

## Aufgaben und Probleme der Textforschung in den Geowissenschaften

H. Kern (Kiel)

### 1. Einleitung

Die geowissenschaftliche Texturforschung beschäftigt sich vorwiegend mit Gesteinen der oberen und unteren Erdkruste und des oberen Erdmantels. Das für die Texturuntersuchungen verwendete Gesteinsmaterial stammt meist aus Übertageaufschlüssen, in denen an manchen Stellen auch Gesteinspakete exponiert sind, die durch tektonische Prozesse aus großen Erdtiefen (20 km und mehr) an die Erdoberfläche verfrachtet wurden. Weiterhin stellen Bohrkerne aus Tiefbohrungen und Gesteinsbruchstücke aus vulkanischen Förderprodukten wichtiges Untersuchungsmaterial für die erdwissenschaftlich ausgerichtete Texturforschung dar.

Das im wesentlichen die obersten Abschnitte der Lithosphäre repräsentierende Probenmaterial ist drei genetisch unterschiedlichen Gesteinstypen zuzuordnen: magmatischen, sedimentären und metamorphen Gesteinen. Die verschiedenartige Entstehungsgeschichte dieser Gesteinstypen spiegelt sich u.a. auch in deren Gefügeeigenschaften wieder.

Magmatische Gesteine sind nur verhältnismäßig selten texturiert. Als Folge der Absaigerung mehr oder weniger plattig ausgebildeter Minerale in der Schmelze (crystal settling) kann sich in diesen Gesteinen eine Vorzugsregelung nach der Kornform entwickeln (shape anisotropy), die meist auch eine Gitterregelung (lattice anisotropy) impliziert. Ein Beispiel hierfür sind Cumulus-Texturen, wie sie manchmal in Ultrabasiten beobachtet werden.

Prinzipiell ähnlich ist die Texturbildung in sedimentären Gesteinen. Die in Tonen und Kalksteinen öfters beobachteten Vorzugsorientierungen sind die Folge der Einregelung plättchenförmig ausgebildeter Minerale (Tonminerale bzw. Calcit) durch Sedimentation im stehenden oder fließenden Wasser.

Die weitaus größte Rolle spielen Texturen in metamorphen Gesteinen. Bei tektonischer Beanspruchung haben Translations- und Zwillingsgleitung sowie dynamische Rekristallisationsvorgänge im Rahmen duktiler Deformation sehr häufig eine ausgeprägte Texturbildung bewirkt. Infolgedessen konzentriert sich die geowissenschaftliche Texturforschung überwiegend auf Texturuntersuchungen in Metamorphiten (Schiefer, Gneise, Mylonite) sowie auf Salzgesteine, bei denen es sich im weiteren Sinne auch um metamorphe Gesteine handelt.

### 2. Allgemeine Charakteristika texturierter metamorpher Gesteine

Obwohl bei natürlichen Deformationsprozessen prinzipiell gleichartige Verformungsmechanismen wirksam sind wie bei der Formgebung metallischer Werkstoffe, unterscheiden sich die Deformationsgefüge metamorpher Gesteine von denen metallischer Werkstoffe erheblich. Metamorphe Gesteine sind in der Regel polyphas aufgebaut. Ihre Korngröße variiert über ein breites Spektrum. Selten sind sie feinkörnig, meist liegen mittel- bis grobkörnige Gefüge vor. Die Symmetrie der gesteinsbildenden Minerale ist meist niedrig. Das gleiche gilt für die Symmetrie des Verformungsgefüges. Sie ist

überwiegend monoklin, seltener rhombisch und nur in Ausnahmen axial. Die Regelungsintensität ist im Vergleich mit der in metallischen Werkstoffen (z.B. Walzblechen) sehr gering.

### 3. Methoden der Texturbestimmung

Wegen des mineralogisch und strukturell sehr variablen Aufbaus metamorpher Gesteine gibt es in der geowissenschaftlichen Texturforschung noch keine Standard-Methode. Die bisher angewendeten und manchmal speziell für nur einen Gesteinstyp entwickelten Untersuchungsverfahren sind in Tabelle 1 aufgelistet und bezüglich Anwendbarkeit, Verfügbarkeit und der Möglichkeit der Automatisierung mit einander verglichen.

Allgemein können zwei Meßverfahren unterschieden werden: die Einzel-Meßwertbestimmung und die Integrale Meßwertbestimmung.

Ein genereller Nachteil der Korn-für-Korn-Messung ist der hohe Zeitaufwand und die sehr begrenzte Automatisierbarkeit der Methode.

Der in jedem Geo-Institut oft mehrmals vorhandene Universal-Drehtisch und seine nahezu universelle Einsetzbarkeit sind der Grund dafür, daß die optische Drehtischmethode das nach wie vor häufigst angewandte Verfahren in der geowissenschaftlichen Texturforschung darstellt. Nachteilig ist, daß mit dem U-Tisch an einem Mineral meist nur wenige Richtungen des Kristallgitters (z.B. opt. Achsen, Spaltflächen, Zwillings Ebenen) bestimmt werden können.

Die wesentlichsten Vorteile der Methoden mit integraler Meßwertfassung sind die Automatisierbarkeit und die Möglichkeit, die Orientierung sehr zahlreicher Gitterrichtungen der Kristallite zu bestimmen. Während mit der röntgenographischen Texturanalyse (zumindest bisher) nur monophase und feinkörnige Gesteine untersucht wurden, ermöglicht die neutronographische Texturanalyse wegen der Erfassung größerer Volumenanteile (geringe Absorption thermischer Neutronen) auch die Texturbestimmung an grobkörnigen und mehrphasig aufgebauten Gesteinen. Darüberhinaus liefert sie im Gegensatz zur röntgenographischen Texturbestimmung jeweils in einem Scan eine vollständige Polfigur. Nachteilig ist der große apparative Aufwand und die dadurch begrenzte Verfügbarkeit der Methoden. Bei der neutronographischen Texturanalyse kommt die derzeit noch unverhältnismäßig lange Meßzeit als weiterer Nachteil hinzu.

### 4. Ziele und Wege der Texturforschung in den Erdwissenschaften

Die geowissenschaftliche Texturforschung verfolgt im wesentlichen zwei Hauptziele:

- 1) Die Entschlüsselung der Verformungsgeschichte eines Gesteins durch Bestimmung der Verformungssymmetrie, strain-Rate und der wirksamen Verformungsmechanismen.
- 2) Die Bestimmung der Textur-spezifischen Gesteinseigenschaften (z.B. mechanische und elastische Anisotropie)

Die unter Punkt 1 angeführten Forschungsziele sind im wesentlichen geologisch-tektonisch ausgerichtet; unter Punkt 2 sind Aufgaben angesprochen, die mehr geophysikalische Fragestellungen betreffen.

Tab. 1 Methoden der Texturbestimmung in den Geowissenschaften

Methode	Anwendungsbereich	Vorteile	Nachteile
<p>I. Einzel-Meßwertbestimmung</p> <p>1. Optischer Universal-Drehtisch</p> <p>2. Röntgen-U-Tisch</p> <p>3. Elektronenbeugung</p>	<p>nahezu Gesteins-unabhängig (&gt; 500 <math>\mu</math>)</p> <p>Gesteins-unabhängig</p> <p>Gesteins-unabhängig</p>	<p>universell verfügbar; vollst. Polfiguren; zusätzliche Information über Mikrogefüge</p> <p>mehrere Gitterrichtungen meßbar; vollst. Polfiguren</p> <p>mehrere Gitterrichtungen meßbar; vollst. Polfiguren</p>	<p>meist nur eine Gitterrichtung (opt. Achse, Flächenpol) meßbar; relat. zeitaufwendig; begrenzt automatisierbar</p> <p>sehr begrenzt verfügbar; sehr zeitaufwendig; begrenzt automatisierbar</p> <p>begrenzt verfügbar; sehr zeitaufwendig; begrenzt automatisierbar</p>
<p>II. Integrale Meßwertbestimmung</p> <p>4. Photometrische Methode</p> <p>5. Röntgen-Texturanalyse</p> <p>6. Neutronographische Texturanalyse</p>	<p>feinkörnige Quarzite</p> <p>feinkörnige (&lt; 300 <math>\mu</math>) mono- u. biphas Gesteine</p> <p>nahezu Gesteins-unabhängig</p>	<p>kurze Meßzeit; vollst. Polfiguren; automatisierbar</p> <p>relat. kurze Meßzeit; mehrere Gitterrichtungen meßbar; automatisierbar</p> <p>mehrere Gitterrichtungen meßbar; vollständige Polfiguren; automatisierbar; universelle Anwendbarkeit</p>	<p>nur eine Gitterrichtung (opt. Achse) meßbar; sehr begrenzte Anwendbarkeit</p> <p>unvollständige Polfiguren; relativ begrenzt verfügbar; eingeschränkte Anwendbarkeit</p> <p>sehr begrenzt verfügbar; lange Meßzeit</p>

#### 4.1 Geologisch-tektonisch ausgerichtete Texturuntersuchungen

Um die Deformationsgeschichte eines Gesteins zu entschlüsseln, werden in der modernen Texturforschung mehrere Wege gleichzeitig beschritten. Neben der Texuranalyse an natürlich verformten Gesteinen werden Texturbestimmungen an experimentell verformten, natürlichen und synthetischen Gesteinen durchgeführt (Experimentelle Gefügekunde). Dabei wird eine möglichst quantitative, d.h. vollständige Beschreibung der Textur (Orientierungs-Verteilungsanalyse, ODF) angestrebt.

In Verbindung mit theoretisch simulierten Verformungsgefügen (Theoretische Gefügekunde) wird versucht, die bei der Deformation wirksamen Verformungsmechanismen abzuleiten. Die Summe aller Beobachtungen liefert schließlich die Basis für die kinematische und dynamische Interpretation natürlicher Verformungsgefüge.

Naturgemäß konzentrierte sich die geowissenschaftliche Texturforschung bisher auf einfach zusammengesetzte, meist monophase Gesteine. Am intensivsten wurden die Texturen in Quarziten, Marmoren und Kalksteinen untersucht. Entsprechend ist der Kenntnisstand über die Entstehung von Texturen in Quarz- und Calcitgefügen auch am weitesten fortgeschritten.

Auf der Basis experimentell ermittelter Gleitmechanismen wurden von Lister und Hobbs (1980) mit Hilfe der Taylor-Theorie theoretische c-Achsendiagramme für Quarzgefüge mit verschiedener Verformungssymmetrie (axial, rhombisch) erstellt (Abb. 1).

MODEL QUARTZITE C  
[ basal  $\langle a \rangle$ . prism  $\langle a \rangle$ . steep dipyramid  $\langle c+a \rangle$  ]  
axial extension    plane strain    axial shortening

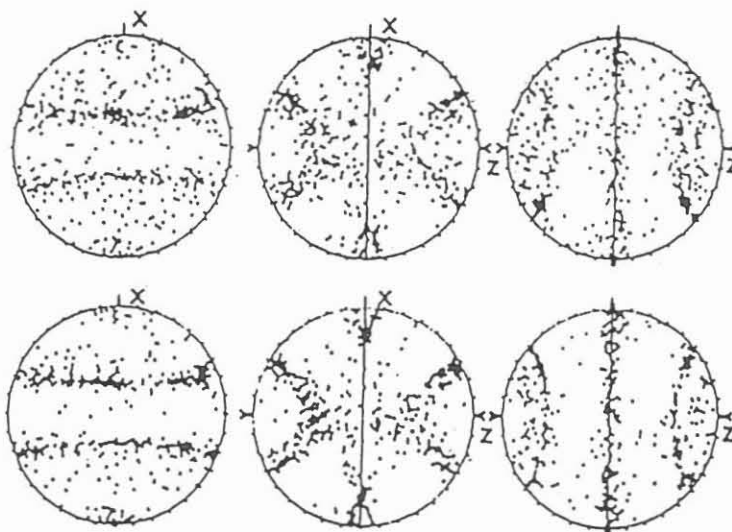


Abb. 1. Theoretisch berechnete Quarz-c-Achsendiagramme für einen Modell-Quarzit bei unterschiedlicher Verformungssymmetrie (Im wesentlichen nach Lister und Hobbs, 1980).

Mit Hilfe der theoretischen Diagramme können z.B. die c-Achsen-Diagramme des Quarzteilgefüges aus Granuliten des sächsischen Granulitgebirges (Abb.2) kinematisch und dynamisch interpretiert werden. Der Vergleich läßt den Schluß zu, daß sich bei der Entstehung der sächsischen Granulite die Beanspruchungs- bzw. Verformungssymmetrie mit zunehmender Tiefe von axialer Dehnung über ebene Verformung (plane strain) zu axialer Kompression entwickelte und Basis- und Prismengleitung bei der Quarzverformung eine wesentliche Rolle gespielt haben.

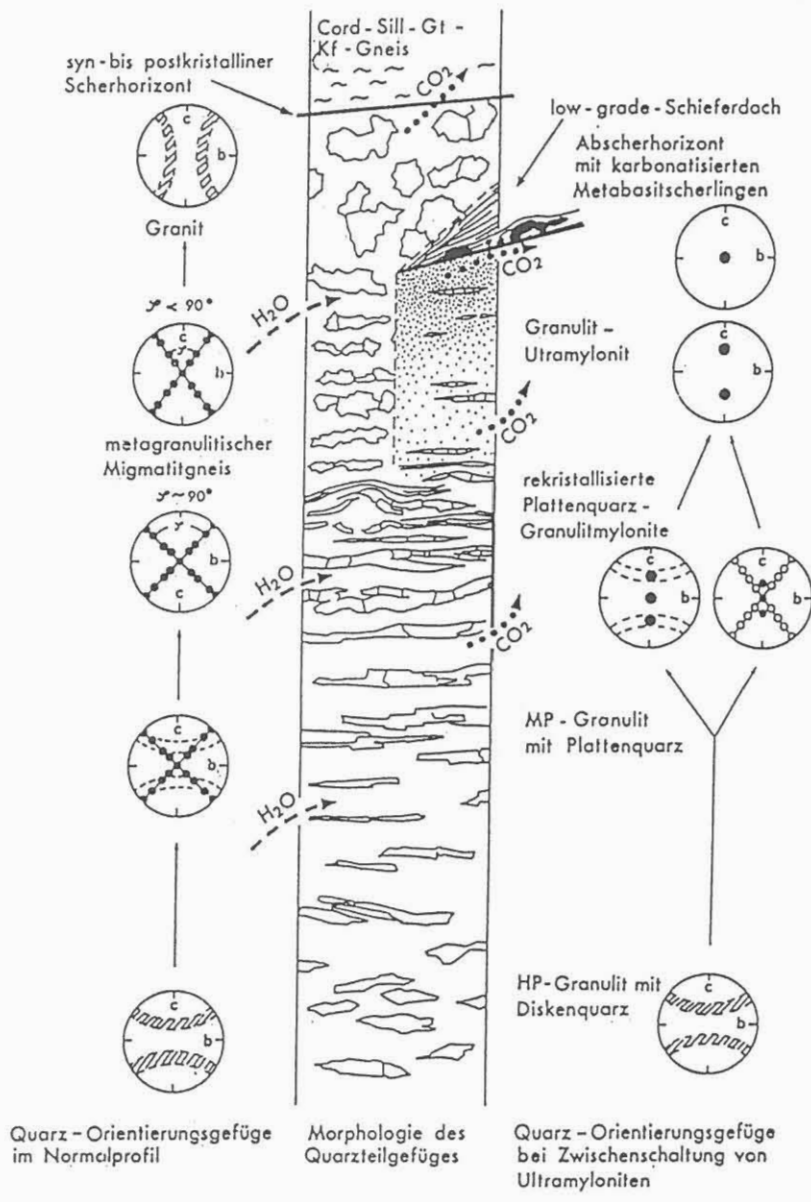
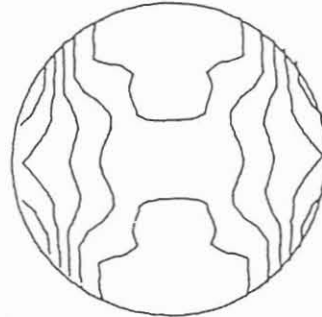
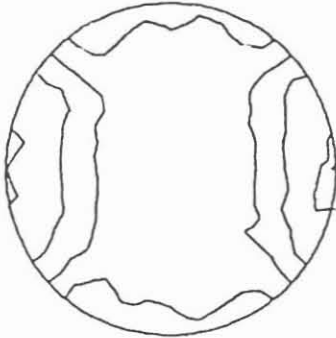


Abb. 2. Entwicklungsmuster der c-Achsenregelung und der Morphologie des Quarzteilgefüges für die mitteleuropäischen Granulitkörper, dargestellt am Beispiel des Sächsischen Granulitgebirges (Behr, 1978).

Die Taylor-Theorie wurde auch mit Erfolg zur Interpretation von experimentell erzeugten Calcitregelungen (Wenk et al., 1986; Wagner et al., 1982) in Kalksteingefügen mit axialer, rhombischer und monokliner Verformungssymmetrie angewendet. Nach Takeshita et al. (1987) dominiert im Niedertemperaturbereich ( $< 400^{\circ}\text{C}$ ) mechanische e-Verzwilligung mit untergeordneter r- und f-Gleitung, während bei höheren Temperaturen (bis  $600^{\circ}\text{C}$ ) die Verformung von r- und f-Gleitung getragen wird und mechanische Zwillingsbildung mehr und mehr in den Hintergrund tritt (Abb. 3).

### c - Achsen

K370  
 $200^{\circ}\text{C}$



K336  
 $400^{\circ}\text{C}$

a



b

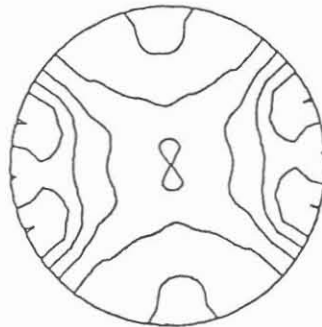


Abb. 3. Vergleich von experimentell erzeugter mit theoretisch berechneter c-Achsenregelung von Calcit in Kalkstein (plane strain)

- a) Experimentell erzeugte c-Achsenregelung
- b) Theoretisch auf der Basis des Taylor-Bishop-Hill Kriteriums berechnete Regelung der Calcit c-Achsen (nach Takeshita et al., 1987).

#### 4.2 Geophysikalisch orientierte Texturuntersuchungen

Die physikalischen Gesteinseigenschaften unter Bedingungen größerer Erdtiefe werden durch physikalische (Druck, Temperatur) und lithologische Einflußgrößen (Chemismus, Mineralbestand, Gefüge, Porenfüllung) bestimmt, die in sehr komplexer Weise zusammenwirken. Um seismische Tiefenprofile (Geschwindigkeitsprofile) petrologisch besser interpretieren zu können, gewinnt die Kenntnis der richtungsabhängigen Gesteinseigenschaften zunehmend an Bedeutung.

Umfangreiche Laboruntersuchungen (Kern, 1982) haben zeigen können, daß vor allem metamorphe Gesteine ausgeprägte Geschwindigkeitsanisotropien aufweisen. Die Richtungsabhängigkeit der Ausbreitung elastischer Wellen wird im wesentlichen durch zwei Gefügemerkmale bestimmt: durch Einregelung der Gesteinsminerale nach dem Kristallgitter (Textur) und durch Mikrorisse, hauptsächlich entlang Korngrenzen. Da oberhalb 200 MPa Mikrorisse geschlossen werden (Kern, 1978), müssen elastische Anisotropien in Gesteinsformationen der Erdkruste und des oberen Mantels in erster Linie auf Vorzugsorientierungen der Hauptminerale zurückgeführt werden.

Abb. 4 zeigt die enge Beziehung zwischen Gefügeanisotropie (Textur) und Geschwindigkeitsanisotropie in einem Amphibolit, einem Gestein, welches am Aufbau der tieferen Erdkruste wesentlich beteiligt ist.

Im Rahmen nationaler und internationaler seismischer Großforschungsprogramme (COCORP, DECORP, EGT etc.) wurden in den letzten Jahren weltweit in mittleren Krustentiefen der Kontinentalbereiche flach-einfallende Reflektoren nachgewiesen, die von Seismologen als Scherzonen interpretiert werden. Die geowissenschaftliche Texturforschung wird in Verbindung mit petrophysikalischen Untersuchungen einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung der Frage leisten können, ob tektonisierte Horizonte (Mylonite, Phyllonite) infolge strain-induzierter Texturbildung als seismische Reflektoren in Frage kommen. Erste Untersuchungen (Jones and Nur, 1982, 1984; Wang et al., 1987; Kern und Wenk, 1988) haben bereits zeigen können, daß stark texturierte Mylonite durchaus den erforderlichen Impedanzkontrast liefern können.

#### 5. Aufgaben geowissenschaftlicher Texturforschung in der BRD

Die bundesdeutsche, geowissenschaftlich ausgerichtete Texturforschung wird sich in ihren Aufgaben und Zielsetzungen in Zukunft mehr und mehr an laufenden oder geplanten Großforschungsprojekten orientieren müssen. Derzeit sind dies in erster Linie die von der DFG geförderten Schwerpunktprogramme "Kontinentale Tiefbohrung der BRD (KTB)" und "Stoffbestand, Struktur und Entwicklung der kontinentalen Unterkruste".

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, handelt es sich bei dem im Rahmen dieser Großprojekte textuell zu untersuchenden Gesteinsmaterial überwiegend um Metamorphite der Grünschiefer-, Amphibolit- und Granulitfazies mit z. T. sehr komplexer Mineralzusammensetzung.

Geht man davon aus, daß bei der Durchführung dieser Forschungsprogramme ein sehr umfangreiches Probenmaterial anfällt, welches dann zu einem großen Teil auch gefügekundlich bearbeitet werden muß,

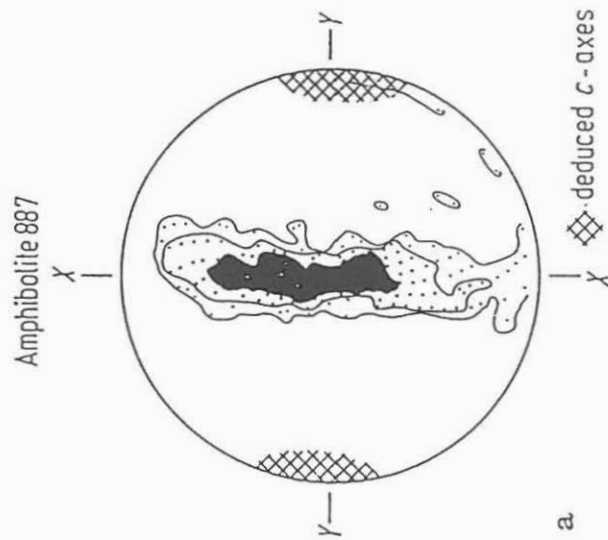
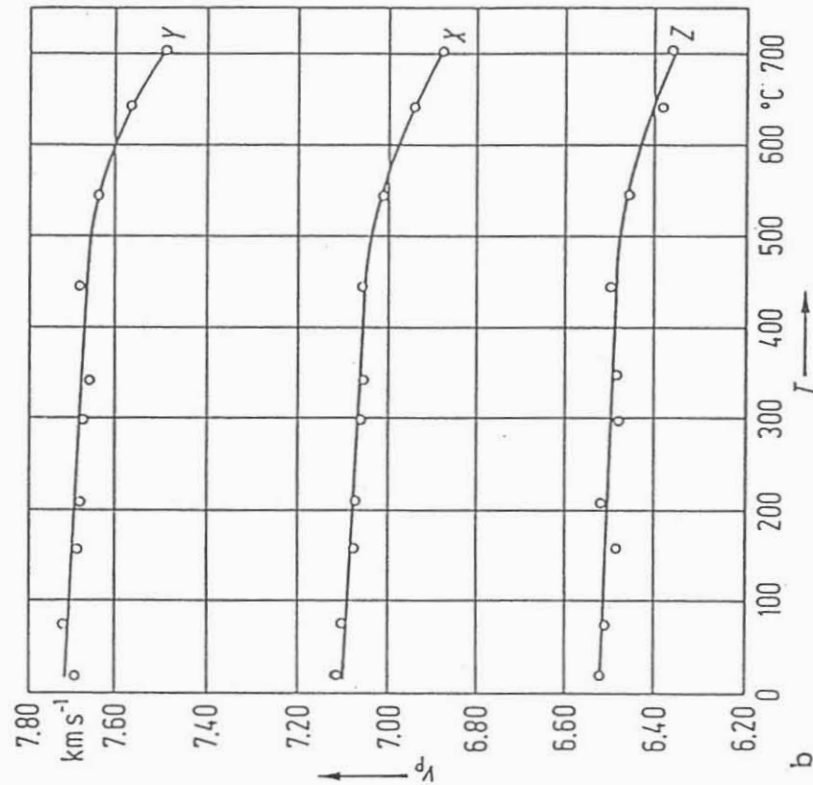


Abb. 4. Beziehungen zwischen Gefügeanisotropie und Anisotropie der elastischen Wellengeschwindigkeiten in einem Amphibolit (Kern, 1982).

- a) Poldiagramm der (110)-Flächen (Röntgentexturaufnahme) und abgeleitete Orientierung der c-Achsen. Konturen: 2.0 - 1.6 - 1.2 - 1.0 m.r.d.
- b) Kompressionswellengeschwindigkeiten ( $V_P$ ) bei 600 MPa und Raumtemperatur in drei orthogonalen Richtungen (X, Y, Z). Die Richtung maximaler Wellengeschwindigkeit (Y) korrespondiert mit der Einregelung der Hornblende-c-Achsen (Im Einkristall ist  $V_{Pmax}$  parallel [001]).



	Vorherrschende Gesteine	Hauptmineralbestand
1. SP "Kontinentale Tiefbohrung der BRD" (KTB)		
Grünschiefer- und Amphibolit-fazielle Gesteine der Oberkruste	Chloritschiefer Granit- und Granodiorit-Gneise	chl, plg, qz plg, kfsp, bio, ms, qz
	Amphibolite Marmore Quarzite Mylonite	hbl, plg, pyr cc qz phyllosil., plg, qz
2. SP "Stoffbestand, Struktur und Entwicklung der kontinentalen Unterkruste"		
Granulit-fazielle Gesteine der Unterkruste	Metapelite Metabasite Marmore Quarzite Ultrabasite	gt, sill, plg, kfsp, bio, qz opx, cpx, gt, plg cc qz ol, opx, cpx

dann stellt sich für die geowissenschaftliche Texturforschung vor allem die Aufgabe, leistungsfähige Methoden zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln, die auch Texturbestimmungen an mittel- bis grobkörnig ausgebildeten und (meist) mehrphasig aufgebauten Gesteinen ermöglichen. Dabei werden vollständige Polfiguren einiger wichtigen Kristallgitter-Richtungen in der Regel zur Texturbeschreibung ausreichen. Bei besonderen Fragestellungen wird aber auch die Erstellung von ODF-Diagrammen erforderlich sein.

Es steht außer Frage, daß hierfür vor allem Methoden der integralen Meßwerterfassung, d.h. röntgenographische und neutronographische Verfahren infrage kommen. Es wird notwendig sein, die Möglichkeiten beider Verfahren gleichermaßen zu nutzen.

Derzeit werden sie den o.a. Erfordernissen noch nicht gerecht. Sie werden so zu modifizieren bzw. zu verbessern sein, daß sie bei vertretbarer Meßzeit zur routinemäßigen Bestimmung vollständiger Polfiguren wichtiger kristallographischer Richtungen der Hauptgesteinsminerale in Krusten- und Mantelgesteinen eingesetzt werden können.

Die Texturbestimmung an grobkörnigen und mehrphasig aufgebauten Gesteinen ist prinzipiell auch mit dem Röntgen-Texturgoniometer möglich. Durch Messung an mehreren Schnitten derselben Probe (Vergrößerung des Probenvolumens) kann die Zählstatistik entscheidend verbessert werden. Die jeweils erhaltenen Sektions-Diffraktogramme müssen anschließend mit Hilfe geeigneter Auswerteverfahren zu Summendiffraktogrammen vereinigt werden. Zur Erstellung vollständiger Polfiguren ist allerdings eine (nicht ganz einfache) Kopplung von Reflexions- und Transmissionsmessung erforderlich oder es müssen Messungen an (zweckmäßigerweise) senkrecht zueinander orientierten Proben durchgeführt werden.

Bei der Neutronographischen Texturanalyse gilt es vor allem, durch Verkürzung der Meßzeit den Probendurchsatz zu erhöhen. Dies ist durch eine optimale Ausstattung vorhandener Meßplätze (Geesthacht, Jülich, Berlin) und durch Installation ortsauflösender Detektoren zur simultanen Messung mehrere Reflexe zu erreichen.

Schließlich gilt für beide Methoden, daß wegen der sehr komplexen Beugungsspektren der meisten Gesteine an den entsprechenden Instituten Profil-Analyseverfahren installiert werden müssen, die eine Trennung der Intensitätsbeiträge überlappender Reflexe ermöglichen.

Der 1985 gegründete Fachausschuss "TEXTUREN", der Wissenschaftler aus den Bereichen Festkörperphysik, Werkstoffwissenschaften und Geowissenschaften zusammenführt, ist aufgerufen, bei der Lösung dieser Probleme mitzuhelfen.

#### Literatur

- Behr, H.-J. (1978). Subfluenzprozesse im Grundgebirgsstockwerk-Mitteleuropas.- Z. dt. geol. Ges. 129, 291-326
- Jones, T. and Nur, A. (1982). Seismic velocity and anisotropy in mylonites and the reflectivity of deep crustal fault. Geology, 10, 260-263

- Kern, H. (1978). The effect of high temperature and high confining pressure on compressional wave velocities in quartzbearing and quartz-free igneous and metamorphic rocks. *Tectonophysics* 44, 185-203
- Kern, H. (1982). P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and temperatures and the effect of the rock microstructure. In "High-Pressure Researches in Geoscience" (W. Schreyer, ed.), pp. 15-45. Stuttgart, Schweizerbart.
- Kern, H. and Wenk, H.-R. (1988). The effect of texture on elastic properties in ductile mylonites from the Santa Rosa Mylonite Zone, California (in preparation).
- Lister, G.S. and Hobbs, B.E. (1980). The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: The influence of deformation history. *J. Struct. Geol.*, 2, 355-370
- Takeshita, T., Tomé C., Wenk, H.-R. and Kocks, U.F. (1987). Single-crystal yield surface for trigonal lattices: Application to texture transitions in calcite polycrystals. *J. Geophys. Res.*, 92, 12917-12930
- Wagner, F., Wenk, H.-R., Kern, H., van Houtte, P. and Esling, C. (1982). Development of preferred orientation in plane strain deformed limestone. Experiment and theory, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 132-139
- Wang, C.Y., Ruppert, C., Guo, T., Davis, G.A., Okaya, D. and Wenk, H.-R. (1987). Seismic reflectivity of the Whipple Mountain shear zone in southern California (submitted).
- Wenk, H.-R., Kern, H., van Houtte, P. and Wagner, F. (1986). Heterogeneous strain in axial deformation of limestone, textural evidence. In: *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies* (B.E. Hobbs and H.C. Heard, Eds.) *Geophys. Monograph* 36, 287-295