

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

Vielen Menschen, die ein Stück eines Werkstoffs in Händen 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 gemach, 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, 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.

32 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

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 Bindungs Kräfte

Jetzt stellen Sie sich bitte vor, Sie wären ein klitzekleiner Gnom, hätten zwei Super-Nano-pinzetten, mit denen Sie sich zwei Eisenatome aus dem gedachten Eisenstab herauspicken können, und hätten die Ehre, auf der internationalen Raumstation unter Schwerelosigkeit und bei Vakuum ein Experiment durchzuführen. Und das geht so:

- ✓ Sie packen das eine Atom mit der einen Pinzette in Ihrer linken Hand (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 nähern Sie diese beiden Atome langsam einander an und fühlen, welche Kräfte die beiden Atome aufeinander ausüben.

Mit welchen Kräften ist denn da zu rechnen?

KAPITEL 1 Von Atomen, Bindungen und Kristallen: Werkstoffe sind wunderschön 33

Zunächst einmal werden Sie vermuten, dass da eine abstoßende Kraft wirken muss. Das wäre doch zu erwarten, wenn man die Atome als runde, zusammengeballte Wattebüschle annimmt. Haben die Wattebüschle 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 Wattebüschle schließlich »massiv« berühren.

So kann man das mit den Wattebüschchen erklären.



Etwas wissenschaftlicher formuliert stoßen sich Atome deswegen ab, weil sich die jeweils negativ geladenen Elektronenhüllen nahe kommen 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.

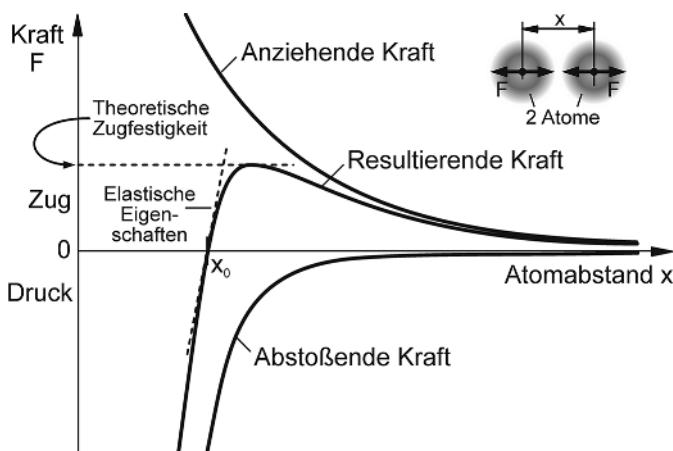


Abbildung 1.1: Bindungskräfte zwischen Atomen

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 mal 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.



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

34 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Es können je nach Atomsorte im Wesentlichen

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

Alles klar? Nein? Wundert mich nicht, das war nur eine kurze Aufzählung, um einen Eindruck zu 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. Bei großen Atomabständen überwiegt die anziehende Kraft, bei kleinen die abstoßende Kraft, wie Sie auch am Verlauf der resultierenden Kraft sehen. Die *resultierende Kraft* ist einfach die Summe aus abstoßender und anziehender Kraft.

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 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.

Und 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 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)

36 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

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

Bei 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 Atome 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?

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.

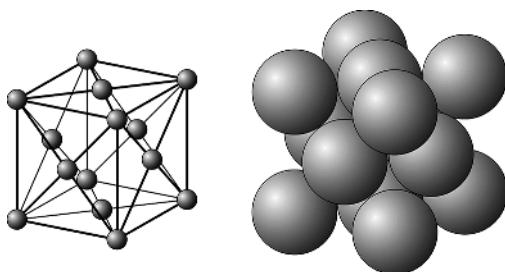


Abbildung 1.2: Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter

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.

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.

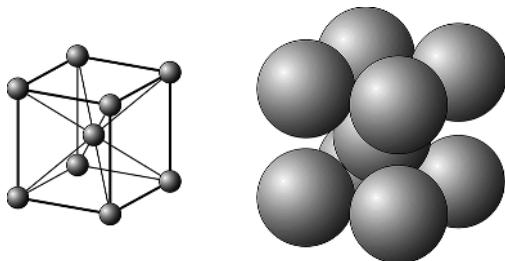


Abbildung 1.3: Das kubisch-raumzentrierte Kristallgitter

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.

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).

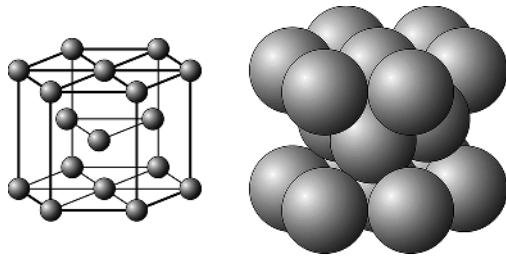


Abbildung 1.4: Das hexagonal dichtest gepackte Kristallgitter

Das ist so, als hätten Sie sieben Tischtennisbälle auf Ihrem Schreibtisch schön dicht aneinandergelegt 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 dichtestmögliche 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 eingebildetes Bild). Mit dem Rasterelektronenmikroskop aber kommt die volle Pracht heraus. Wunderschöne Kristallchen 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 her vorheben:

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

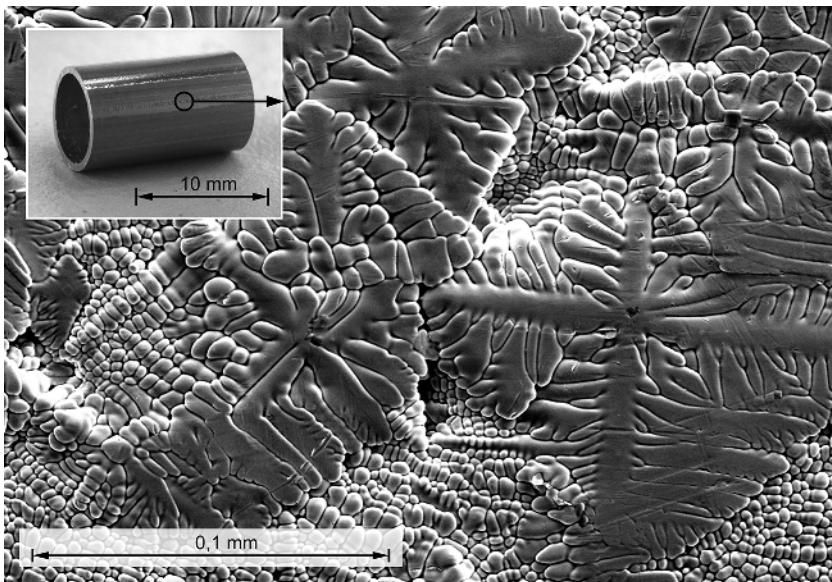


Abbildung 1.5: Blick auf die Oberfläche einer Schweißnaht aus einem rostfreien Stahl, aufgenommen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Also: Die Kristallgitter haben's in sich! Wenn Sie möchten, packen Sie die Aufgaben dazu im Übungsbuch 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).

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°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 langsam nach und nach und untersucht es laufend, so findet man heraus, dass es die kubisch-raumzentrierte Struktur zunächst beibehält.

40 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

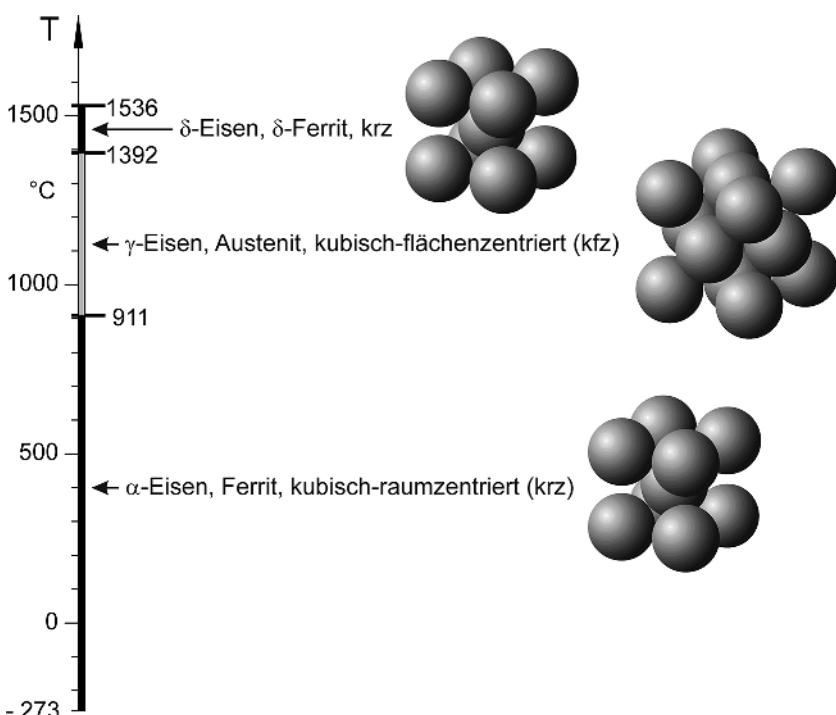


Abbildung 1.6: Polymorphie bei Eisen

Bei 911 °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 °C wieder in die krz-Struktur um, die dann bis zum Schmelzpunkt von 1536 °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 *α-Eisen* oder auch *Ferrit*, benannt nach dem lateinischen Namen für Eisen, Ferrum.
- ✓ Das kubisch-flächenzentriert aufgebaute Eisen heißt *γ-Eisen* oder *Austenit*, benannt zu Ehren von Sir William Chandler Roberts-Austen, einem britischen Metallurgen.
- ✓ Das kubisch-raumzentriert aufgebaute Eisen bei hohen Temperaturen heißt *δ-Eisen* oder *δ-Ferrit*. Es ist genau gleich wie das *α-Eisen*.

Und so ganz beiläufig: Die Artikel sind männlich, es heißt **der Ferrit** und **der Austenit**. Verzei-then Sie mir, wenn ich das anmerke, es ist oftmals nicht bekannt.

Wo das β -Eisen geblieben ist

Logischerweise käme nach α doch β und dann erst γ im griechischen Alphabet. Und wo ist dann das β -Eisen geblieben? Früher hat man geglaubt, das »unmagnetische«, genauer paramagnetische Eisen oberhalb von 769 °C hätte eine eigene Kristallstruktur, und hat es β -Eisen genannt. Später erst hat man festgestellt, dass die Kristallstruktur des β - und des α -Eisens gleich sind, nämlich kubisch-raumzentriert. Tja, und nachdem die Begriffe γ -Eisen und δ -Eisen schon so richtig eingebrennt waren bei den Wissenschaftlern, hat man sie belassen und das β -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 °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 Härteln. Mehr dazu finden Sie in Kapitel 14, und das Übungsbuch hat 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.

42 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

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.

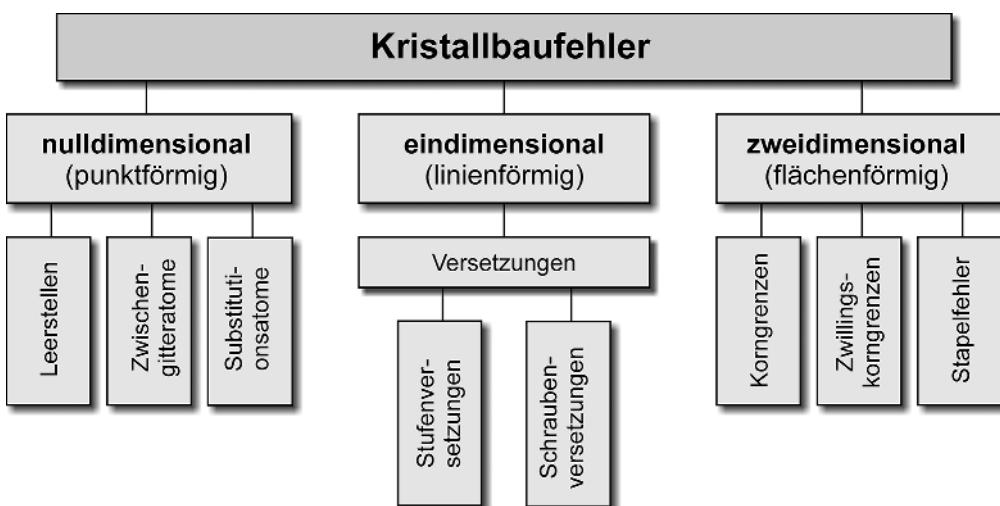


Abbildung 1.7: Gliederung der Kristallbaufehler

Nulldimensionale (punktformige) 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 »punktformig« verständlich. Drei Arten gibt es (siehe Abbildung 1.8).

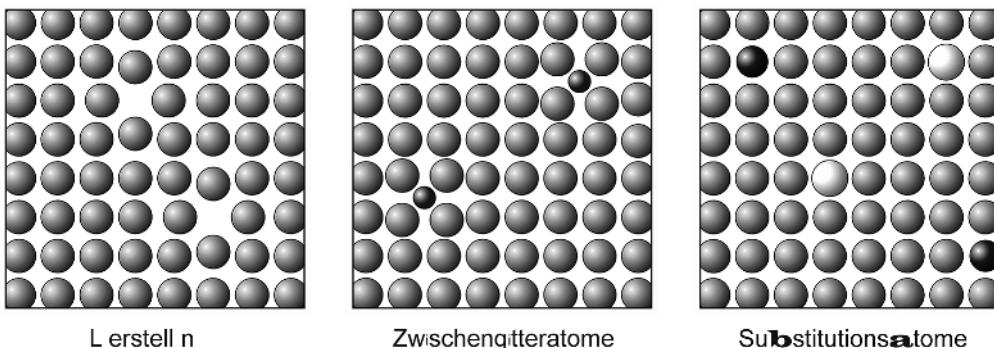


Abbildung 1.8: Nulldimensionale Kristallbaufehler

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 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 10000. Gitterplatz nicht besetzt, bei Raumtemperatur kommt manchmal auf 10^{12} Gitterplätze nur eine Leerstelle!

Ja, und was macht es denn aus, wenn da eben, was weiß ich, jeder zig-tausendste oder millionste 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.

44 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

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,

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).

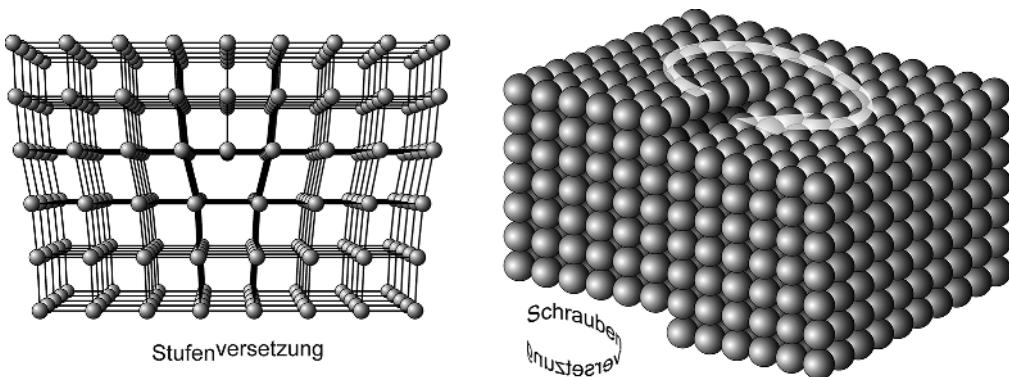


Abbildung 1.9: Stufenversetzung (links) und Schraubenversetzung (rechts)

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!

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 spiraling

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.

46 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

Stellen Sie sich vor, Sie wären ein winzig kleiner Gnom in einem Raumschiff kleiner als ein Atom 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 Parkhausaufahrt?

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

Versetzen 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.

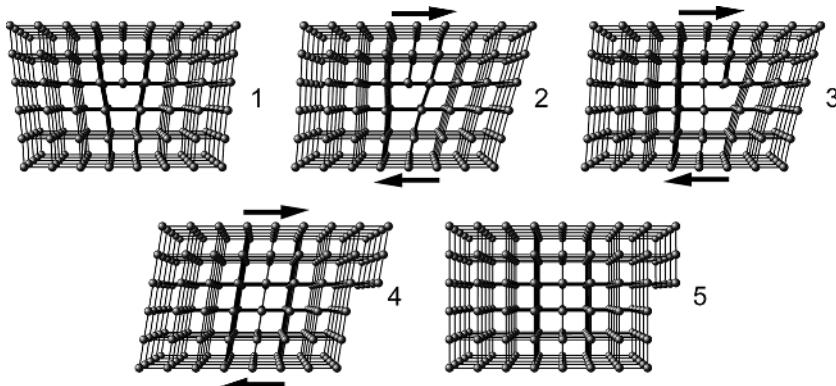


Abbildung 1.10: Mechanismus der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegung

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 Milliar-

den und Abermilliarden von neuen Versetzungen erzeugt. Nur sehen können Sie die mit dem bloßen Auge nicht, dazu braucht man geeignete Elektronenmikroskope.

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).

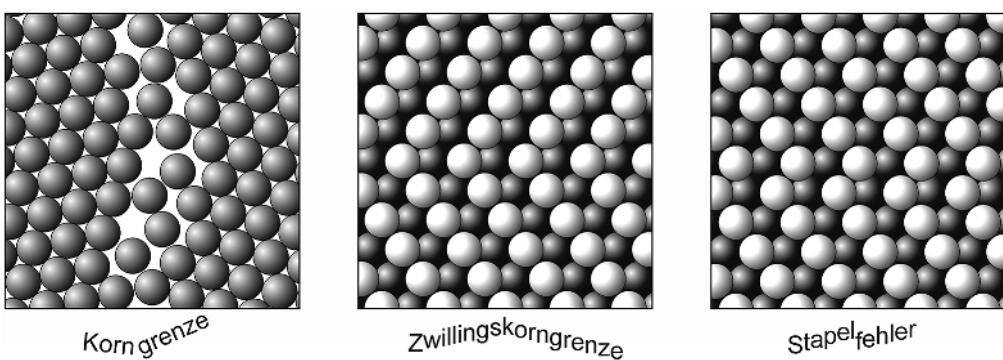


Abbildung 1.11: Zweidimensionale Kristallbaufehler

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).

48 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis



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 solchen 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 und fünfte Lage von Atomen stapeln Sie jeweils etwas nach links versetzt. Und bei der sechsten Lage passiert Ihnen ein Fehler, die 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 die Präparation genau abläuft, sehen Sie in unserem Video zur Metallografie (makroskopische Verfahren). Jedes der angeschnittenen Körner schimmert bei seitlichem Lichteinfall in einer anderen Tönung.

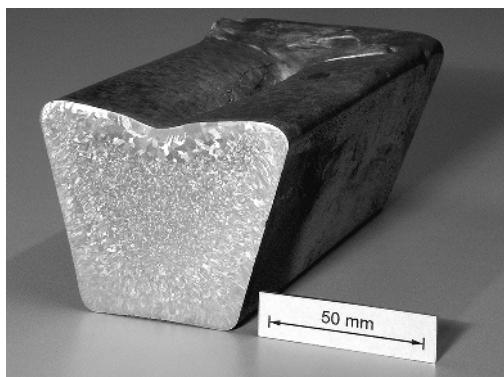


Abbildung 1.12: Schnitt durch einen Gussblock aus einer Aluminiumlegierung, gesägt, geschliffen, poliert und angeätzt

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 Zwillingskorgrenzen erkennen Sie daran, dass sie wie mit dem Lineal gezogen sind und oft mehrfach parallel zueinander auftreten.

50 TEIL I Ausgewählte Grundlagen als Basis

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.

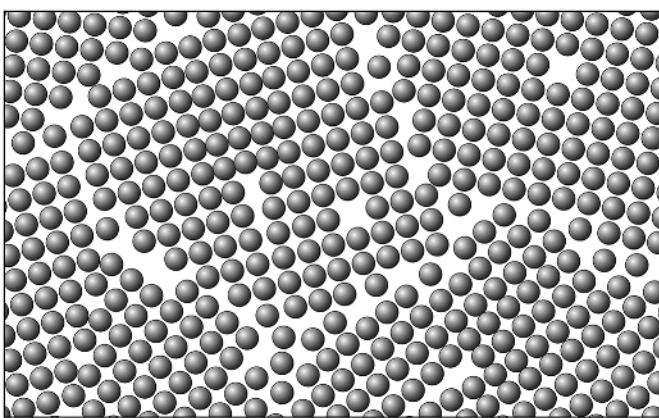


Abbildung 1.13: Atomanordnung in einem reinen Metall

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 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 kühlst 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.