

Legt man eine zweite Kugelschicht so dicht wie möglich auf die Schicht nach ► Bild 3 S. 21, liegen diese Kugeln in Mulden, die durch je drei Kugeln der ersten Schicht gebildet werden. Entsprechend sind alle weiteren Schichten aufgebaut (► Bild 1 a). Aus der zunächst dreieckigen Grundform kann, wie auf ► Bild 1 a und 1 b gezeigt, eine sechseckige Säule isoliert werden, die insgesamt 17 Kugeln enthält: 7 in der Basisschicht, 3 in der Zwischenlage, 7 in der oberen Schicht. Diese kleinste Einheit wird als **Elementarzelle** bezeichnet.

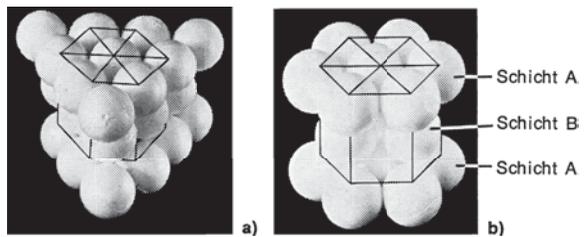


Bild 1 Hexagonal dichteste Kugelpackung.

1 a drei Schichten gemäß Bild 1 gestapelt

1 b sechseckige Säule aus Bild 2 a isoliert

Durch Veränderung des Betrachtungswinkels kann aus der gleichen dreieckigen Grundform auch eine Elementarzelle mit quadratischer Grundfläche herausgenommen werden (► Bild 2). Die Grundfläche wird von vier Kugeln auf den Ecken und einer Kugel im Schnittpunkt der Flächendiagonalen gebildet. Diese Elementarzelle enthält 14 Kugeln: 8 Eckatome und 6 Flächenatome.

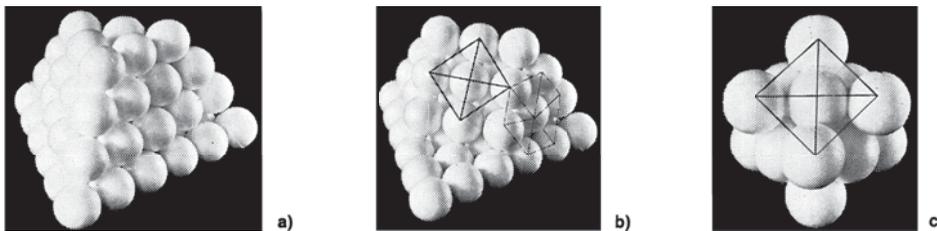


Bild 2 Kubisch dichteste Kugelpackung.

2 a Dichteste Kugelpackung im Raum

2 b quadratische Grundfläche durch Wegnahme einiger Kugeln aus Bild 2 a

2 c kubische Elementarzelle aus Bild 2 a isoliert

Die Sechsecksäule (= hexagonales System) und der Würfel (= kubisches System) sind die Grundformen der Elementarzellen der technisch wichtigen Werkstoffe.

Die folgenden Darstellungen zeigen die wichtigsten Elementarzellen als Kugelpackungen analog ► Bild 3 S. 21 und den Bildern 1 und 2 sowie als Prinzipskizzen beschränkt auf die Atomkerne. Die Verbindungslinien sollen nur die geometrische Gestalt der Elementarzellen verdeutlichen.

Hexagonale Elementarzelle: Gezeigt ist die hexagonale Elementarzelle mit dichtester Kugelpackung (**hdp**). Fehlt die zwischengeschobene Atomlage mit den drei Atomen, liegt eine einfache hexagonale Elementarzelle vor (**hex**). Hexagonal kristallisieren Beryllium, Magnesium, Zink, Cadmium, Cobalt und Titan. Diese Werkstoffe sind parallel zu den sechseckigen Grundflächen gut plastisch verformbar, senkrecht dagegen nur schlecht. Kohlenstoff als Graphit hat eine einfache hexagonale Gitterzelle, jedoch fehlt auch das Zentrumsatom in den Sechseckflächen. Die Bindungskräfte in der Senkrechten sind nur gering, sodass die Sechseckflächen leicht abgesichert werden können. Dadurch ist Graphit ein sehr gutes Schmiermittel.

Einfaches kubisches Gitter: Die Elementarzelle ist ein gleichseitiger, rechtwinkliger Würfel. Diese Elementarzelle ist die Grundform aller kubischen Systeme. Allerdings kristallisiert kein Metall in dieser Form.

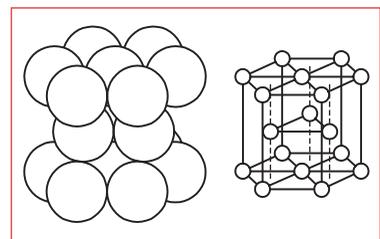


Bild 3 Hexagonale Elementarzelle mit dichtester Kugelpackung (hdp)

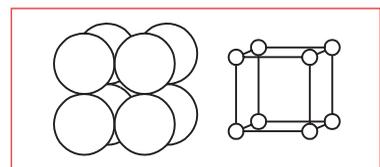


Bild 4 Einfache kubische Elementarzelle

2.3.3 Gitterbaufehler

Die bisherigen Darstellungen der Verformungsmechanismen gehen von der idealisierten Vorstellung eines fehlerfreien Kristallgitters aus. Tatsächlich enthalten jedoch alle Metallkristalle Gitterbaufehler verschiedenster Art.

Zu unterscheiden sind:

elektrische Gitterbaufehler, die auf einer ungleichen Verteilung der elektrischen Ladung im Kristall beruhen, ► **p-/n-Halbleiter**, S. 221;

chemische Gitterbaufehler durch Einbau von Fremdatomen, ► **Mischkristallbildung**, S. 39;

strukturelle Gitterbaufehler durch Abweichungen von der streng periodischen Anordnung der Gitterbausteine.

Strukturelle Gitterbaufehler werden nach ihrer räumlichen Ausdehnung klassifiziert (► Bild 1):

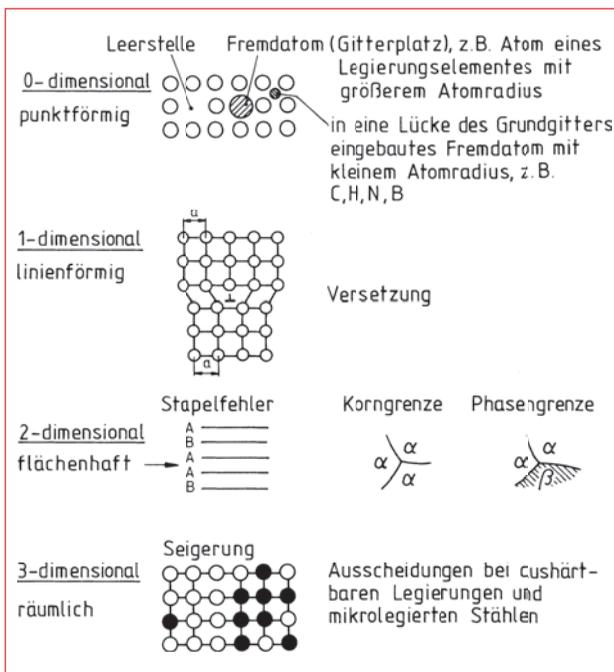


Bild 1 Schematische Darstellung der Gitterbaufehler

Punktförmige (0-dimensionale) Gitterbaufehler entstehen beim Erstarren aus Schmelzen, beim Erwärmen, plastischen Verformen und Bestrahlen mit energiereichen Strahlen. Während durch Kaltumformen erzeugte Leerstellen (= nicht von Atomen besetzte Gitterplätze) schnell wieder verschwinden, können durch Erwärmung erzeugte thermische Leerstellen durch schnelles Abkühlen eingefroren werden. Die Anzahl der thermischen Leerstellen nimmt mit sinkender Temperatur stark zu (10^3 am Schmelzpunkt, 10^9 bei Raumtemperatur).

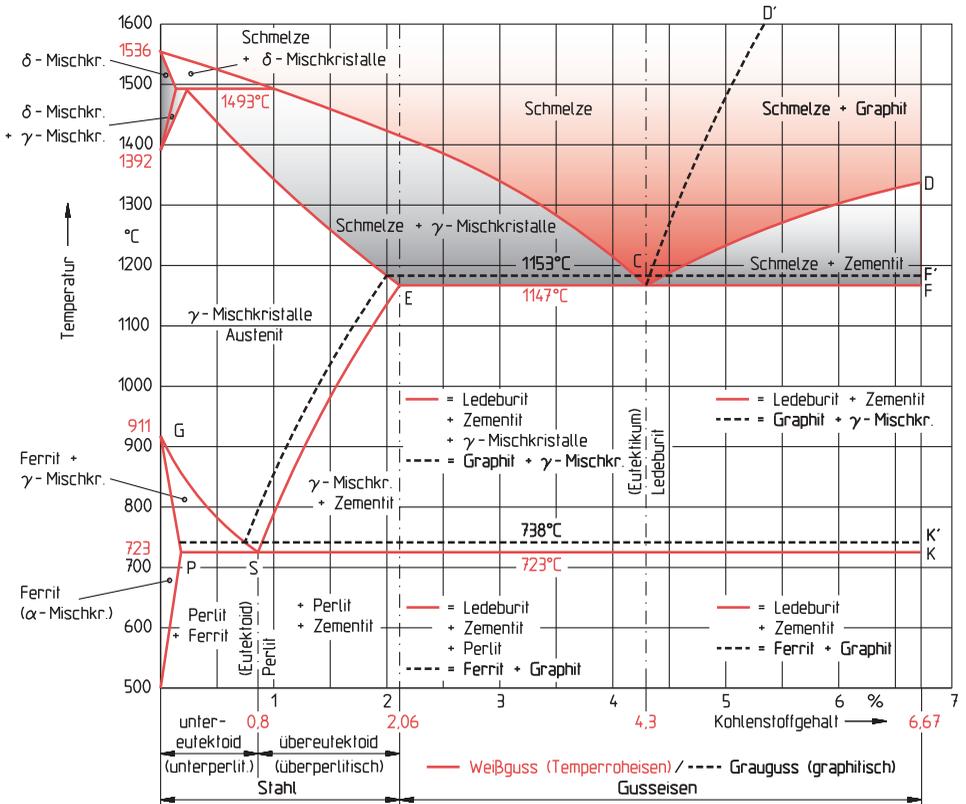
Linienförmige (1-dimensionale) Gitterbaufehler werden als **Versetzungen** bezeichnet. Sie entstehen beim Erstarren von Schmelzen, beim plastischen Verformen und bei dynamischer Beanspruchung auch bei Spannungen unterhalb der Streckgrenze.

Flächige (2-dimensionale) Gitterbaufehler sind die Korngrenzen oder Phasengrenzen, die ebenfalls beim Erstarren aus der Schmelze gebildet werden, im Verlauf der Fertigung aber z.B. durch Wärmebehandlungsverfahren verändert werden können (Normalglühen von Stahlguss, Grobkornglühen bei Transformatorenblechen).

Ein weiterer flächenhafter Baufehler ist der so genannte **Stapelfehler**, ein Fehler in der Stapelfolge der Gitterebene, z.B. A-B-A-A-B in ► Bild 3 S. 21 und ► Bild 6 S. 23.

Räumliche (3-dimensionale) Gitterbaufehler sind nichtmetallische Einschlüsse aus dem Erschmelzungs- und Gießprozess sowie intermediäre oder intermetallische Phasen, die sich in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung und der Temperatur bilden. Dazu zählen auch die Partikel, die sich beim Ausscheidungshärten bilden.

Die Gitterbaufehler beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften der Metalle.



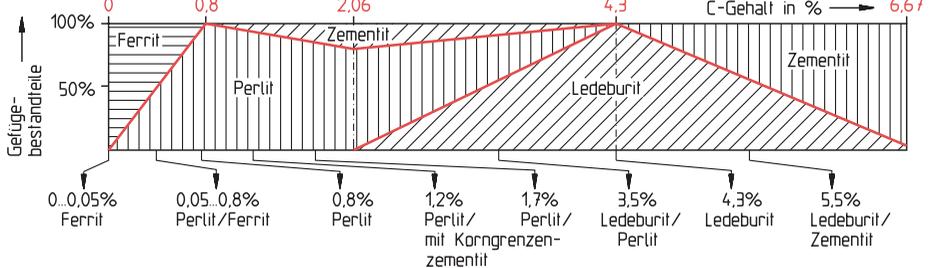
Metastabiles System: Fe-Fe₃C

Stabiles System: Fe-C

Durch Glühen veränderliches Gefüge

Graphitausscheidungen durch Glühen nicht veränderlich

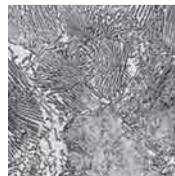
Gefügebestandteile bei Raumtemperatur nach langsamer Abkühlung (Metastabiles System)



unterperlitischer Stahl



perlitischer Stahl



überperlitischer Stahl



ferritisch-perlitisches Gusseisen

Bild 1 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff. Dick ausgezogene Linien für Stahl = System Eisencarbid (Fe-Fe₃C) = metastabiles System (meta gr. zwischen) = **durch Glühen veränderliche Gefüge**. Gestrichelte Linien (für Gusseisen) = System Eisen-Graphit (Fe-C) = stabiles System = **Graphitausscheidungen durch Glühen nicht veränderlich**.

Durch Rekristallisationsglühen erhalten stark verformte Metalle völlig neue Kristallite mit ausgeheilten Gitterbaufehlern und eine niedrige Streckgrenze. Die Rekristallisation setzt jedoch erst ein, wenn die Rekristallisationstemperatur überschritten wird.

Umformen ohne Anwärmen = Kaltumformen = Umformen bei Raumtemperatur.

Umformen nach Anwärmen = Warmumformen oder Halbwarmumformen.¹

Warmumformen = Umformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur.

Halbwarmumformen = Umformen kurz unterhalb der Rekristallisationstemperatur.

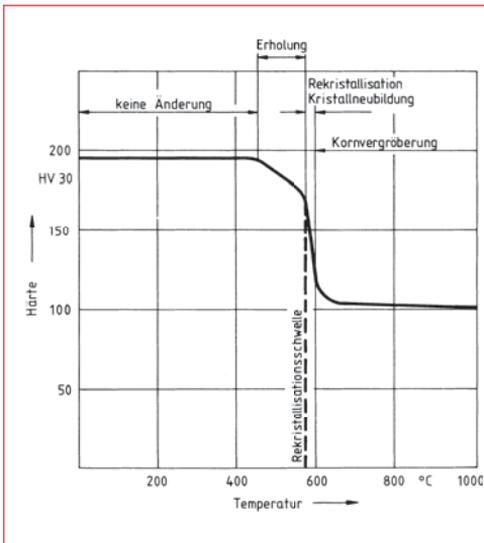


Bild 1 Abhängigkeit der Härte eines weichen Stahls von der Glühtemperatur nach dem Zugdruckumformen ohne Anwärmen mit etwa 60 % Verformungsgrad.

Das Umformen von Blei bei Raumtemperatur und Zinn bei 30 °C ist *Warmumformen*, das Umformen von Stahl bei 400 °C ist *Halbwarmumformen*. Beim Schmieden = *Warmumformen* trifft jeder Hammerschlag ein rekristallisiertes Gefüge.

Bei Metallen tritt nach geringen Umformungen keine Rekristallisation auf. Der sog. *kritische Reckgrad*, die Grenzverformung, oberhalb derer Rekristallisation eintritt, liegt für niedrig legierte Stähle bei etwa 8 bis 12 %.

Die *Rekristallisationstemperatur* ist vom Umformungsgrad und vom Werkstoff abhängig und muss von Fall zu Fall ermittelt werden. Beim Rekristallisationsglühen ist zu beachten, dass mit zunehmendem Verformungsgrad die Rekristallisationstemperatur sinkt und dass zu niedrigerem Umformungsgrad und zu hohes und langes Glühen grobkörnige Gefüge ergeben, ► Bild 2. Als Grenztemperatur gilt $0,4 T_s$ (Schmelztemperatur in K), sie entspricht der *Rekristallisationsschwelle*, bei der die Bildung neuer Kristalle beginnt.

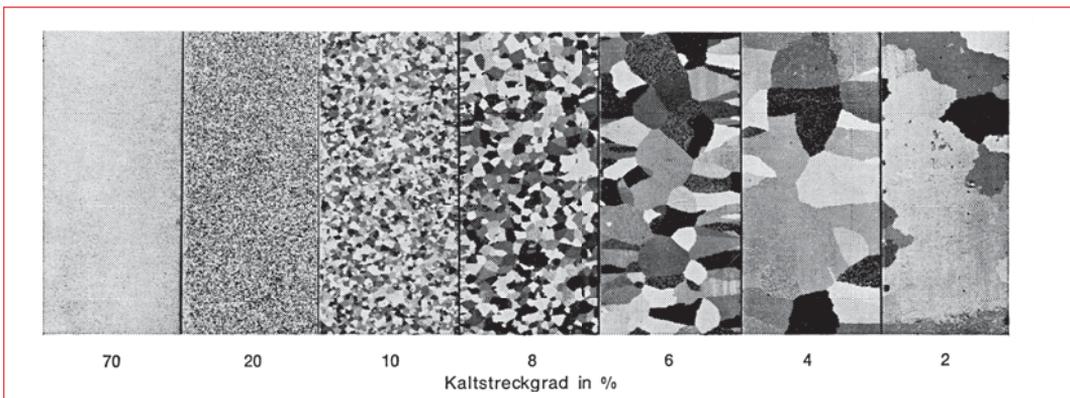


Bild 2 Rekristallisationskorngröße in Abhängigkeit vom Verformungsgrad
2 mm dicke Al-Bleche, verschieden kaltgestreckt und bei 500 °C/2 h geglüht.

¹ Zweck des Halbwarmumformens von Stahl: Verringerung der Umformkraft, Verbesserung der Zähigkeit.

Unlegierte Stähle		Legierte Stähle							
Qualitätsstähle		Edelstähle	Edelstähle		Legierte Stähle				
			Werkzeugstähle	Verschiedene Stähle	Chem. best. Stähle	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle			
		10 Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften	20 Cr	30	40 Nichtrostende Stähle mit < 2,5 % Ni ohne Mo, Nb und Ti	50 Mn, Si, Cu	60 Cr-Ni mit ≥ 2,0, < 3 % Cr	70 Cr Cr-B	80 Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V
01	91 Allgemeine Baustähle mit $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$	11 Bau-, Maschinenbau-, Behälterstähle mit < 0,50 % C	21 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si	31	41 Nichtrostende Stähle mit < 2,5 % Ni mit Mo, ohne Nb und Ti	51 Mn-Si Mn-Cr	61	71 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B C-Si-Mn	81 Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V
02	92 Sonstige, nicht für eine Wärmebehandl. bestimmte Baustähle mit $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$	12 Maschinenbaustähle mit ≥ 0,50 % C	22 Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si	32 Schnellarbeitsstähle mit Co	42	52 Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	62 Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	72 Cr-Mo mit < 0,35 % Mo Cr-Mo-B	82 Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V
03	93 Stähle mit im Mittel < 0,12 % C oder $R_m < 400 \text{ N/mm}^2$	13 Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit besond. Anforderungen	23 Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V	33 Schnellarbeitsstähle ohne Co	43 Nichtrostende Stähle mit ≥ 2,5 % Ni ohne Mo Nb und Ti	53 Mn-Ti Si-Ti	63 Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	73 Cr-Mo mit > 0,35 % Mo	83
04	94 Stähle mit im Mittel ≥ 0,12 % < 0,25 % C oder $R_m \geq 400 < 500 \text{ N/mm}^2$	14	24 W Cr-W	34	44 Nichtrostende Stähle mit ≥ 2,5 % Ni mit Mo, ohne Nb u. Ti	54 Mo Nb, Ti, V W	64	74	84 Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti
05	95 Stähle mit im Mittel ≥ 0,25 < 0,55 % oder $R_m \geq 500 < 700 \text{ N/mm}^2$	15 Werkzeugstähle	25 W-V Cr-W-V	35 Wälzlagerstähle	45 Nichtrostende Stähle mit Sonderzusätzen	55 B Mn-B < 1,65 % Mn	65 Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + < 2 % Ni	75 Cr-V mit < 2,0 % Cr	85 Nitrierstähle
06	96 Stähle mit im Mittel > 0,55 % C oder $R_m > 700 \text{ N/mm}^2$	16 Werkzeugstähle	26 W außer Klassen 24, 25 und 27	36 Werkstoffe mit besond. magnetischen Eigenschaften ohne Co	46 Chemisch beständige u. hochwärmefeste Ni-Legierungen	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + ≥ 2,0 < 3,5 % Ni	76 Cr-V mit > 2,0 % Cr	86
07	97 Stähle mit höherem P- oder S-Gehalt	17 Werkzeugstähle	27 mit Ni	37 Werkstoffe mit besond. magnetischen Eigenschaften mit Co	47 Hitzebeständige Stähle mit < 2,5 % Ni	57 Cr-Ni mit < 1,0 % Cr	67 Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + ≥ 3,5 < 5,0 % Ni oder ≥ 0,4 % Mo	77 Cr-Mo-V	87
		18 Werkzeugstähle	28 Sonstige	38 Werkstoffe mit besond. physikalischen Eigenschaften ohne Ni	48 Hitzebeständige Stähle mit ≥ 2,5 % Ni	58 Cr-Ni mit ≥ 1,0 < 1,5 % Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88
		19	29	39 Werkstoffe mit besond. physikalischen Eigenschaften mit Ni	49 Hochwärmefeste Werkstoffe	59 Cr-Ni mit ≥ 1,5 < 2,0 % Cr	69 Cr-Ni außer Klassen 57 bis 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89

Nicht für eine Wärmebehandlung beim Verbraucher bestimmte Stähle
hochfesteste schweißgeeignete Stähle

Tabelle 1 Stahlgruppennummern (DIN EN 10027-2, gekürzt)

4.8.3.8 Stähle für Sonderanwendungen

Drähte (DIN EN 10264:2012)

Drähte für Stahlseile werden bei allgemeinen Anforderungen aus unlegierten, kaltgezogenen Stählen, bei erhöhten Anforderungen aus unlegierten, kaltgezogenen und kaltprofilierten Stählen oder aus nichtrostenden Stählen hergestellt. Die Nennzugfestigkeiten der Drähte aus unlegierten, kaltgezogenen Drähte liegen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser zwischen 1 180 und 2 160 N/mm². Die Durchmessertoleranzen sind sehr eng gesetzt und liegen je nach Drahtdurchmesser zwischen $\pm 0,008$ mm und $\pm 0,04$ mm bei blanken Drähten. Die Zugfestigkeitswerte der Seile liegen in der Regel höher als die der Einzeldrähte, weil durch die schraubenartige Form im Seil die Drähte aufeinander gepresst werden und sich gegenseitig stützen.

Höherfeste Stähle für den Automobilbereich

Die Forderung nach Leichtbau bei gleichzeitig höherer Sicherheit hat in den letzten Jahren zu einer sprunghaften Entwicklung geführt, deren Ziel Stähle sind mit höheren Festigkeiten bei gleichzeitiger ausreichender Zähigkeit für den Umformprozess und einem erhöhten Energieabsorptionsvermögen durch plastische Verformung bei Unfällen. Diese Eigenschaften sind nur durch eine Kombination der vier festigkeitssteigernden Mechanismen (► S. 34) zu erreichen. Bild 1 zeigt diese Entwicklung in einem Schaubild, in dem die Bruchdehnung über der Zugfestigkeit aufgetragen ist (► Bild 1).

Nach wie vor am häufigsten wird der „Bake-Hardening“-Effekt ausgenutzt, der durch Ausscheidung von Kohlenstoffatomen an Versetzungen während des Lackeinbrennens Festigkeitssteigerungen bis 40 N/mm² ermöglicht (Abschreckalterung durch Kohlenstoff). Etwa 1995 wurden die Dual- und Mehrphasenstähle eingeführt, die ihre Festigkeitssteigerung durch eine gezielte Einlagerung harter Phasen wie Bainit und Martensit in eine weiche Matrix aus Ferrit oder Austenit erhalten. Neueste Entwicklungen sind die X-IP- (Xtremely formable + Xtremely high strength steel with Induced Plasticity)- und TWIP- (Twinning Induced Plasticity)-Stähle, die Festigkeiten bis etwa 1550 MPa bei Bruchdehnungen zwischen 15 bis 35 % erreichen. Auch die vollaustenitischen Stähle finden mehr und mehr Anwendungen in diesem Bereich. Eingesetzt werden sie in der Fahrzeugstruktur als Säulen, Seitenaufprallträger und Stoßfänger, also Bauteilen, die bei Unfällen besonders hohe Belastungen aufnehmen müssen.

Diese Stähle sind teilweise genormt in der DIN EN 10149:2013 und DIN EN 10268:2013.

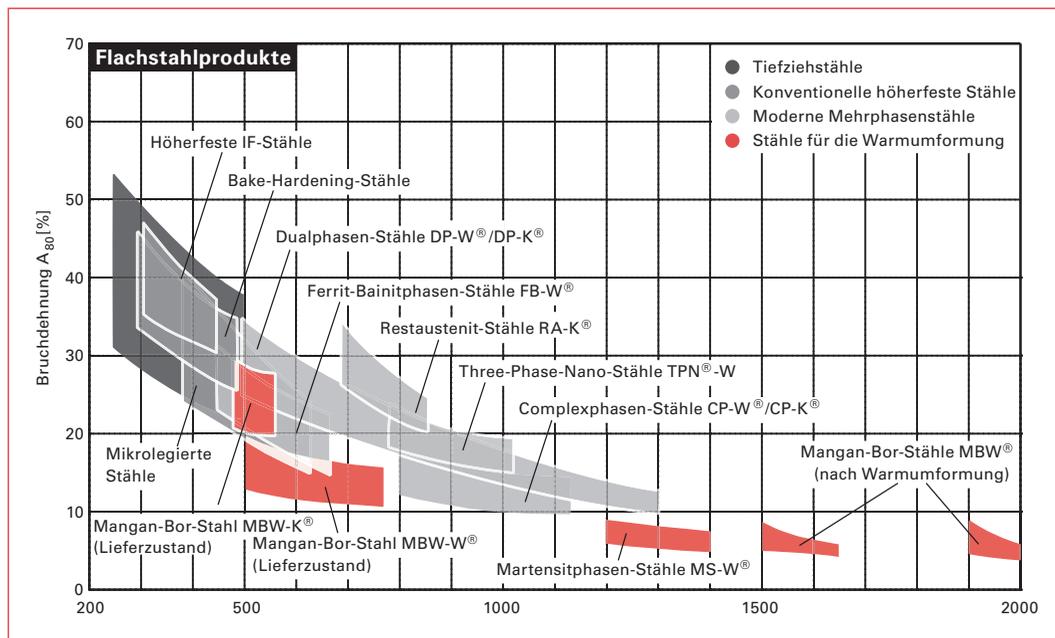
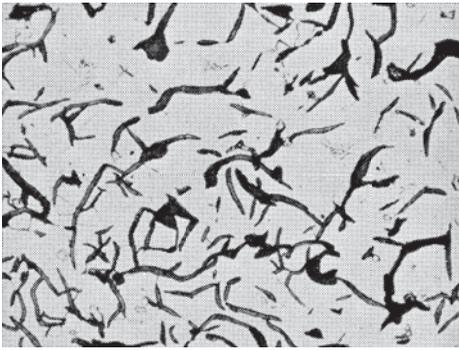
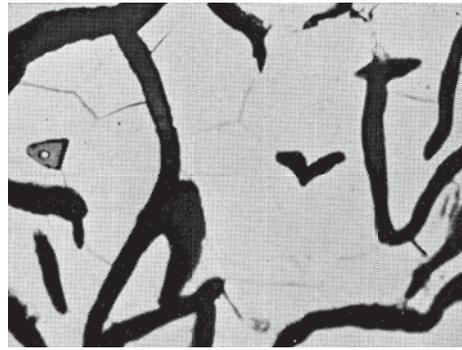


Bild 1 Entwicklung der höherfesten Stähle für den Automobilbau



Bildvergrößerung: 100 : 1



Bildvergrößerung: 500 : 1

Bild 1 Ferritisches Gusseisen (Graphit = schwarz, Ferrit = weiß)

Gusseisen mit Lamellengraphit ist in der DIN EN 1561 : 2012 genormt. ► Tab. 1 enthält die Werkstoffbezeichnungen sowie die kennzeichnenden Eigenschaften.

Werkstoffbezeichnung nach DIN EN 1561 : 2011		maßgebende Wanddicke t in mm	Zugfestigkeit R_m in getrennt gegossenen Probestäben in MPa	Brinellhärte HBW min.–max.
Kurzzeichen	Nummer			
EN-GJL-100	5.1100	5–40	100	
EN-GJL-150	5.1200	2,5–50	150	
EN-GJL-200	5.1300	2,5–50	200	
EN-GJL-250	5.1301	5–50	250	
EN-GJL-300	5.1302	10–50	300	
EN-GJL-350	5.1303	10–50	350	
EN-GJL-HB155	5.1101	2,5–50		–155
EN-GJL-HB175	5.1201	5–50		135–175
EN-GJL-HB195	5.1304	5–50		135–195
EN-GJL-HB215	5.1305	5–50		155–215
EN-GJL-HB235	5.1306	10–50		175–235
EN-GJL-HB255	5.1307	20–50		195–255

Tabelle 1 Gusseisen mit Lamellengraphit nach DIN EN 1561 : 2012. Die Zugfestigkeitswerte gelten für Proben, die durch mechanische Bearbeitung aus gegossenen Probestücken hergestellt wurden.

4.9.2.3 Gusseisen mit Kugelgraphit (ferritisch bis perlitisch, ausferritisch und austenitisch)

Die geringste Querschnittsstörung wird durch kugelförmige Graphitausscheidungen erreicht, weil die Kugel von allen Körpern gleichen Rauminhalts die kleinste Oberfläche hat. Außerdem sind die Radien der Kugeln größer als die Krümmungsradien an den Lamellenenden, sodass die Kerbwirkung sehr viel geringer ist. Durch Zugabe kleiner Mengen Magnesium und Cer zur Schmelze werden die immer vorhandenen Verunreinigungen abgebunden und so die kugelförmige Graphitausscheidung (► Bild 1 und 2 S. 140) ermöglicht.

Gusseisen mit Kugelgraphit ist genauso leicht gießbar wie lamellares Gusseisen. Wegen der geringeren inneren Kerbwirkung hat es jedoch wesentlich höhere Festigkeitswerte und bessere Zähigkeitswerte (duktiler Gusseisen). Der Elastizitätsmodul liegt mit 160000 MPa deutlich über dem des lamellaren Gusseisens. Das Dämpfungsvermögen ist allerdings geringer, da die elastischen Wellen an den Graphitkugeln weniger stark gebrochen werden.

Steifigkeits-Wertungszahlen: für Knicken $E/g \cdot \zeta$, für Beulen $\sqrt[3]{E/g \cdot \zeta}$ (Elastizitätsmodul E s. S. 265)

Beispiel: Die Steifigkeits-Wertungszahl der Al-Legierungen für Knicken ist:

$$\frac{7000000 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot 1000 \text{ cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot 9,381 \text{ m} \cdot 2,8 \text{ kg}} \approx 2540 \text{ km}$$

5.2 Aluminium

5.2.1 Eigenschaften und Verwendung von Aluminium und Aluminiumlegierungen

Gewinnung

Der Ausgangsstoff für die Gewinnung des Aluminiums wird nach seinem ersten Fundort, Les Baux in Südfrankreich, Bauxit genannt. Obwohl der Bauxit heute noch in Südeuropa abgebaut wird, hat sich das Schwergewicht der Bauxitförderung nach Afrika, Australien, Ostasien und Amerika verlagert.

Bauxit enthält neben Fe_2O_3 , SiO_2 und H_2O etwa 50 bis 65 % Aluminiumoxid, Al_2O_3 , sog. Tonerde.

Die Gewinnung des Aluminiums aus Bauxit erfolgt in zwei Stufen: Gewinnung von Tonerde aus Bauxit und Gewinnung von Aluminium aus Tonerde.

Die Gewinnung von Tonerde aus Bauxit erfolgt mit Natronlauge unter einem Druck von 6 bar bis 8 bar bei einer Temperatur von 170 °C. Da zur Erzeugung von 2 t Tonerde 5 t Bauxit erforderlich sind, erfolgt die Extraktion der Tonerde aus Bauxit meist am Bauxit-Fundort.

Wegen der sehr hohen Bindungsenergie des Aluminiumoxids Al_2O_3 wird Aluminium heute ausschließlich durch Schmelzflusselektrolyse¹ in einer Salzschnmelze (Kryolith²-Tonerde-Verfahren) bei etwa 970 °C vom Sauerstoff getrennt. Zur Herstellung von 1 t Aluminium sind 2 t Tonerde und eine elektrische Energie von 13 000 bis 18 000 kWh³ erforderlich.

Die Erzeugung von Al-Gusslegierungen aus Aluminiumschrott erfordert nur etwa 5 % der Energie, die für die Gewinnung von Aluminium aus Bauxit erforderlich ist.

Nach DIN EN 573-3:2013 wird unterschieden in unlegiertes Aluminium, das nicht durch Raffination hergestellt wurde, mit einem Gehalt an Beimengungen zwischen 0,1 % und 1 %, in unlegiertes durch Raffination hergestelltes Aluminium mit einem Gehalt an Beimengungen zwischen 0,01 % und 0,02 % und in legiertes Aluminium. Von den Beimengungen verändern hauptsächlich Fe und Si die mechanischen Eigenschaften des Aluminiums. Beide Beimengungen wirken härtend, sodass mit zunehmender Reinheit die Festigkeit ab- und die Dehnung zunehmen.

Korrosionsbeständigkeit

Aluminium ist nach seiner Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe ein unedles Metall. Seine hohe Korrosionsbeständigkeit beruht auf der Bildung einer sehr dichten oxidischen Deckschicht, die das Metall an Luft oder in wässrigen Lösungen überzieht. Verletzungen der Deckschicht werden bei Anwesenheit von Sauerstoff durch sofortige Oxidation selbsttätig ausgeheilt. In starken oxidierenden Säuren wird die Deckschicht noch verstärkt. Aluminium ist daher sogar in konzentrierter Salpetersäure beständig. Unbeständig ist Aluminium dagegen in Medien, die seine Oxidschicht angreifen, z. B. in konzentrierten Alkalien, frischem Mörtel oder Baukalk. Bei der Verwendung von Aluminium für die Aufbewahrung oder Zubereitung von säurehaltigen Lebensmitteln ist zu beachten, dass dabei lösliche Aluminiumsalze gebildet werden können, die dann anschließend mit den Nahrungsmitteln aufgenommen werden. Ansonsten ist Aluminium aber physiologisch unbedenklich und kann daher uneingeschränkt mit Nahrungsmitteln in Kontakt kommen.

¹ Man schickt dabei Gleichstrom durch ein stromleitendes geschmolzenes Salz, in dem die Tonerde aufgelöst ist. Das Aluminium scheidet sich an dem negativen Pol der angelegten Gleichspannung, der Kathode, ab. Der Sauerstoff wird am positiven Pol, der Anode, abgeschieden.

² Kryolith = Natrium-Aluminiumfluorid.

³ Aluminium wird auch packed electricaity = verpackte Elektrizität genannt.

Nicht aushärtbare/naturharte Aluminiumlegierungen

Die gegenüber Reinaluminium erhöhte Festigkeit dieser Legierungen beruht auf *Mischkristallhärtung* (► S. 34), d. h. auf der Fähigkeit des Aluminiums, mit Magnesium Mischkristalle zu bilden, die auch bei tieferen Temperaturen beständig sind. Die gelösten Magnesiumatome sind Hindernisse für die Bewegung von Versetzungen und bewirken dadurch eine Verfestigung des Aluminiums. Durch zusätzliches Lösen von geringen Mengen Mangan wird die Mischkristallhärtung gesteigert. Die Erhöhung der Festigkeit durch Mischkristallhärtung kann durch zusätzliche mechanische Verfestigung (► Bild 1 S. 152) verdoppelt werden.

Die nicht aushärtbaren Aluminiumlegierungen haben große Anwendungsgebiete. Sie werden an Stelle von Reinaluminium verwendet, wenn mittlere Festigkeit erforderlich ist.

Aushärtbare Aluminiumlegierungen

Die Aushärtbarkeit einiger Al-Legierungen beruht auf der mit abnehmender Temperatur abnehmenden Löslichkeit der Elemente Cu, Si, Mg und Zn. Der Aushärtvorgang und die zur Aushärtung führenden Maßnahmen sind auf ► S. 99 f. und in ► Bild 1 beschrieben. Im Gegensatz zur Verfestigung durch Umformen ohne Anwärmen erfolgt hierbei die **Festigkeitssteigerung ohne wesentliche Verringerung der plastischen Verformbarkeit**.

Alle aushärtbaren Al-Legierungen verhalten sich grundsätzlich ähnlich, sodass sich aus dem Zustandschaubild Al-Cu folgende Temperaturen für ihre Verarbeitung ergeben:

Warmverformen: 300 °C... 550 °C.

Kaltverformen: Bei Raumtemperatur zwischen Abschrecken und Auslagern oder nach dem Weichglühen.

Weichglühen: 350 °C... 400 °C, s. Gefügebild (4). Weichgeglühte und warmverformte Legierungen erhalten ihre maximalen Festigkeitswerte nur durch nachträgliches Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern.

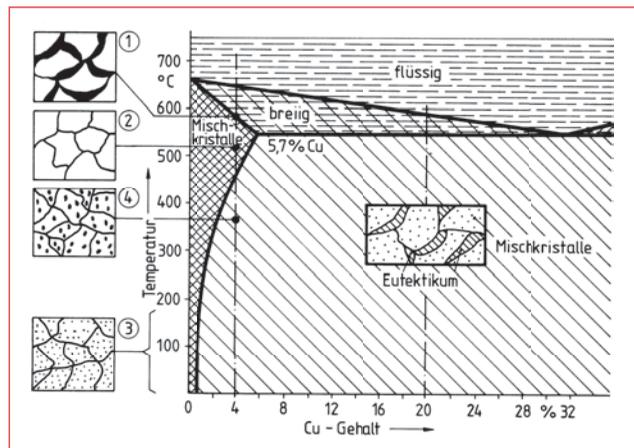
Lösungsglühen: 450 °C... 550 °C, s. Gefügebild (2). Danach Abschrecken in kaltem Wasser. Verzögerung beim Abschrecken hat grobe Ausscheidungen nach Gefügebild (4) und Festigkeitsverlust nach dem Auslagern zur Folge.

Auslagern von lösungsgelühten und danach abgeschreckten aushärtbaren Legierungen zur Erreichung maximaler Festigkeit, s. Gefügebild (3). **Kaltausgelagert** durch mehrtägiges Lagern bei Raumtemperatur werden die Legierungen der Gruppe AlCuMg (Duralumin).

Warmausgelagert durch 2- bis 3tägiges Lagern bei erhöhter Temperatur werden die Legierungen der Gruppen AlZnMg und AlZnCu (130 °C... 135 °C). AlMgSi (140 °C... 160 °C) und AlZnMg (135 °C).

Anlassbeständigkeit der ausgelagerten Legierungen etwa 120 °C... 160 °C.

Cu-Gehalte über 5,7% sind nicht löslich und für die Aushärtung ohne Bedeutung, s. Gefügebild für 20% Cu.



- ① Verbrannt, Zusammenhalt der Körner gelockert, neu einschmelzen.
- ② Lösungsglühen, alles Cu gelöst, nur Mischkristalle, weich, rekristallisiert.
- ③ Bei zu langsamem Abschrecken nach dem Lösungsglühen treten bereits sichtbare Ausscheidungen auf. Das schnell abgeschreckte Gefüge lässt auch nach der Aushärtung **keine sichtbaren** Ausscheidungen erkennen.
- ④ Weichglühen, **sichtbare** Ausscheidung von CuAl_2 ; keine Verfestigung durch Auslagern möglich; maximal weichgeglühter Zustand.

Bild 1 Zustandschaubild der aushärtbaren Aluminium-Kupfer-Legierungen

16 Zerstörungsfreie Prüfung metallischer Werkstoffe

Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Prüfverfahren werden bei den zerstörungsfreien Prüfungen die Bauteile nicht zerstört oder in ihrer Funktion eingeschränkt. Sie können daher problemlos in der Fertigung eingesetzt werden.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind jedoch nur dazu geeignet, Fehlstellen in Werkstoffen oder Bauteilen sichtbar zu machen. Sie liefern keine Aussagen über die mechanische Belastbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen.

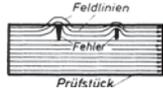
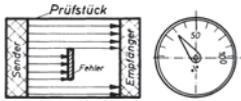
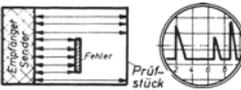
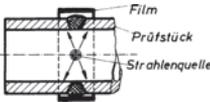
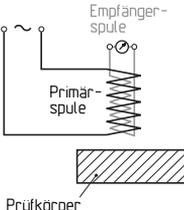
Zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen			
Verfahren	Wirkungsweise	Anwendung	
Oberflächenrissprüfung	Farbeindringprüfung	Durch Kapillarwirkung wird das flüssige Farbeindringmittel in die Risse eingesaugt. Nach dem Reinigen der Oberfläche bildet sich in einem kapillaraktiven Entwickler eine breite Farbspur.	Beliebig geformte Bauteile aus beliebigen Werkstoffen. Die Risse müssen von der Oberfläche ausgehen oder bis an die Oberfläche reichen.
Magnetpulverprüfung	Pol- und Wechselstrom Magnetisierung und Entmagnetisierung		Zerstörungsfreier Nachweis von Rissen, Fremdeinschlüssen und Härtezonon in oder nahe der Oberfläche von magnetisierbaren Werkstücken
Ultraschallprüfung	Durchschallungsverfahren		Nachweis der Kontur von Fehlern, die senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung liegen
	Impuls-Echo-Verfahren		Nachweis der Kontur und der Tiefenlage von Fehlern, die senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung liegen und Wandstärkenmessung
Röntgen- und Gammaprüfung	Film oder Leuchtschirm		Zerstörungsfreier Nachweis von Lunkern, Schlackeeinschlüssen, Seigerungen u. Lage von Füllkörpern im Innern beliebiger Werkstücke
Elektromagnetische Induktionsverfahren	Wirbelstromverfahren		Nachweis von Oberflächenrissen und Kavitäten bis wenige mm Tiefe

Tabelle 1 Zerstörungsfreie Prüfung von Werkstücken