hgw 2088	PF CC 42	1,35	braun	Baumwollgewebe	
EP GC	Hgw 2372 ¹	EP GC 202	1,80	grün-bräunlich	Glasfolienpappe	
Elastomere						
NBR / SBR	NBR	Nano-Crosslink		1,01-1,41	30-90	
SBR	SBR	Styrol-Butadien-Elastomer		1,20	25-95	
IR	IR ¹	Butyl-Elastomer			30-80	
EPDM	EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Elastomer		1,02-1,17	30-90	
CR	CR	Chloropren-Elastomer		1,31-1,52	40-90	
CSM	CSM	Chlorinfluoriertes Polyäthylen-Elastomer		1,43	50-90	
NBR	NBR	Acrylnitril/Butadien-Elastomer		1,18-1,55	30-95	
HNB ²	HNB ²	Hydriertes NBR			30-95	
PNR	PNR	Polynorbornen-Elastomer			10-45	
VMQ	VMQ	Silikon-Elastomer		1,13-1,30	30-85	
FVMQ	FVMQ ¹	Fluorsilikon-Elastomer			30-75	
ACM	ACM ¹	Polyacryloyl-Elastomer			50-90	
FKM	FKM	Fluor-Elastomer		2,00	65-90	
FEPM	FEPM ¹	Tetrafluor-Ethylen/Propylen			65-90	
FFKM	FFKM	Perfluor-Elastomer		1,90	60-90	
Polyurethane						
AU (PUR)	PUR D15	Poly(etheretherketon)-Elastomer		1,26	70-92	
	PUR D44	Poly(etheretherketon)-Elastomer		1,22	70-92	
(EU (PUR)	PUR AP	Poly(etheretherketon)-Elastomer		1,20	55-90	

Beispiele für Einsatztemperaturen von Kunststoffen

Quelle: pdf.directindustry.de

9

6. Kunststoffe

Allgemeine und mechanische Eigenschaften:

Kunststoffe sind in der Regel korrosionsbeständig, aber:

- » einige Thermoplaste sind in organischen Lösungsmitteln löslich
- » einige Kunststoffe können durch Wasseraufnahme quellen
- » Kunststoffe können durch klimatische Einflüsse, z.B. UV-Strahlung altern (d.h. Versprödung, Farbveränderung, etc.) → **Alterung**

mechanische Eigenschaften von Kunststoffen werden beeinflusst von:

- » Vernetzung und Vermaschung von Polymer-Faden-Struktur
- » Art und Menge der beigegebenen Hilfsstoffe
- » Geschwindigkeit der Krafteinleitung (→ viskoelastisches Verhalten)

10

mechanische und thermische Eigenschaften:

Stoff	E-Modul kN/mm²	Zugfestigkeit N/mm²	Dichte kg/dm³	Poisson Zahl ---	Längenausdehnungs-Koeffizient α in $10^{-5}/K$
Gussisen	64 ... 181	140 ... 490	7,1 ... 7,4	0,24 ... 0,29	9 ... 10
Stahl, unlegiert	210	300 ... 700	7,85	0,3	11 ... 12
Stahl, legiert	186 ... 216	500 ... 1500	7,8 ... 7,86	0,2 ... 0,3	9 ... 19
Kupfer	125	200 ... 300	8,93	0,35	16 ... 17
Aluminiun	72,2	40 ... 160	2,7	0,34	23 ... 24
Duroplaste	3 ... 16	6 ... 85	1,4 ... 2,0		10 ... 80
Thermoplaste	0,2 ... 4	4 ... 200	0,8 ... 2,2	0,3 ... 0,35	70 ... 250
Glas	39 ... 98	30 ... 90	2,2 ... 6,3	0,10 ... 0,28	3,5 ... 10

Vergleich der mechanischen und thermischen Eigenschaften von Werkstoffen

Quelle: 3-pi.de

Kunststoffe weisen im Vergleich zu Metallen auf:

- » geringere Zugfestigkeit
- » deutlich geringeren E-Modul
- » höhere bis deutlich höhere Wärmeausdehnung

11

Merkmale von Thermoplasten:

aufgebaut aus unvernetzten Polymerketten
 umformbar, umformbar, schweißbar und zerspanbar
 starke Temperaturabhängigkeit von mechanischen Eigenschaften
 in der Regel thermisch und elektrisch isolierend
 zum Teil lösbar bzw. quellbar in Lösungsmitteln
 einfärbbar
 relativ preiswert herstellbar

Thermoplaste sind gut „legierbar“, d.h. die Eigenschaften können durch Zugabe von Hilfsstoff einfach in einer großen Bandbreite manipuliert und eingestellt werden

13

Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

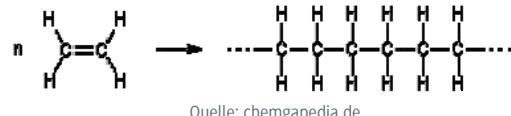
Polyethylen (PE)

teilkristalliner Thermoplast

sehr gute elektrische Isoliereigenschaft

schweißbar aber nur bedingt klebbar

chemische sehr gut beständig gegenüber Ölen, verdünnten Säuren und Laugen, vielen organischen Lösungsmitteln ,etc



Quelle: chemgapedia.de

PE-LD (low density; $\rho = 0,91 \text{ g/cm}^3$): Einsatztemperatur -45°C bis 60°C

PE-HD (high density; $\rho = 0,96 \text{ g/cm}^3$): Einsatztemperatur -45°C bis 95°C

Anwendungen: Verpackungsfolien, Trinkwasser- und Heizungsrohre, Trinkwasserbehälter, Benzin- und Heizöltanks, Beschichtungen für Stahlbleche, etc.



Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

Polypropylen (PP)

teilkristalliner Thermoplast

höherer Festigkeit als PE

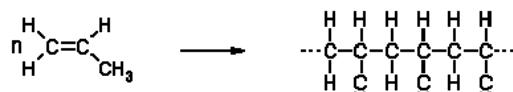
hohe Oberflächenhärte

bis 110°C einsetzbar

nur sehr geringe Kaltzähigkeit unterhalb 0°C

chemische sehr gut beständig gegenüber Ölen, verdünnten Säuren und Laugen, etc.

(wie PE), aber nicht beständig gegenüber Benzin und Benzol



Quelle: chemgapedia.de

Anwendungen: Folien, Pumpengehäuse, Steckdosen, Schalter, Gehäuse für Haushaltsgeräte, etc.



Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

Polyvinylchlorid (PVC)

überwiegend amorpher Thermoplast
gut schweiß- und klebbar
bis 65°C einsetzbar
brennt unter Freisetzung von Chlor-Gas (Verätzungsgefahr)



PVC-Rohre
Quelle: chemiereport.at

PVC-U (Hart-PVC): fest, steif, hart, kerbempfindlich,
unter 0°C spröde, nicht beständig gegen Benzol,
Ester und Salpetersäure

Anwendungen: Abwasserrohre, Lüftungskanäle, Fensterprofile, etc.

PVC-P (Weich-PVC): weich, flexibel bis gummiartig, bis -50°C
einsetzbar, deutlich weniger chemisch beständig als PVC-U

Anwendungen: Schläuche, Dichtungen, Kabelisolierungen, Beschichtungen, etc.



Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

Polystyrol (PS)

amorpher Thermoplast
sehr kerbschlagempfindlich
bis 80°C einsetzbar
sehr UV-empfindlich
chemische nur sehr gering beständig (d.h.
Substanzen gelöst bzw. zersetzt)
schweiß- und klebbar



Polystyrol-Platten (geschäumt)
Quelle: geotec-kunststofftechnik.com

Anwendungen:

- » PS: Verpackungen (Joghurtbecher, ...) isolierenden Folien, Haushaltsschüsseln, etc.
- » PS-E (geschäumt): Dämmstoffe und Isolierungen



Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

Polyethylenterephthalat (PET)

amorpher bis teilkristalliner Thermoplast (abhängig von Abkühlgeschwindigkeit) von -30°C bis 100°C einsetzbar verschleiß- und abriebfest chemische nicht stabil gegenüber heißem Wasser bzw. Wasserdampf, Aceton und konzentrierten Laugen und Säuren nur bedingt klebbar

Anwendungen: Mehrwegflaschen für Getränke (auch CO₂-haltig), Gleitlager und Führungen, geringe belastete Zahnräder, etc.



PET-Flaschen
Quelle: mic.hit-karlsruhe.de

weitere Beispiele technisch wichtiger Thermoplaste:

Polyamid (PA): abriebfest, hart und sehr zäh;

Anwendung: Zahnräder, Gehäuse, Textilfasern, etc.

Ersatzfaser für Seide für Fallschirme (1935); amerikanisches Warenzeichen: NYLON („Now You Look Old Nippon“); Deutschland: PERLON

Polymethylmethacrylat (PMMA): steif, hart, spröd, sehr gute optische Eigenschaften – Acrylglass (glasklar und lichtecht);

Anwendung: Linsen, Brillen, Lichtleitfasern, Verglasungen, etc.

Polycarbonat (PC): fest, schlag- und kaltzäh (bis -140°C); warmfest bis 130°C,
Anwendung: Sicherheitsverglasung, Schaugläser, Gehäuse, etc.

Polytetrafluorethylen (PTFE): zäh und flexibel, gute Gleiteigenschaften, klima- und lichtbeständig, einsetzbar zwischen -250°C und +250°C
Anwendung: Gleitlager, Dichtungen, dampfdurchlässige Folien („Gore-Tex“), etc.



PMMA
Quelle: koenig-kunststoffe.de

Merkmale von Duroplasten:

aufgebaut aus räumlich stark vernetzten Polymerketten
hart, fest und spröde
nicht schmelzbar
nicht löslich
schwer quellbar
spanend bearbeitbar und klebbar



Prepreg im Flugzeugbau
Quelle: rezco.com.au

Formgebung muss vor bzw. während Vernetzung erfolgen

Ausgangsstoffe: Harz + Härter + ggf. mit Harz getränkte faserverstärkte Matten (so genannte **Prepregs**)

21

Beispiele technisch wichtiger Duroplaste:

Epoxidharz (EP)

Einsatz als Gieß- und Formharz
gut geeignet auch als Klebstoff
meist faser-verstärkt
Einsatztemperatur bis 80°C (bei Warmaushärtung bis max. 200°C)
chemisch sehr gut beständig
gute elektrische Isolierung



Epoxidharz
Quelle: fachgebaerdenlexikon.de

Anwendungen: hochfeste Rohre, Bodenbeläge, Schwimmbadbeschichtungen, Lacke, Klebstoffe, Leiterplatte, Bootskörper, etc.



Bodenbelag aus EP
Quelle: fachgebaerdenlexikon.de

22

Beispiele technisch wichtiger Duroplaste:

Polyurethan (PUR)

Eigenschaften variieren stark, je nach eingesetzten Monomeren

hohe Zugfestigkeit und Schlagbiegefestigkeit

Einsatzmöglichkeit ungeschäumt (hart) oder geschäumt (elastisch)

hohe Haftkraft auf Metall, Holz, Textilien, Glas, etc.
(→ Montagekleber)

bei geringem Vernetzungsgrad: hohe Elastizität
(→ Dichtungsmasse)

Anwendungen: Vergussmasse für Elektrotechnik,
Dichtungsmasse, Weich- und Hartschaum-Platten,
Montageschaum, etc.



PUR (ungeschäumt)
Quelle: uniplast-gmbh.de



PUR (geschäumt)
Quelle: uni-regensburg.de

Beispiele technisch wichtiger Duroplaste:

ungesättigte Polyesterharze (UP)

Eigenschaften variieren stark, je nach eingesetzten Komponenten (von steif und spröd bis zäh und elastisch)

Verarbeitung als Gießmasse oder Prepregs
Einsatzbereich bis ca. 180°C
sehr gute elektrische Isoliereigenschaft

Anwendungen: Flugzeugteile, Bootskörper, Well- und Profilplatten für Bautechnik, Behälter, elektrische Isolierungen, Textilfasern



Merkmale von Elastomeren:

aufgebaut aus räumlich weitmaschig vernetzten Polymerketten
weich und flexibel (→ gummielastisch)
nicht schmelzbar
nicht löslich
quellbar

Formgebung muss vor bzw. während Vernetzung erfolgen
mechanische Eigenschaften können über Zugabe von Hilfsstoffen eingestellt werden
Elastomere zersetzen sich nach Überschreitung der zulässigen Höchsttemperatur (z.B. Gefahr bei überhitzen Kompressoren)



O-Ringe aus beschichteten Elastomeren
Quelle: adelhelm.de

Beispiele technisch wichtiger Elastomere:

Naturkautschuk (NR)

Grundstoff für Naturkautschuk ist Latex (Milchsaft des Gummibaums)

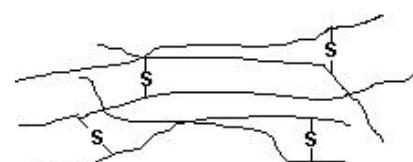
Vernetzung vom Latex-Fäden zu Naturkautschuk erfolgt über **Vulkanisieren** (unter Druck und Wärme Vernetzung durch Schwefel)

sehr hohe Elastizität und Reißfestigkeit
keine Resistenz gegenüber Kraftstoffen, Mineralölen und Fetten

Anwendungen: Scheibenwischerblätter, Reifen, Membranen, Gummifedern, Matratzen, Teppichrücken, etc.



Latex-Ernte am Gummibaum
Quelle: de.dreamstime.com



Schema der Vulkanisierung
Quelle: chemienet.info

Beispiele technisch wichtiger Elastomere:

Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)

SBR ist Synthesekautschuk
höhere Abriebfestigkeit als NR
geringere Elastizität als NR
hohe chemisch Beständig gegenüber vielen Substanzen
einsetzbar zwischen -50°C und 100°C

Anwendungen: Reifen, Dichtungen (O-Ringe), Formteile, Membranen, Schuhsohlen, Flachriemen, etc.



Dichtungen
Quelle: peter-martin.de

28

Beispiele technisch wichtiger Elastomere:

Silikonkautschuk (MVO, VMO)

hohe chemisch Beständig gegenüber vielen Substanzen
hohe Witterungsbeständigkeit
einsetzbar bis ca. 230°C
kältestabil bis ca. -55°C (Sondersilikone bis -100°C)

Anwendungen: Dichtmasse, Dichtungen, Verpackungen, Behälter, etc.



Silikon
Quelle: ace-technik.de

29

Klebstoffe sind Kunststoffsichten mit hoher Haftfähigkeit

Klebeschicht besteht aus drei Lagen

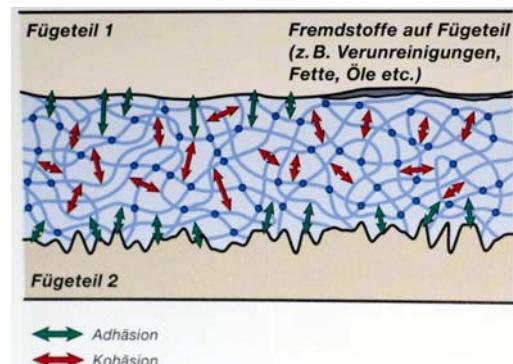
- » Adhäsionsschicht am Werkstück 1
- » Kohäsionsschicht
- » Adhäsionsschicht am Werkstück 2

Klebungen sind Flächenverbindungen, die auf Scherung (Schubspannungen) beansprucht werden

Klebungen benötigen saubere und fettfreie Oberflächen

Klebstoff muss Oberflächen gut benetzen und aushärtbar sein (Gegenbeispiel: Post-It)

Aushärten kann erfolgen physikalisch (Abdampfen von Lösemittel), chemisch (Vernetzungs-Reaktion von Härter und Harz; UV-induzierte Polymerisation, etc.)



Quelle: plasma.de

7. Keramische und mineralische Werkstoffe

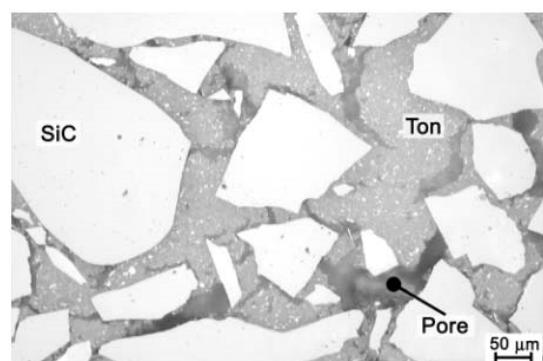


Aufbau und Struktur keramischer Werkstoffe

keramische Werkstoffe bestehen aus anorganischen und nicht-metallischen Ausgangsstoffen bzw. Metalloxiden, die bei hohen Temperaturen **gesintert** werden

Ausgangsmaterialien:

- » Metalloxide (→ **Oxidkeramik**): Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 ...
- » Carbide, Nitride (→ **Nichttoxidkeramik**): SiC , Si_3N_4 , B_4C ...
- » Silikate (→ **Silikatkeramik**): SiO_2 (Quarz), $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ (Feldspat), $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Ton)



Quelle: keramverband.de

Sintern: Zusammenbacken bei hohen Temperaturen ($> 1000^\circ\text{C}$) vom pulvigen, in Form gepresste Ausgangsmaterialien zu kompakten Körper



Aufbau und Struktur keramischer Werkstoffe

keramische Werkstoffe bestehen aus kristallinen Elementarzellen

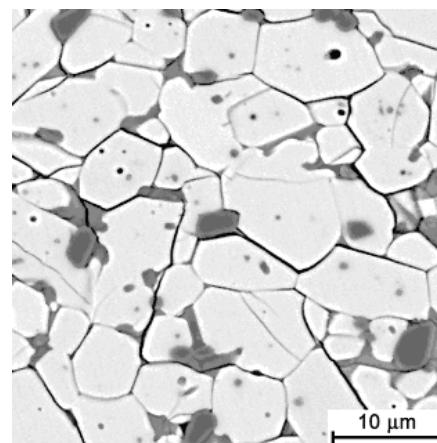
kristalline Elementarzellen werden durch Sinterprozess zu einem heterogenen (oft Mehrkomponenten-) Gefüge zusammengefügt

- » zum Teil amorphes Glasgefüge bei Silikatkeramik;
- » Polykristallin bei Metalloxid- und Nichtmetalloxid-Keramik

Gefüge weist zum Teil hohen Porenanteil auf (Porenanteil wird in der Regel beim „Brennen“ = Sintern deutlich reduziert)

Eigenschaften keramischer Werkstoffe können durch Zugabe von Zuschlagstoffen beeinflusst werden

- » Verbesserung mechanischer Eigenschaften):
 - Fasern
 - Metallpartikel



Gefüge von Aluminiumtitanat
Quelle: keramverband.de

Eigenschaften keramischer Werkstoffe

keramische Werkstoffe weisen im Allgemeinen folgende Eigenschaften auf:

- hohe Sprödigkeit (verglichen mit Metallen)
- relativ geringe Festigkeit (signifikant abhängig von Krafteinleitung und Bauteilgeometrie)
- sehr große Kerb- und Kerbschlagempfindlichkeit
- große Oberflächenhärte
- hohe elektrische Isolierfähigkeit
- hohe elektrische Durchschlagfestigkeit
- zum Teil geringe, zum Teil hohe Temperatur-Wechselfestigkeit
- hohe Korrosions- und Alterungsbeständigkeit
- hohe Bio- und Lebensmittelverträglichkeit



Zahnräder aus Keramik
Quelle: bce-special-ceramics.de

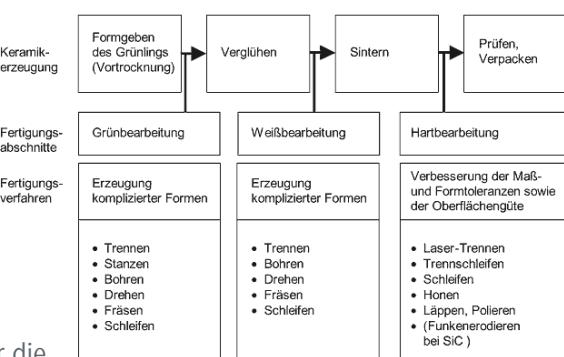
Herstellungsprozess

Herstellungsprozess keramischer Werkstoffe teilt sich auf in

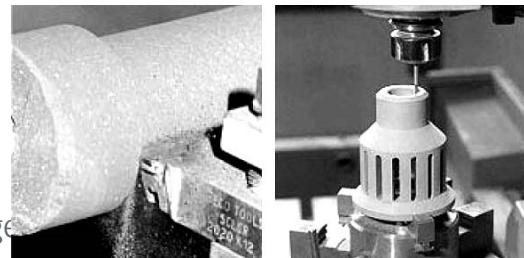
- » Formgebungsprozess
- » Brennvorgang / Sinterprozess

Formgebungsprozess

- » Mahlen und Vermischen der Ausgangsmaterialien für die keramische Masse
 - formbare Masse aus Pulver mit ggf. Zusätzen von Bindemitteln und Plastifizierungsmitteln (Bentonit, Thermoplate, Wasser, ...)
- » Formgebung der keramischen Masse durch:
 - Pressen (diskontinuierliches Pressverfahren)
 - Extrudieren (kontinuierliches Pressverfahren)
 - Gießen (für dünnflüssige Keramikmassen)
- » Trocknen der Formteile (Rohling)
- » spanabhebende, maßgenaue Bearbeitung der Rohlinge
 - Grünbearbeitung



Herstellungsschritte keramischer Werkstoffe
Quelle: keramikverband.de



Grünbearbeitung
Quelle: keramikverband.de

8

Herstellungsprozess

Brennvorgang / Sinterprozess

- » thermische Behandlung der Rohlinge zur dauerhaften Verfestigung der keramischen Masse
- » durch Brennvorgang / Sintern werden Körner von Ausgangsmaterialien oberflächlich aufgeschmolzen, so dass Körner „zusammengeschweißt“ werden
- » Temperaturen bei Brennvorgänge sind abhängig von Art der Ausgangsstoffe:
 - Silikatkeramik: 900°C – 2000°C
 - Oxidkeramik: 1600°C – 1800°C
 - Nichtoxidkeramik: 1300°C – 1500°C



Brennofen
Quelle: milan-keramik.de

Abkühlen / Nachbearbeitung / Qualitätskontrolle

9

Silikatkeramik:

Mehrkomponenten-Werkstoffe aus Ton, Kaolin, Feldspat und Speckstein als Träger für Silikate (SiO_2)

durch Sintervorgang bildet sich neben kristalliner Phase zum Teil auch Glasphase aus (Anteil > 20%)

typische silikatkeramische Werkstoffe:

- » Porzellan
- » Tongut, Steingut ($t_{\text{Brenn}}: 900^\circ\text{C} - 1100^\circ\text{C}$), porös
- » Steinzeug ($t_{\text{Brenn}}: 1200^\circ\text{C} - 1300^\circ\text{C}$), dicht

Anwendungen: Tafelgeschirr, Sanitärkeramik, Isolatoren, Wärme- und Verfahrenstechnik, Medizintechnik (Zahn-Implantate), etc.



Beispiele für verfahrenstechnische Bauteile aus extrudierter Silikatkeramik
Quelle: ikts.fraunhofer.de

11

Oxidkeramik:

keramischer Werkstoffe aus Metalloxiden

- » Aluminiumoxid Al_2O_3
- » Aluminiumtitanat Al_2TiO_5
- » Zirkoniumoxid ZrO_2

durch Sintervorgang bildet sich polykristallines Gefüge

Oxidkeramik weist auf:

- » hohe Druckfestigkeit
- » hohe Temperaturbeständigkeit
- » hohe chemische Beständigkeit
- » sehr hohe Verschleißfestigkeit

Anwendungen: Schneidwerkzeuge, verschleißbeanspruchte Führungen und Düse, Katalysatoren, Verfahrens- und Umwelttechnik, Sanitär- und Elektroanwendungen, Hitzeschutz (z. B. Space-Shuttle), Beschichtungen, etc.



Schneidplatten
Quelle: ceramtec.de



Katalysator-Träger
Quelle: ceramtec.de

12

Nichttoxidkeramik:

keramischer Werkstoff aus metallischen Nitriden und Carbiden

- » Siliziumnitrid Si_3N_4
- » Siliziumcarbid SiC
- » Borkarbid B_4C

Nichttoxidkeramik weist auf

- » sehr hohe Härte
- » Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen
- » hohe Verschleißbeständigkeit
- » hohe Festigkeit auch bei hohen Temperaturen
- » Oxidationsbeständigkeit bis zu sehr hohen Anwendungstemperaturen
- » gute Temperaturwechselbeständigkeit
- » geringe Wärmedehnung und sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit

Anwendungen: Brennerdüsen, Flammrohre, Gleitlager in Chemiepumpen, Hochtemperatur-Wärmetauscher, etc.



Düsen aus Siliziumnitrid
Quelle: ceramtec.de



Schweißdüsen
Quelle: grm-ceramics.de



Aufbau und Struktur von Glas

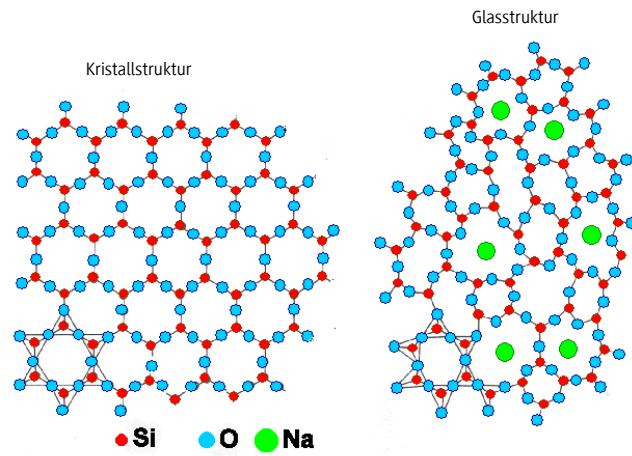
Gläser sind ein anorganischer, nicht metallischer Werkstoff

die Hauptbestandteile von Gläsern sind:

- » Siliziumdioxid SiO_2
- » Natriumdioxid Na_2O
- » Kalziumdioxid CaO
- » Zuschlagstoffe (meist Metalloxide für Einstellung von Farbe, Brechungsindex, Festigkeit, etc.)

Gläser weisen eine amorphe Struktur auf

(bei Abkühlung der Schmelze wird Viskosität so groß, dass SiO_2 keine ausreichende Mobilität für kristalline Anlagerung mehr hat; daher spricht man bei Gläsern auch von „**unterkühlten Flüssigkeiten**“)



Vergleich von Kristallstruktur zu Glasstruktur
Quelle: tf.uni-kiel.de

Aufbau und Struktur von Glas

Zusammensetzung und Eigenschaften typischer Glasqualitäten

	Alkali-Erdalkali-Silikatglas	Borsilikatglas		Erdalkali-Alumino-Silikat-Glas	Alkali-Blei-Silikatglas
		erdalkali-frei	erdalkali-haltig		
typische Zusammensetzung ma-%	SiO ₂	70-75	~ 81	~ 75	55-65
	Na ₂ O/K ₂ O	12-16	~ 4	4-8	13-15
	MgO/CaO/BaO	10-15	---	< 5	---
	Al ₂ O ₃	0,5-2,5	2,5	2-7	17-25
	B ₂ O ₃	---	13,5	8-12	---
	PbO	---	---	---	10-38
Beständigkeit	hydrolyt.	mäßig - gering	sehr gut	sehr gut	mäßig
	Säuren	sehr gut	sehr gut	mäßig - gering	mäßig - gering
	Laugen	gut	gut	gut - mäßig	gut - mäßig
Anwendung	Behälterglas, Flachglas	Chemie, Pharmazie hohe Thermo-schockbeständigkeit	hohe chemische Beständigkeit	Hochtemp.-Thermometer, Verbrennungs-röhren, Resistoren	Schmuckglas, Strahlenschutz, Kathodenstrahlröhre

Quelle: uni-jena.de

17

Eigenschaften von Gläsern

Dichte: $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$

hohe optische Transparenz

(ca. 350 nm bis ca. 2800 nm → optimiert auf sichtbares Licht)

geringe Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda$$

$= 0,8 - 1,0 \text{ W/mK}$

hohe chemische Beständigkeit gegenüber Säuren; nur bedingte Beständigkeit gegenüber Laugen

(u.a. Betonwasser) (→ Glaskorrosion)

lebensmittelecht

plastisch verformbar (bei ca. 1000°C)

geringe Wärmeausdehnung:

$$\alpha$$

$= 0,5 - 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$

(Spezialgläser mit Nullausdehnung: Zerodur®, Ceran®)



Glaskorrasion
Quelle: de.wikipedia.org



Ceran®-Feld; Quelle: planet-wissen.de

18

Eigenschaften von Gläsern

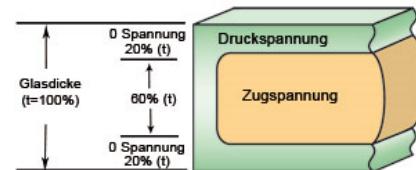
Festigkeit von Glaskörpern wird nahezu ausschließlich nur über die Oberflächenschichten bestimmt; daher

- » Anritzen der Oberfläche genügt, um Gläser zu brechen
- » Mehrschicht-Gläser weisen sehr hohe Festigkeiten auf
- » Oberflächengüte / Oberflächenzustand ist entscheidend für Gebrauchsfestigkeit

Festigkeit kann durch gezieltes Aufbringen von Druckspannungen in der Oberfläche erheblich gesteigert werden



Quelle: glastueren-shop.de



Quelle: sunguardglass.de



Eigenschaften von Gläsern

Festigkeitswerte typischer Gläser

- » Zugfestigkeit: 30 – 90 N/mm²
- » Biegefestigkeit: 30 – 90 N/mm²
- » Druckfestigkeit: 700 – 1100 N/mm²
- » E-Modul: ca. 50 – 90 kN/mm²

Verbesserung der Festigkeit von Vorspannung der Gläser (damit Aufbau von Druckspannungen in Oberflächen)

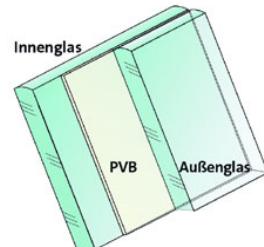
sehr große Kerbempfindlichkeit

(Grund: Kerben verletzen die für die Festigkeit entscheidende Oberflächenschicht)

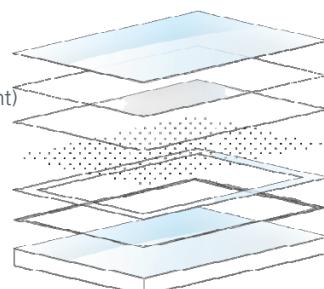
Verbesserung der Kerbempfindlichkeit:

- » Oberflächenbeschichtungen
- » Mehrschicht-Verglasungen
- » Verbundverglasung

Verbundverglasung



Verbundverglasung im Fahrzeugbau
Quelle: chemie-am-auto.de



Verbundscheibe für Touchscreen
Quelle: interelectronix.com



Herstellungsprozesse

Ausgangsstoffe für die Glasherstellung sind Mineralien auf Basis Silizium (Si), Oxiden von Alkali- und Erdalkalimetallen (Ca, Mg, Ba, K) und Metalloxiden (B, Al, Pb,):

Ausgangsstoffe finden sich in:

- » Quarzsand (SiO_2)
- » Soda (Na_2CO_3) (ca. 13%) (→ Flussmittel zur Absenkung von Schmelzpunkt)
- » Kalkstein (CaCO_3) (ca. 10%) (→ Stabilisator für Härte, Glanz und Haltbarkeit)
- » Feldspat, Dolomit, Zuschlagstoffe

typische Zusammensetzung ma-%	Alkali-Erdalkali-Silicatglas	Borosilikatglas		Erdalkali-Alumino-Silicat-Glas	Alkali-Blei-Silicatglas
		erdalkali-frei	erdalkali-haltig		
SiO_2	70-75	~ 81	~ 75	52-60	55-65
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	12-16	~ 4	4-8	---	13-15
$\text{MgO}/\text{CaO}/\text{BaO}$	10-15	---	< 5	10-20	---
Al_2O_3	0,5-2,5	2,5	2-7	17-25	0-1
B_2O_3	---	13,5	8-12	---	---
PbO	---	---	---	---	10-38

Quelle: uni-jena.de

22

Herstellungsprozesse

Gläser entstehen durch Schmelzen und anschließend schnelles Abkühlen von mineralischen Ausgangsstoffen

natürliche Gläser können entstehen durch

- » magmatisches Aufschmelzen (Beispiel: Obsidian)
- » Meteoriteinschlag (Beispiel Wüstenglas)
- » Blitz einschlag in sandige Böden (Beispiel: Fulgurite)



Obsidian (vulkanisches Glas)
Quelle: geomaps.wr.usgs.gov



Wüstenglas
Quelle: sigridboehmer.de

technische Gläser:

- » Aufschmelzen der Ausgangsmineralien unter Zugabe von Bruchglas bei ca. 1200°C bis ca. 1600°C
- » Weiterverarbeitung und Formgebung der Glasschmelze



Fulgurit („Blitzrohr“)
Quelle: topgeo.de

23

Herstellungsprozesse

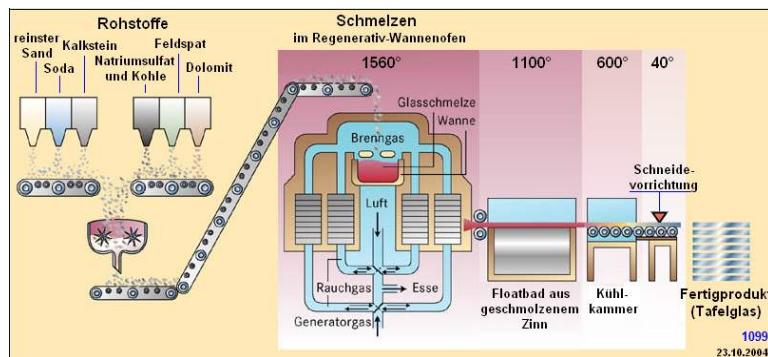
Weiterverarbeitung und Formgebung der Glasschmelze

» Flachglasherstellung:

- **Float-Verfahren**: ausbringen der Glasschmelze über flüssigem Zinnbad; dadurch sehr hochwertige Flachgläser mit großen Tafelgrößen möglich
- Walz- und Ziehverfahren: für Flachgläser mit speziellen Oberflächenstrukturen



Herstellung von Float-Glas
Quelle: oocities.org



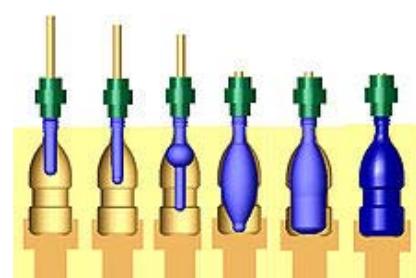
Schema der Floatglas-Herstellung
Quelle: elkage.de

24

Herstellungsprozesse

Weiterverarbeitung und Formgebung der Glasschmelze

- » Behälterglasherstellung: Press-Glas, Gieß-Glas; mundgeblasenes Glas
- » Glasfaserherstellung: Brushing (kontinuierliches Ziehen über Düsenplatte mit Vielzahl von Einzeldüsen)
- » Glasrohrherstellung: kontinuierliche Ziehverfahren
 - Danner-Verfahren: über rotierende Glaspfeife ziehen
 - Vello-Verfahren: über Hohldorn ziehen



Schema der Glasflaschenherstellung
Quelle: de.wikipedia.org



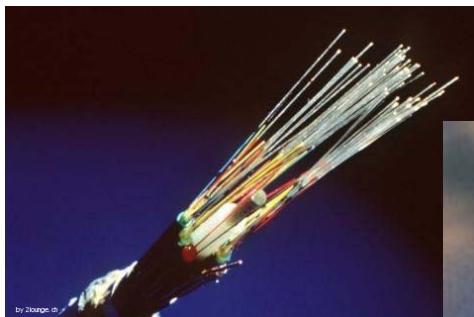
mundgeblasenes Glas
Quelle: baumarkt.de

25

Anwendungsbeispiele technischer Gläser:

Behälterglas: Flaschen, Reagenzgläser, Petrischalen, etc.

optische Gläser: Linsen, Spiegel, Lichtleiter, Prismen, etc.



Glasfaserkabel
Quelle: 2lounge.ch



Becherglas und Reagenzglas
Quelle: de.wikipedia.org

optische Linsen
Quelle: schott.com

27

Anwendungsbeispiele technischer Gläser:

Funktionsgläser: Fensterscheiben, Dächer, Fassaden, Sicherheitsscheiben,

Konstruktionsgläser: Vollglas-Treppen, Glas-Stützen, Glasbausteine

(vorgespanntes Glas mit hoher Druckspannungsanteil)



Glasdach von MyZeil, Frankfurt
Quelle: detail360.de



Glastreppe
Quelle: glaserei-schmitt.de



tragende Glasstütze
Quelle: ludwig-weiler.de

28

Mineralische Werkstoffgruppen und Natursteine

mineralische Werkstoffe bestehen in erster Linie aus Silikaten und Aluminaten, und unterteilen sich typischerweise in

- » Natursteine
- » Bindemittel (Kalk, Zement, Gips)
- » keramische Werkstoffe
- » Gläser

Natursteine bestehen aus Agglomerationen von mineralischen Bestandteilen der Erdkruste, die entstanden sind aufgrund von:

- » Aufschmelzungen im Erdinneren: Magmatite / Urgesteine
- » „Zusammenpressen“ von mineralischen Ablagerungen: Sedimentite / Sedimentationsgestein
- » Umwandlung von Gesteinen durch Wärmeeinwirkung: Metamorphite / metamorphe Gesteine

Natursteine:

Magmatite / Urgesteine:

- » aus Erstarrung silikatischer Schmelzen (Magmen; ca. 1200°C)
- » je nach Zusammensetzung von Magma und Verlauf der Erstarrung ergeben sich unterschiedliche Kristallisationsvorgänge und damit auch unterschiedliche Gesteinstypen
- » Beispiele: Granit, Basalt, Diabas, Porphy, ...



Porphyr
Quelle: kristallin.de



Granit
Quelle: mormo.de

Sedimentationsgestein: Sandstein, Tonschiefer, Kalkstein, ...

- » aus abgelagerten Verwitterungsgesteinen (Primärgesteinen) oder abgelagerten organischen Mineralien (Muscheln, Korallen, ...)
- » Verfestigung unter Druck
- » Beispiele: Sandstein, Kalkstein, Tonschiefer, ...



Tonschiefer
Quelle: moby dick.at



Sandstein
Quelle: kristallin.de

Natursteine:

Metamorphe:

- » Entstehung aus Umkristallisation von bestehenden Gesteinen durch hohem Druck und Temperatur zum Teil auch unter partielltem Aufschmelzen (meist in großen Erdtiefen)
- » dabei auch Ablauf chemischer Umwandlungsreaktionen:
Beispiel: Calzit + Quarz → Wollastonit + CO₂

$$\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiCO}_3 + \text{CO}_2$$
- » Beispiele: Gneis, Glimmerschiefer, Marmor, ...



Gneis
Quelle: mormo.de

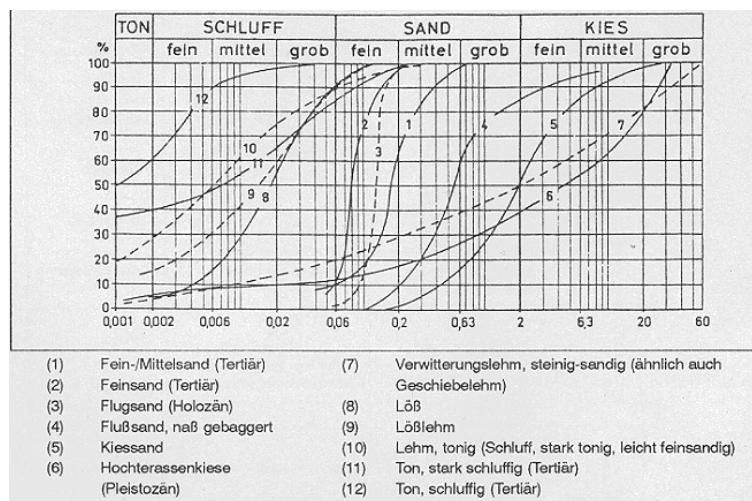


Glimmerschiefer
Quelle: biowin.at

Natursteine:

Lockergesteine

- » durch Erosion zerkleinerte Festgestein
- » Lockergesteine unterscheiden sich nach der Korngröße (→ Sieblinien)
 - Ton: $\varnothing < 0,002 \text{ mm}$
 - Schluff: $0,002 < \varnothing < 0,06 \text{ mm}$
 - Sand: $0,06 < \varnothing < 2 \text{ mm}$
 - Kies: $2 < \varnothing < 60 \text{ mm}$
 - Stein: $\varnothing > 60 \text{ mm}$

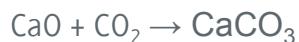


Körnungslinien von Lockergestein
Quelle: fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de

Bindemittel:

Bindemittel sind anorganische, technische Substanzen, die als Klebstoffe für die dauerhafte Verbindung von Lockergesteinen eingesetzt werden (→ z.B. Beton) die Abbindeprozesse verlaufen meist in Form exothermer chemischer Reaktionen:

- » Beispiel: Abbinden von Kalk

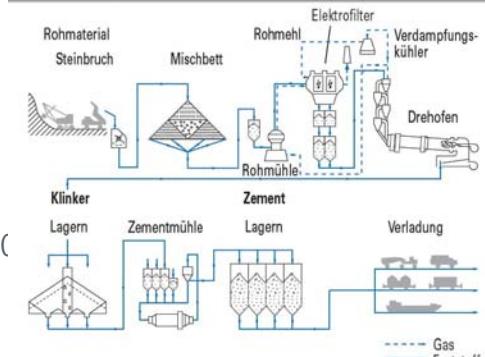


Bindemittel:

- » Kalke: entsäuerter Kalkstein; gebrannt unterhalb der Sintertemperatur
- » Zemente: entsäuerter Kalkstein + Ton + Zusatzstoffe; gebrannt oberhalb der Sintertemperatur (1400 – 1500 °C)
- » Gips, Anhydrit (CaSO_4)



Zement-Drehofen
Quelle: german.alibaba.com



Zementherstellung
Quelle: estelzer.de

8. Verbundwerkstoffe



Was unterscheidet Verbundwerkstoffe von allen anderen Werkstoffen?

Verbundwerkstoffe sind Kombinationen von unterschiedlichen Werkstoffen, die unterschiedliche „Stärken“ und „Schwächen“ haben

die Werkstoffe sind daher so zu kombinieren, dass jeder Teilwerkstoff seine vorteilhaften Eigenschaften („Stärken“) einbringen kann, und so die „Schwächen“ der anderen Werkstoffe kompensiert

Beispiel: Verbundwerkstoff aus

- Werkstoff mit hoher Druckfestigkeit: Epoxidharz
 - Werkstoff mit hoher Zugfestigkeit: Glasfasern
- **Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)**



Was unterscheidet Verbundwerkstoffe von allen anderen Werkstoffen?

Eigenschaften, die im Verbund optimiert werden können:

Zug-, Druck- und Biegefestigkeit
Steifigkeit
Kerbschlagfestigkeit
Temperaturwechselfestigkeit
Dichte
Wärmeleitfähigkeit
Wärmedehnung
Temperaturbeständigkeit
chemische und biologische Verträglichkeit
etc.

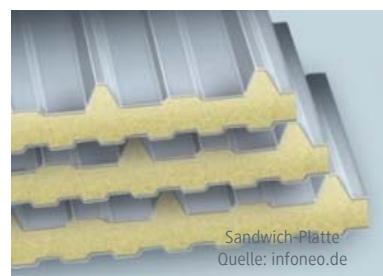


Einteilung von Verbundwerkstoffen?

Wie kann der Verbund unterschiedlicher Werkstoffe erfolgen?

Schichtverbund: Verbundwerkstoff besteht aus Schichten homogener Werkstoffe;

Beispiel: Sperrholz, Sandwich-Platten, ...



Faserverbund: Verbundwerkstoff besteht aus Matrixwerkstoff, in den Fasern aus Faserwerkstoff eingebettet sind

Beispiel: Kohlefaser-verstärkter Kunststoff (CFK)



Handlaminieren von CFK-Bauteil
Quelle: auto.de.msn.com



Einteilung von Verbundwerkstoffen?

Wie kann der Verbund unterschiedlicher Werkstoffe erfolgen?

Teilchenverbund: Verbundwerkstoff besteht aus Matrixwerkstoff, in den Partikel / Körper aus einem andern Werkstoff eingebettet sind

Beispiel: Beton



Beton
Quelle: euroquarz.de



Faserverstärkte Verbundstoffe

Fasermaterial ist in einer umgebenden Matrix eingebettet; dabei gilt:

- » Fasern sind in der Regel optimiert für Zugbelastung
- » Matrix ist in der Regel optimiert auf Steifigkeit, Formstabilität und Druckbelastung

oftmals gilt:

- » Fasermaterial relativ hochpreisig
- » Matrixmaterial relativ niedrigpreisig



Laminieren von großem Windrotorblatt
Quelle: zwomp.de



Faserverstärkte Verbundstoffe

typische Fasermaterialien:

- » Glasfasern
- » Kohlefasern: hohe Festigkeit; zusätzlich elektrisch leitfähig
- » Polyaramide (z.B: Kevlar®): HighTec-Faser für Schutzwesten, Fallschirme, etc.; Fasermaterial sehr leicht, daher Einsatz im u.a. im Flugzeugbau)
- » Whiskers: feinste Keramikfasern aus SiC mit sehr hoher Festigkeit und Temperaturbeständigkeit bis ca. 1000°C
- » Stahlmatten: Bewehrungseisen für Stahlbeton

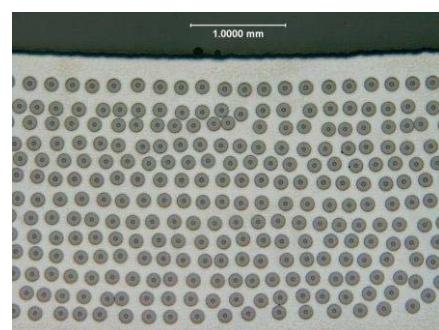
Faser-material	Zugfestig-keit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]
Polyaramid (z.B. Kelvar®)	ca. 2800	125.000	1450
Glasfasern	ca. 4500	85.000	2500
Kohlefasern	ca. 5700	275.000	1750
Whiskers (SiC)	ca. 20.000	480.000	3180

Festigkeit von Fasermaterial
Quelle: nach Ross,Maile - Werkstoffkunde für Ingenieure



Bewehrungsmatten für Stahlbeton
Quelle: feuerverzinken.com

9



MMC - Titanmatrix mit SiO₂-Fasern
Quelle: trl.com



GFK-Formbau
Quelle: becker-gfk.de

10

Teilchenverbundstoffe

Teilchenmaterial ist in einer umgebenden Matrix eingebettet;

Matrix wirkt dabei als Klebstoff zwischen den Teilchen
wichtigstes Beispiel für Teilchenverbundstoffe:

→ **Beton**

Beton besteht aus:

- » Zuschlagstoffe (**Partikel**): je nach Anwendung von Beton sind unterschiedliche Körnungen möglich: Feinsand (ca. 0,1 mm) bis Grobkies (ca. 60 mm)



Beton mit Zuschlagstoffen
Quelle: beton.org

Zement (**Matrix**): Kalk (CaO), Siliziumdioxid (SiO_2), Aluminiumdioxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) verfestigt u.a. zu Calciumsilikaten, Calciumaluminaten und Calciumaluminatferrit und verbindet dabei die Zuschlagsstoffe zu monolithischem Festkörper

- » Wasser: Fluidisierungsmittel
- » Bewehrungseisen („**Fasern**“): zur Aufnahme von Zugspannungen



Teilchenverbundstoffe

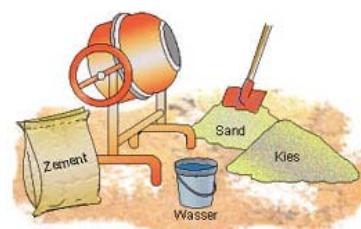
Herstellung und Verarbeiten von Beton:

Betone werden durch mechanisches Vermischen von Zuschlagsstoffen und Zement unter Zugabe von Wasser als Fluidisierungs- und Benetzungsmittel hergestellt pastöse, schütt- und fließfähige Masse dabei wird die Viskosität der jeweiligen Anwendung entsprechend eingestellt

bei Beton ist darauf zu achten, dass es während der Transport-, Pump- und Gießvorgänge nicht zu einer **Entmischung** von Zuschlag und Zement kommt

→ dadurch signifikante

Qualitätsminderung von verfestigtem Beton



Mischen von Beton
Quelle: baumarkt.de



Betonieren mit Betonpumpe
Quelle: de.wikipedia.org



Teilchenverbundwerkstoffe

weitere Teilchenverbundwerkstoffe:

Straßenbelag

» Matrix: Asphalt

» Partikel: Feinkies

Metallkeramik (Hartmetall):

» Matrix: Cobald

» Partikel: W₂C-Teilchen

Schneidkeramik:

» Matrix: Aluminiumoxid

» Partikel: ZrO₂-Teilchen

Schleifscheiben:

» Matrix: Epoxidharze

» Partikel: z.B. Diamant- oder Quarz-Teilchen



Struktur von Straßenbelag
Quelle: de.fotolia.com



Schleifscheibe
Quelle: erwinluecken.de



14

andere Verbundwerkstoffe:

Schichtverbundwerkstoffe:

» Sperrholz

» Sandwichplatten

» Wabenplatten

Beschichtungen (Beispiele)

» pulverbeschichtete Bleche

» bandbeschichtete Bleche

» verzinkte Stahlbleche

» lackierte Werkstoffe

» emaillierte Keramik

» etc.

generelle Problematik von Verbundwerkstoffen:

→ getrennte Entsorgung (da sortenreine
Trennung oft schwierig)



Wabenplatte
Quelle: nauticexpo.de



Pulverbeschichtung von Heizkörper
Quelle: maurer-ag.ch

16

Fragenkatalog Werkstoffkunde

1. Struktur und Aufbau von Werkstoffen

- 1.1. Nennen Sie drei Bindungsarten zwischen Atomen bzw. Molekülen.
- 1.2. Worin liegt der Unterschied zwischen einer amorphen und kristallinen Struktur?
Skizzieren Sie eine teilkristalline Struktur.
- 1.3. Wie nennt man die kleinste Einheit einer Gitterstruktur?
- 1.4. Skizzieren Sie eine kubisch-raumzentrierte Gitterstruktur.
- 1.5. Wie viele Atome werden zum Aufbau eines kubisch-flächenzentrierten Gitters benötigt?
- 1.6. Sie sollen in einen kubischen Behälter möglichst viele Bälle gleicher Größe einfüllen.
Welche Anordnung wählen Sie für die Bälle und wie viel % des Behälters werden dann noch „Luft sein“?
- 1.7. Von welcher Größe ist die Kristallstruktur von Metallen abhängig? Wie lautet der Fachbegriff hierfür? Stellen Sie dies grafisch beispielhaft für Fe dar.
- 1.8. Wodurch unterscheiden sich Ideal- von Realkristallen?
- 1.9. Warum ergeben sich durch Einlagerung von Fremdatomen Verzerrungen im Gitter?
- 1.10. Wie können Liniendefekte in Gitterstrukturen entstehen? Nennen Sie zwei Phänomene.
- 1.11. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Kristallgröße und der Festigkeit eines Werkstoffes?
- 1.12. Warum wirken sich 0-, 1- und 2-dimensionale Fehler positiv auf die Festigkeit aus, 3-dimensionale Fehler dagegen nicht?
- 1.13. Beim Biegen von Blech ändern sich die Werkstoffeigenschaften an der Biegestelle.
Nennen Sie zwei Eigenschaften und wie sie sich verändern.
- 1.14. Skizzieren Sie die Kornstruktur eines Stahls vor und nach einem Walzvorgang.
- 1.15. Warum muss zwischen zwei Umformvorgängen ein Werkstück u.U. „zwischengeglüht“ werden. Welche Parameter sind für diesen Vorgang einzustellen?
- 1.16. Skizzieren Sie ein Löslichkeitsdiagramm von einer Zweitstofflegierung, die im festen Zustand vollkommen löslich sind. Tragen Sie die Begriffe „Soliduslinie“, „Liquiduslinie“, „Schmelze“, „Mischkristall“ sowie „Schmelze/Mischkristall“ ein.
- 1.17. Skizzieren Sie einen Substitutions- und einen Einlagerungs-Mischkristall.

2. Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen

- 2.1. Nennen Sie 4 mechanische Anforderungen an Werkstoffe
- 2.2. Skizzieren Sie ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einen zäh-elastischen Werkstoff.
Tragen Sie die Begriffe „Streckgrenze“, „Zugfestigkeit“, „Bruchdehnung“, Hook´sche Gerade ein
- 2.3. Bei welchen Werkstoffen wird anstelle der Streckgrenze Re die sog. Dehngrenze Rp0,2 angegeben? Wie ist diese definiert?

- 2.4. Mit welcher Kraft F kann ein Rundstab ($d=10\text{mm}$) aus Stahl ($\text{Re}=360\text{N/mm}^2$) max. belastet werden, ohne sich plastisch zu verformen?
- 2.5. Welche Längenänderung erfährt ein Stahlseil einer Liftanlage ($l_0=600\text{m}$), wenn es mit $s=300\text{N/mm}^2$ belastet wird? ($E\text{-ModulStahl}=210.000\text{N/mm}^2$)
- 2.6. Wie ist der Begriff der Härte definiert?
- 2.7. Worin liegt (messtechnisch gesehen) der Hauptunterschied zwischen den Härteprüfverfahren Brinell und Vickers zu dem Verfahren nach Rockwell?
- 2.8. In einer technischen Zeichnung finden Sie die Angebe HRC45. Welche Information steckt dahinter?
- 2.9. Frage eines Studenten: „Besteht ein Zusammenhang zwischen der Härte und der Festigkeit eines Werkstoffes?“
- 2.10. Lt. Tabellenbuch beträgt bei einem Stahl mit der Bezeichnung S235JR die Kerbschlagbiegearbeit bei 27°C bei 20°C. Wie wird diese Arbeit gemessen (event. Skizze) und wie ändert sich der Betrag qualitativ bei einer Temperatur von 0°C?

3. Eisenwerkstoffe

- 3.1. Wie ist der Begriff Stahl definiert?
- 3.2. Nennen Sie drei Gründe, warum Stahl nach wie vor ein viel eingesetzter Konstruktionswerkstoff ist.
- 3.3. Bringen Sie die Begriffe in die richtige zeitliche Reihenfolge im Prozess der Stahlherstellung: Nachbehandlung – Eisenerz – Roheisen – Stranggießen – Frischen – Hochofen
- 3.4. Skizzieren Sie qualitativ ein Eisen-Kohlenstoff-Diagramm für den für Stahl relevanten Bereich. Geben Sie an, welche Mischkristalle bei den folgenden Bedingungen vorliegen und in welcher Form der Kohlenstoff in das jeweilige Kristallgitter eingebunden ist (Hinweis: in der Klausur bekommen Sie ein Fe-C-Diagramm mit Werten!):
 - 3.4.1. 20°C, 0,3% C
 - 3.4.2. 20°C, 0,8 %C
 - 3.4.3. 900°C, 1,1% C
- 3.5. Erläutern Sie die physikalischen Vorgänge beim Härteln, d.h. warum kann der Werkstoff nach der Wärmebehandlung härter sein als davor.
- 3.6. Auf welche Temperatur muss ein Stahl mit einem C-Anteil von 1,5% für das Härteln erwärmt werden?
- 3.7. Wie ist Gusseisen definiert und warum ist Gusseisen im Vergleich zu Stahl spröde?
- 3.8. Ein Werkstück ist nach dem Schweißen sehr verzogen. Wie können diese Formänderungen rückgängig gemacht werden?
- 3.9. Welche generellen Informationen erhalten Sie aus den nachfolgenden Stahlbezeichnungen
 - 3.9.1. E355
 - 3.9.2. 42CrMo4
 - 3.9.3. X12CrNi18-8

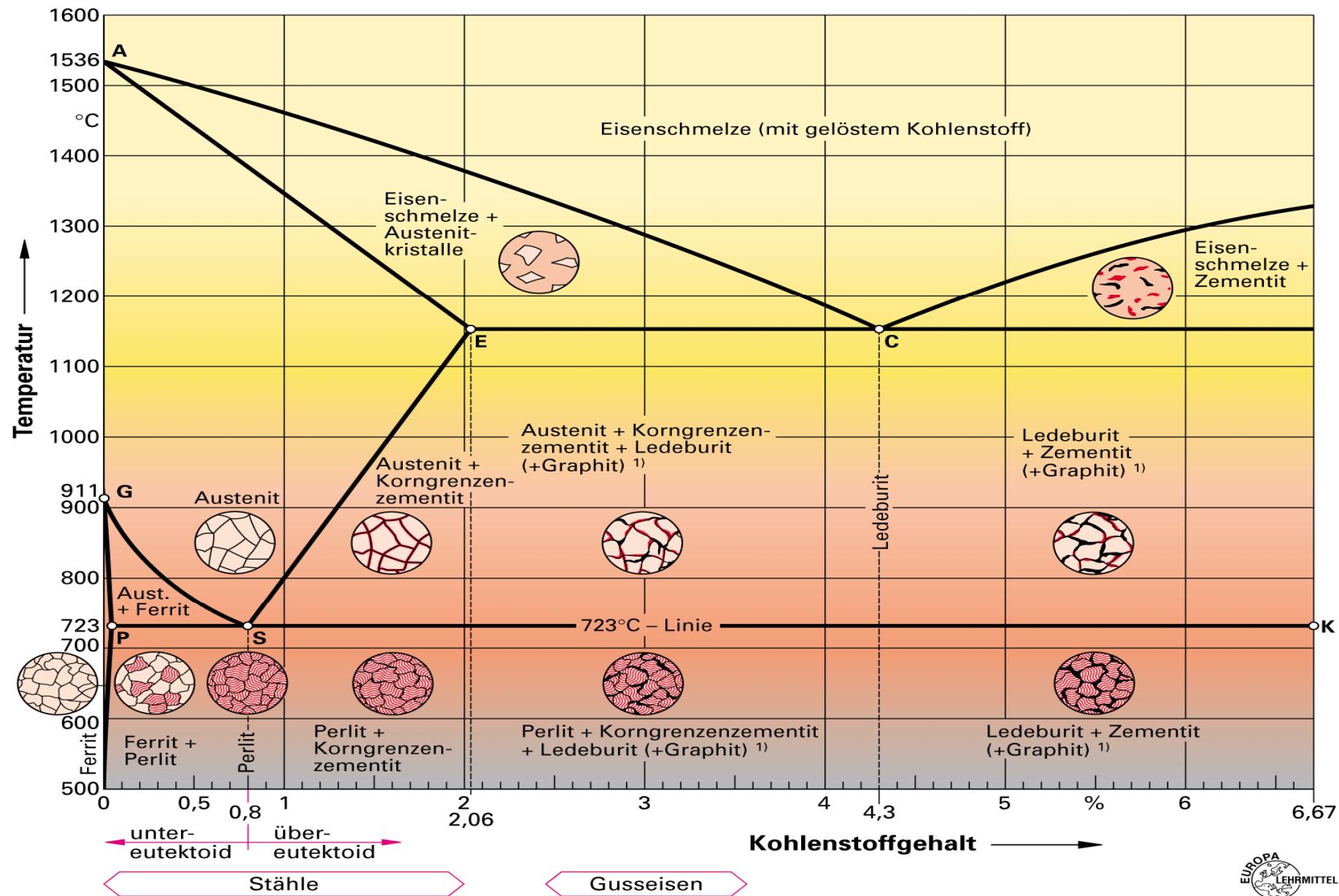
- 3.10. Nennen Sie je eine Eigenschaft für die folgenden Stähle: unlegierter Baustahl, Werkzeugstahl, Automatenstahl, Federstahl
- 3.11. Welche Legierungselemente sind hauptverantwortlich, um einen Stahl korrosionsbeständig zu machen?
- 3.12. Skizzieren Sie die Gefügestruktur von Grauguss mit Lamellen (GJL)- und Kugelgraphit (GJS). Welchen wesentlichen Vorteil hat der GJS- gegenüber dem GJL-Grauguss?

4. NE-Metalle

- 4.1. Wie werden Leicht- von Schwermetallen unterschieden? Nennen Sie je zwei Vertreter.
- 4.2. Worin liegt ein wesentlicher Nachteil bei der Herstellung von Aluminium im Vergleich zu Stahl?
- 4.3. Reinaluminium ist durch seine geringe Festigkeit als Konstruktionswerkstoff ungeeignet. Wie erreicht man, dass Aluminium als Konstruktionswerkstoff eingesetzt werden kann?
- 4.4. Nennen Sie zwei Vorteile von Aluminium-Werkstoffen gegenüber Stahl aus maschinenbaulicher Sicht.
- 4.5. Nennen Sie drei technische Anwendungsgebiete von Aluminium-Werkstoffen.
- 4.6. Nennen Sie drei technische Anwendungsgebiete des Grundmetalls Kupfer.

5. Kunststoffe

5.1.



Stähle

Gusseisen

