

Praktikum in Werkstoffkunde

95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik

Bearbeitet von
Eckard Macherauch, Hans-Werner Zoch

12., überarbeitete und erweiterte Auflage 2015. Buch. XXIV, 766 S. Gebunden
ISBN 978 3 658 05037 5
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

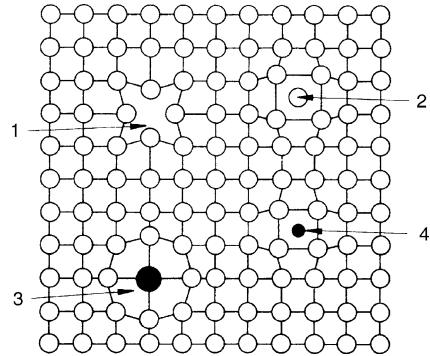
Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

2.1 Grundlagen

Die Metalle und Metall-Legierungen, die in der Technik als Konstruktionswerkstoffe benutzt werden, sind aus relativ kleinen, gegeneinander unterschiedlich orientierten Körnern oder Kristalliten aufgebaut. Man spricht von Vielkristallen. Jedes ihrer Körner umfasst für sich eine dreidimensionale periodische Anordnung von Atomen, stellt also ein Raumgitter dar. Homogene Vielkristalle besitzen nur eine Kornart, heterogene dagegen mehrere. Gleichartige Körner sind durch sog. Korngrenzen, ungleichartige durch sog. Phasengrenzen voneinander getrennt. Die mittleren Linearabmessungen der Körner können von Bruchteilen eines μm bis zu mehr als $10^4 \mu\text{m}$ reichen. Selbst bei reinen Metallen sind die Körner, wie viele Untersuchungen gezeigt haben, nicht vollkommen regelmäßig und störungsfrei aufgebaut. Sie besitzen zwar (vgl. V1) über mikroskopische Bereiche hinweg eine kristallographisch regelmäßige Struktur, haben also im Mittel z. B. eine kubisch flächenzentrierte (kfz), kubisch raumzentrierte (krz) oder hexagonale (hex) Anordnung der Atome, können jedoch in submikroskopischen Bereichen mehr oder weniger starke Abweichungen (Fehlorderungen) von einem idealen Atomgitteraufbau zeigen. Man spricht von Gitterstörungen, deren Art und Häufigkeit durch Herstellung, Behandlung und Beanspruchung der Werkstoffe bestimmt werden. Auf der Beherrschung und gezielten Ausnutzung der Eigenschaften bestimmter Gitterstörungen beruhen viele Erfolge der modernen Werkstofftechnologie. Die auftretenden Abweichungen von der strengen dreidimensionalen Periodizität der Atomanordnung in einem Raumgitter lassen sich unter rein geometrischen Gesichtspunkten in

- 0-dimensionale oder punktförmige,
- 1-dimensionale oder linienförmige,
- 2-dimensionale oder flächenförmige und
- 3-dimensionale oder räumlich ausgedehnte Gitterstörungen

Abb. 2.1 Punktförmige Gitterstörungen. 1 Leerstelle, 2 Zwischengitteratom, 3 Substitutionsatom, 4 Interstitutionsatom

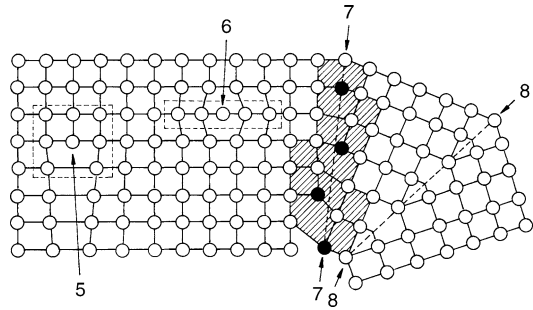


unterteilen. Als Dimensionen sind dabei jeweils diejenigen Ausdehnungen der Gitterstörungen zu verstehen, die atomare Abmessungen überschreiten. Linienförmige Gitterstörungen besitzen beispielsweise in einer Richtung große, in den beiden dazu senkrechten Richtungen dagegen nur atomare Abmessungen. Man weiß heute, dass es nur eine begrenzte Zahl von Gitterstörungstypen gibt. Die für werkstoffkundliche Belange wichtigsten werden nachfolgend kurz angesprochen.

Abbildung 2.1 zeigt eine $\{100\}$ -Ebene eines primitiv kubischen Gitters. Die Kreise symbolisieren die Atomlagen der aus einer einheitlichen Atomart aufgebauten Struktur. Vier verschiedene Typen punktförmiger Gitterstörungen können unterschieden werden. An der Stelle 1 fehlt im Gitterverband ein Atom. Eine solche Gitterstörung heißt Leerstelle. Die durch 2 gekennzeichnete Erscheinung, bei der ein Atom einen Platz zwischen den regulären Gitterplätzen einnimmt, wird Zwischengitteratom genannt. Von diesen punktförmigen Gitterstörungen, die durch Atome der gleichen Art verursacht werden, sind die durch Fremdatome hervorgerufenen zu unterscheiden. Fremdatome, die von dem Raumgitter eines Metalls aufgenommen werden, bilden mit diesem eine „feste Lösung“ und werden deshalb als gelöste Atome bezeichnet. Ein solcher Einbau von Fremdatomen in den Gitterverband kann in zweifacher Weise erfolgen. An der Stelle 3 hat z. B. ein Fremdatom mit größerem Atomdurchmesser als die Atome, die das Gitter aufbauen (Matrixatome), einen regulären Gitterplatz eingenommen. Das Fremdatom ist gegen ein Gitteratom ausgetauscht und damit in das Gitter substituiert worden. Man spricht von einem Substitutions- oder Austauschatom (Beispiel: Zn-Atome in Kupfer). An der Stelle 4 ist dagegen ein Fremdatom mit einem erheblich kleineren Atomvolumen als die Matrixatome auf einem nicht regulär besetzten Gitterplatz (Zwischengitterplatz) interstitiell gelöst worden. Man spricht von einem Interstitutions- oder Einlagerungsatom (Beispiel: C-Atome in Eisen).

In Abb. 2.2 sind die mit 5 und 6 bezeichneten Gebilde als linienförmige Gitterstörungen anzusprechen. Bei 5 endet eine einzelne Atomreihe im Innern der aufgezeichneten Atomenebene. Stellt man sich Abb. 2.2 als Schnitt durch einen senkrecht zur Zeichenebene ausgedehnten Kristall vor, so ist die bei 5 auftretende Atomanordnung die Folge einer in die obere Kristallhälfte eingeschobenen und im Kristallinnern endenden Atomhalbenebene. In der Zeichenebene treten dadurch zwei horizontal übereinander liegende Gittergeraden auf,

Abb. 2.2 Linien- und flächenförmige Gitterstörungen.
 5 Versetzung, 6 Crowdion,
 7 Kleinwinkelkorngränze,
 8 Zwillingsgränze



von denen die eine n , die andere $n + 1$ Atome besitzt. Die Grenzlinie der eingeschobenen Atomebene, die sich senkrecht zur Zeichenebene über größere Gitterbereiche erstreckt, ist eine linienförmige Gitterstörung und wird als Versetzung bezeichnet. Im Gegensatz dazu ist die Gitterstörung 6 dadurch charakterisiert, dass $n + 1$ linienhaft angeordnete Atome parallel zu ihrer Längsausdehnung in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft auf der gleichen Strecke jeweils nur n Atome vorfinden. Man spricht in Ermangelung eines charakteristischen deutschen Wortes von einem crowdion.

Die Gitterstörungen 7 und 8 sind flächenhafter Natur. Bei 7 treten Versetzungen in gesetzmäßiger Weise untereinander angeordnet auf. Bei den schwarz ausgezeichneten Atomen enden jeweils eingeschobene Gitterhalbebenen. Der schraffiert gezeichnete Gitterbereich stellt einen Schnitt durch eine sog. Kleinwinkelkorngränze dar, die zwischen benachbarten, gegeneinander um kleine Winkelbeträge geneigten Kristallbereichen vermittelt. Auch die Gitterstörung 8 führt zu einem Orientierungsunterschied zwischen benachbarten Gitterteilen. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Atome beiderseits zu einer sich senkrecht zur Zeichenebene erstreckenden Gitterebene völlig symmetrisch liegen. Die gestrichelte Linie (8 ... 8) gibt die Spur dieser Spiegelebene mit der Zeichenebene an. Da die benachbarten Kristallteile sich völlig gleichen, wird die Spiegelebene als Zwillingsgränze oder Zwillingskorngränze bezeichnet.

Als weitere flächenförmige Störung ist in Abb. 2.3 an der Stelle 9 das Fehlen einiger Atome in einer Gitterebene angedeutet. Man kann sich die Öffnung durch Ansammlung von Leerstellen entstanden und scheibenförmig senkrecht zur Zeichenebene ausgedehnt vorstellen. Man spricht von einer Leerstellenzone. Die flächenförmige Gitterstörung 10 stellt dagegen einen Schnitt durch eine zweidimensional ausgedehnte Anhäufung von Fremdatomen auf einer Gitterebene dar. Eine solche Gitterstörung wird als Fremdatomzone bezeichnet. Die Störung 11 schließlich umfasst in atomaren Dimensionen mehr oder weniger stark gestörte Gitterbereiche, die zwischen benachbarten Kristalliten mit zueinander größeren Orientierungsunterschieden vermitteln. Sie stellt einen Schnitt durch eine Grenzfläche zwischen relativ ungestörten Gitterbereichen dar und unterbricht die Kontinuität des Gitters. Eine solche Gitterstörung wird Großwinkelkorngränze oder einfach Korngränze genannt. Die Grenzflächen zwischen Körnern unterschiedlicher Art und Gitterstruktur

Abb. 2.3 Flächenförmige Gitterstörungen. 9 Leerstellenzone, 10 Fremdatomzone, 11 Großwinkelkorngrenze

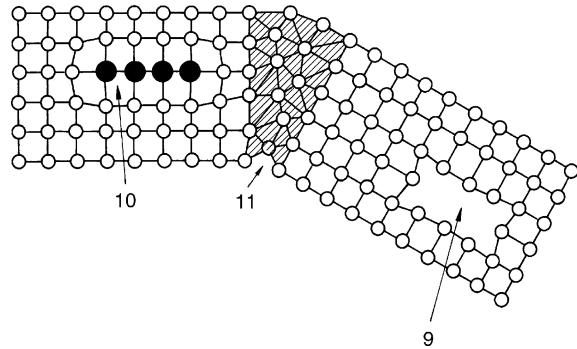
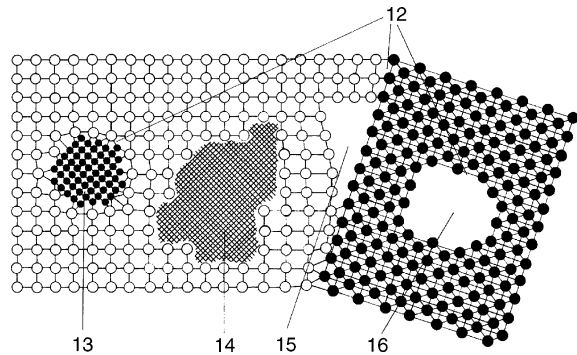


Abb. 2.4 Phasengrenzen (12) und dreidimensionale Gitterstörungen. 13 Ausscheidung, Dispersion, 14 Einschluss, 15 Mikroriss, 16 Mikropore, Pore



werden als Phasengrenzen (12 in Abb. 2.4) bezeichnet. Charakteristische dreidimensionale Gitterstörungen sind schematisch in Abb. 2.4 dargestellt.

Bei vielen Metall-Legierungen bilden sich unter bestimmten thermodynamischen Bedingungen im Gitter der Matrixatome neue Gitterbereiche mit einer gegenüber der Matrix veränderten Struktur aus. Man spricht in solchen Fällen von Ausscheidungen. Es können aber auch durch geeignete Versuchsführungen innerhalb eines Matrixgitters feindispers oxidische Kristallite entweder durch geeignete Sinterprozesse eingebaut oder durch innere Oxidation erzeugt werden. Derartige Gebilde nennt man Dispersionen. Schließlich treten oft auch auf Grund der Herstellungsprozesse unvermeidbare intermetallische oder intermediäre Verbindungen als selbständige Kristallite innerhalb eines Matrixgitters auf. Sie können verschiedene Abmessungen einnehmen und werden als Einschlüsse bezeichnet. Ausscheidungen, Dispersionen und Einschlüsse stellen räumliche Gitterstörungen dar (13 und 14 in Abb. 2.4). Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie innerhalb eines Matrixgitters (Phase A) einen geordneten Kristallbereich mit eigener Struktur (Phase B) bilden und gegenüber der umgebenden Matrix durch eine Phasengrenze getrennt sind. Eine andere räumliche Gitterstörung ist der sog. Mikroriss. Entstanden sein könnte er z. B. durch drei Versetzungen, die wie in Bereich 15, Abb. 2.4 angenommen auf eine Phasengrenze aufgelaufen sind und dadurch unter ihren drei Gitterhalbebenen einen sich senkrecht oder schräg zur Zeichenebene ausdehnenden Hohlraum bilden. Schließlich kommt auch die

räumliche Störung 16 vor, die einen kugelförmigen Hohlraum innerhalb des Matrixgitters darstellen soll. Derartige Poren können als Leerstellen- oder als Gasansammlungen unter bestimmten Bedingungen entstehen. Glücklicherweise gibt es nur eine endlich begrenzte Zahl von Gitterstörungen, die sich der eingangs erwähnten Systematik unterordnen. Das ist deshalb von großer praktischer Bedeutung, weil die Gitterstörungen einerseits viele Werkstoffeigenschaften beeinflussen und bestimmen, andererseits aber auch viele für die Werkstofftechnologie wichtige Prozesse überhaupt erst ermöglichen. Als Beispiele seien hier nur die Leerstellen und die Versetzungen näher betrachtet. Leerstellen entstehen auf Grund allgemeiner thermodynamischer Gesetze in jedem Kristallgitter mit einer durch die jeweilige absolute Temperatur T bestimmten Konzentration c_L . Quantitativ gilt:

$$c_L = \frac{n}{N} = c_0 \exp \left[\frac{-Q_B}{k \cdot T} \right]. \quad (2.1)$$

Dabei ist n die Zahl der Leerstellen, N die Zahl der Gitteratome, c_0 eine Konstante, k die Boltzmannkonstante und Q_B die Bildungsenergie einer Leerstelle. Typische Zahlenwerte für Q_B liegen bei reinen Metallen in der Größenordnung von ~ 1 eV/Leerstelle = 96.600 J/mol. Mit wachsender Temperatur steigt die Leerstellenkonzentration an. Die bei Raumtemperatur in Metallen bzw. Legierungen vorliegenden c_L -Werte sind von deren Schmelztemperaturen bzw. Schmelztemperaturbereichen abhängig. Bei reinen Metallen ist ein guter Richtwert $c_L \approx 10^{-12}$. In der Nähe des Schmelzpunktes wird in vielen Fällen $c_L \approx 10^{-4}$ beobachtet. Als wichtige Konsequenz des Auftretens dieser atomaren Fehlordnungserscheinung folgt unmittelbar aus Abb. 2.1, dass die den Leerstellen benachbarten Atome mit diesen den Gitterplatz tauschen können. Leerstellen ermöglichen also atomare Platzwechsel von Matrix- und Substitutionsatomen und damit Diffusionsvorgänge. Man macht sich aber andererseits an Hand von Abb. 2.1 auch klar, dass für die Diffusion von Interstitutionsatomen, die auf Sprüngen von einem Gitterlückenplatz zu benachbarten (vgl. V1, Abb. 1.3) beruhen, die Existenz von Leerstellen nicht benötigt wird.

Die Versetzungen schließlich sind eine für die plastische Verformbarkeit metallischer Werkstoffe unerlässliche Voraussetzung. Ohne Versetzungen gäbe es z. B. keine Umformtechnik. Man unterscheidet als Grundtypen der Versetzungen die Stufen- und die Schraubenversetzungen. Ihre formale Erzeugung in einem primitiv kubischen Gitter geht aus Abb. 2.5 und 2.6 hervor.

Man denke sich das betrachtete primitiv kubische Kristallgitter jeweils zur Hälfte aufgeschnitten, das oberhalb der Schnittfläche gelegene Kristallviertel unter der Wirkung der angedeuteten Schubkräfte soweit (um den sog. Burgersvektor \vec{b}) nach rechts verschoben, bis eine Oberflächenstufe vom Betrage $|\vec{b}|$ entstanden ist und danach wieder verschweißt. Dann hat sich im Gitter ein Zwangszustand gebildet, bei dem in einem bestimmten Gitterbereich die obere Kristallhälfte eine Gitterhalbebene mehr enthält als die untere. Die zusätzliche Gitterhalbebene endet in Höhe der ursprünglichen Schnittebene. Es ist eine den Kristall schlauchförmig durchsetzende Gitterstörung entstanden, die man Stufenversetzung nennt. Abstrahierend von den atomaren Details kann man diese durch eine gerade Linie darstellen und ihr einen Linienvektor \vec{s} zuordnen.

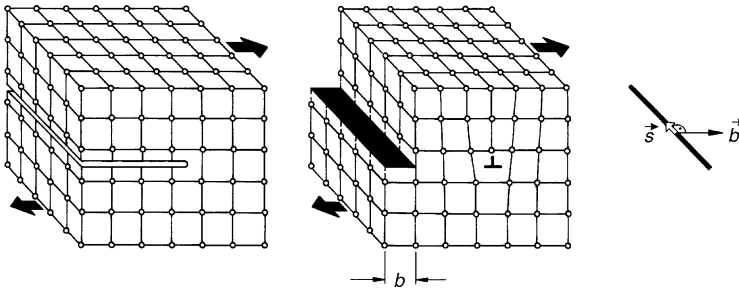
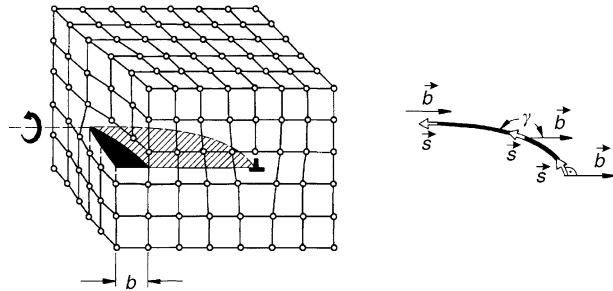


Abb. 2.5 Formale Erzeugung einer Stufenversetzung in einem kubisch primitiven Kristallgitter

Abb. 2.6 Formale Erzeugung einer Schraubenversetzung in einem kubisch primitiven Kristallgitter



Eine Stufenversetzung ist dann dadurch charakterisiert, dass sie sich senkrecht zu ihrer Verschiebungsrichtung erstreckt und dass ihr Linienvektor \vec{s} senkrecht auf dem Burgersvektor \vec{b} steht. Das Gitter um eine Stufenversetzung ist innerlich verspannt. Das Atomgitter ist oberhalb der Schnittebene zusammengedrückt, unterhalb dagegen gedehnt. Man spricht von einem Eigenspannungsfeld (vgl. V75). Es fällt mit wachsender Entfernung von der Störung proportional zu $1/r$ ab. Die auf die Länge der Versetzungslinie bezogene elastisch gespeicherte Energie ist proportional zu b^2 und durch

$$U_{\perp}^L = \alpha_{\perp} \cdot G \cdot b^2 \quad (2.2)$$

gegeben. Dabei ist α eine konstante und G der sog. Schubmodul (vgl. V49).

Bei der Verschiebung des oberen Kristallviertels in Abb. 2.6 um b entsteht keine zusätzliche Gitterhalbene. Dagegen tritt, wie man sich leicht klar macht, eine schraubenförmige Aufspaltung der senkrecht zur entstandenen linienförmigen Störung liegenden Gitterebenen auf. Wiederum kann man von den atomaren Details abstrahieren und die Versetzungslinie durch eine Gerade beschreiben, bei der der Linienvektor \vec{s} und Burgersvektor \vec{b} parallel zueinander liegen. Die Verschiebung der Gitteratome erfolgt bei der Bewegung einer Schraubenversetzung senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung. Das mit der Schraubenver-

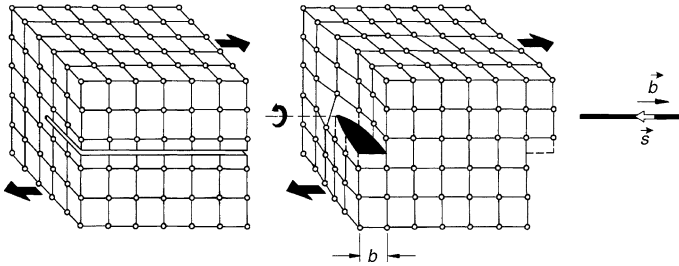


Abb. 2.7 Gemischte Versetzung in einem kubisch primitiven Kristallgitter

setzung verbundene Spannungsfeld ist rotationssymmetrisch und enthält keine Kompressions- bzw. Dillatationsbereiche. Die Linienenergie ist durch

$$U_o^L = \alpha_o \cdot G \cdot b^2 \quad (2.3)$$

gegeben, wobei $\alpha_o < \alpha$ ist.

Der allgemeinste Fall einer Versetzung, die sog. gemischte Versetzung, ist in Abb. 2.7 gezeigt. Burgersvektor \vec{b} und Linienvektor \vec{s} bilden einen beliebigen Winkel γ miteinander. Offenbar besitzt die Versetzung an der Stirnseite des betrachteten Gitterbereiches reinen Stufencharakter, auf der linken Begrenzungsseite dagegen reinen Schraubencharakter. Im dazwischen liegenden Gitterbereich kann man der Versetzung Stufen- und Schraubenanteile dadurch zuordnen, dass man den Burgersvektor bezüglich der Versetzungslinie in eine Normal- und eine Tangentialkomponente zerlegt. Die in Abb. 2.5, 2.6 und 2.7 gezeigten Versetzungen sind unter der Einwirkung von Schubkräften in der gedanklich verlängerten ursprünglichen Schnittebene relativ leicht beweglich. Man nennt diese Ebene Gleitebene und die Richtung, in der dabei die Atombewegung erfolgt, Gleitrichtung. Gleitebene und Gleitrichtung bilden das Gleitsystem der Versetzung. In den erörterten Beispielen wurde als Gleitebene eine $\{100\}$ -Ebene und als Gleitrichtung eine $\langle 100 \rangle$ -Richtung betrachtet. Das Gleitsystem ist also vom Typ $\{100\}\langle 100 \rangle$. Da es drei unterschiedlich orientierte $\{100\}$ -Ebenen im kubisch primitiven Gitter mit jeweils zwei $\langle 100 \rangle$ -Richtungen gibt, verfügt dieser Gittertyp über sechs Gleitsysteme vom Typ $\{100\}\langle 100 \rangle$. Belegen sich die in Abb. 2.5, 2.6 und 2.7 gezeigten Versetzungen in ihren Gleitsystemen unter der Einwirkung von Schubkräften durch die betrachteten Kristallbereiche vollkommen hindurch, so entsteht jeweils eine weitere Oberflächenstufe der Höhe $|\vec{b}|$. Jeder Kristall ist um den gleichen Betrag $|\vec{b}|$ länger geworden und hat sich damit bleibend verformt. In den Gleitsystemen der Körner eines Vielkristalls liegen im Allgemeinen viele Versetzungen bzw. Versetzungslinien vor. Ihre Gesamtlänge pro cm^3 wird als Versetzungsdichte des Werkstoffes bezeichnet.

2.2 Aufgabe

Mit Hilfe ebener Stahlkugelmodelle sind Gitterstörungenzustände zu simulieren und zu diskutieren. Danach sind an Hand von Schwerpunkts- und Realmodellen (vgl. V1) eines kfz-Gitters mit Gleitsystemen vom Typ $\{111\}\langle 100\rangle$ und eines krz-Gitters mit Gleitsystemen vom Typ $\{110\}\langle 111\rangle$ die atomaren Strukturen der Stufenversetzungen in diesen Gittern zu erörtern. Ferner sind für beide Gittertypen die atomaren Vorgänge zu analysieren, die zur Zwillingsbildung führen.

2.3 Versuchsdurchführung

Es stehen zwei ebene Stahlkugelmodelle zur Verfügung. Beim ersten Modell (vgl. Abb. 2.8) sind gleich große Kugeln zwischen zwei Plexiglasplatten so gesammelt, dass sie sich beim Schütteln in einer Ebene relativ zueinander bewegen und durchmischen können. Die jeweilig erzeugten Anordnungen liefern ebene Schnitte durch eine dichteste Kugelpackung und zeigen bei Betrachtung auf einem Lichtkasten die verschiedensten Störungen. Bei dem zweiten Stahlkugelmodell sind den großen Kugeln anteilmäßig 5 % kleinere zugemischt. Dieses Modell erlaubt die Beobachtung der Auswirkung einer zweiten Atomart auf die Ausbildung von Störungen.

Ferner liegen Realmodelle von der Atomanordnung in den $\{111\}$ - und $\{110\}$ -Ebenen eines kfz- und von den $\{110\}$ - und $\{111\}$ -Ebenen eines krz-Gitters vor. Zunächst wird gezeigt, dass beide Gitterstrukturen auch durch Stapelung bestimmter Gitterebenen entstehen können. Dann wird nachgewiesen, dass die Struktur von Stufenversetzungen bei kfz- und krz-Gittern aus geometrischen Gründen nicht durch eine einzige eingeschobene Halbebene charakterisiert werden kann. Die mögliche Aufspaltung der Burgersvektoren $a/2\langle 110\rangle$ und $s/2\langle 111\rangle$ in Teilvektoren wird begründet. Die in Abb. 2.9 dargestellten Versetzungen wer-

Abb. 2.8 Anordnung von beweglichen Stahlkugeln in einem ebenen Modell nach Durchmischung

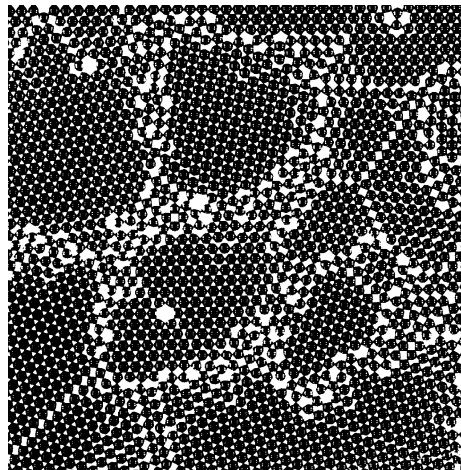
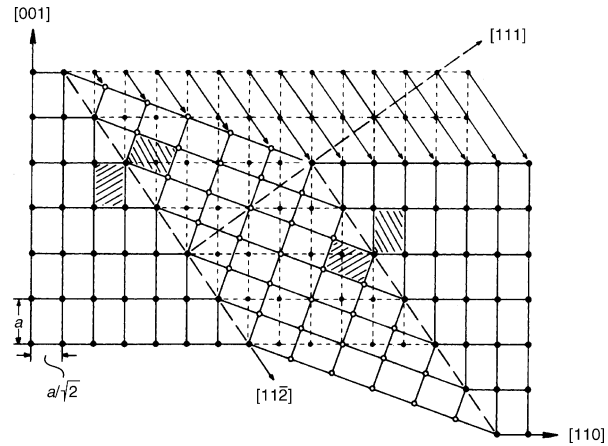


Abb. 2.10 Zwillingsbildung im kfz-Gitter (Schwerpunktmodell). Betrachtet wird die (110)-Ebene. Zwillingssebene ist die (111)-Ebene, Zwillingsableitrichtung die $[11\bar{2}]$ -Richtung. Man spricht von einem Zwillingsystem vom Typ $\{111\}\langle 112\rangle$. Beiderseits der entstandenen Zwillingsgrenzen sind Gitterbereiche schraffiert, die die entstandene Spiegelsymmetrie bezüglich der Grenzflächen verdeutlichen



genannt. Sie bestimmt die Aufspaltungsweite der Teilversetzungen und damit den Abstand der eingeschobenen $\{110\}$ -Halbebenen im Gitter. An Hand räumlicher Modelle von Versetzungen im kfz- und krz-Gitter werden die vorliegenden Verhältnisse diskutiert.

Schließlich wird an Hand von Abb. 2.10 die Zwillingsbildung im kfz-Gitter besprochen und der Vorgang der Zwillingsbildung im krz-Gitter entwickelt. Dazu wird eine (110)-Ebene aufgezeichnet. Spiegel- und damit Zwillingssebene ist eine $\{112\}$ -Ebene, die die Zeichenebene längs einer $\langle 111\rangle$ -Richtung schneidet. Durch geeignete Atomverschiebungen, die mit der Entfernung von der Zwillingssebene anwachsen, wird ein Kristallteil bezüglich des Ausgangszustandes in eine spiegelbildliche Lage gebracht. Der relative Verschiebungsbetrag, um benachbarte $\{112\}$ -Ebenen in Zwillingsposition zu bringen, wird berechnet.

2.4 Symbole, Abkürzungen

Symbol/Abkürzung	Bedeutung	Einheit
b	Betrag des Burgersvektors	m
c_0	Konstante	-
k	Konstante	-
N	Anzahl der Gitteratome	-
n	Anzahl der Leerstellen	-
U_{\perp}^L	elastisch gespeicherte Energie einer Stufenversetzung	J
U_{\circ}^L	elastisch gespeicherte Energie einer Schraubenversetzung	J
α_{\perp}	Konstante	-
α_{\circ}	Konstante	-
Q, Q_W, Q_B	Aktivierungsenergie (Bildungsenergie)	J/mol
c_L	Leerstellenkonzentration	cm^{-3}
T	Temperatur	K
G	Schubmodul	MPa

<http://www.springer.com/978-3-658-05037-5>

Praktikum in Werkstoffkunde

95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der
Werkstofftechnik

Macherauch, E.; Zoch, H.-W.

2014, XXIV, 766 S. 516 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-658-05037-5