

Ann. Naturhist. Mus. Wien	87	A	33-37	Wien, November 1985
---------------------------	----	---	-------	---------------------

## Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen am Chondriten Ybbsitz

VON WOLFGANG FRIEDRICH MÜLLER<sup>1)</sup>

(Mit 5 Tafeln)

Manuskript eingelangt am 3. April 1985

### Zusammenfassung

Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen zweier Präparate des Meteoriten Ybbsitz ergaben folgendes: Olivin enthält eine hohe Dichte von Versetzungen mit dem Burgers-Vektor  $b = [001]$ , der charakteristisch für Verformung durch Stoßwellen ist. Ein weiterer Hinweis auf Beanspruchung durch Stoßwellen sind die in Ca-reichen Klinopyroxen beobachteten Zwillingslamellen nach (100). Der bytownitische Plagioklas zeigt  $1/2$  [110]-Antiphasen-Domänen mit Abmessungen von mehreren Mikrometern, die für eine Abkühlungszeit vom mindestens 500 Jahren auf  $1000^\circ\text{C}$  sprechen. Diaplektisches Plagioklasglas wurde nicht gefunden. Daher kann der ganze Meteorit keinem höheren Stoßwellendruck als 250 kbar ausgesetzt gewesen sein.

### Summary

A transmission electron microscopic study of two specimens of the meteorite Ybbsitz gave the following results: Olivine contains a high density of dislocations with the Burgers vector  $b = [001]$  which is characteristic for shock deformation. Mechanical twin lamellae on (100) in Ca-rich clinopyroxene were probably also produced by shock waves. The bytownitic plagioclase displays large  $1/2$  [110]-antiphase domains of a size of several micrometers. They indicate comparatively long cooling times of at least 500 years down to  $1000^\circ\text{C}$ . Diaplectic plagioclase glass was not found. Therefore, the meteorite in total was not subjected to shock waves with a peak pressure of more than 250 kbar.

### Einleitung

Im folgenden werden einige Beobachtungen mitgeteilt, die mit dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) am Chondriten Ybbsitz erhalten wurden. Sie sollen einen Einblick in das Gefüge im submikroskopischen Bereich geben. Da nur zwei Präparate untersucht wurden und der Meteorit im Lichtmikroskop eine große Vielfalt an Bestandteilen zeigt, können die Beobachtungen nur einen kleinen Ausschnitt darstellen.

---

<sup>1)</sup> Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Wolfgang Friedrich MÜLLER, Institut für Mineralogie der Technischen Hochschule Darmstadt, Schnittspahnstr. 9, D-6100 Darmstadt. – BR Deutschland.

## Experimentelles

Aus einem etwa 30  $\mu\text{m}$  starken Dünnschliff wurden interessierende Probenbereiche mit einem Skalpell herausgeschnitten, auf jeweils ein Cu-Netz (50 mesh) von 3 mm Durchmesser geklebt und in einer Ionendünnungsanlage mit Argon-Ionen beschossen, die durch eine Spannung von 5 bis 6 kV beschleunigt wurden. Auf diese Weise wurden Präparate hergestellt, die für TEM-Untersuchungen geeignet dünne, wenige Zehntel  $\mu\text{m}$  starke Präparatbereiche enthalten. Die TEM-Untersuchungen wurden an einem JEOL JEM 200 CX und einem JEOL JEM 100 B durchgeführt. Dieses war auch mit einer Anlage zur energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDA) ausgestattet, die semiquantitative Analyseergebnisse liefert. Über die Anwendungsmöglichkeiten des TEM in der Mineralogie unterrichtet z. B. das Buch „Electron Microscopy in Mineralogy“ (WENK 1976).

## Beobachtungen

### 1. Olivin

Der Olivin enthält Versetzungen in einer Dichte der Größenordnung von  $10^9\text{cm}^{-2}$  (Fig. 1). Die Analyse mit Hilfe von Kontrastexperimenten zeigt, daß es sich im wesentlichen um Schraubenversetzungen mit dem Burgersvektor  $\underline{b} = [001]$  handelt.

### 2. Ca-arme Pyroxene

Es wurde sowohl Orthopyroxen mit Einschaltungen von wahrscheinlich isochemischen elementarzellen-breiten Klinopyroxen-Lamellen parallel (100) beobachtet wie auch Klinopyroxen mit vereinzelt Orthopyroxen-Lamellen. Die energiedispersive Röntgenmikroanalyse eines Orthopyroxens ergab mit Fs67 einen erstaunlich Fe-reichen Pyroxen; der Wo-Gehalt war etwa 1,5 Molprozent.

### 3. Ca-reiche Pyroxene

Fig. 2 und 3 zeigen einen Klinopyroxen mit dem Pauschalchemismus von  $\text{Wo}_{48}\text{En}_{23}\text{Fs}_{32}$ , der Entmischungslamellen nach (001) von Pigeonit enthält, wie aus der Elektronenbeugungsaufnahme (Fig. 4) zu Fig. 3 hervorgeht: Die Analyse der Beugungsaufnahme ergibt, daß die Richtungen  $c^*_{\text{Augit}}$  und  $c^*_{\text{Pigeonit}}$  parallel verlaufen. Die Richtungen  $a^*$  zeigen eine Aufspaltung bedingt durch den unterschiedlichen monoklinen Winkel  $\beta$  von Augit und Pigeonit (s. BUSECK & al. 1980). Bei den feinen lamellaren Strukturen parallel (100) handelt es sich um Zwillingslamellen des Ebenengesetzes (100). Derartige Zwillingslamellen nach (100) wurden auch in einem anderen Klinopyroxen etwa der gleichen Zusammensetzung gefunden (Fig. 5).

#### 4. Ca-reicher Plagioklas

Das eine TEM-Präparat enthielt mehrere große gut durchstrahlbare Bereiche Ca-reichen Plagioklases, dessen Chemismus nach der EDA auf An<sub>70</sub> bis 80 geschätzt wird. Alle Beugungsbilder besaßen Reflexe des Typs  $h + k = 2n, l = 2n$  (a-Reflexe) und  $h + k = 2n + 1, l = 2n + 1$  (b-Reflexe). Dazu kamen bei einigen Kristallen diffuse Reflexe des Typs  $h + k = 2n, l = 2n + 1$  (c-Reflexe), gelegentlich waren sehr schwache und diffuse Reflexe des Typs  $h + k = 2n + 1, l = 2n$  (d-Reflexe) wahrnehmbar. Die Plagioklase zeigten in Dunkelfeldaufnahmen im Licht von b-Reflexen  $1/2 [110]$ -Antiphasendomänen (Fig. 6). Auch modulierte Strukturen konnten in Hell- und Dunkelaufnahmen abgebildet werden (Fig. 7).

In Ca-reichem Plagioklas wurden isometrische Einschlüsse von etwa  $1/2$  bis  $1 \mu\text{m}$  Durchmesser von Ca-armem Pyroxen (ungefähre Zusammensetzung En<sub>30</sub>Wo<sub>4</sub>Fs<sub>66</sub>, wahrscheinlich Klinopyroxen) gefunden (Fig. 8).

Fig. 9 und das zugehörige Elektronenbeugungsdiagramm von Fig. 10 zeigen das Mosaikgefüge eines mechanisch beanspruchten Plagioklases.

#### Diskussion und Schlußfolgerungen

Die in Olivin beobachteten Versetzungen mit dem Burgersvektor  $[001]$  sind charakteristisch für hohe Verformungsgeschwindigkeiten und niedrige Temperaturen bei der Verformung, wie zuerst von PHAKEY & al. (1972) nachgewiesen wurde. Diese Autoren hatten Olivin-Einkristalle untersucht, die experimentell bei einem Bregrenzungsdruck von 10 kbar, Verformungsgeschwindigkeiten von  $10^{-4}$  und  $10^{-5} \text{ sec}^{-1}$  und Temperaturen von 600 bis  $1250^\circ \text{ C}$  verformt wurden. Auch für stoßwellenverformte Olivine sind Versetzungen mit dem Burgersvektor  $[001]$  charakteristisch (ENGELHARDT & al. 1971, MÜLLER 1975, JEANLOZ 1980). Da in Meteoriten Stoßwellen die einzige wahrscheinliche Ursache für Verformung sind, gelten  $[001]$ -Versetzungen in Meteoriten und Mondproben als Indikator für Stoßwellenwirkung. In einer Reihe von equilibrierten und unequilibrierten chondritischen Meteoriten wurden bereits Versetzungen dieses Typs nachgewiesen und als Stoßwelleneffekt interpretiert (s. ASHWORTH & BARBER 1975, TÖPEL-SCHADT & MÜLLER 1979, 1981). Es ist nach den vorliegenden Beobachtungen zu schließen, daß auch der Chondrit Ybbsitz durch Stoßwellen verformt wurde, wobei nicht entschieden werden kann, ob dieses Ereignis noch auf dem Meteoriten-Mutterkörper oder erst nach dem Herausschlagen bei einer Kollision im Weltall stattfand.

Ein weiterer Hinweis auf mechanische Beanspruchung sind die in Ca-reichem Klinopyroxen beobachteten Zwillings-Lamellen nach  $(100)$ . Deformationszwillinge dieser Art können auch durch Stoßwellen erzeugt werden, wie in Augiten aus dem Meteoritenkrater Clearwater Lake West und im stoßwellenbeanspruchten Chondriten Etter beobachtet wurde (MÜLLER 1978). Übrigens wird unseres Wissens hier erstmals über Deformationszwillinge nach  $(100)$  in Augit mit Pigeonit-Entmischungslamellen nach  $(001)$  berichtet. Zwillingslamellen nach  $(001)$ , die in stoßwellenbeanspruchten Klinopyroxen ebenfalls auftreten können (HORNEMANN & MÜLLER 1971, MÜLLER 1978), wurden nicht gesehen.

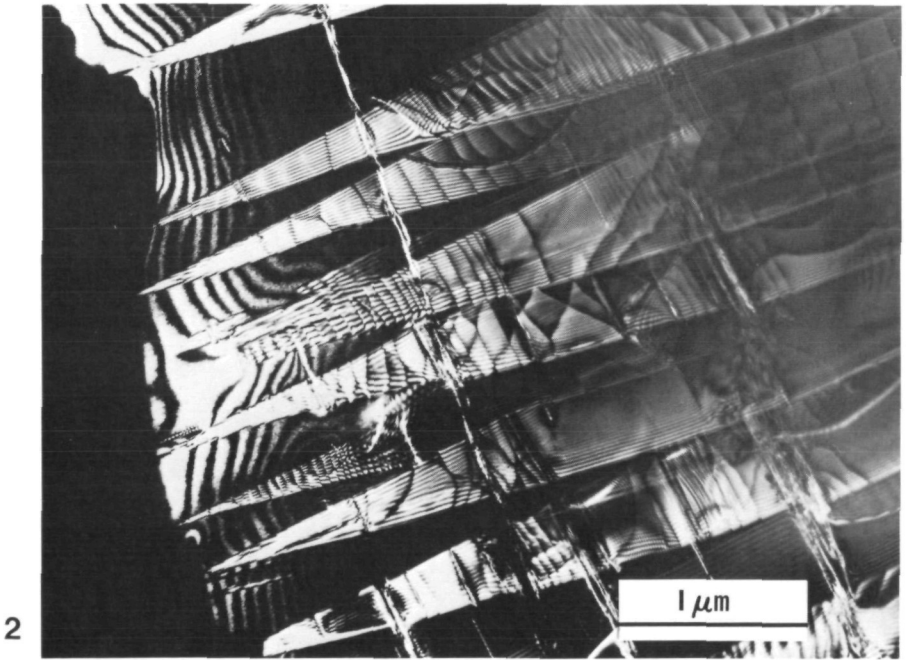
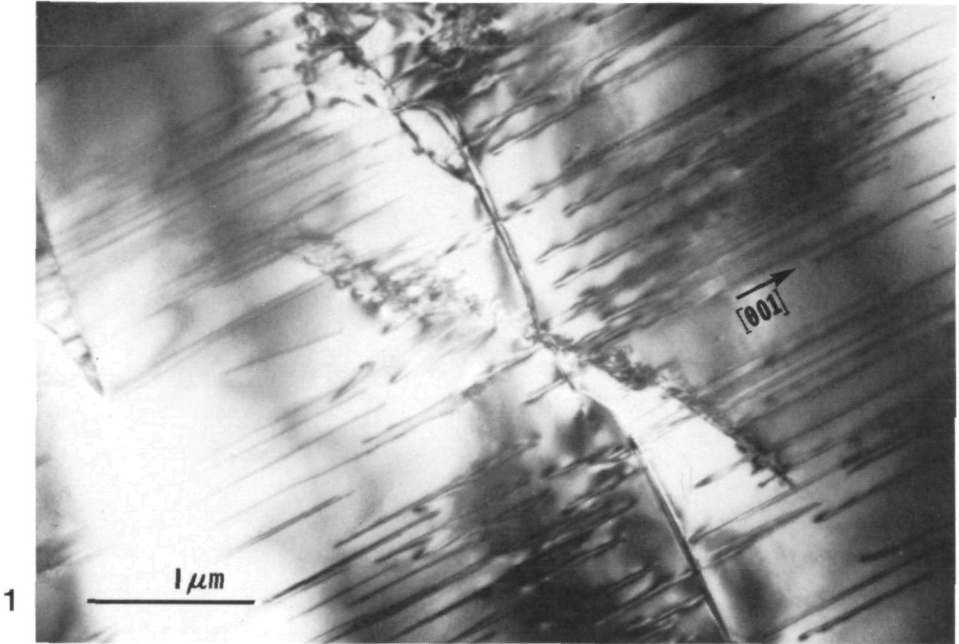
Da der Plagioklas keine Umwandlung in diaplektisches Glas (Maskelynit) erkennen läßt, kann er und der Meteorit im ganzen nicht einem Stoßwellendruck von mehr als 250–300 kbar ausgesetzt gewesen sein (s. DODD 1981, p. 109). (Das schließt nicht aus, daß einzelne Komponenten des Meteoriten vorher möglicherweise durch einen höheren Stoßwellendruck beansprucht worden waren.)

Die Größe der 1/2 [110]-Antiphasendomänen im Plagioklas läßt auf eine relativ langsame Abkühlungsgeschwindigkeit für diese Kristalle schließen. Nach MÜLLER & al. (1984) kann eine Zeit von mindestens 500 Jahren für eine Abkühlung auf ca. 1000° C abgeschätzt werden, eine Zeit, wie sie für die Achondrite Stannern und Juvinas vermutet wird. In chondritischen Meteoriten wurden jedoch unseres Wissens so große Antiphasendomänen noch nicht beobachtet. Auch die Entmischungslamellen in Klinopyroxen sind verträglich mit einer relativ langsamen Abkühlung in der gleichen Größenordnung.

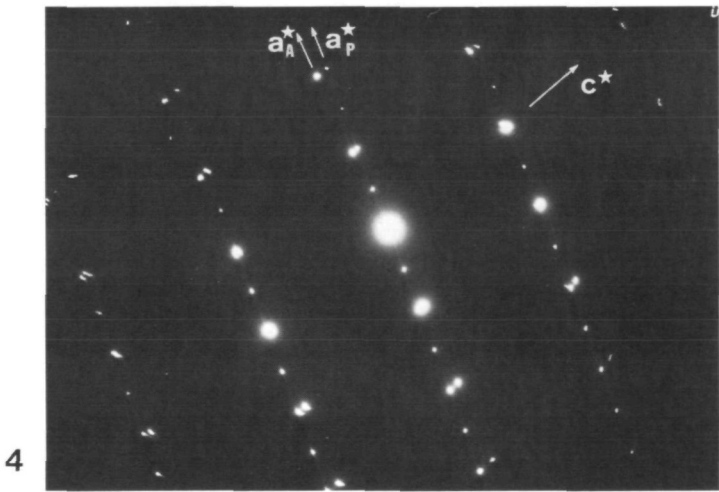
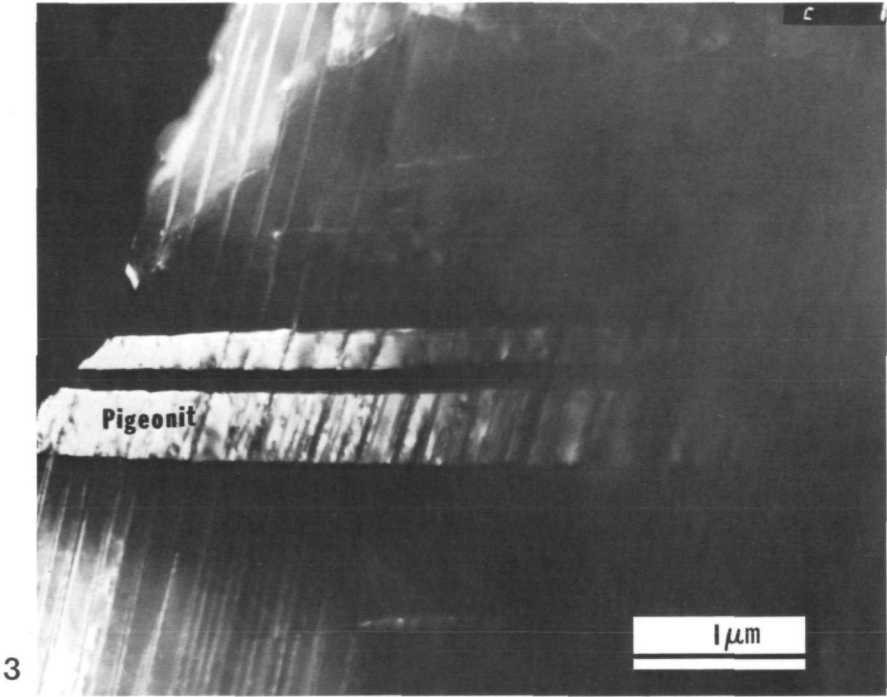
Dank: Herrn Doz. Dr. G. KURAT danke ich für Proben des Meteoriten Ybbsitz. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. D. BARBER, University of Essex, und Herrn Prof. Dr. G. MIEHE und Herrn Prof. Dr. H. FUESS, Universität Frankfurt a. M., für die Arbeitsmöglichkeiten an den Elektronenmikroskopen der Institute. Für photographische Arbeiten danke ich Frau G. SEIFERT, für Präparationsarbeiten Herrn J. ÖFFLER. Die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft wird dankbar anerkannt.

#### Literatur

- ASHWORTH, J. R. & BARBER, D. J. (1975): Electron petrography of shockdeformed olivines in stony meteorites. – *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **27**: 43–50.
- BUSECK, P. R., NORD, jr. G. L. & VELEN, D. R. (1980): Subsolidus phenomena in pyroxenes. – In: *Pyroxenes, Reviews in Mineralogy*, **7** (C. T. PREWITT, ed.): 117–211. – Mineralogical Society of America.
- DODD, R. T. (1981): *Meteorites – A Petrological-Chemical Synthesis*. – Cambridge (Cambridge University Press).
- ENGELHARDT, W. v., ARNDT, J., MÜLLER, W. F. & STÖFFLER, D. (1971): Shock metamorphism and origin of regolith and breccias at the Apollo 11 and Apollo 12 landing sites. – *Proc. 2<sup>nd</sup> Lunar Sci. Conf.*, The MIT Press: 833–854.
- HORNEMANN, U. & MÜLLER, W. F. (1971): Shock-induced deformation twins in clinopyroxene. – *N. Jb. Mineral., Mh.* 1971: 247–256.
- JEANLOZ, R. (1980): Shock effects in olivine and implications for Hugoniot data. – *J. Geophys. Res.*, **85**: 3163–3176.
- MÜLLER, W. F. (1975): Transmissionselektronenmikroskopie von gesteinsbildenden Mineralien. – *Naturwissenschaften*, **62**: 223–230.
- (1978): Stoßwelleneffekte in Pyroxenen: Transmissionselektronenmikroskopische Beobachtungen. – *Fortschr. Mineral.*, **56**/ Beiheft 1: 95–96.
- JOHN, R. J. & KROLL, H. (1984): On the origin and growth of antiphase domains in anorthite. – *Bull. Minéral.*, **107**: 489–494.
- PHAKEV, P., DOLLINGER, G. & CHRISTIE, J. (1972): Transmission electron microscopy of experimentally deformed olivine single crystals. – *Geophys. Monogr.*, **16**: 117–138.
- TÖPEL-SCHADT, J. & MÜLLER, W. F. (1979): Transmission electron microscopy of the chondritic meteorites Chainpur (LL3), Mezö-Madaras (L3) and Tieschitz (H3). – *Meteoritics*, **14**: 548–550.
- & MÜLLER, W. F. (1981): Versetzungen in Troilit aus gewöhnlichen chondritischen Meteoriten. – *Fortschr. Mineral.*, **59**/ Beiheft 1: 195–196.
- WENK, H. R. (ed.) (1976): *Electron Microscopy in Mineralogy*. – Berlin, Heidelberg, New York (Springer-Verlag).

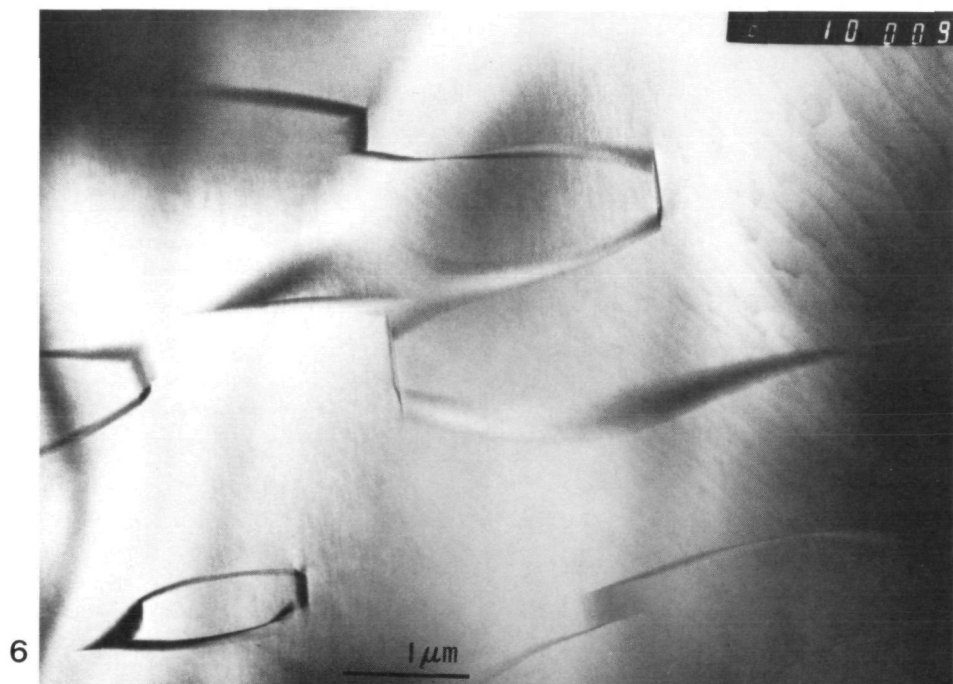
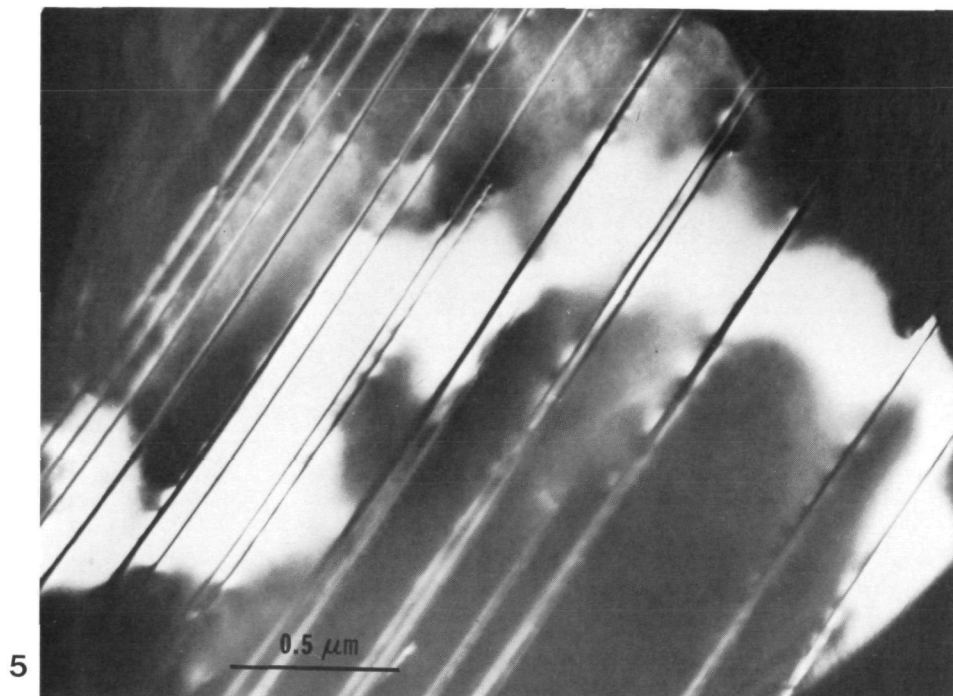




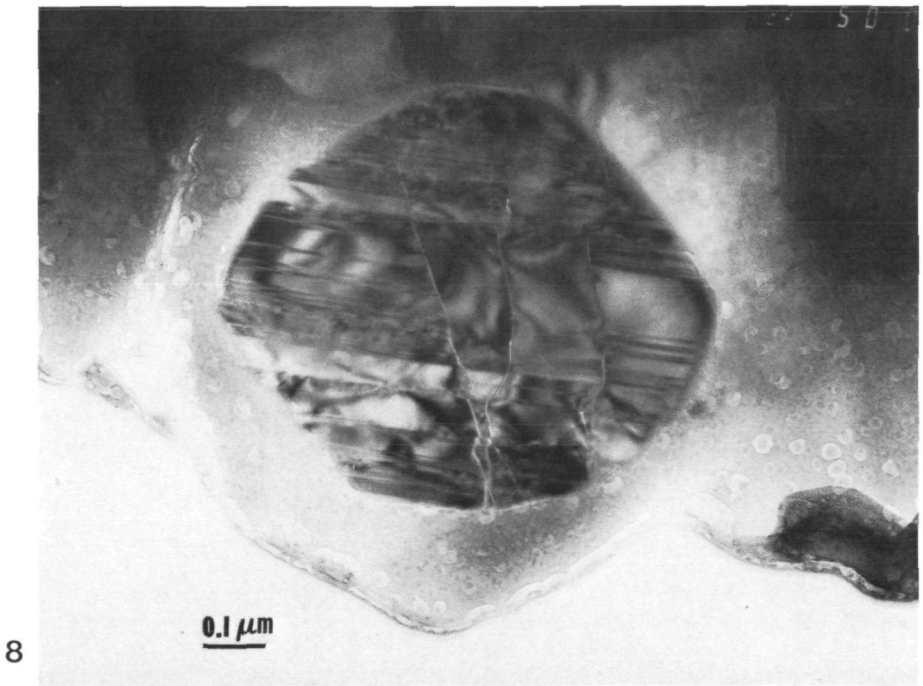
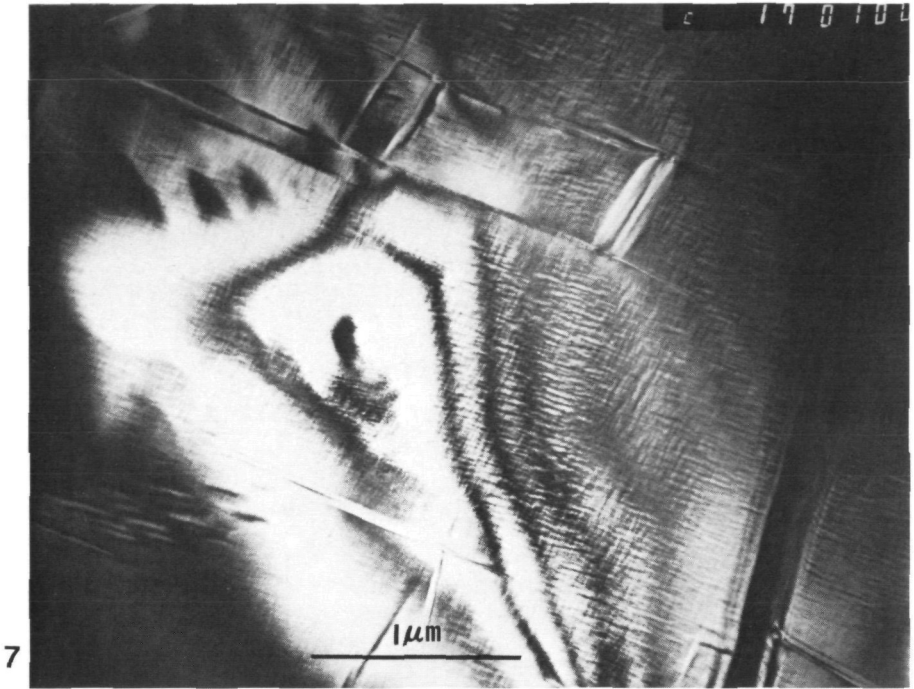




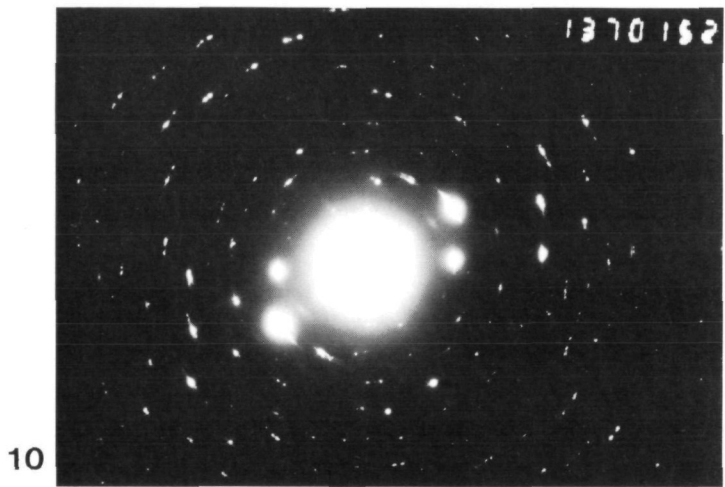














## Tafelerklärungen

## Tafel 1

Fig. 1. Stoßwelleninduzierte Versetzungen in Olivin. Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (wie alle folgenden Aufnahmen).

Fig. 2. Ca-reicher Klinopyroxen mit Entmischungslamellen nach (001) von Pigeonit (im Bild etwa WSW-ENE verlaufend) und feine Zwillingslamellen nach (100) (NNW-SSE). Dunkelfeldaufnahme.

## Tafel 2

Fig. 3. Derselbe Kristall wie in Fig. 2, jedoch anderer Bereich und andere Orientierung. Die Richtung [010] steht hier etwa senkrecht auf der Bildfläche, so daß sowohl Pigeonit-Entmischungslamellen (W-E) wie Zwillingslamellen (N-S) etwa senkrecht zur Probenoberfläche liegen. Dunkelfeldaufnahme mit einem Pigeonit-Reflex.

Fig. 4. Elektronenbeugungsaufnahme der Orientierung  $a^*-c^*$  mit Augit- und Pigeonit-Reflexen;  $c^*$  Augit verläuft parallel  $c^*$  Pigeonit.

## Tafel 3

Fig. 5. Ca-reicher Klinopyroxen mit stoßwellen-induzierten Zwillingslamellen parallel (100). Dunkelfeldaufnahme.

Fig. 6. Antiphasendomängengrenzen in Bytownit. Dunkelfeldaufnahme mit einem b-Reflex.

## Tafel 4

Fig. 7. Modulierte Strukturen in Bytownit. Dunkelfeldaufnahme mit einem a-Reflex.

Fig. 8. Einschluß eines Ca-armen Pyroxens in Bytownit. Hellfeldaufnahme.

## Tafel 5

Fig. 9. Mosaikgefüge von mechanisch beanspruchtem Bytownit. Hellfeldaufnahme.

Fig. 10. Elektronenbeugungsaufnahme zu Fig. 9. Die Fragmentierung in Kristallite läßt sich aus den Beugungsmaxima ersehen, die auf Kreisbögen gegen das jeweils stärkste Maximum um einige Grade gedreht sind.