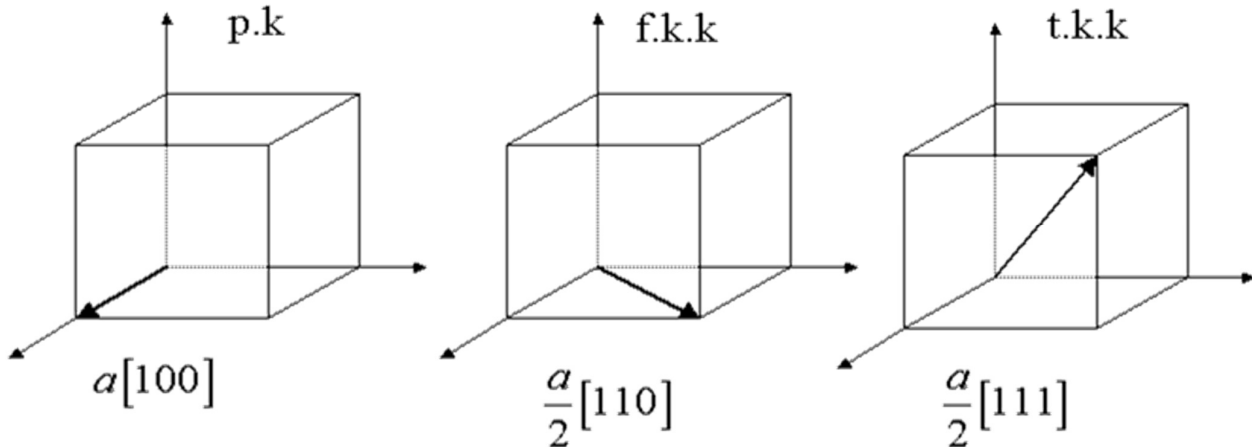


Verformung von Einkristallen und Polikristallen

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung
(BMEGEMTAGK1N)
2018

- Die vollständige (perfekte) und partielle Versetzungen;
- die Abschnitte und Mechanismen der plastischen Verformung von Einkristallen,
- plastische Verformung von polikristallinen Materialien kennenlernen.

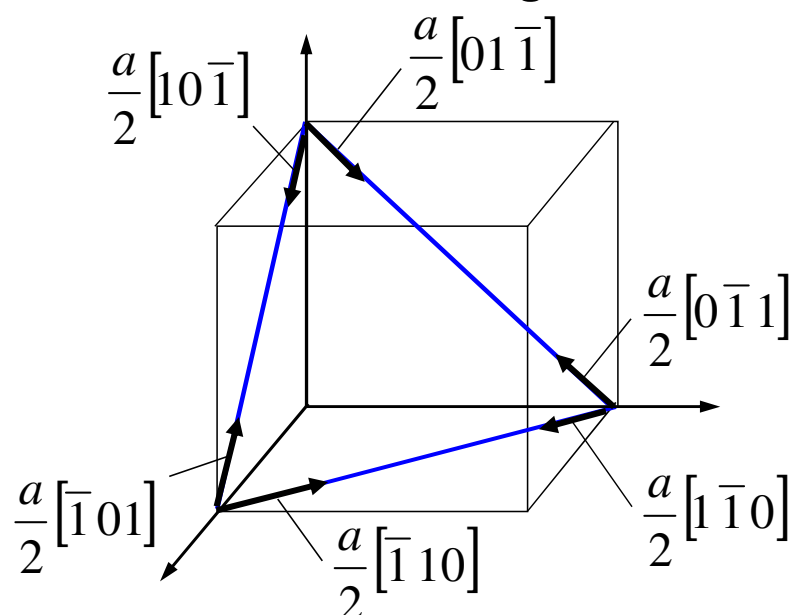
Wegen der Gitterstruktur können die Burgers-Vektoren nicht beliebig sein. Solche Versetzungen deren Burgers-Vektor von zwei benachbarten Atome bestimmt ist werden vollständige oder (perfekte) Versetzungen genannt. Im kubischen Gitter gibt es die $a[100]$, $a/2[110]$ und $a/2[111]$ vollständige Versetzungen.



Die kürzesten vollständige Versetzungen

3

Auf der (111) Ebene der krz Kristallen sind 6 vollständige Versetzungen paarweise mit entgegengesetzter Vorzeichen möglich



Eine Reaktion von den-en (Aufeinandertreffen): $\frac{a}{2}[\bar{1}10] + \frac{a}{2}[1\bar{1}0] \rightarrow \vec{0}$

4

Eine andere Reaktion: $\frac{a}{2}[\bar{1}10] + \frac{a}{2}[10\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{2}[01\bar{1}]$

Energiebilanz:

$$\frac{a^2}{4}(\bar{1}^2 + 1^2 + 0^2) + \frac{a^2}{4}(1^2 + 0^2 + \bar{1}^2) = a^2 > \frac{a^2}{4}(0^2 + 1^2 + \bar{1}^2) = \frac{a^2}{2}$$

Die neue Versetzung ist stabil, weil deren Energie kleiner ist als die Energie als die Summe der Energien der Versetzungen die Sie erzeugen.

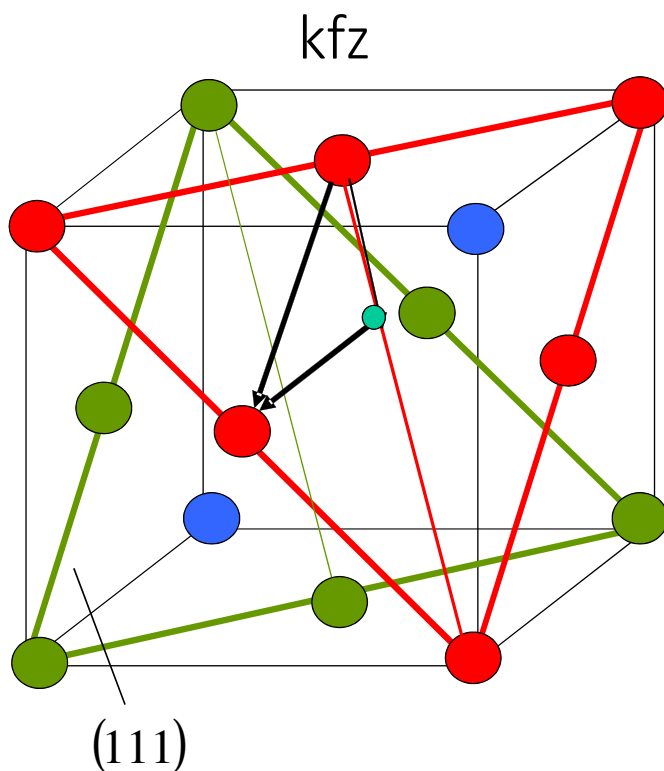
Weitere Reaktion: $\frac{a}{2}[\bar{1}01] + \frac{a}{2}[0\bar{1}1] \rightarrow \frac{a}{2}[\bar{1}\bar{1}2]$

Energiebilanz:

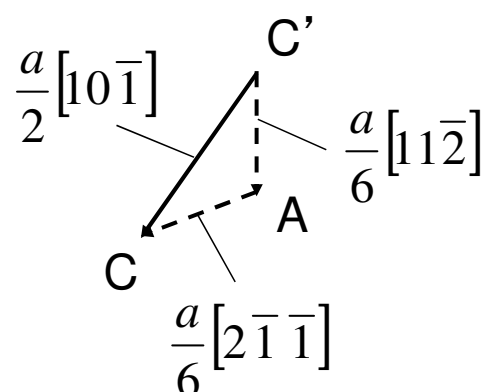
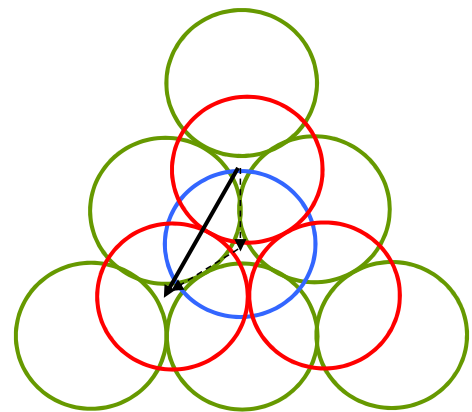
$$\frac{a^2}{4}(\bar{1}^2 + 0^2 + 1^2) + \frac{a^2}{4}(0^2 + \bar{1}^2 + 1^2) = a^2 < \frac{a^2}{4}(\bar{1}^2 + \bar{1}^2 + 2^2) = \frac{3}{2}a^2$$

Die neue Versetzung ist stabil, weil deren Energie kleiner ist als die Energie als die Summe der Energien der Versetzungen die Sie erzeugen.

Partielle Versetzung nach Shockley

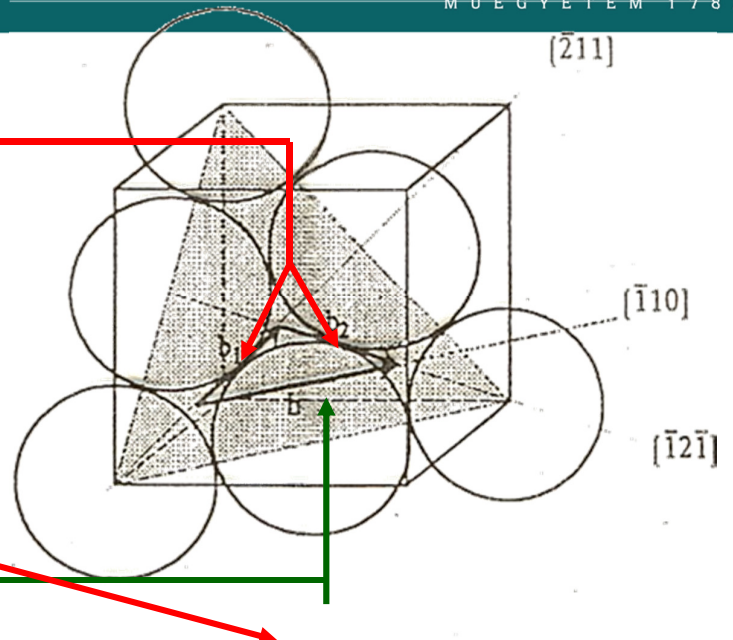


A
B
C



Versetzungen (vollständige)

Teilversetzungen



$$\frac{a}{2} [\bar{1}10] \Rightarrow \frac{a}{6} [211] + \frac{a}{6} [\bar{1}2\bar{1}]$$

$$\text{da } \frac{a^2}{4} (1 + 1 + 0) > \frac{a^2}{36} (4 + 1 + 1) + \frac{a^2}{36} (1 + 4 + 1)$$

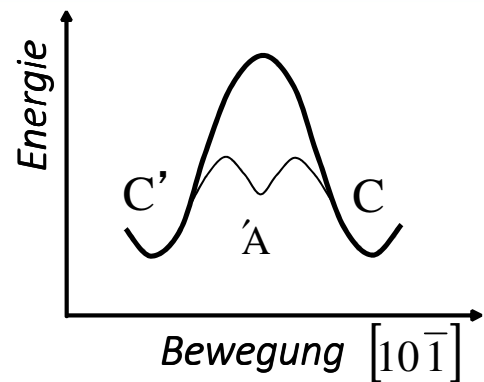
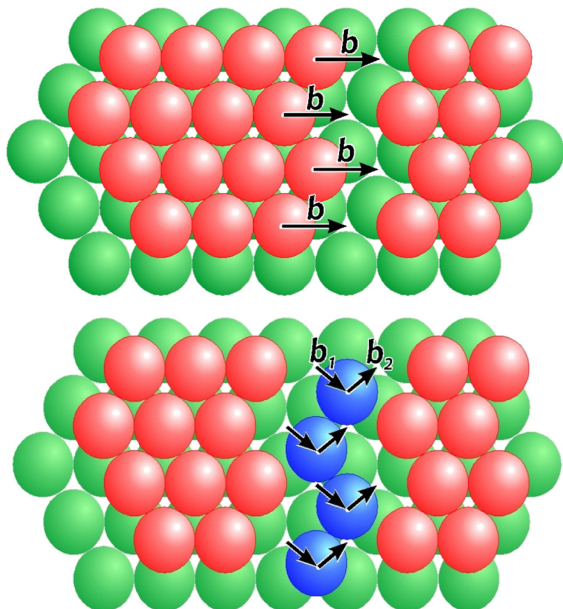
$$\frac{a^2}{2} > \frac{a^2}{6} + \frac{a^2}{6}$$

7

Stapelfolgenfehler

$$\frac{a}{2} [10\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{6} [11\bar{2}] + \frac{a}{6} [2\bar{1}\bar{1}]$$

$$b^2 = \frac{a^2}{2} > b_1^2 + b_2^2 = \frac{a^2}{6} + \frac{a^2}{6} = \frac{a^2}{3}$$



C		A		C
B		C		B
A		B		A
C		A		C
B	→	C	→	B
A		A		A
C		C		C
B		B		B
A		A		A

8

Bei der plastische Verformung von Metallen ausgezeichnete Kristallebenen verrutschen (gleiten) in gegebenen kristallographischen Richtungen aufeinander.

n Normalvektor der Gleitebene

Gleitebene

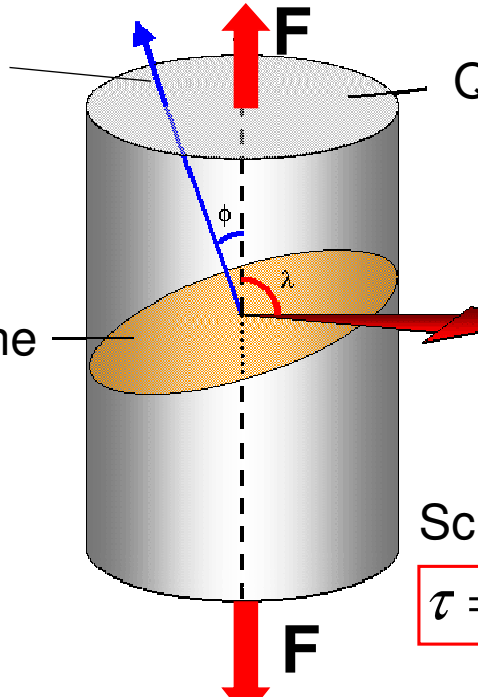
Querschnitt (A)

Gleitrichtung (g)

Schmid'sche Schubspannungsgesetz:

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \lambda = \sigma m$$

m – Schmid-Faktor



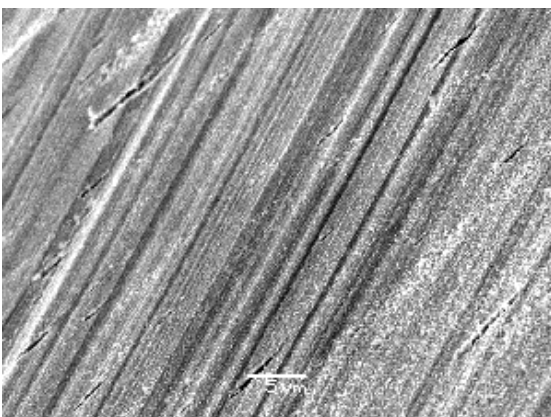
$$A_g = \frac{A}{\cos \phi}$$

$$F_g = F \cos \lambda$$

$$\tau = \frac{F_g}{A_g} = \frac{F \cos \phi \cos \lambda}{A}$$

Gleitsystem: Gleitebene und eine dazu gehörende Gleitrichtung. Die Gleitung erscheint auf der Gleitebenen schichtweise.

Mit der Zunahme der Belastung auf der Gleitebene tritt der sog. kritische Schubspannung $\tau_{krit.}$ auf, wobei bei gegebenen Gleitsystem die plastische Verformung anfängt. Grundlegende Annahme ist, dass es zu allen Gleitebenen eines Gittertyps dasselbe kritische Schubspannung gehört.



Charakteristische Gleitsysteme:

krz	$\langle 111 \rangle$	$\{110\}$	12 Stück
kfz	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$	12 Stück
dgh	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{0001\}$	3 Stück

Gleitsystem: Gleitebene + Gleitrichtung

Kristallsystem	Gleitebene	Gleitrichtung	Anzahl der nicht parallelen Ebenen	Gleitrichtungen pro Ebene	Anzahl der Gleitsysteme
pk	{100}	$\langle 100 \rangle$	3	2	$3 \times 2 = 6$
krz	{110}	$\langle 111 \rangle$	6	2	$6 \times 2 = 12$
kfz	{111}	$\langle 110 \rangle$	4	3	$4 \times 3 = 12$
hex	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	1	3	$1 \times 3 = 3$

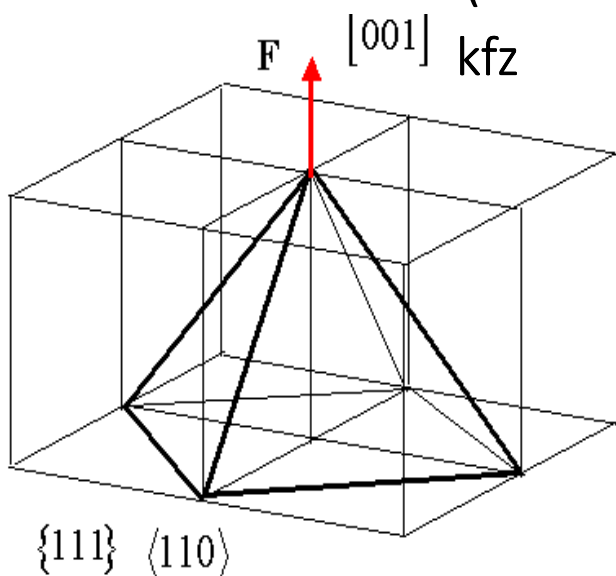
Zur einzelnen Gleitsystemen in einem Kristall gehört die gleiche kritische Schubspannung.

11

Einfache und mehrfache Gleitung

Einfaches Gleiten: Die Lage von F Kraft ist so, dass die Verformung nur in einem Gleitsystem stattfindet.

Mehrfaches Gleiten: Verformung findet gleichzeitig in mindestens zwei (in mehreren) Gleitsystemen statt.

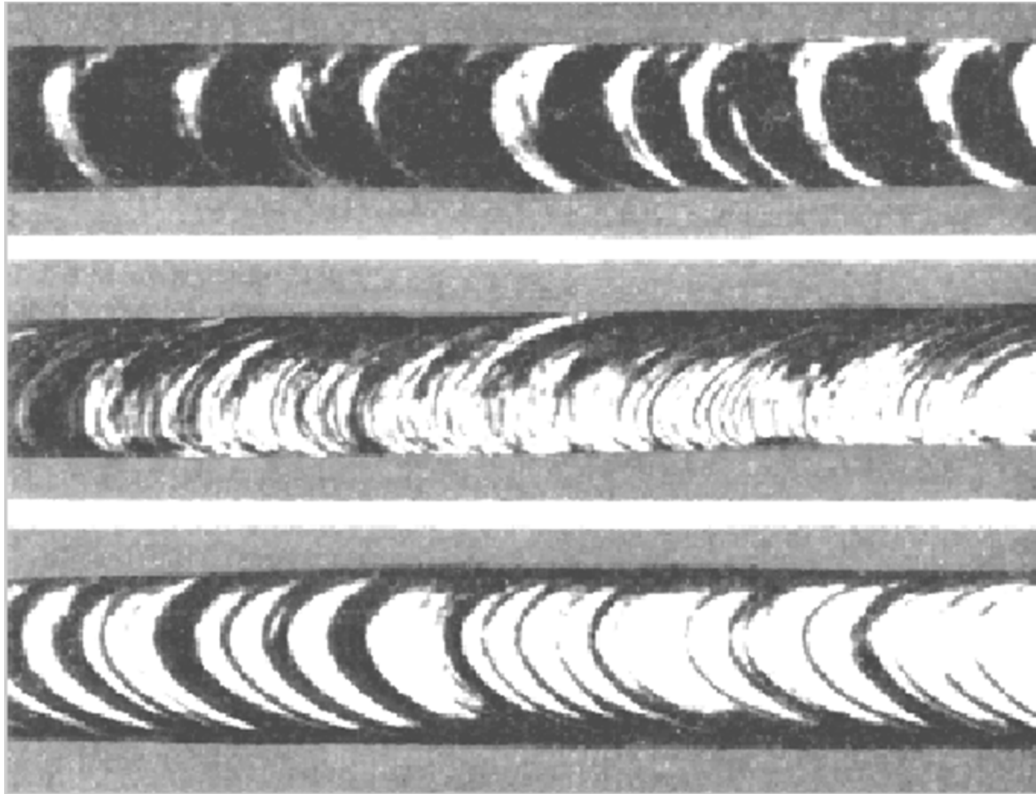


KFZ

4 Stück in der {111} Ebene

2-2 in der $\langle 110 \rangle$ Richtung

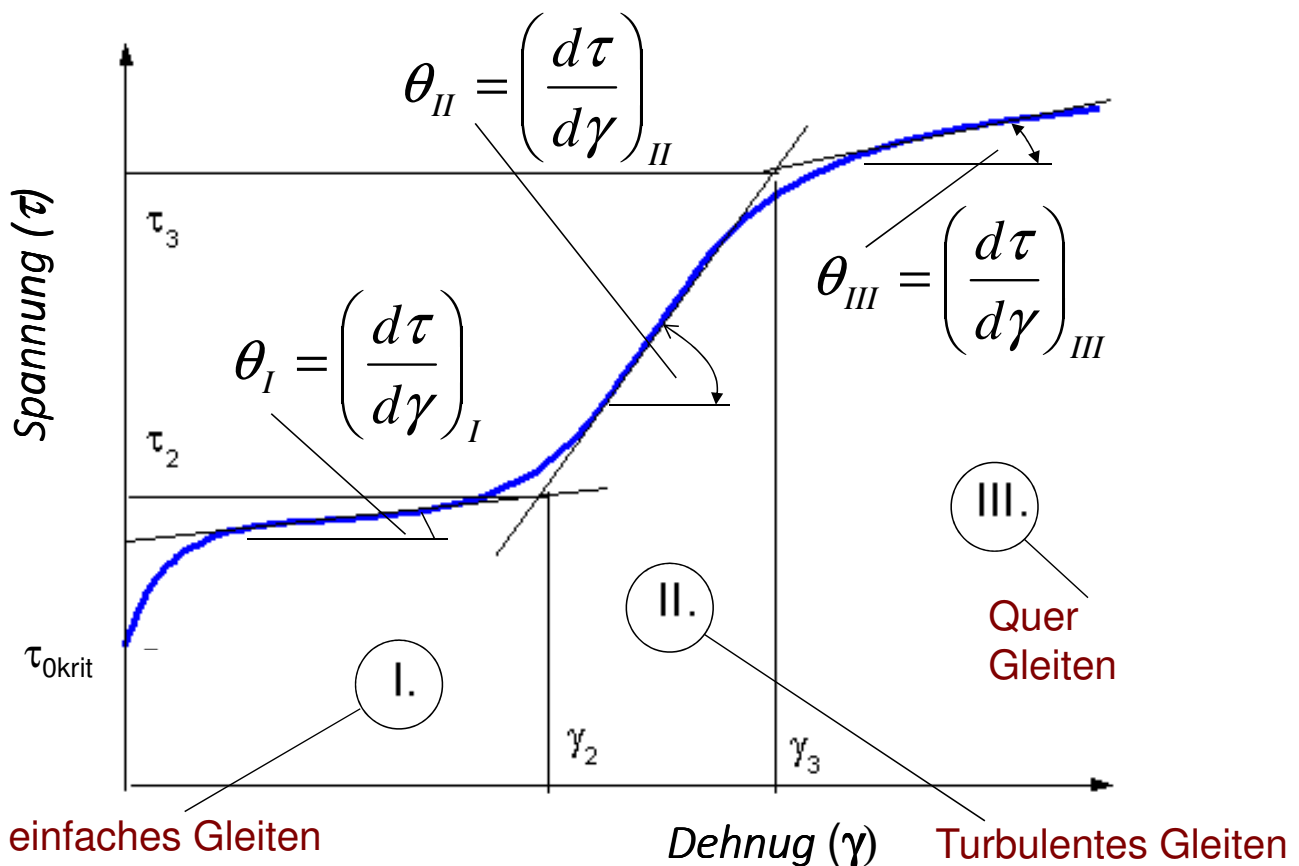
12



Zinn (Sn)

Bismut (Bi)

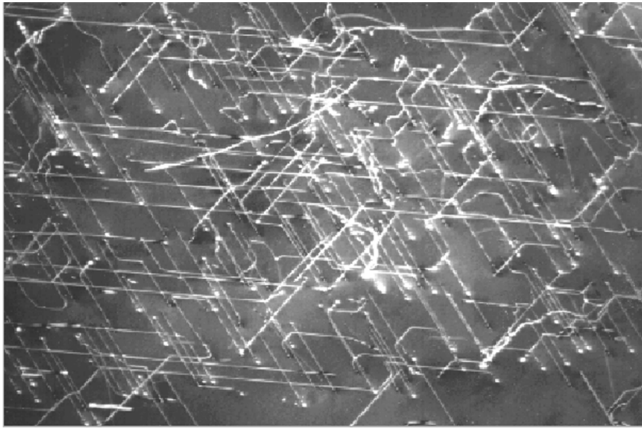
Zink (Zn)



Die Gleitung geschieht in einem Gleitsystem. Der Anfangsschubspannung τ_0 ändert sich nur wenig: $\theta \approx G/3000$

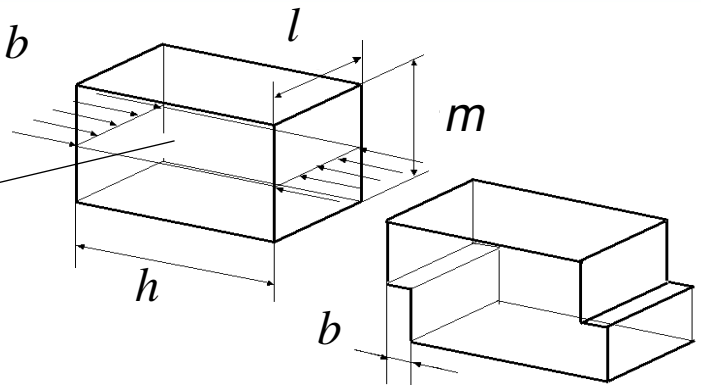
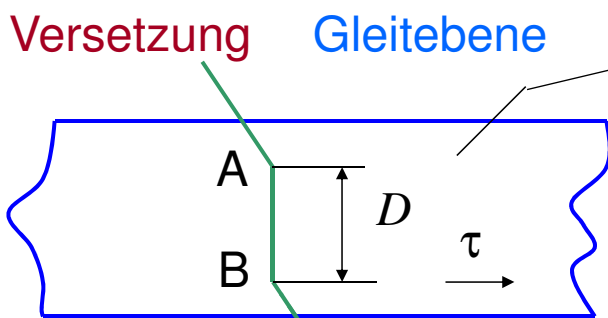
Die Gleitung kann man makroskopisch auch gut beobachten, dazu sind sehr viele Versetzungen nötig. Eine Versetzung verursacht eine Verschiebung von b Vektor. So ist für 1 mm makroskopische Verschiebung die Bewegung von n Stück Versetzungen nötig:

$$n = \frac{\Delta l}{b} = \frac{10^{-1} \text{ cm}}{2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}} = 5 \cdot 10^8$$



Anfang der Verformung gibt es so viele Versetzungen im Material nicht. Mit Frank-Read-Quellen werden neue Versetzungen gebildet.

$$W_\tau = \tau l b h = W_{F_d} = F_d l h \rightarrow F_d = \tau b$$

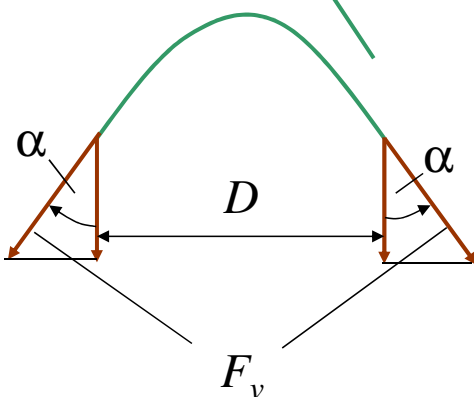


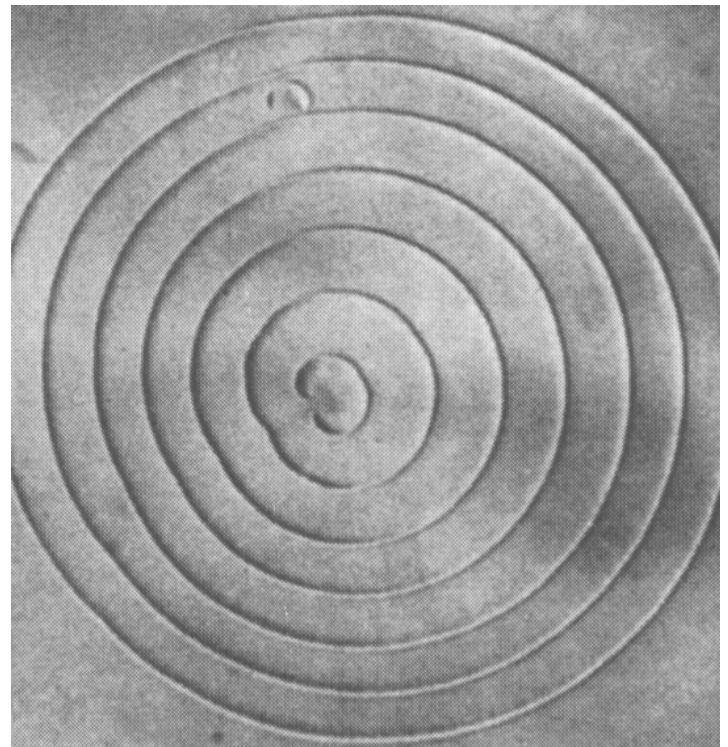
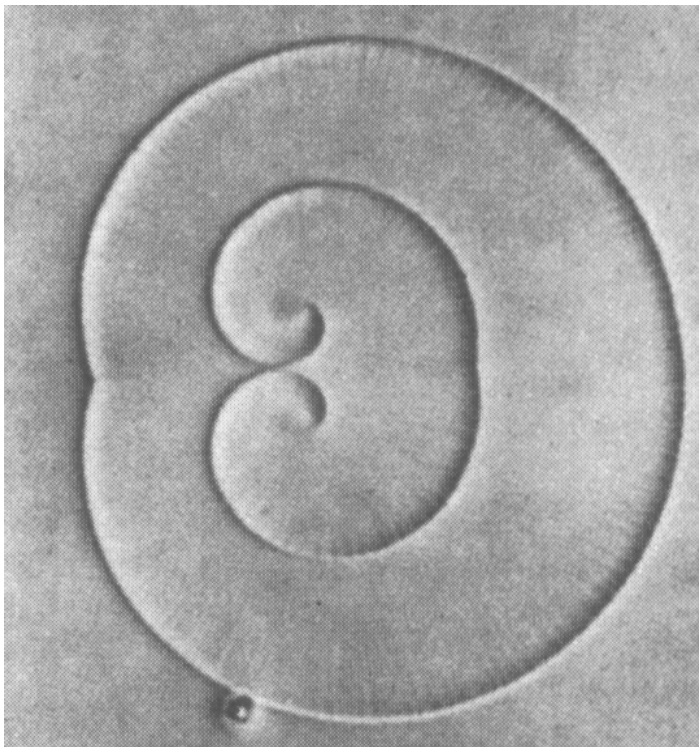
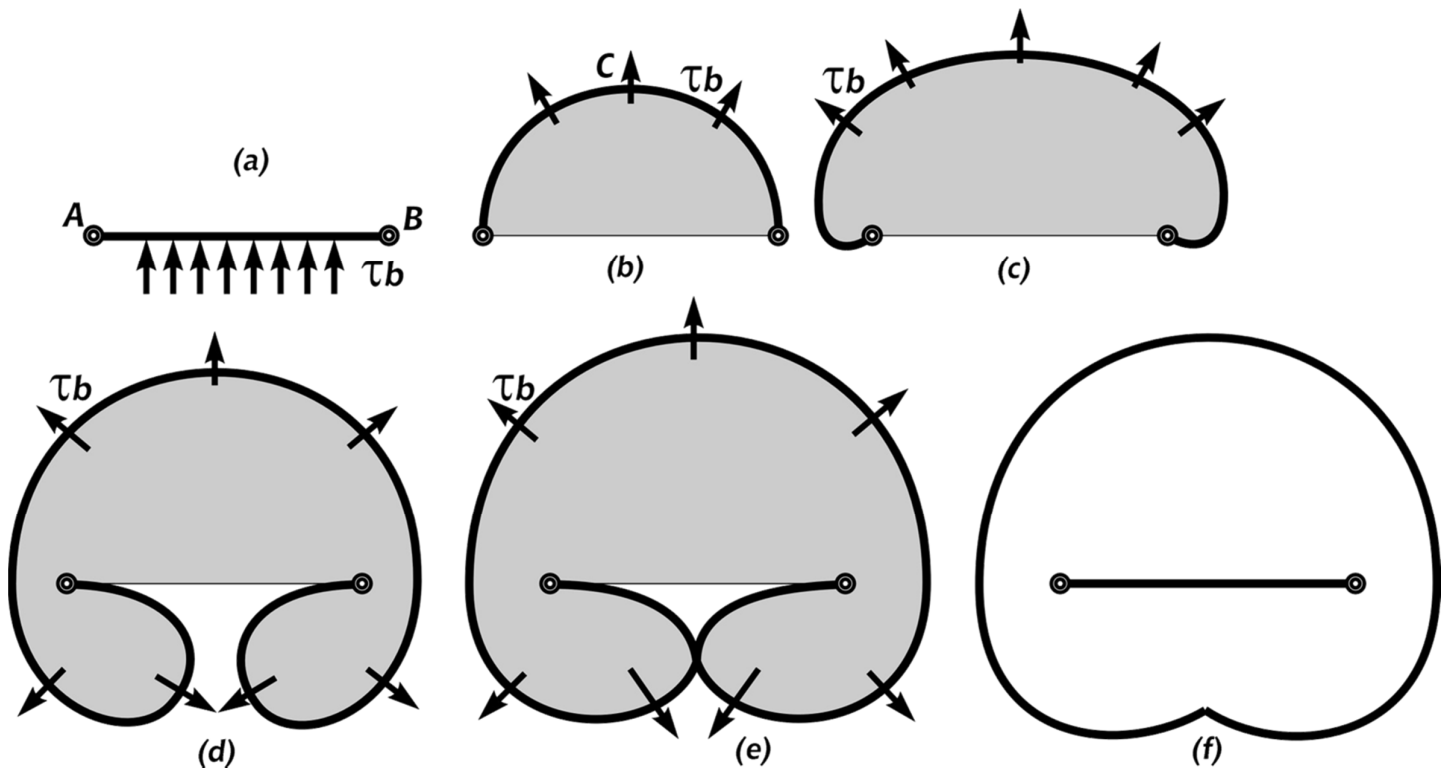
$$F_v = \frac{dW}{dl} = \frac{d}{dl} \left(\frac{Gb^2 l}{1-\nu} \right) = \frac{Gb^2}{1-\nu} \quad (\text{Stufenversetzung})$$

$$F_v = \frac{Gb^2}{1-\nu} \quad (\text{Schraubenversetzung})$$

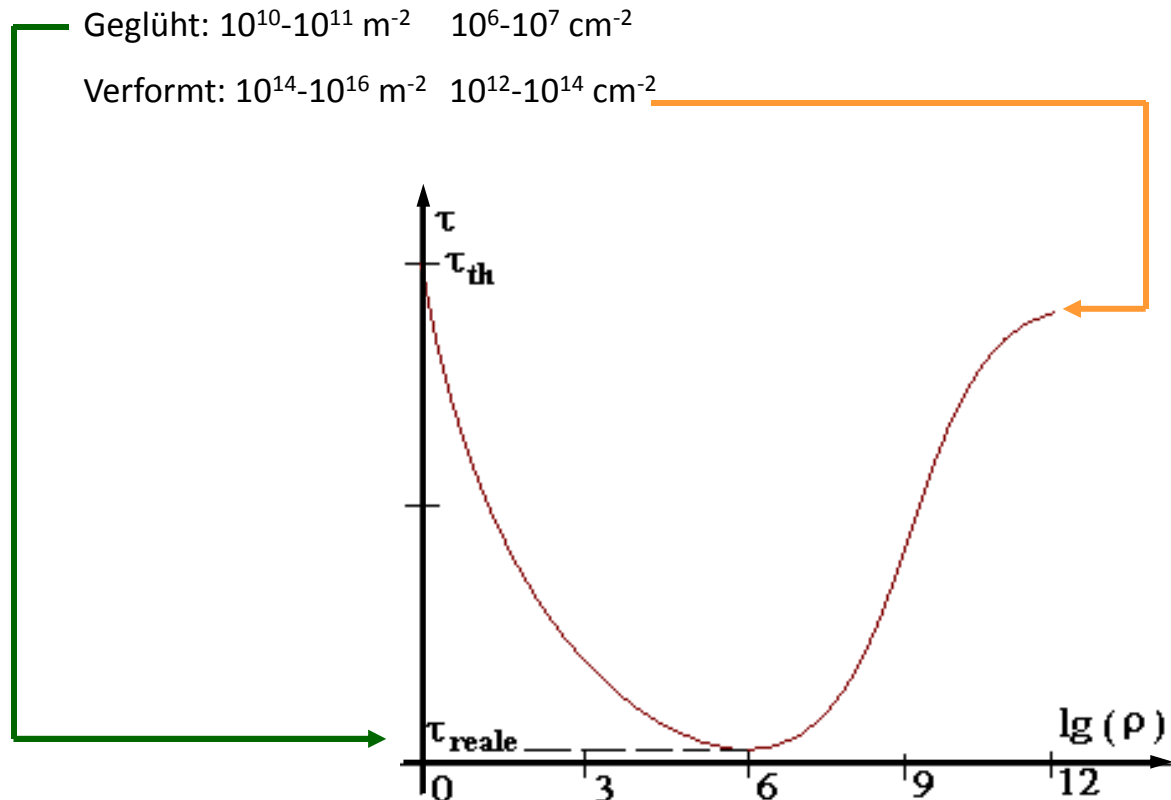
$$2F_v \cos \alpha = 2Gb^2 \cos \alpha = \tau b D$$

$$\tau = \frac{2Gb}{D} \cos \alpha \rightarrow \tau_{krit} = \frac{2Gb}{D}$$





Kaltverfestigung



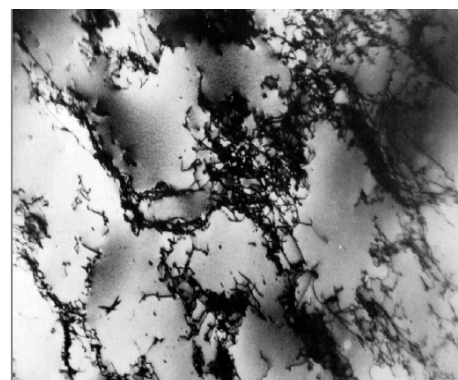
19

II. Abschnitt

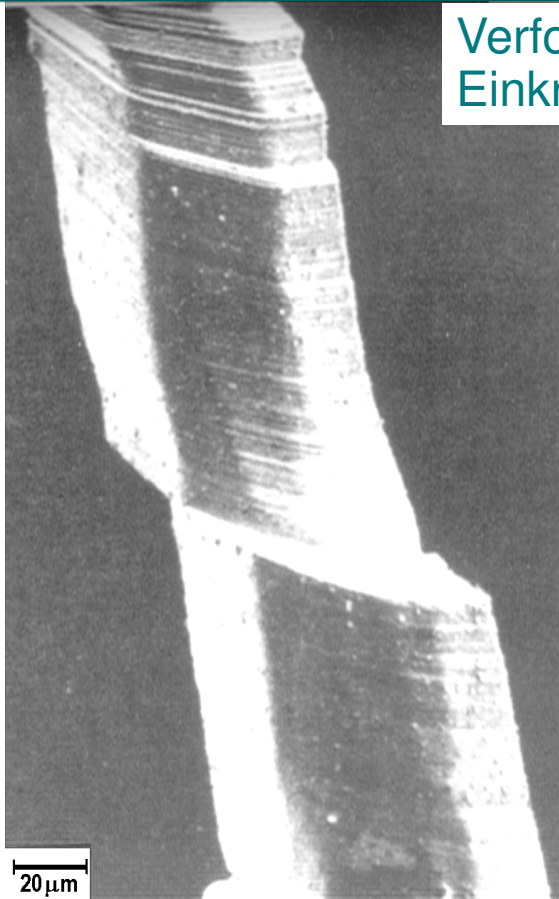
Wegen der Entstehung von neuen Versetzungen die Schubspannung wächst. Wegen der Verformung ändert sich die gegenseitige Ausrichtung der Kraft und der Kristall. Der Kristall dreht sich so, dass mindestens in 2 Gleitsystemen das Gleiten beginnt. Dieser Abschnitt kann auch mit linearen Verfestigung charakterisiert werden:

$$\theta_{II} \approx G/300 \quad \theta_{II} = \frac{d\tau}{d\gamma} \approx 10\theta_I \approx \frac{G}{300}$$

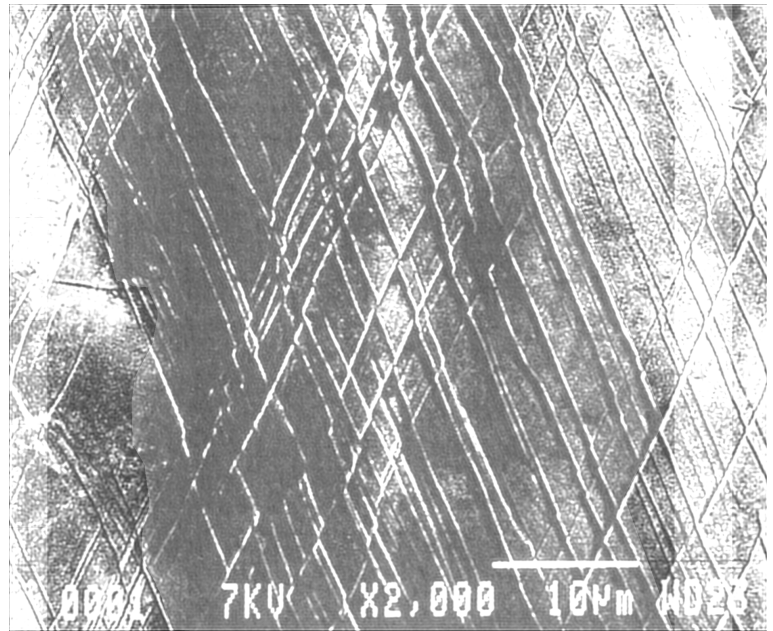
Die Verteilung der Versetzungen ist nicht gleichmäßig.



20



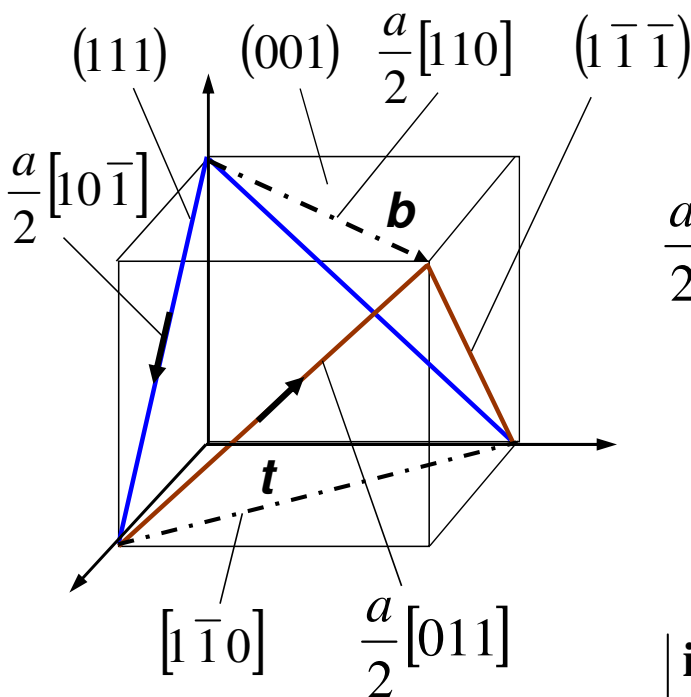
Verformung eines Zn Einkristalls im I. Bereich



Schnittlinien durch der Oberfläche und die Gleitebenen beim Cu

Einkristall (II: Bereich)

21



$$\frac{a}{2}[10\bar{1}]_{(111)} + \frac{a}{2}[011]_{(\bar{1}\bar{1}\bar{1})} \rightarrow \frac{a}{2}[110]_{(001)}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{t}}{|\mathbf{b} \times \mathbf{t}|}$$

$$\mathbf{n} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + \frac{2}{2}\mathbf{k}$$

22

Bei der Cottrel-Lomer Barriere die Resultierende der Versetzungslinien ist die Schnittlinie zwei Gleitebenen. Es ist senkrecht zur Burgers Vektor der Versetzung, also solche Stufenversetzung was in der (001) Ebene liegt. Dieser Ebene ist im kfz System keine Gleitebene, deswegen bewegt sich der neue Versetzung nicht mehr. Für weitere Gleitung beginnt die Verformung in anderen Gleisystemen (Frank-Read-Quellen). Es benötigt zusätzliche Spannung.

$$\tau = \tau_0 + \alpha b G \sqrt{\rho}$$

τ_0 – Anfangsfließspannung

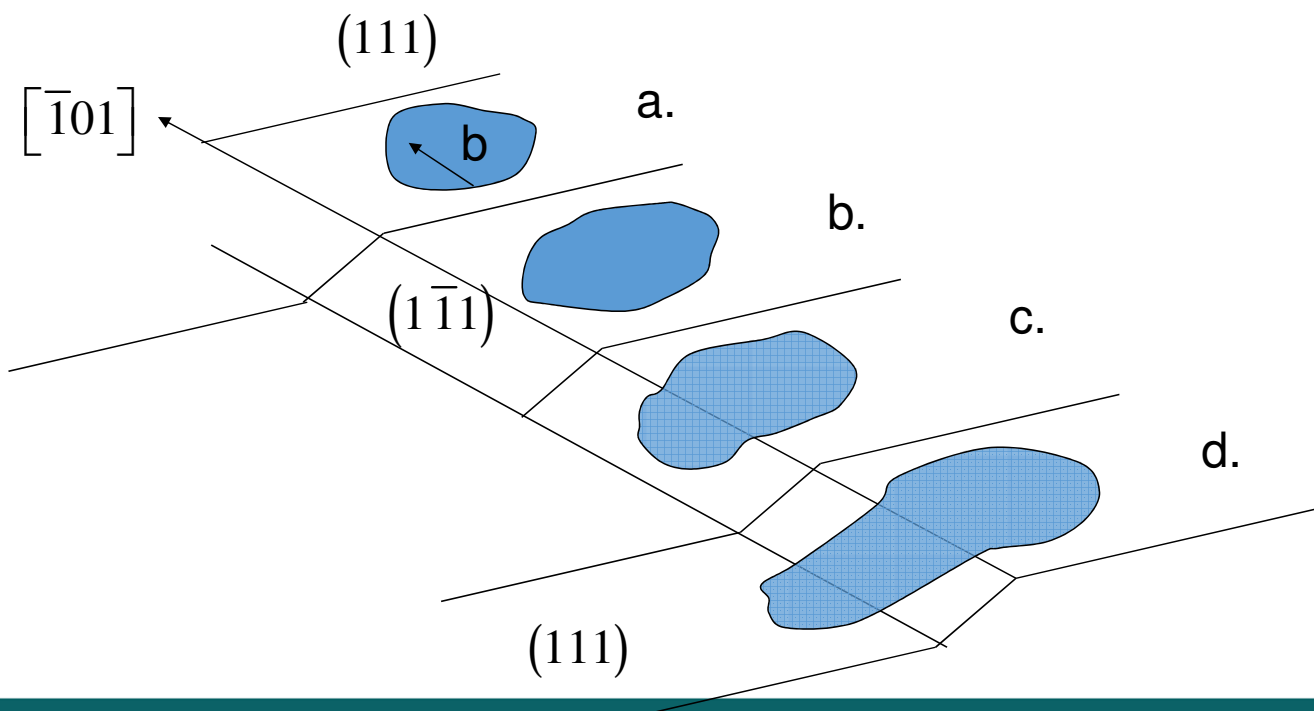
α – Konstante(0,3-0,6)

b – Absolutwert des Burgers-Vektors

G – Schubmodul

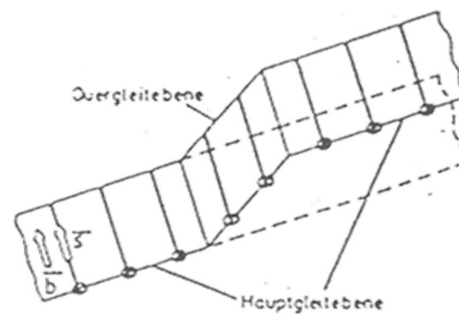
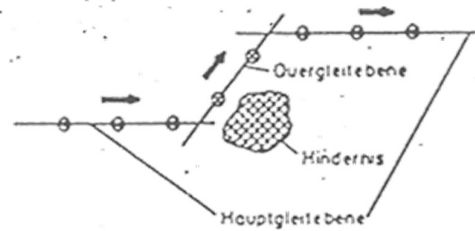
ρ – Versetzungsdichte

Es ist typisch, dass die fixierten Versetzungen werden von Hinten anderen Versetzungen umgelaufen. Dieser Vorgang ist Quergleiten.



Schraubenversetzung → (es gibt keine festgelegte Gleitebene)

Da Schraubenversetzungen keine "eingeschobenen Halbebenen" umfassen, können sie leicht in andere Gleitebenen überwechseln. Quergleiten ist wichtiger Umgehungsmechanismus von größeren Gleithindernissen.



Quergleiten von Schraubenversetzungen

25

Im III. Abschnitt verläuft die Verformung auf höheren Spannungsniveau, aber wegen der Aufeinandertreffen der Versetzungen mit entgegengesetzter Vorzeichen, die Verfestigung ist nicht so stark. Dieser Teil der Spannungs-Dehnungskurve zeigt in dieser Abschnitt parabolisches Charakter.

$$\tau = \frac{d\tau}{d\gamma} \sqrt{\gamma - \gamma_3}$$

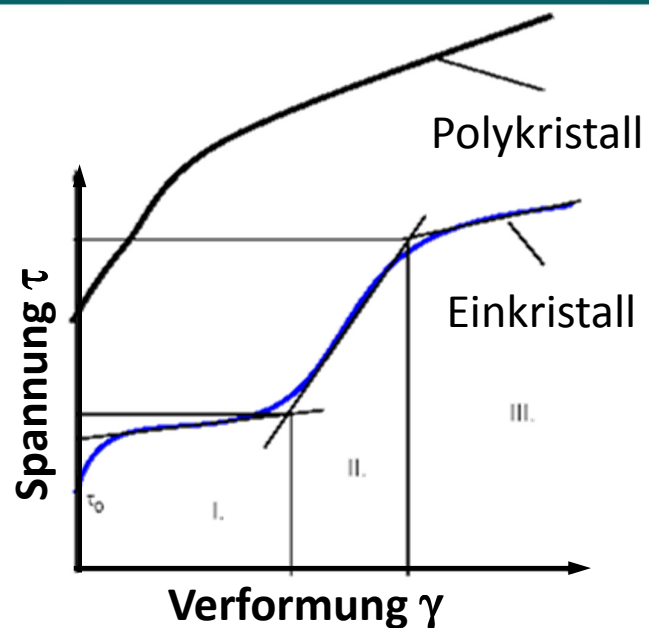
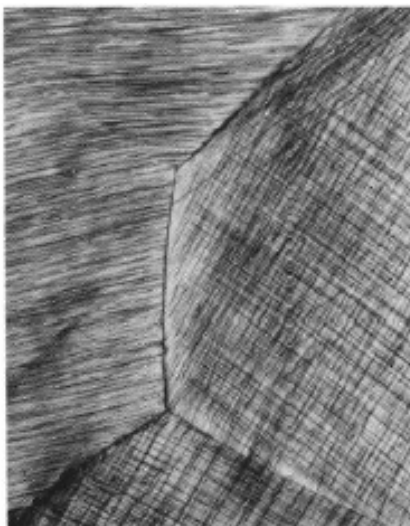
26

Die polikristalline Materialien bestehen aus vielen Körner mit verschiedenen Orientation. Die Kontinuität des Körpers bleibt während der Verformung konstant, deswegen nehmen wir an, dass in allen Körner mehrere Gleitsysteme aktiv sind (min. 5). Die Verfestigung polikristalline Materialien ist immer intensiver, als die von Einkristallen. Nach Taylors Theorie die makroskopische Leistung der Verformung kann mit der Summe der plastische Leistungen der einzelnen Gleitsysteme ausgedrückt werden:

$$\bar{\sigma} \dot{\epsilon}^p = \tau_{krit} \sum_{\alpha=1}^n \dot{\gamma}^{\alpha} \rightarrow \frac{\bar{\sigma}}{\tau_{krit}} = \frac{\sum_{\alpha=1}^n \dot{\gamma}^{\alpha}}{\dot{\epsilon}^p} = M$$

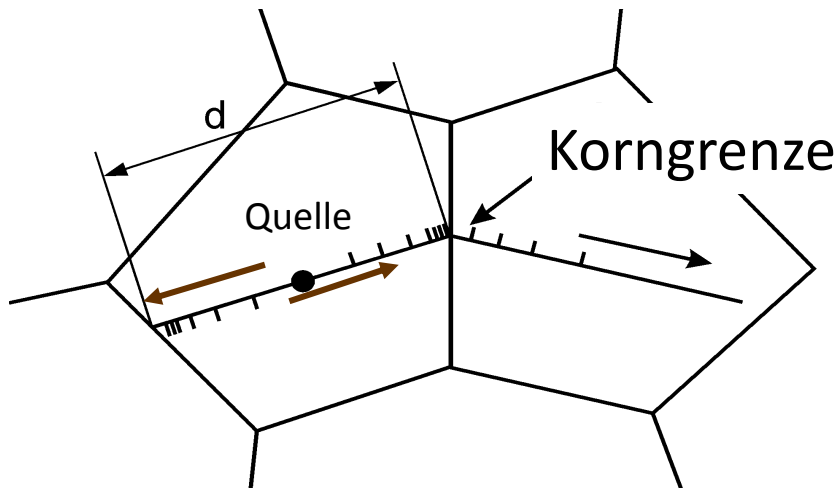
Im kfz Gitter $M=3,06$, t.k.k im krz Gitter $M=2,83$.

27



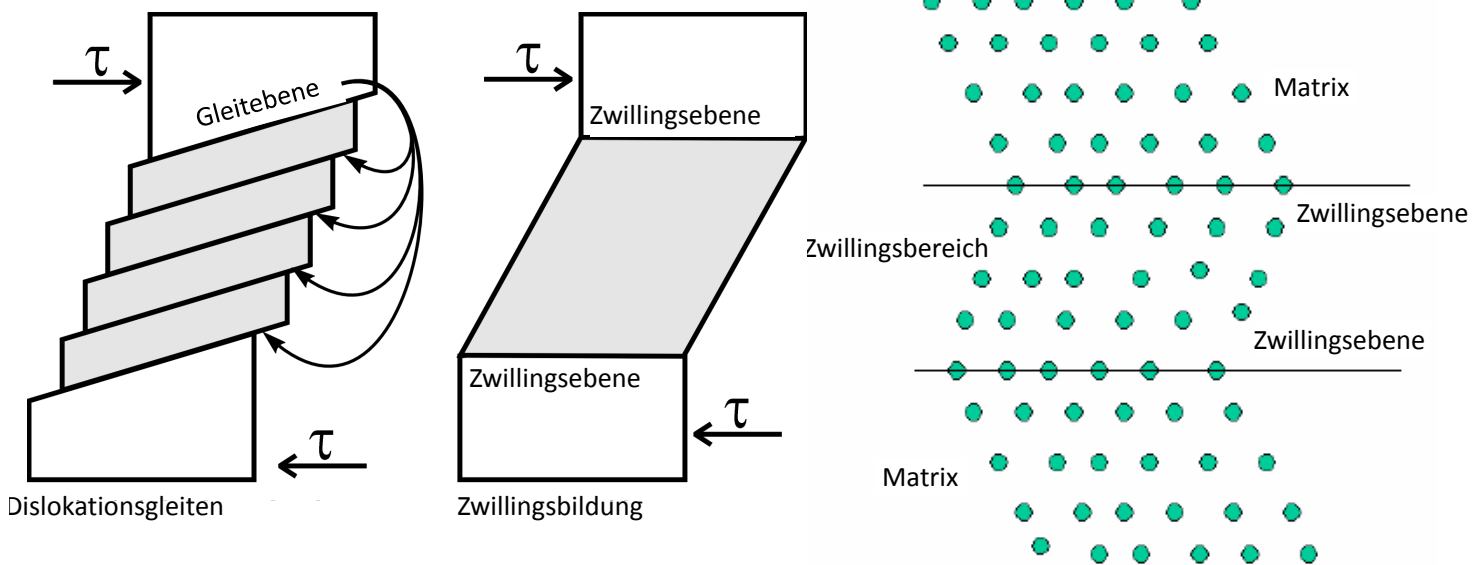
- In allen Körnern mehrfaches Gleiten.
- Verformungsverfestigung stärker.
- Bereich I. fehlt.
- Die Spannungen sind immer größer als bei der Einkristallen.

28



Hall-Petch Gleichung (untere Streckgrenze)

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{d}}$$



Gleiten: Bewegung in einigen Gleitebenen

Zwillingsbildung: Alle Ebenen bewegen sich in dem Zwillingsbereich

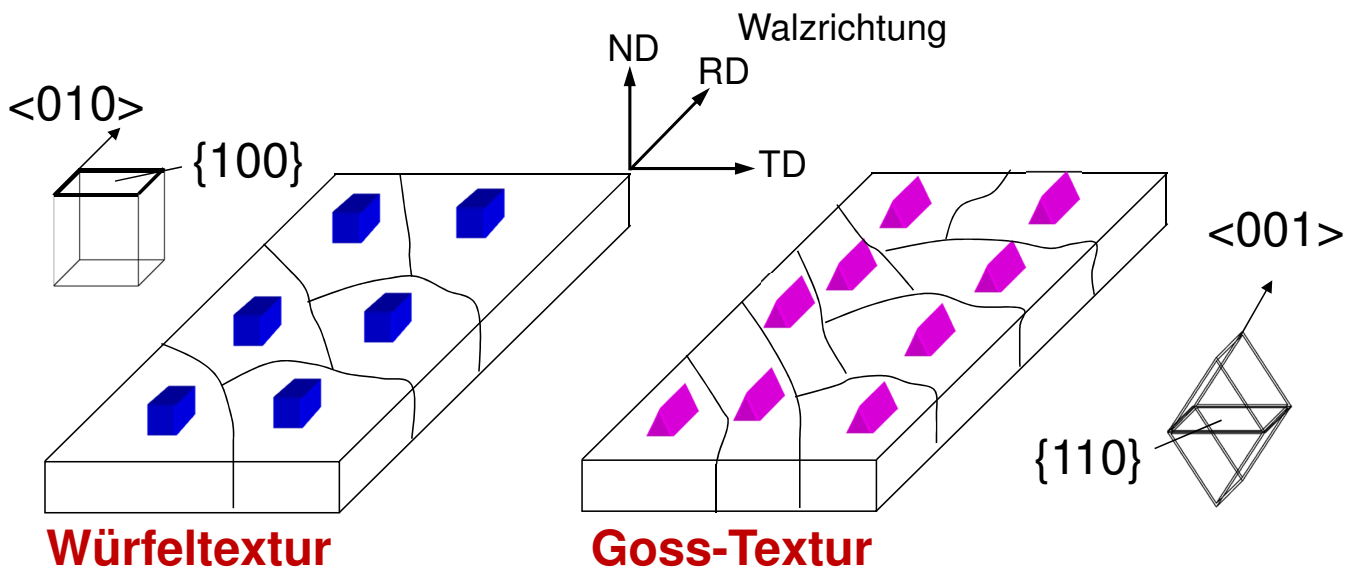
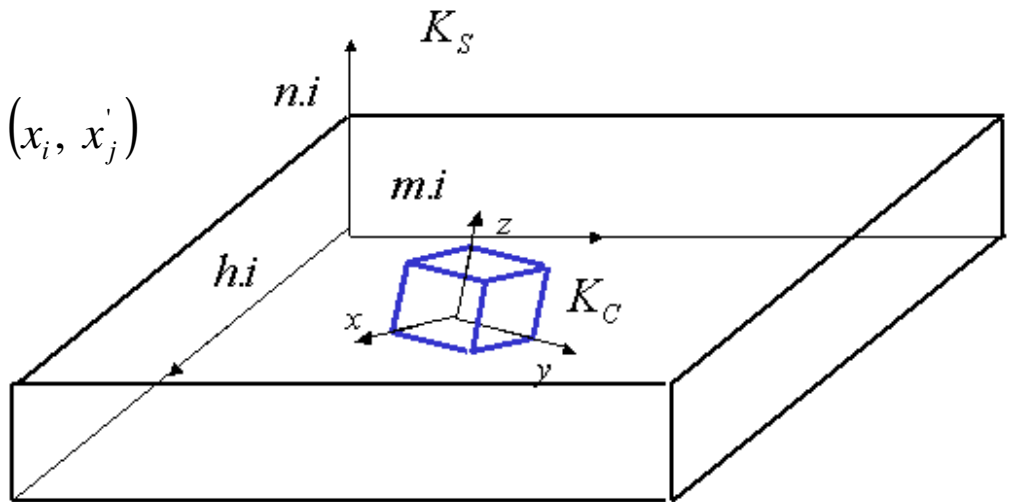
Ist die anisotrope Anordnung der Teile eines Festkörpers zu einer äußeren Koordinatensystem. Die Textur kann von mechanischen und von kristallographischen Ursprung stammen.

Ermittlung der Orientation der Körner:

K_c – lokales Koordinatensystem einen einzelnen Korn (x, y, z)

K_s – makroskopisches Koordinatensystem des Bleches (h_i, m_i, n_i)

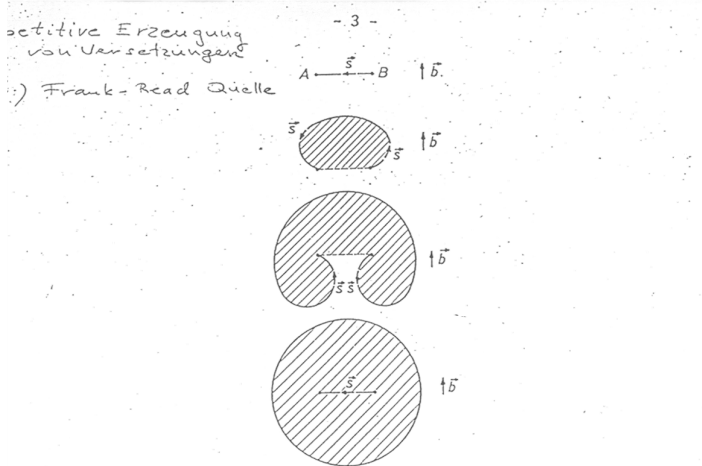
$$\mathbf{g} = [g_{ij}], \quad g_{ij} = \cos(x_i, x'_j)$$



Axiale Textur: die Kornstruktur ist so, dass die Körner mit einer gegebene Richtung parallel stehen.

Typische Struktur für Stangenziehen und Drahtziehen
<UVW>

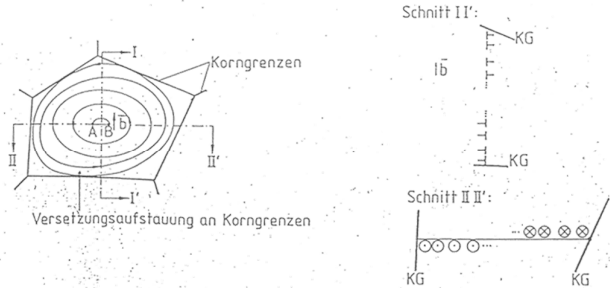
Frank-Read Quelle



Im Endstadium nähern sich Schraubenversetzungsanteile, ziehen einander an und löschen sich aus. Dabei wird das ursprüngliche Versetzungssegment wieder erzeugt, allerdings umgeben von einem geschlossenen neuerzeugten Versetzungsring. Somit kann der beschriebene Prozeß wieder von vorn beginnen. Auf diese Weise kann ein zweiter, dritter, ... n-ter Versetzungsring um das zwischen A und B verankerte Segment entstehen, das als die eigentliche Versetzungsquelle (nach ihrem Entdecker Frank-Read-Quelle genannt) anzusehen ist.

Versetzungen an der Korngrenzen

Die repetitiv erzeugten Versetzungsringe können in einem sonst ungestörten Korn eines Vielkristalls auf ihrer Gleitebene soweit unbehindert gleiten, bis der erste Versetzungsring auf die Korngrenzen auftrifft. Über die Korngrenzen hinweg können sich die Versetzungen nicht bewegen, weil dort wegen der Orientierungsunterschiede zu den Nachbarkörnern die Kontinuität der Gleitebenen nicht mehr gewährleistet ist. Als Folge davon stauen sich die von der Frank-Read-Quelle unter der wirksamen Schubspannung und den angenommenen Bedingungen erzeugten Versetzungsringe an den Korngrenzen auf, und es stellt sich etwa die nachfolgend skizzierte Versetzungsanordnung ein. Man spricht von Versetzungsaufstauungen. Diese können mit großen Spannungskon-



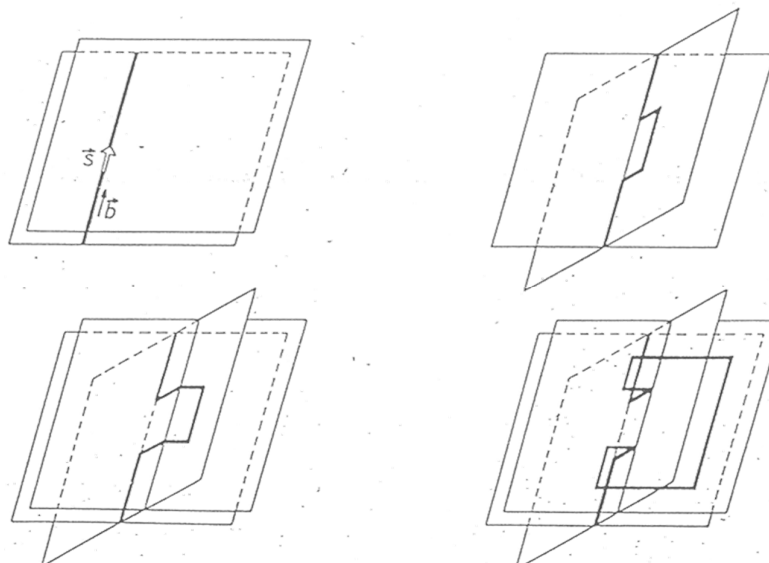
zentrationen im Bereich der führenden Versetzung verbunden sein. Liegt ein Aufstau von n Versetzungen vor, so tritt lokal an der Aufstauspitze eine Schubspannung

$$\hat{\tau} = n\tau$$

auf. Legt man Schnitte durch derartige Versetzungsaufstauungen, so erkennt man aus der jeweils vorliegenden Orientierung zwischen den Linienvektoren und dem Burgersvektor, daß als Grenzfälle reine Stufen- und reine Schraubenversetzungsaufstauungen vorkommen, meistens aber Aufstauungen von Mischversetzungen vorliegen.

Doppeltes oder mehrfaches Quergleiten

Nach Abschn. zeichnen sich Schraubenversetzungen dadurch aus, daß sie leicht quergleiten, also von einer Gleitebene auf eine anders orientierte und dann wieder auf eine mit der Ausgangsorientierung übereinstimmende übergehen. Bleiben dabei die in der Quergleitebene liegenden Versetzungssegmente ortsfest, so können sich die in der Ausgangs- und der dazu parallelen Gleitebene befindlichen Versetzungsanteile nach dem im letzten Abschnitt beschriebenen Mechanismus ausbreiten. Dann kann z. B. eine Sequenz von Ereignissen stattfinden, wie sie nachfolgend wiedergegeben ist. Man sieht,



daß auch in dieser Weise repetitive Versetzungsvermehrungen erfolgen können. Im Prinzip kann so durch immer neu erfolgende Quergleitprozesse ein ganzes Kornvolumen mit Versetzungen aufgefüllt werden.

Danke für die Aufmerksamkeit!