

# 1 Hinter Gittern

## In diesem Kapitel ...

- erfahren Sie all das, was es hinter Gittern von metallischen Werkstoffen zu verstehen gibt
- lernen Sie die verschiedenen Gittertypen und Gitterfehler kennen
- werden Sie sehen, wie hierüber entscheidender Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften ausgeübt werden kann

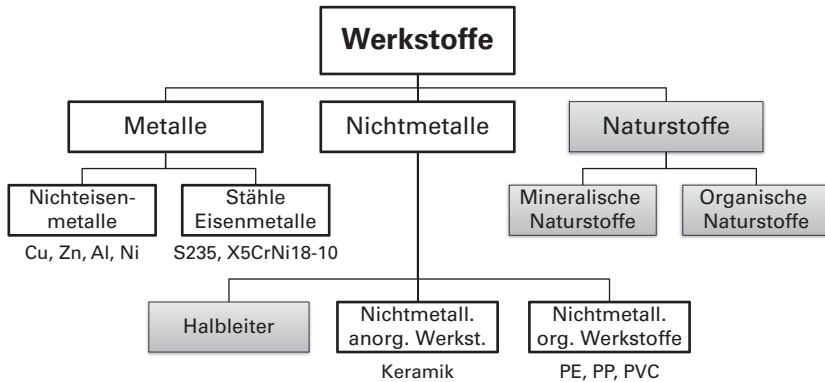
In diesem Kapitel werden wird alles Wichtige angesprochen, was hinter Gittern metallischer Werkstoffe steht. Dazu zählen zunächst einmal elementare Kenntnisse, wie die Einteilung der Werkstoffe und der Atomaufbau, sowie die Atomarten, aus denen sich dann die verschiedenen Bindungstypen ableiten lassen. Erst dann können wir uns mit den wichtigsten Gittertypen und Gitterfehlern beschäftigen, die uns durch das ganze Buch begleiten werden, weil sie bereits eine Vielzahl der Werkstoffeigenschaften entscheidend beeinflussen.

## Einteilung der Werkstoffe

Bevor wir uns den Gittertypen und Gitterfehlern widmen können, müssen wir uns zunächst mit einigen Grundlagen der Werkstoffkunde und Werkstoffchemie beschäftigen. Lassen Sie uns mit einer Einteilung der Welt der Werkstoffe beginnen (siehe Abbildung 1.1).

Werkstoffe werden grob in die drei Bereiche „Metalle“, „Nichtmetalle“ und „Naturstoffe“ eingeteilt. Innerhalb der Naturstoffe differenziert man zwischen mineralischen und organischen Naturstoffen. Dies umschließt auch Werkstoffe wie Holz aber auch Beton, die allerdings **nicht** Gegenstand dieses Schnellkurses sind.

Die Nichtmetalle lassen sich in Halbleiter, nichtmetallische anorganische Werkstoffe und nichtmetallische organische Werkstoffe einteilen. Halbleiter, die insbesondere für Ingenieure der Elektrotechnik relevant sind, werden wir in diesem Kurs auch nicht näher betrachten. Zu den nichtmetallischen anorganischen Werkstoffen zählen die Keramiken und zu den nichtmetallischen



**Abbildung 1.1** Einteilung der Werkstoffe

organischen Werkstoffen die Kunststoffe, wie beispielsweise Polyethylen, Polypropylen oder Polyvinylchlorid. Auf diese beiden Werkstoffklassen wird in Kapitel 10 näher eingegangen.

Innerhalb der metallischen Werkstoffe liegt der Schwerpunkt auf den Stählen und Eisenwerkstoffen. Alle anderen Metalle werden zusammengefasst unter dem Begriff „Nichteisenmetalle“. Hierunter fallen beispielsweise Kupfer, Zink, Aluminium und Nickel. Diese interessanten Werkstoffe werden wir in Kapitel 9 betrachten.

Den Schwerpunkt der ersten sechs Kapitel bilden die Stähle und Eisenmetalle. So werden Ihnen nach dem Durcharbeiten der beiden ersten Kapitel auch Bezeichnungen wie S235 oder X5CrNi18-10 etwas sagen.

## Atomaufbau

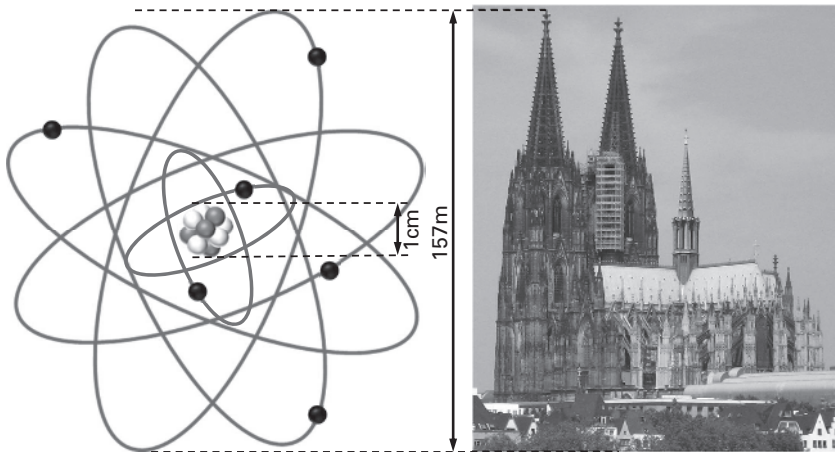
Damit wir die Struktur und die daraus resultierenden Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffklassen verstehen können, müssen wir zunächst die verschiedenen Bindungsarten kennenlernen. Die Tatsache, dass es überhaupt verschiedene Bindungsarten gibt, resultiert aus dem Aufbau der Atome.

Wie die meisten von Ihnen sicherlich wissen, bestehen Atome aus verschiedenen Elementarteilchen:

- Elektronen, die eine negative elektrische Ladung tragen,
- Protonen, die eine positive elektrische Ladung tragen und
- Neutronen, die neutral sind.

In jedem Atom sind gleich viele Elektronen wie Protonen vorhanden, so dass es zu einem Ladungsausgleich kommt.

Abbildung 1.2 zeigt links ein Kohlenstoffatom nach dem Bohr'schen Atommodell, bei dem sich die Elektronen auf bestimmten Kreisbahnen um den Atomkern bewegen. Um den Kern, bestehend aus 6 Protonen und 6 Neutronen, kreisen 6 Elektronen: zwei auf der innersten Schale und 4 auf der äußeren. Hierbei entsprechen die Proportionen aber nicht der Realität. Bei allen bekannten Atomen beträgt der Radius des Atomkerns nur  $1/10.000$  bis  $1/100.000$  des Atomradius. Wäre der Atomkern  $1\text{cm}$  groß (in etwa die Größe eines Kirschkerns), dann würde der Radius des gesamten Atoms der Höhe des Kölner Domes entsprechen, dem dritthöchsten Kirchengebäude der Welt.



**Abbildung 1.2** Atomaufbau und das Größenverhältnis Atomkern/Atom

Alle Atome, die im neutralen Zustand gleichviele Elektronen besitzen, gehören zu einem chemischen Element. Nun gibt es aber über 100 verschiedene Elemente, das heißt Elemente mit mehr oder weniger Elektronen und Protonen. Die einzelnen Elektronen eines Atoms können sich zum einen in der Entfernung zum Kern und zum anderen auch in ihrem Energiezustand unterscheiden (siehe Abbildung 1.3). Die Elektronen befinden sich in bestimmten Energiestufen, die nach Nils Bohr auch „Schalen“ genannt werden.

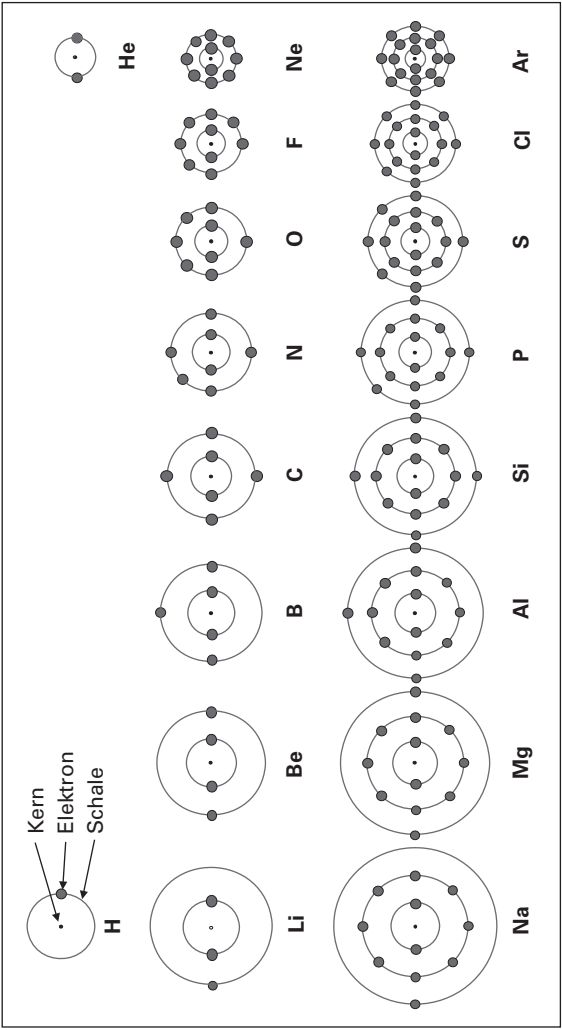


Abbildung 1.3 Elemente 1 bis 19 nach dem Atommodell von Niels Bohr



**Erinnerung**

Die Elektronen der äußersten Energiestufe heißen Außenelektronen, sie spielen für die Chemie und damit auch für die Bindungsarten die entscheidende Rolle!

Die Elektronenanordnung lässt sich aus dem Periodensystem der Elemente ablesen (siehe Abbildung 1.4): Die Hauptgruppenzahl entspricht der Anzahl der Außenelektronen, die Periode entspricht der Anzahl an Schalen.

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

**Abbildung 1.4** Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente (ohne Edelgase)

## Oktettregel

Die Edelgase, die im Periodensystem in Abbildung 1.5 weiß markiert sind, sind reaktionsträge, also chemisch stabil, weil sie keinen Bedarf an zusätzlichen Elektronen haben. Sie haben eine volle äußere Schale.

In der jeweils äußersten Schale finden zunächst acht Elektronen Platz. Eine Ausnahme bildet hier Helium, da auf der ersten und kleinsten Schale nur maximal zwei Elektronen Platz finden.

Hauptgruppen			Nebengruppen										Hauptgruppen						
I													VIII						
1	H	II											III	IV	V	VI	VII	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ia	IIa	Al	Si	P	S	Cl	Ar			
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Br	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd	
7	Fr	Ra	Ac																
Lanthanide			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinide			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Abbildung 1.5 Periodensystem der Elemente mit Edelgasen

**Erinnerung**

Der Edelgaszustand einer gefüllten äußeren Elektronenhülle (Edelgaskonfiguration) wird von allen Atomen angestrebt.

## Metall oder Nichtmetall, das ist hier die Frage

Das Ziel, in den stabilen Edelgaszustand zu gelangen, wird entweder durch die Aufnahme oder die Abgabe von Elektronen erreicht (natürlich gilt das nicht für die Edelgase selber). Atome mit wenigen Außenelektronen haben daher das Bestreben, diese abzugeben. Solche Atome werden *Metallatome* genannt. Atome mit vielen Außenelektronen haben das Bestreben, die Schale aufzufüllen. Sie werden *Nichtmetallatome* genannt.

Je weniger Elektronen sich in der Außenschale befinden und je weiter diese vom Kern entfernt ist, desto stärker ist das Bestreben diese Elektronen abzugeben. Das heißt der Metallcharakter nimmt zu. Je mehr Elektronen sich in der Außenschale befinden und je näher sich diese am Kern befinden, desto stärker ist das Bestreben, zusätzliche Elektronen aufzunehmen. Das heißt der Nichtmetallcharakter nimmt zu, wie in Abbildung 1.6 dargestellt ist. Kommt es zu der

Nichtmetallcharakter nimmt zu →

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

Metallcharakter nimmt zu →

Metallcharakter nimmt zu →

Nichtmetallcharakter nimmt zu ←

☒ Metalle    ☐ Halbmetalle    ☐ Nichtmetalle

**Abbildung 1.6** Einteilung in Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle im Ausschnitt des Periodensystems der Elemente (ohne Edelgase)

angesprochenen Elektronenabgabe (im Fall der Metallatome) bzw. Elektronenaufnahme (im Fall der Nichtmetallatome), wird das elektrisch neutrale Atom natürlich im Falle der Metalle zum positiven bzw. im Falle der Nichtmetalle zum negativen Ion. Durch ihre Ladung üben diese Ionen eine Kraftwirkung auf ihre Umgebung aus.

#### BEISPIEL

Caesium ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Cs und der Ordnungszahl 55. Im Periodensystem steht es in der 1. Hauptgruppe und der 7. Periode. Das heißt, dass sich nur ein Elektron auf der Außenschale befindet und dieses weit entfernt vom Kern ist. Damit zählt Caesium nicht nur zu den Metallen, sondern auch zu den extrem reaktiven Metallen. Es reagiert beispielsweise sofort und sehr heftig mit Luft, weshalb es in Glasampullen unter Inertgas aufbewahrt wird.

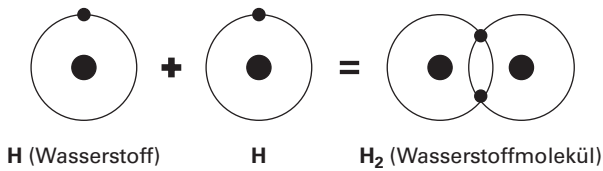
## Bindungsarten

Die chemische Bindung ist die Grundlage dafür, dass sich Moleküle und Kristalle überhaupt bilden können; somit ist sie auch für eine Chemie der Werkstoff von großer Bedeutung. Es fragt sich nun, welche Kombination von Metall- bzw. Nichtmetallatomen zu welcher Bindungsart führt.

### Elektronenpaarbindung

Reagiert ein Nichtmetallatom mit einem weiteren Nichtmetallatom, so haben beide Atome das Bestreben, weitere Elektronen in die äußere Schale aufzunehmen. Dies gelingt durch die sogenannte *Elektronenpaarbindung* – auch *kovalente Bindung* oder *Atombindung* genannt.

So liegen beispielsweise im Wasserstoffgas nicht einzelne Wasserstoffatome vor, sondern Moleküle, bestehend aus zwei gebundenen Wasserstoffatomen. Durch dieses „Elektron-Sharing“ befinden sich beide Wasserstoffatome im Edelgaszustand (siehe Abbildung 1.7). Das heißt beide Wasserstoffatome verfügen nun über zwei Elektronen, womit die äußere Elektronenschale gefüllt ist, wie beim Edelgas Helium.



**Abbildung 1.7** Elektronenpaarbindung am Beispiel eines Wasserstoffmoleküls

Die positiv geladenen Kerne müssten sich ja eigentlich abstoßen, aber die negativen Elektronen halten sie zusammen. Sie bilden ein Elektronenpaar. Elektronenpaarbindungen führen also zu *Molekülen*. Fehlen, wie im Beispiel des Sauerstoffs, zwei Elektronen auf der Außenschale, so kann es auch zur Ausbildung von zwei Elektronenpaarbindungen, das heißt zu einer Doppelbindung kommen.

Weitere Beispiele für bekannte Moleküle sind:

- Methan ( $\text{CH}_4$ )
- Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )
- Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Es gibt aber auch so genannte Makromoleküle, die aus mehreren 10.000 Einzelatomen bestehen, wie beispielsweise die Desoxyribonukleinsäure (DNA) oder auch die zahlreichen Kunststoffe.

### Erinnerung

In der Werkstofftechnik interessieren uns vor allem die für die verschiedenen Bindungsarten resultierenden Eigenschaften. Für die Elektronenpaarbindung lässt sich hier festhalten:

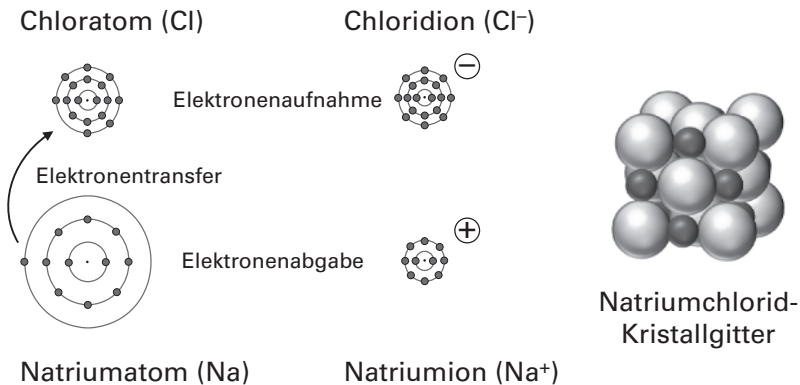
1. Stoffe aus kleinen Molekülen, die durch Elektronenpaarbindung entstanden sind, sind bei Raumtemperatur gasförmig oder flüssig; Beispiele hierfür sind Methan, Ammoniak, Wasser oder Alkohol.
2. Stoffe aus großen Molekülen, die durch Elektronenpaarbindung entstanden sind, wie beispielsweise Kunststoffe, sind bei Raumtemperatur fest.
3. Kristalle – also Stoffe mit einer klaren Periodizität in alle drei Raumrichtungen – in denen die Atome durch Elektronenpaarbindung gebunden sind, sind außerordentlich hart. Bekanntestes Beispiel ist hier Diamant, bei dem es sich um ein Kristallgitter aus Kohlenstoffatomen in Elektronenpaarbindung handelt.

## Ionenbindung

Was passiert aber, wenn ein Nichtmetallatom auf ein Metallatom trifft? Hier gibt es offenbar einen Partner, der sich freut, sein Elektron loszuwerden und einen, der es gerne aufnimmt. Dann können ein oder auch mehrere Elektronen von einem Atom auf ein anderes Atom übergehen, so dass sich entsprechend positiv oder negativ geladene Teilchen bilden, die so genannten Ionen. Die resultierende Bindungsart heißt demzufolge Ionenbindung. Sie liegt bei der Mehrzahl der nichtmetallischen anorganischen Stoffe vor.

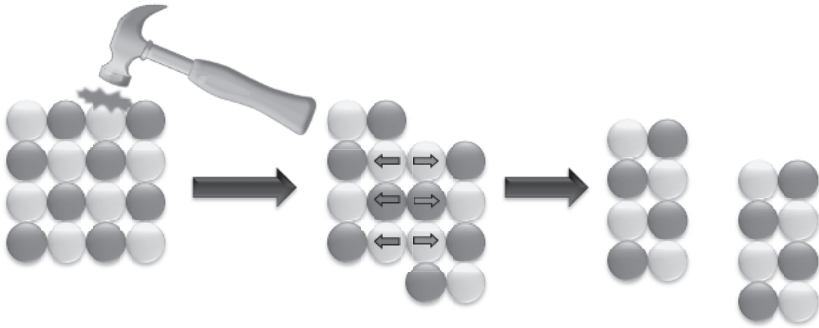
### BEISPIEL

Kochsalz ist chemisch gesehen Natriumchlorid. Hier wird das vom Natriumatom abgegebene Elektron von einem Chloratom aufgenommen; es entstehen Natrium- und Chloridionen (siehe Abbildung 1.8). Im Festkörper bewirken die elektrostatischen Kräfte, dass jeweils ein positiv geladenes *Kation* und ein negativ geladenes *Anion* aufeinander folgen.



**Abbildung 1.8** Ionenbindung am Beispiel von Kochsalz (Natriumchlorid)

Wie in Abbildung 1.9 zu erkennen, hat die Verschiebung eines Teils der Ionen um einen Atomabstand zur Folge, dass sich die Kationen bzw. die Anionen gegenüberstehen. Die aufgrund der gleichnamigen Ladungen abstoßenden Kräfte zerstören daraufhin den Kristall.



**Abbildung 1.9** Ionenbindung unter Krafteinwirkung

### Erinnerung

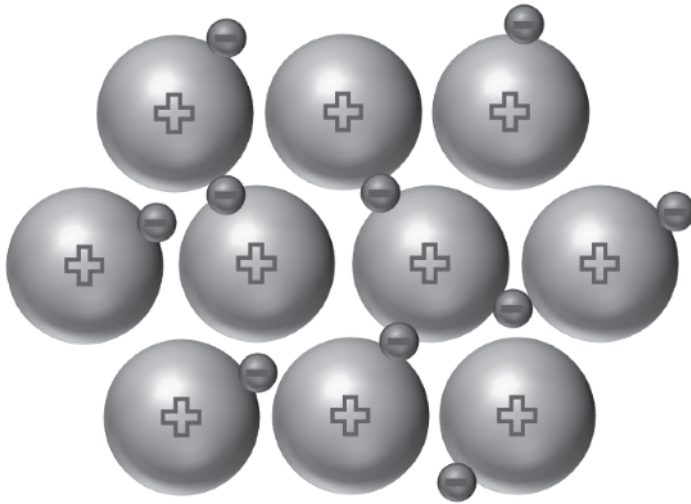
Eine plastische Verformbarkeit ist folglich bei der Ionenbindung nicht zu erwarten.

## Metallbindung

Die letzte Kombinationsmöglichkeit ist die Reaktion von Metallatomen untereinander. Wie bereits erläutert wurde, wollen Metallatome grundsätzlich Elektronen abgeben, um in den Edelgaszustand zu gelangen so dass sie positiv geladene Ionen bilden. Wechselwirken nun Metallatome mit Metallatomen, so sind keine Atome vorhanden, die Elektronen aufnehmen würden. So bleiben die abgegebenen Elektronen ungebunden. Diese frei beweglichen Elektronen der Außenschale (auch *Valenzelektronen* genannt) bilden ein Elektronengas. Die Metallbindung ist also gekennzeichnet durch positiv geladene Atomrümpfe, die mit dem Elektronengas auf Grund der unterschiedlichen Ladung wechselwirken (siehe Abbildung 1.10).

### Erinnerung

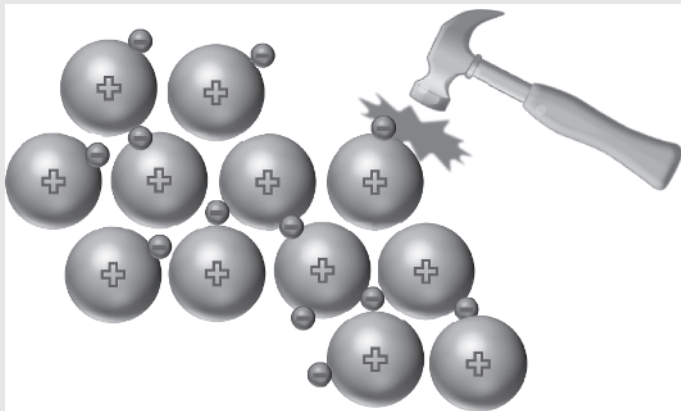
*Die gute elektrische und thermische Leitfähigkeit der Metalle beruht auf der freien Beweglichkeit der Valenzelektronen im Metall*



**Abbildung 1.10** Metallbindung aufgrund der Wechselwirkung zwischen den positiven Atomrümpfen und dem Elektronengas

### Erinnerung

Anders als beim Ionengitter bewirkt ein Platzwechsel einzelner Atomrümpfe in einem Metallgitter keine Veränderung der Ladungsverteilung zwischen den Atomrümpfen und dem Elektronengas. Die Atome lassen sich also gegeneinander verschieben, ohne dass es zu einer Zerstörung des Gitters kommen muss (siehe Abbildung 1.11). Dies erklärt die gute bis sehr gute plastische Verformbarkeit der metallischen Werkstoffe.



**Abbildung 1.11** Plastische Verformung metallischer Werkstoffe

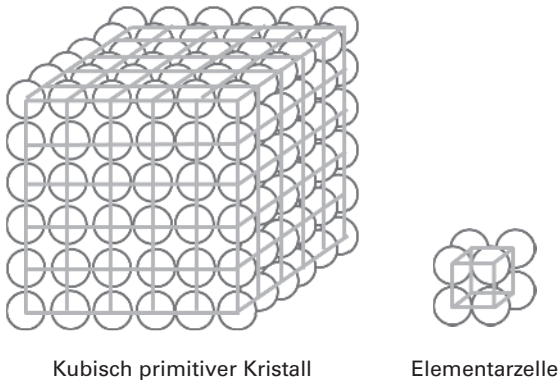


Wie bereits erwähnt, beschäftigen sich die ersten sechs Kapitel ausschließlich mit Stählen und Eisenwerkstoffen, so dass im Folgenden die Metallbindung und die sich daraus ableitenden Strukturen und Eigenschaften im Vordergrund stehen.

## Gittertypen

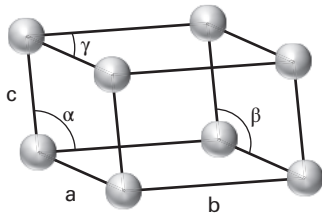
Kristalle, gleich ob als Atom-, Ionen- oder Metallkristalle, können in unterschiedlicher Weise aufgebaut sein. Um den Aufbau von Kristallen zu verstehen, stellen Sie sich zunächst vor, dass die Mitten der Teilchen durch Linien verbunden sind, so dass ein räumliches Gitter entsteht. Die kleinste immer wiederkehrende Einheit dieses Gitters, die sogenannte *Elementarzelle*, beschreibt nun den kristallinen Aufbau.

Abbildung 1.12 zeigt ein kubisch primitives Kristallgitter, wie Sie es bereits in Abbildung 1.8 beim Kochsalz kennengelernt haben. Hierbei sitzt jeweils ein Atom auf den Ecken eines Kubus – also eines Würfels.



**Abbildung 1.12** Kristallgitter und Elementarzelle

Die verschiedenen Elementarzellen werden durch die Seitenlängen der Elementarzelle  $a$ ,  $b$  und  $c$ , die sogenannten *Gitterparameter*, und die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ , die *Gitterwinkel*, gekennzeichnet (siehe Abbildung 1.13). Für Metalle liegen die Gitterparameter bei gerade einmal 0,25 – 0,5 nm, was kleiner als ein millionstel Millimeter ist.



**Abbildung 1.13** Gitterparameter und Gitterwinkel

Nach der Form der Gitterzellen unterscheidet man sieben verschiedene Kristallsysteme, von denen das kubische, das tetragonale und das hexagonale System für metallische Werkstoffe am wichtigsten sind.

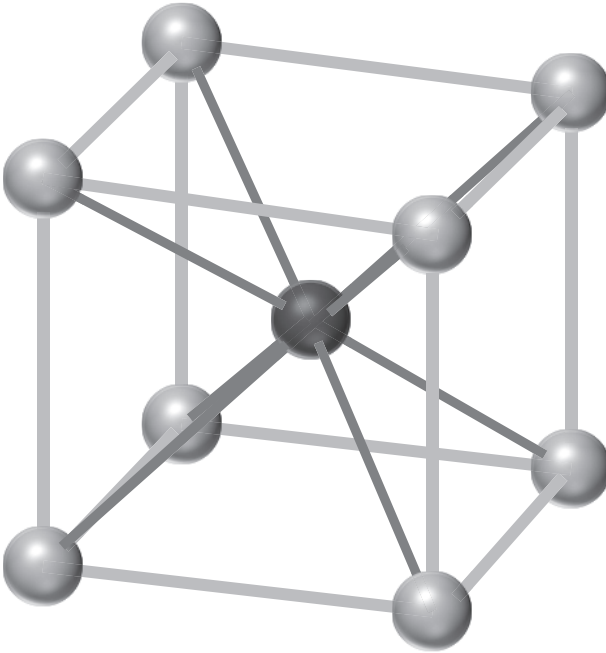
Die bisher vorgestellten Kristallgitter, bei denen nur die Eckpunkte der Elementarzellen mit Atomen besetzt sind, werden primitive Gitter genannt. Diese finden sich häufig bei Ionengittern, aber nicht bei Kristallgittern metallischer Werkstoffe. Hier zeichnen sich die Elementarzellen durch zusätzliche Atome in den Schnittpunkten der Flächendiagonalen oder der Raumdiagonalen aus.

#### Erinnerung

Die wichtigsten bei Metallen vorkommenden Gittertypen sind das **kubisch raumzentrierte** (krz) Gitter, das **kubisch flächenzentrierte** (kfz) und das **hexagonale Gitter dichtester Kugelpackung** (hdp).

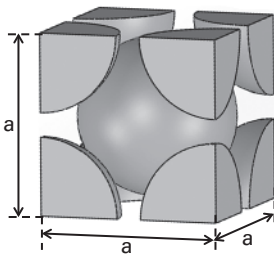
### Das kubisch raumzentrierte Gitter

Das kubisch raumzentrierte Gitter (krz) besteht neben den acht Atomen in den Würfecken zusätzlich aus einem Atom in der Würfelmitte am Schnittpunkt der Raumdiagonalen – daher raumzentriert (siehe Abbildung 1.14). Da es sich um eine kubische Elementarzelle handelt, sind alle Seitenlängen der Elementarzelle gleich, d.h.  $a = b = c$ , und alle Winkel ebenfalls gleich, d.h.  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . Das kubisch raumzentrierte Gitter wird auch Wolfram-Typ genannt, da Wolfram ein Metall mit krz-Gitter ist. Andere Metalle, die als Festkörper im krz-Gitter vorliegen, sind  $\alpha$ -Eisen, Chrom, Niob, Molybdän und Tantal.



**Abbildung 1.14** Kubisch raumzentriertes Gitter (krz)

Da sich das krz-Gitter die Atome auf den Würfecken mit den angrenzenden Elementarzellen teilen muss, besteht es aus insgesamt 2 Atomen (siehe Abbildung 1.15).



**Abbildung 1.15** Elementarzelle eines kubisch raumzentrierten Gitters

So können wir folgende Berechnung anstellen:

$$\begin{aligned}
 n &= \left( 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \right) \text{ Atome} = 2 \text{ Atome} \\
 V_E &= a^3 \\
 V_A &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \\
 P &= n \cdot \frac{V_A}{V_E} \cdot 100 \%
 \end{aligned}$$

$V_E$  bezeichnet das Volumen der Elementarzelle. Da es sich um einen Würfel handelt, berechnet sich das Volumen zu  $a^3$ .  $V_A$  ist das Volumen des Atoms; es berechnet sich nach der bekannten Formel zur Bestimmung eines Kugelvolumens. Die Packungsdichte  $P$ , das heißt die Raumerfüllung der Elementarzellen durch Atome, ergibt sich aus der Anzahl der Atome in der Elementarzelle  $n$ , multipliziert mit dem Volumen eines Atoms und dividiert durch das Volumen der Elementarzelle.

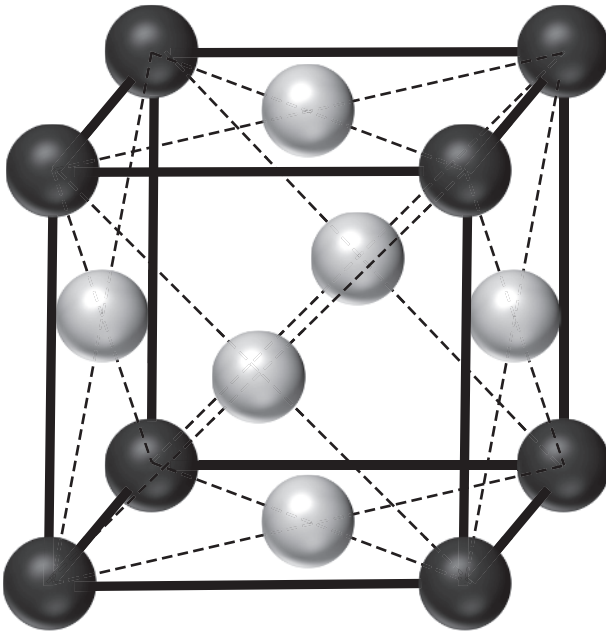
Da die Raumdiagonale dem Vierfachen des Atomradius entspricht, lässt sich  $a$  durch  $R$  ausdrücken:

$$a = \left( \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \cdot R$$

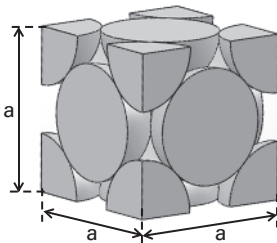
Dadurch ergibt sich sowohl im Ausdruck für das Volumen des Atoms als auch für das Volumen der Elementarzelle ein Term  $R^3$ , so dass er sich aus der Gleichung für die Packungsdichte herauskürzt und diese sich zu ca. 68 % ergibt.

## Das kubisch flächenzentrierte Gitter

Auch beim kubisch flächenzentrierten Gitter (kfz) handelt es sich um eine kubische Elementarzelle, also sind alle Seitenlängen der Elementarzelle gleich, das heißt  $a = b = c$ , ebenso sind alle Winkel gleich, also  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . Es besteht neben den 8 Atomen in den Würfecken zusätzlich aus einem Atom in jeder Würfelfläche am Schnittpunkt der Flächendiagonalen – daher stammt der Begriff flächenzentriert (siehe Abbildung 1.16 und Abbildung 1.17). Das kubisch flächenzentrierte Gitter wird auch Kupfer-Typ genannt, da Kupfer ein Metall mit kfz-Gitter ist. Andere Metalle, die als Festkörper im kfz-Gitter vorliegen, sind  $\gamma$ -Fe, Nickel, Silber und Gold.



**Abbildung 1.16** Kubisch flächenzentriertes Gitter (kfz)

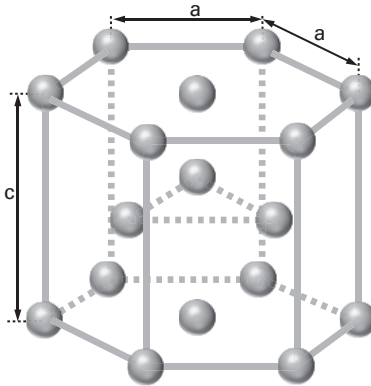


**Abbildung 1.17** Elementarzelle eines kubisch flächenzentrierten Gitters

Aus ähnlichen Überlegungen wie beim kubisch raumzentrierten Gitter ergibt sich eine Packungsdichte von ca. 74 %.

### Die hexagonal dichteste Kugelpackung

Bei der hexagonal dichtesten Kugelpackung (hdp) bildet ein Sechseck mit Atomen auf den Ecken und in der Flächenmitte die Grund- und Deckfläche. Dazwischen befinden sich drei weitere Atome (siehe Abbildung 1.18). Auch



**Abbildung 1.18** Hexagonal dichteste Kugelpackung (hdp)

wenn diese Anordnung dichteste Kugelpackung genannt wird, entspricht ihre Raumausfüllung mit 74 % der beim kubisch flächenzentrierten Gitter.

Als prominentester Vertreter gilt Magnesium, weshalb auch oft von der Magnesium-Typ gesprochen wird, wenn man die hexagonal dichteste Kugelpackung beschreibt. Andere Vertreter mit hexagonal dichtester Kugelpackung sind Zink und Titan.

Betrachtet man die Einteilung der Metalle nach der Kristallstruktur in Tabelle 1.1, erkennt man, dass einige Metalle gleich bei mehreren Kristallstrukturen genannt werden. Solche Metalle, die offenbar in verschiedenen Modifikationen vorliegen können, werden *polymorph* genannt.

Kubisch raumzentriert krz	Kubisch flächenzentriert kfz	Hexagonal hdp
Eisen	Eisen	
Titan		Titan
Lithium	Aluminium	Cadmium
Molybdän	Blei	Cobalt
Niob	Gold	Magnesium
Tantal	Kupfer	Zink
Vanadium	Nickel	
Wolfram	Palladium	
	Platin	
	Silber	

**Tabelle 1.1** Einteilung der Metalle nach der Kristallstruktur

## Gitterfehler

Bei den oben beschriebenen Kristallgittern handelt es sich um Idealkristalle mit einem unveränderlichen, exakt periodischen Aufbau aus identischen Bausteinen. Ein realer Kristall zeichnet sich dagegen durch zahlreiche Gitterfehler aus, die den exakten periodischen Aufbau stören.

Gitterfehler können sich positiv oder auch negativ auf die Werkstoffeigenschaften auswirken. Da die meisten dieser Fehler gewollt oder auch ungewollt bei der Werkstoffverarbeitung und/oder Weiterverarbeitung eingebracht werden, ist die Kenntnis von deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften für den Maschinenbauingenieur von entscheidender Bedeutung.

Entsprechend ihrer Form werden die Gitterfehler in

- Nulldimensionale oder Punktfehler,
- Eindimensionale oder Linienfehler,
- Zweidimensionale oder Flächenfehler und
- Dreidimensionale oder Volumenfehler eingeteilt.

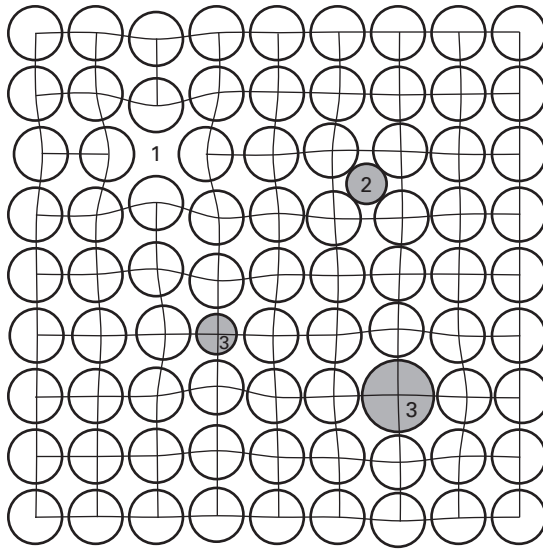
Diese Fehler im Folgenden ausführlich erläutert.

### Auf den Punkt gebracht – Nulldimensionale Gitterfehler

Nulldimensionale Gitterfehler haben die Ausdehnung eines einzelnen Atoms und sind damit auf einen einzelnen Gitterplatz beschränkt. Es sind drei Typen von nulldimensionalen Gitterfehlern bekannt:

- Leerstellen
- Zwischengitteratome
- Substitutionsatome

Bei *Leerstellen* (Abbildung 1.19/1) handelt es sich um Gitterplätze, die nicht von einem Atom besetzt sind. Die Leerstellendichte steigt exponentiell mit der Temperatur an; sie erhöht sich bis zur Schmelztemperatur um ca. acht Zehnerpotenzen im Vergleich zur Raumtemperatur. Beim Schmelzpunkt beträgt die Leerstellendichte ca.  $10^{-4}$ , was ca. 100 Millionen Leerstellen pro  $\text{mm}^2$  Gitterebene entspricht.



**Abbildung 1.19** Nulldimensionale Gitterfehler, 1: Leerstelle, 2: Zwischengitteratom, 3: Substitutionsatom

Bei *Zwischengitteratomen* (Abbildung 1.19/2) liegen die Atome nicht auf den Gitterplätzen, sondern zwischen diesen. Kommt ein Zwischengitteratom dadurch zustande, dass ein Atom seinen Gitterplatz verlässt und dort eine Leerstelle entsteht, so nennt man diese Anordnung nach dem russischen Physiker Jakow Iljitsch Frenkel *Frenkel-Defekt*.

Da alle anderen Atomsorten entweder größer oder kleiner sind, bilden auch Fremdatome Fehler im Gitter. Nehmen die Fremdatome Gitterplätze ein, ersetzen sie also Atome der Matrix, so heißen sie *Substitutionsatome* (Abbildung 1.19/3). Um gezielt Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften zu nehmen, werden zum Teil auch größere Mengen weiterer Atomarten im Gitter gelöst. Hier handelt es sich dann in der Regel nicht um Gitterfehler, sondern um sogenannte *Mischkristalle*. Sie werden weiter unten ausführlich erläutert.

Zwischengitteratome in Form von Einlagerungsatomen werden uns als Kohlenstoffeinlagerung im Eisengitter beim Thema Stahl in den Kapiteln 4–6 noch näher beschäftigen.



### Erinnerung

Es wurde bereits gesagt, dass die Packungsdichte im kubisch flächenzentrierten Gitter höher ist als im kubisch raumzentrierten, das heißt das freie Gittervolumen ist kleiner, so sind die wenigen vorhandenen Gitterlücken aber größer als im kubisch raumzentrierten Gitter. So lässt sich im kubisch flächenzentrierten  $\gamma$ -Eisen ca. 100 mal mehr Kohlenstoff einlagern als im kubisch-raumzentrierten  $\alpha$ -Eisen.

## Walk the line – Eindimensionale Gitterfehler

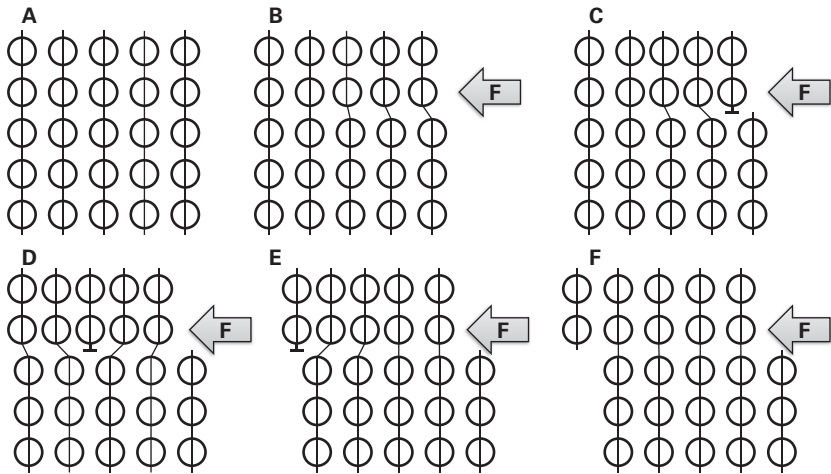
Als eindimensionale Gitterfehler treten Versetzungen auf, von denen es zwei verschiedene Typen gibt:

- Stufenversetzung
- Schraubenversetzung

Eine *Stufenversetzung* kann man sich als eingeschobene Kristallebene, eine *Schraubenversetzung* dagegen wie eine Umdrehung bei einer Wendeltreppe vorstellen. Häufig treten Versetzungen aber nicht als reine Stufen- oder Schraubenversetzungen, sondern als Kombination beider Typen auf.

Die Länge der Versetzungslinien pro Volumeneinheit, also die Versetzungsdichte, kann vor allem durch plastische Verformung (Kaltverformung) deutlich erhöht werden. Während die Versetzungsdichte für ein unverformtes Metallgitter noch bei ca.  $1\text{km}/\text{mm}^3$  liegt, so kann diese durch *Kaltverformung* – einer plastischen Verformung bei gemäßigten Temperaturen – bis auf  $10.000\text{km}/\text{mm}^3$  ansteigen.

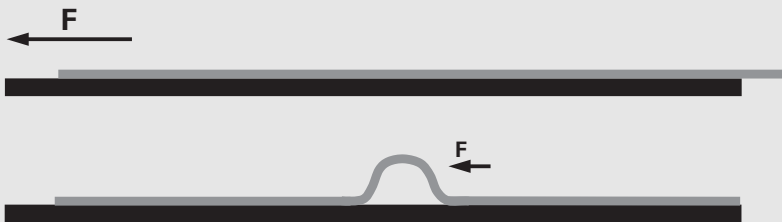
In Abbildung 1.20 A ist ein Schnitt durch ein unverformtes, fehlerfreies Kristallgitter dargestellt. Unter Einwirkung einer äußeren Kraft  $F$  (Abbildung 1.20 B) werden die Atome leicht aus ihrer Ruhelage verschoben. Verringert man die Kraft, verhält sich der Werkstoff *rein elastisch*, das heißt das Kristallgitter wird in seine Ausgangslage zurückkehren. Wird die Kraft über einen materialspezifischen Wert hinaus erhöht, so gleiten dichtest gepackte *Gleitebenen* durch Versetzungsbewegungen übereinander ab (Abbildung 1.20 C–F), so dass das Material nach Entlastung zwar wieder einen elastischen Anteil zeigt, durch das Abgleiten jedoch auch ein erheblicher *plastischer*, also bleibend deformierter, Anteil hinzugekommen ist.



**Abbildung 1.20** Versetzungsbewegungen unter Krafteinwirkung

#### Erinnerung

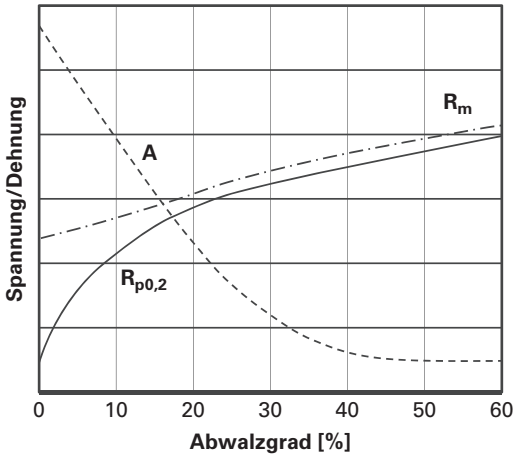
Aufgrund der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegungen ist der Kraftaufwand zur Verschiebung von Gitterebenen relativ gering. Abbildung 1.21 zeigt das sogenannte *Teppichmodell* für die Verformung durch Versetzungsbewegung. Wie man weiß, kostet es deutlich weniger Kraft, eine Falte durch den Teppich zu schieben als ihn als Ganzes zu verschieben. Dieser geringe Kraftaufwand bei plastischer Verformung durch Versetzungsbewegungen ist der Grund für die gute plastische Verformbarkeit metallischer Werkstoffe.



**Abbildung 1.21** Teppichmodell für die Verformung durch Versetzungsbewegungen

Die bei der Kaltverformung entstehenden Versetzungen und die demzufolge ansteigende Versetzungsdichte bewirken eine *Verfestigung* des Werkstoffes, da sich die Versetzungen im immer höheren Maße gegenseitig behindern. Die

gegenseitige Beeinflussung der Versetzungen bedingt, dass zu deren Bewegung und Erzeugung eine stetige Erhöhung der Spannungen erforderlich ist. Der Widerstand gegen die plastische Verformung steigt, das Metall verfestigt sich. Abbildung 1.22 zeigt die mit steigendem Abwalzgrad ansteigende Streckgrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$  bei gleichzeitiger sinkender Bruchdehnung – hier  $A$ . Das heißt der Werkstoff verfestigt sich bei gleichzeitiger Versprödung.



**Abbildung 1.22** Änderung wichtiger mechanischer Eigenschaften durch Kaltverfestigung

Da die elastische Verformung primär von den Bindungskräften der jeweiligen Metallbindung beeinflusst wird und weniger von der Versetzungsdichte, wird auch der Elastizitätsmodul  $E$  nur unwesentlich vom Verformungsgrad abhängen.

Diese oben genannten Materialkennwerte  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A$  und  $E$  werden im Zugversuch ermittelt. Die wichtigsten Grundlagen zum Zugversuch lesen Sie am Ende dieses Kapitels im Abschnitt „Wenn die Spannung steigt – der Zugversuch“. Hier werden auch die oben genannten Begriffe näher erklärt.

Ein durch Kaltverformung verfestigter Werkstoff kann durch Auslagerung bei höheren Temperaturen wieder *entfestigt* werden, da sich dabei die Versetzungsdichte abbaut. Abbildung 1.23 zeigt, wie bei einem Werkstoff mit einem Abwalzgrad von 50 % mit steigender Temperatur die Festigkeit wieder sinkt, während die Dehnbarkeit zunimmt.

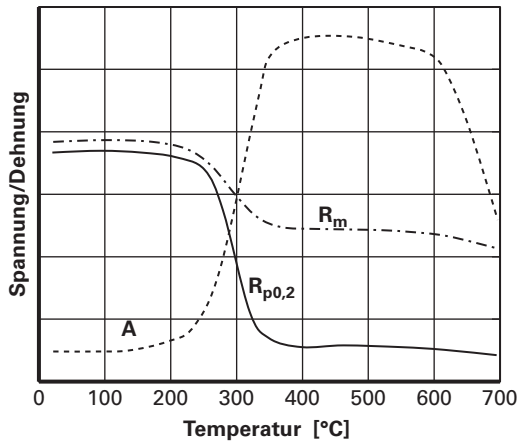


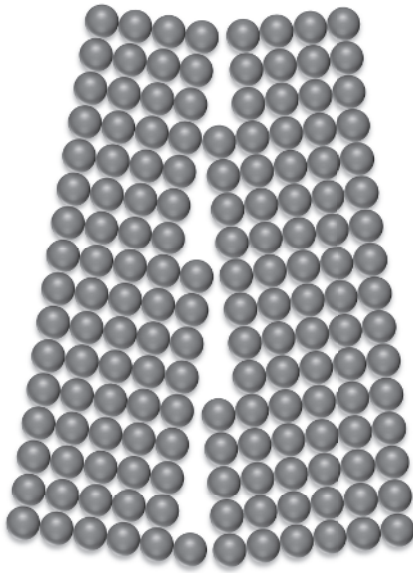
Abbildung 1.23 Änderung wichtiger mechanischer Eigenschaften bei Entfestigung

Diesen Vorgang der *Rekristallisation* werden wir in Kapitel 6 „Wärmebehandlung der Stähle“ noch genauer kennenlernen.

### Nicht nur oberflächlich – Zweidimensionale Gitterfehler

Ist ein Atom in einem idealen, fehlerfreien Kristallgitter eingebunden, so befindet es sich in seiner Gleichgewichtslage. Jeder (nulldimensionale) Gitterfehler bewirkt eine Auslenkung aus der Gleichgewichtslage. Aber auch wenn ein Atom nicht von allen Seiten den gleichen Krafteinwirkungen ausgesetzt ist, wie dies in der Umgebung von Versetzungen oder an der Oberfläche eines Kristalls der Fall ist, befinden sich die Atome nicht mehr in der Gleichgewichtslage, sondern nehmen einen höheren Energieinhalt ein; in diesem zweiten Fall spricht man von der Oberflächenenergie.

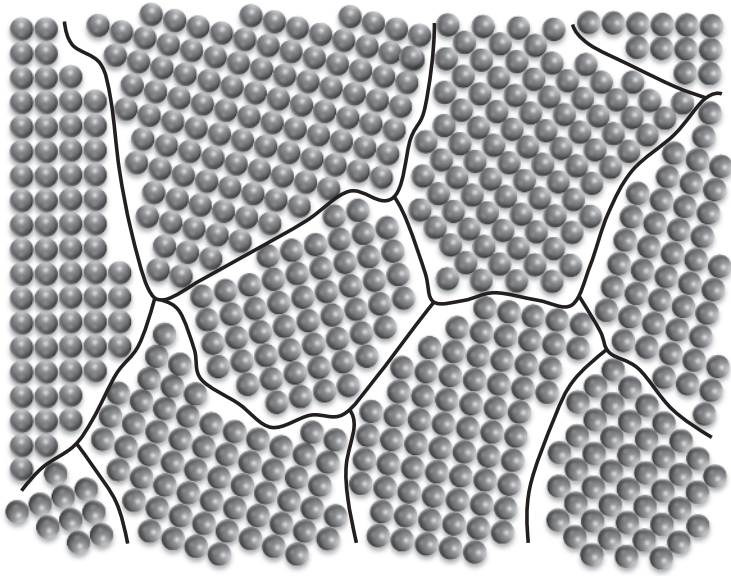
Da sich die Krafteinwirkungen von Versetzungen auch untereinander beeinflussen, kann es als Folge zu einer Aneinanderkettung von Stufenversetzungen und damit zur Ausbildung eines flächenhaften Gitterfehlers kommen. Man spricht in solchen Fällen von einer *Kleinwinkelkorngrenze*, da Gitterebenen entstehen, die nur um wenige Grad ( $<15^\circ$ ) zueinander gekippt stehen (siehe Abbildung 1.24). Je größer der Abstand der Versetzungen ist, desto kleiner ist der Kippwinkel und umso geringer der Energieinhalt.



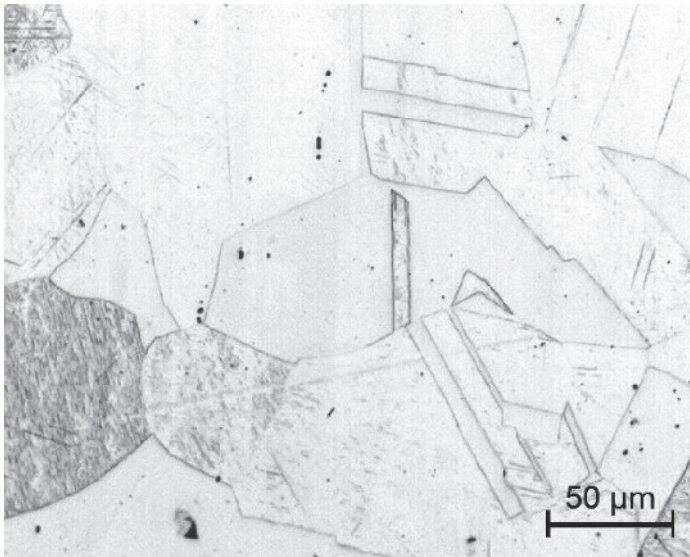
**Abbildung 1.24** Kleinwinkelkorngrenzen

Bei der Kristallisation einer metallischen Schmelze entsteht gleichzeitig eine Vielzahl von Kristallen, deren Kristallgitter voneinander unabhängige Orientierungen im Raum haben. Stoßen die Wachstumsfronten dieser Kristalle aufeinander, so sind die Winkel der Kristalle untereinander zumeist größer als  $15^\circ$  (siehe Abbildung 1.25). Den auf diese Weise entstandenen flächenhaften Gitterfehler nennt man *Großwinkelkorngrenze*. Durch den hohen Energieinhalt der Großwinkelkorngrenzen ergeben sich höhere Festigkeitskennwerte für Werkstoffe mit feinkörnigem Gefüge. Anders als bei der Kaltverfestigung durch das Einbringen von Versetzungen mittels plastischer Verformung, wird die Zähigkeit des Werkstoffes in aller Regel eher verbessert als verschlechtert.

Neben den beiden vorrangig vorherrschenden zweidimensionalen Gitterfehlern, der Klein- und der Großwinkelkorngrenze, gibt es eine Reihe von Sonderfällen. Hier sind besonders die *Zwillingsgrenzen* zu erwähnen, die dann entstehen, wenn die Kristalle, die durch sie getrennt werden, spiegelsymmetrisch angeordnet sind. Zwillingsgrenzen besitzen einen sehr geringen Energieinhalt und finden sich vorwiegend innerhalb eines Kornes. Typisch sind Zwillingsgrenzen vor allem für austenitische nichtrostende Stähle, die uns in Kapitel 7 noch häufiger begegnen werden (siehe Abbildung 1.26).



**Abbildung 1.25** Großwinkelkorngrenzen



**Abbildung 1.26** Zwillingsgrenzen in austenitischem nichtrostenden Stahl (X5CrNi 18-10)

## Dreidimensionale Gitterfehler

Volumenfehler, auch Inklusionen genannt, entstehen durch gasförmige, flüssige oder feste Fremdphasen und liegen im Inneren des Kristalls vor. Man unterscheidet zwischen

- Poren,
- Einschlüssen und
- Ausscheidungen.

*Poren* sind einfach Hohlräume im Kristall, die mit Gas oder Flüssigkeit gefüllt sind, während feste Fremdphasen als *Einschlüsse* bezeichnet werden.

Sonderfälle des Einschlusses sind *Ausscheidungen*, bei denen die Fremdphase aus dem Kristall selbst gebildet wird. Hierauf werden wir in Kapitel 9 „Nichtmetalle“ im Zusammenhang mit der Ausscheidungshärtung bei Aluminium noch eingehen.

## Rutschpartie – Gleitebenen, Gleitsysteme

Besonders geeignet für die Bewegung von Versetzungen sind sogenannte *Gleitebenen*. Gleitebenen sind durch zwei Eigenschaften charakterisiert:

1. Es handelt sich um Gitterebenen mit möglichst hoher Atomdichte, also geringen Atomabständen.
2. Es handelt sich um Gitterebenen mit möglichst großem Abstand zur nächsten Parallelebene.

Aus diesen Rahmenbedingungen ergibt sich, dass eine möglichst niedrige Schubspannung für die Bewegung von Versetzungen notwendig ist. Abbildung 1.27 veranschaulicht, dass die erforderliche Schubspannung für das Gleiten von Ebenen mit zunehmender Atomdichte immer geringer wird.

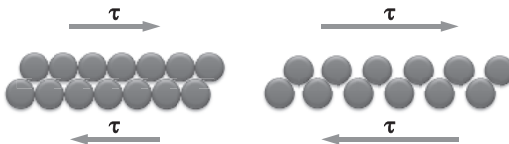
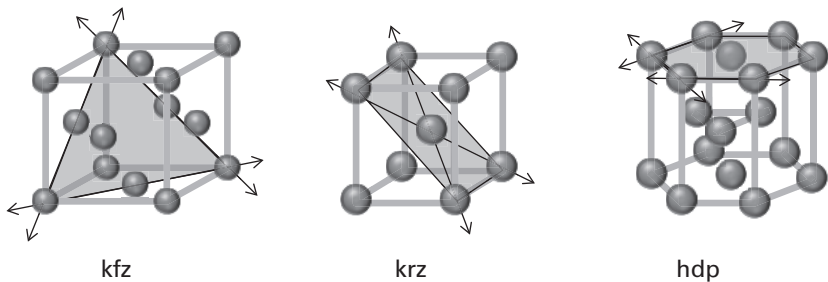


Abbildung 1.27 Gleitebenen

Aber nicht nur die Gleitebene als solche wird durch die Atomdichte bestimmt, sondern auch die Richtungen, in denen die Gleitbewegungen erfolgen können (siehe Abbildung 1.28). Diese *Gleitrichtungen* sind dadurch charakterisiert, dass sie eine möglichst dichte Folge von Atomen besitzen. Die Kombination aus Gleitebene und Gleitrichtung wird als *Gleitsystem* bezeichnet. Die Gleitsysteme sind für das plastische Verformungsverhalten der verschiedenen Gittertypen verantwortlich. Hierbei sind für ein gutes plastisches Verhalten die folgenden Punkte entscheidend:

- die Anzahl der Gleitsysteme und
- die Besetzungsdichte der Gleitsysteme.

Zwischen den drei wichtigen Gitterstrukturen der Metalle kfz, krz und hdp bestehen in dieser Hinsicht kennzeichnende Unterschiede.



**Abbildung 1.28** Gleitsysteme

In Abbildung 1.28 ist im kfz-, krz- und hdp-Gitter jeweils eine Gleitebene mit den möglichen Gleitrichtungen eingezeichnet. Beim kfz-Gitter existieren vier solcher Gleitebenen, die jeweils drei Gleitrichtungen besitzen, so dass sich insgesamt 12 voneinander unabhängige Gleitsysteme ergeben.

Im krz-Gitter existieren 6 Gleitebenen mit jeweils 2 Gleitrichtungen, so dass es auch 12 Gleitsysteme besitzt.

Wie bereits erwähnt, ist neben der Anzahl der Gleitsysteme auch die Besetzungsdichte entscheidend für gutes plastisches Verhalten. Auch wenn kfz- und krz-Gitter die gleiche Anzahl an Gleitsystemen besitzen, unterscheiden sie sich doch deutlich in der Besetzungsdichte der Gleitebenen. Diese ist im kfz-Gitter höchstmöglich, so dass Metalle mit kfz-Gitter denen mit krz-Gitter bezüglich ihrer plastischen Verformbarkeit deutlich überlegen sind.



Besonders deutlich zeigt sich der Unterschied zwischen kfz-Metallen und krz-Metallen bei temperaturabhängiger schlagender Beanspruchung, die Sie im Kerbschlagbiegeversuch am Ende dieses Kapitels im Abschnitt „Eine zähe Sache – der Kerbschlagbiegeversuch“ kennenlernen werden. Mit sinkender Temperatur steigt der Gleitwiderstand besonders bei Metallen stark an, die über keine dichtest gepackten Gleitebenen verfügen. Mit der Variation der Versuchstemperatur erhält man nach der Auswertung der Versuche deutliche Hinweise auf eine eventuell vorhandene Übergangstemperatur. Hierbei wechselt das Bruchverhalten in einem kleinen Temperaturbereich von einem zähen zu einem spröden Versagensmechanismus.

In hexagonalen Metallgittern gibt es nur drei voneinander unabhängige Gleitsysteme, so dass die plastische Verformbarkeit schlechter ist als die der Metalle mit kubischen Gittern.

Die deutlich bessere plastische Verformbarkeit der kfz-Metalle gegenüber hexagonalen Metallen lässt sich durch die größere Anzahl von Gleitsystemen erklären. Die deutlich bessere plastische Verformbarkeit der kfz-Metalle gegenüber krz-Metallen lässt sich dagegen über die höhere Besetzungsdichte der Gleitsysteme erklären.

#### Erinnerung

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Gleitsysteme folgt, dass die plastische Verformbarkeit von kfz-Metallen besser ist als jene von krz-Metallen und erst recht besser als die von Metallen mit hexagonal dichtester Kugelpackung.

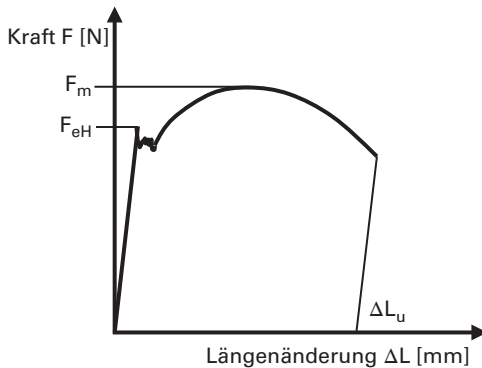
## Zerstörende Werkstoffprüfung

Bei der zerstörenden Werkstoffprüfung werden die Werkstoffe bei der Prüfung physikalisch zerstört, so dass das zu prüfende Bauteil danach nicht mehr verwendet werden kann. Ich möchte Ihnen hier zunächst die zwei wichtigsten Prüfverfahren dieser Kategorie vorstellen, den *Zugversuch* und den *Kerbschlagbiegeversuch*.

### Wenn die Spannung steigt – der Zugversuch

Der Zugversuch wird auf einer genormten Zug-Prüfmaschine durchgeführt. Der Zugversuch hat in der Werkstoffprüfung die größte Bedeutung, weil hierdurch die wichtigsten Kenndaten eines Werkstoffes, wie Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung bestimmt werden.

Ein genormter Prüfstab wird in das Spannwerkzeug eingespannt und die Probe mit genormter Geschwindigkeit gedehnt. Die Kraft  $F$ , die die Probe der aufgezungenen Streckung entgegensetzt, wird in einem Diagramm gegen die Verlängerung  $\Delta L$  des Probenstabes aufgezeichnet (siehe Abbildung 1.29).



**Abbildung 1.29** Kraft-Verlängerungs-Diagramm eines Baustahls

Wird ein Zugversuch an einem Baustahl durchgeführt, so tritt ab einer bestimmten Beanspruchung neben der elastischen Dehnung plötzlich auch eine bleibende Verlängerung der Probe auf. Dabei geht der im Diagramm angezeigte Graph bei  $F_{eH}$  zurück, weil die Widerstandskraft der Probe plötzlich nachlässt. Nach Überwindung dieses Streckgrenzenbereiches dehnt sich die Probe bei steigender Kraft mehr und mehr. Bei einer bestimmten Höchstkraft, die im Diagramm als  $F_m$  angezeigt wird, beginnt die Probe sich einzuschnüren, also lokal eine deutliche Querschnittsabnahme erfährt. Hierbei geht die Kraft zurück. Schließlich tritt der Bruch ein.

Um nicht nur Aussagen über die Kräfte treffen zu können, die ein bestimmter Zugstab in der Lage ist zu ertragen, sondern Werkstoffkennwerte zu erhalten, müssen die Kräfte und Längenänderungen auf die geometrischen Daten des Zugstabes bezogen werden. So wird die Kraft  $F$  auf den Ausgangsquerschnitt des Stabes  $S_0$  bezogen und damit die *Spannung*  $\sigma$  ermittelt. Die Verlängerung  $\Delta L$  wird auf die Ausgangsmesslänge  $L_0$  bezogen, womit die *Dehnung*  $\varepsilon$ , also die relative Längenänderung in Prozent, ermittelt wird:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 \%$$

Bei geringer Beanspruchung verhalten sich viele Werkstoffe rein elastisch, das heißt die Verformung ist reversibel und geht bei Entlastung vollständig zurück. Dieser Bereich zeigt sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (siehe Abbildung 1.30) als Anstiegsgerade im Bereich kleiner Dehnungen; sie wird Hooke'sche Gerade genannt, da in diesem Bereich das Hooke'sche Gesetz gilt. In der Regel werden Konstruktionen so ausgelegt, dass sie in diesem rein elastischen Bereich belastet werden. Die Steigung der Hooke'schen Gerade entspricht dem *Elastizitätsmodul*  $E$  – auch kurz *E-Modul* genannt –, der ein Maß für die Steifigkeit eines Werkstoffes ist:

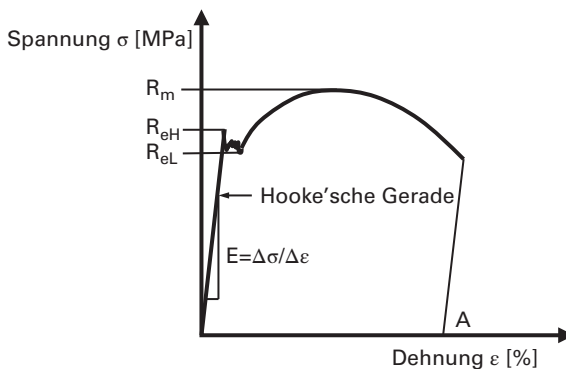
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Die im Kraft-Verlängerungs-Diagramm (siehe Abbildung 1.29) angezeigte Höchstkraft  $F_m$ , dividiert durch den Anfangsquerschnitt der Probe  $S_0$  ergibt die *Zugfestigkeit*  $R_m$ :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

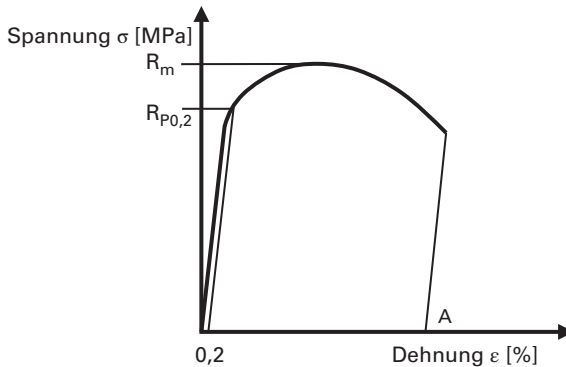
Betrachten wir das Verhalten der Spannung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, erkennen wir die Punkte  $R_{eH}$  als *obere Streckgrenze* und  $R_{eL}$  als *untere Streckgrenze*.

Wenn das Probenmaterial nicht wie in Abbildung 1.30 eine ausgeprägte Streckgrenze aufweist (es also zu einem abrupten Spannungsabfall am Ende



**Abbildung 1.30** Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Baustahls

der Hooke'schen Gerade kommt), bestimmt man die *0,2 %-Grenze*  $R_{p0,2}$  (auch Ersatzstreckgrenze genannt) Nach DIN wird die 0,2 %-Grenze zeichnerisch durch eine Parallele zur Hooke'schen Gerade im Abstand von 0,2 % zur ursprünglichen Messlänge ermittelt (siehe Abbildung 1.31). Der Schnittpunkt mit der Spannungs-Dehnungs-Kurve gibt die Spannung  $R_{p0,2}$  an.



**Abbildung 1.31** Zeichnerische Ermittlung der Ersatzstreckgrenze  $R_{p0,2}$

### Warnung

Bei allen konstruktiven Berechnungen wird stets mit der oberen Streckgrenze gearbeitet, weil nur bis hierhin ein rein elastisches Verhalten garantiert werden kann.

Zur Bestimmung der bleibenden Verlängerung der Probe nach dem Bruch, bezogen auf die Anfangsmesslänge, der *Bruchdehnung*  $A$  wird die zerrissene Probe exakt zusammengefügt und die prozentuale Verlängerung bezogen auf die Anfangslänge bestimmt.

## Eine zähe Sache – der Kerbschlagbiegeversuch

Zur Auswahl eines für eine bestimmte Anwendung geeigneten Werkstoffes wird neben den mechanischen Kennwerten aus dem Zugversuch häufig noch das Ergebnis des Kerbschlagbiegeversuches benötigt. Die Verwendung eines Materials, das seinen Anforderungen nicht gerecht wird, kann fatale Folgen haben. Kommen Kälte und starke Krafteinwirkungen zusammen, wird mancher Stahl

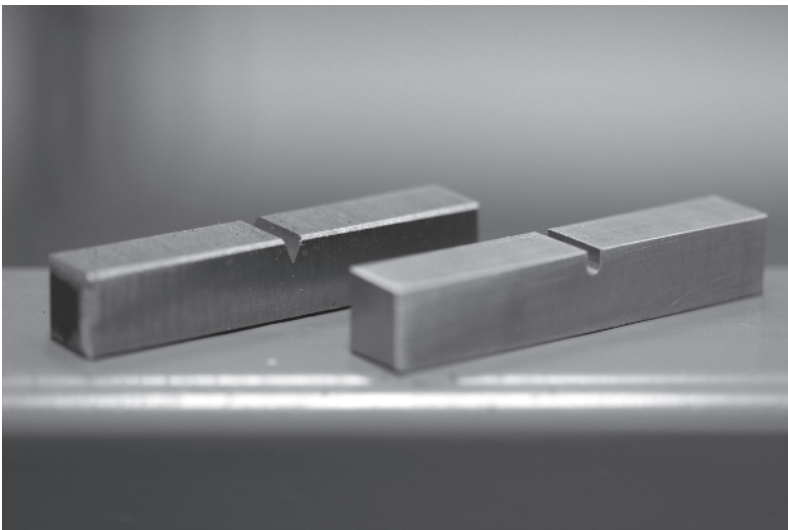
spröde und bricht. Bei dem sehr kalten und schneereichen Winter im Jahr 2005 brachen deshalb beispielsweise zahlreiche Strommasten zusammen.

Wie der Zugversuch, ist auch der Kerbschlagbiegeversuch eine zerstörende Werkstoffprüfung. Er gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffes gegen schlagartige Beanspruchung. Die *Zähigkeit* als die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch oder Rissausbreitung hängt dabei von drei Faktoren ab:

- der Temperatur,
- der Kerbform
- und der Zusammensetzung des Materials bzw. der sich daraus ergebenden Gitterstruktur.

Die Proben für den Kerbschlagbiegeversuch besitzen eine Länge von 55mm und einen quadratischen Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ . Die Proben werden eingekerbt, um den Bruchvorgang besser steuern zu können. Dabei können zwei unterschiedliche Kerbformen verwendet werden:

- die *V-Kerbe* und
- die *U-Kerbe* (siehe Abbildung 1.32).



**Abbildung 1.32** Probenformen beim Kerbschlagbiegeversuch

Da die Zähigkeit eines Werkstoffes auch von seiner Temperatur abhängt, werden die Proben im Klimaschrank erst auf die entsprechende Temperatur gebracht und dann unmittelbar vor dem Versuch heraus genommen. Dann wird die Probe mit der Kerbe in Schlagrichtung im Pendelschlagwerk platziert (Abbildung 1.33) und der Pendelhammer ausgelöst. Durchschlägt der Pendelhammer die Probe, wird ein Teil seiner kinetischen Energie durch Verformungsprozesse absorbiert. Deshalb schwingt der Hammer auf der anderen



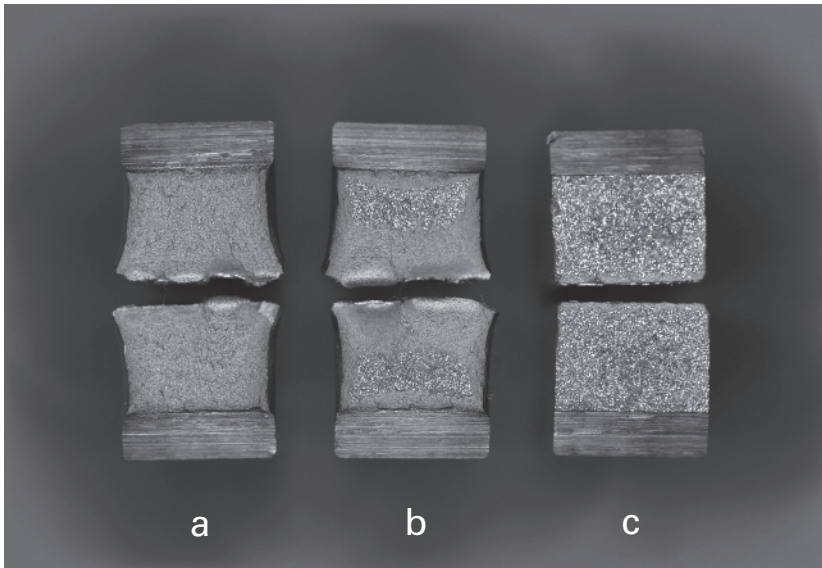
**Abbildung 1.33** Kerbschlagbiegeversuch

Seite weniger hoch. Aus der Differenz zwischen Anfangs- und Endhöhe des Pendels berechnet sich die Kerbschlagarbeit einer Werkstoffprobe. Sie wird in Joule angegeben und an der Skala des Prüfgerätes abgelesen.

Es gibt zwei verschiedene Brucharten:

- *Trennbrüche* und
- *Verformungsbrüche*

Einige metallische Werkstoffe (z.B. Baustähle mit krz-Gitter) neigen dazu, bei tiefen Temperaturen zu verspröden. Werden solche Werkstoffe bei tiefen Temperaturen im Kerbschlagbiegeversuch geprüft, kommt es zu einem Trennbruch, bei dem die Probe glatt durchbricht und die Bruchfläche ein feinkristallines Aussehen hat (siehe Abbildung 1.34 c). Zähre Werkstoffe verformen sich zunächst, bevor sie brechen. Solche Verformungsbrüche erkennt man an den deformierten Kanten (siehe Abbildung 1.34 a). Es gibt aber auch Proben, die neben feinkristallinen Bereichen Verformungsstellen aufweisen (siehe Abbildung 1.34 b); man bezeichnet diese Form dann als *Mischbruch*.



**Abbildung 1.34** Brucharten

Da die Kerbschlagarbeit stark von der Temperatur abhängen kann, werden die gemessenen Werte gegen die Temperatur aufgetragen (siehe Abbildung 1.35). Die Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve lässt sich in drei Bereiche einteilen:

1. *Hochlage*
2. *Steilabfall*
3. *Tieflage*

Die Hochlage beschreibt eine gute Zähigkeit bei hohen Temperaturen. In der Hochlage treten Verformungsbrüche auf. Die Tieflage weist niedrige Kerbschlagzähigkeitswerte bei tiefen Temperaturen auf. Das Material bricht glatt durch; d.h. es kommt zu Trennbrüchen. Der Steilabfall beschreibt den Übergangsbereich zwischen Hoch- und Tieflage. Im Steilabfall streuen die gemessenen Werte stark; hier kommt es zu Mischbrüchen.

Wie bereits im Abschnitt „Rutschpartie – Gleitebenen, Gleitsysteme“ erläutert wurde, zeigt sich der Unterschied zwischen kfz-Metallen und krz-Metallen besonders deutlich bei temperaturabhängiger schlagender Beanspruchung. Besonders bei Metallen, die über keine dichtest gepackten Gleitebenen verfügen, steigt der Gleitwiderstand bei sinkender Temperatur stark an. Mit der Variation der Versuchstemperatur erhält man nach der Auswertung der Versuche deutliche Hinweise auf eine eventuell vorhandene *Übergangstemperatur*  $T_U$  (siehe Abbildung 1.35). Da die Kenntnis der Übergangstemperatur von duktilem (plastisch verformbaren) zu sprödem Werkstoffverhalten für die Werkstoffauswahl von entscheidender Bedeutung sein kann, wird sowohl die

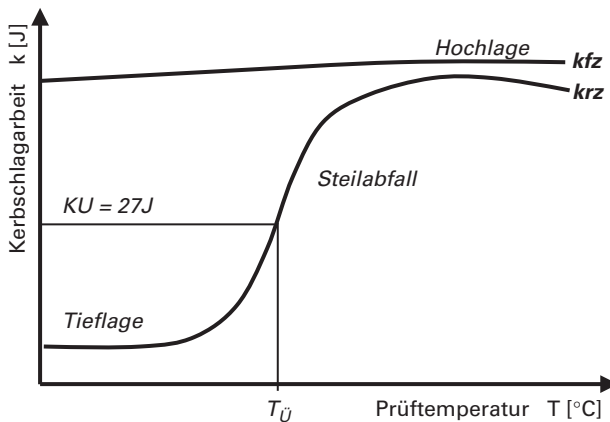


Abbildung 1.35 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve



Temperatur, als auch der erzielte Wert für die Kerbschlagarbeit (in unserem Beispiel aus Abbildung 1.35 KU = 27 J) in der Werkstoffbezeichnung (vor allem bei Baustählen) mit angegeben. Wie dies genau geschieht, wird im nächsten Kapitel „Bezeichnung der Stähle“ erläutert.

#### AUF EINEN BLICK

- Atome bestehen aus negativ geladenen Elektronen, positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen.
- Für die Bindungsarten spielen die Außenelektronen die entscheidende Rolle.
- Alle Atome streben den Edelgaszustand einer gefüllten äußeren Elektroschale an.
- Man unterscheidet die Elemente in Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle. Je nachdem, welche Atomsorten miteinander eine Bindung eingehen, bilden sich Elektronenpaarbindungen, Ionenbindungen oder Metallbindungen
- Sowohl die Gittertypen der metallischen Werkstoffe als auch Art und Anzahl der Gitterfehler haben entscheidende Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften.
- Ursache für die gute plastische Verformbarkeit metallischer Werkstoffe bei relativ geringem Kraftaufwand sind Versetzungen. Besonders geeignet für die Bewegung von Versetzungen sind Gleitebenen.
- Die plastische Verformbarkeit von kfz-Metallen ist besser als die von krz-Metallen und erst recht als die von hdp-Metallen.
- Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften wie E-Modul und Streckgrenze werden im Zugversuch ermittelt.
- Die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegen schlagartige Beanspruchung wird im Kerbschlagbiegeversuch untersucht.

## Übungsaufgaben

Diese Übungsaufgaben sollen Ihnen helfen, zu reflektieren, ob Sie den gelesenen Stoff verstanden und verinnerlicht haben. Versuchen Sie die Lösungen so gut es geht zu erarbeiten, ohne nachzuschlagen. Die Musterlösungen für die folgenden Übungsaufgaben finden Sie als Download unter

[www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN3-527-53023-1](http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN3-527-53023-1).

### Aufgabe 1

Erklären Sie unter Zuhilfenahme der Perioden und Hauptgruppen des Periodensystems der Elemente, welche Atome zu den Metallen und welche zu den Nichtmetallen gerechnet werden.

### Aufgabe 2

Welche Bindungsarten kennen Sie? Wie gut lassen sich die resultierenden Werkstoffklassen plastisch verformen? Begründen Sie Ihre Antwort.

### Aufgabe 3

Berechnen Sie die Packungsdichte in einem kubisch flächenzentrierten Gitter.

### Aufgabe 4

Benennen und beschreiben Sie drei nulldimensionale Gitterfehler.

### Aufgabe 5

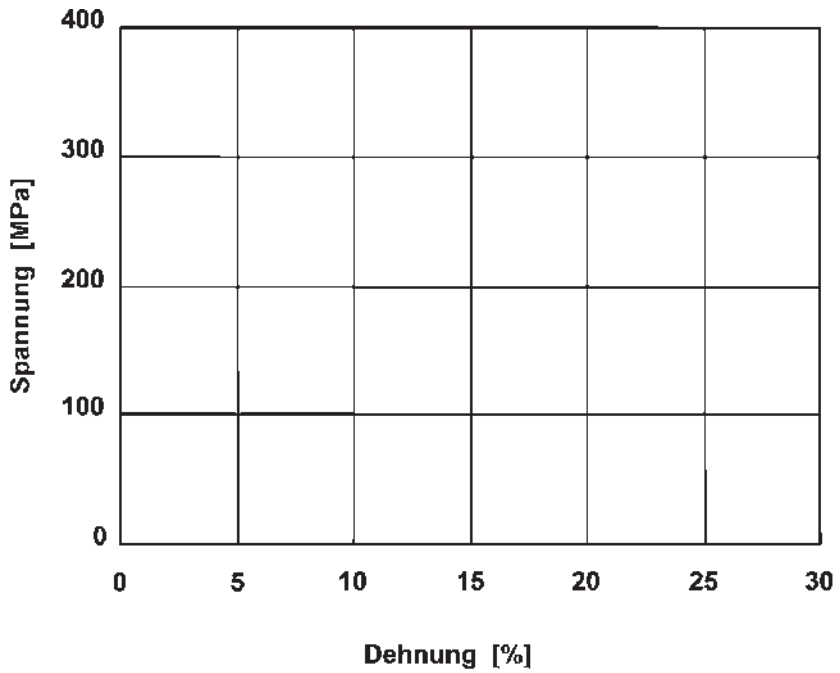
Sortieren Sie krz, hdp und kfz nach ihrer plastischen Verformbarkeit. Begründen Sie Ihre Antwort.

### Aufgabe 6

Gegeben ist ein Probenstab aus Baustahl mit einer Anfangsmesslänge von  $l_0 = 60 \text{ mm}$ . Bei einer Zugkraft von  $14250 \text{ N}$  weist er eine Dehnung von  $0,06 \%$  auf. Der E-Modul beträgt  $210 \text{ GPa}$ . Welchen Anfangsdurchmesser  $d_0$  besitzt der Probenstab?

Die plastische Verformung für den Baustahl beginnt bei  $0,115 \%$ . Die maximal angelegte Kraft beträgt  $41000 \text{ N}$  bei einer Dehnung von  $14 \%$ . Die Probe bricht bei  $245 \text{ MPa}$  und weist eine Bruchlänge von  $76,5 \text{ mm}$  auf. Skizzieren Sie die Spannungs-Dehnungs-Kurve für diesen Werkstoff.

Hinweis: Tragen Sie die gegebenen und errechneten Punkte ein und vervollständigen Sie die Kennlinie qualitativ. Kennzeichnen Sie die charakteristischen Werte.



### Aufgabe 7

Von welchen drei Faktoren hängt die Zähigkeit bei schlagartiger Beanspruchung ab?

