

Aussagen des Verdrehungsmoirés über Gitterfehler

Von J. DEMNY

Aus dem Physikalischen Laboratorium Mosbach *

(Z. Naturforsch. 15 a, 194—199 [1960]; eingegangen am 24. Dezember 1959)

Dünne Goldkristall-Lamellen, die wie eine Schraubenfläche übereinander gewachsen sind (Wendelkristalle), liefern bei Durchstrahlung im Elektronenmikroskop oft Verdrehungsmoirés. Diese Moirés geben die Möglichkeit, Kristallgitter und ihre Fehler indirekt zu untersuchen. Es werden einige charakteristische Veränderungen im Moiré beschrieben, die auf einzelne und mehrere Versetzungen sowie auf Stapelfehler zurückzuführen sind. Einige typische Konfigurationen des Moirés werden durch lichtoptische Modelle nachgebildet. In Filmaufnahmen konnte das Wandern der Versetzungen und die Entstehung von Stapelfehlern verfolgt werden.

Die Netzebenenabstände in den Kristallgittern betragen nur einige Ångström-Einheiten und liegen somit im allgemeinen unter der Auflösungsgrenze des Elektronenmikroskops. Nur in Ausnahmefällen ist es bisher gelungen, Kristallgitter direkt abzubilden (MENTER¹, NEIDER²). Ebenso ist man, um Gitterfehler nachzuweisen und zu untersuchen, vorwiegend auf indirekte Methoden angewiesen. Die bekannteste (und anschaulichste) dieser Methoden beruht auf dem Moiréeffekt.

In dieser Arbeit soll an typischen Beispielen gezeigt werden, welche Auswirkungen das Auftreten von Stufenversetzungen und Stapelfehlern auf das Verdrehungsmoiré hat, und wie man umgekehrt aus den Moiré-Erscheinungen zu Aussagen über Lage und Anordnungen von Versetzungen usw. gelangen kann. Es werden mehrere Hauptfälle dieser Erscheinungen mit einfachen lichtoptischen Modellen nachgebildet und anschaulich gemacht. Die ausgewerteten Bilder stammen aus gemeinsamen Untersuchungen mit POPPA und SCHULZE³.

I. Zur Methode

Moirémuster können entstehen, wenn geeignet übereinanderliegende dünne Einkristallfolien mit gleichen oder vergleichbaren Gitterkonstanten im Elektronenmikroskop durchstrahlt werden. Reine Verdrehungsmoirés — eine spezielle Form dieser Erscheinungen — erhält man, wenn zwei genau gleiche Kristallgitter, die um einen kleinen Winkel ge-

geneinander verdreht sind, aufeinanderliegen (Drehachse senkrecht zur Kristallfolie). Die Moiréstreifen stehen in diesem Fall nahezu senkrecht auf den sie erzeugenden Netzebenen, der Streifenabstand ist umgekehrt proportional zum Verdrehungswinkel. Der Verdrehungswinkel darf nur Zehntel Grad betragen. Es wäre mühsam, Einkristallfolien derart übereinanderzupräparieren, um den gewünschten Moiréeffekt zu erhalten. Glücklicherweise kommt die Natur dem Beobachter entgegen.

SUITO und UYEDA⁴ gaben eine Methode an, Goldkristall-Plättchen von einigen μ Ausdehnung und weniger als 100 Å Dicke herzustellen. Die Kristalle haben oft die vorteilhafte Eigenschaft, in zwei oder mehreren Schichten wie eine Schraubenfläche übereinanderzuwachsen, wie es von BRÜCHE und DEMNY⁵ und SUITO und UYEDA⁶ beschrieben wurde. Die aufeinanderliegenden Schichten dieser „gewendelten“ Goldkristalle sind oft nur so wenig gegeneinander verdreht, daß bei Durchstrahlung im Elektronenmikroskop Verdrehungsmoirés mit Moiréstreifen-Abständen bis zu 100 Å und mehr entstehen. Die Abb. 1 * stellt einen solchen sechseckigen Wendelkristall dar, dessen Oberfläche die (111)-Ebene ist. Die wichtigsten Gitterrichtungen sind eingetragen. Die folgenden Untersuchungen befassen sich ausschließlich mit den Auswertungen der Moiré-Muster, die die {220}-Netzebenen des Goldgitters liefern.

Von den Moirés lassen sich durch Kombination makroskopischer Strichgitter leicht Modelle herstellen, an denen die Eigenschaften der Moirés studiert

* Mitgliedsinstitut der AIF V. 67/59.

¹ J. W. MENTER, Proc. Roy Soc., Lond. A **236**, 119 [1956].

² R. NEIDER, Proc. Reg. Conf. Electr. Micr., Stockholm 1956, 93 [1957].

³ Die Aufnahmen wurden mit dem Elmiskop des Botanischen Instituts der Universität Heidelberg aufgenommen.

⁴ E. SUITO u. N. UYEDA, Proc. Internat. Conf. Electron Microscopy, London 1954, S. 233 [1956].

⁵ E. BRÜCHE u. J. DEMNY, Z. Naturforsch. **14 a**, 351 [1959].

⁶ E. SUITO u. N. UYEDA, Proc. Int. Conf. Electr. Micr., Berlin 1958 (im Druck).

* Abb. 1, 2, 6, 8, 9, 11, 12 und 13 auf Tafel S. 198 a, b.



werden können. Dabei entsprechen den Linien der Strichgitter die Spuren der Netzebenen. Während jedoch die Entstehung der Moirés in den lichtoptischen Modellen auf einem Absorptionseffekt beruht, ist für die Bildung der elektronenmikroskopischen Moirés eine Interferenz-Erscheinung verantwortlich. Das hat zur Folge, daß die Intensitätsverteilung der beiden Moirémuster komplementär zueinander ist⁷.

Die durch Gitterfehler verursachten Änderungen der Netzebenenordnung werden oft auf die Moiréstreifen übertragen, so daß in einzelnen Fällen eine „Ähnlichkeit“ zwischen Moirébild und Netzebenenbild besteht. Man kann daher auf Grund von Veränderungen und Störungen im Moiré Kenntnis über Abweichungen vom idealen Gitteraufbau erhalten. Mit Hilfe der Moiréeffekte wird das Elektronenmikroskop gewissermaßen überlistet, indem man Aussagen über Strukturen erhält, die unterhalb der Auflösungsgrenze der Apparatur liegen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß bei großen Moiréstreifen-Abständen Einzelheiten der Störungsgebiete des Gitters gar nicht oder nur sehr lückenhaft wiedergegeben werden.

II. Gitterversetzungen

Einzelne Stufenversetzung. Abb. 2 zeigt das Moiré eines Gold-Wendelkristalls, das als Folge von Versetzungen viele Störungen enthält. Als erstes betrachten wir die Auswirkung reiner Stufenversetzungen. Diese werden in der Modellvorstellung durch Einschieben halber Netzebenen in das Atomgitter idealisiert. Im Verdrehungsmoiré zweier Kristalle erscheint nach BASSETT, MENTER und PASHLEY⁹ dieselbe Zahl zusätzlicher „Halbebenen“. Sie stehen der Natur des Moirés gemäß allerdings senkrecht auf denen des realen Kristallgitters. Je nachdem, welche Lage die beiden aufeinanderliegenden Kristallgitter zueinander haben, geben die schwarzen (Intensitätsminima) oder die weißen Linien (Intensitätsmaxima) des Moirés diesen Sachverhalt wieder. Für den ersten Fall ist die Versetzung A, für den zweiten die Versetzung B der Abb. 2 ein Beispiel. In Abb. 3 a und 3 b findet man die gleichen Erscheinungsformen bei zwei übereinandergelegten Modellgittern dargestellt. Das eine Gitter ist ungestört, das andere enthält eine Stufenversetzung in Form einer eingeschobenen halben Gitterlinie. Die Abb. 3 b ist aus Abb. 3 a dadurch hervorgegangen, daß ein Gitter relativ zum anderen in Richtung der Moirélinien um einen halben Gitterabstand verschoben wurde.

Zwei eng benachbarte Stufenversetzungen. Als nächstes sei die Form C der Abb. 2 behandelt. Ihr Zustandekommen kann man auf zweierlei Weise erklären. Entweder sind in einem Kristall zwei eng benachbarte Versetzungen mit ungleichen Vorzeichen vorhanden (d. h. anschaulich, die Halbebenen sind von entgegengesetzten Seiten in das Gitter eingeschoben), oder die beiden Versetzungen haben gleiche Vorzeichen, befinden sich aber in den verschiedenen Kristallen. Die zweite Möglichkeit kann folgendermaßen am Modell veranschaulicht werden. Verdreht man eines von zwei parallel übereinandergelegten Modellgittern — das eine ungestört, das andere mit eingeschobener Halbebene — einmal um einen kleinen Winkel nach rechts und einmal um einen kleinen Winkel nach links gegenüber dem anderen, so kehrt die Versetzung im Moiré ihr Vorzeichen um. Das folgt aus einer einfachen Überlegung über die Verdrehungswinkel beider Gitter im Störungsgebiet einer Stufenversetzung. Sind nun in verschiedenen Gittern Versetzungen vom gleichen Typ mit gleichen Vorzeichen vorhanden, so erscheinen sie im Moirégitter mit entgegengesetzten Vorzeichen (und umgekehrt). Denn liegt im Modell der Abb. 4 die Versetzung im oberen Gitter, dann ist das untere relativ zum oberen etwas nach links verdreht, andernfalls genau umgekehrt.

Oft sind im Moiré zweier Kristalle Unregelmäßigkeiten gemäß D, E, F, G (Abb. 2) zu sehen, die vom normalen Versetzungsbild abweichen. Sie sind offenbar auf eng benachbarte, aber in verschiedenen Kristallen liegende Versetzungen zurückzuführen, wie die folgenden Modelle zeigen. Das Moiré der Abb. 5 a entsteht dadurch, daß die beiden Modellgitter der Abb. 4 so übereinandergelegt werden, daß die beiden Versetzungen gleichen Vorzeichens um eine kleine Strecke parallel zum Moiré voneinander entfernt sind. Durch Verschieben der beiden Gitter parallel zum Moiré entstehen die Abb. 5 a bis e. Die dabei auftretenden charakteristischen Formen sind im Prinzip dieselben wie die an den in Abb. 2 markier-

ten. Die Abb. 5 f bis h zeigen die Erscheinungen, die entstehen, wenn die beiden Gitter der Abb. 4 so übereinandergelegt werden, daß die beiden Versetzungen entgegengesetzten Vorzeichens um eine kleine Strecke parallel zum Moiré voneinander entfernt sind. Durch Verschieben der beiden Gitter parallel zum Moiré entstehen die Abb. 5 i bis l. Die dabei auftretenden charakteristischen Formen sind im Prinzip dieselben wie die an den in Abb. 2 markierten.

⁷ Wegen Einzelheiten des Abbildungsmechanismus sei z. B. auf RANG⁸ und die dort verzeichnete Literatur verwiesen.

⁸ O. RANG, Z. Phys. 136, 465 [1953]; Z. Kristallografie (im

Druck); Proc. Int. Conf. Electr. Micr., Berlin 1958 (im Druck).

⁹ G. A. BASSETT, J. W. MENTER u. D. W. PASHLEY, Proc. Roy. Soc., Lond. A 246, 345 [1958].

ten Stellen. In Abb. 5 c liegen die beiden Versetzungen genau übereinander. Das Moiré weist in diesem Fall keine Störung auf. Versetzungen gleichen Vorzeichens, die sich in verschiedenen Kristallen befinden und genau übereinanderliegen, bleiben also im Moiré unbemerkt. Das ist verständlich, da beide Gitter an jeder Stelle, auch im Störungsgebiet, denselben Winkel miteinander bilden. Im Zusammenhang mit Untersuchungen an Parallelmoirés von Gold und epitaxial darauf aufgewachsenem Palladium erklären übrigens BASSETT und Mitarb., daß eine im Gold vorhandene Versetzung sich beim Aufwachsen des Palladiums oft in dieses Metall hinein fortsetzen kann, in diesem Falle also nicht feststellbar ist.

Genau übereinanderliegende Versetzungen bleiben also auch beim Auszählen unberücksichtigt. Wenn man trotzdem in Abb. 2 durch Abzählen die Versetzungsdichte bestimmt, so kommt man auf einen Wert von 10^{10} Versetzungen je cm^2 . Er stellt auf Grund des vorher Gesagten einen Mindestwert dar. Hinzu kommt noch, daß eine Versetzung nicht unbedingt in jedem Moiré auftritt, was im folgenden gezeigt wird.

Der Einfluß einer Versetzung auf verschiedene Netzebenen. Versetzungen werden in der Theorie (vgl. dazu z. B. SEEGER¹⁰) durch ihren BURGERS-Vektor charakterisiert. Dieser Vektor ist im Fall einer vollständigen Versetzung ein Gittervektor $[hkl]$. Liegt eine reine Stufenversetzung vor, so gibt $[hkl]/d_{hkl}$ anschaulich an, wieviele (hkl) -Halbebenen in das Gitter eingeschoben sind, wenn d_{hkl} der (hkl) -Netzebenen-Abstand ist. Die Komponente eines BURGERS-Vektors $\mathbf{b} = [hkl]$ in einer Gitterrichtung $\mathbf{r} = [mnp]$ ist $(hm + kn + lp) d_{mnp}$. Das innere Produkt $\mathbf{b} \cdot \mathbf{r}$ gibt also direkt die Zahl der auf Grund des BURGERS-Vektors \mathbf{b} zusätzlich vorhandenen (mnp) -Ebenen an.

In kubisch-flächenzentrierten Gittern, zu denen das Gold gehört, sind die Vektoren $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$ und $\langle 100 \rangle$ die einzigen stabilen BURGERS-Vektoren. Letztere können allerdings in ein Paar vom ersten Typ aufspalten. Nach den obigen Überlegungen hat der Vektor $\frac{1}{2}[10\bar{1}]$ das Auftreten zweier $(20\bar{2})$ -Halbebenen und je einer $(0\bar{2}2)$ - und (220) -Ebene zur Folge. BASSETT und Mitarb.⁹ zeigten diesen Zusammenhang z. Tl. bereits an Moirés von übereinander präpariertem Gold und Palladium. Abb. 6 gibt diesen Sachverhalt noch einmal im Verdrehungsmoiré

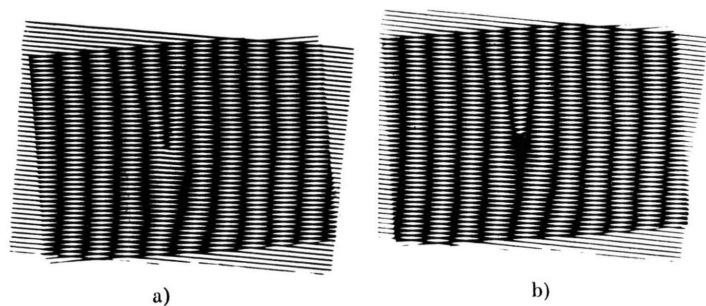
zweier Goldkristalle wieder. Während Abb. 6 a das eben angeführte Beispiel darstellt, liegt in Abb. 6 b eine Versetzung mit BURGERS-Vektor $\frac{1}{2}[110]$ vor. Die Zahl der (220) -, $(20\bar{2})$ - und $(0\bar{2}2)$ -Halbebenen ist in diesem Falle 0, 1 und 1, was auch aus der Abbildung deutlich hervorgeht. (Man betrachte die Bilder in Schrägsicht unter einem kleinen Winkel zur Papierebene in Richtung der drei Streifensysteme! Die Orientierung der Abbildungen stimmt mit der der Abb. 1 überein.) (Abb. 6 a wurde bereits in Phys. Bl. 15, 465 [1959] gezeigt.)

Gelegentlich beobachtet man im $\{220\}$ -Moiré des Goldes mehr als zwei nebeneinanderliegende Halbebenen. Hier darf man wohl annehmen, daß es sich um zwei Versetzungen in den beiden verschiedenen Kristallen handelt, die eng benachbart übereinander liegen. Ein Beispiel dafür ist Abb. 7 und später Abb. 12 b.

Kleinwinkelkorngrenze. Eine Häufung von Versetzungen liegt an Kleinwinkelkorngrenzen vor. So ist in Abb. 8 beispielsweise eine Reihe von etwa zehn z. Tl. äquidistanter Versetzungen zu sehen, die eine Kleinwinkelkorngrenze bilden. Man erkennt deutlich zu beiden Seiten der Korngrenze verschiedene Moiré-Abstände, die leicht zu deuten sind. Aus dem Abstand $a = 1,44 \text{ \AA}$ der $\{220\}$ -Netzebenen und dem Versetzungsabstand $D = 440 \text{ \AA}$ (gemessen an drei aufeinanderfolgenden, etwa auf einer Geraden liegenden, äquidistanten Versetzungen) berechnet man nach der bekannten Formel $\beta = a/D$ einen Korngrenzenwinkel von $\beta = 3,3 \cdot 10^{-3}$. Der große Moiréabstand $M_1 = 185 \text{ \AA}$ unterhalb der Korngrenze liefert nach der Formel $\gamma = a/M_1$ einen Verdrehungswinkel der beiden Kristalle in diesem Bereich von $\gamma = 7,7 \cdot 10^{-3}$. Im Gebiet oberhalb der Korngrenze sind dann die beiden Kristallgitter um den Winkel $\beta + \gamma = \delta = 1,1 \cdot 10^{-2}$ verdreht, woraus man einen Moiréabstand M_2 von 130 \AA berechnet, der mit dem dort gemessenen von 142 \AA recht gut übereinstimmt. Die kleine Diskrepanz erklärt sich wohl auch daraus, daß in diesem Bereich der eine Kristall „dachförmig“ verkantet auf dem anderen liegen dürfte, wobei der Dachfirst mit der Kleinwinkelkorngrenze zusammenfällt. Das wird dadurch gestützt, daß die Moirés entlang dieser Korngrenze ihre Richtung plötzlich ändern. Man hat es also mit keinem reinen Verdrehungsmoiré mehr zu tun.

Zuordnung von Versetzungen. In all den bisher gezeigten Fällen blieb die Frage offen, in welchem der beiden Kristalle die beobachteten Versetzungen auf-

¹⁰ A. SEEGER, Handb. d. Phys., Bd. VII, Teil 1.



← Abb. 3. Verschiedene Erscheinungsformen einer Versetzung im Moiré.

Abb. 4. Moiré mit zwei Versetzungen gleichen Vorzeichens in verschiedenen Gittern.

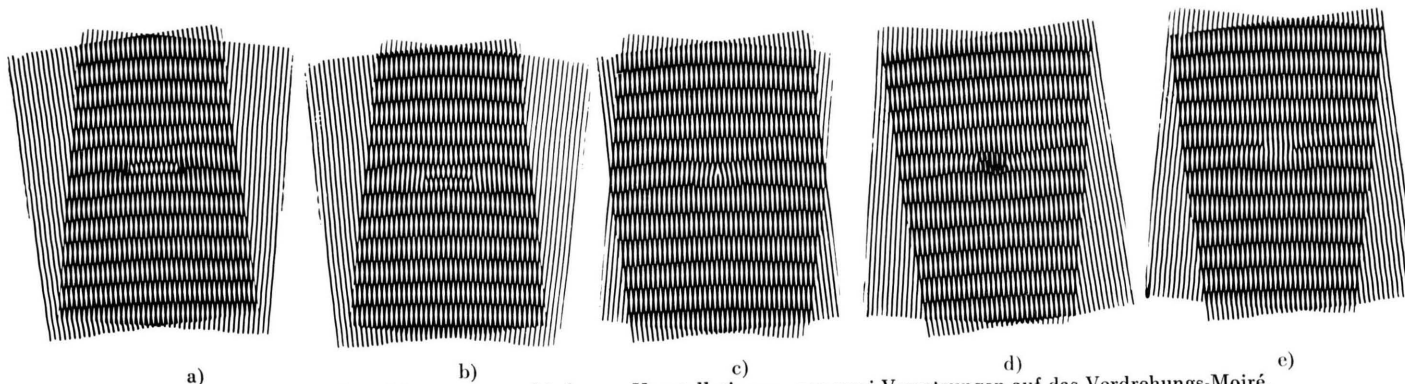
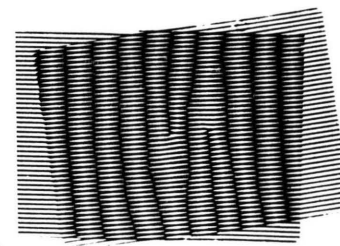


Abb. 5 a—e. Auswirkungen verschiedener Konstellationen von zwei Versetzungen auf das Verdrehungs-Moiré.

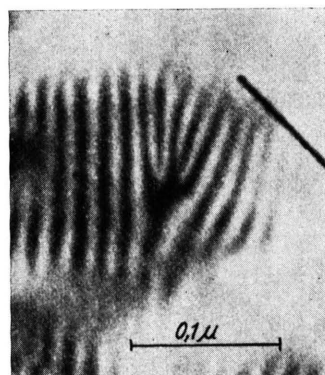
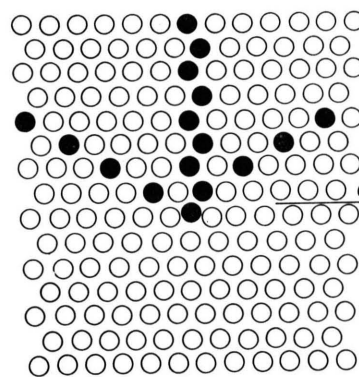
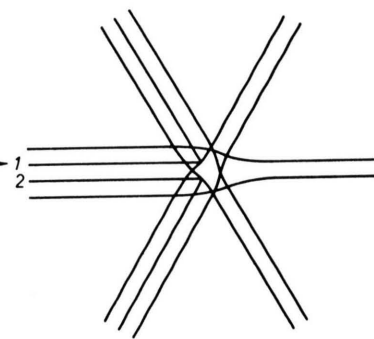


Abb. 7. Zwei eng benachbarte Versetzungen liefern vier eingeschobene Halbebenen.



a)



b)

Abb. 10.

a) Schema einer $\frac{1}{2}[110]$ -Versetzung. b) Dazugehöriges Moirébild (Ausschnitt).

treten. Diese Frage muß im allgemeinen unbeantwortet bleiben, kann jedoch in Sonderfällen geklärt werden. Ein solcher liegt vor, wenn *drei* Kristallschichten günstig übereinander liegen. So wird in Abb. 9 das grobe Moiré von den Kristallfolien I und II geliefert, während das feine Moiré entweder von den Folien III und I oder III und II herrührt. Letzteres bildet nur einen kleinen Winkel mit dem ersten, so daß es von gleichindizierten Netzebenen stammt. Die beiden Versetzungen der Abb. 9 b, die den markierten Ausschnitt der Abb. 9 a darstellt, kommen nur im feinen, aber nicht im groben Moiré vor. Sie müssen daher zwangsläufig im Kristall III liegen.

III. Wandern von Versetzungen

Durch die intensive Bestrahlung im Elektronenmikroskop erwärmen und verspannen sich die Kristallfolien. Dadurch kommen die Versetzungen in Bewegung. Es soll nun gezeigt werden, welche Veränderungen die Moirémuster durch wandernde Versetzungen erfahren. Es handelt sich dabei um die Deutung einiger charakteristischer Vorgänge, die in Filmaufnahmen¹¹ beobachtet wurden. In Abb. 10 a ist das Schema einer $\frac{1}{2}[\bar{1}10]$ -Versetzung mit ihren Auswirkungen auf die (022)- und (202)-Ebenen angegeben; Abb. 10 b ist das zugehörige Moirébild (Orientierung wie Abb. 1, Moirélinien senkrecht auf Netzebenen!). Im kubisch-flächenzentrierten Gitter spielen nun die {111}-Ebenen und die $\langle 110 \rangle$ -Richtungen die Hauptrolle als Gleitebenen und Gleitrichtungen. Die Oberfläche der Goldkristalle, also die (111)-Ebene, wird von den (111)-, ($\bar{1}11$)- und ($1\bar{1}1$)-Ebenen in Geraden parallel zu den Kristallkanten geschnitten (Abb. 1). Gleitet nun die in Abb. 10 a skizzierte Stufenversetzung entsprechend der angegebenen Gleitrichtung G nach rechts, so müssen sich die beiden Moirélinien 1 und 2 der Abb. 10 b nach rechts verlängern. Dieser Vorgang ist in den Abb. 11 a und b festgehalten. Die Versetzung „V“ ist in etwa einer Sekunde, um die die beiden Aufnahmen zeitlich auseinanderliegen, um $0,2 \mu$ nach rechts gewandert, die beiden eingeschobenen Moirélinien haben sich dabei um denselben Betrag nach rechts verlängert. Im Gitter des Verdrehungsmoirés macht sich also das Gleiten einer Versetzung als eine Diffusion bemerkbar (d. h. Anlagerung von Atomen an eine Versetzungslinie) und umgekehrt. Die beiden eingeschobenen (022)- und (202)-Ebenen bilden mit der Gleitrichtung einen Winkel von 30° bzw.

150° . Die Winkel der entsprechenden Moirélinien mit der Gleitrichtung sind 60° bzw. 120° , was aus dem Verhalten der Versetzung „V“ der Abb. 12 a und 12 b hervorgeht. Sie läuft von rechts zur Bildmitte, wo sie über der Versetzung „A“ zu liegen kommt, denn dort sind jetzt drei eingeschobene Linien zu sehen. Das ist einer der vorher besprochenen Sonderfälle, in denen durch genau übereinanderliegende Versetzungen ungleichen Vorzeichens mehr als zwei eingeschobene Linien auftreten können.

In Abb. 12 c ist die Versetzung „V“ aus dem Gesichtsfeld gewandert und das Bild der Versetzung „A“ der Abb. 12 a hat sich geändert. Die beiden eingeschobenen Linien haben sich um eine gewisse Strecke voneinander entfernt. Dafür gibt es zwei Deutungsmöglichkeiten. Entweder waren schon von vornherein zwei sehr eng benachbarte Versetzungen vorhanden (jede mit einer zusätzlichen Moirélinie), die dann auseinander wanderten oder es hat eine Versetzungsreaktion der Art

$$[001] = \frac{1}{2}[101] + \frac{1}{2}[\bar{1}01]$$

stattgefunden. Denn die Versetzung mit BURGERS-Vektor $[001]$ liefert in dem hier vorliegenden (022)-Moiré zwei, die beiden Versetzungen der rechten Seite je eine eingeschobene Linie. Bei derart großen Moiréabständen von 200 \AA kann dieser Fall nicht eindeutig entschieden werden.

Außer der Bewegung der Versetzungen wurde auch oft die Bewegung der Moiréstreifen selbst beobachtet. Sie kommt dadurch zustande, daß die beiden Kristalle sich etwas gegeneinander verschieben. Wird das eine Kristallgitter gegenüber dem anderen um einen Gitterabstand, und zwar in Richtung der Moiréstreifen verschoben, dann verschieben sich die Moiréstreifen selbst ebenfalls um einen Streifenabstand. Das heißt, kleine unmeßbare Gitterverschiebungen von wenigen Ångström-Einheiten werden in meßbare Verschiebungen senkrecht dazu transformiert, die um den Moiréfaktor $m = \text{Moiréabstand} / \text{Netzebenenabstand}$ größer sind (bzw. $m \cos \alpha$, wenn die Bewegungsrichtung mit den Moiréstreifen einen Winkel α bildet). Das gleiche gilt für die dazugehörigen Geschwindigkeiten. In Filmaufnahmen wurde z. B. an Moiréstreifen von 500 \AA Abstand, was bei einem Netzebenenabstand von $1,44 \text{ \AA}$ einem Moiréfaktor $m = 350$ entspricht, eine Geschwindigkeit von 100 \AA/sec gemessen. Die Kristallgitter haben sich

¹¹ H. POPPA u. K.-J. SCHULZE, Naturwiss. **46**, 398 [1959].

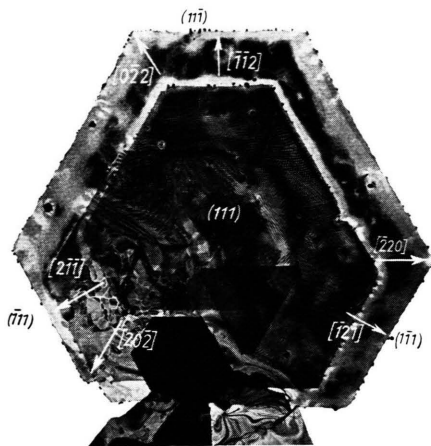


Abb. 1. Gewendelter Goldkristall mit Verdrehungsmoiré und den wichtigsten Gitterrichtungen. Die Indizierungen (111) , $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ und $(1\bar{1}\bar{1})$ sollen angeben, zu welchen Kristallkanten die Schnittgeraden der $\{111\}$ -Ebenen mit der Oberfläche $[(111)\text{-Ebene}]$ parallel sind.

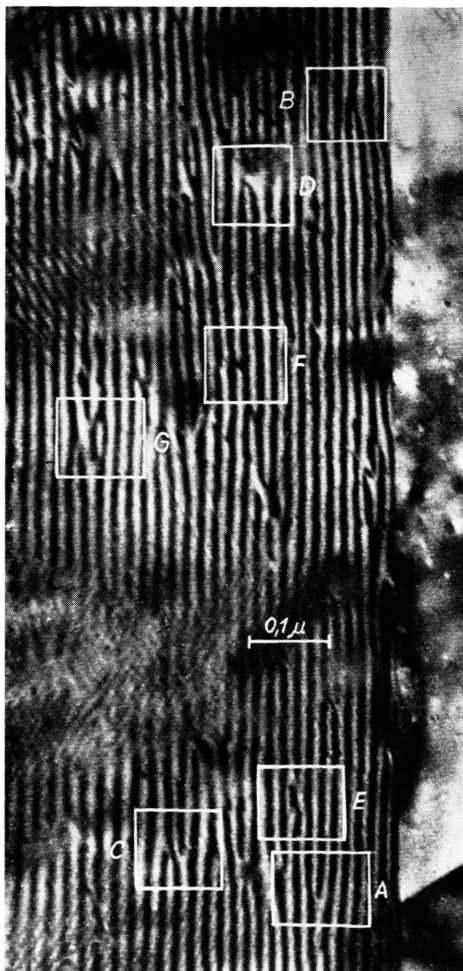


Abb. 2. Moiré mit zahlreichen Versetzungen.

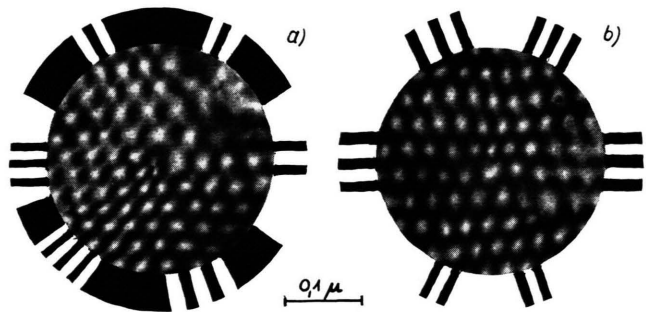


Abb. 6. a) Einfluß einer Versetzung $\frac{1}{2}[\bar{1}01]$ auf die (022)-, (220)- und (202)-Ebenen (Orientierung wie Abb. 1). b) Dasselbe für die Versetzung $\frac{1}{2}[110]$.

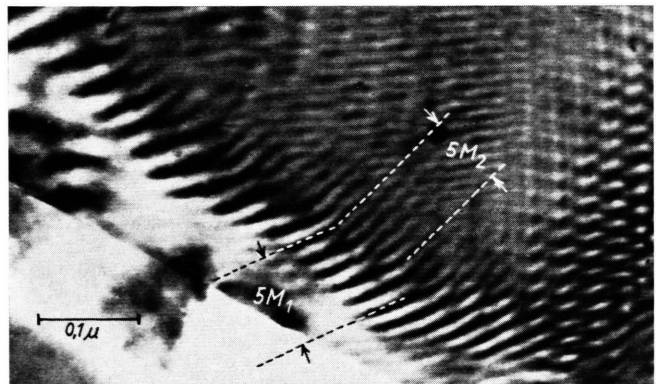


Abb. 8. Kleinwinkelkorngrenze im Moiré.

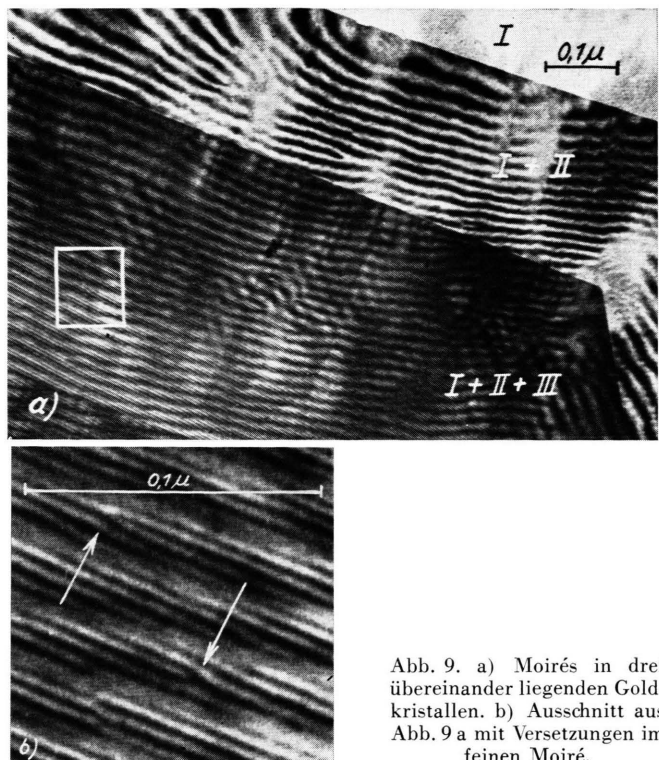


Abb. 9. a) Moirés in drei übereinander liegenden Goldkristallen. b) Ausschnitt aus Abb. 9 a mit Versetzungen im feinen Moiré.

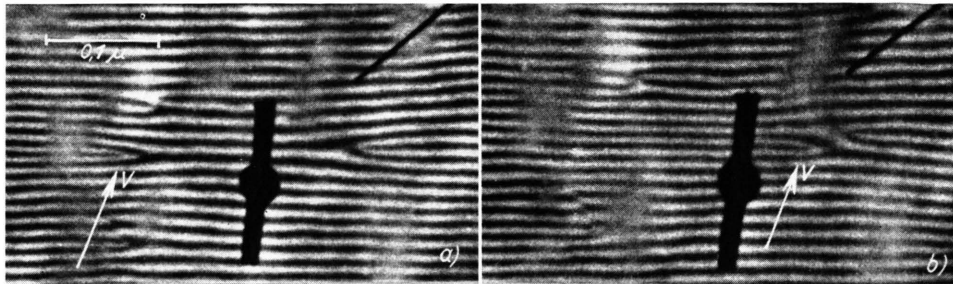


Abb. 11. Gleitende Versetzung, Gleitrichtung parallel zum Moiré. Die schwarzen Markierungen rühren vom Leuchtschirm her.

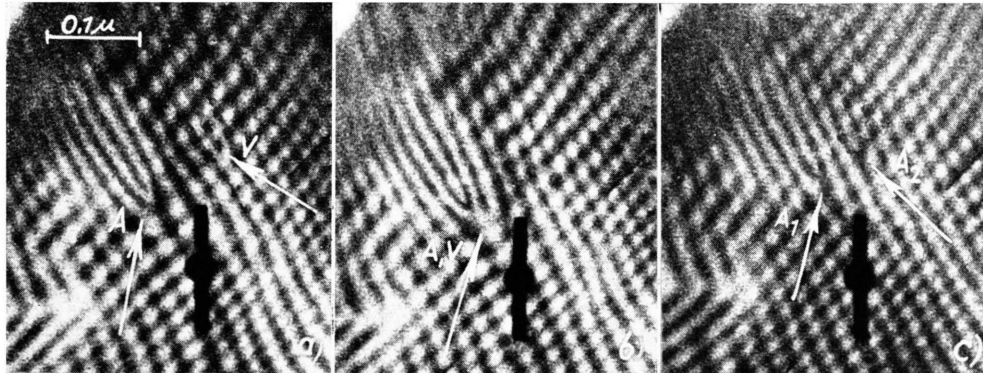


Abb. 12. a) und b) Gleitende Versetzung, Gleitrichtung bildet 60° -Winkel mit Moiré. Die schlechten Reproduktionen der Filmaufnahmen sind etwas retuschiert. c) Aufspalten der Versetzung „A“ der Abb. 12 a.

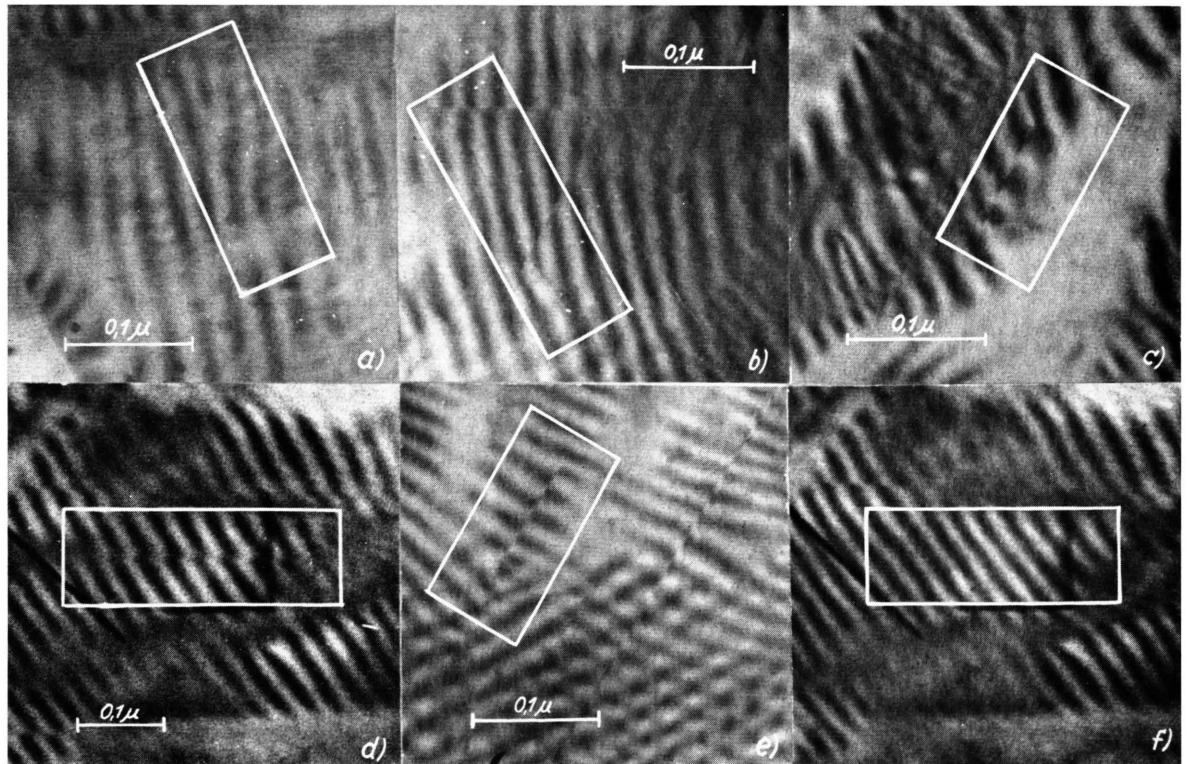


Abb. 13. Moirés bei Stapelfehlern. a) Stapelfehler des Typs I der Tab. 1. Er schließt an den Enden mit je einer eingeschobenen Ebene ab. — b) Stapelfehler des Typs II der Tab. 1. Er schließt an einem Ende mit einer eingeschobenen Ebene ab, das andere Ende bleibt ohne Einfluß auf das Moiré. Der Stapelfehler ist im Original als feine Linie zu sehen. — c) Stapelfehler des Typs III der Tab. 1. Die Moiréstreifen erleiden an seinen Enden Verschiebungen von $\frac{2}{3}$ bzw. $\frac{1}{3}$ ihres Abstandes. — d) Stapelfehler des Typs IV der Tab. 1. Die Moiréstreifen erleiden an seinen Enden Verschiebungen von $+\frac{1}{3}$ bzw. $-\frac{1}{3}$ ihres Abstandes. — e) Zwei eng benachbarte Stapelfehler des Typs III der Tab. 1 liefern Linien-Verschiebungen von $\frac{4}{3}$ bzw. $\frac{2}{3}$ ihres Abstandes an den Stapelfehlerenden. — f) Dieselbe Objektstelle wie Abb. 13 d, jedoch vor der Bildung des dort markierten Stapelfehlers.

demnach mit einer Geschwindigkeit von ca. $0,3 \text{ \AA/sec}$ oder von umgerechnet 1 mm/Jahr gegeneinander bewegt ($\alpha = 0$ angenommen). Zur Bestimmung der genauen Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung muß das Verhalten verschiedener Moirésysteme bekannt sein.

IV. Stapelfehler

Im kubisch-flächenzentrierten Gitter sind die Atome der $\{111\}$ -Ebenen am dichtesten gepackt. Im fehlerfreien Gitter sind diese Ebenen so übereinander gestapelt, daß jeweils die erste und vierte, zweite und fünfte usw. genau senkrecht übereinander liegen. Die Ebenen bilden dann die ungestörte Reihenfolge ABCABC... . Unter Stapelfehler versteht man Abweichungen von dieser Anordnung, z. B. die Folge ABCABABC... . Ein derartiger Stapelfehler kann nach HEIDENREICH und SHOCKLEY durch eine Versetzungsreaktion des Typs

$$\frac{1}{2}[110] = \frac{1}{6}[211] + \frac{1}{6}[12\bar{1}]$$

aus einer Stufen- oder Schraubenversetzung entstehen. Diese Reaktion läuft unter Energiegewinn ab. Die freiwerdende Energie treibt sozusagen die beiden rechts stehenden Partialversetzungen auseinander, bis die Oberflächenspannung des dazwischen entstandenen Stapelfehlers den abstoßenden Kräften das Gleichgewicht hält. Jede der sechs verschiedenen Versetzungen mit BURGERS-Vektoren des Typs $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$ kann auf zwei Arten nach diesem Muster aufspalten, so daß es insgesamt 12 Reaktionen gibt, die auf diese Weise zu Stapelfehlern führen. In ihrem Einfluß auf die $\{220\}$ -Ebenenscharen sind allerdings nur vier derartige Reaktionen verschieden. In Tab. 1 sind diese Zusammenhänge eingetragen.

Durch Bildung des inneren Produkts $b \cdot r$ (b = BURGERS-Vektor der Stufen- oder der Partialversetzungen, $r = [022]$) errechnet man die Einflüsse der Partialversetzungen, die die Stapelfehler begrenzen, auf die (022) -Ebenen und damit auch auf ihre Moirélinien (vgl. Tab. 1). Zum Teil schließen die Stapelfehler mit einer oder keiner eingeschobenen Ebene ab, z. Tl. mit Verschiebungen von $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{2}{3}$ des (022) -Netzebenenabstandes. Im letzten Fall sind die Netzebenen entlang der Stapelfehler, die sich durch gerade, den Kristallkanten parallele Linien bemerkbar machen, um $\frac{1}{3}$ ihres Abstandes verschoben. Diese Erscheinungen sind in den Moirés der Abb. 13 a – d zu sehen. Die Stapelfehler sind durch

Rechtecke markiert. Das Moiré der Abb. 13 e zeigt an den Enden des markierten Stapelfehlers Streifenverschiebungen von $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{2}{3}$ ihres Abstandes. Hier liegt offenbar der Fall zweier eng benachbarter Stapelfehler mit den jeweiligen Verschiebungen von $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{3}$ vor. Die Orientierung der Abbildungen stimmen mit der der Abb. 1 überein. BASSETT und Mit-

I	$\frac{1}{2}[011] = \frac{1}{6}[1\bar{1}2] + \frac{1}{6}[12\bar{1}]$	(111)
	$b \cdot r$ 2 1 1	
II	$\frac{1}{2}[101] = \frac{1}{6}[211] + \frac{1}{6}[112]$	(111)
	$b \cdot r$ 1 0 1	
III	$\frac{1}{2}[110] = \frac{1}{6}[21\bar{1}] + \frac{1}{6}[121]$	(1 $\bar{1}1$)
	$b \cdot r$ -1 - $\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$	
IV	$\frac{1}{2}[011] = \frac{1}{6}[112] + \frac{1}{6}[\bar{1}21]$	(11 $\bar{1}$)
	$b \cdot r$ 0 $\frac{1}{3}$ - $\frac{2}{3}$	

Tab. 1. Stapelfehlerbildung durch Aufspalten von Stufenversetzungen des Typs $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$ und ihr Einfluß auf die (022) -Netzebenen ($r = [022]$). — Die letzte Spalte gibt an, in welcher Ebene die Reaktion stattfindet.

arb.⁹ konnten schon Aufspaltungen von Versetzungen, die zu Stapelfehler führen, z. Tl. nachweisen. Sie fanden im Moiré von Gold und Kupfer bei einem Streifenabstand von etwa 12 \AA Stapelfehler von etwa 85 \AA Länge. In den hier untersuchten Goldkristallen wurden Stapelfehler bis zu einigen Zehntel μ Ausdehnung gefunden¹². Diese hohen Werte, die mit den bisherigen Ergebnissen der Theorie, die für diese Größe Werte unter 100 \AA angibt, nicht übereinstimmen, werden durch die extrem starke Bestrahlung erklärt, der die Goldkristalle im Elektronenmikroskop ausgesetzt waren. Diese Aussage wird durch Filmaufnahmen bestätigt, in denen bei starker Bestrahlung häufig das Aufspalten von Versetzungen und das damit verbundene plötzliche Auftreten solcher großer Stapelfehler beobachtet werden konnte. Die Abb. 13 f und 13 d sind dafür ein Beispiel. Die beiden Aufnahmen liegen nur um Bruchteile einer Sekunde auseinander. Die charakteristische Änderung des (022) -Moirés in dem markierten Bereich weist auf das Entstehen eines Stapelfehlers mit $\pm \frac{1}{3}$ Verschiebungen an den Enden hin. Die Versetzung, aus der der Stapelfehler entstanden ist, hat auf dieses Moiré keinen Einfluß (Fall IV der Tab. 1).

Wir danken der Arbeitsgemeinschaft für Elektronenoptik e.V., der Deutschen Forschungsgemeinschaft und den Wirtschaftsministerien des Bundes und des Landes Baden-Württemberg für ihre Unterstützung.

¹² O. RANG u. H. POPPA, Z. Metallkunde (im Druck).