



Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

Sommersemester 2020



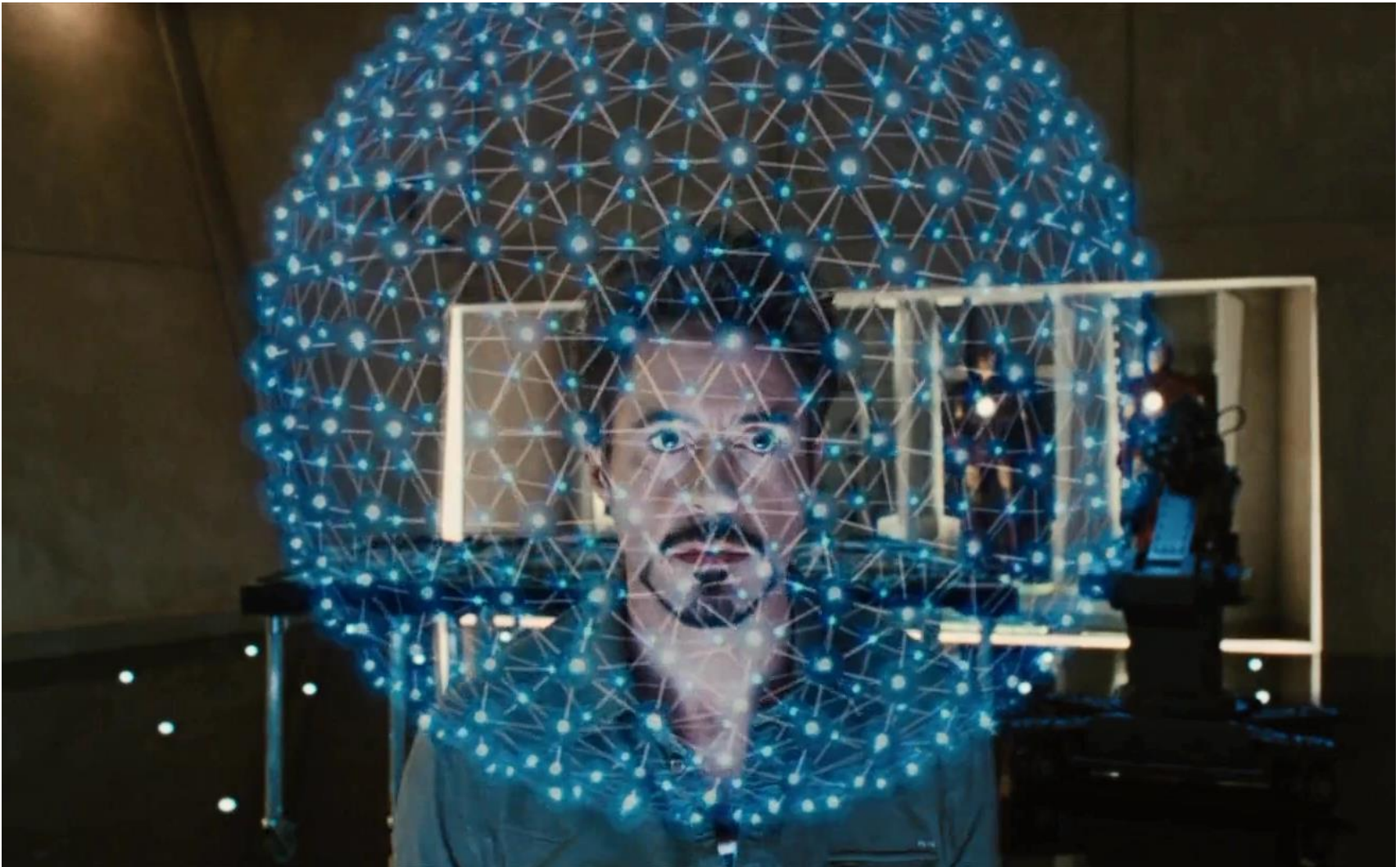
1. Einführungsveranstaltung
2. Grundlagen der Werkstoffkunde
3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe
4. Titanwerkstoffe
5. Aluminiumwerkstoffe
6. Magnesiumwerkstoffe
7. Zinkwerkstoffe
8. Kupfer-, Blei- und Zinnwerkstoffe
9. Seltene Erden

1. Einführungsveranstaltung



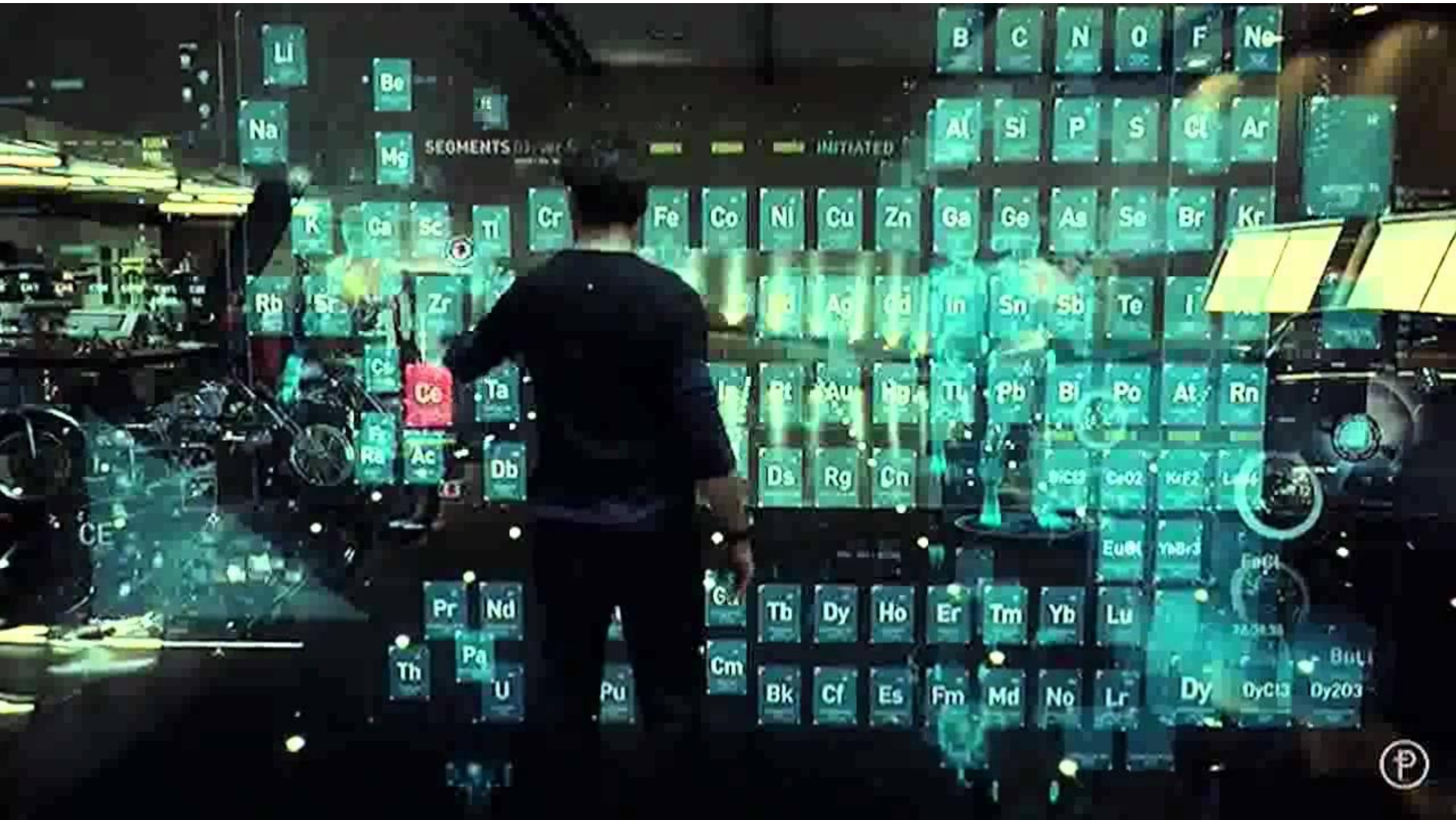
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/75/Jigsaw.svg/1200px-Jigsaw.svg.png>

Wie findet man den richtigen Werkstoff?

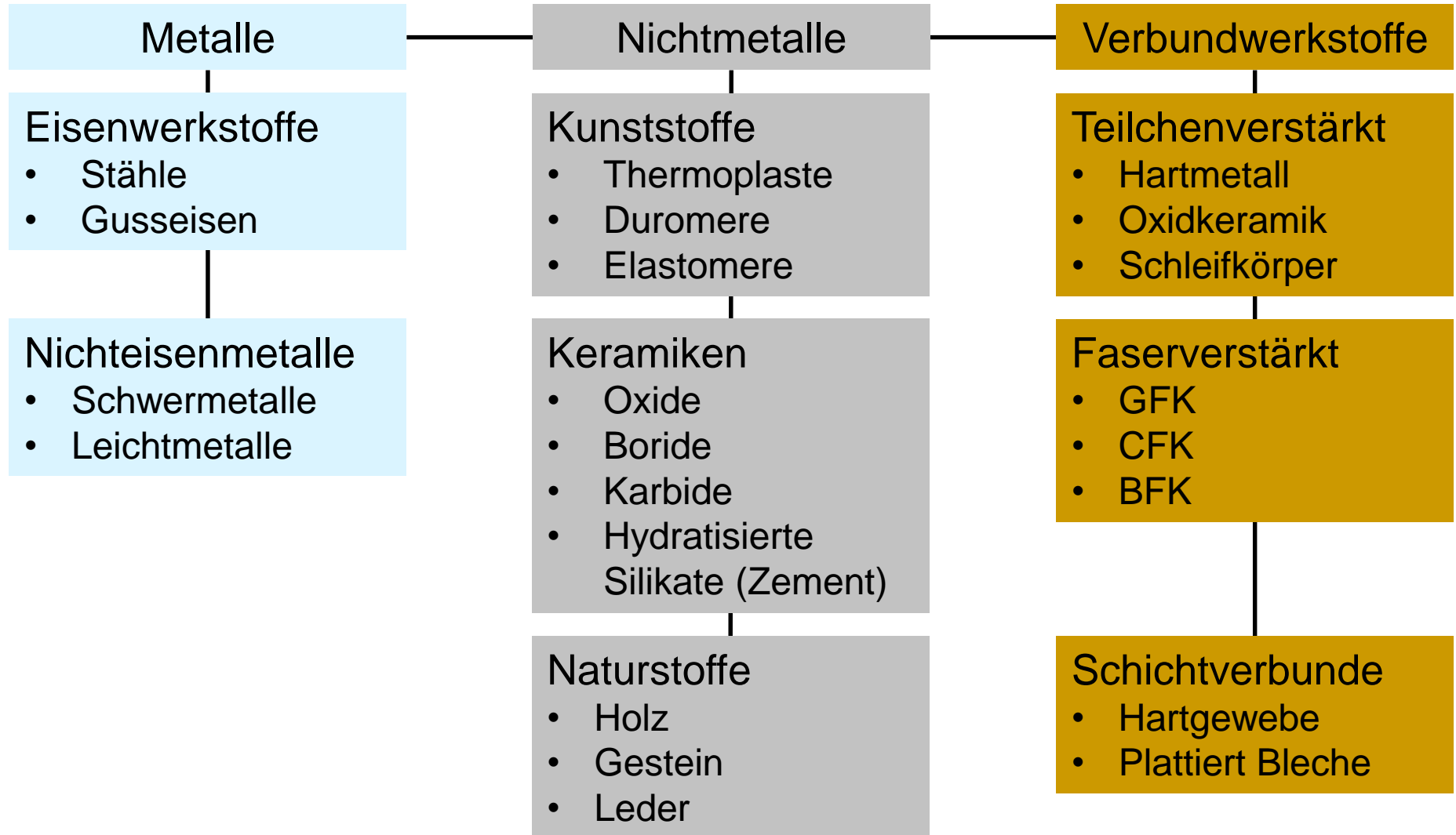


https://vignette.wikia.nocookie.net/marvelcinematicuniverse/images/d/da/Atomic_Structure.png/revision/latest?cb=20140926111042

Das Periodensystem der Elemente



<https://oiger.de/wp-content/uploads/IronMan-Elemente.jpg>



Metalle

Eisenwerkstoffe

- Stähle
- Gusseisen

Nichteisenmetalle

- Schwermetalle
- Leichtmetalle

Zink

Kupfer

Blei

Zinn

Seltene Erden

Magnesium

Metalle

Eisenwerkstoffe

- Stähle
- Gusseisen

Nichteisenmetalle

- Schwermetalle
- Leichtmetalle

Zink

Kupfer

Blei

Zinn

Seltene Erden

Magnesium

Aluminium

Titan

Magnesium

Konstruktions- / Strukturwerkstoffe

Vorwiegend
mechanische
Belastung

Gehäuse,
Träger,
Rahmen

Phoenix – ein Auto aus Bambus.
Foto: albrechtbirkner.com



Werkzeugwerkstoffe

Werkzeugen
(HSS-Stähle,
Hartmetalle,
Cermets)



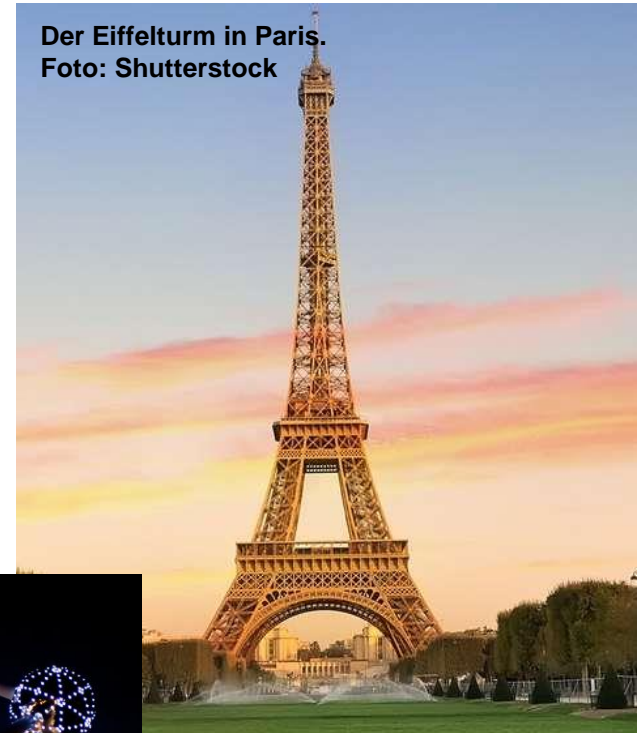
Wendeschneidplatten.
Foto: technik-einkauf.de

Künstliche Muskeln für
Anwendungen in Industrie und
Prothetik- Spinnen-Greifer
passt sich an.
Foto: Oliver Dietze



Funktionswerkstoffe

Besondere
elektrische,
mechanische,
magnetische,
akustische,
optische oder
biologisch-chemische
Eigenschaften



<https://www.stahlbau.de/unternehmen/themenarchiv/beeindruckende-bauwerke-der-stahl-weihnachtsbaum-von-rio>, <https://www.stahl-blog.de/index.php/bauwerke-mit-stahl-die-begeistern/>, <https://www.falstaff.de/nd/kampf-um-das-eiffelturm-restaurant/>, <https://www.klm.com/destinations/de/de/article/the-atomium-symbol-of-brussels>

**Flughafen in Mactan Cebu: Tragwerk und Dachstruktur komplett aus Holz.
Foto: Rubner Holzbau**



**Dinge aus Naturstoffen,
z. B. aus Holz**

Bleistifte.



**Kilden Performing Arts Centre in Kristiansand
Foto: Hufton Crow**



<https://www.derstandard.de/story/2000086460309/groesstes-holzgebaeude-asiens-stammt-aus-oesterreich>, <https://www.visitnorway.de/reiseziele/region-suden/kristiansand/listings-kristiansand/kilden-teater-og-konserthus-performing-arts-centre/36977/>, <https://german.alibaba.com/product-detail/promotion-customized-mini-wooden-hotel-pencil-for-hotel-supplies-60377168299.html>



Ein Haus aus PET-Flaschen
Foto: imgur.com



Elefant aus PET-Flaschen
Foto: Sergey Karpov

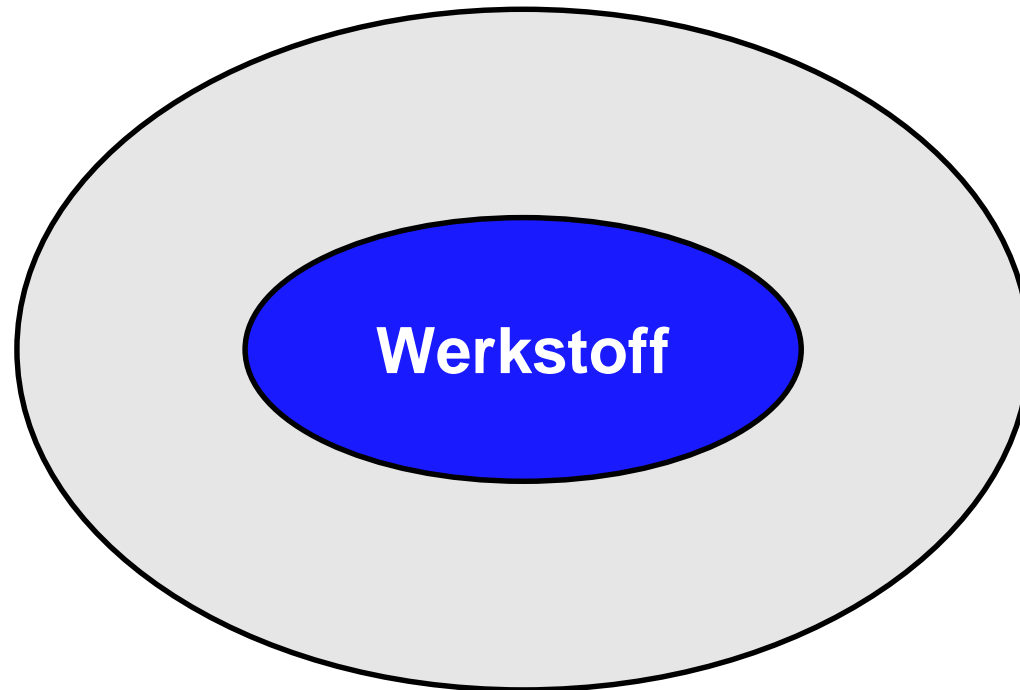
Dinge aus Kunststoff



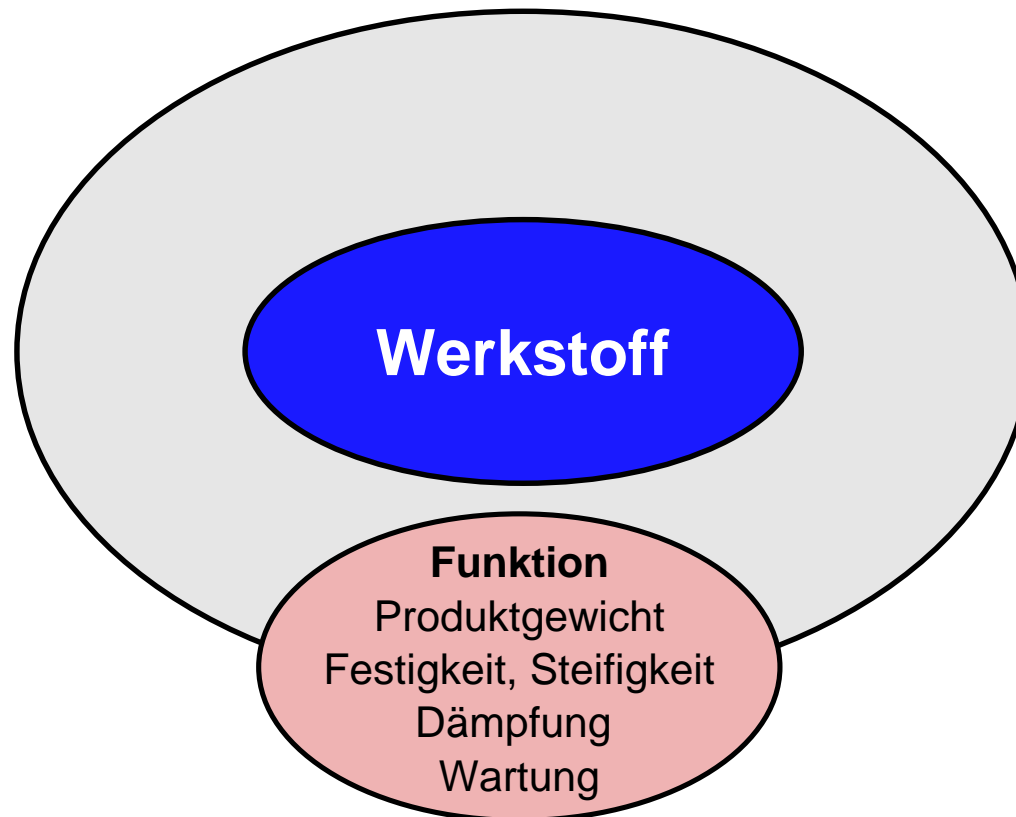
Plastikstrohalm
Foto: Eigens - Fotolia.com

<https://nettipps.de/pet-flaschen-recycling-oder-ein-haus-aus-pet-plastikflaschen-bauen1/>, <https://www.ecowoman.de/upcycling-nicht-gut-fuer-umwelt-wie-sinnvoll-ist-upcycling-und-recycling-5020>, <https://www.umweltberatung.at/warum-plastik-vermeiden>

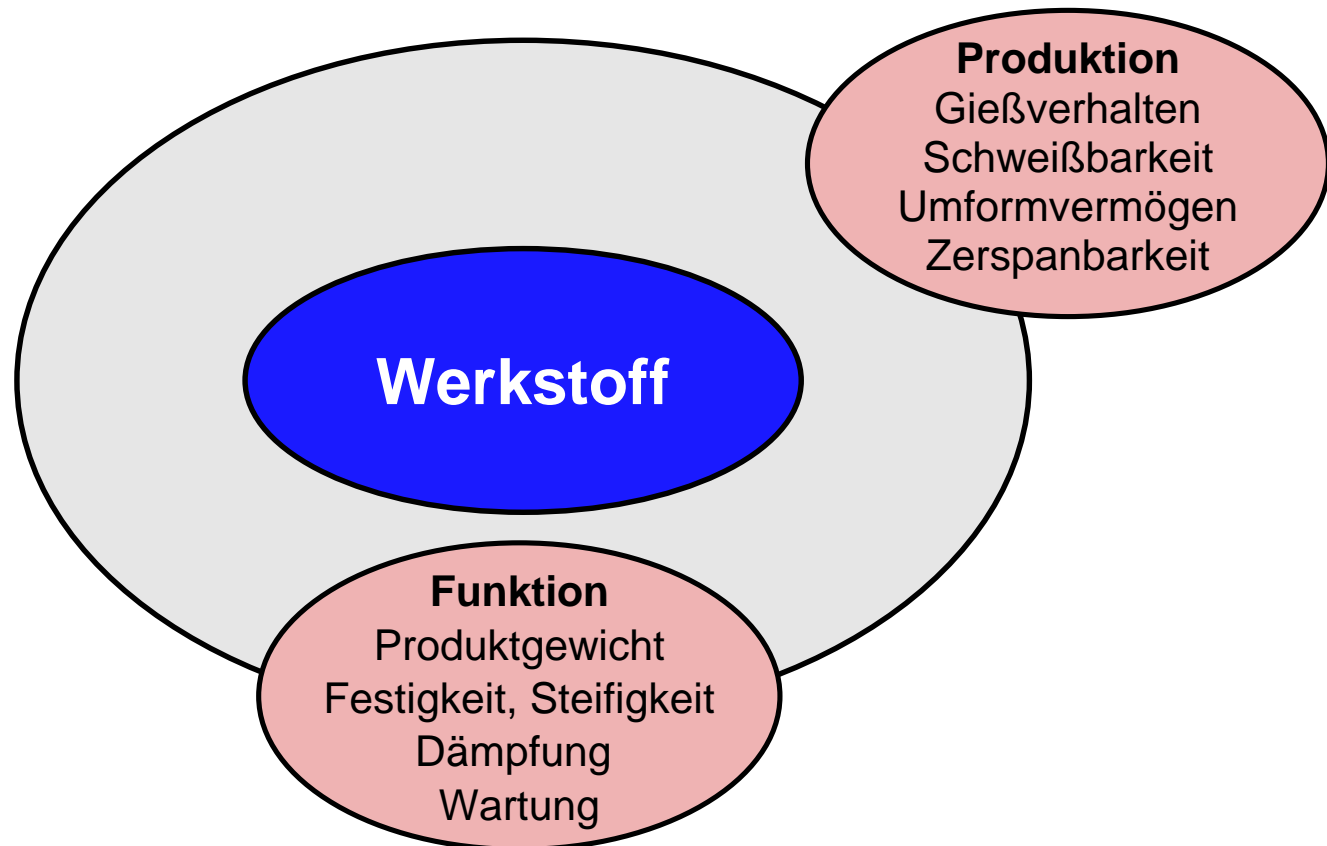
Anforderungen an Werkstoffe



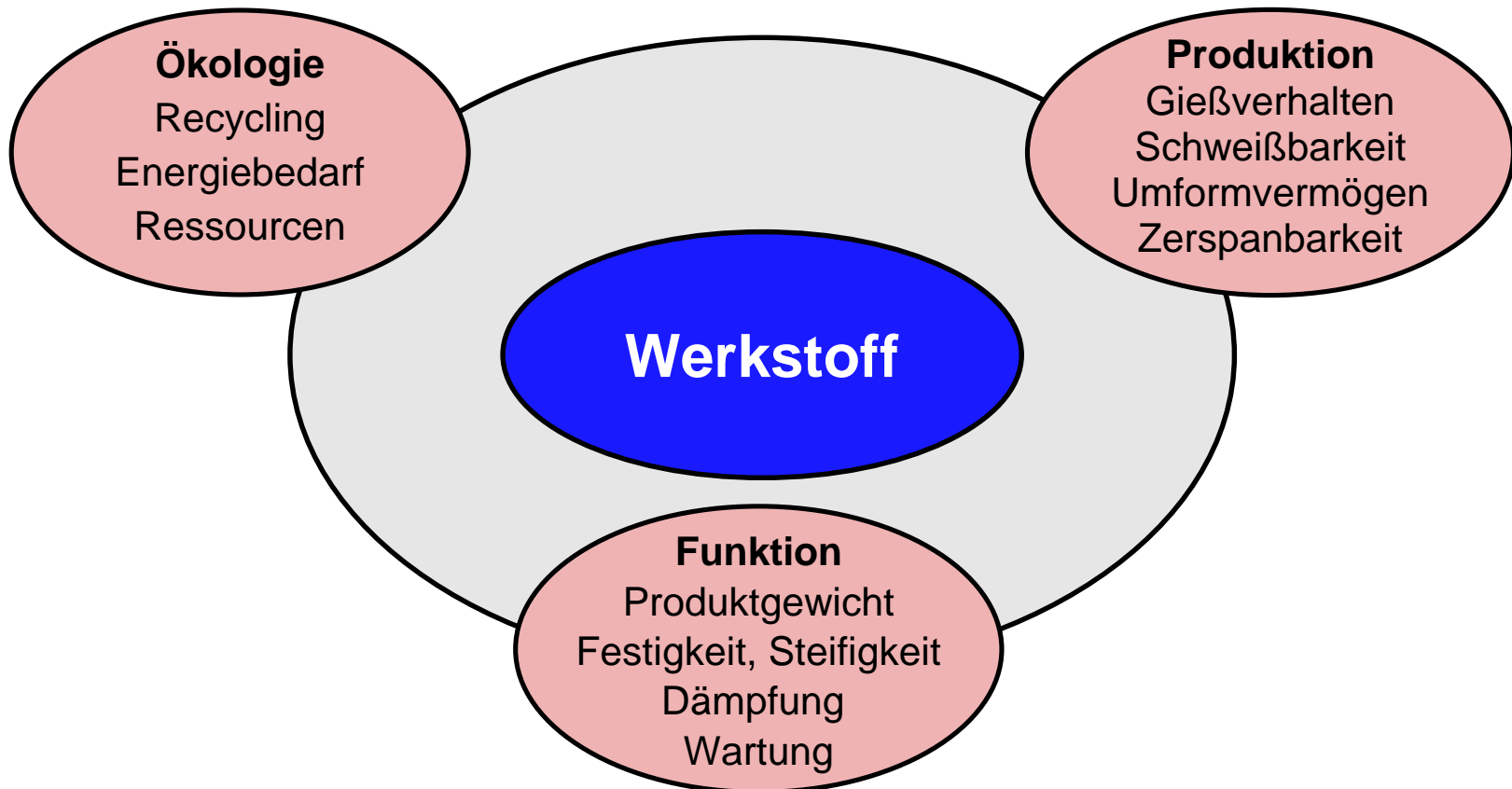
Anforderungen an Werkstoffe



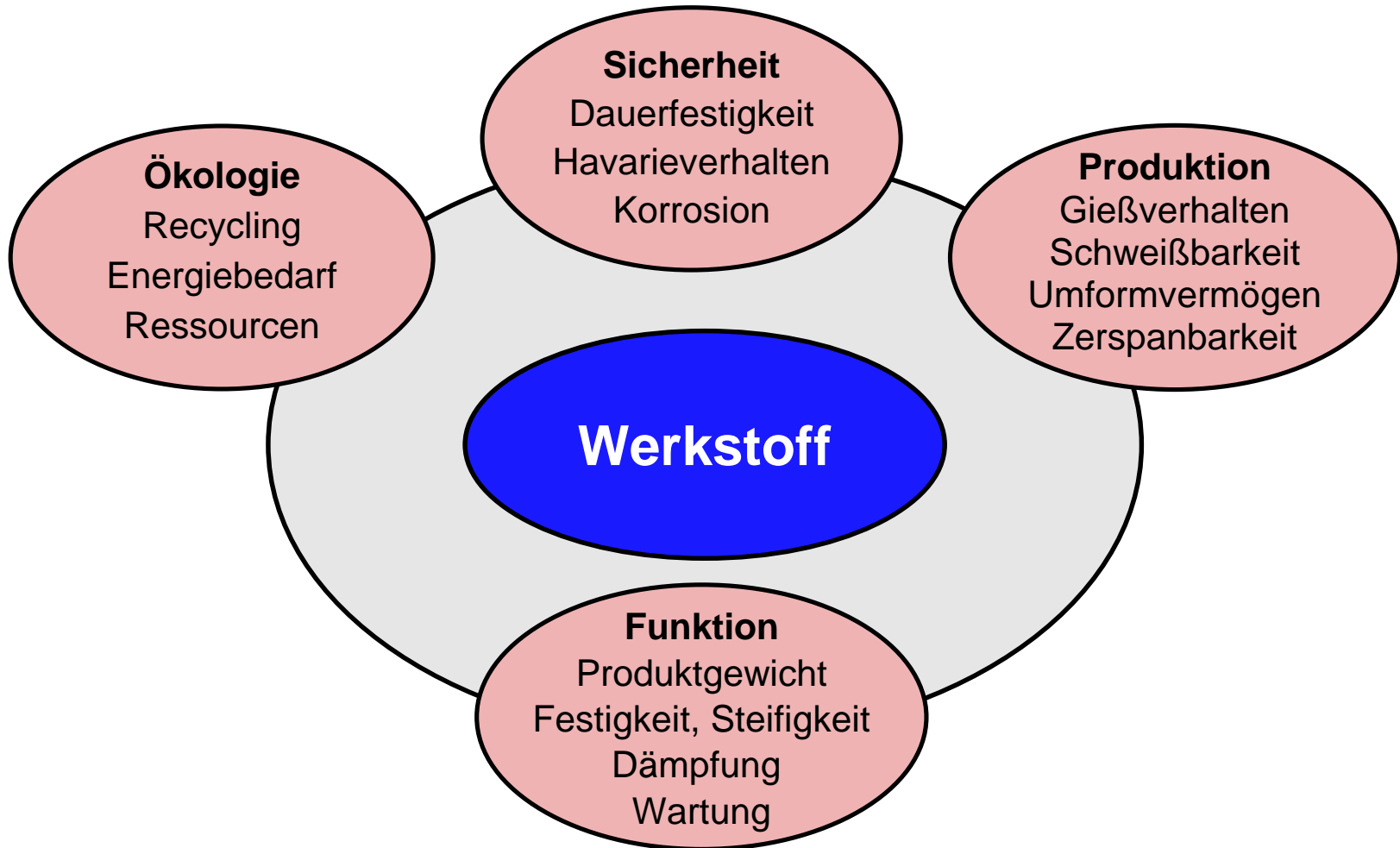
Anforderungen an Werkstoffe



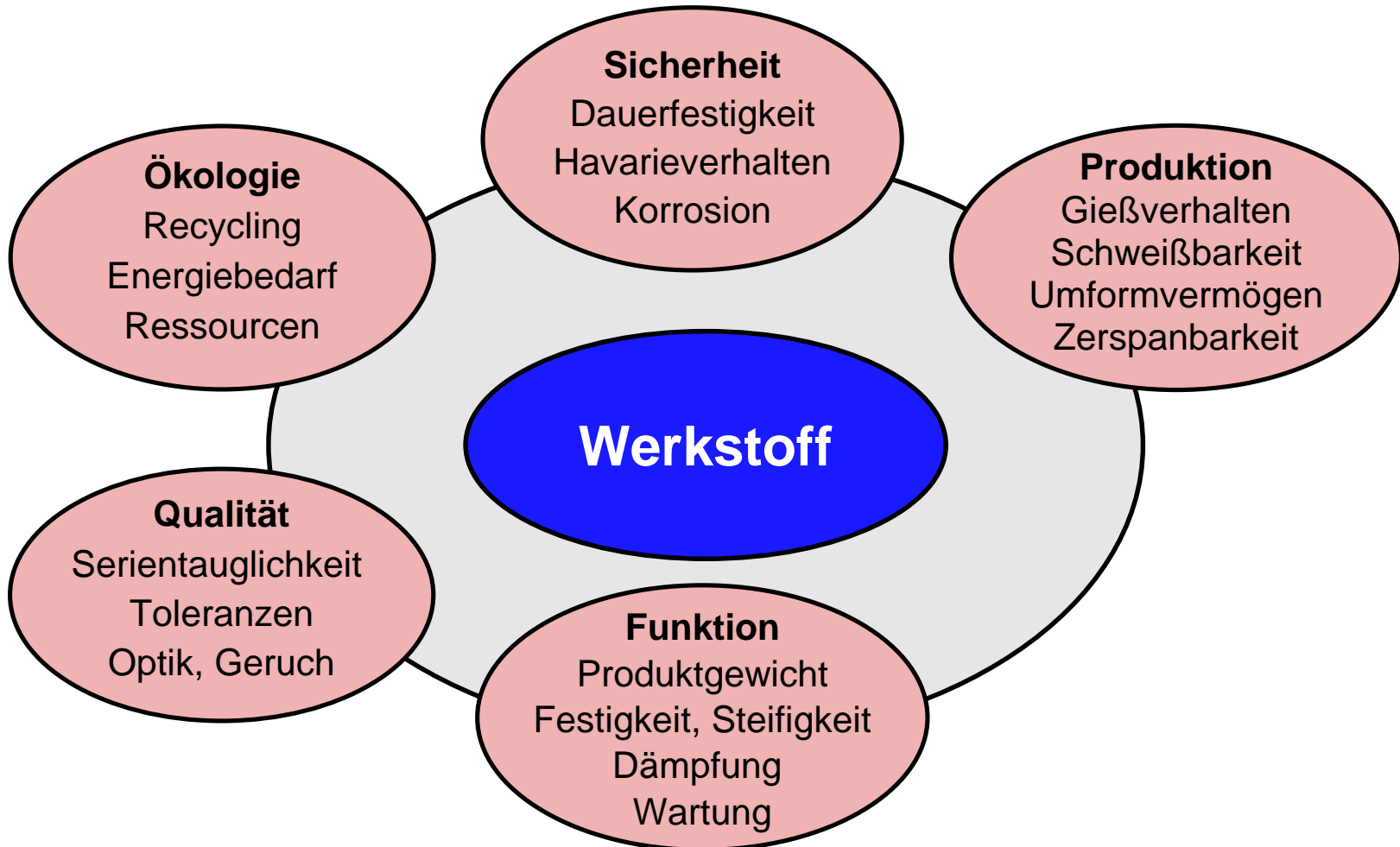
Anforderungen an Werkstoffe



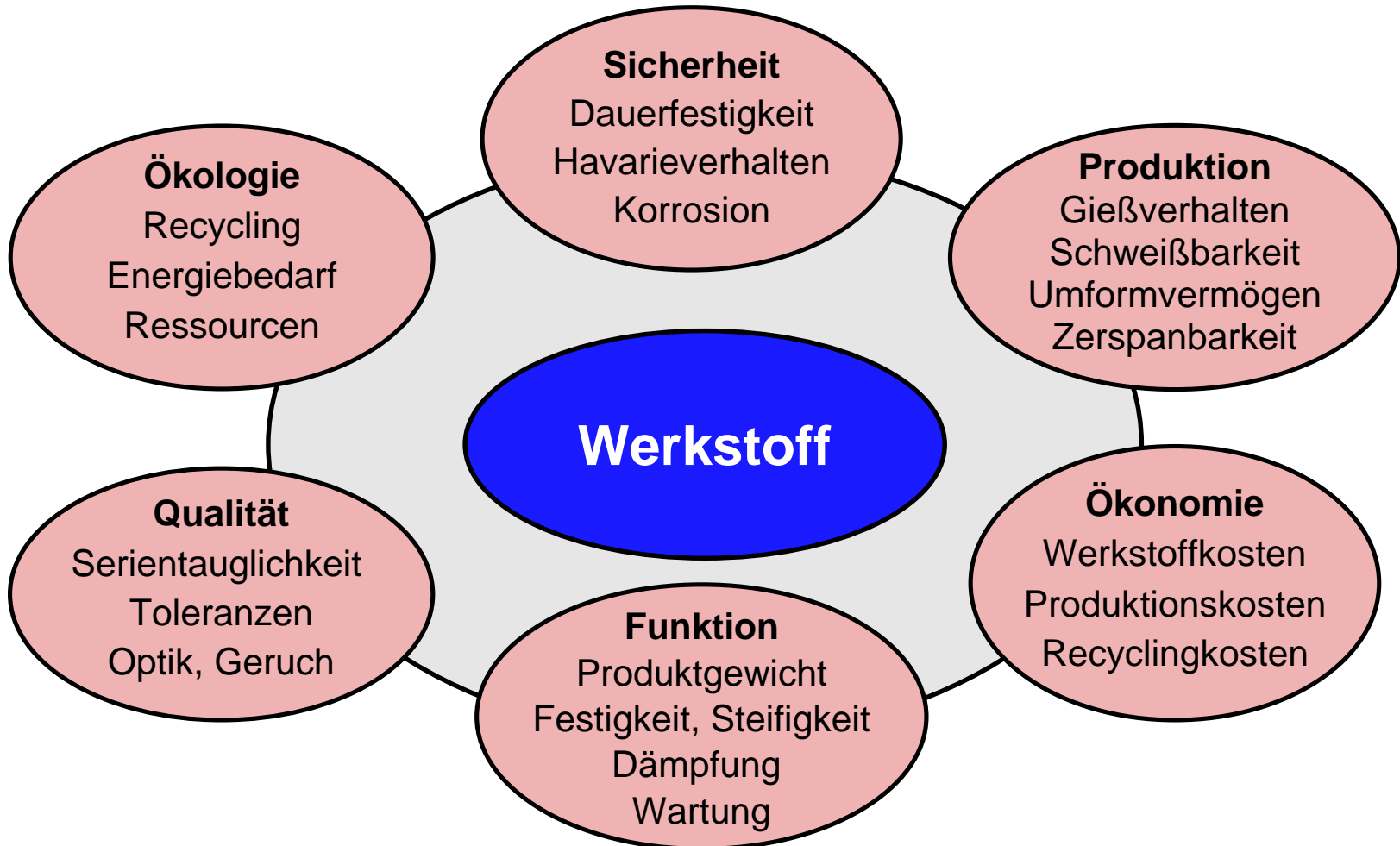
Anforderungen an Werkstoffe



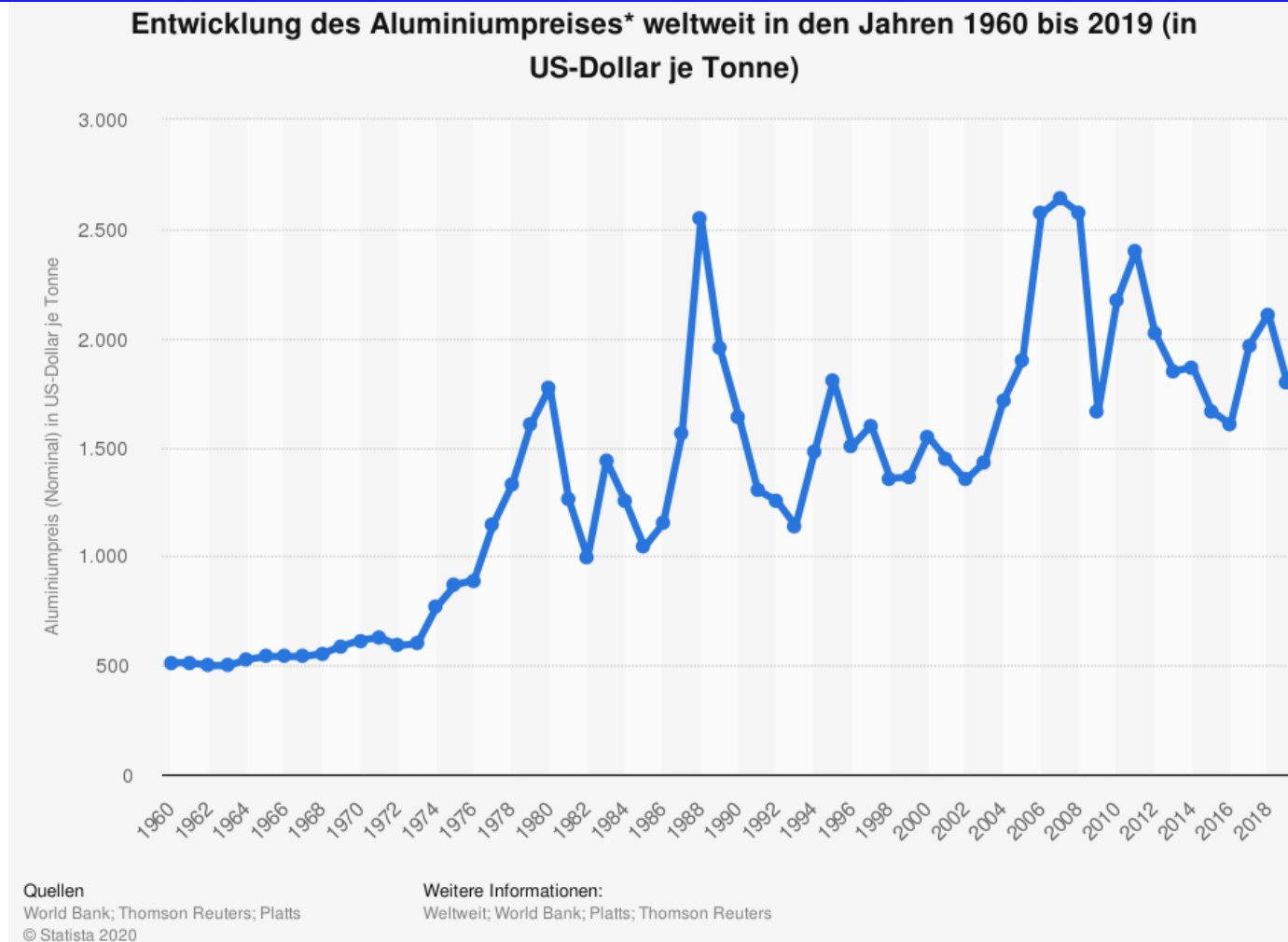
Anforderungen an Werkstoffe



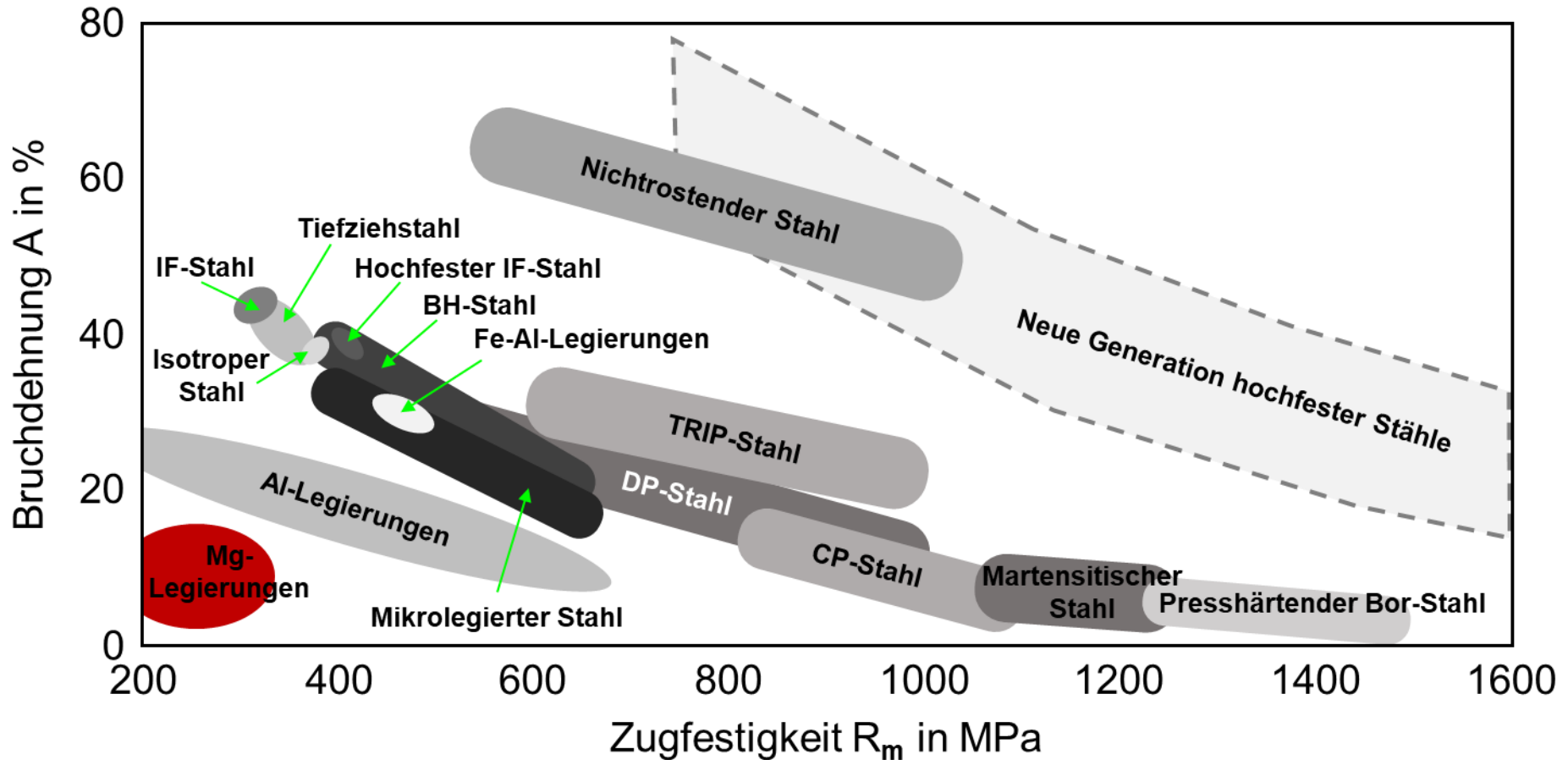
Anforderungen an Werkstoffe



Anforderung „Preisentwicklung“

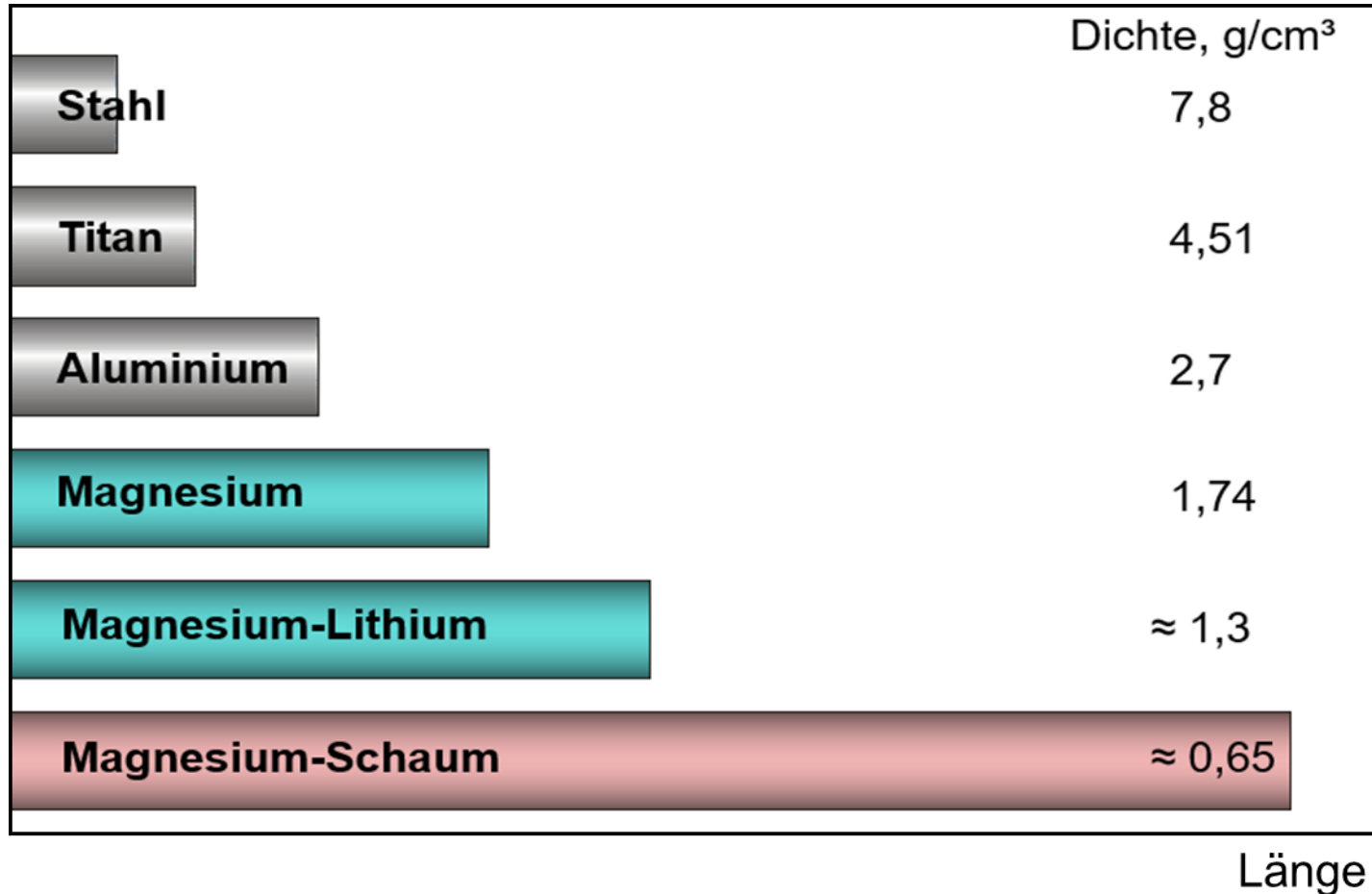


Anforderung „Eigenschaftsprofile“



Verändert nach: https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2015/01-02/17_leichtbau_tagung_01j2015/17_leichtbau_tagung_01j2015.php

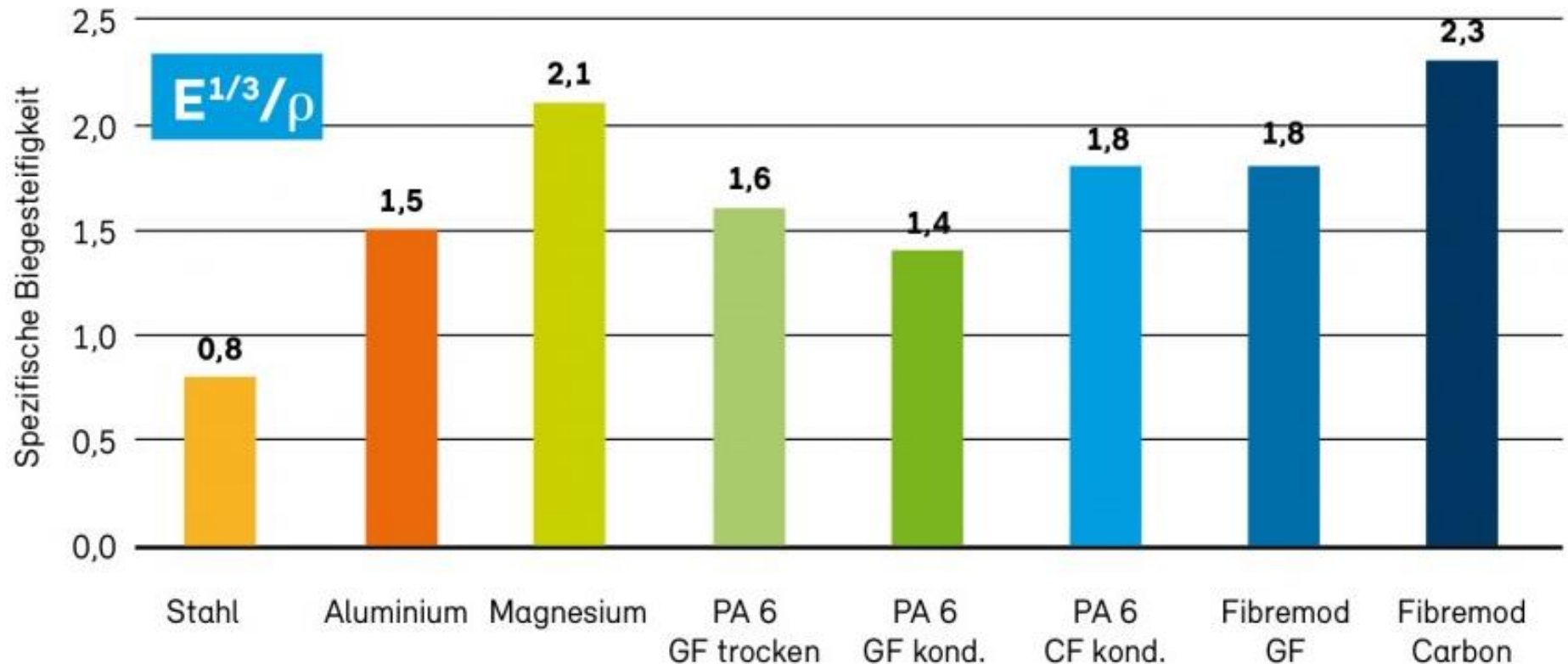
Anforderung „Gewicht“



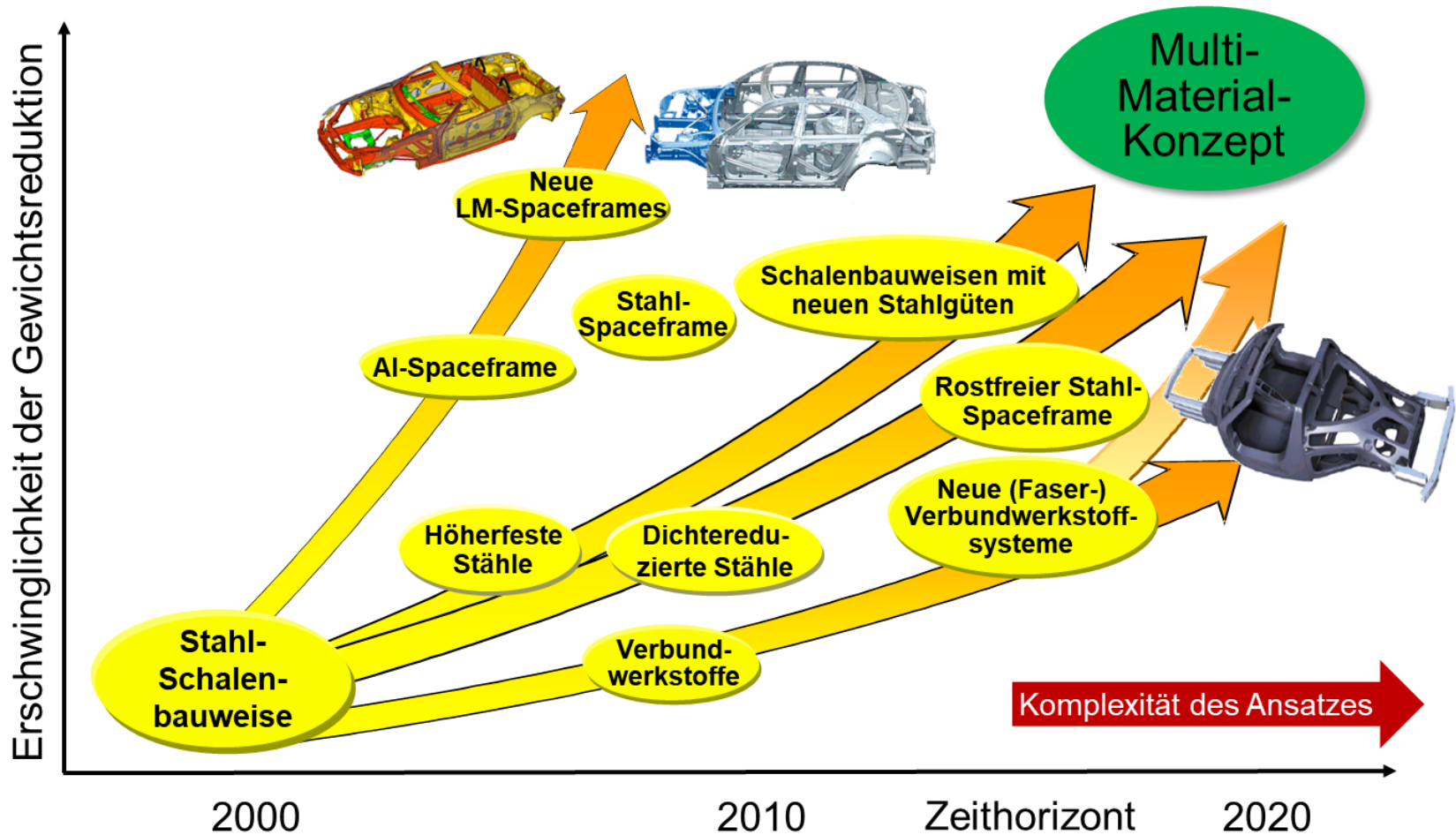
Verändert nach: Skript Konstruktionswerkstoffe, Institut für Werkstoffkunde Universität Hannover, 2016

Anforderung „Gewicht“

Bildquelle: Borealis



Anforderung „Leichtbau“



Anforderung „Optik“



<https://luxussachen.kaufen/luxusautos-kaufen/>, https://www.nieuwsblad.be/cnt/dmf20130604_00609932, <https://www.amazon.de/XCDX-Porzellan-Kaffeaset-Diamantbecher-Handgefertigte-Luxusartikel/dp/B07KT3VZBN>, <https://www.curioctopus.de/read/17515/diese-9-unerhort-teuren-produkte-beweisen-dass-luxus-keine-grenzen-kennt>, <https://www.wunderweib.de/luxus-fuer-das-kinderzimmer-23402.html>

Anforderung „Sicherheit“



Anforderung „Sicherheit“





Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

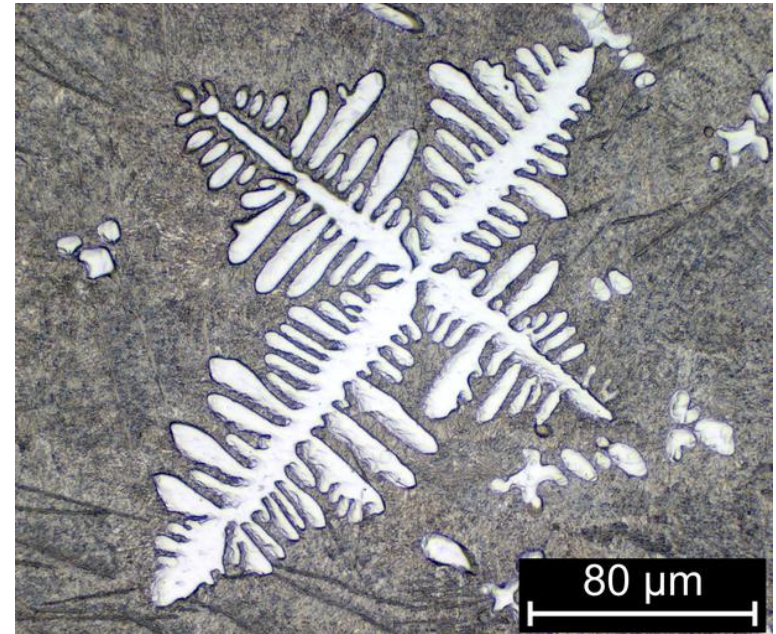
Sommersemester 2020



1. Einführungsveranstaltung
2. Grundlagen der Werkstoffkunde
3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe
4. Titanwerkstoffe
5. Aluminiumwerkstoffe
6. Magnesiumwerkstoffe
7. Zinkwerkstoffe
8. Kupfer-, Blei- und Zinnwerkstoffe
9. Seltene Erden



2. Grundlagen der Werkstoffkunde



Bindungsarten

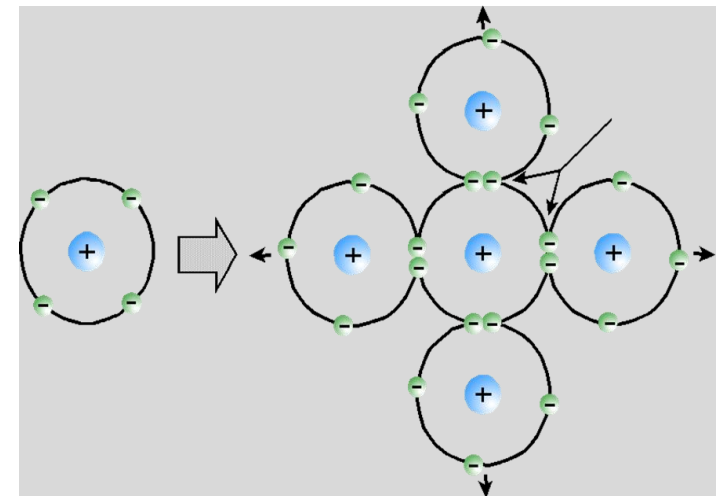
Mechanismen der gegenseitigen Bindung zwischen Atomen

- Kovalente Bindung
(Atombindung, Elektronenpaarbindung, homöopolare Bindung)
- Ionenbindung
(heteropolare Bindung)
- Metallbindung
- Van der Waals-Bindung
(wenn H beteiligt: Wasserstoffbrücken-Bindung)

Bindungsarten - kovalente Bindung

Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen zwischen den Atomen ist erhöht

Atome „teilen“ sich die Elektronen („Elektronenpaarbindung“) und erreichen dadurch Edelgaskonfiguration



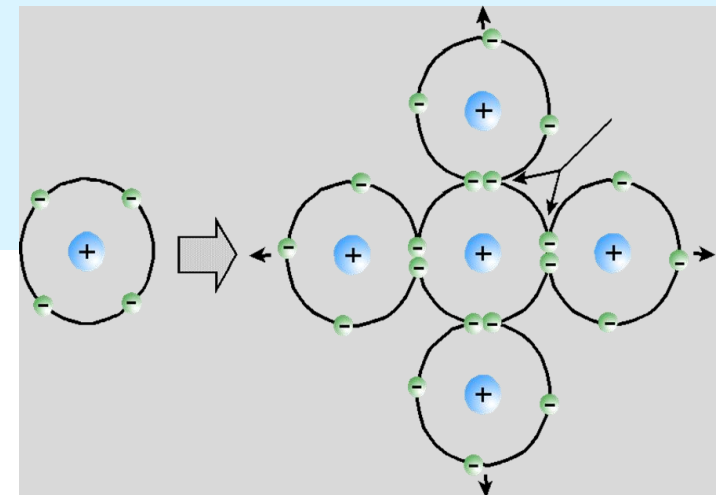
Bindungsarten - kovalente Bindung

Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen zwischen den Atomen ist erhöht

Atome „teilen“ sich die Elektronen („Elektronenpaarbindung“) und erreichen dadurch Edelgaskonfiguration

- ausgeprägte Bindungsrichtungen
- große Bindungsenergie, daher feste Bindung, geringe Duktilität
- geringe elektrische/thermische Leitfähigkeit
- viele Keramiken, Halbleiter, Polymere

Beispiel: Silizium

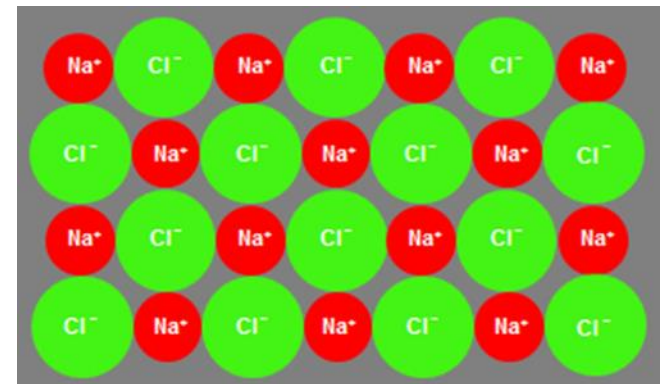
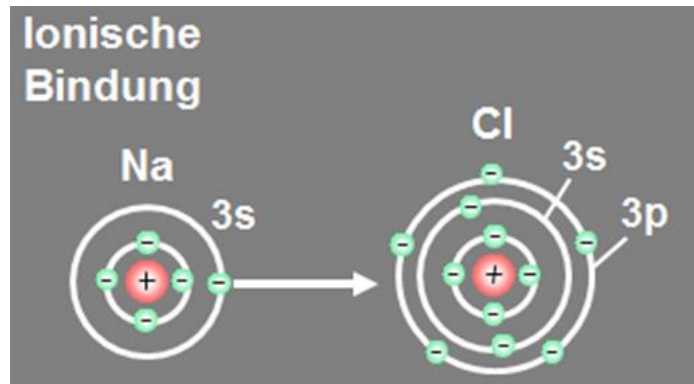


Bindungsarten - Ionenbindung

Voraussetzung: Unterschiedliche Atomarten

Ein Elektron wird an ein anderes Atom abgegeben, Atome erreichen dadurch eine Edelgaskonfiguration

Bindung wird durch die kugelsymmetrische elektrostatische Anziehung verursacht



Bindungsarten - Ionenbindung

Voraussetzung: Unterschiedliche Atomarten

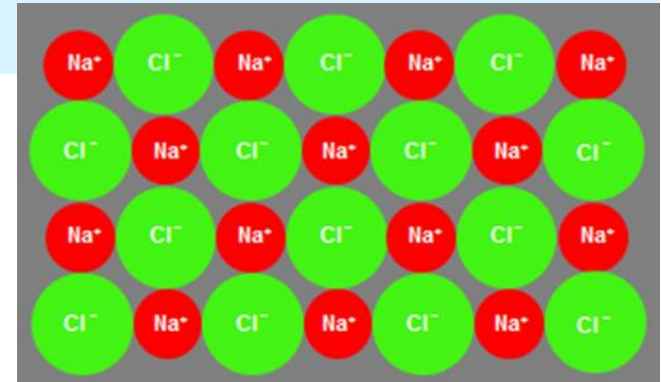
Ein Elektron wird an ein anderes Atom abgegeben, Atome erreichen dadurch eine Edelgaskonfiguration

Bindung wird durch die kugelsymmetrische elektrostatische Anziehung verursacht

- keine Vorzugsrichtung in der Bindung
- Ionenkristalle sind dicht gepackt
- Ionenkristalle haben eine geringe elektrische Leitfähigkeit

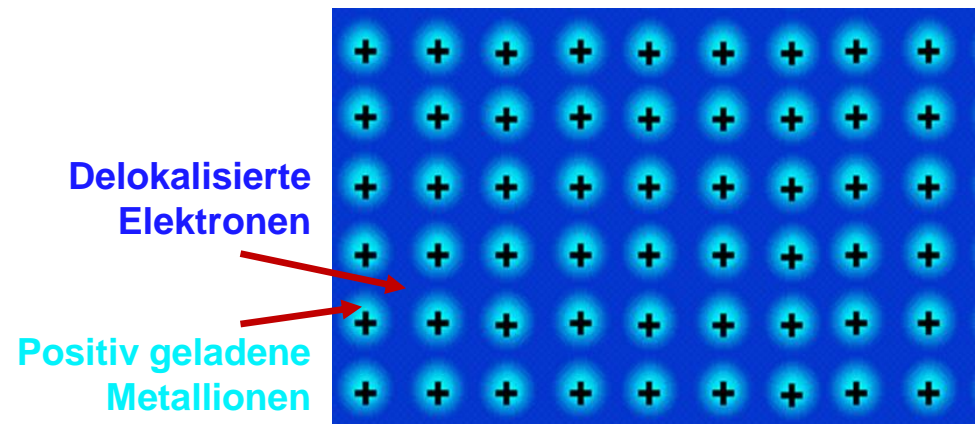
Beispiel: Kochsalz

**Ionische
Bindung**



Bindungsarten - Metallbindung

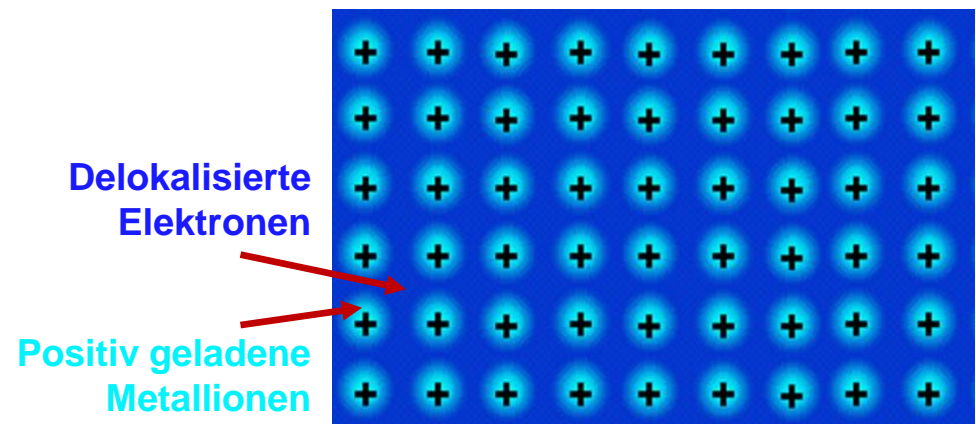
Elektronengasmodell: Die Metallatome geben ihre Valenzelektronen an ein „Elektronengas“ ab, das die Atome gleichmäßig umgibt.



Bindungsarten - Metallbindung

Elektronengasmodell: Die Metallatome geben ihre Valenzelektronen an ein „Elektronengas“ ab, das die Atome gleichmäßig umgibt.

- keine Vorzugsrichtung in der Bindung
- Metallkristalle sind dicht gepackt
- Metallkristalle haben eine gute elektrische Leitfähigkeit



Bindungsarten - Metallbindung

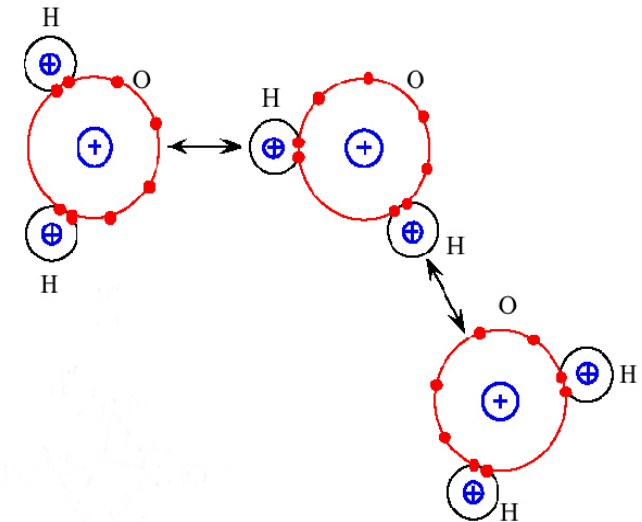
Eigenschaften Metallischer Werkstoffe:

- metallischer Glanz (Reflexionsvermögen)
- gute Leitfähigkeit
 - elektrische
 - thermische (Kälte)
- gute Verformbarkeit
 - Verfestigung beim Verformen

Bindungsarten - Van der Waals-Bindung

Bindungen beruhen auf schwachen Wechselwirkungen zwischen elektrischen Dipolen

Räumliche Trennung von positiven und negativen Ladungen im Atom



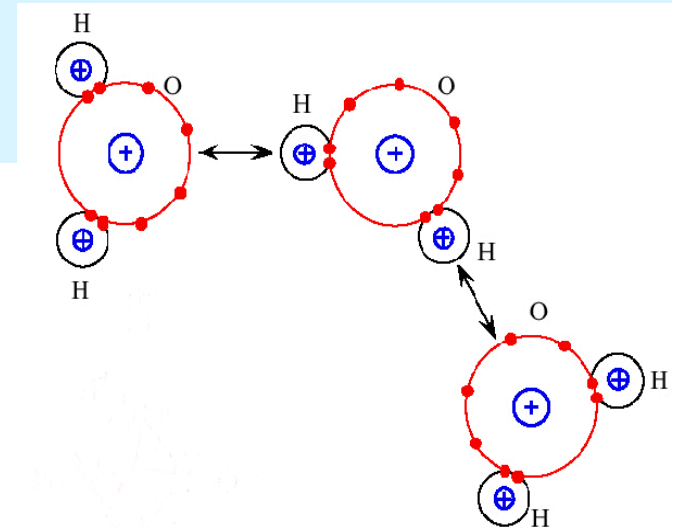
Bindungsarten - Van der Waals-Bindung

Bindungen beruhen auf schwachen Wechselwirkungen zwischen elektrischen Dipolen

Räumliche Trennung von positiven und negativen Ladungen im Atom

- relativ kleine Bindungsenergien
- niedriger Schmelzpunkt
- schlechte elektrische Leitfähigkeit

Beispiel: Wasser



Bindungsarten - Zusammenfassung

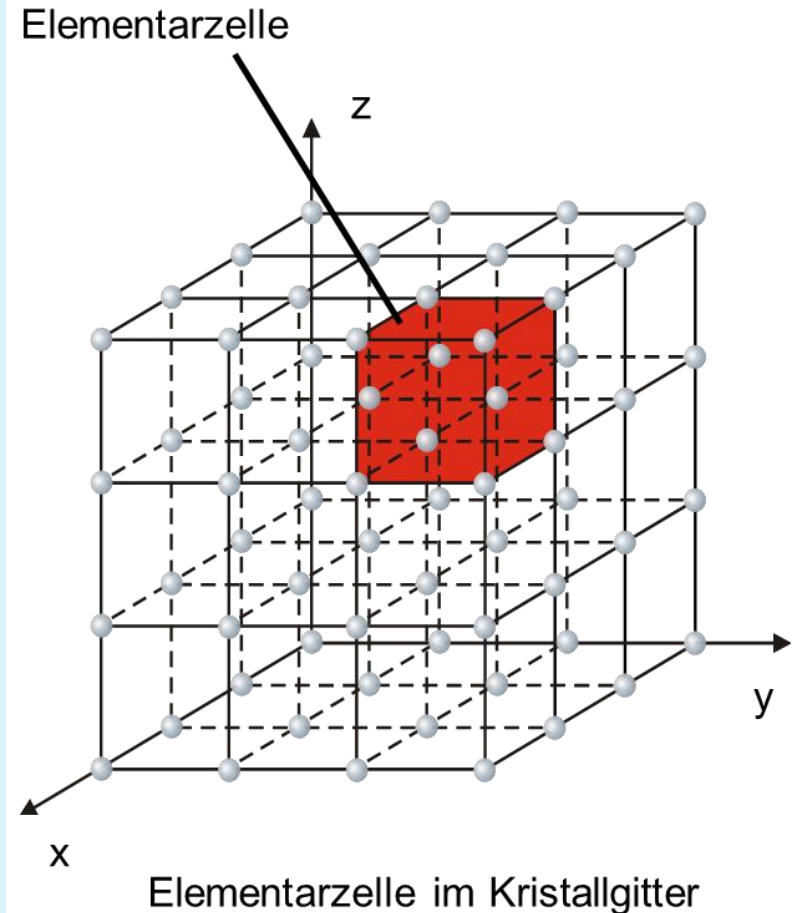
Bindung	Teilchen	Eigenschaften	Beispiele
kovalent	Atome	sehr hoher Schmelzpunkt sehr hart elektrischer Nichtleiter	Diamant (C) Sand (SiO ₂) Bornitrid(BN)
Ionisch	Ionen	hoher Schmelzpunkt hart, spröde schlechter elektrischer Leiter	Kochsalz (NaCl) Bariumoxid (BaO) Calciumfluorid (CaF ₂)
metallisch	Positive Ionen, bewegliche Elektronen	hoher Schmelzpunkt hart oder weich duktil, verformbar sehr gutelekt. Leiter	Gold (Au) Kupfer (Cu) Eisen (Fe) Magnesium (Mg)
van der Waals	Polarisierte Moleküle	sehr niedriger Schmelzpunkt weich sehr schlechterelekt. Leiter	Wasserstoff (H ₂) Chlor (Cl ₂) Kohlendioxid (CO ₂)

Bindungsarten - Zusammenfassung

Bindung	Teilchen	Eigenschaften	Beispiele
kovalent	Atome	sehr hoher Schmelzpunkt sehr hart elektrischer Nichtleiter	Diamant (C) Sand (SiO ₂) Bornitrid(BN)
Ionisch	Ionen	hoher Schmelzpunkt hart, spröde schlechter elektrischer Leiter	Kochsalz (NaCl) Bariumoxid (BaO) Calciumfluorid (CaF ₂)
metallisch	Positive Ionen, bewegliche Elektronen	hoher Schmelzpunkt hart oder weich duktil, verformbar sehr gutelekt. Leiter	Gold (Au) Kupfer (Cu) Eisen (Fe) Magnesium (Mg)
van der Waals	Polarisierte Moleküle	sehr niedriger Schmelzpunkt weich sehr schlechterelekt. Leiter	Wasserstoff (H ₂) Chlor (Cl ₂) Kohlendioxid (CO ₂)

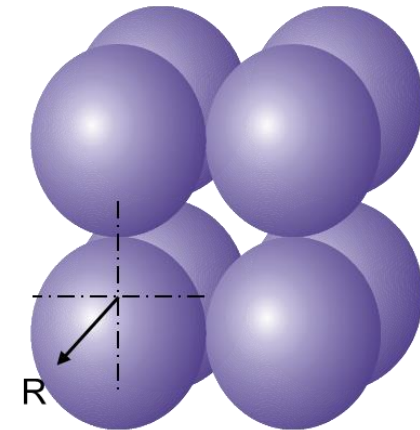
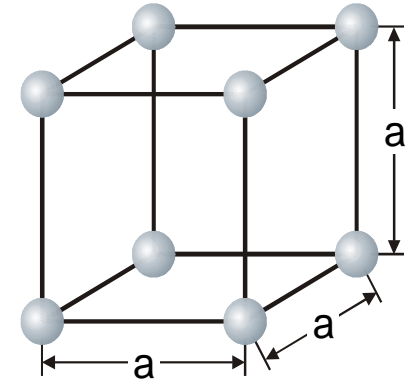
Kristallstruktur von Metallen

- Metalle bilden im festen Zustand Kristalle
 - Atome in regelmäßiger räumlicher Anordnung
- Beschreibung durch Elementarzellen
 - kleinste Einheit, aus der ein Kristall periodisch aufgebaut werden kann
- Kristallgitter wird durch 3-dimensionale Aneinanderreihung von EZ in den Raumrichtungen x , y und z gebildet
 - Ideale Kristalle besitzen völlig regelmäßige Anordnung der Gitterbausteine



Elementarzellen - kubisch primitive (kp) EZ

- Punktgitter:
 - Verbindungslinien zwischen Atommittelpunkten bilden Gitter
- Kugelmodell:
 - Atome im Gitter als einander berührende Kugeln gepackt
- Atomradius liegt zwischen 0,1 nm - 0,2 nm
- für kubisch primitive (kp) Kristalle gilt:
 - Atomradius $R = 0,5 * a$



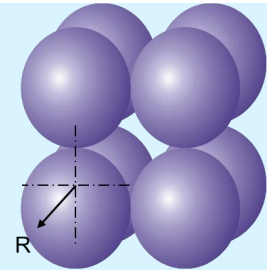
Oben: Punktgitter mit Atommittelpunkten
Unten: Kugelmodell mit Atomen
(kubisch primitive EZ)

Elementarzellen - kubisch primitive (kp) EZ

Packungsdichte:

$$V_k = D_z \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \pi \cdot \frac{a^3}{6}$$

$$\Rightarrow P = \frac{V_k}{V} = \pi \cdot \frac{a^3}{6} \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{\pi}{6} \approx 0,524 \Rightarrow 52\%$$



V_k = Volumen der Kugeln in der Elementarzelle

R = Atomradius (im kp-Gitter: $R = 0,5 a$)

P = Packungsdichte

V = Volumen der Elementarzelle (im kp-Gitter: a^3)

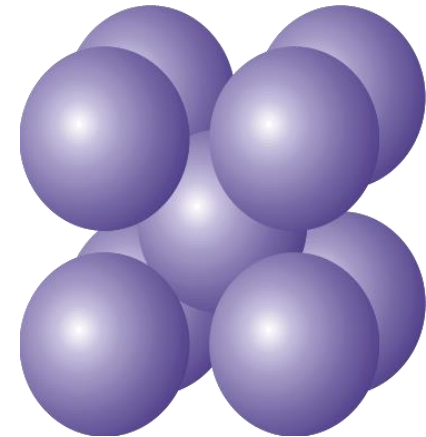
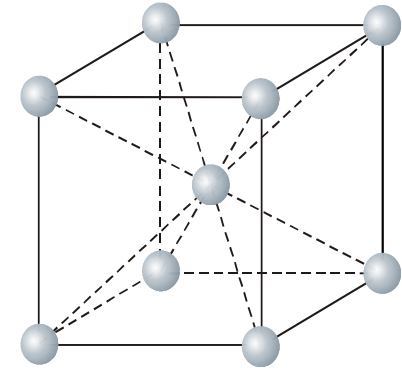
D_z = Gitterpunktdichte = Anzahl der Kugeln, die insgesamt in eine Elementarzelle gepackt sind (im kp-Gitter: $8 \cdot 1/8 = 1$)

K = Koordinationszahl = Anzahl der Atome, die zu einem zentralen Atom den kürzesten Abstand haben (im kp-Gitter: 6)

Elementarzellen - kubisch raumzentrierten (krz) EZ

Typische Vertreter mit krz-Gitter:

- Cr (Chrom)
- Mo (Molybdän)
- V (Vanadium)
- W (Wolfram)
- α -Fe (α -Eisen)
- Ta (Tantal)



Oben: Punktgitter mit Atommittelpunkten
Unten: Kugelmodell mit Atomen
(kubisch raumzentrierten EZ)

Elementarzellen - kubisch raumzentrierte (krz) EZ

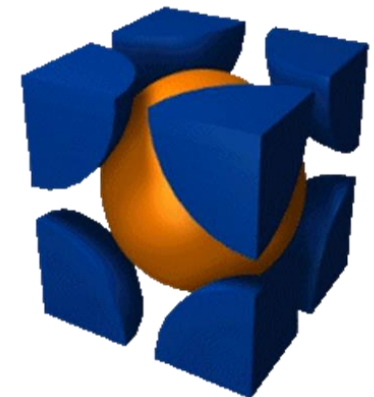
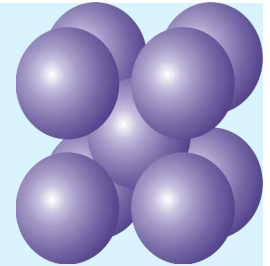
Packungsdichte:

$$R = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \cdot a \approx 0,433 \cdot a$$

$$\Rightarrow P = \frac{V_k}{V} = D_z \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{1}{a^3} = 2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \cdot a \right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \approx 0,680 \Rightarrow 68\%$$

$$D_z = \text{Gitterpunktdichte} = 8 \cdot 1/8 + 1 = 2$$

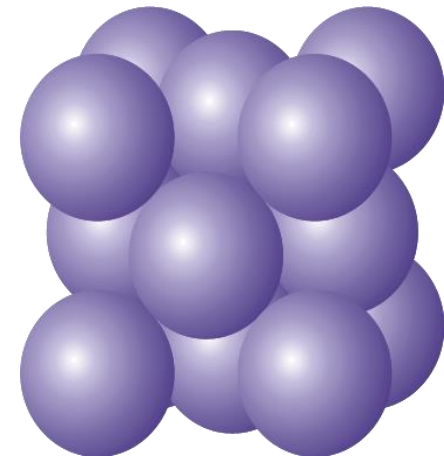
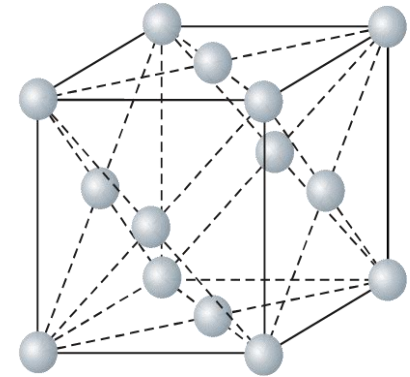
$$K = \text{Koordinationszahl} = 8$$



Elementarzellen - kubisch flächenzentrierten (kfz) EZ

Typische Vertreter mit kfz-Gitter:

- Al (Aluminium)
- Ag (Silber)
- Au (Gold)
- Cu (Kupfer)
- Ni (Nickel)
- Pb (Blei)
- γ -Fe (γ -Eisen)



Oben: Punktgitter mit Atommittelpunkten
Unten: Kugelmodell mit Atomen
(kubisch flächenzentrierten EZ)

Elementarzellen - kubisch flächenzentrierte (kfz) EZ

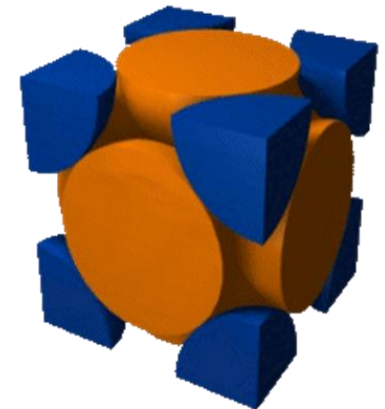
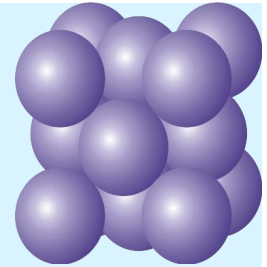
Packungsdichte:

$$R = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot a \approx 0,354 \cdot a$$

$$\Rightarrow P = \frac{V_k}{V} = D_z \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{1}{a^3} = 4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot a \right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \approx 0,740 \Rightarrow 74\% = P_{\max}$$

$$D_z = \text{Gitterpunktdichte} = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$$

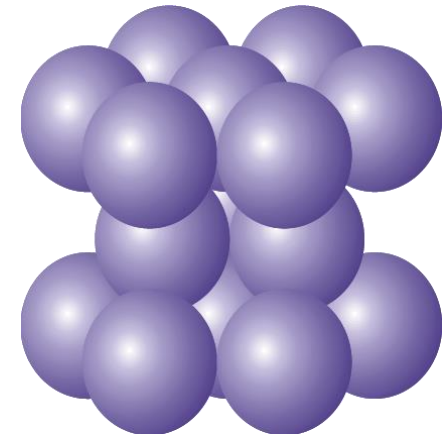
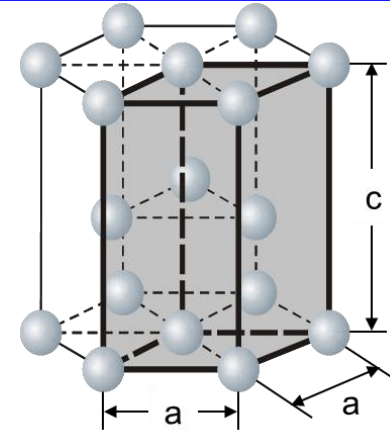
$$K = \text{Koordinationszahl} = 12$$



Elementarzellen - hexagonal dichtest-gepackte (hdp) EZ

Typische Vertreter mit hdp:

- Mg (Magnesium)
- α -Ti (α -Titan)
- Co (Kobalt)
- Ca (Kalzium)
- Zn (Zinn)
- Cd (Cadmium)
- Be (Beryllium)



Oben: Punktgitter mit Atommittelpunkten
Unten: Kugelmodell mit Atomen
(hexagonal dichtest-gepackte EZ)

Elementarzellen - hexagonal dichtest-gepackte (hdp) EZ

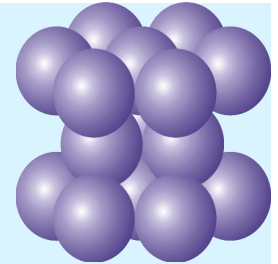
Packungsdichte:

$$R = \frac{1}{2} \cdot a$$

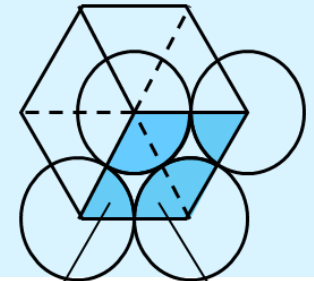
$$\Rightarrow P = \frac{V_k}{V} = \frac{\pi \cdot \frac{a^3}{3}}{\sqrt{3} \cdot a^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{6} \cdot a\right)} = \frac{\pi}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{6}} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \approx 0,740 \Rightarrow 74\% = P_{\max}$$

$$D_z = \text{Gitterpunktdichte} = 4 \cdot 1/6 + 4 \cdot 1/12 + 1 = 2$$

$$K = \text{Koordinationszahl} = 12$$

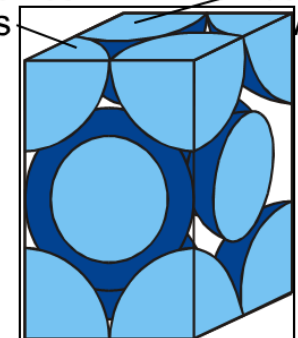


Drauf-
-sicht:



1/12 eines
Atoms

1/6 eines
Atoms



Metall	Be	α -Ti	Mg	Co	ideal	Ca	Zn	Cd
c/a	1,585	1,601	1,624	1,624	1,633	1,640	1,856	1,886

Isotropie, Anisotropie, Textur

Isotropie

Richtungsunabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Anisotropie

Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Isotropie, Anisotropie, Textur

Isotropie

Richtungsunabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Anisotropie

Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Quasiisotropie

Kristallite eines Gefüges sind anisotrop, statistische Verteilung der räumlichen Anordnung der Kristallite führt zum makroskopischen Ausgleich der richtungsabhängigen Eigenschaften
-> Gefüge ist makroskopisch isotrop

Isotropie, Anisotropie, Textur

Isotropie

Richtungsunabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Anisotropie

Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Quasiisotropie

Kristallite eines Gefüges sind anisotrop, statistische Verteilung der räumlichen Anordnung der Kristallite führt zum makroskopischen Ausgleich der richtungsabhängigen Eigenschaften
-> Gefüge ist makroskopisch isotrop

Textur

Ausrichtung der Kristallite z. B. durch Walzvorgänge
-> Anisotropie des polykristallinen Werkstoffes

Isotropie, Anisotropie, Textur

Isotropie

Richtungsunabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Anisotropie

Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften

Quasiisotropie

Kristallite eines Gefüges sind anisotrop, statistische Verteilung der räumlichen Anordnung der Kristallite führt zum makroskopischen Ausgleich der richtungsabhängigen Eigenschaften
-> Gefüge ist makroskopisch isotrop

Textur

Ausrichtung der Kristallite z. B. durch Walzvorgänge
-> Anisotropie des polykristallinen Werkstoffes

amorphe Stoffe

Atome und Ihre Bindungen sind völlig regellos verteilt
-> keine Richtungsabhängigkeiten der Eigenschaften
-> amorphe Stoffe sind isotrop

Gitterfehler

- Realkristalle sind niemals fehlerfrei, sondern weisen Störungen der idealen Struktur auf
- jede Störung des idealen Gitteraufbaus erzeugt ein bestimmtes Spannungsfeld, der Kristall bekommt einen höheren Energiegehalt
- Gitterbaufehler sind für mechanische Eigenschaften metallischer Werkstoffe verantwortlich
- der kleinste Gleichgewichtsabstand für zwei Atome im ungestörten Raumgitter entspricht dem Minimum der Bindungsenergie
- die Bindungsenergie entspricht der erforderlichen Arbeit für die Trennung der beiden Atome bei 0 K

Gitterfehler

- Die Störung des idealen Gitteraufbaus hat zur Folge, dass angrenzende Atome den Gleichgewichtsabstand nicht einhalten können. Sie befinden sich damit auf einem höheren Energieniveau
- Entstehung von Gitterbaufehlern :
 - durch Störung des thermodynamischen Gleichgewichts bei der Kristallentstehung
 - im festen Kristall durch Energiezufuhr z. B. mechanische Verformung oder Kernstrahlung

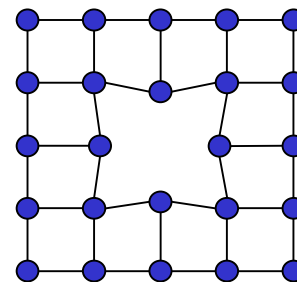
Gitterfehler

- Die Störung des idealen Gitteraufbaus hat zur Folge, dass angrenzende Atome den Gleichgewichtsabstand nicht einhalten können. Sie befinden sich damit auf einem höheren Energieniveau
- Entstehung von Gitterbaufehlern :
 - durch Störung des thermodynamischen Gleichgewichts bei der Kristallentstehung
 - im festen Kristall durch Energiezufuhr z. B. mechanische Verformung oder Kernstrahlung
- Gitterbaufehler werden nach ihrer räumlichen Dimension unterschieden :
 - Leerstellen und Zwischengitteratome (Punktfehler)
 - Versetzungen (Linienfehler)
 - Korn- und Phasengrenzen (Flächenfehler)
 - Ausscheidungen, Einschlüsse etc. (Volumenfehler)

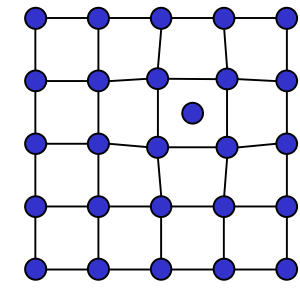
Gitterfehler - Nulldimensionale Fehler

- Leerstellendichte ist temperaturabhängig
 - bei RT 10^{-12} Leerstellen pro Gitterplatz
 - beim Schmelzpunkt 10^{-4} Leerstellen pro Gitterplatz
- Kristall kann sich mit Leerstellen im thermodynamischen Gleichgewicht befinden
- Kombination aus Leerstelle und Zwischengitteratom heißt *Frenkel-Paar*

- Leerstellen (unbesetzte Gitterplätze)
- Zwischengitteratome
- Fremdatome



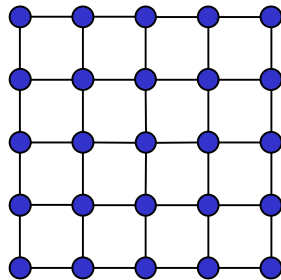
Leerstelle



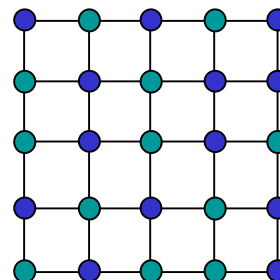
Zwischengitteratom

Gitterfehler - Nulldimensionale Fehler

- Austausch- oder Substitutionsatome sind Fremdatome
 - Atomradiendifferenzen von höchstens 15%
 - Elemente sollten gleiche Gitterstruktur haben und sich chemisch affin zueinander verhalten
- Prozess ist Voraussetzung für Legierungsbildung
Beispiel sind Cu-Ni-Legierungen

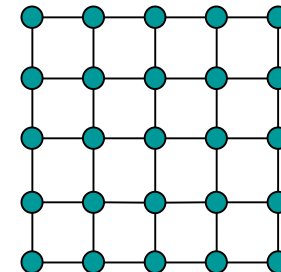


100 % Cu



50 % Cu

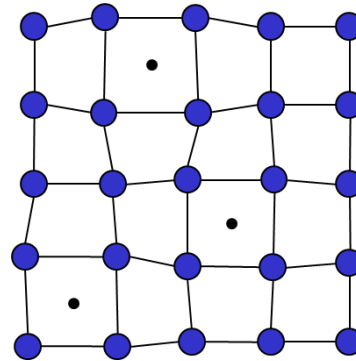
50 % Ni



100 % Ni

Gitterfehler - Nulldimensionale Fehler

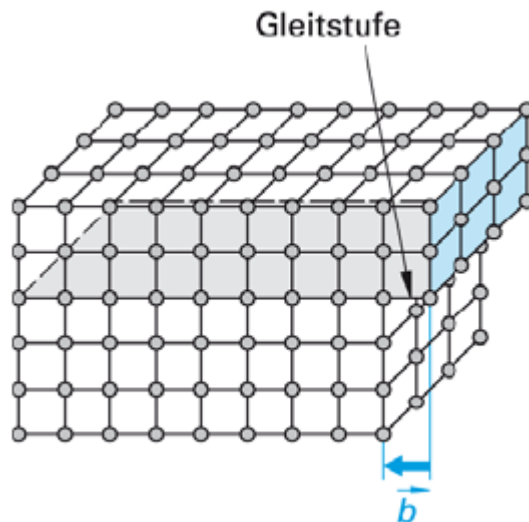
- Einlagerungs- oder interstitielle Atome
 - Fremdatome auf Zwischengitterplätzen
- nur möglich, wenn sie wesentlich kleiner als Atome des Grundgitters sind
- Beispiele für Einlagerungsatome: H, O, N, C, B
 - bedeutendste Kombination ist Fe und C



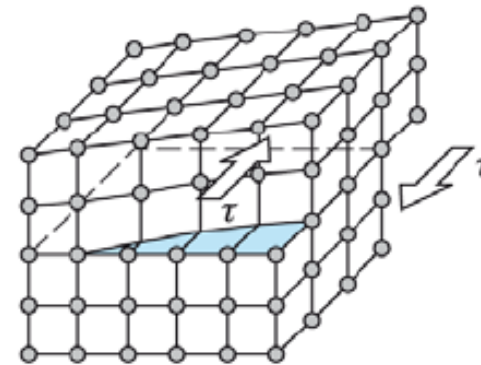
Einlagerungsatome (C in Fe)

Gitterfehler - Eindimensionale Fehler

- eindimensionale Gitterfehler heißen Versetzungen
 - Stufenversetzung
 - Schraubenversetzung



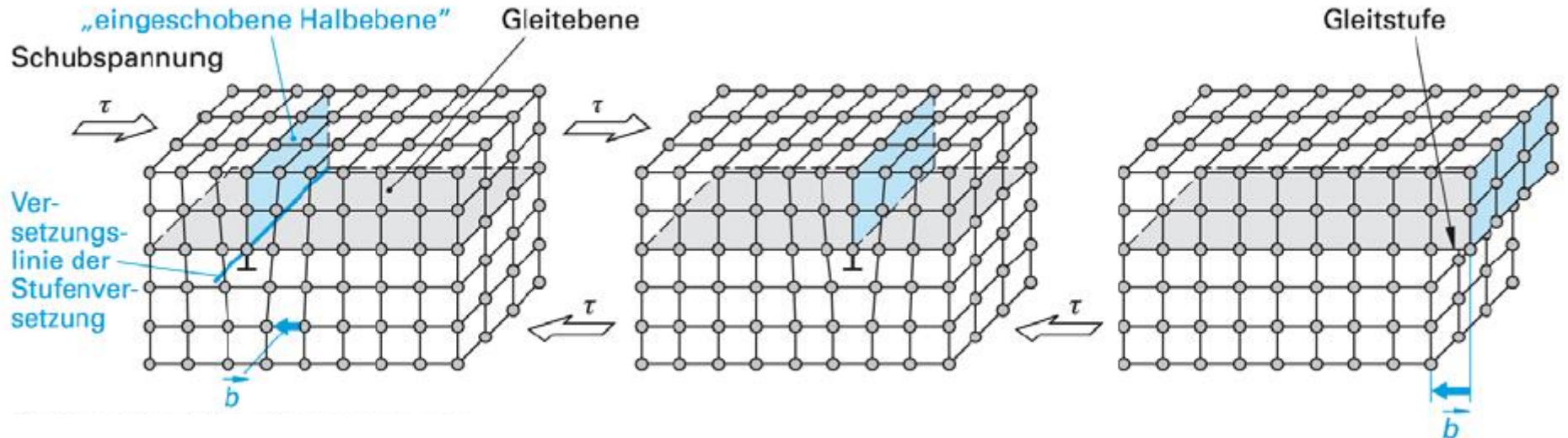
Stufenversetzung



Schraubenversetzung

Gitterfehler - Eindimensionale Fehler

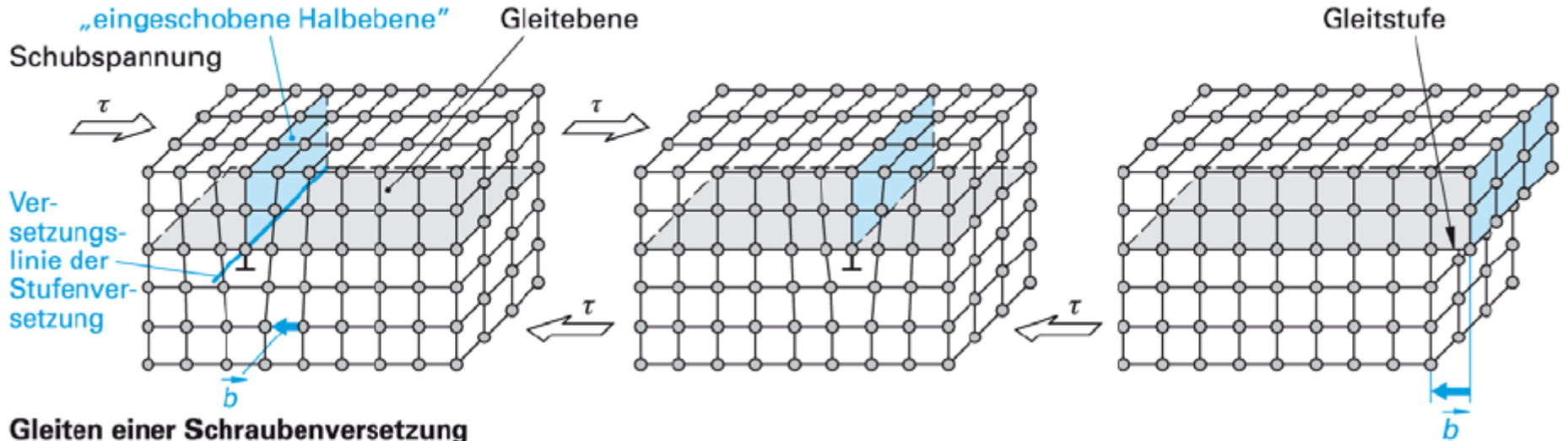
Gleiten einer Stufenversetzung



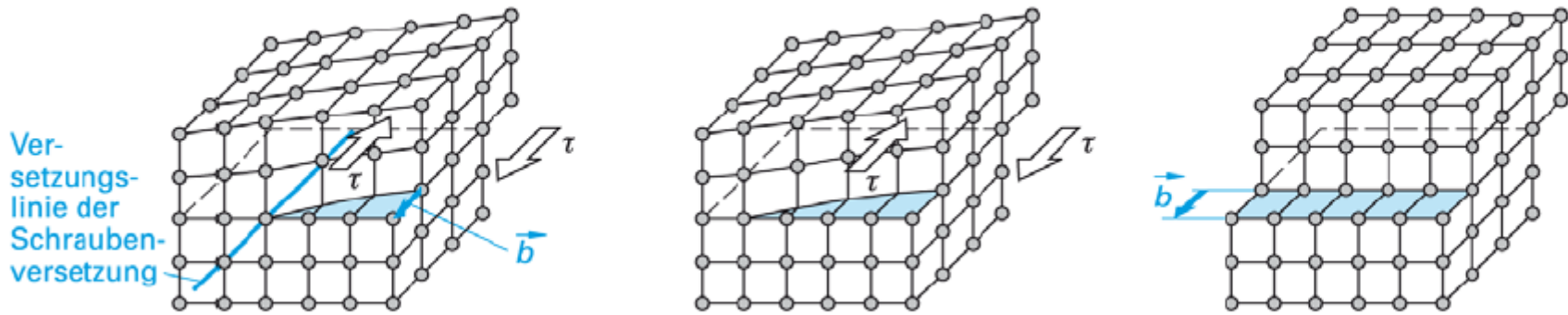
Quelle: C. Kammer, V. Läßle, L. Steuernagel, Werkstofftechnik Maschinenbau, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Gitterfehler - Eindimensionale Fehler

Gleiten einer Stufenversetzung



Gleiten einer Schraubenversetzung



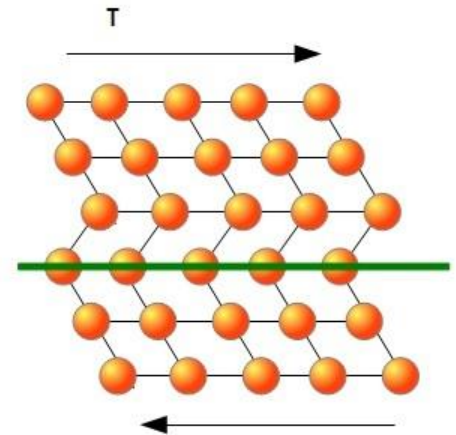
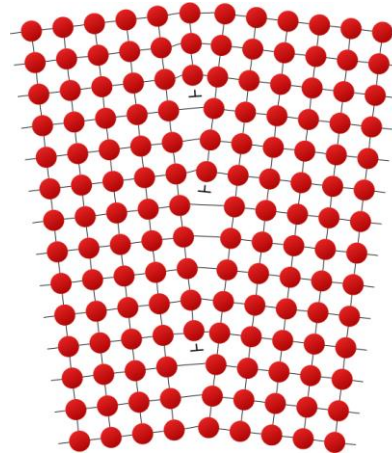
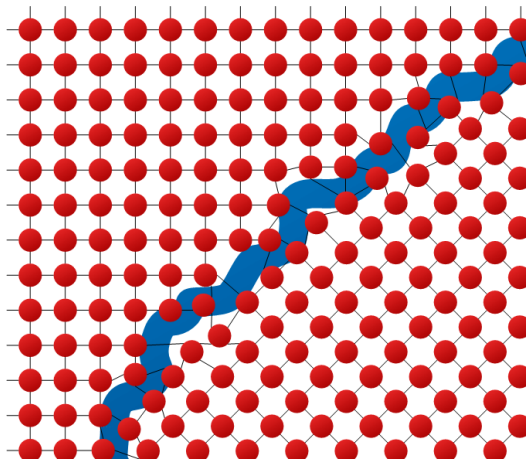
\vec{b} = Burgersvektor



Quelle: C. Kammer, V. Läßle, L. Steuernagel, Werkstofftechnik Maschinenbau, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Gitterfehler - Zweidimensionale Fehler

- Korngrenzen
 - Großwinkel-Korngrenze:
 - Grenzbereich zwischen Kristalliten mit Orientierungsunterschied von mehr als 15 Grad
 - Kleinwinkel-Korngrenze
- Zwillingsbildung



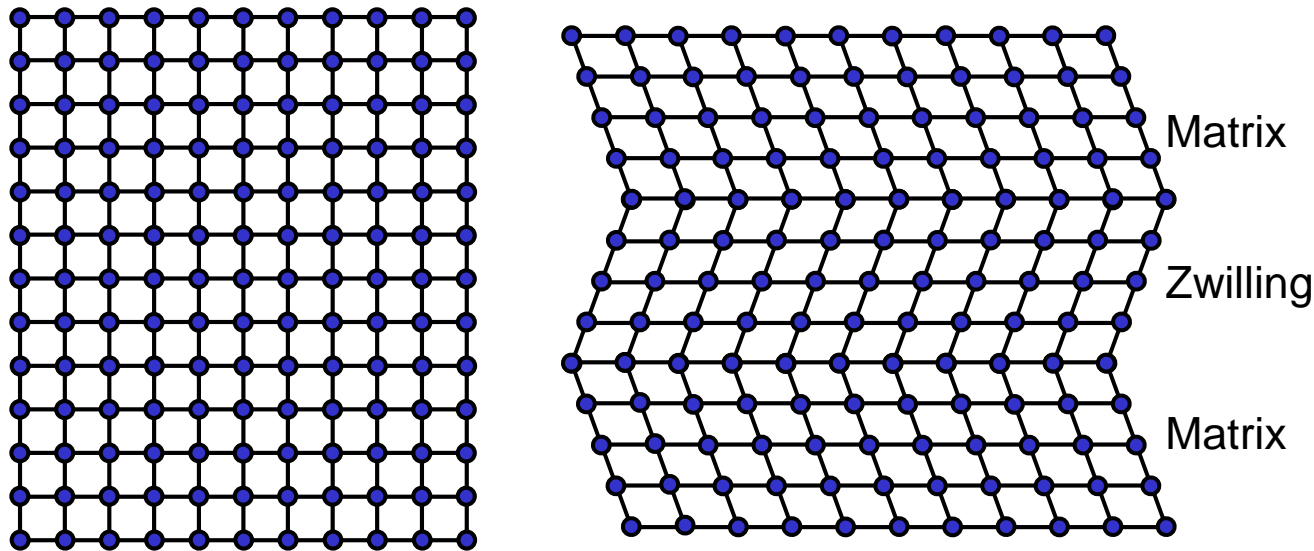
Quelle: https://www.ahoefer.de/index.php?option=com_content&view=article&id=294:2-dimensionale-gitterdefekte&catid=90:gitterdefekte&lang=de-DE,
<https://www.ingenieurkurse.de/assets/courses/media/51-zwillingsbildung-ca.jpg>

Gitterfehler - Zweidimensionale Fehler

- Kleinwinkelkorngrenzen
 - Unterteilung des einzelnen Korns in sogenannte Subkörner mit Orientierungsabweichungen bis zu etwa 10 Grad
 - im einfachsten Fall Bildung aus untereinander liegenden Stufenversetzungen
 - sind die Kleinwinkelkorngrenzen nicht nur gegeneinander verkippt, sondern auch verdreht, dann erfolgte die Bildung aus Stufen- und Schraubenversetzungen
 - die Energie einer Kleinwinkelkorngrenze ist geringer als die einer (Großwinkel-)Korngrenze

Gitterfehler - Zweidimensionale Fehler

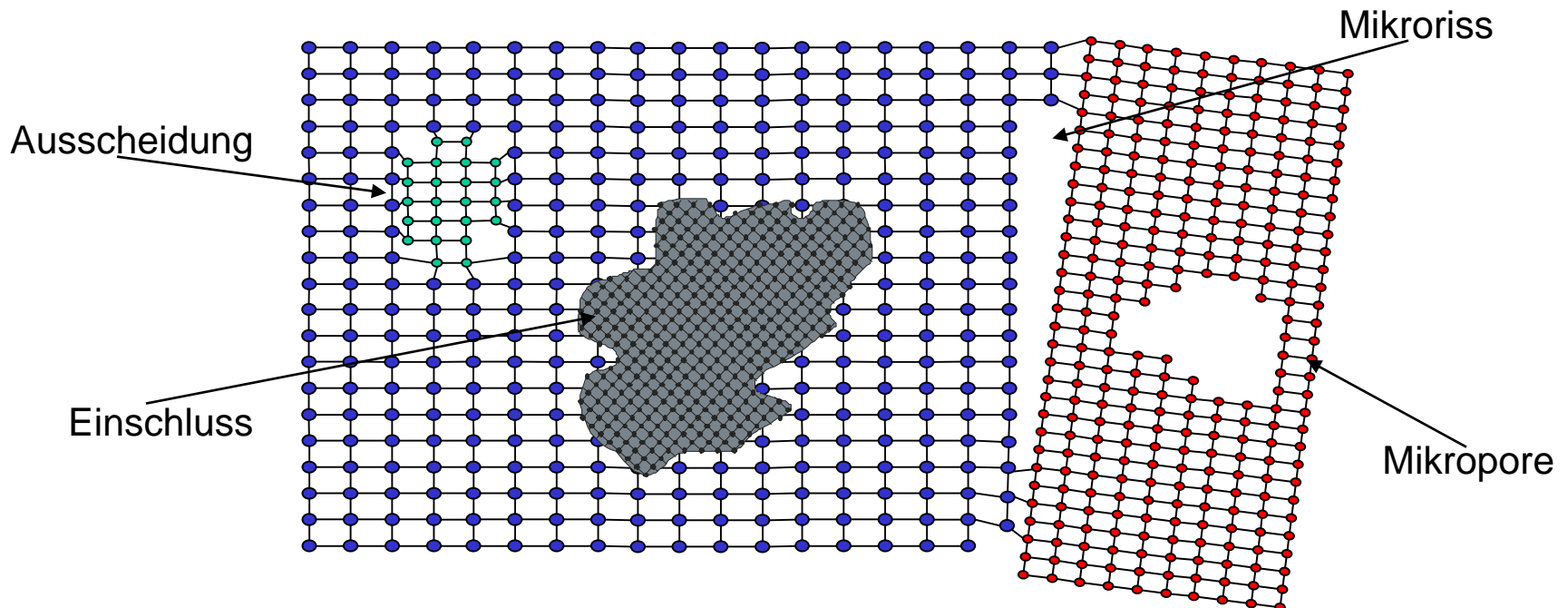
- Zwillingsbildung
 - Gitterbereich mit spiegelbildlicher Anordnung an Zwillings Ebenen
 - Aufeinanderfolgen von zwei entgegengesetzten Stapelfehlern
 - Auftreten nur bei Werkstoffen mit niedriger Stapelfehlerenergie, z.B. Kupfer



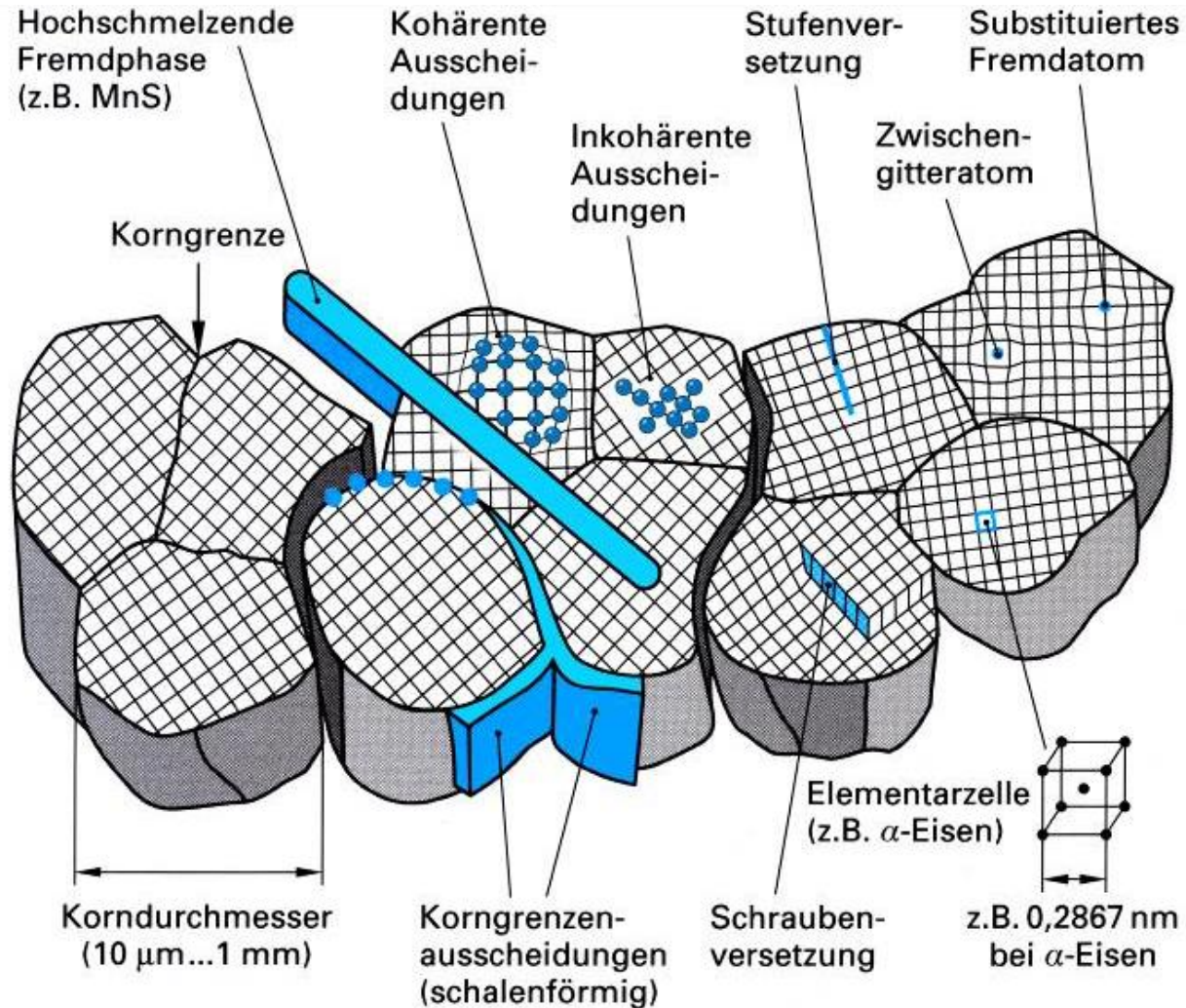
Struktur von Zwillingsgrenzen

Gitterfehler - Dreidimensionale Fehler

- alle absichtlichen oder unbeabsichtigten räumlichen Störungen:
 - Risse, Poren, Einschlüsse (unbeabsichtigt, z.B. Gießprozess)
 - Ausscheidungen (erwünschte Anteile zweiter Phasen)



Gitterfehler - Zusammenfassung



Gitterfehler - Zusammenfassung

Nulldimensional	Punktfehler	Leerstellen, Fremdatome,...
Eindimensional	Linienfehler	Versetzungen
Zweidimensional	Flächenfehler	Korngrenzen
Dreidimensional	Volumenfehler	Risse, Einschlüsse, Ausscheidungen

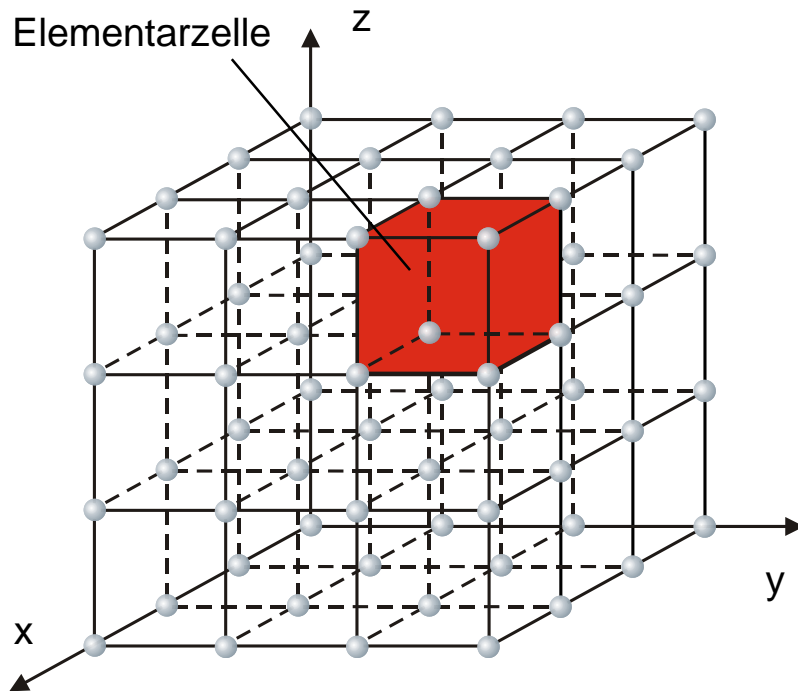
Haupteigenschaften der verschiedenen Gitterbaufehler für den Werkstoff:

- Fremdatome sind die Voraussetzung für Legierungsbildung
- Versetzungen sind für die plastische Verformung verantwortlich
- Korngrenzen sind Hindernisse für Versetzungsbewegungen, also wichtig für die Festigkeit

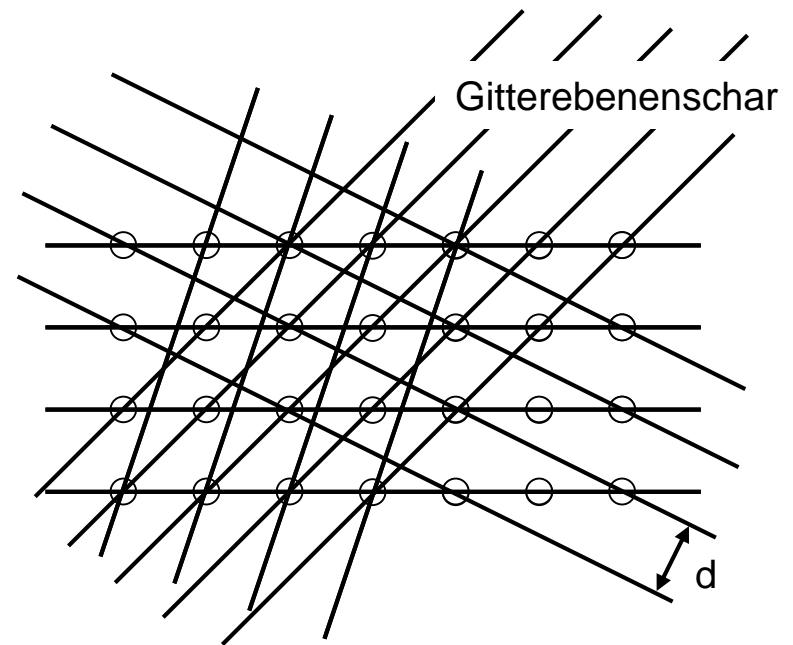
Millersche Indizes

Millersche Indizes:

"Werkzeug" zur Beschreibung von kristallographischen Gitterebenen und Gitterrichtungen und für die Kristallstrukturanalyse



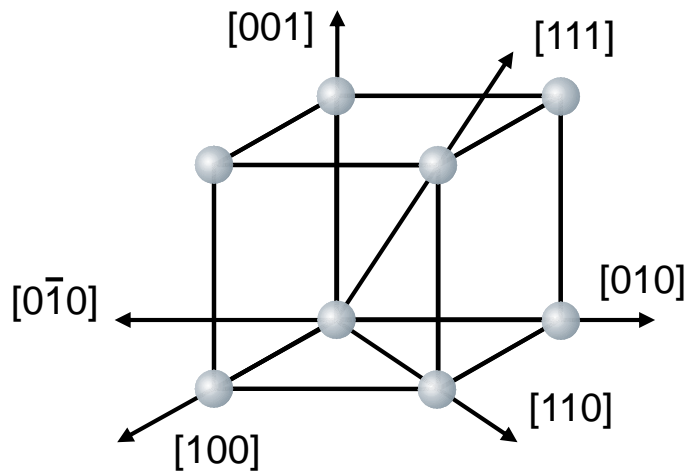
Elementarzelle im dreidimensionalen Kristallgitter



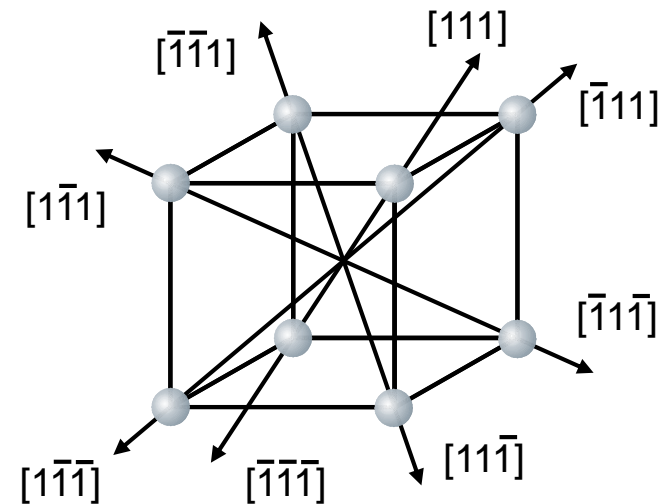
Zweidimensionaler Ausschnitt aus einem Kristallgitter mit Gitterebenen des Kristalls

Millersche Indizes

- bestimmte Richtung: Indizes in eckigen Klammern, z. B. $[110]$
- kristallographisch äquivalente Richtungen zusammengefasst:
-> eine dieser Richtungen in spitzen Klammern, z. B. $\langle 110 \rangle$
- negative Achsabschnitte: Kennzeichnung durch Querstrich über dem Index



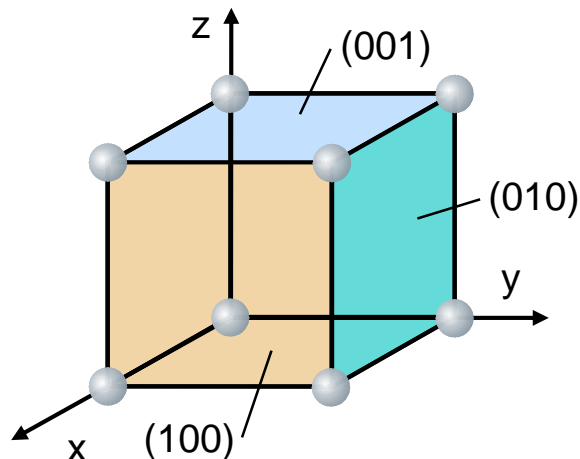
Beispiel: $[010]$ Würfelkante in y -Richtung,
 $\langle 100 \rangle$ für alle Würfelkanten



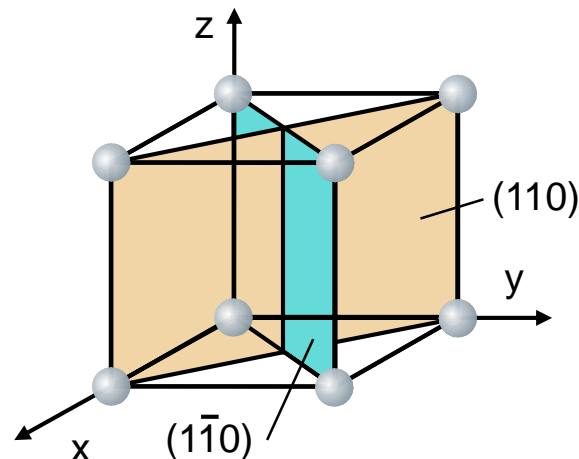
Beispiel: $\langle 111 \rangle$ entspricht allen $[111]$ Raumdiagonalen im kubischen System

Millersche Indizes

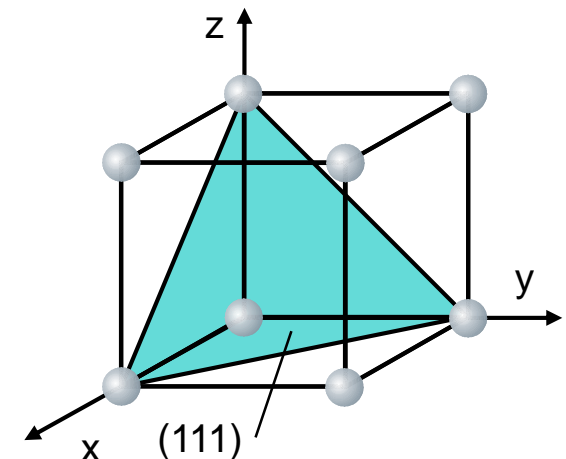
- bestimmte Richtung: Indizes in eckigen Klammern, z. B. $[110]$
- kristallographisch äquivalente Richtungen zusammengefasst:
-> eine dieser Richtungen in spitzen Klammern, z. B. $\langle 110 \rangle$
- negative Achsabschnitte: Kennzeichnung durch Querstrich über dem Index



drei der sechs Arten
von $\{100\}$ -Ebenen



zwei der sechs Arten
von $\{110\}$ -Ebenen



eine der vier Arten
von $\{111\}$ -Ebenen



Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

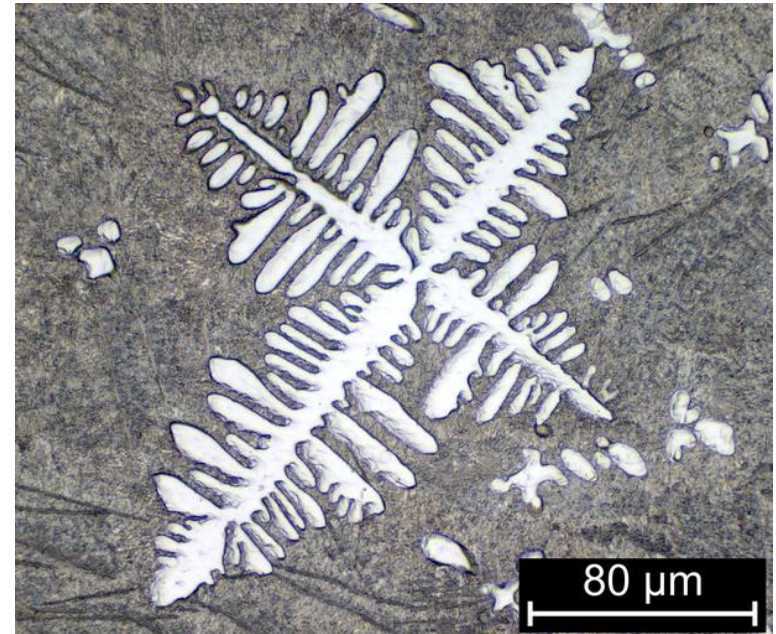
Sommersemester 2020



1. Einführungsveranstaltung
2. Grundlagen der Werkstoffkunde
3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe
4. Titanwerkstoffe
5. Aluminiumwerkstoffe
6. Magnesiumwerkstoffe
7. Zinkwerkstoffe
8. Kupfer-, Blei- und Zinnwerkstoffe
9. Seltene Erden



2. Grundlagen der Werkstoffkunde



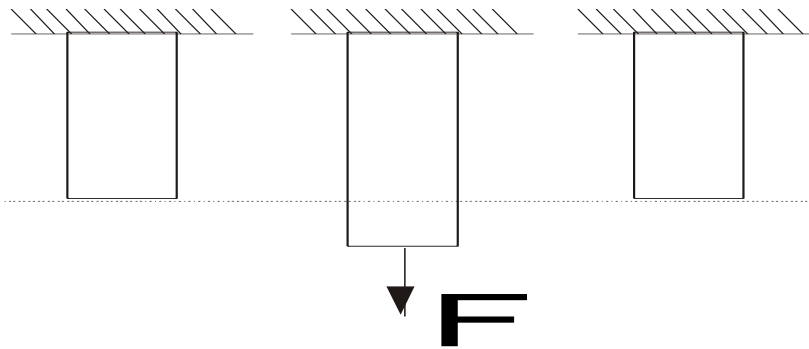
Mechanische Eigenschaften der Metalle

- Mechanischen Eigenschaften kennzeichnen das Verhalten eines Werkstoffes unter Einwirkung äußerer Kräfte
- 3 elementare Auswirkungen bei äußerer Belastung
 - elastische Verformung
 - plastische Verformung
 - Bruch

Mechanische Eigenschaften der Metalle

Elastische Verformung

Verformungen durch äußere Kräfte gehen bei Entlastung vollständig zurück (reversibel)

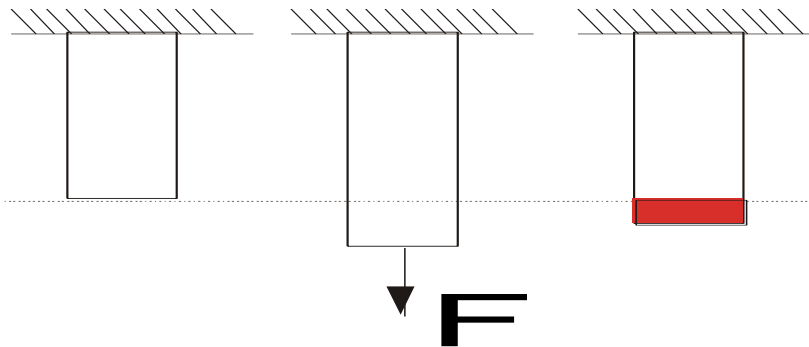


Federn

Mechanische Eigenschaften der Metalle

Plastische Verformung

Nach Entlastung bleibt eine Verformung bestehen (irreversibel)

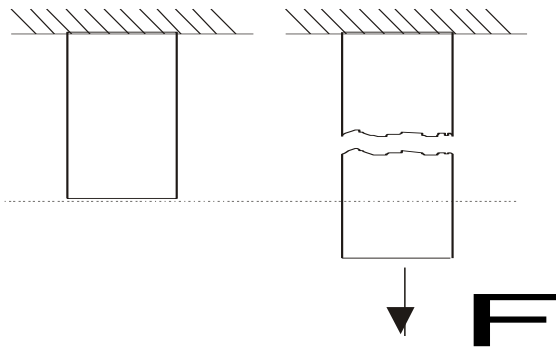


Tiefziehteile

Mechanische Eigenschaften der Metalle

Bruch

Äußere Kräfte bewirken eine Werkstofftrennung (irreversibel)



Sprödbruch (links),
Verformungsbruch (rechts)

Hooke'sches Gesetz und Elastizitätsmodul

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei makroskopischen Proben wird die Belastung als Spannung angegeben und nicht als Kraft

- Spannung σ ist die auf die Querschnittsfläche der Probe bezogene Kraft

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Hooke'sches Gesetz und Elastizitätsmodul

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei makroskopischen Proben wird die Verlängerung als Dehnung angegeben und nicht als Längenänderung

- Dehnung ε ist die auf die Ausgangslänge der Probe bezogene Verlängerung

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Hooke'sches Gesetz und Elastizitätsmodul

Hooke'sches Gesetz für elastische Zug-/Druckbeanspruchung

- Spannung σ ist die auf die Querschnittsfläche der Probe bezogene Kraft
- Dehnung ε ist die auf die Ausgangslänge der Probe bezogene Verlängerung

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

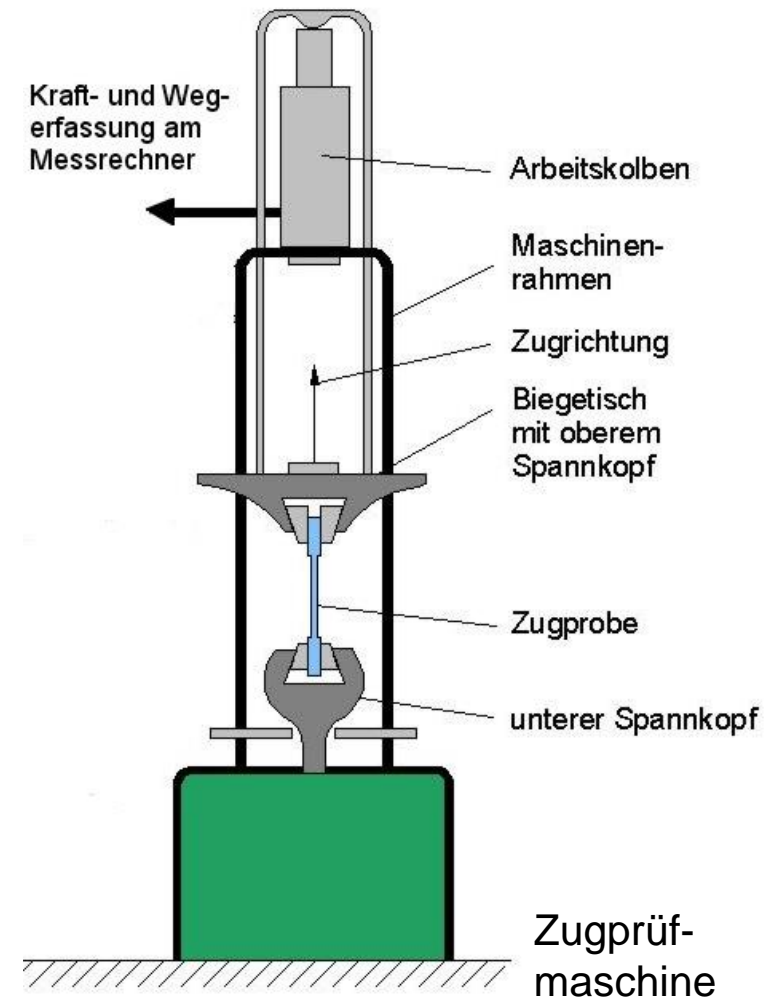
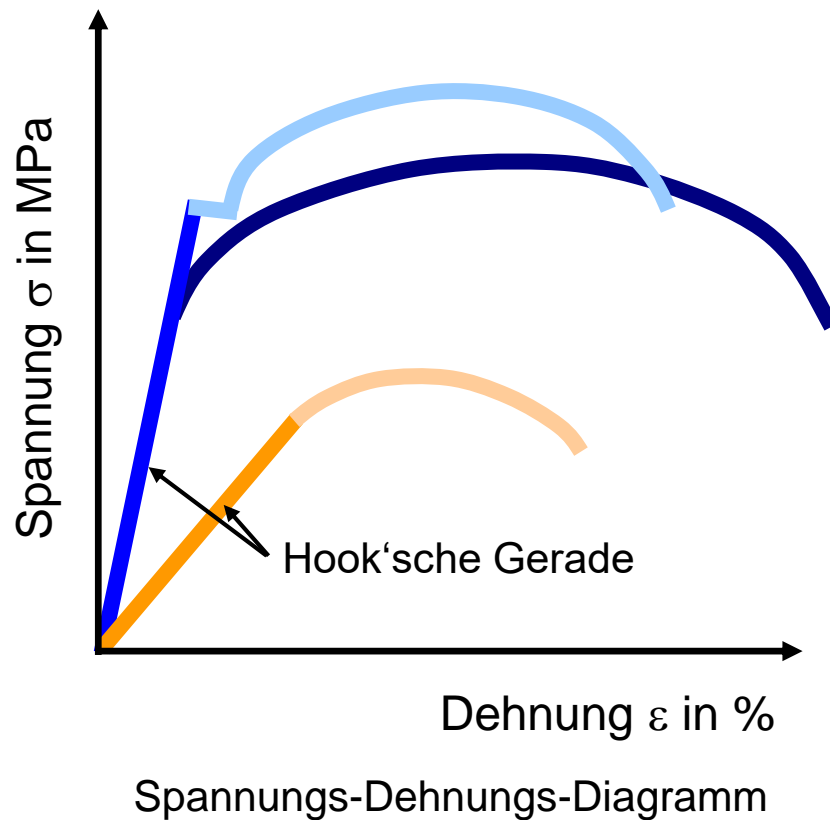
Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Werkstoffen erfolgt im Zugversuch.

Der Elastizitätsmodul wird aus der Steigung der Hook'schen Geraden ermittelt:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Bestimmung des Elastizitätsmoduls



Technologische Bedeutung des Elastizitätsmoduls

Beispiel 1:

Durchbiegung eines Rundstabs $\varnothing 10$ mm, $l = 1000$ mm, $F = 100$ N

E- Module in MPa:

Eisen 210.000

Kupfer 120.000

Titan 116.000

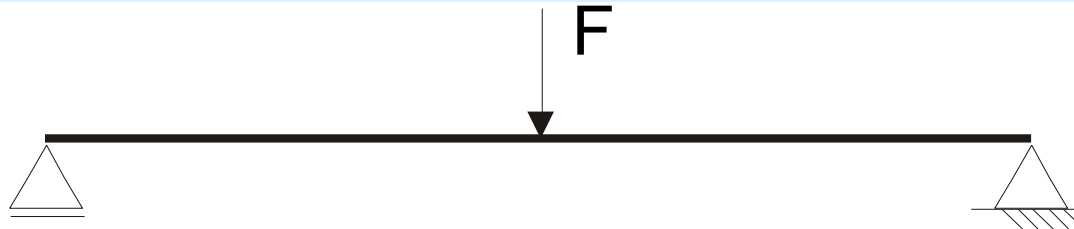
Aluminium 71.000

Magnesium 45.000

Durchbiegung: $f_m = \frac{Fl^3}{48EI_y}$

Flächenmoment: $I_{y_Rundstab} = \frac{\pi d^4}{64}$

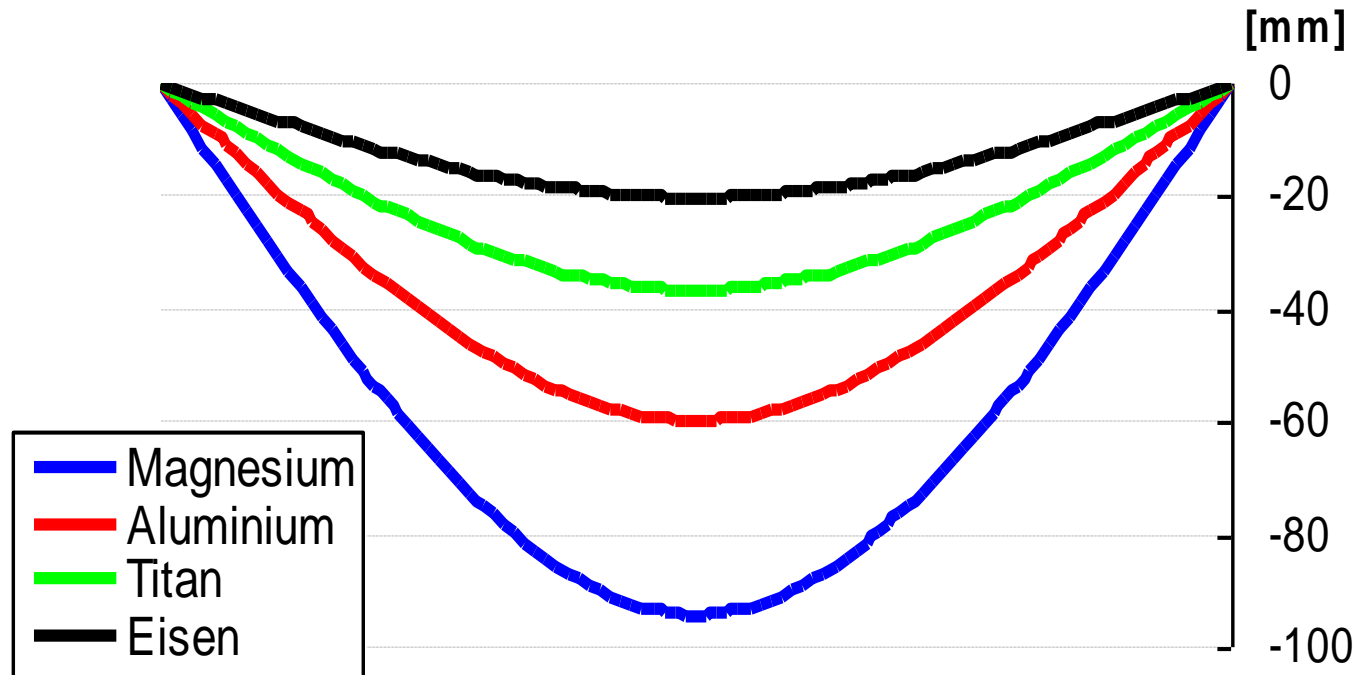
$\Rightarrow f_m \approx 1/E$



Technologische Bedeutung des Elastizitätsmoduls

Beispiel 1:

Durchbiegung eines Rundstabs $\varnothing 10$ mm, $l = 1000$ mm, $F = 100$ N



Durchbiegung des Rundstabs aus verschiedenen Metallen

Technologische Bedeutung des Elastizitätsmoduls

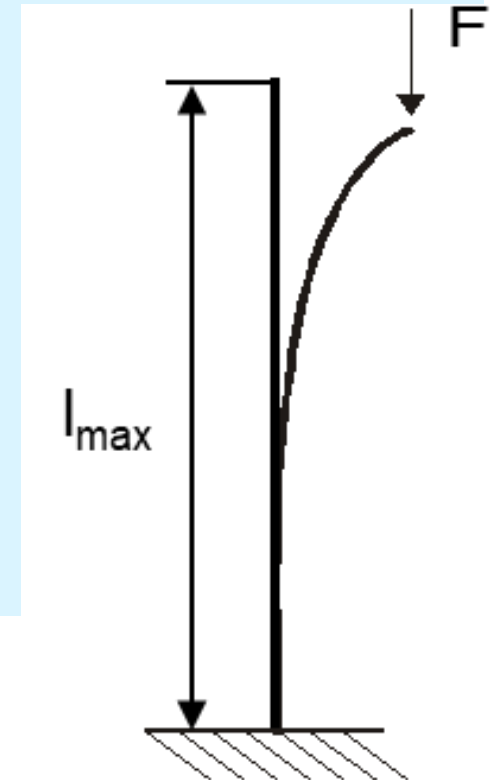
Beispiel 2:

Wie lang darf ein Rundstab ($\varnothing 10$ mm) höchstens sein, damit er unter einer axialen Druckkraft von $F = 1000$ N nicht ausknickt?

Knicklänge nach Euler:
$$l_{\max} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_y}{4F}}$$

Flächenmoment:
$$I_y = \frac{\pi d^4}{64}$$

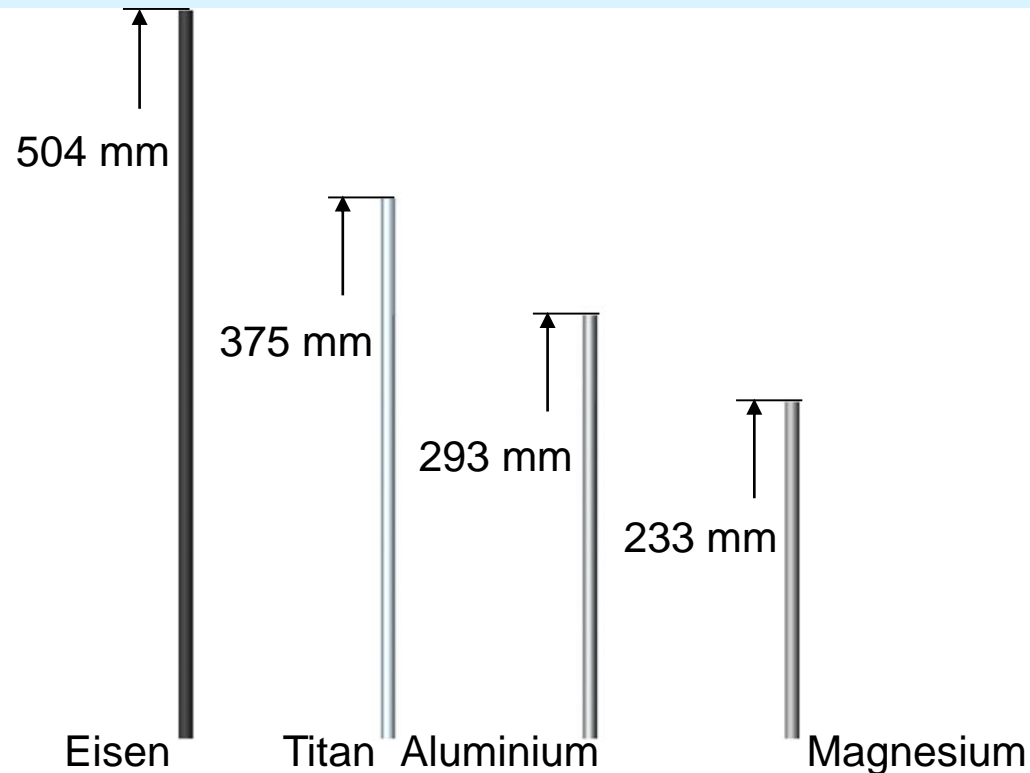
$$\Rightarrow l_{\max} \approx \sqrt{E}$$



Technologische Bedeutung des Elastizitätsmoduls

Beispiel 2:

Wie lang darf ein Rundstab ($\varnothing 10$ mm) höchstens sein, damit er unter einer axialen Druckkraft von $F = 1000$ N nicht ausknickt?



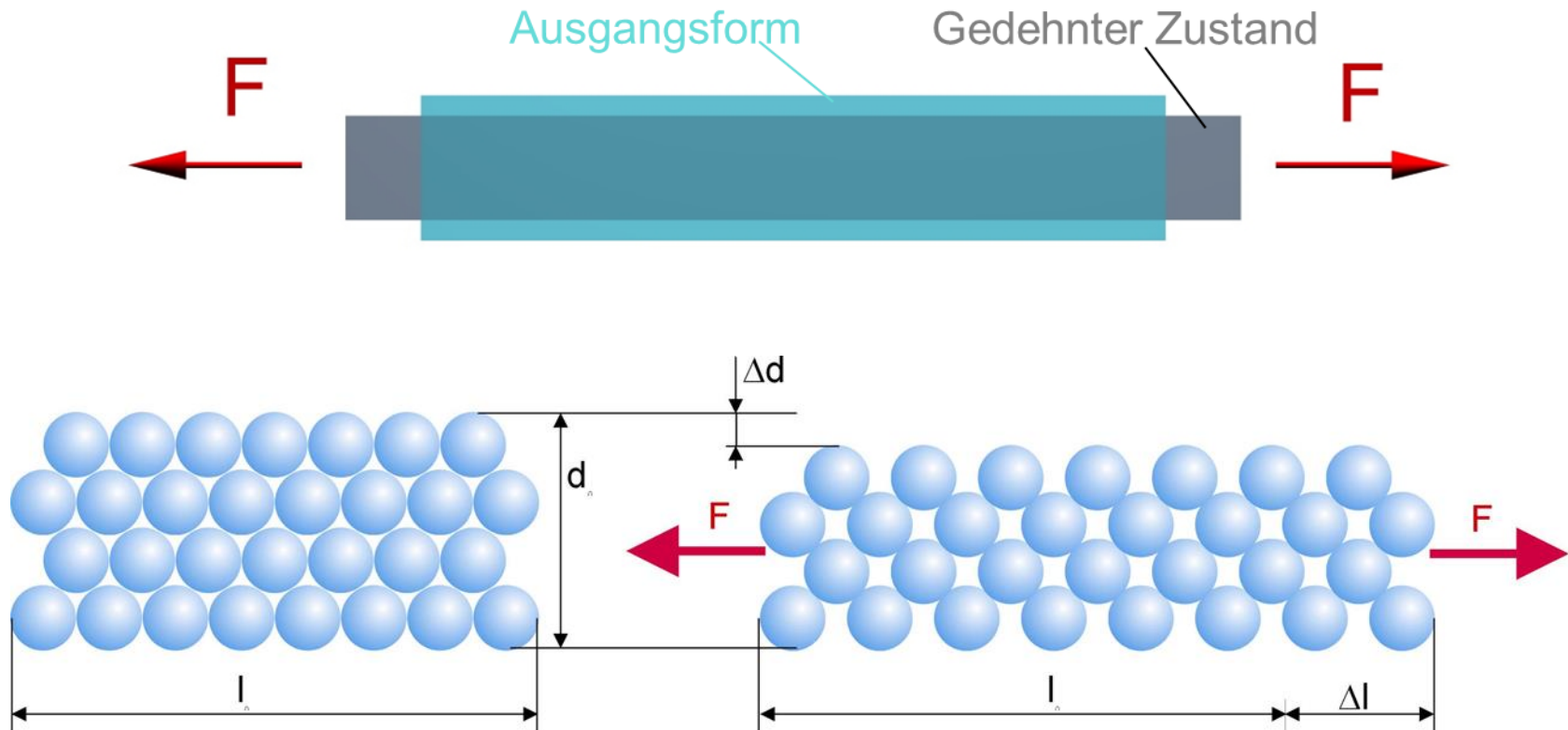
Querkontraktion

Elastische Längsdehnung $\varepsilon_l = \Delta l / l_0$ führt zu einer elastischen Querschnittsabnahme $\varepsilon_q = \Delta d / d_0$

Das Verhältnis $\varepsilon_q / \varepsilon_l$ wird durch die Querkontraktionszahl ν (Poisson-Zahl) angegeben

Metallische Werkstoffe: $0,25 < \nu < 0,35$

Mechanismus der Querkontraktion



Volumenzunahme bei Zug- und -abnahme bei Druckbelastung
 $V = \text{const.}$ näherungsweise, für $\nu \approx 0,5$

Schubmodul

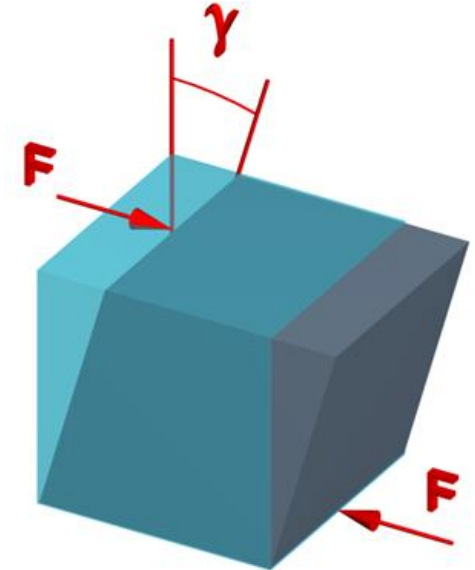
Greifen an einem Körper mit der Grundfläche A gemäß nebenstehender Abbildung die Kräfte F an, wird er mit der Schubspannung $\tau = F/A$ belastet

Es gilt das Hook'sche Gesetz in der Form:

$$\tau = G\gamma \quad (\tan \gamma = \gamma \text{ für kleine } \gamma)$$

Schubmodul:

$$G = E/(2 + 2\nu)$$



Kompressionsmodul

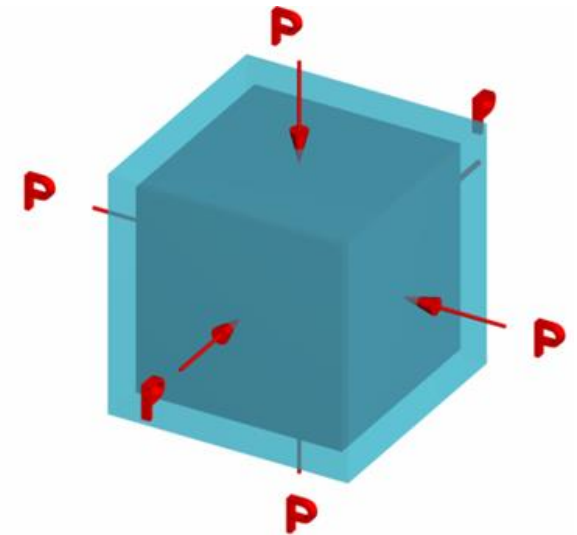
Greift an einem Körper der hydrostatische Druck P an, so ändert sich sein Volumen V

Es gilt das Hook'sche Gesetz in der Form:

$$P = -K\Delta V/V$$

Kompressionsmodul:

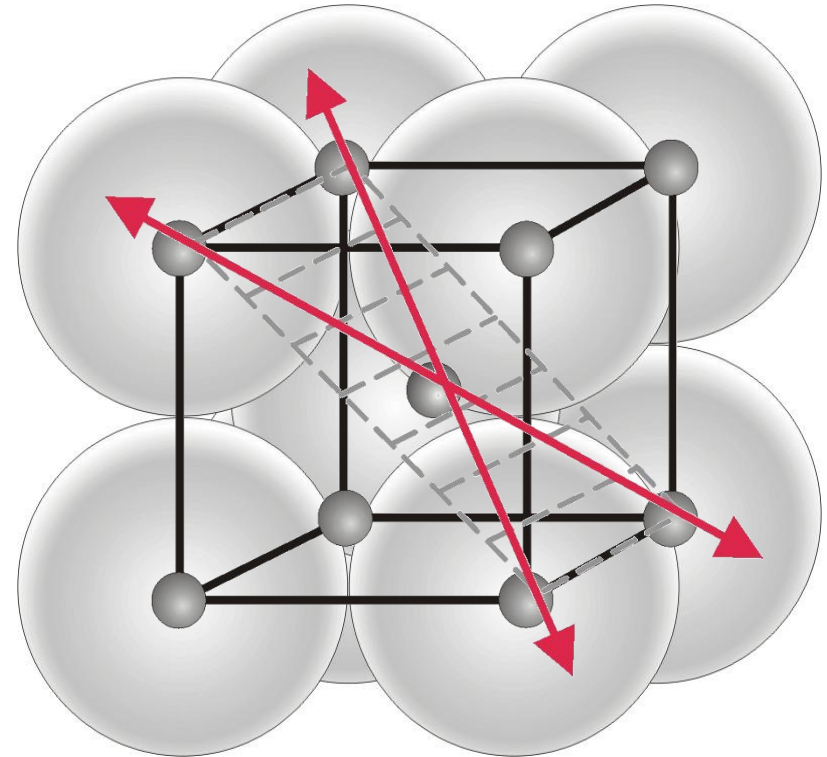
$$K = E/(3 - 6\nu)$$



Verformungsmechanismen

- Versetzungsgleiten (Entstehung von Gleitbändern)
- Versetzungsklettern
- Korngrenzgleiten
- Elastische Verformung
- Zwillingsbildung
- Restaustenit-Umwandlung
- Bruch

Gleitsysteme im krz-Gitter



Gleitsysteme im krz-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

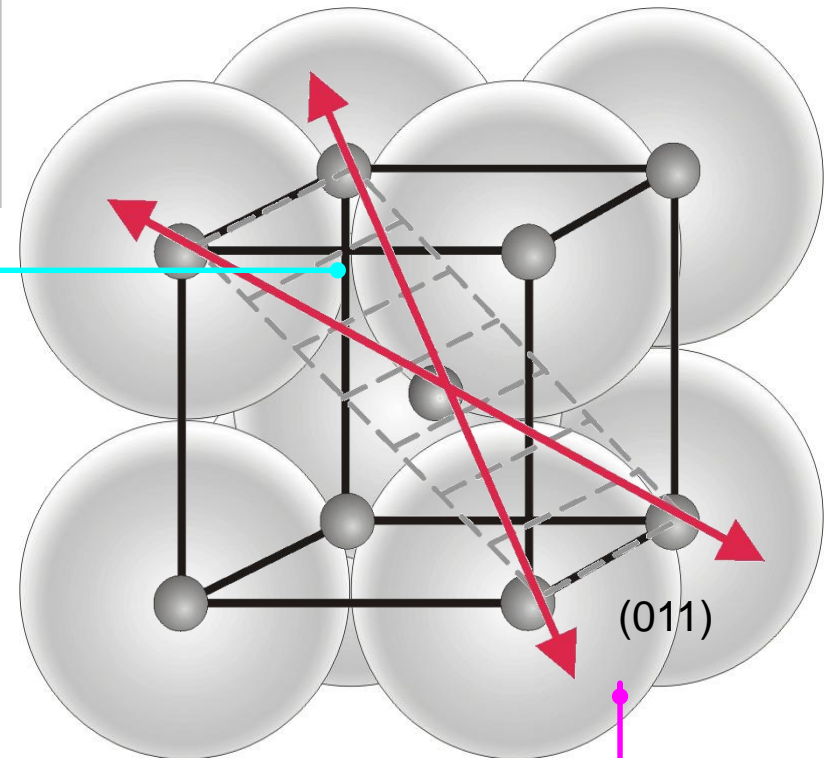
Gleitebene vom Typ $\{110\}$

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen

Gleitrichtung: Richtungen in den Gleitebenen, in denen Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

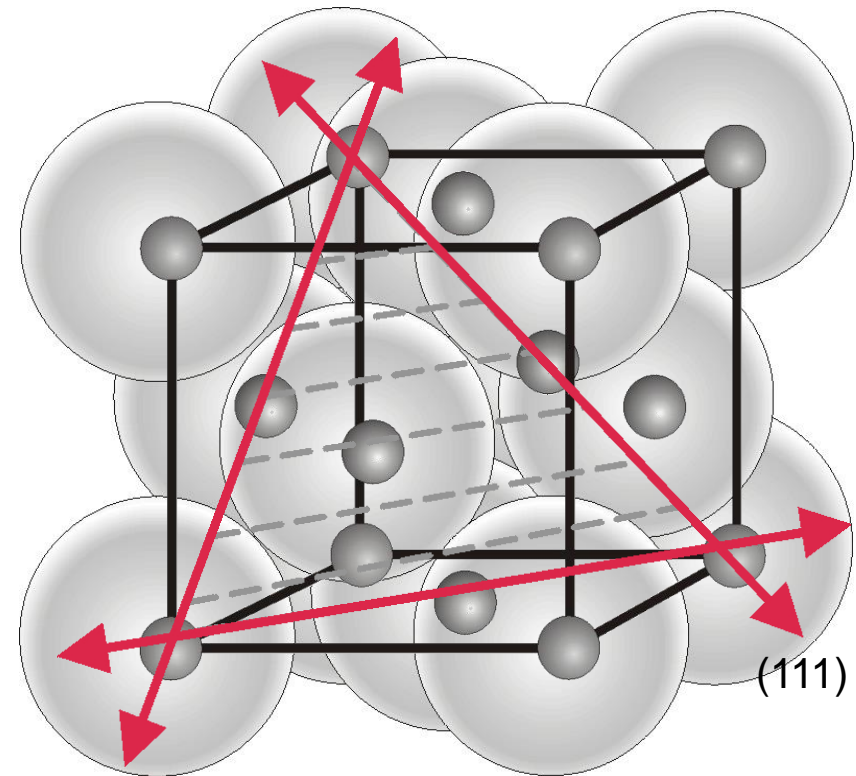
Gleitrichtung vom Typ $\langle 111 \rangle$

Gleitrichtung: immer dichtest gepackte Richtungen



Anzahl Gleitebenen	= 6
Anzahl Gleitrichtungen	= 2
Anzahl Gleitsysteme	= 6 x 2 = 12

Gleitsysteme im kfz-Gitter



Gleitsysteme im kfz-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

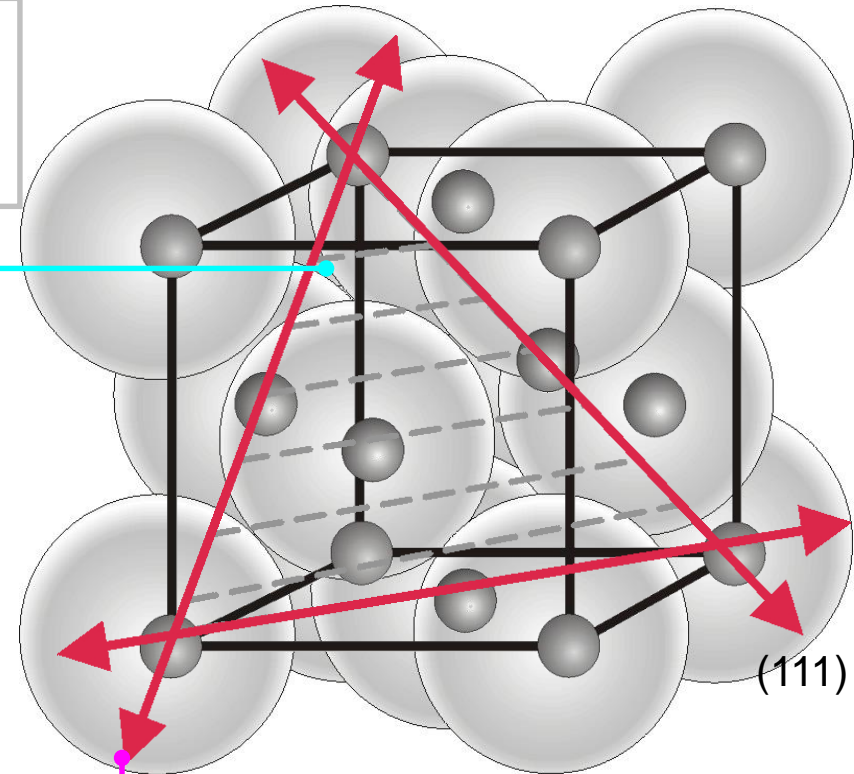
Gleitebene vom Typ {111}

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen

Gleitrichtung: Richtungen in den Gleitebenen, in denen Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitrichtung vom Typ <110>

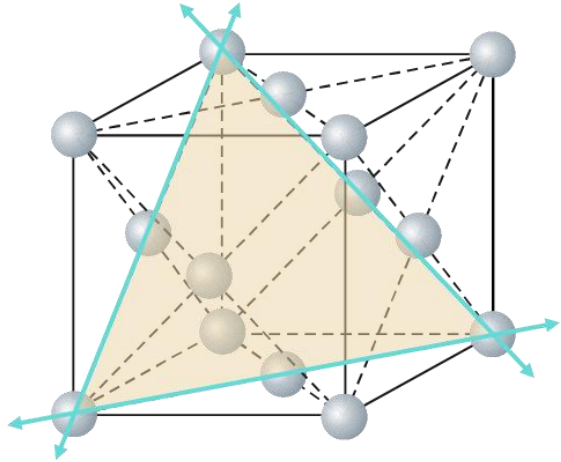
Gleitrichtung: immer dichtest gepackte Richtungen



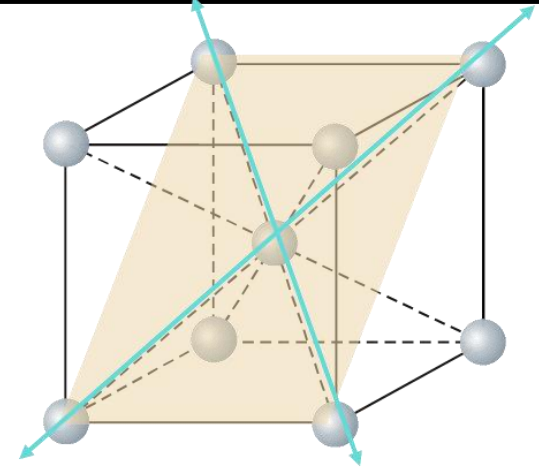
Anzahl Gleitebenen	= 4
Anzahl Gleitrichtungen	= 3
Anzahl Gleitsysteme	= 4 x 3 = 12

Gleitsysteme - Übersicht

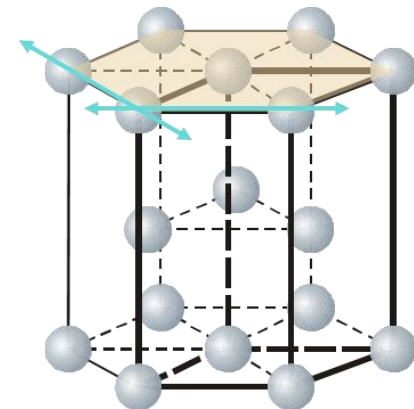
Kfz Richtung $\langle 110 \rangle$ Ebene $\{111\}$



Krz Richtung $\langle 111 \rangle$ Ebene $\{110\}$



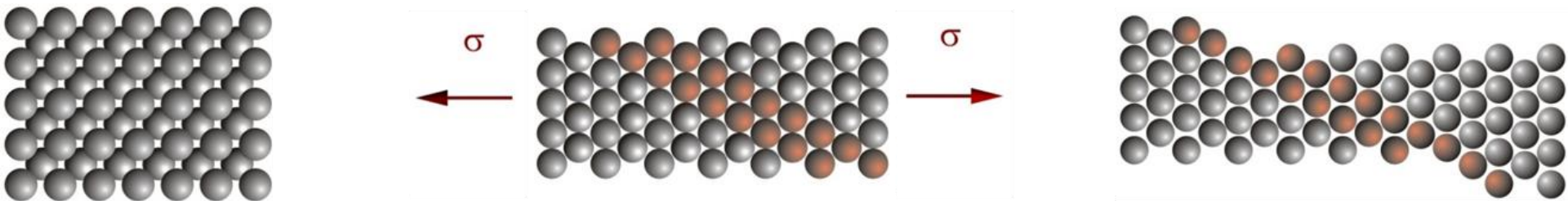
hdp Richtung $\langle 1120 \rangle$ Ebene $\{0001\}$



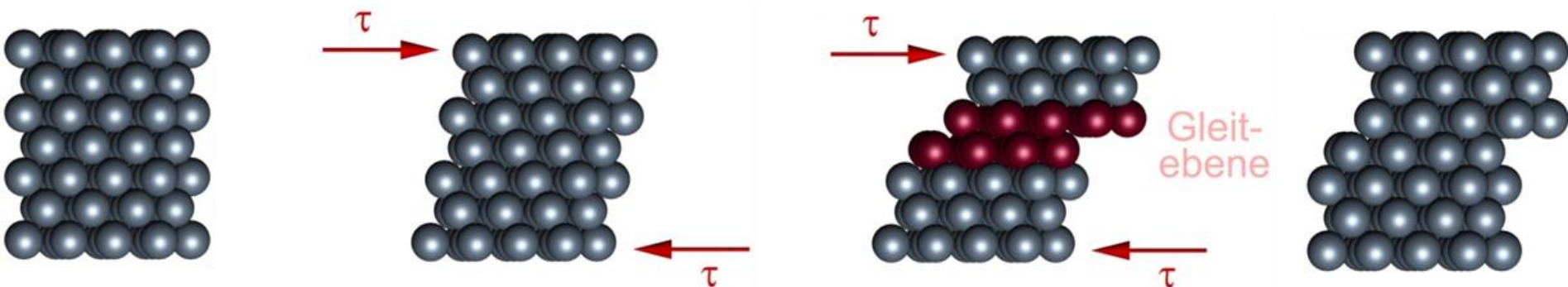
Struktur	Anzahl Ebenen	Richtungen pro Ebene	Gleitsysteme
kfz	4	3	$4 \cdot 3 = 12$
krz	6	2	$6 \cdot 2 = 12$
hdp	1	3	$1 \cdot 3 = 3$

Plastische Verformung durch Versetzungsgleiten

Zugbeanspruchung



Schubbeanspruchung





Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch

Elastizitätsmodul, E

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Zugfestigkeit, R_m

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

Dehngrenze $R_{p0,2}$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{\varepsilon_p 0,2\%}}{A_0}$$

Streckgrenze, R_e

$$R_e = \frac{F_e}{A_0}$$

totale Dehnung ε_t

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L_0} = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch

Elastizitätsmodul, E

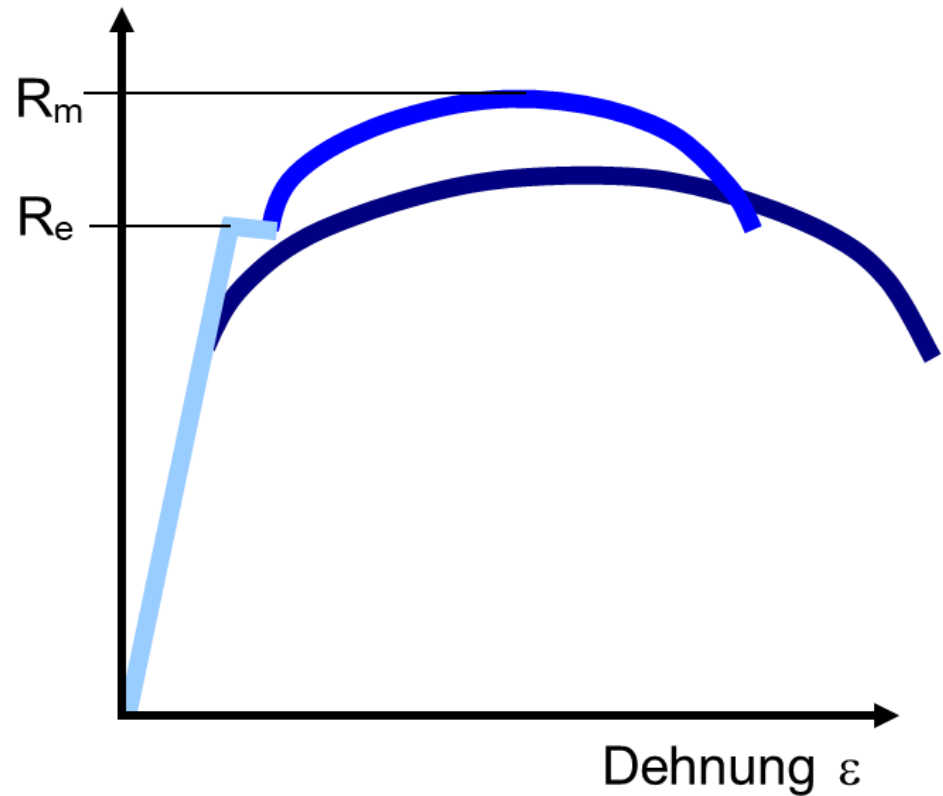
Zugfestigkeit, R_m

Dehngrenze $R_{p0,2}$

Streckgrenze, R_e

totale Dehnung ϵ_t

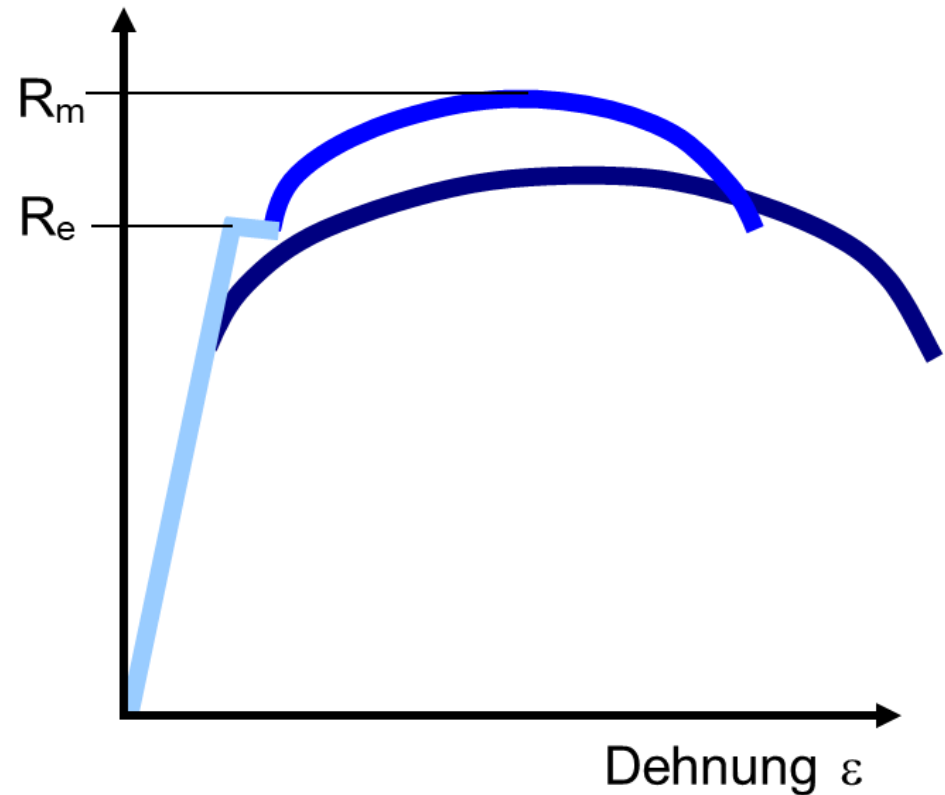
Spannung σ



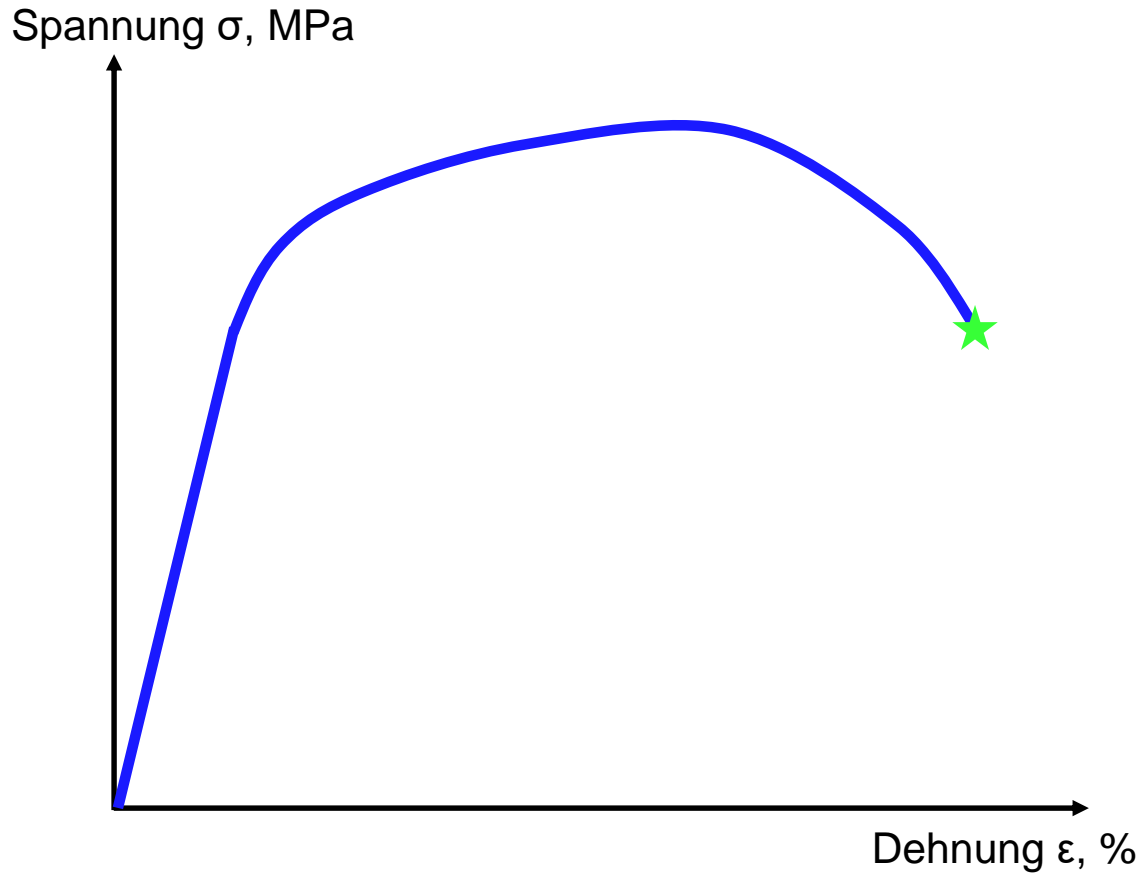
Streckgrenze und Verfestigung

- bei R_e (Streck- / Dehngrenze) beginnt die plastische Verformung
- Streckgrenze (**niemals** die Zugfestigkeit R_m) ist für statische Festigkeitsberechnungen relevant
- Größe der Spannung hängt von kritischer Schubspannung τ_0 ab, bei der Versetzungsbewegung beginnt
- Verfestigungsmechanismen können kritische Schubspannung erhöhen

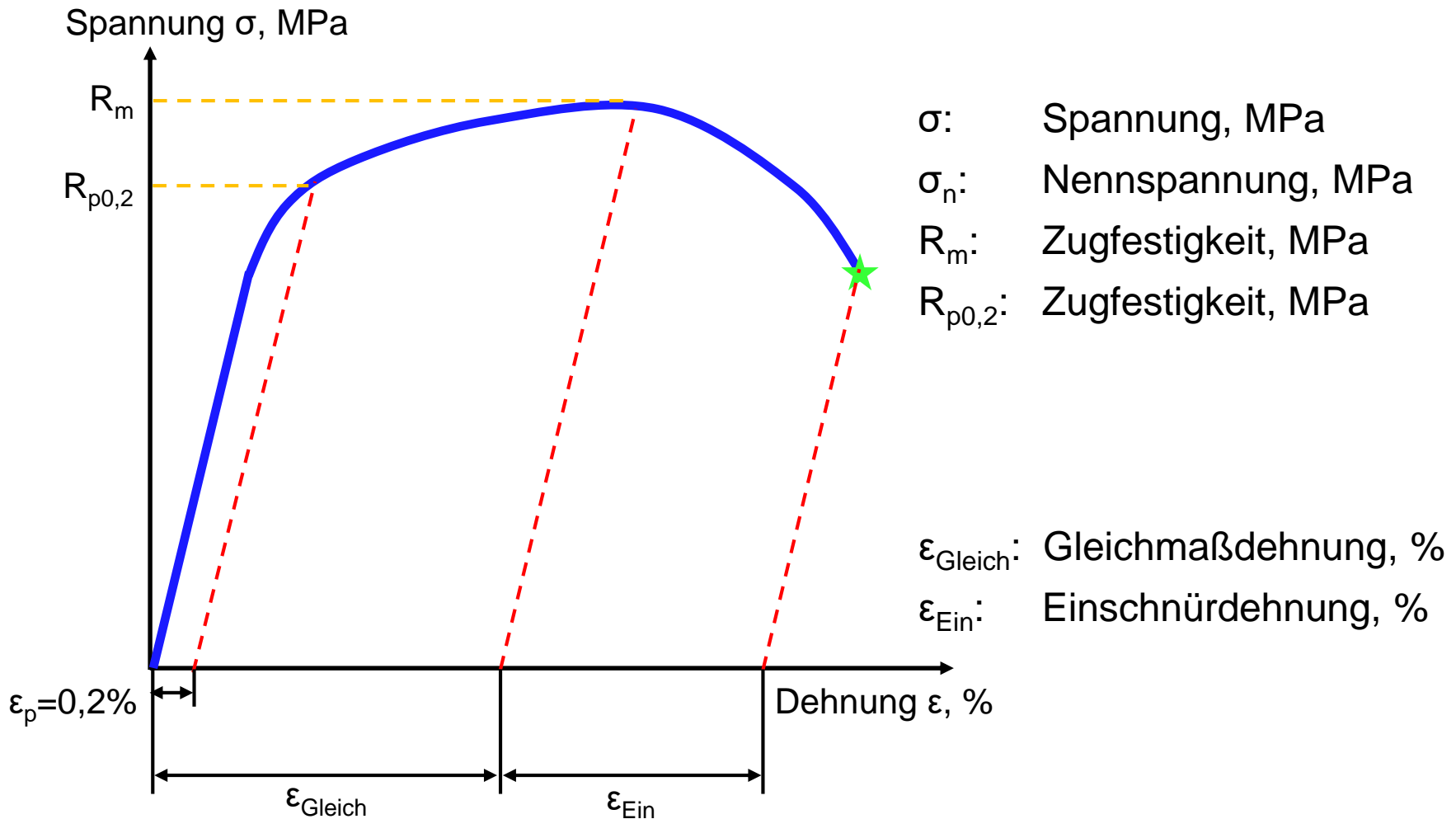
Spannung σ



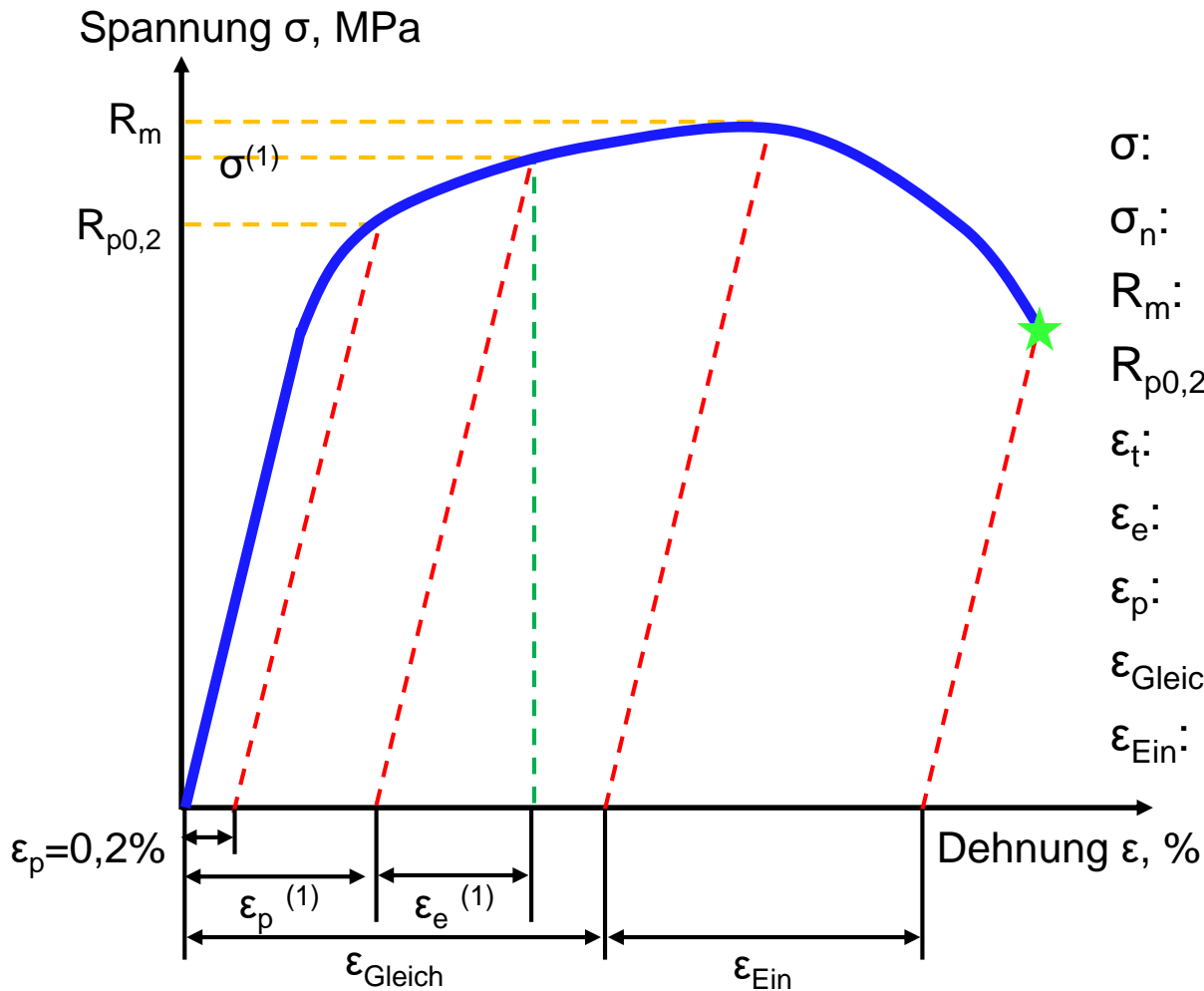
Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch



Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch

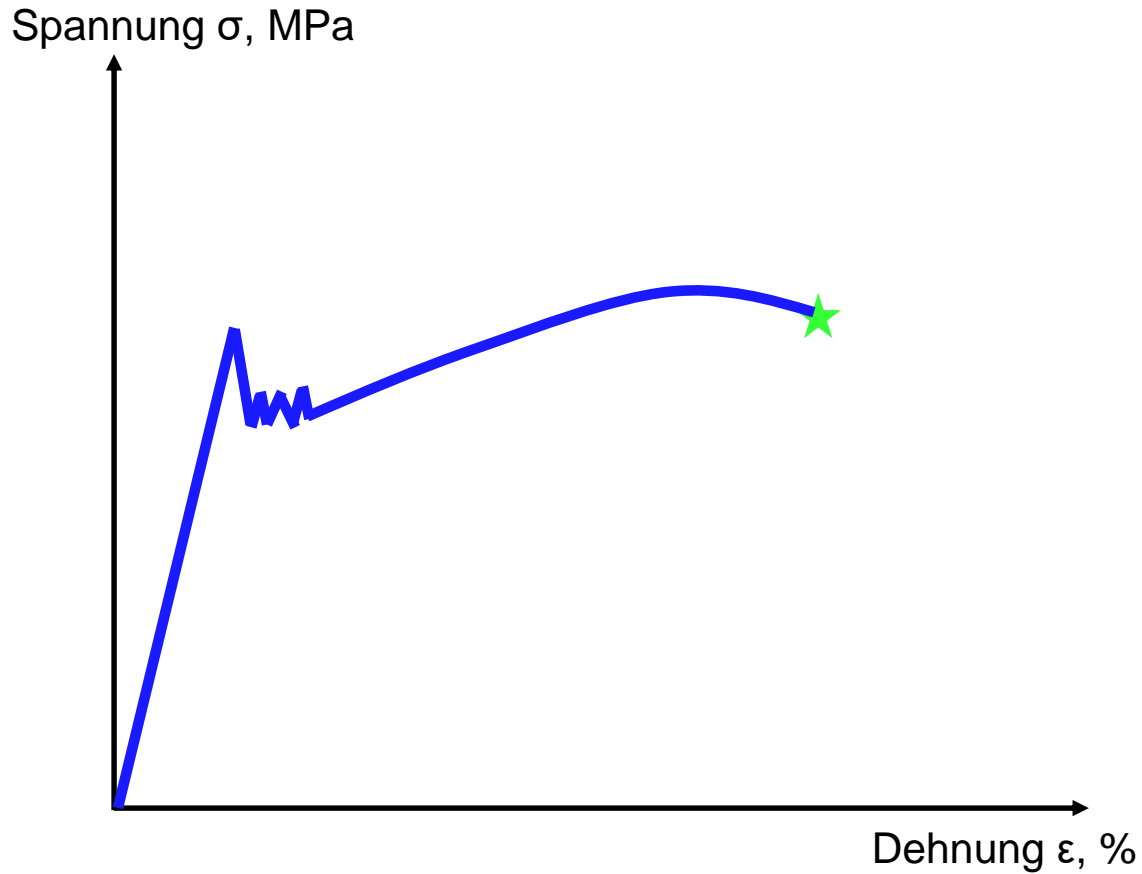


Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch



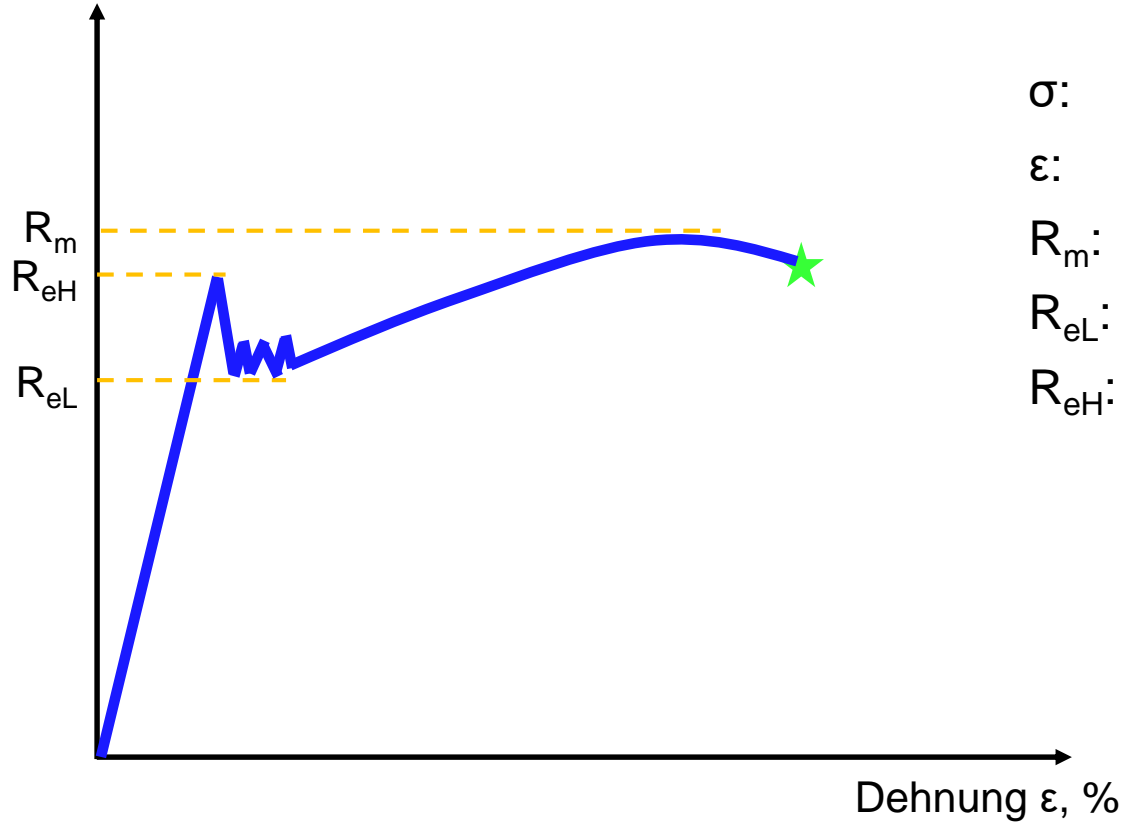
- σ : Spannung, MPa
- σ_n : Nennspannung, MPa
- R_m : Zugfestigkeit, MPa
- $R_{p0,2}$: Zugfestigkeit, MPa
- ε_t : totale Dehnung, %
- ε_e : elastischer Anteil Dehnung, %
- ε_p : plastischer Anteil Dehnung, %
- $\varepsilon_{\text{Gleich}}$: Gleichmaßdehnung, %
- ε_{Ein} : Einschnürdehnung, %

Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch



Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch

Spannung σ , MPa



σ : Spannung, MPa

ϵ : Dehnung, %

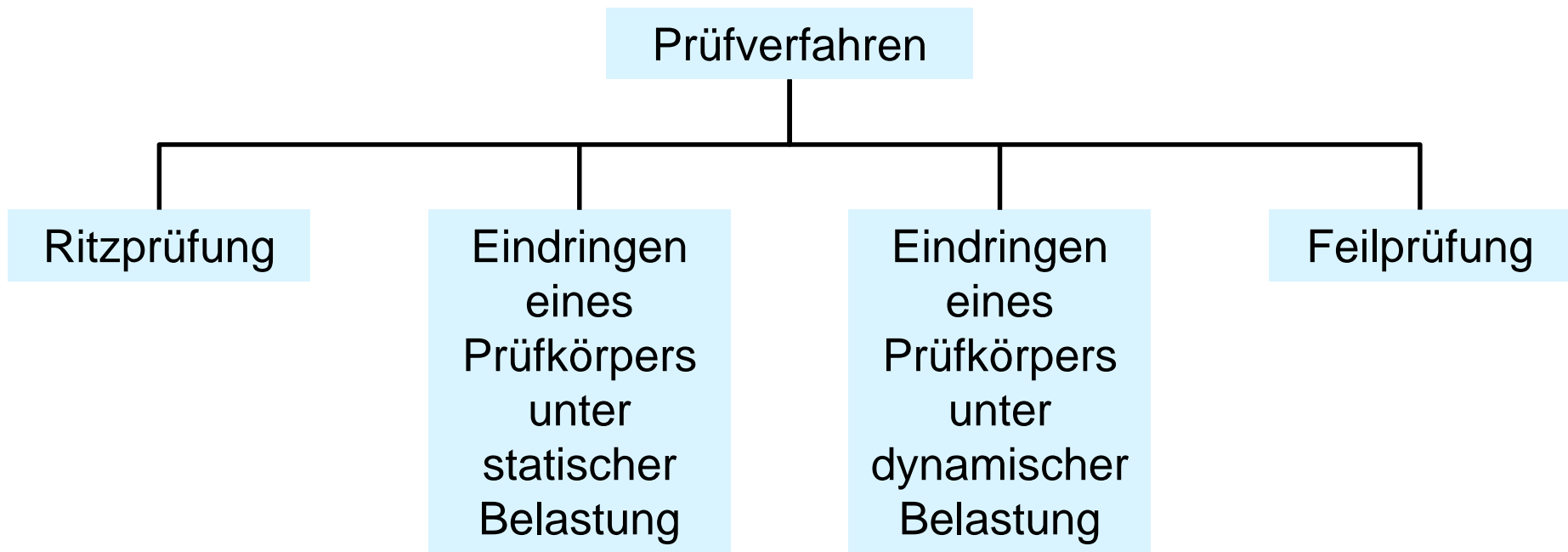
R_m : Zugfestigkeit, MPa

R_{eL} : untere Streckgrenze, MPa

R_{eH} : obere Streckgrenze, MPa

Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Härteprüfung

Als technische Härte wird der Widerstand bezeichnet, den ein Werkstoff dem Eindringen eines harten Prüfkörpers entgegensetzt
-> Härte stellt den Widerstand eines Werkstoffes gegen Verschleiß dar

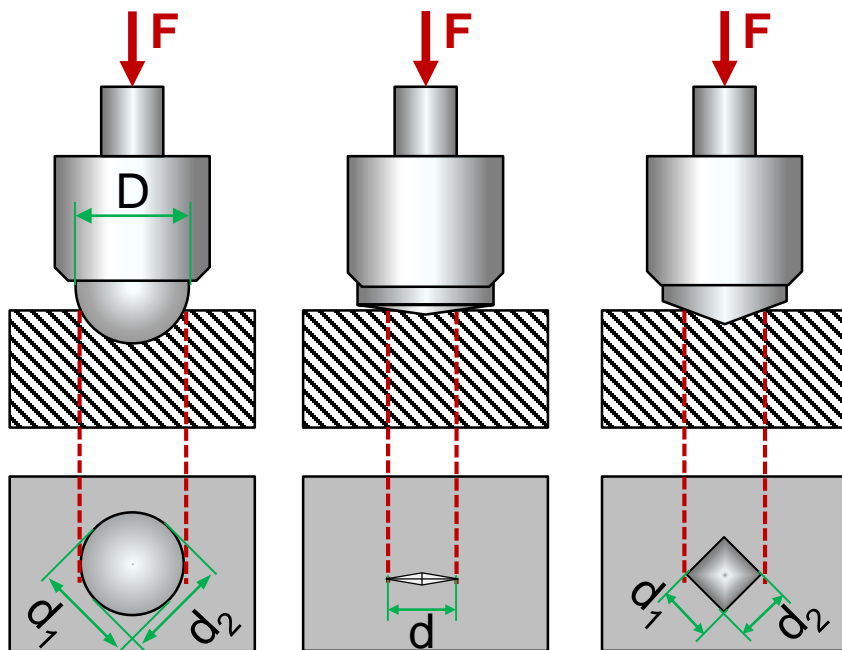


Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Härteprüfung

Eindringen eines Prüfkörpers unter statischer Belastung

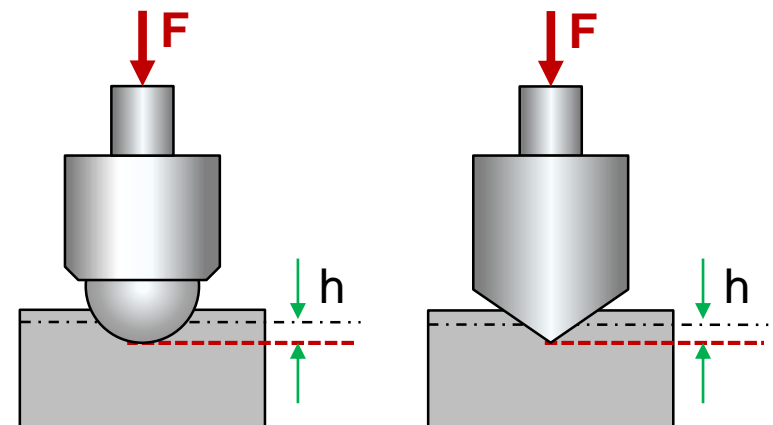
Messen der Eindrückfläche

Brinell, Knoop, Vickers







Messen der Eindrücktiefe

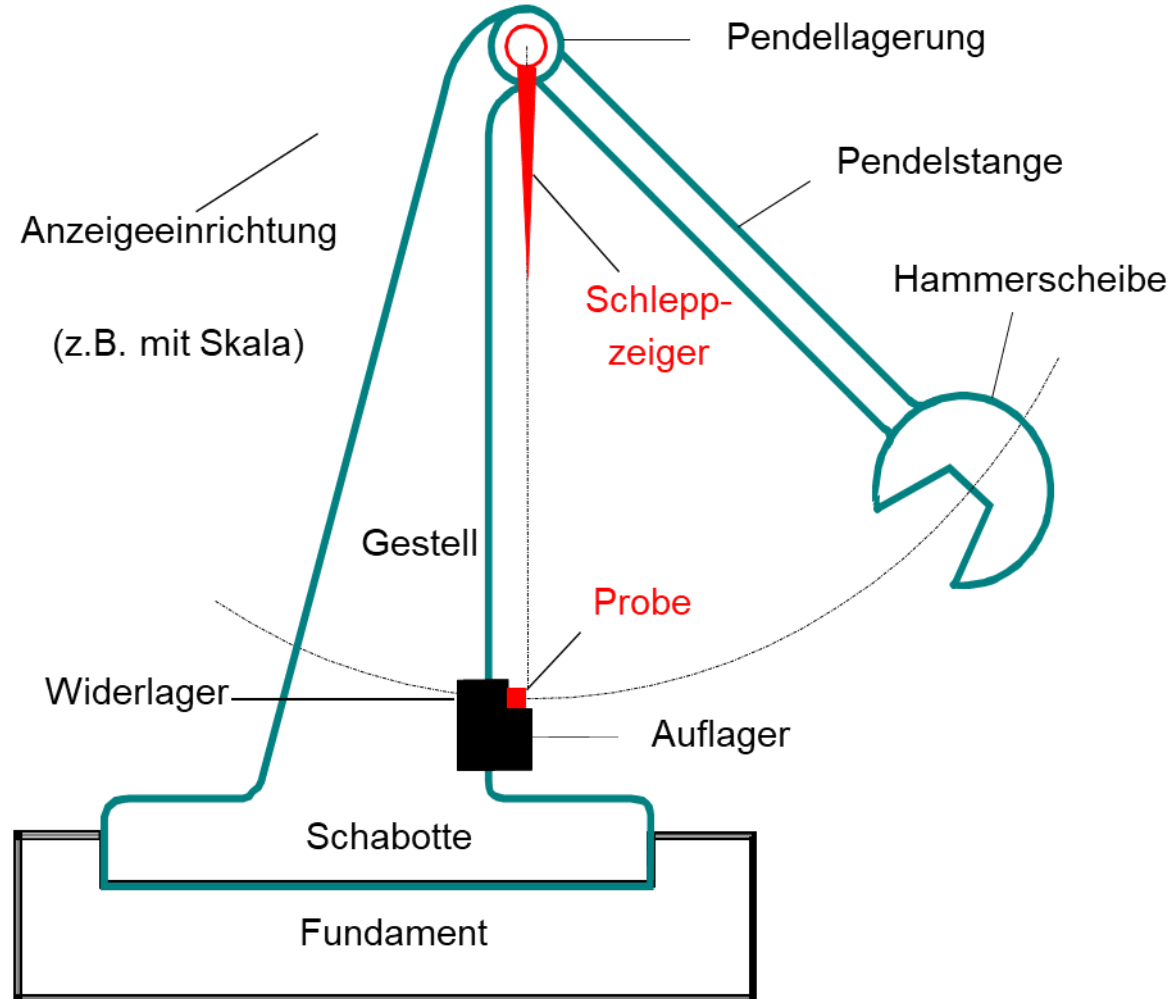
Rockwell



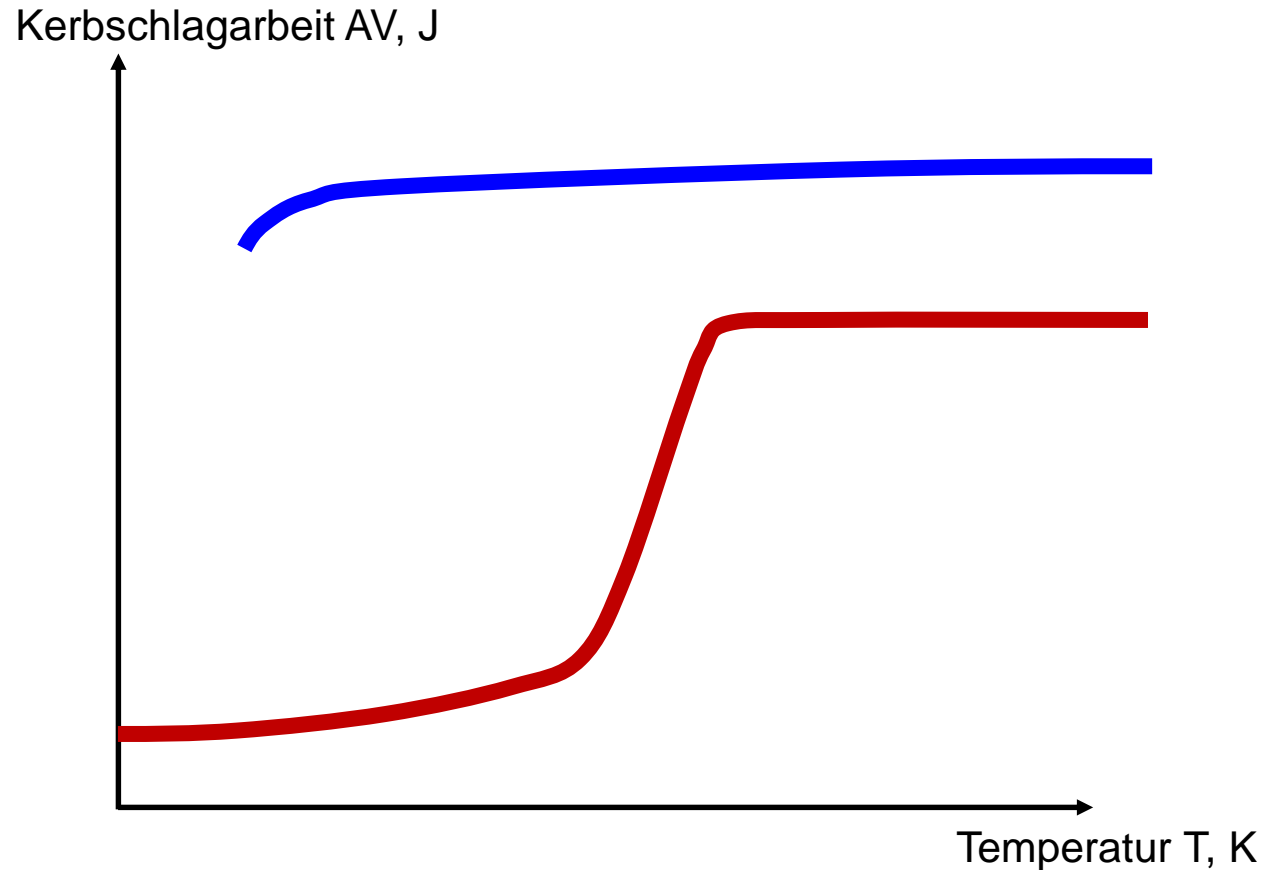
Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Härteprüfung

Verfahren	Eindringkörper	Vor- und Nachteile	Anwendung
Brinell HBW	gehärtete Kugel 	genaue reproduzierbare Werte nur für weiche und mittelharte Werkstoffe	geglühter und vergüteter Stahl Leichtmetalle, Schwermetalle
Vickers HV	Diamantpyramide 	universell einsetzbare Härteprüfung für mittelharte und harte Werkstoffe	gehärteter Stahl, gehärtete Rand- schichten, Gefügebestandteile
Rockwell HRC	Diamantkegel 	direkte Anzeige des Härtewertes für harte Werkstoffe	gehärtete Stähle, Legierungen, Hartmetalle
Rockwell HRB	gehärtete Kugel 	direkte Anzeige des Härtewertes für mittelharte und weiche Werkstoffe	ungehärtete Stähle CuZn-Legierungen

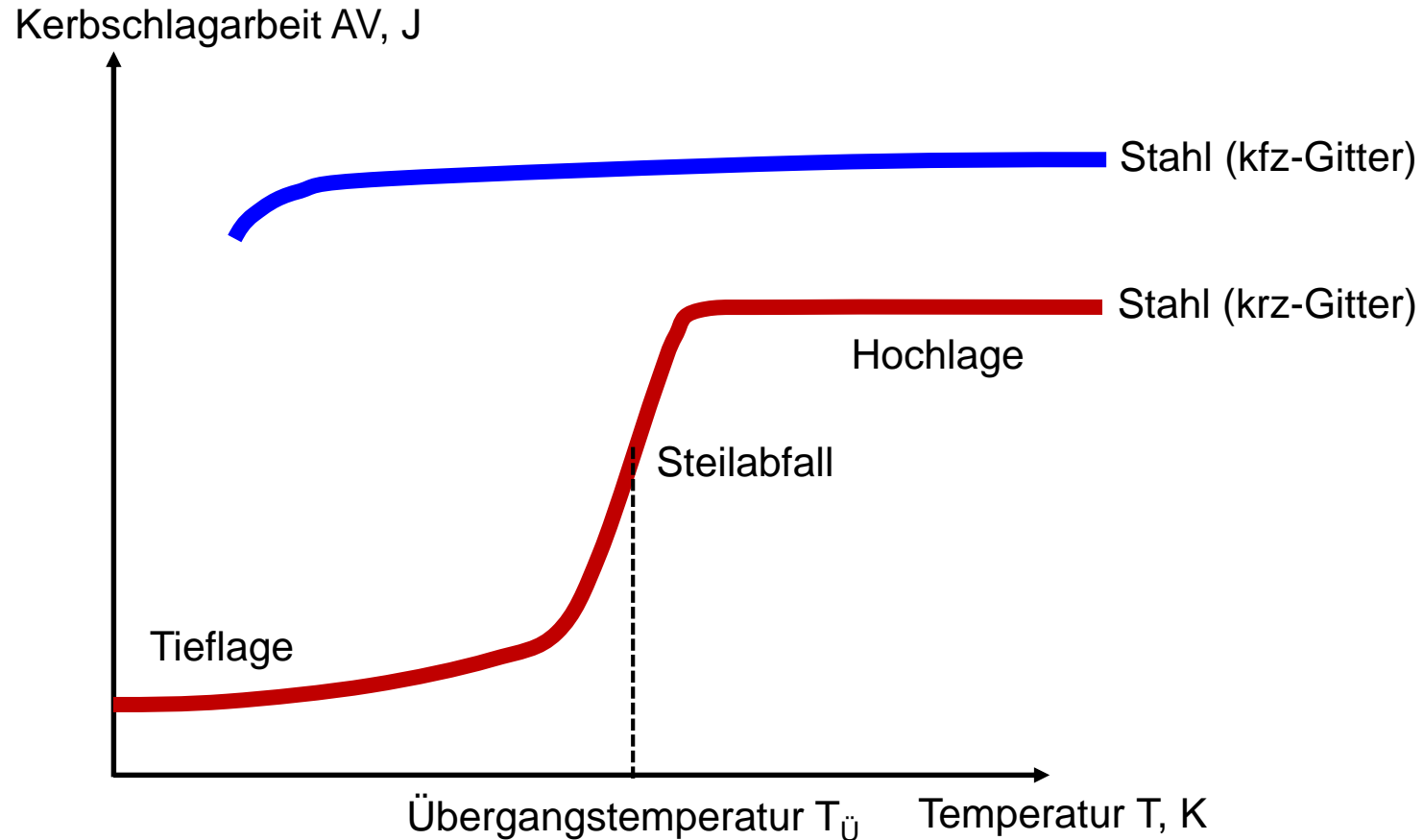
Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Kerbschlagbiegeversuch



Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Kerbschlagbiegeversuch



Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Kerbschlagbiegeversuch



Weitere Prüfverfahren und Kennwerte - Kerbschlagbiegeversuch

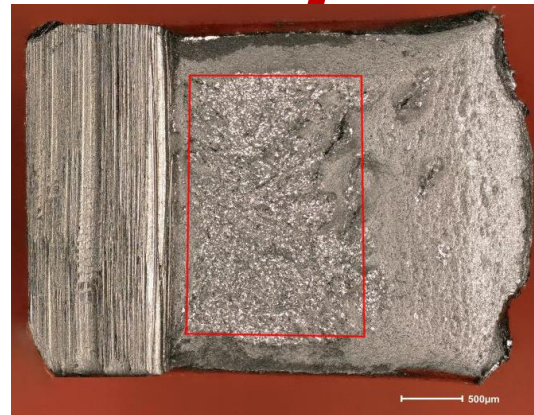
Kerbschlagarbeit AV, J



Sprödbbruch



Mischbruch



Zähbruch

Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$

Temperatur T, K



Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

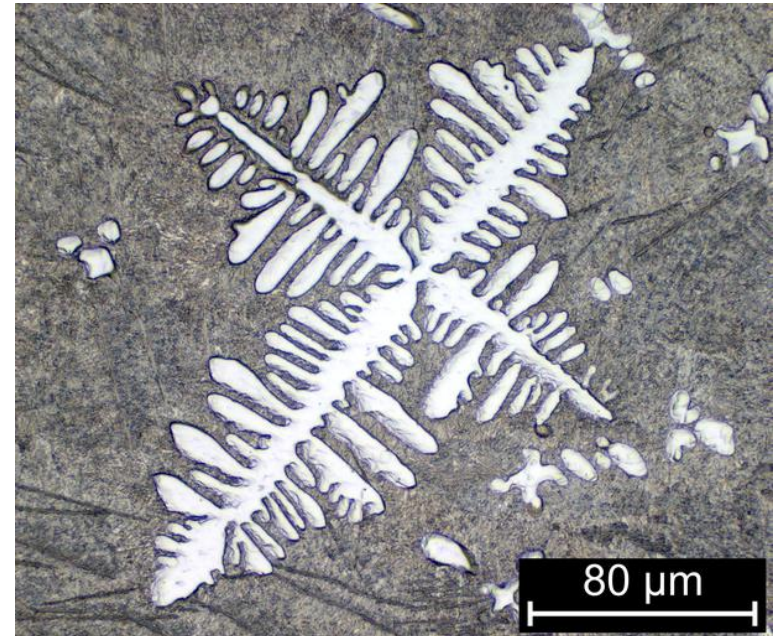
Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

Sommersemester 2020

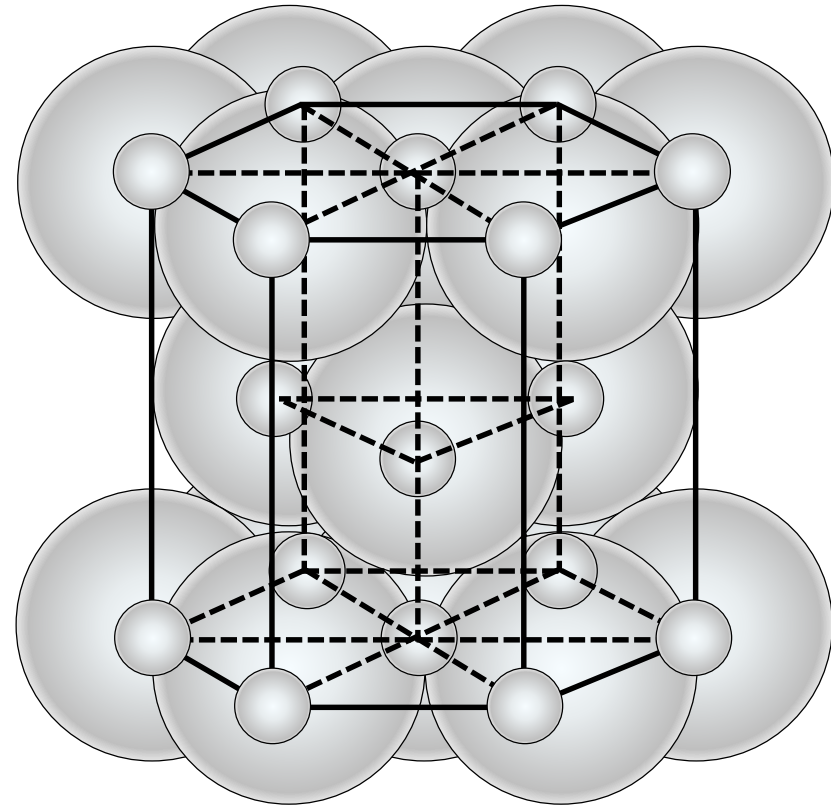


2. Grundlagen der Werkstoffkunde

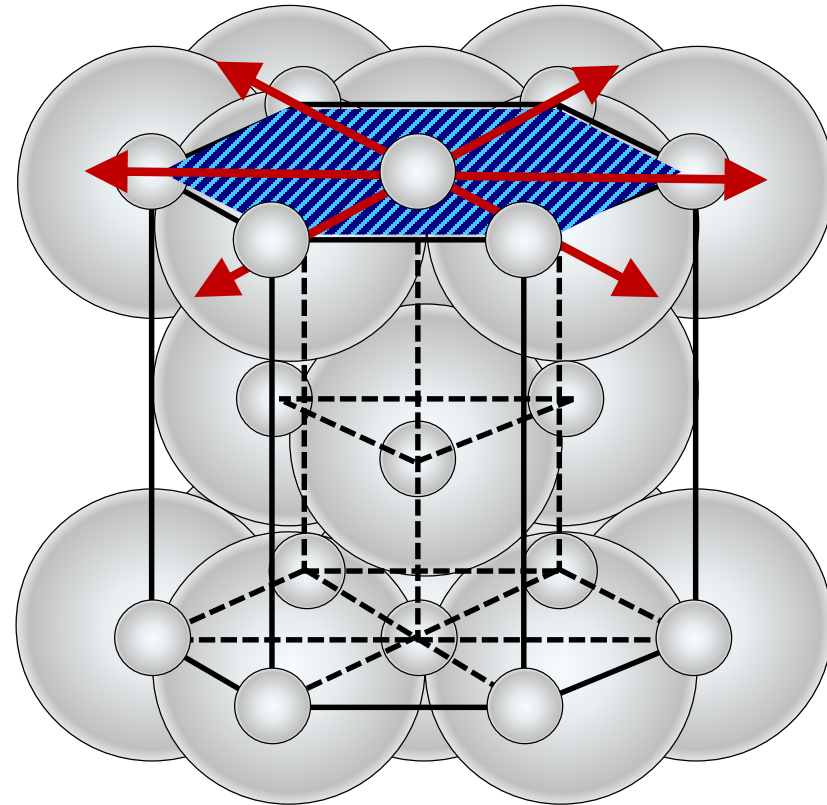
Zusatzfolien



Gleitsysteme im hdp-Gitter



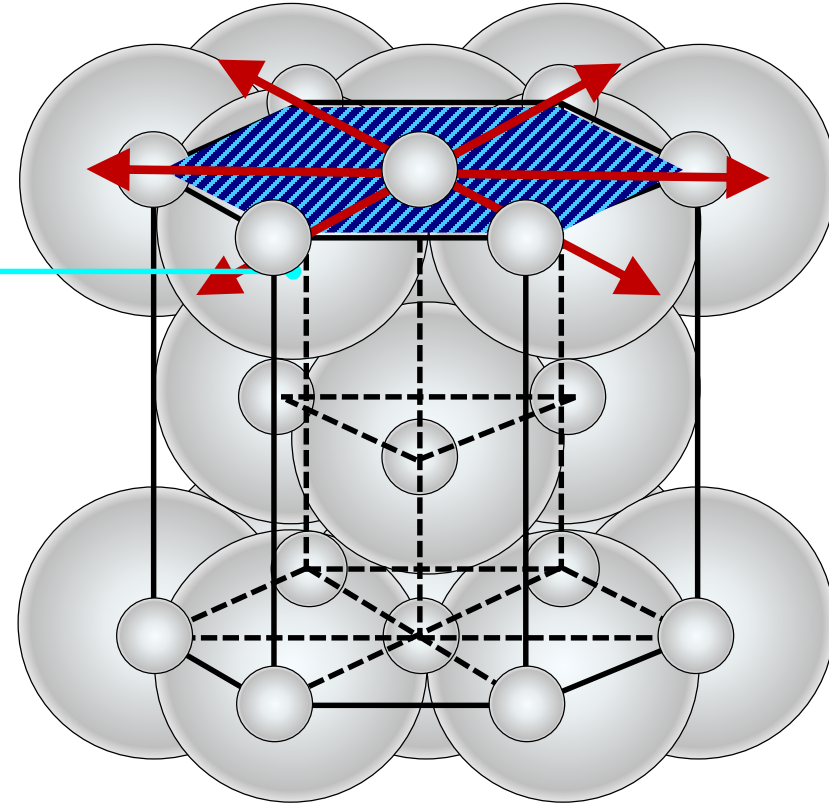
Gleitsysteme im hdp-Gitter



Gleitsysteme im hdp-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitebene vom Typ $\{0001\}$

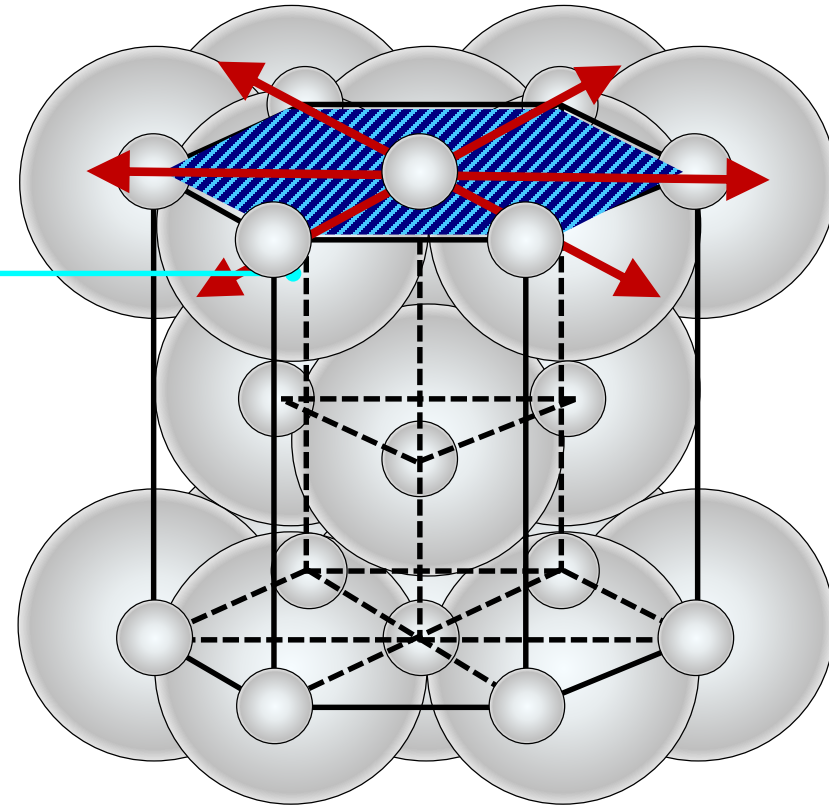


Gleitsysteme im hdp-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitebene vom Typ $\{0001\}$

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen



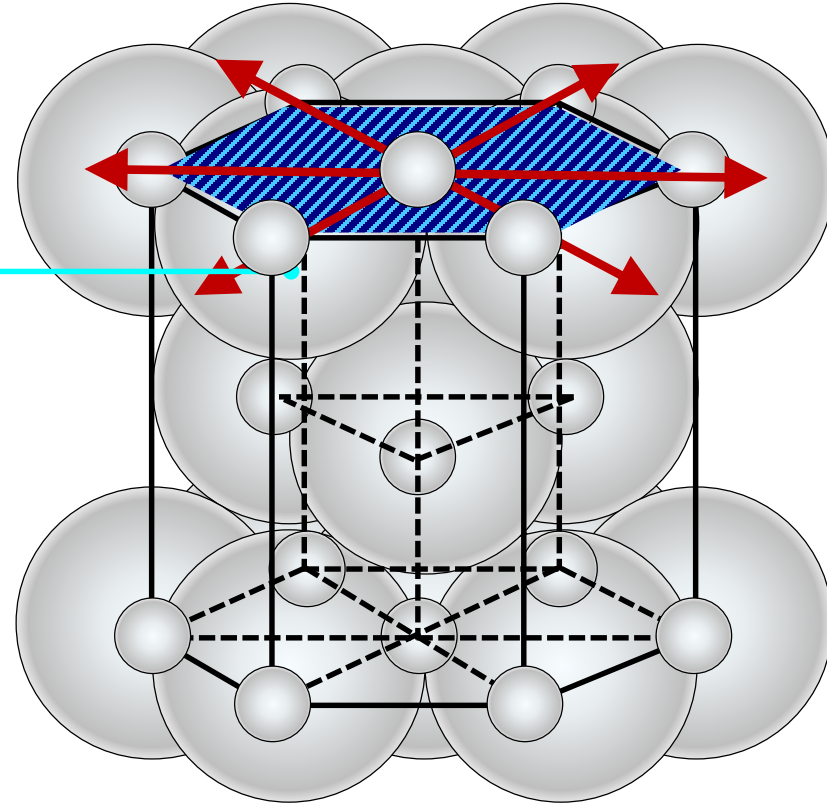
Gleitsysteme im hdp-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitebene vom Typ $\{0001\}$

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen

Gleitrichtung: Richtungen in den Gleitebenen, in denen Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können



Gleitsysteme im hdp-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

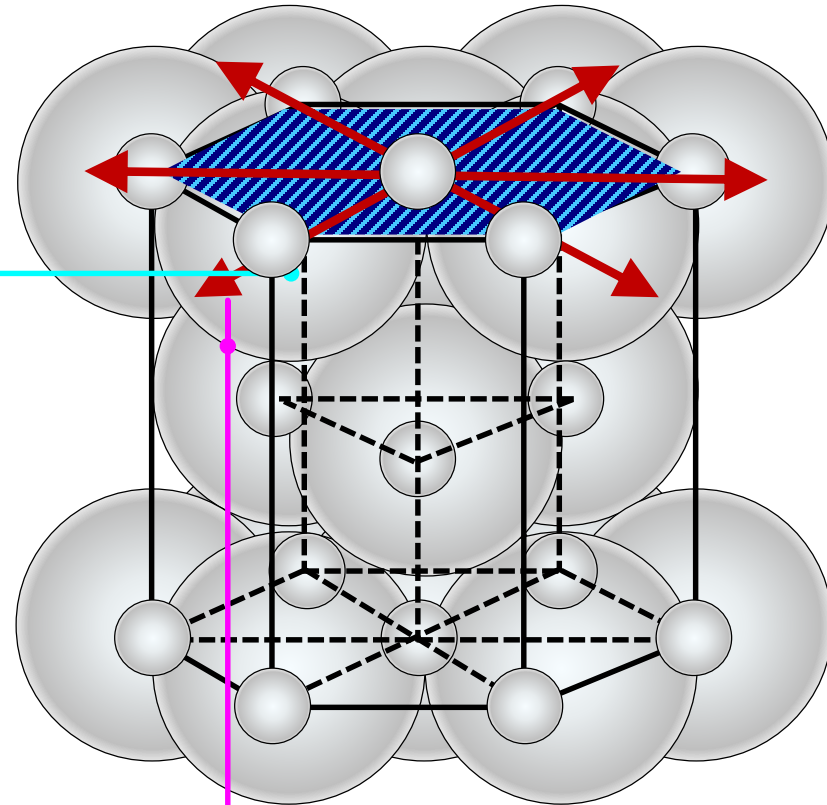
Gleitebene vom Typ $\{0001\}$

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen

Gleitrichtung: Richtungen in den Gleitebenen, in denen Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitrichtung vom Typ $\langle 1120 \rangle$

Gleitrichtung: immer dichtest gepackte Richtungen



Gleitsysteme im hcp-Gitter

Gleitebene: Gitterebenen, in bei Anliegen äußerer Kräfte Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

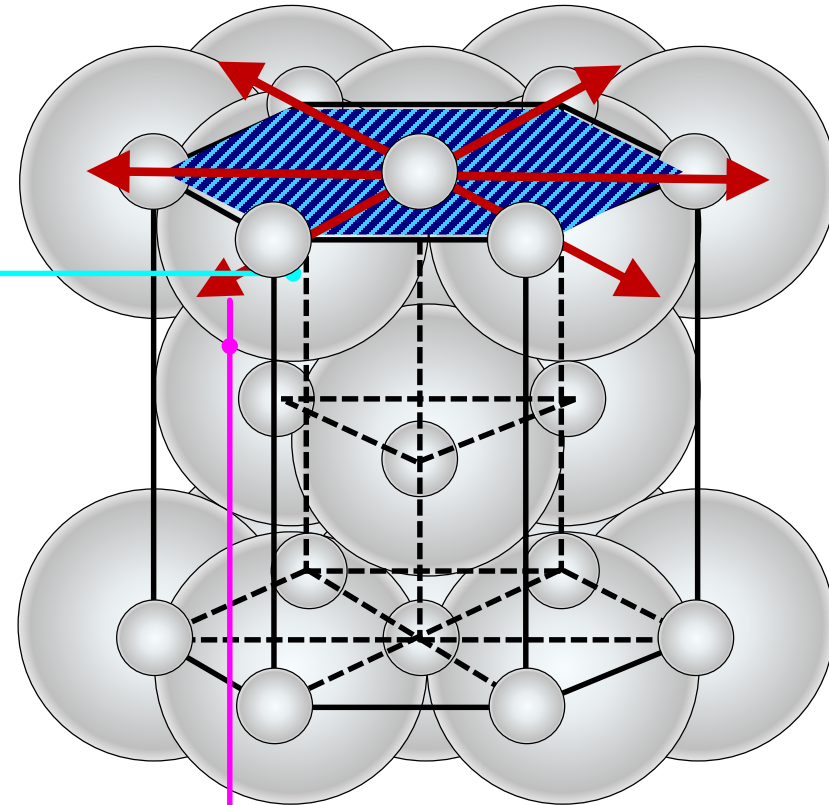
Gleitebene vom Typ $\{0001\}$

Gleitebene: immer dichtest gepackte Ebenen

Gleitrichtung: Richtungen in den Gleitebenen, in denen Versetzungsbewegungen und damit plastische Verformungen stattfinden können

Gleitrichtung vom Typ $\langle 1120 \rangle$

Gleitrichtung: immer dichtest gepackte Richtungen



Anzahl Gleitebenen	= 1
Anzahl Gleitrichtungen	= 3
Anzahl Gleitsysteme	= 1 x 3 = 3



Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

Sommersemester 2020



1. Einführungsveranstaltung
2. Grundlagen der Werkstoffkunde
3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe
4. Titanwerkstoffe
5. Aluminiumwerkstoffe
6. Magnesiumwerkstoffe
7. Zinkwerkstoffe
8. Kupfer-, Blei- und Zinnwerkstoffe
9. Seltene Erden



3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe



https://www.stolle.net/uploads/_processed_/csm_guss_01_520a7beec9.jpg

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

Dichte:	7,85 g/cm ³
E-Modul:	206 GPa
Ausdehnungskoeffizient:	12,3 * 10 ⁻⁶ /K
Elektr. Leitfähigkeit:	9,93 S/m
Wärmeleitfähigkeit:	80,2 W/mK

Stahl = Werkstoff, dessen Massegehalt an Eisen größer ist, als der jeden anderen Elementes und der i.A. weniger als 2 Gew.-% C enthält

Stahl = C < 0,8 Gew.-% → untereutektoider Stahl

Stahl = 0,8 Gew.-% < C < 2,0 Gew.-% → übereutektoider Stahl

Gusseisen = C > 2,0 Gew.-%

Stahl = Eisenwerkstoff, der ohne Nachbehandlung schmiedbar ist

Einteilung in legierte und unlegierte Stähle

Stahlherstellung - Hochofen

- _____
- Vorwärmzone
- _____
- Reduktionszone
- _____
- Kohlungszone
- _____
- Schmelzzone
- _____

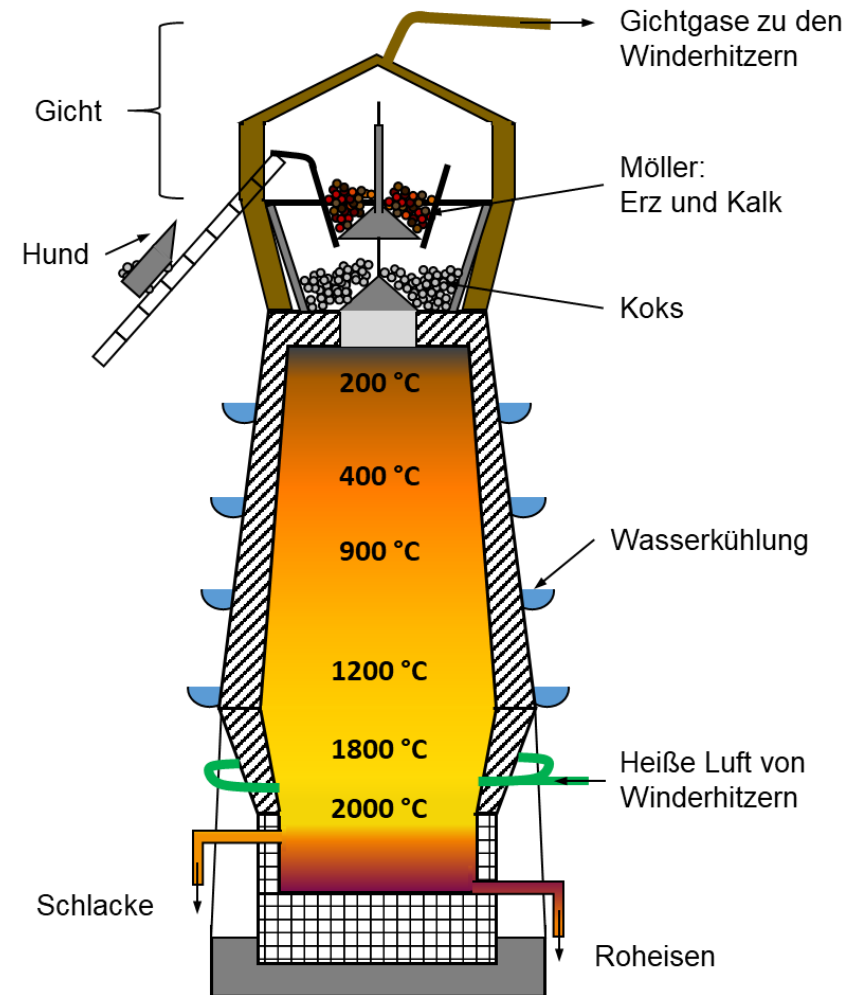


Abbildung verändert nach: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Stahlherstellung - Hochofen

- Beschickung mit Eisenerz, Koks und Zuschlägen (z.B. Kalk)
- Gichtgas (60 % Stickstoff, 20 % Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan) zur Weiternutzung - „Aufheizen“ der Luft
- Trocknen und Vorwärmen von Eisenerz, Koks und Zuschlägen
- Eisenoxid wird durch CO und C reduziert
- Eisen-Kohlenstoffgemisch mit $T_s = 1100\text{ °C}$ - 1200 °C
- Koks verbrennt, Eisen-Kohlenstoffgemisch schmilzt, restliche Eisenverbindungen werden von CO und C zu Fe reduziert
- Roheisen wird abgeschöpft, (3 % bis 4 % C), ist spröde und nicht schmiedbar

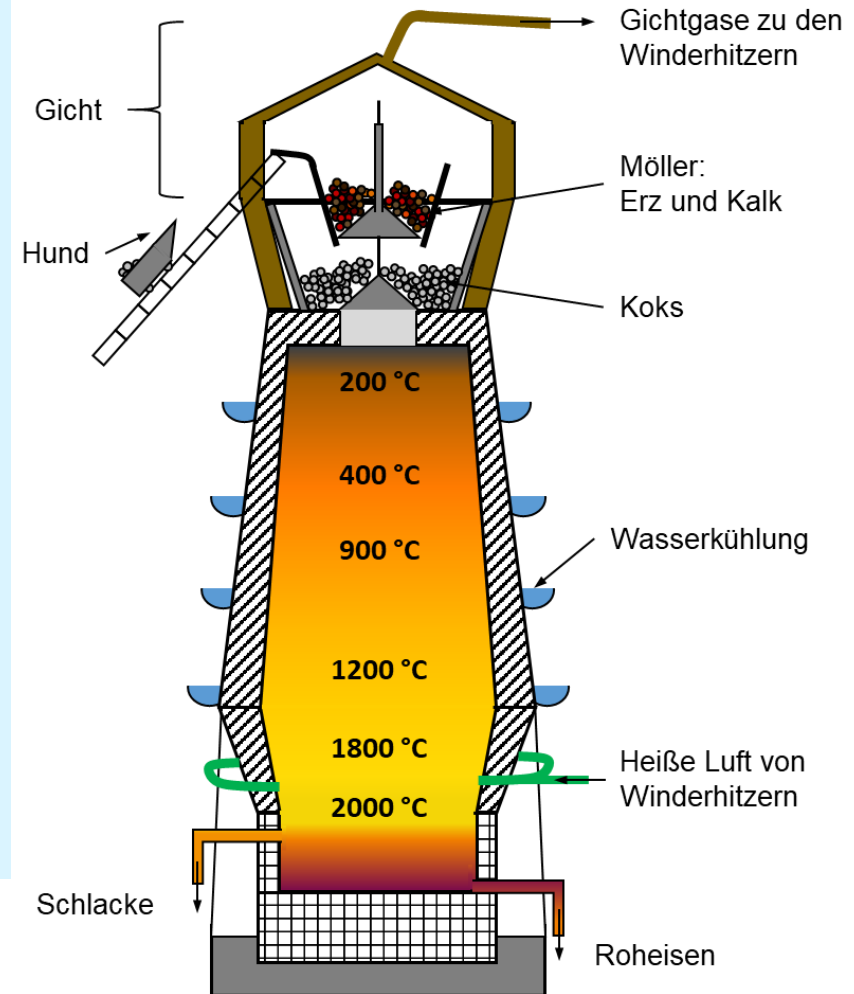
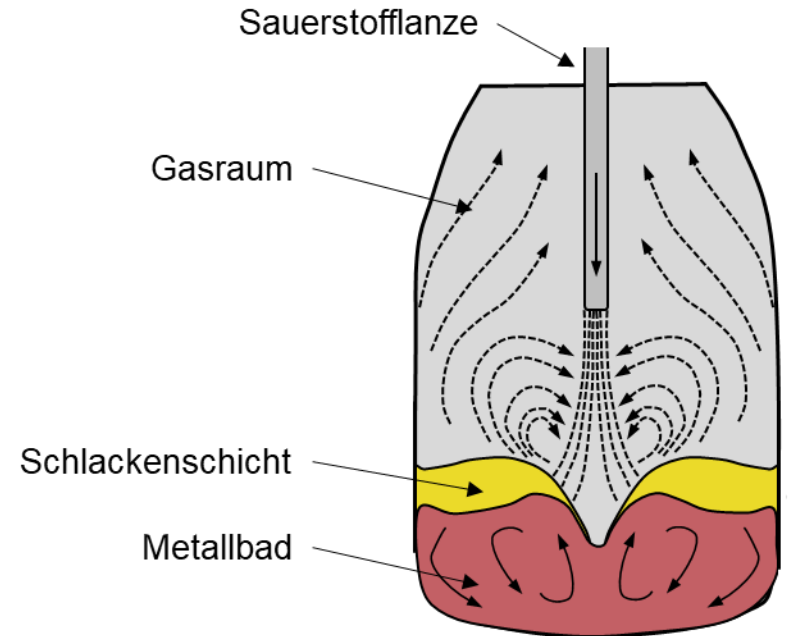


Abbildung verändert nach: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Stahlherstellung - Konverter

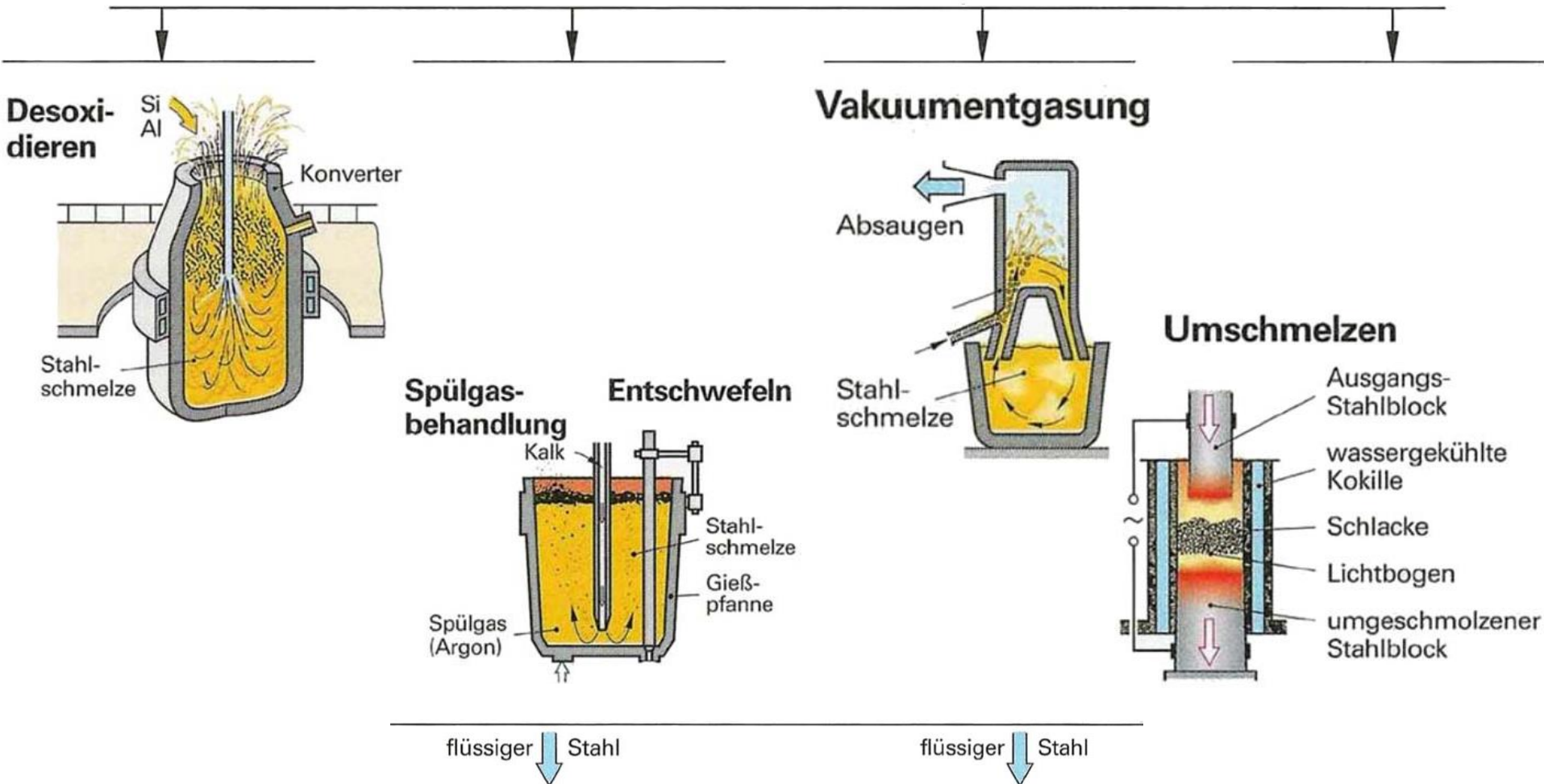
Sauerstoffblasverfahren (LD-Verfahren):

- Reduzieren/Entfernen störender Begleitelemente wie C, S, P, Si
- Blasvorgang mit technisch reinem Sauerstoff führt zu Verbrennen von C, S, P und Si
- Eisenbegleiter entweichen als Gas oder werden in flüssiger Schlacke gebunden
- Blasdauer bestimmt Reinheitsgrad des Eisens/Stahls



Strömungsverhältnisse
beim Blasvorgang

Stahlherstellung

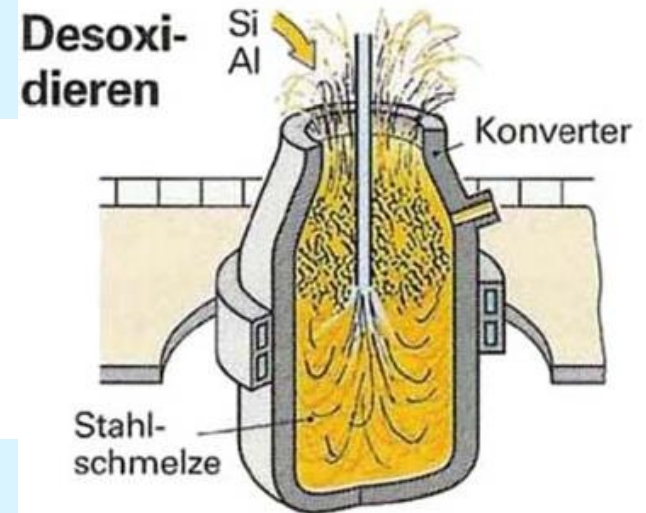


Verändert nach: <http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlherstellung/herstellung.html>

Stahlherstellung - Konverter

Verbesserung der Qualität des Stahls durch:

- Einblasen von Sauerstoff in flüssige Stahlschmelze
- Binden von Begleitelementen
- Zugaben von Si und Al



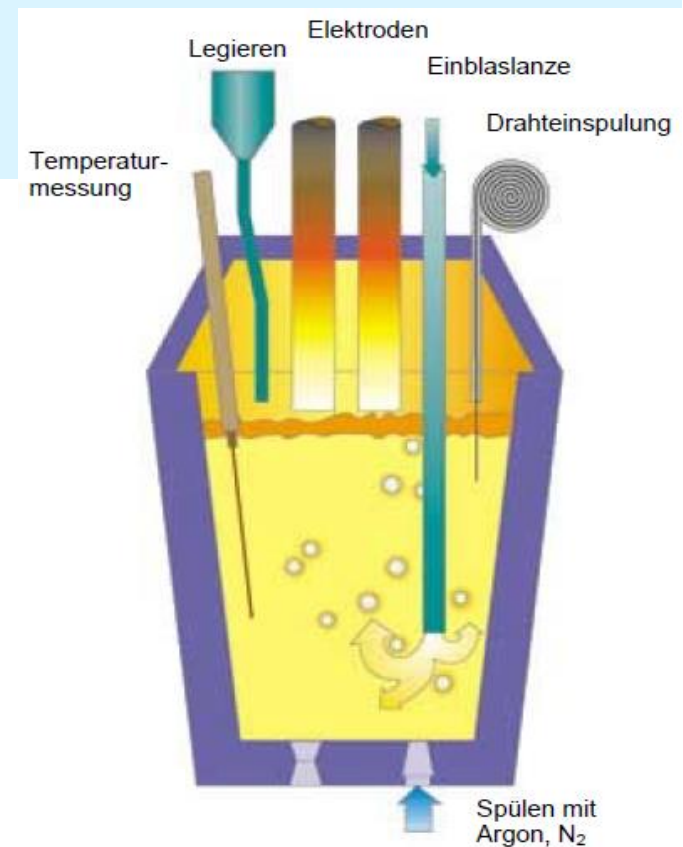
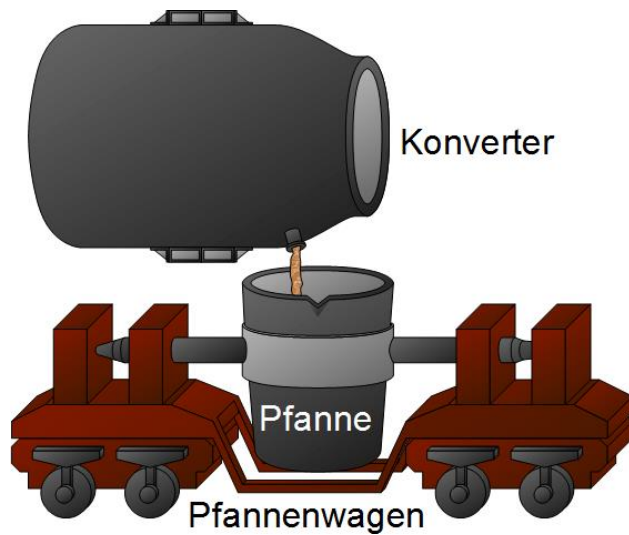
Effekte beim Desoxidieren:

- Si und Al binden Gase, die beim Abkühlen frei werden
 - Geringere Neigung zur Lunkerbildung
- Verhinderung einer Entmischung der Schmelze
 - C, P und S reichern sich an und bilden Seigerungen
- Beruhigt vergossener Stahl

Stahlherstellung - Pfannenofen

Puffer zwischen Erschmelzung und Vergießen des Stahls

- Einstellung definierter Temperaturen in Stahlgießpfanne
- Spülen der Schmelze mit Argon
- Analyse der chemischen Zusammensetzung
- Vorbereitung der Schmelze für Weiterverarbeitung



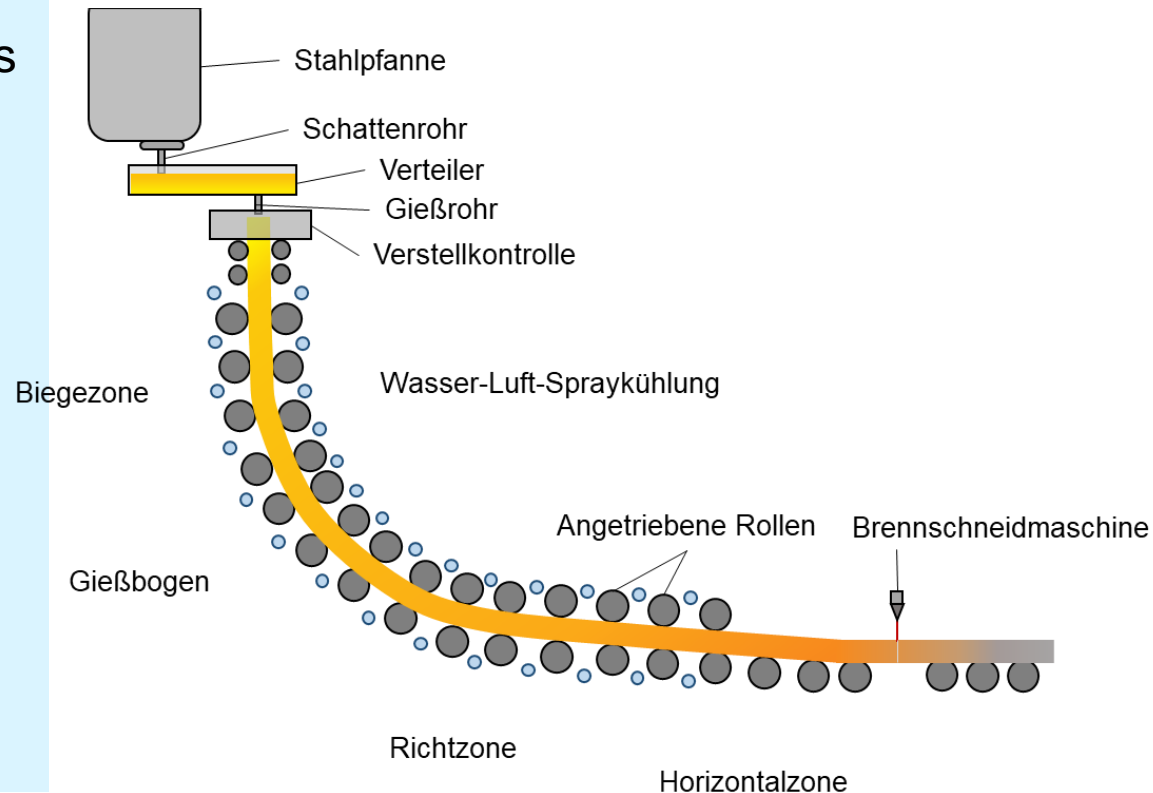
<http://www.oocities.org/tego3/Stahlerzeugung.pdf>, <https://www.ahoepler.de/images/maschinenbau.../stahl-herstellung/vom-roehisen-zum-rohstahl/pfannenwagen.png>

Stahlherstellung - Strangguss

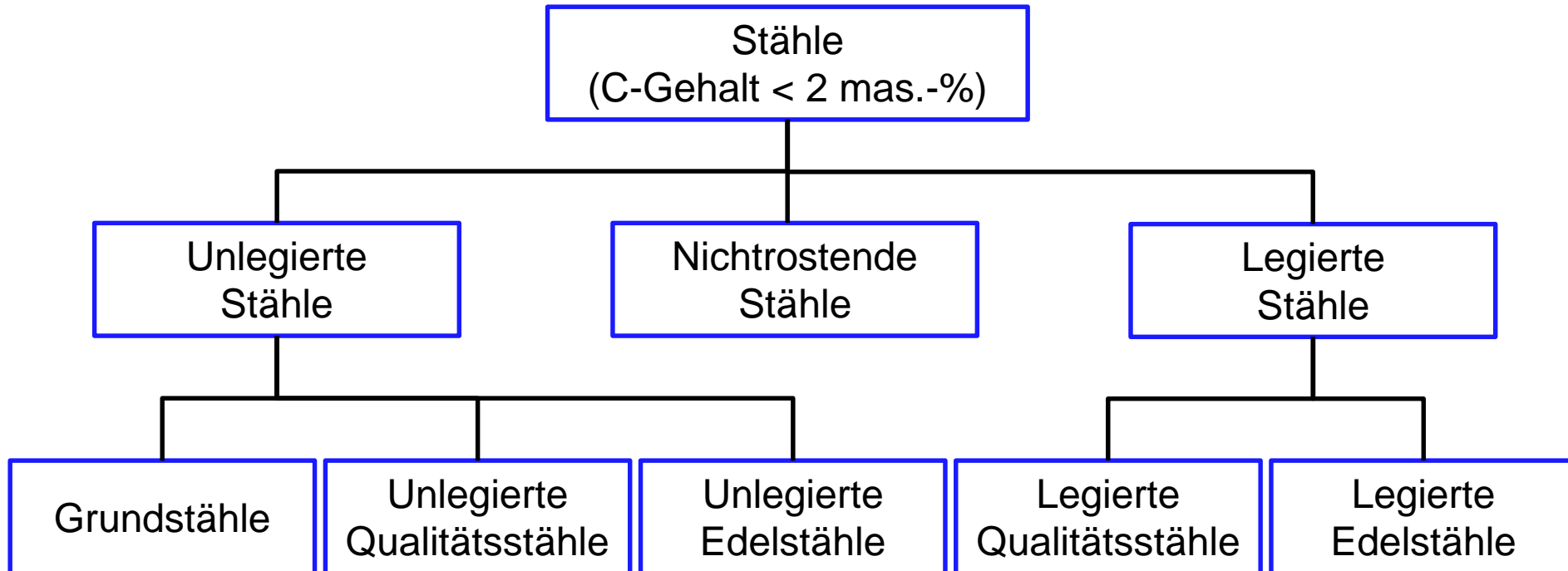
Vergießen des Stahls zu
Halbzeugen:

- Eingießen des flüssigen Stahls
- Umlenken des zunehmend abkühlenden Stahls um 90°
- Einstellen der (Blech-/Brammendicke durch Rollenanzordnung
- Richten des Halbzeuges
- Abtrennen

- Größter Anteil der Stähle (ca. 90 %)
- Vorbrammen, Platinen, Stränge



Einteilung der Stähle



Einteilung der Stähle

Werkstoffe mit $C \leq 2,0$ mas.-% \rightarrow Stähle

$C < 0,8$ mas.-% \rightarrow untereutektoid

$0,8 \text{ mas.-%} < C < 2,0 \text{ mas.-%}$ \rightarrow übereutektoid

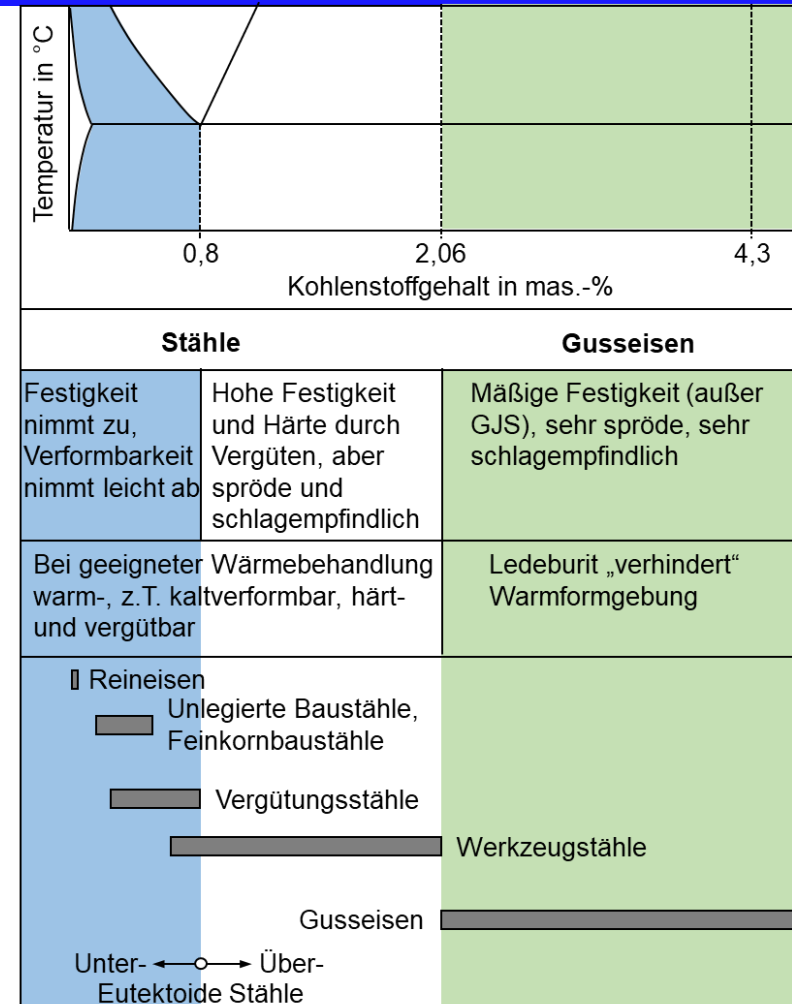
$C > 2,0$ mas.-% \rightarrow Gusseisen

Stahl:

Zäh, warmumformbar, Festigkeitssteigerung durch Wärmbehandlung

Gusseisen:

Mäßige Festigkeitswerte



Bezeichnung der Stähle

Allgemeine Baustähle

Warm- oder kalt gewalzte Stähle, für die keine Wärmebehandlung vorgesehen ist. (Profile für Strommasten oder Brücken, Stahlträger usw...)

Feinkornbaustähle

Festigkeitssteigerung über Feinkornbildung, nicht über Kohlenstoffgehalt, da dieser die Schweißeignung herabsetzt

Vergütungsstähle

Stähle für den Maschinenbau, bei denen eine Wärmebehandlung (Vergüten) zur Festigkeitssteigerung vorgesehen ist

Einsatzstähle

Stähle mit Kohlenstoffgehalten bis 0,2 mas.-% (eigentlich nicht härtbar). Durch Aufkohlen im Randbereich können außen harte und innen zähe Werkstücke erzeugt werden für z. B. Zahnräder

Bezeichnung der Stähle

Automatenstähle

Stähle für die spanabhebende Massenfertigung (Bohren, Drehen, Fräsen)
Kurzspanigkeit durch Zugabe von Schwefel und eventuell Blei

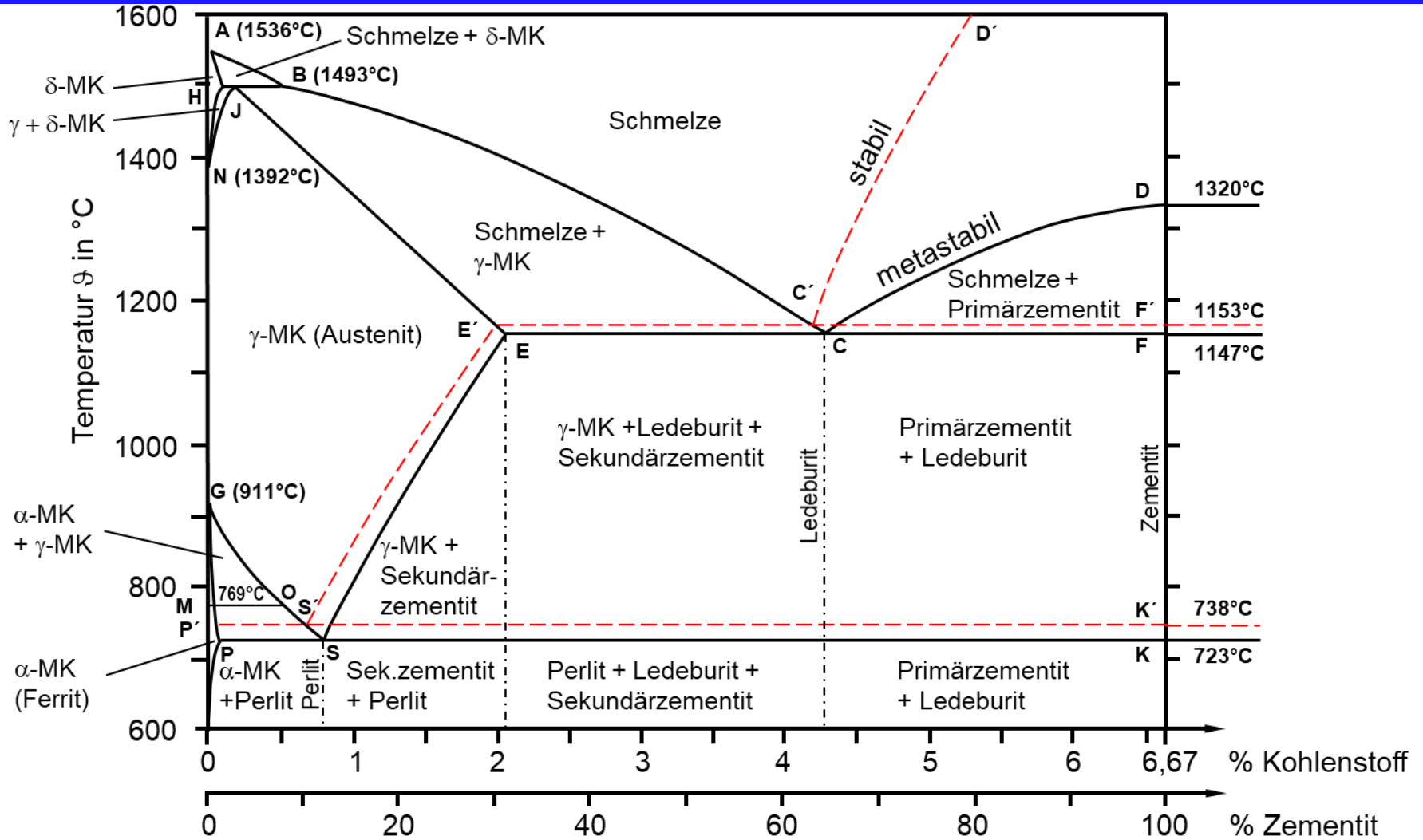
Werkzeugstähle

Edelstähle zur Fertigung von Werkzeugen, die meist vergütet werden
Kohlenstoffgehalt 0,6 mas.-% bis 1,3 mas.-%

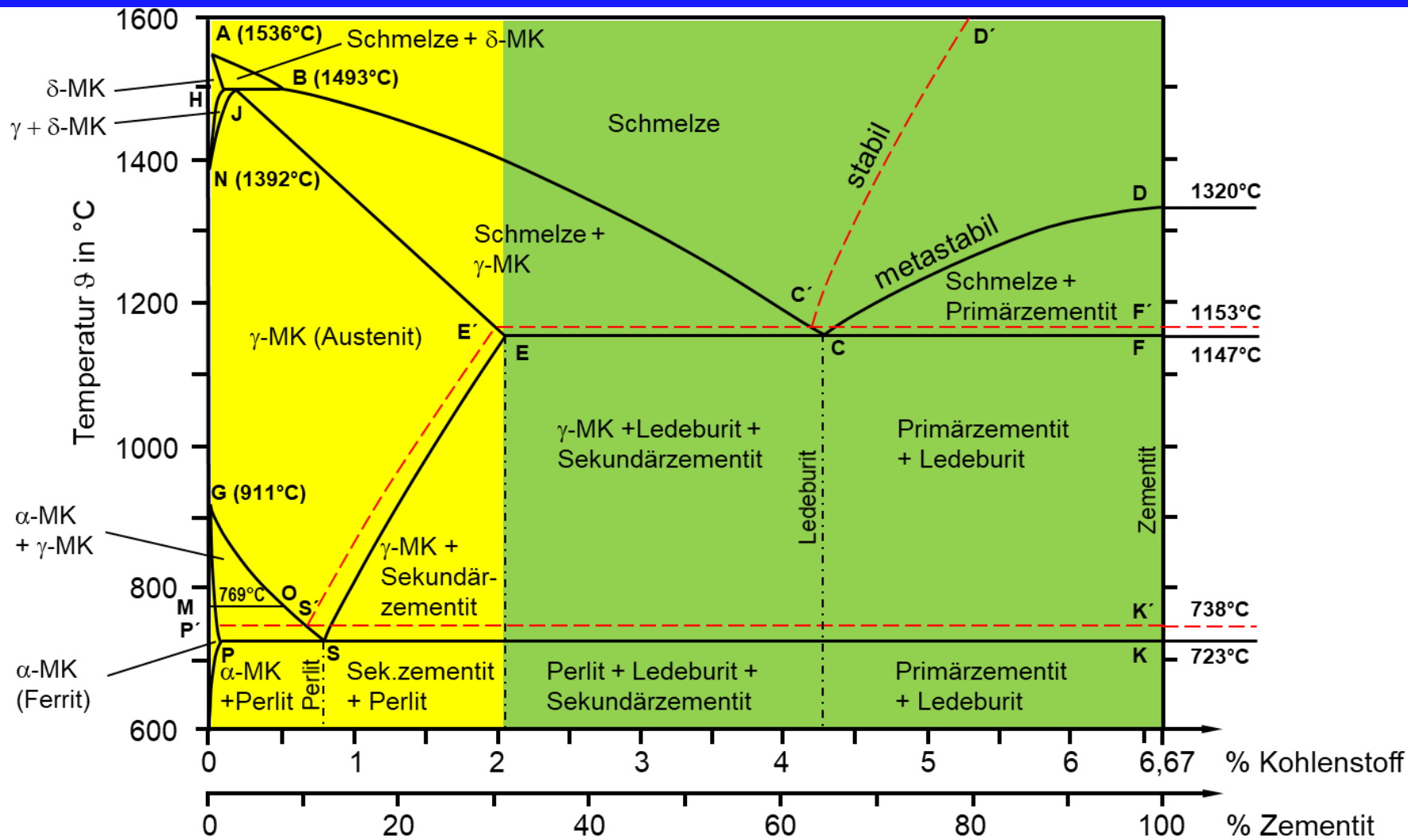
Schnellarbeitsstähle

Sonderform der Werkzeugstähle (höherlegierte Werkzeugstähle).
Hohe Härte, Verschleiß- und Anlassbeständigkeit durch Karbide (Cr, Co, Mo, V)
Bezeichnung HS (High Speed) für große Schnittgeschwindigkeit

Eisen-Kohlenstoffdiagramm



Eisen-Kohlenstoffdiagramm

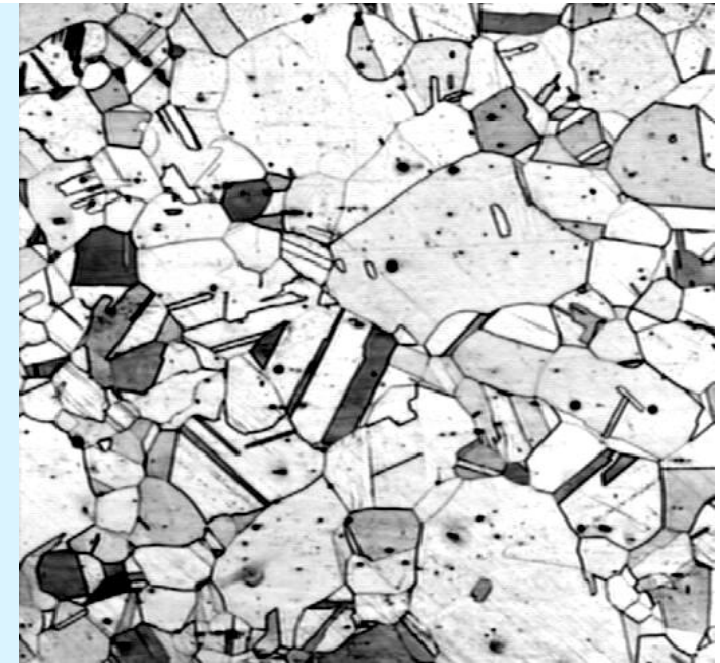


Austenitbildner

Austenitische Stähle:

Erweitertes γ -Gebiet durch C, N, Cu, Zn und Au
Typische Austenitbildner sind Ni, C, Co, Mn, N

- Hohe Zähigkeit
- Hohe Verfestigung durch Kaltverformung
- Hochwarmfest
- Niedrige Dehngrenze
- Nicht magnetisierbar
- Nicht abschreckhärtbar
- Evtl. grobes Korn schwer zu beseitigen



Exemplarisches Gefüge eines austenitischen Stahls

Achtung:

Cr ist in Cr-Ni-Stählen nicht der Austenitbildner, sondern lediglich für die chemische Passivierung (Rostschutz) verantwortlich

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Austenit:

- Einphasiges Gefüge des γ -Mischkristalls
- Sehr gut umformbar
- Unmagnetisch

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Austenit:

- Einphasiges Gefüge des γ -Mischkristalls
- Sehr gut umformbar
- Unmagnetisch

Zementit:

- Einphasiges Gefüge aus Fe_3C
- Verminderte Umformbarkeit
- Erhöhte Festigkeit

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Ledeburit:

- Eutektisches Gefüge aus Fe_3C und γ -MK
- Sehr geringe Duktilität
- Gute Verschleißbeständigkeit

Austenit:

- Einphasiges Gefüge des γ -Mischkristalls
- Sehr gut umformbar
- Unmagnetisch

Zementit:

- Einphasiges Gefüge aus Fe_3C
- Verminderte Umformbarkeit
- Erhöhte Festigkeit

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Ledeburit:

- Eutektisches Gefüge aus Fe_3C und γ -MK
- Sehr geringe Duktilität
- Gute Verschleißbeständigkeit

Austenit:

- Einphasiges Gefüge des γ -Mischkristalls
- Sehr gut umformbar
- Unmagnetisch

Perlit:

- Gefüge aus α -MK und Fe_3C
- Schichtweiser Aufbau
- Gute Zerspanbarkeit

Zementit:

- Einphasiges Gefüge aus Fe_3C
- Verminderte Umformbarkeit
- Erhöhte Festigkeit

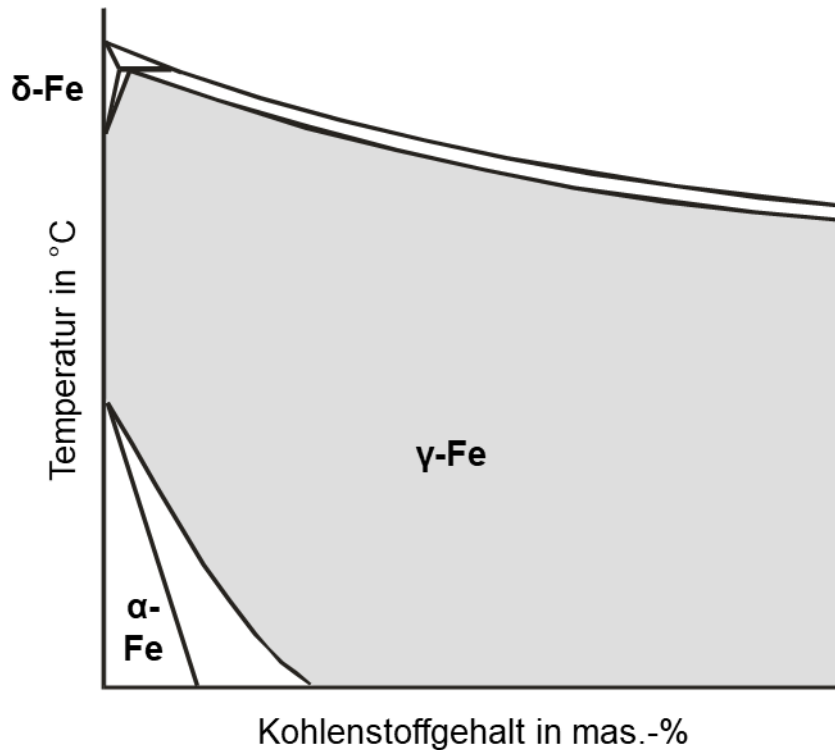
Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Gefügeart	Phasen	Aufbau
Ferrit	α -MK	krz, max. 0,02 % C
Austenit	γ -MK	kfz, max. 2,06 % C
Zementit	Fe_3C	orthorhombisch
Ledeburit	Eutektikum α -MK + Fe_3C bzw. γ -MK + Fe_3C	
Perlit	Eutektoid α -MK + Fe_3C	lamellar

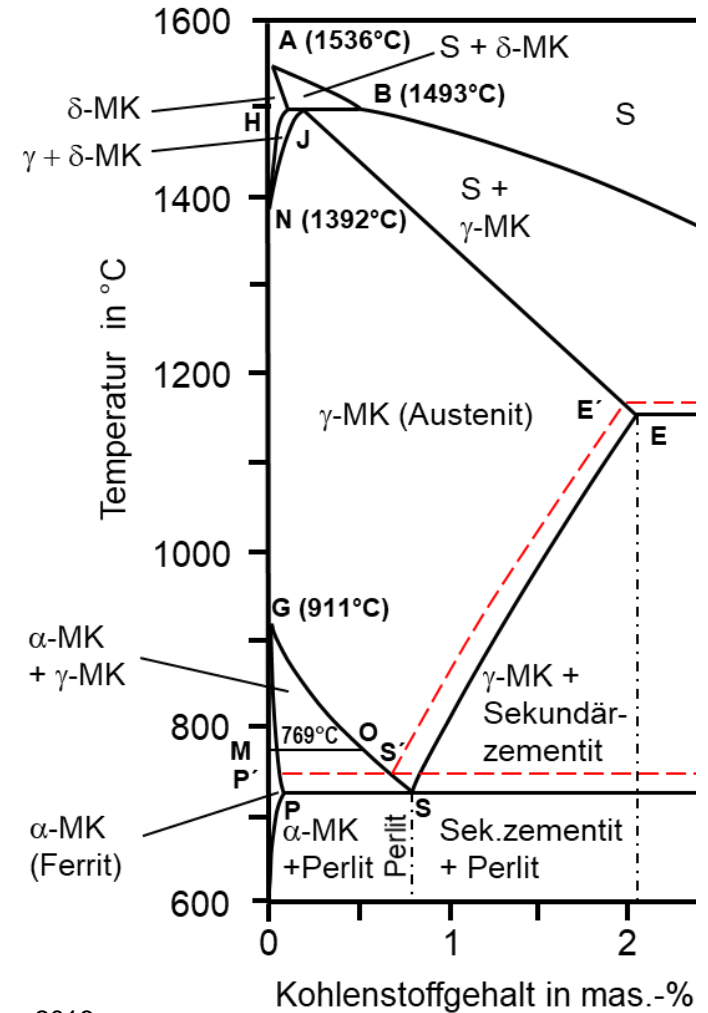
MK: Mischkristall

Austenitbildner

Einschnürung des α -Gebietes



EKD für hohe Gehalte an Austenitbildnern



Verändert nach: Skript Konstruktionswerkstoffe, Institut für Werkstoffkunde Universität Hannover, 2016

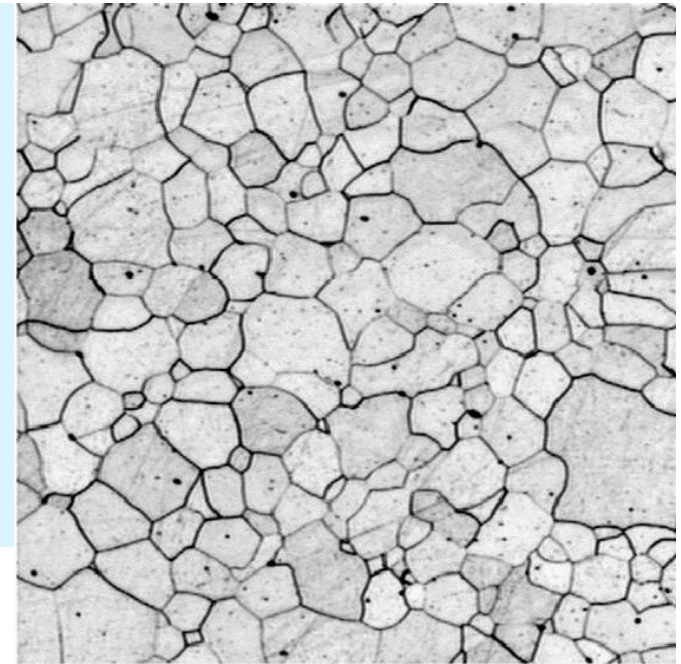
Ferritbildner

Ferritische Stähle:

Erweitertes α -Gebiet durch B, S, Nb, Ta, Zr, Ce

Typische Ferritbildner sind Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W

- Warmfest
- Besondere magnetische Eigenschaften
- Nicht abschreckhärtpbar
- Neigen zur Bildung von groben Körnern, die nur schwer zu beseitigen sind



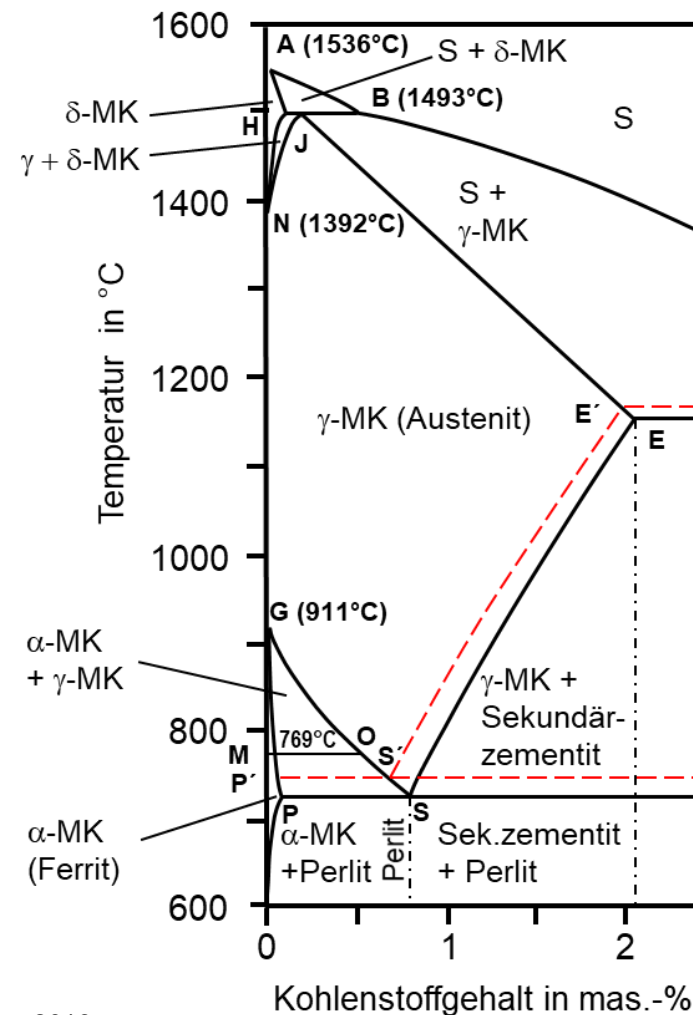
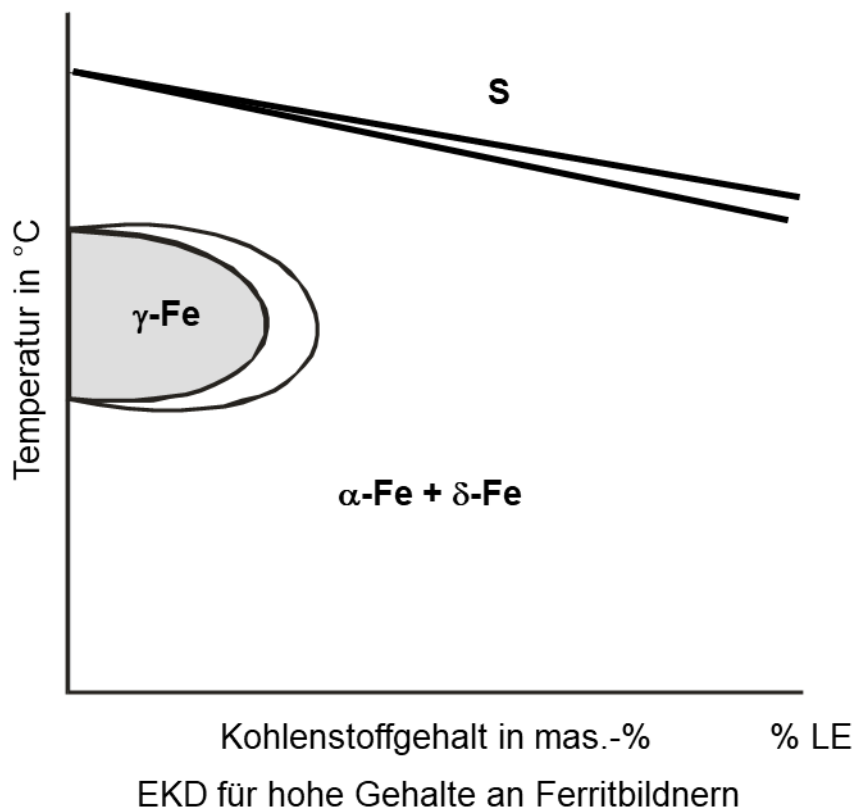
Exemplarisches Gefüge eines ferritischen Stahls

Achtung:

Bei ausreichendem Gehalt an Legierungselementen keine Umwandlung bei Erwärmung → ferritische Stähle

Ferritbildner

Einschnürung des γ -Gebietes



Verändert nach: Skript Konstruktionswerkstoffe, Institut für Werkstoffkunde Universität Hannover, 2016

Wärmebehandlung von Stählen

Wärmebehandeln nach DIN EN 10 052:

“...ein Werkstück ganz oder teilweise Zeit-Temperatur-Folgen zu unterwerfen, um eine Änderung seiner Eigenschaften und/oder seines Gefüges herbeizuführen. Gegebenenfalls kann während der Behandlung die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs geändert werden.”

Verfahren der Wärmebehandlung werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt:

- **Glühen:**
Werkstoff wird erwärmt, Abkühlung erfolgt langsam, thermodynamische Ausgleichsvorgänge können/sollen ablaufen
- **Härten:**
Werkstoff wird erwärmt, Abkühlung erfolgt schnell (Abschrecken), thermodynamische Ausgleichsvorgänge werden gezielt eingefroren

Härtbarkeit hängt vom Legierungsgehalt ab!

Wärmebehandlung von Stählen

Gleichmäßige Verteilung
löslicher Bestandteile

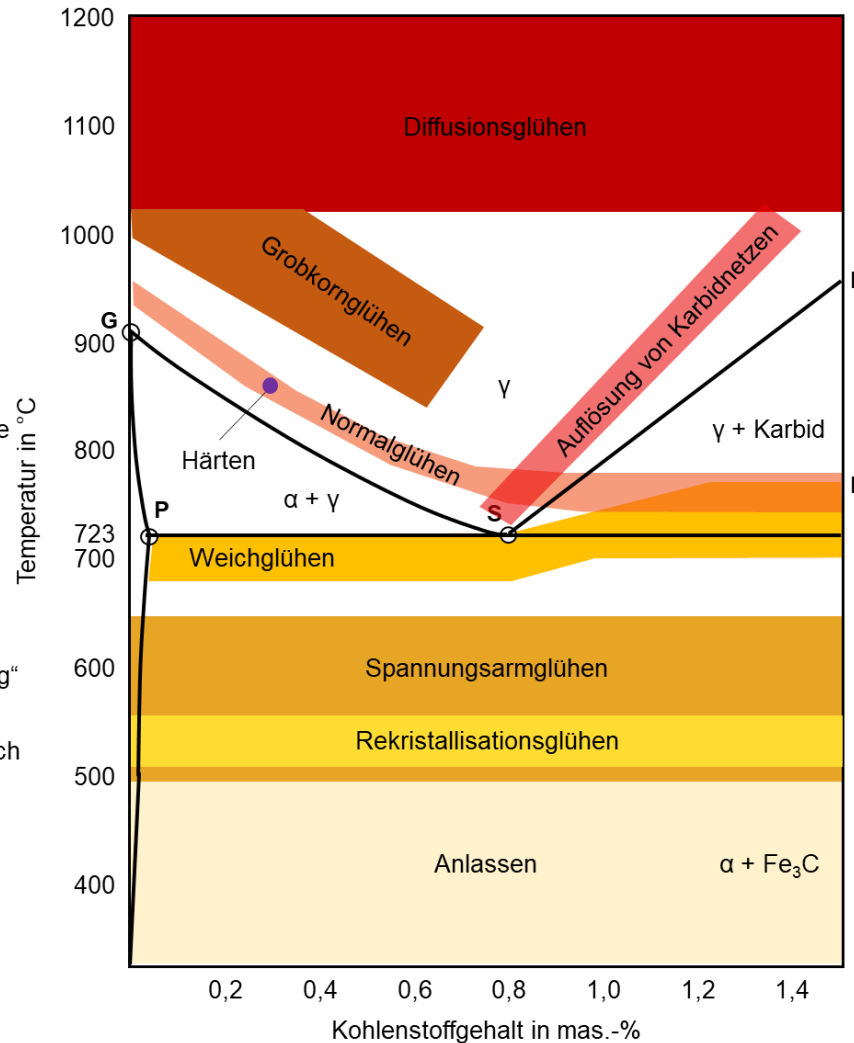
Größere Körner, verbesserte
spanabhebende Bearbeitung

Möglichst feinkörniges Gefüge

Verbesserte Umformbarkeit

Ausgleich „innerer“
Spannungen, „Kristallerholung“

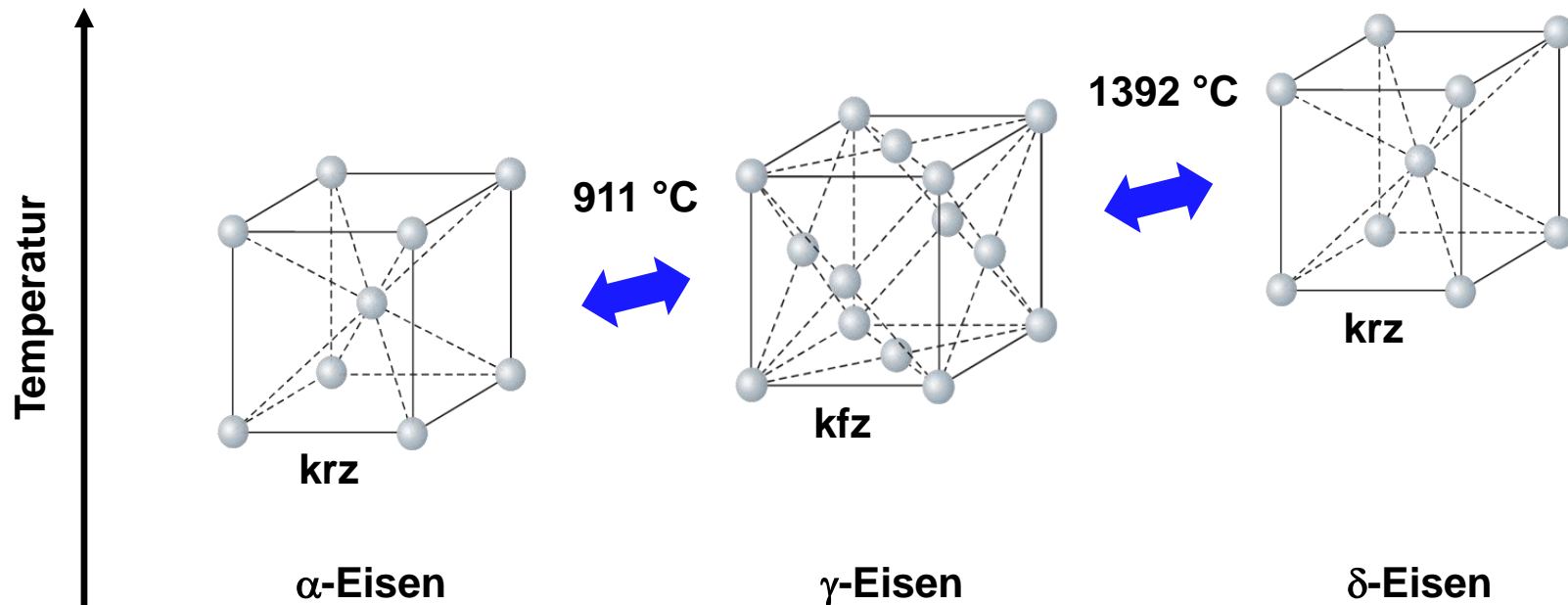
Rückgängig machen von
Eigenschaftsänderungen durch
vorangegangene
Kaltverformung,
Rekristallisation



Wärmebehandlung von Stählen

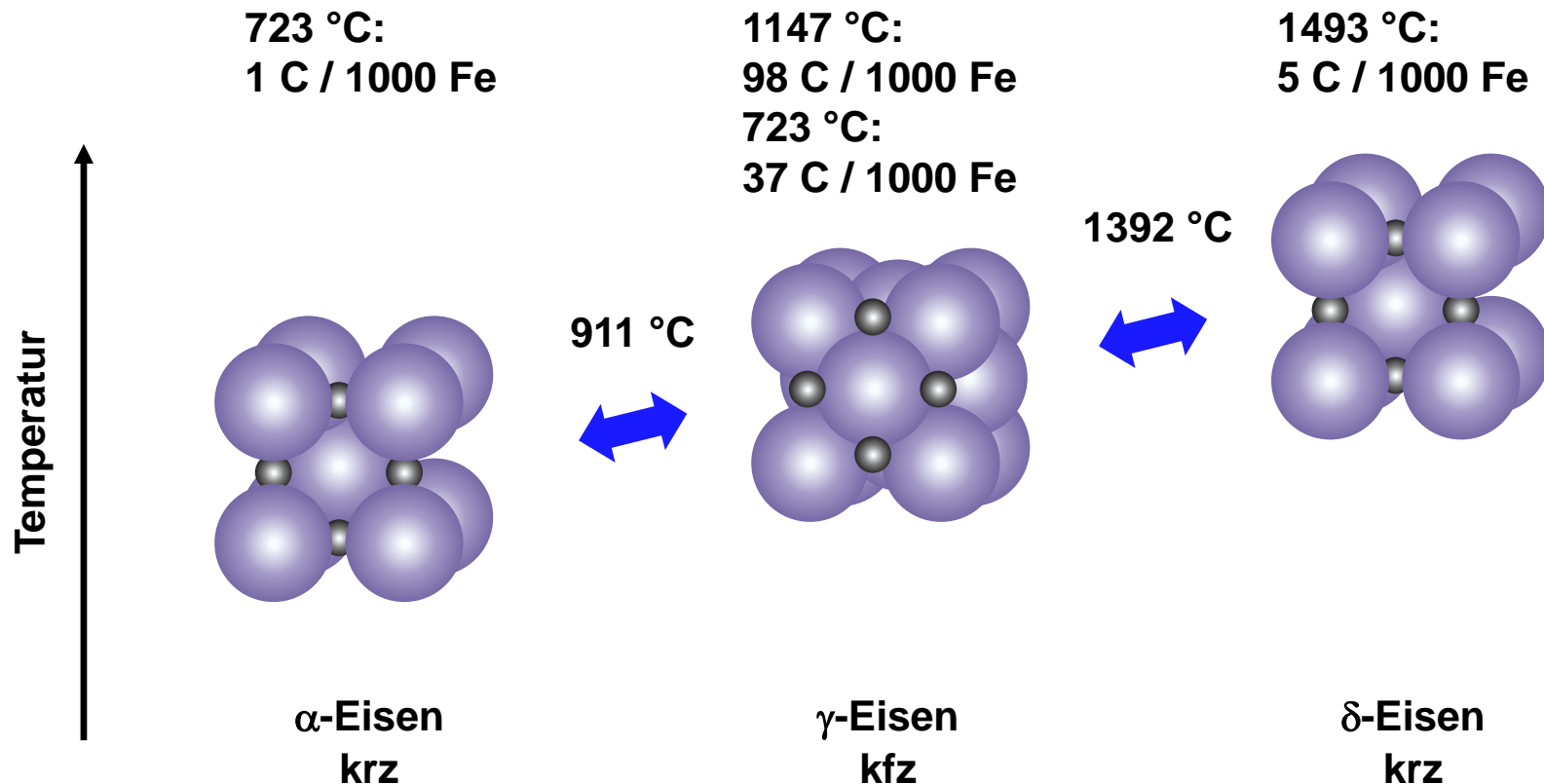
Allotropie des Eisens:

Allotropie = Temperaturabhängige Auftreten von verschiedenen Kristallgitterformen bei Metallen
Änderung des Kristallgitters führt zu Volumenänderung des Werkstoffes



Wärmebehandlung von Stählen

Härten = Erwärmung in das Austenitgebiet mit schneller Abkühlung zur Erzeugung von Martensit



Wärmebehandlung von Stählen

Vergüten = Härten mit nachfolgendem Anlassen (Wiedererwärmen)

Ziel:

- Verbesserung der Zähigkeit bei gewünschter Festigkeit
- Bei gleicher Streckgrenze (oder Zugfestigkeit) haben vergütete Werkstoffe eine bessere Zähigkeit als in allen anderen Gefügeständen

Vorgehensweise:

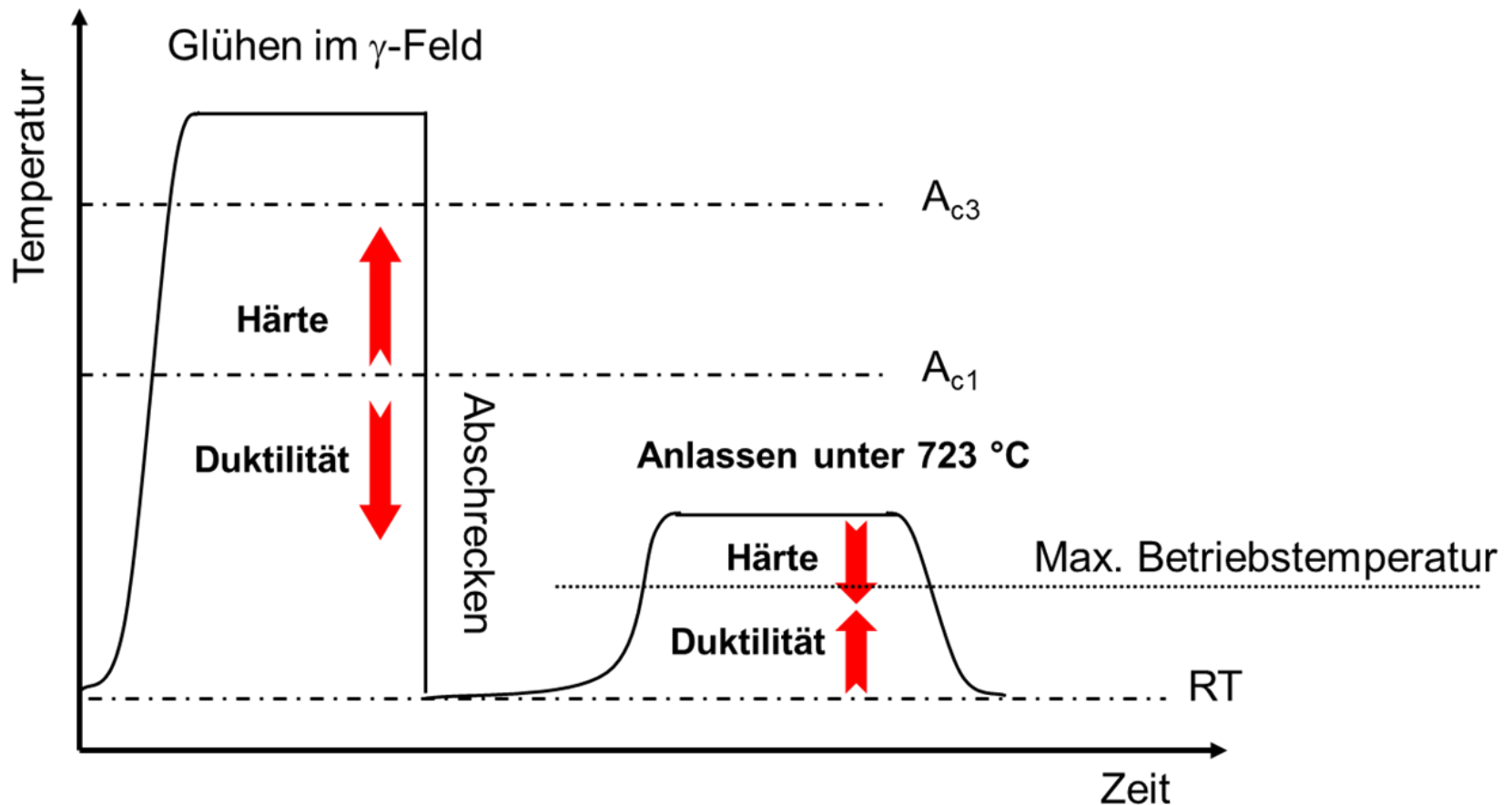
- Zunächst Härten (Austenitisieren und Abschrecken)
- Wiedererwärmen auf $450\text{ °C} < T < 650\text{ °C}$
- Langsames Abkühlen

Ursache:

- Zwangsgelöster Kohlenstoff aus dem Martensit scheidet sich in Form gleichmäßig verteilter, sehr feiner Karbide wieder aus
- Eigenspannungen durch beim Härten verspanntes Gitter werden ausgeglichen

Wärmebehandlung von Stählen

Vergüten: Temperatur-Zeit-Verlauf





Moderne Werkstoffe in Theorie und Anwendung

Dr.-Ing. K.-P. Hoyer

Sommersemester 2020



1. Einführungsveranstaltung
2. Grundlagen der Werkstoffkunde
3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe
4. Titanwerkstoffe
5. Aluminiumwerkstoffe
6. Magnesiumwerkstoffe
7. Zinkwerkstoffe
8. Kupfer-, Blei- und Zinnwerkstoffe
9. Seltene Erden



3. Stahl- und Gusseisenwerkstoffe



https://www.stolle.net/uploads/_processed_/csm_guss_01_520a7beec9.jpg

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

Dichte:	7,85 g/cm ³
E-Modul:	206 GPa
Ausdehnungskoeffizient:	12,3 * 10 ⁻⁶ /K
Elektr. Leitfähigkeit:	9,93 S/m
Wärmeleitfähigkeit:	80,2 W/mK

Stahl = Werkstoff, dessen Massegehalt an Eisen größer ist, als der jeden anderen Elementes und der i.A. weniger als 2 Gew.-% C enthält

Stahl = C < 0,8 Gew.-% → untereutektoider Stahl

Stahl = 0,8 Gew.-% < C < 2,0 Gew.-% → übereutektoider Stahl

Gusseisen = C > 2,0 Gew.-%

Stahl = Eisenwerkstoff, der ohne Nachbehandlung schmiedbar ist

Einteilung in legierte und unlegierte Stähle

Stahlherstellung - Hochofen

- _____
- Vorwärmzone
- _____
- Reduktionszone
- _____
- Kohlungszone
- _____
- Schmelzzone
- _____

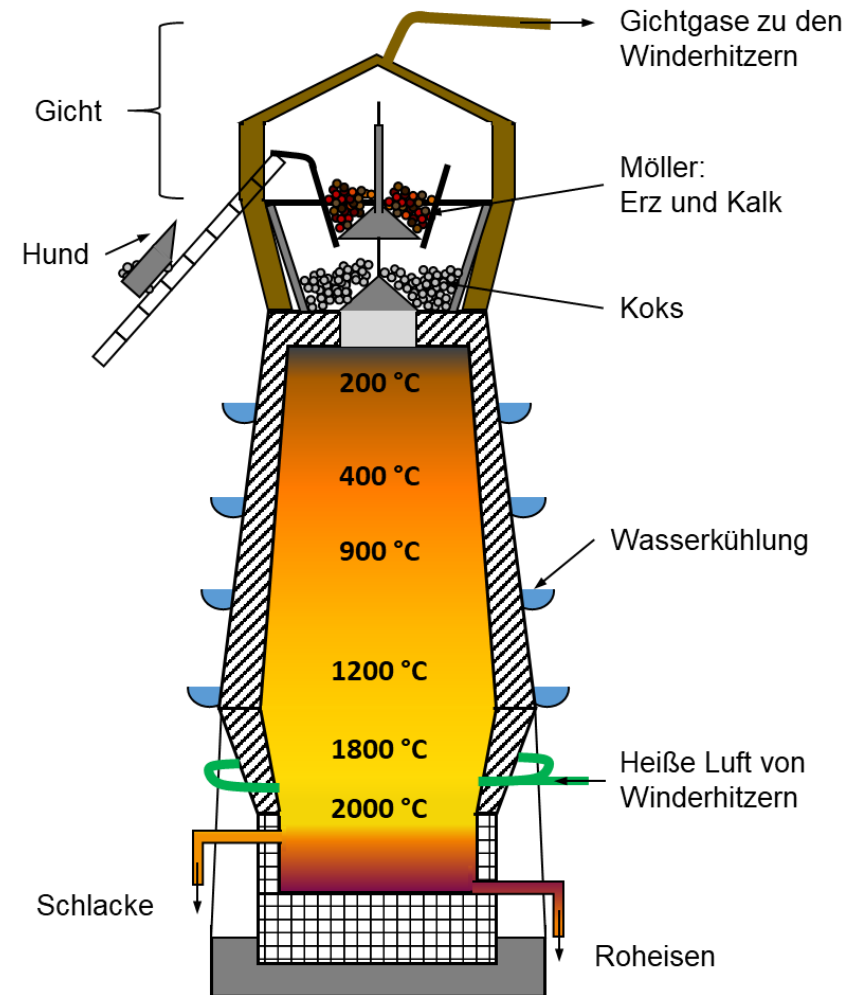


Abbildung verändert nach: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Stahlherstellung - Hochofen

- Beschickung mit Eisenerz, Koks und Zuschlägen (z.B. Kalk)
- Gichtgas (60 % Stickstoff, 20 % Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan) zur Weiternutzung - „Aufheizen“ der Luft
- Trocknen und Vorwärmen von Eisenerz, Koks und Zuschlägen
- Eisenoxid wird durch CO und C reduziert
- Eisen-Kohlenstoffgemisch mit $T_s = 1100\text{ °C} - 1200\text{ °C}$
- Koks verbrennt, Eisen-Kohlenstoffgemisch schmilzt, restliche Eisenverbindungen werden von CO und C zu Fe reduziert
- Roheisen wird abgeschöpft, (3 % bis 4 % C), ist spröde und nicht schmiedbar

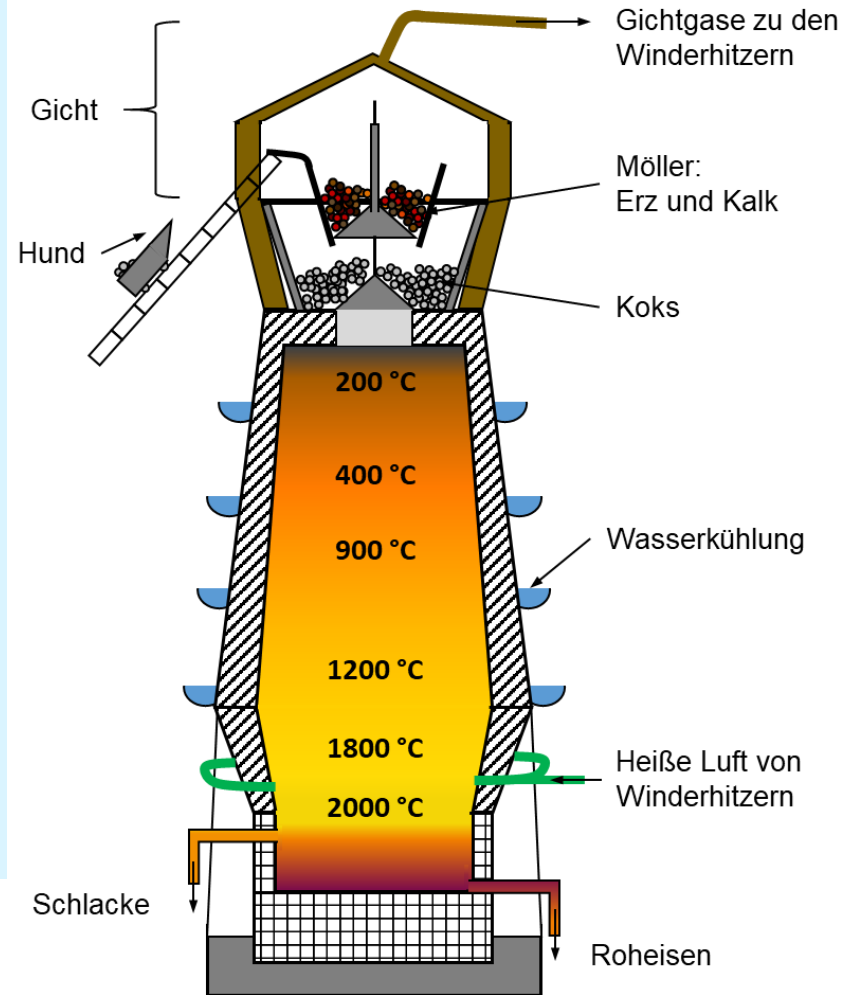
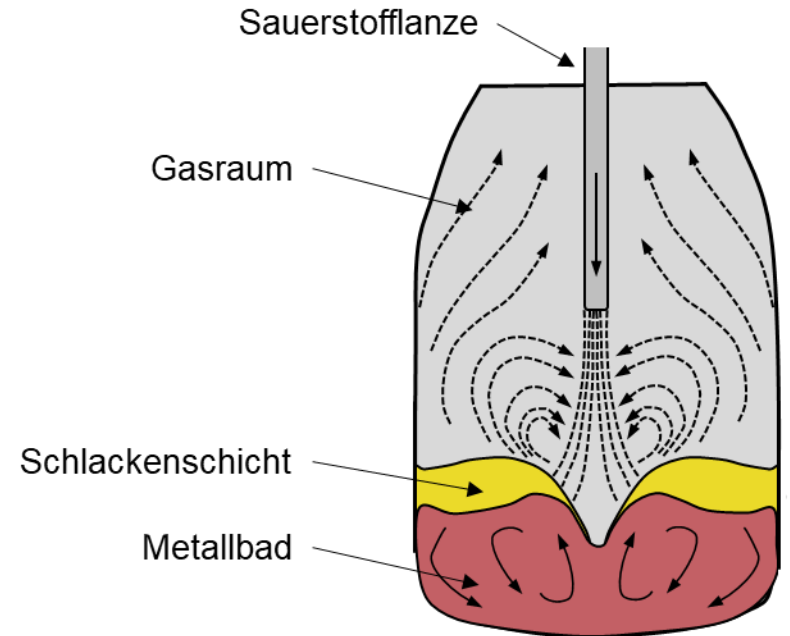


Abbildung verändert nach: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Stahlherstellung - Konverter

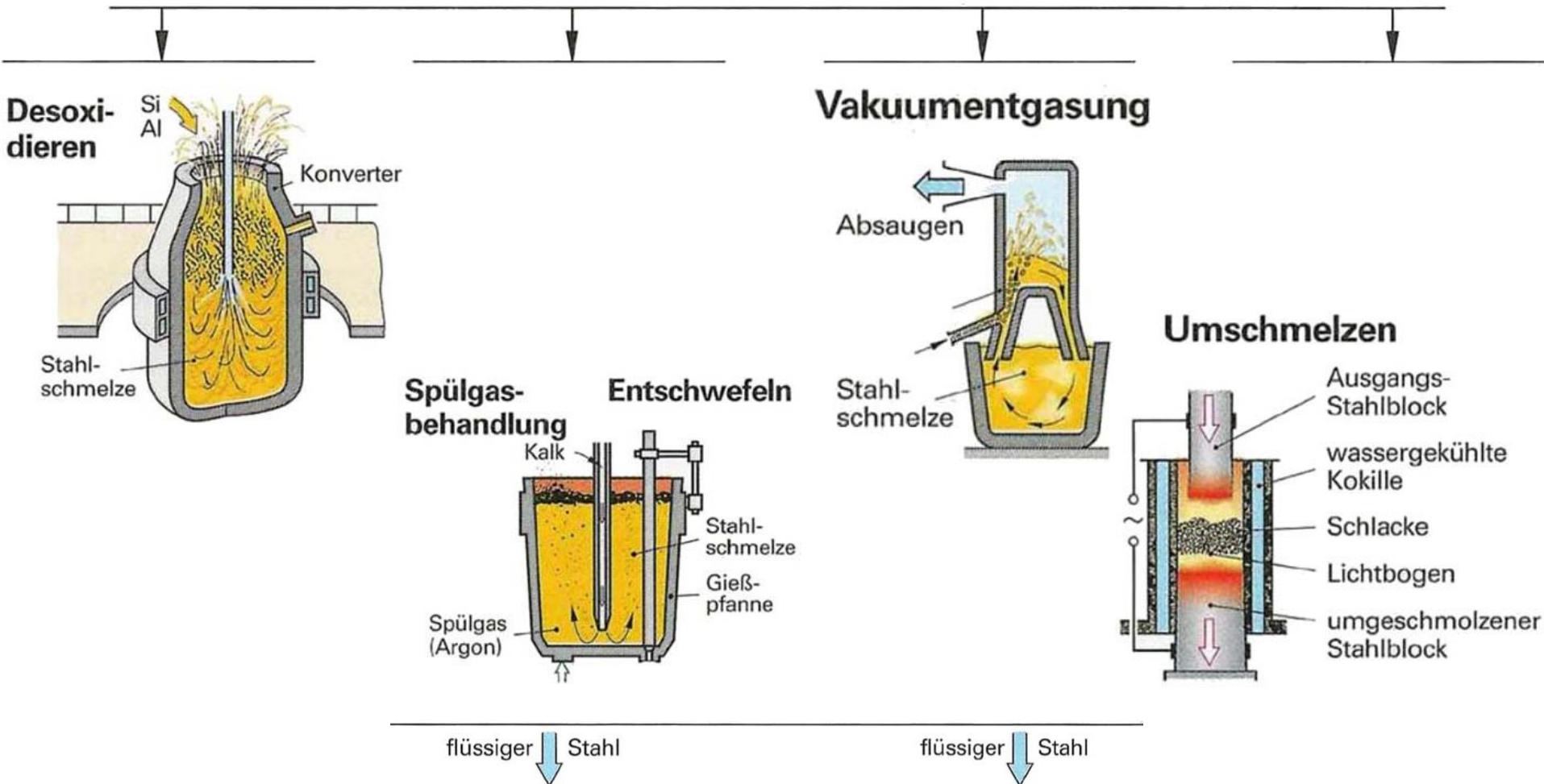
Sauerstoffblasverfahren (LD-Verfahren):

- Reduzieren/Entfernen störender Begleitelemente wie C, S, P, Si
- Blasvorgang mit technisch reinem Sauerstoff führt zu Verbrennen von C, S, P und Si
- Eisenbegleiter entweichen als Gas oder werden in flüssiger Schlacke gebunden
- Blasdauer bestimmt Reinheitsgrad des Eisens/Stahls



Strömungsverhältnisse
beim Blasvorgang

Stahlherstellung

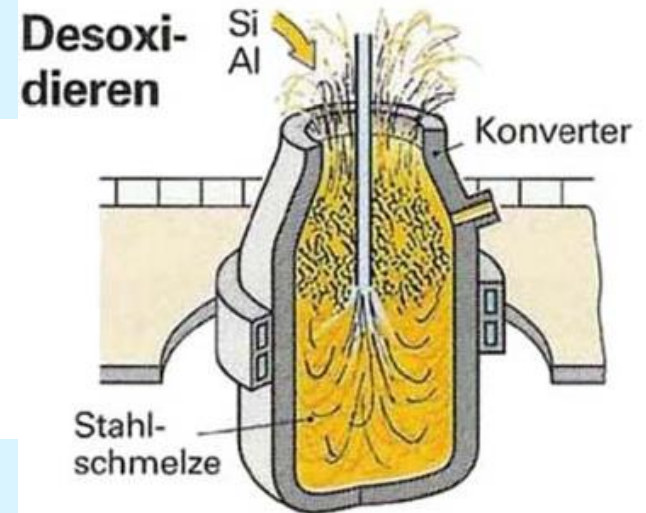


Verändert nach: <http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlherstellung/herstellung.html>

Stahlherstellung - Konverter

Verbesserung der Qualität des Stahls durch:

- Einblasen von Sauerstoff in flüssige Stahlschmelze
- Binden von Begleitelementen
- Zugaben von Si und Al



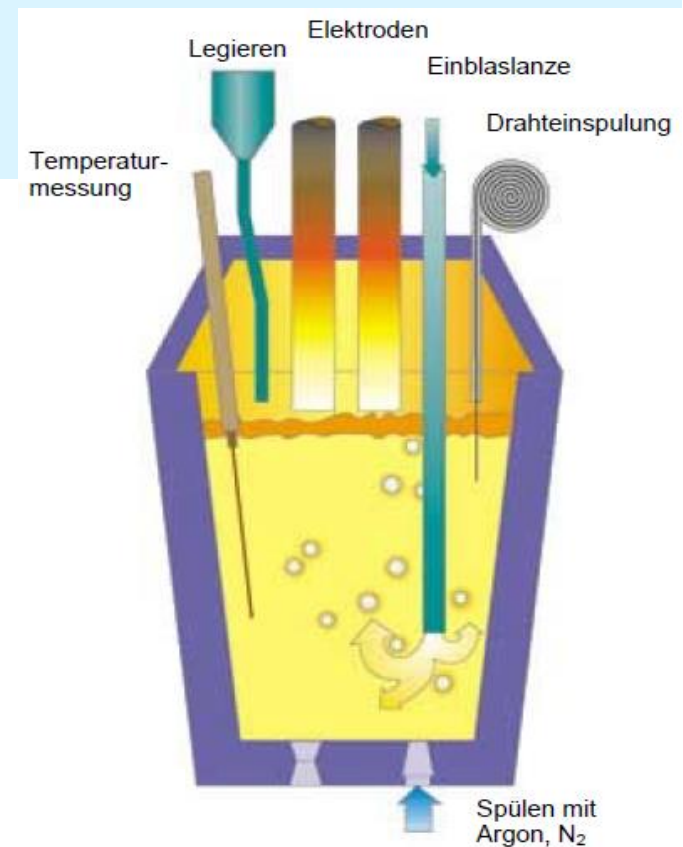
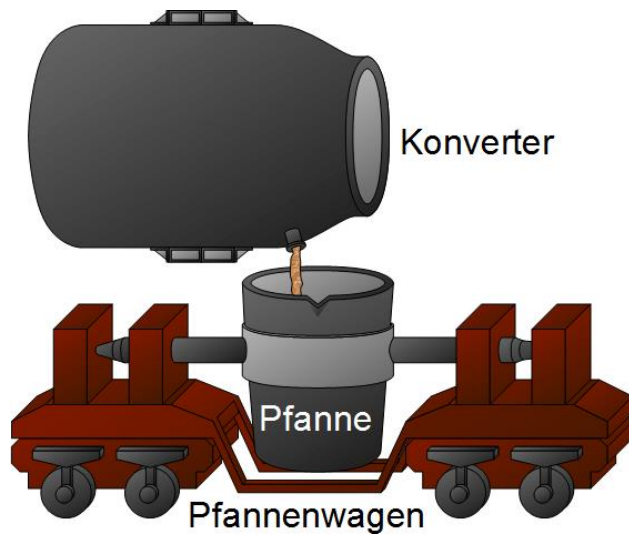
Effekte beim Desoxidieren:

- Si und Al binden Gase, die beim Abkühlen frei werden
 - Geringere Neigung zur Lunkerbildung
- Verhinderung einer Entmischung der Schmelze
 - C, P und S reichern sich an und bilden Seigerungen
- Beruhigt vergossener Stahl

Stahlherstellung - Pfannenofen

Puffer zwischen Erschmelzung und Vergießen des Stahls

- Einstellung definierter Temperaturen in Stahlgießpfanne
- Spülen der Schmelze mit Argon
- Analyse der chemischen Zusammensetzung
- Vorbereitung der Schmelze für Weiterverarbeitung



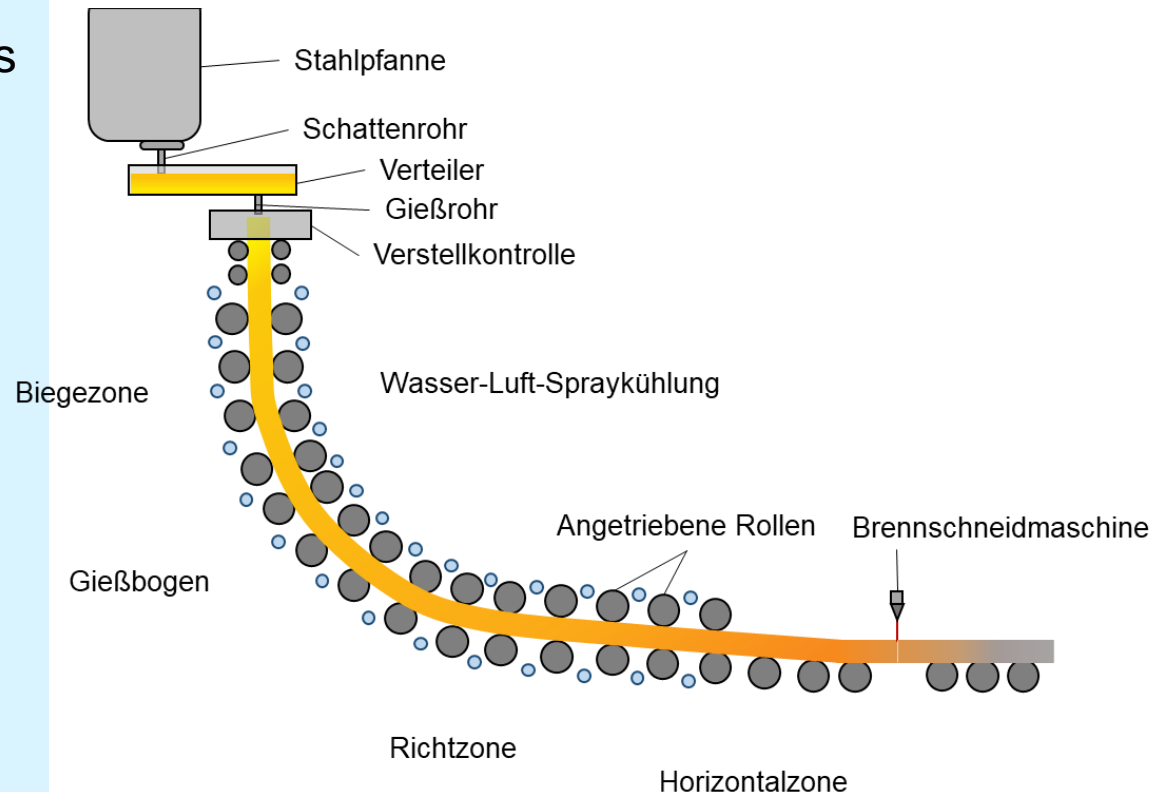
<http://www.oocities.org/tego3/Stahlerzeugung.pdf>, <https://www.ahoefer.de/images/maschinenbau/.../stahl-herstellung/vom-roehisen-zum-rohstahl/pfannenwagen.png>

Stahlherstellung - Strangguss

Vergießen des Stahls zu
Halbzeugen:

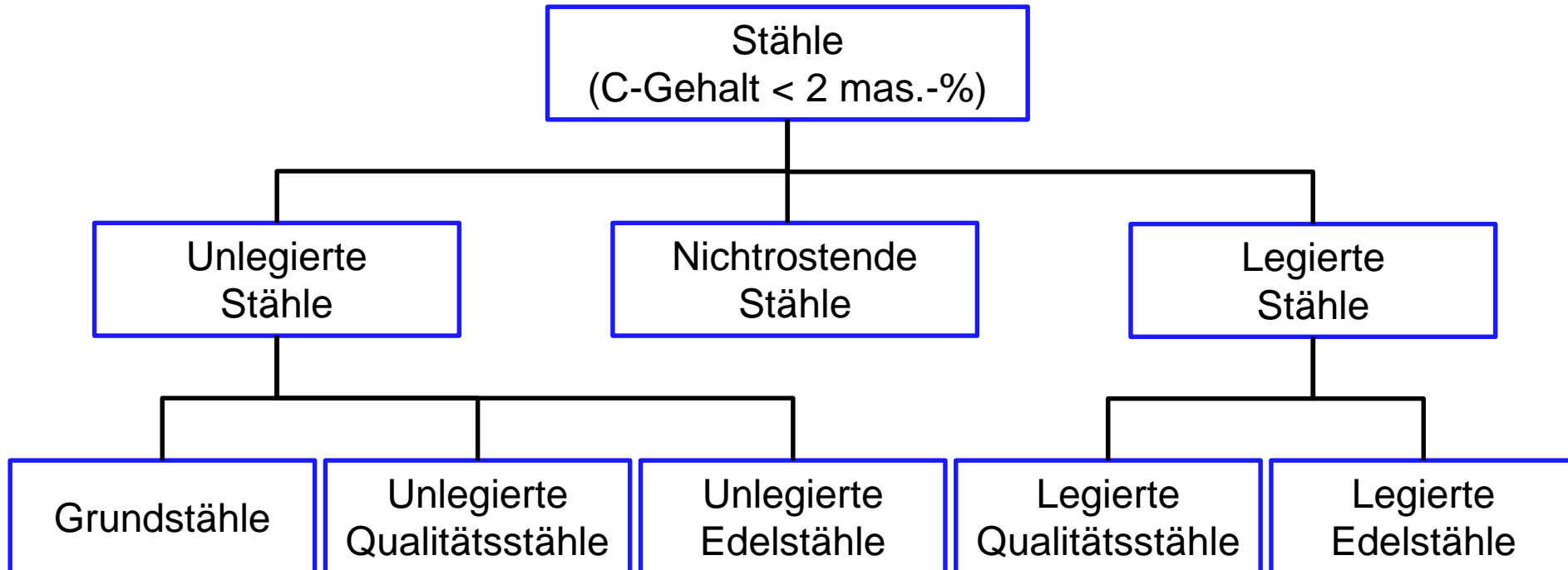
- Eingießen des flüssigen Stahls
- Umlenken des zunehmend abkühlenden Stahls um 90°
- Einstellen der (Blech-/Brammendicke durch Rollenanzordnung
- Richten des Halbzeuges
- Abtrennen

- Größter Anteil der Stähle (ca. 90 %)
- Vorbrammen, Platinen, Stränge



Verändert nach: <http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlherstellung/herstellung.html>

Einteilung der Stähle



Einteilung der Stähle

Werkstoffe mit $C \leq 2,0$ mas.-% \rightarrow Stähle

$C < 0,8$ mas.-% \rightarrow untereutektoid

$0,8 \text{ mas.-%} < C < 2,0 \text{ mas.-%}$ \rightarrow übereutektoid

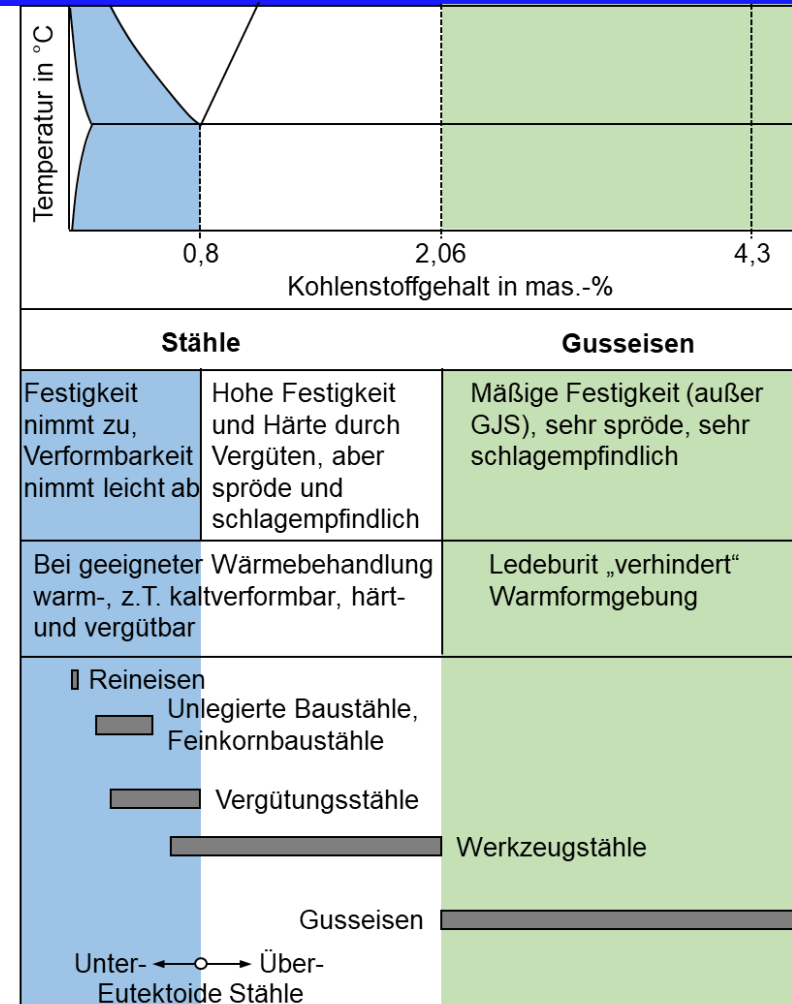
$C > 2,0$ mas.-% \rightarrow Gusseisen

Stahl:

Zäh, warmumformbar, Festigkeitssteigerung durch Wärmbehandlung

Gusseisen:

Mäßige Festigkeitswerte



Bezeichnung der Stähle

Allgemeine Baustähle

Warm- oder kalt gewalzte Stähle, für die keine Wärmebehandlung vorgesehen ist. (Profile für Strommasten oder Brücken, Stahlträger usw...)

Feinkornbaustähle

Festigkeitssteigerung über Feinkornbildung, nicht über Kohlenstoffgehalt, da dieser die Schweißeignung herabsetzt

Vergütungsstähle

Stähle für den Maschinenbau, bei denen eine Wärmebehandlung (Vergüten) zur Festigkeitssteigerung vorgesehen ist

Einsatzstähle

Stähle mit Kohlenstoffgehalten bis 0,2 mas.-% (eigentlich nicht härtbar). Durch Aufkohlen im Randbereich können außen harte und innen zähe Werkstücke erzeugt werden für z. B. Zahnräder

Bezeichnung der Stähle

Automatenstähle

Stähle für die spanabhebende Massenfertigung (Bohren, Drehen, Fräsen)
Kurzspanigkeit durch Zugabe von Schwefel und eventuell Blei

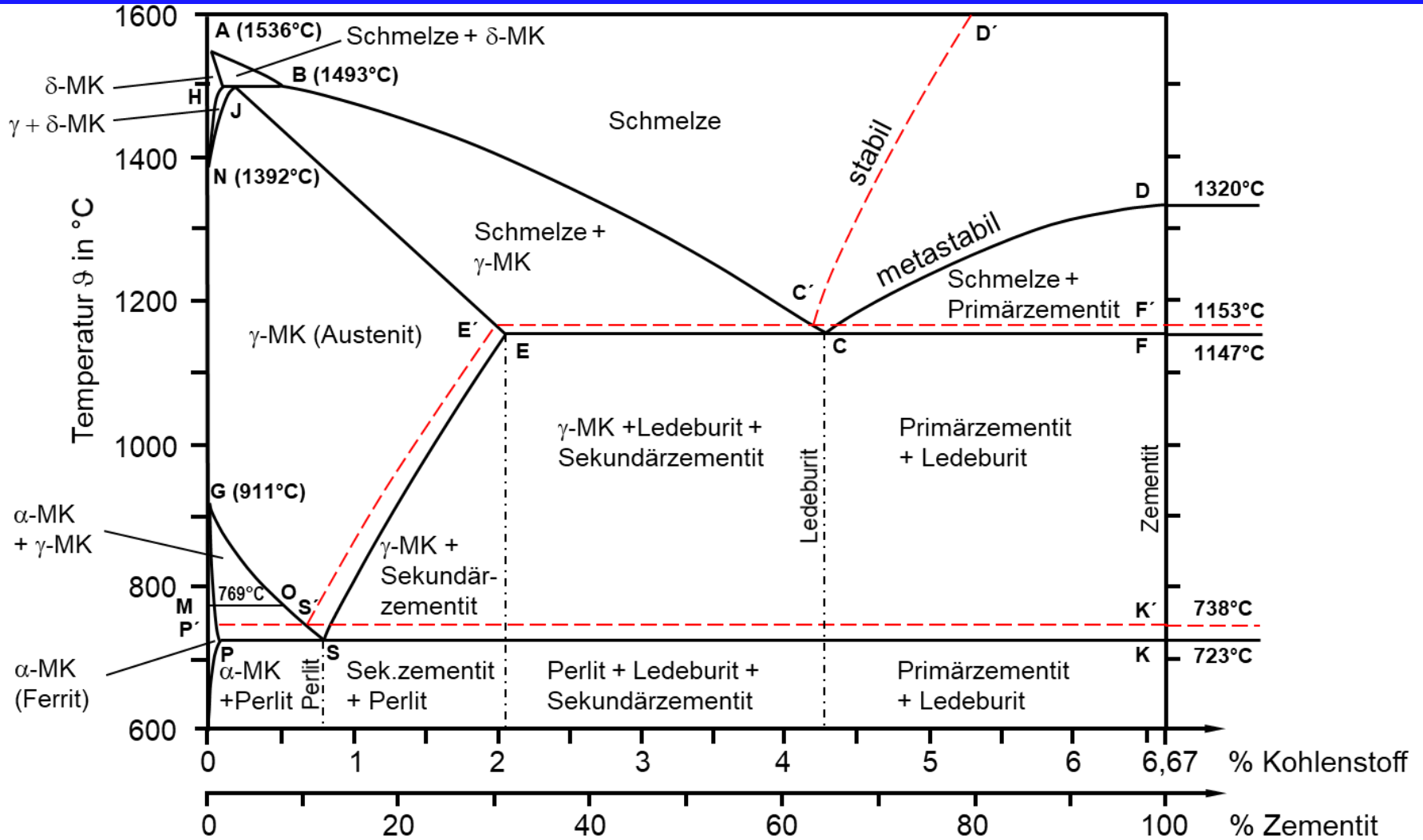
Werkzeugstähle

Edelstähle zur Fertigung von Werkzeugen, die meist vergütet werden
Kohlenstoffgehalt 0,6 mas.-% bis 1,3 mas.-%

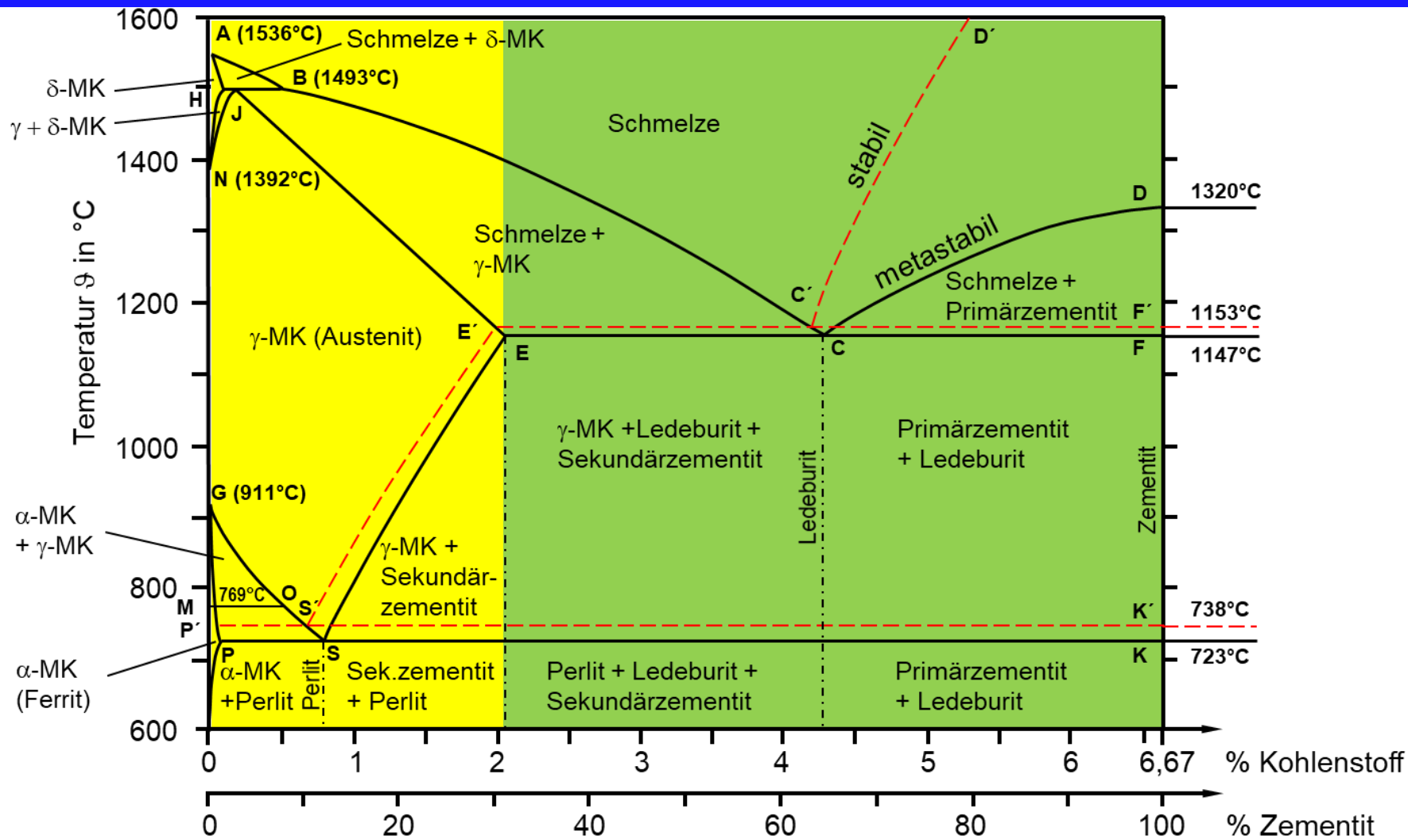
Schnellarbeitsstähle

Sonderform der Werkzeugstähle (höherlegierte Werkzeugstähle).
Hohe Härte, Verschleiß- und Anlassbeständigkeit durch Karbide (Cr, Co, Mo, V)
Bezeichnung HS (High Speed) für große Schnittgeschwindigkeit

Eisen-Kohlenstoffdiagramm



Eisen-Kohlenstoffdiagramm

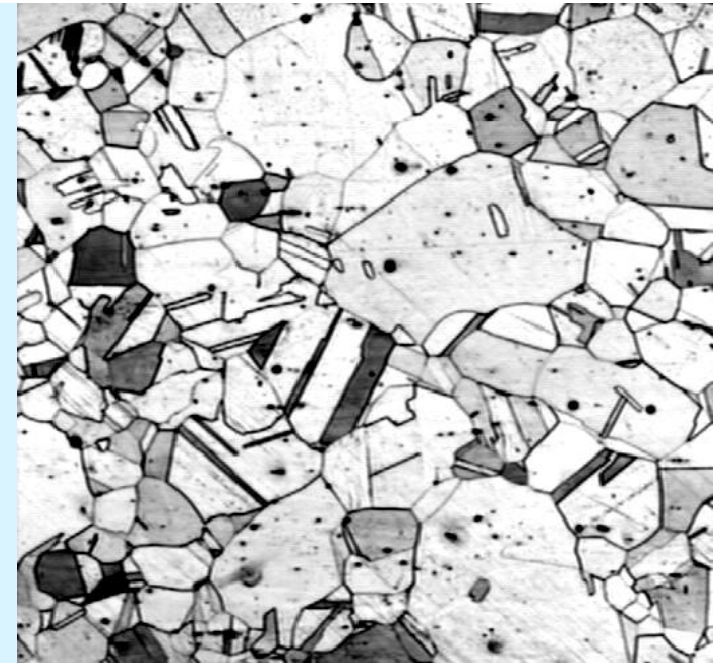


Austenitbildner

Austenitische Stähle:

Erweitertes γ -Gebiet durch C, N, Cu, Zn und Au
Typische Austenitbildner sind Ni, C, Co, Mn, N

- Hohe Zähigkeit
- Hohe Verfestigung durch Kaltverformung
- Hochwarmfest
- Niedrige Dehngrenze
- Nicht magnetisierbar
- Nicht abschreckhärtbar
- Evtl. grobes Korn schwer zu beseitigen



Exemplarisches Gefüge eines austenitischen Stahls

Achtung:

Cr ist in Cr-Ni-Stählen nicht der Austenitbildner, sondern lediglich für die chemische Passivierung (Rostschutz) verantwortlich

Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Ferrit:

- Einphasiges Gefüge des α -Mischkristalls
- Weich, gut kaltumformbar
- Geringe Festigkeit

Ledeburit:

- Eutektisches Gefüge aus Fe_3C und γ -MK
- Sehr geringe Duktilität
- Gute Verschleißbeständigkeit

Austenit:

- Einphasiges Gefüge des γ -Mischkristalls
- Sehr gut umformbar
- Unmagnetisch

Perlit:

- Gefüge aus α -MK und Fe_3C
- Schichtweiser Aufbau
- Gute Zerspanbarkeit

Zementit:

- Einphasiges Gefüge aus Fe_3C
- Verminderte Umformbarkeit
- Erhöhte Festigkeit

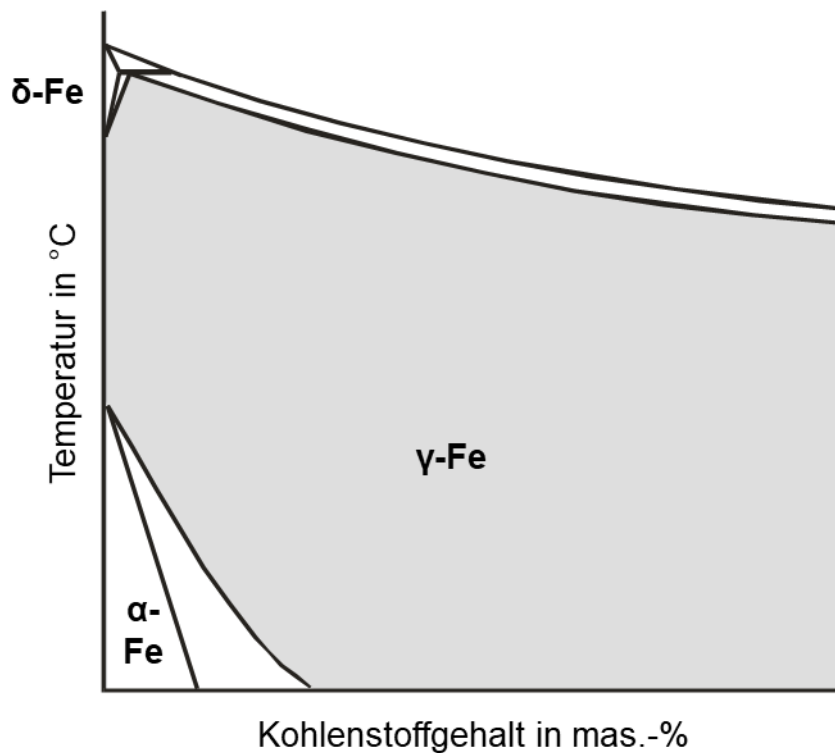
Gefügearten im System Eisen-Kohlenstoff

Gefügeart	Phasen	Aufbau
Ferrit	α -MK	krz, max. 0,02 % C
Austenit	γ -MK	kfz, max. 2,06 % C
Zementit	Fe_3C	orthorhombisch
Ledeburit	Eutektikum α -MK + Fe_3C bzw. γ -MK + Fe_3C	
Perlit	Eutektoid α -MK + Fe_3C	lamellar

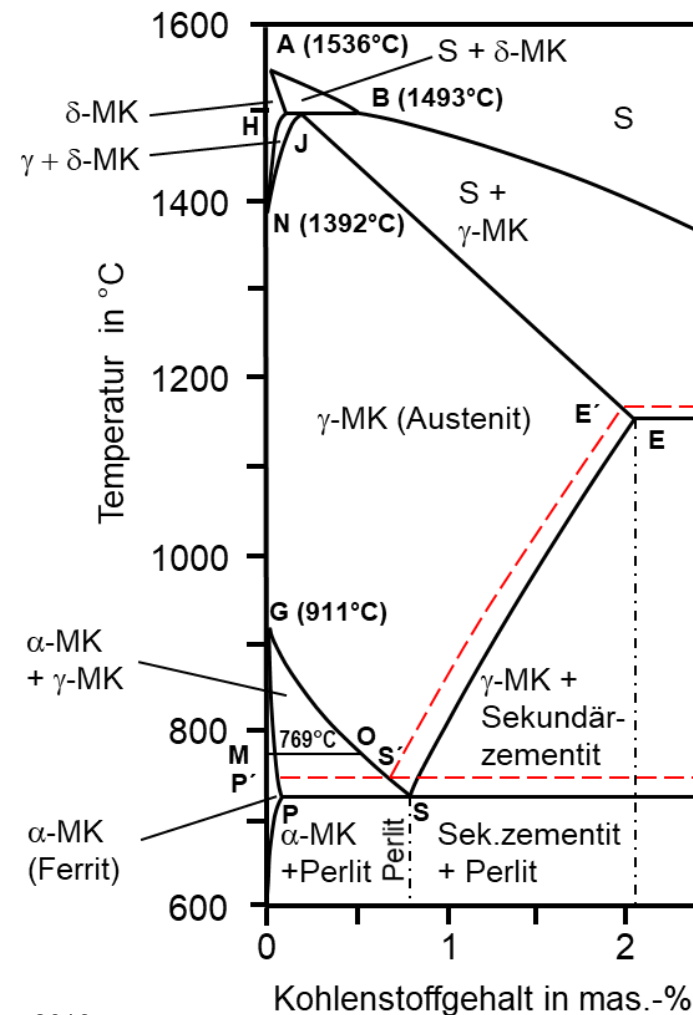
MK: Mischkristall

Austenitbildner

Einschnürung des α -Gebietes



EKD für hohe Gehalte an Austenitbildnern



Verändert nach: Skript Konstruktionswerkstoffe, Institut für Werkstoffkunde Universität Hannover, 2016

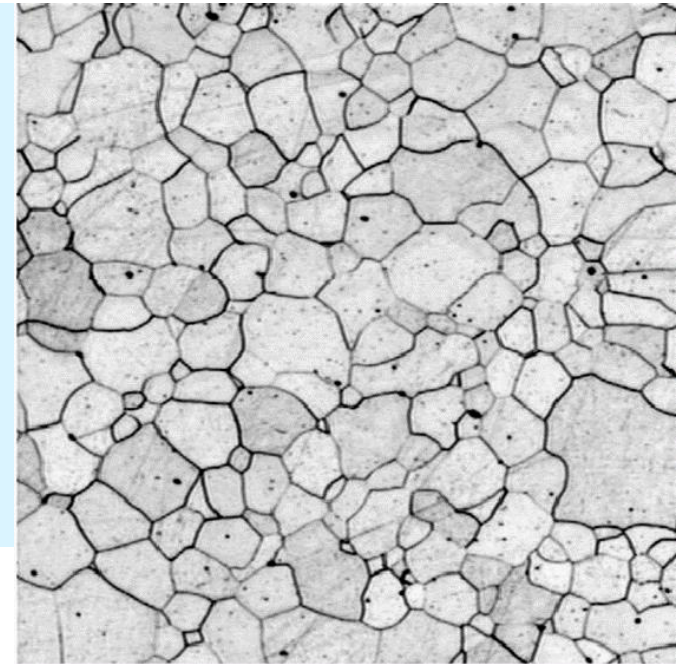
Ferritbildner

Ferritische Stähle:

Erweitertes α -Gebiet durch B, S, Nb, Ta, Zr, Ce

Typische Ferritbildner sind Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W

- Warmfest
- Besondere magnetische Eigenschaften
- Nicht abschreckhärtpbar
- Neigen zur Bildung von groben Körnern, die nur schwer zu beseitigen sind



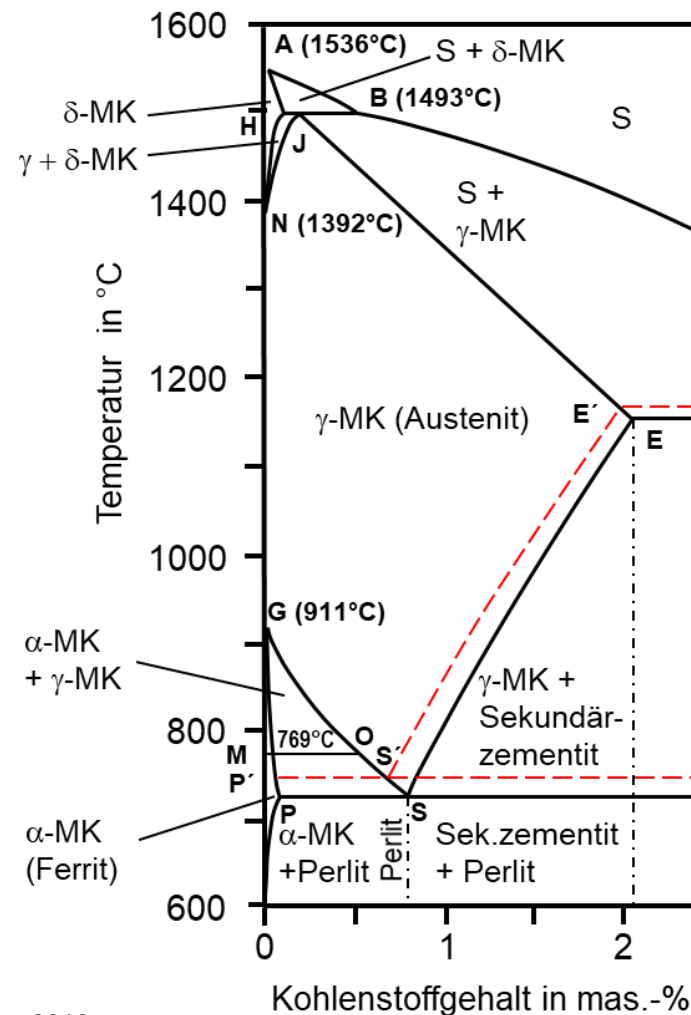
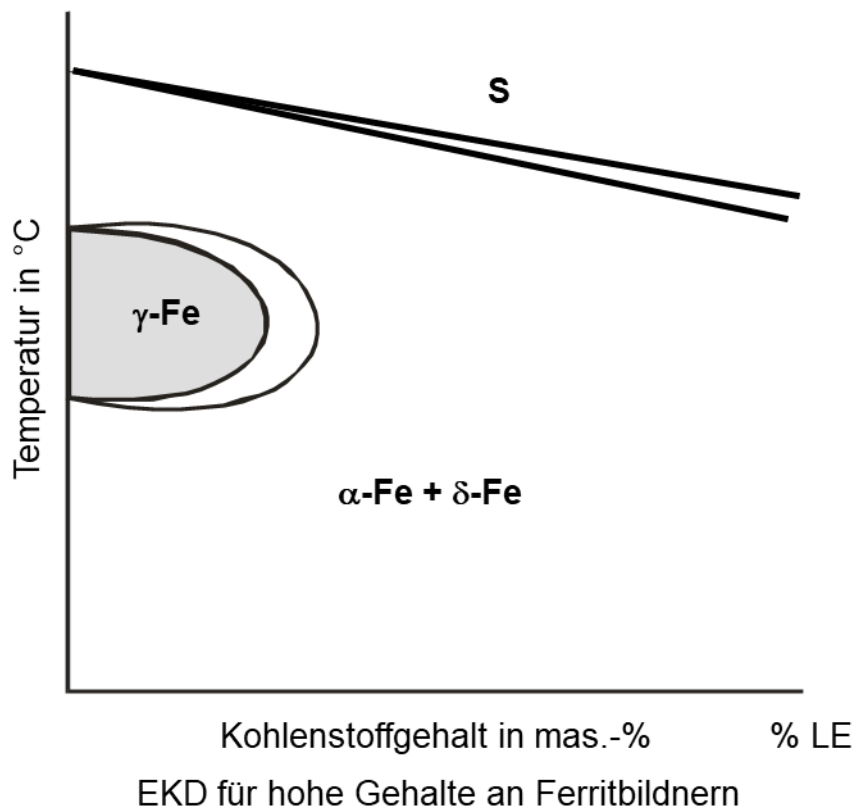
Exemplarisches Gefüge eines ferritischen Stahls

Achtung:

Bei ausreichendem Gehalt an Legierungselementen keine Umwandlung bei Erwärmung → ferritische Stähle

Ferritbildner

Einschnürung des γ -Gebietes



Verändert nach: Skript Konstruktionswerkstoffe, Institut für Werkstoffkunde Universität Hannover, 2016

Wärmebehandlung von Stählen

Wärmebehandeln nach DIN EN 10 052:

“...ein Werkstück ganz oder teilweise Zeit-Temperatur-Folgen zu unterwerfen, um eine Änderung seiner Eigenschaften und/oder seines Gefüges herbeizuführen. Gegebenenfalls kann während der Behandlung die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs geändert werden.”

Verfahren der Wärmebehandlung werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt:

- Glühen:
Werkstoff wird erwärmt, Abkühlung erfolgt langsam, thermodynamische Ausgleichsvorgänge können/sollen ablaufen
- Härten:
Werkstoff wird erwärmt, Abkühlung erfolgt schnell (Abschrecken), thermodynamische Ausgleichsvorgänge werden gezielt eingefroren

Härtbarkeit hängt vom Legierungsgehalt ab!

Wärmebehandlung von Stählen

Gleichmäßige Verteilung
löslicher Bestandteile

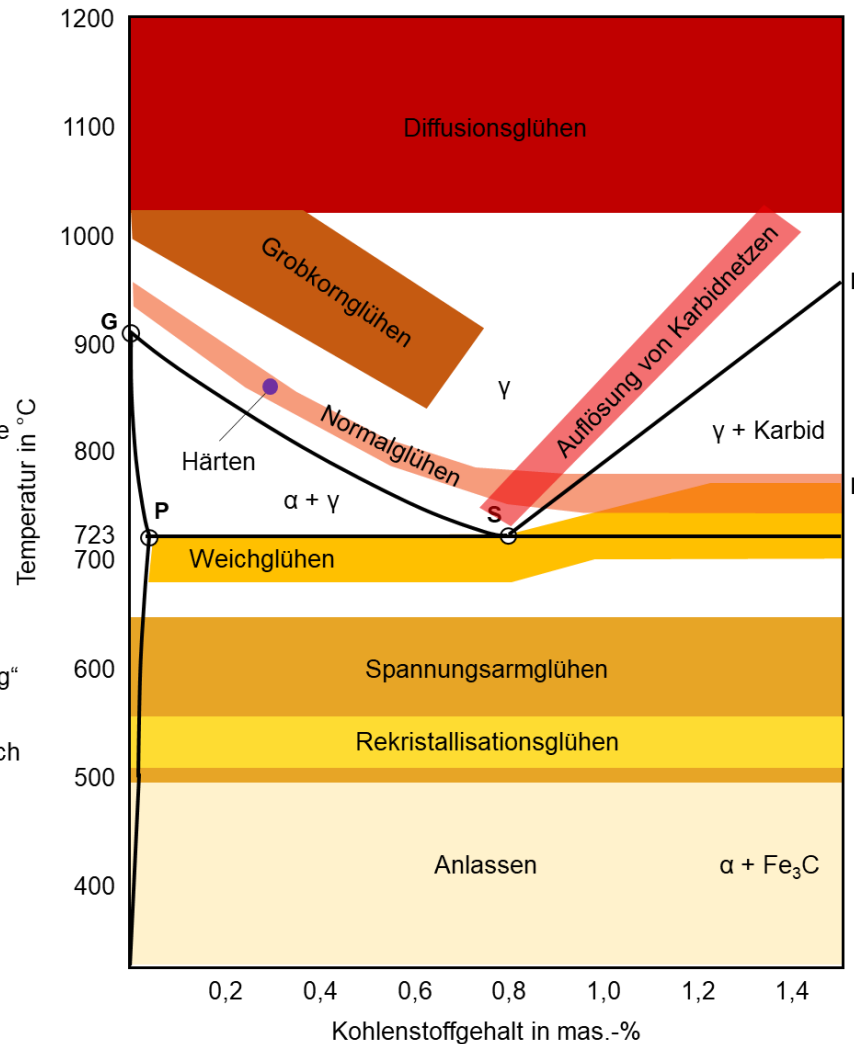
Größere Körner, verbesserte
spanabhebende Bearbeitung

Möglichst feinkörniges Gefüge

Verbesserte Umformbarkeit

Ausgleich „innerer“
Spannungen, „Kristallerholung“

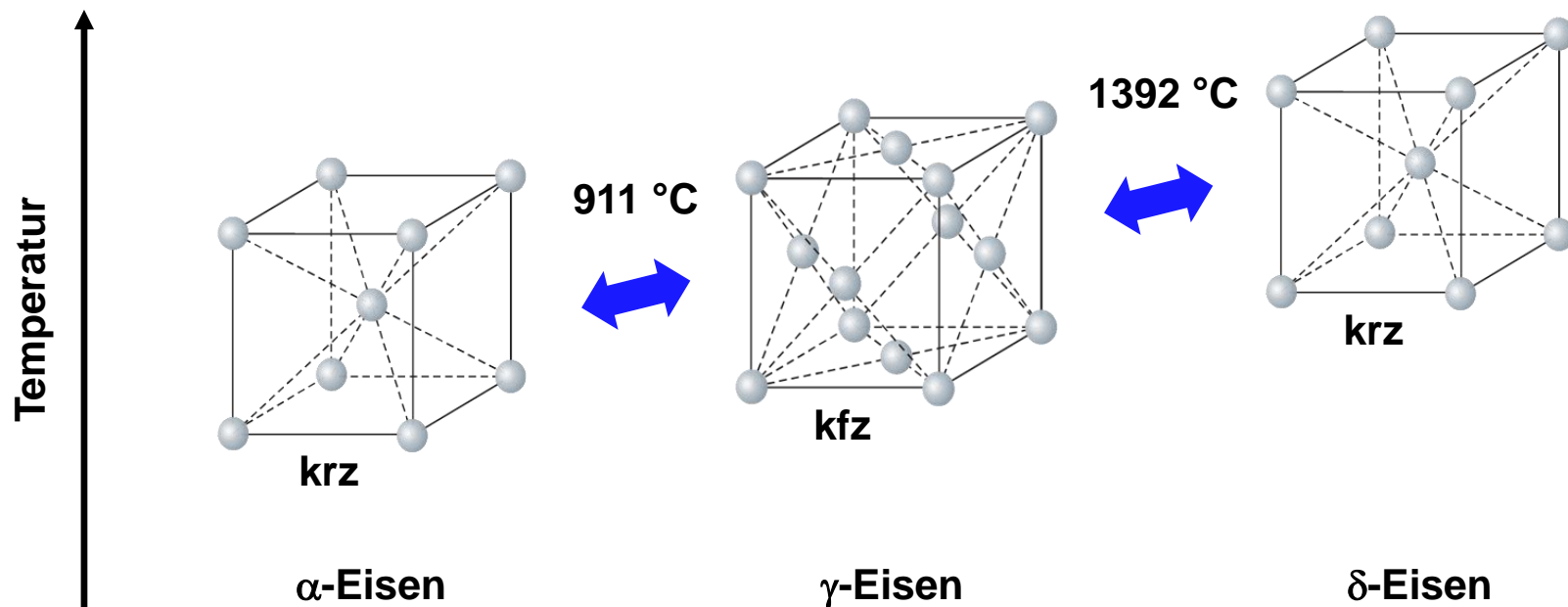
Rückgängig machen von
Eigenschaftsänderungen durch
vorangegangene
Kaltverformung,
Rekristallisation



Wärmebehandlung von Stählen

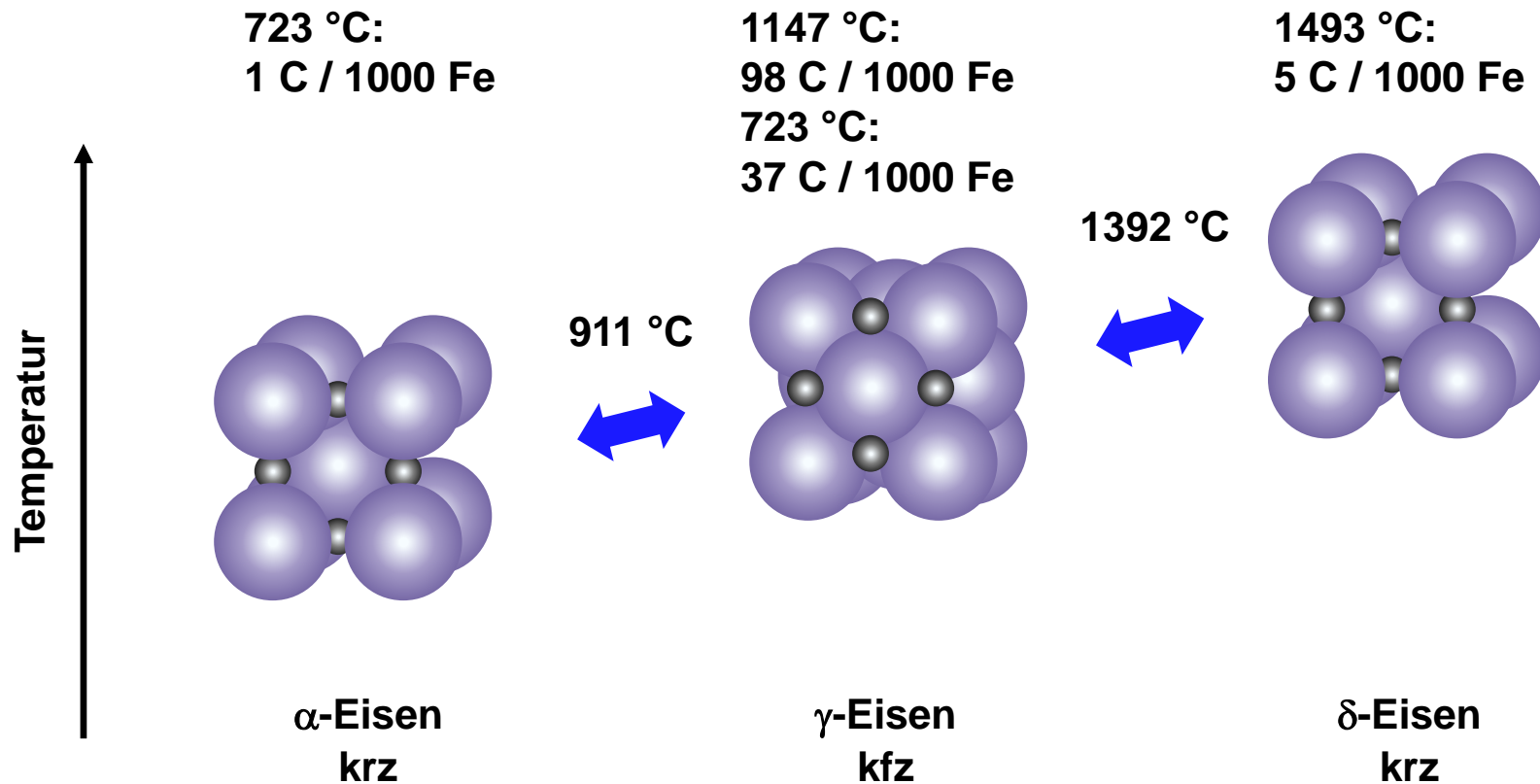
Allotropie des Eisens:

Allotropie = Temperaturabhängige Auftreten von verschiedenen Kristallgitterformen bei Metallen
Änderung des Kristallgitters führt zu Volumenänderung des Werkstoffes



Wärmebehandlung von Stählen

Härten = Erwärmung in das Austenitgebiet mit schneller Abkühlung zur Erzeugung von Martensit



Wärmebehandlung von Stählen

Vergüten = Härten mit nachfolgendem Anlassen (Wiedererwärmen)

Ziel:

- Verbesserung der Zähigkeit bei gewünschter Festigkeit
- Bei gleicher Streckgrenze (oder Zugfestigkeit) haben vergütete Werkstoffe eine bessere Zähigkeit als in allen anderen Gefügezuständen

Vorgehensweise:

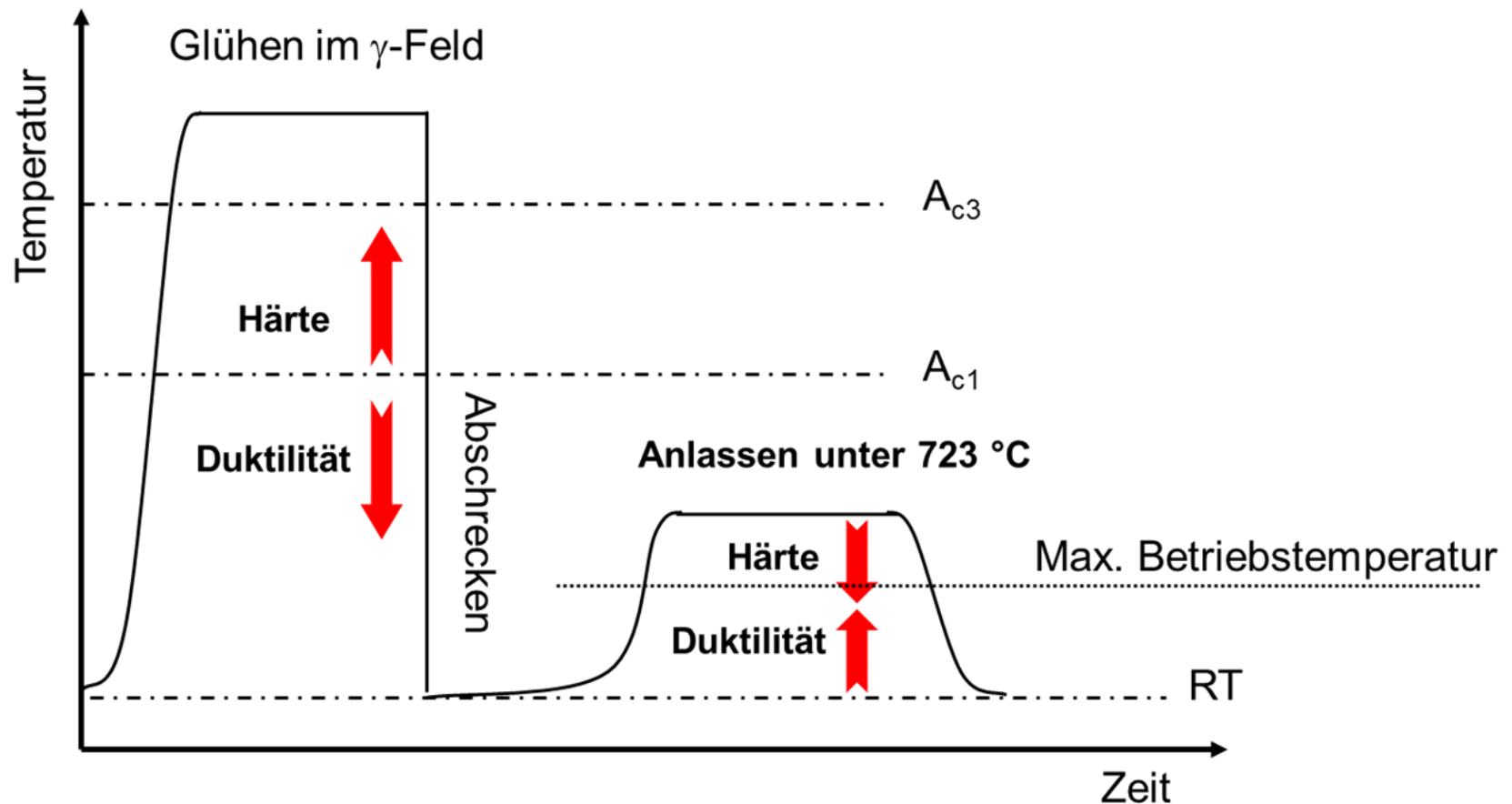
- Zunächst Härten (Austenitisieren und Abschrecken)
- Wiedererwärmen auf $450\text{ °C} < T < 650\text{ °C}$
- Langsames Abkühlen

Ursache:

- Zwangsgelöster Kohlenstoff aus dem Martensit scheidet sich in Form gleichmäßig verteilter, sehr feiner Karbide wieder aus
- Eigenspannungen durch beim Härten verspanntes Gitter werden ausgeglichen

Wärmebehandlung von Stählen

Vergüten: Temperatur-Zeit-Verlauf



Wärmebehandlung von Stählen

Isotherme Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU-Schaubild)

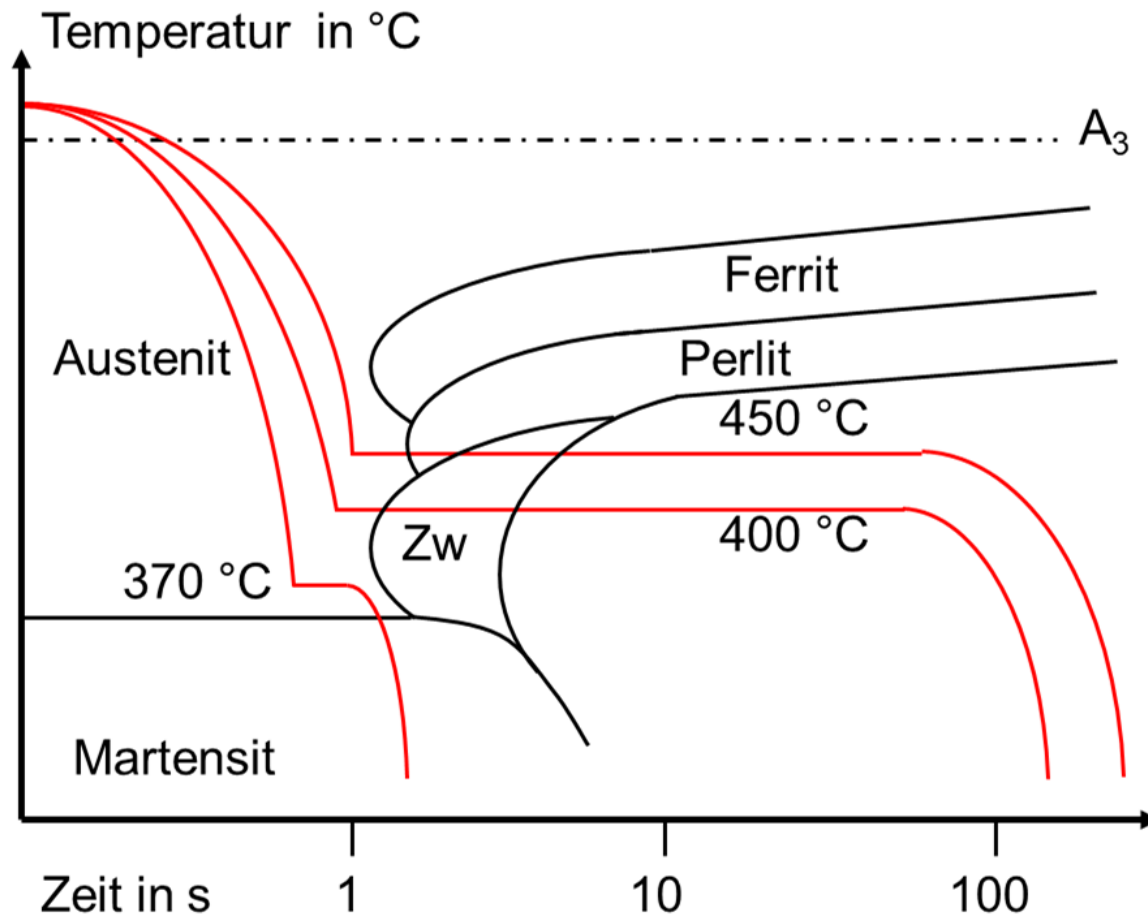
- Umwandlungsvorgänge die ablaufen, wenn ein Stahl auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt und dort gehalten wird
- Geben Beginn und Ende der Umwandlung an
- Zeigen, welches Gefüge am Ende der Abkühlung vorliegt

Kontinuierliche Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU-Schaubild)

- Umwandlungsvorgänge die bei unterschiedlichen Abkühlraten eintreten
- Zeigen, welches Gefüge am Ende der Abkühlung vorliegt
- Geben die Härtewerte der einstellbaren Gefüge an

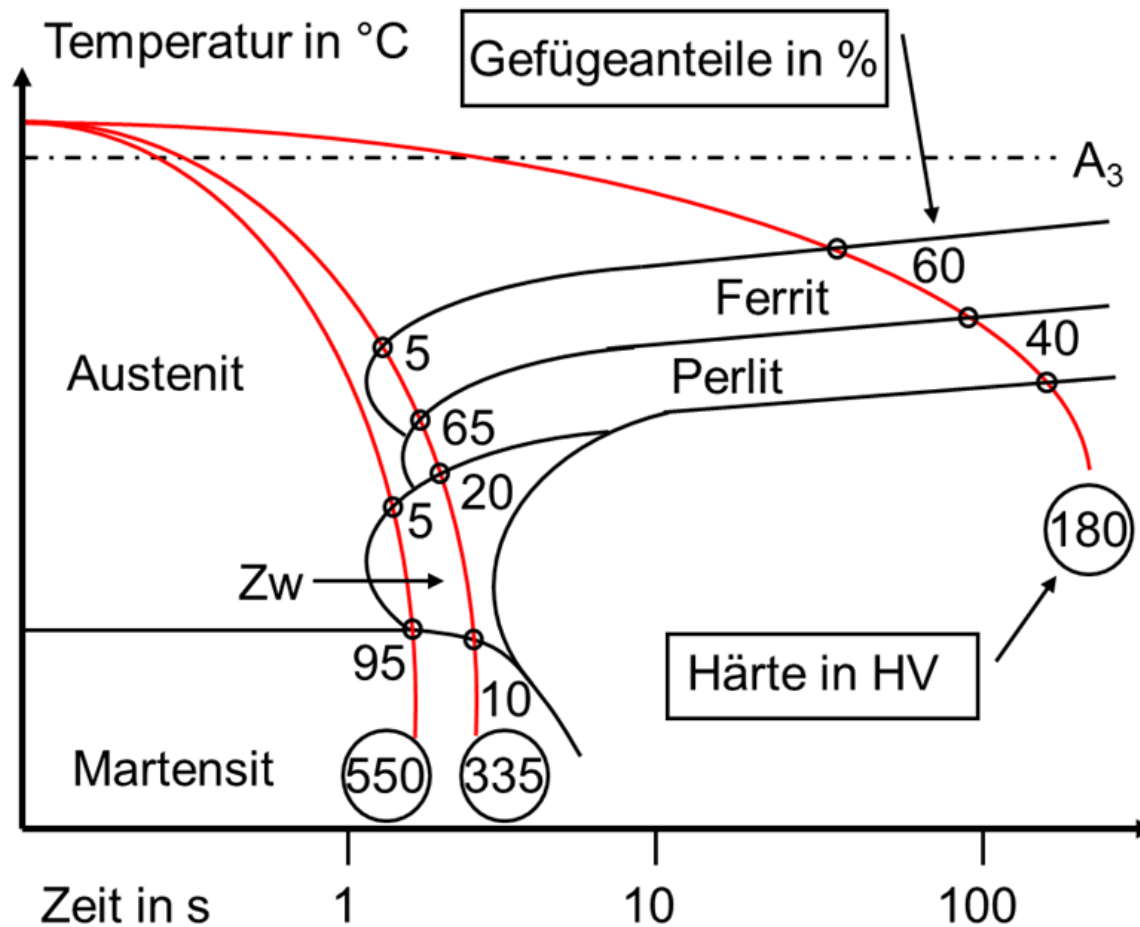
Wärmebehandlung von Stählen

Isotherme Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU-Schaubild)



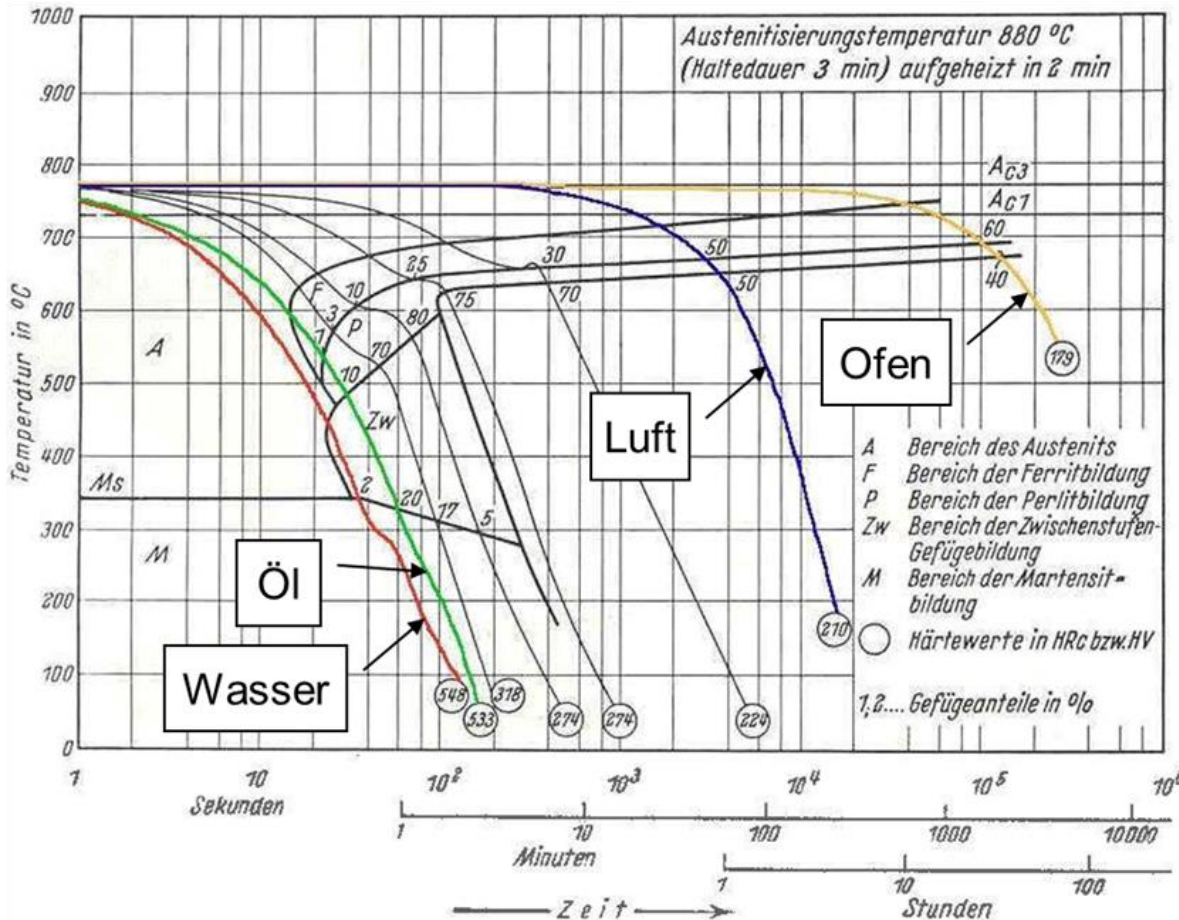
Wärmebehandlung von Stählen

Kontinuierliches Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU-Schaubild)



Wärmebehandlung von Stählen

Einfluss des Abschreckmediums beim Härten



Wasser

Gefügebestandteile:
Martensit, Bainit



Öl

Gefügebestandteile:
Martensit, Bainit,
Perlit, Ferrit



Luft

Gefügebestandteile:
Ferrit und Perlit

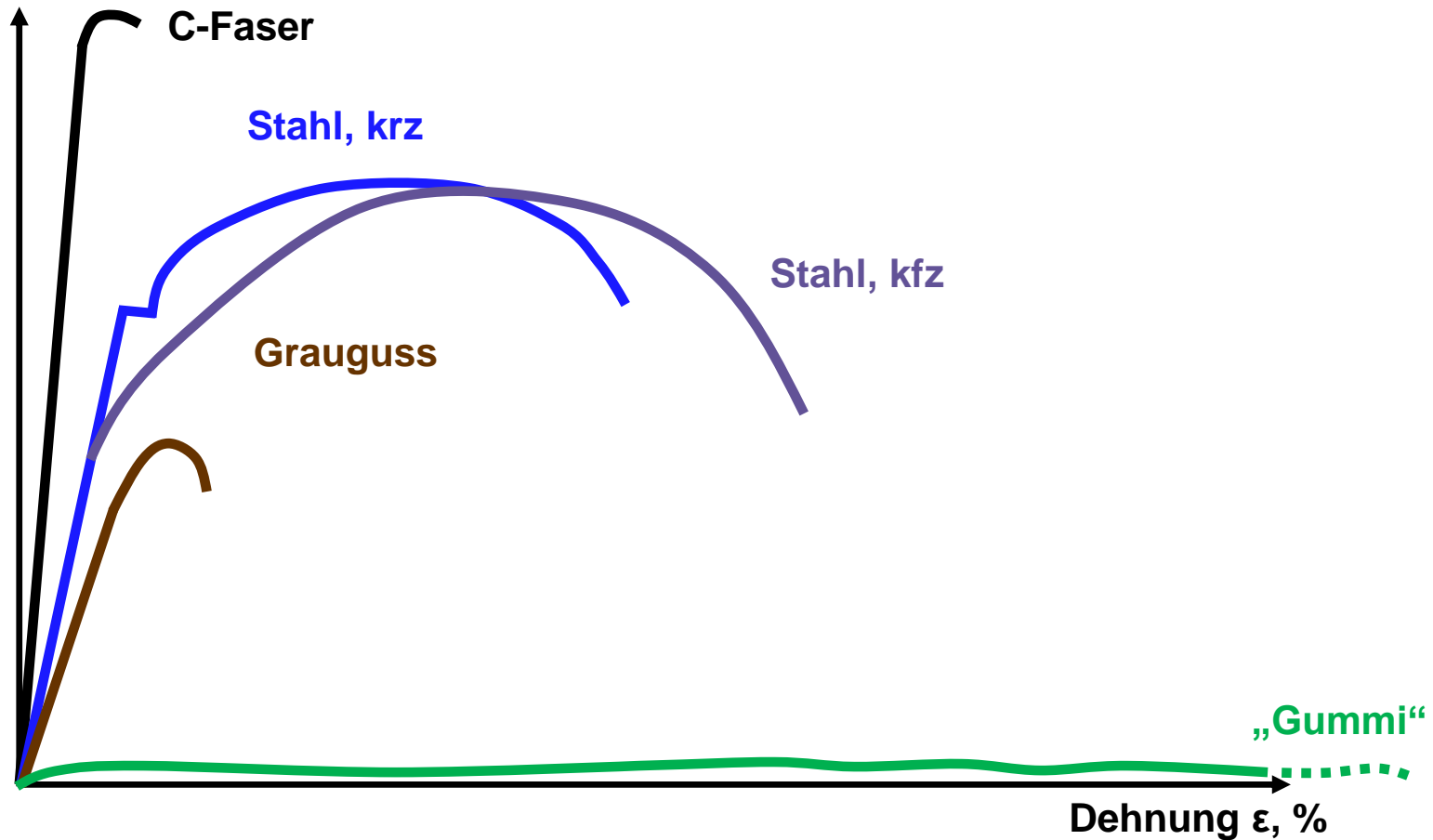


Ofen

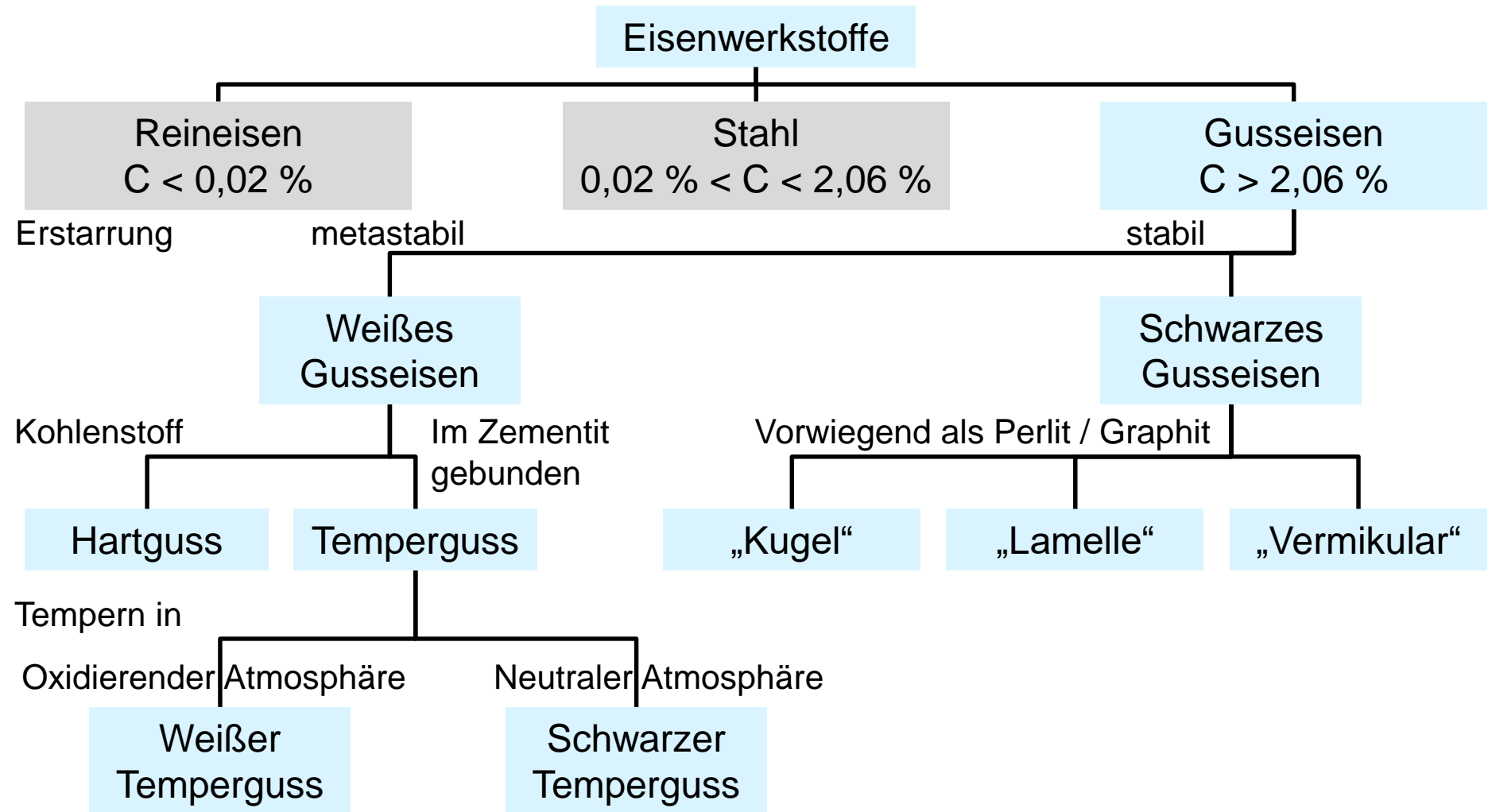
Gefügebestandteile:
Ferrit und Perlit

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

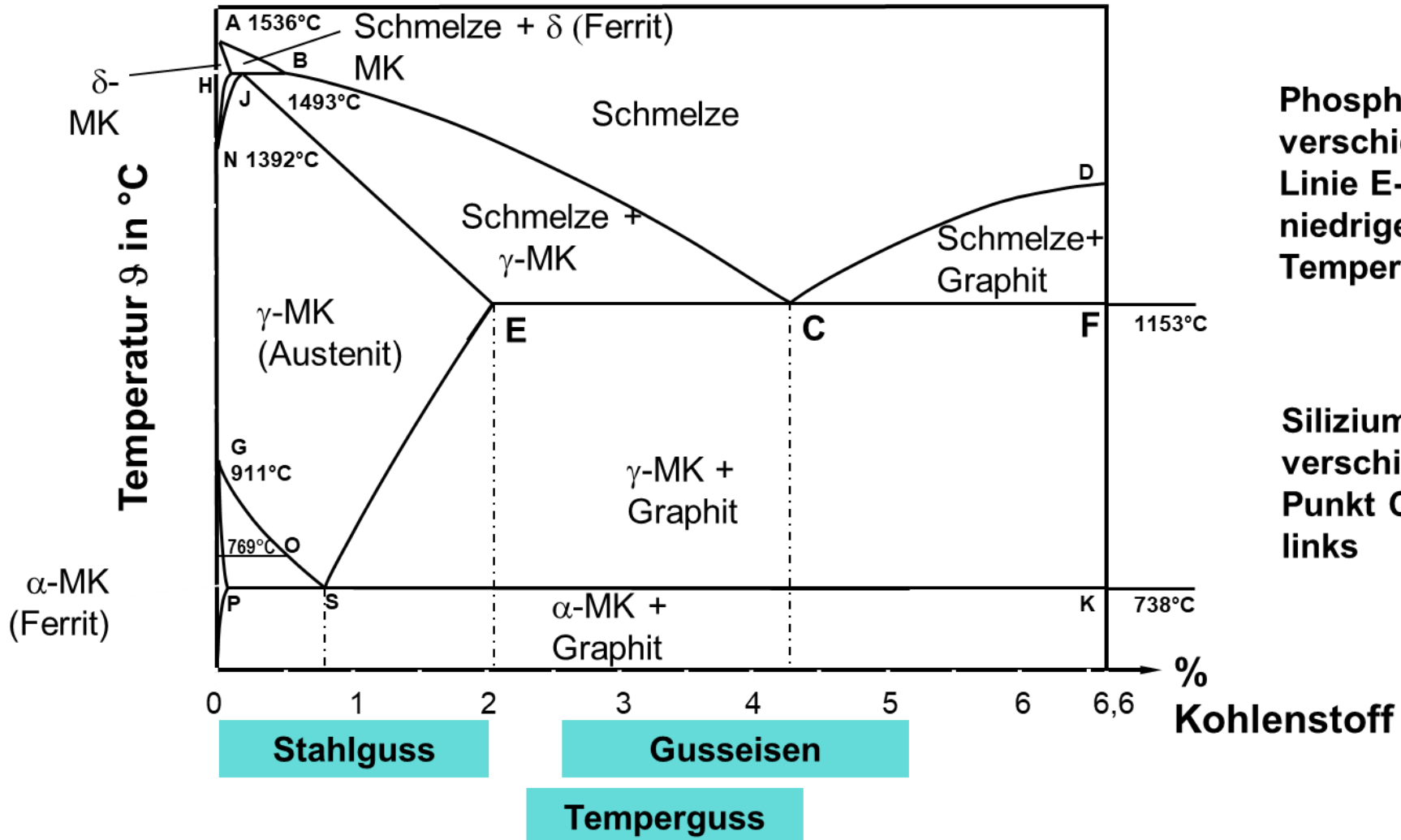
Spannung σ , MPa



Einteilung gegossener Eisenwerkstoffe



Gegossener Eisenwerkstoffe - Begleitelemente



Eutektisches Gefüge

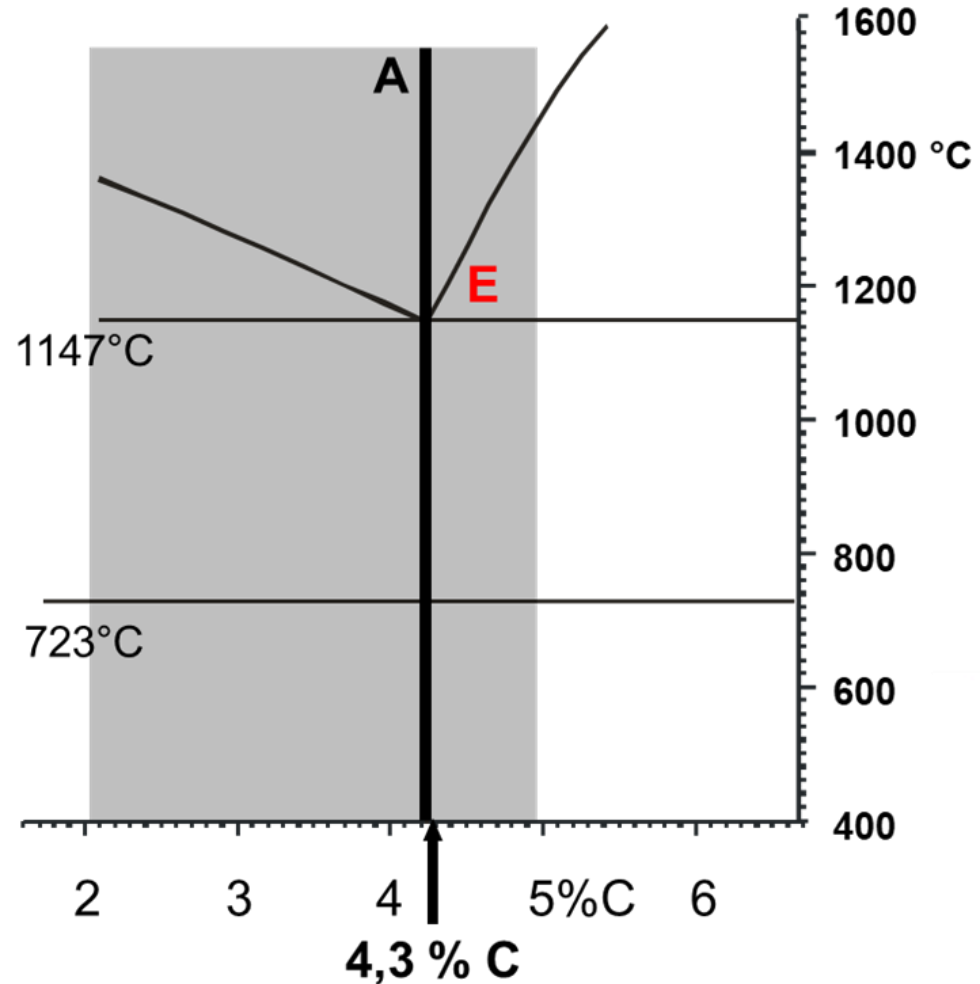
1147 °C:
gleichzeitiges Erstarren von Primärzementit & γ -Fe

1147 °C - 723 °C:
Ausscheiden von C als Sekundärzementit aus γ -Fe

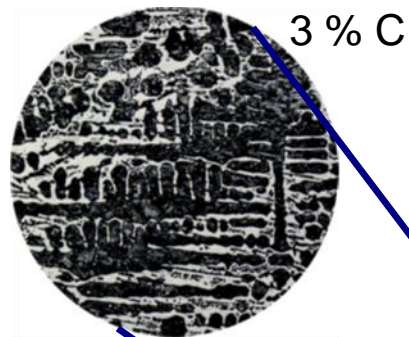
723 °C:
Eutektoider Zerfall der γ -Fe zu Perlit
Lederburit (Zementit, hell, zerfallener γ -MK)



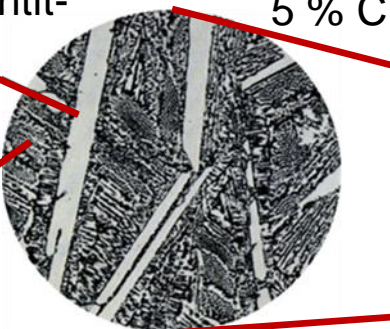
Bereich des Gusseisens



Unter- und übereutektoide Gefüge

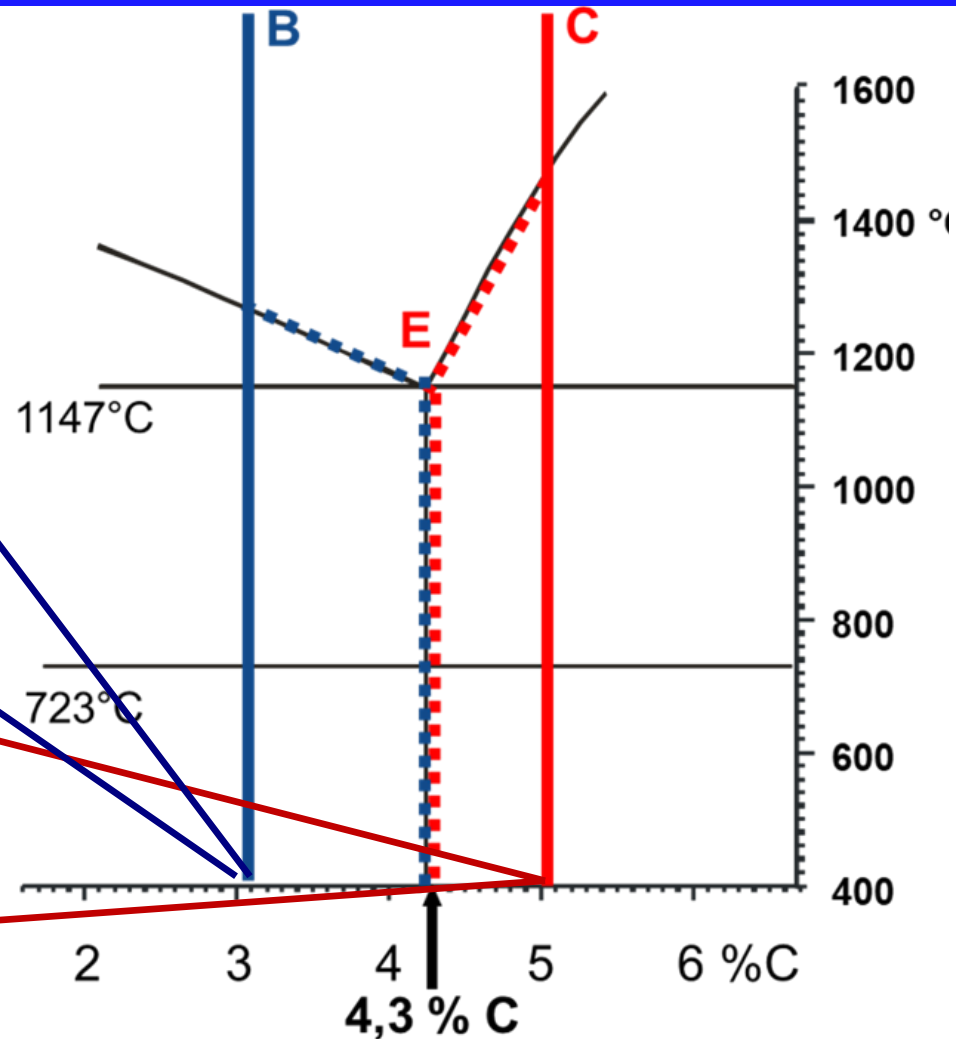


zerfallener γ -MK (dunkel) + Lederburit



(primär) Zementit-Lamellen

Lederburit



Gusseisenwerkstoffe

Gießeigenschaften:

- Niedrige Gießtemperaturen

Überhitzen möglich (=gutes Formfüllungsvermögen):

- Kein oder nur kleines Erstarrungsintervall

Vermeiden von Warmrissen:

- Sehr geringe Schrumpfung bei GJL

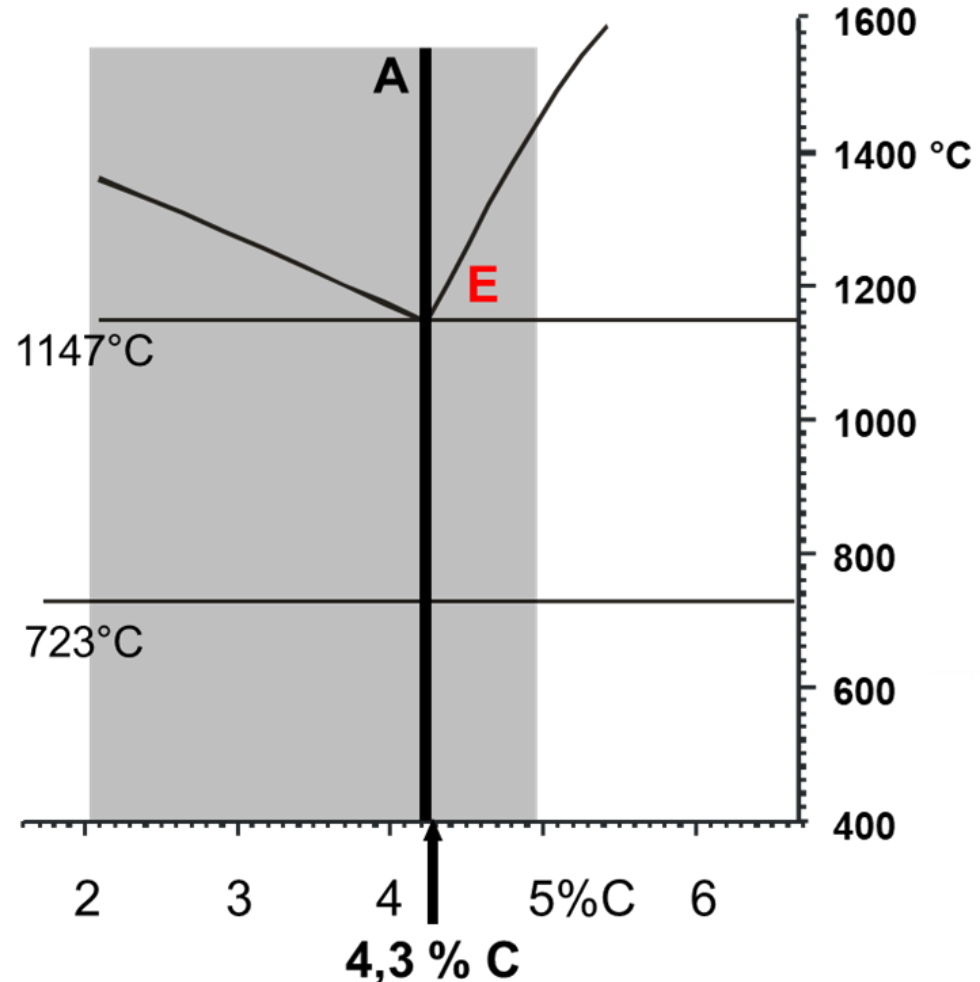
Benennung des Gusseisens:

- Gemäß der Form des Graphits
- GJL, GJS, GJV

Temperguss:

- GJMW, GJMB

Bereich des Gusseisens



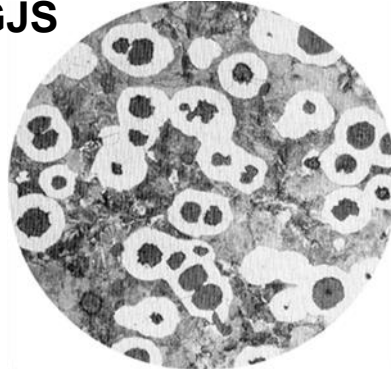
Gusseisenwerkstoffe - Gefüge

GJL



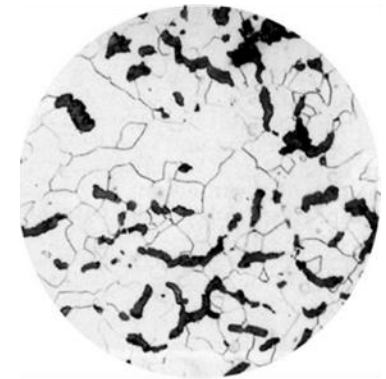
Perlitisches
Gefüge

GJS



Ferritisch-perlitisches
Gefüge

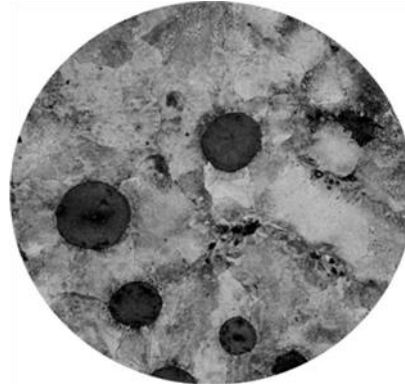
GJV



Ferritisches
Gefüge

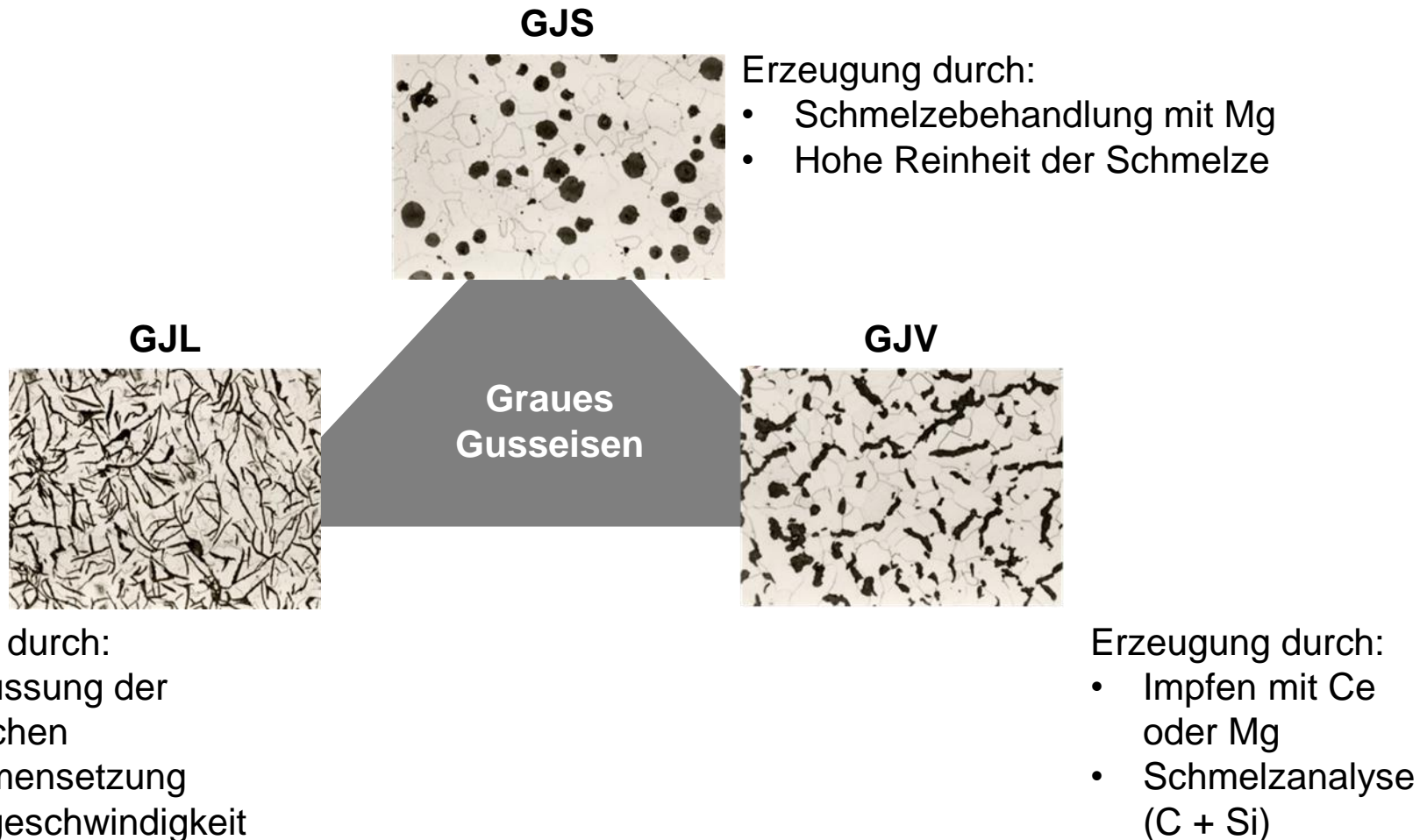


Ferritisch-perlitisches
Gefüge



Perlitisches
Gefüge

Gusseisenwerkstoffe - Graues Gusseisen



Gusseisenwerkstoffe - GJL

Gusseisen mit Lamellengraphit:

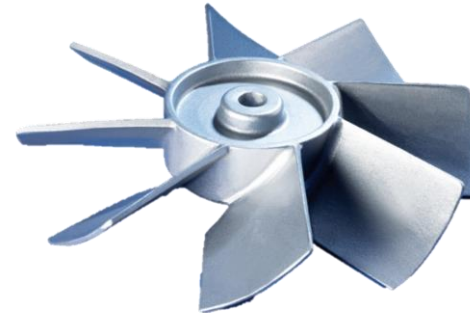
- Hoher C-Gehalt, dadurch niedriger Schmelzpunkt
- Düninflüssige Schmelze, dadurch gutes Formfüllungsvermögen
- Gut spanend bearbeitbar
- Gut schwingungsdämpfend

- Lamellen wirken als Kerben, dadurch geringe Zugfestigkeit
- Schlechte Schweißbarkeit

Gusseisenwerkstoffe - GJL



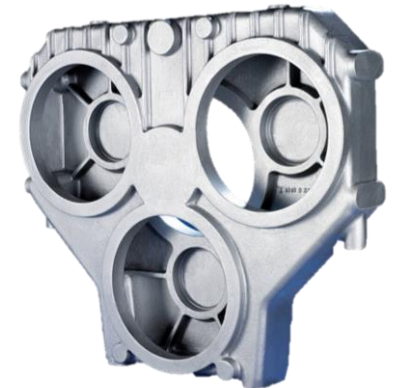
Zylinderkurbelgehäuse *



Lüfterrad ***



Sterngriffe DIN 6336 **



Gehäuse ***

* Gienanth GmbH aus Eisenberg (Pfalz) auf der NEWCAST 2019 in Düsseldorf; ** www.norelem.de/de/de/Produkte/Produktübersicht ; *** www.trompeter-guss.de

Gusseisenwerkstoffe - GJS

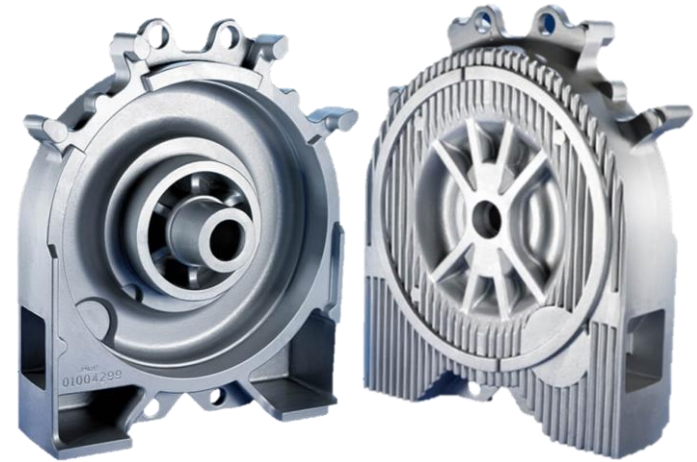
Gusseisen mit Kugelgraphit:

- Grundgefüge: Ferrit, dadurch gute Duktilität & Bearbeitbarkeit
- Grundgefüge: Perlit, dadurch hohe Härte und Festigkeit
- Ähnlich gute Gießeigenschaften wie GJL
- Festigkeitswerte ähnlich wie Stahl

Gusseisenwerkstoffe - GJS



Kurbelwelle *



Statorgehäuse **



Pumpengehäuse ***

* www.kfz-tech.de/Biblio/Kurbeltrieb/Kurbelwelle3.htm; www.trompetter-guss.de; ***<http://schulte-mt.de/images/pictures/Bild%20%20Endkontrolle%20eines%20Pumpengeh%C3%A4uses.JPG>

Gusseisenwerkstoffe - GJV

Gusseisen mit Vermikulargraphit:

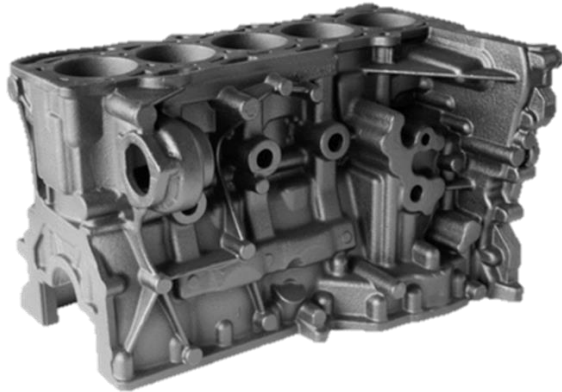
Vorteile gegenüber GJL

- Höhere Festigkeit
- Gute Duktilität (Bruchdehnung ca 2 % - 6 %)
- Gute thermische Stabilität
- Geringere Oxidationsneigung
- Geringere Wanddickenabhängigkeit

Vorteile gegenüber GJS

- Niedrigerer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- Bessere Temperaturwechselfestigkeit
- Geringere Verzugsneigung
- Höhere Wärmeleitfähigkeit
- Höheres Dämpfungsvermögen

Gusseisenwerkstoffe - GJV



Kurbelgehäuse *



Zylinderkopf **



Kompressorengehäuse **



Motorblock ***

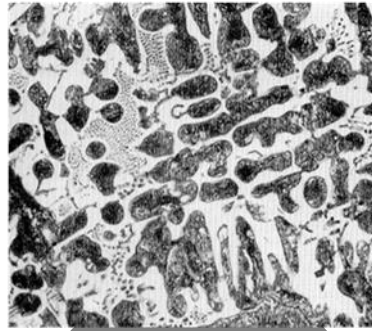


Schwungrad ***

* Eisenwerk Brühl; ** <https://www.fonderiepalmieri.it/de/gusseisensorten/#sferoidali>; *** <https://www.gienanth.com/kompetenzen/produkte-loesungen/anwendung/alle>

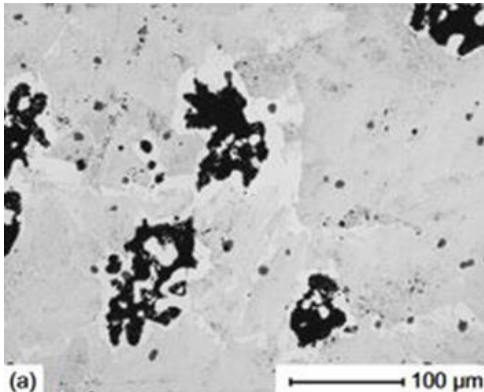
Gusseisenwerkstoffe - Temperguss

Temperrohguss



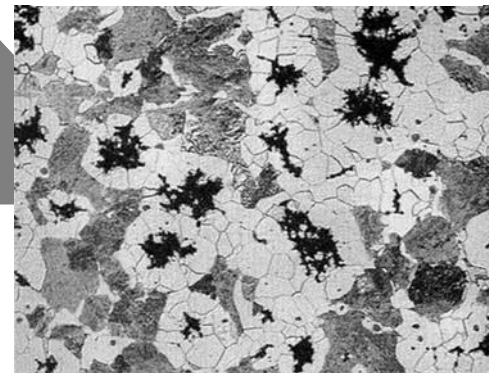
Kohlenstoff liegt als Zementit vor
Hart und spröde, daher praktisch nicht
bearbeitbar

Schwarzer Temperguss



Graphitisierungsglühen (950 °C) in
neutraler Atmosphäre
 Fe_3C als Graphit (=Temperkohle)

Weißer Temperguss



Glühen in oxidierender Atmosphäre
(1.050 °C)

Temperguss

Gusseisenwerkstoffe - GJMB

Schwarzer Temperguss:

- Kohlenstoffgehalt von 2,06 % bis 2,6 %
- Hohe Duktilität
- Für dickwandige Bauteile geeignet
- Gut zerspanbar
- Schwarze Bruchfläche

Gusseisenwerkstoffe - GJMB



Tempergussfitting *



Deckenwinkel **



Flansche **



Ringhaken ***

* www.stiefel.de/Temperguss-T-Stueck-Typ-130-IG-IG-IG-G-1-2-Zoll-verzinkt; ** www.iltubo.de/diy-shop/fittings-schwarz/flansche-deckenwinkel/; *** www.i.pinimg.com/originals/a5/32/ef/a532ef80de23b6067fae5ba390e7e430.jpg

Gusseisenwerkstoffe - GJMW

Weißer Temperguss:

- Kohlenstoffgehalt von 3,0 % bis 3,4 %
- Hohe Duktilität
- Für dünnwandige, auf Stoß beanspruchte und formgenaue Bauteile geeignet
- Schweißbar
- Warm- und kaltumformbar
- Weiße Bruchfläche

Gusseisenwerkstoffe - GJMW



Tempergussfitting *



Möbelrolle **



Fügelemente *



Flaschenöffner ***

* www.livarna-titan.eu/de/temperguss/; ** www.manufactum.de/moebelrolle-temperguss-verzinkt-a32373/; *** www.kug.bdguss.de/fileadmin/content/Publikationen-Normen-Richtlinien/Tempguss.pdf

Gusseisenwerkstoffe - GJH

Hartguss:

- Kohlenstoffgehalt von ca. 3,0 %
- Mangangehalt 5,0 % bis 6,0 % oder Nickelgehalt von 3,0 % bis 4,0 %
- Gefüge: Ledeburit mit Zementit oder Perlit
- Hohe Härte im Randbereich
- Geringer Si-Gehalt, dadurch Weißerstarrung
- Karbidstabilisierende Zusatzstoffe (z.B. Cr)

Gusseisenwerkstoffe - GJH



Walzen *



Kolben für hydraulische Pressen *



Strahlmittel **



Schleifscheibenabrichter ***

* www.walzengiesserei-quedlinburg.de; ** www.arteka.de/Strahltechnik/Hartguss-Strahlmittel.html; *** www.erhaso.com/Ersatzrolle-fuer-WILA-Abriecher-E5-Gr4-Hartmetall-Wellscheiben-50mm-Bo10mm

Gusseisenwerkstoffe - GS

Stahlguss:

- Kohlenstoffgehalt unter 0,5 % (unleg. Stahlguss)
- Hohe Duktilität und Festigkeit
- Schweiß- und schmiedebare
- Tieftemperaturzähigkeit
- Hitze- und Zunderbeständigkeit
- Gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeit
- Schlecht gießbar
- Große Erstarrungsschrumpfung und Schwindung

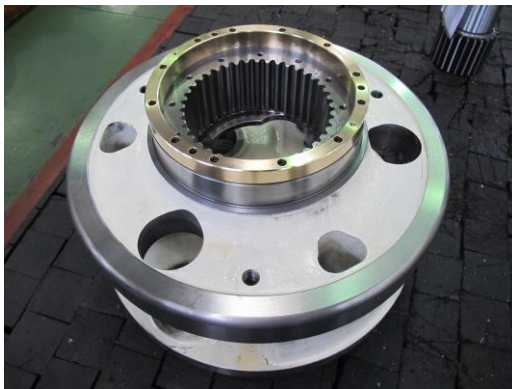
Gusseisenwerkstoffe - GS



Pumpengehäuse aus beim Verputzen *



Ringsegment *



Innenzahnrad *



Turbinengehäuse **



Knoten (Windturbine-Gründung) ***

* www.schulte-mt.de/images/pictures/3.12%20Pumpengeh%C3%A4use%20aus%20beim%20Verputzen.JPG; ** <https://www.continental-automotive.com/de-DE/Passenger-Cars/Powertrain/Gasoline-Technologies/Gas-Exchange/Turbocharging/Turbocharger-with-Steel-Casting-Turbine-Housing>; *** www.fwh-stahlguss.de/produkte/produktgruppen/on-und-offshore-industrie/