SITZUNGSBERICHTE DER LEIBNIZ-SOZIETÄT

Band 70 • Jahrgang 2004

trafo Verlag Berlin ISSN 0947-5850 ISBN 3-89626-496-6

Inhalt

Neue Ergebnisse der Geo- und Kosmoswissenschaften

- 01 Zum Geleit
- 02 Wissenschaftliches Kolloquium des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften - Dokumentation der Ergebnisse
- 03 Horst Montag: Gedanken zur faszinierenden Entwicklung der Geodäsie seit den 1950er Jahren
- 04 Diedrich Möhlmann: Wasser in der Marsoberfläche
- 05 Karl-Heinz Marek: Zu Visionen der bemannten Raumfahrt
- 06 Heinz Militzer: Einige Ergebnisse aus tiefenseismischen Untersuchungen im Rahmen des UMP
- 07 Peter Bankwitz: Tiefkrustale Bildung von Klüften in Granitplutonen
- 08 Alexander Frischbutter, Kurt Walther und Christian Scheffzück: Diffraktionsexperimente zur intrakristallinen Strainmessung mit Neutronenund Synchrotronstrahlung an geologischen Materialien
- 09 Günter Leonhardt: Die Sanierung der Wismut-Hinterlassenschaft

Wissenschaftliche Mitteilungen

10 Georg Kowalle: Die wissenschaftliche Kooperation auf dem Gebiet der Seismologie im Rahmen der KAPG, 1966-1990

11 Fritz Gackstatter: Separation of the Restricted 3-Body Problem in Kepler's Sense with Applications to Moon Theory, Resonance Phenomena and Gravitational Waves

12 Laudatio anläßlich des 70. Geburtstages von Heinz Kautzleben

13 Dank des Jubilars

Wissenschaftliches Kolloquium des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften am 29. April 2004 zu Problemen von Geophysik, Geodäsie, Weltraumforschung, Geologie und Montanwissenschaften¹ - Dokumentation der Ergebnisse -

Einführung:

Das Interessengebiet des Arbeitskreises ist weit gefächert, was die Gefahr mit sich bringt, daß die Spezialisten auf getrennten Ebenen forschen und wirken, ein förderlicher Austausch fehlt und die wissenschaftliche und gesellschaftliche Wirkung der speziellen Forschungsergebnisse beeinträchtigt wird. Kolloquien der Art wie vom Arbeitskreis am 29. April 2004 praktiziert, bei dem die Spezialisten mehrerer Gebiete zusammenkommen und ihre Ergebnisse unter interdisziplinären Gesichtspunkten miteinander vergleichen und diskutieren, sind deshalb dringend erforderlich. Der Arbeitskreis nahm mit dem Kolloquium eine Praxis auf, die über zwei Jahrzehnte im damaligen Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR mit Erfolg gepflegt worden war. Es ist zu hoffen, daß es nicht bei diesem "Aufflackern eines noch glimmenden Feuers" bleiben wird. Die Publikation der sieben Vorträge zum Kolloquium, die Originalarbeiten waren, im vorliegenden Band der "Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät" verschafft dieser Hoffnung eine solide Grundlage. Das gilt auch für die weiteren sechs Vorträge zum Kolloquium, in denen über Ergebnisse berichtet wurde, die bereits vor kurzem an anderer Stelle veröffentlicht worden sind..

In folgenden Vorträgen bezogen sich die Autoren auf ihre bereits publizierten Ergebnisse:

• Siegfried Franck, Potsdam: Auf der Suche nach der zweiten Erde (Bezug: Christine Bounama, Werner von Bloh und Siegfried Franck – Wo sind die Zwillinge der Erde? Sterne und Weltraum, Januar 2004, 30–36)

¹ Das Kolloquium wurde von Peter Bankwitz vorbereitet. Als Moderatoren wirkten Karl-Heinz Bernhardt, Peter Bankwitz und Heinz Militzer.

- Ludwig Grunwaldt, Potsdam: Thermosphärische Dichtestrukturen aus Beschleunigungsmessungen auf CHAMP (Bezug: H. Lühr, M. Rother, W. Köhler, P. Ritter, L. Grunwaldt – Thermospheric up-welling in the cusp-region, evidence from CHAMP observations. Geophys. Res. Letters, vol. 31, L06805, doi:10.1029/2003GL019314, 2004)
- Albrecht Schulze, Potsdam: Petrologische Interpretationen seismischer Daten
- Werner Stackebrandt; Kleinmachnow: Airborne-Laserscanning eine neue Methode für die Brandenburgische Landesgeologie (Bezug: Werner Stackebrandt – Airborne Laserscanning für geologische Detailuntersuchungen und Abwehr bergbaubedingter Gefahren im Muskauer Faltenbogen, Südost-Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Kleinmachnow, 10 (2003), 1/2, S. 1–6)
- Jürgen Kopp, Kleinmachnow: Grundgebirgsgeologie in Brandenburg: Aufgabenspektrum und Notwendigkeit zur internationalen Zusammenarbeit (Bezug: Jürgen Kopp und Peter Bankwitz Die Europäische Kristallinzone (EKZ) eine Übersicht. Z. geol. Wiss., Berlin 31 (2003) 3, 179–196. Jürgen Kopp, Peter Bankwitz und Rudolf Naumann Magmenentwicklung im Wirkungsfeld einer transregionalen Scherzone: Geochemie und Geochronologie der Metamorphite der Bohrung Schleusingen 3/63. Z. geol. Wiss. 30 (2002) 4/5, 293–315)
- Horst Kämpf, Potsdam: Triggern Erdbeben bakterielle Aktivität? (Bezug: Karin Bräuer, Horst Kämpf, Gerhard Strauch, and Stephan M. Weise Isotopic evidence ³He/⁴He, ¹³C_{CO2}) of fluid-triggered intraplate seismicity. J. Geophysical Research, 108, No. B2, 2070, doi:10.1029/2002JB002077, 2003, ESE 3-1 3-11)

Folgende Vorträge werden als Originalarbeiten abgedruckt:

- Horst Montag, Brandenburg (Havel): Gedanken zur faszinierenden Entwicklung der Geodäsie seit den 1950er Jahren
- Diedrich Möhlmann, Berlin: Wasser in der Marsoberfläche
- Karl-Heinz Marek, Glindow: Zu Visionen der bemannten Raumfahrt
- Heinz Militzer, Eichwalde: Einige Ergebnisse aus tiefenseismischen Untersuchungen im Rahmen des Projektes "Oberer Erdmantel" (UMP)
- Peter Bankwitz, Potsdam: Tiefkrustale Bildung von Klüften in Granitplutonen
- Alexander Frischbutter, Potsdam, mit K. Walther und Ch. Scheffzük: Diffraktionsexperimente zur intrakristallinen Strainmessung mit Neutronen-

und Synchrotronstrahlung an geologischen Materialien

• Günter Leonhardt, Gera: Die Sanierung der Wismut-Hinterlassenschaft

Die Vorträge erhellten zum einen den großen Fortschritt, den die Entwicklung der Fachwissenschaften in den letzten 50 Jahren gebracht hat (H. Montag. H. Militzer), zum andern boten die Vorträge faszinierende Einblicke in die naturwissenschaftliche Forschung der kommenden Jahre und Jahrzehnte. Eine Vorausschau auf zukünftiges Wissen, wie es dem Menschen möglich sein wird, lieferte vor allem die Befassung mit dem Weltraum (S. Franck, D. Möhlmann, L. Grunwaldt) und der Raumfahrt (K.-H. Marek), aber auch der Blick in die Tiefe des Erdkörpers (H. Kämpf, A. Schulze, P. Bankwitz) oder in das Innere der Materie (A. Frischbutter). Zwischen diesen beiden Komplexen der rückblickenden Analyse und der vorauseilenden Findung neuer Annahmen sind geologische Ergebnisse zur obersten Erdkruste angesiedelt, die zum Verständnis und zur Sicherung des Lebensraumes des Menschen beitragen (J. Kopp, G. Leonhardt, W. Stackebrandt). In den Diskussionen, die bei der Überarbeitung der Vortragsmanuskripte für die Publikation beachtet wurden, wurden viele Querbezüge zwischen den verschiedenen Vorträgen sichtbar.

Peter Bankwitz und Heinz Kautzleben

Neue Ergebnisse der Geo- und Kosmoswissenschaften

Zum Geleit

Im Wissenschaftsgebiet "Geo- und Kosmoswissenschaften" wird eine große Zahl von etablierten Disziplinen – von der Geographie bis zur Kosmologie – zusammengefaßt. Gemeinsam befassen sie sich mit der allseitigen Erforschung des engeren und weiteren Lebensraumes der Menschheit. Ihr Ziel ist ein tieferes Verständnis der Erde und des Weltalls einschließlich der Stellung des Menschen im Universum als Grundlage und Voraussetzung zur rationellen, nachhaltigen Nutzung der Geosphäre durch und für den Menschen. Dabei wird immer deutlicher, daß die Nutzung mit der Verantwortung für den Schutz verbunden ist. Mit dieser Beschreibung des Gebietes werden auch seine sozialwissenschaftlichen Aspekte erfaßt. Das Ziel kann nur erreicht werden, wenn alle Disziplinen auf möglichst hohem wissenschaftlichem Niveau betrieben werden, ihre speziellen Zielstellungen der gemeinsamen Zielstellung angepaßt sind und die Arbeiten multi-, trans- und interdisziplinär durchgeführt werden. Die Leibniz-Sozietät, ihre beiden Klassen und speziell ihr Arbeitskreis Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften tragen dazu in akademiespezifischer Weise bei. Die Arbeitskreise der Sozietät stellen neben den beiden Klassen eine neue Organisationsform für mehr themengebun-Regel jedoch interdisziplinäre dene. in aller Vorhaben Gelehrtengesellschaft dar.

In den beiden Bänden Nr. 70 und 71 der "Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät"werden neue Ergebnisse der Geo- und Kosmoswissenschaften dargelegt, die in jüngster Zeit erarbeitet worden sind. Dabei machte die Fülle des Materials eine Aufteilung auf die Themenkreise der Geodäsie und der Physik der festen Erde, der Weltraum- und Planetenforschung, der Geologie sowie der Bergbauwissenschaften (im Band Nr. 70) und der atmosphärischen Wissenschaften, der geophysikalischen Hydrodynamik und Zeitreihenanalyse (im Band Nr. 71) erforderlich.

Thematisch schließt der vorliegende erste der beiden Bände an ein Kolloquium an, das der Arbeitskreis Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissen-

schaften, vorbereitet von Peter Bankwitz, am 29. April 2004 aus Anlaß des 70. Geburtstages seines Sprechers, Heinz Kautzleben, veranstaltet hat. Die nachfolgend abgedruckten Beiträge beruhen auf den Vorträgen, sind jedoch sämtlich von ihren Verfassern überarbeitet und zumeist wesentlich erweitert worden. Als Sprecher des Arbeitskreises hat Heinz Kautzleben die Zusammenstellung und Redaktion des Bandes übernommen.

Die Thematik dieser Beiträge reicht von der Mechanik der Kluftbildung in der tiefen Erdkruste über die Interpretation tiefenseismischer Gemeinschaftsuntersuchungen bis zur Sanierung bergbaulicher Altlasten, neuesten Ergebnissen von Planetenmissionen und den Perspektiven bemannter Raumfahrt. Erkenntnisgewinn durch interdisziplinäres Herangehen wird ergänzt durch wissenschaftshistorische Betrachtung, die im Sinne Goethes – "die Geschichte der Wissenschaft ist die Wissenschaft selbst" – gegenwärtiges Wissen als etwas Gewordenes und in ständigem Wandel Befindliches begreift. Abgerundet wird die Zusammenstellung von Aufsätzen aus der Feder von Mitgliedern wie von Gästen der Leibniz-Sozietät mit einer Auflistung an anderer Stelle bereits publizierter Ergebnisse zur Thematik des Heftes sowie durch eine Rezension.

Aus gegebenem Anlaß seien noch einige Worte zur Person Heinz Kautzlebens angefügt, der am 31. März 2004, ein Vierteljahrhundert nach seiner Wahl in die seinerzeitige Akademie der Wissenschaften der DDR, sein siebentes Lebensjahrzehnt vollendet hat. Seine wichtigsten wissenschaftlichen und wissenschaftsorganisatorischen Leistungen sind von berufener Seite in einer Laudatio umrissen, die ebenso wie die Erwiderung Heinz Kautzlebens bereits in der turnusmäßigen Sitzung der Klasse Naturwissenschaften am 15. April vorgetragen wurde – beide Dokumente bilden den Abschluß des vorliegenden Bandes.

Mit seinen vielfältigen wissenschaftlichen Leistungen und als Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde seit 1973, später des Instituts für Kosmosforschung und dazu als langjähriger Leiter des Forschungsbereichs Geound Kosmoswissenschaften sowie schließlich als Sekretär für Geo- und Kosmoswissenschaften, verbunden mit der Wahrnehmung verantwortungsvoller internationaler Aufgaben und Funktionen bis hin zur Antarktisforschung, steht der Jubilar in der Tradition interdisziplinärer geo- und astrophysikalischer Forschung von Weltgeltung, die mit der Inbetriebnahme des Magnetischen Observatoriums auf dem Telegraphenberg am 3. Oktober 1889 ihren Anfang nahm und an die nach dem Beitritt der DDR zur BRD das heutige Geoforschungszentrum Potsdam anknüpfen konnte, aus nichtwissenschaftlichen

Zum Geleit 7

Gründen freilich unter Verzicht auf bedeutendes angestammtes intellektuelles Potential.

Angesichts des Engagements, mit dem Heinz Kautzleben Wissenschaft und Wissenschaftsorganisation als Lebensinhalt betrieben hat, findet sich sein Name folgerichtig auf der ersten, 54 Namen enthaltenden Mitgliederliste der Leibniz-Sozietät aus dem Jahre 1993. Seither ist der Jubilar mit weiteren zahlreichen Beiträgen und Publikationen zur aktuellen Entwicklung seines Fachgebietes, aber auch mit originären Gedanken zu historisch-philosophischen Aspekten geokosmos- und umweltwissenschaftlicher Disziplinen wie zu ihrer Wirksamkeit in der gegenwärtigen Welt hervorgetreten, hat den von ihm angeregten Arbeitskreis Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften zu einem der aktivsten Arbeitskreise der Sozietät entwickelt und als Geschäftsführer der Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät initiativreich für die materielle Unterstützung der Gelehrtengesellschaft gewirkt.

In seiner Erwiderung auf die ihm gewidmete Laudatio hat unser Jubilar seine künftigen Vorhaben in der Leibniz-Sozietät skizziert – dafür wünschen wir ihm stabile Gesundheit und ungeminderte Schaffenskraft im achten Lebensjahrzehnt!

Karl-Heinz Bernhardt

Gedanken zur faszinierenden Entwicklung der Geodäsie seit den 1950er Jahren

1. Einige Bemerkungen zum Stand der Landesvermessung Mitte der 1950er Jahre

Ziel der Landesvermessung ist die Schaffung geodätischer Grundlagennetze für die Lage, die Höhe und das Schwerefeld als Referenzrahmen für alle weiteren Vermessungen eines Landes. Die klassische Meßmethode für die Lage-Grundlagennetze war die Triangulation. Die auf diese Weise geschaffenen großräumigen geodätischen Netze waren prinzipiell auf die Kontinente beschränkt, da die Ozeane, abgesehen von einigen Meerengen, nicht überbrückt werden konnten. Sie waren also immer nur "Insellösungen". Die in den 1950er Jahren aufkommenden Mikrowellenentfernungsmessungen über große Distanzen ermöglichten neben den Triangulationsnetzen auch die Punktbestimmung durch Trilaterationsnetze. Die erwähnten Einschränkungen trafen aber auch auf die Trilaterationsnetze zu, und auch das Genauigkeitspotential blieb in der gleichen Größenordnung.

Die instrumentelle Ausrüstung bestand im Wesentlichen aus Sekundentheodoliten für astronomische Anschlussmessungen und die Triangulationen, aus Invardrähten für die Basismessungen zur Bestimmung des Maßstabes des Netzes und den ersten Mikrowellenentfernungsmessern für die Trilaterationen. Großen Aufwand erforderte der Bau von Signaltürmen über den trigonometrischen Punkten zur Gewährleistung der direkten Sicht über die großen Distanzen. Für die Höhenreferenznetze dienten Präzisions-Libellennivellierinstrumente (und erste Kompensatornivelliere) und für die Schwere-Grundlagennetze wurden neben wenigen stationären Pendelapparaten vor allem Präzisions-Federgravimeter eingesetzt.

Parallel bzw. im Vorlauf zu den Entwicklungen der Messtechnik wurden die Lösungen der theoretischen Probleme (ellipsoidische Rechnung und Abbildung, Theorie der physikalischen Höhen, Potentialtheorie) entsprechend

den jeweiligen Anforderungen ständig verfeinert. Die Hilfsmittel zur Auswertung der Messdaten entsprechend diesen Theorien waren allerdings in Anbetracht heutiger Möglichkeiten sehr bescheiden. Sie waren geprägt durch Formulare, Logarithmentafeln (9- oder mehrstellig, Interpolation mit zweiten Differenzen), Astronomische Jahrbücher und mechanische Rechenmaschinen (meist Doppellaufwerk zur gleichzeitigen Berechnung von x und y).

Die bei den klassischen Grundlagenvermessungen für die Lagekoordinaten angewendeten Mess- und Auswertemethoden wurden zwar im Laufe der Jahrzehnte immer weiter verbessert, ihre Fortschritte wurden aber zunehmend geringfügiger. Das Genauigkeitspotential erreichte Mitte der 1950er Jahre etwa 10⁻⁵ bis 10⁻⁶ und war damit quasi erschöpft. Die klassischen Methoden waren so praktisch zu ihrem Höhepunkt gelangt.

2. Satelliten revolutionieren die Geodäsie

Mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 wurde auch in der Geodäsie eine neue Ära eröffnet, die Satellitengeodäsie entstand. Erstmalig wurde eine globale Vermessung der Erde mit geodätischer Genauigkeit möglich. Damit ist eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über die Größe und Figur der Erde, über geometrische und physikalische Parameter der Erde, verbunden. Die hohe Genauigkeit enthüllte auch die zeitliche Variation der meisten dieser Parameter.

Der hohe Genauigkeitssprung durch die Satellitengeodäsie lässt sich anschaulich durch zwei Beispiele charakterisieren. Die geometrische Methode der Satellitengeodäsie wurde auch schon auf unseren natürlichen Satelliten, den Mond, angewendet. J. A. Euler benutzte ihn um 1770 erstmalig für Aufgaben der Gradmessung. Nimmt man die gleiche Genauigkeit für die Richtungsmessung ($\leq \pm 1''$) an, so ergibt sich allein aus der günstigeren Geometrie bei künstlichen Erdsatelliten (Höhe z.B. 1000 km) eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 400. Noch größer ist der Effekt bei den Methoden der dynamischen Satellitengeodäsie. Sie wurden erstmals von P. S. Laplace (1749-1827) auf den Mond angewandt, um aus der Knotenbewegung des Mondes die Erdabplattung abzuleiten. Vergleicht man die durch die Erdabplattung verursachte Knotenbewegung des Mondes von etwa 6,2"/a mit derjenigen eines künstlichen Erdsatelliten von (je nach Bahn) etwa 6°/d, so ergibt sich allein aus diesem Phänomen – wieder bei gleicher Messgenauigkeit - eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 10⁶! Das bestätigt in beeindruckender Weise, dass große Erkenntnissprünge in der Wissenschaft oder Technik nur durch neue Prinziplösungen möglich sind. Zusätzlich wurde natürlich im Laufe der Zeit auch die Messgenauigkeit ständig weiter verbessert; aber auch auf dem Gebiet der Messtechnik wurden Genauigkeitssprünge nur durch die Anwendung neuer Wirkprinzipien erzielt (z. B. Laser, VLBI).

Klassische Geodäsie versus Satellitengeodäsie

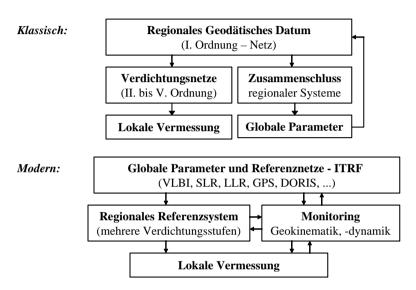


Fig. 1: Prinzip der Schaffung globaler und regionaler geodätischer Referenzsysteme: Vergleich der klassischen mit der modernen Vorgehensweise

Die prinzipielle Vorgehensweise beim Aufbau geodätischer Netze als Realisierung bzw. Manifestierung eines geodätischen Referenzsystems ist aus Fig 1 erkennbar. In klassischer Zeit stand am Beginn die Schaffung eines Triangulationsnetzes I. Ordnung (Punktabstand 30 km bis 50 km, Winkelmessungen, Maßstab durch Basismessungen und anschließende Übertragung auf nahegelegene Dreiecksseiten I. Ordnung durch Basisvergrößerungsnetz). Das wurde dann verdichtet über Netze II. bis V. Ordnung (unterschiedlich in einzelnen Ländern) bis zu Aufnahmepunkten für lokale Vermessungen. Die Verdichtung erfolgte also "vom Großen ins Kleine", wobei das "Große" aber bestenfalls eine Ländergruppe war. Ein Problem bestand darin, dass für die Berechnungen der Dreiecke I. Ordnung auf der gekrümmten Erdoberfläche die Kenntnis globaler Parameter eine Voraussetzung war. Wegen der zweckmäßigen Approximation der Erde durch ein Ellipsoid betraf das die Parameter eines Ellipsoids und dessen Orientierung. Diese Parameter – als

"Geodätisches Datum" bezeichnet – waren aber aus kleinen Landesnetzen nur unvollkommen bestimmbar, so dass insbesondere seit Mitte des 19. Jahrhundert durch die Aktivitäten vieler berühmter Geodäten Bestrebungen zum Zusammenschluss verschiedener Landesnetze unternommen wurden (Beginn mit der Mitteleuropäischen Gradmessung durch J. J. Baeyer im Jahre1862 über die Europäische Gradmessung 1867, die Internationale Erdmessung 1886 bis schließlich zur heutigen Internationalen Assoziation für Geodäsie innerhalb der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik). Auf diese Weise wurde sukzessive ein regional bestanschließendes Ellipsoid einschließlich astronomischer Orientierung im Raum bestimmt. Damit stand der jeweils beste Parametersatz zur Verfügung, der für die Berechnung der ellipsoidischen Koordinaten großräumiger geodätischer Grundlagennetze der Landesvermessung verwendet werden konnte.

Im Zeitalter der kosmischen bzw. Satellitengeodäsie ist das grundsätzlich anders. Am Anfang stehen hier globale Netze, da die höchsten Genauigkeiten erreicht werden, wenn von global verteilten Stationen die Satelliten mit unterschiedlichen (und redundanten) Verfahren beobachtet werden (Satelliten bewegen sich um die ganze Erde und halten sich auch nicht an politische oder andere Grenzen). Auf diese Weise gelingt erst durch satellitengeodätische Verfahren die Bestimmung eines geozentrisch gelagerten mittleren Erdellipsoids, welches das Geoid global am besten approximiert. Die aus den Analysen erhaltenen geozentrischen 3-D-Koordinaten der weltweit verteilten Stationen stellen die Realisierung des globalen Referenzsystems dar. Die weitere Verdichtung kann relativ beliebig, ohne die strenge schrittweise Vorgehensweise, erfolgen, da die Genauigkeit nur unwesentlich vom Abstand der Punkte abhängt. Das klassische Prinzip "vom Grossen ins Kleine" kann also eigentlich erst durch die modernen Verfahren verwirklicht werden. Die hohe Genauigkeit, die heute erreicht wird, macht es notwendig, einerseits eine Vielzahl geokinematischer und geodynamischer Parameter zu berücksichtigen, andererseits bietet sie auch die Möglichkeit, diese Effekte immer genauer zu analysieren.

Die Mess- und Auswerteverfahren der klassischen und Satellitennetze sind in Fig. 2 schematisch gegenübergestellt. Als Messverfahren standen in klassischer Zeit die astronomischen Längen-, Breiten- und Azimutbestimmungen, die terrestrischen Winkel-, Höhen- und Längenmessungen sowie die gravimetrischen Messungen (Schwere, Schwereunterschiede) zur Verfügung. Die astronomischen Messungen dienten vor allem zur Lagerung und Orientierung des Netzes auf der Ellipsoidoberfläche, in Kombination mit den terrestrischen Lagebestimmungen aber auch zur Bestimmung von Geoid-

strukturen. Die Ergebnisse der terrestrischen Messungen sind relative Koordinaten in Lage und Höhe, allerdings bestenfalls auf große Regionen bzw. Kontinente ausgedehnt. Die Schweremessungen liefern zwar prinzipiell Geoidhöhen, wegen der lückenhaften Überdeckung der Erde aber nur sehr unvollkommen.

In der Satellitengeodäsie werden zur Bestimmung von Stationskoordinaten heute meist Messungen von Distanzen und Distanzänderungen von terrestrischen Punkten zu Satelliten (oder umgekehrt) benutzt. Zur Bestimmung des Schwerefeldes der Erde kommen insbesondere auch Messungen zwischen Satelliten und Altimetermessungen vom Satelliten aus hinzu. Im Ergebnis stehen bei der reinen geometrischen Methode ähnlich wie in der klassischen Geodäsie relative Koordinaten, allerdings großräumiger, zur Verfügung. Die neue Qualität wird durch die dynamische Methode erreicht. Neben geometrischen können auch physikalische Größen bestimmt werden. In erster Linie betrifft das globale Lösungen mit präzisen geozentrischen (absoluten) Koordinaten sowie die Bestimmung des globalen Gravitationsfeldes und damit des Geoides (hier und im Folgenden wird nicht unterschieden zwischen dem klassischen Geoid nach Stokes und dem Quasigeoid nach Molodenski).

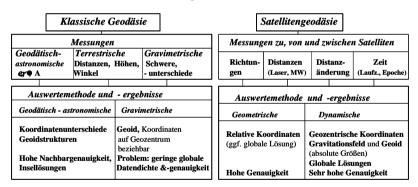


Fig. 2: Prinzipieller Vergleich von Messungen und Ergebnissen in klassischer und moderner Geodäsie

3. Neue Möglichkeiten und Erkenntnisse durch moderne kosmischgeodätische Verfahren

Die Grundlage der dynamischen Satellitengeodäsie ist die präzise Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Dazu bedurfte es zunächst einer entsprechenden Bahntheorie, die auf der Basis der klassischen Himmelsmechanik

für künstliche Erdsatelliten weiterentwickelt und entsprechend den steigenden Anforderungen und Messgenauigkeiten ständig verfeinert werden muss-te. Damit war auch eine ständige Erweiterung der in die Bahnmodellierung eingehenden Parameter verbunden. Die Parameter selbst konnten aber im allgemeinen erst durch entsprechende Bahnanalysen ermittelt werden. Diese iterative Verbesserung einer Vielzahl von Parametern ist andererseits die Quelle vieler neuer geowissenschaftlicher Erkenntnisse. Für reine Positionsbestimmungen auf der Erde ist die Bahnbestimmung hingegen nur ein notwendiger Zwischenschritt. Eine wichtige Ergänzung erfahren die satellitengeodätischen Verfahren durch die Nutzung extragalaktischer Strahlungsquellen (Quasare); sie erlauben vor allem die Realisierung und Überwachung eines Inertialsystems, leisten aber auch zu anderen Parametern unabhängige Beiträge.

Im Rahmen internationaler Kooperation sind auf diese Weise immer wieder neue und verfeinerte Erkenntnisse über die vielfältigen Parameter des Systems Erde und deren Wechselwirkungen erzielt worden. Das betrifft insbesondere die Figur und Größe der Erde einschließlich Schwerefeld und Geoid, das globale Referenzsystem, die Geokinematik und Geodynamik sowie einige physikalische Phänomene (Gravitationskonstante, relativistische Effekte).

3.1 Messsysteme

Die Voraussetzung für hochpräzise Bahnanalysen ist neben der Theorie der Bahnmechanik und der Wechselwirkung der verschiedenen Parameter ein globales Stationsnetz mit entsprechenden Messgeräten und ein internationaler Datenaustausch. Das setzt international abgestimmte Projekte bzw. Dienste voraus. Um bestmögliche Genauigkeiten zu erzielen und insbesondere systematische Fehler weitgehend auszuschalten, ist eine Kombination verschiedener, aber in der Messgenauigkeit gleichwertiger Messverfahren notwendig. Diese Redundanz - sowohl hinsichtlich der Messgenauigkeit als auch der Sensibilität für die Bestimmung der einzelnen Parameter - wird heute erreicht durch optische Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten (SLR – Satellite Laser Ranging), verschiedene Mikrowellenverfahren (vor allem GPS, Messungen zwischen Satelliten = SST Satellite to Satellite Tracking, Altimeter) und Gradiometer im Satelliten. Im Sinne der Redundanz ist die zusätzliche Nutzung von Lasermessungen zum Mond (LLR) und der Mikrowellen-Interferometrie mit sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry - VLBI) zu Quasaren von besonderer Bedeutung.

Diese Messverfahren hat es in der Form in den 1950er Jahren noch nicht gegeben. Das Laser-Prinzip wurde erst 1960 experimentell nachgewiesen, bei der Mikrowellenmesstechnik begannen damals die ersten geodätischen Anwendungen und die Quasare waren noch nicht einmal entdeckt. Zusätzlich haben sich die Genauigkeit und der Anwendungsbereich in den letzten Jahrzehnten enorm weiterentwickelt. Die erreichten Genauigkeiten liegen heute bei globalen Anwendungen im Zentimeter- bis Subzentimeterbereich (10⁻⁹).

3.2 Figur der Erde

Wie schon kurz erwähnt, beschränkte sich die Kenntnis der globalen Figur der Erde vor der Satellitenära auf die Erdabplattung und einige lokale bis regionale Strukturen des Schwerefeldes bzw. des Geoides, die aus geodätischastronomischen und/oder gravimetrischen Messungen abgeleitet worden waren. Die sich daraus ergebende Genauigkeit für das Geoid lag in der Größenordnung von 10 m bis zu mehreren Metern. Schon im Jahre 1958 wurde durch die Auswertung der ersten Satellitenbeobachtungen die Abplattung in Form des zonalen Kugelfunktionskoeffizienten J₂ genauer bestimmt als es vorher möglich war. 1959 folgte das Glied J₃, das unter dem Begriff "Birnenform" der Erde als neue Erkenntnis auch außerhalb der Fachliteratur gefeiert wurde. In den folgenden Jahren wurden immer wieder neue verfeinerte Erdmodelle mit immer größerer räumlicher Auflösung und Genauigkeit publiziert. Von besonderer Bedeutung waren in den ersten Jahren die verschiedenen Modelle "Standard Earth" (SE-Modelle) des Smithsonian Astrophysical Observatory. Es folgten viele weitere Modelle anderer Institutionen. Erwähnt seien die jeweils mehrfach weiterentwickelten Modelle GEM, OSU, GRIM, JGM und andere. Die globale Auflösung erreichte dabei oft 180 mal 180 (z.T. wesentlich mehr) der Entwicklung nach Kugelfunktionen (180 mal 180 entspricht Auflösung ($\lambda/2$) von 110 mal 110 km an der Erdoberfläche). Die globalen Lösungen wurden mehrfach ergänzt anhand von Altimetermessungen zur Meeresoberfläche, so dass das globale Geoid in Meeresgebieten zeitweise besser bekannt war als auf den Kontinenten. Durch jüngste, noch laufende komplexe Satellitenprojekte mit niedrigfliegenden Satelliten, ausgerüstet mit GPS-Empfängern, Laserreflektoren und vor allem hochsensiblen Akzelerometer-Systemen zur Elimination der nichtgravitativen Bahnstörungen (CHAMP) sowie zusätzlich SST zwischen zwei ca. 200 km hintereinander fliegenden Satelliten (GRACE), wurden sehr hohe Genauigkeiten bei erhöhter und homogener Auflösung über die gesamte Erde erhalten. Unter Einbeziehung dieser neuesten Ergebnisse erreicht die Genauigkeit für das globale Geoid heute

bereits das Zentimeterniveau. Für einige niedere Harmonische, insbesondere J_2 , zeigten sich auch bereits zeitliche Variationen. Die weitere Verfeinerung des globalen Geoids, d.h. die genaue Erfassung der Detailstrukturen bis in den lokalen Bereich, erfolgte durch regionale Kombinationslösungen (Aerogravimetrie, Einbeziehung von terrestrischen Schweremessungen sowie Vergleich von Nivellementshöhen mit ellipsoidischen Höhen aus GPS-Messungen). In einigen Gebieten liegt so die Genauigkeit der Geoidhöhe heute insgesamt im Zentimeterniveau. Der für viele Anwendungen wichtige Horizontalgradient der Geoidundulation pro Kilometer erreicht teilweise den Millimeterbereich. Beide Parameter sind für die heutige geodätische Praxis von großer Bedeutung; sie ermöglichen die Umwandlung der durch GPS erhaltenen ellipsoidischen Höhen in Normalhöhen

3.3 Globales geodätisches Referenzsystem

In der Geodäsie werden zwei Arten von Referenzsystemen benötigt, ein terrestrisches System zur Festlegung von Koordinaten von Punkten auf der Erdoberfläche und ein inertiales Referenzsystem zur Orientierung der geodätischen Netze im Raum sowie als Basis für die Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Das globale geozentrische terrestrische Referenzsystem wird festgelegt durch das Massenzentrum der Erde als Ursprung, die mittlere Lage der Rotationsachse im Erdkörper (z-Achse) und den Schnittpunkt des mittleren Meridians von Greenwich mit dem Äquator (x-Achse; y-Achse Ergänzung zum Rechtssystem). Das inertiale Referenzsystem ist raumfest orientiert und hat als Ursprung ebenfalls das Geozentrum (eigentlich nur quasi-inertial wegen der nicht gleichförmigen Bahnbewegung der Erde um die Sonne).

Alle diese Parameter, die die Referenzsysteme definieren, sind zeitlichen Variationen unterworfen. Zur Realisierung der Orientierung des Inertialsystems müssen die Phänomene Präzession und Nutation überwacht werden. Sie wurden früher durch astronomische Beobachtungen bestimmt. Heute geschieht das durch die Anbindung an die extragalaktischen Strahlungsquellen mittels VLBI. Dabei wird eine Genauigkeit von besser als 0,001" erreicht, im Gegensatz zu bestenfalls 0,1" bei früheren optisch-astronomischen Beobachtungen. Das terrestrische System wird vor allem durch die Variationen des Erdrotationsvektors (Polbewegungen und Rotationsschwankungen) beeinflusst. Sie müssen deshalb ständig überwacht werden. Dazu wurde bereits 1899 der internationale Polbewegungsdienst und einige Jahre später der Zeitoder Rotationsdienst eingerichtet. Mit klassischen astronomischen Messungen wurde in diesen wissenschaftlichen Diensten bis 1987 der Erdrotati-

onsvektor überwacht. Ab 1988 trat an ihre Stelle der International Earth Rotation Service (IERS); die astronomischen Verfahren wurden durch die modernen kosmisch-geodätischen Verfahren ersetzt, die um zwei bis drei Zehnerpotenzen höhere Genauigkeiten erzielen. Wegen dieser hohen Genauigkeit müssen heute viele weitere geodynamische Effekte berücksichtigt und eliminiert werden. Dazu zählen insbesondere alle Massenverlagerungen im Erdkörper und deren geometrische (Punktbewegungen) und gravimetrisch/physikalische Auswirkungen (Änderung des Gravitationsfeldes). Im Abschnitt 3.4 werden einige dieser Parameter charakterisiert.

Seit 1988 werden durch den IERS jährlich Kombinationslösungen zur Bestimmung der Referenzsysteme veröffentlicht. Grundlage dafür sind heute weltweit erhaltene Daten unterschiedlicher Messverfahren, nämlich VLBI, SLR, LLR, GPS und DORIS. Das terrestrische Referenzsystem unter der Bezeichnung ITRFxx (International Terrestrial Reference Frame, xx für Jahreszahl) besteht aus Koordinatensätzen, einschließlich Punktbewegungen, für ein globales Stationsnetz. Die Genauigkeit der Punktkoordinaten liegt bei $\pm\,1\,\mathrm{cm}$ $(z.T. \le \pm 5 \text{ mm})$ und damit auf den Erdradius bezogen bei 10^{-9} bis 10^{-10} ; die Punktbewegungen haben eine Unsicherheit von etwa ± 1 mm/a oder besser. Die Verdichtung des globalen Netzes bis in den lokalen Bereich ist quasi mit der gleichen Genauigkeit möglich. Damit besteht erstmalig die Voraussetzung für ein einheitliches Referenzsystem mit geodätischer Genauigkeit, das weltweit für alle Vermessungen genutzt werden kann. Für Deutschland geschah die Verdichtung auf der Grundlage des ITRF89 über das europäische System ETRS89 (EUREF-Kampagnen in nahezu ganz Europa) zum deutschen Referenzsystem DREF und dann weiter zu den Referenznetzen der einzelnen Bundesländer.

3.4 Geodynamische Parameter

Die Kombination der verschiedenen kosmisch-geodätischen Verfahren erlaubt Subzentimetergenauigkeit für Phänomene globalen bis lokalen Ausmaßes. Damit ist eine Vielzahl von Erscheinungen erstmals nachweisbar; andere können im Vergleich zu den klassischen Verfahren mit wesentlich höherer Präzision bestimmt werden. Mit der höheren Genauigkeit ist auch eine wesentlich höhere zeitliche und/oder räumliche Auflösung für die einzelnen Phänomene verbunden. Der Nachweis dieser Phänomene ist eine wesentliche Grundlage für weiter gehende geowissenschaftliche Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Erdkörpers und seiner Bewegungen im Raum. Diese Interpretation kann um so besser erfolgen, je mehr Informationen zur Ver-

fügung stehen. In diesem Sinne wird das kürzlich auf der IUGG-Generalversammlung 2003 beschlossene Netz komplexer Stationen (neben den kosmisch-geodätischen Messverfahren zusätzliche geophysikalische und geologische Messungen an den gleichen Stationen) mit der Bezeichnung Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) weitere Fortschritte bringen.

Im Folgenden soll der Kenntnisstand einiger Phänomene charakterisiert werden.

Geozentrum: Das Geozentrum ist physikalisch definiert als das Massenzentrum der Erde, einschließlich Ozean und Atmosphäre. Änderungen der Massenverteilung der Erde bewirken somit auch Änderungen des Geozentrums. Das Geozentrum ist auch das dynamische Zentrum der Satellitenbewegungen (ein Brennpunkt der oskulierenden Kepler-Ellipse) und kann insofern aus der Bahnanalyse als Ursprung des geozentrischen Koordinatensystems abgeleitet werden. Die ebenfalls aus der Bahnanalyse hervorgehenden Stationskoordinaten beziehen sich dann im geometrischen Sinne auf dieses Zentrum. Der Nachweis gelingt also nur durch Satellitenmethoden. Bisherige Analysen haben erste Ergebnisse gebracht; sie zeigten u.a. Jahres- und Halbjahreswellen mit Amplituden von einigen Millimetern.

GM (*Gravitationskonstante G mal Erdmasse M*): GM ist als Hauptglied der Gravitationsfeldentwicklung aus Bahnanalysen von Erdsatelliten und Bahnen von Raumsonden bestimmbar. Die Genauigkeit liegt heute bei 10⁻⁹. Andererseits wird der Maßstab von Satellitennetzen gemeinsam von GM (Maßstab der Bahnbestimmung) und der Lichtgeschwindigkeit (Messungen) bestimmt. Der Vergleich der jährlichen ITRF – Lösungen zeigt eine Maßstabsgenauigkeit von mindestens 10⁻⁹ und bestätigt somit das Ergebnis. Es sei erwähnt, dass die Gravitationskonstante selbst als physikalische Grundgröße nur mit einer Genauigkeit von 10⁻⁴ bis 10⁻⁵ nachgewiesen wurde.

Erdorientierungsparameter~(EOP): Die EOP oder Erdrotationsparameter (ERP) bestehen aus den Polbewegungen und Erdrotationsschwankungen bzw. der rotationsgebundenen Zeit. Die Polkoordinaten x_p und y_p können heute mit einer Genauigkeit von etwa $\pm\,5$ mm bei einer zeitlichen Auflösung von besser als 1 Tag bestimmt werden. Das entspricht in der Genauigkeit gegenüber den klassischen astronomischen Verfahren einer Steigerung um mindestens den Faktor 100. Ähnliche Genauigkeitssteigerungen betreffen den Nachweis von Rotationsschwankungen (in Form der Tageslänge LOD) und die Bestimmung der rotationsgebundenen Zeit UT (Universal Time). Die erreichbare Genauigkeit liegt heute bei $\pm\,0.03$ ms bis $\pm\,0.05$ ms. Die geowissenschaftliche In-

terpretation dieser hoch aufgelösten Variationen des Erdrotationsvektors ermöglicht zunehmend differenziertere Erkenntnisse über die Wechselwirkung der verschiedenen Phänomene, wie den Effekten der Kern-Mantel-Kopplung, der Mantelkonvektion, den verschiedenen Oberflächeneffekten (Tektonik, Hydrologie, Dynamik des Meeres), den atmosphärischen Einflüssen sowie den Einwirkungen anderer Himmelskörper (Gezeiten).

Deformationen der Erdoberfläche: Die Bewegungen von Punkten der Erdoberfläche können sehr unterschiedliche Ursachen haben. In erster Linie sind zu nennen globale Plattentektonik, andere regionale oder lokale tektonische Erscheinungen, seismische Ereignisse, Auflasteffekte (großräumige postglaziale Entlastungseffekte, Meeresgezeiten, Grundwasser, Luftdruck, sonstige Massenbewegungen) oder Erdgezeiten. Der Nachweis des Gesamtbetrages der Punktbewegungen gelingt heute für die großräumigen bis globalen Erscheinungen mit einer Genauigkeit von \pm 1 mm/a bis \pm 0,1 mm/a. Die Zeitcharakteristik kann bis in den Tagesbereich aufgelöst werden. Bei entsprechendem Aufwand erreicht man diese Genauigkeit auch für regionale oder lokale Effekte.

Die Trennung der einzelnen Bewegungsanteile ist wesentlich für die Erforschung der verschiedenen geodynamischen Prozesse und deren Wechselwirkungen. Sie gelingt insbesondere über den zeitlichen Ablauf, der sich von säkular bis kurzperiodisch (Stunden) erstreckt. Mit dem räumlichen und zeitlichen Bewegungsverhalten liegen wichtige Eingangsgrößen für weitergehende Interpretationen zur Dynamik des Erdkörpers vor. Die Ergebnisse tragen zum Verständnis vieler Erscheinungen, u.a. zur Prognose von Erdbeben, bei und sind so von großer gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung.

4. Schlussbemerkungen

In den letzten 50 Jahren hat die Geodäsie einen beispiellosen Progress, quasi eine Revolution erlebt. In diesen 50 Jahren hat sich nicht nur die Genauigkeit für die Bestimmung großräumiger Netze um den Faktor 1000 erhöht, sondern es gab auch einen enormen Erkenntnisfortschritt über den Status und die Dynamik des Systems Erde. In erster Linie betrifft das die Größe und Figur der Erde, einschließlich Gravitationsfeld und Geoid, das globale Referenzsystem sowie die Deformation des Erdkörpers und eine Vielzahl geodynamischer Effekte. Diese neuen Erkenntnisse sind auch von großer gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz. Möglich wurde der Fortschritt in erster Linie durch die völlig neuen Methoden der kosmischen Geodäsie unter Nutzung

der künstlichen Erdsatelliten und der in dieser Zeit entdeckten Quasare. Darüber hinaus haben neuartige technische Entwicklungen wie die Erfindung des Laserprinzips und die moderne Rechen- und Kommunikationstechnik zu diesem Entwicklungssprung beigetragen.

Die neuen erweiterten Potentiale der Geodäsie sind nicht nur für den Erkenntnisfortschritt von großer Bedeutung, sondern sie haben auch für die Praxis des Vermessungswesens neue Möglichkeiten geschaffen. Das präzise globale Referenzsystem steht für alle Landesvermessungen zur Verfügung und ermöglicht somit ein einheitliches System für alle Vermessungen. In Europa ist durch die Einführung des ETRS89 ein wichtiger Schritt in dieser Richtung unternommen worden. Die Vereinheitlichung der geodätischen Grundlagen ermöglicht auch erweiterte Anwendung der Geodäsie z.B. bei der grenzüberschreitenden Navigation oder dem Aufbau großräumiger Geo-Informationssysteme (GIS). Andererseits erlaubt die Anwendung von Methoden der Satellitengeodäsie, insbesondere von GPS in Kombination mit weitmaschigen Referenzpunkten eine beträchtliche Reduzierung der Anzahl der geodätischen Festpunkte für Anschlussmessungen jeglicher Art.

Wasser in der Marsoberfläche

Einleitung

Mit den Ergebnissen der NASA Mars-Mission "Mars Odyssey" wurde nachgewiesen, dass auch in mittleren und niederen Breiten des Mars in den oberen Metern des Marsbodens Wasser in Mengen von ca. 2 Gew.-% bis zu ca. 16 Gew.-% vorhanden ist. Dies Wasser kann dort aus thermodynamischen Gründen nicht als Eis vorhanden sein, es wäre längst wegsublimiert, wohl aber als Sorptionswasser, wobei insbesondere das quasi-flüssige Adsorbatwasser bemerkenswerte physikalische, chemische und ggf. auch biochemische Konsequenzen haben kann. Adsorbatwasser ist insbesondere in den obersten und mit der Atmosphäre wechselwirkenden Schichten zu erwarten, die so auch photochemisch aktiviert werden können.

"Unfrozen water" im terrestrischen Permafrost

Auf den ersten Blick kann überraschend sein, dass Wasser im von Wassereis dominiertem Permafrost und ebenso in feuchten porösen Böden bei Temperaturen deutlich unter 0° C und bis hinab zu wenigstens –40° C zumindest teilweise in einem stationären flüssigen Zustand sein kann und nicht gefriert. In der englischsprachigen Literatur wird hier zumeist von "unfrozen water" gesprochen (Anderson and Tice, 1972, Anderson and Morgenstern, 1973, Pearson and Derbyshire, 1974, Dash et al., 1995). Die folgende Abb. 1 gibt den Gehalt W_u an "unfrozen water" für verschiedene Minerale in Abhängigkeit von der Temperatur wieder. Ursache der stationären Existenz flüssigen Wassers unterhalb 0° C ist, dass sich generell an festen Oberflächen als Folge der von diesen ausgehenden van der Waaals-Wechselwirkungen Schichten von flüssigkeitsartigem Adsorbatwasser bilden, wobei letzteres im Sinne einer zweidimensionalen Flüssigkeit zu verstehen ist (Stillinger, 1980, Staszczuk, 1995, Thiel and Madey, 1987, Henderson, 2002). Es ist dieses flüssigkeitsartige Adsorbatwasser, das wegen seiner Lösungs- und Transport-

eigenschaften in terrestrischen Böden auch unter 0° C chemische und biologische Prozesse zulässt.

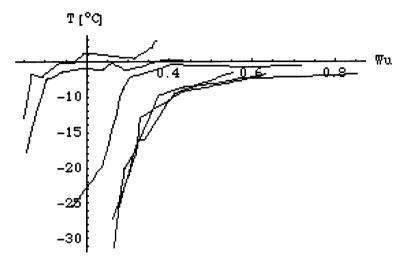


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des relativen Gehaltes an "unfrozen water" (W_U) verschiedener Tonminerale bei Normaldruck (nach Anderson, 1968).

Mit dem anschaulichen Bild von Adsorbatwasser-Monolagen lässt sich bei bekannter innerer oder auch "spezifischer" Oberfläche der adsorbierenden porösen Materialien aus dem gemessenen Wassergehalt die Anzahl der Monolagen ableiten.

Der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte p/p_0 und der Anzahl n der Monolagen ist in Abb. 2 dargestellt. Dabei ist p_0 der Sättigungsdruck und p ist der atmosphärische Wasserdampfpartialdruck, der von der Temperatur und der Menge vorhandener Wassermoleküle abhängt.

Bemerkenswert an Abb. 2 ist, dass sich die Adsorbatwasser-Belegung bei unterschiedlichen Substratoberflächen nicht gravierend ändert, wobei mit den verwendeten Substraten ein repräsentativ großer Bereich überstrichen wird. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Darstellungen in Abb. 2 nicht einfach und nur temperaturabhängig sind. Sie gelten, obwohl bei Temperaturen oberhalb 0° C gewonnen, auch bei tieferen Temperaturen, denn der jeweilige p/p₀-Wert kann (gemäß der Zustandsgleichung) je nach der Menge vorhandenen Wasserdampfes sowohl bei T > 0° C als auch bei T < 0° C erreicht werden. Entscheidend für den Kurvenverlauf ist letztlich die energetische Bindung der Wassermoleküle an die jeweilige Substratoberfläche und das

sich dem entsprechend einstellende Gleichgewicht von Adsorption und Desorption.

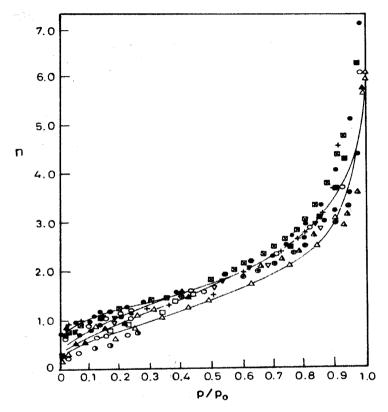


Abb. 2: Anzahl n der Adsorbatwasser-Monolagen in Abhängigkeit von der relativen Feuchte p/p_0 (aus Mikhail und Robens, 1983). Die verschiedenen Symbole beziehen sich auf unterschiedliche Substrate (ionischer Festkörper).

Sorptionswasser in porösen Medien

Da in porösen Medien wegen des in den Porenvolumina gehaltenen Wassers sowohl Adsorption als auch Absorption eine Rolle spielen können, hat es sich für diese Medien als sinnvoll erwiesen, den übergreifenden Terminus Sorptionswasser zu verwenden. Dabei unterscheidet man zwischen physikalisch und chemisch gebundenem Wasser.

Der Partialdampfdruck des Wasserdampfes über Wassereis ist im Gleichgewicht gemäß Sonntag (1990) im Temperaturbereich von -65° C < T < 0 $^{\circ}$ C in guter Näherung gegeben mit

$$p_{s}[Pa] = 611.2 e^{\frac{22,46 (T-273,15)}{T \cdot 0.53}}$$
 (1)

Dies nimmt für hier relevante Temperaturen T >> 0.53 K die Form

$$p[Pa] = 3.47 \cdot 10^{12} e^{-\varepsilon_{ice}/kT[K]}$$
 (2)

an. Diese Darstellung folgt auch direkt aus der Clausius-Clapeyron Gleichung für den Fall einer von der Temperatur unabhängigen Sublimationsenthalpie ϵ_{ice} . Mit den obigen Zahlen folgt pro Wassermolekül eine Sublimationsenergie von $\epsilon_{ice}=8.466\ 10^{-20}\ Ws=0.528\ eV$. Bei einem mittleren Molekulargewicht des Wassers von 18,015 und mit einer Molekülmasse von 3,013 $10^{-26}\ kg$ gilt dann für die molare Darstellung $\Delta H_{ice}=49,154\ kJ\ mol^{-1}$. Hierbei wurde zur Umrechnung verwendet, dass 1 kJ mol^{-1} einem Wert von 1.7224 $10^{-21}\ Ws=0.0107\ eV$ pro Wassermolekül entspricht.

Eine die Eigenschaften des Permafrostes beeinflussende Tatsache ist, dass die Enthalpien für die Bindung von Sorptionswasser an Minerale die Sublimationsenthalpie des Wassereises übertreffen können. Dies ist die physikalische Ursache für das Postulat, dass auch gegenwärtig im oberen Marsboden in Tiefen von wenigen Dezimetern und Metern noch Sorptionswasser vorhanden sein kann, da es dort wegen seiner stärkeren Bindung an die Mineraloberflächen eine um Größenordungen höhere Lebensdauer im Marsboden hat, verglichen mit dem in den oberen Metern wegen der relativ stärkeren Sublimation nicht mehr zu erwartenden Wassereis, das mithin erst in größeren und kälteren Tiefen von Dekametern oder Hektometern möglich ist, aus denen es auch in geologischen Zeitskalen noch nicht wegsublimiert sein kann. Dieses weiter unten detailliert diskutierte Ergebnis der Existenz von Sorptionswasser im oberen Marsboden bietet die physikalische Basis zum Verständnis der auf die Präsenz von Wasser im oberen Marsboden hinweisenden Beobachtungen von Mars Odyssey.

Spezifische Oberflächen

Poröse Materialien verfügen über "innere Oberflächen", die im direkten Austausch mit umgebenden Medien stehen können. Diese inneren Oberflächen werden als "spezifische Oberflächen" bezeichnet und als Fläche A pro Volumen oder pro Masse gemessen. Leider liegen für Materialien der Marsober-

fläche keine repräsentativen Werte für spezifische Oberflächen vor. Der einzige in der Literatur publizierte Wert basiert auf Modellüberlegungen im Rahmen der Interpretation der Viking 1 Daten (Ballou et al., 1978). Dieser Wert der spezifischen Oberfläche pro Masse des dortigen Marsbodens beträgt $\rm S_M=1.7~10^4~m^2~kg^{-1}$. Er liegt im Vergleich mit terrestrischen Mineralen am unteren Rand, da diese einen Bereich von $\rm 10^4~m^2~kg^{-1} < S_M < 10^6~m^2~kg^{-1}$ überstreichen (van Olphen and Fripiat, 1979), wobei Montmorillonite und Zeolithe am oberen Rand dieses Gebietes angesiedelt sind, während der untere Bereich typisch z.B. für Kaolinite ist.

Die spezifische Oberfläche S_V pro Volumen V eines Materials der Massendichte ρ_S ist darstellbar als $S_V = A/V = \rho_S \, S_M$. Mit $\rho_S = 1500 \, kg \, m^{-3}$ folgt beispielsweise, dass die spezifische Oberflächen pro Volumen des Oberflächenmaterials des Mars mit einem massebezogenen Wert von

 $\rm S_M=1.7~10^4~m^2~kg^{-1}~mit~S_V=2.55~10^7~m^2~m^{-3}=2.55~10^7~m^{-1}$ gegeben ist. Der hierzu inverse Längenwert ist übrigens ein Maß für die Mikrostruktur des Materials.

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Adsorbatwasser ist die mittlere Flächenmassendichte Σ einer Monolage. Diese folgt aus der Oberfläche eines Wassermoleküls, die im Bereich von (9.6 – 10.2) 10^{-20} m² liegt. Mit einer Masse des Wassermoleküls von 3 10^{-26} kg folgt dann eine Flächenmassendichte im Bereich von (3.125 – 2.94) 10^{-7} kg m $^{-2}$. Im Folgenden wird ein Wert $\Sigma = 3 \ 10^{-7}$ kg m $^{-2}$ verwendet.

Da die Dicke einer Monolage adsorbierten Wassers bei 0.3 nm liegt, folgt mit dem oben gegebenen Wert für die Flächenmassendichte einer Monolage Adsorbatwasser ein Volumen von 0.00765 m³ Adsorbatwasser pro Kubikmeter Marsbodenmaterial mit spezifischer Oberfläche gemäß Ballou et al. (1978). Dies entspricht bei einer Massendichte des Marsbodens von $\rho_S=1500~kg~m^{-3}$ und einer Wassermassendichte von 1000 kg m $^{-3}$ einem Gewichtsanteil von 0.51 Gewichtsprozent (bezogen auf die Trockenmasse). In anderen Worten, und als generelle Orientierungszahl: 2 Monolagen Adsorbatwasser entsprechen ungefähr einem Wasseranteil im Marsboden von 1 Gewichtsprozent, wenn man den Wert von Ballou et al. (1978) für die spezifische Oberfläche zugrunde legt.

Sorptionsenthalpien

Das energetische Maß für die Bindung von Adsorbatwasser ist die Adsorptionsenthalpie bzw. Sorptionsenthalpie. Sie ist betragsmäßig gleich der bei der Adsorption (Sorption) frei werdenden Adsorptionswärme. Wie bereits er-

wähnt, liegt die Adsorptionsenthalpie für Eis bei $\Delta H_{ice} = 49,154 \text{ kJ mol}^{-1}$, während die entsprechenden Werte für die Wasseradsorption an geeigneten Mineralen z.T. deutlich größer sein können, insbesondere bei zeolithischen Mineralen.

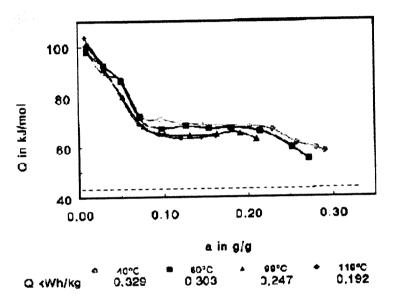


Abb. 3: Adsorptionswärme Q (Adsorptionsenthalpie) eines X-Zeolithes in Abhängigkeit vom Wassergehalt für unterschiedliche Temperaturen (Stach und Jänchen, 2003). Die gestrichelte Gerade stellt den Wert für flüssiges Wasser dar.

Im Rahmen einer Studie (Stach und Jänchen, 2003) ergaben sich die in den folgenden Abbildungen dargestellten Ergebnisse.

Der Wert der Adsorptionsenthalpie liegt also auch bei höheren Wassergehalten deutlich über dem Wert für Wassereis bzw. flüssiges Wasser bei 0° C. Offenbar nimmt die Enthalpie um so mehr zu, je weniger Monolagen vorhanden sind. Dies ist durch den damit möglichen direkteren "Durchgriff" der attraktiven van der Waals-Kräfte an der Substratoberfläche erklärbar.

Bemerkenswert an der Abb. 3 ist, dass die Adsorptionskurven für sehr unterschiedliche Temperaturen nahezu die gleichen sind. Dies belegt, dass die Adsorptionsprozesse im Wesentlichen durch die energetische Bindung der Wassermoleküle an die Substratoberfläche zu charakterisieren sind.

Die beiden gezeigten Beispiele belegen, dass es mineralische Substanzen, vornehmlich solche mit zeolithischer Struktur gibt, die Adsorptionswasser stark binden können. Die aufgeführten Ergebnisse wurden jedoch unter terrestrischen Laborbedingungen gewonnen.

Mit den höheren Adsorptionsenthalpien des Wassers ΔH_{min} an Mineraloberflächen im Vergleich zum Wassereis mit $\Delta H_{ice} < \Delta H_{min}$ ist die Tatsache verknüpft, dass die Verdampfung von Adsorbatwasser von Mineraloberflächen weniger effektiv verläuft als die Sublimation von Eis. Das Verhältnis von Sublimationsrate Z zu Verdampfungsrate E ist darstellbar als

 $S=Z/E=\exp(\Delta H_{min}-\Delta H_{ice})$. Es gibt an, wie viel länger verdampfendes Adsorbatwasser gegenüber einer gleichen Menge sublimierenden Wassereises überlebt. Dieser Faktor ist bei Mineralen mit Adsorptionsenthalpien der oben genannten Größen von der Größenordnung 10^6 oder mehr für Bedingungen an und in der Marsoberfläche. Sorptionswasser dürfte also dort noch an Stellen vorkommen, deren Eis längst wegsublimierte.

Ein zu dem Vorgehen über Adsorptionsenthalpien äquivalenter Ansatz zum Verständnis der Wasseraufnahmeeigenschaften von Mineralen wurde von Bish et al. (2003) mit Untersuchungen an "hydrous minerals" vorgestellt, der auf früheren Arbeiten (Carey und Bish, 1996) beruht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Sorptionswasser, das eine wesentlich längere Überlebensdauer unter den thermophysikalischen Bedingungen an und unter der Marsoberfläche mittlerer und niederer Breiten hat als Wassereis, das Potenzial zur Erklärung der wasserbezogenen Mars Odyssey Ergebnisse hat.

Chemische Prozesse, vermittelt durch Sorptionswasser

Die Präsenz flüssigkeitsartigen Adsorbatwassers kann Einfluss auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften und auf ggf. durch Adsorbatwasser ermöglichte physikalische und chemische Prozesse im oberen Marsboden haben. Wasser löst Substanzen infolge seiner elektrostatisch polaren Struktur, es ist so etwas wie ein "universelles Lösungsmittel". Die so möglichen und durch die Präsenz des Adsorbatwassers ggf. ermöglichten chemischen Prozesse können hier nur ansatzweise und mit ersten Beispielen dargestellt werden. Sollte sich bei vorgesehenen Experimenten bestätigen, dass Adsorbatwasser chemische Prozesse unter Marsbedingungen veranlassen kann, so eröffnen sich damit neue Ansätze für eine "adsorbatwasser-getragene Marsoberflächenchemie". In diesem Sinne wurde im Jahr 2003 erfolgreich ein entsprechender Förderantrag an die DFG gestellt (Möhlmann und Sattler, 2003), der zu einer künftigen DFG-Förderung dieser Untersuchungen führte.

Ein noch ungeklärtes Phänomen der Marsoberfläche ist ihr hoher Oxidationsgrad. Dieser kann möglicherweise durch Adsorbatwasser mit verursacht sein, denn in der Marsoberfläche vorhandenes Haematit kann bei UV-Bestrahlung, wie sie an der Marsoberfläche gegeben ist, und in Präsenz von Wasser die stark oxidierenden Hydroxyl-Radikale frei setzen. Dieser Prozess wird als Photo-Fenton-Reaktion bezeichnet (Spacek et al., 1995):

$$Fe_{aq}^{3+} + H_2O \xrightarrow{h*\nu} Fe_{aq}^{2+} + H^+ + OH^{\bullet}$$
 (3)

Hydroxyl-Radikale oxidieren bei Freisetzung von Kohlendioxid die meisten organischen Substanzen. Die Photo-Fenton-Reaktion wird übrigens terrestrisch z.B. bei der Reinigung organischer Schmutzwasser verwendet. Analog zu diesen Oxidationsprozessen könnten daher auch organische Substanzen an Marsoberfläche zersetzt werden. z.B. gemäss $C_x H_y + (4x + y) OH^{\bullet} \longrightarrow x CO_2 + (2x + y) H_2O$ Oxidation von Kohlenwasserstoffen durch OH Radikale). Dies könnte den merkwürdigen Befund erklären, dass mit den Viking-Missionen keine organischen Substanzen nachgewiesen werden konnten, obwohl allein durch das meteoritische Bombardment mit kohlig-chondritischen Meteoriten organische Materialien die Marsoberfläche erreicht haben müssen. Die Photo-Fenton-Reaktion bezieht ihre Energie aus der UV-Strahlung. Sie kann also auch bei den vergleichsweise kühleren Marstemperaturen uneingeschränkt wirksam sein.

Weiterhin kann Adsorbatwasser mit dem mit Anteilen zwischen (7 und 9) Gewichtsprozenten (Banin et al., 1992) im Marsboden nachgewiesenen SO₃ letztlich Schwefelsäure bilden. Die an der Marsoberfläche zu erwartenden, aber bisher mit spektroskopischen Fernerkundungsmethoden dort nicht nachweisbaren Karbonate könnten an ihren Oberflächen mit dieser Schwefelsäure in Sulfate umgewandelt worden sein. Sie wären in diesem Falle in der Tat mit spektralen optischen Fernerkundungsmethoden nicht als Karbonate messbar. Die bei den Marstemperaturen im Vergleich zur Erde reduzierten chemischen Reaktionsraten können im Hinblick auf den Mars dadurch "kompensiert" werden, dass für diese langsameren Prozesse im Rahmen der Evolution der Marsoberfläche über Milliarden von Jahren ausreichend Zeit zur Verfügung stand.

Diese Überlegungen haben gemeinsam mit Chemikern des DLR-Institutes für Technische Thermodynamik, Aussenstelle Köln, zu ersten qualitativen chemischen "Ja-Nein"-Experimenten geführt um zu prüfen ob die relativ geringen Wasseranteile in Form von Adsorbatwasser in der Tat überhaupt in der Lage sind, chemische Reaktionen zu befördern. Dazu wurden Haematit-Proben, die mit der atmosphärischen Feuchte im Gleichgewicht waren, und somit

Adsorbatwasser enthielten, mit einer Quecksilber-Bogenlampe UV bestrahlt. Gleichzeitig wurde die organische Substanz Isopropanol über die Probe geführt. Im Falle der Erzeugung von OH-Radikalen mit der Photo-Fenton-Reaktion müssten diese das Isopropanol in Kohlendioxid zerlegen, und das konnte in der Tat gemessen werden.

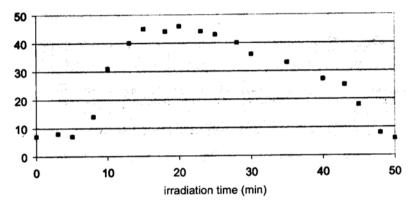


Abb. 4: Freisetzung von Kohlendioxid infolge der Oxidation von Isopropanol durch mit der Foto-Fenton-Reaktion erzeugte OH-Radikale (Möhlmann und Sattler, 2003)

Die UV-Lampe arbeitete nach ca. 10 Minuten effektiv. Danach sank nach anfänglicher Zunahme die CO₂-Produktion wieder ab, was eine Folge der langsam beginnenden Austrocknung der Probe ist. Nach ca. 40 Minuten wurde die UV-Bestrahlung abgeschaltet, worauf hin die CO₂-Erzeugung wieder stärker zurück ging.

Von Interesse ist, dass es im Permafrost der Erde gefundene anaerobe Photosynthese-Bakterien gibt, die zweiwertiges Eisen (Fe(II)), wie es über die Photo-Fenton-Reaktion aus dreiwertigem Eisen (Fe(III)) entstehen kann, wieder in dreiwertiges Eisen (Fe(III)) in Form rot-brauner Eisenoxide verwandeln (Ehrenreich und Widdell, 1994). Diese über das UV photosynthetisierenden anaeroben Bakterien nutzen das solare UV zur Einbindung von CO₂ in organische Kohlenstoffverbindungen ((CH₂O)n). Der Elektronendonor für diese Photosysnthese ist das zweiwertige Eisen, das mit dieser Reaktion z.B. festes Ferrihydrit (Fe(OH)₃) erzeugt. Generell gilt gemäß Nealson und Stahl (1997)

$$Fe(II) + CO_2 + H_2O \xrightarrow{UV} Fe(III) + (CH_2O)n$$
(4)

Bemerkenswert ist, dass somit die Photo-Fenton-Reaktion und die Eisen oxidierenden Bakterien einen geschlossenen Prozess-Zyklus bilden können, der aus dem solaren UV seine Energie bezieht, und neben dem UV nur Eisen CO₂ und Wasser benötigt. Alle diese Komponenten sind an und in der Marsoberfläche vorhanden.

Erste laborative Tests zum temperatur- und feuchteabhängigen Verhalten solcher Permafrostkulturen haben gemeinsam mit der Potsdamer Forschungsstelle des AWI begonnen.

Thermische Modellierungen

Der Tagesgang der Temperatur T(z,t) in der Marsoberfläche kann in guter Näherung über die Festkörperleitfähigkeit des Marsbodens modelliert werden. Dann gilt

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \Delta T(z,t) \tag{5}$$

Die "obere" Randbedingung an der Oberfläche z=0 ist mit der Energiebilanz an der Oberfläche gegeben:

$$\frac{1 - A}{r_h^2} S_c f(loc,t) = -\frac{\lambda}{L} \frac{\partial T(z,t,loc)}{\partial z} \bigg|_{z=0} + \varepsilon \sigma T^4(z=0,t,loc)$$
 (6)

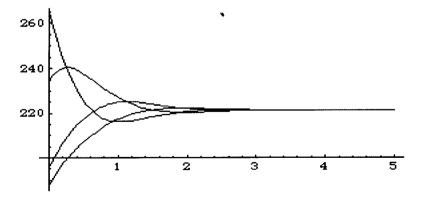


Abb. 5: Tiefenprofile der Temperatur zu Sonnenaufgang (untere Kurve), Mitternacht (nächst höhere Kurve), Sonnenuntergang (zweithöchste Kurve) und Mittag (obere Kurve). Die Tiefe ist in Einheiten der täglichen thermischen Eindringtiefe L gegeben, die Temperatur in K.

Hierbei ist λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Massendichte des Bodenmaterials und c die Wärmekapazität. Die thermische Trägheit ist definiert als $I = \sqrt{\lambda \rho} \, c$, und z ist die mit x = z L auf die tägliche thermische Eindringtiefe $L = \sqrt{\lambda \, P/\rho} \, c = \lambda \sqrt{P/I}$ normierte dimensionslose Tiefe. Analog ist die Zeit t mit $t = P\tau$ auf die Rotationsperiode P normiert. Die Funktion f(loc,t) beschreibt die lokale- und Zeitabhängigkeit des solaren Einstrahlungswinkels an der Oberfläche. Für die Modellrechnungen wurde ein äquatorialer Ort gewählt. Die Solarkonstante hat (bei 1 AU) einen Wert von $S_c = 1368 \, \text{W m}^{-2}$, A ist die Albedo, und ϵ die Emissivität der Marsoberfläche.

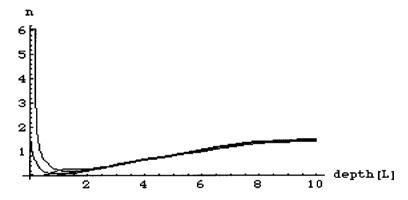


Abb. 6 : Tiefenprofil der Anzahl von Adsorbatwasserlagen "n" für das mit Abb. 5 gegebene Temperaturfeld.

Abb. 6 beschreibt die Tagesvariation der Temperatur in ihrer Abhängigkeit von der Tiefe. Die verwendeten Parameter sind bezogen auf die Landestelle der Mars-Express-Landesonde Beagle 2: A = 0.2361, I = 40 W s $^{1/2}$ m $^{-2}$ K $^{-1}$. Die als obere Randbedingung vorgegebene Oberflächentemperatur wurde für Herbstbedingungen der European Mars Climate Database (Lewis et al., 1999) entnommen. Die resultierende tägliche thermische Eindringtiefe nimmt bei Werten für Massendichte ρ = 1500 kg m $^{-3}$ und einer für Basalte typischen Wärmekapazität von c = 837 Ws kg $^{-1}$ K $^{-1}$ einen Wert von L = 0.95 cm an. Offenbar reichen die täglichen Variationen nur bis in eine Tiefe von ca. 3 L, also von wenigen Zentimetern. Die Jahresvariation ist analog noch bis in Tiefen von mehreren Dezimetern spürbar. Die Temperatur liegt mithin in Tiefen von Dezimetern und darunter bei einem konstanten Wert von 220 K. Verwendet man nun einen atmosphärischen Wassergehalt von 10 pr μm , so folgt mit den berechneten Temperaturprofilen über die die in Abb. 2 dargestellte Rela-

tion von Mikhail und Robens (1983) letztlich eine Beziehung der Art $n(p/p_0) = n(T(z,t))$. Das resultierende Tiefenprofil der Adsorbatwasserbelegung ist in Abb. 6 dargestellt. Offenbar tendiert der Wassergehalt für größere Tiefen im Dezimeterbereich gegen ungefähr zwei Monolagen (Möhlmann, 2004). In dem zumindest zeitweise erwärmten höher liegenden Zwischengebiet nimmt der Wassergehalt ab, während er direkt an der Oberfläche infolge der Wechselwirkung mit der Atmosphäre wieder zunimmt. Der resultierende Tagesgang an der Oberfläche ist mit der Abb. 7 gegeben. Sättigung des Wasserdampfgehaltes tritt während der Nachtstunden und in frühen Morgenstunden auf. Dies erklärt die Beobachtungen von Frostablagerungen an der Oberfläche und Morgennebel über der Oberfläche.

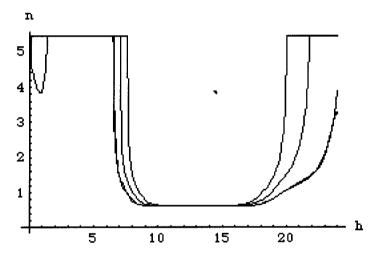


Abb. 7: Tagesgang des Wassergehaltes (relative Feuchte p/p_0) an der äquatorialen Oberfläche für Frühling, Sommer und Herbst.

Thermophysikalisches Modell des oberen Marsbodens mittlerer und niederer Breiten

Die oben dargestellten thermophysikalischen Modellrechnungen führen zu dem Ergebnis, dass in einer ersten groben Modellierung die Marsoberfläche im Hinblick auf den Wassergehalt als aus drei Schichten bestehend angesehen werden kann.

Die Oberfläche wechselwirkt am direktesten mit dem Wassergehalt der Atmosphäre. Der Wassergehalt in der unteren Marsatmosphäre in niederen

Breiten ist größenordnungsmäßig gegeben mit der Höhe h präzipitierten Wassers mit h = 10 pr μ m. Dies ist für eine Massendichte des Wassers von ρ_{W} = 1000 kg m⁻³ äquivalent einer Oberflächenmassendichte des Wassers von $m/F = \rho_W V/F = \rho_W h = 10 \text{ g m}^{-2}$ auf einer Fläche F der Marsoberfläche. Falls die 10 pr um atmosphärischen Wassers in einer Monolage des Marsbodens mit einer spezifischen Oberfläche von $S_M = 1.7 \cdot 10^4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Ballou et al., 1978) adsorbiert würden, dann betrüge die Höhe H_I des so angefeuchteten Bodens H_I = 1.31 mm. Im Falle größerer spezifischer Oberflächen wäre diese Höhe entsprechend geringer. Diese Abschätzung zeigt, dass der direkte adsorptive Austausch der Atmosphäre mit dem oberen Marsboden in einer dünnen ..aktiven" Schicht der Dicke von ca. 1 mm am wirksamsten ist. Diese obere "Haut" kann zeitweise mit vielen Monolagen Adsorbatwasser belegt sein. Dabei können die oberen Monolagen, die nicht mehr von der Substratoberfläche beeinflusst werden und die sich demzufolge in ihren Eigenschaften dem flüssigen Wasser angleichen, gefrieren und so z.B. zum an der morgendlichen Oberfläche beobachteten Morgenfrost führen. Am Tage ist diese Oberfläche infolge der höheren Temperaturen ausgetrocknet (vgl. Abb. 7).

Unterhalb dieser dünnen "Haut" befindet sich eine Schicht, die infolge der täglichen Erwärmung zumindest zeitweise noch relativ warm (vgl. Abb. 5) und dem gemäß trockner ist. Unterhalb dieser Übergangsschicht hat der Boden eine Temperatur von ungefähr 220 K. Dem entspricht ein Wassergehalt von ca. zwei Monolagen (vgl. Abb. 6). Je nach der Größe der spezifischen Oberfäche kann der Gehalt an Adsorbatwasser im Bereich von 1 Gewichtsprozent bis zu 10 Gewichtsprozent (und ggf. mehr) liegen.

Die Tiefenstruktur des oberen Marsbodens stellt sich mit dieser ersten groben thermophysikalischen Unterteilung folgendermaßen dar:

- I. Obere "Haut" von 1 mm (oder weniger) Tiefe, die im Tagesgang zeitweise wassergesättigt und zeitweise trocken sein kann.
- II. "Übergangsschicht" von ungefährt 3 L Tiefe (einige Zentimeter bis zu wenigen Dezimetern), die im Vergleich zu der unterliegenden Schicht relativ trocken ist.
- III. Thermisch stabile "Grundschicht" unterhalb einiger Zentimeter bzw. weniger Dezimeter mit einer Adsorbatwasserbelegung von ca. zwei Monolagen. Diese Grundschicht zeigt sich vornehmlich in den wasserbezogenen Mars Odyssey Resultaten, die natürlich zusätzlich zum Adsorbatwasser den hier nicht diskutierten Gehalt an chemisch gebundenem Wasser erfasst haben.

Der ESA und der NASA wurden Experimentvorschläge unterbreitet um den herausfordernden "Skandal" fehlender Wassermessungen am Mars und resultierender physikalischer und chemischer Bodenuntersuchungen mit im Jahre 2009 startenden Lande-Missionen zu beheben.

Literatur

- Anderson, D.M., 1968. Undercooling, freezing point depression, and ice nucleation of soil water. Israel J. of Chemistry, 6, 349–355.
- Anderson, D.M., A.R. Tice, 1972. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements, *Highw.Res. Record* No. 393, 12–18.
- Anderson, D.M., N.R. Morgenstern, 1973. Permafrost Proc. 2nd Int. Conf. (Washington, DC: National Academy of Science), 257–288.
- Ballou, E.V., Wood, P.C., Wydeven, Th., Lehwalt, M.E., Mayck, R.E., 1978. Chemical interpretation of Viking Lander 1 life detection experiment. Nature, 271, 644–645.
- Banin, A., Clark, B.C., Wänke, H., 1992. Surface Chemistry and Mineralogy. In: H.H. Kieffer, B.M. Jakosky, C.W. Snyder, M.S. Metthews, (Eds.), Mars, University of Arizona Press, Tucson & London,pp. 594–625.
- Bish, D.L., Carey, J.W., Vaniman, D.T., Chipera, S.J., 2003. Stability of hydrous minerals on the martian surface. Icarus, 164, 96–103.
- Carey, J.W, Bish, D.L., 1996. Equilibrium in the clinotilolite-H₂O system. American Mineralogist, 81, 952–962.
- Dash, J.G., Haying Fu, J.S. Wettlaufer, 1995. The premelting of ice and its environmental consequences. *Rep. Prog. Phys.*, 58, 115–167.
- Ehrenreich, A., Widdell, F., 1994. Anaerobic oxidation of ferrous iron by purple bacteria, a new type of phototrophic metabolism, Appl. Environ. Microbiol. 60, 4517–4526.
- Feldman, W.C., T.H. Prettyman, S. Maurice, J.J. Plaut, D.L. Bish, D.T. Vaniman, M.T. Mellon, A.E. Metzger, S.W. Squyres, S. Karunatillake, W.V. Boynton, R.C. Elphic, H.O. Funsten, D.J. Lawrence, Tokar R.L., 2003. The global distribution of near-surface hydrogen on Mars, JGR-Planets, submitted July 2003.
- Henderson, M.A., 2002. The interaction of water with solid surfaces: fundamental aspects revisited, Surface Science Reports, 46, 1–308.
- Lewis, S. R., M. Collins, P. L. Read, F. Forget, F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand, J.-P. Huot, A climate database for Mars. JGR, 104 (E10), 24177–24194, 1999.
- R. Sh. Mikhail, E. Robens, 1983. Microstructure and Thermal Analysis of Solid Surfaces. *Wiley*, Chichester, UK.
- Möhlmann, D., 2002. Adsorption water in mid- and low latitude Martian soil. ESA SP-518,169–172.

- Möhlmann, D., 2004. Water in the upper martian surface at mid- and low-latitudes: presence, state, and consequences, Icarus, 168, 318–323.
- Möhlmann, D., Ch. Sattler, 2003. DFG-Antrag "Liquid-like adsorption water in the Martian surface".
- Nealson, K.H., D.A. Stahl, 1997. Microorganisms and Biochemical cycles: What can we learn from layered microbial communities? In: Reviews in Mineralogy Vol 35, Geomocrobiology; Interaction between Microbes and Minerals, Eds. J.F. Banfield und K.H. Nealson, Mineralogical Society of America.
- Pearson, T.T., Derbyshire W., 1974. NMR Studies of Water Adsorbed on a Number of Silica Surfaces, J. Coll. Interf. Sciences, 46, No. 2, 232–248.
- Sonntag, D., 1990. Important new values of the physical constants of 1986; vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae. Z. Meteorol. 5, 340–344.
- Spacek, W., Bauer, R., Heisler, G., 1995. Heterogeneous and homogeneous wastwater treatment – comparison between photodegradation with TO₂ and the photo-Fenton reaction, Chemosphere, Vol. 30, 477–484.
- Stach, H.G., Jänchen, J.E., 2003. Study for DLR-PF: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Wasseradsorption an marsähnlichen Materialien, Berlin.
- Staszczuk, P., 1995. Study of the Adsorbed Liquid Films on Solid Surfaces by Means of the controlled Rate Thermal Analysis, in Proceedings of the XXVIth International Conference on Vacuum Microbalance techniques, Marrakech, Morocco, M.b.B. Chanaa, Editor, Facult des Sciences Semlalia, University Cadi Ayyad: Marrakech, p. 240–245.
- Stillinger, F.H., 1980. Water revisited, Science, 209 (4455): p. 451,457.
- Thiel, P.A., Madey T.E., 1987. The interaction of water with solid surfaces, Surface Science Reports, 7, p. 211.
- van Olphen, H., Fripiat, J.J. (Editors), 1979. Data Handbook for Clay Materials and other Non-metallic Minerals, Pergamon, Tarrytown, N.Y., USA.

Karl-Heinz Marek

Zu Visionen der bemannten Raumfahrt

1. Heinz Kautzleben und die bemannte Raumfahrt.

Mit dem Beitrag soll an die Aktivitäten erinnert werden, die Prof. Dr. Heinz Kautzleben in seiner Tätigkeit als Mitglied des Koordinierungskomitees Interkosmos, als Stellvertretender Leiter des Forschungsbereiches Geo- und Kosmoswissenschaften der Akademie der Wissenschaften der DDR und als Direktor der Akademie-Zentralinstitutes für Physik der Erde im Zusammenhang mit dem Weltraumflug von Sigmund Jähn als des ersten Deutschen im Jahre 1978 geleistet hat. Er hat sich mit dieser Thematik bis in die jüngste Vergangenheit befaßt und erst im vergangenen Jahr im Rahmen des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften der Leibniz-Sozietät eine Diskussion über Ziele. Nutzen und Zukunft der bemannten Raumfahrt angeregt. Im Zusammenhang mit Auffassungen, daß eines der Ziele der bemannten Raumfahrt in der Schaffung von Voraussetzungen für eine in ferner Zukunft mögliche Auswanderung der Menschheit auf andere kosmische Objekte besteht, hat H. Kautzleben formuliert: "In absehbarer Zeit kann die Menschheit ihren Lebensraum auf der Erde nicht verlassen. Anderweitige Aussagen sind verantwortungslose Spekulationen, die von der Sorge um den Erhalt einer lebensfreundlichen Biogeosphäre ablenken" [1].

Im folgenden werden einige aktuelle Aspekte zur Zukunft der bemannten Raumfahrt betrachtet.

2. Die aktuelle Diskussion über Sinn und Nutzen der bemannten Raumfahrt

Diese Diskussion ist heute aktueller denn je. Sie läßt sich auf zwei Gründe zurückführen:

a. Die allgemeine Situation der Raumfahrt ist heute nicht mehr mit dem Pioniergeist früherer Jahrzehnte vergleichbar. Der politische und militärische Prestigekampf der Großmächte UdSSR und USA während der Zeit des Kalten Krieges und der Wettbewerb zweier Gesellschaftssysteme als

42 Karl-Heinz Marek

wesentliche Antriebe für Raumfahrt-Aktivitäten wurden mit der weltpolitischen Wende 1989/1990 beendet. Heute wird die Raumfahrt meist von kommerziellen Zielstellungen und von irdischen Problemen dominiert. Ausschließlich wissenschaftliche Ziele standen bisher nur selten im Mittelpunkt der Weltraummissionen.

b. Die hohen Kosten der bemannten Raumfahrt – besonders verschärft in Zeiten knapper Kassen – haben zu einer restriktiven Finanzierungspolitik und zu politischen Entscheidungen zugunsten anderer Prioritäten geführt. Forschungen mit bemannten Missionen sind meist um ein Mehrfaches teurer als mit unbemannten Satelliten. Allein die Transportkosten mit einem SPACE SHUTTLE betragen ca. 500 Mio. US \$ und übersteigen damit erheblich den Wert eines Satelliten (für ein kleineres Satellitenprojekt werden heute ca. 200 Mio. US \$ veranschlagt). Es wird vielfach beklagt, daß wegen der hohen Kosten eines SHUTTLE-Starts und der Internationalen Raumstation ISS bereits eine ganze Reihe von unbemannten Forschungsmissionen abgesetzt werden mußte.

Auf den bisherigen Nutzen der bemannten Raumfahrt auf wirtschaftlichem, kulturellem, bildungspolitischem und wissenschaftlichem Gebiet wurde bereits früher eingegangen [2]. Dabei wurde die Auffassung vieler Wissenschaftler betont, daß es aus rein wissenschaftlichen Gründen – außer für medizinische Forschungen – kaum eine prinzipielle Notwendigkeit für die Anwesenheit des Menschen im Weltraum gibt. Die überwiegende Mehrzahl der Weltraumaktivitäten kann mit Hilfe von Automaten bzw. Robotern – ebenso wie bereits auf der Erde erfolgreich praktiziert – ausgeführt werden. So wird z. B. die Planetenforschung stets eine Domäne der unbemannten Raumfahrt bleiben. Dennoch kann aus den verschiedensten Gründen von einer Realisierung eines bemannten Fluges zum Mars in den nächsten 2–3 Jahrzehnten ausgegangen werden, auch wenn sein Nutzen vor allem in der Demonstration zu sehen ist, daß Menschen auch praktisch zu einem solchem Schritt in der Lage sind. In dieser Frage ist nahezu die gleiche Situation erkennbar, wie beim APOLLO-Mond-Programm der USA vor ca. 35 Jahren.

Bei der Planung bzw. Bewertung konkreter Missionen muß man allerdings stets den jeweiligen technischen Entwicklungsstand und einige andere Voraussetzungen berücksichtigen, z.B. den Umstand, daß Roboter den Menschen mit dessen Kreativität und Entscheidungs-, Korrektur- und Steuerungsfähigkeit nicht vollständig verdrängen können. Damit die Potenziale der beiden hierfür notwendigen Komponenten des Systems Mensch-Maschine (Roboter) effektiv genutzt werden können, sollte in der Praxis stets eine optimale Kombination dieser beiden Komponenten angestrebt werden. Die Relation zwi-

schen Mensch und Automat und damit zwischen bemannter und unbemannter Raumfahrt wird stets durch die jeweiligen konkreten wissenschaftlich-technischen, sowie die gesellschaftlich-ökonomischen und ethisch-sozialen Erfordernisse bestimmt.

Zu den Diskussionen über Sinn und Nutzen der Raumfahrt gehören neben den den Naturwissenschaftlern näher liegenden technischen und ökonomischen Problemen auch die mehr philosophischen Aspekte im Zusammenhang mit Überlegungen über die ferne Zukunft der Menschheit in ihrem evolutionären Entwicklungsprozeß. Diese Aspekte tangieren unmittelbar die eingangs genannte These von H. Kautzleben. Solche Überlegungen wurden bekanntlich von einer Reihe früherer Pioniere und Visionäre der bemannten Raumfahrt, wie Dolkowski, W. v. Braun, Puttkamer u. a., als eine wesentliche Motivation für die Raumfahrt insgesamt angesehen. In den philosophischen Betrachtungen dieser Visionäre wird in ferner Zukunft eine Besiedlung des Weltraums durch den Menschen und die Existenz außerirdischer Zivilisationen ("extraterrestrische Emigration" mit "Terraforming") für möglich gehalten. Dem entspricht auch der Jahrhunderte alte Traum der Menschen nach Raumfahrt und Weltraumkolonisation. Eines der wichtigsten Hintergründe solcher Auffassungen ist neben dem unbegrenzbaren menschlichen Wissensund Erkenntnisdrang auch die Sorge um eine Erhaltung höherer Formen menschlichen Lebens im Falle einer möglichen künftigen Unbewohnbarkeit der Erde. Andere halten solche Überlegungen allerdings für Unsinn ("Raumfahrt wird zur Traumfahrt"). Obwohl zu dieser Frage gegenwärtig naturgemäß noch keinerlei konkrete Vorstellungen bzw. Gedankenmodelle existieren, sollte man solche Überlegungen nicht von vornherein als unsinnig abstempeln. Man kann heute tatsächlich noch nicht entscheiden, ob diese Frage einmal eine Option für den fernen Entwicklungsprozeß der Menschheit darstellen kann oder nicht. Deshalb sollten die Potenziale der bemannten Raumfahrt auch dafür als eine langfristige Alternative offen gehalten werden [2].

Diese Gedanken an eine in einer sehr fernen Zukunft liegende Vision sollte man trennen von der heute und in absehbarer Zeit vor der Menschheit liegenden sozialen Verantwortung und Verpflichtung zum Erhalt der Geosphäre und zur Beseitigung der Mißstände auf der Erde. Es ist unbestritten, daß gegenwärtig und in naher Zukunft die Nutzung des erdnahen Raumes der Verbesserung bzw. Erhaltung der Lebensqualität der Menschheit auf ihrem Heimatplaneten dienen muß.

Die Entsendung bemannten Expeditionen zum Mars wird in späterer Zeit auch der Erkundung und Erforschung von Möglichkeiten akzeptabler Lebensräume für eine mögliche Kolonisation und das Überleben der menschlichen

44 Karl-Heinz Marek

Zivilisation dienen. Die bemannte Raumfahrt ist für erste praktische Schritte in dieser Richtung bereits gegenwärtig nicht mehr eine Frage der Machbarkeit, sofern die Technologien (speziell die Transportsysteme) entsprechend weiterentwickelt und die logistischen Probleme gelöst werden können. Auch scheinen bei entsprechendem politischen Willen der Raumfahrt betreibenden Länder diese ersten Schritte finanziell durchaus verkraftbar. Schätzungen der jüngsten Zeit [3] zeigen, daß für ein Raumfahrtprogramm im o. g. Sinne Investitionen von insgesamt ca. 60-200 Mrd. US \$ über einen Zeitraum von 20-60 Jahren (im Durchschnitt 2–3 Mrd. US \$ pro Jahr) erforderlich wären. Extraterrestrische Stationen auf dem Mond bzw. Mars würden einige Mrd. US \$ pro Jahr benötigen. Im Vergleich dazu sind die gegenwärtig weltweit für militärische Zwecke ausgegebenen Mittel von insgesamt ca. 800 Mrd. US \$ pro Jahr riesig. Der Irak-Krieg kostet die USA täglich ca. 150 Mio. US \$, innerhalb weniger Monate wurden dafür etwa 75 Mrd. US \$ verbraucht. Das USA-Apollo-Mondprogramm soll im Zeitraum 1962–1972 ca. 100 Mrd. US \$ (nach heutigem Aufwand) gekostet haben.

3. Künftige Entwicklungen der bemannten Raumfahrt

Die bemannte Raumfahrt ist bisher auf den erdnahen Orbit begrenzt. Den Schwerpunkt der internationalen Aktivitäten bildet gegenwärtig die Internationale Raumstation ISS, auf der in erster Linie technologische Entwicklungen und Grundlagenforschungen sowie Nutzanwendungen insbesondere in den Lebenswissenschaften (Biologie, Medizin), den Beobachtungswissenschaften (Astronomie, Erderkundung, Atmosphären- und Klimaforschung) und zur Physik (Materialwissenschaften, Plasmaphysik) ausgeführt werden. Die Zukunft der bemannten Raumfahrt ist jedoch nach dem Ablauf der ISS, deren Lebensdauer ursprünglich bis 2015 geplant war, weitgehend ungewiß. Im folgenden wird auf die Vorhaben der drei Länder eingegangen, die gegenwärtig aktiv bemannte Raumfahrt betreiben.

3.1. Das neue amerikanische Raumfahrtprogramm

Der Präsident der USA G.W. Bush hat im Januar 2004 ein neues Raumfahrtprogramm der NASA verkündet [4]. Dabei hat er vier Punkte genannt:

- Fertigstellung der Internationalen Raumstation ISS bis zum Jahre 2010. Ansonsten gibt es dafür nur ein geringes Engagement, die ISS wird danach sich selbst überlassen.
- 2. Das SHUTTLE-Programm wird 2010 eingestellt. Bis 2014 soll ein neu zu entwickelnder Raumtransporter CEV einsatzfähig sein.

- 3. Es erfolgt eine "Rückkehr" zum Mond:
 - ab 2008 werden für die Erforschung des Mondes unbemannte Sonden bzw. Roboter eingesetzt
 - bis spätestens 2020 soll wieder mit bemannten Mondflügen mit dem Ziel begonnen werden, zur Vorbereitung und Durchführung weiterer Raumflüge (speziell zum Mars) und für die Rohstoffgewinnung eine permanente (bemannte) Außenstation aufzubauen.
- 4. Erforschung des Mars mit Robotern (wie gegenwärtig mit großem Erfolg im Gange) und ab 2030 bemannte Marsflüge.

Das klingt alles nach zügiger Weiterentwicklung der bemannten Raumfahrt – erst zum Mond, dann zum Mars. Tatsächlich sollen jedoch die gegenwärtigen Hauptprogramme der amerikanischen bemannten Raumfahrt -SHUTTLE und ISS – nicht weitergeführt und durch Arbeiten mit Robotern ersetzt werden. Der Ausstieg aus den internationalen Vereinbarungen zum Betrieb der ISS mit einer 6-köpfigen Besatzung ist bereits erfolgt. Auch amerikanische Fachleute, wie z. B. der Regierungsberater R. A. Muller, Berkely University [5], sind der Auffassung, daß die Ankündigungen von G. W Bush eine klare Priorität für die unbemannte Raumfahrt und die Roboterentwicklung darstellen ("Roboter-Raumfahrt"). Offenkundig kommt in der Öffentlichkeit der USA die bemannte Raumfahrt nach den SHUTTLE-Katastrophen nicht mehr gut an. Andererseits haben die Erfolge der amerikanischen unbemannten Raumfahrt, besonders die Mars-Sonden und andere Ergebnisse der jüngsten Vergangenheit, wieder zu einem gestiegenen Interesse an der Raumfahrt geführt. Auch das erscheint der USA-Administration in politischer Hinsicht besonders im Wahljahr und nach dem Irak-Desaster sehr wichtig.

Auf einen völlig anderen Aspekt der Rede von G. W Bush hat neulich Dr. Sigmund Jähn in einem Zeitungsinterview hingewiesen [6]. Danach kann Bushs Plan zur Kolonisation des Mondes weniger als ein kosmisches Forschungs-, als vielmehr als strategisches ökonomisches Programm angesehen werden, das dazu beitragen kann, den USA in einigen Jahrzehnten die Dominanz über den globalen Energiemarkt zu sichern – nämlich dann, wenn wegen des weltweiten Wachstums des Energieverbrauchs und wegen der Verknappung der Energieträger Erdöl, Kohle, Erdgas sowie der nicht ausreichenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Solar- und Windenergie, aus Wasserkraft, Biomasse, Erdwärme u.a.) eine globale Energiekrise unvermeidlich geworden ist. Da wegen der langfristig begrenzten Uran-Vorräte auch die Energiegewinnung durch Kernspaltung offenkundig lediglich eine temporäre Lösung darstellt, verbleibt als einzige unerschöpfliche und ökologisch saubere und ungefährliche Energiequelle die Kernfusion. Für diese

46 Karl-Heinz Marek

stellt das Helium-3-Isotop den vorteilhaftesten Rohstoff dar. Dieser ist jedoch auf der Erde kaum vorhanden, wohl aber in großen Mengen auf dem Mond. Nach Abschätzungen russischer Wissenschaftler, auf die sich S. Jähn in dem Interview bezieht, reicht bei diesem recht abenteuerlich anmutenden und gelegentlich auch als unrealistisch eingeschätzten Gedankenmodell eine SHUTTLE-Ladung Helium vom Mond für den gesamten jährlichen Energieverbrauch der USA, zwei SHUTTLEs - für den jährlichen Energiebedarf der gesamten Erde. Falls in absehbarer Zeit sowohl Gewinnung und Transport des Heliums vom Mond auf die Erde, als auch die Technologie der Kernfusion gelöst werden können, erscheint dieses Modell seinen Schöpfern als ein möglicher Ausweg aus dem erwarteten globalen Energieproblem. All das sind heute noch weitgehend Visionen. Aber Bush als Kenner der Energiewirtschaft und Befürworter der Kernfusion hat bei den Planungen der menschlichen Aktivitäten auf dem Mond ja auch von mehreren Jahrzehnten gesprochen. Ist diese zeitliche Übereinstimmung ein Zufall?

Zur Umsetzung der von G. W. Bush proklamierten neuen amerikanischen Raumfahrtpläne wurden bereits strukturelle Veränderungen bei der NASA eingeleitet. Das Hauptinteresse der USA liegt nicht beim Mars, sondern vielmehr beim Mond mit dem Ziel, eine Mondbasis als "Brückenkopf" zu schaffen.

3.2. Aktivitäten zur bemannten Raumfahrt in Rußland

Rußland hat die Entwicklung der bemannten Raumfahrt in der Vergangenheit durch zahlreiche Erstleistungen bestimmt. Gegenwärtig erfolgt eine inhaltliche Neuorientierung der russischen Raumfahrt, die auch mit strukturellen Veränderungen verbunden ist. Leiteinrichtung ist seit kurzem die Föderale Weltraumagentur FKA unter Leitung von A. Perminow. Zum Jahresende 2004 wird ein neues nationales Raumfahrtprogramm mit einer klaren Positionierung zur Weiterführung der bemannten Raumfahrt erwartet. Im Vordergrund soll dabei ein in sich geschlossenes logisches und pragmatisches Langzeitprogramm stehen [7]. Trotz gewisser inhaltlicher Zusammenhänge werden dabei Mond- und Mars-Aktivitäten wegen ihrer unterschiedlichen inhaltlichen Zielstellungen als getrennte Aufgaben angesehen.

Der ursprünglich für den Zeitraum 2002-2012 ausgearbeitete und international abgestimmte Plan der Nutzung der ISS – basierend auf einer sechsköpfigen Besatzung – soll weiterentwickelt werden. Durch die SHUTTLE-Ausfälle sind bei Aufbau und Nutzung der ISS Verzögerungen von bisher 2-2½ Jahren eingetreten. Der ISS-Betrieb wird z. Z. mit jährlich zwei bemannten SOJUS-Taxiflügen und fünf PROGRESS-Frachtern aufrecht erhalten, was Rußland allein in diesem Jahr 88 Mio. EURO gekostet hat. Dem

stehen Einnahmen von je ca. 18 Mio. EURO für den Mitflug eines ESA-Astronauten bzw. eines Weltraum-Touristen gegenüber. Wegen der Finanzierungsprobleme der USA sind offensichtlich auch Veränderungen an der ISS-Konfiguration unvermeidlich. Neue Module sollen 2006 und 2010 angedockt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der russischen bemannten Raumfahrt ist der Bau des neuen, wieder verwendbaren Raumtransporters CLIPPER für 6 Kosmonauten. Dieser kann bis 500 km weite seitliche Manöver ausführen, so daß damit flexible und punktgenaue Landungen in verschiedenen Regionen möglich sind. Am bewährten Fallschirm-Landesystem wurde festgehalten. Der Transporter ist 10 Meter lang und besteht aus Passagierkabine, Geräte-Antriebsteil und Kopplungsaggregat. Seine Kabine ähnelt dem Cockpit der 1988 unbemannt getesteten Raumfähre BURAN. Der neue Transporter soll 2010 einsatzfähig sein und ist als Pendler zwischen Erde und ISS sowie für weitere künftige Raumflüge, u. a. als Mars-Zubringer, vorgesehen.

Seit 2002 wird beim Bau eines sog. Internationalen Expeditionskomplexes MEK für einen bemannten Mars-Flug, der ab 2013-2014 mit 6 Mann Besatzung erfolgen soll, ein neues Konzept verfolgt. Dabei ist vorgesehen, einen Elektroantrieb auf der Basis von Sonnenenergie anstelle der bis 1988 verfolgten Flüssigkeitsantriebe einzusetzen. Der Flug zum Mars soll von einer Erdumlaufbahn aus erfolgen, auf der Montage und Stationierung des Raumschiffs durchgeführt werden. Generell werden Mars-Flüge für die nächste Zeit als realistisch angesehen, besonders zweckmäßig in internationaler Zusammenarbeit (Perminow 2004). Gegenwärtig ist kein Programm der russischen bemannten Mondforschung bekannt.

3.3. China im Weltraum

Nach dem erfolgreichem Flug des 1. "Taikonauten" Yang Liwei auf dem Raumschiff SHENZHOU 5 im Oktober 2003 plant die VR China eine zügige Weiterentwicklung seiner bemannten Raumfahrt. Die vorgesehenen Folgeschritte lehnen sich an das frühere Programm der Entwicklung der bemannten Raumfahrt in der Sowjetunion an. Nach [8] befinden sich z. Z. 14 Astronauten (Militärpiloten) für künftige Raumflüge im Training. In den nächsten Jahren sollen folgende Schritte folgen:

- Juni/Juli 2005: 2. bemannter Raumflug Chinas mit 2 Astronauten über 5-7 Tage, Durchführung wissenschaftlicher Experimente in einem speziellem Orbitalmodul
- März/April 2006: Raumflug von 3 Astronauten mit Kopplung eines Orbi-

48 Karl-Heinz Marek

- talmoduls und Ausstieg in den freien Weltraum
- Herbst 2006: weiterer Raumflug mit Durchführung verschiedener Kopplungsmanöver
- 2008: Start einer Raumstation (vergleichbar mit russischer SALUT-Serie)
 Daneben hat China ein ehrgeiziges Programm zur Erforschung des
 Mondes begonnen, das folgende Vorhaben beinhaltet:
- Dezember 2006: Orbiter auf Mondumlaufbahn für ca. ein Jahr für eine topographische 3D-Kartierung mit Hilfe einer hochauflösenden CCD-Kamera sowie Infrarot- und Röntgen-Spektrometer
- 2010: Landung einer unbemannten Mondsonde zur Entnahme und Untersuchung von Bodenproben
- 2012: Fertigstellung eines manövrierfähigen Mondfahrzeugs (Rover)
- 2015: Rückführung von Bodenproben von der Mondoberfläche zur Erde
- ca. 2020: bemannte Mondlandung, Tests zur Vorbereitung des Aufbaus einer permanenten bemannten Mondstation

4. Deutschlands Rolle in der bemannten Raumfahrt.

Diese Rolle hat Dr. Sigmund Jähn inhaltlich im November 2003 vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät ausführlich gewürdigt [9]. Ergänzend soll hier darauf hingewiesen werden, daß sich die Raumfahrtstrukturen in Deutschland in den letzten 10 Jahren nachdrücklich verändert haben. Die ehemalige deutsche Raumfahrtagentur DARA wurde in das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR integriert mit dem Ergebnis, dass die DLR nunmehr Aufträge im eigenen Haus vergeben kann. Dennoch erwiesen sich die verfügbaren finanziellen Mittel als nicht ausreichend. Letztendlich trug diese Politik mit zum Niedergang bzw. Ende einer erheblichen Anzahl kleinerer, auf dem Gebiet der Raumfahrtentwicklung und -nutzung tätiger Firmen bei. Auch die deutsche Raumfahrt-Großindustrie durchlebte einen grundlegenden Wandel, der zu neuen europäischen Konzernstrukturen und damit zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit führte.

Die strategischen Leitlinien für die nationale Entwicklung der Raumfahrt in Deutschland wurden bereits im Deutschen Raumfahrtprogramm formuliert, das die Bundesregierung am 16. Mai 2001 verabschiedet hat. Daraus ist die künftige Ausrichtung der Raumfahrt in Deutschland von den früher technologieorientierten auf nunmehr anwendungsorientierte und mit unbemannten Missionen in internationaler Zusammenarbeit zu realisierende Zielstellungen erkennbar.

Entsprechend den Aussagen der für die Raumfahrt zuständigen Bundesministerin für Bildung und Forschung E. Bulmahn [10] wird die Raumfahrt als ein ..unverzichtbarer Pfeiler des Wirtschafts- und Wissenschaftsstandorts Deutschland" und als Innovationsträger der Zukunft angesehen, insbesondere als eine Zukunftstechnologie zur Schaffung neuer Märkte und hochwertiger neuer Arbeitsplätze. Letzteres soll sowohl auf der Basis einer wirtschaftlichen Nutzung vorhandener Raumfahrt-Infrastrukturen, als auch aus dem Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die Praxis realisierbar sein. Diesem nationalen Programm zufolge müssen alle deutschen Raumfahrtprojekte künftig einen klar ausweisbaren Nutzen für den Menschen haben, d.h. die Raumfahrt muß sich mehr als bisher am Bedarf und am künftigen Nutzen für die Praxis orientieren. Im Vordergrund sollen dabei solche "marktnahen" Projekte wie Erdbeobachtung, Satellitennavigation und -kommunikation stehen. Diese pragmatische Position der Bundesregierung einschließlich des seit 2002 praktisch weitgehend erfolgten Finanzierungsstopps für neue Projekte der bemannten Raumfahrt wird von vielen als ein weitgehender Ausstieg der Bundesrepublik Deutschland aus ihrer ehemals in Westeuropa auf diesem Gebiet führenden Rolle angesehen.

In den letzten Jahren sind mehrfach gravierende Einsparungen am deutschen Raumfahrtetat – vorwiegend zu Lasten der nationalen Programme – erfolgt, u. a. im Jahre 2003 um 42 Mio. EURO. Der deutsche Raumfahrtetat 2004 des BMBF sieht noch ca. 560 Mio. EURO als Beitrag für die europäische Weltraumorganisation ESA vor (die BRD ist deren zweitgrößter Beitragszahler), von denen etwa die gleiche Summe als "geographical return" der deutschen Raumfahrtindustrie und den Forschungsgruppen (insgesamt 5200 Beschäftigte) zufließt. Zusätzlich werden das nationale Raumfahrtprogramm aus dem Haushalt des BMBF mit 145 Mio. EURO sowie das DLR mit 60 Mio. EURO finanziert. Dazu kommen für den kommerziellen und wissenschaftlichen Bereich weitere Mittel, insbesondere aus dem Verteidigungs- und dem Verkehrsministerium für Einzelprojekte (Galileo, EUMETSAT usw.). Nach Aussagen des neuen DLR-Programmdirektors für Raumfahrt V. Liebig [11] wird in Deutschland insgesamt jährlich ca. 1 Mrd. EURO in die Raumfahrt investiert.

Deutschland hatte besonders in den letzten zweieinhalb Jahrzehnten in der Zusammenarbeit mit der UdSSR/Rußland, den USA und der ESA wichtige Beiträge zur Entwicklung der bemannten Raumfahrt geleistet. Zusammen mit diesen Partnern haben bisher 10 deutsche Kosmonauten und Astronauten an bemannten Raumflügen teilgenommen (Tab. 1). Es wurden die europäischen Weltraumlabors SPACELAB und COLUMBUS (2006 vorgesehen als Modul

50 Karl-Heinz Marek

für ISS) und das wieder verwendbare Transportsystem ATV (ebenfalls für ISS) entwickelt und gebaut sowie das Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR in Oberpfaffenhofen, das European Astronaut Centre EAC in Köln und das European Space Operation Centre ESOC in Darmstadt betrieben. Von den 16 sich gegenwärtig im Training befindlichen ESA-Astronauten kommen vier (Reiter, Schlegel, Ewald, Thiele) aus Deutschland.

| Sigmund Jähn | 26.0803.09.1978 | Raumstation SALUT-6 |
|---|---|--|
| Ulf Merbold | 28.1108.12.1983 22.0131.01.1992 03.1004.11.1994 | SPACE SHUTTLE COLUMBIA SPACE SHUTTLE DISCOVERY Raumstation MIR |
| Ernst Messerschmidt und Reinhard Furrer | 30.1006.11.1985 | SPACE SHUTTLE CHALLEN- GER |
| Klaus Flade | 17.03.–24.03.1992 | Raumstation MIR |
| Ulrich Walter und Klaus Schlegel | 26.0406.05.1993 | SPACE SHUTTLE COLUMBIA |
| Thomas Reiter | 03.09.1995-29.02.1996 | Raumstation MIR |
| Reinhold Ewald | 10.0202.03.1997 | Raumstation MIR |
| Gerhard Thiele | 11.0222.02.2002 | SPACE SHUTTLE ENDEVOUR |

Tab. 1: Deutsche Raumfahrer

Um so enttäuschender ist, daß es offensichtlich gegenwärtig für die Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt keine nach der ISS in die Zukunft reichenden Visionen und längerfristigen Zielstellungen und damit auch keine entsprechenden Beschlüsse und Finanzierungen – sowohl national, als auch im ESA-Verbund – gibt. Die Defizite an Visionen und Zielstellungen sind naturgemäß gravierender als die o. g. Finanzierungsprobleme, auch wenn beide nicht unabhängig voneinander sind.

Trotz der für die bemannte Raumfahrt in Deutschland wenig verheißungsvollen Perspektiven kann man mit Befriedigung zur Kenntnis nehmen, daß im vergangenen Jahr die deutsche Öffentlichkeit die Leistung des 1. deutschen Weltraumfluges vor 25 Jahren gebührend gewürdigt hat. Dazu gehörten mehrere Veranstaltungen – neben dem bereits genannten Vortrag von S. Jähn vor der Leibniz-Sozietät fanden u. a. im April 2003 in der Archenhold-Sternwarte Berlin-Treptow ein vom Arbeitskreis Fernerkundung Berlin-Brandenburg e.V. organisiertes wissenschaftliches Kolloquium und im August 2003 im Vogtland eine Großveranstaltung der ESA und des DLR mit und unter Schirmherrschaft des Bundespräsidenten J. Rau statt. Daneben gab es Würdigungen

dieses Ereignisses unterschiedlichster Art, wie z. B. auch die Herausgabe eines Sonderbriefumschlages mit Sonderstempel von Potsdam zum Jubiläumsdatum 26. August 2003, der an die Aktivitäten des seinerzeit von H. Kautzleben geleiteten ZIPE bei der Vorbereitung und Auswertung von wissenschaftlichen Experimenten dieses Raumflugs erinnert.

Literatur

- [1] H. Kautzleben: Treffen des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften. Leibniz Intern. Mitteilungen der Leibniz-Sozietät Nr. 21, Berlin 2004
- [2] K.-H. Marek: Wozu bemannte Raumfahrt? Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 68, Berlin 2004, S. 13–24
- [3] H. Koelle: Die Besiedlung des Weltraums und die Zukunft unserer Erde. Raumfahrt Concret, Heft 32, Neubrandenburg 2004
- [4] o. V.: NASA Facts. President Bush Delivers Remarks On U.S. Space Policy. Washington D.C., Jan.14, 2004
- [5] R. A. Muller: Technology Review. Heise Zeitschriften Verlag, Feb. 2004
- [6] Märkische Allgemeine Zeitung, S. V3, Potsdam 22.01.2004
- [7] V. Blagow: Persönl. Mitteilung, Mai 2004
- [8] H. W. Luttmann: Die Chinesen im All. Deutsche Raumfahrtausstellung Morgenröthe-Rautenkranz 2004
- [9] S. Jähn: 25 Jahre deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 68, Berlin 2004, S. 7–11
- [10 o. V.: Welt und All. Deutschlands Rolle in der Raumfahrt. In: Bild der Wissenschaft plus. Stuttgart 2001
- [11]V. Liebig: Perspektiven der deutschen Raumfahrt. Raumfahrt Concret, Heft 32, Neubrandenburg 2004

Heinz Kautzleben: Anmerkungen zum Beitrag von Karl-Heinz Marek

Die heutige Situation der bemannten Weltraumfahrt ist dadurch gekennzeichnet, daß in den vier Jahrzehnten seit dem Flug von Jurij Gagarin auf diesem Gebiet im Prinzip alles verwirklicht wurde, was gegenwärtig technisch möglich ist. Es gibt stabile Lösungen für Langzeitmissionen in erdnahen Umlaufbahnen. Der Flug von Menschen zum Erdmond wurde mehrfach durchgeführt. Die führenden Nationen wissen, wie es gemacht wird und was es kostet. Sie wissen aber auch, was ein Flug von Menschen zum Mars als dem absehbar nächsten Ziel kosten würde. In historisch außerordentlich kurzer Zeit wurde auf diesem Gebiet sehr viel für die Wissenschaft erreicht. Allen ist bewußt,

52 Karl-Heinz Marek

daß weitere Fortschritte mit gleichem Tempo nicht zu erreichen sind. Weitere spektakuläre Erstleistungen sind nicht absehbar.

Die bemannte Weltraumfahrt ist bisher ausschließlich eine Angelegenheit von Staaten. Diese müssen über eine hohe Leistungskraft verfügen und global engagiert sein. Missionen zur bemannten Raumfahrt werden nach wie vor auf Grund von politischen Entscheidungen durchgeführt, bei denen deren Ziele und absehbaren Ergebnisse gegenüber allen anderen staatlichen Aktivitäten abgewogen werden. Gegenwärtig mißt nur noch die VR China der bemannten Raumfahrt eine hohe Priorität zu. In allen anderen Staaten ist ihr Stellenwert deutlich gesunken. Allerdings nicht auf Null! Bei den bisher führenden Staaten wirkt sich außerdem dramatisch aus, daß sie sich über mehrere Jahrzehnte übernommen haben und zum Teil in erschreckend hohem Maße überschuldet sind. Die Kosten der bemannten Raumfahrt werden deshalb heute von ihnen (und der Öffentlichkeit) als "erheblich" bewertet, was relativ ist.

Die Bewunderer und die Aktivisten der bemannten Raumfahrt können nicht mehr davon ausgehen, daß die staatlichen Entscheidungsträger dieses Gebiet von sich aus fördern. Diese werden die erforderlichen Mittel nur dann bereitstellen, wenn ihnen dafür überzeugende Argumente vorgelegt werden. Weit in die Zukunft reichende Visionen – wie die Angst um das Überleben der Menschheit, wenn die heutige Politik die Erde zugrunde gerichtet haben wird – werden dafür wohl nicht genügen. Gefragt sind Argumentationen für den abschätzbaren Nutzen der bemannten Raumfahrt, um die Interessen der Nationen heute und auf absehbare Zeit zu sichern. Beim heute erreichten Stand auf technisch-organisatorischem Gebiet und der durch die Praxis bestätigten Erfahrung über die Möglichkeiten der bemannten Raumfahrt können wir jedoch davon ausgehen, daß überzeugende Argumente die staatlichen Entscheidungsträger umgehend veranlassen werden, die bemannte Raumfahrt verstärkt zu fördern.

Um derartige Argumente für die bemannte Weltraumfahrt auszuarbeiten, können die Erfahrungen nützlich sein, die bei der Erforschung und Erschließung der ehemals am schwierigsten zugänglichen Regionen der Erde, der Polar- und der Hochgebirgsregionen, Jahrhunderte lang bis heute gesammelt wurden. Wer alles hat sich daran auf welche Weise beteiligt? Dabei sollte es auch hilfreich sein, über das Engagement einzelner Enthusiasten und privater Organisationen nachzudenken. Es ist vorstellbar, daß begeisterte Milliardäre Teile ihres Vermögens in die bemannte Weltraumfahrt investieren. Gleiches gilt für die moderne Unterhaltungsindustrie, die über riesige Kapitalmengen verfügt bzw. diese aktivieren kann. Die Wirtschaft wird man interessieren

können, wenn ein wirtschaftlicher Gewinn durch die bemannte Raumfahrt plausibel gemacht werden kann.

Heinz Militzer

Einige Ergebnisse aus tiefenseismischen Untersuchungen im Rahmen des UMP

Mit meinem Glückwunsch an den Jubilar möchte ich eine kurze historische Reminiszenz an wissenschaftliche Aktivitäten und Ergebnisse verbinden, die Ende der 50er Jahre die Fachwelt bewegten und bis in die 70er Jahre hinein unsere Vorstellungen über den Aufbau von Kruste und oberem Mantel mit bestimmten. In den Folgejahren fanden sie durch unseren Jubilar selbst und Mitarbeiter seines Wirkungsbereiches ihre Fortsetzung.

Hinweisen möchte ich auf die ersten Ergebnisse tiefenseismischer Untersuchungen, die anfangs sporadisch und mit großem Aufwand im Rahmen des UMP – des internationalen Upper-Mantle-Projects – zusammengetragen wurden und die zu ersten wichtigen Veränderungen unserer damaligen Vorstellungen über den Aufbau, Zustand und die Dynamik unseres Planeten Erde geführt haben.

Es darf daran erinnert werden, daß auf Beschluß des Internationalen Geophysikalischen Komitees das IGJ (1957/58) – das Internationale Geophysikalische Jahr – als internationale Geophysikalische Kooperation (IGC) fortgeführt wurde. Der erwartete Arbeitsumfang und wissenschaftlich regionale Besonderheiten geophysikalischer Forschungen veranlaßten damals die IUGG (Internationale Union für Geodäsie und Geophysik) die IGC in Regionen zu gliedern. Die DDR gehörte zur Europäisch-Asiatischen Region.

Als internationale Forschungsprojekte wurden festgelegt:

- das Projekt "Oberer Erdmantel (UMP)",
- das "Internationale Jahr der ruhigen Sonne (IQSY)" und
- das "Internationale Hydrologische Dezennium (IHD)".

Bezüglich des Projektes "Oberer Erdmantel" standen anfangs die verschiedenen kontinentalen und ozeanischen Tiefenstrukturen, die Wechselbeziehungen zwischen Kruste und Mantel sowie ihre Bedeutung für oberflächennahe geologische Situationen und Erscheinungen im Vordergrund; das Studium der Rheologie des oberen Mantels, des Welttriftsystems,

54 Heinz Militzer

der Kontinentalränder und Inselbögen und die Frage nach der Kontinentaldrift waren weltweit von Bedeutung.

Anfangs wurden unsere Vorstellungen über den Krustenbau noch vornehmlich durch Berechnungen unter Verwendung seismologischer Daten und an der Erdoberfläche gemessener Bouguer-Anomalien der Schwere gestützt; die Krustenunterkante wurde im klassischen Sinne mit der Moho-Diskontinuität gleichgesetzt (Abb.1).

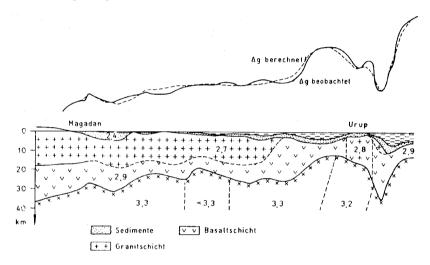


Abb. 1 : Vergleich der Krustenmächtigkeit und -struktur mit Bouguer-Anomalien (umgezeichnet nach Gainanow, Kosminskaja u.a.) [2]

Bereits im Ergebnis erster tiefenseismischer Untersuchungen im Rahmen des UMP jedoch – das waren die Aufnahme und Auswertung großer Steinbruchsprengungen, die Helgoland-Sprengung, die Haslach- und andere Sprengungen – mußten die damaligen Vorstellungen über ein einfaches, dreigliedriges, radialsymmetrisches Krustenmodell der oberen 100 km unserer Erde grundsätzlich revidiert werden.

Speziell aus der Analyse seismischer Wellenfelder traten an ihre Stelle Hinweise über eine ungleichartig dünngeschichtete Kruste mit kilometermächtigen Übergangszonen und tiefen Brüchen, welche die gesamte Kruste durchsetzen, bis in den Bereich der Moho reichen und Verwerfungen der einzelnen Schichtenkomplexe bis zu 20 km und mehr bewirken [2].

Grundsätzlich neue Erkenntnisse mit z.T. anfangs scheinbar widersprüchlichen Annahmen ergaben sich aus der nachgewiesenen Schwankungsbreite

der Tiefenlage der Moho, der Nachweis von Wurzelstrukturen unter den meisten Faltengebirgen, vor allem aber auch die Existenz von "Antiwurzeln" in Gebieten, in denen Erhebungen der Erdoberfläche keine oder nicht entsprechend ausgeprägte Tiefenstrukturen besitzen – so im Bereich des Balkans und der südlichen Karpaten. In diesen Gebieten verlangte einerseits die Isostasie eine Abnahme der Dichte im Mantel, wie normalerweise Depressionsgebiete der Erdoberfläche mit Aufwölbungen der Moho verbunden sind; andererseits mußten aber auch Depressionsgebiete ausgegliedert werden, die offenbar keine Antiwurzeln besitzen. In solchen Gebieten der Erdkruste wurden oft Vertikalbewegungen mit antiisostatischem Charakter beobachtet, d.h. daß nach dem Verlauf der isostatischen Anomalien an Stelle von Hebungen tatsächlich Senkungen auftreten (Ferghanabecken).

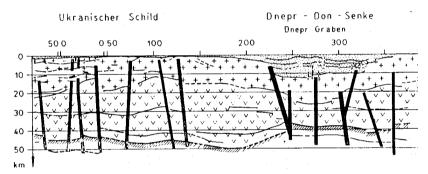


Abb. 2: Krustenprofil über dem ukrainischen Schild und das Dnepr-Don-Becken (umgezeichnet nach Sollugub [2], [3])

Aus der Frequenzanalyse an der Moho refraktierter seismischer Wellen sowie aus der Schärfe von Reflexionseinsätzen ließ sich ableiten, daß in stabilen Gebieten – unter den alten Schilden und tiefen Ozeanbecken – der Übergangsbereich Kruste/Mantel kaum mächtiger als ½ km ist; in Geosynklinalgebieten, in Gebieten mit alpinotyper Tektonik oder in Gebieten der großen Inselbögen dagegen erschien dieser Übergang viel weniger scharf.

Eines der interessantesten Ergebnisse tiefenseismischer Untersuchungen war die in einigen Bereichen nachgewiesene Mehrgliedrigkeit der Moho-Diskontinuität. Das Vorhandensein von zwei oder mehr Moho-Diskontinuitäten wurde speziell im Bereich der Karpaten bis in den angrenzenden Randteil der osteuropäischen Plattform festgestellt, insbesondere in Gebieten der altproterozoischen geosynklinalen Zonen des Ukrainischen Schildes und ihrer Fortsetzung in das Dnjepr-Becken.

56 Heinz Militzer

In der gemeinsamen Monographie "Die Struktur der Erdkruste Mittelund Südosteuropas nach Angaben der Tiefenseismik" [1] und der vorausgegangenen Diskussion vor allem mit Sollugub, Prosen u.a. wurde dazu ausgeführt, daß diese Mehrgliedrigkeit mit entsprechenden Gebirgsbildungen in
Verbindung zu bringen ist und daß die "Moho-Duplikate" Flächen darstellen,
die zu unterschiedlichen Zeiten eine unterschiedliche Tiefenlage besessen haben müssen. Nahe liegt, daß diese Flächen im Profil der Lithosphäre sprunghaft verschoben wurden, wobei die frühere Lage dieser Flächen als Grenze
physikalischer Eigenschaften erhalten geblieben ist. – Diese Vorstellung
konnte nicht mehr nur mit der Moho-Grenzflächenhypothese oder mit Hilfe
elementarer Phasenübergänge Kruste/Mantel erklärt werden, sondern erforderte die Analyse komplizierter Prozesse, die in der Übergangszone Kruste/
Mantel wirken und in ihrer Ursache tief bis in den Mantel reichen [3].

Nunmehr wurde der Schluß plausibel, daß die Moho nicht die untere Grenze der Lithosphäre darstellt, sondern vielmehr innerhalb des Mantels liegen müsse. Möglicherweise liegt ein Wechsel in den mechanischen Eigenschaften erst in Bereichen, die sich etwa mit der oberen Begrenzung der lowvelocity-Zone im Mantel decken.

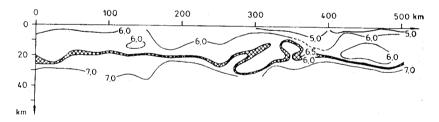


Abb. 3: Tiefenseismisches Profil VI (Debrecen-Brno-Praha-Weimar) – Teilabschnitt Tschechien – unter besonderer Kennzeichnung eines low-velocity-Kanals (umgezeichnet nach Beranek) [2], [4]

Bei tiefenseismischen Untersuchungen längs des internationalen Profils VI konnten seinerzeit z.B. Beranek u.a. Kanäle niedriger Geschwindigkeit im Raum der Donausenke und des Böhmischen Massivs in Tiefen zwischen 15–30 km nachweisen. Die Autoren brachten sie mit einer partiellen Anatexis in Verbindung [4]. Porstendorfer u.a. bestätigten diese Geschwindigkeitsanomalien mittels magnetotellurischer Tiefensondierungen auch als Bereiche anomaler elektrischer Leitfähigkeiten.

Global schwankten Angaben über die Tiefenlage der low-velocity-Zone zwischen 100 bis nahezu 250 km unter den Kontinenten und zwischen 50 bis

mitunter 400 km unter den Ozeanen. Es gab Hinweise, daß die low-velocity-Zone unter den kristallinen Schilden nur schwach ausgeprägt ist und an einigen Stellen ganz zu fehlen scheint. Im Bereich tektonisch aktiver Gebiete nimmt sie wahrscheinlich an Mächtigkeit zu und kann auch die Basis der Kruste erreichen. Diese Annahme gilt für Gebiete im nordatlantischen Ozean, in Island und Japan, im Bereich des Kurilenbogens und in westlichen Gebieten der USA.

Beloussow – einer der damals führenden Analytiker geologisch-geophysikalischer Ergebnisse – setzte sich in diesem Zusammenhang mit der Frage auseinander, weshalb es Bereiche gibt, in denen eine low-velocity-Zone nur für Transversalwellen zu existieren scheint, und ob der low-velocity-Kanal als ein Bereich chemischer Änderungen oder als Intervall mit Phasenübergängen aufzufassen ist.

Vom Standpunkt der Wechselwirkung zwischen oberem Mantel und Kruste war von Bedeutung, ob die mittlere Dichte des Materials im low-velocity-Kanal geringer ist als die Dichte in den Schichten zwischen dem Kanal und der Krustenbasis. Läge eine solche Dichteinversion vor, müsse eine mechanische Instabilität im oberen Bereich des Kanals angenommen werden. Auf der Grundlage eines solch hypothetischen Mechanismus ließ sich ein abgerundetes Schema von Tiefenprozessen herleiten, in dem prinzipielle Möglichkeiten über die Entwicklung vertikaler Krustenbewegungen, des Geosynklinalmagmatismus und eine Reihe anderer Bildungsbedingungen der Kruste sinnvoll eingegliedert werden konnten [5].

Zwischenzeitlich sind diese damals rein hypothetischen Vorstellungen durch einen enormen weltweiten Erkenntniszuwachs in der ganzen Breite aller geowissenschaftlichen Disziplinen bestätigt, konkretisiert oder auch revidiert worden.

Die Krustenschnitte aus Profilbeobachtungen wurden noch in den 70er Jahren unter der Federführung der KAPG (Kommission der Akademien sozialistischer Länder "Planetare Geophysik") durch komplexgeophysikalische Ergebnisdarstellungen entlang kilometerbreiter Geotraversen erweitert; sie lieferten wesentliche Beiträge über krustenbildende und krustenverändernde Prozesse im Bereich der Territorien von Mittel- und Südosteuropa; in den westlichen Ländern wurde die Tiefenreflexionsseismik systematisch zur Analyse des Zustandes sowie der tektonischen Entwicklung von Erdkruste und Teilen des oberen Mantels eingesetzt (z.B. DEKORP – Deutsches Kontinentales Reflexionsseismisches Programm). Das EUROPROBE – ein neueres geowissenschaftliches Großforschungsprojekt hat sich nun zum Ziel

58 Heinz Militzer

gesetzt, die Entwicklung des europäischen Kontinents vom Atlantik bis zum Ural in internationaler und interdisziplinärer Arbeitsteilung zu analysieren und schwerpunktmäßig Teilprobleme zu bearbeiten wie: Tiefes Europa – Gräben und sedimentäre Becken – Transeuropäische Suturzone – Ural und Varisziden [6].

Bleibt uns die Feststellung, daß auch in der DDR schon im Rahmen des UMP wichtige Erkenntnisse über den Tiefenbau unseres Territoriums, über den Verlauf der Moho und die Existenz möglicher Inversionszonen in der Tektonosphäre als Beitrag zur Entwicklung eines modernen Weltbildes gesammelt werden konnten.

Zu Ehren des Jubilars habe ich versucht, ein Streiflicht dieser Entwicklung zu vermitteln.

Literatur

- [1] Sollogub, V.B., Militzer, H., Prosen, C.: Die Struktur der Erdkruste Mittel- und Südosteuropas nach Angaben der Tiefenseismik. *Geodät. u. Geophys. Veröffentl. Hrsg. v. NKGG d. DDR, Reihe III, H.27(1972), 186 S.*
- [2] Militzer, H.: Einige Ergebnisse des UMP als Beitrag zur Lösung tektonophysikalischer Probleme Ergebnisse und Probleme der Geo- und Kosmoswissenschaften. Sitzungsberichte der AdW der DDR. Math. Naturw. Techn., Akad. Verl. Bln 1N(1975), S. 93–116
- [3] Checunov, A.V., Sollogub, V.B. u.a.: Beitrag in "Die Struktur der Erdkruste Mittelund Südosteuropas". KAPG. Naukova Dumka 1971
- [4] Beranek, B., Praus, O.: Die bisherigen Ergebnisse der Untersuchung des tiefen Aufbaus der Erdkruste auf dem Gebiet der ČSSR. Sonderdruck des Instituts für Angew. Geophysik, Brünn, und des Geophys. Inst. d. Akad. d. Wiss., Prag, 1972
- [5] Beloussov, V. V.: Interactions betwenn the earth's crust and upper mantle. The Earth's Crust and Upper Mantle. Am. Geophys. Union. 1969 (Geophy. Monogr. 13)
- [6] Fuchs, K.: EUROPROBE auf den Spuren der Geologie des werdenden Europas. DGG-Mittlg. 4/1992, S. 6–12

Tiefkrustale Bildung von Klüften in Granitplutonen

1. Einführung

Zugbrüche, im natürlichen Gestein geologisch auch als Klüfte bezeichnet, sind weltweit eines der verbreitetsten Phänomene als das Ergebnis einer vorangegangenen Deformation. Sie treten in allen Materialien auf und in jeder Größe, von Mikrometer-Dimension in Metall, Glas und Gestein (Inglis 1913, Irwin 1957) bis zu km-Länge in einer Sandstein-Formation in Nevada (Cruikshank & Aydin 1995). Der Bruch spielt eine große Rolle, sowohl bei der Gestaltung der Erdkruste, als auch im täglichen Leben des Menschen. So entwickelte sich die neuere Bruchforschung bezeichnenderweise u. a. aus Untersuchungen der Rißgefährdung an Werkstoffen im Flugzeugbau. Der Versuch praktischer Schadensbegrenzung führte durch experimentelle Messungen und Berechnungen zur Ableitung grundlegender Gesetze der modernen Bruchphysik, vor allem initiiert durch Griffith (1920).

2. Kenntnisstand Bruchphysik

Die grundlegende Theorie der Rißausbreitung in Festkörpern geht auf Griffith (1920) zurück. Danach müssen zwei Bedingungen erfüllt sein, damit ein Bruch eintritt: 1. Der Bruch muß energetisch gewünscht sein und 2. muß es einen molekularen Mechanismus geben, durch den der Energietransfer erfolgen kann. Der neue und entscheidende Gedanke von Griffith war, die Oberflächenenergie von Bruchflächen mit der Deformationsenergie beim Bruchvorgang (potentielle Energie) zu korrelieren. Schließlich war bis dahin nicht ohne weiteres klar, daß Oberflächen eines Festkörpers Energie besitzen, so wie Wärme, elektrische Energie, mechanische Energie usw.

Diese Theorie begründete die Bruchmechanik und besagt, daß sich ein Riß immer dann ausbreitet, wenn die durch die Rißausbreitung freiwerdende Energie größer ist, als für die Bildung der zwei neuen Bruchflächen nötige Oberflächenenergie und für eine plastische Zone an der Rißspitze. Der Nach-

teil des Griffith-Modells ist, daß die Lösungen an den Rißenden unendlich hohe Spannungen ergeben. Das Problem wurde durch Barenblatt (1962) so gelöst, daß atomare bzw. molekulare Kohäsionskräfte angenommen werden können, welche zu einem Schließen der Rißenden führen. Diese Erweiterung des Griffith-Modells ist besonders in der geologischen Literatur aufgegriffen worden.

Der Griffith-Riß ist am einfachsten zu beschreiben als langer schmaler Riß in einem unter Zug stehenden Körper (Blumenauer & Pusch 1982). Seine flächige Ausdehnung führt, durch radiale Bruchausbreitung vom Initialpunkt aus, zum "pfennigförmigen" Riß, woran die primären "penny-shaped" Klüfte besonders in vielen Granitmassiven erinnern.

Voraussetzung für den Bruch sind Materialdefekte ('flaws') in der Mikrodimension, wie sie in allen Realmaterialien vorkommen.

Fraktographie

Die Bedeutung phänomenologischer Studien an Brüchen wurde an Untersuchungen der 60er Jahre ersichtlich, die in eine sich neu entwickelnde Forschungsrichtung einmündeten: die Fraktographie. Diese Betrachtungsweise der Brüche trägt wesentlich zum Verständnis der Bruchprozesse bei. Wesentliche Erkenntnisse kamen aus experimentellen Untersuchungen, vor allem von seiten der Materialwissenschaften. Die ersten Beschreibungen von fraktographischen Kennzeichen auf geologischen Klüften gehen vereinzelt schon auf die Zeit um 1900 zurück, sie wurden jedoch erst nach 1960 intensiver untersucht (e.g. de Freminville 1914; Hodgson 1961; Bankwitz 1966; Kulander et al. 1979; Pollard et al. 1982; Bahat 1991).

Die geologische Anwendung der Fraktographie auf Kluftuntersuchungen ermöglichte einen großen Fortschritt in der Kluftinterpretation. Diese Kluftoberflächen-Morphologie enthält Informationen über Art und Verlauf des Bruchprozesses selbst (Bankwitz 1966; Bankwitz & Bankwitz 1984, 2000; Kulander & Dean 1985; Segall & Pollard 1983; Lacazette & Engelder 1992; Engelder et al. 1993; Bahat et al. 2003).

Erkennbar sind: das Zentrum der Bruchentstehung und die Bruchöffnungsarten (Modi) sowie Richtungen der Bruchausbreitung (Abb. 1); abzuleiten sind: die Spannungsverteilung, die Art des Bruchs (Ermüdung, Spröd- oder duktiler Bruch; verursacht durch Impakt oder thermische Einflüsse), Eigenschaften des initialen Risses, und ob die Oberflächenmerkmale einen einzelnen oder einen vielphasigen Bruchprozeß abbilden. Die Fraktographie ist damit eine Basis für bruchmechanische Analysen, für die Ableitung der Bruchspannung, der Bruchzähigkeit und damit verbundener Parameter von Klüften.

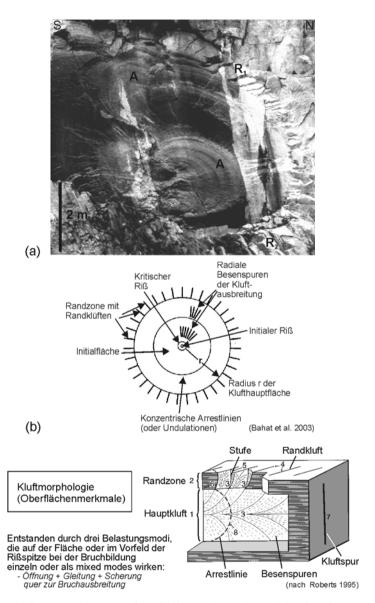


Abb. 1: (a) Kluft mit Arrestlinien ,A' und Randklüften ,R' (Sunne-Granit, Schweden). (b) Termini der Kluftoberflächenmerkmale. (c) Kluftmerkmale in 3D-Darstellung.

(c)

Fraktographische Untersuchungen befaßten sich geologisch bisher nahezu ausschließlich mit Sedimentgesteinen bzw. experimentell mit Glas, Keramik, Metallen, Baustoffen etc.

3. Untersuchte Probleme Variation von Kluftmerkmalen

Die Ausbreitung eines Bruches wird häufig durch Inhomogenitäten oder bereits vorhandene Flächen im Gestein (z.B. Schichtung in Sedimenten) infolge der dort herrschenden lokalen Spannungen behindert. Deshalb können Klüfte ihre volle Größe (in Abhängigkeit von der Spannung) und die charakteristischen Bruchmerkmale (in Abhängigkeit vom Bruchmechanismus und der Rißöffnungsart) nur in isotropen Materialien entwickeln. Am ehesten ist ein solcher *Proto-Typ einer geologischen Kluft* in einem undeformierten, quasiisotropen Granit zu untersuchen, sofern man große Aufschlüsse hat, denn diese Klüfte werden 10 m bis mehr als 100 m groß.

Die fraktographischen Kluftmerkmale sind vermutlich je nach Entstehungszeitpunkt im Ablauf der Kristallisations- und Exhumierungsgeschichte oder Bildungsort unterschiedlich ausgebildet. Einige dieser Merkmale treten gehäuft in manchen Plutonen auf, so z.B. Kluft- und Gang(kontakt)oberflächen mit vielen Arrestlinien oder bestimmte Abweichungswinkel der Randzone oder der Randklüfte von der Hauptfläche oder aber besonders rauhe oder besonders glatte Oberflächen. Eine bisher überhaupt nicht in Betracht gezogene Frage war, ob die Variationen der Kluftkennzeichen zufällig oder systematischer Art sind und eventuell zusätzliche Informationen über einen Pluton liefern können, möglicherweise verbunden mit Anhaltspunkten für eine grobe Abschätzung der Entstehungstiefe dieser Klüfte.

Mögliche Krustentiefe der Kluftentstehung

Seit langem in Diskussion ist die Frage nach der Tiefe, in der Klüfte noch entstehen können. Bereits Crosby (1882) argumentierte, daß Zugspannungen in tief abgesenkten Gesteinen wegen der Wärme und des enormen Überlagerungdrucks nicht existieren. Hubbert (1951) vertrat die Auffassung, daß die vertikale Spannung in einer gegebenen Tiefe gleich dem Überlagerungsdruck ist und sich deshalb in der tieferen Kruste Klüfte nicht bilden können, weil es für jedes Material eine kritische Tiefe gibt, unterhalb der die horizontalen Spannungen kompressiv sind. Bereits in geringer Krustentiefe sollten absolute Zugspannungen nicht mehr möglich sein. Griggs & Handin (1960) mein-

ten, dies sei schon unterhalb weniger hundert Meter der Fall. Secor (1965, 1969) dagegen postulierte, daß Zugbrüche sich bis in einigen 1000 Metern Tiefe entwickeln können, wenn ein *interner Flüssigkeitsdruck*, ungefähr so groß wie die kleinste kompressive Spannung im Gestein, auf die Innenseiten des Bruches wirkt. Wenn eine Flüssigkeit den Bruch vorantreibt, entstehen hydraulische Klüfte oder Gänge. Auf der Grundlage der Theorie von Secor vermutete Engelder (1985) die Bildung tektonischer Klüfte in Tiefen zwischen 0,5 und 2,5 km, die von hydraulischen Klüften bis in 5 km Tiefe. Segall & Pollard (1983) ließen die Frage offen, in welcher Tiefe erste Granitklüfte entstehen, wiesen jedoch als erste auf die Möglichkeit hin, daß dies zwischen der Intrusionstiefe (im von ihnen untersuchten Granit auf 15 km geschätzt) und ca. 1000 m unter der Oberfläche sein könnte.

Secor (1965, S. 41) schrieb: "Wenn ein geologisches Phänomen unter Anwendung physikalischer und mathematischer Methoden analysiert wird, tendieren die Resultate zu einer Aura von Präzision und Eleganz, welche nicht gerechtfertigt ist. Es muß daran erinnert werden, daß Gesteine extrem komplizierte Systeme darstellen und die Anwendung physikalischer Gleichungen im günstigsten Fall eine grobe Annäherung und ein armseliger Ersatz für empirische Daten über das Verhalten des Gesteins ist. ... Zugbrüche in der Tiefe der Erdkruste sind ein *unglaublich komplizierter Vorgang.*"

Hvdraulische Brüche

In großer Bildungstiefe, unterhalb mehrerer Kilometer, sind unter lithostatischen Bedingungen nur noch hydraulische Kluftbildungen möglich durch Druck auf die Innenwände eines Haarrisses und durch Weiterwachsen des Bruches zu einer Kluft durch ständig oder wiederholtes Nachdringen von Fluida (Engelder et al. 1993). Das gleiche gilt für spätgranitische Gänge, die in Tiefen mit lithostatischen Bedingungen entstehen: *Bekannt ist*, daß sie a) entweder in hydraulisch entstandene Klüfte innerhalb des Plutons intrudieren (hydraulische Intrusionskluft) oder daß sich b) ein Gang durch das Eindringen einer Restschmelze in den sich dabei synchron bildenden Bruch entwickelt (interner hydraulischer Bruch; Mandl 2000; Abb. 2a). Im letzteren, als dominierend angenommenen Fall, sind Kluftfläche (als Gangwand = Kontakt) und Kluftfüllung (= kristallisierte Schmelze = Gang) zwei genetisch zusammengehörige Teilformen eines "internen hydraulischen Zugbruchs" (Abb. 2b–c).

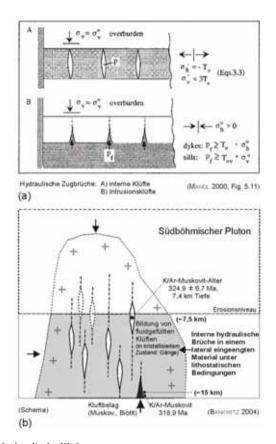


Abb. 2: Interne hydraulische Klüfte.

- (a) Bruchphysikalische Betrachtung nach Mandl (2000). A: interne hydraulische Zugklüfte in einem horizontal eingeengten Material, mit einem Flüssigkeitsdruck, der sich innerhalb des Materials entwickelt. B: hydraulische Intrusionsklüfte, die von einem Reservoir außerhalb der Mate-rialschicht gefüllt werden.
- (b) Schema der ersten Bruchbildung im Mrákotín-Granit (Tschechische Republik) in Form von internen hydraulischen Zugklüften, deren Füllung aus dem Material der direkten Umgebung des Bruchs stammt. Am unteren Ende (schwarz): hydraulische Intrusionskluft im Weinsberg-Granit (Österreich) mit hydrothermalem Kluftbelag.

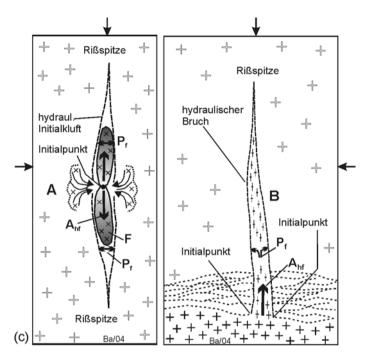


Abb. 2: (c) Einströmen der Flüssigkeit in den Initialpunkt eines Bruchs mit unterschiedlicher Ausbreitung im ständig größer werdenden Bruch: in Typ A vom zentralen Initialpunkt aus in alle Richtungen, in Typ B von unten nach oben. P_f: Flüssigkeitsdruck; A_{hf}: Ausbreitung der Flüssigkeit.

Nicht bekannt war bisher, bis in welche Tiefen derartige hydraulische Klüfte entstehen können. Theoretische bruchphysikalische Berechnungen ergaben bei Berücksichtigung spezieller bruchmechanischer Bedingungen, jedoch nur unter Anwesenheit eines *starken Überdrucks*, eine theoretische maximale Bildungstiefe von ca. 8 km (Mandl 2000).

Granitklüfte besitzen in nicht wenigen Fällen Oberflächenmerkmale, die ein zyklisches Rißwachstum anzeigen und auf denen außerdem Gangmaterial erhalten ist. Merkmale einer zyklischen Kluftausbreitung sind von Sedimenten seit langem bekannt (z.B. Lacazette & Engelder 1992) und können als Sprödbruch-typische Formen in allen sich spröde verhaltenden Materialien auftreten. Von Graniten waren die hier vorgestellten Kluftformen bisher nicht bekannt. Sie wurden erstmals von Bankwitz et al. (2004), Bahat et al. (2001, 2003) sowie Bankwitz & Bankwitz (2000, 2004) dargestellt.

4. Lösungsweg und Teilergebnis

Spätgranitische Gänge in einem Pluton haben entweder den Bruch selbst produziert, in dem sie jetzt stecken (Kontaktflächen des Ganges), oder die Kluft war prä-existent. In beiden Fällen liefern *Analysen des Gangmaterials* Informationen sowohl über den Gang als auch über seine Kontaktwände, d.h. die Kluftfläche selbst. Eine Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen im Gang ermöglicht die Berechnung seiner Abkühlungstiefe und damit der Tiefe, in der die hydraulisch entstandene Bruchwand des Ganges gebildet wurde. Für den Fall prä-existenter Brüche ist das eine Mindesttiefe. An Muskoviten des Gangmaterials kann das Abkühlungsalter der Gang- und Bruchbildung bestimmt werden. Diese Daten wurden erstmalig für zwei Gänge im Südböhmischen Pluton (SBP) ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2b schematisch veranschaulicht.

Altersdatierung

Zum Nachweis eines frühen Zeitpunktes der ersten Bruchbildung im Mrákotín-Granit (N-Teil des SBP) sind K/Ar-Datierungen an Muskoviten in spätgranitischem Gangmaterial auf zwei Zugklüften (Wemmer, in Bankwitz et al. 2004) vorgenommen worden sowie weitere Bestimmungen für den Weinsberg-Granit selbst (S-Teil des SBP). Die Alter von 324.9 Ma und 318.9 Ma korrelieren mit dem Intrusionsalter der Plutone (Scharbert 1998).

Thermometrische Untersuchungen an Granitproben

Aus der Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen (n=17) in dem Gangmaterial des Mrákotín-Granits (Tab. 1) ist das Krustenniveau der Gangbildung und der dazu gehörigen Kontaktflächen (Thomas, in Bankwitz et al. 2004) bestimmt worden. Fluid-Einschlüsse in dem Füllmaterial der Klüfte sind z.B. nach Srivastava & Engelder (1992) besonders hilfreich, um Daten der Druck- und Temperatur-Bedingungen des bruch-antreibenden Fluids zur Zeit der Bruchausbreitung zu gewinnen.

| Probe | Salinität (NaCl- Äquiv.%) | Homogenisierungs- temperatur (°C) | n | Bildungs- temperatur (°C) | Bildungs druck (kbar) | Tiefe (km) |
|-------|---------------------------------|---|----|---------------------------------|-----------------------------|---------------|
| FK-1 | 5.8 <u>+</u> 0.6 | 375 <u>+</u> 6 | 17 | 620 | 1.89 | 7.4 |
| FK-11 | 13.8 <u>+</u> 0.2 | 332 <u>+</u> 10 | 20 | 662 | 3.65 | 14.3 |

Tab. 1: Ergebnis der Fluid-Einschluβ-Analysen. FK-1: Mrákotín-Granit; FK-11: Weinsberg-Granit. Zur Methode: siehe Thomas, in Bankwitz et al. (2004, im Druck).

Fraktografische Untersuchungen

Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen auf eigenen Geländebeobachtungen in zahlreichen Graniten in Europa, wo systematische Flächen- und Winkel-Messungen an den Kluftoberflächen und ihren Oberflächenmerkmalen (Morphologie; Winkel der Abweichungen aus der Hauptfläche) vorgenommen wurden. Grundlage der Betrachtung war die räumliche Verteilung und Raumlage der Haupkluftscharen und vor allem ihre *relativzeitliche Abfolge*. In die vorliegende Auswertung wurden nur die jeweils *ältesten Klüfte* (vor allem aus dem Südböhmischen Pluton: SBP) einbezogen, da die frühesten Klüfte möglicherweise in größerer Tiefe gebildet wurden als spätere.

Es wird allgemein angenommen, daß viele Klüfte erst während der Krustenexhumierung und damit in höheren Krustenniveaus, oder nahe der Oberfläche (Entlastungsklüfte) entstanden. Deshalb werden spätere Kluftbildungen dafür nicht berücksichtigt. Die relativzeitliche Bruchabfolge wurde ermittelt nach den gebräuchlichsten Kriterien: Initiierung jüngerer Klüfte oder deren Beendigung an präexistenten Brüchen; auch das Abbiegen jüngerer Kluftflächen bei Annäherung an eine älteren Kluft (Bankwitz 1966; Bankwitz & Bankwitz 1984, 2000; Bahat 1991; Engelder et al. 1993).

Mit diesen drei Methoden, der fraktographischen Untersuchung, der physikalischen Alterdatierung und der thermometrischen Flüssigkeitseinschluß-Analyse, wurde die Bildung der *ersten* Klüfte in einem Pluton vor 324,9 Ma in 7,4 km bzw. 15 km Tiefe (Tab. 1) nachgewiesen.

5. Bruchmerkmale als Ergebnis von Spannungsbedingungen und Antriebskräften

Form und Oberflächenmerkmale von Klüften, die per definitionem stets Weitungsbrüche sind, variieren nicht nur in den verschiedenen Graniten, sondern auch von Kluftschar zu Kluftschar im gleichen Pluton. Da die Kluftscharen in der Regel zu unterschiedlichen Zeiten entstanden sind, gehen ihre Formen auf unterschiedliche Spannungsverhältnisse zurück, die jeweils zur Zeit ihrer Bildung bestanden. Orthogonale Richtungen bilden nicht unbedingt ein zeitgleich entstandenes Kluftsystem. Klüfte, die nacheinander entstanden sind und auf verschiedene Ereignisse im Granit oder im regionalen Umfeld zurückgehen, können sich signifikant unterscheiden.

Das *lokale Spannungsfeld* an der Rißspitze kann das Wachstum des Bruchs bewirken, ebenso das jeweilige *pluton-interne* Spannungsfeld (Druck-Temperatur-Regime) oder das *regionale*, "*ferne*" Spannungsregime

außerhalb des Plutons. Jedes Spannungsfeld beeinflußt die Orientierung und die Oberflächenmorphologie der Klüfte. Während der Kluftausbreitung bis zum natürlichen Ende (Abb. 3) können die genannten Spannungsbedingungen wechseln und, damit verbunden, die den Bruch vorantreibenden Kräfte und Bruchmechanismen. Engelder & Fischer (1996) unterscheiden vier Antriebskräfte: (1) Dehnung senkrecht zur Kluft, (2) thermoelastische Kontraktion, (3) durch Fluida angetriebener Bruch, (4) "axial splitting" parallel zur maximalen Kompression. Die fluid-getriebenen Klüfte sind natürliche hydraulische Brüche.

Vor allem in quasi-isotropen Materialien, z.B. in undeformierten Graniten, entsteht der Prototyp einer Kluft: runde bis elliptische "penny-shaped" Initialklüfte (Abb. 3), wie sie z.B. im Südböhmischen Pluton auftreten. Fluidgetriebene Klüfte zeigen häufig ±konzentrische Arrestlinien in Form von Ringen oder Flächenundulationen, die auf Verzögerungen infolge des zu langsam nachfließenden Fluids als Antriebs-Agens zurückgehen. Diese Arrestlinien könnten auch auf eine seismisch getriggerte Bruchausbreitung hinweisen (Engelder et al. 1993). Unter lithostatischen Bedingungen in größerer Tiefe wird der Trigger-Effekt hauptsächlich das Nachfließen des Fluids beschleunigen, und partiell einen kurzzeitigeren Ablauf der hydraulischen Kluftbildung ermöglichen.

Den äußeren Rand der Klüfte bilden aus der Fläche abbiegende Randzonen (tilt-Winkel, Abb. 4), die meist besetzt sind mit rotierten Randklüften (twist-Winkel). Verantwortlich ist der Trend des lokalen Spannungsfeldes (Wechsel der Zug-/Druckspannungen) an der voranschreitenden Rißspitze bzw. im Vorfeld (Abb. 4, A und B), oft verursacht durch das lokale Spannungsfeld einer benachbarten Kluft oder einer anderen Inhomogenität des Gesteins (Bankwitz 1966; Kulander & Dean 1985; Dyer 1988; Pollard & Aydin 1988; Olson & Pollard 1989). Den dabei auftretenden Scherspannungen (Modus II oder III) weicht die Rißspitze durch Rotation (tilt-/twist-Winkel) aus, um sich weiterhin im Modus I (Rißöffnungsmodus) öffnen zu können. Die weitere Kluftausbreitung verläuft stets senkrecht zur Zugspannung (Y) oder kleinsten Kompressionsspannung (Lawn & Wilshaw 1975; Atkinson 1987). Das Schema der Abb. 4 zeigt lediglich Kluft-Ausschnitte von in der Regel runden bis elliptischen Initialflächen (s. Abb. 3) mit umlaufenden Randzonen.

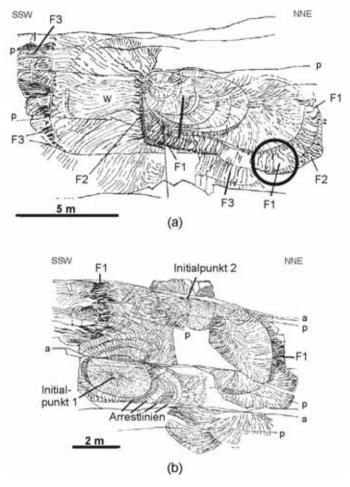


Abb. 3: Beginn der Bruchausbreitung im jeweils innersten Ring. F1–F3: Randzonen; a: prä-existente alte Lagerklüfte; p: junge Entlastungsklüfte. Radiale Besenspuren (plumes): Ausbreitungsrichtung. Arrestlinien (ringförmige Strukturen) belegen ein zyklisches Bruchwachstum. (a) Der Riß breitete sich lateral zunächst nur in NNE-Richtung aus. Nach Erreichen der Randzone 2 (F2) endete dieses Rißwachstum und die Kluft breitete sich anschließend nur nach SSW aus (Gesamlänge: 15 m). Kreis: Probenahmepunkt für Altersdatierung und Paläo-Tiefenbestimmung auf der äußeren Randzone. (b) Zwei Initialpunkte, welche während der weiteren Bruchausbreitung miteinander wechselwirkten. Aufschluß: Stbr. Boršov.

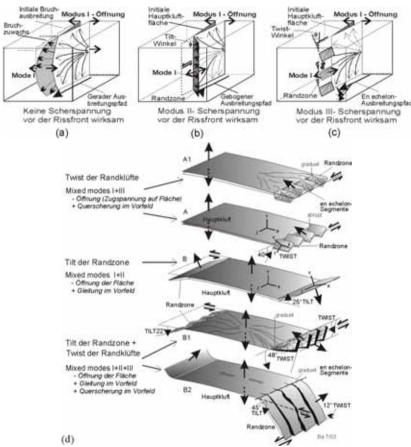


Abb. 4: Rißfront mit einem kleinen Zuwachs an neuer Bruchfläche (grau). (a) Planarer Bruchausbreitungspfad unter Modus I-Bedingungen (Öffnungsmodus). (b) Aus der Hauptfläche abgebogener (tilted) Pfad, infolge einer lokal wirksamen Scherspannung vor der Rißfront der geöffneten Hauptkluftfläche (mixed mode I + II). (c) Aus der Hauptfläche herausgedrehter (twisted) Ausbreitungspfad der Kluft infolge von Scherspannung im Vorfeld des Risses (mixed mode I + III). (b) und (c): Der Riß wandert aus der Scherspannungsrichtung in eine Position senkrecht zur Zugspannung, weil er sich nur in dieser Stellung öffnen kann (Modus I). Verändert nach Pollard & Aydin (1988). (d) Verschiedene Arten von Randzonen (AI–B2) mit Indikationen ihres Bildungsverlaufs und der Spannungsverhältnisse an der Rißspitze (Modus I, II oder III) sowie der Rißöffnungsarten. A und B: Grundformen; Rotationswinkel: der Randzone (tilt, B–B2) und der Randklüfte (twist, A–A1 und B1–B2). X – Richtung der maximalen, Y – der kleinsten Spannung.

6. Varianz von Modus II und III (tilt und twist) in unterschiedlicher Entstehungstiefe

Ändern sich zeitlich oder auch räumlich die Spannungsbedingungen, so ändern sich auch die Kluftmerkmale: z.B. die Form der Hauptkluftfläche, der Randzone und ihrer Randklüfte sowie, als besonderes Kennzeichen, die Winkel der Abweichung aus der Hauptkluftfläche (tilt und twist). Diese Änderungen treten offenbar besonders mit zunehmender Tiefe auf. Betrachtet man nur die jeweils zuerst entstandenen Granitklüfte, stellt man eine offensichtlich systematische Variation der Merkmale in den verschiedenen Plutonen fest. Das betrifft nicht nur ihre Größe, die Ebenheit oder Rauheit ihrer Hauptfläche, sondern besonders den Grad der Abweichung der Randzonen und der Randklüfte aus der Hauptfläche (tilt- und twist-Winkel, wie in Abb. 4 demonstriert).

Es scheint, daß tief-intrudierte Granite eine andere Winkel-Kombination an den Klufträndern aufweisen als flachere Intrusionen. Voraussetzung für diese Annahme ist, daß Intrusions- oder Platznahme-Tiefen wenigstens ungefähr bekannt sind. Exakte Daten dazu fehlen häufig. Abbildung 5 zeigt summarisch die am häufigsten gemessenen Formen und Winkelbeziehungen der ersten vertikalen Granitklüfte, so wie sie im Gelände beobachtet worden sind. Die Winkelgröße von 25° wurde empirisch für die Abgrenzung der Gruppen A und B gewählt, auf der Grundlage der Beobachtungen im Gelände. Tilt-Winkel bis nahe 90° sind selten, fast nur in Ausnahmefällen zu beobachten, Winkel darüber praktisch überhaupt nicht.

Die bevorzugten Winkelkombinationen (großer tilt-/kleiner twist-Winkel und umgekehrt) in Abbildung 5 ergaben sich allein aus der Messung morphologischer Details von vielen tausend Kluftoberflächen (Bankwitz & Bankwitz 2004). Diese Korrelation erwies sich als ein offensichtlich systematischer Trend in vielen Graniten. Sie belegen eine Abnahme der vertikalen Scherung in der Bruchfläche (Modus II) und eine Zunahme der lateralen Scherung quer zur Fläche (Modus III) mit der Tiefe. Das deutet auf einen Zusammenhang mit den veränderten Spannungsbedingungen der tieferen Erdkruste hin.

Ein Vergleich der gemessenen Kluftmorphologie mit der wahrscheinlichen Tiefe der ersten Bruchbildung in Graniten war möglich, da für einige Granite die Intrusionstiefe mit Hilfe von Flüssigkeitseinschlüssen (Süd- und Mittelböhmischer Pluton: 7,4 km und 14,3 km; Thomas in Bankwitz & Bankwitz 2004; Erzgebirgsplutone: ~3 km, Thomas & Klemm 1997; Rönne-Granit/Bornholm: ca. 15–20 km, Thomas, pers. Mitt. 2003) oder die finale Platznahme in der metamorphen Hülle durch P-T-Pfade der Mineralparage-

nesen bestimmt worden sind (Granite der Oberpfalz, wie Falkenberg-, Flossenbürg-, Leuchtenberg-, Steinwald-Granit: 9–12 km, Zulauf et al. 1993),

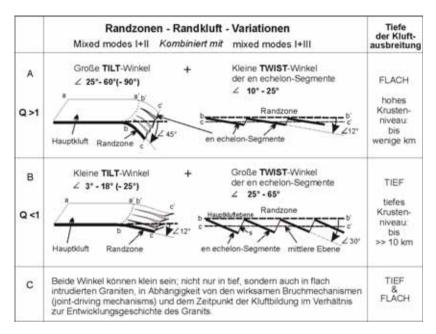


Abb. 5: Verbreitete Kombination von tilt- und twist-Winkeln der frühesten Sprödbruchklüfte in verschiedenen Graniten Mitteleuropas. Ausgewertet wurden zahlreiche Einzelplutone in 14 Granitmassiven von Skandinavian bis zur Insel Elba. In den hochkrustal-intrudierten Graniten (Gruppe A, z.B. Erzgebirgsgranite) dominieren große Rotationswinkel (tilt) der Randzone und kleine Rotationswinkel der Randklüfte (twist < 25°, empirische Grenze). In tief-intrudierten Graniten (Gruppe B, z.B. Südböhmischer Pluton) ist eine umgekehrte Beziehung das beherrschende Phänomen: flach aus der Hauptkluftfläche abweichende Randzonen tragen Randklüfte mit beachtlicher Rotation quer zur Ausbreitungsrichtung (twist > 25°). Mixed modes: Spannungsverhältnisse an der Rißspitze (Abb. 4). Klüfte mit sehr schwach ausgebildeter Oberflächenmorphologie besetzen die Gruppe C. Q. Quotient tilt/twist-Winkel. a,b,c und a',b',c': vergleichbare Lokalitäten in der 3D-Skizze und im Schnitt durch die Randzone.

und von vielen Graniten die Erstarrungstiefe durch petrologische Daten in Verbindung mit geologischen und geophysikalischen Schweredaten annähernd geschätzt werden konnte (z.B. Bohus-Granit in Schweden, Granite von Donegal/Irland, Mte. Capanne-Granit/Elba). Eine systematische Beziehung zwischen manchen Bruchformen und der Tiefe ihrer Entstehung zeichnet sich ab.

Konzentriert man die Betrachtung auf das Verhältnis Hauptkluft/ Randzonen, so können drei Gruppen von Bruchformen unterschieden werden (Abb. 5, A–C). Offenbar ist jeweils eine dieser Gruppen typisch für die erste Bruchbildung in einem Pluton. Die Kluftentwicklung in als flach intrudiert angese-

henen Graniten war in den Aufschlüssen durch große Abweichungswinkel der Randzone (tilt) gekennzeichnet, kombiniert mit einem kleinem Drehwinkel (twist) der Randklüfte (Gruppe A, z.B. Erzgebirgsgranite). In tief intrudierten Graniten dominieren erste Klüfte mit einem schwach oder nicht abgebogenem Rand, der jedoch mit Randklüften besetzt ist, die stark aus der Hauptfläche herausdrehen (Gruppe B). Die letzte Gruppe C umfaßt Klüfte mit sehr schwach ausgebildeter Oberflächenmorphologie und kleinen tiltund twist-Winkeln.

Die Meßwerte der twist- und tilt-Winkel einer Kluft zeigen für flach intrudierte Granite (≤ 3 km) und für Plutone mit tiefkrustaler Platznahme (7–15 km, Tab. 1) eine signifikant unterschiedliche Verteilung (Abb. 6a). Die Verteilungsmuster unterstreichen eine Tiefenabhängigkeit dieser Kluftformen. In den tief intrudierten Graniten bleibt die jeweilige Abbiegung der Randzone aus der Hauptkluft mehr oder weniger gleich und ist generell gering (tilt < 25°), dagegen variiert der twist-Winkel der Randklüfte stark und wird sehr groß (vertikale Punktwolke; deutliche en echelon-Ausbildung). Die Streubreite des tilt geht ein wenig auf die Schwierigkeit zurück, viele Daten mit sehr ähnlichen Werten auf engstem Raum darstellen zu müssen.

In den flacher intrudierten Graniten ist das Verteilungsmuster anders. Die horizontale Punktwolke zeigt ein großes Spektrum der Abbiegungswinkel von Randzonen (tilt), variiert vertikal jedoch nur um ca. 10°. Das heißt, die Randklüfte selbst sind nur ganz schwach aus der Hauptfläche herausgedreht (kleiner twist-Winkel) und ihre en echelon-Stellung ist schwach entwickelt.

Betrachtet man das Winkelverhältnis tilt/twist, so ist zu erkennen, daß mit zunehmender Tiefe der Granitintrusion oder Granitplatznahme die Variation der Quotienten kleiner wird (Abb. 6b). In den flacher intrudierten Graniten (Erzgebirge und Insel Elba) variiert der Quotient um mehr als zwei Größenordnungen (0,1 bis >10).

In den tieferen Intrusionen (Süd- und Mittelböhmischer Pluton) liegen die Werte ganz überwiegend innerhalb einer Größenordnung und unter "1", was eine relativ kleine Abbiegung der Randzonen (tilt) im Verhältnis zur größeren Drehung der Randklüfte (twist) anzeigt. Den extrem tief intrudierten Weinsberg-Granit (~15 km Paläotiefe des heutigen Anschnitts) charakterisiert ein Winkel-Quotient von 0,4–1,0. Die Quotienten stellen sich mit zunehmender Tiefe unter "1" ein, offenbar um den Wert von ca. 0,7. Die Winkel im Weinsberg-Granit sind nach dem Geländebefund generell kleiner als z.B. im Mrákotín-Granit (Boršov) im N-Teil des Plutons.

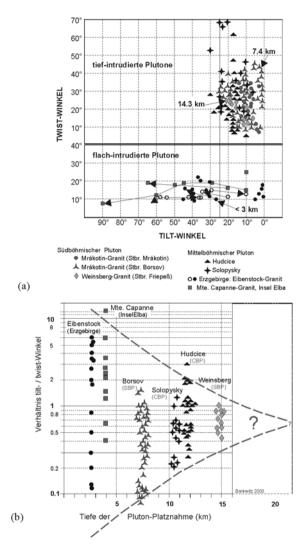


Abb. 6: (a) Tilt- und twist-Winkel von Randzonen der ersten Klüfte in Granitplutonen, deren Intrusionstiefe nach Literaturangaben und eigenen Untersuchungen bekannt ist. Intrusionstiefe in km auf der Grundlage von Schmelz- bzw. Flüssigkeitseinschlüssen für das Erzgebirge und den Südböhmischen Pluton (Thomas 1994, Thomas in: Bankwitz et al. 2004) und nach petrologischen und Schweredaten. (b) Das Winkelverhältnis twist/tilt gegen die Tiefe der Granitintrusionen. Die Namen bezeichnen verschiedene Granitplutone.

Die *Daten* in Abb. 6 zeigen, daß tiefere Granite andere Kluftformen entwickeln als höher intrudierte. Das "Eichdatum" des Granits von Boršov, in dem die untersuchten Klüfte im Kristallisationsniveau der Gänge gebildet wurden, mit vergleichbarem Alter zur Platznahme des Granits selbst, legt die *Annahme* nahe, daß die ersten Klüfte sich auch in anderen Graniten bereits während der Kristallisation und Platznahme gebildet haben könnten.

Die zunehmend unter "1" liegenden Quotienten in Abbildung 6b weisen darauf hin, daß die wandernde Rißfront der Klüfte sich in den tieferen Plutonen immer weniger aus der Hauptfläche heraus bewegt. In großer Tiefe (15 km) gibt es offenbar nur noch schwache Abbiegungen (Abb. 6a) und auch die Drehung (twist) der Randklüfte wurde im Weinsberg-Granit kleiner. Die asymptotische Abnahme der Quotienten oberhalb und unterhalb "1" in Richtung auf den Quotienten 0,7 könnte auf eine Möglichkeit der Bruchbildung bis in 20 km Tiefe hindeuten, möglicherweise auch noch darüber hinaus. Für eine endgültige, gesicherte Kurvenfestlegung sind allerdings noch mehr Daten nötig.

Man könnte das Argument ins Feld führen, daß man sich hier im Bereich einer duktilen Kruste befindet, unter P-T-Bedingungen, die einem Sprödbruch nach bisherigen Kenntnissen widersprechen. Daß dies kein Argument gegen Sprödbruchbildungen in dieser Tiefe ist, machen Rißbildungen in einem nicht vollständig verfestigtem Granit nahe dem Solidus deutlich, wie sie als Stockscheider bekannt sind. Allerdings können sich in diesem Niveau überhaupt nur hydraulische Klüfte bilden.

Mit dem Ergebnis in Abbildung 6b deutet sich ein tiefenabhängiges bruchphysikalisches Verhalten an, wodurch man über die daraus resultierenden spezifischen Kluftformen nach sorgfältiger Kluftanalyse in Granitkörpern die Kluftbildungstiefe und über diese die Tiefe der Granitplatznahme in groben Kategorien abschätzen kann. Allerdings ist einzuräumen, daß derartige Aussagen weiterer Untersuchungen und einer statistischen Absicherung bedürfen.

7. Zeitpunkt und Ort der ersten Granitkluft-Bildung

Um den Vorgang einer Sprödbruchentstehung in großen Krustentiefen (>7 km) verstehen zu können, wurde das Verhalten der granitischen Schmelze zwischen den Liquidus- und Solidus-Zuständen und im Verlaufe der weiteren Abkühlung untersucht (Thomas et al. 2000, 2003). Die weiteren Ausführungen zur Möglichkeit der Bruchbildung nahe dem Solidus folgen dem Beitrag von Thomas in Bankwitz et al. (2004).

P-T-Entwicklung in Schmelzen

Die Diagramme der Abbildung 7a und b zeigen die P-T-Entwicklung einer primär wasser-untersättigten granitischen Schmelze unter Bedingungen am Ort der Platznahme. Der P-T-Pfad ist ein Abkühlungspfad, nicht unbedingt ein Exhumierungspfad. Eine Schmelze wird auch bei konstanter Überlagerung kristallisieren. Das Kristallwachstum in der Schmelze (Pfad in Richtung zum Solidus: Punkt I nach II) belegt Abkühlung, wobei die Wärme an die Hüllgesteine abgegeben wird.

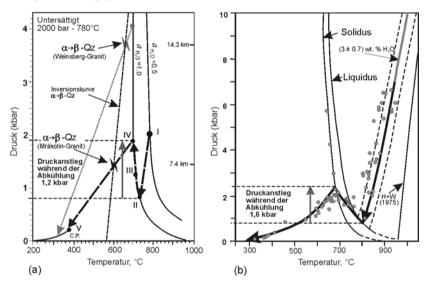


Abb. 7: P-T Pfade während der Kristallisation in Graniten, abgeleitet aus Flüssigkeits- und Schmelzeinschluß-Studien (z. T. nach Thomas 1994 und in: Bankwitz et al. 2004; Student & Bodnar 1996). (a) Abkühlung in zwei Sub-Plutonen des Südböhmischen Plutons; Blitzzeichen markieren die Bildung der Flüssigkeitseinschlüsse in Quarz am α - β -Übergang, der mit einer Volumenänderung von etwa 1% verbunden ist. Die Flüssigkeitseinschlüsse stellen minimale P-T-Bedingungen dar. α_{H2O} -1 Wasseraktivität. Dicke Linien, markiert durch α_{H2O} -1 und α_{H2O} -0.5 stellen die wasser-gesättigten und wasser-untersättigten Soliduskurven dar. Punkte: I, Schmelzeinschlüsse gebildet bei wasser-untersättigten Bedingungen, Punkte II bis IV markieren die P-T Bedingungen der Schmelzeinschlüsse in Wasser-gesättigter Schmelze im Bereich des Solidus. C.P., kritischer Punkt des Salz- H_2O Systems in den Flüssigkeitsein-schlüssen. (b) Daten von verschiedenen Erzgebirgsplutonen, welche einen Druckanstieg während der Abkühlung zwischen dem Liquidus und Solidus zeigen (Thomas 1994). Die grauen Punkte sind Daten von Schmelz- und Flüssigkeitseinschlüssen. (s. Thomas in Bankwitz et al. 2004).

Schmelzeinschlüsse bilden sich, wenn ein kleiner Magmentropfen in einem wachsenden Kristall, wie z.B. Quarz, eingeschlossen wird und wenn dieser

78 Peter Bankwitz

Kristall als Container in der Lage ist, die Einschließungsbedingun-gen zu bewahren. Trifft das zu, dann kann man Informationen über ehemalige magmatische Bedingungen aus der Untersuchung solcher Schmelzeinschlüsse erhalten. Die verschiedenen Schmelz- und Flüssigkeitseinschlüsse bilden sich zu unterschiedlichen Zeiten und unterschiedlichen P-T-Bedingungen der sich abkühlenden Schmelze und charakterisieren die verschiedenen Stadien der Abkühlungsgeschichte.

Die Entwicklung des Granitmagmas während Aufstieg, Platznahme und Abkühlung kann durch das Verhalten der Schmelzeinschlüsse in sehr vereinfachter Weise modelliert werden. Die Entstehung der Flüssigkeitseinschlüsse gibt die frühe post-magmatische Geschichte wieder, welche mit einem Wechsel der Dichte und der Bildung von Mikrorissen verbunden ist.

Der P-T-Pfad der Flüssigkeitseinschlüsse (Mrákotín-Granit, Abb. 7a) repräsentiert Abkühlung und Kristallisation der Granitschmelze (dicke Linie) vom Startpunkt I (= völlige Homogenisierung der Einschlüsse auf der wasseruntersättigten Solidus-Kurve) bis zum Punkt II. Während dieser Zeit wird Wasser durch das Kristallwachstum in die Restschmelze abgegeben. Nahe am wasser-gesättigten Solidus ($a_{\rm H20}$ = 1) bewirkt dieser Prozeß ein starkes Anwachsen des H₂O-Drucks ("Überdruck": Punkte II bis IV) um 1,2 kbar, was eine Bruchbildung auslösen kann. Dieser Überdruck ist nachgewiesen durch zahlreiche Messungen des zunehmenden Drucks der Einschlüsse zwischen den Punkten II und IV (Daten in Abb. 7a nicht dargestellt; die Eckpunkte I bis V kennzeichnen den Kurvenverlauf der Verteilung von Meßdaten), für die Erzgebirgsgranite (Abb. 7b) erkennbar an den Datenpunkten im Bereich zwischen 680° und 800°C.

Druckanstieg am Solidus und Rißbildung

Die Druckzunahme von Punkt II nach IV ist die physikalische Konsequenz des Kristallisationsprozesses. Die Reaktion: OH-haltige Schmelze \rightarrow Kristalle + H₂O-Dampf erfolgt bei Volumenzunahme und damit unter Druckzunahme. Der *Druckanstieg* zwischen den Punkten II und IV während der Abkühlung und der Wasser-Separation ist belegt durch zahlreiche Messungen von Thomas (1994), wie in Abb. 7b für die Erzgebirgsgranite, und von Student & Bodnar (1996) und Student (2002) für den Fall primär wasseruntersättigter Schmelzen nachgewiesen worden. Burnham (1979) hat gezeigt, daß bei konstanten Volumenbedingungen während der Kristallisation einer felsischen Schmelze sehr hohe Drucke entstehen können, theoretisch bis zu mehreren $10~\mathrm{kbar}$.

Der Betrag des Überdrucks hängt vom mechanischen Verhalten der Schmelze ab. Die späteste Schmelzphase kann unter sehr niedrigen Temperaturen (~500°C, 1 kbar) flüssig und damit mobil sein, wenn der Gehalt an Volatilen (H₂O, B, F) und Semi-Volatilen (P₂O₅, seltene Alkalien) hoch genug ist. In einem guasi-geschlossenen System treten hydraulische Risse als Ergebnis der wechselnden Dichte der Schmelze während der Kristallisation auf. Diese Risse werden mit Fluida gefüllt oder mit dem Rest der intergranularen Schmelze, weil der sich öffnende Riß mit dem gesamten Granitkörper kommunizieren kann. Der Vorgang ist ähnlich der gut bekannten Rißgeneration im Dach von Granitkörpern mit der Entwicklung von Stockscheider-Pegmatiten. Experimente zeigen, daß solche Restschmelzen durch einen hohen Gehalt an Wasser, niedrige Dichte, niedrige Viskosität (ähnlich der von Wasser) und hohe Mobilität (Thomas & Webster 2000, Thomas et al. 2000, 2003) gekennzeichnet sind. Möglicherweise stellt die Restschmelze ein superkritisches Fluid dar, welches vom kristallisierenden Granit abgetrennt worden ist.

Dieses überkritische Fluid, zusammen mit dem Druckanstieg nahe am Solidus, kann zur Reaktivierung und zu wiederholtem Schmelzen führen, wobei kleine Mengen neuer granitischer oder pegmatitischer Schmelzen entstehen.

Abfolge der Ereignisse bei der ersten Kluftbildung

Wir nehmen an, daß die Abfolge der lokalen Prozesse in einem sich abkühlenden Granit und die Bedingungen einer frühen Kluftentstehung in der Weise vonstatten gehen, wie in Abb. 8 dargestellt ist. Diese vereinfachte Abfolge von Vorgängen enthält verschiedene Momente und Bedingungen, unter welchen eine hydraulische Bruchbildung (Mandl 2000) möglich ist. Zusätzlich können Dichte- und Volumenänderungen während der Kristallisation (thermoelastische Kontraktion) zur weiteren Ausbreitung der Risse führen. Vorgeschlagen wird deshalb hier das "Magma-selfmade"-Bruch-Konzept der in situ-Rißentstehung (s. Abb. 2c) infolge des Überdrucks und der mobilen Restschmelze und Bildung einer neuen Schmelzgeneration in dem geschlossenen System des abkühlenden, sich verfestigenden Granits. Fleckenartig verteilte scheibenförmige Klüfte mit zyklischen Ausbreitungsmerkmalen (wie z.B. konzentrische Undulationen; s. Abb. 3) sind die mit diesen Prozessen verbundenen Bruchformen. Die im SBP vorhandene regelmäßige Ausbreitung dieser fleckenförmigen Zentren in SSW-NNE-Richtung setzt zusätzliche Kräfte voraus, wie die Kontrolle durch ein regionales Spannungsfeld.

80 Peter Bankwitz

Abfolge von Ereignissen in felsischen Magmen bei der Erstarrung und frühen Bruchbildung

Abkühlung des Magmas auf Solidus-P-T-Bedingungen im Intrusionsniveau Nachweis: Schmelz- und Flüssigkeitseinschlüsse

Anstieg des H₂O-Drucks nahe am Solidus durch Kristallisation wasserfreier Phasen

Beweis: P-T-Bedingungen von Schmelz- und Flüssigkeitseinschlüssen

Bruchbeginn

Nachweis: Alters- und Tiefenbestimmungen

Zyklische Ausbreitung durch Eindringen von hoch-mobiler und niedrig-viskoser Restschmelze in hydraulisch gebildete Brüche, langsames subkritisches Risswachstum Beweis: fleckenartig verteilte runde Klüfte mit spätgranitischem Gangmaterial

Druckbedingte Entstehung kleiner Mengen neuer granitischer Schmelze Ursache: Überdruck nahe am Solidus

Andauerndes langsames subkritisches Risswachstum Beweis: fraktografische Kennzeichen verbunden mit Granitgängen

Mit dem Erreichen eines kritischen Punktes der Bruchausbreitung erfolgt ein autonomes Risswachstum

fraktografischer Beweis: Randzone mit ebenen en echelon-Klüften

Kristallisation der neuen oder der Restschmelze in den ersten Klüften als synchron-gebildete Granitgänge im Intrusionsniveau

Beweis: Schmelzeinschlüsse und Altersbestimmungen an den Gängen

Abb. 8: Abfolge von Vorgängen in einer kristallisierenden granitischen Schmelze, die zu langsam sich ausbreitenden hydraulisch induzierten Klüften führt. Diese erste Rißbildung ist genetisch verbunden mit dem Eindringen von hochmobiler Restschmelze geringer Viskosität in den Riß-Initialpunkt.

Der Beweis eines sich einstellenden Überdrucks nahe dem Solidus anhand von Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüssen liefert Argumente gegen Zweifel daran, daß *hydraulische Risse in tiefkrustalen Gesteinen* entstehen könnten. Segall & Pollard (1983) berechneten für Granitklüfte in der Sierra Nevada

eine relative Zugspannung (mittlere regionale Spannung plus interner Fluiddruck) von ungefähr 0.1 kbar bis 0.4 kbar. In einer kristallisierenden Schmelze beträgt der entstehende Überdruck (overpressure) nahe am Solidus ca. 2 kbar. Die Zunahme des H₂O-Drucks um 1.6 kbar bzw. 1,2 kbar, wie er für die Erzgebirgsgranite berechnet wurde und im Südböhmischen Pluton auftritt (Bankwitz et al. 2004), ist eine Größenordnung höher als der von Segall & Pollard (1983) abgeleitete und kann damit auf jeden Fall Brüche initiieren.

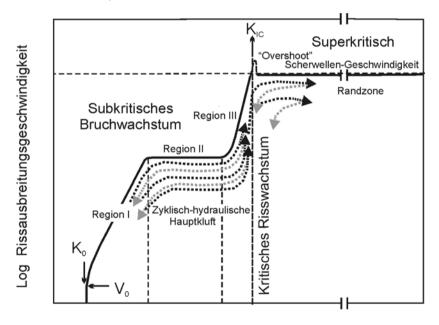
Aus bruchphysikalischer Sicht ist unter lithostatischen Bedingungen ein vertikaler "interner hydraulischer Zugbruch" (s. Abb. 2) nur in Anwesenheit eines großen internen Überdrucks möglich. Bei Annahme einer zunehmenden Auflast von 15 MPa/Tiefen-km müßte in ca. 3 km Tiefe ein Flüssigkeitsüberdruck von ca. 50 MPa herrschen, und in ca. 9 km ein Überdruck von ca. 117 MPa, um die Entstehung eines solchen internen Zugbruchs in dieser Tiefe möglich zu machen (Mandl 2000). Dieser Überdruck ist während der Abkühlung im Granit nahe am Solidus nach den Messungen von Thomas im SBP gegeben (s. Abb. 7).

8. Rißwachstumsregime (Beispiel: Klüfte im Südböhmischen Pluton)

Nach Secor (1969) treten in impermeablen Gesteinen, wozu man Granite rechnen kann, kurze und cm-ständige Brüche auf, während Klüfte in permeablen Gesteinen lang sein sollten und sich in großen Abständen bilden. Jedoch sind die von uns beobachteten ersten Klüfte in Graniten oft sehr ausgedehnt (10er Meter) und haben untereinander große Abstände (dm bis mehrere Meter). Damit liefern sie nach Secor (1969) Hinweise darauf, daß "pressurized fluids" zum Zeitpunkt der Bruchbildung anwesend waren. Thomas konnte 1994 und später zeigen, daß diese in einem konsolidierenden Magma tatsächlich auftreten.

Fluida sind in magmatischen Gesteinen häufig, z.B. nach der Wasserfreisetzung aus der kristallisierenden Schmelze nahe dem Solidus (Abb. 7). Hinweise auf fluidgetriebene Brüche sind besonders die quasi-kreisförmigen "Sonnen"-artigen Klüfte, verbunden mit wellenförmigen Undulationen, wie sie z.B. im Steinbruch Boršov aufgeschlossen sind. Sie zeigen eine sehr langsame Bruchausbreitung an, die jeweils von der Zufuhr der Fluida abhängt und zeitweilig verzögert ist. Generell sind solche typischen Flächen in anderen Graniten relativ selten zu beobachten. Sie sind im Mittelböhmischen Granit, Bohus-Granit und Sunne-Granit (beide in Schweden) aufgeschlossen. Diese runden Initialflächen sind jedoch nicht die einzige Form fluid-getriebener hydraulischer Klüfte (Lacazette & Engelder 1992; Bahat 1991).

Die hier geschilderte frühe Bruchbildung erfolgt durch langsame subkritische Rißausbreitung. Eine spannungs-abhängige Geschwindigkeit wurde für Langzeitbelastung bei Anwesenheit von chemisch wirksamen Fluida gefunden (Abb. 9, nach Wiederhorn 1972 und anderen Autoren, u. a. Rabinovitch & Bahat 1979). In dieser Wiederhorn-Kurve wurde die Spannungsintensität (K_I) in Beziehung zur Rißausbreitungsgeschwindigkeit (V) gesetzt. K_I ist die Bruchspannung eines Modus I-Bruches mit stabiler subkritischer Bruchausbreitung. K_{Ic} ist die kritische Bruchspannung eines Modus I-Bruches mit instabiler superkritischer Bruchausbreitung. Es wird generell angenommen, daß Klüfte in der Oberkruste, die unter Fluiddruck entstehen, stabil reißen und sich damit im Abschnitt I bis III der Kurve in Abbildung 9 ausbreiten (Atkinson & Meredith 1987).



Log Spannungsintensität

Abb. 9: Variation der Rißgeschwindigkeit ,V' als Funktion der Spannungsintensität K an der Rißspitze für subkritische, kritische und superkritische Bruchausbreitung. Ein Geschwindigkeits"overshoot" ,O' nach Überschreiten von K_{IC} (kritische Bruchspannung) und noch vor Erreichen des Plateaus der Endgeschwindigkeit (= Scherwellengeschwindigkeit) ist von Rabinovitch & Bahat (1979) vorhergesehen worden. Nach Bahat et al. (2003).

Stabiles Rißwachstum erfolgt, wenn das antreibende Fluid langsam in den Bruch nachfließt. Dieser Vorgang scheint für die ersten Boršov-Klüfte zuzutreffen. Sich langsam ausbreitende hydraulische Klüfte (Abb. 3) besetzen die Regionen I bis III der subkritischen Bruchspannungskurve (Abb. 9). Der zentrale Teil der runden Initialklüfte in Boršov bildete sich offensichtlich in der Region I der Wiederhorn-Kurve. Während der weiteren Bruchausbreitung bildet sich die erste rauhe ringförmige Zone (oft mit kleinen Randklüftchen besetzt) in der Region III der Kurve, nahe an der kritischen Bruchspannung (K_{Ic}). Durch Mangel an nachdringendem Fluid verlangsamt sich das Rißwachstum oder kommt zum Stillstand, um danach wieder erneut in Region I einzusetzen und sich zu steigern. Abb. 9 verdeutlicht das zyklische Wachstum der Kluft. Randzonen, besetzt mit gut entwickelten Randklüften wie in Abb. 3f, überschreiten bei ihrer Bildung jedoch den Wert K_{IC} (kritische Bruchspannung). Die Randzonen-Ausbreitung verläuft dann zumindest zu Beginn im superkritischen Bereich, um anschließend während des weiteren Wachstums wieder langsamer zu werden. Fraktographische Merkmale belegen diesen Prozeß (Bahat et al. 2001).

In vielen Fällen wurde der Bruchprozeß an den äußeren peripheren Grenzen der Initialklüfte, im Übergangsbereich zur Randzone, autonom und es erfolgte eine Aufgabelung in mehrere Randkluftflächen (Bankwitz 1966; Bahat et al. 2001, 2003), was eine superkritische Kluftausbreitung anzeigt. Die kurzzeitige Zunahme der Rißgeschwindigkeit und Bruchintensität führte zu einer Segmentierung der Randzone in von der Initialkluft abweichende Randklüfte. In manchen Fällen nahm die Rißgeschwindigkeit anschließend wieder ab und die Bruchausbreitung kehrte in den subkritischen Bereich der Wiederhorn-Kurve zurück, um nach einem weiteren Flächenwachstum der Randklüfte erneut in den superkritischen Bereich zu wechseln (Abb. 9). Die Klüfte wurden in einigen Fällen weiterhin durch spätgranitische Schmelze in ihrer Ausbreitung vorangetrieben und treten heute als Begrenzungsflächen von Gängen in Erscheinung. Die vertikale Ausbreitung der en echelon-Randklüfte am unteren und oberen Rand der Initialflächen belegt die Dominanz der vertikalen Kompression zu diesem Zeitpunkt, durch die Auflast einer Gesteinssäule von mindestens 7 km Mächtigkeit.

9. Schlußfolgerungen

Bankwitz et al. (2004) konnten erstmalig nachweisen, daß sich hydraulisch induzierte Granitklüfte in großer Tiefe (im SBP in mind. 7.4 km) und sehr früh bilden können (Bankwitz: bezogen auf die Initialquelle, den Bruchmechanis-

84 Peter Bankwitz

mus und die Antriebskräfte; Wemmer: bezogen auf das absolute Intrusionsalter; Thomas: bezogen auf die Konsolidierung des Granitmagmas und den damit verbundenen Überdruck). Eine solche Tiefe war von Bahat et al. (2003) wahrscheinlich gemacht worden. Damit wird eine neue Sicht eröffnet auf frühe Bruchvorgänge im Granit unter hohen Temperaturen und nahe dem Solidus. Nicht alle Fragen sind geklärt, vor allem nicht für alle Plutone. Die Fakten eröffnen jedoch eine Basis für weitere Betrachtungen und Diskussionen.

Bei den ersten Granitklüften des SBP handelt es sich um hydraulische Brüche. Diese Bruchvorgänge verliefen langsam und in Intervallen, da fluidgetrieben, im subkritischen Bereich der Bruchausbreitung. Das könnte typisch sein für *frühe Klüftung in magmatischen Intrusiva*. In Tiefen um 7 km können sich nicht-hydraulisch gebildete Klüfte nicht entwickeln, da die horizontale Spannung in diesem Niveau generell kompressiv ist. Der aus den fraktographischen Kluftoberflächenmerkmalen eines Gangkontaktes ableitbare Bruchmechanismus stimmt überein mit frühen Klüften in Sedimenten. Es dürfte sich bei dem vorgestellten Konzept also um ein generelles Modell der Bruchbildung in >3 km Tiefe handeln für natürliche hydraulische Brüche, die offenbar in der Natur stärker verbreitet sind, als vorhandene Füllungen der Klüfte (magmatische Gänge, Quarz-, Calcit-Beläge) anzeigen.

Die Berechtigung zu dem hier vorgestellten "Magma-selfmade"-Bruch-Konzept, als einem Grundprinzip des natürlichen hydraulischen Bruchs, und zur Annahme einer Beziehung zwischen Kluftform und Tiefe der Entstehung ergibt sich aus mehreren Fakten:

- 1. Es ist nachgewiesen, daß sich Klüfte in 7.4 km Tiefe vor 325 Ma bildeten, durch Datierung von Granitgängen auf zwei Klüften (Wemmer) und durch Bestimmung der Intrusionstiefe des einen Ganges (Thomas, beide in Bankwitz et al. 2004). In der Oberpfalz sind Bruchflächen von Gängen besetzt, welche diskordant von 305 Ma alten Lamprophyren durchschlagen werden (Zulauf 1993). Die Exhumierung dieser Kruste erfolgte etappenweise erst später (Bankwitz et al. 2004), so daß die Bildung dieser Brüche in großer Tiefe stattfand.
- 2. Untersuchungen zur Abkühlung felsischer Magmen belegen, daß nahe am Solidus die Freisetzung von Wasser und damit verbunden ein bemerkenswerter Druckanstieg stattfindet (Burnham 1979, Student & Bodnar 1996, Thomas et al. 2000, Thomas in Bankwitz et al. 2004): z.B. im SBP 1,2 kbar, im Erzgebirge 1,8 kbar. Olson & Pollard (1989) berechneten für Granitkluftbildung einen Druck von 0,1 bis 0,4 kbar. D.h. im Granit entwickelt sich ein vielfach höherer Druck, als er zur Bruchbildung benötigt wird.

- Dieser Überdruck führt zu Rissen, in die Restschmelze eindringt und hydraulische Klüfte erzeugt. Der Vorgang erfolgt im Niveau der Platznahme des Granits.
- 4. In die vorliegende Auswertung sind nur die im Steinbruch nachweisbar zuerst entstandenen Klüfte einbezogen worden, da sie am ehesten für eine Bildung am Ort der Intrusion bzw. Erstarrung in Frage kommen.

Für diese Auswertung sind vor allem Klüfte benutzt worden, die nach ihrer Oberflächenmorphologie hydraulischer Entstehung sind, die also am wahrscheinlichsten durch freigesetztes Wasser (und Restschmelze) im Bereich des Überdrucks nahe am Solidus gebildet wurden. Bei der Bildung der frühen Klüfte in Graniten spielen hohe Fluiddrucke eine Schlüsselrolle (Mandl 2000), die zu diesem Zeitpunkt auf den Druckanstieg bei der Erstarrung des Granits zurückgehen. Die fluide Phase hat bewirkt, daß die Kluft als "interner hydraulischer Zugbruch" entstand mit einem sehr geringmächtigen Granitbelag (wenige cm mächtig, erhalten bei einer Kluftausdehnung von über 20 x 50 m). Für eine schlüssige Interpretation ist die Beachtung fraktographischer Kennzeichen eine unabdingbare Voraussetzung. Konzentrische Arrestlinien belegen eine zyklische Kluftausbreitung in kleinen Schritten (increments) durch pulsende Fluide (Abb. 9). Diese Merkmale sind im Südböhmischen Pluton (CZ) sehr gut entwickelt. Offenbar kommt hydraulischen Klüften bei der Bruchdeformation der tiefen Kruste generell eine bedeutende Rolle zu (Lacazette & Engelder 1992; Mandl 2000; Bankwitz et al. 2004).

Eine europaweite statistische Bewertung der *tilt- und twist-Winkel* von Randkluftzonen in Graniten erbrachte den Hinweis darauf, daß das Verhältnis dieser Kluftwinkel, d. h. daß bestimmte Kluftformen typisch für eine größere oder kleinere Tiefe der Granitplatznahme sein kann. Bei Intrusionstiefen um 15 km (bzw. möglicherweise um 20 km) tendiert offenbar das Winkelverhältnis tilt/twist zu <1, was auf eine mit der Tiefe steigende Tendenz zu kleinerer Varianz der Winkelgrößen und zu einer stärker ebenen Gestaltung der Hauptklüfte und ihrer Randzonen hindeutet. Dieses Verhalten von tiefkrustalen Zugklüften wurde erstmalig von Bankwitz & Bankwitz (2004) beobachtet. Umgekehrt erlaubt vermutlich die Geometrie der jeweils frühesten Granitklüfte nach sorgfältiger Kluftanalyse in günstigen Fällen eine grobe Abschätzung der relativen Paläotiefe der betreffenden Granite u.a. mit Hilfe fraktographischer Merkmale.

86 Peter Bankwitz

Anmerkung

Ich danke den Koautoren mehrerer gemeinsamer Arbeiten zum Problem "Klüfte in Granit": Prof. D. Bahat, Beer Sheva/Israel, Dr. K. Wemmer, Göttingen, Dr. H. Kämpf und Dr. R. Thomas, Potsdam, für die Geländetätigkeit, Diskussionen und für Laboruntersuchungen, besonders meiner Frau.

Literatur

- Atkinson, B. K., Meredith, P. G. (1987): The theory of subcritical growth with applications to minerals and rocks. In: Atkinson, B. K. (ed.), Fracture Mechanics of rocks. Academic Press. Orlando: 111–166.
- Bahat, D. (1991): Tectonofractography. Springer Verlag, Berlin: 1–354.
- Bahat, D., Bankwitz, P., Bankwitz, E. (2001): Changes of crack velocities at the transition from the parent joint through the en echelon fringe to a secondary mirror plane. J. Struct. Geol., 23: 1215–1221.
- Bahat, D., Bankwitz, P., Bankwitz, E. (2003): Pre-uplift joints in granite: evidence for sub critical and post critical fracture growth. Bull. Geol. Soc. Am., 115: 148–165.
- Bankwitz, P. (1966): Über Klüfte, II. Die Bildung der Kluftfläche und eine Systematik ihrer Strukturen. Geologie, 15: 896–941.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E. (1984): Die Symmetrie von Kluftoberflächen und ihre Nutzung für eine Paläospannungsanalyse. Z. geol. Wiss., 12: 305–334.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E., 2000. Granitklüftung Kenntnisstand 80 Jahre nach Hans Cloos. Z. geol. Wiss., 28, 87–110.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E., Bahat, D., Breiter, K. & Kämpf, H. (2001): Excursion B, South Bohemian Pluton. – In: Exkursionsführer und Veröffentlichungen der GGW, 212: 129–156.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E. (2004, im Druck): The relationship of tilt and twist of fringe-cracks in granite plutons. In: Engelder, T. & Cosgrove, J. (eds.), The Initiation, Propagation and Arrest of Joints and Other Fractures. Geol. Soc. London Spec. Pub., 231: 183–208.
- Bankwitz, P., Thomas, R., Wemmer, K., Kämpf, H. (2004, im Druck): Age and depth evidence for pre-exhumation joints in granite plutons: fracturing during the early cooling stage of felsic rock. In: Engelder, T. & Cosgrove, J. (eds), The Initiation, Propagation and Arrest of Joints and Other Fractures. Geol. Soc London Spec. Pub., 231: 25–47.
- Barenblatt, G. I. (1962): The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture.— Adv. Appl. Mechanics, 7: 55–129, New York.
- Blumenauer, H., Pusch, G. (1982): Technische Bruchmechanik. VEB Dt. Verl. Grundstoffind., 2. Aufl., 232 S., Leipzig.

- Burnham, C. W. (1979): The importance of volatile constituents. In: Yoder, H. S., (ed.), The Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspective. Princeton Univ. Press.: 439–482.
- Crosby. W. O. (1882): On the classification and origin of joint structures. Proc. Boston Soc. Nat. Hist., 22: 72–85.
- Cruikshank, K. M., Aydin, A. (1995): Unweaving the joints in Entrada Sandstone, Arches National Park, Utah, U.S.A. J. Struct. Geol., 17: 409–421.
- De Freminville, M. Ch. (1914): Recherches sur la fragilité-l'eclatement. Revue de Métallurgie, 11: 971–1056.
- Dyer, R. (1988): Using joint interactions to estimate paleostress ratios. J. Struct. Geol., 10: 685–699.
- Engelder, T. (1985): Loading paths to joint propagation during a tectonic cycle: an example from the Appalachian Plateau, U.S.A. J. Struct. Geol., 7: 459–476.
- Engelder, T., Fischer, M. P., Gross, M. R. (1993): Geological aspects of fracture mechanics. Geological Society of America, Boston: 281 pp.
- Engelder, T. & Fischer, M. P. (1996): Loading configurations and driving mechanisms for joints based on the Griffith energy-balance concept. Tectonophysics, 256: 253–277.
- Griffith, A. A. (1920): The theory of rupture. Phil. Trans. Roy. Soc., A 221: 163–198, London.
- Griggs, D. T., Handin, J. (1960): Observations on fracture and hypothesis of earthquakes. In: Griggs, D. T. & Handin, J. (eds.), Rock deformation. Geol. Soc. Am. Mem., 79: 347–364.
- Hodgson, R. A. (1961): Classification of structures on joint surfaces. Am. J. Sci. 259: 493–502.
- Hubbert, M. K. (1951): Mechanical basis for certain familiar geologic structures. Geol. Soc. Am. Bull., 63: 355–372.
- Irwin, G. R. (1957): Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. J. Appl. Mech., 24: 361–364.
- Kulander, B. R., Barton C. C., Dean, S. C. (1979): The application of fractography to core and outcrop fracture investigations. Report to U.S. D.O.E.Morgantown Energy Technology Center, METC/SP-79/3: 174 p.
- Kulander, B. R., Dean, S. L. (1985): Hackle plume geometry and joint propagation dynamics. In: Stephansson, O. (eds.), Fundamentals of Rock Joints. Proc. Lulea Univers. Technology: 85–94.
- Lacazette, A., Engelder, T. (1992): Fluid-driven propagation of a joint in the Ithaca siltstone, Appalachian basin, New York. In: Evans, B. & Wong, T.-F., Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. Academic Press, London: 297–370.
- Lawn, B. R., Wilshaw, T. R. (1975): Fracture of Brittle Solids. London, Cambridge University Press.: 204 pp.
- Mandl, G. (2000): Faulting in Brittle Rocks. Springer, Berlin, 434 pp.

88 Peter Bankwitz

Olson, J. E., Pollard, D. D. (1989): Inferring paleostress from natural fracture patterns: A new method. Geology, 17: 345–348.

- Pollard, D. D., Segall, P., Delaney, P. T. (1982): Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. Geol. Soc. Am. Bull., 93: 1291–1303.
- Pollard, D. D., Aydin, A. (1988): Progress in understanding jointing over the past century. Geol. Soc. Geol. Soc. Am. Bull., 100: 1181–1204.
- Rabinovitch, A., Bahat, D. (1979): Catastrophe theory: A technique for crack propagation analysis. J. Appl. Phys., 50: 321–334.
- Roberts, J. C. (1995): Fracture surface markings in Liassic limestone at Lavernock Point, South Wales. In: Ameen, M. S. (Hrsg.), Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis. Geol. Soc. London Spec. Pub., 92:175–186.
- Scharbert, S. (1998): Some geochronological data from the South Bohemian Pluton in Austria: a critical review. Acta Universitatis Carolinae, Geologica, Praha, 42: 114–118.
- Secor, D. T. (1965): Role of fluid pressure in jointing. Am. J. Sc., 263: 633-646.
- Secor, D., Jr. (1969): Mechanics of natural extension fracturing at depth in the earth's crust. In: Research in tectonics, Geol. Surv. Canada Paper: 3–47.
- Segall, P., Pollard, D. (1983): Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada. Geol. Soc. Am. Bull., 94: 563–575.
- Srivastava, D., Engelder, T. (1992): Crack-propagation sequence and pore-fluid conditions during fault-bend folding in the Appalachian Valley and Ridge. Geol. Soc. Am. Bull., 102: 116–128.
- Student, J. J., Bodnar, R. J. (1996): Melt inclusion microthermometry: Petrologic constraints from the H₂O-saturated haplogranite system. Petrology, 4: 291–306.
- Student, J. J. (2002): Silicate melt inclusions in igneous petrogenesis. Unpubl. Ph.D. Dissertation, Virginia Tech. Blacksburg, VA.: 119 pp.
- Thomas, R. (1994): Fluid evolution in relation to the emplacement of the Variscan granites in the Erzgebirge region: A review of the melt and fluid inclusion evidence.In: Seltmann, R., Kämpf, H., Möller, P.(eds.), Metallogeny of Collisional Orogens: 70-81, Prague.
- Thomas, R., Klemm, W. (1997): Microthermometric study of silicate melt inclusions in Variscan granites from SE Germany. J. Petrol., 38: 1753–1765.
- Thomas, R., Webster, J. D. (2000): Strong tin enrichment in a pegmatite-forming melt. Mineral. Deposita, 35: 570–582.
- Thomas, R., Webster, J. D., Heinrich, W. (2000): Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure. Contrib. Mineral. Petrol., 139: 394–401.
- Thomas, R., Förster, H.-J., Heinrich, W. (2003): The behaviour of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydrothermal solutions: a melt and fluid-inclusion study. Contrib. Mineral. Petrol. 144: 457–472.

- Wiederhorn, S. M. (1972): Subcritical crack growth in ceramics. In: Bradt, R. C., Evans, A. G., Hasselman, D. P. H., Lange, F. F. (eds.). Fracture Mechanics of Ceramics. Plenum, New York, 2: 613–646.
- Zulauf, G. (1993): Brittle deformation events at the western border of the Bohemian Massif. Geol. Rundsch., 82: 489–504.

Alexander Frischbutter¹, Kurt Walther¹ & Christian Scheffzük^{1,2}

Diffraktionsexperimente zur intrakristallinen Strainmessung mit Neutronen- und Synchrotronstrahlung an geologischen Materialien

1. Einführung

Bereits in den frühen 80er Jahren entwickelte sich eine erfolgreiche Zusammenarbeit von Potsdamer Geologen und Physikern sowie Materialwissenschaftlern des Kernforschungsinstituts in Rossendorf bei Dresden mit dem Ziel der neutronographischen Bestimmung kristallographischer Vorzugsorientierungen (Textur) in Gesteinen. Der für Geowissenschaftler interessante Vorteil der Neutronenstreuung war die Erfassung der vollständigen Orientierungsverteilungsfunktion, wohingegen bis dahin mit optischen Mitteln nur die Bestimmung der Häufigkeitsverteilungen einzelner Flächenlagen/Kristallrichtungen möglich gewesen war. Die Experimente beschränkten sich zunächst auf die Untersuchung von Texturen opaker oder kubischer Minerale (z.B. Erze, Salze). In Rossendorf wurden Diffraktionsexperimente mit monochromatischen Neutronen durchgeführt, d.h. für die Beobachtung jeder Netzebene eines Minerals war der dem Bragg-Gesetz entsprechende Streuwinkel einzustellen. Mit dem Übergang der Texturforschung auch auf gesteinsbildende Minerale niedrigerer Symmetrie (große Zahl der Reflexe erfordert hohe spektrale Auflösung) erwies sich die Anwendung der Neutronen-Flugzeit-Methode (polychromatischer Neutronenstrahl) als sinnvoll, nicht zuletzt auch, weil der polychromatische Strahl die simultane Beobachtung mehrerer Netzebenen gestattet. Diese Möglichkeit war am Frank Laboratorium für Neutronenphysik des Vereinigten Instituts für Kernforschung (VIK) in Dubna (120 km nördlich Moskau) gegeben. Mit der Inbetriebnahme des Impulsreaktors IBR-2 vor nunmehr 20 Jahren konzentrierte sich dort die Texturforschung

¹ GeoForschungsZentrum Potsdam

² Frank Laboratorium für Neutronenphysik am Vereinigten Institut für Kernforschung, Dubna (Russische Föderation)

am Flugzeitkanal 7A zunehmend auf die Untersuchung geologischer Materialien und es wurden den hieraus erwachsenen experimentellen Anforderungen genügende Diffraktometer geschaffen (NSWR, SKAT). Mit dem Ende der achtziger Jahre fertiggestellten Flugzeitdiffraktometer SKAT stand ein technologisch weitestgehend ausgereiftes Gerät zur Verfügung, das seitdem im Dauerbetrieb ganz überwiegend dem Studium geologischer Materialien dient.

In diesem Stadium wurden die ersten Experimente zur intrakristallinen Strainmessung in Beugungsexperimenten mit Neutronenstrahlung an gesteinsbildenden Mineralien durchgeführt. Die bereits mit vergleichsweise einfachen Experimentaufbauten (EPSILON) erzielten guten Erfolge waren Grundlage für eine sich anschließende, aufwendigere Weiterentwicklung, die zu einem Multidetektor-Diffraktometer führte, mit welchem die gleichzeitige Messung unterschiedlicher Netzebenen für verschiedene Probenpositionen möglich wurde (EPSILON-MDS, 2001). Zum Diffraktometer wurde eine Deformationseinrichtung gebaut (EXSTRESS), welche die neutronographische Vermessung der Änderung von Gitterabständen unter stufenlos wählbaren, einaxialen Belastungen gestattet.

Aus der experimentellen als auch theoretischen Verbindung von Aussagen zu Textureigenschaften und Strainverteilungen in geologischen Materialien sind Beiträge zum besseren Verständnis des Ablaufs von Deformationsprozessen in Gesteinen zu erwarten, wobei der hier gestellte Forschungsansatz speziell auf die Bedingungen der oberen Erdkruste ausgerichtet ist.

2. Physikalische Grundlagen

Die für geologische Untersuchungen bedeutenden Vorteile von Neutronenstrahlung z.B. gegenüber Röntgenstrahlung liegen in der um Größenordnungen geringeren Absorption, wodurch auch noch Probenvolumina von mehreren cm³ erfaßbar werden und gleichzeitig auch für Kristalle mit großen Einheitszellen hohe spektrale Auflösung möglich ist. Aufgrund hoher Intensität und kleinem Fokus des einfallenden Strahls gestattet Synchrotronstrahlung dagegen vergleichsweise geringere Meßpunktabstände bei guter spektraler Auflösung und vergleichsweise geringerem Meßzeitbedarf. Allerdings können nur Probentiefen bis maximal etwa 1 mm erfasst werden.

Experimentell kann grundsätzlich nur Deformation (ϵ) und nicht Spannung (σ) gemessen werden. Spannungen werden nach dem *Hook*schen Gesetz bestimmt. Die Deformation (Strain) einer Netzebene (ϵ_{hkl}) ergibt sich

aus dem Verhältnis der Änderung eines Netzebenabstandes (Δd), bezogen auf den undeformierten Zustand (d_0):

$$\epsilon_{hkl} = \frac{d^{hkl} - d_0^{hkl}}{d_0^{hkl}}$$

Der Stress-Tensor (drei normale und sechs tangentiale Komponenten) ist ein symmetrischer Tensor zweiter Ordnung mit sechs unabhängigen Komponenten. Mißt man den Strain in (mehr als) sechs Richtungen bezogen auf ein Probenkoordinatensystem [x,y,z], erhält man die Strainkomponenten durch Lösen eines (überbestimmten) Systems linearer Gleichungen.

In einem Beugungsexperiment wird der Strain parallel zur Richtung des Beugungsvektors, d.h. in Richtung der Bisektrix zwischen einfallendem und gebeugtem Strahl (parallel zur Normalen auf die beugende Netzebene) gemessen. Führt man für die Richtung des Beugungsvektors Polarkoordinaten ein (Φ ... Azimut, Rotationswinkel; Ψ ... Polar-, Kippwinkel) erhält man den auf das Probenkoordinatensystem bezogenen Ausdruck für den richtungsabhängigen Strain (Noyan, 1992), worin die Terme ϵ_{ij} die gesuchten Komponenten des Strain-Tensors sind:

$$\begin{split} &\epsilon\big(\Phi,\Psi\big) = \frac{d_{_{\Phi\Psi}} - d_{_{0}}}{d_{_{0}}} = \epsilon_{_{11}}\cos^{2}\Phi\sin^{2}\Psi + \epsilon_{_{12}}\sin2\Phi\sin^{2}\Psi + \epsilon_{_{22}}\sin^{2}\Phi\sin^{2}\Psi + \epsilon_{_{33}}\sin^{2}\Psi - \epsilon_{_{33}}\\ &+ \epsilon_{_{13}}\cos\Phi\sin2\Psi + \epsilon_{_{23}}\sin\Phi\sin2\Psi \end{split}$$

Die *Bragg*-Gleichung ($n\lambda = 2d \sin\Theta$) enthält zwei Variable zur Bestimmung eines Netzebenenabstandes d: die Wellenlänge λ und den Beugungswinkel Θ . An einem stationären Reaktor (z.B. Rossendorf oder Hahn-Meitner-Institut Berlin) erhält man durch Reflexion an Monokristallen einen monochromatischen Strahl mit konstantem Neutronenfluß. Zur Auswahl eines bestimmten Netzebenenabstandes d_{hkl} wird der Streuwinkel Θ variiert. Gute Auflösungen für kleine 2Θ -Bereiche sind durch Mehrfachreflexion (z.B. an gebogenen Si-Kristallen) zu erzielen.

Die Flugzeitmethode (Dubna) nutzt den Dualismus von Teilchen- und Welleneigenschaften von Neutronen, wonach man ihnen sowohl eine kinetische Energie (Impuls) als auch eine Wellenlänge zuordnen kann (*De Broglie-*Gleichung). Danach ist die Flugzeit (t) der Neutronen vom Moderator über die Probe zum Detektor direkt proportional zu ihrer Wellenlänge:

$$d_{hkl} = \frac{h}{2m_o} \cdot \frac{1}{sin\Theta} \cdot \frac{1}{l_1 + l_2} \cdot t$$

Die Genauigkeit des Experimentes, also die Auflösung des Diffraktometers, läßt sich erhöhen, indem man die Flugstrecke (I) verlängert. Andererseits steigt mit wachsender Flugstrecke der Verlust an Neutronen. Der Intensitätsverlust durch die lange Flugstrecke wird durch einen Neutronenleiter in Grenzen gehalten. Er hat einen Querschnitt von 50x170 mm². Seine Glaswände sind innen mit einem natürlichen Ni-Isotopengemisch bedampft.

Der Neutronenfluß beträgt an der Moderatoroberfläche im Impuls 5×10^{15} N cm⁻²s⁻¹, im zeitlichen Mittel 8×10^{12} N cm⁻²s⁻¹. Am Probenort von EPSI-LON-MDS erreicht der Neutronenfluss einen Wert von $\approx 10^6$ N cm⁻²s⁻¹. Für das Experiment werden thermische Neutronen, also Neutronen mit Wellenlängen von der Größenordnung der Elementarzellen der zu untersuchenden Minerale, genutzt.

Flugzeitexperimente erfordern einen gepulsten Neutronenstrahl. Ein solcher kann entweder an stationären Reaktoren auf mechanischem Wege durch einen "Chopper", an gepulsten Quellen (z.B. der gepulste Reaktor IBR-2 in Dubna) oder durch Beschleuniger, die Neutronen durch Spallation generieren, erzeugt werden.

3. Das Neutronen-Flugzeit-Diffraktometer EPSILON-MDS

Das Straindiffraktometer EPSILON-MDS teilt sich mit dem Texturdiffraktometer SKAT den Flugzeitkanal 7A des Impulsreaktors IBR-2 in Dubna. Der Neutronenleiter hat eine Länge von etwa 102 m und ermöglicht so Messgenauigkeiten von $4x10^{-3}$ bei Netzebenenabständen >2Å.

Grundbaustein des Diffraktometers ist ein vierachsiges Goniometer (eine Rotationsachse und drei, senkrecht zueinander angeordnete Translationsachsen, angetrieben durch Schrittmotoren). Neun Radialkollimatorblöcke sind auf einem Ring um das Probenzentrum in einer Ebene senkrecht zum einfallenden Strahl befestigt. Am Ausgangsfenster der Kollimatoren sind mehrere (maximal neun) 3 He-Detektoren (10 mm Ø, 200 mm lang) angeordnet, so dass ein Streuwinkelbereich von $82^{\circ} \leq 2\Theta \leq 98^{\circ}$ überstrichen wird. Dabei ist dem zentralen Detektor-Zählrohr der Streuwinkel $2\Theta = 90^{\circ}$ zugeordnet (Walther et al., 2000). Die Konstruktion ermöglicht es, daß die von Netzebenen in verschiedenen Probenpositionen abgebeugten Neutronen gleichzeitig erfaßt werden können (Abb. 1).

Jeder Radialkollimator besteht aus 48, mit GdO_2 bedampften Folien, angeordnet in einem Winkelabstand von 20 Winkelminuten. Die Transparenz der Kollimatoren beträgt 90–95%. Ein durch den großen 2Θ -Bereich sich ergebender Verlust an spektraler Auflösung und Unterschiede im Betrag sekun-

därer Laufwege, die aus der Anordnung der Detektoren auf einer ebenen Fläche am Ausgang der Kollimatoren folgen, werden mittels elektronischer Flugzeitfokussierung, d.h. die Verwendung variabler Breiten des Flugzeitanalysators behoben. Im Ergebnis können alle Spektren eines Kollimators addiert werden. Der Intensitätsgewinn in ersten Testmessungen betrug etwa 100 %.

4. Das Synchrotrondiffraktometer (ROBL) an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble (F)

Auch wenn die Eindringtiefe von Synchrotronstrahlung vergleichsweise gering bleibt, stellt die Methode doch auch für geowissenschaftliche Fragestellungen eine sinnvolle Ergänzung zur Neutronenstrahlung dar, weil hohe Energie und Intensität sowie ein sehr kleiner Strahlfokus Meßlinien mit geringen Punktabständen ermöglichen, d.h. die Untersuchung lokaler Effekte (Textur als auch Strain) erlauben und nur relativ kurze Meßzeiten erforderlich sind.

Am Synchrotrondiffraktometer ROBL werden alternativ radiochemische und festkörperphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Meßzeit kann man über das Einreichen von Forschungsvorschlägen zugesprochen bekommen. Das Diffraktometer wurde vom FZ Rossendorf entwickelt und steht seit 1998 zur Verfügung (Matz et al., 1999). Materialforschung erfolgt hauptsächlich zu strukturellen Fragen von Festkörpern und Schmelzen (Reflexion oder Diffraktion).

Optisches Hauptelement ist ein Doppelkristall-Monochromator zwischen zwei Spiegeln. Der Strahl ist für einen Energiebereich von 5 bis 35 keV ausgelegt. Grundbaustein ist ein Sechs-Kreis-Goniometer, welches Experimente in beiden, senkrecht zueinander stehenden Beugungsebenen ermöglicht. Zur Verfügung stehen verschiedene Detektoren, u.a. auch eine zweidimensionale CCD-Kamera (SMART). Wahlweise sind verschiedene Kollimatoren einsetzbar.

Die Auflösung in Diffraktionsexperimenten wird durch den Monochromator und die Strahldivergenz bestimmt: Für einen Si(111)-Monochromator und Si-Spiegel, 12 keV bei einem vertikal parallelen Strahl ergab sich eine Auflösung von $\Delta d/d\sim 1,3 \times 10^{-4}$.

5. Anwendungsbeispiele für geologische Materialien

Die Betrachtung von Gesteinen als "(geologisches) Material" unter Nutzung der hier umrissenen Methoden war ursprünglich auf die diesbezüglichen Er-

folge der Materialwissenschaftler gegründet. Den wesentlich komplizierteren Bedingungen der Arbeit mit geologischen Materialien jedoch (Mehrphasigkeit und niedrige Kristallsymmetrie der Einzelkomponenten) ist es geschuldet, daß in den Geowissenschaften ein vergleichbares Niveau noch nicht erreicht ist. Während Texturmessungen bereits für eine Vielzahl gesteinsbildender Minerale vorliegen (auch wenn "Gesteinstexturen" im eigentlichen Sinne für mehrphasige Objekte noch fehlen), steht die Erforschung intrakristalliner Strainverhältnisse noch durchaus am Anfang, sowohl in experimenteller als auch theoretischer Hinsicht. Weniger noch ist bekannt über Zusammenhänge zwischen intrakristallinem Strain (z.B. Mikrostrain, Reststrain) und Textureigenschaften, die auch – aber nicht nur – vor allem im Fall von Mehrfachdeformationen von wesentlichem Einfluß für Spannungsverteilungen sein sollten.

Zunächst standen Reststrainbestimmungen und axiale Deformationsexperimente mit der Neutronen-Flugzeit-Methode an monomineralischen Gesteinsproben, z.B. Quarzsandstein (Frischbutter et al., 2000), Dolomit (Walther et al., 2001), Kalzit (Nikitin et al., 2004; Scheffzük et al., im Druck) im Vordergrund. Später folgten, vor allem unter Nutzung des rekonstruierten Diffraktometers EPSILON-MDS, Experimente mit mehrphasigen Gesteinsproben wie Arkosen, Quarzit-Dunit-Kombinationen, Granit, auch unter Anwendung von Synchrotronstrahlung sowohl zur Problematik lokaler Texturen (Turmalin) als auch kleinmaßstäblicher Strainmessung über Phasengrenzen.

Im folgenden wird hieraus eine Auswahl von Untersuchungsergebnissen zusammengestellt:

5.1 Sandstein

Der Probenkörper war ein kretazischer Sandstein (Elbezone, SE-Deutschland), untexturiert, aber geschichtet, > 95 % Quarz. Die Abb. 2 zeigt ein typisches Neutronen-Flugzeitspektrum mit indizierten Quarzpeaks. Das Ergebnis eines einaxialen Belastungsversuchs (Zylinder 30 mm Ø, 60 mm lang) ist in Abb. 3 dokumentiert. Dargestellt ist der Deformationsverlauf für die Quarznetzebene ($01\bar{1}1/10\bar{1}1$). Das Elastizitätsmodul E=66,3+6,1 GPa ist durch lineare Regression bestimmt worden. Die Aufzeichnung des Entlastungsverhaltens ergab erwartungsgemäß die für Deformationen 1. Art (Makrostrain) charakteristische Peakverschiebungen hin zu größeren Netzebenenabständen, bzw. längeren Flugzeiten (Abb. 4).

5.2 Dolomit

Das Probenmaterial war ein oolithischer Dolomit mit teilweise deutlichen, aber nicht durchgehend einheitlichen, bereits makroskopisch erkennbaren Deformationen der Ooide (Abb. 5), die sich auch in einer schwachen, kristallographischen Vorzugsorientierung widerspiegeln (Abb. 6).

Diese Textur, wahrscheinlich aber auch stärkere Inhomogenitäten im Porenraum und in der Struktur des Gesteins sind mögliche Ursachen für die größeren Fehlerbalken der Meßwerte. Sie sind hier für drei Dolomit-Netzebenen dargestellt (Abb. 7). Lediglich das sich nach linearer Regression ergebende *Young*sche Modul für den (113)-Peak von 101 GPa entspricht hinreichend genau berechneten Werten (nach Reuss: 104 GPa, nach Voigt: 132 GPa). Auch dieser Umstand hat vermutlich in den genannten Gründen und in der methodischen Problematik der Auswirkung von Peaküberlagerungen seine Ursache.

5.3 Deformation an einer mehrfach deformierten Gesteinsgrenze – Beugungsexperimente mit Neutronen- und Synchrotronstrahlung

Aus Halbzylindern von Dunit und Quarzit ist parallel zur Foliation des Quarzits eine in einem Stahlmantel eingespannten Zylinderprobe (Ø 15 mm, Höhe 10 mm) präpariert worden. Durch eine Schockwelle (16–34 GPa) mit Ausbreitungsrichtung in der Zylinderachse und parallel zur Foliation des Quarzits erfolgte eine Deformation zu den Endmaßen der Probe Ø 18 mm, Höhe 8 mm (Kenkmann et al., 2000).

Die Probe bot damit die Möglichkeit, Reststrainänderungen mit Bezug auf die Grenzfläche zwischen verschiedenen Gesteinen als auch den Einfluß unterschiedlicher, bereits vorhandener Texturen (richtungslos-körniger Dunit gegen stark texturierten Quarzit) im Sinne einer Mehrfachdeformation zu untersuchen. Neutronographisch sind Profilpunkte im Bereich ± 3 mm von der Grenzfläche vermessen worden. Die mit neutronographischer Diffraktion (Abb. 8) erzielten Ergebnisse ermöglichten über die Anwendung der Rietveld-Methode eine Bestimmung der Deformation der Einheitszelle. Für den Quarz ergibt sich danach ein drastischer Abfall residueller Dehnung bis hin zu Kompression mit Annäherung an die Grenzfläche. Aufgrund der gewählten Experimentgeometrie (zwei Detektoren in $2\Theta = 90^\circ$, Grenzfläche in 45° -Stellung zum einfallenden Strahl) werden Basis- und zugehörige Prismenflächen des Quarz-Hauptmaximums in den Detektoren A bzw. B (gefüllte Zeichen, Abb. 8) gemessen. Die gleichen Flächen eines Maximums, welches zwar nur geringe Intensität erreicht, jedoch von kinematisch besonderer Be-

deutung ist, weil es scherende Deformationsanteile in der Gneistextur abbildet, werden in den Detektoren B bzw. A (offene Zeichen, Abb. 8) registriert. Für das Nebenmaximum der Quarztextur ist somit dilatativer Strain deutlich höher als für das Hauptmaximum und zusätzlich der Abfall zur Grenzfläche offensichtlich so stark, daß die sich dabei ergebenden Fehlerbalken (vgl. Daten für das Hauptmaximum) so groß werden, daß ihre Darstellung nicht mehr sinnvoll wurde.

Von der Dunitseite zur Grenzfläche kann nur bedingt eine gerichtete Entwicklung erkannt werden: unter Vorbehalt ist eine leicht steigende Dehnungstendenz zu verzeichnen.

Grundsätzlich erfolgen die Strainvariationen in einem sehr eng um die Grenzfläche begrenzten Bereich.

An der gleichen Probe sind Diffraktionsexperimente mit Synchrotronstrahlung (hohe räumliche Auflösung erlaubt kleine Meßpunktabstände) durchgeführt worden (3 Profillinien zu je 18 Meßpunkten im Abstand von 0,5 mm, vgl. inset Abb. 10).

Während sich Makrostrain in der Verschiebung von Peakpositionen äußert, verursacht Mikrostrain (Strain im Gitterbereich) eine Peakverbreiterung. Damit bieten Beugungsexperimente die gegenüber allen anderen Methoden einzige Möglichkeit, auf dem Wege von Peakformanalysen Mikrostrainzustände zu bestimmen.

Die Abb. 9 zeigt, wie mit Annäherung an die Gesteinsgrenzfläche (if) ein Quarz- und ein Olivinpeak zunehmend an Intensität bis gegen Null verlieren. Daraus war zu schlußfolgern, daß zur Grenzfläche hin eine Zerkleinerung der beugenden Kristallite bis unter die Grenze der sog. kohärenten Beugungslänge erfolgt ist. Vorangegangene mikroskopische Beobachtungen hatten bereits Kornzerkleinerung bis hin zur Bildung von Schmelzfilmen auf der Grenzfläche (Kenkmann et al., 2000) erkennen lassen. Für eine Formanalyse wurden die Beugungspeaks von Quarz (11½1) und Forsterit (031) als Überlagerung einer *Gauss*- und einer *Lorentz*-Form gefittet. Fluktuationen des Mikrostrains sollten sich dabei in Änderungen der Peakbreite des *Gauss*-Peaks äußern. Fluktuationen der Partikelgröße dagegen die Breite des *Lorentz*-Peaks beeinflussen. Nach Scherrer (1918) ergibt sich die Partikelgröße d dabei zu

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{b \cdot \cos \Theta}$$

mit λ der Wellenlänge der benutzen Strahlung, Θ des *Bragg*-Winkels, b der Peakbreite auf halber Höhe des Maximums und k einer Konstanten (0,94).

Ist die Intensität des zu untersuchenden Peaks zu klein, so tendiert das verwendete Auswerteprogramm zu sehr kleinen Werten für die Peakbreite des Lorentz-Anteils. Entsprechend obiger Formel resultieren daraus unrealistisch große Werte der Teilchengröße und gleichzeitig große Fehler der berechneten Werte. Diese Fälle sind bei der Interpretation der Ergebnisse auszuschließen. Daraus folgt nach Abb. 10, die als inset-Bildchen auch eine Skizze der vermessenen Profillagen enthält, daß eine Korngrößenänderung im Quarzit nur innerhalb der (zur Grenzfläche parallelen) Foliation, jedoch mit graduellen Unterschieden hinsichtlich der Profillage erfolgt ist.

Anders dagegen im Dunitanteil der Probe: Hier erzeugt die überlagerte Schockwelle in dem zuvor richtungslos-körnigen Material eine flächige Strukturierung in Form einer charakteristischen Korngrößenverteilung (Abb. 11), die vom oberen zum unteren Meßprofil und von der Grenzfläche beider Gesteinstypen zum Probenmantel hin einfällt.

Die Strainauswertung des Synchrotronexperimentes (Abb. 12) kann die neutronographisch gewonnenen Ergebnisse grundsätzlich bestätigen, speziell was die Relationen zwischen den Gesteinstypen Dunit und Quarzit an ihrer Grenzfläche anbelangt. Zusätzlich ist eine Verfeinerung der Ergebnisse durch deutlich geringere Meßpunktabstände möglich geworden. Dies betrifft nicht nur Aussagen zum Einfluß unterschiedlicher Positionen im Meßnetz, sondern auch den Einfluß der Wände des Stahlzylinders.

Dilatativer Reststrain im Quarzit ist danach maximal für das Probenzentrum, und in Probenbodennähe zwischen 2 und 7 mm Entfernung von der Grenzfläche deutlich zur Grenzfläche und zur Zylinderwandung bis hin zu kompressiven Zuständen abfallend. Für den oberen scan (in Nähe der offenen Probenseite) ergeben sich entgegengesetzte Relationen (wertet man die extrem hohen Fehlerbalken für Werte in Nähe der Grenzfläche als Ausdruck einer Fortsetzung der sich aus dem vorhergehenden Kurvenverlauf ableitenden Tendenz). Wesentlich indifferenter und zudem nur wenig um das Null-Niveau schwankend ergeben sich die Verhältnisse im Dunitteil: Die Grenzfläche macht sich bis etwa zur Probenmitte durch sehr große Fehlerbalken vor allem für die Werte der unteren beiden Profillinien bemerkbar.

6. Zusammenfassung

Beugungsexperimente mit Neutronen- oder Synchrotronstrahlung eröffnen in der Zusammenarbeit mit Kernphysikern und Materialwissenschaftlern für geowissenschaftliche Fragestellungen eine neue Beobachtungsdimension und können so zur Klärung des Ablaufs von Deformationsprozessen in der

oberen Erdkruste beitragen. Aufbauend auf dieser Kooperation sind in den vergangenen drei Jahrzehnten gute Fortschritte auf dem Gebiet der Texturforschung gemacht worden. Dagegen steht die intrakristalline Strainanalyse auch im internationalen Vergleich noch weitgehend am Anfang ihrer Entwicklung.

Beugungsexperimente mit Neutronen- und Synchrotronstrahlung sind sich gegenseitig sinnvoll ergänzende Methoden für Studien an Geomaterialien (spektrale und räumliche Auflösung, Beobachtungsvolumen).

Der Beitrag konzentriert sich schwerpunktmäßig auf die intrakristalline Strainmessung, stellt hierzu kurz das Straindiffraktometer EPSILON-MDS am VIK Dubna sowie das Synchrotrondiffraktometer ROBL am ESRF Grenoble vor und bringt ausgewählte Ergebnisse von Belastungsexperimenten mit Sandstein, Dolomit (Makrostrain) und mehrphasigen Proben (Dunit-Quarzit). Außerdem werden aus den experimentellen Ergebnissen Diskussionsansätze zu Fragen der Beziehungen zwischen Textur und Strain abgeleitet sowie als Beispiel Möglichkeiten einer Peakformanalyse an Beugungsspektren diskutiert.

Danksagung: Die Arbeiten wurden im Rahmen der BMBF-Projekte 03-DU-BPOT-9, DUO3X4 und durch das GFZ Potsdam gefördert. Die Autoren danken für die kollegiale Unterstützung während der Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des VIK Dubna (Russ), dem ESRF Grenoble (F) und dem FZ Rossendorf (D).

Abbildungen

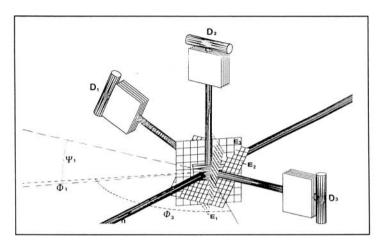


Abb. 1: Konstruktionsprinzip des Straindiffraktometers EPSILON-MDS. Jeder Netzebene (E) ist ein Detektor (D) zugeordnet. Von links unten nach rechts oben ist der einfallende Neutronenstrahl (n) skizziert.

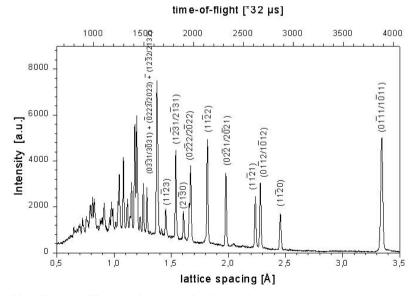


Abb. 2: Neutronen-Flugzeitspektrum einer Sandsteinprobe

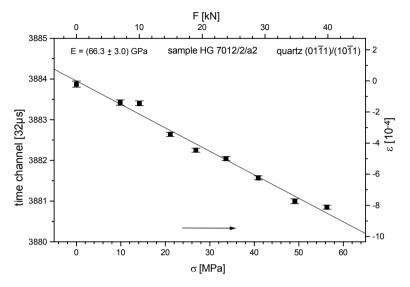


Abb. 3: Strain-Stress-Diagramm zu einem Belastungsexperiment für Quarz in einem Sandstein

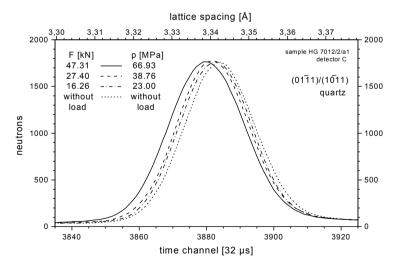


Abb. 4: Peakverschiebung infolge Probenentlastung

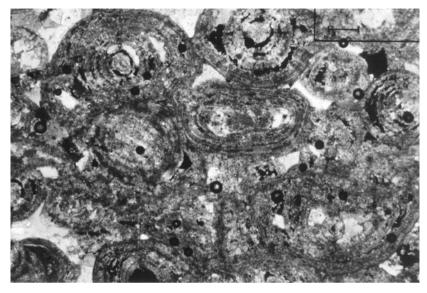


Abb. 5: Dolomit-Mikrofoto, einfach polarisiertes Licht (Maßstab: 0,2 mm)

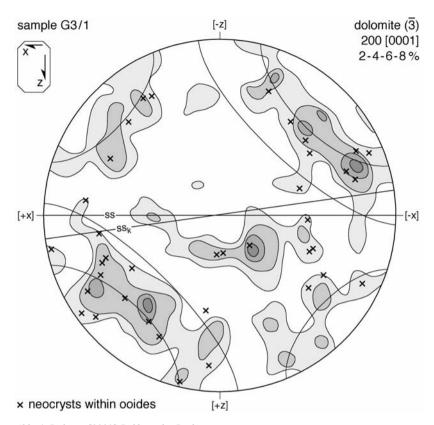


Abb. 6: Dolomit [0001]-Polfigur der Probe

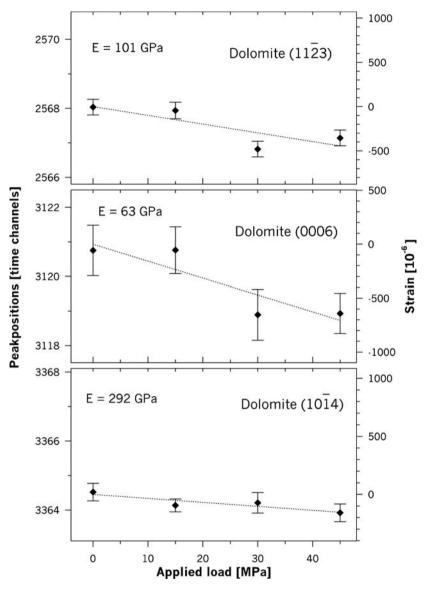


Abb. 7: Strain-Stress Diagramme für drei Netzebenen des Dolomits in einem Belastungsexperiment

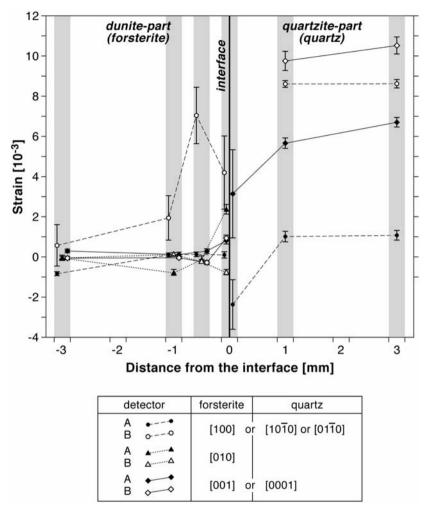


Abb. 8: Strainentwicklung an einer schock-deformierten Dunit-Quarzit-Grenzfläche, bestimmt mittels Neutronendiffraktion

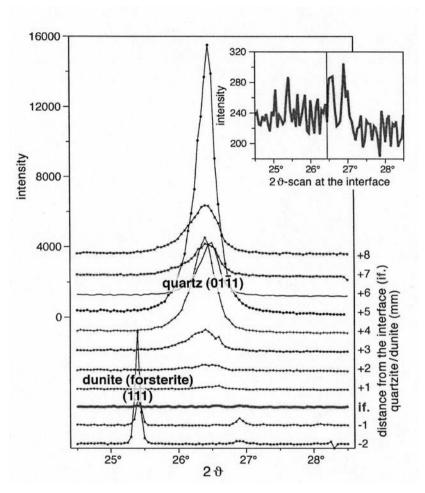


Abb. 9: Entwicklung eines Forsterit- und eines Quarzpeaks beiderseits der deformierten Gesteinsgrenze Dunit-Quarzit

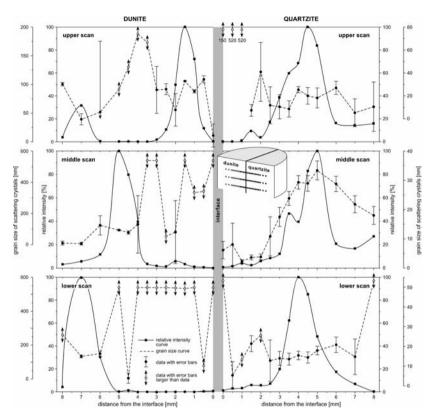


Abb. 10: Ergebnis einer Peakformanalyse zur Abschätzung der Größenentwicklung streuender Kristallite beiderseits der Grenzfläche Dunit-Quarzit

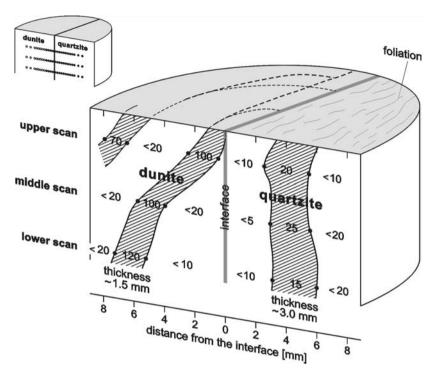


Abb. 11: Kristallitgrößen- und Struktuierungsmuster beiderseits der Grenzfläche Dunit-Quarzit, bestimmt mittels einer Peakformanalyse aus einem Synchrotronspektrum

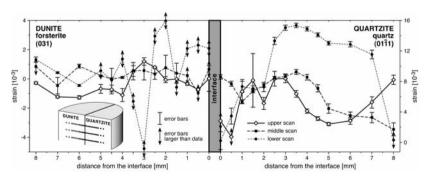


Abb. 12: Reststrainverteilung beiderseits einer überprägten Gesteinsgrenze, bestimmt durch eine Peakformanalyse eines Synchrotronspektrums

Literatur

- Frischbutter, A.; Neov, D.; Scheffzük, Ch.; Vrana, M.; Walther, K. (2000): Lattice strain measurements on sandstone under load using neutron diffraction. J. struct. Geol. 22, Elsevier Amsterdam:1587–1600.
- Kenkmann, T.; Hornemann, U.; Stöffler, D. (2000): Experimental generation of shock-induced pseudotachylites along lithological interfaces. – Meteoritics and Planetary Science 35, University of Arizona: 1275–1290.
- Matz, W.; Schell, N.; Bernhard, G.; Prokert, F.; Reich, T.; Claußner, J.; Oehme, W.;
 Schlenk, S.; Dienel, S.; Funke, H.; Eichhorn, F.; Betzl, M.; Pröhl, D.; Strauch, G.;
 Hütting, H.; Neumann, W.; Brendler, V.; Reichel, P.; Denecke, M.A.; Nitsche, H.
 (1999): ROBL a CGR beamline for radiochemistry and materials research at the
 ESRF. J. Synchrotron Rad. 6, Blackwell Publishing Oxford: 1076–1085.
- Nikitin, A. N.; Ivankina, T.I.; Sobolev, G.A.; Scheffzük, Ch.; Frischbutter, A.; Walther, K. (2004): Neutron Diffraction Study of Intracrystalline Strains and Stresses in a Marble Sample at High Temperatures and External Mechanical Loads. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, vol. 40, 1, Moscow: 83–90.
- Noyan, I. C. (1992): The Theory of Stress/Strain Analysis with Diffraction. In: M.T. Hutchings and A.D. Krawitz (ed.): Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction – NATO ASI Series E: Applied Sciences, vol. 216, Plenum Publishing Corporation New York: 51–65.
- Scheffzük, Ch.; Siegesmund, S.; Koch, A. (2004): Strain investigations using neutron time-of-flight diffraction on calcite marbles. Environmental Geology, Springer Verlag Heidelberg (im Druck)
- Scherrer, P. (1918): Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. – Göttinger Nachrichten, Math.-Phys., Georg-August-Universität Göttingen: 98–100.
- Walther, K..; Scheffzük, C.; Frischbutter, A. (2000): Neutron time-of-flight diffractometer EPSILON for strain measurements: layout and first results. – Physica B, Condensed Matter 276-278, Elsevier Amsterdam: 130–131.
- Walther, K.; Scheffzük, Ch.; Frischbutter, A. (2001): Strain-stress experiments on dolomite using neutron TOF diffraction. – Fisika Semli, 2001/1, Moscow: 32–40.

Günter Leonhardt

Die Sanierung der Wismut-Hinterlassenschaft

Für die Einladung zum heutigen Kolloquium bedanke ich mich, weil ich mich gern an meine Tätigkeit auf dem Potsdamer Telegrafenberg erinnere und dem Jubilar zu Dank verpflichtet bin, daß er mir die Möglichkeit gab, dort zu arbeiten. Vor Aufnahme der Tätigkeit im damaligen Zentralinstitut für Physik der Erde war ich als Stellvertreter des Hauptmarkscheiders in der Generaldirektion der SDAG Wismut, nach der Abwicklung der Akademie der Wissenschaften der DDR als Vorstand der Sparte Consulting und Engineering in der umgestalteten Wismut GmbH tätig.

Die SDAG Wismut war nach Kanada und den USA mit einer Gesamtfördermenge von 220.000 t Uran der weltweit drittgrößte Uranproduzent. Die Hinterlassenschaft und die negativen territorialen Auswirkungen eines solchen Industriezweiges sind natürlich nicht unerheblich, zumal die Bergbauund Aufbereitungstätigkeit auf eine relativ kleine Fläche beschränkt war. In Sachsen war das der Granitkontakt im westlichen Erzgebirge und im Vogtland, später die Gegend um Freital und Königstein, in Thüringen das Gebiet um Ronneburg. Aufbereitungsbetriebe gab es in Crossen und Seelingstädt, nahe der Landesgrenze zwischen Sachsen und Thüringen.

1998 hatte ich Gelegenheit in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät zur Tätigkeit der Wismut in den Lagerstätten zu sprechen, in denen zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung noch Abbau umging¹. Ich habe mich dabei auf geomechanisch-bergschadenkundliche Probleme konzentriert. Thesenhaft habe ich darüber informiert, wie die Sanierung der Hinterlassenschaft erfolgen soll. Heute möchte ich an ausgewählten Beispielen erläutern, welche Fortschritte inzwischen erreicht wurden,welche Probleme auftraten und noch zu lösen sind.

¹ Günter Leonhardt: Uranbergbau der Wismut – technisch-wissenschaftliche Leistung und Umweltproblem. Veröffentlicht in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät, Band 26 (Jahrgang 1998, Heft 7), S. 63–87

110 Günter Leonhardt

Den Umfang der notwendigen Sanierung zum Zeitpunkt, als die Gewinnungsarbeiten eingestellt wurden, zeigt die Übersicht 1. Dafür wurden insgesamt 6,6 Mrd. Euro zur Verfügung gestellt.

Natürlich gibt es in allen stillgelegten Bergbaugebieten unabhängig vom geförderten Rohstoff einen Sanierungsbedarf. Der Spezifik des Uranabbaus geschuldet, wird aber der ehemalige Wismut-Bergbau anders behandelt als die anderen Bergbauzweige. Mit der Wiedervereinigung Deutschlands ist die Urangewinnung aus primär ökonomischen Gründen eingestellt worden. Uran ist auf dem Weltmarkt billiger als z.B. seine Gewinnung in Teufen von mehr als 1.800 Meter wie der Ganglagerstätte Aue, in der u. a. Gesteinstemperaturen von mehr als 70 °C auftraten. Wegen der besonderen gesundheitsgefährdenden Eigenschaften der Zerfallsprodukte von Uran war die Sanierung der belasteten Anlagen und Territorien zwingend erforderlich und wurde deshalb auch vorrangig behandelt.

Die Übersicht 2 enthält das von den zuständigen Behörden bestätigte Sanierungskonzept.

Zur Realisierung läßt sich kurz folgendes sagen:

Die Säuberung und Verwahrung der Grubenräume ist abgeschlossen, ein Großteil der Hohlräume ist inzwischen geflutet, die ausfließenden Wässer werden vor ihrer Entlassung in die Vorfluter in neu geschaffenen Wasserbehandlungsanlagen von Schadstoffen getrennt. Kontaminierte Betriebsanlagen sind abgerissen und im Tagebau-Restloch Lichtenberg oder in den Schlammteichen der Aufbereitungsbetriebe sicher verwahrt. Nicht kontaminierte Gebäude wurden überwiegend Nachnutzern übergeben.

Mit Ausnahme der an der Autobahnabfahrt Ronneburg weithin sichtbaren Abraumhalden der früheren Bergbaubetriebe Reust und Paitzdorf, die in den nächsten Jahren noch in das Tagebaurestloch Lichtenberg eingebracht und zur Konturierung der Bergbau-Folgelandschaft verwendet werden, sind alle Halden landschaftsnah verwahrt, überwiegend aufgeforstet und gegen Erosion gesichert.

Zwei Objekte, bei deren Sanierung besondere Probleme auftreten und wofür auch international keine gesicherten Erfahrungen bestehen, sollen näher erläutert werden.

Zum einen ist das das Grubengebäude des früheren Bergbaubetriebes Königstein. Im Hangenden der Lagerstätte liegt, geschützt durch eine Turonton-Schicht, ein Trinkwasserleiter, aus dem die Stadt Pirna und umliegende kleinere Ortschaften versorgt werden. Dieses Reservoir mußte während der Betriebstätigkeit durch eine wissenschaftlich begründete Abbauführung und

muß auch nach Einstellung der Gewinnungstätigkeit ungestört erhalten bleiben.

In der Grube wurde in den ersten Betriebsjahren Uranerz im Kammer-Pfeiler-Bau mit nachträglichem Versatz gewonnen, ab Mitte der 80-er Jahre wurde zur chemischen Gewinnung übergangen. Dabei ist das erzführende Gestein nach Schaffung eines notwendigen Kompensationsraumes in situ durch Sprengungen aufgelockert worden. Anschließend wurde Schwefelsäure aufgebracht und dadurch das Erz gelöst. Der Transport nach Übertage erfolgte im gelösten Zustand. Der Aufbereitungsprozeß wurde also gewissermaßen nach Untertage verlegt. Insgesamt sind etwa 130.000 Tonnen Schwefelsäure in das Gebirge injiziert worden. Durch den langsam ablaufenden chemischen Prozeß war es unvermeidbar, daß nach Einstellung der Gewinnungstätigkeit große Säuremengen im Gebirge verblieben und der Lösungsvorgang bis zu deren Neutralisierung weiter läuft. Der nicht zu stoppende Prozeß wird im Interesse der Umwelt streng kontrolliert, die uranhaltige Lösung wird unter größtmöglicher Sicherheit bei Gewinnung und Transport exportiert.

Unabhängig von den ablaufenden Reaktionen ist es nachteilig für eine abschließende Sanierung, daß sich die zuständigen Behörden und Fachleute bis dato nicht verbindlich dazu äußern, ab welchem Verdünnungsgrad die Säurereste als neutralisiert betrachtet werden und schadlos in die Vorfluter entlassen werden dürfen. Auch Jahre nach der Herstellung der deutschen Einheit gibt es noch kein Gesetz für die Gewässerbewirtschaftung in den Beitrittsländern. Offenbar liegt das daran, daß wegen der unikalen Problematik Gesetze aus den Altbundesländern nicht ohne weiteres auf das Problem Königstein übertragen werden können.

Ein anderes Problem ist die Sanierung der Schlammteiche der beiden Aufbereitungsbetriebe. Im Aufbereitungsprozeß ist das erzhaltige Gestein auf Feinkorngröße zermahlen und das zu gewinnende Uran im Ergebnis chemischer Reaktionen durch Flotation abgeschieden worden.

Der taube Feinschlamm wurde über Rohrleitungen in künstlich angelegte sog. Schlammteiche, gepumpt. Diese Absetzbecken haben keinen natürlichen Abfluß und können daher nicht entwässert werden. Die Schlämme sind teilweise mehr als 70 Meter mächtig. Im Zuge der Sanierung werden zu deren Verfestigung Haldenmassen eingebracht, z.B. ist die gesamte Halde des Aufbereitungsbetriebes Crossen im Umfang von mehreren Millionen m³ über einen Pipe-Conveyer, das ist ein zur Vermeidung von Umweltbelastungen beim Transport geschlossenes Förderband, umgelagert worden. Für die Renaturierung muß die trockengefallene Oberfläche eine Mindestfestigkeit be-

112 Günter Leonhardt

sitzen, um z.B. die Bepflanzung zu ermöglichen. Es mag primitiv anmuten, die angewandte Methode ist aber die einzig praktikable Möglichkeit, die Schlämme weitgehend zu entwässern und zu verfestigen. Von Schwimmkörpern aus werden in die Ablagerungen Löcher gestoßen und saugfähige textile Vertikaldrains eingebracht. Dadurch wird es möglich, den Wassergehalt der Schlämme langsam zu vermindern und die Oberfläche zu stabilisieren.

Trotz aller Probleme gibt es sichtbare Fortschritte, die Hinterlassenschaft des Uranbergbaus zu beseitigen bzw. umweltgerecht zu sanieren. Die bisher erzielten Ergebnisse und die angewandten Methoden entsprechen höchsten Ansprüchen, sie geben der Nachfolge-Wismut die Möglichkeit, die gewonnen Erfahrungen international zu vermarkten.

Etwa 2006/2007 soll die Verfüllung, Endkonturierung und landschaftsnahe Gestaltung des Tagebaurestloches Lichtenberg, das 1990 noch ein offenes Volumen von 84 Mio. m³ hatte, und von verbleibenden Halden und Betriebsgeländen abgeschlossen sein. Für die geschilderte besondere Problematik der Schlammteiche ist ein längerer Zeitraum erforderlich; nach derzeitigem Kenntnisstand ist mit dem Abschluß dieser Arbeiten etwa 2012 zu rechnen.

Lassen Sie mich mit einem erfreulichen Ausblick schließen.

Bei meinem Vortrag im Jahre 1998 hatte ich mitgeteilt, daß Gelder für die Sanierung der Hinterlassenschaft leider nur für die Standorte bereit gestellt worden sind, in denen zum Zeitpunkt der wiedererlangten Einheit unseres Landes noch Bergbau umging. Standorte, die zu früheren Zeitpunkten unsaniert an das Territorium zurückgegeben wurden, sind trotz zweifellos vorhandener Probleme nicht berücksichtigt worden. Diese politisch motivierte und mit der juristisch komplizierten Lage im besetzten Nachkriegsdeutschland begründete Entscheidung ist für die Bevölkerung in den ehemaligen Wismutgebieten, wie z.B. in Annaberg und Johanngeorgenstadt im Erzgebirge oder in Zobes im Vogtland, nicht verständlich, sie muß naturgemäß zu aufgeregten und nicht immer sachlichen Diskussionen führen.

Erfreulicherweise gibt es inzwischen ein erstes Beispiel, dieser unbefriedigenden Situation zu entsprechen. Vom Bund und vom Land Sachsen wurden im vergangenen Jahr 770 Mio. Euro bereitgestellt, Sanierungsarbeiten auch im Gebiet von Johanngeorgenstadt durchzuführen, wo die damalige SAG Wismut in den Nachkriegsjahren tätig war. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen ist der Wismut GmbH die Koordinierung dieser Arbeiten übertragen worden. Mehrere vorwiegend ortsansässige Kooperationspartner sind in Projektierung und Ausführung einbezogen. Bleibt zu hoffen, daß zukünftig

auch für andere belastete Standorte der Wismut und anderer Bergbauzweige Mittel und Wege zur Sanierung gefunden werden.

Übersicht 1: Sanierungsobjekte SDAG Wismut (Stand 1990)

| | Aue | Königstein | Ronneburg | Seeling- städt | Summe |
|-------------------------|-------|------------|-----------|-------------------|---------|
| Tagesschächte Anzahl | 8 | 10 | 38 | _ | 56 |
| Halden | | | | | |
| Anzahl | 20 | 3 | 16 | 9 | 48 |
| Fläche (ha) | 342,3 | 37,9 | 604,4 | 533,1 | 1.517,7 |
| Volumen (Mio m³) | 47,2 | 4,5 | 187,8 | 72,0 | 311,5 |
| Schlammteiche | | | | | |
| Anzahl | 1 | 3 | 3 | 7 | 14 |
| Fläche (ha) | 3,5 | 4,6 | 9,0 | 706,7 | 723,8 |
| Inhalt (Mio m³) | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 159,7 | 160,4 |
| Grubengebäude | | | | | |
| Ausdehnung (km²) | 30,7 | 7,1 | 73,4 | _ | 111,2 |
| off. Länge (km) | 240 | 112 | 1.043 | _ | 1.395 |
| Tagebau | | | | | |
| Fläche (ha) | _ | _ | 160 | _ | 160 |
| off. Volumen (Mio | | | 84 | _ | 84 |
| m³) | | | | | |

Übersicht 2: Sanierungskonzept

- Säuberung der Grubengebäude von wassergefährdenden Stoffen.
- Verfüllung solcher Grubenräume, die langfristig eine Gefährdung der Tagesoberfläche und von Grundwasserleitern verursachen können.
- Flutung der Grubengebäude; die überlaufenden Flutungswässer sind in der Regel chemisch und radioaktiv kontaminiert. Sie werden in vorhandenen oder neu zu errichtenden Anlagen zur Wasserreinigung so lange behandelt, bis die Verunreinigungen unter die Grenzwertkonzentrationen gesunken sind und dann in die Vorfluter entlassen.
- Demontage und Abbruch kontaminierter Anlagen und Gebäude; zur Entsorgung des kontaminierten Schrotts und Bauschutts ist vorzugsweise eine Einlagerung in die Schlammteiche mit Zwischenlagerung im Be-

114 Günter Leonhardt

- triebsgelände vorgesehen.
- Verwahrung der Schlammteiche am Ort. Zunächst muß das Freiwasser abgestoßen werden und die Entwässerung der eingelagerten Aufbereitungsschlämme erfolgen. Mit der nachfolgenden Abdeckung soll eine Abdichtung des Deponiekörpers erreicht werden. Nach Abschluß dieser Maßnahmen werden langfristig Umweltbelastungen über den Luft- und Wasserpfad unterbunden. Beim Abstoßen von Freiwasser und beim Entwässern der Schlämme fallen ebenfalls kontaminierte Wässer an. Sie werden wie die Flutungswässer gereinigt und dann in die Vorfluter geleitet. Die Dämme der Schlammteiche werden konturiert, abgedeckt und erosionssicher gestaltet.
- Verwahrung der Halden vorzugsweise am Ort. Sie werden je nach Notwendigkeit abgemacht, konturiert, abgedeckt und begrünt. Mehrere Halden müssen umgelagert werden, z.B. im unmittelbaren Nahbereich von Wohngebieten im Raum Aue/Schlema und zur Verfüllung des Tagebaurestloches in Ronneburg.
- Anlage und kontinuierliche Beobachtung von Messnetzen im Umkreis der Sanierungsobjekte, um die Umgebung zu überwachen und den langfristigen Sanierungserfolg zu erfassen.

Die wissenschaftliche Kooperation auf dem Gebiet der Seismologie im Rahmen der KAPG, 1966–1990¹

1. Einführung

Die Seismologie als globale Geowissenschaft bedarf einer breiten internationalen Zusammenarbeit der Observatorien und wissenschaftlichen Einrichtungen. Diese Erkenntnis führte bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts zur Gründung entsprechender wissenschaftlicher Gesellschaften und zur Durchführung von internationalen wissenschaftlichen Kongressen. Einen tiefen Einschnitt in die wissenschaftliche Zusammenarbeit der Seismologen brachten der zweite Weltkrieg und dessen Folgen. Mit der Durchführung des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGJ, 1957/58) wurde die nach 1939 fast vollständig zum Erliegen gekommene internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Seismologie wieder intensiviert. Die Herausbildung und zunehmende Konfrontation der weltpolitischen Blöcke blieb jedoch nicht ohne Konsequenzen für die internationale wissenschaftliche Kooperation auf dem Gebiet der Seismologie. Das Bestreben der östlichen und der westlichen Seite, auf die internationalen nichtstaatlichen wissenschaftlichen Organisationen u. a. durch die Besetzung von Leitungsfunktionen Einfluss zu nehmen, und die ökonomischen und politischen Bedingungen führten dazu, dass sich unter Führung der UdSSR, abgelöst von den weltweiten Organisationen, eine separate Wissenschaftskooperation der sozialistischen Länder herausbildete. Ausgangspunkt dieser Entwicklung bildete die regionale geophysikalische Kooperation des IGJ in der Osteuropäisch-Asiatischen Region. 1966 wurde die Kommission der Akademien der

¹ Wissenschaftliche Mitteilung, vorgelegt von Heinz Kautzleben in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 20.11.2003. Der Artikel setzt die Reihe der Berichte über die Zusammenarbeit der wissenschaftlichen Einrichtungen der ehemaligen sozialistischen Länder in Mittel- und Osteuropa auf dem Gebiet der Geowissenschaften fort. S. Band 57 (Jahrgang 2003, Heft 1) der Sitzungsberichte. Der Autor des Berichtes war etwa zwei Jahrzehnte aktiv an den Arbeiten der KAPG beteiligt.

Wissenschaften sozialistischer Länder für die multilaterale wissenschaftliche Zusammenarbeit zum komplexen Problem "Planetare Geophysikalische Forschungen" (kurz: KAPG) in Leipzig gegründet. Einen Schwerpunkt der Wissenschaftskooperation in der KAPG bildete die Seismologie. In den 60er und 70er Jahren wurde diese Kooperation durch Unterkommissionen zu Teilbereichen der seismologischen Forschung koordiniert. In den 80er Jahren wurde eine projektorientierte Gliederung der Forschungskooperation durchgesetzt. Dabei war stets das Bestreben vorhanden, die Struktur der Kooperation in der KAPG ähnlich der der Internationalen Assoziation für Seismologie und Physik des Erdinnern (IASPEI) bzw. der Europäischen Seismologischen Kommission (ESC) zu gestalten. An der Zusammenarbeit der KAPG auf dem Gebiet der Seismologie waren vorrangig die geowissenschaftlichen Institute der Akademien der Wissenschaften der teilnehmenden Länder beteiligt, weiterhin auch einige Hochschuleinrichtungen. Trotz der regionalen Beschränktheit konnten in diesem Rahmen einige fundamentale Ergebnisse erzielt werden

2. Entwicklung des seismologischen Stationsnetzes

Sowohl die seismologische Grundlagenforschung als auch die Lösung von seismologischen Überwachungsaufgaben erfordern ein leistungsfähiges Beobachtungsnetz sowie eine standardisierte Methodik der Datengewinnung und -bearbeitung. Seismologische Stationen und Observatorien hatten sich historisch als eigenständige, oftmals an Universitäten und Hochschulen gebundene Einrichtungen herausgebildet. Die apparative Ausstattung, die Art und der Umfang der Datengewinnung und -auswertung waren dabei von den Möglichkeiten und Interessen der jeweiligen Betreiber abhängig. Das Bedürfnis nach einer möglichst schnellen Bereitstellung seismologischer Grundparameter seismischer Ereignisse wuchs in den 50er Jahren stark an. Seine Befriedigung erforderte die Schaffung homogener Beobachtungsnetze, entsprechender Kommunikationswege und Datenzentren. Die Blockkonfrontation und die unterschiedlichen Sicherheitsdoktrinen in Ost und West bedingten die Schaffung von Stationsnetzen, die möglichst genaue Daten über Erdbeben regional und global lieferten, andererseits aber auch als "nationales Mittel" die Kontrolle von unterirdischen Kernwaffentests ermöglichten. Obwohl der Aspekt des Monitoring von Kernwaffentests in der KAPG offiziell keine Rolle spielte, ist er als Handlungsmotiv zumindest seitens der UdSSR anzusehen. Etwa gleichzeitig mit dem standardisierten seismologischen Stationsnetz der KAPG entstand außerhalb der sozialistischen Länder das vom USGS ausgerüstete und betreute World Wide Standard Seismograph Network (WWSSN). Zumindest die seismologischen Hauptstationen der an der KAPG teilnehmenden Länder (einschließlich Kuba) wurden mit Standardgeräten des KAPG-Netzes ausgestattet. Die Ausrüstung der Hauptstationen dieses seismologischen Netzes entsprach dem damaligen Weltstand.

Die Entwicklung seismischer Geräte für die Stationen und Observatorien war ein permanenter Bestandteil der Kooperation in der KAPG, zunächst in Form einer Arbeitsgruppe, dann als Programm. In die Kooperation zu seismologischen Geräten und Stationsausrüstungen waren alle Teilnehmerländer der KAPG einbezogen.

Die seismologischen Stationen der KAPG waren analog registrierend. Der Seismograph bestand aus einem gekoppelten Seismometer-Galvanometer-System. Zur Gewährleistung der erforderlichen Homogenität der Daten wurden die Seismographen mit standardisierten Übertragungscharakteristiken versehen (Tabelle 2.1), die durch eine entsprechende Auswahl der Eigenperioden T und Dämpfungen D sowie der Rückwirkungsfaktoren σ erzielt wurden (Aranovich u. a., 1968; Tobias, 1973, 1976; Hurtig & Stiller, 1984). In Tab. 2.1 stehen die Indizes s für Seismometer und g für Galvanometer. Der Periodenbereich, in dem die maximale Vergrößerung erzielt wird, ist mit dT bezeichnet.

| Тур | T_s | T_{g} | $\mathbf{D_s}$ | $\mathbf{D_g}$ | σ^2 | dT | Bemerkungen |
|------|-------|---------|----------------|----------------|------------|---------|----------------------------------|
| AI | 1,2 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0,4–1,0 | kurzperiodisch, schmalbandig |
| AII | 0,9 | 0,38 | 0,5 | 2,0 | 0 | 0,1-1,0 | kurzperiodisch, breitbandig |
| AIII | 1,8 | 0,6 | 0,4 | 0,7 | 0 | 0,4–1,6 | kurzperiodisch, schmalbandig |
| AIV | 1,6 | 0,4 | 0,5 | 2,0 | 0 | 0,1-1,6 | kurzperiodisch, breitbandig |
| В | 25 | 1,2 | 0,5 | 8,0 | 0,25 | 0,1–20 | mittelperiodisch, breitbandig |
| С | 25 | 104 | 1,3 | 0,7 | 0,25 | 10–100 | langperiodisch, breitbandig |

Tabelle 2.1: Geräteparameter von Seismographen in der KAPG

Die breitbandigen Abstimmungen AII und AIV ergeben eine möglichst verzerrungsfreie Aufzeichnung der ersten Einsätze (P-Wellen). Die mittelperiodische B-Charakteristik liefert im teleseismischen Entfernungsbereich Aufzeichnungen, die alle Wellenphasen gut wiedergeben und somit eine Interpretation erleichtern. Während die Standardisierung des WWSSN durch die einheitliche Ausrüstung mit US-amerikanischen Geräten gewährleistet, wurde die Standardisierung im seismologischen Netz der KAPG weitgehend durch die Abstimmung der Geräteparameter erreicht. Zusätzlich wurden an fast allen Stationen der KAPG sowjetische Seismographen des Typs SMK-III (Modifizierter Kirnos-Seismograph) aufgestellt. Im Rahmen der KAPG- Zusammenarbeit wurde beispielsweise die seismische Station Rio Carpintero auf Kuba mit einem langperiodischen Seismographensatz SSJ-1, der im Institut für Bodendynamik und Erdbebenforschung Jena entwickelt und gefertigt wurde, ausgerüstet.

Mit der Entwicklung und dem Einsatz breitbandiger Seismographen wurden in der KAPG darüber hinaus wichtige Impulse für die Entwicklung moderner Seismometer gegeben (Unterreitmeier, 1975; Plesinger, 1973; Teupser & Unterreitmeier, 1977), die dem internationalen Trend entsprachen (s. Wieland & Streckeisen, 1982).

Obwohl in den 80er Jahren versucht, konnten in der KAPG eine koordinierte Modernisierung und die Weiterentwicklung des seismologischen Observatoriumsnetzes zu einem modernen digitalen Stationssystem nicht erreicht werden. Der Hauptgrund ist in der nicht ausreichenden Verfügbarkeit von entsprechender Rechentechnik und im westlichen Embargo zu sehen. Als Folge dessen wurden in den meisten Teilnehmerländern der KAPG eigene, von den Partnern abgekoppelte Anstrengungen zur digitalen seismologischen Datengewinnung unternommen. Ein digitales Netzwerk, das als Gegenstück für entsprechende Entwicklungen im Westen (beispielsweise Digital WWSSN, Geoscope) anzusehen wäre, konnte nicht aufgebaut werden. In der UdSSR wurden im Institut für Physik der Erde in Moskau Entwicklungen der erforderlichen Hard- und Software durchgeführt (Aranovich u. a., 1983). Einige Stationen wurden auf nationaler Ebene aufgebaut. In der DDR wurden mit dem Einsatz eines Prozessrechners PRS 4000 in der Station Moxa bei Jena sowie der Einführung einer digitalen Registrierung im seismologischen Netz des Zentralinstituts für Physik der Erde (ZIPE- bzw. SID-Netz) eine eigenständige Entwicklung betrieben (Bormann u. a., 1983). In Rumänien wurde in den 80er Jahren ein Computer vom Typ PDP 11/34 (DEC) als zentrale seismologische Datenerfassungseinheit eingesetzt (Ionica & Grigore, 1983).

Vergleichbare Technik fand unabhängig davon in Bulgarien Anwendung (Christoskov u. a., 1986). Die Einführung der digitalen seismologischen Datenerfassung erfolgte unabhängig und unkoordiniert in den einzelnen osteuropäischen Ländern. Möglichkeiten für eine gemeinsame Weiterentwicklung der Beobachtungsbasis in den KAPG-Ländern bestanden aufgrund der Nichtverfügbarkeit der erforderlichen Hardware nicht. In der zweiten Hälfte der 80er Jahre wurden jedoch in der KAPG Projekte initiiert, die darauf abzielten, den Austausch der digitalen Daten zwischen den beteiligten Einrichtungen zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen. Diese Projekte erbrachten aber bis zur Auflösung der KAPG keine realen und breit anwendbaren Resultate.

3. Auswertung und Interpretation

In unmittelbarem Zusammenhang mit der Ausrüstung und dem Betrieb der seismologischen Stationen und Observatorien steht die Frage der Datenauswertung und Interpretation. Dieser Problemkreis bildete einen permanenten Bestandteil der Zusammenarbeit im Rahmen der KAPG. In den 60er Jahren wurde insbesondere durch Seminare (in der heutigen Terminologie Workshops) ein Beitrag zur Durchsetzung einer hohen Qualität der Seismogrammauswertung geleistet. Die Auswerteverfahren entsprachen dabei dem Standard der traditionsreichen und entwickelten seismologischen Einrichtungen. Gleichzeitig diente diese Aktivität dazu, ein gewisses Vertrauensverhältnis untereinander zu entwickeln und gemeinsame Forschungen zu initiieren. Einen breiten Raum nahmen dabei Untersuchungen der Laufzeiten seismischer Wellen sowie der Magnituden ein.

Mit dem großregionalen Vergleich der Laufzeitdaten war es möglich, Inhomogenitäten in der tiefen Kruste und im Erdmantel aufzufinden und somit einen Beitrag zu den weltweiten internationalen Projekten (Upper Mantle Project, International Lithosphere Project) zu leisten. Die Untersuchungen zu Laufzeitresiduen wurden für einen großen Teil der Stationen der KAPG bis in die 80er Jahre durchgeführt (Bormann, 1975, Vinnik u. a., 1975). Leider ist es in diesem Zusammenhang nicht zu einer Verallgemeinerung der Ergebnisse in Hinblick auf laterale Inhomogenitäten unter Eurasien gekommen.

Besonders intensiv wurde die Frage der Bestimmung der Magnitude eines seismischen Ereignisses aus den unterschiedlichen Wellenarten untersucht (Arbeitsgruppe 4.2 der KAPG). Begonnen wurde die Kooperation bereits in den 50er Jahren zwischen dem Geophysikalischen Institut in Prag und sowjetischen Seismologen (Vanek u. a., 1962) sowie mit den Seismologen der DDR (Vanek & Stelzner, 1960). Das Problem der Magnitudenbestimmung

besitzt in der Seismologie grundlegende Bedeutung, da die Magnitude eines seismischen Ereignisses ein direktes Maß für dessen Energie darstellt. Andererseits ist aber auch die Magnitude, die anhand unterschiedlicher Wellen bestimmt wurde, ein wesentliches Kriterium zur Diskriminierung zwischen Kernexplosionen und natürlichen Erdbeben. Im Ergebnis mehrjähriger Studien im Rahmen der KAPG-Zusammenarbeit wurde ein homogenes Magnitudensystem entwickelt. Dieses ermöglichte es, den Fehler bei der Magnitudenbestimmung aus verschiedenen Wellentypen, die mit Hilfe unterschiedlicher Geräte an den Hauptstationen der KAPG aufgezeichnet wurden, zu minimieren (Vanek u. a., 1980; Christoskov u. a., 1983). Diese Untersuchungen stimulierten im wesentlichen ähnliche Forschungen in Westeuropa im Rahmen der ESC. Gleichzeitig bildeten diese Arbeiten zur Magnitudenbestimmung eine wichtige Voraussetzung für Untersuchungen der Dämpfung seismischer Wellen.

In der zweiten Hälfte der 60er Jahre fanden insbesondere, angeregt durch Savarenskij und Yanovskaya, Untersuchungen zur Ausbreitung von Oberflächenwellen breite Anwendung. Derartige Untersuchungen wurden in allen KAPG-Ländern durchgeführt.

Die stark experimentell orientierten Forschungen wurden durch eine fruchtbare Entwicklung der Theorie und numerischen Verfahren zur Beschreibung der Wellenausbreitung ergänzt. Zentren der theoretischen Forschung zur Wellenausbreitung bildeten sich in Leningrad und Prag heraus. Ein Meilenstein dieser Entwicklung ist in der Herausarbeitung der Strahlentheorie durch Babich, Molotkov und Cerveny zu sehen (Cerveny u. a., 1977). Die programmtechnische Umsetzung und breite Anwendung dieses sowie weiterer innovativer Verfahren war in den Ländern der KAPG durch den geringen Ausstattungsgrad mit der erforderlichen Rechentechnik jedoch erschwert.

4. Untersuchungen des Erdinnern

Die Forschungskooperation in der KAPG zum Zustand und zur Physik des Erdinnern orientierte sich zu einem beträchtlichen Teil an den Schwerpunkten der weltweiten Forschungsprojekte. In großem Maße wurde versucht, die Erkenntnisse und Ergebnisse der Seismologie zum tiefen Erdinnern mit der Materialphysik, insbesondere mit dem Hochdruckverhalten relevanter Stoffe und Stoffgruppen zu kombinieren. Hierbei entwickelte sich eine enge Kooperation zwischen den Instituten und Laboratorien in Moskau, Kiew, Jena/Potsdam und Prag. Während zunächst die physikalischen Eigenschaften von

Gesteinen unter Druck- und Temperaturbedingungen der Kruste im Vordergrund standen, rückten in der zweiten Hälfte der 70er Jahre Mantelmaterialien in das Zentrum der Forschungen. Ergänzt wurden die experimentellen Untersuchungen durch die Entwicklung von Zustandsgleichungen für den tiefen Erdmantel und Kern (Ullmann & Pankov, 1976). Die Untersuchungen zu Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen in klüftigen Gesteinen (Stiller u. a. 1978) wurden durch modellseismische Untersuchungen in Prag ergänzt und vertieft. Hiermit wurde es möglich, das Verhalten bestimmter Stoffsysteme unter den Bedingungen des Erdinnern im Hinblick auf Phasenübergänge und konvektive Prozesse zu untersuchen.

Aus seismologischer Sicht nahmen in der KAPG Untersuchungen der Mantel- und Kernwellen einen relativ breiten Raum ein (Yanovskaya, 1968; Bormann, 1975; Tittel & Bormann, 1977; Bormann u.a., 1977; Ruprechtova & Karnik, 1971; Kowalle u. a. 1983). Diese Untersuchungen lieferten wesentliche Beiträge zur Klärung der heterogenen Strukturen im Erdinnern sowie zur Verbesserung der Bestimmung der Grunddaten seismischer Ereignisse, insbesondere der Lage des Epizentrums und der Energie (Magnitude) des Bebens. Die Rückkopplung zu den Materialeigenschaften sowie zur Dynamik des Erdinnern wurde im Rahmen dieser Forschungen durch Kooperationsbeziehungen mit Geologen, Tektonikern und Materialphysikern hergestellt.

5. Seismizität und seismische Gefährdung

Die Territorien der Teilnehmerländer an der KAPG sind teilweise durch eine relativ starke Erdbebenaktivität charakterisiert. Fragen der Standortsicherheit und seismischen Gefährdung nahmen, hiervon ausgehend, permanent einen breiten Raum in der Kooperation ein. Da Erdbeben in ihrer Wirkung grenzüberschreitend sind, ist das Erfordernis für eine grenzübergreifende Kooperation gegeben. Bereits im Rahmen der regionalen Zusammenarbeit im IGJ wurde die Notwendigkeit für eine Vereinheitlichung der makroseismischen Skala erkannt. Ausgehend von den seismischen Intensitätsskalen von Mercalli, Cancani und Sieberg sowie den Erfordernissen des modernen Bauens wurde in einer Gemeinschaftsarbeit von Medvedev (Moskau), Sponheuer (Jena) und Karnik (Prag) die makroseismische Intensitätsskala MSK64 entwickelt (Medvedev u.a., 1964). Die Skala wurde für die KAPG und darüber hinaus von einem großen Teil der europäischen Staaten als verbindlich erklärt. Die MSK-Skala erfuhr in den Folgejahren einige Modifikationen und ist dann in den 90er Jahren als wesentlicher Bestandteil in die Europäische Makroseismische Skala EMS-92 bzw. EMS-98 eingeflossen.

In den 70er und 80er Jahren wurde auf der Grundlage der makroseismischen MSK-Skala, der vereinheitlichten Magnitudendenskalen und verbesserter Daten zur Herdortung die Seismizität auf dem Territorium der KAPG-Teilnehmerländer neu bewertet. Hierbei wurden insbesondere für die grenznahen Bereiche zwischen den einzelnen KAPG-Ländern sowie zu den weiteren Nachbarländern umfangreiche Vergleiche und Abstimmungen vorgenom-men. Diese Arbeiten wurden auch durch die verschärften Kriterien für die Standortsicherheit für Industrieobjekte, insbesondere Kernkraftwerke, stimuliert (Karnik u. a., 1983). Entsprechende international zusammengesetzte Arbeitsgruppen arbeiteten über mehrere Jahre intensiv zusammen. In den einzelnen Ländern der KAPG wurden umfangreiche Untersuchungen zur Seismizität auf dem eigenen Territorium durchgeführt und entsprechende Ergebnisse publiziert. Zusammenfassend wurde in der KAPG-Arbeitsgruppe 4.3 ein moderner Erdbebenkatalog für Ost- und Zentraleuropa erarbeitet (Schenkova u. a., 1983). Dieser wurde durch einen Isoseistenatlas für das genannte Territorium untersetzt, der 1978 durch Prochazkova & Karnik herausgegeben wurde. Neben der traditionellen Seismizitätsanalyse wurden moderne Aspekte der Verknüpfung von seismischer Aktivität, Krustenstruktur und Tektonik einbezogen (Bune, 1983). Methodisch wurden Beiträge zur probabilistischen Beschreibung der Bebenaktivität geleistet (Karnik & Schenkova, 1978; Bune & Katrikh, 1978; Schenk & Schenkova, 1978), die Grundlage für die moderne Seismizitätsanalyse darstellen. Die Untersuchung der rezenten Seismizität wurde insbesondere nach dem starken Vrancea-Beben 1977 in den Nachbarländem Rumäniens durchgeführt. Ebenso entwickelte sich eine umfangreiche Zusammenarbeit bei der Bearbeitung der Erdbebendaten im Zusammenhang mit dem Bebenschwarm 1985/86 im Vogtland (Prochazkova, 1986), die bis heute fortbesteht und interessante Ergebnisse bringt.

6. Herdmechanismus und Erdbebenprognose

Die wissenschaftlichen Untersuchungen des Herdvorgangs von Erdbeben bildeten einen festen Bestandteil der Zusammenarbeit im Rahmen der KAPG. Insbesondere im Zusammenhang mit Starkbeben in den KAPG-Ländern wurden diese Forschungen unter Einbeziehung von Kooperationspartnern durchgeführt. Theoretische Untersuchungen zum Herdvorgang erfolgten hauptsächlich in Moskau und Warschau. Ergänzend hierzu wurden Arbeiten in Prag, Bukarest und Potsdam durchgeführt, die insbesondere der Interpretation seismischer Registrierungen dienten und Laboruntersuchungen einbezogen. Die Arbeiten von Kostrov, Teisseyre, Niewiadomski zur theoretischen Be-

handlung des Problems der Rissausbreitung und der damit zusammenhängenden Wellenabstrahlung haben die internationalen Forschungen zum seismischen Herdvorgang nachhaltig beeinflußt. Es wurden die theoretischen Grundlagen für die spätere Entwicklung der Barrieren- bzw. asperity-Modelle für den Herdvorgang geschaffen. Die theoretischen Forschungen wurden durch Laboruntersuchungen mit Hilfe von Ultraschall und der Schlierenoptik experimentell vertieft (Shamina, 1981; Waniek u. a., 1977). Gleichzeitig wurde der Einfluss von Mehrphasensystemen auf den Herdvorgang untersucht. (Stiller u. a., 1977).

In den 80er Jahren rückten insbesondere Forschungen zur Bebenprognose stark in den Vordergrund. Entsprechende Projekte, die eine Integration von Forschungen zum Herdvorgang und Seismizitätsanalyse mit der Untersuchung geophysikalischer Felder darstellten, wurden in der KAPG installiert. Die Ergebnisse dieser Arbeiten erbrachten jedoch insgesamt nicht den erhofften Fortschritt für die Vorhersage von Erdbeben.

7. Ergebnisse der KAPG-Zusammenarbeit

Im Rahmen der Zusammenarbeit in der KAPG wurden die nationalen Forschungen in den osteuropäischen Ländern auf dem Gebiet der Seismologie zumindest in den 60er und 70er Jahren stimuliert und auf ein dem internationalen Niveau entsprechendes Level gehoben. Die Schaffung eines einheitlichen seismologischen Beobachtungsnetzes und die Einführung standardisierter Verfahren der Datengewinnung und -bearbeitung ermöglichten einen unkomplizierten Datenaustausch. In einigen Teilnehmerländern erfuhr somit die Seismologie einen bedeutenden Aufschwung. Teilweise konnten sich über Jahre aktiv kooperierende Arbeitsgruppen mit Wissenschaftlern der KAPG-Teilnehmerländer etablieren. Zwischen einzelnen Einrichtungen und Laboratorien entwickelten sich intensive wissenschaftliche Beziehungen. Jedoch scheiterte ein langfristiger Wissenschaftleraustausch häufig an finanziellen Beschränkungen in Form von Kontingenten für den Austausch. Es ist bezeichnend, dass die wissenschaftlichen Projekte und Programme in der KAPG durch intensive Diskussionen leicht etabliert werden konnten. Lange Diskussionen wurden aber stets um Austauschkontingente geführt, was häufig zu Kürzungen der Vorschläge führte.

Als über die KAPG hinaus wirksam sind die Tagungen der KAPG einzuschätzen. Zu Beginn der Zusammenarbeit in der KAPG dominierten deren Generalversammlungen. In den 70er und 80er Jahren rückten Fachtagungen der einzelnen Disziplinen und Symposien in das Zentrum der Aktivität. In der

zweiten Hälfte der 70er Jahre wurde begonnen, zu den Veranstaltungen der KAPG Gäste aus westlichen Ländern einzuladen. Dies führte dazu, dass in den 80er Jahren zunehmend internationale Tagungen durch die KAPG initiiert und gemeinsam mit anderen wissenschaftlichen Organisationen veranstaltet wurden

Ausgewählte Literatur

- ARANOVICH, Z.I., KORCHAGINA, O.A. & TOBIAS, V. (1968): A Proposition of the standardization of the amplitude characteristics of short-period highly sensitive seismographs. Studia geophys. geod. 12, 38–49.
- ARANOVICH, Z.I., NEGREBECKIY, S.A., SEROVA, O.A., CEJSHVLI, G.D., LOMTATIDZE, L.F., ALSHIBAYA, A.K., KOFNER, A.L. & STEPANEC, Yu.V. (1983): Mehrkanaliger digitaler Messkomplex zur Aufzeichnung seismologischer Daten in einem weiten Frequenz- und Dynamikbereich (Russisch). Veröff. Zentralinst. Phys. d. Erde 78, 13–19.
- BORMANN, P. (1975): P-wave residuals and their dependence on station conditions. Proc. XIV. Gen. Ass. ESC, Trieste, 27–40.
- BORMANN, P. (1975): Untersuchung der Laufzeitresiduen von P-Wellen-Auswertungen für 50 Stationen des seismologischen Weltnetzes. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. 93, 123–138.
- BORMANN, P., KOWALLE, G. & TITTEL, B. (1977): Investigation of core phases recorded at seismic stations of the GDR and CSSR. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. A-6 (117), 113–124.
- BORMANN, P., HURTIG, E., KOWALLE, G. & TEUPSER, CH. (1983): The system for acquisition and processing seismological data in the GDR. Veröff. Zentralinst. Phys. d. Erde 78, 20–32.
- BUNE, V.L. & KATRIKH, I.R. (1978): Data on probability of earthquakes on the map of seismic zoning. Proc. Symp. Analysis of seismicity and seismic risk, Liblice, Prague, 279–294.
- BUNE, V.L. (1983): The methodology for mapping regional seismic zones. Proc. Meeting Working Group 4.3 KAPG, 95–104.
- CERVENY, V., MOLOTKOV, L.A., PSENCIK, I. (1977): Ray method in seismology. Univer. Karlova Praha, 214 S.
- CHRISTOSKOV, L., LEVY, E. & SOLAKOV, D. (1986): Real time and background data processing in the Bulgarian seismological network. Proc. XX. Gen. Assembly ESC, Kiel, 65–73.
- CHRISTOSKOV, L., KONDORSKAYA, N.V. & VANEK, J. (1983): Earthquake magnitude in seismological practice: PH, S and L waves. Roz. Ceskoslov. Akad. Ved. 93, 113 S. DMOWSKA, R. & KOSTROV, B.V. (1973): A shearing crack in a semispace under strain conditions. Archiv. Mech. 25,3.

- HURTIG, E. & STILLER, H. (1984): Erdbeben und Erdbebengefährdung. Akademie-Verlag Berlin, 328 S.
- IONICA, F. & GRIGORE, A. (1983): Seismic data transmission in Romanian network. Veröff. Zentralinst. Phys. d. Erde 78, 84.
- KARNIK, V. & SCHENKOVA, Z. (1978): The third asymptotic distribution in earth-quake statistics. Proc. Symp. Analysis of seismicity and seismic risk. Liblice, Prague, 335–350.
- KOSTROV, B.V. (1970): Theorie des Herdvorgangs tektonischer Erdbeben (Russ.). Izv. AN SSSR, Ser. Fiz. Zemli 4, 84–101.
- KOSTROV, B.V. (1975): Herdmechanik eines tektonischen Erdbebens (Russ.). Moskau, Nauka.
- KOWALLE, G., TITTEL, B. & BORMANN, P. (1983): Determination of a magnitude calibration function using short-period readings of PKP. Tectonophys. 93, 289–294.
- MEDVEDEV, S.V., SPONREUER, W. & KARNIK, V. (1965): Seismic intensity scale. Version MSK 1964. Soviet Geoph. Comm., (Russ. & Engl.) 11 S.
- NIEWIADOMSLI, J. (1975): Analysis of crack stresses and its application to problems of orogen mechanics. Publ. Inst. Geophys. Polish Academ.Sci. 5, 80 S.
- PLESINGER, A. (1973): Synthesis of feedback controlled broadband modifications of conventional seismograph systems. Z. Geophys. 39, 573–596.
- PROCHAZKOVA, D. & KARNIK, V. (Ed.) (1 978): Atlas of isoseismal maps. Central and Eastern Europe. Prague, 128 S.
- PROCHAZKOVA, D. (Ed.) (1986): Earthquake swarm 1985/86 in Western Bohemia. Proc. Workshop Marianske Lazne.
- RUPRECHTOVA, L. & KARNIK, V. (1971): Core waves recorded in Central Europe. Studia geoph. geod. 15, 299–315.
- SAVARENSKIJ, E.F, SOLOV'EV, S.L. & SHEBALIN, N.V. (1962): Standardisierung der Magnitudenskala (Russisch). Izv. ANSSSR, ser. geofiz. no. 2, 153–158.
- SCHENKOVA, Z., KARNIK, V. & SCHENK, V. (1983): Earthquake catalogue and maps of epicentres. Proc. Meeting Working Group 4.3 KAPG, 9–18.
- SCHIENK, V. & SCHENKOVA, Z. (1978): Model of earthquake occurrence and its autocorrelation function in the prediction of seismic activity. Proc. Symp. Analysis of seismicity and seismic risk. Liblice, Prague, 359–373.
- SHAMINA, O.G., PAVLOV, A.A., KOZAK, J. & WANIEK L. (1977): Laboratory study on seismoactive faults. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. A6 (117).
- SHAMINA, O.G. (1981): Modelluntersuchungen der Physik des Erdbebenherdes (Russ.). Moskau, Nauka.
- STILLER, H., WAGNER, F.C. & VOLLSTÄDT, H. (1977): A two-phase model for the description of the influence of cracks on the P- and S-wave velocities in dry and saturated rock samples. Tectonophys. 43.

STILLER, H., WAGNER, F.C. & VOLLSTÄDT, H. (1978): Die Geschwindigkeiten elastischer Wellen im klüftigen Gestein und in Erdbebengebieten. Veröff. NKGG, Reihe III, Heft 39, 87–89.

- TEISSEYRE, R. (1970): Crack formation and energy release caused by the concentration of dislocation along fault planes. Tectonophysics, 9.
- TEUPSER, CH. & UNTERREITMEIER, E. (1977): Der elektronische Dreikompenentenseismograph EDS 1, Theorie, Aufbau und Wirkungsweise. Veröff. Zentralinst. Phys. d. Erde 51, 114 S.
- TITTEL, B. & BORMANN, P. (1977): A study of longitudinal Earth core phases at Moxa and Collm stations. Geophys. Prosp. D series, 10, 315–325.
- TOBIAS, V. (1973): Partial and calibration constants of electromagnetic seismographs with standard type A characteristics. Geopfys. Sbornik 21, 267–286.
- TOBIAS, V. (1976): Constants of standarad intermediate-period electromagnetic seismographs. Geofys. Sbornik 24, 211–230.
- ULLMANN, W. & PANKOV, V.L (1976): A new structure of the equation of state and its application in high-pressure physics and geophysics. Veröff. Zentralinst. Phys. d. Erde 41, 201 S.
- UNTERREITMEIER, E. (1975): Hochverstärkender langperiodischer elektronischer Seismograph an der Station Moxa. Veröff Zentralinst. Phys. d. Erde 31/2, 495–503.
- VANEK, J., KONDORSKAYA, N.V. & CHRISTOSKOV, L. (1980): Earthquake magnitude in seismological practice: PV and PVs waves. Bolg. Akad. Nauk, 263 S.
- VANEK, J., KARNIK, V., ZATOPEK, A., KONDORSKAYA, N.V., RIZNICHEN-KO, Yu.V., VANEK, J. & STELZNER, J. (1960): Einheitliche Bestimmung von Erdbebenmagnituden für mitteleuropäische Stationen. Geofyz. Sbornik, 136, 299–399.
- VANEK, J., STELZNER, J. (1960): The problem of magnitude calibrating functions for body waves. Annali di Geof. 13, 393–407.
- VINNIK L.P., LUKK, A.A. & LENARTOVICH, E. (1975): Lateral inhomogeneities in the uppermost mantle and tectonics of the Pamirs, Hindu Kush and of the Carpatians. Proc. XIV. Gen. Ass. ESC, Trieste, 427–432.
- WANIEK, L., KOZAK, J., SHAMINA, O.G. & PAVLOV, A.A. (1977): Schlieren observations of P-waves in models simulating zones of randomnly distributed cracks. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. A6 (117).
- WIELAND, E. & STRECKEISEN, G. (1982): The leaf-spring seismometer. Design and performance. Bull. Seis. Soc. Am. 72, 2346–2367.
- YANOVSKAYA, T.B. (1968): Some data on seismic waves through the Earth's core. J. Geophys. Earth. 16, 37–43.

Im wissenschaftlichen Kolloquium der Leibniz-Sozietät am 2. Oktober 2003 anläßlich des 75. Geburtstages von Hans-Jürgen Treder hielt Prof. Dr. Fritz Gackstatter vom I. Mathematischen Institut der Freien Universität Berlin einen Kurzvortrag zum Thema "Separation von Raum und Zeit beim eingeschränkten Dreikörperproblem mit Anwendung bei den Resonanzphänomenen im Saturnring und Planetoidengürtel". Der Vortrag wurde veröffentlicht im Band 61 der "Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät" (Jahrgang 2003, Heft 5), S. 95–98. Er war ein Auszug aus einer umfangreichen Arbeit des Autors, die in englischer Sprache im Verlag Chemie Weinheim veröffentlicht werden soll.

Fritz Gackstatter hat das vollständige Manuskript dieser Arbeit im Februar 2004 vorab der Leibniz-Sozietät zur Verfügung gestellt. Ich habe es der Klasse Naturwissenschaften in ihrer Sitzung am 16. Februar 2004 als wissenschaftliche Mitteilung vorgelegt.

Fritz Gackstatter

Separation of the Restricted 3-Body Problem in Kepler's Sense with Applications to Moon Theory, Resonance Phenomena and Gravitational Wayes

Inhaltsübersicht:

Introduction: Ideas, Methods, some Results and Historical Background

Book I. The Motion of the Moons in the Solar System (Part I)

Chapter 1. The Motion of our Moon

Chapter 2. Harmonic and Musical Theorem and the Fraction 14/15 – Addendum to Kepler's *Harmonices Mundi*

Chapter 3. From Harmonic Theorem to the First Law of the Moon Theory, via Harmonic Means to Mean Distance and to the Parameters of the Anomalies Chapter 4. General Laws on the Periods of Revolution in the Moon Theory

Book II. Separation of the Restricted 3-Body Problem in Kepler's Sense with Methods of Differential Geometry

Chapter 5. The First Law of the Restricted 3-Body Problem: the Geodesic Equation

128 Fritz Gackstatter

Chapter 6. Three Laws of Kepler Type for the Restricted 3-Body Problem by Separation of Space and Time

Addendum 1. Restricted 3-Body Problem and Snellius' Refraction Law

Addendum 2. Geodesic Equation and Numerical Analysis

Addendum 3. Trojans, Stationary Satellites and the Implicit Form (I_3) of the First Law

Book I. The Motion of the Moons in the Solar System (Part II)

Chapter 7. The Fundamental Lemma of the Moon Theory: the Fourier Approximation of the Geodesic Equation

Chapter 8. The Laws on Variation, Evection and Revolution of Apsides in the Moon Theory

Chapter 9. The Third Law of the Moon Theory

Book III. Resonance Phenomena in the Ring of Saturn and in the Belt of Asteriods

Chapter 10. Saturn Ring and Asteroids (Part I): Explanation of the Phenomena in the Neighbourhood of the Resonance Orbits by means of Linear Systems coming from the Geodesic Equation; Singularities and Formulas of Variation

Chapter 11. Saturn Rings and Asteroids (Part II): Explanation of the Resonance Orbit Phenomena by means of Algebraic Systems coming from the Geodesic Equation; Apsides Conditions and Degrees of Freedom

Addenda. Further Resonance Phenomena in the Solar System

Addendum 4. Two Ellipse Problems observed in the Cassini Gap

Addendum 5. Ring E of Saturn; Mathematical Order of the Phenomena with q>1 by using the Reflection Principle; Retrograde Motions

Addendum 6. Space Probes in the Graviational Systems Earth-Moon and Mars-Phobos-Deimos

Addendum 7. Ring Systems

Addendum 8. Anomalies

Addendum 9. Atomic and Molecular Models

Book IV. Potential Waves of Newtonian Physics and the Restricted 3-Body Problem

Chapter 12. Restricted 3-Body Problem with Distance Property (D^G)

Chapter 13. The Variation Effect in the System Saturn-Titan

Chapter 14. Potential Waves with Variation and Retardation Effect

Book V. Gravitational Waves of Einstein's Theory and the Relativistic 2-Body Problem

Chapter 15. Earth-Moon-Satellite and the Variation and Retardation Effect Chapter 16. Terrestrial Experiments to prove the Existence of Gravitational Waves

Chapter 17. On the 2-Body Problem of Einstein's Theory of Relativity

Zum Inhalt sei in aller Kürze folgendes gesagt: Gackstatter befaßt sich in seiner Arbeit mit klassischen Fragen der Himmelsmechanik, die schon im Rahmen der Newtonschen Mechanik nicht mehr eindeutig lösbar sind, bei denen durch Störungsrechnungen jedoch praktisch brauchbare Lösungen erreicht werden können. An erster Stelle steht dabei das sog. eingeschränkte Dreikörperproblem, bei dem der dritte Körper sehr klein ist. Bei seinen Untersuchungen geht er von der Idee aus, in den Gleichungen die Parameter Raum und Zeit zu separieren. Er wendet dabei Methoden der Differentialgeometrie an. Dadurch kann er die Probleme mit divergenten Reihen umgehen, und es gelingt ihm, das klassische Problem der kleinen Divisoren zu eliminieren. Mit seinen mathematischen Ergebnissen und den Methoden der Mondtheorie kann er die Resonanzphänomene im Sonnensystem physikalisch erklären.

Im letzten Drittel seines Arbeit nutzt Gackstatter die von ihm entwickelte Theorie zu Betrachtungen zum Nachweis von Gravitationswellen mit Hilfe von kleinen Satelliten im System Erde-Mond. Sehr interessant sind auch seine Vorschläge zur Vereinfachung der numerischen Experimente zum Langzeitverhalten des eingeschränkten Dreikörperproblems.

Die Arbeit stellt beträchtliche Ansprüche an die mathematischen Fähigkeiten des Lesers. Sie ist aber didaktisch sehr gut aufgebaut, so daß die Gedankenführung und die Ergebnisse auch vom Nichtmathematiker erfaßt werden können. Als mathematischer Geophysiker mit Interesse an den verwickelten Bewegungen der großen und kleinen Körper in unserem Sonnensystems habe ich die Arbeit mit großem Vergnügen gelesen und dabei viele neue Einsichten gewonnen.

Heinz Kautzleben

Laudatio anläßlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. habil. Heinz Kautzleben

Heinz Kautzleben ist seit Abschluß des Geophysik-Studiums in Leipzig 1957 wissenschaftlich und wissenschaftsorganisatorisch aktiv. Bis Mitte 1991 lag sein Tätigkeitsfeld vor allem in Instituten der Akademie der Wissenschaften der DDR. Dabei war er von 1973 bis 1988 Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde und von 1989 bis 1991 Direktor des Instituts für Kosmosforschung.

Nach der Wende befaßte sich Heinz Kautzleben vor allem mit der Methodologie und dem philosophischen Hintergrund des Fachgebiets Geophysik als Teil der Geo-Kosmoswissenschaften. In der Leibniz-Sozietät wirkt Heinz Kautzleben aktiv – wie immer – als Sprecher des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften und als Geschäftsführer der Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät.

Von internationaler Ausstrahlung waren seine Potentialfeldberechnungen des geomagnetischen Hauptfeldes im Außenraum und dessen säkulare Änderungen, auch mit Konsequenzen für die geomagnetische Landesvermessung und für die Bedeutung des globalen Schwerefeldes, das als dynamisches System zu behandeln ist. Seine Arbeiten führten mit zu neuartigen wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Herstellung überregionaler geomagnetischer Karten, die z.B. für das internationale Projekt "World Magnetic Survey" einen vielbeachteten Beitrag darstellten. Aus diesen Arbeiten ergab sich seine Zuwendung zur Geodäsie und Satellitengeodäsie, was letztlich zu einer verantwortungsreichen Arbeit innerhalb der IUGG bzw. der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG, Vizepräsident 1987–1991) und der "Multilateralen Zusammenarbeit der Akademien der sozialistischen Länder für planetare geophysikalische Forschungen" (KAPG, stellv. Vorsitzender 1978–1991) geführt hat.

In seinen wissenschaftlichen Aktivitäten und in allen ihm anvertrauten Verantwortungsbereichen wurde sein Anliegen der Entwicklung einer fundierten theoretischen Basis der Forschung deutlich. In der Fernerkundung mit aerokosmischen Mitteln drängte er auch im Interkosmos-Verband auf die

Entwicklung der Interpretationstheorie. Unter seiner Leitung ist die Fernerkundung als Forschungsrichtung in der DDR begründet und zu internationaler Anerkennung geführt worden.

Heinz Kautzleben förderte verschiedene Fachdisziplinen, die zum Verständnis der Entwicklung und des Verhaltens der Erdkruste eine Voraussetzung darstellen, wie die Hochdruckforschung, Seismologie, Seismik und Satellitengeodäsie, und unterstützte die Entwicklung der Forschungstätigkeit in der Geologie und Geochemie. Er war in vielen geowissenschaftlich orientierten Gremien aktiv. Seine Eignung zur Entwicklung fundierter theoretischer Grundlagen steht in engem Zusammenhang mit seinem Vermögen, vorausblickend Forschungsrichtungen zu fördern, die zukünftigen Lösungen bestehender Probleme der wissenschaftlichen Praxis dienen könnten. Er war aufgrund dieser Haltung ein Forschungsleiter, der immer wieder neue Anstöße gab.

Das Zentralinstitut für Physik der Erde war nicht nur nominell ein multidisziplinäres Wissenschaftszentrum, unter seiner Leitung arbeitete es auch tatsächlich und sehr konkret interdisziplinär zu Fragen der Physik der Erde, mit weitreichenden Konsequenzen für Fragen der Praxis, für die oberste Schicht der Erde, den Lebensraum des Menschen und seine Gefährdung. Das betrifft nicht nur die Antarktis, sondern auch die Fernerkundung und Tiefenseismik, die Erkundung der Erdkruste von "oben" und "unten".

Die Antarktisforschung der DDR ist durch Heinz Kautzleben zu internationaler Bedeutung geführt worden, wobei er es verstanden hat, verschiedene wissenschaftliche und wissenschaftlich-technische Disziplinen zusammenzuführen.

Seine Beziehung zu den Hochschulen bestand vor allem in der Vorlesungstätigkeit (Theoretische Physik für Geophysiker und Meteorologen sowie Physik der Erde) in Berlin und Leipzig, des weiteren in konzeptioneller und kooperativer Arbeit für die einschlägigen Ministerien zur Förderung von Forschung und Ausbildung. Seit 1969 hat er zahlreiche Promotionen und Habilitationen betreut.

International war Heinz Kautzleben aktiv besonders in der IAG, der KAPG und bei Interkosmos (Mitglied des Koordinierungskomitees seit 1984 und des Wissenschaftlichen Beirates von IK seit 1974). Die von ihm initiierten IAG-Symposien "Geodäsie und Physik der Erde" ermöglichten Ost-West-Begegnungen auch in der Zeit der eingeschränkten Reisetätigkeit.

Heinz Kautzleben hat über 150 wissenschaftliche Publikationen verfaßt und sein Wissen in mehreren hundert Vorträgen weitergegeben.

Seine Persönlichkeit ist von Objektivität, Zurückhaltung und analytischer Genauigkeit geprägt und von der Fähigkeit, eigene Arbeiten und die eigene Leitungstätigkeit zu hinterfragen. Menschliche Bescheidenheit, die den Gedanken anderer Raum gibt, befähigte ihn, die Abteilungsleiter und Mitarbeiter des ZIPE zu interdisziplinärer Kooperation zu motivieren. Er konnte im wissenschaftlichen Institutsleben nicht nur zuhören, seine Fragen trafen stets den Kern des Problems, und er scheute nicht, sich auch mit den Mitarbeitern zu beraten. So bestand ein der Forschung dienliches Klima im Institut unter seiner Leitung.

Für die Qualität seiner Arbeit spricht die Tatsache, daß zahlreiche seiner ehemaligen Schüler bis heute in wissenschaftlichen Einrichtungen tätig sind, vielfach bei thematischer Weiterentwicklung ihrer Arbeiten in der Vorwendezeit.

Man darf Heinz Kautzleben noch viele produktive Jahre wünschen.

Peter Bankwitz

Dank für die Glückwünsche und die Laudatio

Herr Präsident, Herr Vorsitzender, Kolleginnen und Kollegen der Leibniz-Sozietät, lieber Peter Bankwitz!

Ich danke Ihnen sehr für die Grüße und Glückwünsche zu meinem Geburtstag. Ich möchte diese Gelegenheit auch dazu nutzen, Ihnen für die vieljährige kollegiale Zusammenarbeit zu danken, die Sie mir gewährt haben. Vor allem danke ich Dir, lieber Peter, für die vielen lobenden Worte, die Du für mich gefunden hast. Einige Kritik hätte ich aber auch vertragen.

Ich verstehe die Laudatio als Aufforderung, mich zusammen zu reißen und nach bestem Vermögen für die Wissenschaft und für die Leibniz-Sozietät weiter tätig zu sein.

Was könnte ich anbieten? Gewiß keine Spezialforschungen mehr – das verstehen und können die Jüngeren viel besser. Einbringen könnte ich die Erfahrungen und Erkenntnisse – soweit sie heute überhaupt noch gefragt sind – aus meinem fast fünfzig Jahren Forschungstätigkeit (auf mehreren Gebieten, originell und nacharbeitend, um den Fortschritt erkennen und nutzen zu können).

Ich glaube, daß es sich lohnen würde, in unserer Sozietät einmal darüber zu diskutieren, was die Erfahrungen und Erkenntnisse aus früheren Zeiten für die Gegenwart und die Zukunft wert sind.

Vor wenigen Wochen fand in Berlin die diesjährige Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft statt. Im Pressegespräch am Rande dieser Tagung beklagte sich der amtierende Präsident der DGG darüber, daß die Geophysik gegenwärtig von der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen wird. Tatsächlich besteht in dieser Hinsicht ein großer Unterschied zu der Zeit, in der ich meine wissenschaftliche Laufbahn begann. Das war 1957, zu Beginn des Internationalen Geophysikalischen Jahres, an dessen Anfang als Paukenschlag der Start von Sputnik 1 erfolgte. Die damaligen Ereignisse haben meine Sicht auf die Geophysik und die Wissenschaft generell geprägt. Es hat einige Zeit gedauert, bis ich verstanden habe, was damals geschah und eingeleitet wurde.

Das Internationale Geophysikalische Jahr war eine großartige weltweite Aktion, in der Zeit des "kalten Krieges" die Kräfte aller Nationen zusammenzuführen, um herangereifte grundlegende wissenschaftliche Probleme, die nur gemeinsam gelöst werden können, auch gemeinsam zu lösen. Es gelang sogar, Mittel des "Kalten Krieges" für die Wissenschaft einzusetzen. Innerhalb von zwei, drei Jahrzehnten wurde dann auf diese Weise ein so großer wissenschaftlicher Fortschritt erreicht, daß noch heute durch vertiefende Forschungen an der Sicherung und Stabilisierung des damaligen "großen Sprunges" als Grundlage für die gesellschaftliche Nutzung gearbeitet wird. Der im IGJ eingeleitete Fortschritt betraf vor allem die Kenntnis des Raumes um die Erde und den Einfluß der Sonne auf die Erde.

Nur wenige Jahre später setzten auch die Forscher auf dem Gebiet der festen Erde in analoger Weise zu einem ähnlich "großen Sprung" an. Auch sie erreichten innerhalb von zwei, drei Jahrzehnten einen derart großen wissenschaftlichen Fortschritt mit vergleichbaren Folgen für die Wissenschaft und die gesellschaftliche Nutzung. Das neue Paradigma, wie die Wissenschaftstheoretiker sagen, heißt "Plattentektonik". Viele Außenstehende meinen, daß damit die Grundfragen der geologischen Wissenschaften gelöst sind.

Tatsächlich ist es sehr viel schwieriger geworden, der breiten Öffentlichkeit verständlich zu machen, daß auch künftig die Forschungen auf dem Gebiet der Geowissenschaften lebensnotwendig sind. Daß die Öffentlichkeit in Deutschland und im "politischen Europa" heute weniger an den Geowissenschaften interessiert ist, hat seine Ursache aber nicht nur im gegenwärtigen hohen Wissensstand, sondern vor allem im derzeitigen weltweiten Überangebot an billigen mineralischen Rohstoffen – dem Ergebnis der forcierten Lagerstättenerkundung nach der Energie- und Rohstoffkrise in den siebziger Jahren.

Ganz anders ist die Situation bei der dritten großen Fragestellung, mit der sich die Geo- und Kosmoswissenschaften befassen: der Mensch-Umwelt-Problematik. Den Entwicklungsstand dabei kann man so beschreiben: Das Problembewußtsein wurde in den letzten drei, vier Jahrzehnten geweckt. Von wissenschaftlich begründeten Lösungen sind wir aber noch weit entfernt. Auch hier wird versucht, international zielstrebig zusammenzuarbeiten. Ich verweise nur auf das Umweltprogramm der Vereinten Nationen und das Projekt Geosphäre-Biosphäre des ICSU, des Internationalen Rates der Wissenschaftlichen Unionen.

Erst in den letzten Jahren ist mir bewußt geworden, daß die Naturforschung mit der Hinwendung zur Mensch-Umwelt-Problematik wieder bei

Fragestellungen angelangt ist, die sie im 17., 18. Jahrhundert verlassen hat. Man kann diese am besten mit der Formel "die Einheit der Natur" umreißen. In jener Zeit begann die Ausbildung der neuzeitlichen Naturwissenschaft mit dem expliziten Ziel, die "Natur" mit Hilfe von Wissenschaft und Technik schrittweise mehr zu beherrschen. Dabei versucht der Mensch sich aus dem einheitlichen Verbund der Natur zu lösen, sich über die (übrige) Natur zu erheben. Die Wissenschaft schuf sich dafür einen neuen, eingeschränkten, pragmatischen Naturbegriff. Anscheinend führt uns dieses Herangehen zunehmend in Schwierigkeiten.

Die erneute Hinwendung zur Mensch-Umwelt-Problematik erfordert eine Neudefinition der Geo- und Kosmoswissenschaften, mit Folgerungen für die Zielstellungen, die von diesen Disziplinen zu verfolgen sind. Ich habe dazu in letzter Zeit einige Male vorgetragen. Zuletzt in der Plenarsitzung unserer Sozietät zum 200. Geburtstag von Immanuel Kant. Die Definition, die ich jetzt bevorzuge, lautet: "Die Geo- und Kosmoswissenschaften untersuchen den engeren und weiteren Lebensraum der Menschheit." Meinem engeren Fachgebiet, der Geophysik, weise ich dabei die Aufgabe zu, in Form von in sich widerspruchsfreien (physikalischen) Modellen das Gerüst für die weiterführenden Forschungen zu schaffen.

Ich hoffe, daß diese Arbeitshypothese ein "roter Faden" für meine weitere Tätigkeit in der Leibniz-Sozietät werden kann. Und ich rechne dabei auf kritische Diskussionen, wie ich sie in der Vergangenheit führen durfte.

Ich danke Ihnen sehr für Ihre Aufmerksamkeit.

Heinz Kautzleben