

NEUTRONENTEXTURMESSUNGEN IN DEN GEOWISSENSCHAFTEN:

Kristallographische und magnetische Vorzugsorientierungen von verschiedenen Gesteinstypen

Von Anke Hansen

Das Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik der TU Clausthal unterhält am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht eine Außenstelle unter Leitung von Prof. Brokmeier. Das Geesthachter Forschungszentrum, das seit 2001 Mitglied in der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) ist, betreibt in Geesthacht einen Mittelflussneutronenreaktor. Die dort produzierten Neutronen werden in der an das Reaktorgebäude angeschlossenen Versuchshalle für wissenschaftliche Experimente mit materialwissenschaftlichem Schwerpunkt zur Verfügung gestellt. Eines der dort installierten Versuchseinrichtungen ist das von Prof. Brokmeier und seiner Arbeitsgruppe betreute Neutronentexturdiffraktometer TEX-2. Das Gerät ist sowohl für die Untersuchung werkstoffwissenschaftlicher Proben wie Metalle, Legierungen und Verbundwerkstoffe als auch für Gesteine optimiert. Die Neutronen werden dazu eingesetzt, die räumliche Orientierung der Kristalle, aus denen das Probenmaterial aufgebaut ist, zu ermitteln. Die Orientierungsverteilung der Kristalle bestimmt entscheidend die Materialeigenschaften eines kristallinen Körpers mit und ist daher beispielsweise bei der Legierungsentwicklung von großer Bedeutung.

Bild 1 zeigt Aufbau (links) und Funktionsschema (rechts) von TEX-2. Der Neutronenstrahl verlässt die sogenannte Abschirmburg (CNS), in der er kollimiert und monochromatisiert wird, durch die weiße Blende (obere Bildmitte) und trifft auf die Probe. Diese ist in einer Eulerwiege eingespannt und daher in alle Raumrichtungen drehbar. Die an der Probe gebeugten Neutronen treten in ein Vakuumstrahlrohr ein und werden zum Detektor (Helium-Einzelzähler) geführt.

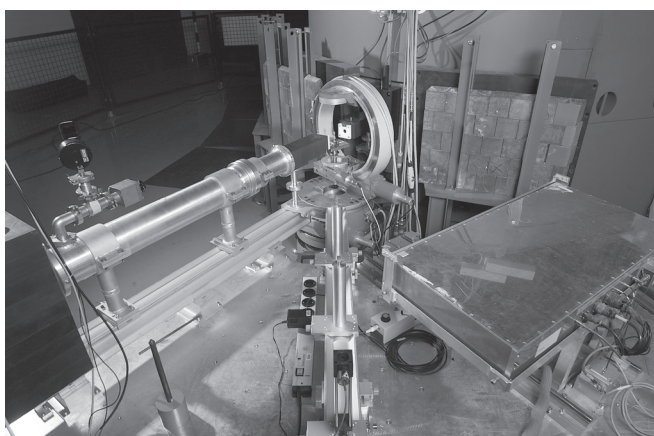
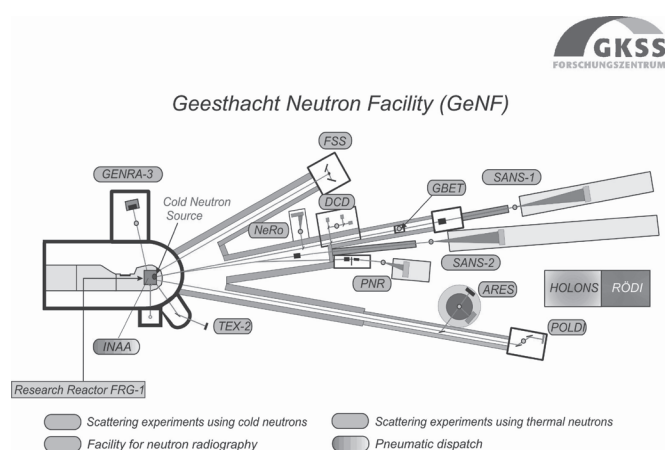


Bild 1: Das Neutronentexturdiffraktometer TEX-2 in der Versuchshalle des GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

Auch für geologische Proben ist die Kenntnis von der räumlichen Orientierung der Kristalle notwendig, zum einen um Rückschlüsse auf Verformungsprozesse aus der geologischen Vergangenheit zu ziehen und zum anderen, um kristallographische Vorzugsorientierungen mit physikalischen Materialeigenschaften zu korrelieren und damit geophysikalische Modelle verbessern zu können.

Neutronen bieten gegenüber konventioneller Röntgenstrahlung, die auch für Texturuntersuchungen eingesetzt wird, entscheidende Vorteile hinsichtlich der Eindringtiefe in das Probenmaterial. Besonders für natürliche Materialien wie Gesteine ist eine große Eindringtiefe der Strahlen in das Probenmaterial notwendig, da es sich häufig um vielphasige Zusammensetzungen mit unterschiedlichen Korngrößen handelt. Die große Eindringtiefe der Neutronen in das Probenmaterial gewährleistet die Erfassung des gesamten Probenvolumens und damit einer statistisch ausreichenden Anzahl an Kristalliten. Andererseits ermöglicht die Texturmessung mit Neutronen einen zerstörungsfreien Messvorgang, der es erlaubt, das untersuchte Probenmaterial für weitere Forschungen erneut zu verwenden.

In der auf der *European Conference on Neutron Scattering (ECNS)* im September 2003 vorgestellten Arbeit wurden drei Fallstudien verschieden alter und unterschiedlich stark verformter Gesteinstypen behandelt.



Quartäre Tonsteine aus Sizilien, ca. zwei Millionen Jahre alt, schwach verformt

Das aus geologischer Sicht junge Probenmaterial zeigt äußerlich keine Spuren einer verformenden Beanspruchung, stammt jedoch aus einem tektonisch auch heute noch sehr aktiven Gebiet. Der Mittelmeerraum stellt geologisch einen Bereich mit einer komplexen geotektonischen Situation dar, der durch zahlreiche Zonen erhöhter Erdbebenaktivität charakterisiert ist. Um die Erdbebenvorhersage zukünftig zu verbessern, sollte eine Dokumentation der Bebenaktivität der jüngeren geologischen Vergangenheit erfolgen. Dazu wurden Tonsteine aus Gebieten mit einer extensiven, d.h. dehrenden tektonischen Beanspruchung entnommen. Die zwei Zentimeter hohen Zylinder mit einem Durchmesser von ebenfalls zwei Zentimetern wurden zuerst auf ihre Magnetisierbarkeit mit einer sogenannten Kappabrücke, einer Schwachfeld-Induktionsbrücke, untersucht. Da die Magnetisierbarkeit bei allen Proben eine Vorzugsrichtung zeigte, wurden die Proben anschließend im Neutronentexturdiffraktometer untersucht. Die dort vorgenommenen Messungen sollten zeigen, ob die Vorzugsrichtung der Magnetisierbarkeit mit einer Vorzugsrichtung der Kristallite einhergeht. Entscheidend dabei war auch die Klärung der Frage, welche Mineralart für die Magnetisierbarkeit des Gesteins verantwortlich ist. **Bild 2** zeigt exemplarisch die Ergebnisse von drei Messungen, aus denen hervorgeht, dass die Richtungen der schwächsten Magnetisierbarkeit (k_{\min}) jeweils mit dem Maximum der kristallographischen c-Achsenverteilung von Chlorit zusammenfallen. Die Verteilung der Kristallachsen, die das Ergebnis der Neutronentexturuntersuchungen darstellt, ist im Bild als zweidimensionales Isoliniendiagramm wiedergegeben und wird als Polfigur bezeichnet, da sich daraus die Poldichteverteilung einer kristallographischen Fläche, in diesem Fall der Basalfläche von Chlorit, ergibt. Die Richtung der leichtesten Magnetisierbarkeit k_{\max} stimmt überein mit der Hauptdehnungsrichtung im Gelände. Diese, für den Betrachter nicht verformt erscheinenden Gesteine haben also sehr wohl eine Verformung erfahren, die sich in einer bevorzugten Einregelung der Kristalle zeigt und durch die Untersuchung mit Neutronenbeugung „sichtbar“ gemacht werden kann. Durch diese Untersuchungen konnte zum einen die Übereinstimmung kristallographischer und magnetischer Gefüge gezeigt werden; zum anderen wurde deutlich, dass sich die Richtung der stärksten Magnetisierbarkeit in einem Gebiet dehrender Beanspruchung parallel zur Hauptdehnungsrichtung ausrichtet.

Mit diesen Erkenntnissen lassen sich nun die wechselnden Spannungsfelder, denen der Mittelmeerraum in der jüngsten geologischen Vergangenheit ausgesetzt war, im Detail nachvollziehen und dokumentieren.

Karbonische Tonschiefer aus dem Böhmischem Massiv, Tschechische Republik

Die Gesteine der zweiten Fallstudie stammen aus einem Gebiet kompressiver Tektonik und wurden während einer Gebirgsbildung verformt. Auch in diesem Fall wurde die Orientierungsverteilung des Minerals Chlorit mit Neutronen untersucht. Dabei wurde eine starke Einregelung des Minerals

festgestellt, die mit der Stärke der Verformung, der das Gestein ausgesetzt war, deutlich zunimmt. Das Mineral Chlorit reagiert besonders schnell auf Beanspruchungen und orientiert sich mit seiner Basalfläche senkrecht zur größten Beanspruchungsrichtung. Diese Neuorientierung der Kristalle ist für Geologen ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beurteilung der Verformungsintensität, der ein Gestein ausgesetzt war. In den schwächer deformierten Gebieten des Untersuchungsbereichs liegt diese kristallographische Fläche parallel zur Schichtung des Gesteins, in den stärker verformten Bereichen parallel zur Schieferung. Diese Vorzugsorientierung kann mit Hilfe des Neutronentexturdiffraktometers bereits festgestellt werden, bevor sie mikroskopisch sichtbar wird.

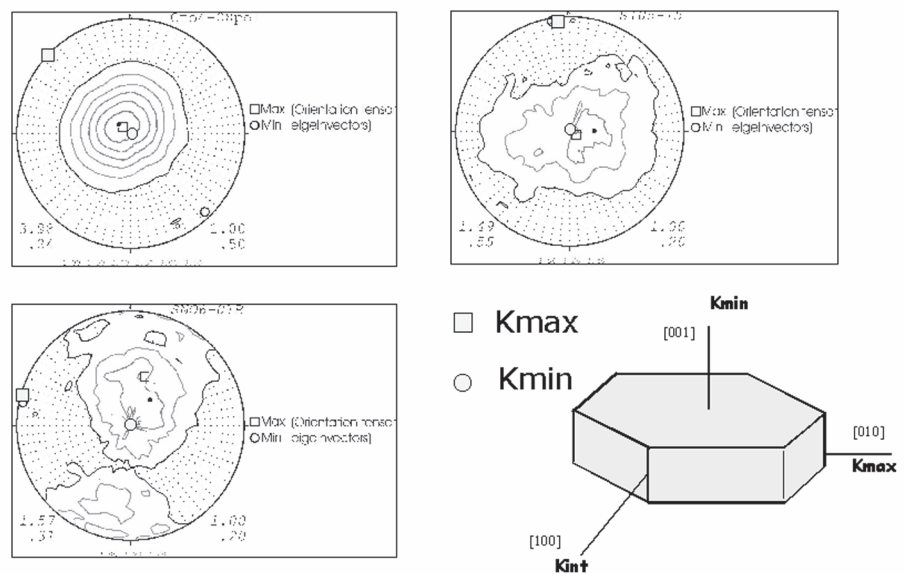


Bild 2: Messungen an quartären Tonsteinen

Es sind drei Polfiguren der Chlorit-Basalflächenverteilung dargestellt. Die Maxima dieser Isolinienverteilungen korrespondieren mit der Richtung minimaler Magnetisierbarkeit der Proben. Die Hauptachsen der magnetischen Suszeptibilität in einem Chlorit-Einkristall sind unten rechts dargestellt.

Damit lassen sich die einzelnen Zonen eines Gebirgskomplexes nun viel genauer voneinander abgrenzen und damit auch besser hinsichtlich ihrer Entwicklungsgeschichte verstehen. Das Mineral Chlorit ist Indikator einer fortschreitenden Verformung und markiert die einzelnen Bereiche unterschiedlich starker Verformungsintensität.

Präkambrische Eisenerze aus dem Eisernen Viereck, ca. 2 Milliarden Jahre alt, Brasilien

Im letzten Beispiel wurden Gesteine des Erdaltertums untersucht, die im Laufe ihrer langen geologischen Vergangenheit eine komplexe Verformungsgeschichte während mehrerer Gebirgsbildungsprozesse aufzuweisen haben. Das Probenmaterial entstammt dem sogenannten „Eisernen Viereck“, einer markanten geologischen Struktur im brasilianischen Bundesstaat Minas Gerais (**Bild 3**). Entlang dieser nahezu viereckigen Grundform befinden sich zahlreiche Eisenerzgruben, die auch für den deutschen Eisenerzmarkt produzieren. Aus mehreren brasilianischen Gruben (Águas Claras, Mutuca und Conceição) und zum Vergleich aus einer kanadischen Eisenerzgrube (Fire Lake) wurde Probenmaterial entnommen und im Hinblick auf kristallographische und magnetische Eigenschaften untersucht. Das Trägermineral für die Magnetisierbarkeit war in diesem Falle nicht wie bei den ►

vorab beschriebenen Beispielen Chlorit, sondern das Eisenerzmineral Hämatit (Fe_2O_3). Die räumliche Verteilung der Magnetisierbarkeit eines Gesteins, also dessen magnetische Suszeptibilität, kann im dreidimensionalen Raum als Ellipsoid dargestellt werden. Zweckmäßiger ist jedoch die Angabe des Anisotropiegrades (corrected degree of anisotropy), der im Diagramm gegen den Grad der Vorzugsorientierung der Basalfläche von Hämatit aufgetragen ist. Die gute Korrelation der beiden Parameter zeigt, dass das magnetische Gefüge von hämatitischen Eisenerzen ausschließlich von der Basalfächenorientierung des Minerals Hämatit bestimmt wird. Der Regelungsgrad dieser kristallographischen Fläche ist zudem ein Maß für die Verformung, die das Eisenerz erfahren hat.

Die Messung der kristallographischen Basisfläche von Hämatit kann mit Neutronen besonders gut durchgeführt werden, da es sich hier um einen sogenannten „magnetischen Reflex“ handelt, der nur durch die Verwendung von Neutronen und nicht mit der konventionell zur Texturmessung eingesetzten Röntgenstrahlung genutzt werden kann.

Neutronenpolfigurmessungen bieten demnach auch für die Untersuchung von geologischen Proben entscheidende Vorteile. Ein wesentlicher Nachteil ist allerdings die relativ geringe und extrem teure Verfügbarkeit von Neutronen, die an den Betrieb eines Forschungsreaktors bzw. einer Spallationsquelle gebunden sind.

Mein Dank gilt Francesca Cifelli (Universität Rom) und Martin Chadima (Universität Brno), die als Messgäste am Neutronentexturdiffraktometer TEX-2 in Geesthacht Polfigurmessungen an ihrem Probenmaterial durchgeführt haben und daher wesentliche Ergebnisse zu den vorgestellten Fallstudien erarbeitet haben.

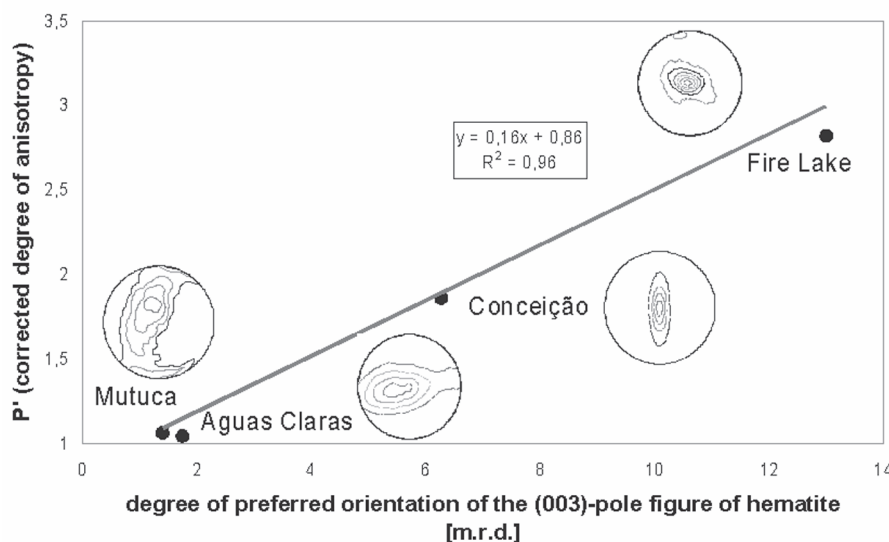


Bild 3: Untersuchung an präkambrischen Eisenerzen

Aufgetragen ist der korrigierte Anisotropiegrad der Magnetisierbarkeit über dem Regelungsgrad der (003)-Polfiguren von Hämatit. Zusätzlich zeigen die Hämatit-Polfiguren eine Tendenz von einer gürtelförmigen zur kreisförmigen Anordnung und belegen damit die zunehmende Verformungsintensität.

Dr. Anke Hansen
GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Max-Planck-Straße 1
21502 Geesthacht
Telefon: 04152/87-1676
Fax: 04152/87-1723
E-Mail: anke.hansen@gkss.de

Your best way to make
the most of every well.

HALLIBURTON

DON'T LOSE THIS ADDRESS
IT'S LIKE LOSING A
MILLION DOLLARS

29227 Celle · Hans-Heinrich-Warneke-Str. 12
Phone: 051 41/999-0 · Fax: 051 41/9991 68