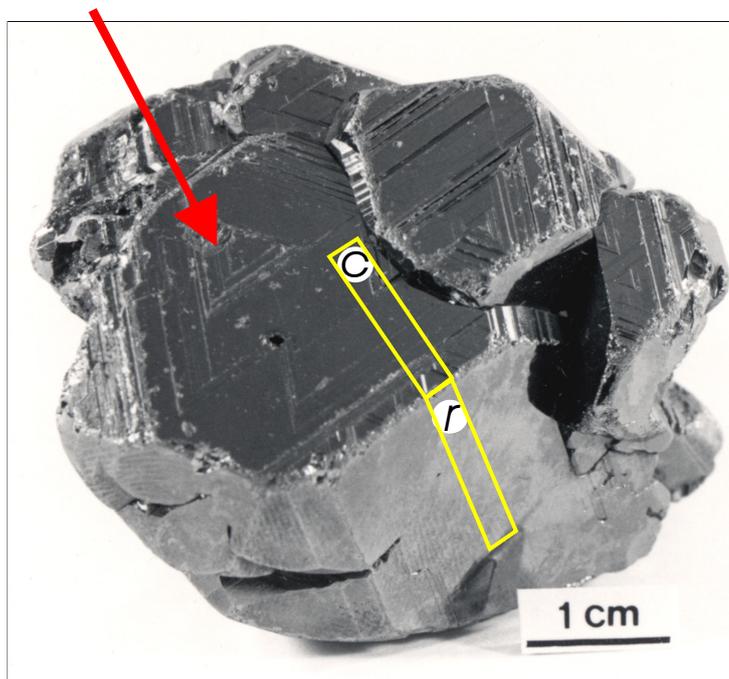


**Gefügekunde natürlich und experimentell verformter Erze am
Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen University
- 1933 bis 2015 -.**

Eine Kurzdokumentation

Zusammengestellt von Heinrich Siemes
ehem. Lehr- und Forschungsgebiet Mineralogie und Gefügekunde.
November 2015.

Aggregat von Hämatitkristallen
(0001)-Fläche mit Spuren von drei {r}-Flächen



Orientierung einer Scheibe (gelb), die zur Herstellung von Proben
für Stauchversuche (Siemes et al. 2008) präpariert wurde.

Inhalt:

Begründung der modernen Erzgefügekunde mit optischen Methoden.	3
Messung der kristallographischen Vorzugsorientierungen von Erzen mit röntgenographischen Methoden.	3
Messung der kristallographischen Vorzugsorientierungen von Erzen durch Neutronen- und Elektronenbeugung.	6
Experimentelle Verformung von Erzen bei hohen allseitigen Drucken und Temperaturen am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre.	8
Experimentelle Verformung von Erzen bei hohen allseitigen Drucken und Temperaturen am Geoforschungszentrum in Potsdam.	9
Schlußbemerkung.	13
Beteiligte Personen und Institutionen.	14
Verzeichnis der Veröffentlichungen:	15
Galena, Bleiglanz,	15
Sphalerit, Zinkblende	15
Chalcopyrit, Kupferkies	15
Pyrrhotin, Magnetkies	16
Magnetit	16
Hämatit	16
Pyrit	17
Übersichtsaufsätze	17
Methodische Arbeiten	18
Nichterze	18
Studien- und Diplomarbeiten	19
weitere relevante Literaturstellen	20

Begründung der modernen Erzgefügekunde mit optischen Methoden.

Professor Dr. rer. nat. Doris Schachner (geb. Korn), Direktorin des Institutes für Mineralogie und Lagerstättenlehre von 1949 bis zu ihrer Emeritierung 1972, hatte sich in Aachen 1933 als Assistentin von Paul Ramdohr (1926-1934 Institutsdirektor in Aachen) mit dem Thema „Zur Gefügekunde der Erze“ habilitiert. Sie ist die Begründerin der modernen Erzgefügekunde. Bruno Sander ist ihr Vorbild und Lehrer.

Sander, B. (1930). Gefügekunde der Gesteine. Springer Wien, 352 S.

Korn, D. (1933). Ein deformiertes Flußspat-Quarz-Kupferkiesgefüge aus einer mittelschwedischen Sulfidlagerstätte. N. Jb .Mineral., Geol. Paläont., Abh. Abt. A, Beil. Bd. 66 (1933) 433-459.

Korn, D. (1933). Zur Lagebestimmung opaker Erze und Metalle im Mikroskop. N. Jb .Mineral., Geol. Paläont., Abh. Abt. A, Beil. Bd. 67 (1933) 428-461.

Korn, D. (1934). Die Lagebestimmung opaker Mineralien im Mikroskop. In: H. Schneiderhöhn , P. Ramdohr, Lehrbuch der Erzmikroskopie, Bd. I/1, (1934) 265-302, Borntraeger, Berlin.

Schachner-Korn, D. (1948). Ein metamorphes Erzgefüge. Heidelb. Beitr. Miner. Petrogr. 1 (1948) 407-426.

Schachner-Korn, D. (1954). Ein Wachstums- und ein Rekristallisationsgefüge von Bleiglanz aus einer rheinischen Lagerstätte. Tschermaks min. petro. Mitt., III. Folge, 4 (1954) 111-116 (Sander-Festband).

Friedrich, G. (2004). Zum hundertsten Geburtstag von Doris Schachner - Erinnerungen an eine bemerkenswerte Professorin und ihr Wirken an der RWTH Aachen. Erzmetall 57 (2004) 176-178.



In der Publikation von 1954 (siehe S. 112) hat Doris Schachner einen Vorläufer des Universaldrehtisches für Auflichtmikroskopie UTR-2 (auf ihren Vorschlag gefertigt von der Fa. Leitz) benutzt, um die Orientierung von Bleiglanz durch Einmessung der $\{001\}$ -Spaltbarkeit zu bestimmen.

Christa Hennig-Michaeli hat in ihrer Dissertation (1976) mit mikroskopischen Methoden die c-Achsenverteilungen an experimentall und natürlich verformten Hämatiterzen untersucht (Dissertation, 1976) und eine dynamische Interpretation der Deformationszwillinge unternommen (GFF, 1977).

Messung der kristallographischen Vorzugsorientierungen von Erzen mit röntgenographischen Methoden.

Einen neuen Weg, Vorzugsorientierungen in einem opaken Erzgefüge zu messen, brachte die Entwicklung von Röntgen-Texturmesseinrichtungen zunächst für Metalle (Rückstrahl-Methode nach Schulz, 1949). Die Firma Siemens in Karlsruhe hat 1956 ihre Entwicklung eines Texturgoniometers vorgestellt (Neff 1956, 1957). Neff und Paulitsch haben 1959 und 1960 erste Messungen an Erzen veröffentlicht. Das Siemens-Texturgoniometer hat v. Gehlen (1960) für seine

Habilitationsschrift, die sich u.a. ausführlich mit den optimalen Messeinstellungen befasst, verwendet. [Unter ‚Textur‘ ist in diesem Zusammenhang ‚kristallographische Vorzugsorientierung‘ = ‚crystallographic preferred orientation (CPO)‘ zu verstehen.]

Schulz, L.G. (1949). A direct method of determining preferred orientation of a flat reflection sample, using a Geiger-counter X-ray spectrometer. *J. Appl. Phys.* 20 (1949) 1030-1033.

Neff, H. (1956). Ein neues Zählrohrgoniometer für Texturbestimmungen an Blechen. *Z. Metallkunde* 47 (1956) 646-649.

Neff, H. (1957). Texturbestimmungen mit einem Zählrohrgoniometer. *Siemens-Zeitschrift* 31, (1957) 23-30.

Neff, H., Paulitsch, P. (1959). Bestimmung natürlicher Korngefüge mit dem Zählrohrgoniometer. *Naturwiss.* 46, 490.

Neff, H., Paulitsch, P. (1960). Röntgenographische Bestimmung der Hämatitregel in natürlichen Gefügen. *N. Jb. Miner. Abh.* 94 (1960), 1401-1410 (Festband Ramdohr).

v.Gehlen, K. (1960). Die röntgenographische und optische Gefügeanalyse von Erzen, insbesondere mit dem Zählrohr-Texturgoniometer. *Beitr. Miner. Petro.* 7 (1960), 340-388.

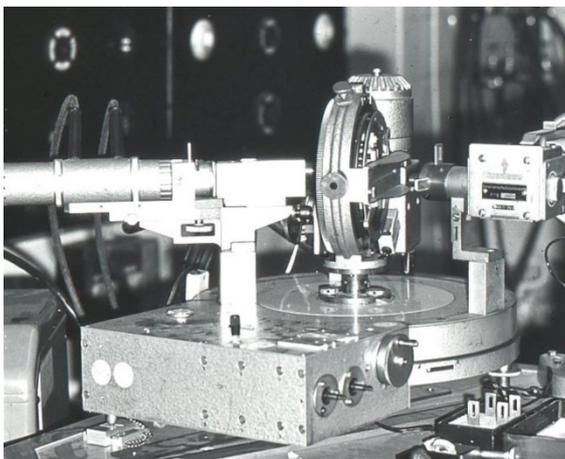
Paulitsch, P., Schicht, R., Mons, W. (1967). Zur Gefügeregelung von Hämatit. *Naturwiss.* 54, 88.

Paulitsch, P. (1963), Davis B.L. (1963), Wenk, H.-R. (1963), Starkey, J. (1964), and Riechert, L. (1966) haben weitere Methoden der röntgenographischen Texturbestimmung beschrieben. Diese waren vornehmlich für Gesteine geeignet, haben sich jedoch nicht durchgesetzt.

Auf Grund eines Antrags (1958) bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurde 1959 ein Siemens-Texturgoniometer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft Frau Prof. Schachner als Leihgabe (Scha 26/6) bewilligt. Dieses wurde 1960 ausgeliefert. Die ersten Arbeiten unter Verwendung dieses Texturgoniometers erschienen 1961 und 1963.

Siemes, H. (1961). Betrachtungen zur Verformung und zum Rekristallisationsverhalten von Bleigliedern. Diss. RWTH Aachen, 1961.

Schachner, D., Siemes, H. (1963). Röntgenographische Untersuchung der Gefügeprägung von Gesteinen der Bohrung Münsterland 1. *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.* 11 (1963) 447-458.

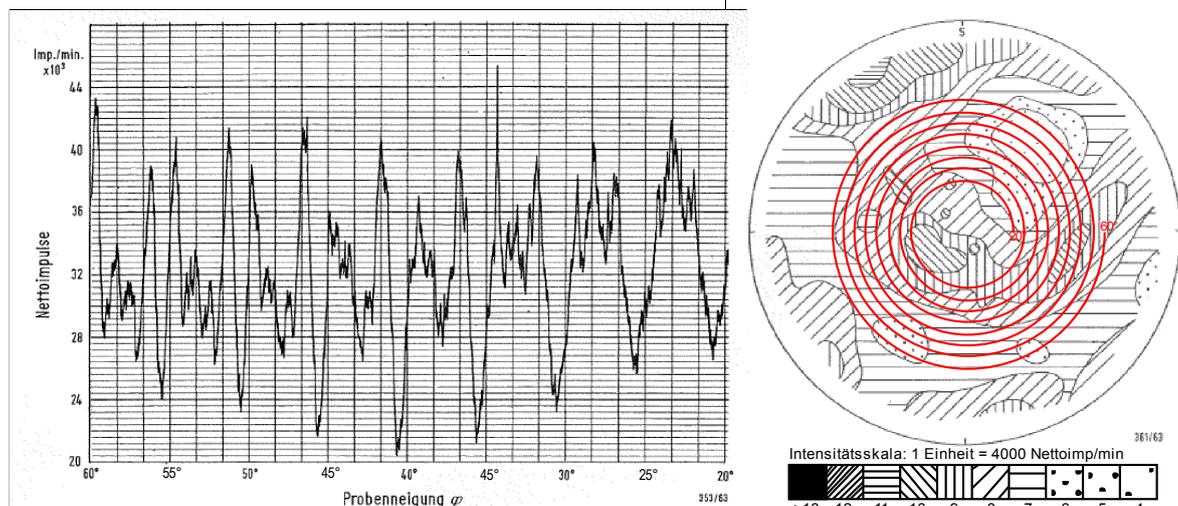


Links: Siemens Röntgentexturgoniometer der 1. Generation mit mechanischen Klinkenverstellungen von Pol- und Azimutwinkel montiert auf einem Beugungsgoniometer zur Durchführung von $\delta/2\delta$ -scans.

Rechts: Siemens Röntgentexturgoniometer der 2. Generation mit Verstellung von Pol- und Azimutwinkel durch Schrittmotoren.

Für die Arbeiten, die bis etwa 1980 veröffentlicht wurden, wurde das Texturgoniometer in der Abbildung links verwendet. Die gemessenen Intensitäten eines Reflexes wurden in der

Anfangsphase entlang einer Spirale in einem Schreiberdiagramm ausgegeben und manuell in die Lagenkugelprojektion übertragen. In dieser wurden dann Isolinien auch manuell interpoliert (Schachner & Siemes, 1963).



Messdaten: Cu-Anode, quadrat. Brennfleck, 20 kV, 8 mA, Aperturblende: 0,8*0,9 mm², Zählrohrblende: 10*10mm², Ni-Filter, Szintillationszähler.



Später wurden die Intensitäten auf einem Drucker ausgegeben und manuell auf Lochkarten übertragen. Es folgte eine Zeit der Ausgabe der Intensitäten direkt auf Lochstreifen bis Anfang der 80er Jahre eine digitale Ausgabe mit einem Apple-II-PC eingerichtet werden konnte. Die Polfiguren wurden durch Fortran-Programme zunächst auf Schnelldruckern und später mit verschiedenen Plottern gesteuert von den Rechnern CD 6400, Cyber175 und IBM7090 des Rechenzentrums der RWTH erstellt. Beispiele sind auf Seite 7 wiedergegeben.

1971 wurde das Lehr- und Forschungsgebiet Mineralogie und Gefügekunde, Prof. Dr.-Ing. Heinrich Siemes, eingerichtet. Mit der Emeritierung von Prof. Dr. rer. nat. Doris Schachner 1972 wurden ihre DFG-Leihgaben dem Lehr- und Forschungsgebiet übertragen. Über ihre Emeritierung hinaus hat Prof. Schachner Erzgefüge-Arbeiten gefördert.

1981 stellte die Deutsche Forschungsgemeinschaft eine automatisierte Textur-Röntgen-Messeinrichtung nach Lücke mit einem Polfigurenschreiber (Si 209/1) und digitaler Ausgabe der Daten als Leihgabe bereit (Seite 4, Abb. rechts). Diese Anlage wurde in den Veröffentlichungen bis 1994 verwendet.

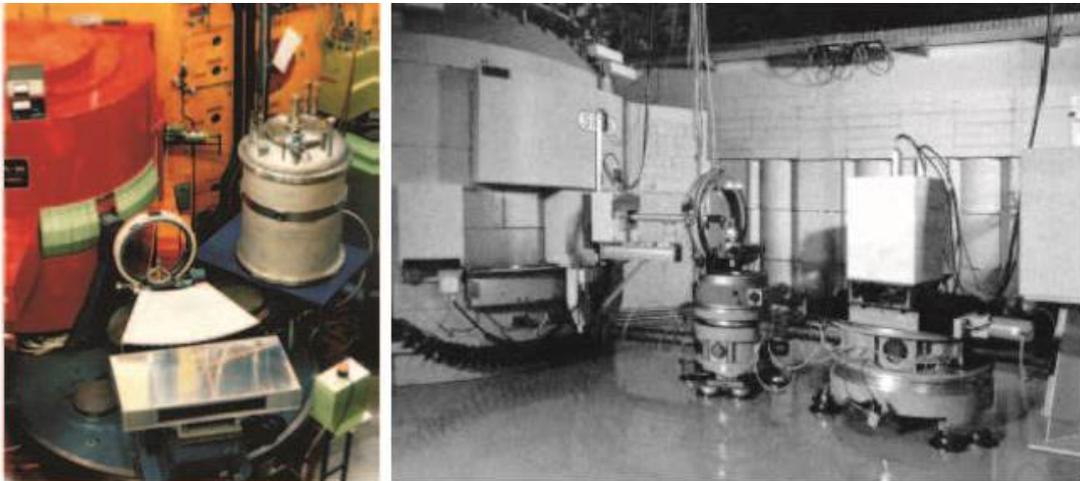
In den Jahren 1985 bis 1990 wurden von Christa Hennig-Michaeli in Kooperation mit J.J. Couderc (Laboratoire de Physique des Solides, associé au C.N.R.S., et Institut National des Sciences Appliquées, Université Paul Sabatier, Toulouse) Versetzungsstrukturen von Sphalerit und Chalcopyrit im Transmissionselektronenmikroskop analysiert.

Messung der kristallographischen Vorzugsorientierungen von Erzen durch Neutronenbeugung und Elektronenbeugung.

Die erste Messung der Vorzugsorientierungen von Erzgefügen durch Neutronenbeugung stammt aus dem Jahr 1985 (Kämpf et al.)

Kämpf, H., Bankwitz, P., Betzl, M., Legler, C. (1985). Results of neutron texture analysis of Prevariscian and Variscian magnetite ores of the Erzgebirge anticlinal zone. *Gerlands Beitr. Geophysik* 94 (1985) 522-532.

Ab 1990 wurden die kristallographischen Orientierungen vorzugsweise durch Neutronenbeugung an den Forschungszentren KFA Jülich in Kooperation mit W. Schäfer, G. Will und E. Jansen und GKSS Geesthacht in Kooperation mit H.-G. Brokmeier und Mitarbeitern bestimmt. Ein weiterer Messplatz in Dubna/Moskauer Gebiet, Russland mit J.Heinitz, K. Ullemeyer, K. Walther u. a. m. konnte 1994 genutzt werden.



Links: Neutronen-Diffraktometer SV7 am FRJ-2-Reaktor in Jülich. SV7 ist mit einem großen Lineardetektor ausgerüstet, der einen 2θ -Bereich von 50° erfasst. Auf diese Weise können die Reflexe aller Mineralkomponenten einer Probe in einem Scan erfasst werden.

Rechts: Neutronen-Diffraktometer TEX2 am FRG -1-Reaktor in Geesthacht. Gesteuert durch ein Messprogramm wird jeder einzelne Reflex, jeder Mineralkomponente getrennt mit einem Einfachdetektor vermessen.

Ab 2004 wurden die Erzgefüge (Mikrogefüge und Vorzugsorientierung der Körner) im Elektronenmikroskop durch EBSD (Electron BackScatter Diffraction) Messungen in Kooperation mit Karsten Kunze, Geologisches Institut der ETH Zürich, und später mit Luiz Morales, Geomechanik und Rheologie, Geoforschungszentrum Potsdam, gewonnen.

Neben der Software, die die Daten der Messgeräte der verschiedenen Firmen zur Weiterverarbeitung aufbereitet, wurden für die numerische Auswertung und graphische Darstellung eigens entwickelte (Siemes, 1967) und stets weiterentwickelte Fortran-Programme am Rechenzentrum der RWTH (CD 6400, Cyber 175, IBM 3090) und später auf PC's benutzt. Zur Berechnung der Orientierungsverteilungsfunktion (ODF) wurde zunächst ein Programm verwendet, das von Spangenberg (1977) in seiner Doktorarbeit „Reihenentwicklung nach verallgemeinerten Kugelfunktionen“ nach (Bunge, 1969) erstellt wurde. Ein weiteres bei Messungen in Geesthacht benutztes Reihenentwicklungsprogramm wurde von Dahms 1992 entwickelt. Ab 1988 wurde das Programm Mentex (Schaeben, 1988) verwendet, das die ODF durch Entropieoptimierung berechnet und so Artefakte vermeidet, die nicht durch gemessene Polfigurdaten gestützt werden.

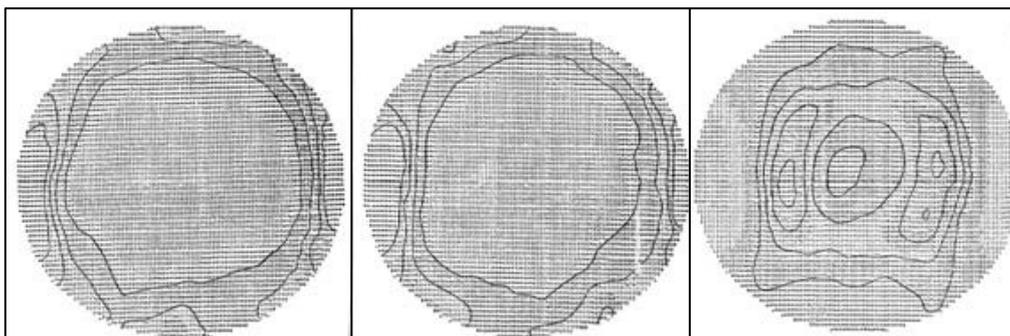
H. Schaeben (1988). Entropy optimization in texture goniometry. 1. Methodology. Phys. stat. sol (b) 148 (1988) 63-72.

Seit 2008 wurde insbesondere das universal verwendbare MTEX benutzt, um Polfiguren, ODF's und das Mikrogefüge (Korngröße, Kornformen, etc.) und Orientierungen der Körner zu berechnen und graphisch darzustellen.

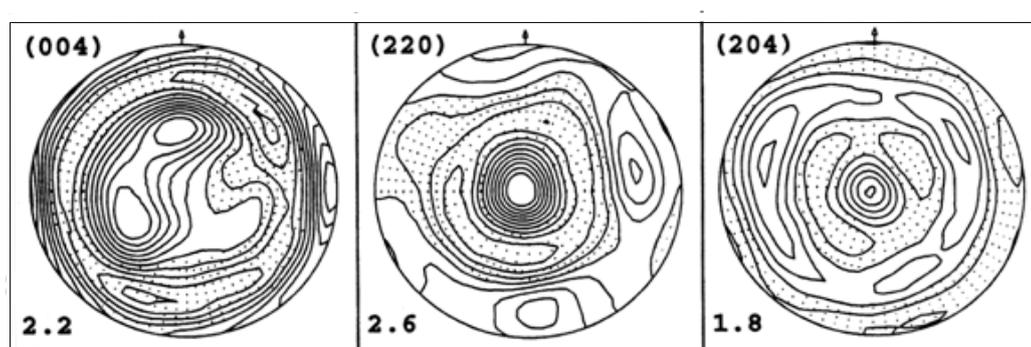
Hielscher, R., Schaeben, H. (2008). A novel pole figure inversion method: specification of the MTEX algorithm. Journal of Applied Crystallography 41 (2008) 1024-1037.

Bachmann, F., Hielscher, R., Schaeben, H. (2011). Grain detection from 2d and 3d EBSD data — Specification of the MTEX algorithm. Ultramicroscopy 111 (2011) 1720-1733.

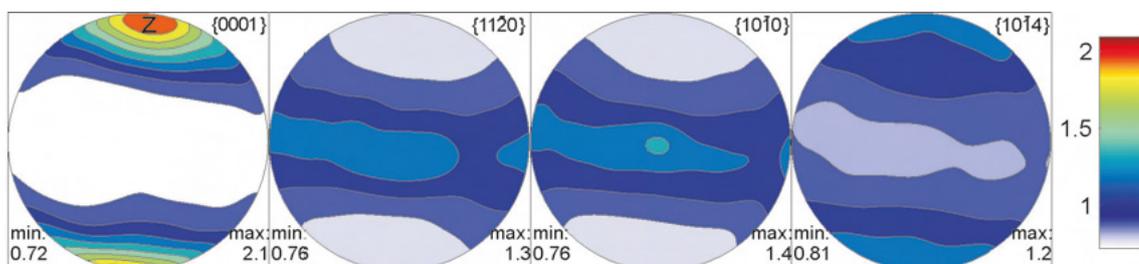
Beispiele der Darstellung von Polfiguren aus verschiedenen Messperioden



Vollständige Polfiguren $\{10\cdot10\}$, $\{11\cdot20\}$ und $\{10\cdot12\}$ von hexagonalem Pyrrhotin aus der Grube Bayerland, die aus Messungen in 3 Schnitten senkrecht zu einander gewonnen wurden. Druckerausgabe der Symbole der Intensitätsstufen und Handzeichnung der Isolinien (1971, Bayer & Siemes).



Vollständige aus der ODF berechnete Polfiguren der $\{004\}$ -, $\{220\}$ - und $\{204\}$ -Reflexe von tetragonalem Chalcopyrit, 30% experimentell verformt bei 300°C, allseitigem Druck von 300 MPa und mit einer Rate von $3 \cdot 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$. Die Daten sind normiert und die Isolinien interpoliert und mit einem Plotter erzeugt. (1996, Jansen et al.)



Vollständige Polfiguren der Hämatit-Reflexe $\{0001\}$, $\{11\cdot20\}$, $\{10\cdot10\}$ und $\{10\cdot14\}$ von einem Eisenerz aus der Lagerstätte Sishen in Südafrika. Darstellung und Verarbeitung der EBSD-Texturmessungen mit MTEX. (2013, Siemes).

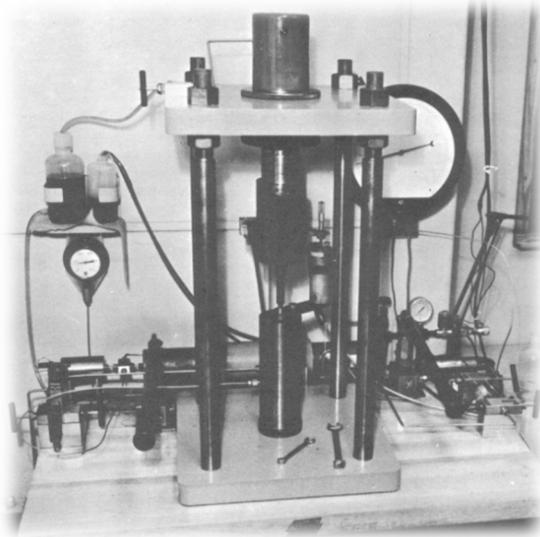
Im Literaturverzeichnis sind die publizierten Arbeiten geordnet nach den Erzmineralen Bleiglanz, Zinkblende, Kupferkies, Magnetkies, Magnetit, Hämatit, Pyrit zusammengestellt.

Experimentelle Verformung von Erzen bei hohen allseitigen Drucken und Temperaturen am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre.

Nach dem Prinzip von v.Kármán (1911) wurde 1961/62 eine Anlage zur Verformung von Erzen unter hohen allseitigen Drucken konzipiert und mit Mitteln des Instituts hergestellt. Die Mannesmann AG (Prof. Dr. W. Jamm und W. Rüssmann) fertigte den ersten Hochdruckzylinder, der in eine kommerzielle Baustoffprüfpresse eingesetzt wurde. Diese erste Anlage konnte aber erst später nach erfolgreichem Umbau genutzt werden.

v.Kármán, Th. (1911). Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. Z. VDI 55 (1911) 1749-1757.

Im Rahmen eines einjährigen Stipendiums 1964 (H. Siemes) konnten während eines neunmonatigen Aufenthaltes bei der strukturgeologischen Arbeitsgruppe von Prof. Fred A. Donath an der Columbia University erste Verformungsversuche an Bleiglanz ausgeführt und die Bauweise von Versuchsanlagen studiert werden.



Donath, F.A. (1964). Strength variation and deformational behavior in anisotropic rocks. In: State of stress in the earth's crust (W.R. Judd. Ed.), 1964, 281-298.

Verformungsapparatur in Donath's Lab , Columbia-University New York (Donath, 1968).

Anlässlich der 45. AGU-Tagung in Washington (1964) waren viele der experimentellen Verformer der USA und Australiens anwesend. Dort konnten im Gespräch erste Erkenntnisse über die Verformbarkeit von Bleiglanz gewonnen werden, die aber erst 1966 publiziert wurden.

Lyall, K.D., Paterson, M.S. (1966). Plastic deformation of galena (lead sulphide). Acta Metallurgica 14 (1966) 371-383.

Besichtigungen in den Laboratorien von D.T. Griggs (University of California, Los Angeles) und H. Heard (Shell Laboratories, Houston, Texas) gaben weitere Anregungen. Mit diesen Erfahrungen in den USA konnte 1965 die erste Versuchsanlage zur Verformung von Erzen bei Raumtemperatur und hohen allseitigen Drucken im Institut in Aachen zunächst noch mit Handsteuerung in Betrieb genommen werden (links in der Abb. nächste Seite). Die Erfassung der Daten (Last, Verschiebung des Stempels, allseitiger Druck) erfolgte durch lineare Datenschreiber, später durch einen x-y-Schreiber. Die Daten wurden aus den Schreiberdiagrammen stufenweise abgelesen und auf

Lochkarten übertragen. Die Korrektur der Daten für die elastische Verformung der Verformungsapparatur und die Vergrößerung des Probenquerschnittes sowie die Umrechnung der Rohdaten zur Darstellung von Spannungs-Verformungskurven wurde zunächst mit einem Fortran-II-Programm aus dem Labor von Fred Donath am Deutschen Rechenzentrum in Darmstadt (IBM 7090/94) ausgeführt. Später wurden die Daten digital erfasst und mit einem ständig angepassten Programm am Rechenzentrum der RWTH (CD 6400, Cyber 175, IBM 3090) und zuletzt auf PC's bearbeitet, um die Spannungs-Verformungskurven per Rechner zu erstellen.

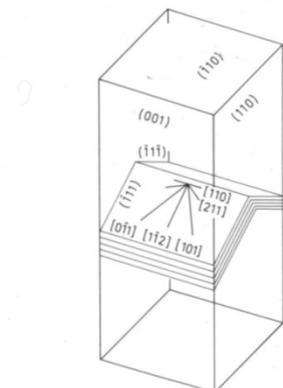
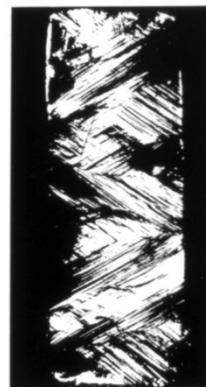
Diese Anlage und eine weitere wurden, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein Westfalen, stetig weiter entwickelt. Am Ende konnten Versuche bis zu Temperaturen von 450°C, einem allseitigen Druck bis zu 700 MPa und Verformungsraten von 10^{-2} s^{-1} bis 10^{-8} s^{-1} ausgeführt und die Daten per Apple-II-PC digital erfasst werden (in der untenstehenden rechten Abb.).



1. Aachener Verformungsapparatur nach dem Umbau etwa 1965-1966, ermöglichte Versuche bis 700 MPa allseitigem Druck bei Raumtemperatur mit analoger Datenerfassung..



2. Aachener Verformungsapparatur in Betrieb bis etwa 1994, ermöglichte Verformungsversuche bis ca. 450°C und variablen Verformungsraten mit digitaler Datenerfassung durch einen Apple PC.



Links: Bleiglanzerz 36,7% experimentell bei Raumtemperatur unter 100 MPa allseitigem Druck verformt (1970, Siemes).

Rechts: Zinkblendekristall experimentell 9,6 % bei Raumtemperatur unter 500 MPa allseitigem Druck verformt. Gleitlinien auf einer {110}-Fläche. (1973, Siemes, Saynisch, Borges).

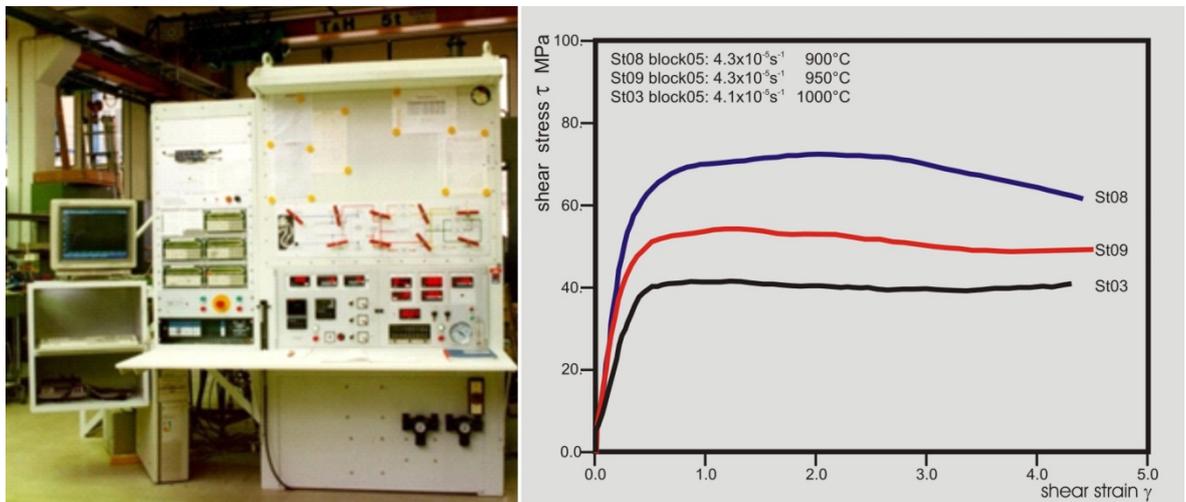
In den Jahren 1986 bis 1988 wurde untersucht, inwieweit Vickershärte-Messungen an kleinen Einkristallproben (z.B. $7 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$) bei hohen Temperaturen die Versuche an großen Einkristallproben (z. B. $10 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$) vorbereiten, ersetzen oder ergänzen können (z.B. Kollenberg, 1988). Die Messungen wurden am National Physical Laboratory (Dr. Morell) in Teddington, UK, ausgeführt.

In den Aachener Verformungsapparaturen wurde der allseitige Druck durch Silikonöl oder Tellus Shell-Öl übertragen, daher konnten keine Versuche mit höheren Temperaturen als 450°C gefahren werden. Bei der DFG wurde die Finanzierung einer kommerziell erhältlichen Verformungsapparatur von der Australian National University (ANU), Professor Mervyn Paterson, beantragt. Um diese Apparatur zu testen, wurden Personal- und Reisemittel für 3 Monate von der DFG bewilligt. Christa Hennig-Michaeli hat vom September bis Oktober 1990 in Canberra erfolgreich Versuche an Solnhofener Kalkstein und Hämatiterz gefahren (1991, Hennig-Michaeli). Da nach 1995 die experimentelle Gefügekunde nicht fortgesetzt werden sollte, wurde der Antrag bei der DFG zurückgezogen.

Mit der Neubesetzung des Lehrstuhls Mineralogie und Lagerstättenlehre und des Lehrgebietes Mineralogie und Gefügekunde mit veränderten Ausrichtungen wurden das Verformungslabor und die Texturmessanlage 1994/1995 abgebaut

Experimentelle Verformung von Erzen bei hohen allseitigen Drucken und Temperaturen am Geoforschungszentrum in Potsdam.

Nach dem Abbau der Verformungsanlagen im Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre konnten ab 1996 die Verformungsapparaturen des Geoforschungszentrums, Sektion Geomechanik und Rheologie unter Leitung von Professor G. Dresen, in Kooperation mit E. Rybacki und M. Naumann genutzt werden.



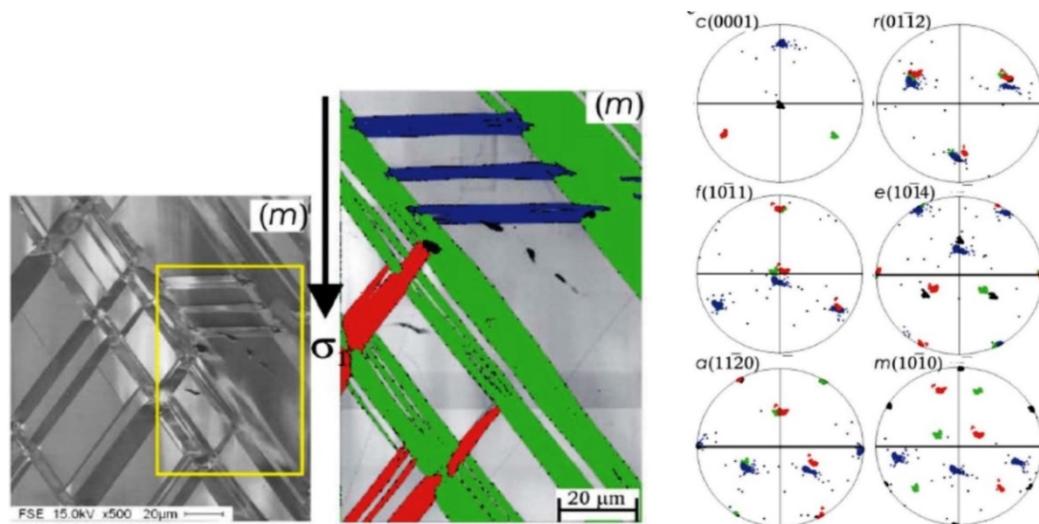
Links: Paterson-HPT-Verformungsapparatur im GFZ Potsdam.

Rechts: Shearstress-Shearstrain-Kurven von Hämatiterz in Abhängigkeit von der Temperatur bei sonst gleichen Versuchsbedingungen.

Die Verformungsapparatur nach Paterson, die am GFZ zunächst zur Verfügung stand, ist geeignet Proben axialsymmetrisch unter hohem Gasdruck (500 MPa) und hoher Temperatur (1300°C) zu verformen. Der Versuchsablauf ist weitgehend automatisiert und elektronisch gesteuert. In den Jahren 1996 bis 2001 wurden Versuche mit Bleiglanzerzen, Hämatiterzen und Hämatitkristallen bei Manteldrucken von 300 bis 400 MPa, Temperaturen bis 1000°C und variablen Verformungsraten ausgeführt.

Paterson, M.S. (1970). A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation. *Int. Jour. Rock Mechanics and Mining Sciences* 7 (1970) 517-526.

Die digital erfassten Rohdaten wurden mit Rechenprogrammen von Erik Rybacki, Geoforschungszentrum Potsdam, korrigiert und die Spannungs-Verformungskurven graphisch ausgegeben (Bild Seite 10, rechts).

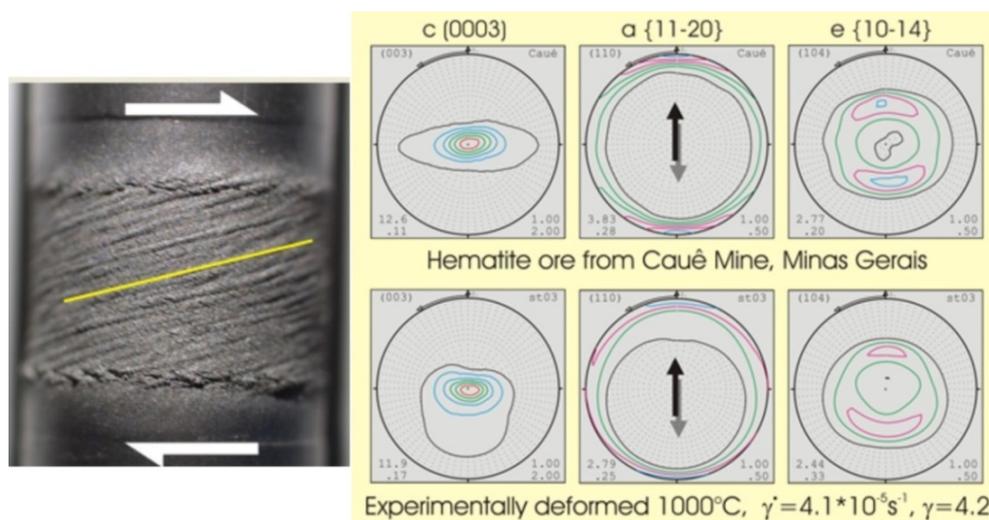


Links: (m)-Fläche eines prismatisch geschnittenen Hämatit-Kristalls im Stauchversuch 3,4% verformt, senkrecht zu $c(0001)$ bei 600°C und 300 MPa allseitigem Druck. Sichtbar auf den (m)-Flächen sind die Spuren von drei $\{r\}$ -Zwillingen (rot, blau, grün).

Rechts: Polfiguren von sechs Reflexen in der Orientierung senkrecht zur Stauchachse $c(0001)$ (2008, Siemes et. al.)

Später wurde das GFZ-Labor mit einer weiteren Verformungsapparatur ausgestattet, die außer den Kompressionsversuchen auch Torsionsversuche bei niedrigen Verformungsraten bis zu hohen Scherverformungen ermöglicht. Torsionsversuche an Hämatit und Magnetit wurden in den Jahren 2005 bis 2015 unternommen.

Paterson, M.S., Olgaard, D.L. (2000). Rock deformation tests to large shear strains in torsion. *J. Struct. Geol.* 22 (2000) 1341-1358.



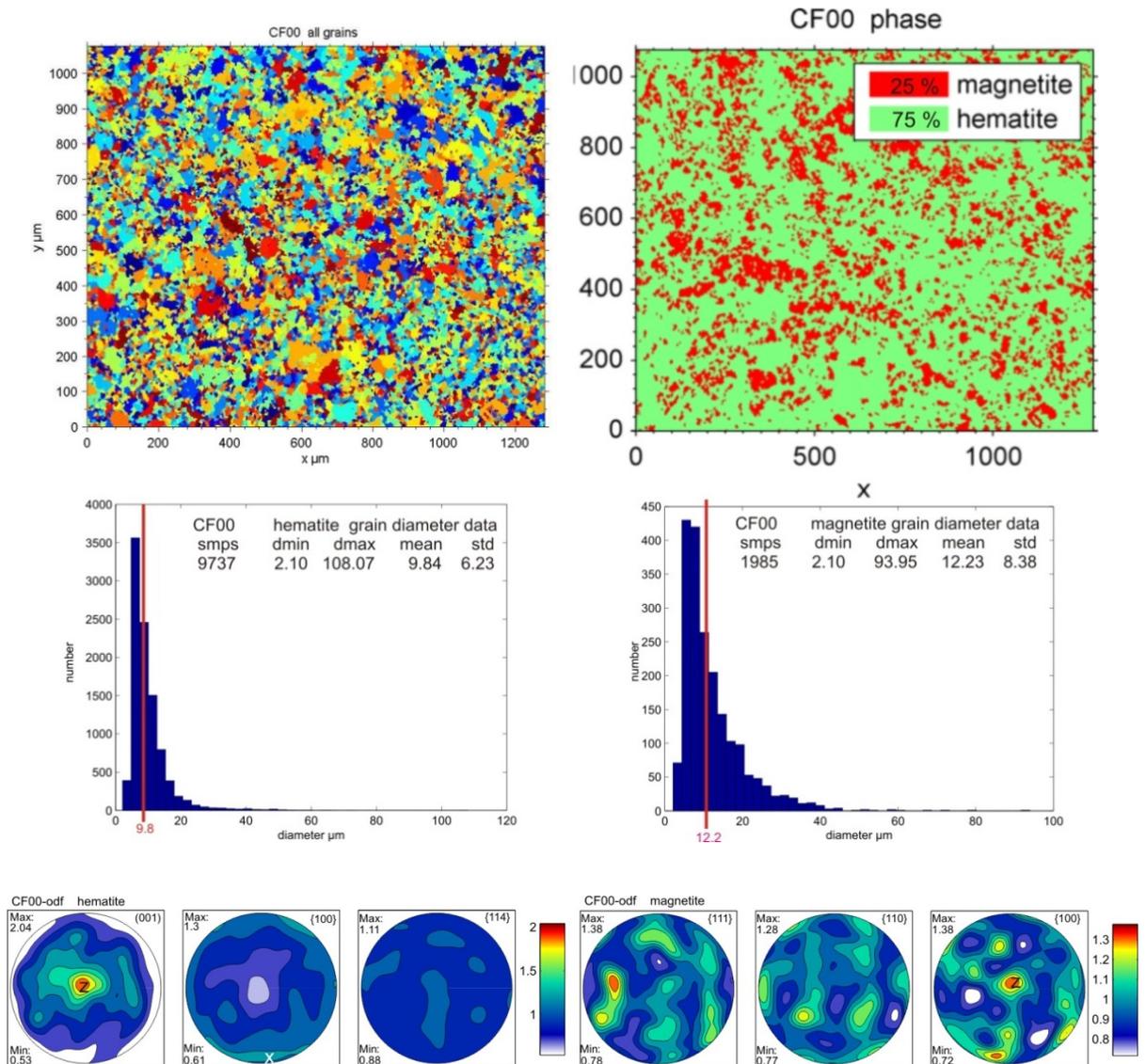
Links: Hämatiterz im Torsionsversuch bei 1000°C , mit einer Gesamtverformung von $\gamma=4.2$ und einer Verformungsrate von $\dot{\gamma}=4.1 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1}$.

Rechts oben: Hämatit-Polfiguren von natürlich verformtem Hämatiterz aus der Grube Cauê, Eisernes Viereck, Brasilien.

Rechts unten: Hämatit-Polfiguren nach der Torsionsverformung ähnlich den Polfiguren des natürlich verformter Hämatiterzes (2010, Siemes et.al.).

Die Texturen, die durch Torsionsversuche (simple shear) erzeugt wurden, erwiesen sich als besonders geeignet zur Interpretation (z.B. C.A. Rosière et al. 1989, H. Quade et al. 2000) der natürlich entstandenen Texturen in den Hämatiterzen des Eisernen Vierecks von Minas Gerais in Brasilien. Siehe dazu die die publizierten Arbeiten über Hämatit und Magnetit.

Das folgende Beispiel zeigt die Analyse der Daten einer EBSD-Messung an einem Martitierz aus dem Eisernen Viereck, Minas Gerais, Brasilien. Die Abbildungen zeigen die Phasenverteilung von Hämatit und Magnetit sowie die Verteilungen der äquivalenten Durchmesser und die zugehörigen Polfiguren.



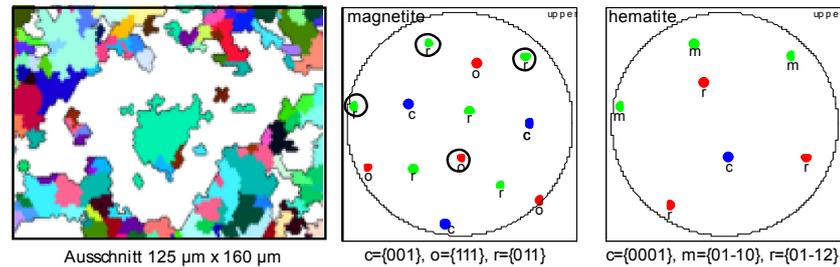
Hämatit-Magnetit-Erz (Martit) von Minas Gerais, Brasilien (2015, Siemes, Rybacki, Morales et. al. in Bearbeitung).

Oben: EBSD-Orientierungsbild und Phasenverteilung in der Probe.

Mitte: Korngrößenverteilung der beiden Phasen aus EBSD-Messungen.

Unten: Polfiguren der beiden Phasen aus den jeweiligen ODF's berechnet.

Aus den Messdaten können noch viele weitere Beziehungen ermittelt werden, z.B. die Orientierungsbeziehungen benachbarter Körner wie in der Nachfolgenden Abbildung gezeigt.



Links: EBSD-Orientierungsbild eines Hämatit-Magnetit-Erzes. Magnetit ist weiß gefärbt. Hämatit-Körner sind in Abhängigkeit von der Orientierung verschiedenfarbig.

Mitte: Polfigur des Magnetit-Korns.

Rechts: Polfigur des zentralen, grün gefärbten Hämatit-Korns. .

Im EBSD-Orientierungsbild der obigen Abbildung liegt ein kleineres grüngefärbtes Hämatit-Korn in einem großen weißgefärbten Magnetit-Korn. Die Polfiguren beider Phasen zeigen, dass sie in der wohl bekannten topotaktischen Beziehung mit $\{111\}_{\text{mag}}$ parallel zu $(0001)_{\text{hem}}$ und $\langle 110 \rangle_{\text{mag}}$ parallel zu $\langle 01-10 \rangle_{\text{hem}}$ stehen (s. z. B. Davis et al. 1968; Barbosa et al., 2015).

Im Literaturverzeichnis sind die publizierten Arbeiten geordnet nach den Erzmineralen Bleiglanz, Zinkblende, Kupferkies, Magnetkies, Magnetit, Hämatit, Pyrit zusammengestellt.

Schlußbemerkung.

Sander, B. (1950, „Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, Teil 2: Die Korngefüge. Springer Verlag, Wien und Innsbruck, pp. 399) schreibt auf S. 39: „Die vollkommene Darstellung eines zusammengesetzten Gefüges aus den Teilgefügen der Kornarten K_1 , K_2 , K_3 usw. ist die „Achsenverteilungsanalyse“, aus Gefügebild und Achsenlagen von K_1 , K_2 usw. aufeinander bezogen. Diese Darstellung enthält sämtliche Raumdaten des betrachteten Bereichs eindeutig aufeinander bezogen, alles was von Orientierung, Gestalt, Verteilung der Körner abhängt.“ Zu dieser Zeit war die zeitaufwendige und mühsame Bestimmung der AVA beschränkt auf die optische Bestimmung der c-Achsen von anisotropen transparenten Mineralen. Auswertungen von EBSD-Messungen von Mikrogefügen sind von diesen Einschränkungen „c-Achsen, Anisotropie und Transparenz“ unabhängig, wie das obige Beispiel der Untersuchung an Martit zeigt.

Sehr viele neue Erkenntnisse könnten über die Verformbarkeit von Erzmineralen und Erzen und die Entstehung der Vorzugsorientierungen von Erzen gewonnen werden, wenn die Versuche und Auswertungen erneut mit den modernen, neuentwickelten Methoden ausgeführt würden.

Förderer, Personen und Institutionen

Nach der Umwidmung 1994 des Lehr- und Forschungsgebietes Mineralogie und Gefügekunde wurden die Versuche an Hämatit und Magnetit unter Zuordnung zum Lehr- und Forschungsgebiet Geochemie und Petrologie, Prof. U. Kramm, später unter Zuordnung zum Lehr- und Forschungsgebiet Reservoir-Petrologie, Prof. C. Hilgers, und als Gast im Lehr- und Forschungsgebiet Ton- und Grenzflächenmineralogie, Prof. Helge Stanjek, bis 2015 fortgesetzt.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft und das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen haben die Forschungsarbeiten mit ihren Zuwendungen gefördert.

Herr Prof. W. Jamm (Lehrauftrag Berechnung und Konstruktion von Hochdruckanlagen) und Herr W. Rüssmann von der Mannesmann AG haben den ersten Hochdruckversuchskörper, der von ihrer Firma gestiftet wurde, konzipiert und Herr Prof. Dr.-Ing. habil. W. Lohmann (Mathematik in der Technik an der RWTH) hat die Festigkeitsberechnungen für einen dickwandigen Versuchskörper beigesteuert.

Mit Texturmessungen und Verformungsversuchen haben sich Doktoranden, Stipendiaten, wissenschaftliche Mitarbeiter und studentische Mitarbeiter befasst:

Hans-Jürgen Saynisch, Barbara Borges, Helmut Lang, Peter Müller, Gunter Bauer, Helmut Schaeben, H.-J. Spangenberg, Christa Hennig-Michaeli, Lutz Kübler (Alexander von Humboldt Stipendiat), Wolfgang Kollenberg, Luane Martens, Lutz-Hermann Kreutzer, Stephan Kreutzer, Ellen Jansen, Doris Zilles, Christine Breuer, Walter Winter, Elke Niederschlag, Johannes Huppertz, Birgit Klingenberg.

Mit Arbeiten rund um die Verformungsapparaturen und Texturmessanlagen waren im Laufe der vielen Jahre folgende Mitarbeiter des Institutes befasst:

Mechanische Werkstatt: Willy Honné, Günther Paprotny, Peter Zimmermann; Dünn- und Anschlifflabor: Willi Grawinkel, Thomas Derichs; Fotolabor: Gertrud Wolf, Monika Wiechert; Röntgenlabor: Lisa Löbbecke, Gertrud Siebel; Elektronik: Martin Brand, Wolfgang Stapf, Hermann Lagrèze; Mikrosondenlabor: Annemarie Wiechowski, Barbara Thiele, Roman Klinghardt; Geochemisches Labor: Rolf Neef; Rechnungs- und Bibliothekswesen: Annemarie Lentsch, Grete Lagrèze, Hildegard Breuers, Gudrun Günther, Jutta Lauscher, Bettina Leesmeister.

Im Zusammenhang mit den Texturuntersuchungen an Hämatiterzen aus dem Eisernen Viereck, Brasilien, und den Verformungsversuchen an Hämatiterzen ist die Kooperation mit Prof. Carlos Alberto Rosière, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, und Prof. Horst Quade, Clausthal-Zellerfeld, besonders hervorzuheben.

Kontakte zu Forschungseinrichtungen und Wissenschaftlern, die sich mit Gefügeuntersuchungen und der experimentellen Verformung an Erzen oder Gesteinen befassten, bestanden mehr oder weniger intensiv über unterschiedlich lange Zeiten: Fred A. Donath, Mervyn Paterson, Henry Lindley, Peter Paulitsch, H.J. Bunge, Franz Karl, Hartmut Kern, Günther Braun, Peter Ypma, K.D. Lyall, Barry Atkinson, Ken McClay, Stephen F. Cox, H.-R. Wenk, Alan P. Boyle, Craig D. Barrie, Sandra Piazzolo, Florian Heidelberg.

Verzeichnis der Veröffentlichungen:

Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre, RWTH Aachen und Lehr- und Forschungsgebiet Mineralogie und Gefügekunde: Gefüge, Verformung, Rekristallisation, Regelung von Erzen

Galena – Bleiglanz

- Schachner-Korn, D. (1948). Ein metamorphes Erzgefüge. *Heidelb. Beitr. Miner. Petrogr.* 1 (1948) 407-426.
- Schachner-Korn, D. (1954). Ein Wachstums- und ein Rekristallisationsgefüge von Bleiglanz aus einer rheinischen Lagerstätte. *Tschermaks min. petro. Mitt., III. Folge*, 4 (1954) 111-116 (Sander-Festband).
- Siemes, H. (1961). Betrachtungen zur Verformung und zum Rekristallisationsverhalten von Bleiglanzen. *Diss. RWTH Aachen*, 1961.
- Siemes, H. (1964). Zum Rekristallisationsverhalten von natürlich verformten Bleiglanzen. *N. Jb. Miner. Abh.* 102 (1964) 1-30.
- Siemes, H., Schachner-Korn, D. (1965). Theoretische Ableitung der Schertexturen von Bleiglanz und Vergleich dieser mit Texturen natürlich verformter Bleiglanze. *N. Jb. Miner. Abh.* 102 (1965) 221-250.
- Siemes, H. (1965). Theoretische Ableitung der Stauchtexturen von Bleiglanz. *N. Jb. Miner. Abh.* 103 (1965) 80-93.
- Siemes, H. (1967). Experimentelle Stauchverformung von polykristallinen Bleiglanzen - Bestimmung der Festigkeitseigenschaften unter allseitigem Druck zwischen 1 und 5000 bar sowie röntgenographische Untersuchung der auftretenden Texturen. *Habilitationsschrift, RWTH Aachen*, 1967.
- Siemes, H. (1970). Experimental deformation of galena ores. In: *Experimentelle und natürliche Gesteinsverformung* (Ed.: P. Paulitsch), Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York (1970) 165-208.
- Pauly, H., Siemes, H. (1973). Microhardness of galena related to Ag-Bi-content. *Bull. Geol. Soc. Denmark* 22 (1973) 50-78.
- Siemes, H. (1976). Recovery and recrystallization of deformed galena. *Econ. Geology* 71 (1976) 763-771-
- Siemes, H. (1977). Recovery and recrystallization of deformed galena. *Tectonophysics* 39 (1977), 171-174.
- Siemes, H., Spangenberg H.-J. (1980). Shear fabrics of naturally deformed galena. *J. Struct. Geol.* 2 (1980) 235-241.
- Martens, L. (1987). Verformbarkeit und Regelung von Galenit und Sphalerit in Mischserzen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, der Verformungstemperatur und der Verformungsrate. *Diss. RWTH Aachen*, 1987.
- Jansen, E.M., Siemes, H., Brokmeier, H.-G. (1998). Crystallographic preferred orientation and microstructures of experimentally deformed Braubach galena ores with emphasis on the relation to diffusional processes. *Mineralium Deposita* 34 (1998) 57-70.

Sphalerit – Zinkblende

- Saynisch, H.J. (1967). Festigkeits- und Gefügeuntersuchungen an Zinkblenden. *Diss. RWTH Aachen*, 1967.
- Saynisch, H.J. (1970). Festigkeits- und Gefügeuntersuchungen an experimentell und natürlich verformten Zinkblendeerzen. In: *Experimentelle und natürliche Gesteinsverformung* (Ed.: P. Paulitsch), Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York (1970) 209-252.
- Siemes, H., Saynisch, H.J., Borges, B. (1973). Experimentelle Verformung von Zinkblendeinkristallen bei Raumtemperatur und 5000 bar Manteldruck. *N. Jb. Miner. Abh.* 119 (1973) 65-82.
- Siemes, H., Borges, B. (1979). Experimental deformation of sphalerite single crystals under confining pressures of 3000 and 5000 bars at temperatures between 25°C and 450°C. *N. Jb. Miner. Abh.* 134 (1979) 288-304.
- Kollenberg, W., Siemes, H. (1983). Experimental deformation of sphalerite-garnet ore under a confining pressure of 300 MPa and at temperatures between 250° C and 300° C. In: *Deformation of Multi-Phase and Particle Containing Materials, and Materials Science* (Eds.: J.B. Bilde-Sorensen, N. Hansen, A. Horsewell, T. Leffers, H. Liholt) (1983) 351-356.
- Couderc, J.J., Dudouit, I., Hennig-Michaeli, Ch., Levade, C. (1985). The interaction between slip and twinning systems in natural sphalerite experimentally deformed. *phys. stat. sol. (a)* 90 (1985) 581-593.

Chalcopyrit – Kupferkies

- Korn, D. (1933). Ein deformiertes Flußspat-Quarz-Kupferkiesgefüge aus einer mittelschwedischen Sulfidlagerstätte. *N. Jb. Mineral., Geol. Paläont., Abh. Abt. A, Beil. Bd.* 66 (1933) 433-459.
- Lang, H. (1968). Stauchversuche mit polykristallinen Kupferkiesen und deren Ergebnisse unter besonderer Berücksichtigung der Gefügeregelung. *Diss. RWTH Aachen*, 1968.
- Couderc, J.J., Hennig-Michaeli, Ch. (1986). Transmission electron microscopy of experimentally deformed chalcopyrite single crystals. *Phys. Chem. Minerals* 13 (1986) 393-402.
- Hennig-Michaeli, Ch., Siemes, H. (1987). Experimental deformation of chalcopyrite single crystals at 200° C. *Tectonophysics* 135 (1987) 217-232.
- Couderc, J.J., Hennig-Michaeli, Ch. (1988). TEM evidence of various glide modes in experimentally strained CuFeS₂ crystals. *Philosophical Magazine A* 57 (1988) 301-325.
- Couderc, J.J., Hennig-Michaeli, Ch. (1989). TEM study of mechanical twinning in experimentally deformed chalcopyrite (CuFeS₂) single crystals, Part I: (112) deformation twins. *Eur. J. Mineral.* 1 (1989) 275-293.
- Couderc, J.J., Hennig-Michaeli, Ch. (1989). TEM study of mechanical twinning in experimentally deformed chalcopyrite (CuFeS₂) single crystals, Part II: strain-induced (102) twins. *Eur. J. Mineral.* 1 (1989) 295-310.

- Couderc, J.J., Hennig-Michaeli, Ch. (1990). TEM studies on dislocation reactions in experimentally deformed chalcopyrite single crystals. In: *Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks* (Eds.: D.J. Barber, P.G. Meredith), Unwin & Hyman, London, 1990, 391-415.
- Jansen, E. (1990). Experimentelle Deformation von natürlichem, polykristallinem Chalkopyrit bei Temperaturen bis 450°C und Verformungsraten von 10^{-5} bis 10^{-8} unter besonderer Berücksichtigung der entstehenden Texturen. Diss. RWTH Aachen, 1990.
- Jansen, E.M., Merz, P., Siemes, H., Will, G. (1991). Interpretation of preferred orientation in naturally and experimentally deformed chalcopyrite ores by neutron diffraction texture analysis. *Textures & Microstructures* 14-18 (Spec. Issue, eds.: C. Esling, R. Penelle) (1991) 431-436.
- Jansen, E.M., Siemes, H., Merz, P., Schäfer, W., Will, G., Dahms, M. (1993). Preferred orientation of experimentally deformed Mt. Isa chalcopyrite ore. *Mineralogical Magazine* 57 (1993) 45-53.
- Jansen, E.M., Siemes, H. (1993). Phase reaction between chalcopyrite and pyrrhotite during uniaxial compression experiments at 400° C and 450° C, 300 MPa confining pressure and different strain rates. *N. Jb. Miner. Mh.* (1993) 325-336.
- Jansen, E.M., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (1994). Examples of neutron diffraction texture analysis on one and the same chalcopyrite sample before and after experimental deformation. *Proceedings of the intl. Conf. on Textures of Materials ICOTOM 10* (Ed.: H.J. Bunge), *Materials Science Forum* 157-162 (1994) 733-738.
- Jansen, E.M., Kunze, K. (1994). Microstructural analysis of an experimental deformed chalcopyrite grain by orientation imaging microscopy. *Proceedings of the intl. Conf. on Textures of Materials ICOTOM 10* (Ed.: H.J. Bunge), *Materials Science Forum* 157-162 (1994) 739-744.
- Jansen, E.M., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (1995). Neutron texture investigations on natural Mt. Isa chalcopyrite ore. Part I: Preferred orientation of one and the same chalcopyrite sample before and after experimental deformation. *Textures and Microstructures* 26-27, (1995) 167-179.
- Jansen, E.M., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (1996). Neutron texture investigations on natural Mt. Isa chalcopyrite ore. Part II: Preferred orientation of chalcopyrite after different experimental deformation conditions. *Textures and Microstructures* 28, (1996) 1-15.

Pyrrhotin – Magnetkies

- Bayer, H., Siemes, H. (1971). Zur Interpretation von Pyrrhotin-Gefügen. *Mineral. Deposita* 6 (1971) 371-378.
- Kübler L. (1985). Deformation mechanisms in experimentally deformed single crystals of pyrrhotite, $Fe_{1-x}S$. *Phys. Chem. Minerals* 12 (1985) 353-362.
- Niederschlag, E. (1994). Experimentelle Deformation und Neutronentexturanalyse an polykristallinem Pyrrhotin. Diss. RWTH Aachen, 1994.
- Niederschlag, E., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (1994). Preferred orientation of a naturally and experimentally deformed pyrrhotite ore by X-ray and neutron diffraction texture analysis. *Proceedings of the intl. Conf. on Textures of Materials ICOTOM 10* (Ed.: H.J. Bunge), *Materials Science Forum* 157-162 (1994) 821-826.
- Niederschlag, E., Siemes, H. (1996). Influence of initial texture, temperature and total strain on the texture development of polycrystalline pyrrhotite ores in deformation experiments. *Textures and Microstructures* 28, (1996) 129-148.

Magnetit

- Müller, P., Siemes, H. (1972). Zur Festigkeit und Gefügeregelung von experimentell verformten Magnetitkies. *N. Jb. Miner. Abh.* 117 (1972) 39-60.
- Hennig-Michaeli, Ch., Siemes, H. (1975). Zwillingsleitung beim Magnetit. *N. Jb. Miner. Abh.* 123 (1975) 330-334
- Hennig-Michaeli, Ch., Siemes, H. (1982). Compression experiments on natural magnetite crystals at 200° C and 400° C at 400 MPa confining pressure. In: *Issues in Rock Mechanics, Proceedings Twenty-Third Symposium on Rock Mechanics* (Eds.: G.E. Goodman, F.E. Heuze), American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York (1982) 380-388.
- Schaeben, H., Siemes, H., Höfler, S., Will, G. (1990). Practical applications of entropy optimization in quantitative texture analysis. In: *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics* (Eds.: R.J. Knipe, E.H. Rutter). *Geol. Soc. London Spec. Publication* no. 54 (1990) 375-381.

Hämatit

- Hennig-Michaeli, Ch. (1976). Mikroskopische Gefügeuntersuchungen an experimentell und natürlich verformten Hämatitkies. Diss. RWTH Aachen, 1976.
- Hennig-Michaeli, Ch. (1977). Dynamic interpretation of deformation twins in haematite. *Geol. Förening. Förhandl. (GFF)* 99, (1977) 208-215.
- Hennig-Michaeli, Ch. (1977). Microscopic structure studies of experimentally and naturally deformed iron ores. *Tectonophysics* 39 (1977) 255-271.
- Hennig-Michaeli, Ch., Siemes, H. (1982). Experimental deformation of hematite crystals between 250 C and 400° C at 400 MPa confining pressure. In: *High Pressure Research in Geoscience* (Ed.: W. Schreyer) Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (1982) 133-150.

- Hrouda, F., Siemes, H., Herres, N., Hennig-Michaeli, Ch. (1985). The relationship between the magnetic anisotropy and the c-axis fabric in a massive hematite ore. *J. Geophys.* 65 (1985) 174-182.
- Kollenberg, W. (1986). Microhardness measurement on haematite crystals at temperatures up to 900°C. *Jour. Mat. Sci.* 21 (1986) 4310-4314.
- Rosière, C.A., Quade, H., Siemes, H., Chemale, F. Jr., Resende de Souza E.M. (1996). Um Modelo para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II - Trama, Textura e Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. *Geonomos*, 1996, (4) 61-75.
- Rosière, C.A., Quade, H., Siemes, H., Chemale Jr., F. (1998). Fabric, texture and anisotropy of magnetic susceptibility in high-grade iron ores from the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Materials Science Forum*, 273-275 (1998) 693-700.
- Quade, H., Rosière, C.A., Siemes, H., Brokmeier, H.-G. (2000). Fabrics and textures of Precambrian iron ores from Brazilian Deposits. *Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften*, SH1 (2000) 155-162.
- Siemes, H., Schaeben, H., Rosière, C.A., Quade, H. (2000). Crystallographic and magnetic preferred orientation of hematite in banded iron ores. *J. Struct. Geol.* 22 (2000) 1747-1759.
- Rosière, C.A., Siemes, H., Quade, H., Brokmeier, H.-G., Jansen, E.M. (2001). Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *J. Struct. Geol.* 23 (2001) 1429-1440.
- Hackspacher, P.C., Oliveira Jr., V.T., Siemes, H., Rosière, C.A., Moreno, M.M.T. (2001). Textures of hematitic and itabiritic iron ores in the Conceição Mine, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Z. dt. Geol. Ges.* 152 (2001) 467-478.
- Siemes, H., Klingenberg, B., Schäfer, W., Jansen, E., Dresen, G., Rybacki, E., Naumann, M. (2001). Textures of experimentally deformed hematite ores with magnetite and wuestite. *Proceedings (CD-ROM) of the 6th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology*, 2001, Cancun, Mexico.
- Siemes, H., Günther, H., Rosière, C.A., Quade, H. (2002). Deformation partitioning and textures of banded iron ores. In: Robb, L., Montjoie R. (Eds.), *Extended Abstracts (CD-ROM)*, 11th Quadrennial IAGOD Symposium and Geocongress 2002, Windhoek, Namibia, Geological Survey of Namibia.
- Siemes, H., Klingenberg, B., Rybacki, E., Naumann, M., Schäfer, W., Jansen, E., Rosière, C.A. (2003). Texture, microstructure, and strength of hematite ores experimentally deformed in the temperature range 600° to 1100°C and at strain rates between 10^{-4} and 10^{-6} s⁻¹. *J. Struct. Geol.* 25 (2003) 1371-1391.
- Siemes, H., Klingenberg, B., Rybacki, E., Naumann, M., Schäfer, W., Jansen, E., Kunze, K. (2004). Glide systems of hematite single crystals in deformation experiments. In: *Applied Mineralogy (Pecchio et al., eds)* (2004), 947-949, ICAM, São Paulo, ISBN 85-98656-02-X
- Kunze, K., Siemes, H., Rybacki, E., Jansen, E., Brokmeier, H.-G. (2008). Microstructure and texture from experimentally deformed hematite ore. In: *EMC 2008 (S. Richter, A. Schwedt, eds)*, vol.2, Materials Science, 827-828, Springer Verlag.
- Siemes, H., Klingenberg, B., Rybacki, E., Naumann, M., Schäfer, W., Jansen, E., Kunze, K. (2008). Glide systems of hematite single crystals in deformation experiments. *Ore Geology Reviews*, 33 (2008) 255-279.
- Rosière, C.A., Siemes, H., Rios, F.J., Moreira, B.B., Miquita, D.R., de Magalhães, M.S., Balzuweit K. (2009). Textural features of Fe high-grade ores. A guide for metallogenetic interpretation. In: *Smart Science for Exploration and Mining, Proc. 10th Biennial SGA Meeting*, Townsville, North Queensland, Australia, August 17-20, 2009 (Eds.: P.J. Williams et al.). p. 579-581.
- Hielscher, R., Schaeben, H., Siemes, H. (2010). Orientation distribution within a single hematite crystal. *Mathematical Geosciences* 42 (2010) 359-375.
- Siemes, H., Rybacki, E., Kunze, K., Klingenberg, B., Naumann, M., Jansen, E., Brokmeier H.-G. (2010). Development of microstructure and texture of hematite ores deformed to large strain in torsion: can texture identify the prevailing strength and creep mechanisms during deformation? *Advanced Engineering Materials* 12 (2010) 1003-1007.
- Siemes, H., Rybacki, E., Klingenberg, B., Rosière, C.A. (2011). Development of a recrystallized grain size piezometer for hematite based on high temperature torsion experiments. *Europ. J. Mineral.* 23, (2011) 293-302 (Spec. vol. EMPG XIII 2010, Toulouse).
- Schaeben, H., Balzuweit, K., León-García, O., Rosière, C.A., Siemes, H. (2012). Application of the Bingham quaternion distribution to texture analysis of a hematite specimen. *Z. geol. Wiss.* 40 (2012), 307-317.
- Rosière C.A., Garcia ,O.L., Siemes H., Schaeben H. (2013). Domainal fabrics of hematite in schistose, shear zone-hosted high-grade Fe ores: The product of the interplay between deformation and mineralization. *J. Struct. Geol.* 55 (2013) 150-166.
- Siemes, H. (2013). Microstructures and crystallographic preferred orientation (CPO) of hematite ores from the Sishen Mine, Northern Cape Province, South Africa. *South African Journal of Geology* 116 (2013), 79-100.

Pyrit

- Jansen, E.M., Merz, P., Schaeben, H., Schäfer, W., Siemes, H., Will, G., (1992). Determination of Preferred Orientation of Pyrite in a Chalcopyrite Ore by Means of Neutron Diffraction. *Textures & Microstructures* 19 (1992) 203-210.
- Siemes, H., Zilles, D., Cox, S.F., Merz, P., Schäfer, W., Will, G., Schaeben, H., Kunze, K. (1993). Preferred Orientation of experimentally deformed pyrite measured by means of neutron diffraction. *Mineralogical Magazine* 57 (1993) 29-43.

Übersichtsaufsätze

- Korn, D. (1933). Zur Lagebestimmung opaker Erze und Metalle im Mikroskop. *Neues Jb. Mineral., Geol. Paläont., Abh. Abt. A, Beil. Bd.* 67 (1933) 428-461.
- Korn, D. (1934). Die Lagebestimmung opaker Mineralien im Mikroskop. In: H. Schneiderhöhn, P. Ramdohr, *Lehrbuch der Erz-mikroskopie*, Bd. I/1, (1934) 265-302, Borntraeger, Berlin.
- Siemes, H. (1977). Fabric analysis and fabric development in ores. *Geol. Förening. Förhandl. (GFF)* 99, (1977), 172-185.

- Siemes, H., Hennig-Michaeli, Ch. (1985). Ore Minerals. In: Preferred orientation in deformed metals and rocks, an introduction to modern texture analysis (Ed.: H.R. Wenk) Academic Press, Orlando (1985) 335-360.
- Siemes, H., Hennig-Michaeli, Ch., Martens, L. (1991). The importance of deformation experiments on minerals for the interpretation of metamorphic ore textures. *Ore Geology Reviews* 6 (1991) 475-483.
- Siemes, H., Jansen, E.M., Niederschlag, E. (1994). Crystallographic preferred orientation of experimentally deformed sulfide ores. In: *Textures of Geological Materials* (Eds.: H.J.Bunge, S. Siegesmund, W. Skrotzki, K. Weber) DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, (1994) 231-250.
- Siemes, H., Jansen, E.M., Niederschlag, E. (1998). Neutron diffraction analysis of preferred orientation of naturally and experimentally deformed ores. In: *Proc. 9th Quadrennial IAGOD Symposium., Beijing (China) 1994* (Ed.: R.D. Hagni), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 83-93.

Methodische Arbeiten

- Siemes, H. (1967). Ein Rechenprogramm zur Auswertung von Röntgen-Texturgoniometer-Aufnahmen. *N. Jb. Miner. Monatshefte* (1967), 49-60.
- Siemes, H. (1967). Die Endlagen bei der Stauch- und Zugverformung von polykristallinen Metallen. *Z. Metallkunde* 58 (1967) 228-230.
- Siemes, H. (1970). Anfertigung von quantitativen Gefügediagrammen mit Hilfe von Messungen mit dem Röntgentexturgoniometer. *Clausth. Tekt. Hefte* 10 (1970) 293-298.
- Siemes, H. (1974). Anwendung der Taylor-Theorie auf die Regelung von kubischen Mineralen. *Contr. Mineral. Petrol.* 43 (1974) 149-157.
- Spangenberg, H.-J. (1977). Rechenprogramm zur Berechnung der Orientierungsverteilungsfunktion. *Diss. RWTH Aachen*, 1977.
- Schaeben, H. (1981). Mathematische Methoden der Analyse von Richtungsgefügen. *Diss. RWTH Aachen*, 1981.
- Schaeben, H. (1984). A new cluster algorithm for orientation data. *Mathematical Geology* 16 (1984) 139-153.
- Schaeben, H., Siemes, H. (1990). Entropy Optimization in Texture Goniometry, II. Practical Applications. *phys. stat. sol. (b)* 158, 1990, 407-425.
- Schaeben, H., Siemes, H. (1991). Recovering odfs with maximum entropy and their geoscientific interpretation. *Textures & Microstructures* 14-18 (Spec. Issue, eds.: C. Esling, R. Penelle) (1991) 31-36.
- Schaeben, H., Siemes, H. (1991). Mentex for quantitative texture analysis. *Geodata* 1 (1991) 21-25.
- Hennig-Michaeli, Ch. (1991). Erfahrungen mit der Paterson-Verformungs-Apparatur. Bericht bestehend aus Textteil und Anhang mit Abbildungen und Tabellen, 1991.
- Schaeben, H. (1994). Diskrete mathematische Methoden zur Berechnung und Interpretation von kristallographischen Orientierungsdichten. *Habilitationsschrift, RWTH Aachen*, 1994.
- Traas, C., Siemes, H., Schaeben, H. (1994). Smoothing pole figures using tensor products of trigonometric and polynomial splines. *Proceedings of the Intl. Conf. on Textures of Materials ICOTOM 10* (Ed.: H.J. Bunge), *Materials Science Forum* 157-162 (1994) 453-458.
- Schaeben, H., Siemes, H. (1996). Determination and interpretation of preferred orientation with texture goniometry: An application of indicators to maximum entropy pole- to orientation-density inversion. *Math. Geol.* 28, (1996) 169-201.
- Siemes, H., Rosière, C.A., Hackspacher, P., Schäfer, W., Jansen, E. (2000). Defocusing correction of X-ray pole figures by means of neutron pole figure measurement. *Textures and Microstructures* 34 (2000) 55-62.
- Günther, A., Brokmeier, H.-G., Petrovsky, E., Siemes, H., Helming, K., Quade, H. (2002). Mineral preferred orientation and magnetic properties as indicators of varying strain conditions in naturally deformed iron ores. In: *Proceedings of the Int. Conf. on Neutron Scattering, INCS 2001. Appl. Phys. A, Material Science & Processing* 74 [Suppl.] (2002) 1080-1082
- Hansen, A., Chadima, M., Cifelli, F., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (2004). Neutron pole figures compared with magnetic preferred orientations of different rock types. *Physica B: Condensed Matter* 350 (2004) 120-122.

Verschiedenes – Nicht-Erze

- Siemes, H. (1962). Bestimmungen von Elementen geringer Konzentration in Bleiglanz mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse. *Erzmetall* 15 (1962) 463-471.
- Schachner, D., Siemes, H. (1963). Röntgenographische Untersuchung der Gefügeprägung von Gesteinen der Bohrung Münsterland 1. *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.* 11 (1963) 447-458.
- Siemes, H. (1964). Zur röntgenfluoreszenzanalytischen Bestimmung von schweren Elementen in wäßrigen Lösungen. *Z. analytische Chem.* 199 (1964) 231-234.
- Siemes, H., Schwarz, E. (1964). Zur Bestimmung von Uran und Thorium in Sedimentgesteinen des Karbons. *Erzmetall* 17 (1964) 233-238; 306-311.
- Siemes, H. (1966). Röntgenographische Bestimmung der Texturen von unverformtem und experimentell verformtem Solnhofener Kalkstein. *Sitzungsberichte des ersten Kongresses der Internationalen Gesellschaft für Felsmechanik, Lissabon, Bd. 1* (1966) 205-215.
- Müller, P. (1969). Festigkeit und Gefügeregelung von Anhydrit. Experimentelle Stauchverformung im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 300°C und unter allseitigem Druck zwischen 1 atm und 5000 bar. *Diss. RWTH Aachen*, 1969.
- Bauer, G., Kellerwessel, H., Siemes, H. (1972). Untersuchungen über den Temperatureinfluß bei der trockenen Verpressung von Kaliumchlorid. *Aufbereitungstechnik* 13 (1972) 203-208.

- Bauer, G. (1973). Experimentelle Stauchverformung an Oetztaler Glimmerschiefern unter allseitigen Drucken von 1000 und 6000 bar, Temperaturen von 20°C bis 300°C und Verformungsgeschwindigkeiten zwischen 10^{-4} und 10^{-8} 1/sec. Diss. RWTH Aachen, 1973.
- Müller, P., Siemes, H. (1974). Festigkeit und Gefügeregelung von Anhydrit. *Tectonophysics* 23 (1974) 105-127.
- Nguyen, M.M., Siemes, H. (1978). Regelungsvorgänge beim Verdichten von Sylvit-Pulver in Glattwalzwerken. *Kristall und Technik* 13 (1978) 663-681.
- Kollenberg W. (1987). Die visuelle Wahrnehmung als bestimmender Faktor geowissenschaftlicher Forschung. Diss. RWTH Aachen, 1987.
- Kollenberg, W. (1988). Plastic deformation of Al_2O_3 single crystals by indentation at temperatures up to 750°C. *Jour. Mat. Sci.* 23 (1988) 3321-3325.
- Breuer, Ch. (1991). Bestimmung plastischer Eigenschaften an Spinellen, insbesondere der operativen Verformungsmechanismen, in Abhängigkeit von der Temperatur mit Hilfe eines Eindruckhärtemeßgerätes. Diss. RWTH Aachen, 1991.
- Winter, W. (1992). Experimentelle Bestimmung der Zugfestigkeit spröder Werkstoffe (Glas, Keramik) im Scheiben-Druck-Versuch. Diss. RWTH Aachen, 1992.
- Winter, W., Brokmeier, H.-G., Siemes, H. (1994). On the influence of a weak preferred orientation on the strength of aluminum oxide ceramic. *Proceedings of the Intern. Conference on Textures of Materials ICOTOM 10* (Ed. H.J. Bunge), *Materials Science Forum* 157-162, (1994) 1507-1512.
- Kolb, J., Kisters A.F.M., Meyer F.M., Siemes, H. (2003). Polyphase deformation of mylonites from Renco gold mine (Zimbabwe): identified by crystallographic preferred orientation of quartz. *J. Struct. Geol.* 25 (2003) 253-272.
- Chadima, M., Hansen, A., Hirt, A.M., Hrouda, F., Siemes, H. (2004). Phyllosilicate preferred orientation as control of magnetic fabric: evidence from neutron texture goniometry and low and high-field magnetic anisotropy (SE Rhenohercynian Zone of Bohemian Massif). In: *Magnetic Fabric: Methods and Applications* (F., Martin-Hernández, C.M., Lüneburg, C., Aubourg, M., Jackson, Eds.) Geological Society Special Publication (London) 238 (2004) 361-380.
- Bauer, W., Siemes, H. (2004). Prism $\langle c \rangle$ -Slip in Deformed Quartz in Granulite-Facies Rocks from the Eastern Orvinfjella, Central Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geol. Jb.* 96 (2004) 365-389.
- Bauer, W., Siemes, H. (2004). Kinematics and Geothermometry of Mylonitic Shear Zones in the Eastern Orvinfjella, Central Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geol. Jb.* 96 (2004) 391-421.
- Kolb, J., Rogers, A., Meyer F.M., Siemes, H. (2005). Dominant coaxial deformation of veins during the interseismic stage of the fault-valve cycle: microfabrics of laminated quartz veins of the Hutti gold mine, India. *J. Struct. Geol.* 27 (2005) 2043-2057.
- Bauer, W., Siemes, H., Spaeth, G., Jacobs, J. (2015). Quartz microfabrics of shear zones of the western orogenic front of the East African/Antarctic Orogen: result of transpressive deformation? *Geotectonic Research* 97, p. 1–3, Special Issue DRT 2015.

Studien- und Diplomarbeiten (unveröffentlicht)

- Gossen, M. (1962). Vergleich von optischen und röntgenographischen Texturaufnahmen an Bleiglanzen. Meldearbeit, August 1962.
- Dohrmann, F. (1971). Experimentelle Ermittlung der Abhängigkeit vom Verformungsgrad (bis 30 %) und vom Manteldruck (bis 5000 bar) unter Raumtemperatur von Solnhofener Kalkstein. Studienarbeit, 1971.
- Zarkesh-Fard, M. (1977). Rekristallisationsuntersuchungen an experimentell verformtem Kupferkies. Studienarbeit, August 1977.
- Rahimi-Motem, V. (1978). Erhitzungsversuche an experimentell verformten Kupferkiesen und röntgenographische Bestimmung der Umwandlungsprodukte. Studienarbeit, 1978.
- Kolahdouzha, G. (1978). Röntgenographische und optische Untersuchungen an verschiedenen Magnetkiesen (Pyrrhotinen). Studienarbeit, Dezember 1978.
- Hommm, P., Kollenberg, W. (1978). Experimentelle Verformung polykristalliner Zinkblende bei 3000 bar Manteldruck und Temperaturen zwischen 25 und 400°C. Studienarbeit, Oktober 1978.
- Lagrèze, H. (1978). Entwurf einer automatischen Meßapparatur zu Aufnahme von Druckverformungskurven an Gesteinsproben. Diplomarbeit, 1978:
- Dirks, U. (1980). Gefügeuntersuchungen an Gangartmineralien eines Hämatiterzes aus Stripa / M.Schweden. Studienarbeit, Juli 1980.
- Böcke, T. (1980). Verformbarkeit und Gefügeregelung von Dichterzen der Blei-Zink-Lagerstätte Ramsbeck unter Berücksichtigung der Genese dieser Erze. Diplomarbeit, 1980.
- Kotnik M. (1982). Erhitzungsversuche an verschiedenen Hämatiterzen zwischen $0.4 T_m$ und $0.7 T_m$ des Hämatits. Studienarbeit, Februar 1982.
- Klein, Ch. (1983). Experimentelle Verformung polykristalliner Zinkblende bei 300 MPa Manteldruck, konst. Temperatur (200°C) und konst. Belastungsraten bis zu verschiedenen Verformungsgraden. Studienarbeit, Mai 1983.
- Jansen, E. (1985). Richtungsabhängige Mikrohärtmessungen an orientierten Kupferkieskristallen. Studienarbeit, 1985.
- Klein, Ch. (1985). Charakterisierung der Mikrodeformation mittels Eindringkörpers an Hand von Hämatit- und Korund-Einkristallen verschiedener Orientierungen. Ein Vergleich zwischen theoretischen Modellen und Versuchsergebnissen. Diplomarbeit, 1986.
- Zilles, D. (1986). Charakterisierung von Verformungsmechanismen bei Mikrohärtmessungen an Hämatiteinkristallen. Studienarbeit, Juni 1986.
- Kreutzer, L.H. (1986). Tektonische und gefügekundliche Untersuchungen im Aufschlußgebiet Loka Brunn in Bergslagen, Schweden, unter besonderer Berücksichtigung der Zinkblendemineralisation. Diplomarbeit, 1986.
- Kreutzer, S. (1986). Tektonische und gefügekundliche Untersuchungen im Aufschlußgebiet Riddarhyttan, Schweden, unter besonderer Berücksichtigung der Magnetit-Hämatit-Bändererze. Diplomarbeit, 1987.
- Hechler, B. (1987). Richtungsabhängige Härtemessungen auf (110)-Spaltflächen verschiedener Zinkblendens. Studienarbeit, Oktober 1987.

- Jansen, E. (1987). Abhängigkeit kristallchemischer und kristallphysikalischer Parameter vom Chemismus verschiedener natürlicher Zinkblenden. Diplomarbeit, Januar 1987.
- Breuer, J.W.J. (1988) Tektonisch und gefügekundliche Untersuchungen im Aufschlußgebiet Slättberg (Schweden) unter besonderer Berücksichtigung der Ni-Pyrrhotin Vererzung. Diplomarbeit, 1988.
- Huppertz, J. (1988). Gefügekundliche Untersuchungen an orientierten Eisenerzproben aus Graengesberg/Mittelschweden. Diplomarbeit 1988.
- Zilles, D. (1989). Texturuntersuchungen und mikroskopische Charakterisierung von experimentell verformten polykristallinen Pyrit-Erzen. Diplomarbeit, Juni 1989.
- Mein, P. (1991). Bruchstatistische Bewertung des Scheibendruckversuches. Diplomarbeit, 1991.
- Niederschlag, E. (1992). Experimentelle Verformung von Pyrrhotin und Bestimmung der Änderung der Regelung in Abhängigkeit von der Temperatur und Orientierung. Diplomarbeit, Februar 1992.

Einige weitere relevante Literaturstellen

- Barbosa, P.F., Lagoeiro, L. (2010). Crystallographic texture of the magnetite-hematite transformation: Evidence for topotactic relationships in natural samples from Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *American Mineralogist* 95, 118–125.
- Bunge, H.-J. (1969). *Mathematische Methoden der Texturanalyse*. Akademie Verlag, Berlin, pp. 330.
- Dahms, M. (1992). The Iterative Series Expansion Method for Quantitative Texture Analysis Part II: Applications, *J. Appl. Cryst.* 25, 258-267.
- Davis, B. L. (1964). The small-circle net method in petrofabric analysis. *Amer. Jour. Sci.* 262, 307-324.
- Davis, B. L., Rapp, G. Walawander, M.J. (1968). Fabric and structural characteristics of the martitization process. *American Journal of Science* 266, 482 - 496.
- Donath, F.A. (1968). The development of kink bands in brittle anisotropic rock. *Geol. Soc. Memoir* 115, p. 458.
- Paulitsch, P. (1963). Ein Röntgen-Universaldrehtisch. *Fortschritte der Mineralogie* 41, 158-159.
- Paulitsch, P., Schicht, R., Mons, W. (1967). Zur Gefügeregelung von Hämatit. *Naturwissenschaften* 54, 88.
- Riechert, L. (1966). Der Zählrohr-U-Tisch. *Schweiz. Miner. Petro. Mitt.* 46, 121-136.
- Starkey, J. (1964). An X-ray method for determining the orientation of selected crystal planes in polycrystalline aggregates. *American Journal of Science* 262, 735-752.
- Wenk, H.-R. (1963). Eine Gefüge-Röntgenkamera. *Schweiz. Miner. Petro. Mitt.* 43, 707-719.
- Wenk, H.-R. (1965). Eine photographische Röntgen-Gefügeanalyse. *Schweiz. Miner. Petro. Mitt.* 45, 518-550.