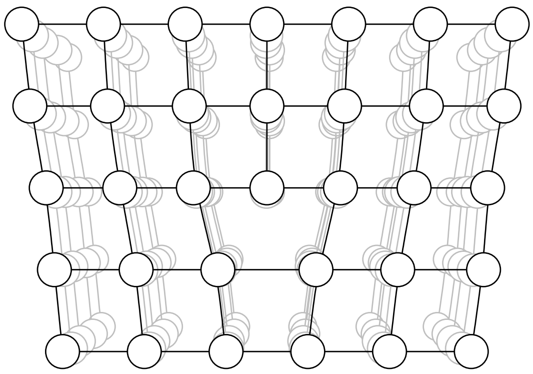


Abbildung 11.7: Detailansicht auf atomarer Ebene einer Stufenversetzung.

11.2.4 Der Burgers Vektor

Der Burgers Vektor charakterisiert eine Versetzungslinie. Hierzu wird das gestörte mit dem ungestörten Gitter verglichen, indem die elementaren Schritte beim Umlauf um die Versetzung in jede Richtung gezählt werden (von einem Atom zum nächsten). Anschließend werden genau dieselben Schritte in einem ungestörten Gitter wiederholt, jedoch wird in diesem Fall der Ring nicht mehr geschlossen; es fehlt ein elementarer Schritt. Dieser wird als Burgers Vektor definiert.

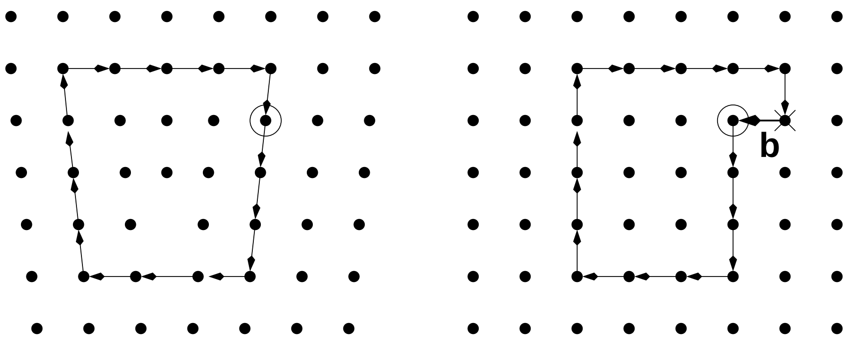


Abbildung 11.8: Zur Definition des Burgers Vektors: Umlauf um eine Stufenversetzung (links) und die selben Schritte plus Burgers Vektor im ungestörten Gitter (rechts).

Zur Veranschaulichung dieser Definition sind die elementaren Schritte um eine Stufenversetzung in Abbildung 11.8 gezeigt. Zu beachten ist, daß der Burgers Vektor im ungestörten Bereich definiert ist.
Für eine Schraubenversetzung ist der Umlauf in Abbildung 11.9 dargestellt. Da der Burgers Vektor im ungestörten Gitter definiert ist, zeigt er in dieser Abbildung, die eine gestörte Kristallstruktur zeigt, in die dem Umlauf entgegengesetzte Richtung.

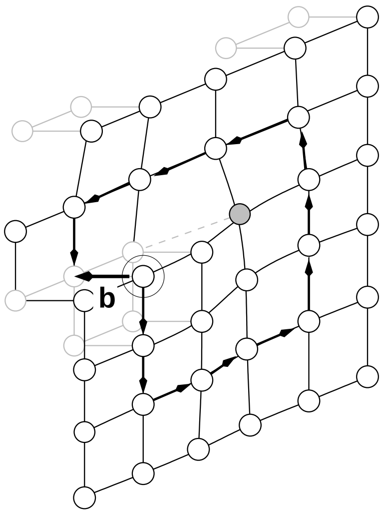


Abbildung 11.9: Zur Definition des Burgers Vektors: Umlauf um eine Schraubenversetzung und Angabe des Burgers Vektors.

Anhand des Burgers Vektors werden die beiden eben vorgestellten Typen von Versetzungen klassifiziert. Wie man aus den Umlauf-Bildern entnehmen kann, gilt für eine Stufenversetzung:

$$\left.\begin{array}{rc} \text{Burgers Vektor} & \vec{b} \\ \text{Versetzungslinie} & \vec{ds} \end{array}\right\} \quad \vec{b} \perp \vec{ds}$$

und für eine Schraubenversetzung:

$$\left.\begin{array}{rc} \text{Burgers Vektor} & \vec{b} \\ \text{Versetzungslinie} & \vec{ds} \end{array}\right\} \quad \vec{b} \parallel \vec{ds}$$

Dies sind zugleich die elementaren Definitionen von Schrauben- und Stufenversetzungen.
Versetzungen können nicht innerhalb eines Kristalls enden, sie gehen immer durch den Kristall hindurch bis zu seiner Oberfläche (oder Korngrenze) oder bilden einen Versetzungsring. Versetzungen können auch aufspalten, aber dazu später.
Versetzungen können durch eine Anhäufung von Leerstellen entstehen, wie das nachstehende Bild verdeutlicht.

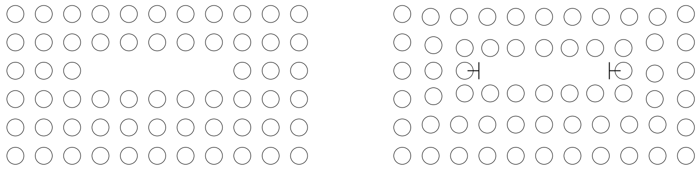


Abbildung 11.10: Anhäufung von Leerstellen bilden Versetzungen

Generell gilt, daß der Burgers Vektor einer Versetzung immer gleich bleibt. Da aber die Versetzungslinie nicht immer eine Gerade ist, sondern ihre Richtung ändern kann (was sie auch tut!!), findet man in der Praxis immer eine Kombination beider Typen, also den Wechsel von Stufen- zu Schraubenkonfiguration.

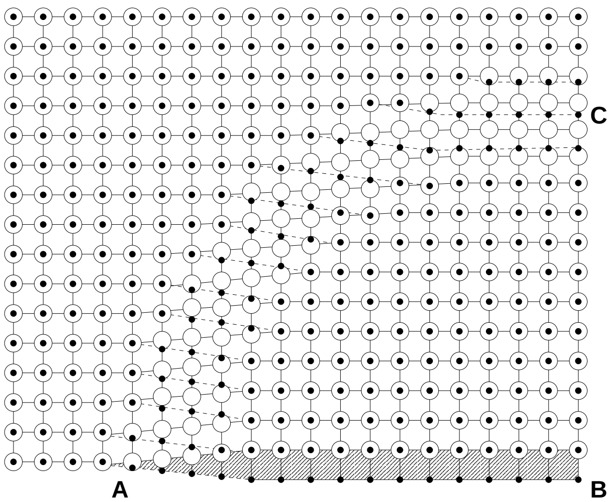


Abbildung 11.11: Draufsicht eines teilweise abgescherten Kristalls ($\overline{AB}$=Gleitebene). Bei A hat die Versetzung Schrauben- und bei C Stufencharakter. (• - Atome unterhalb der Gleitebene; ○ - Atome oberhalb der Gleitebene)

11.2.5 Experimenteller Nachweis von Versetzungen

Der experimentelle Nachweis von Versetzungen ist mit lichtmikroskopischen Methoden möglich. Da Versetzungen an der Oberfläche von Kristallen enden, ist das Gitter an der Oberfläche lokal gestört, was mit einer lokalen Aufweitung des Gitters einhergeht. Durch Ätzen der Oberfläche wird genau an diesen Stellen mehr Material abgetragen, als an den ungestörten Bereichen. Hierdurch werden die durch die lokalen Spannungsfelder der Versetzungen erzeugten Grübchen noch vergrößert. Diese Grübchen sind dann lichtmikroskopisch sichtbar. Natürlich muß die Probe für diese Untersuchungen speziell präpariert werden.

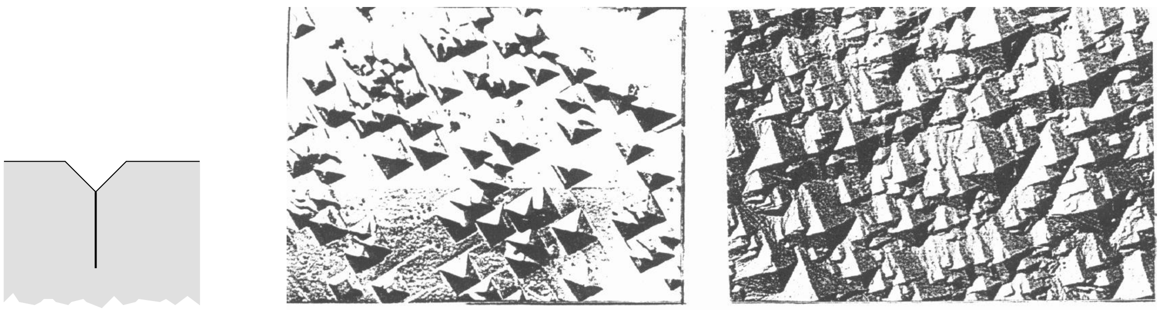


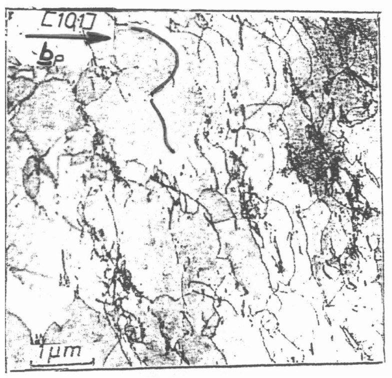
Abbildung 11.12: Seitenansicht eines Ätzgrübchens (links, schematisch) und lichtmikroskopische Aufnahmen von LiF in unverformtem (Mitte) und verformtem Zustand (rechts) (Quelle: Reppich, 1969).

Die Versetzungsdichte ist dann definiert als:

$$\rho = \frac{\#V}{A} = \frac{\text{Anzahl der durch die Oberfläche stoßenden Versetzungen}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{Länge der Versetzungen}}{\text{Volumen}}$$

Typische Werte sind: $\rho = 10^8\ \text{m}^{-2}$ für nicht verformte Materialien und $\rho = 10^{12}\ \text{m}^{-2}$ für verformtes Material. Daraus lassen sich die Abstände bestimmen: verformt $\sim 1\ \mu$m; nicht verformt $\sim 100\ \mu$m.

Alternativ kann man Versetzungen mittels Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM) nachweisen. Dies Verfahren stellt hohe Anforderungen an die Probenpräparation, das Mikroskopieren selbst und an die Auswertung. Ohne in die Details zu gehen, soll an dieser Stelle nur die prinzipielle Machbarkeit erwähnt werden. Versetzungen sind z. B. nur sichtbar, wenn die Braggbedingung erfüllt ist ($\vec{g}\vec{b}$-Kriterium), das heißt man sieht nie alle gleichzeitig.



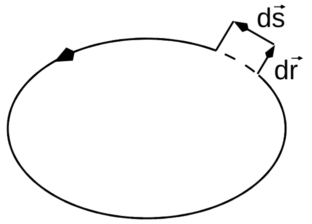
ZUM NACHDENKEN:

- Welche Versetzungstypen gibt es?
- Wie werden Versetzungen klassifiziert?
- Wie werden Versetzungen experimentell nachgewiesen?

Abbildung 11.13: TEM Aufnahme von Versetzungen in Kupfer (Quelle: Mughrabi, 1971).

11.2.6 Versetzungsbewegung

Erweitert man einen Versetzungsring um das Element $[d\vec{s} \times d\vec{r}]$, so werden zwei Punkte auf diesem Ring um $\vec{b}$ in Richtung $d\vec{r}$ verschoben.
Nun werden zwei Fälle unterschieden:



1. $d\vec{r}$ liegt in der Gleitebene $\Rightarrow d\vec{r} \parallel \vec{b}$ mit $\vec{b} \perp d\vec{s}$

2. $d\vec{r}$ liegt senkrecht zur Gleitebene $\Rightarrow d\vec{r} \perp \vec{b}$ mit $\vec{b} \perp d\vec{s}$

Wenn $d\vec{r}$ nicht in der Gleitebene liegt, dann öffnet die Erweiterung des Versetzungsrings ein Volumenelement

$$dV = b\,[d\vec{s} \times d\vec{r}] = d\vec{r}\left[\vec{b} \times d\vec{s}\right] \tag{11.15}$$

Dies bedeutet, daß entweder dV/Ω Leerstellen erzeugt werden, oder dV wird doppelt besetzt, es entstehen Zwischengitteratome.
Man bezeichnet nun die Versetzungsbewegung als **konservativ**, wenn kein Volumenelement geöffnet wird ($dV = 0$). Die Versetzung gleitet. Wird hingegen ein Volumenelement geöffnet ($dV \neq 0$), so wird die Bewegung als **nicht konservativ** bezeichnet, die Versetzung klettert.
Gleitet ein Teil einer Versetzung ab, so entsteht in ihr ein Knick, wobei die Versetzung nach wie vor komplett in der Gleitebene liegt. Wird ein Volumenelement geöffnet, so klettert die Versetzung in die nächste Gleitebene. Die Versetzung hat nun einen Sprung. Dieser Teil liegt nicht in der Gleitebene und kann sich nicht mehr durch Gleiten fortbewegen, sondern muß über den energieaufwendigeren Klettermechanismus bewegt werden.

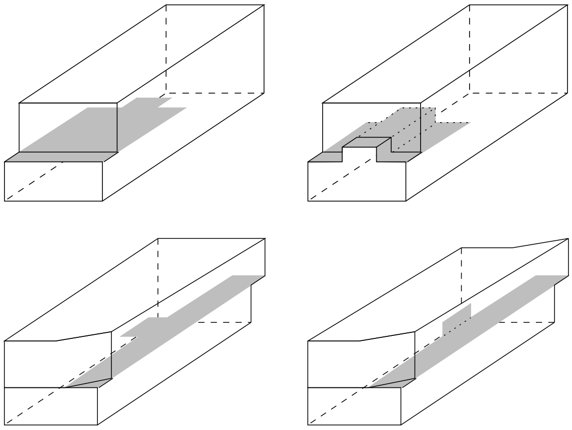
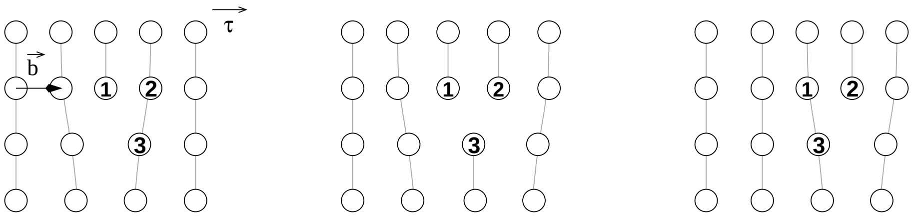


Abbildung 11.14: Knicke (links) und Sprünge (rechts) von Stufen- (oben) und Schraubenversetzungen (unten).

Gleitet nun zum Beispiel eine Stufenversetzung ab, so passiert auf atomarer Ebene Folgendes: Am Anfang ist die Versetzung beim Atom ①. Durch das Scheren wird der Abstand zwischen ① und ③ kleiner und Atom ③ entfernt sich zunehmend von ②. Irgendwann ist der Zustand erreicht, wo sich die Abstände zwischen ① und ③ sowie zwischen ② und ③ gleichen.



Eine weitere Scherung führt dazu, daß sich der Kristall neu konfiguriert und nun eine atomare Verbindung zwischen Atom ② und ③ eingeht. Die Versetzung liegt dann bei Atom ② und ist um einen atomaren Schritt nach rechts geglitten.

Legt man beide Bilder übereinander, so entsteht folgendes Bild, wobei die grauen Atome die zeitlich späteren darstellen.

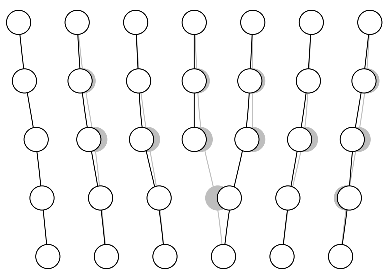


Abbildung 11.15: Schematische Darstellung eines Gleitprozesses einer Stufenversetzung nach rechts zu zwei Zeiten (grau = zeitlich später).

Die Versetzung ist auch in diesem Fall nach rechts gewandert. Man erkennt, daß die atomare Anordnung kaum durch das Gleiten einer Versetzung verändert wird (lediglich in der Gleitebene an der Versetzung selber). Klettert eine Versetzung hingegen wie in Abbildung 11.16 dargestellt, nach oben, so hinterläßt sie eine Leerstelle ($dV \neq 0$) und stört damit den Kristallverbund in mehreren Gleitebenen.

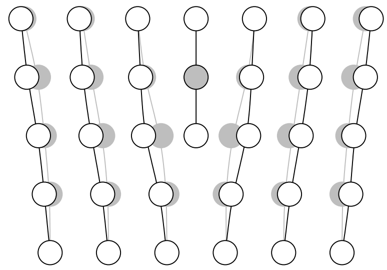


Abbildung 11.16: Schematische Darstellung eines Kletterprozesses einer Stufenversetzung nach oben zu zwei Zeiten (grau = zeitlich später).

Entscheidend für die Volumenänderung ist das fehlende Atom, wie hier beim Klettern nach oben gezeigt oder das zusätzliche Atom im Fall des Kletterns nach unten.
Die Volumenänderung wird am einfachsten makroskopisch verdeutlicht. Ein Abscheren durch Gleiten verändert das Kristallvolumen nicht, da $\vec{r}_1 \parallel \vec{b}$. Dies ist im linken Bild von Abbildung 11.17 gezeigt ($\zeta = \zeta'$). Klettern mit $\vec{r}_2 \perp \vec{b}$ verändert sehr wohl das Volumen, was im rechten Teil durch das gestrichelt gezeichnete Volumenelement angedeutet ist.

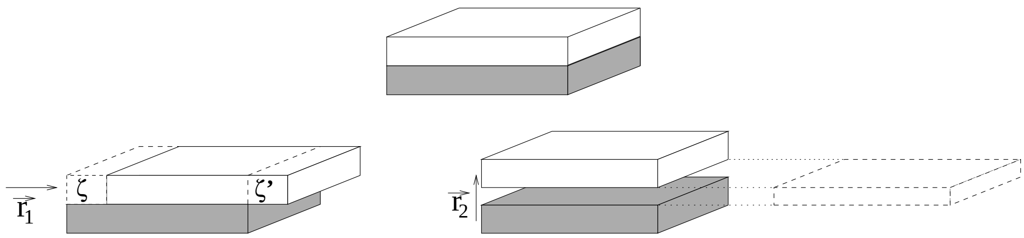


Abbildung 11.17: Veranschaulichung der Volumenänderung beim Versetzungsklettern.

Während es für Stufenversetzungen Klettern und Gleiten gibt, gilt für Schraubenversetzungen $\vec{b} \parallel \vec{s}$ und damit auch $dV = 0$, da $d\vec{s} \times \vec{r} \perp \vec{b}$. Damit wird bei der Bewegung von Schraubenversetzungen durch den Kristall nie Volumen verändert. Das Selbe gilt für das Gleiten von Versetzungen. Lediglich das Klettern von Stufenversetzungen führt zu einer Änderung des Volumens.
Das Klettern einer Versetzung ist eng mit Leerstellen und Diffusion verbunden. Der Mechanismus läuft wie folgt ab: Ein Atom in der Nähe der Versetzung springt von dort weg in eine Leerstelle. Danach springt das Atom an der Versetzung in die erzeugte Leerstelle, wodurch die Versetzung an dieser Stelle um eine Stufe nach oben gewandert ist. Dieses Szenario ist in der Abbildung 11.18 zweidimensional abgebildet.

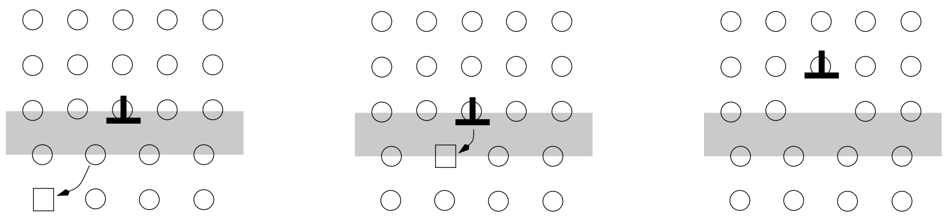


Abbildung 11.18: Schematische Darstellung eines Kletterprozesses über den Mechanismus der Diffusion.

Bisher hat sich lediglich ein einzelnes Atom bewegt, die ganze Atomreihe muß nun noch folgen. Dies läuft durch einen Schritt-für-Schritt-Prozeß ab, wie er in Abbildung 11.19 skizziert ist.