

**Zeitschrift:** Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =  
Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

**Band:** 45 (1965)

**Heft:** 2

**Artikel:** Eine photographische Röntgen-Gefügeanalyse

**Autor:** Wenk, Hans-Rudolf

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-35202>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 27.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Eine photographische Röntgen-Gefügeanalyse

Von *Hans-Rudolf Wenk* (Zürich)\*)

Mit 33 Textfiguren

## Inhalt

Abstract . . . . .	518
Zusammenfassung . . . . .	518
A. Methodik der photographischen Röntgen-Gefügeanalyse . . . . .	518
1. Einleitung . . . . .	518
2. Geometrie der Röntgenbeugung an Gefügen . . . . .	521
3. Aufbau der Kamera . . . . .	524
4. Gang der Auswertung . . . . .	527
a) Übersichtsaufnahmen . . . . .	527
b) Stereogrammaufnahmen . . . . .	531
c) Quantitative Auswertung . . . . .	534
5. Spezielle Anwendungen der Kamera . . . . .	535
a) Einkristall-Orientierung . . . . .	535
b) Korngrößenbestimmung . . . . .	536
6. Bewertung der Methode . . . . .	537
B. Anwendung der photographischen Röntgen-Gefügeanalyse . . . . .	538
1. Fasrige und stengelige Mineralaggregate (Gips, Coelestin, Aragonit) . . . . .	538
2. Gefüge von organischen Schalenmaterialien . . . . .	540
3. Deformierte Metalle . . . . .	543
4. Tektonitgefüge . . . . .	546
Literatur . . . . .	549

---

\*) Gegenwärtige Adresse: Dr. H.-R. Wenk, Institut für Kristallographie und Petrographie der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.

**Abstract**

The method of the photographic X-ray texture-analysis, especially the geometric relations of X-ray diffraction in fabrics, construction and manipulation of a new texture-goniometer and the interpretation of the film-diagrams are explained in detail.

X-ray analysis is of fundamental value for the study of petrofabrics because it is so far the unique method for geometric investigation of opaque, cubic, and very fine-grained materials.

The texture-goniometer may also be used for single-crystal orientation, research on structural defects, and grain-size determination in ranges from  $5 \mu$  to 5 mm.

Some applications of X-ray fabric-analysis are demonstrated: fibrous aggregates, shell-materials of mollusca and echinoids, deformed metals and tectonite fabrics.

**Zusammenfassung**

Die Methodik der röntgenographischen Gefügeanalyse, insbesondere die geometrischen Beziehungen bei Röntgenbeugung an Gefügen, Aufbau und Handhabung der Gefügekamera und die Auswertung der Filmdiagramme werden ausführlich beschrieben.

Die Röntgenanalyse ist für die Gefügekunde von fundamentalem Wert, da sie bisher als einzige Methode die Untersuchung undurchsichtiger, kubischer und sehr feinkörniger Proben ermöglicht.

Die Gefügekamera kann, abgesehen von Texturbestimmungen, auch zur Ein-kristallorientierung, für Fehlbauuntersuchungen und zur Korngrößenbestimmung im Bereich  $5 \mu$ —5,0 mm verwendet werden.

Anhand einiger Beispiele wird auf die Anwendungsbereiche der Röntgen-Gefügeanalyse hingewiesen: Untersucht wurden Faseraggregate, Schalenmaterialien von Echinodermen und Mollusken, deformierte Metalle und Tektonitgefüge.

**A. METHODIK DER PHOTOGRAPHISCHEN RÖNTGEN-GEFÜGEANALYSE****1. Einleitung**

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, eine neue photographische Röntgen-Gefügeanalyse zu beschreiben. Durch dieses Verfahren wird die Bestimmung der Pollagenverteilung beliebiger Netzebenen ermöglicht. Die Methode wurde soweit vereinfacht, dass die Aufnahmen routinemässig ausgeführt werden können. Wir beschränken uns dabei auf das für die praktische Anwendung Wichtige und verzichten auf manche Feinheit, welche die Dinge exakter, aber umständlicher beschreiben würde, denn wir sind uns bewusst, dass sonst die Methode kaum jemals angewendet würde. An Beispielen aus Mineralogie, Zoologie, Metallographie

und Petrographie werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten der Röntgen-Gefügeanalyse gezeigt.

Der röntgenographischen Gefügeanalyse kommt zweierlei Wert zu. Manche Kristallaggregate gestatten keine Einmessung der Körner am U-Tisch, so feinkörnige Kalksteine und Quarzite, zahlreiche organogene Schalenmaterialien oder die undurchsichtigen Erze und Metalle. Die Orientierung vieler Mineralien kann überdies optisch nicht eindeutig bestimmt werden: Bei dem für gesteinsbildende Vorgänge überaus wichtigen Quarz ist bloss die c-Achse einer mikroskopischen Untersuchung zugänglich, während seine Drehlage unbestimmt bleibt. Daneben bedeutet die Röntgenanalyse eine grosse Arbeitserleichterung und Zeitersparnis: Während am U-Tisch ein Quarzachsendiagramm noch in relativ kurzer Zeit aufgenommen werden kann, ist eine vollständige Einmessung von Calcit bereits mühsam, erst recht diejenige von monoklinen und triklinen Mineralien, etwa den Feldspäten. Bedenkt man die a priori fundamentale Bedeutung der Röntgenanalyse in der Gefügekunde, so ist man erstaunt, dass sie bis heute nur ganz sporadisch in der Petrographie angewendet wurde. Hauptanwendungsgebiet der Röntgenographie ist seit der grundlegenden Entdeckung LAUES vor einem halben Jahrhundert die Strukturbestimmung der Kristalle geblieben. Nur vereinzelt wurde Röntgenbeugung zur Kristallorientierung verwendet, obgleich die fundamentale Arbeit von KRATKY, welche die prinzipiellen Möglichkeiten zeigt, schon 1930 erschienen ist. Die vorliegende Arbeit vertieft diese Methode, welche sich auf die Orientierung eines Kristalls oder eines polykristallinen Aggregats durch Röntgenbeugung bezieht.

SANDER und SACHS (1930) haben zum ersten Mal die Methode der Röntgenbeugung in der Gefügekunde der Gesteine angewendet. Die Aufnahmen dieser Autoren geben zwar kein Poldiagramm, doch lässt sich aus ihnen bei günstiger Aufstellung des Präparates die Symmetrie des Gefüges beurteilen. Die Ermittlung der Gefügesymmetrie mit solchen Aufnahmen ähnlich wie es bei einer LAUE-Aufnahme in der Kristallographie geschieht, ist fast nur noch von historischer Bedeutung; vereinzelt wird das Verfahren bis heute in der Metallographie angewendet. Bei den komplizierteren Tektonitgefügen vermochte es nicht die Drehlage der einzelnen Kristallite zu ermitteln. SACHS stand der Anwendbarkeit der beschriebenen Methode sehr skeptisch gegenüber:

„Die Ausmessung einer einzelnen Aufnahme ist ziemlich unsicher, erst die Übereinstimmung einer grösseren Anzahl von Schnitten sichert den Befund... die Anzahl von 15—20 Aufnahmen erwies sich für eine einigermassen vollständige Lagenbestimmung als notwendig“ (SANDER und SACHS, 1930, S. 571).

Es ist daher nicht verwunderlich, dass dieses aufwendige Verfahren keinen Eingang in die Petrographie gefunden hat; hingegen ist es auffällig, dass die von KRATKY (1930) kurz vorher beschriebene Methode so lange unbeachtet blieb, denn sie ermöglicht es prinzipiell aus einer einzigen Aufnahme die Orientierung eines Kristalls oder eines Kristallaggregates zu bestimmen. Man konnte sie wohl deshalb wenig anwenden, weil die grundlegenden geometrischen Beziehungen nur für die spezielle Anwendung auf organische Fasern gelöst waren. Auch die Arbeiten von HOWARTH (1940), HO (1947) und WOOSTER (1948), die den Gedanken KRATKYS wieder aufgriffen, trugen nichts zu einer Verbreitung des Verfahrens bei.

Erst mit der Entwicklung des Zählrohrgoniometers nach 1945 erlebte die Röntgentexturanalyse neuen Aufschwung: Die leistungsfähige Apparatur von SCHULZ (1949) wurde später von JETTER und BORIE (1953) und HIGGS et al. (1960) für spezielle Zwecke modifiziert, ist aber bis heute das tauglichste Mittel der röntgenographischen Gefügeanalyse geblieben. Nachteilig ist daran, dass nicht die ganze Lagenkugel erfasst wird, sondern nur diskrete Punkte oder Linien, was die Anwendung der Methode bei grobkörnigen Gefügen ausschliesst. Man erhält direkt eine stereographische Projektion mit Intensitätsangaben. GEHLEN (1960, 1962a, 1962b) untersucht mit dem Gerät zum ersten Mal petrographisch wichtige Tektonitgefüge.

Zählrohrverfahren sind besonders durch den grossen Aufwand an zum Teil kostspieligen Hilfsapparaturen in ihrer Verbreitung beschränkt, so dass in der Petrographie ein Bedürfnis nach einer billigen, einfachen und doch eindeutigen photographischen Methode besteht. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine solche zu beschreiben. Die Lösung der allgemeinen geometrischen Beziehungen wurde vom Verfasser früher angegeben (WENK, 1963). Hier legen wir mehr Wert auf die praktische Seite (Handhabung der Kamera, Auswertung von Aufnahmen) und erläutern anhand von Beispielen einige Anwendungsmöglichkeiten. Kürzlich hat STARKEY (1964) eine ähnliche Kamera beschrieben. Bei ihm muss der Dünnschliff vom Objektträger losgelöst werden. Wegen des komplizierten Drehmechanismus wird auf eine Verschiebung des Präparates verzichtet. Die Gründe für die Verwendung einer vollzylindrischen Kassette sind nicht unmittelbar ersichtlich, da im Hinblick auf die Symmetrie der Anordnung und die geometrischen Beziehungen ein Viertelszylinder ausreicht, wodurch Filmmaterial eingespart werden kann und die mechanische Konstruktion erleichtert wird.

## 2. Geometrie der Röntgenbeugung an Gefügen

Im folgenden seien die wichtigsten Winkelbeziehungen erläutert, die zum Verständnis der photographischen Röntgen-Gefügeanalyse notwendig sind. Die allgemeine Geometrie ist bei WENK (1963) beschrieben.

Der primäre Röntgenstrahl trifft auf das Präparat. Dabei entsteht Beugung am Kristallgitter, wenn die Braggsche Reflexionsbedingung erfüllt ist (vgl. Fig. 1):

$$2d = \frac{n\lambda}{\sin \vartheta}.$$

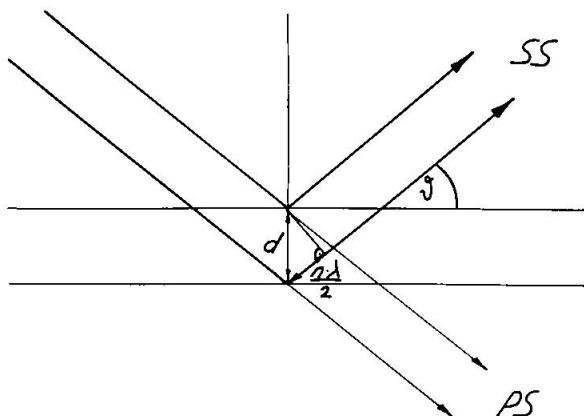


Fig. 1. Röntgenbeugung am Kristallgitter.  $d$  = Netzebenenabstand,  $\lambda$  = Wellenlänge,  $\vartheta$  = Beugungswinkel.

Die reflektierten Strahlen liegen auf einem Kegelmantel vom halben Öffnungswinkel  $2\vartheta$  (Fig. 2). Um in Reflexionsstellung zu sein, muss eine Netzebene einen Kreiskegel vom halben Öffnungswinkel  $\vartheta$  tangieren. Das Präparat wird um eine Achse, die gegen den Primärstrahl um einen Winkel ( $90^\circ - \sigma$ ) geneigt ist, gedreht, um einer beliebigen Netzebene (hkl) die Reflexion zu ermöglichen. Der gebeugte Strahl wird auf einem photographischen Film, welcher zylindrisch um den Primärstrahl liegt, als Schwärzung registriert. Der Schnitt des Beugungskegels — dem Ort aller möglichen Reflexionen der Netzebene (hkl) — mit dem Filmzylinder ist ein Kreis. Rollen wir den Film ab, so erhalten wir eine Gerade.

Gefragt ist der Ort der Schwärzung auf dem Film, erzeugt durch die Reflexion einer um  $\psi$  gegen das Präparat geneigten Netzebene, die den Reflexionswinkel  $\vartheta$  hat (Fig. 3). Diesen Ort charakterisieren wir durch den Winkel  $\varphi$  zwischen Vertikalebene und gebeugtem Strahl ( $\angle ACB$ ).  $\varphi$  ist eine Funktion der Netzebenenneigung  $\psi$ , des Glanzwinkels  $\vartheta$  und der Neigung des Präparates  $\sigma$ . Wie früher gezeigt wurde (WENK, 1963), ist der Fall  $\sigma = \vartheta$  besonders einfach und übersichtlich; für Gefügeauf-

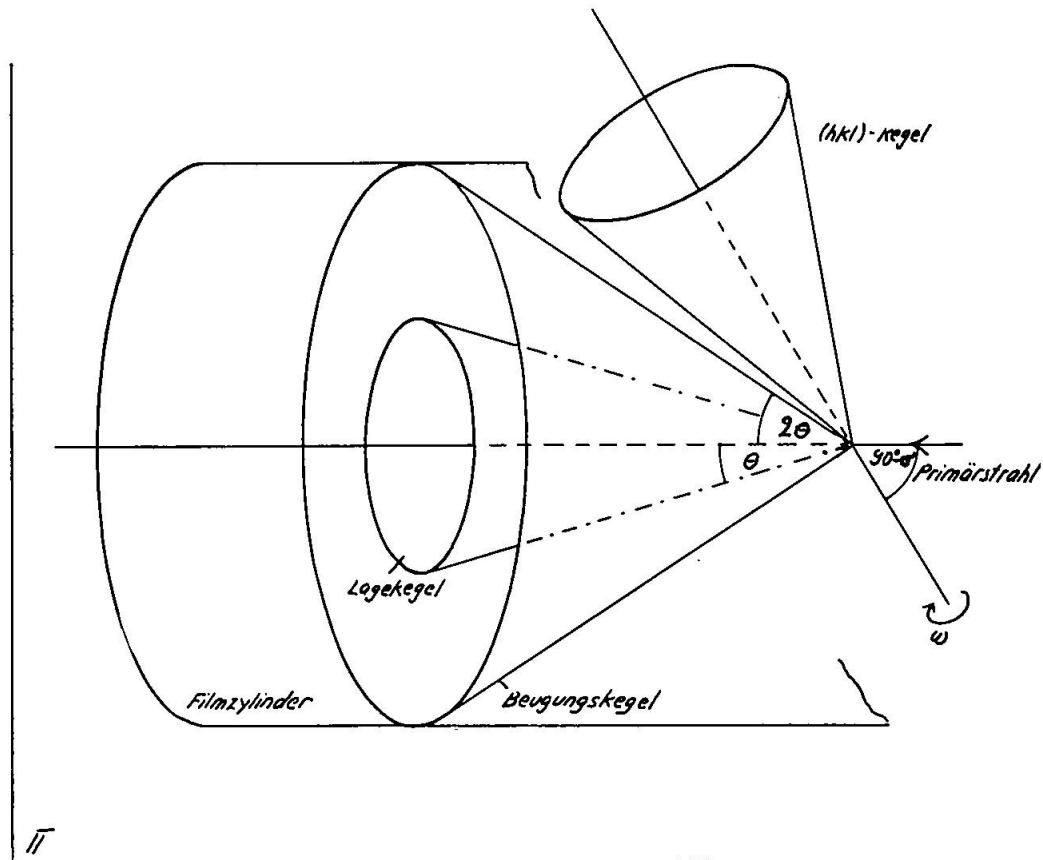


Fig. 2. Prinzip der Röntgenbeugung an Gefügen.

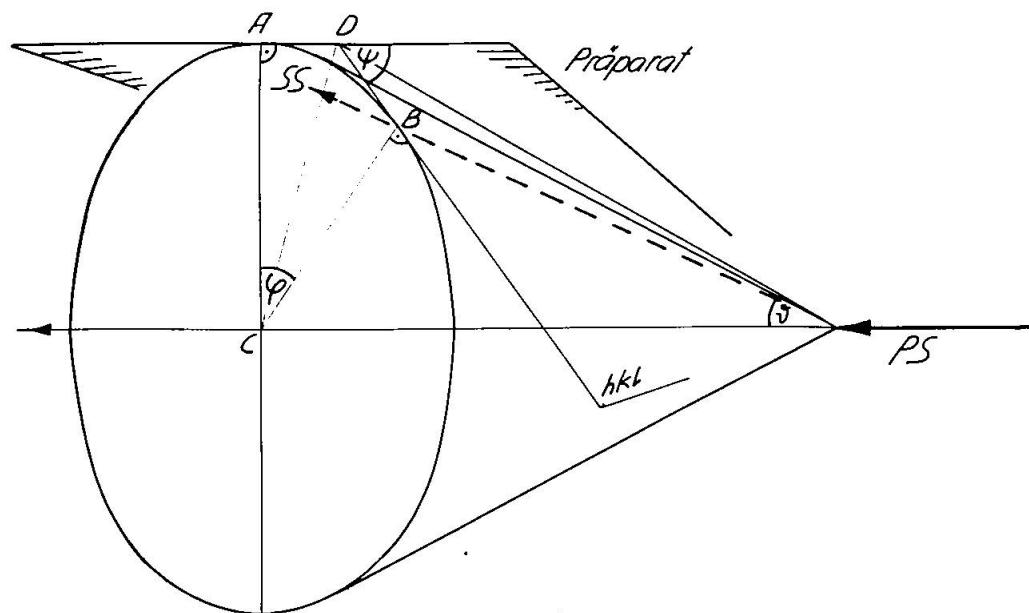


Fig. 3. Geometrie der Röntgenbeugung bei Gefügeaufnahmen.

nahmen wählt man zweckmäßig diese Stellung. Bei der Ableitung der geometrischen Beziehungen beschränken wir uns darauf.

Wir betrachten das sphärische Viereck ACBD in Fig. 3. Darin sind  $\angle DAC = \angle CBD = 90^\circ$  (Winkel von Tangenten an Kreise) und  $AD = BD$  (Tangentenabschnitte), überdies gilt  $AC = BC = \vartheta$ . Im rechtwinkligen Dreieck ACD sind bekannt:  $AC = \vartheta$ ,  $\angle ADC = \psi'/2$  ( $\psi' = 180^\circ - \psi$ ). Der gesuchte Winkel  $\varphi/2 = \angle ACD$  lässt sich nach der Napierischen Regel angeben:

$$\cos \frac{\psi'}{2} = -\cos \frac{\vartheta}{2} = \cos \vartheta \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (1)$$

Diese Funktion ist im Intervall  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  angenähert linear. Dies entnimmt man der ersten Ableitung, welche besonders für kleine bis mittlere  $\vartheta$ - und  $\varphi$ -Werte praktisch konstant ist:

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{d[\arccos(\cos \vartheta \sin \varphi)]}{d\varphi}, \quad (2)$$

nach der Kettenregel differenziert erhält man daraus:

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = -\frac{\cos \vartheta \cos \varphi}{1 - \cos^2 \vartheta \sin^2 \varphi}. \quad (3)$$

In Fig. 4 ist diese Funktion für einige Glanzwinkel dargestellt.

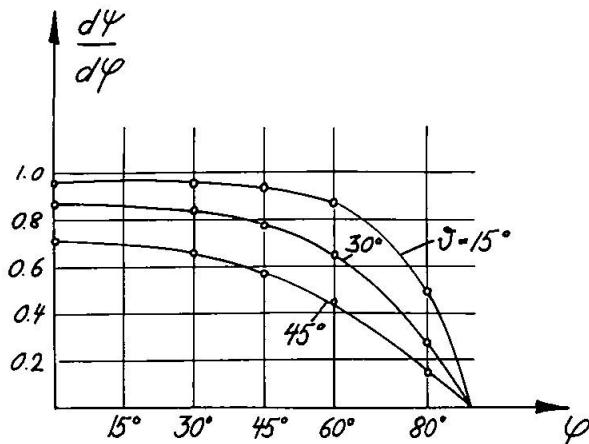


Fig. 4. Zur Linearität der Beziehung zwischen  $\varphi$  und  $\psi$  für  $\sigma = \vartheta$  (siehe Text).

Die Neigung der Netzebene zum Präparat ist ermittelt. Um ihre eindeutige Raumlage anzugeben, muss noch das Azimut als weiterer geometrischer Ort bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird der Film parallel zum Primärstrahl und synchron zur Präparatdrehung bewegt. Der Abszissenwert der Schwärzung auf dem Film gibt uns Auskunft über die Drehlage des Präparates im Augenblick der Reflexion. Der Drehwinkel  $\nu$  wird proportional als Strecke abgebildet und steht mit dem

Azimut in folgender Weise in Beziehung: Das Azimut ist gegenüber dem Drehwinkel  $\nu$  um  $\delta$  ( $\triangle A[PS]D$  in Fig. 3) verdreht. Wir erhalten das Azimut als Summe des Drehwinkels  $\nu$  des Präparates und der Verschiebung  $\delta$ , einer Funktion der Netzebenenneigung  $\psi$  und des Beugungswinkels  $\vartheta$ .  $\delta$  wird berechnet als Seite AD des rechtwinkligen sphärischen Dreiecks ACD aus  $\angle ACD = \varphi/2$  und  $AC = \vartheta$ , wiederum für den Spezialfall  $\sigma = \vartheta$ .

$$\operatorname{tg} \delta = \sin \vartheta \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}. \quad (4)$$

Die Lage der Netzebene (hkl) bezüglich der Präparatebene ist damit eindeutig bestimmt. Aus Ordinate und Abszisse der Schwärzung auf dem Film lässt sich mit Hilfe der beiden Gleichungen (1) und (4) die Position einer Kristallfläche in Poldistanz und Azimut (das heisst den beiden sphärischen Koordinaten) berechnen. Auf Grund der Beziehungen (1) und (4) zwischen Netzebenenneigung, Azimut und Poldistanz lassen sich Schablonen herstellen (vgl. Fig. 10—13, S. 529—532), die es erlauben, solche Röntgenaufnahmen in eine gebräuchliche Kugelprojektion zu übertragen.

### 3. Aufbau der Kamera (Modell GRK 3)

Fig. 5 zeigt ein Bild der Kamera: Sie besteht aus einem Aluminium-Eisengerüst. Durch die Eintrittsblende A (0,5 oder 1,0 mm  $\varnothing$ ) trifft der Primärstrahl auf das Präparat B und wird an diesem gebeugt. Die Reflexionen werden auf einem Film registriert, dessen Kassette C als Viertelszylinder ausgebildet ist. Die Kassette bewegt sich längs einer Spindel D, welche durch den Synchronmotor E angetrieben wird, parallel zum Primärstrahl. Mit zwei Blechblenden, im folgenden „Screen“ genannt (F), wird der ausgesuchte Beugungskegel ausgeblendet. Ein Massstab (G) dient der Einstellung von Kassette und „Screen“ (vgl. Fig. 8).

Der Drehtisch bildet den zentralen Teil. Er ist um eine senkrecht zur Drehachse stehende Achse H schwenkbar. An der Skala I dieser Schwenkachse lässt sich der Neigungswinkel  $\sigma$  des Präparates einstellen und fixieren. Durch Drehen der Rändelschraube K wird das Präparat auf die richtige Höhe gebracht: die Drehachse muss den Primärstrahl in der Präparatoberfläche schneiden. In derselben Zeit, in der sich die Kassette um ihre Länge verschiebt, vollführt der Drehtisch eine Umdrehung. Darauf läuft der Drehtisch und die Kassette an ihre Ausgangsposition zurück. Die Belichtungszeit — vorgegeben durch die Intensität

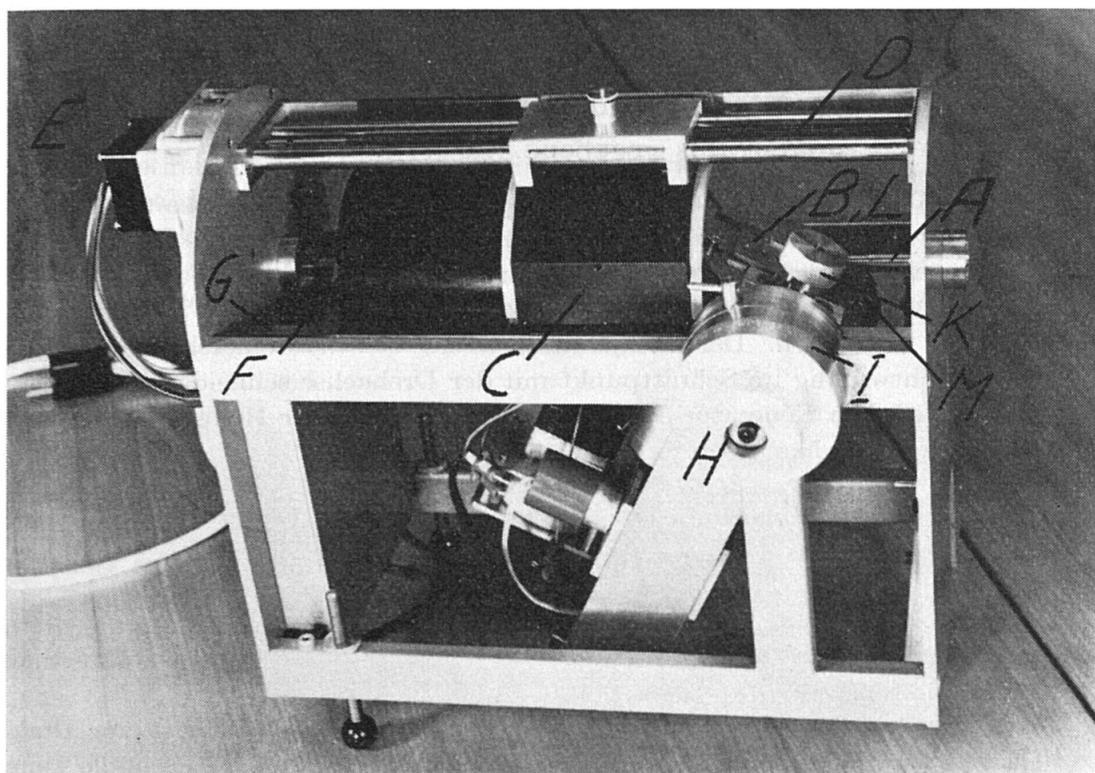


Fig. 5. Gefüge-Röntgenkamera (Typ GRK 3).

der Reflexe — wird als ganzzahliges Vielfaches der Drehdauer (im vorliegenden Fall  $2\frac{1}{2}$  h) gewählt.

Als Präparat dient ein dünnes Plättchen: Für Gesteinsanalysen verwendet man zweckmäßig einen Dünnschliff mit dem üblichen Glas-Objektträger, aber ungedeckt, da sonst die Röntgenstrahlung im Deckglas fast vollständig absorbiert wird. Ein sicheres Verfahren zum Abdecken der Dünnschliffe ist folgendes: Der Dünnschliff wird für kurze Zeit mit der Deckglasseite auf Trockeneis ( $\text{CO}_2$ ) gelegt. Als bald lässt sich das Deckglas leicht mit einer Rasierklinge abspalten. Das Präparat wird, um das statistische Mittel zu verbessern, auf einem Kreuztisch L in Zickzackbewegung in zwei zueinander senkrechten Richtungen parallel mit konstanter Geschwindigkeit verschoben. Je nach der Grösse des Präparates können durch Herausziehen der Schraube M zwei verschiedene Flächenausschnitte bestrichen werden.

Für Einkristalluntersuchungen kann der Kreuztisch abgehoben und an seiner Stelle ein Einheits-Goniometerkopf eingesetzt werden.

Voraussetzung für genaue Aufnahmen ist eine gute Justierung der Kamera. Diese Einstellungen brauchen nur selten wiederholt zu werden, etwa dann, wenn die Kamera oder ihre Bestandteile zu Revisionszwecken

auseinandergenommen werden. Durch Stellschrauben können die verschiedenen Lager verschoben und geneigt werden. Es empfiehlt sich, die wichtigsten Handgriffe in folgender Reihenfolge auszuführen, wobei die Richtung des Primärstrahls gegebene Ausgangsgröße ist:

1. Spindel, Kassetten- und Screenführung parallel zur Kameraachse (= Primärstrahlrichtung) in richtigem Abstand montieren.
2. Screen- und Kassettenradius sowie deren Zentrierung überprüfen.
3. Eintrittsblende zentrieren.
4. Drehtisch zentrieren. Der Primärstrahl muss die Schwenkachse des Drehtisches rechtwinklig im Schnittpunkt mit der Drehachse schneiden.
5. Kamera vor dem Generator aufstellen und bei maximaler Helligkeit im Rückstrahlschirm auf dem Tisch fixieren.

Nach diesen Justierungen ist die Kamera betriebsbereit. Bei den Aufnahmen geht man am besten ebenfalls nach einem bewährten Schema vor:

1. *Einlegen des Films.* Ein kleines Loch in der Kassettenwand gibt als Schwärzung die Nullmarke.
2. *Probe auf dem Drehtisch montieren.* Dünnschliffe werden senkrecht zur Drehachse auf dem Schlitten des Kreuztisches angebracht. Für Einkristalle kann direkt ein Goniometerkopf verwendet werden, so dass der Kristall für spätere Precession- und Weissenberguntersuchungen nicht mehr neu montiert werden muss. Dazu wird der Kreuztisch entfernt.
3. *Höheneinstellung der Probe* in der  $\sigma = 0^\circ$ -Stellung durch Drehen des Stiftes K. Man visiert dabei von der Austrittsöffnung her gegen die Eintrittsblende (Vorsicht, Röntgenstrahl abstellen!). Die Eintrittsblendenöffnung soll halb vom Präparat verdeckt werden, weil dann beim Kippen des Drehtisches der Schnittpunkt der Drehachse mit der Präparatoberfläche auf gleicher Höhe bleibt. Bei Dünnschliffen wird vorteilhaft der im Fluoreszenz-Rückstrahlschirm aufgefangene Primärstrahl verwendet. Kleine Proben, die nicht verschoben zu werden brauchen, müssen zuerst seitlich zentriert werden, damit sie beim Drehen im Primärstrahl bleiben.
4. *Schwenkwinkel  $\sigma$*  an der Skala I einstellen und die Einstellung mit der Hebeleinschraube X blockieren.
5. *Kassette und Screen entsprechend der gewünschten Netzebene* durch paralleles Verschieben in die richtige Lage bringen (vgl. Fig. 8, S. 528).
6. Je nach der Art der Aufnahme Drehtisch-, Kreuztisch- und Kassetten-Motoren anstellen.
7. *Primärstrahlfenster öffnen.*
8. *Belichtung.* Die Zeit soll ein ganzzahliges Vielfaches der Dauer einer Drehtisch-Umdrehung sein. Kassetten- und Drehtischmotor sind miteinander gekoppelt.
9. *Generatorfenster schliessen, Motoren abstellen.*
10. Kassette entfernen und den Film entwickeln, fixieren und wässern.

Die Justierung der Kamera kann durch Probeaufnahmen folgendermassen überprüft werden:

1. Kassettenradius und Kassettenaufhängung bezüglich der Primärstrahlachse: Ein Pulverpräparat wird mit ruhender Kassette aufgenommen. Die Reflexionen der Netzebenen müssen dann auf Geraden liegen (vgl. Fig. 7).
2. „Screen“-Radius und „Screen“-Führung: Ein bestimmter Reflexionskegel wird bei kleiner Screenöffnung ausgeblendet. Die Schwärzung auf dem Film darf dabei nicht teilweise fehlen.
3. Spindelvorschub: Die Kassette wird bei stehendem Drehtisch verschoben. Die Reflexionen der einzelnen Pulverkörper müssen parallele Geraden beschreiben. Eine periodische Kurve (Fig. 6) weist auf eine fehlerhafte Spindel.

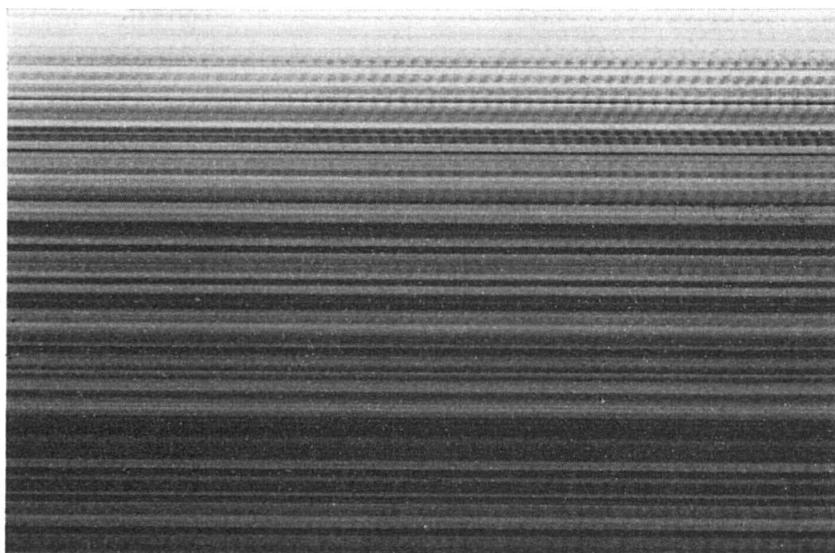


Fig. 6. Stehendes Pulverdiagramm bei fehlerhafter Spindel. Die Periode der sinusförmigen Kurven entspricht der Spindelsteigung.

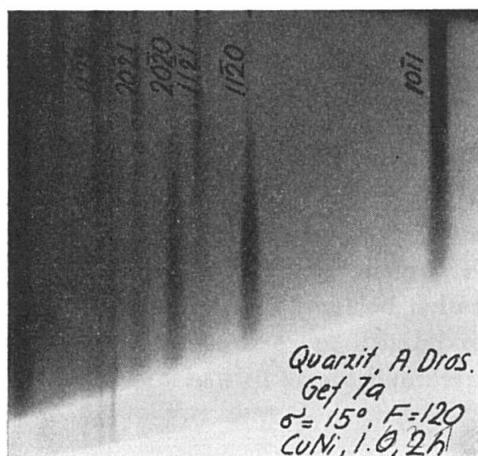
#### 4. Gang der Auswertung

##### a) Übersichtsaufnahmen

Die Kassette wird im gewünschten Glanzwinkelbereich montiert und bewegt sich während der Aufnahme nicht. Die „Screen“-Blenden werden nicht benutzt, da man darauf ausgeht, möglichst viele Netzebenen auf dem Film abzubilden. Auf dem entrollten Film erhält man das Bild der verschiedenen Beugungskegel als parallele Geraden (Fig. 7); diese entsprechen den Debye-Scherrer-Ringen bei Pulveraufnahmen.

Bei der Indizierung der Linien benutzt man die Beziehungen

$$\operatorname{tg}(2\vartheta) = \frac{R}{L} \quad \text{und} \quad d_{(hkl)} = \frac{\lambda}{2 \sin \vartheta} \quad (\text{Fig. 8}).$$



Die Aufnahme zeigt die Beugungsbilder von Quarz und anderen Minerallen. Die Intensität ist sehr verschieden und es sind nur wenige Linien sichtbar. Die Beugungsbilder sind nicht so gut wie bei den Pulveraufnahmen, da die Kamera nicht so genau ist. Es kann jedoch eine grobe Orientierung der Minerale gegeben werden. Die Beugungsbilder sind nicht so gut wie bei den Pulveraufnahmen, da die Kamera nicht so genau ist. Es kann jedoch eine grobe Orientierung der Minerale gegeben werden.

Fig. 7. Überblicksdiagramm eines Mylonit-Quarzites mit Indizierung der wichtigsten Linien.

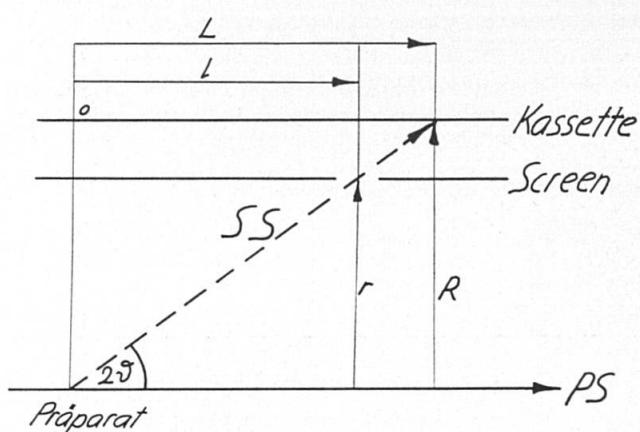
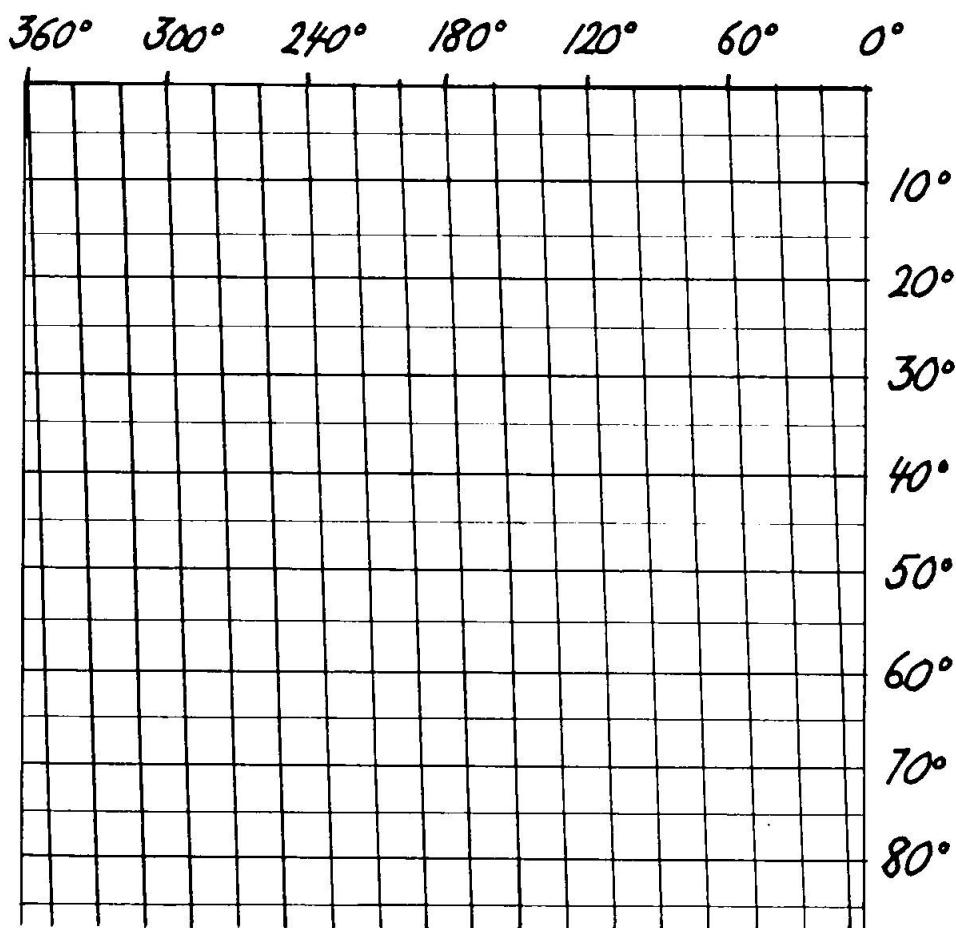
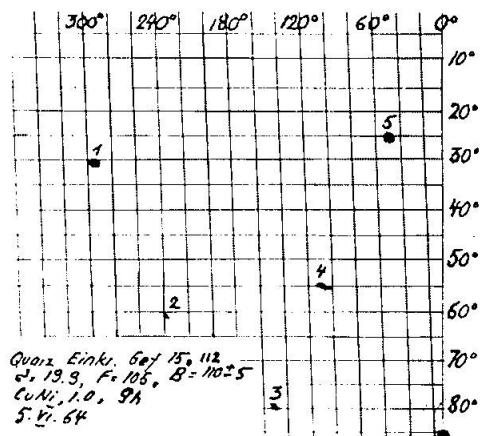


Fig. 8. Schema zur Indizierung der Linien und zur Montierung von Kassette und Screen.  $R$  = Kassettenradius,  $r$  = Screenradius,  $l$  = Abstand der Linie vom Nullpunkt.

Die Aufnahme gibt uns Aufschluss über die mineralogische Zusammensetzung der Probe. Die Kamera sollte nicht zur Identifizierung komplizierter Substanzgemische oder gar zur Gitterkonstantenbestimmung verwendet werden. Für solche Arbeiten ist den Präzisions-Pulverkameras (DEBYE-SCHERRER, GUINIER) der Vorzug zu geben. Die Genauigkeit der Gefügekamera ist mässig, für Gefügeaufnahmen allerdings vollauf genügend: die Linien sind breit, da recht grosse Eintrittsblenden verwendet werden, um die Expositionszeit zu reduzieren. Die Aufnahme gibt uns neben der mineralogischen Zusammensetzung auch einen ersten Überblick über den Regelungsgrad. Aus der Schwankung der Intensität längs einer Linie lässt sich beurteilen, ob sich eine weitere Untersuchung der Probe lohnt. Auf Fig. 7 erkennt man, dass ein Schatten die unteren Teile des Films abdeckt, und zwar um so mehr, je kleiner der Beugungs-



Quarz (10\bar{1}1)  $d=3.343$

Fig. 10.

Fig. 10—13. Netze zum Auswerten von Gefügeaufnahmen.

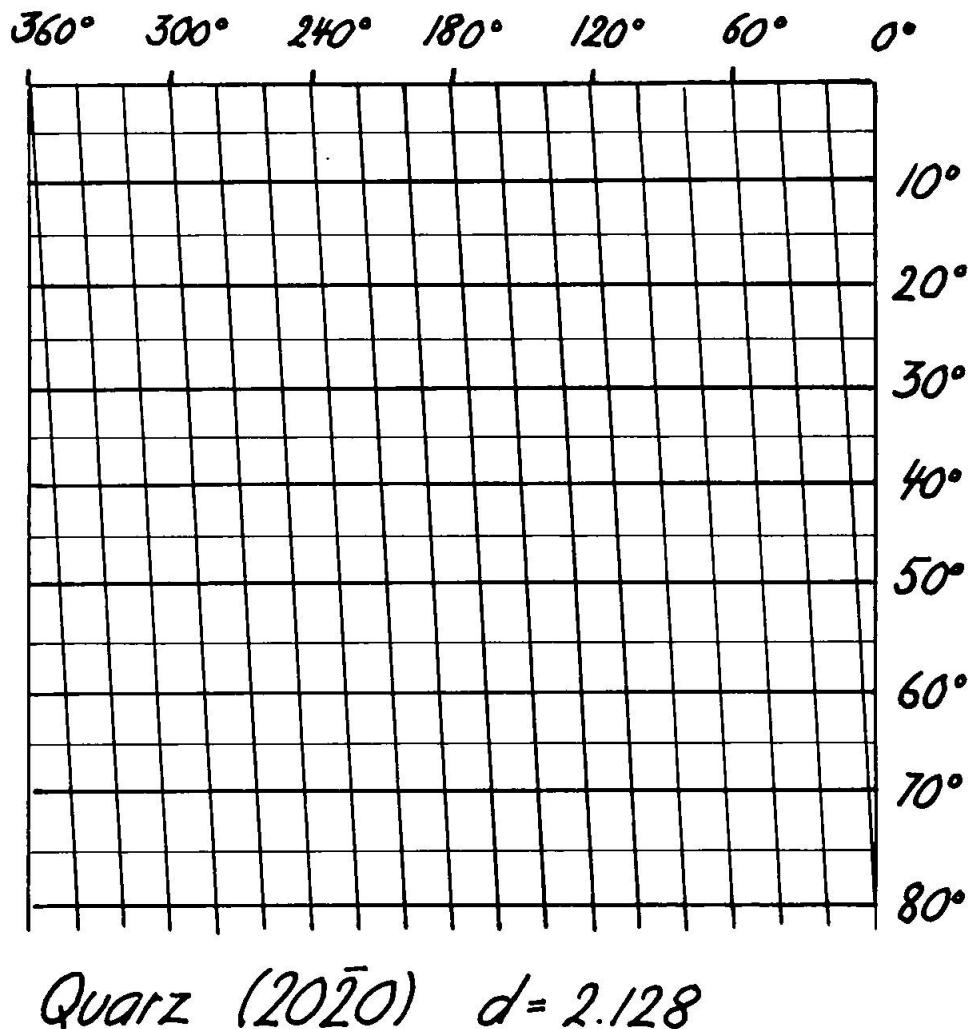


Fig. 11.

winkel ist. Diese Erscheinung beruht darauf, dass nur Strahlen im Raum oberhalb der Präparatebene registriert werden können, während der Rest im Glas des Objektträgers absorbiert wird. Die Sichtbarkeit wird dadurch eingeschränkt (vgl. WENK, 1963). Als Faustregel mag dienen, dass für  $\sigma = \vartheta$  Netzebenen bis zu einem Neigungswinkel gegen das Präparat von  $65^\circ$  tatsächlich zur Reflexion gelangen. Das ist ein gewisser Nachteil, dem damit begegnet werden kann, dass drei aufeinander senkrecht stehende Schlitte untersucht werden (bei homogenen Proben!) oder dass man den Schliff vom Objektträger löst und auf einem Scotch-Tape befestigt (STARKEY, 1964). Für die meisten Gefügeaufnahmen genügt indessen ein Sichtbarkeitsbereich von  $65^\circ$ .

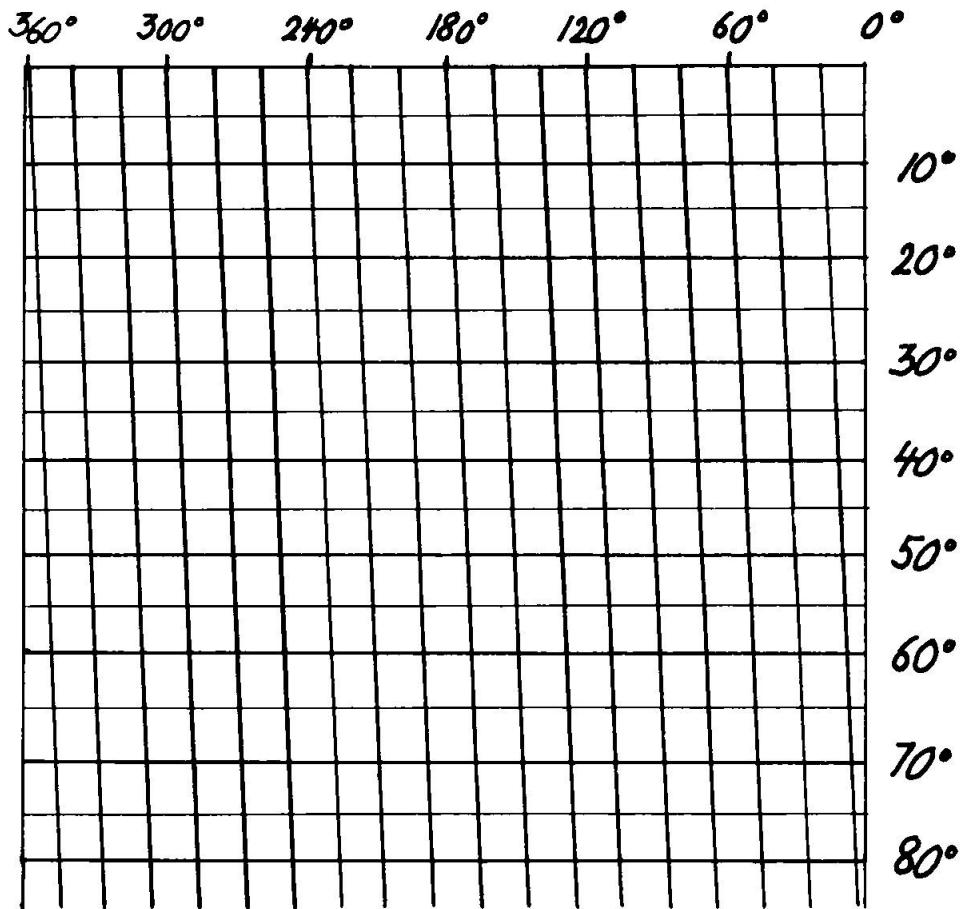


Fig. 12.

*b) Stereogramm-Aufnahmen*

Wir wählen aus der Übersichtsaufnahme die Netzebene, deren Pollagenverteilung wir bestimmen wollen. Folgende Auswahlkriterien sind zu beachten: In erster Linie kommen Kristallflächen mit einfachen Indizes (zum Beispiel Quarz  $10\bar{1}1$ ,  $11\bar{2}0$ ,  $20\bar{2}0$ ) oder schon nachgewiesener mechanischer Bedeutung (zum Beispiel Calcit  $10\bar{1}2$ ) in Frage. Günstig sind Netzebenen von kleiner Zähligkeit (das Diagramm ist sonst schwierig zu deuten) und von hoher Intensität. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass ein Reflex nicht von einem andern überlagert wird oder sich in unmittelbarer Nähe eines solchen befindet. Zweckmäßig wird

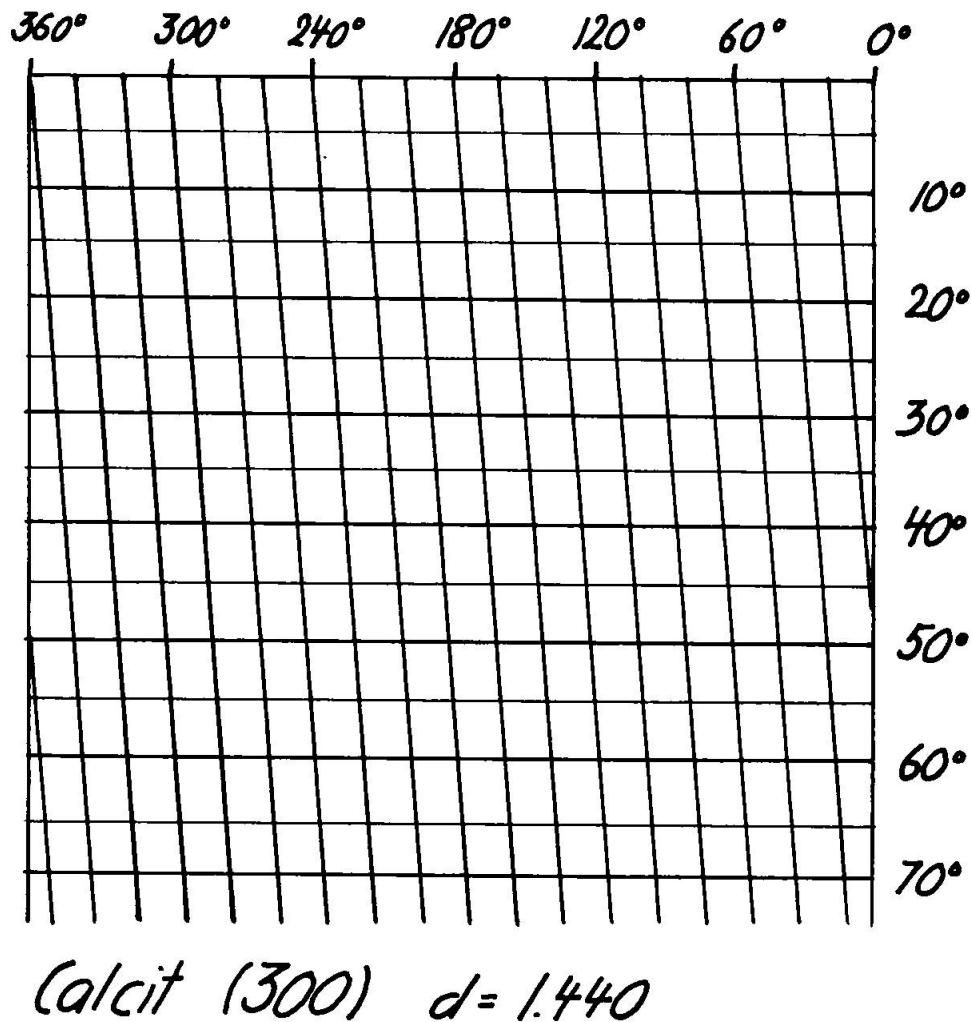


Fig. 13.

man einen Reflex wählen, dessen Intensität in der Übersichtsaufnahme möglichst stark variiert.

Man montiert Kassette und Blenden entsprechend Fig. 8. Die Blendenöffnung wird man je nach Lage der Nachbarlinien auf 3 bis 10 mm festlegen. Eine scharfe Ausblendung hat den Vorteil, dass die Streustrahlung und damit der Filmuntergrund reduziert wird, wodurch das Regelungsbild deutlicher in Erscheinung tritt. Es dürfen jedoch nicht Teile des Beugungskegels durch die Blenden weggeschnitten werden.

Die Kassette wird während der Aufnahme synchron zur Präparat-drehung verschoben.

Der Gang der Auswertung sei an einem Beispiel erläutert: Quarz-Einkristall, ausgeblendete Netzebene  $(10\bar{1}1)$ , „Screen“stellung  $110 \pm 5$  mm

bei einem Radius von 56 mm, Drehtischneigung  $\sigma = \vartheta = 13,3^\circ$ , Cu-Strahlung, Ni-Filter, Belichtungszeit 4 h, Fig. 9.

Aus Formeln (1) und (4) wird für wichtige Netzebenen eine Schablone hergestellt (Fig. 10—13). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Schablonen sind klein; für Zwischenwerte kann deshalb entweder linear interpoliert oder die nächstfolgende Schablone verwendet werden. Die Vertikaleinteilung entspricht der Poldistanz auf der Lagenkugel, der Abszissenmaßstab dem Azimut. Man legt die Aufnahme mit bekanntem Nullpunkt auf das Netz und kann die entsprechenden Goldschmidt-Koordinaten direkt ablesen. Im vorliegenden Fall erhält man für die Rhomboederfläche (1011) von Quarz die Positionen (Fig. 9):

	$\varphi$	$\rho$
1.	295°	31°
2.	239°	62°
3.	151°	80°
4.	110°	55°
5.	50°	25°

Fig. 14 zeigt die stereographische Projektion dieser Quarzpositionen mit Konstruktion der c-Achse.

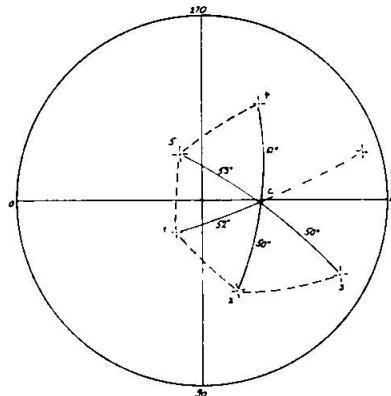


Fig. 14. Stereographische Projektion der (1011)-Positionen von Quarz (vgl. Fig. 9).

Wird das Präparat in negativem Sinn gedreht und wird der Film von links nach rechts verschoben (Nullpunkt ist der schwarze Punkt in der rechten oberen Ecke), so wird in der stereographischen Projektion in positivem Sinn gemessen mit dem Westpunkt N als Nullpunkt der Azimutzählung (Fig. 15). Die Photographie ist schnell in eine übliche Kreisprojektion übertragen. Werden von einer Probe mehrere Schnitte angefertigt, so ist beim Koordinieren der Diagramme auf die Orientierung der Einzelschnitte zu achten.

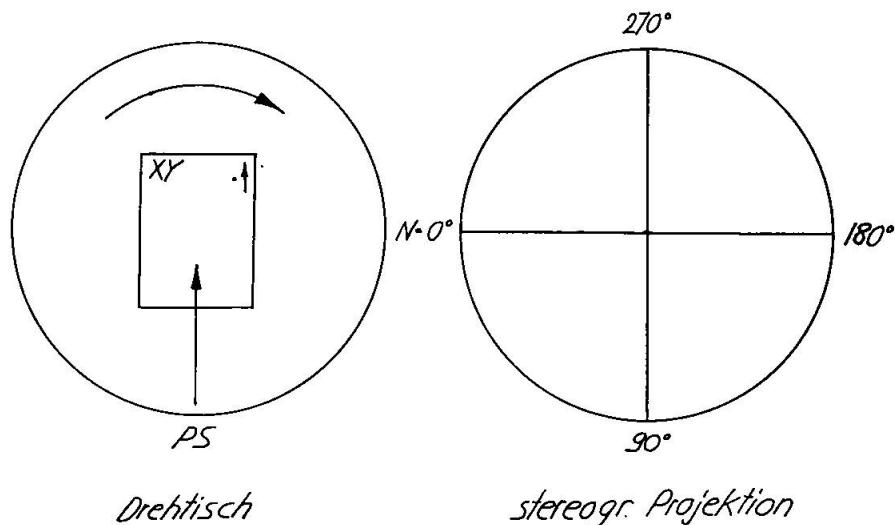


Fig. 15. Zusammenhang zwischen Präparatdrehung und Lagenkugelprojektion.

### c) Quantitative Auswertung

Von blossem Auge lassen sich meist leicht drei Schwärzungsgrade in den Aufnahmen unterscheiden: starke, mittlere bis schwache Schwärzung und Untergrund. In der Regel genügt diese grobe Abschätzung bei Gefügen vollauf. Eine genauere Differenzierung ist statistisch nur bei sehr feinkörnigem Material gerechtfertigt, sowohl in der röntgenographischen als auch in der optischen Analyse, bei der durch Auszählung oft eine gar nicht vorhandene Genauigkeit vorgetäuscht wird. Tausend Kristalle müssen auch in gut geregeltem Gestein im Minimum bei einer quantitativen Gefügeanalyse erfasst werden.

Die röntgenographische Gefügeanalyse — dies sollte man stets vergegenwärtigen — ist eine Flächen-, nicht eine Kornstatistik. Bei Flächenstatistik haben in ungleichkörnigem Gestein kleine Kristalle weniger Gewicht, und grosse Körner können Maxima vortäuschen, wodurch das Gesamtbild stark gestört wird. Flächenstatistik hat den Vorteil, dass sie mehr Daten für thermodynamische Aussagen liefern kann als die Kornstatistik; sie ist äusserst ungünstig bei nichtisometrischen Körnern. In Glimmergefügen kann ein flachliegendes Glimmerblatt zahlreiche quergestellte Glimmer in seiner Belichtungsstärke überwiegen. Eine Korrektur des Schnitteffektes ist in diesen Fällen unerlässlich (SANDER et al., 1954).

Sind diese Punkte berücksichtigt, so können im Röntgendiagramm photometrisch die Intensitäten bestimmt werden, die von Absorptionseffekten nur wenig beeinflusst werden (GEHLEN, 1960; STARKEY, 1964).

Diese wirken sich höchstens bei grossen Poldistanzen (in der Nähe der Sichtbarkeitsgrenze) störend aus. Die gemessene Intensität muss korrigiert werden, weil die Flächen zwischen zwei Kleinkreisen mit gleichen Poldistanz differenzen  $d\rho$  von der Poldistanz  $\rho$  abhängig sind (s. Fig. 16).

$$dF = d\rho r = d\rho \sin \rho.$$

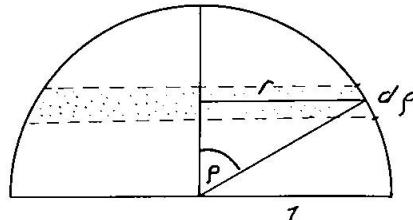


Fig. 16. Abhängigkeit der Flächendichte von der Poldistanz.

Die Flächendichte  $dF$  auf dem Film nimmt gegen kleinere Poldistanzen hin ab. Der Korrekturfaktor  $k$  ist indirekt proportional zum Sinus der Poldistanz:

$$k = \frac{1}{\sin \rho}.$$

Die auf  $\rho = 90^\circ$  umgerechnete Intensität  $I_{(\rho)}$  beträgt

$$I_{(\rho=90^\circ)} = I_{(\rho)} k = \frac{I_{(\rho)}}{\sin \rho}.$$

Die korrigierte Intensität ist proportional zur entsprechenden Fläche, also auch proportional zu den Dichtelinien optisch ermittelten Gefügediagramme. Um die gebräuchlichen prozentualen Dichtelinien zu erhalten, muss die Intensität entweder mit der über den ganzen Film integrierten Gesamtintensität (= 100%) oder mit der Intensität eines unge Regelten Testpräparates verglichen werden. Von jeder gemessenen Intensität ist der durch Streustrahlung verursachte Filmuntergrund abzuziehen.

## 5. Spezielle Anwendungen der Kamera

### a) Einkristall-Orientierung

Die Justierung eines Kristalls nach der Precession-Methode (BUERGER, 1944) ist zwar sehr genau, sie eignet sich jedoch nur für kleine Korrekturen, so dass eine Vorjustierung unerlässlich ist. Sind morphologische Merkmale vorhanden, kann diese auf einem Zweikreisgoniometer optisch durchgeführt werden, fehlen sie, wie etwa bei Kugeln

oder unregelmässigen Bruchstücken, so ist es oft dem Zufall überlassen, ob eine Hauptachse in den Aufnahmebereich der Precession-Kamera fällt. In diesen Fällen kann die Gefügekamera erfolgreich eingesetzt werden. Der Kristall wird auf dem Goniometerkopf montiert, und das Diagramm einer Netzebene ( $hkl$ ) wird aufgenommen. Dies wurde am Beispiel von Quarz im vorigen Abschnitt erläutert. Mit einer einzigen Aufnahme wird die Orientierung des Kristalls bezüglich des Goniometerkopfs eindeutig bestimmt und die gewünschte Achse kann mühelos zentriert werden.

Mit derselben Anordnung kann Kristall-Fehlbau untersucht werden (vgl. WENK, 1966).

### *b) Korngrößenbestimmung*

Die Korngrösse lässt sich im Bereich kleiner Partikel ( $2-10 \mu$ ) mit klassischen Methoden (Sieben, Schleppen) nur schwer bestimmen; mit Röntgenbeugung ist dies relativ leicht möglich, zum Beispiel bei Gesteinen und Pulvern. Eine obere Grenze der zu bestimmenden Korngrösse ist durch die Abmessung der Kamera gegeben (auf einer Fläche von Dünnschliffgrösse müssen die Körner statistisch verteilt sein), nach unten ist sie durch die Linienverbreiterung der Reflexe (ca.  $0,1 m\mu$ , je nach Substanz) beschränkt. Für Korngrößenuntersuchungen nach der Röntgenmethode kommen selbstverständlich nur kristallisierte Substanzen in Frage. Bei Substanzgemischen kann leicht die Korngrösse einer jeden Komponente bestimmt werden.

Als Präparat dient entweder ein Dünnschliff, der je nach Korngrösse zur Mittelung verschoben wird oder fest bleibt, oder ein Pulver, welches in einen Träger eingepresst ist. Bei sehr feinkörnigen Pulverpräparatenbettet man das Pulver in bestimmtem Mengenverhältnis in ein organisches Medium ein (zum Beispiel Stärke) und erhält damit eine bessere Auflösung. Von diesem Präparat wird eine Stereogramm-Aufnahme gemacht (siehe Fig. 17). Man zählt die Anzahl der Körner in einem vorgegebenen Volumen auf Grund der Reflexe und ermittelt daraus die *durchschnittliche* Korngrösse. Es wird die Anzahl von Reflexen auf einer bestimmten Filmfläche (zum Beispiel  $1 cm^2$ ) ausgezählt und mit Eichpräparaten verglichen. Es dürfen nur Messungen im Bereich gleicher Poldistanzen miteinander verglichen werden, sonst ist die S. 535 abgeleitete Korrekturformel anzuwenden. Durch photometrische Intensitätsmessung von Einzelreflexen kann ausserdem die *absolute* Korngrösse eines einzelnen Korns bestimmt werden.

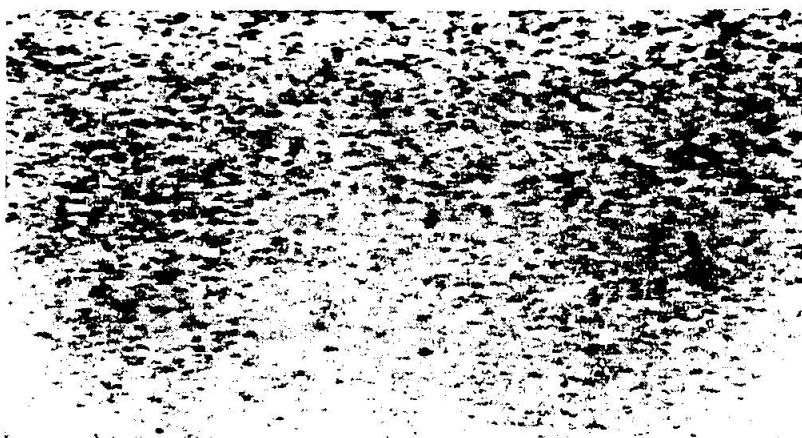


Fig. 17. Röntgendiagramm eines feinkörnigen (dichten) mylonitischen Quarzites, mikroskopisch nicht mehr auflösbar. Obere Bergsdalen-Decke, Espeland, N Hardanger-Fjord, Norwegen.  $(10\bar{1}1)$ -Verteilung, 0,5-mm-Blende.

### 6. Bewertung der Methode

Im folgenden werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der photographischen Röntgen-Gefügeanalyse einander gegenübergestellt.

#### *Vorteile:*

- a) Innerhalb weniger Stunden lässt sich automatisch die Pollagenverteilung einer beliebigen Netzebene auf einem Röntgenfilm abbilden. Für die Gefügeanalyse genügt im allgemeinen eine Aufnahme und ein Schnitt.
- b) Im Gegensatz zur Zählrohrmethode wird die Lagenkugel vollständig, nicht nur an diskreten Punkten oder Linien erfasst.
- c) Als Präparat dient ein gewöhnlicher Dünnschliff. Optische und röntgenographische Analyse können am gleichen Präparat durchgeführt werden.
- d) Wegen der Möglichkeit der Kreuztischverschiebung eignen sich auch grobkörnige Proben für eine Untersuchung.
- e) Herstellung und Handhabung der Kamera sind einfach und ihre Verwendung vielseitig: Gesteinsidentifizierung, Gefügediagramme, Einkristall-Orientierung, Fehlbau, Korngrösse.

#### *Nachteile:*

- a) Die aufgenommenen Flächen sind meist mehrzählig, bei Quarz zum Beispiel (mit Ausnahme der sehr schwach reflektierenden Basis) sechszählig<sup>1)</sup>. Dadurch wird die Deutung bei komplizierten Regelungstypen erschwert. In solchen Fällen ist die Aussagekraft eines optischen Diagramms oft grösser.
- b) Sehr schwache Orientierung der Kristalle geht im Filmuntergrund verloren.

<sup>1)</sup> Die sechs Reflexe etwa der wichtigen Netzebene  $(10\bar{1}1)$  sind zwar röntgenographisch nicht gleichwertig, aber von sehr ähnlicher Intensität.

- c) Bei Dünnschliffuntersuchungen werden Netzebenenneigungen  $> 65^\circ$  nicht registriert.
- d) Quantitative Bestimmungen sind umständlich.
- e) Ungleichkörnige und aus anisometrischen Kristallen aufgebaute Gesteine sind wegen der Flächenstatistik nur mit Vorbehalt (Schnitteffektkorrektur) zu untersuchen.
- f) Das Filmdiagramm muss zur genauen Beurteilung in eine gebräuchliche Kugelprojektion übertragen werden.

## B. ANWENDUNG DER PHOTOGRAPHISCHEN RÖNTGEN-GEFÜGEANALYSE

### I. Fasrige und stengelige Mineralaggregate

Faser- und Stengelaggregate sind bei zahlreichen Mineralien eine häufige Wachstumserscheinung. Die Kristalle sind dabei nach einer Richtung gelängt und gewöhnlich scharf geregelt; bezüglich der andern Achsen verhalten sie sich unterschiedlich. Bei manchen herrscht völlige Drehlagefreiheit, bei andern sind sämtliche Achsen im Aggregat starr fixiert. Parallele Anlagerungen sind für das Kristallwachstum energetisch besonders günstig.

Die Gefügeaufnahmen von fasrigen Aggregaten eignen sich wegen der ausserordentlich scharfen Regelung vorzüglich als Demonstrationsbeispiele. Als Präparate für die folgenden Aufnahmen dienten senkrecht zur Stengelachse geschnittene dünne Plättchen.

*Gips* (monoklin). Seidenglänzendes, fasriges Aggregat aus Tiengen bei Waldshut.

Der Befund (Fig. 18) zeigt vollständige Drehlagefreiheit um die c-Achse; diese ist hingegen ausserordentlich gut orientiert. Die Flächenpole (002) und (022) liegen auf Kleinkreisen um die Faserachse [001].

*Coelestin* (orthorhombisch). Blaues, feinfasriges Aggregat von Dornburg bei Jena.

Die a-Achse [100] ist Stengelrichtung, die übrigen Achsen sind weitgehend fixiert. Die Schwankungen sind jedoch grösser als im Fall von Gips (Fig. 19).

*Aragonit* (orthorhombisch). Grünlich-durchscheinendes Stengelaggregat von Agrilesa, Attika.

Das Diagramm (Fig. 20) lässt eine hexagonale Anordnung der Pyramidenflächen erkennen, was mit der pseudohexagonalen Struktur erklärt werden kann. Die einzelnen Drehlagen sind nicht gleich stark besetzt und zeigen verschieden ausgeprägte Streuung.

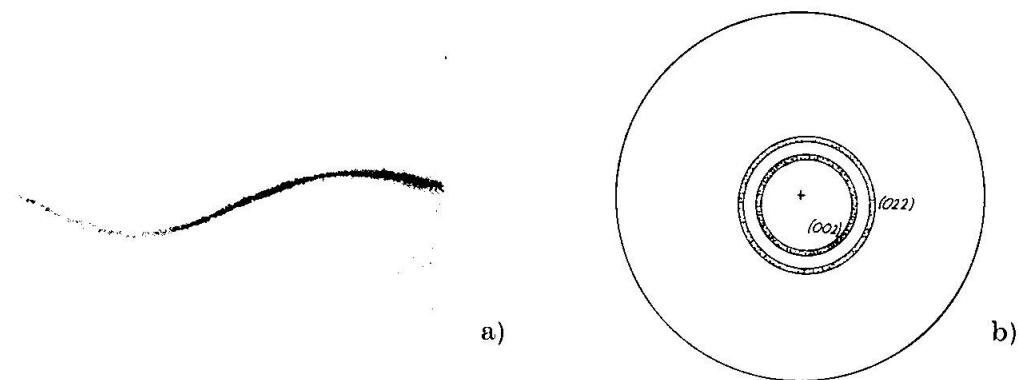


Fig. 18. Fasergips.

a) Röntgendiagramm von (022).

b) Stereographische Projektion der Pollagenverteilung von (002) und (022). Die Asymmetrie beruht auf einem leicht schiefen Schnitt der Probe (sinusartige Linien im Röntgendiagramm).

Fig. 19. Coelestin. Röntgendiagramm von (210).

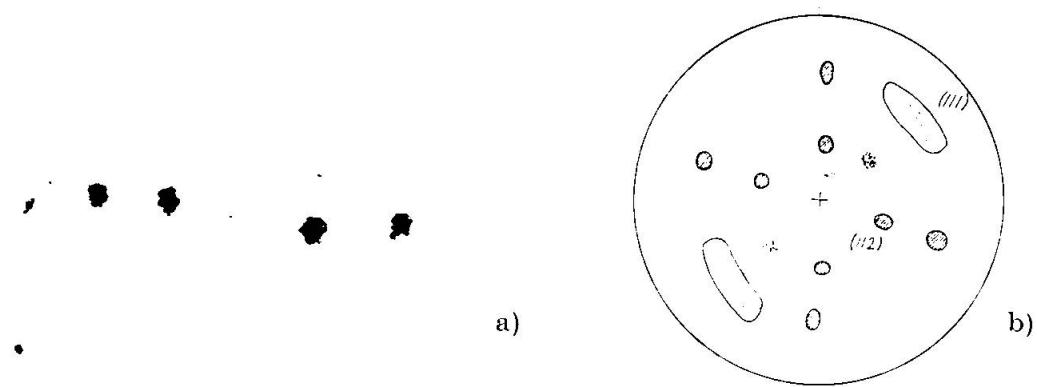


Fig. 20. Aragonit-Faseraggregat.

a) Röntgendiagramm von (112).

b) Stereographische Projektion der Pollagenverteilung von (112) und (111).

## 2. Gefüge von organischen Schalenmaterialien

Gefüge von organischen Schalenmaterialien (zum Beispiel Echinodermenskelette, Molluskenschalen) können oft wegen ihrer feinkörnigen Struktur optisch nicht vollständig untersucht werden. Unter anderem hat RAUP (1959, 1962) auf den Wert von c-Achsenmessungen an Echinodermenskeletten für die Taxonomie der Echinodermen hingewiesen. Neuere Untersuchungen von NISSEN (1962) haben an einfachen Fällen mit LAUE-Aufnahmen die Drehlage der Calcitkristalle in einem Seeigel-skelett bestimmt. Die Röntgenanalyse erlaubt eine vollständige, rasche und sichere Beurteilung der Orientierung, die in den meisten Fällen ausserordentlich gut ist. Die Kenntnis der Gefüge von Schalenmaterialien ist möglicherweise wertvoll zur Klärung phylogenetischer Zusammenhänge. Es ist noch ungewiss, ob die Orientierung der Kristalle einem anorganischen Wachstumsgefüge entspricht oder auch von lebenden, nichtkristallinen, organischen Substanzen beeinflusst ist. In der Folge sind einige Beispiele ausgewählt und die Untersuchungsmöglichkeiten mit der Gefügekamera gezeigt.

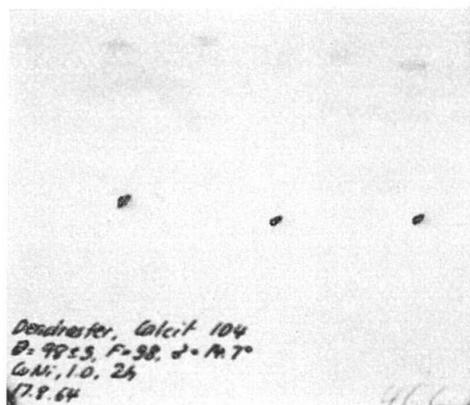
*Echinodermen.* Untersucht wurden Ambulacralplatten dreier verschiedener rezenter Seeigel-Arten. In den Stereogrammen ist die Apical-Richtung jeweils gegen oben. Die leichte Desorientierung wird durch die um etwa  $10^\circ$  gegen die Symmetrieebene verkippten Ambulacralplatten hervorgerufen (für weitere Angaben vgl. RAUP, 1962). Horizontal-ebene des Diagramms ist die Plattenebene.

In Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von vier Stunden wurde jeweils das r-Rhomboeder ( $10\bar{1}1$ ) und die Basis ( $0001$ ) untersucht und damit der Kristall eindeutig fixiert.

Besonders übersichtlich ist das Bild bei *Dendraster excentricus* (Fig. 21) mit der c-Achse normal zur Plattenebene. Bei *Strongylocentrotus franciscanus* und *Sphaerechinus granularis* (Fig. 22, 23) steht die c-Achse schief, liegt aber immer in der Apicalebene. Diese ist auch bezüglich der a-Achsen aller in einer Vertikalebene liegenden Platten Symmetrieebene.

*Pelecypoden.* Viel kompliziertere Verhältnisse als bei den Seeigeln liegen bei den Muscheln vor, was schon durch den mehrschichtigen Aufbau der Schale in Prismenschicht, Perlmutterschicht und Conchiolin-schicht bedingt ist. Die Gefüge sind äusserst feinkörnig: die Röntgenanalyse ist deshalb die einzige Untersuchungsmöglichkeit. Wir beschränken uns auf die Beschreibung eines Beispiels (*Mytilus californianus*).

Die Unterschale (Fig. 24, 25) besteht aus Aragonit, dessen c-Achsen



a)

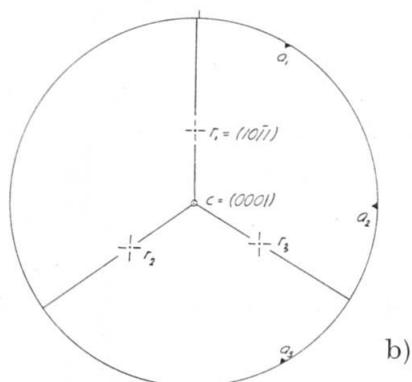
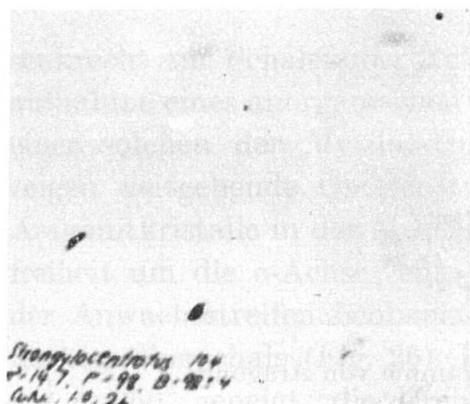


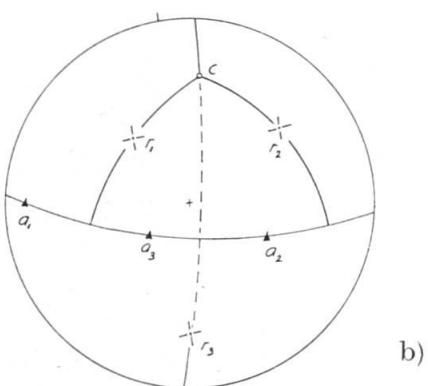
Fig. 21. Dendraster excentricus.

a) Röntgendiagramm, Calcit (1011).

b) Orientierung der Ambulacralsplatten (stereographische Projektion).



a)



22. Strongylocentrotus franciscanus.

a) Röntgendiagramm, Calcit (1011).

b) Orientierung der Ambulacralsplatten (stereographische Projektion).

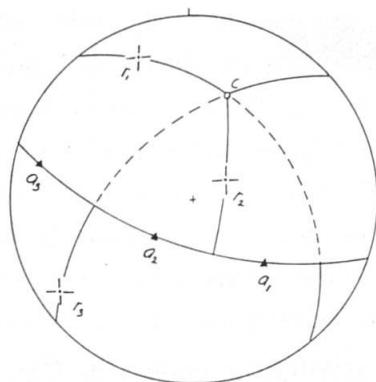


Fig. 23. Orientierung der Annulacralsplatten bei Sphaerechinus granularis (stereographische Projektion).

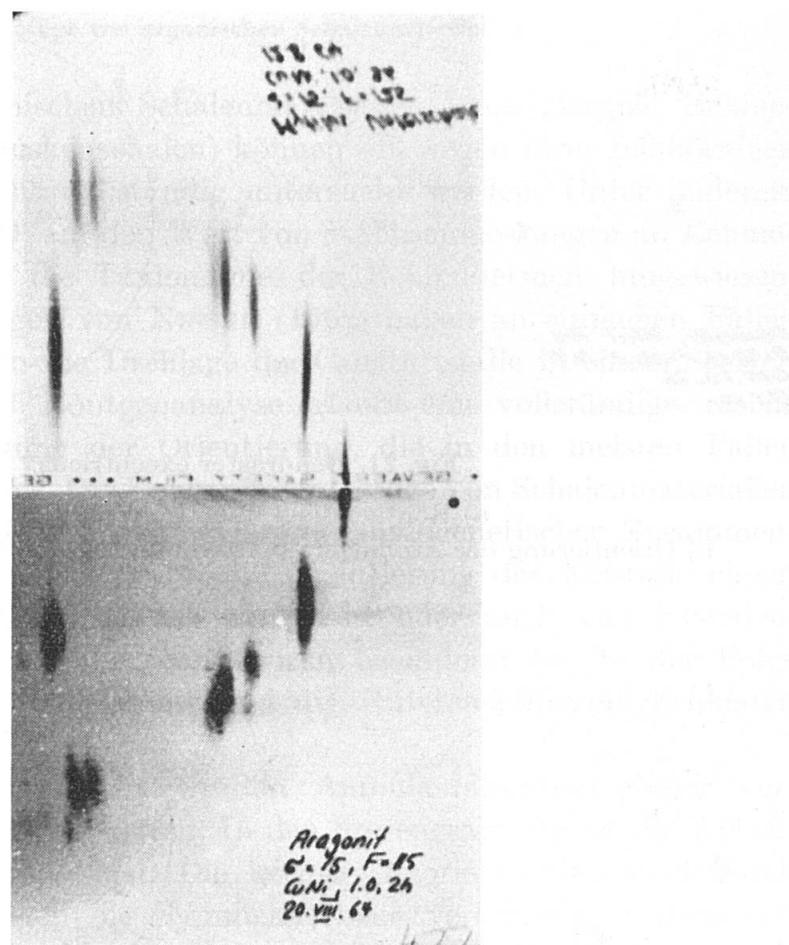


Fig. 24. Röntgen-Übersichtsdiagramme von Aragonit.  
Oben: *Mytilus californianus*, Unterschale. Unten: Aragonit-Faseraggregat.

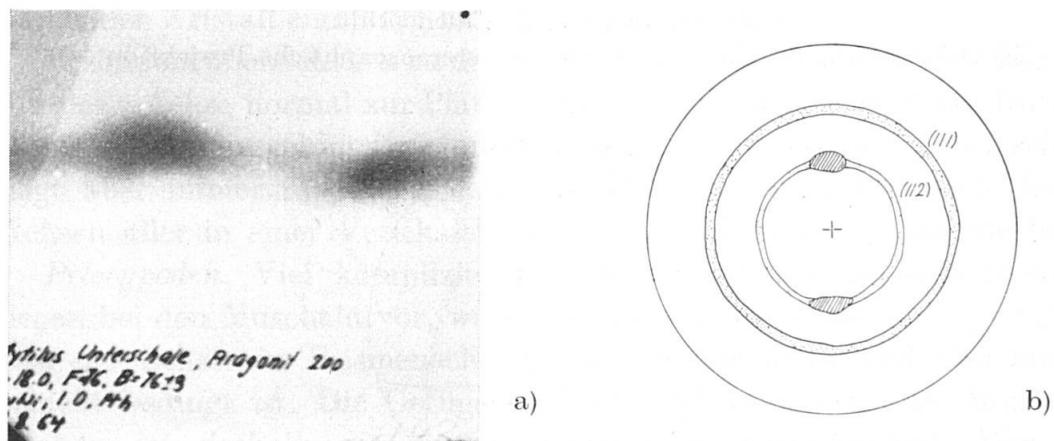
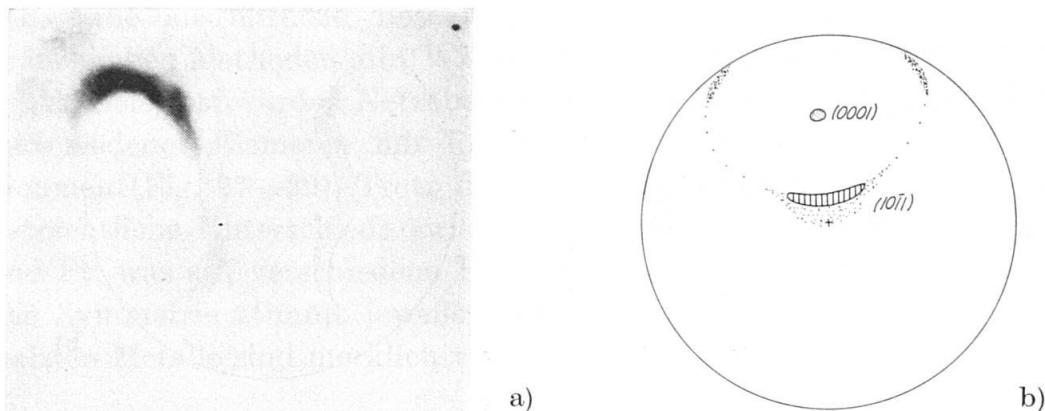


Fig. 25. *Mytilus*, aragonitische Unterschale.

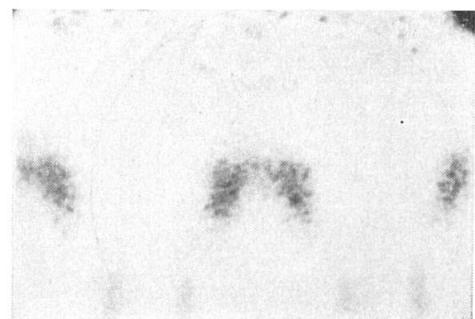
- a) Röntgendiagramm (200).
- b) Stereographische Projektion der Pollagenverteilungen von (112) und (111).

Fig. 26. *Mytilus*, calcitische Oberschale.a) Röntgendiagramm  $(10\bar{1}1)$ .b) Stereographische Projektion der Pollagenverteilungen von  $(10\bar{1}1)$  und  $(0001)$ .

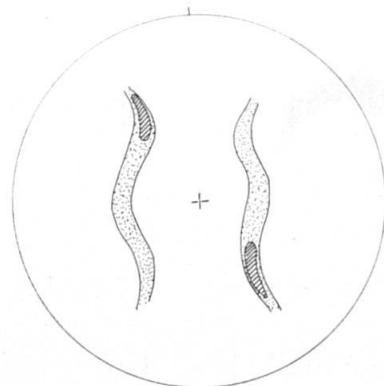
senkrecht zur Schalenoberfläche stehen. In Fig. 24 wird die Übersichtsaufnahme eines anorganischen Aragonit-Faseraggregates (vgl. S. 538) mit einer solchen der *Mytilus*-Unterschale verglichen. Die beiden Bilder zeigen weitgehende Übereinstimmung. In der a-Achsenorientierung der Aragonitkristalle in der Muschelschale herrscht mehr oder weniger Drehfreiheit um die c-Achse; eine schwache Häufung wird in der Richtung der Anwachsstreifen beobachtet. Verschieden ist das Gefüge der calcitischen Oberschale (Fig. 26). Die c-Achsen sind gegen die Schalenfläche um ca.  $60^\circ$  geneigt; die Drehlage der a-Achsen ist weitgehend fixiert.

### 3. Deformierte Metalle

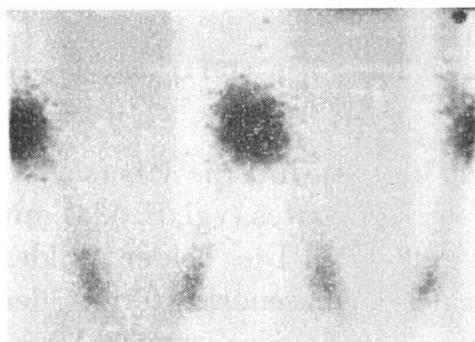
Das klassische Anwendungsgebiet der Röntgen-Texturanalyse ist das der deformierten Metalle. Metalle sind sehr gut deformierbar und gelten deshalb in dieser Hinsicht als Modellbeispiele für die Gefügekunde der Gesteine. Da es sich um technisch wichtige Werkstoffe handelt, ist ihr Regelungsmechanismus viel besser untersucht als derjenige der Gesteine. Früher wurde die Symmetrie ihres Gefüges hauptsächlich mit LAUE-Aufnahmen nach SANDER und SACHS (1931) bestimmt (zum Beispiel EPPRECHT, 1952); heute sind diese Methoden meist durch die Texturgoniometer ersetzt. Metalle haben gegenüber Gesteinen kleine Kristallite, sind oft kubisch und undurchsichtig, deshalb nur durch die Röntgenanalyse sicher erfassbar. Sie haben meist nur wenige, dafür sehr starke Reflexe und eignen sich deshalb ausgesprochen für Röntgenuntersuchun-



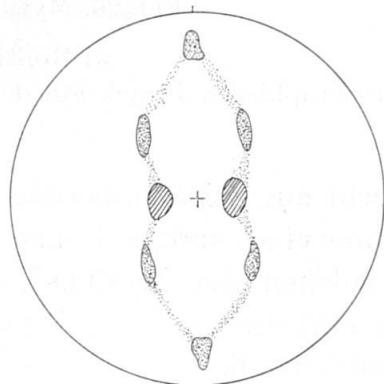
a)



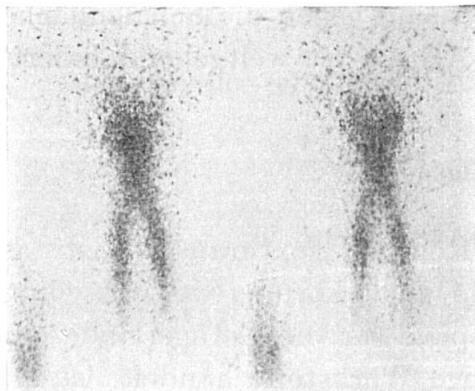
b)



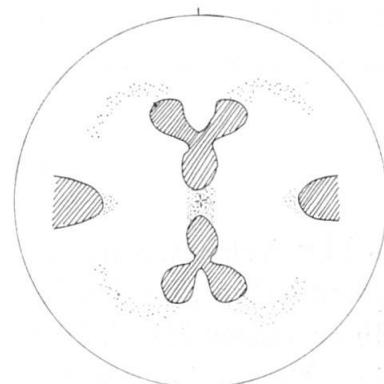
c)



d)



e)



f)

Fig. 27. Al-Folie.

- a) Röntgendiagramm (100).
- b) Pollagenverteilung von (100) in Lambert-Projektion.
- c) Röntgendiagramm (111).
- d) Pollagenverteilung von (111) in Lambert-Projektion.
- e) Röntgendiagramm (220).
- f) Pollagenverteilung von (220) in Lambert-Projektion.

gen. Eine ausführliche Beschreibung der in der Metallographie gebräuchlichen Methoden gibt WASSERMANN und GREWEN (1962).

Als Beispiele wurden Netzebenenverteilungen von Blechen und Folien verschiedener Elemente mit kubisch flächenzentriertem Gitter aufgenommen (Fig. 27—29). Trotz der strukturellen Ähnlichkeit zeigen sich beträchtliche Unterschiede zwischen den Gefügen der Elemente Al, Au und Pt, was auf verschiedene Bearbeitung zurückgeführt werden muss. Die Symmetrie stimmt jeweils überein. Die Korngrößen der drei gewalzten Metalle sind merklich verschieden.

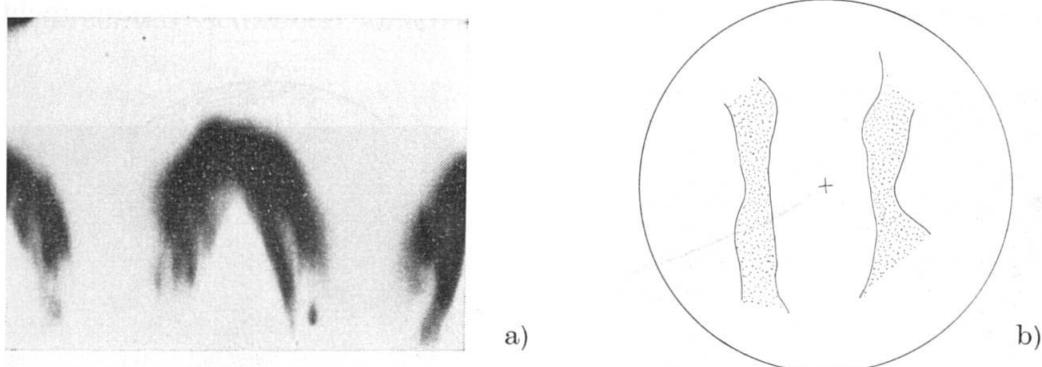


Fig. 28. Pt-Folie, (111).

- a) Röntgendiagramm.  
b) Pollagenverteilung in Lambert-Projektion.

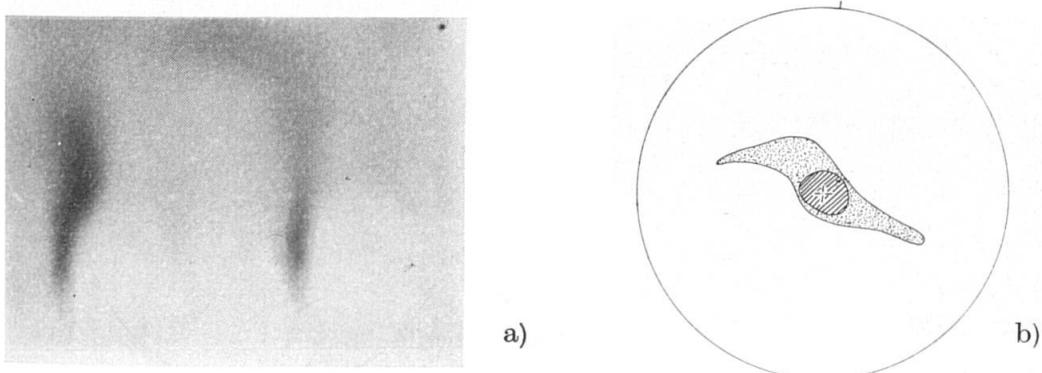


Fig. 29. Au-Blech, (100)

- a) Röntgendiagramm.  
b) Pollagenverteilung in Lambert-Projektion.

#### 4. Tektonitgefüge

Die Gefügekunde ist in erster Linie eine Hilfswissenschaft der Geologie. Diese exakte, im wesentlichen der Kristallographie und Festkörperphysik zugehörige Disziplin ermöglicht sichere Aussagen über den Aufbau der geologischen Körper. Es ist gerade für Kristallinpetrographen wichtig, eine rasche und eindeutige Methode zur Bestimmung der Orientierung der Kristalle im Gestein zu besitzen. Die Röntgenanalyse kann in vielen Fällen erfolgreich eingesetzt werden; sie ersetzt jedoch die optische Analyse nicht. Die Aussagekraft von Pollendiagrammen mehrzähliger Flächen ist reduziert, auch Symmetriebetrachtungen sind oft unsicher, zum Beispiel bei rekristallisierten Quarzgefügen, wo die Symmetrie der c-Achsen-Verteilung (Hauptregelungselement) durchaus nicht

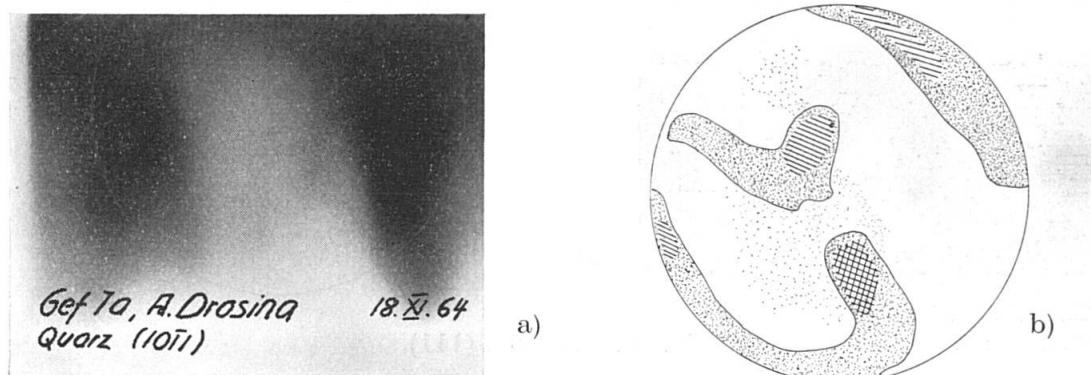


Fig. 30. Mylonitequarzit, A. Drosina (Leventina), (10 $\bar{1}$ 1).

- a) Röntgendiagramm.
- b) Pollagenverteilung in Lambert-Projektion.

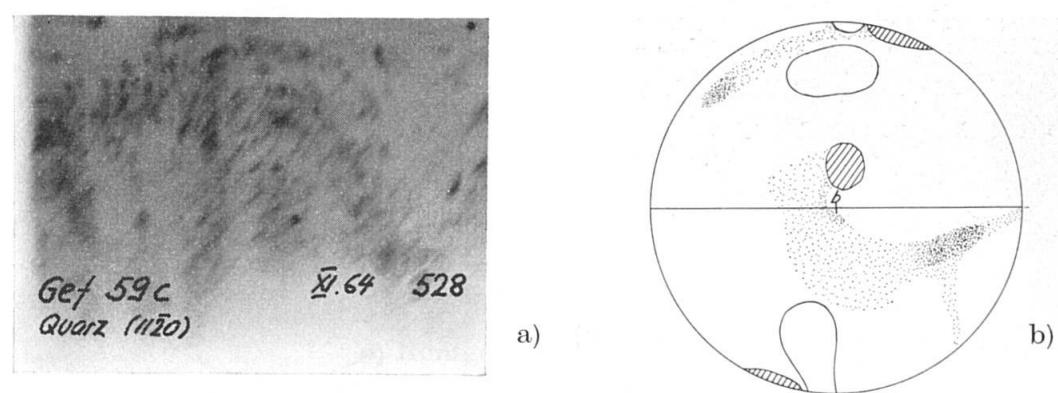


Fig. 31. Quarzlage, Riale Ghendola (V. Antigorio), (11 $\bar{2}$ 0).

- a) Röntgendiagramm.
- b) Pollagenverteilung in Lambert-Projektion.

mit der Symmetrie der Prismen- und Rhomboeder-Verteilung (Nebenregelungselement) übereinstimmen muss. Im folgenden sind kurz einige Beispiele der wichtigsten gesteinsbildenden Mineralien Quarz, Calcit und Feldspat (Plagioklas) beschrieben. Auf Schwierigkeiten bei der Untersuchung von Tektonitgefügen mit der Röntgenanalyse und auf Möglichkeiten der Interpretation von Röntgenaufnahmen wird an anderer Stelle (WENK 1965) näher eingetreten.

*Quarz.* Bei Quarz kommen wegen der hohen Intensität der Reflexe vor allem die Netzebenen  $(10\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{2}0)$  und  $(20\bar{2}0)$  für eine Untersuchung in Frage. Fig. 30 zeigt die  $(10\bar{1}1)$ -Verteilung einer in winzige Fragmente aufgelösten Quarzlage in Bündnerschiefer (Gef. 7, A. Drosina, Tessin vgl. WENK, 1965); das Stereogramm ist aus drei aufeinander senkrechten Schnitten konstruiert. In Fig. 31a ist eine Aufnahme der

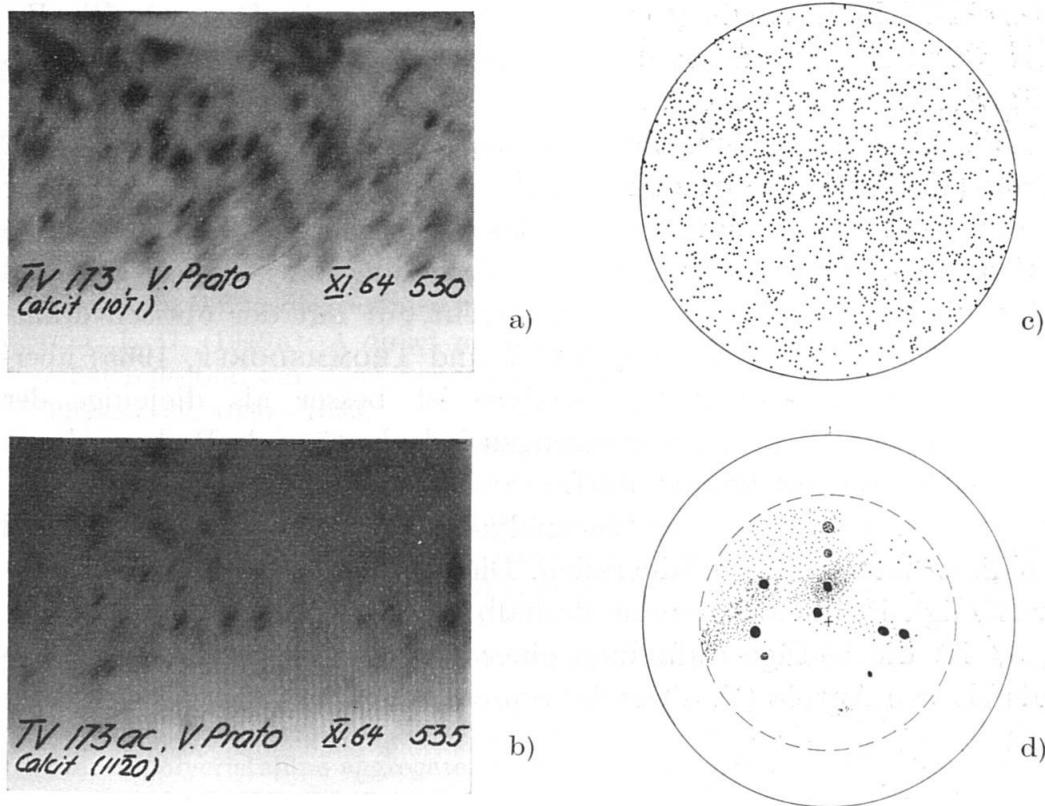


Fig. 32. Marmorlage, V. Prato (Maggia).

- a) Röntgendiagramm, Calcit  $(10\bar{1}1)$ .
- b) Röntgendiagramm, Calcit  $(11\bar{2}0)$ .
- c)  $(11\bar{2}0)$ -Verteilung. 1600 a-Achsen, Lambert-Projektion (aus WENK und TROMMS-DORFF, 1965). Optische Messungen.
- d)  $(11\bar{2}0)$ -Verteilung, dem Röntgendiagramm entnommen.

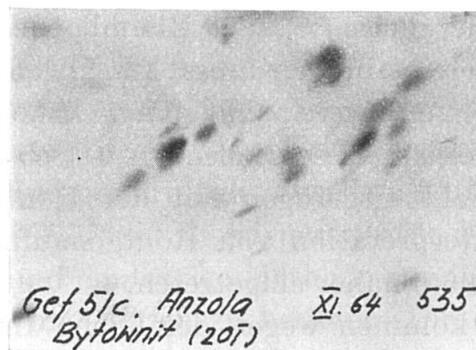


Fig. 33. Röntgendiagramm eines Bytownitgefüges. Plagioklaslage im Hornblendefels von Anzola. Netzebene (20 $\bar{1}$ ).

Prismenebene (11 $\bar{2}$ 0) dargestellt (Stereogramm Fig. 31b). Als Probe diente ein Mylonitquarzit (Gef. 59, R. Ghendola, V. Devero). Die Ergebnisse von Röntgenuntersuchungen an Quarziten werden bei WENK (1965) ausführlich diskutiert.

*Calcit.* Als Untersuchungsbeispiel dient eine Marmorprobe aus dem V. Prato (V. Maggia), welche uns von Dr. V. TROMMSDORFF zur Verfügung gestellt wurde. Aufgenommen wurde das r-Rhomboeder (10 $\bar{1}$ 1) (Fig. 32a) und das Prisma (11 $\bar{2}$ 0) (Fig. 32b). Die Verteilung der a-Achsen aus dem Röntgendiagramm (Fig. 32d) stimmt recht gut mit der optisch ermittelten Verteilung (Fig. 32c aus WENK und TROMMSDORFF, 1965) überein. Die Statistik der Röntgenanalyse ist besser als diejenige der optischen; einige grosse Körner erzeugen jedoch störende Reflexe, denen kein Gewicht zugelegt werden darf.

*Plagioklas.* Die Röntgengefügeanalyse bewährt sich vor allem bei monoklinen und triklinen Mineralien. Die Kristallflächen sind von niedriger Zähligkeit, die Diagramme deshalb einfacher zu interpretieren. In Fig. 33 ist die Gefüge-Aufnahme einer Bytownitlage aus dem Hornblendefels von Anzola (V. d'Ossola) reproduziert.

Wir danken Prof. F. Laves (Zürich) und Prof. E. Wenk (Basel), an deren Instituten die Arbeit durchgeführt wurde, für ihre Unterstützung, ebenso Herrn E. Glauser, technischer Assistent am Mineralogischen Institut der Universität Basel, für seinen selbstlosen Einsatz beim Bau der Gefügekamera.

Interessenten für die Kamera sind gebeten, sich an das Mineralogische Institut der Universität Basel zu wenden. Das Gerät kann entweder dort gebaut, oder es können genaue Planskizzen ausgeliehen werden.

## LITERATUR

## A. Methodik

- BUERGER, M. J. (1944): The Photography of the reciprocal Lattice. ASXRED Monograph Nr. 1, Cambridge, Mass.
- v. GEHLEN, K. (1960): Die röntgenographische und optische Gefügeanalyse von Erzen, insbesondere mit dem Zählrohr-Textur-Goniometer. Beitr. Min. Petr. 7, — (1962a): Ein Pyrrhotin-Gefüge aus der Grube Bayerland bei Waldsassen (Oberpfalz). Beitr. Min. Petr. 8, 315—322.
- v. GEHLEN, K. und VOLL, G. (1962): Röntgenographische Gefügeanalyse mit dem Texturgoniometer am Beispiel von Quarziten aus kaledonischen Überschichtungszonen. Geol. Rdsch. 51, 440—450.
- HIGGS, D. V., FRIEDMAN, M. and GEBHART, J. E. (1960): Petrofabric analysis by means of the X-ray diffractometer. Geol. Soc. Amer. Mem. 79, 275—292.
- HO, T. L. (1947): Petrofabrie analysis by means of X-ray. Geol. Soc. China Bull. 27, 389—398.
- HOWARTH, F. E. (1940): An apparatus for determining the orientation of crystals by X-rays. Rev. Sci. Instruments. 11, 88—91.
- JETTER, L. K. and BORIE, B. S. Jr. (1953): Method for the quantitative determination of preferred orientation. J. Applied Physics. 24, 532—535.
- KRATKY, K. O. (1930): Ein Röntgengoniometer für die Polykristalluntersuchung. Z. Krist., 72, 529.
- SANDER, B. und SACHS, G. (1930): Zur röntgenographischen Gefügeanalyse von Gesteinen. Z. Krist., 75, 550—571.
- SANDER, B. mit KASTLER, D. und LADURNER, J. (1954): Zur Korrektur des Schnitteffektes in Gefügediagrammen heterometrischer Körner. Wien.
- SCHULZ, L. G. (1949a): A direct method of determining preferred orientation of a flat reflection sample using a Geiger counter X-ray spectrometer. J. Applied Physics. 20, 1030—1033.
- (1949b): Determination of preferred orientation in flat transmission samples using a Geiger counter X-ray spectrometer. J. Applied Physics, 20, 1033—1036.
- STARKEY, J. (1964): An X-ray method for determining the orientation of selected crystal planes in polycrystalline aggregates. Amer. J. Sc., 262, 6, 735—752.
- WENK, H.-R. (1963): Eine Gefüge-Röntgenkamera. Schweiz. Min. Petr. Mitt., 43, 707—719.
- (1966): Zum Fehlbau von Quarzkristallen in Tektoniten. Beitr. Min. Petr. (im Druck).
- WOOSTER, W. A. (1948): An X-ray goniometer for the study of preferred orientation in polycrystalline aggregates. J. Sci. Instruments. 25, 129—134.

## B. Anwendung

- EPPRECHT, W. (1952): Röntgenfeinstruktur-Untersuchungen über das Kriechen von Stahl. Schweiz. Arch. angew. Wiss. und Technik, 18. Jg., 10—21.
- NISSEN, H. U. (1963): Röntgengefügeanalyse am Kalzit von Echinodermenskeletten. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 117, 230—234.
- RAUP, D. M. (1959): Crystallography of echinoid calcite. J. Geol., 67, 661—673.

- (1962): The Phylogeny of calcite crystallography in echinoids. *J. Paleont.*, *36*, 793—810.
- SANDER, B. und SACHS, G. (1930): Zur röntgenoptischen Gefügeanalyse von Gesteinen. *Z. Krist.*, *75*, 550—571.
- WASSERMANN, G. und GREWEN, J. (1962): Texturen metallischer Werkstoffe. Berlin.
- WENK, H.-R. (1965): Gefügestudie an Quarzknauern und -lagen der Tessiner Kulmination. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* *45*, 467—515.
- WENK, H.-R. und TROMMSDORFF, V. (1965): Koordinatentransformation, Nachbarwinkelstatistik. Mittelbare Orientierung, (Gefügekundliche Rechenprogramme mit Beispielen). *Beitr. Min. Petr.* *11*, 559—585.

Manuskript eingegangen am 5. Mai 1965.