

## IN DIESEM KAPITEL

Wie sich Atome binden

Welche Kristallarten es gibt und wie sie sich ändern können

Die Kristallbaufehler und ihre Folgen

Unerwartete Kristalle im Alltag

# Kapitel 1

## Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön

Viele Menschen, die ein Stück eines Werkstoffs in der Hand halten, können sich gar nicht vorstellen, was es da im Inneren gibt. Meistens meint man, das sei so was Graues, irgendwie Langweiliges, was dann manchmal sogar noch rostet. Aber dass da charaktervolle Atome drin sind, dass die Atome miteinander Bindungen eingehen können, sich die Atome zu wunderschönen Kristallen anordnen, die Kristalle wie wir Menschen Fehler (von bemerkenswerter Ästhetik) aufweisen, dass Werkstoffe sogar verschiedene, sich ändernde Kristallarten haben können und manche Kristalle sogar im Alltag sichtbar sind, ist meist unbekannt.

Aber gemacht, schauen Sie sich erst einmal die Atome im Inneren eines Werkstoffs an und erkennen Sie, warum Werkstoffe, wie alle festen Stoffe, Kräfte ertragen und sich elastisch verhalten.

### Bindungen zwischen den Atomen, fast wie bei den Menschen

Stellen Sie sich einen Stab aus einem metallischen Werkstoff vor, sagen wir aus Eisen. Er soll etwa 1 cm Durchmesser haben und 20 cm lang sein. Ziehen Sie nun maßvoll an diesem Stab,



## 36 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

dann sehen Sie, dass er diese Zugkraft aushalten kann. Was man nun nicht so leicht sieht: Er dehnt sich unter der Wirkung der Zugkraft ein klein wenig. Das ist so ähnlich, als würden Sie ein Gummiband nehmen und es mit den Händen auseinanderziehen.

Wenn Sie den Stab dann entlasten, federt er wieder in die ursprüngliche Länge zurück, genau wie das Gummiband. Der Unterschied zum Gummiband ist nur, dass die Dehnung unter der Wirkung der Kraft sehr klein und ohne Messgeräte meist nicht feststellbar ist.

Drücken Sie anschließend den Stab maßvoll zusammen, so wird er etwas zusammengestaucht. Auch das kann man mit dem bloßen Auge kaum sehen und muss es mit feinen Instrumenten messen. Nehmen Sie die Druckkraft wieder weg, so federt der Stab wieder in die ursprüngliche Länge zurück.

Dieses Verhalten nennt man *elastisch*.

So weit, so gut. Jetzt wissen wir natürlich alle, dass der Stab aus Atomen aufgebaut ist. Und wenn Sie an so einem Stab maßvoll ziehen und drücken können, ohne dass er auseinanderbricht oder auf andere Art versagt, dann müssen die Atome im Stab irgendwie in der Lage sein, diese Zug- und Druckkräfte aufzunehmen. Wie geht denn das?

### Atome im Werkstoff

Um der Geschichte auf die Spur zu kommen, müssen wir die Atome im Werkstoff etwas näher unter die Lupe nehmen. Was sind denn überhaupt Atome? Da gibt es den relativ schweren, positiv geladenen Atomkern, um den die leichten, negativ geladenen Elektronen kreisen, so ähnlich wie Satelliten um die Erde. Halt, sagen da die Physiker und Chemiker. So einfach ist das nicht: Erstens bewegen sich die Elektronen nicht immer auf einer Kreisbahn, zweitens gibt es die Quanteneffekte und drittens dies und viertens das. Und je mehr man versucht, die Atome zu verstehen, und je mehr Fragen man beantwortet hat, desto mehr neue Fragen tauchen auf und desto unklarer wird das mit den Atomen.

Und was machen wir jetzt, die wir versuchen, die Atome im Werkstoff zu begreifen? Wir nehmen hier einfach an, dass die Atome wie ein gut zusammengeballter runder Wattebausch aufgebaut sind. Klar stimmt das nicht, ist sogar grottenfalsch, aber manche Effekte lassen sich damit anschaulich erklären.

### Die Bindungskräfte

Jetzt stellen Sie sich bitte vor, Sie wären ein klitzekleiner Gnom, hätten zwei Super-Nanopinzetten, mit denen Sie sich zwei Eisenatome aus dem gedachten Eisenstab herauspicken können, und hätten die Ehre, auf der internationalen Raumstation unter Schwerelosigkeit und im Vakuum ein Experiment durchzuführen:

- ✓ Sie sollen das eine Atom mit der einen Pinzette in Ihrer linken Hand packen (ganz vorsichtig natürlich, Sie wollen die Atome nicht beeinflussen oder gar beschädigen) und das andere Atom mit der zweiten Pinzette in Ihrer rechten Hand.
- ✓ Dann sollen Sie diese beiden Atome langsam einander annähern und fühlen, welche Kräfte die beiden Atome aufeinander ausüben.



## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 37

Mit welchen Kräften ist denn da zu rechnen?

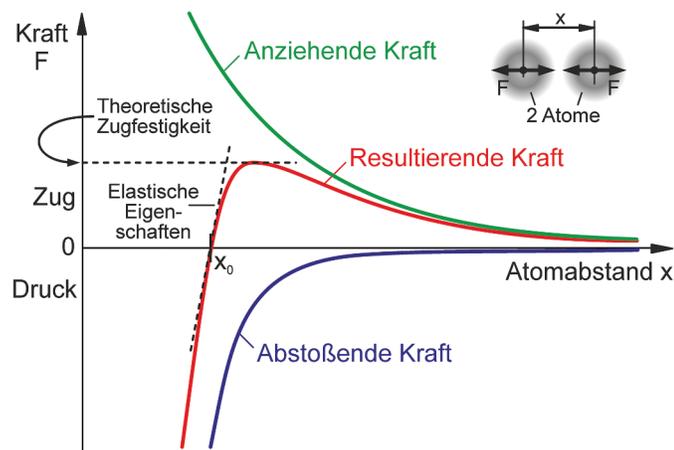
Zunächst einmal werden Sie vermuten, dass da eine abstoßende Kraft wirken muss. Das wäre doch zu erwarten, wenn man die Atome als runde, zusammengeballte Wattebäusche annimmt. Haben die Wattebäusche einen sehr großen Abstand voneinander, so berühren sie sich nicht und es wirkt natürlich auch keine Kraft. Schon bei mittlerem Abstand kann es aber sein, dass sich zwei abstehende Fäserchen berühren und eine kleine abstoßende Kraft zur Folge haben. Bei weiterer Annäherung berühren sich immer mehr abstehende Fasern, die Kraft steigt überproportional an. Und ganz stark wird die abstoßende Kraft ansteigen, wenn sich die Wattebäusche schließlich »massiv« berühren.

So kann man das mit den Wattebäuschen erklären.



Etwas wissenschaftlicher formuliert stoßen sich Atome deswegen ab, weil sich die jeweils negativ geladenen Elektronenhüllen nahekomen und sich gleichnamige Ladungen abstoßen.

Klar, dass man jetzt ein passendes Diagramm braucht, um das darzustellen. In Abbildung 1.1 sind die zwischen zwei Atomen wirkenden Kräfte  $F$  in Abhängigkeit vom Atomabstand  $x$  aufgetragen. Anziehende Kräfte sind positiv dargestellt, abstoßende negativ. Der Atomabstand  $x$  ist der Abstand zwischen den Mittelpunkten der zwei Atome, wie oben rechts im Bild eingezeichnet. Wenn Sie das Diagramm jetzt von rechts nach links lesen, erkennen Sie den beschriebenen Verlauf der abstoßenden Kraft.



**Abbildung 1.1:** Bindungskräfte zwischen Atomen

Was wäre aber mit unserer Welt los, wenn Atome nur abstoßende Kräfte aufeinander ausüben könnten? Denken Sie an dieser Stelle bitte kurz nach, bevor Sie weiterlesen.

Ja, ein absolutes Horrorszenario wäre das. Es gäbe dann keine festen Stoffe, natürlich auch keine Werkstoffe, nicht einmal Flüssigkeiten und uns selbst gäbe es nicht, keine Erde, und wer weiß, wie das Weltall aussähe. Es gäbe nur Gase, da nichts die Atome zusammenhielte.





## 38 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis



Also müssen zwischen Atomen auch erhebliche anziehende Kräfte wirken. Deren Natur kennt man inzwischen ganz gut, insbesondere die Chemiker wissen da bestens Bescheid.

Je nach Atomsorte

- ✓ können im Wesentlichen elektrostatische Anziehungskräfte zwischen Ionen auftreten,
- ✓ kann es zu Elektronenpaaren kommen, wenn sich zwei Elektronen gernhaben (soll ja auch bei den Menschen so sein),
- ✓ kann es zwischen freien Elektronen und Metallatomen zur Anziehung kommen und
- ✓ gibt es bei manchen Kunststoffmolekülen durch Ladungsverschiebungen Anziehungskräfte.

Alles klar? Nein? Wundert mich nicht, das war nur eine kurze Aufzählung, damit Sie einen Überblick bekommen. Sie brauchen das für die Werkstoffkunde auch nicht gar so genau zu wissen. Eines ist aber wichtig: Der Verlauf der anziehenden Kraft zwischen zwei Atomen verläuft deutlich »flacher« als der Verlauf der abstoßenden Kraft (siehe Abbildung 1.1).

Die abstoßende und die anziehende Kraft wirken gleichzeitig und bilden die *resultierende Kraft*. Die resultierende Kraft ist einfach die Summe aus abstoßender und anziehender Kraft. Bei großen Atomabständen überwiegt die anziehende Kraft, bei kleinen die abstoßende Kraft, wie Sie es auch am Verlauf der resultierenden Kraft sehen.

### Das Besondere

Was fällt Ihnen am Verlauf der resultierenden Kraft in Abbildung 1.1 auf? Drei Erscheinungen sind bemerkenswert:

- ✓ Es gibt einen Abstand  $x_0$  zwischen zwei Atomen, bei dem sich die abstoßende und die anziehende Kraft genau die Waage halten. Das ist der Abstand zweier Atome, die Sie sich selbst überlassen. Und gleichzeitig auch der Abstand zweier Atome in einem Festkörper, auf den keine äußere Kraft wirkt. Zieht man an dem Stab, so dehnt sich der Stab elastisch, die Atome nehmen einen Abstand größer als  $x_0$  ein. Nimmt man die äußere Kraft vom Stab weg, so federt der Stab wieder in den Ursprungszustand zurück, der Atomabstand ist wieder  $x_0$ . Analog sind die Überlegungen bei einer Druckkraft auf den Stab. Dieses Verhalten von Atomen nennt man *Bindung*.
- ✓ In Abbildung 1.1 ist zusätzlich noch gestrichelt die Steigung der resultierenden Kraft an der Stelle  $x_0$  eingezeichnet. Welche Bedeutung könnte diese Steigung in der Praxis haben? Sie kennzeichnet die *elastischen Eigenschaften* von Werkstoffen. Bei elastisch nachgiebigen Werkstoffen, wie Gummi, ist die Steigung flach, bei elastisch starren Werkstoffen, wie Stahl, ist sie steil.
- ✓ Ja, und dann haben wir noch das Maximum der resultierenden Kraft. Das ist die größtmögliche resultierende Zugkraft, die zwei Atome aufeinander ausüben können. Mehr geht nicht, mit gar nichts auf der Welt. Und wenn man das umrechnet auf übliche





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 39

Querschnitte, so kommt man auf die *theoretische Zugfestigkeit*, ein fantastisch hoher Wert. Kein massiver irdischer Werkstoff schafft diese Festigkeiten tatsächlich, weil in allen Werkstoffen immer bestimmte Fehler enthalten sind. Nur bei ganz hauchdünnen Haarkristallen, den sogenannten Whiskern, kommt man an diese Festigkeiten heran. Aber die Natur bietet uns dieses Potenzial, es ist also noch »viel drin« bei den Werkstoffen!

### Und das sind die Auswirkungen in der Praxis

Je nachdem, welche Sorte von Atomen in den Werkstoffen vorkommt, können die Bindungen recht unterschiedlich sein. Bei »starken« Bindungen ist die Steigung der resultierenden Kraft bei  $x_0$  groß und die maximale Bindungskraft ist sehr hoch. Solche Werkstoffe sind in elastischer Hinsicht sehr starr, sie weisen meist hohe Zugfestigkeiten auf, ihr Schmelzpunkt liegt hoch und ihr Wärmeausdehnungskoeffizient (Wärmeausdehnung pro Grad Celsius) ist gering. Meist ist das erwünscht, beispielsweise beim Leichtbau, wenn man hohe Festigkeit und Steifigkeit braucht.

Bei Werkstoffen mit »schwachen« Bindungen ist alles umgekehrt, sie sind in elastischer Hinsicht sehr nachgiebig, haben meist keine so hohen Festigkeiten und einen niedrigeren Schmelzpunkt. Auch das kann erwünscht sein, beispielsweise bei Gummidichtungen.

Mehr zum Thema Elastizität, Bindung und Wärmeausdehnung finden Sie in Kapitel 2; wie Sie Zugfestigkeiten messen, erkläre ich in Kapitel 6.

### Alles eine Frage der Ordnung: die wichtigsten Atomanordnungen

Nehmen Sie ruhig einmal Gegenstände aus verschiedenen Werkstoffen des Alltags in die Hand. Vielleicht ein Trinkglas, einen Hammer, eine Schere, einen Löffel, eine Zahnbürste oder was Ihnen sonst noch einfällt. Jetzt stellen Sie sich vor, Sie hätten ein Super-Elektronenmikroskop und könnten Ihre Gegenstände nach Herzenslust vergrößern und vergrößern und vergrößern. Wenn Sie dann so etwa bei hundertmillionenfacher Vergrößerung angelangt wären, könnten Sie die Atome prima sehen. Ein Eisenatom in der Schere hätte dann einen Durchmesser von etwa 2,5 cm.

Sie könnten dann nicht nur die Atome an sich sehen, sondern auch, wie sie sich im Werkstoff anordnen. Welche grundsätzlichen Möglichkeiten gibt es denn da? Atome in Werkstoffen können entweder völlig *regellos* angeordnet sein oder schön *regelmäßig*.

### Regellose Anordnung der Atome – es lebe das Chaos

Alle Werkstoffe, in denen die Atome völlig regellos vorliegen, also total durcheinander, ohne jede Ordnung, wie Kartoffeln in einem Sack, werden in der Wissenschaft grundsätzlich *Gläser* genannt. Man spricht häufig auch von *amorphen* Werkstoffen; *amorph* bedeutet »ohne



## 40 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Form, ohne Struktur«. »Glas« bedeutet also nicht, dass man da immer hindurchsehen kann, sondern »Werkstoff mit regelloser Atomanordnung«. Die Wissenschaft unterscheidet:

- ✓ **anorganische Gläser** (Fensterglas, optische Gläser)
- ✓ **metallische Gläser** (die sind eine Besonderheit unter den Metallen, übrigens genauso glänzend und undurchsichtig wie die »normalen« kristallinen Metalle)
- ✓ **amorphe Kunststoffe** (bei denen sind die Moleküle regellos verteilt)

Die regellose Anordnung der Atome (beziehungsweise Moleküle) erzielt man überwiegend, indem man die Werkstoffe erst aufschmilzt (dann hat man ja das Chaos) und dann so schnell abkühlt, dass das Chaos »eingefroren« wird. Weitere Informationen zu den Gläsern erhalten Sie in Kapitel 18.

## Regelmäßige Anordnung der Atome – es lebe die Ordnung

In den meisten Werkstoffen ordnen sich die Atome regelmäßig an, wie normalerweise bei den Metallen und Legierungen. Man spricht dann von *Kristallen, Kristallstrukturen und Kristallgittern*. So etwas finden Sie auch bei den Menschen. Beispielsweise, wenn der Musikverein zum 100-jährigen Bestehen in Reih und Glied wohlgeordnet in die große Festhalle einmarschiert. Das ist dann ein Kristall aus Menschen. Die große Menschenmenge, die ungeordnet nachfolgt, wäre übrigens eher eine Flüssigkeit oder ein Glas.

Und die Atome haben Charakter:

- ✓ Manche sind »schleckig«, sie wollen Bindungen mit ihren Nachbaratomen nur in ganz bestimmten räumlichen Richtungen eingehen. Dadurch bleibt ziemlich viel Platz zwischen den Atomen leer und die Kristallgitter sind eher *locker gepackt*, wie beim Diamant.
- ✓ Anderen Atomen wiederum ist es nicht ganz so wichtig, in welche räumlichen Richtungen die Bindungen geknüpft werden. Sie wollen vor allem viele Nachbaratome um sich herum haben. Das führt dann zu recht *dicht gepackten* Kristallgittern, wie sie bei den Metallen vorkommen.

Sehen Sie, so wie es Unterschiede zwischen uns Menschen gibt, so gibt es auch Unterschiede zwischen den Atomen. Und damit auch jede Menge einfacher, aber auch komplizierter Kristallgitter. Im Folgenden möchte ich Ihnen die drei wichtigsten Kristallgitter der metallischen Werkstoffe vorstellen.

Schauen Sie sich diese drei Kristallgitter in Ruhe an. Links in den Abbildungen ist jeweils das sogenannte »Drahtmodell« zu sehen, rechts das »Kugelmodell«. Beide Modelle haben so ihre Vor- und Nachteile. Beim Drahtmodell sieht man die Lage der Atome recht gut, aber man kann nicht so leicht erkennen, wo sich die Atome berühren. Beim Kugelmodell ist es gerade umgekehrt.

Was ist nun das Besondere an den drei Kristallgittern?



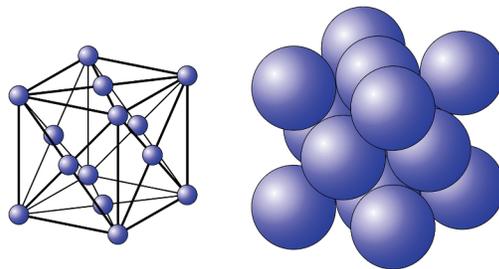


## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 41

### Das kubisch-flächenzentrierte Gitter

Beim kubisch-flächenzentrierten (kfz) Gitter sitzt jeweils ein Atom an den Ecken eines Würfels, deswegen heißt es ja auch kubisch (von »cubus«, lateinisch für Würfel). Zusätzlich gibt es noch jeweils ein Atom mitten in den Seitenflächen, deswegen nennt man es flächenzentriert.

Anhand des Kugelmodells in Abbildung 1.2 erkennen Sie, dass sich die Atome entlang der Flächendiagonalen berühren. Was man aber nicht so leicht sieht: Das kfz-Gitter ist die dichtestmögliche Packung von Kugeln im Raum. Mit nichts auf der Welt, weder praktisch noch theoretisch, können Sie gleich große Kugeln dichter packen als es das kfz-Gitter tut. Beispiele für Metalle mit kfz-Gitter sind Aluminium, Kupfer und Nickel, und nicht völlig daneben ist es, wenn Sie sich das merken.

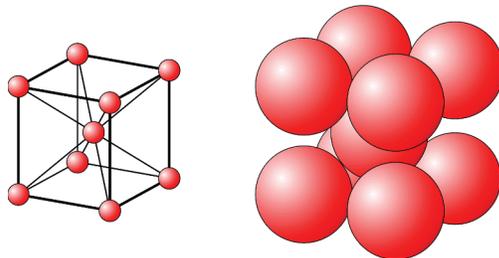


**Abbildung 1.2:** Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter

### Das kubisch-raumzentrierte Gitter

Beim kubisch-raumzentrierten (krz) Gitter sitzt je ein Atom an den Ecken eines Würfels und ein weiteres Atom im Raumzentrum, daher der Name.

Die Atome berühren sich entlang der Raumdiagonalen; zwischen den Eckatomen bleibt ein bisschen Platz übrig (siehe Abbildung 1.3). Daraus ist zu vermuten, dass das krz-Gitter nicht ganz so dicht gepackt ist wie das kfz-Gitter, was auch wirklich so ist. Beispiele für Metalle mit krz-Gitter sind Chrom und Molybdän, auch hier lohnt sich merken.



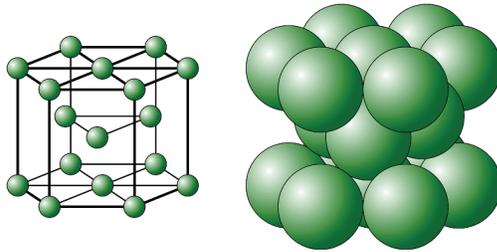
**Abbildung 1.3:** Das kubisch-raumzentrierte Kristallgitter



## 42 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

### Das hexagonal dichtest gepackte Gitter

Beim hexagonal dichtest gepackten (hdp) Gitter bilden die Atome der untersten Ebene ein regelmäßiges Sechseck (also ein Hexagon, griechisch für Sechseck) mit einem Atom in der Mitte (siehe Abbildung 1.4).



**Abbildung 1.4:** Das hexagonal dichtest gepackte Kristallgitter

Das ist so, als hätten Sie sieben Tischtennisbälle auf Ihrem Schreibtisch schön dicht aneinandergelagt und an den Berührstellen miteinander verklebt. Legen Sie drei weitere Tischtennisbälle in die Vertiefungen der unteren Ebene, erhalten Sie die mittlere Schicht. So, und zum Schluss kommt die dritte, oberste Schicht drauf, wiederum in die Vertiefungen der mittleren Schicht hineingelegt, und zwar mit derselben Anordnung wie bei der untersten Schicht. Fertig ist das hdp-Gitter.

Was man vermuten kann, ist die ebenfalls sehr dichte Packung der Atome. Und tatsächlich hat auch das hdp-Gitter die dichtest mögliche Packung von Kugeln im Raum, genau so dicht wie beim kfz-Gitter. Beispiele für Metalle mit hdp-Gitter sind Zink und Magnesium.

### Bedeutung in der Praxis

Normalerweise sieht man den Metallen ihren kristallinen Aufbau gar nicht an. Erst nach entsprechender Vorbereitung werden die Kristalle unter dem Mikroskop sichtbar. Mehr darüber erfahren Sie in Kapitel 10.

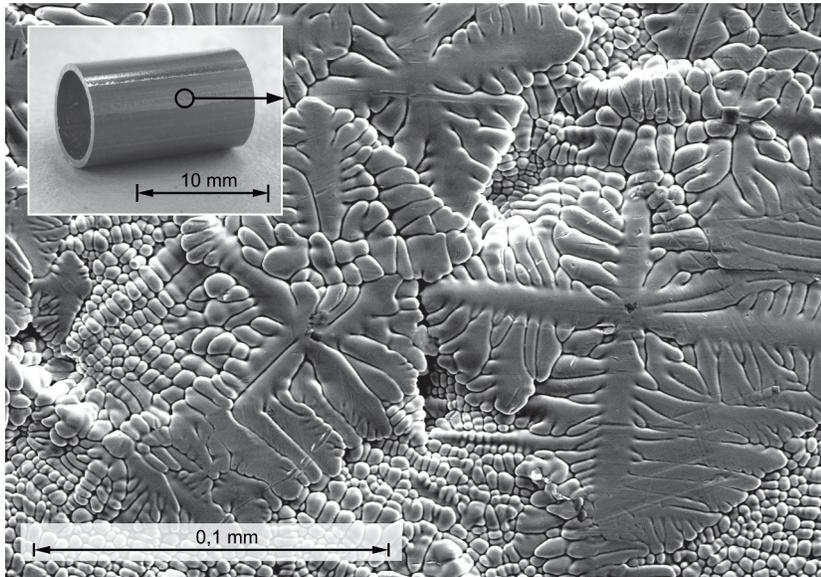
Nur in Ausnahmefällen, wenn Metallkristalle weitgehend frei wachsen, kann man den kristallinen Aufbau auch direkt und ohne Präparation vermuten. Abbildung 1.5 zeigt den Blick auf eine Schweißnaht an einem Rohrstück aus einem rostfreien Stahl. Mit dem Auge allein sehen Sie nicht viel (siehe links oben eingeblendetes Bild). Mit dem Rasterelektronenmikroskop aber kommt die volle Pracht heraus. Wunderschöne Kriställchen mit vielen Seitenarmen, den sogenannten Dendriten, sind an der Oberfläche sichtbar.

Eigentlich könnten Sie argumentieren: Was interessiert mich das, wie die Atome im Metall angeordnet sind? Sie glauben aber gar nicht, wie sehr sich die Atomanordnung bemerkbar macht. Im Grunde wirkt sie sich auf alle Eigenschaften aus; zwei besondere möchte ich hervorheben:

- ✓ Die kubisch-flächenzentriert aufgebauten Werkstoffe sind auch bei tiefen Temperaturen noch sehr zäh, lassen sich also gut plastisch verformen. Demgegenüber werden



## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 43



**Abbildung 1.5:** Blick auf die Oberfläche einer Schweißnaht aus einem rostfreien Stahl, aufgenommen mit dem Rasterelektronenmikroskop

die kubisch-raumzentriert und hexagonal dichtest gepackt aufgebauten Werkstoffe bei tiefen Temperaturen spröde. Weitere Informationen dazu gibt's in Kapitel 8.

- ✓ Die Fähigkeit, Legierungen zu bilden, unterscheidet sich beim kfz- und krz-Gitter sehr. Näheres dazu finden Sie beim Beispiel Eisen in den Kapiteln 5 und 15.

Also: Die Kristallgitter haben's in sich! Wenn Sie möchten, packen Sie die Übungsaufgaben dazu an. Das sind richtige »Klassiker« in der Werkstoffkunde, sie helfen Ihnen, die Kristallgitter wirklich zu verstehen.

## Polymorphie bei Kristallen, die unglaublichen Vorgänge im Inneren

Normalerweise hat jedes Metall eine bestimmte Kristallart, und zwar im gesamten Temperaturbereich vom absoluten Nullpunkt bis zum Schmelzpunkt. So ist Aluminium im gesamten Temperaturbereich kubisch-flächenzentriert und Chrom kubisch-raumzentriert aufgebaut.



Manche Metalle aber weisen in Abhängigkeit von der Temperatur (und auch vom Druck) verrückterweise mehrere Kristallarten auf. Dieses Phänomen nennt man *Polymorphie*, was man ungefähr mit »Vielstruktur« übersetzen kann.

Das bekannteste und wichtigste Beispiel hierfür ist das Element Eisen, und an diesem Beispiel möchte ich Ihnen die Polymorphie erklären (siehe Abbildung 1.6).



## 44 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

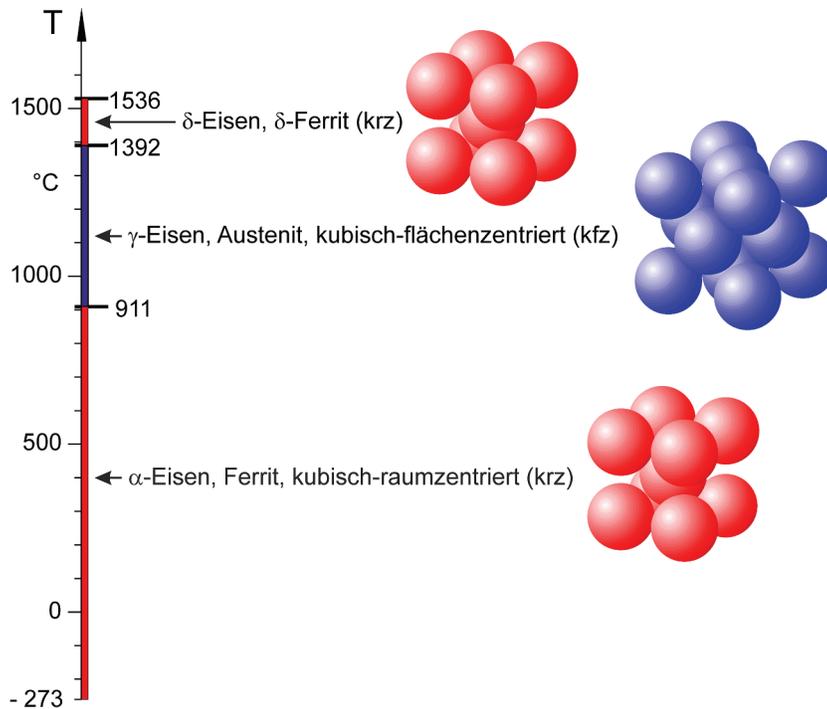


Abbildung 1.6: Polymorphie bei Eisen

Stellen Sie sich ein kleines Stückchen reinen Eisens vor, ein Blumendraht kommt der Sache schon sehr nahe. Kühlt man dieses Stückchen reinen Eisens bis in die Nähe des absoluten Nullpunkts, also  $-273\text{ °C}$  ab und untersucht es auf seine Kristallstruktur (kann man mit Röntgenstrahlen machen), so stellt man fest, dass es kubisch-raumzentriert aufgebaut ist. Erwärmt man das Eisen nun schön langsam und untersucht es laufend, so findet man heraus, dass es die kubisch-raumzentrierte Struktur zunächst beibehält.

Bei  $911\text{ °C}$  aber wandelt sich das Eisen abrupt in die kubisch-flächenzentrierte Struktur um, die dann bei höheren Temperaturen vorliegt. Wer nun meint, die kfz-Struktur sei dann bis zum Schmelzpunkt vorhanden, der irrt. Zu allem Überfluss wandelt sich das Eisen bei  $1392\text{ °C}$  wieder in die krz-Struktur um, die dann bis zum Schmelzpunkt von  $1536\text{ °C}$  bleibt. Fast kommt man zu der Ansicht, das Eisen wisse nicht, was es will. Bei abnehmenden Temperaturen verläuft übrigens alles wieder in umgekehrter Reihenfolge.

Die bei Eisen auftretenden Kristallgitter benennt man mit griechischen Buchstaben und zusätzlich auch mit Namen:

- ✓ Das kubisch-raumzentriert aufgebaute Eisen bei tiefen Temperaturen heißt  $\alpha$ -Eisen oder auch *Ferrit*, benannt nach dem lateinischen Namen für Eisen, Ferrum.
- ✓ Das kubisch-flächenzentriert aufgebaute Eisen heißt  $\gamma$ -Eisen oder *Austenit*, benannt zu Ehren von Sir William Chandler Roberts-Austen, einem britischen Metallurgen.



## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 45

- ✓ Das kubisch-raumzentriert aufgebaute Eisen bei hohen Temperaturen heißt  $\delta$ -Eisen oder  $\delta$ -Ferrit. Es ist genau gleich wie das  $\alpha$ -Eisen.

Gleich noch zwei Anmerkungen dazu:

- ✓ Die Artikel sind männlich, es heißt **der** Ferrit und **der** Austenit. Verzeihen Sie mir, wenn ich das anmerke, es ist oftmals nicht bekannt.
- ✓ Und so bunt wie in Abbildung 1.6 und einigen weiteren Abbildungen sind die Atome leider nicht. Ich habe sie nur zur Unterscheidung der Kristallstrukturen eingefärbt. Die Eisenatome im  $\alpha$ -,  $\gamma$ - und  $\delta$ -Eisen sind identisch.

### Wo das $\beta$ -Eisen geblieben ist

Logischerweise käme nach  $\alpha$  doch  $\beta$  und dann erst  $\gamma$  im griechischen Alphabet. Und wo ist dann das  $\beta$ -Eisen geblieben? Eisen verliert oberhalb von  $769^\circ\text{C}$  seinen Magnetismus (genauer: Ferromagnetismus) und wird unmagnetisch (genauer: paramagnetisch). Früher hat man geglaubt, das paramagnetische Eisen oberhalb von  $769^\circ\text{C}$  hätte eine eigene Kristallstruktur, und hat es  $\beta$ -Eisen genannt. Später erst hat man festgestellt, dass die Kristallstruktur des  $\beta$ - und des  $\alpha$ -Eisens gleich sind, nämlich kubisch-raumzentriert. Tja, und nachdem die Begriffe  $\gamma$ -Eisen und  $\delta$ -Eisen schon so richtig eingebraut waren bei den Wissenschaftlern, hat man sie belassen und das  $\beta$ -Eisen einfach »vergessen«. Unter den Teppich gekehrt.

Nun eine absolut berechtigte Frage, vielleicht ging Ihnen das auch schon durch den Kopf: Warum tut das Eisen denn das? Es könnte doch einfach nur in der krz- oder kfz-Struktur vorliegen. Besser hätte ich die Frage nicht gestellt, denn ich weiß keine richtig überzeugende Antwort darauf. Die Wissenschaft sagt, die Natur strebe immer den energetisch günstigsten Zustand an. Und zwischen  $911$  und  $1392^\circ\text{C}$  sei halt das kfz-Gitter das energetisch günstigere und deswegen gibt es das. Aber warum das gerade hier energetisch günstiger ist ...

Und warum erzähle ich so viel von dieser Polymorphie des Eisens und den polymorphen Umwandlungen? Die sind enorm wichtig, sie sind die Grundlage für die meisten Wärmebehandlungen der Stähle, beispielsweise für das Härten. Mehr dazu finden Sie in Kapitel 14, und die Übungsaufgaben haben auch noch etwas Feines auf Lager.

So, und jetzt die letzte Frage hierzu: Gibt es die Polymorphie auch bei anderen Stoffen und unter anderen Bedingungen? Ja, die Polymorphie tritt auch bei Titan, Zinn, manchen anderen Metallen und anderen Elementen auf, auch bei besonderen Legierungen und chemischen Verbindungen, bei speziellen Keramiken sowie Gesteinsarten. Und sie ist zusätzlich noch abhängig vom Druck.

Schön sind sie, die Kristalle im Inneren vieler Werkstoffe. Aber wie fast immer im Leben: Nichts ist perfekt, und auch die Kristalle im Werkstoff nicht.



## Kristallbaufehler: Nichts ist perfekt

Dass Kristalle in vielen Werkstoffen vorkommen, haben die Wissenschaftler schon lange vermutet. So richtig beweisen konnte man das aber erst vor rund hundert Jahren. Damals hatte Wilhelm Conrad Röntgen die Röntgenstrahlung entdeckt und zuerst in der Medizin angewandt. Etwas später kamen dann die Materialwissenschaftler, die haben mit Röntgenstrahlen auf Werkstoffe geschossen und beobachtet, was dabei passiert. So konnte man erstmals den kristallinen Aufbau von Metallen direkt nachweisen.

Dann aber fuhr den Wissenschaftlern ein Schreck durch die Glieder. Wie konnte es denn sein, dass ein Stück Eisen kristallin aufgebaut ist und sich dennoch plastisch verformen lässt, zum Beispiel durch Walzen? Alle Stoffe, denen man den kristallinen Zustand ansehen kann, beispielsweise Kochsalzkristalle, Bergkristalle, Saphire, sind ja spröde. Und was passiert denn im Eisen beim Walzen? Gehen da die Kristalle kaputt?

Nach heftiger Diskussion kam ein schlauer Mensch auf die Idee, ein Stück Eisen richtig kräftig zu walzen und es wieder mit Röntgenstrahlen zu untersuchen. Und siehe da: Es waren nach dem Walzen immer noch Kristalle drin. Puh. Was jetzt?

Wenn ich einen schönen Hut aufhätte, würde ich ihn jetzt ziehen und mich vor denjenigen Wissenschaftlern symbolisch verneigen, die damals rein theoretisch vorhergesagt haben, dass es in den Metallkristallen bestimmte Fehler geben muss. Mit diesen Fehlern sind Metallkristalle tatsächlich in der Lage, sich plastisch zu verformen, und hinterher sind immer noch Kristalle vorhanden. Erst viel später, etwa Mitte des 20. Jahrhunderts, konnte man diese Fehler durch Elektronenmikroskope direkt sichtbar machen.

Heute kennt man die sogenannten *Kristallbaufehler*, auch *Gitterfehler* genannt, recht genau und teilt sie in null-, ein- und zweidimensionale Fehler ein (siehe Abbildung 1.7). Dreidimensionale Kristallbaufehler (Volumenfehler) zu definieren ist eher unüblich, man benennt sie dann mit den konkreten Namen, wie zum Beispiel Poren.

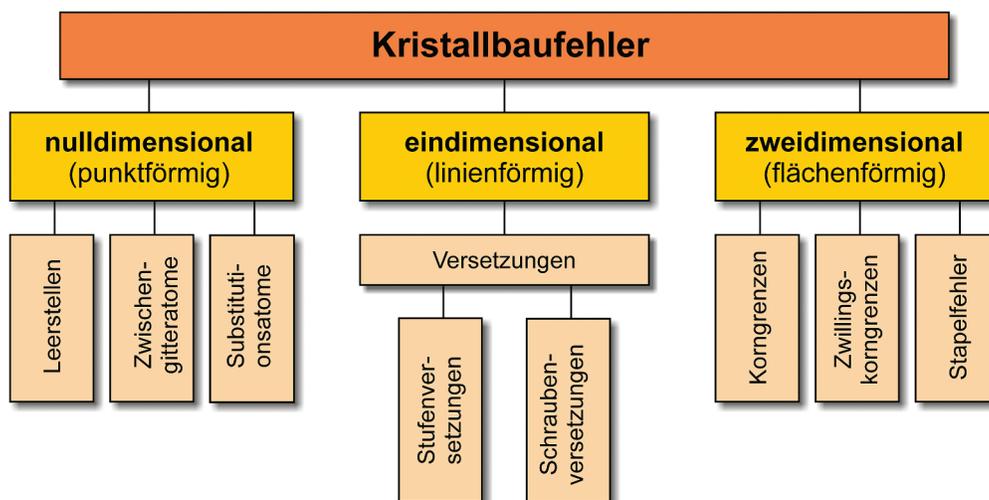
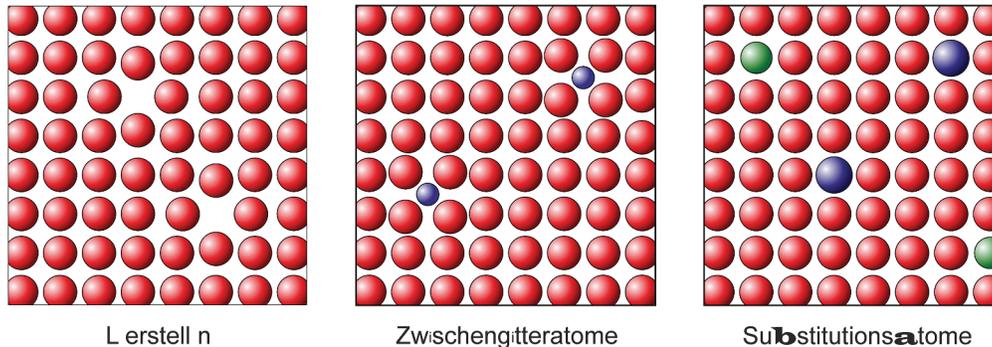


Abbildung 1.7: Gliederung der Kristallbaufehler



## Nulldimensionale (punktförmige) Kristallbaufehler

Als nulldimensional bezeichnet man Kristallbaufehler, die aus einem besonderen oder einem fehlenden Atom bestehen. Wenn man ein Atom nun als »Punkt« auffasst, wird auch die Bezeichnung »punktförmig« verständlich. Drei Arten gibt es (siehe Abbildung 1.8).



**Abbildung 1.8:** Nulldimensionale Kristallbaufehler

## Leerstellen oder wo nichts ist

*Leerstellen* sind »leere«, also unbesetzte Gitterplätze in Kristallen. Da fehlt einfach ein Atom, wo eigentlich eines sein sollte.

Wie kommen denn die Leerstellen in die Kristalle? Das Besondere und zunächst Rätselhafte ist, dass sie im Normalfall allein durch die Temperatur und die daraus resultierende Wärmebewegung der Atome entstehen. Bei hohen Temperaturen gibt es viele Leerstellen, bei tiefen Temperaturen wenige. Dagegen tun können Sie (fast) nichts, es ist immer so, die Natur macht das von ganz allein. Warum aber?



Ein Kristall mit einer bestimmten Zahl (genauer: Dichte) von Leerstellen hat einen günstigeren, also niedrigeren energetischen Zustand als ein Kristall ohne Leerstellen. Oder ganz menschlich ausgedrückt: Mit ein paar Leerstellen fühlt sich ein Kristall wohler. Bei hoher Temperatur braucht er mehr Leerstellen, um sich wohlzufühlen, bei niedriger Temperatur reichen ihm weniger.

Spezialisten können die Zahl der Leerstellen in einem bestimmten Kristall ausrechnen und manchmal sogar messen. Viele sind es nicht: Dicht unterhalb des Schmelzpunkts hat ein Metall etwa jeden 10.000. Gitterplatz nicht besetzt, bei Raumtemperatur kommt manchmal auf  $10^{12}$  Gitterplätze nur eine Leerstelle!



## 48 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Ja, und was macht es denn aus, wenn da eben, was weiß ich, jeder zig-tausendste oder milli-onste Gitterplatz nicht besetzt ist? Zugegeben, bei tiefen Temperaturen (im Verhältnis zum jeweiligen Schmelzpunkt) spürt man die Leerstellen kaum.



Bei höheren Temperaturen aber ermöglichen die Leerstellen das Wandern, genauer *Diffundieren* der Atome im Kristallgitter. Und das ist bei vielen Wärmebehandlungen sowie Verarbeitungsverfahren nötig und macht sich dort massiv bemerkbar.

Ohne Leerstellen wäre die Welt ärmer. Mehr dazu erfahren Sie in Kapitel 3.

### Zwischengitteratome oder wo zusätzlich etwas ist

*Zwischengitteratome* oder *Einlagerungsatome*, das drückt der Name schon aus, sind Atome, die sich auf Zwischengitterplätzen, also »Lücken« im Kristallgitter eingenistet haben. Wie Sie in Abbildung 1.8 sehen, kommt als Zwischengitteratom im Normalfall nur ein kleines anderes Atom infrage, da es in den Kristallgittern meist sehr beengt zugeht.

Selbst ein kleines Atom passt meist nicht vollständig in so einen Zwischengitterplatz rein und drückt die Nachbaratome etwas unsanft nach außen. Daraus folgt ganz logisch: Zwischengitteratome fühlen sich umso wohler im Kristall, je größer die Lücken zwischen den Atomen sind und je kleiner sie selbst sind.



Wichtig und für die Praxis nutzbar sind die Zwischengitteratome bei *Legierungen*. Zwischengitteratome werden absichtlich zugegeben, um einem Werkstoff besondere Eigenschaften zu geben, insbesondere seine Festigkeit zu erhöhen. Ein Beispiel ist Kohlenstoff in Eisen.

Mehr hierzu gibt's in den Kapiteln 5 und 15.

### Substitutionsatome oder wo etwas ersetzt ist

Wie kann man sonst noch andere Atome in ein Kristallgitter hineinschmuggeln? Einfach dadurch, dass man ein »normales« Atom (ein »Wirtsgitteratom«, ist das nicht ein schöner Name) durch ein »Fremdatom« ersetzt. Da dann ein Wirtsgitteratom durch ein anderes ersetzt oder »substituiert« wird, nennt man so ein Atom *Substitutionsatom*. Abbildung 1.8 zeigt Ihnen rechts vier Substitutionsatome in einem Kristall.

Fast schon selbstverständlich: Substitutionsatome fühlen sich im Kristall umso wohler, je ähnlicher sie den Wirtsgitteratomen sind, vor allem, was den Durchmesser anlangt. Wenn Wirts- und Substitutionsatom nicht nur

- ✓ sehr ähnlichen Atomdurchmesser haben, sondern auch noch
- ✓ chemisch sehr verwandt sind und zusätzlich
- ✓ das gleiche Kristallgitter aufweisen,





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 49

können sie in beliebigen Mengenverhältnissen zueinander im Kristallgitter eingebaut werden.

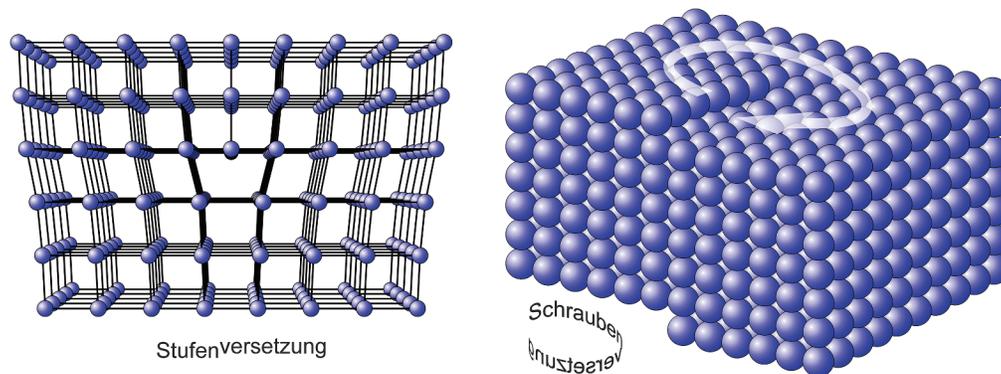


Auch die Substitutionsatome sind wichtig, wenn es um die *Legierungen* geht. Auch mit ihnen kann die Festigkeit eines Werkstoffs gesteigert werden. Beispiele sind Kupfer-Nickel- und Kupfer-Zink-Legierungen. Mehr hierzu lesen Sie in Kapitel 4.

So, das waren die punktförmigen Gitterfehler. Jetzt geht es an die linienförmigen.

### Eindimensionale (linienförmige) Kristallbaufehler

Unter den eindimensionalen, also linien- oder fadenförmigen Kristallbaufehlern gibt es nur eine Art, das sind die *Versetzungen*. Die Versetzungen lassen sich in zwei miteinander verwandte Grundtypen gliedern, die Stufen- und die Schraubenversetzungen (siehe Abbildung 1.9).



**Abbildung 1.9:** Stufenversetzung (links) und Schraubenversetzung (rechts)

#### Stufenversetzungen, gerade und doch stufig

Abbildung 1.9 zeigt links eine *Stufenversetzung* in einem einfachen kubischen Kristall, dargestellt als Drahtmodell. Sehen Sie sich das Bild bitte in Ruhe an.

Wie könnten Sie einen solchen Kristallbaufehler rein gedanklich (also nicht praktisch) aus einem perfekten Kristall herstellen? Bitte erst nachdenken, bevor Sie weiterlesen.

- ✓ Entweder dadurch, dass Sie die Bindungen im perfekten Kristall von oben her bis zur Mitte auftrennen, eine **zusätzliche halbe Ebene von Atomen einfügen** und die Bindungen neu knüpfen.
- ✓ Oder durch das Gegenteil, indem Sie eine **untere Halbebene von Atomen entfernen** und die Bindungen ebenfalls wieder neu knüpfen. Das Ergebnis ist absolut gleich!





## 50 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Wenn Versetzungen linienförmige Fehler sind, ja wo ist denn dann die Linie? Schauen Sie bitte genau in die Mitte der Stufenversetzung in Abbildung 1.9. Durch diesen zentralen Punkt (den Kern) der Stufenversetzung hindurch, senkrecht zur Zeichenebene, verläuft die sogenannte Versetzungslinie.

### Schraubenversetzungen, gerade und doch spiralig

Die *Schraubenversetzung* ist schon ein bisschen schwerer zu verstehen. Abbildung 1.9 (rechts) zeigt sie in einem einfachen kubischen Kristall als Kugelmodell. Schauen Sie sich auch dieses Bild erst in Ruhe an.

Stellen Sie sich vor, Sie wären ein winzig kleiner Gnom in einem Raumschiff, das kleiner als ein Atom ist, und würden kreisförmig im Uhrzeigersinn über die obere Ebene von Atomen reisen, wie mit dem hellen Pfeil in Abbildung 1.9 angedeutet. Nach einer Runde wären Sie eine Ebene tiefer angelangt, nach einer weiteren Runde noch eine Ebene tiefer, und nach sieben Runden (zählen Sie mal nach) kämen Sie unten aus dem Kristall wieder heraus. Ihre Flugbahn wäre eine Schraubenlinie gewesen, und daher kommt auch der Name Schraubenversetzung. Erinnert Sie das nicht irgendwie an eine Parkhausauffahrt?

Was man nun anhand der Bilder nicht so leicht erkennt, und das müssen Sie mir jetzt einfach mal glauben, ist die sehr enge Verwandtschaft von Stufen- und Schraubenversetzung. Es gibt sogar jeden beliebigen Zwischenzustand zwischen den beiden Grundtypen, das sind dann die gemischten Versetzungen.

Und wie kommen die Versetzungen in die Kristalle rein?

### Wie es zu Versetzungen kommt und was sie bewirken

Versetzungen entstehen ursprünglich beim Wachsen von Kristallen aus der Schmelze, also beim Gießen eines Werkstoffs. Da unterlaufen der Natur Fehler, so wie auch uns Menschen.

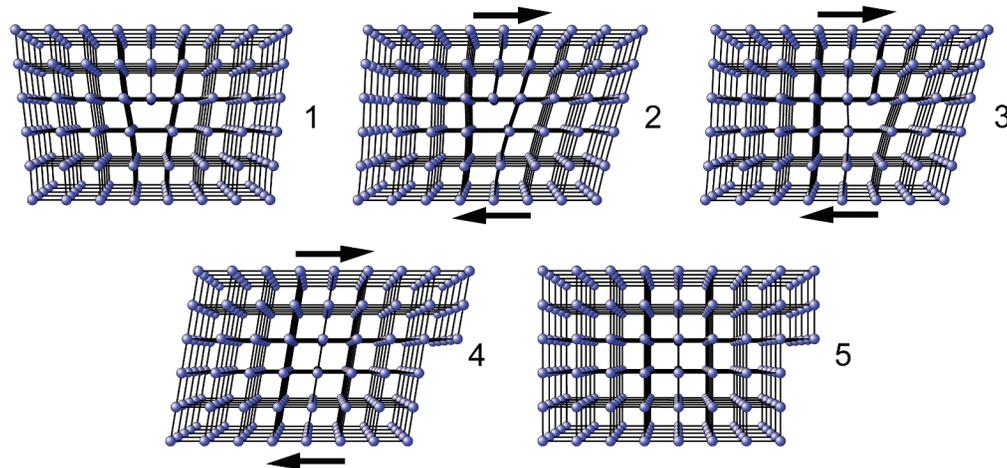
Und welche praktische Bedeutung die Versetzungen haben, sehen Sie anhand von Abbildung 1.10. Versetzungen ermöglichen die plastische Verformung von Metallkristallen, ohne dass die Kristalle zerstört werden, eine superwichtige Geschichte.

Durch Schubbeanspruchung eines Kristalls (Zustand 2) werden Bindungen direkt am Kern der Versetzung gelöst und zur eingeschobenen Halbebene hin neu geknüpft (Zustand 3). Die Halbebene ist dann scheinbar um einen Atomabstand weitergerückt. Dieses Spiel wiederholt sich, bis die Versetzung die Kristalloberfläche erreicht und eine Stufe an der Oberfläche hinterlässt. Daher auch der Name Stufenversetzung.

Obwohl dies Abbildung 1.10 nicht anzusehen ist: Versetzungen können Sie in riesiger Menge erzeugen, indem Sie irgendein Stück eines metallischen Werkstoffs plastisch verformen. Also Blumendraht oder einen Nagel nehmen, richtig kräftig biegen, und schon haben Sie Milliarden und Abermilliarden von neuen Versetzungen erzeugt. Nur sehen können Sie die mit dem bloßen Auge nicht, dazu braucht man geeignete Elektronenmikroskope.



## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 51



**Abbildung 1.10:** Mechanismus der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegung

Was bei Werkstoffen wichtig ist:



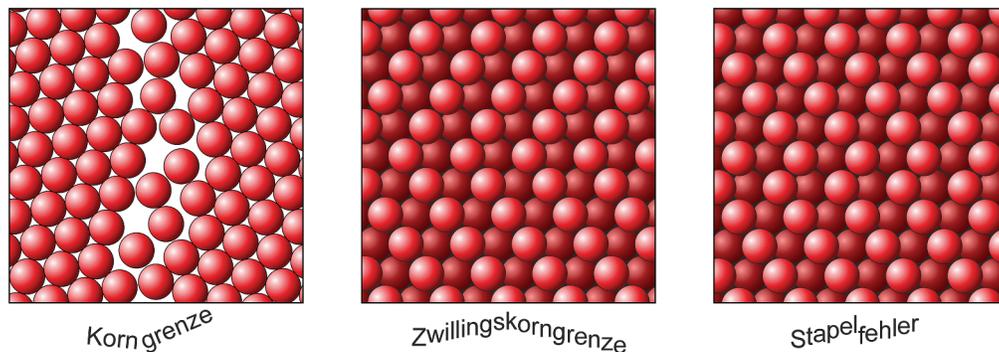
Versetzungen (egal ob Stufen-, Schrauben- oder gemischte Versetzungen) ermöglichen es einem Kristall, sich plastisch zu verformen. Wenn das leicht geht, liegt ein weicher, wenig fester Werkstoff vor. Und wenn das schwer geht, hat man einen harten, festen Werkstoff.

Ahnen Sie es? Wenn Sie Versetzungen das Leben schwer machen, können Sie die Festigkeit eines Werkstoffs steigern. Mehr dazu erfahren Sie in Kapitel 17.

So viel zu den linienförmigen Kristallbaufehlern. Jetzt sind die flächenförmigen dran.

## Zweidimensionale (flächenförmige) Kristallbaufehler

Unter den zweidimensionalen, also flächenförmigen Kristallbaufehlern gibt es drei verschiedene Arten, die bei den Werkstoffen des Alltags häufig vorkommen: die Korngrenzen, die Zwillingskorngrenzen und die Stapelfehler (siehe Abbildung 1.11).



**Abbildung 1.11:** Zweidimensionale Kristallbaufehler



## 52 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

### Korngrenzen, wie Grenzen auf der Landkarte

*Korngrenzen*, das drückt der Name aus, sind Grenzen oder Übergänge von einem »Korn« zu einem benachbarten Korn. »Korn« ist hierbei ein Fachausdruck für einen Kristall innerhalb eines Werkstoffs. Bei den meisten Werkstoffen des Alltags liegen im Inneren nämlich viele kleine Kristalle oder Körner vor, die an Korngrenzen aneinanderstoßen.

Korngrenzen haben meist eine »Dicke« von etwa ein bis zwei Atomdurchmessern und stellen einen dünnen Bereich dar, in dem die Atome nicht mehr regelmäßig angeordnet sind. Korngrenzen entstehen in der Regel beim Wachsen einzelner Körner, beispielsweise aus der Schmelze beim Gießen oder im festen Zustand (bei der Rekristallisation, mehr dazu in Kapitel 3).



Obwohl Korngrenzen ja Kristallbaufehler sind, wirken sie sich bei niedrigen bis mittleren Temperaturen (im Vergleich zum Schmelzpunkt) **positiv auf die mechanischen Eigenschaften** von Metallen aus. Wenn ein Stahl beispielsweise besonders viele der Korngrenzen enthält, also viele kleine Körner aufweist, dann hat er sowohl eine hohe Festigkeit als auch eine hohe Zähigkeit. Eine fantastische Geschichte, die man in der Praxis gerne nutzt.

Erst bei hohen Temperaturen Richtung Schmelzpunkt stellen Korngrenzen Schwachpunkte dar, weil dann ein Korn am anderen abgleiten oder abrutschen kann, so wie wir Menschen auf Glatteis, und das führt zu geringer Festigkeit.

### Zwillingskorngrenzen, die symmetrischen

Stellen Sie sich nun vor, Sie könnten zwei Kristalle, oder jetzt besser ausgedrückt, zwei Körner, räumlich so drehen und kippen, dass sie eine exakt ebene Korngrenze zwischen sich bilden, und zwar so, dass das eine Korn das genaue Spiegelbild des anderen Korns darstellt und keinerlei »Durcheinander« an der Korngrenze wäre. Dann hätten Sie eine *Zwillingskorngrenze* gebildet, wie in der Mitte in Abbildung 1.11 zu sehen.

Können Sie die Lage der Spiegelebene erkennen? Sie läuft horizontal durch die Bildmitte. Sie werden sich sicher fragen, was das denn für ein komischer Kristall in der Mitte in Abbildung 1.11 ist. Kaum zu glauben, aber das ist ein kubisch-flächenzentrierter Kristall, der in einer etwas wild gedrehten und gekippten Ebene aufgeschnitten ist.

Zwillingskorngrenze heißt sie übrigens, weil ein Korn dem anderen so ähnlich ist wie ein Zwilling dem anderen. Was natürlich wissenschaftlich nicht haltbar ist, aber so ist das manchmal mit den Namen.

### Stapelfehler, die korrigierten Fehlritte

Und wenn ich schon bei aufgeschnittenen kfz-Kristallen bin, zeige ich Ihnen gleich einen *Stapelfehler* rechts in Abbildung 1.11.

Warum dieser Kristallbaufehler Stapelfehler heißt? Stapeln Sie einmal in Gedanken die Atome wie rechts in Abbildung 1.11, beginnend mit einer unteren Lage. Die zweite, dritte, vierte





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 53

und fünfte Lage von Atomen stapeln Sie jeweils etwas nach links versetzt. Und bei der sechsten Lage passiert Ihnen ein Fehler, diese Lage ist nämlich nach rechts versetzt. Sie bemerken Ihren Fehler, wischen sich den Schweiß von der Stirn und machen wieder wie ursprünglich weiter. Fertig ist der Stapelfehler.

Und wie kommen die Zwillingskorngrenzen und die Stapelfehler in die Werkstoffe? Sie entstehen überwiegend beim Wachsen der Kristalle, ähnlich wie die Korngrenzen. Und wie wirken sie sich aus? In mechanischer Hinsicht wie die Korngrenzen, also meist positiv.

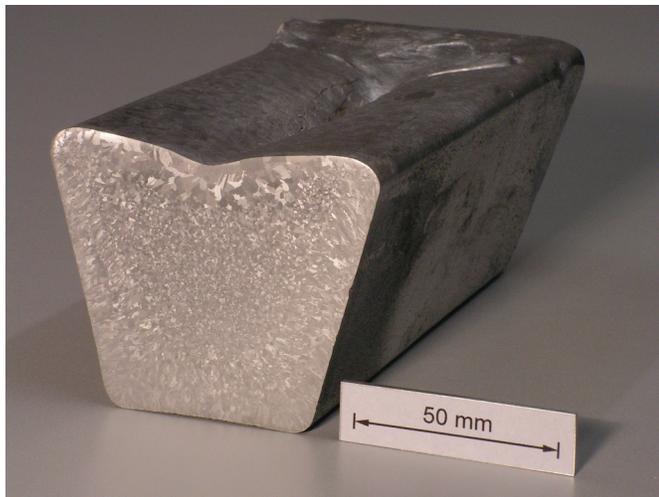
### Einkristall und Vielkristall im Alltag

Nahezu alle metallischen Werkstoffe unseres Alltags werden ganz am Anfang ihrer Entstehungsgeschichte in eine Form gegossen. Beim Erstarren gibt es zunächst viele kleine Keime, von denen aus Kristalle wachsen. Die Kristalle wachsen weiter, bis sie schließlich aneinanderstoßen und Korngrenzen zwischen sich bilden. Im gegossenen und auch im anschließend weiterverarbeiteten Werkstoff liegen dann viele Kristalle, also Körner vor. Man spricht von einem *vielkristallinen oder polykristallinen Werkstoff*.



Die Größe der Körner, die *Korngröße*, kann von wenigen Nanometern bis zu einigen Millimetern reichen. Bei den typischen metallischen Werkstoffen des Alltags und der Technik sind die Körner etwa 0,01 bis 0,1 mm groß und lassen sich erst nach geeigneter Präparation mit dem Licht- oder Elektronenmikroskop beobachten.

Vergleichsweise groß sind die Körner im aufgeschnittenen Gussblock in Abbildung 1.12, die lassen sich nach trickreicher Präparation schon mit dem Auge erkennen. Wie eine solche



**Abbildung 1.12:** Schnitt durch einen Gussblock aus einer Aluminiumlegierung, gesägt, geschliffen, poliert und angeätzt





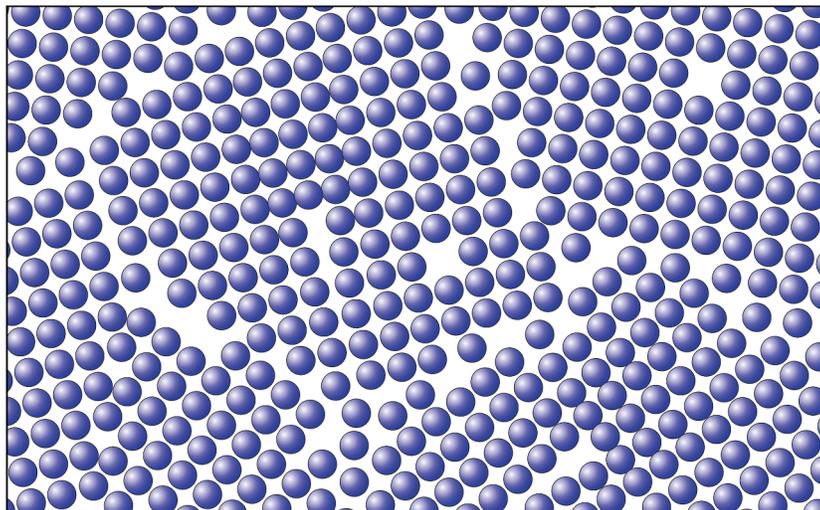
## 54 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Präparation genau abläuft, sehen Sie in unserem Video zur Metallografie (makroskopische Verfahren). Jedes der angeschnittenen Körner schimmert bei seitlichem Lichteinfall in einer anderen Tönung.

Ebenfalls groß sind die Körner bei vielkristallin aufgebauten Solarzellen. Wenn Sie in nächster Zeit die Gelegenheit haben, eine vielkristalline Solarzelle aus der Nähe anzusehen, dann suchen Sie einmal gezielt nach Körnern, Korngrenzen und Zwillingskorngrenzen. Das oben auf der Solarzelle aufgebrachte Gitter aus Silberstreifen müssen Sie sich wegdenken, das dient zur Abnahme der Ladungen auf der Oberseite. Die Körner reflektieren das Licht je nach Lichteinfall verschieden, zwischen den Körnern sind die Korngrenzen. Die Zwillingskorngrenzen erkennen Sie daran, dass sie wie mit dem Lineal gezogen sind und oft mehrfach parallel zueinander auftreten.

Und sind Ihnen schon die schimmernden Flächen an feuerverzinkten Teilen im Freien aufgefallen, beispielsweise an Laternenpfählen? Auch das sind Körner, sehr flache und sehr große. Der Regen trägt die Zinkschicht leicht ab, sodass die Zinkkristalle aufgeraut werden und je nach Lichteinfall verschieden schimmern. Die Kristalle im darunterliegenden Stahl sind aber sehr viel kleiner, nur etwa 0,1 mm groß.

Innerhalb der Körner befinden sich eine Vielzahl weiterer Gitterfehler, wie Leerstellen und Versetzungen. Bei extrem hoher Vergrößerung könnte ein Stück eines reinen Metalls etwa wie in Abbildung 1.13 dargestellt aussehen.



**Abbildung 1.13:** Atomanordnung in einem reinen Metall

Welche Kristallbaufehler erkennen Sie? Sehen Sie bitte genau hin. Ein kleiner Hinweis sei erlaubt: Schraubenversetzungen und Stapelfehler konnte ich nicht unterbringen, und Fremdatome sind natürlich auch nicht drin, es ist ja ein reines Metall.

Im Normalfall sind viele kleine Körner im Werkstoff absolut erwünscht, sie sorgen für gute Festigkeit und Zähigkeit. Für einige Anwendungen, zum Beispiel bei Halbleitern oder bei





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 55

Turbinenschaufeln für höchste Einsatztemperaturen, werden jedoch Werkstücke benötigt, die aus einem einzigen Kristall, einem Einkristall, bestehen:

- ✓ Bei den *einkristallinen Turbinenschaufeln* möchte man das Korngrenzengleiten, also das Abrutschen der Korngrenzen gegeneinander ausschalten, das bei sehr hohen Temperaturen auftritt.
- ✓ Bei den *Halbleitern* sind alle linien- und flächenförmigen Kristallbaufehler unerwünscht, da sie zu Fehlfunktionen führen können.

Für die Herstellung von Einkristallen gibt es übrigens mehrere Möglichkeiten. Meistens kühlt man eine Schmelze sehr langsam und erschütterungsfrei ab, dann kann ein einziger Kristall in aller Ruhe wachsen. Das ist wie bei uns Menschen: Wollen wir etwas Besonderes und ziemlich Perfektes machen, brauchen wir Zeit und Sorgfalt dazu.

Das war's zum Thema Atome, Bindungen und Kristalle. Sie werden sehen, dass Sie viel davon gebrauchen können, wenn es an die nächsten Kapitel geht. Und damit das auch gut klappt mit den nächsten Kapiteln, gibt es nachfolgend allerhand Aufgaben zum Üben.

# Übungsaufgaben zum Kapitel 1

## Aufgaben zu Atomen und ihren Bindungen

### Aufgabe 1

Wie sind die Atome in ihrem Inneren aufgebaut? Gehen Sie nur ganz grob darauf ein, die detaillierte Beschreibung überlassen wir der Atomphysik.

### Aufgabe 2

- a) Beschreiben Sie den Begriff *Bindung zwischen Atomen* mit einigen grundlegenden Überlegungen. Was passiert, wenn man zwei Atome eines Werkstoffs sich gedanklich langsam annähern lässt und die Kräfte zwischen ihnen misst?
- b) Was wäre der Fall, wenn es zwischen Atomen nur abstoßende Kräfte gäbe?

### Aufgabe 3

- a) Zeichnen Sie ein sinnvolles Diagramm, das die Kräfte zwischen zwei Atomen eines Werkstoffs in Abhängigkeit des Atomabstands darstellt. Beschriften Sie die Achsen und alle eingezeichneten Kurven korrekt.
- b) Welche zwei wichtigen Werkstoffeigenschaften lassen sich aus diesem Diagramm entnehmen?
- c) Zeichnen Sie in das Diagramm ein, wo und wie man diese Eigenschaften ablesen kann.



## 56 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

# Aufgaben zu Atomanordnung, Kristallen und Polymorphie

### Aufgabe 4

- Was versteht man unter *amorpher Atomanordnung* bei Werkstoffen?
- Wie nennt man ganz allgemein Werkstoffe mit amorpher Atomanordnung auch noch, insbesondere in wissenschaftlichen Kreisen?
- Bei welchen drei Werkstoffgruppen liegt eine amorphe Atomanordnung vor?
- Wie erreicht man, dass bei diesen Werkstoffen die Atomanordnung amorph ist (wie stellt man sie her)?
- Und was ist das Gegenteil der amorphen Atomanordnung?

### Aufgabe 5

- Unter welchen Bedingungen kommt ein »locker« gepacktes Kristallgitter zustande?
- Und unter welchen Bedingungen entsteht ein dicht gepacktes?

### Aufgabe 6

- Welche drei *Kristallgitter* kommen bei den reinen Metallen am häufigsten vor?
- Fertigen Sie von jedem dieser drei Gitter eine sinnvolle, realistische Skizze an. Strengen Sie sich ruhig ein wenig an dabei, die Lage der Atome soll aus den Skizzen klar ersichtlich sein. Damit es nicht gar zu wild wird, nehmen Sie zunächst das »Drahtmodell« für Ihre Skizzen. Dabei stellen Sie die Atome kleiner dar, als sie es dem Abstand zueinander nach eigentlich sein sollten. Und die Bindungen zwischen den Atomen zeichnen Sie als Linien, das sind die gedachten Drahtstücke. Wer sich traut, kann im zweiten Schritt auch das Kugelmodell für die Skizzen ausprobieren, da nimmt man die Atome als starre, massive Kugeln an, die sich an bestimmten Stellen berühren.
- An welchen Stellen berühren sich nun die Atome? Gehen Sie auch hier wieder von der Vorstellung starrer, massiver Kugeln aus.
- Nennen Sie zu jedem der drei Kristallgitter mindestens zwei Beispiele für Metalle, die das jeweilige Kristallgitter aufweisen.
- Wenn Sie möchten, basteln Sie sich diese drei wichtigen Kristallgitter aus Tischtennisbällen, die Sie mit Alleskleber verbinden. Erst dadurch bekommt man ein wirklich gutes Gefühl für die Anordnung der Atome, man kann die Gitter dann im wahrsten Sinne des Wortes »begreifen«.



## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 57



Bei den nachfolgenden fünf Aufgaben ist es sinnvoll, wenn Sie sich die Atome als starre, massive Kugeln denken, die sich an bestimmten Stellen berühren. Natürlich ist das nicht in Wirklichkeit genau so, aber mit dieser einfachen Annahme kann man viele Erscheinungen näherungsweise deuten, und das hilft beim Verständnis.

Und noch etwas: Als *Elementarzelle* bezeichnet man (vereinfacht) den kleinsten Baustein eines Kristallgitters, aus dem man das ganze Kristallgitter durch einfaches Aneinanderreihen aufbauen kann. Bei kubischen Gittern ist sie das **Innere** desjenigen Würfels, der durch die Mittelpunkte der **Eckatome** gebildet wird.

Denken Sie eine Weile darüber nach, Sie brauchen diese Überlegungen für die nachfolgenden Übungsaufgaben. Ach was, noch besser ist es, Sie üben das gleich.

### Aufgabe 7

Zeichnen Sie die »echte« Elementarzelle des kubisch-raumzentrierten (krz) und des kubisch-flächenzentrierten (kfz) Kristallgitters, so gut Sie das hinbekommen.



Denken Sie sich die Gitter aus Holzkugeln aufgebaut. An den Berührungspunkten seien die Holzkugeln miteinander verleimt. Nun sägen Sie gedanklich von diesem Gittermodell außen all das weg, was nicht zur eigentlichen Elementarzelle gehört. Sie sägen also (mit einem sehr dünn gedachten Sägeblatt) entlang der Würfelseitenflächen jeweils genau durch die Mittelpunkte der Eckatome hindurch. Was übrig bleibt, ist ein Würfel, an dessen Ecken die Mittelpunkte der Eckatome sitzen.

Zugegeben, das ist schon recht knifflig, besonders beim kfz-Gitter. Auch ich musste mich bei der Lösung ganz schön anstrengen und bin ins Schwitzen geraten. Sinngemäß geht das übrigens bei allen anderen Kristallgittern und deren Elementarzellen.

Und jetzt gibt es was zum Rechnen. Fangen Sie mal mit Eisen an, dem am häufigsten verwendeten Metall.

### Aufgabe 8

Wie groß ist der Durchmesser von Eisenatomen bei Raumtemperatur, wenn die Kantenlänge der Elementarzelle (die nennt man Gitterkonstante) bekannt ist?



Die Kantenlänge der Elementarzelle ist bei kubischen Gittern der **Abstand der Mittelpunkte der Eckatome**. Er lässt sich übrigens vergleichsweise einfach und recht präzise mit Röntgenstrahlen messen. Führen Sie Ihre Rechnung ganz allgemein mit Variablen durch: Nennen Sie die Kantenlänge der Elementarzelle  $a$ . Und weil es Eisen ist, nehmen Sie noch den Index Fe für Eisen dazu, also  $a_{\text{Fe}}$ . Klingt gleich viel wissenschaftlicher. Und den Durchmesser der Eisenatome nennen Sie  $d_{\text{Fe}}$ .



## 58 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Führen Sie Ihre Rechnung logisch Schritt für Schritt durch, nennen Sie jeden Gedankengang Ihrer Rechnung klar.

Welcher Wert ergibt sich für den Atomdurchmesser bei  $a_{\text{Fe}} = 0,287 \text{ nm}$  ( $1 \text{ nm} = 1 \text{ Nanometer} = 10^{-9} \text{ Meter} = 1 \text{ millionstel Millimeter} = \text{arg klein}$ )?

Jetzt geht es ans Kupfer, ein wichtiges, schönes und fast schon edles Metall.

### Aufgabe 9

Wie groß ist der Durchmesser  $d_{\text{Cu}}$  von Kupferatomen bei Raumtemperatur, wenn die Kantenlänge der Elementarzelle  $a_{\text{Cu}}$  bekannt ist? Rechnen Sie ähnlich wie bei der vorhergehenden Aufgabe, nutzen Sie die dortigen Anmerkungen.

Welcher Wert ergibt sich für den Atomdurchmesser bei  $a_{\text{Cu}} = 0,361 \text{ nm}$ ?

Eine auf den ersten Blick kuriose, aber fürs Folgende wichtige Frage schließt sich an.

### Aufgabe 10

Wie viele Atome befinden sich anteilig in einer Elementarzelle

- a) des krz-Gitters und
- b) des kfz-Gitters?



Bevor Sie wie ein Pfeil losschießen – und möglicherweise danebentreffen – ein Hinweis: Es geht um die »echte« Elementarzelle. Also bei kubischen Gittern um das **Innere** desjenigen Würfels, der ... Sie wissen jetzt, was ich meine. Auch hier bitte logisch jeden Gedankenschritt klar nennen.

Die nachfolgende Aufgabe scheint vorrangig nur mit räumlicher Geometrie zu tun zu haben, aber auch hier reichen die Auswirkungen bis in die Praxis.

### Aufgabe 11

Wie groß ist die Packungsdichte

- a) des krz-Gitters und
- b) des kfz-Gitters?

Unter *Packungsdichte* versteht man den Anteil des Raumes in einem Gitter, den die Atome einnehmen, wenn man sich die Atome als starre massive Kugeln denkt. Man kann auch *Raumerfüllung* dazu sagen. Sie gibt an, wie viel Prozent eines Gitters aus massiven Kugeln besteht. Und der Rest, die Differenz zu 100 %, das ist dann »leerer Raum«.





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 59



Sie brauchen nicht einen Kristall mit zig Milliarden von Atomen zu nehmen, um diese Aufgabe zu meistern. Es reicht, wenn Sie die Elementarzelle heranziehen, die repräsentiert das ganze Gitter.

- ✓ Nennen Sie die Kantenlänge der Elementarzelle wieder allgemein  $a$ .
- ✓ Dann rechnen Sie das Volumen der gesamten Elementarzelle  $V_{EZ}$  aus.
- ✓ Anschließend bestimmen Sie das Volumen aller Atome  $V_{\text{Atome}}$  in der Elementarzelle.
- ✓ Und wenn Sie das Volumen aller Atome  $V_{\text{Atome}}$  durch das Volumen der Elementarzelle  $V_{EZ}$  dividieren, erhalten Sie die Raumerfüllung.

Sofern Sie alles richtig gemacht haben, müsste sich die Kantenlänge  $a$  herauskürzen. Damit auch alles richtig wissenschaftlich aussieht, taufen Sie die Packungsdichte  $\eta$  (kleines griechisches Eta). Natürlich kann man sie nennen, wie man möchte, aber diese Bezeichnung, dieses *Symbol*, nimmt man oft.

Und wofür sind die Kenntnisse zu den Kristallgittern überhaupt gut?

### Aufgabe 12

Eigentlich wirkt sich die Art des Kristallgitters auf alle Eigenschaften der metallischen Werkstoffe aus. Welche zwei wichtigen Eigenschaften hängen aber besonders vom Kristallgitter ab? Können Sie dazu je ein Beispiel für die Auswirkung in der Praxis nennen?

Hier könnten sich noch zig weitere Aufgaben zu den Kristallgittern anschließen, aber die betreffen eher die eingefleischten Experten der Materialwissenschaften. Es gibt aber noch zwei Punkte, die mir wichtig erscheinen:

- ✓ die Änderung der Kristallart, die *Polymorphie*, und
- ✓ die *Kristallbaufehler*.

Beide Erscheinungen haben fantastische Auswirkungen in der Praxis. Legen Sie los mit der Polymorphie.

### Aufgabe 13

- a) Was versteht man allgemein unter Polymorphie?
- b) Nennen Sie zwei oder drei Beispiele für metallische Elemente, die **keine** Polymorphie aufweisen (jedenfalls nicht unter halbwegs üblichen Bedingungen, wir lassen die Kirche im Dorf). Und jetzt bitte noch ein oder zwei Beispiele für metallische Elemente, die polymorph sind.





## 60 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

- c) Erläutern Sie die Polymorphie des Elementes Eisen anhand eines sinnvollen, beschrifteten Diagramms.
- d) Welche praktische Bedeutung hat die Polymorphie des Eisens?

### Aufgabe 14

Wenn nun Eisen polymorphe Umwandlungen aufweist, was Sie sicherlich soeben richtig beschrieben haben, und die Kristallgitter des  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Eisens verschiedene Packungsdichten haben, was Sie sicherlich ebenfalls richtig ausgerechnet haben, was müsste denn dann bei der Kristallgitterumwandlung mit dem **Volumen und der Länge** eines Eisenstabs passieren? Für diejenigen unter Ihnen, die noch etwas mathematisch tüfteln wollen: Wie groß ist die prozentuale Volumenänderung (man nennt sie auch ganz korrekt relative Volumenänderung) bei der Umwandlung des  $\alpha$ -Eisens in das  $\gamma$ -Eisen?

So, und jetzt geht es an die *Kristallbaufehler*, auch *Gitterfehler* genannt. Nichts ist perfekt, und auch den Kristallen passiert so allerhand. Und das Schöne an den Kristallbaufehlern ist, dass die Welt ohne sie viel ärmer wäre. Irgendwie erinnert mich das an uns Menschen, was wären wir ohne unsere Fehler ...

## Aufgaben zu Kristallbaufehlern und was sie so im Alltag anrichten

### Aufgabe 15

Wie teilt man die Kristallbaufehler sinnvoll in verschiedene Arten ein? Versuchen Sie, eine Gliederungsübersicht aufzustellen, nennen Sie die Kristallbaufehler.

### Aufgabe 16

Nennen Sie drei verschiedene **null**dimensionale Kristallbaufehler mit Namen. Fertigen Sie von jedem der genannten Gitterfehler eine sinnvolle Skizze an, und nennen Sie ihre Bedeutung in der Werkstofftechnik.

### Aufgabe 17

- a) Nennen Sie einen **eindimensionalen** Kristallbaufehler mit Namen.
- b) Welche zwei Untervarianten gibt es davon?
- c) Fertigen Sie von einer der Untervarianten eine sinnvolle Skizze an.
- d) Wie könnte man diesen Kristallbaufehler (theoretisch) aus einem perfekten Kristall erzeugen?
- e) Nennen Sie die Bedeutung dieses Kristallbaufehlers in der Werkstofftechnik.





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 61

### Aufgabe 18

- Erläutern Sie den üblichsten Mechanismus der plastischen Verformung von Metallkristallen anhand von fünf Skizzen.
- Warum fällt den metallischen Werkstoffen gerade dieser Mechanismus leicht? Mit »leicht fällt« meine ich, dass man meistens nur geringe mechanische Spannungen braucht, um ihn in Gang zu setzen, ihn zu aktivieren.

### Aufgabe 19

Nennen Sie die drei wichtigsten **zweidimensionalen** Kristallbaufehler. Fertigen Sie von jedem der genannten Gitterfehler eine sinnvolle Skizze an und nennen Sie die Bedeutung in der Werkstofftechnik.

### Aufgabe 20

- Wie sind die meisten metallischen Werkstoffe des Alltags aufgebaut? Handelt es sich eher um ein- oder vielkristalline Werkstoffe? Sieht man ihnen das an?
- Bei welchen Beispielen aus dem Alltag kann man einzelne Kristalle mit dem bloßen Auge erkennen?
- In welchen Fällen sind Werkstücke aus einem einzigen Kristall, die sogenannten Einkristalle, sinnvoll?

So, das soll zunächst reichen. Wenn Sie diese Aufgaben ohne zu spicken gelöst haben, dann sind Sie schon ganz gut gewappnet. Gewappnet für eine Klausur, für den betrieblichen Alltag in der Firma und natürlich für einen abschließenden Test. Ich habe da einige konkrete, bewusst bunt gemischte Behauptungen vorbereitet, die entweder richtig sind oder nicht. Testen Sie sich, haken Sie bei den Behauptungen an, ob sie zutreffend sind oder nicht.

## Richtig oder nicht richtig?

### Aufgabe 21

Behauptung	Richtig	Nicht richtig
a) Leerstellen liegen in allen metallischen Kristallen vor.		
b) In Gläsern sind die Atome regellos angeordnet.		
c) Versetzungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes.		
d) Ein Werkstück aus S235JR mit wenigen Korngrenzen ist (bei Raumtemperatur) fester als dasselbe Werkstück mit vielen Korngrenzen.		
e) Die elastische Verformung von Kristallen läuft über die Bewegung von Versetzungen ab.		



## 62 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Behauptung	Richtig	Nicht richtig
f) Korngrenzen zählen zu den eindimensionalen Kristallbaufehlern.		
g) Die Bindungskräfte zwischen den Atomen eines Werkstoffs wirken sich auf den E-Modul des Werkstoffs aus.		
h) Das Kristallgitter von Nickel weist anteilig 2 Atome pro Elementarzelle auf.		
i) Zwillingskorngrenzen zählen zu den eindimensionalen Kristallbaufehlern.		
j) Im Stahl S235JR sind die Atome bei Raumtemperatur amorph angeordnet.		
k) Die plastische Verformung der metallischen Werkstoffe findet normalerweise über die Bewegung von Versetzungen im Kristallgitter statt.		
l) Chrom weist bei Raumtemperatur ein kubisch-raumzentriertes Gitter auf.		
m) Nickel weist bei Raumtemperatur ein kubisch-flächenzentriertes Gitter auf.		
n) Das Kristallgitter von Chrom weist anteilig 2 Atome/Elementarzelle auf.		
o) Leerstellen zählen zu den eindimensionalen Kristallbaufehlern.		
p) Substitutionsatome sitzen statt eines regulären Atoms auf einem normalen Gitterplatz.		
q) Aluminium weist polymorphe Umwandlungen auf.		
r) Das Kristallgitter von Eisen bei Raumtemperatur weist anteilig 4 Atome/Elementarzelle auf.		
s) Korngrenzen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes.		
t) Das kfz-Kristallgitter weist anteilig 4 Atome/Elementarzelle auf.		
u) Leerstellen erleichtern das Diffundieren von Atomen im Kristallgitter.		
v) Eisen weist bei Raumtemperatur ein kubisch-raumzentriertes Gitter auf.		
w) Zwischengitteratome sitzen statt eines regulären Atoms auf einem normalen Gitterplatz.		

## Antworten zu den Aufgaben in diesem Kapitel

### Lösung zur Aufgabe 1

Atome bestehen aus einem schweren positiv geladenen Atomkern und leichten negativ geladenen Elektronen, die um den Atomkern »kreisen«. Die Elektronen bilden eher eine





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 63

diffuse »Wolke«, sodass ein Atom äußerlich ein »weiches«, überwiegend leeres Gebilde darstellt. Dann gibt es noch die Quanteneffekte ...

### Lösung zur Aufgabe 2

- a) Bindungen entstehen durch anziehende und abstoßende Kräfte zwischen den Atomen. Beide Kräfte wirken gleichzeitig; bei kleinen Atomabständen überwiegt die abstoßende, bei großen Abständen die anziehende Kraft, insgesamt kommt ein stabiler Gleichgewichtszustand zustande.
- b) Es gäbe nur Gase auf unserer Welt.

### Lösung zur Aufgabe 3

- a) Das Diagramm finden Sie in Abbildung 1.1.
- b) und c) Die zwei Werkstoffeigenschaften sind die *theoretische Zugfestigkeit* und die *elastischen Eigenschaften* (Elastizitätsmodul).

### Lösung zur Aufgabe 4

- a) Eine regellose Anordnung der Atome (wie die Kartoffeln im Sack).
- b) Das sind die *Gläser* (selbst dann, wenn man nicht durch sie hindurchsehen kann).
- c) Bei den *anorganischen Gläsern* (den »normalen«, wie Fensterglas), bei den *metallischen Gläsern* (durch die man übrigens nicht hindurchsehen kann) und den *amorphen Kunststoffen* (bei denen sind die Moleküle regellos angeordnet).
- d) Meistens durch ausreichend schnelle Abkühlung aus der Schmelze (»Einfrieren« der Atomanordnung, wie sie in der Schmelze vorliegt).
- e) Die regelmäßige Anordnung, die kristalline, da bilden die Atome ein regelmäßiges Kristallgitter (überwiegend jedenfalls, wenn man von den Kristallbaufehlern absieht).

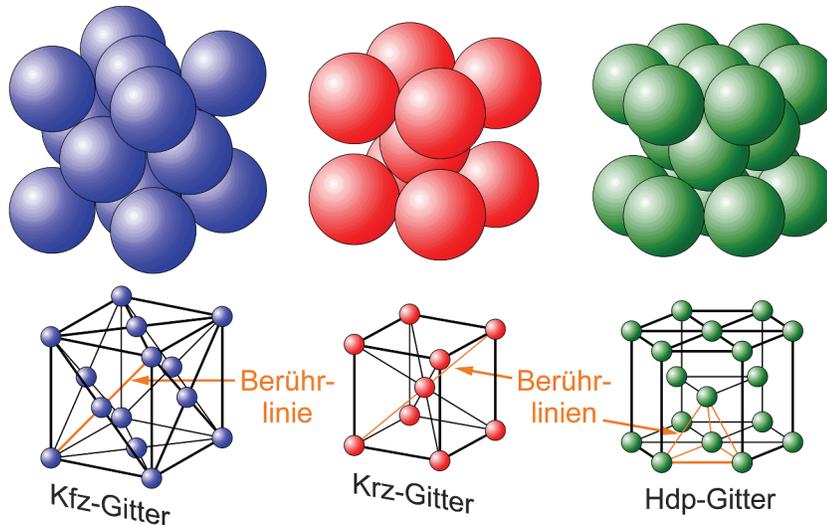
### Lösung zur Aufgabe 5

- a) Ein »locker« gepacktes Kristallgitter entsteht, wenn die Atome »eigenwillig« sind und Bindungen zu Nachbaratomen nur in bestimmten Richtungen eingehen, beispielsweise beim Kohlenstoff im Diamant. »Locker gepackt« bedeutet übrigens nicht, dass diese Kristallgitter zwangsläufig besonders schlecht oder schwach sind.
- b) Ein dicht gepacktes Kristallgitter entsteht bei denjenigen Atomen und Bindungsarten, bei denen die Richtung der Bindungen zu den Nachbaratomen nicht so wichtig ist, und die möglichst viele Bindungen eingehen wollen; dies liegt bei den meisten Metallen vor.

## 64 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

## Lösung zur Aufgabe 6

- a) Am häufigsten: kubisch-flächenzentriertes (kfz) Gitter, kubisch-raumzentriertes (krz) Gitter und hexagonal dichtest gepacktes (hdp) Gitter.
- b) Das sind die »Skizzen« der Kristallgitter:



- c) Beim kfz-Gitter berühren sich die Atome entlang der **Flächendiagonalen** der Elementarzelle (und in noch anderen Richtungen), beim krz-Gitter entlang der **Raumdiagonalen**. Beim hdp-Gitter bilden die »Berührlinien« die Kanten eines **Tetraeders**, einem räumlichen Gebilde aus vier gleichseitigen Dreiecken.
- d) **Kfz**-Struktur haben: Al, Cu, Ni; **krz**-Struktur weisen auf: Cr, Mo, Fe (bei Raumtemperatur); **hdp**-Struktur: Zn, Mg.
- e) So sehen meine Tischtennisball-Gittermodelle aus:

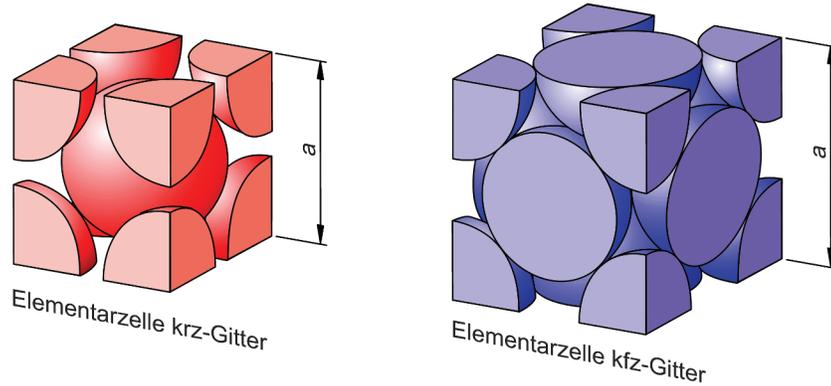




## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 65

### Lösung zur Aufgabe 7

Das sind die »echten« Elementarzellen:



### Lösung zur Aufgabe 8

- ✓ **Erste Überlegung:** Welche Kristallstruktur hat Eisen bei Raumtemperatur? Es ist die krz-Struktur.
- ✓ **Zweite Überlegung:** In welcher Richtung berühren sich die Atome, wo gibt es Lücken? Die Atome berühren sich entlang der **Raumdiagonalen**. Deren Länge können Sie logisch nach dem Satz des Pythagoras berechnen oder aus einer Formelsammlung entnehmen, sie beträgt  $\sqrt{3} \cdot a_{\text{Fe}}$ . Zwischen zwei benachbarten Eckatomen bleibt eine kleine Lücke.
- ✓ **Dritte Überlegung:** Wie viele Atomdurchmesser passen in eine Raumdiagonale? Das sind zwei (ein halber, ein ganzer und noch ein halber, also  $2d_{\text{Fe}}$ ).
- ✓ Und jetzt die **allgemeine Lösung**. Mathematisch lautet die zweite und dritte Überlegung:

$$\text{Länge der Raumdiagonale} = \text{zwei Atomdurchmesser: } \sqrt{3} \cdot a_{\text{Fe}} = 2d_{\text{Fe}}$$

$$\text{Nach } d_{\text{Fe}} \text{ aufgelöst erhalten Sie: } d_{\text{Fe}} = \frac{\sqrt{3}}{2} a_{\text{Fe}}$$

- ✓ **Ganz konkret** ergibt sich:  $d_{\text{Fe}} = \frac{\sqrt{3}}{2} 0,287 \text{ nm} = 0,249 \text{ nm}$ .

### Lösung zur Aufgabe 9

Die Lösung ist analog zur vorhergehenden Aufgabe, daher sind die Erklärungen etwas gekürzt.

- ✓ Die Kristallstruktur ist kfz.
- ✓ Die Atome berühren sich entlang der Flächendiagonalen, sie ist  $\sqrt{2} \cdot a_{\text{Cu}}$  lang.





## 66 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

- ✓ In die Flächendiagonale passen wieder ein halber, ein ganzer und noch ein halber Atomdurchmesser, das sind zwei.
- ✓ Mathematisch allgemein:  $\sqrt{2} \cdot a_{\text{Cu}} = 2d_{\text{Cu}}$ , nach  $d_{\text{Cu}}$  aufgelöst:  $d_{\text{Cu}} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{\text{Cu}}$ .
- ✓ Konkret:  $d_{\text{Cu}} = \frac{\sqrt{2}}{2} 0,361 \text{ nm} = 0,255 \text{ nm}$ .

### Lösung zur Aufgabe 10

Sie müssen die Zahl der Atome ausrechnen, die sich im **Inneren** der Elementarzelle befinden. Bei denjenigen Atomen, die ganz im Inneren sind, ist das kein Problem, die gehören **vollständig** dazu. Diejenigen Atome, die nicht ganz im Inneren sind, nehmen Sie **anteilig**. Anschaulich sieht man das auch ganz gut anhand der Skizzen zur »echten« Elementarzelle.

#### a) Krz-Gitter

- Das zentrale Atom ist ganz enthalten, ergibt 1 Atom.
- Die Eckatome zählen aber nur zu je 1/8 zur Elementarzelle, und weil es 8 davon hat, und  $8 \cdot \frac{1}{8} = 1$  ist, ergibt das insgesamt wieder 1 Atom.
- In der Summe sind also  $1 + 1 = 2$  **Atome** in der Elementarzelle.

#### b) Kfz-Gitter

- 8 Eckatome zu je 1/8 ergeben 1 Atom.
- Die flächenzentrierten Atome zählen je zur Hälfte zur Elementarzelle, und weil es 6 davon gibt, erhält man  $6 \cdot \frac{1}{2} = 3$ , also 3 Atome.
- In der Summe sind  $1 + 3 = 4$  **Atome** in der Elementarzelle enthalten.

Kurioserweise sitzt beim kfz-Gitter kein Atom vollständig in der Elementarzelle drin.

### Lösung zur Aufgabe 11

#### a) Krz-Gitter

- Das **Volumen der Elementarzelle** ist das Würfelvolumen:

$$V_{\text{EZ}} = a^3 \quad (1)$$

- Als Nächstes nutzen Sie den Zusammenhang zwischen Atomdurchmesser  $d$  und  $a$  aus den vorigen Aufgaben. Die Indizes lassen Sie weg, es geht ja nicht nur ums Eisen:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} a \quad (2)$$





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 67

- Jedes Atom ist eine Kugel, und das Kugelvolumen beträgt allgemein (in einer Formelsammlung nachsehen)  $V = \frac{\pi}{6}d^3$ . In der krz-Elementarzelle sind zwei Atome enthalten. Mit Gleichung (2) erhalten Sie für das **Volumen aller Atome** in der Elementarzelle:

$$V_{\text{Atome}} = 2 \frac{\pi}{6} d^3 = 2 \frac{\pi}{6} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} a \right)^3 = \frac{\pi \sqrt{3}}{8} a^3 \quad (3)$$

- Nun sind Sie fast fertig. Nehmen Sie die Gleichungen (1) und (3), dann ergibt sich die Packungsdichte im krz-Gitter:

$$\eta_{\text{krz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{V_{\text{EZ}}} = \frac{\frac{\pi \sqrt{3}}{8} a^3}{a^3} = \frac{\pi \sqrt{3}}{8}$$

- Und wenn Sie diesen Ausdruck konkret ausrechnen, erhalten Sie:

$$\eta_{\text{krz}} = \frac{\pi \sqrt{3}}{8} = 0,680$$

Das bedeutet, dass im krz-Gitter der mit Atomen ausgefüllte Anteil 0,680 ist, das sind 68,0 %.

### a) Kfz-Gitter

- Das **Volumen der Elementarzelle** ist wieder

$$V_{\text{EZ}} = a^3 \quad (1)$$

- Den Zusammenhang zwischen Atomdurchmesser  $d$  und  $a$  im kfz-Gitter kennen Sie auch schon:

$$d = \frac{\sqrt{2}}{2} a \quad (2)$$

- Jedes Atom hat ein Volumen von  $V = \frac{\pi}{6}d^3$ , in der kfz-Elementarzelle sind vier davon enthalten. Für das **Volumen aller Atome** in der Elementarzelle erhalten Sie mit Gleichung (2):

$$V_{\text{Atome}} = 4 \frac{\pi}{6} d^3 = 4 \frac{\pi}{6} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} a \right)^3 = \frac{\pi \sqrt{2}}{6} a^3 \quad (3)$$

- Die Packungsdichte im kfz-Gitter bekommen Sie mit den Gleichungen (1) und (3):

$$\eta_{\text{kfz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{V_{\text{EZ}}} = \frac{\frac{\pi \sqrt{2}}{6} a^3}{a^3} = \frac{\pi \sqrt{2}}{6}$$

- Als Zahlenwert:  $\eta_{\text{kfz}} = \frac{\pi \sqrt{2}}{6} = 0,740$ .





## 68 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

74,0 % des Raums sind also »erfüllt«, und zwar mit starren, massiven Kugeln, das war die vereinfachende Annahme. Mehr geht nicht, das ist die theoretisch und praktisch dichtest mögliche Packung von Kugeln im Raum.

### Lösung zur Aufgabe 12

Das sind die Zähigkeit und die Fähigkeit, Legierungen zu bilden.

- ✓ Werkstoffe mit kfz-Gitter (wie Aluminium) sind auch bei sehr tiefen Temperaturen noch zäh, sie lassen sich noch gut plastisch verformen. Krz (beispielsweise Eisen) und hdp aufgebaute Werkstoffe (wie Zink) werden zu tiefen Temperaturen hin spröde.
- ✓ Die Fähigkeit, Legierungen zu bilden, unterscheidet sich beim kfz- und krz-Gitter sehr. Die Unterschiede sieht man besonders deutlich beim Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm.

### Lösung zur Aufgabe 13

- a) Unter Polymorphie versteht man die Erscheinung, dass ein Werkstoff in Abhängigkeit der Temperatur (und auch des Drucks) verschiedene Kristallgitter aufweist.
- b) Keine Polymorphie haben Aluminium, Kupfer, Chrom. Polymorph sind Eisen und Titan.
- c) Das (hoffentlich sinnvolle) Diagramm finden Sie in Abbildung 1.6.
- d) Die Polymorphie ist die Grundlage für viele Wärmebehandlungen der Stähle, beispielsweise das Härten.

### Lösung zur Aufgabe 14

Der Eisenstab müsste sich bei der Umwandlung vom  $\alpha$ - ins  $\gamma$ -Eisen schlagartig zusammenziehen, denn die Packungsdichte im kfz aufgebauten  $\gamma$ -Eisen ist deutlich höher als im krz aufgebauten  $\alpha$ -Eisen. Oder: Die gleiche Zahl von Atomen braucht dichter gepackt weniger Platz. Wenn man also die Länge eines Eisenstabs bei Temperaturerhöhung misst, so dehnt er sich zunächst »ganz normal« aus, so wie es (fast) alle Werkstoffe tun. Und wenn sich im Inneren das Kristallgitter von krz nach kfz ändert, dann äußert sich das in einer plötzlichen Längen- und Volumenabnahme. Das ist übrigens eine klasse Methode, Kristallgitterumwandlungen auf einfache Art zu messen.

Und nun zur relativen Volumenänderung bei der Umwandlung. Nennen Sie das Volumen des Stabs im krz-Gitter  $V_{\text{krz}}$ . Das Volumen im kfz-Gitter nennen Sie analog  $V_{\text{kfz}}$ . Die **relative Volumenänderung** ist dann:

$$\frac{\text{Volumenänderung}}{\text{ursprüngliches Volumen}} = \frac{\text{Volumen nachher} - \text{Volumen vorher}}{\text{Volumen vorher}} = \frac{V_{\text{kfz}} - V_{\text{krz}}}{V_{\text{krz}}} \quad (1)$$





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 69

Wie erhalten Sie jetzt  $V_{\text{kfz}}$  und  $V_{\text{krz}}$ ? Nehmen Sie hierzu die allgemeine Definition der Packungsdichte:

$$\eta = \frac{\text{Volumen aller Atome}}{\text{Volumen der Probe}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{V_{\text{kfz/krz}}}$$

Im **kfz-Gitter** ist die Packungsdichte  $\eta_{\text{kfz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{V_{\text{kfz}}}$ . Nach  $V_{\text{kfz}}$  aufgelöst erhalten Sie:

$$V_{\text{kfz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{\eta_{\text{kfz}}} \quad (2)$$

Im **krz-Gitter** ist die Packungsdichte  $\eta_{\text{krz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{V_{\text{krz}}}$ . Nach  $V_{\text{krz}}$  aufgelöst erhalten Sie:

$$V_{\text{krz}} = \frac{V_{\text{Atome}}}{\eta_{\text{krz}}} \quad (3)$$

Setzen Sie nun die beiden Gleichungen (2) und (3) in Gleichung (1) ein, so ergibt sich das gesuchte Resultat:

$$\text{Relative Volumenänderung} = \frac{V_{\text{kfz}} - V_{\text{krz}}}{V_{\text{krz}}} = \frac{\frac{V_{\text{Atome}}}{\eta_{\text{kfz}}} - \frac{V_{\text{Atome}}}{\eta_{\text{krz}}}}{\frac{V_{\text{Atome}}}{\eta_{\text{krz}}}} = \frac{\frac{1}{\eta_{\text{kfz}}} - \frac{1}{\eta_{\text{krz}}}}{\frac{1}{\eta_{\text{krz}}}} = \frac{\eta_{\text{krz}}}{\eta_{\text{kfz}}} - 1$$

Das Volumen der Atome  $V_{\text{Atome}}$  ist in beiden Kristallgittern gleich, jedenfalls nehmen wir das bei der Berechnung an. Die Größe  $V_{\text{Atome}}$  kürzt sich deswegen aus der oberen Gleichung heraus.

Das wäre die allgemeine Gleichung, und die können Sie sogar für jede Art der Polymorphie anwenden. Im Fall des Eisens setzen Sie jetzt noch die Ergebnisse der vorhergehenden Aufgaben für die Packungsdichte ein und erhalten dann:

$$\text{Relative Volumenänderung} = \frac{\eta_{\text{krz}}}{\eta_{\text{kfz}}} - 1 = \frac{\frac{\pi\sqrt{3}}{8}}{\frac{\pi\sqrt{2}}{6}} - 1 = \frac{3\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} - 1 = -0,0814$$

In Worten: Die relative Volumenänderung ist  $-0,0814$ . Oder prozentual ausgedrückt: Das Volumen schrumpft um 8,14 %. Tatsächlich misst man in Experimenten viel weniger Volumenschrumpfung; das ist ein Hinweis darauf, dass die Atome in Wirklichkeit eben doch keine starren, massiven Kugeln sind.

### Lösung zur Aufgabe 15

Man teilt sie ein in die *nulldimensionalen* (punktförmigen), die *eindimensionalen* (linienförmigen) und die *zweidimensionalen* (flächenhaften) Kristallbaufehler, die Gliederungsübersicht zeigt Abbildung 1.7.





## 70 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

### Lösung zur Aufgabe 16

Das sind die *Leerstellen*, *Zwischengitteratome* und *Substitutionsatome*, siehe Abbildung 1.8. Die Leerstellen ermöglichen die Diffusion; die Zwischengitter- und die Substitutionsatome treten bei Legierungen auf.

### Lösung zur Aufgabe 17

- a) Das ist die *Versetzung*.
- b) *Stufen- und Schraubenversetzung* sind die beiden Varianten.
- c) Wählen Sie die Stufenversetzung, die lässt sich leichter zeichnen, und ganz so umfangreich wie links in Abbildung 1.9 muss Ihre Skizze nicht aussehen.
- d) Durch Einfügen einer Halbebene von Atomen in einen perfekten Kristall. Oder durch das Gegenteil, das Herausnehmen einer Halbebene mit Neuknüpfen der Bindungen. Interessant ist, dass das Gegenteil zum (grundsätzlich) gleichen Ergebnis führt.
- e) Versetzungen ermöglichen es einem Kristall, sich plastisch zu verformen. Je nachdem, wie leicht oder schwer das geht, liegt ein weicher, weniger fester Werkstoff vor oder ein härterer, festerer.

### Lösung zur Aufgabe 18

- a) Der üblichste Mechanismus ist die Bewegung von Versetzungen; auch hier dürfen Ihre Skizzen einfacher sein als in Abbildung 1.10 dargestellt.
- b) Er fällt den Kristallen deswegen leicht, weil sie immer nur **eine** Reihe von Bindungen direkt am Kern lösen müssen, und nicht **alle** Bindungen innerhalb einer Kristallebene. Das ist so, als ob Sie ein ganzes Bündel von Stäben einzeln durchbrechen dürfen und nicht das ganze Bündel auf einmal.

### Lösung zur Aufgabe 19

Es sind die *Korngrenzen*, *Zwillingskorngrenzen* und *Stapelfehler*, wie in Abbildung 1.11 dargestellt. Die eigenen Handzeichnungen dürfen übrigens ruhig etwas vereinfacht sein.

Die Hauptbedeutung der zweidimensionalen Kristallbaufehler liegt in der Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften. Bei niedrigen Temperaturen (relativ zum Schmelzpunkt) wirken sie sich meistens günstig aus, bei höheren Temperaturen eher ungünstig.

### Lösung zur Aufgabe 20

- a) Da handelt es sich fast nur um vielkristalline Werkstoffe, und das sieht man ihnen meistens nicht an. Die Kristalle sind zu klein, um sie mit dem bloßen Auge zu sehen, außerdem muss man sie in geeigneter Weise sichtbar machen.
- b) Bei vielkristallinen Solarzellen und feuerverzinkten Teilen im Freien.





## KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 71

- c) Bei einkristallinen Turbinenschaufeln, die für höchste Anwendungstemperaturen vorgesehen sind, auch bei Halbleitern in der Elektrotechnik.

### Lösung zur Aufgabe 21

Beh.	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)	j)	k)	l)	m)	n)	o)	p)	q)	r)	s)	t)	u)	v)	w)
R.	✓	✓	✓				✓				✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	
N. r.				✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓		✓	✓					✓



