

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR

Forschungsbereich Kosmische Physik

ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde

Nr. 29

Aufgaben und Ergebnisse
der Forschungsarbeiten des Zentralinstituts
für Physik der Erde

Herausgegeben aus Anlaß des 25. Jahrestages der Gründung der
Deutschen Demokratischen Republik

von H. Kautzleben

Als Manuskript gedruckt

Potsdam 1974

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|--|--------------|
| KAUTZLEBEN, H., Aufgaben und Ergebnisse der Forschungsarbeiten im Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR | 5 |
| FRÖLICH, F., Neue Aspekte zum Geodynamics Project aus hochdruck-festkörperphysikalischer und planetarer Sicht | 21 |
| VOLLSTÄDT, H.; SEIPOLD, U., Beiträge zum stofflichen Zustand des Erdinnern aus physikalischen Messungen unter extremen p,T-Bedingungen | 33 |
| NEUNHÖFER, H.; GÜTH, D.; MALISCHEWSKY, P., Untersuchung seismischer Oberflächenwellen im Hinblick auf Beziehungen zur Geodynamik | 45 |
| MURTIG, E.; WIRTH, H., Über Beziehungen zwischen geothermischen und gravimetrischen Anomalien | 57 |
| SCHWAB, G.; TESCHKE, H.-J., Mobilisierung und Kratonisierung von Senkungsstrukturen. Ein Beitrag zur Mächtigkeitanalyse des Deckgebirges in Europa | 71 |
| STANGE, L., Konsequenzen der geodätischen Nutzung von Laserbeobachtungen künstlicher Erdsatelliten | 85 |
| ELSTNER, CL.; HÖPFNER, J., Betrachtungen zum Nachweis von Gezeiteneffekten in geodätisch-astronomischen Breitenbestimmungen | 95 |
| TEUPSER, CH.; UNTERREITMEIER, E., Zur Verbesserung des Einsatzes von oberflächennahen Strainseismographen am Beispiel der Station Moxa | 109 |
| FISCHER, H.; NEUBERT, R.; SELKE, CH.; STECHER, R., Erweiterung der Satellitenkamera SBG zur Laserentfernungsmessung | 125 |
| SCHÜLER, R., Untersuchungen zur Ermittlung und Elimination des Refraktionseinflusses bei Interferenzlängenmessungen im freien Gelände mit Hilfe der Luftdispersion | 137 |
| AUSTER, V.; LENGNING, K.; LENNERS, D.; SCHMIDT, H., Aussagen zur Einführung neuer Beobachtungs- und Auswertemethoden im geomagnetischen Beobachtungsbetrieb | 147 |
| SCHNEIDER, M.M., Geodätische und gravimetrische Forschungen in der Antarktis | 161 |

Aufgaben und Ergebnisse der Forschungsarbeiten
im Zentralinstitut für Physik der Erde
der Akademie der Wissenschaften der DDR

von

HEINZ KAUTZLEBEN

Zusammenfassung

Das Zentralinstitut für Physik der Erde wurde 1969 durch Vereinigung vier bis dahin selbständiger Akademieinstitute für Geodäsie, Geodynamik, Geomagnetismus und Geotektonik gebildet. Die Forschungsarbeiten reichen einerseits von Beiträgen zur höheren Geodäsie über Untersuchungen zur Seismologie und geophysikalischen Festkörperforschung bis zu ausgewählten Problemen der Physik und Chemie des Mondes und der Planeten und andererseits von Arbeiten zur physikalischen Struktur und Dynamik der Lithosphäre, besonders der Erdkruste, bis zu strukturgeologischen und geotektonischen Untersuchungen. Die Forschungen werden in wachsendem Maße geprägt durch die Zielstellungen des internationalen Geodynamik-Projektes und bestimmt durch die Anforderungen der sozialistischen Gesellschaft hinsichtlich des wissenschaftlichen Vorlaufs und spezieller wissenschaftlicher Dienstleistungen. Die Arbeit gibt eine Übersicht über die wichtigsten Entwicklungen und Forschungsergebnisse aus dem letzten Jahrzehnt.

Summary

The Central Earth Physics Institute was formed in 1969 by the union of four institutions, independent until this time, for geodesy, geodynamics, geomagnetism and geotectonics. The scientific field extends, on the one hand, from contributions concerning geodesy and investigations on seismology as well as geophysical solid state physics to selected problems of physics and chemistry of the Moon and planets and, on the other hand, from contributions relating to structure and dynamics of the lithosphere, especially the Earth's crust, to structural geological and geotectonic investigations. At a growing extent the investigations are stamped by the objectives of the Geodynamics Project and are determined by the requirements of the socialist society with regard to scientific advance and selected scientific service. This paper gives a review on the most important developments and results obtained in the past decade.

Резюме

Центральный институт физики Земли был создан в 1969 году путем объединения четырёх до этого самостоятельных институтов: геодезии, геодинамики, геомагнетизма и геотектоники. Диапазон исследований охватывает с одной стороны проблемы высшей геодезии и сейсмологии, исследования физики и химии Луны и планет, а с другой стороны также работы по физической структуре и динамике литосферы, особенно земной коры, структурно-геологические и геотектонические исследования. Направления исследований всё в большей степени носят отпечаток целей международного проекта по геодинاميке и определяются требованиями социалистического общества относительно предварительных научных разработок и специальных научных услуг. Настоящая работа даёт обзор о важнейших развитиях и результатах исследований последнего десятилетия.

1. Einleitung

Das Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR (ZIPE) wurde mit Wirkung vom 1. Februar 1969 gebildet. Seine Schaffung erfolgte im Rahmen der Akademie- und Hochschulreform und ist sichtbarer Ausdruck der zielstrebigen Wissenschaftspolitik, die von der Partei- und Staatsführung der DDR während der nunmehr 25 Jahre umfassenden Existenz der DDR konzipiert und durchgesetzt wurde. Mit der Gründung des ZIPE wurde eine neue Etappe in der Entwicklung der geowissenschaftlichen Forschung, insbesondere der Forschungen auf dem Gebiet Physik des Erdkörpers, innerhalb der AdW der DDR eingeleitet. Durch Vereinigung der bis dahin selbständigen Akademieinstitute für Geodynamik, für Geodäsie, für Geomagnetismus und für Geotektonik wurden wesentlich bessere Möglichkeiten für komplexe, inter- und multidisziplinäre Forschungen auf diesem Gebiet sowie gleichzeitig für die stärkere Profilierung und Vertiefung der verschiedenen im ZIPE vereinigten geowissenschaftlichen Disziplinen geschaffen. Mit dem Zentralinstitut entstand ein leistungsfähiges Zentrum der geowissenschaftlichen Grundlagenforschung in der Deutschen Demokratischen Republik, das sehr bald auch die Leitung und Koordinierung der weiteren Forschungsarbeiten übernehmen konnte, die in der DDR, insbesondere im Bereich des Hochschulwesens, auf diesen und angrenzenden Gebieten durchgeführt werden. Die Bildung des ZIPE führte schließlich auch zu besseren Möglichkeiten und höheren Leistungen in der Kooperation mit den Forschungseinrichtungen der mit der DDR befreundeten sozialistischen Länder, in den Beziehungen zu Forschungsstellen weiterer Länder sowie der Mitarbeit in den internationalen Organisationen auf den vom ZIPE vertretenen bzw. betreuten Wissenschaftsgebieten.

Die Mitarbeiter und die Leitung des Zentralinstitutes betrachten es als ihre prinzipielle Aufgabe, das Wissen über den Erdkörper, über das die Menschheit bereits verfügt und das laufend durch Forschungsarbeiten in aller Welt erweitert wird, im notwendigen Umfang zu erfassen und bereitzustellen und darüber hinaus diesen Wissensschatz durch eigene spezielle Forschungsarbeiten über Probleme zu ergänzen, die für das Zentralinstitut besonders bedeutsam sind. Diese Relevanz wird dabei bestimmt durch die im Zentralinstitut bereits vorhandenen Kenntnisse, Erfahrungen und Ausrüstungen, durch die im Verlauf der bisherigen Entwicklung erreichte Einordnung der Arbeitsrichtungen des Institutes in die Zusammenarbeit im innerstaatlichen und internationalen Rahmen, vor allem aber durch die Anforderungen der sozialistischen Gesellschaft hinsichtlich des wissenschaftlichen Vorlaufs und spezieller wissenschaftlicher Dienstleistungen.

Im Zentralinstitut für Physik der Erde sind als geowissenschaftliche Fachrichtungen vertreten: Geodäsie und Gravimetrie, Seismologie, geophysikalische Festkörperforschung, Geotektonik und Tektonophysik, Geomagnetismus. Als Forschungsobjekte werden bearbeitet: sowohl der Erdkörper in seiner Gesamtheit wie auch der Bereich der Erdkruste (und der darunterliegenden Teile des Erdinneren), der für die Verhältnisse in der DDR von besonderer Bedeutung ist. Die einzelnen Forschungsaufgaben lassen sich dabei in Projekten und Themenkomplexen zusammenfassen, die im folgenden nach Zielstellung und Ergebnis kurz beschrieben werden sollen. Es kommt hierbei besonders darauf an, den Entwicklungsweg zu charakterisieren, den das Zentralinstitut seit seiner Bildung im Jahre 1969 in Fortsetzung und Ergänzung der in den früher selbständigen Spezialinstituten durchgeführten Arbeiten zurückgelegt hat.

Die im ZIPE aufgegangenen Institute gehören zu den ältesten Forschungseinrichtungen der Akademie, und es ist eine äußerst bedeutsame Aufgabe des Zentralinstitutes, die mit den Instituten eingebrachten traditionellen Forschungsarbeiten entsprechend den Anforderungen der sozialistischen Gesellschaft und den Gesetzmäßigkeiten der Wissenschaftsentwicklung fortzuführen. Das betrifft in besonderem Maße die geodätisch-geophysikalischen Observatoriumsprogramme, mit denen über viele Jahre hinweg, z.T. einmalig in ihrer Vollständigkeit und Homogenität, Daten und Informationen über die physikalischen Erscheinungen des Erdkörpers und deren zeitliche Veränderungen angesammelt wurden und weiterhin als Basis für die wissenschaftlichen Forschungsarbeiten und als Hilfsmittel zur Lösung gesellschaftlicher und volkswirtschaftlicher Aufgaben bei der Nutzung der Geosphäre und der Sicherung des Lebens in ihr zu beschaffen sind.

2. Untersuchungen zur höheren Geodäsie, globale Dynamik des Erdkörpers

Die fortschreitende Integration der sozialistischen Staaten, die Entwicklung des sozialistischen Weltsystems und die Erweiterung der weltweiten internationalen Zusammenarbeit auf der Basis der friedlichen Koexistenz stellen das Vermessungs- und Kartenwesen der DDR vor neue Aufgaben, deren Lösung ein hohes wissenschaftlich-technisches Niveau erfordert. Wichtige Beiträge hierzu haben die Arbeiten zur höheren Geodäsie zu erbringen, die im ZIPE als einziger Forschungseinrichtung der DDR auf diesem Gebiet durchgeführt werden. Diese Arbeiten umfassen insbesondere Untersuchungen auf den Gebieten Satellitengeodäsie, geodätische Astronomie sowie Gravimetrie und Gezeitenforschung, wobei in zunehmendem Maße die Frage nach den zeitlichen Änderungen, nach der Dynamik des Erdkörpers in den Vordergrund des Interesses aller Verfahren gerückt ist.

2.1. Satellitengeodäsie

Der entscheidende Fortschritt in Richtung auf eine wissenschaftlich befriedigende Lösung der bereits von HELMERT formulierten Aufgabe der Geodäsie ist im letzten Jahrzehnt durch die geodätische Nutzung von künstlichen Erdsatelliten erreicht worden. Es wurde dadurch möglich, geodätische Festpunktsysteme im Maßstab des gesamten Erdkörpers mit ausreichender Genauigkeit aufzubauen und die astrogeodätischen Netze im kontinentalen Maßstab durch den Einbau übergeordneter Netze zu stabilisieren. Im Zentralinstitut wurden bereits frühzeitig (1963) sowohl experimentelle wie auch theoretische Arbeiten auf diesem neuen Zweig der Geodäsie begonnen, wobei im gleichen Maße wie die Arbeiten im Institut selbst sich auch die internationale Zusammenarbeit, insbesondere mit Forschungseinrichtungen in der UdSSR und anderen RGW-Staaten, entwickelte.

Die ersten Möglichkeiten für eigene satellitengeodätische Beobachtungen wurden durch die Entwicklung und den Bau der Kamera PSK (Potsdamer Satellitenkamera) im Jahre 1965 geschaffen. Wesentlich bessere Voraussetzungen entstanden 1968/69 durch die Inbetriebnahme der Automatischen Kamera für Astrogeodäsie (SBG), die vom VEB Carl Zeiss Jena entwickelt und gebaut worden war. Im ZIPE wurde für das SBG eine optimale Beobachtungs- und Auswertetechnologie entwickelt und im Routineeinsatz bei internationalen Beobach-

tungsprogrammen erprobt. Gegenwärtig wird von einem Kollektiv des ZIPE in Zusammenarbeit mit dem VEB Carl Zeiss Jena für das SBG eine Zusatz Einrichtung zur Laser-Entfernungsmessung nach Satelliten entwickelt und gebaut, wodurch beobachtungstechnisch der erforderliche Genauigkeitsbereich für den Nachweis dynamischer Vorgänge des Erdkörpers zugänglich wird.

Über mehrere Jahre wurde im ZIPE besondere Aufmerksamkeit den geometrischen Verfahren der Satellitengeodäsie gewidmet, wobei verschiedene praktisch nutzbare Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Gegenwärtig wird an fehlertheoretischen Untersuchungen zur Ableitung geodätischer Vektoren aus Richtungs- und Entfernungsoberbeobachtungen nach künstlichen Erdsatelliten gearbeitet. Für die zukünftige Entwicklung der Satellitengeodäsie sind jedoch die dynamischen Verfahren bedeutsamer. Erste Untersuchungen hierzu wurden im ZIPE bereits in den sechziger Jahren angestellt, wobei aus den Bahnstörungen globale Schwereanomalien abgeleitet wurden. Gegenwärtig werden theoretische Arbeiten zur Bahnbestimmung durchgeführt. Es geht hierbei um die Entwicklung, Optimierung und Programmierung eines mathematisch-physikalischen Bahnmodells, mit dessen Hilfe die Koordinaten der terrestrischen Stationen sowie die zeitlichen Änderungen dieser Koordinaten und des Koordinatensystems insgesamt mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden können. Es werden damit sicherlich auch schon in absehbarer Zeit die Voraussetzungen dafür vorhanden sein, mit den Verfahren der Satellitengeodäsie die globale Dynamik des Erdkörpers (Polbewegung, Rotationsschwankungen, zeitenbedingte und andere Deformationen) zu erfassen.

2.2. Geodätische Astronomie

Das ZIPE verfügt über eine große Tradition beim Studium des Rotationsverhaltens der Erde. Zu den ersten Aufgaben des 1870 gegründeten Geodätischen Instituts Potsdam gehörten bereits regelmäßige astronomische Beobachtungen von Breite und Länge. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen werden als Reduktionsgrößen u.a. im Vermessungswesen und in der Navigation benötigt, besitzen darüber hinaus aber seit langem selbständige Bedeutung für naturwissenschaftliche Forschungen über die Dynamik und den Aufbau der Erde. In Verbindung mit der geodätisch-astronomischen Aufgabenstellung ist vom Institut in Potsdam über lange Jahre die Funktion des staatlichen Zeitdienstes wahrgenommen worden.

Die langjährige Durchführung von Beobachtungen der Länge und Breite ermöglicht es, für das geodätisch-astronomische Observatorium des ZIPE in Potsdam diese Größen mit hoher Genauigkeit anzugeben. Das Observatorium wird deshalb seit langem als Bezugspunkt und Eichstation für praktische astronomisch-geodätische Arbeiten genutzt. Die geodätisch-astronomischen Beobachtungen der geographischen Breite und Länge bzw. der Zeit werden im ZIPE kontinuierlich mit einem Astrolab DANJON und einem visuellen Passageinstrument, seit Beginn des Jahres 1974 auch mit einem photographischen Zenitteleskop durchgeführt. Besondere Aufmerksamkeit muß bei diesen Beobachtungen wie allgemein bei geodätischen Problemen den Genauigkeitsfragen - der Erhaltung und womöglich der Steigerung der Genauigkeit - gewidmet werden. Die Anstrengungen im geodätisch-astronomischen Observatorium des ZIPE waren deshalb auch vorrangig auf diese Probleme, besonders bei der Zeit- bzw. Längenbestimmung, gerichtet.

In letzter Zeit sind im ZIPE in verstärktem Maße Untersuchungen zur Analyse und Interpretation der beobachteten Breiten- und Längensohwankungen angestellt worden, die den Nachweis planetarer Vorgänge und ihrer Verbindung mit anderen geophysikalischen Beobachtungen zum Ziel haben. U.a. ist es dabei gelungen, die Auswirkungen mehrerer Komponenten der Erdgezeiten in den Breitenbeobachtungen aufzufinden. Die in Potsdam vorhandenen Stellen zur Beobachtung von Länge und Breite erscheinen gemeinsam mit den eigenen mehrjährigen Gezeitenregistrierungen gut geeignet, die theoretisch bekannten bzw. vermuteten Beziehungen zwischen den Gezeiten und dem Rotationsverhalten des Erdkörpers zu verifizieren.

2.3. Gravimetrie und Erdgezeitenforschung

Im vergangenen Jahrzehnt sind die Untersuchungen des Schwerefeldes der Erde in eine neue Phase gelangt. Durch die Entwicklung neuer gravimetrischer Verfahren, die Nutzung der Beobachtungen von künstlichen Erdsatelliten und die vertiefte internationale Zusammenarbeit konnten in den letzten Jahren die Voraussetzungen für ein neues System von Schwerestationen geschaffen werden, das das seit 1909 benutzte Potsdamer System ablöst. Die Station Potsdam konnte auf Grund der 1969 abgeschlossenen zweiten Potsdamer absoluten Schwerebestimmung und einiger Verbindungsmessungen zu anderen Stationen in dieses neue System einbezogen werden. Gleichzeitig damit rückte die Frage nach den zeitlichen Variationen der Schwere und den sie verursachenden Prozessen in den Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses. Das Ziel dieser Untersuchungen entspricht der gegenwärtig mit modernen Gravimetern erreichten Meßgenauigkeit von einigen Mikrogal. Im ZIPE wird gegenwärtig an den hierzu erforderlichen Verbesserungen der instrumentellen Ausrüstung gearbeitet; erste Ergebnisse präzisionsgravimetrischer Arbeiten konnten bereits bei der mehrfachen Bestimmung kleiner Schwereunterschiede entlang einer ausgewählten Ost-West-Linie erreicht werden.

Der Übergang zur Untersuchung zeitlicher Schwerevariationen wurde im ZIPE durch die langjährigen Erfahrungen begünstigt, die auf dem Gebiet der Erdgezeitenforschung vorlagen. Das ZIPE betreibt seit über einem Jahrzehnt in Potsdam eine Station zur Registrierung sowohl der Vertikal- wie auch der Horizontalenkomponenten der Gezeitenbeschleunigung. Weiterhin wurde im Kalibergwerk Tiefenort/Merkers eine geophysikalische Untertagestation eingerichtet, in der ebenfalls Gezeitenbeobachtungen angestellt werden. Die Gezeitenersehnungen sind eng mit typischen Effekten im Rotationsverhalten der Erde verknüpft, weshalb die Gezeitenregistrierungen auch im ZIPE in Verbindung mit den geodätisch-astronomischen Beobachtungen interpretiert und gedeutet werden. In den Aufzeichnungen sind darüber hinaus deutlich Effekte von Vorgängen in der Atmosphäre und der Hydrosphäre erkennbar.

3. Seismologie und geophysikalische Festkörperforschung, Untersuchungen zur Physik und Chemie des Erdinnern

Das wichtigste Hilfsmittel bei der Erforschung der Struktur des Erdinnern ist die Seismologie. Die Grundzüge der physikalischen Struktur konnten bereits frühzeitig durch konsequente Auswertung von Raumwellenregistrierungen in aller Welt abgeleitet werden. Die Anwendung der elektronischen Rechentechnik hat es darüber hinaus ermöglicht, auch die Registrierungen der Oberflächenwellen zu analysieren, und zwar besonders im Hinblick auf die Struktur der Kruste und der obersten Teile des Mantels. Durch die Einführung festkörperphysikalischer Modellvorstellungen konnte in den letzten Jahren ein erheblicher Fortschritt in der Aufklärung der stofflichen Eigenschaften des Erdinnern erzielt werden. Unser gegenwärtiges Bild vom Aufbau des uns nicht zugänglichen Erdinnern wird dabei maßgeblich durch die Verknüpfung von Seismologie und Hochdruckphysik bestimmt. Die stofflichen Eigenschaften des Erdinnern spielen eine wesentliche Rolle sowohl für die Deutung der gegenwärtigen Struktur und ihrer Entwicklung wie auch für die thermische Geschichte der Erde. Darüber hinaus sind sie entscheidend für den Ablauf aller dynamischen Prozesse im Erdinnern, denen sich das Interesse der Forschung in den letzten Jahren besonders im Rahmen des internationalen Geodynamik-Projektes immer stärker zuwendet. Die experimentellen Voraussetzungen für die Beiträge des ZIPE zu diesen Forschungsaufgaben sind einerseits die seismologischen Observatoriumsarbeiten, die im Jahre 1974 eine permanente Tätigkeit von 75 Jahren aufweisen, und andererseits Labors für festkörperphysikalische Untersuchungen unter thermodynamischen Bedingungen, die denen des Erdinnern entsprechen. Diese Labors wurden erst im letzten Jahrzehnt aufgebaut.

3.1. Seismologische Forschungen

Die seismologischen Arbeiten des ZIPE konzentrierten sich seit langem auf den Aufbau, die Unterhaltung und ständige Modernisierung des seismologischen Stationsnetzes der DDR, insbesondere der Zentralstation Moxa (Kreis Pößneck), die routinemäßige Aufbereitung des Beobachtungsmaterials und die Bereitstellung der Ergebnisse für innerstaatliche Aufgaben und den internationalen Datenaustausch. Die Station Moxa ist entsprechend den international üblichen Anforderungen vollwertig mit Instrumenten ausgestattet, die im ZIPE selbst entwickelt und gebaut wurden. In umfangreichen Arbeiten sind hierbei die Grundlagen der theoretischen Mechanik für den Seismographenbau zusammenfassend formuliert und konstruktiv ausgewertet worden. Ab Mitte der sechziger Jahre wurde dann in stärkerem Maße dazu übergegangen, die Möglichkeiten der Elektronik und der Datenverarbeitung in den Seismographenbau und die Stationsausrüstung einzubeziehen. Gegenwärtig wird an der Entwicklung von elektronischen Seismographen mit digitaler ereignisselektiver Datenausgabe gearbeitet, die als wesentliche Baugruppe eines automatisch arbeitenden seismologischen Observatoriums anzusehen sind. Im Rahmen des seismologischen Observatoriumsprogramms, das vom ZIPE für die gesamte DDR vollverantwortlich unterhalten wird, wurde ebenfalls ab Mitte der sechziger Jahre ein spezielles Stationsnetz zur Beobachtung der Oberflächenwellen aufgebaut, um die strukturellen Besonderheiten des Aufbaus von Kruste und oberem Mantel besser erkunden zu können (vgl. hierzu auch Kap. 5).

Theoretische Untersuchungen werden Fragen der Seismizität gewidmet. Besondere Aufmerksamkeit finden aber seit einigen Jahren seismologische Spezialprobleme in Verbindung mit der Ableitung festkörperphysikalischer Modellvorstellungen. Dabei spielten und spielen Zustandsgleichungen für Zusammenhänge zwischen seismologischen Parametern, Druck, Dichte und weiteren geophysikalischen Parametern sowie den strukturphysikalischen Eigenschaften der kondensierten Materie im Erdinnern eine bedeutende Rolle. In einer Reihe von Arbeiten wurden sowohl Zustandsgleichungen untersucht, die kontinuumsmechanisch begründet sind, als auch solche, die gittertheoretisch abgeleitet werden. In beiden Fällen war es möglich, Zustandsgleichungen zu gewinnen, die eine Reihe von empirischen Formeln verallgemeinern.

3.2. Geophysikalische Festkörperforschung

Mit der Bildung des ZIPE und der damit verbundenen inhaltlichen Neuformierung der Forschungsrichtungen wurde auch die bis dahin in geringen Ansätzen vorhandene geophysikalische Festkörperforschung neu profiliert. Dabei wurde von dem sich international abzeichnenden Grad der Verbindung von festkörperphysikalischer Hochdruckforschung und seismologischer Interpretation ausgegangen. Im Gegensatz zu den bereits lange Zeit im Institut betriebenen Arbeiten auf dem Gebiet der Seismologie erfordert die Durchführung von Untersuchungen unter extremen thermodynamischen Bedingungen im ZIPE vor allem den Aufbau entsprechender Apparaturen mit der damit verbundenen peripheren Meßtechnik.

Es konnten dabei sehr schnell laborative Ausrüstungen geschaffen werden, mit denen Beiträge zur substantiellen Erforschung der Erdkruste und der obersten Teile des Erdmantels zu erzielen sind. Das betrifft die Bestimmung makrophysikalischer Parameter an ausgewählten Gesteinen und Mineralen unter den Druck- und Temperaturbedingungen dieser äußeren Bereiche des Erdkörpers. Die erhaltenen elektrischen, thermischen und elastischen Parameter gehen mit den verschiedenen geophysikalischen Meßmethoden in eine Komplexinterpretation für die Erdkrustenforschung ein. Gegenwärtig werden Vorbereitungen getroffen, auch die rheologischen Eigenschaften der Gesteine zu bestimmen.

In allerletzter Zeit konnten auch die experimentellen Voraussetzungen für Untersuchungen der Eigenschaften und des Zustandsverhaltens von Materialien unter den extremen thermodynamischen Bedingungen des tiefen Erdinnern (vom Bereich des oberen Mantels bis in den Erdkern hinein) geschaffen werden. Im ZIPE stehen zur Zeit Experimente an binären Verbindungen der 3d-Übergangsmetalle mit den Chalkogeniden im Vordergrund. Zum Druck- und Temperaturverhalten dieser Verbindungen liegen bereits umfangreiche Meßergebnisse vor. Weitere Untersuchungen betreffen das Phasenverhalten von Stoffen mit extremen Eigenschaften bei hohen Drücken und Temperaturen. Beim Aufbau dieser Forschungsrichtung wurde von Anfang an eine enge Kooperation mit der Werkstoff-Forschung und deren hochdruckphysikalischen Arbeiten in der DDR angestrebt.

3.3. Untersuchungen an Mondproben von Luna 16 und Luna 20

Die Übergabe von Mondbodenmaterial, das die sowjetischen automatischen Stationen Luna 16 und Luna 20 zur Erde gebracht haben, ist für die Weiterentwicklung der Geowissenschaften in der DDR außerordentlich bedeutungsvoll und hat insbesondere auch die geophysikalische Festkörperforschung im ZIPE wesentlich stimuliert. Diese Arbeiten werden im Rahmen des Interkosmos-Programms durchgeführt; an ihnen sind neben dem ZIPE mehrere Institute der Akademie der Wissenschaften und Einrichtungen des Hochschulwesens der DDR beteiligt. Die Untersuchungen sind vorwiegend gesteinsphysikalisch orientiert, geben darüber hinaus jedoch Anlaß und die Möglichkeit, weiterführende vergleichende Untersuchungen zur Physik der Erde, des Mondes und der Planeten durchzuführen. Im Rahmen eines Komplexprogrammes werden mineralogisch-geochemische Untersuchungen zur Kennzeichnung und Klassifizierung des Mondbodenmaterials, mikrophysikalische Untersuchungen unter Normalbedingungen sowie Röntgenbeugungsuntersuchungen bei hohen Drücken durchgeführt. Die Auswertung der Daten liefert zusätzlich wesentliche Hinweise auf die Entstehungsbedingungen von Mineralen auf dem Mond; sie können so mit bereits für die Erde bekannten Tatbeständen verglichen und interpretiert werden.

4. Beiträge zum Projekt Oberer Erdmantel und zum Geodynamik-Projekt

Ende des Jahres 1970 wurde mit dem Projekt Oberer Erdmantel (UMP) das bisher bedeutendste internationale Programm in den Geowissenschaften abgeschlossen. Es erbrachte eine Vielzahl von hochinteressanten Aussagen über Struktur und Aufbau der Erdkruste und des oberen Erdmantels. Das wesentliche Ergebnis ist in der Erkenntnis zu sehen, daß der Erdkörper nicht nur im Bereich der Erdkruste, sondern mindestens bis zu Tiefen von etwa 700 km neben vertikalen auch signifikante laterale Inhomogenitäten aufweist. Sie müssen als Ursache und Folge dynamischer Vorgänge im Erdmantel gedeutet werden, welche ihrerseits als Ursachen des geologischen Geschehens anzusehen sind. In Verbindung damit vollzog sich eine tiefgreifende Neugestaltung der Vorstellungen über die Erde, ihre Oberflächenformen und deren Entwicklung. Sie kulminierte Ende der sechziger Jahre in der Formulierung einer neuen Hypothese über die globale Tektonik und deren Verbindung mit dem Aufbau des Erdinnern und den dort ablaufenden Prozessen. Diese Hypothese der sog. Plattentektonik wird heute von zahlreichen Geowissenschaftlern als brauchbar für die Deutung einer Vielzahl geologisch-geophysikalisch-geochemischer Phänomene 1. Ordnung aus den letzten 200 Millionen Jahren der Erdgeschichte anerkannt. Mit der Hypothese über die Plattentektonik ist es gelungen, die bereits vor mehr oder weniger langer Zeit entwickelten Vorstellungen über die Kontinentalverschiebung, die BENIOFF-Zonen, das Seafloor-Spreading, über die Existenz einer Schwächezone im oberen Mantel und die Konvektionsstromhypothese zu einer einheitlichen Modellvorstellung zu vereinigen.

Unter Berücksichtigung der Leistungen und Ergebnisse des UMP wurde als neues internationales Programm der siebziger Jahre das Geodynamik-Projekt vom ICSU beschlossen. Die Bearbeitung dieses Projektes begann offiziell 1974. Sein Ziel besteht in der Erforschung der Dynamik und der dynamischen Geschichte der Erde unter besonderer Berücksichtigung der tiefsitzenden Ursachen der an der Erdoberfläche beobachtbaren geologi-

schen Erscheinungen. Als wichtige Aufgabe dieses Projektes wird in verschiedenen Ländern die Prüfung und Ergänzung bzw. Erweiterung der Vorstellungen zur Plattentektonik angesehen. Zur Zeit erscheinen zahlreiche Arbeiten, in denen vom Standpunkt dieser Hypothese aus die bisherigen Erkenntnisse aller geowissenschaftlichen Disziplinen neu interpretiert und Schlußfolgerungen für weitere Arbeiten gezogen werden.

Das Zentralinstitut (bzw. die vier im ZIPE aufgegangenen vormals selbständigen Institute) hat sich am Projekt Oberer Erdmantel beteiligt und arbeitet auch am Geodynamik-Projekt mit. Die Beteiligung an diesen betont interdisziplinär orientierten Programmen konzentrierte und konzentriert sich dabei auf diejenigen Forschungsaufgaben, die sowohl wegen der spezifischen geologischen Situation bzw. Regionalstellung des Staatsgebietes der DDR wie auch wegen der bereits betriebenen relevanten experimentellen und theoretischen Forschungen effektiv bearbeitet werden können. Diese ordnen sich von der Zielstellung her in die beiden Komplexthemen ein, die das Nationalprogramm der DDR zur Beteiligung am Geodynamik-Projekt bilden:

- a) Entwicklung und weitere Vervollständigung eines dynamischen Modells der Tektonosphäre in Mitteleuropa und
- b) Beiträge zur Erforschung der Antriebsmechanismen für die geodynamischen Prozesse.

Die im ZIPE im Rahmen des zweiten Komplexthemas bearbeiteten Forschungsaufgaben und die dabei bisher erzielten Ergebnisse sind in Kap. 2 und 3 bereits dargelegt worden. Es sind das die disziplinären Arbeiten einerseits zur höheren Geodäsie und andererseits zur Seismologie und geophysikalischen Festkörperforschung. Diese Untersuchungen werden in zunehmendem Maße vor allem von den Ideen des Geodynamik-Projektes beeinflusst. An den Arbeiten im Rahmen des ersten Komplexthemas beteiligt sich das ZIPE mit speziellen Forschungen und andererseits durch Bereitstellung und Analyse von relevanten Ergebnissen aus Arbeiten mit anderen, bes. mit volkswirtschaftlichen Zielstellungen in allen im Institut bearbeiteten Teildisziplinen. Diese Forschungen reichen von der Geodäsie und Gravimetrie (mit Aussagen über rezente Krustenbewegungen) über Seismologie, Geothermie, Geomagnetismus und Paläomagnetismus sowie Petrophysik (mit Aussagen zur Struktur und Dynamik der Lithosphäre) bis zur Geotektonik (mit Aussagen über die geologisch-tektonische Entwicklung und Regionalstellung des im Staatsgebiet der DDR zugänglichen Krustenbereiches). Die im ZIPE bearbeiteten Aufgaben dieser Teildisziplinen und die dabei erzielten Ergebnisse werden in Kap. 5 und 6 dargelegt.

5. Untersuchungen zur Physik (Struktur und Dynamik) der Lithosphäre

Das generelle Ziel dieser Untersuchungen besteht in der Erarbeitung von Prinziplösungen sowie dem Nachweis überregionaler und teilweise globaler Zusammenhänge. Sie bauen auf methodischen Weiterentwicklungen von Seismologie und Seismik, Geoelektrodynamik, Geomagnetismus, Paläomagnetismus, Geothermie, Gravimetrie, Petrophysik sowie der Geochemie auf und schließen Methodentests im regionalen Rahmen der DDR ein. Die Arbeiten werden in enger innerstaatlicher Kooperation besonders mit Einrichtungen des Hochschulwesens der DDR durchgeführt. Sie haben den Charakter von Grundlagenforschun-

gen und liefern in wesentlichen Teilen wissenschaftliche Vorlaufsergebnisse für die geologisch-geophysikalische Erkundung.

Die Aufstellung komplexer Modelle der Erdkruste bzw. der Lithosphäre setzt Kenntnisse über die geometrische Struktur dieser Bereiche, über ihren stofflichen Bestand sowie über die Dynamik und zeitliche Entwicklung voraus. Ausgehend davon konzentrierten sich sämtliche Arbeiten auf die Lösung von vier Problemen, die im folgenden eingehender behandelt werden.

5.1. Geologisch-geophysikalische Rayonierung

Für das Problem der Rayonierung als im wesentlichen horizontaler Gliederung eines bezüglich seiner geophysikalischen, geologischen und geochemischen Merkmale heterogenen Krustenbereiches in homogene Teilbereiche ist eine allgemeingültige methodische Basis in Form von objektivierten statistischen Analysen erarbeitet worden. Diese Verfahren wurden zunächst am Beispiel der Anomalien geophysikalischer Potentialfelder entwickelt, können und müssen jedoch bei jeder praktischen Anwendung die Gesamtheit der verfügbaren geophysikalischen, geologischen und geochemischen Merkmalsverteilungen einschließen. Es ergeben sich dabei im Prinzip zwei Lösungsvarianten: a) Rayonierung durch Nachweis von Gebietsgrenzen in Form quasilinearer Diskontinuitäten, die durch tektonische Störungen, Tiefenbrüche oder Lineamente bedingt sind; b) Rayonierung durch Charakterisierung einzelner Teilgebiete mit Hilfe statistischer Kenngrößen der flächenhaften Merkmalsverteilungen und Ermittlung ähnlicher Bereiche. Für beide Varianten sind Lösungen sowohl erarbeitet wie auch praktisch erprobt worden.

5.2. Vertikale Gliederung

Die vertikale Gliederung der Erdkruste (durch im wesentlichen horizontal verlaufende Diskontinuitäten) ist für das Territorium der DDR und die angrenzenden Gebiete in erster Näherung bekannt. Neues Datenmaterial und die Anwendung neuer bzw. weiterentwickelter Auswertemethoden zeigen jedoch, daß bestehende Modellvorstellungen in vielen Fällen grundlegend revidiert werden müssen und neue Erkenntnisse über den Aufbau der tieferen Kruste und des oberen Mantels erzielt werden, die weitreichende Konsequenzen für tektonische und minerogenetische Fragestellungen haben. Es wird immer deutlicher, daß die einfachen Modellvorstellungen, welche von einer geschichteten Lithosphäre ausgehen, die Einzelschichten als in sich homogen und isotrop ansehen und lediglich Gradienten der physikalischen Eigenschaften in radialer Richtung zulassen, nicht gültig sind. So kommt der Erfassung lateraler Änderungen in der vertikalen Gliederung eine besondere Bedeutung zu.

Die Tiefenlage von Grenzflächen, die Feinstruktur einzelner Diskontinuitäten und die Charakteristik bestimmter Tiefenbrüche können nur durch seismische und seismologische Untersuchungen ermittelt werden. Im ZIPE werden zu dieser Aufgabenstellung seit mehreren Jahren Untersuchungen über die Ausbreitung seismischer Oberflächenwellen, seit 1972 auch mit Hilfe der Explosionsseismologie, durchgeführt. Zur Erfassung der Ober-

flächenwellen wurde vom ZIPE in der DDR ein spezielles Stationsnetz eingerichtet. Die Theorie wurde dahingehend weiterentwickelt, daß neben der Wirkung der horizontalen Schichtung auch der Einfluß von vertikalen und geneigten Diskontinuitäten auf die Dispersion der Oberflächenwellen diskutiert werden kann. Aus der detaillierten Analyse der Registrierungen konnte für die gesamte DDR ein bis ins einzelne gehendes Modell der Kruste und des obersten Mantels aufgestellt werden, das die grundlegenden Unterschiede zwischen Nord- und Südteil dieses Gebietes enthält. Die Analyse liefert darüber hinaus Hinweise auf Geschwindigkeitsinversionen und ihre regionale Ausbildung. Die methodischen und instrumentell-technischen Arbeiten zur Explosionsseismologie sind im ZIPE z.Z. soweit gediehen, daß erste Analysen von sprengseismischen Registrierungen angestellt werden konnten. Sie führten bereits zur Ergänzung und Verfeinerung des bisher vorliegenden Krustenmodells.

In guter Übereinstimmung mit den Lithosphärenmodellen, die sich aus der Analyse von Oberflächenwellen ergeben, stehen die Aussagen, die für das Gebiet der DDR über den vertikalen Verlauf von Temperatur und Wärmestrom gewonnen werden konnten. Die Ergebnisse der geothermischen Arbeiten zeigen, daß in der unteren Kruste und an der Kruste-Mantel-Grenze starke laterale Temperaturvariationen auftreten dürften. Zur Erklärung muß ein zusätzlicher Wärmetransport durch Konvektion angenommen werden.

Prinzipiell sollte erwartet werden, daß eine generelle Übereinstimmung zwischen den Anomalien im Wärme fluß und in der Temperaturverteilung in der unteren Kruste einerseits und denjenigen in der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit andererseits besteht. Für die DDR und die angrenzenden Gebiete liegen zahlreiche Ergebnisse geomagnetischer und magnetotellurischer Tiefensondierungen vor, an denen Mitarbeiter des ZIPE seit Jahren maßgeblich mitgewirkt haben. Die sog. Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie als eine der markantesten elektrischen Anomalien in der gesamten Lithosphäre ist von Mitarbeitern des ehemaligen Geomagnetischen Instituts erstmals erschlossen worden. Untersuchungen im ZIPE haben gezeigt, daß die oben erwähnte Übereinstimmung zwischen thermischen und elektrischen Anomalien nicht generell besteht, sondern durch die geologisch-tektonische Situation wesentlich beeinflußt wird.

Eingehende Untersuchungen im Hinblick auf die vertikale Gliederung der Erdkruste und deren laterale Inhomogenitäten wurden schließlich im ZIPE auch durch Analyse der Anomalien des Schwerefeldes und des permanenten Magnetfeldes angestellt. Es wurde gezeigt, daß hierfür die Autokovarianzfunktionen und die Leistungsspektren gravimetrischer und magnetischer Anomalienverteilungen gut geeignet sind und aus ihnen Informationen über die Quellenverteilung in bestimmten Quellenebenen erhalten werden können. Die Methoden wurden weitgehend ausgearbeitet und praktisch angewendet.

5.3. Physikalische und chemische Eigenschaften des Krustenmaterials

Angaben über physikalische und chemische Eigenschaften des Erdkrustenmaterials stellen ein Bindeglied zwischen geophysikalischen Meßwerten und geologischen Daten dar. Damit sind sie als eine Voraussetzung zur Lösung komplexer Interpretationsaufgaben anzusehen. Methodische Untersuchungen und technologische Arbeiten auf diesem Gebiet wurden

im ZIPE vor wenigen Jahren begonnen und haben jetzt einen Stand erreicht, der die Bestimmung elastischer thermischer und elektrischer Parameter von Gesteinen unter thermodynamischen Bedingungen gestattet, die denen der Kruste bis in den oberen Mantel hinein äquivalent sind. Bezüglich aller Meßverfahren liegen erste Meßreihen vor.

5.4. Dynamik der Erdkruste

Zu dieser Thematik sind im ZIPE paläomagnetische Untersuchungen sowie Forschungen zu rezenten Krustenbewegungen durchgeführt worden. Sie betreffen sowohl regionale Arbeiten im Gebiet der DDR als auch Untersuchungen zur kritischen Sichtung und Analyse des Datenmaterials.

6. Geologisch-tektonische Forschungen

Charakteristisch für die Entwicklung dieser Forschungen während der letzten Jahre, insbesondere seit der Einbeziehung des früheren Geotektonischen Instituts in das Zentralinstitut, ist die zunehmende Bearbeitung von theoretischen Fragestellungen der Geologie. Dementsprechend zeichnen sich die neuen Forschungsergebnisse durch einen erhöhten Verallgemeinerungsgrad der auf regionaler Basis (im Nord- und Südteil des Staatsgebietes der DDR) bzw. durch überregionale Vergleiche (Ural, Balkan, Südwestrand der Osteuropäischen Tafel zwischen Nordsee und Schwarzem Meer) gewonnenen Daten aus. Hierbei sind allgemeine Gesetzmäßigkeiten des Zustandes und der Entwicklung der Erdkruste, insbesondere der Kratonisierung von Mobilzonen, abzuleiten. Aus dieser übergeordneten Problemstellung folgen als abgeleitete Forschungsaufgaben: Klärung der Entwicklung der Orogene, speziell der Paläozoiden, im Gebiet von Mitteleuropa (Probleme des Grundgebirges); Erforschung der Bildungsgesetzmäßigkeiten der Norddeutsches-Polnischen Senke (Probleme des Tafeldeckgebirges bzw. Molassenstockwerkes); Untersuchungen zur Felderteilung der Erdkruste im Gebiet von Mitteleuropa, insbesondere zum Bau und zur Entwicklung von Lineamenten (Elbe-Lineament, Nordsee-Dobrudscha-Lineament). Die Bearbeitung dieser Thematik erfolgte schwerpunktmäßig durch lithologisch-paläogeographische, strukturgeologische sowie geodätische und geochemische Methoden, z.T. in direkter Verbindung mit dem Industriepartner (Zentrales Geologisches Institut) bzw. mit den Kooperationspartnern des ZIPE im Bereich des Hochschulwesens.

6.1. Untersuchungen zum Strukturbau der Paläozoiden (Varisziden)

Die erzielten Forschungsergebnisse betreffen vor allem die Zonalität des Orogens im Gebiet von Mitteleuropa. Es erfolgten Untersuchungen am nördlichen Außenrand der Varisziden zur Analyse der Baustiländerung und der Zeitlichkeit der tektonischen Verformungsvorgänge. Besonders beachtet werden dabei Fragen der Gliederung, der strukturellen Stellung und des Hangendüberganges in diesen Gebieten. Es zeigte sich u.a., daß der Lateral- und der Vertikalübergang zum überlagernden Molassenstockwerk petrophysikalisch mittels der regionalen Dichteänderungen erfaßbar sind. Die speziellen Gemeinschaftsarbeiten mit den Kooperationspartnern betrafen bevorzugt Probleme des

Deckenbaus im Harz sowie die Stellung der Basite im Orogenbereich.

Besondere Fortschritte wurden ferner bei der Gliederung und der geochemischen Untersuchung alter Baustufen innerhalb der Varisziden, speziell des Präkambriums im Granulitgebirge, im Schwarzburger Antiklinorium und im Kristallin von Ruhla, erzielt.

Im engen Zusammenhang mit der Orogenforschung stehen einige theoretische Untersuchungen zur Übertragbarkeit der modernen geotektonischen Hypothesen (Plattentektonik), die besonders auf Beobachtungen im ozeanischen Bereich aufbauen, auf die Paläoelemente in Mitteleuropa.

6.2. Erforschung des Tafeldeckgebirges und Molassenstookwerkes der Norddeutsch-Polnischen Senke

Besondere Aufmerksamkeit wurde bei der Verallgemeinerung der bisherigen Untersuchungen dem strukturellen Übergang vom Molassenstookwerk zum Tafeldeckgebirge im Hinblick auf die Postmitätsfragen gewidmet. Hierbei konnten die lokalen und regionalen Strukturvorgänge als Teil einer übergeordneten Beckendynamik eingeordnet werden, die in mehreren definierbaren Etappen ablief und bei der sich die initialen Phasen durch besonders hohe Absenkungsraten auszeichnen. Bei den neuen Forschungen wird versucht, den Beckenbildungsprozeß als allgemeines Krustenphänomen zu betrachten, das übergeordneten, globalen Impulsen folgt; u.a. wird eine Beziehung zum Spreading des Atlantiks vermutet.

Bei paläotektonischen Spezialuntersuchungen im Bereich des Norddeutsch-Polnischen Beckens konnten ferner allgemeine Aussagen zur Genese von Salzstrukturen (Beziehung zwischen Salinar und Postsalinar) gewonnen werden, wobei auch die mathematisch-statistischen Methoden der Mächtigkeitsanalyse systematisch weiterentwickelt wurden.

Die Untersuchungen im Molassenstookwerk bezogen sich einerseits auf den Sedimentinhalt des intra- und extraorogenen Bereiches und andererseits auf den subsequenten Magmatismus sowie dessen regionale Position im Süd- und Nordteil der DDR und die Genese als Ausdruck tiefkrustaler Vorgänge. Bemerkenswert ist die ausgeprägte Bindung der Vulkanite an zonale Elemente, die vermutlich Brüche sind.

6.3. Untersuchungen zur Felderteilung der Kruste und zu Lineamenten

Die Untersuchungen ergaben grundsätzliche regionale Aussagen, so zur Entwicklung des Nordsee-Dobrukscha-Lineaments am Südwestrand der Osteuropäischen Tafel, und lieferten weiterhin wertvolle methodische Ergebnisse, z.B. zum Studium des Gefügebbaus im Bereich des Elbe-Lineamentes. In diesem Zusammenhang ist es durch die Kombination geodätischer und tektonischer Untersuchungen zur Klärung rezenter Krustenbewegungen gelungen, aus den direkten Aussagen zur Krustendynamik auch Hinweise zur Krustenrayonierung bzw. Felderteilung zu erhalten. Demnach stehen die rezenten Krustenbewegungen im Bereich der Norddeutsch-Polnischen Senke in direkter postumer Beziehung zur Paläotektonik.

Die Verbindung strukturell-tektonischer und regional geophysikalischer Forschungen wurde besonders angewendet bei der Zusammenstellung von kleinmaßstäblichen Karten für das Gebiet zwischen Ural und Atlantik zwecks Ausscheidung von Deformationsstookwerken. Diese noch laufenden Arbeiten liefern allgemeine Beiträge zum Geodynamik-Projekt.

7. Geomagnetische Arbeiten

Die Forschungen auf dem Gebiete des Geomagnetismus liefern Beiträge sowohl zur Erforschung des Erdinnern wie auch zur solar-terrestrischen Physik. Bei der Bildung des Zentralinstituts für Physik der Erde wurde entschieden, daß die disziplinären Arbeiten zum Geomagnetismus, insbesondere die Durchführung und Weiterentwicklung des entsprechenden Observatoriumsprogramms und die Überwiegend auf die Erforschung des Erdinnern orientierten geomagnetischen Untersuchungen, vollverantwortlich im ZIPE ausgeführt werden. Über die letztgenannten Forschungsarbeiten ist bereits in Kap. 5 berichtet worden; sie betreffen vorwiegend Untersuchungen zur geomagnetischen Tiefensondierung sowie zu den Anomalien des permanenten geomagnetischen Feldes und seiner Säkularvariation. - Die im ehemaligen Geomagnetischen Institut der AdW intensiv betriebenen Untersuchungen zur Analyse, Interpretation und Theorie des geomagnetischen Hauptfeldes sind im ZIPE aus sachlichen und personellen Gründen nicht fortgeführt worden.

Besondere Anstrengungen wurden dagegen unternommen, das geomagnetische Observatoriumsprogramm, dessen Anfänge bis in das Jahr 1889 zurückreichen und das international stets hoch geschätzt wurde, auf einem hohen Niveau zu betreiben. Das betrifft vor allem die durchgehende Einführung der elektronischen Datenverarbeitung im Observatorium Niemegk. Die erste Etappe - der Aufbau einer Datenerfassungsanlage - wurde 1973 mit deren Übernahme in den Dauerbetrieb abgeschlossen. Die zweite Etappe sieht den Einsatz eines Prozeßrechners vom Typ PRS 4000 vor. Die Einsatzvorbereitung hierfür wurde im ersten Halbjahr 1974 abgeschlossen, so daß mit dem Aufbau des gesamten Systems Mitte 1974 begonnen werden konnte.

8. Schlußbemerkungen

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die Arbeitsgebiete, die im ZIPE gepflegt werden, und die wesentlichen Forschungsergebnisse, ohne dabei jedoch Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu können. Eine vollständige Übersicht über die im Verlauf eines Jahres durchgeführten Arbeiten bieten die wissenschaftlichen Jahrestagungen, die vom Zentralinstitut jeweils zum Ende des Kalenderjahres durchgeführt werden. An ihnen beteiligen sich auch die Kooperationspartner des ZIPE aus dem Bereich des Hochschulwesens der DDR.

Über die erreichten Ergebnisse wird von den Mitarbeitern des ZIPE in zahlreichen Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften berichtet. Bis zum 1. April 1974 sind insgesamt 395 Mitteilungen in Zeitschriften bereits erschienen bzw. zum Druck übergeben worden. Darüber hinaus gibt das ZIPE eine eigene Publikationsreihe heraus, die Arbeiten mit größerem Umfang bzw. Sammelbände enthält. Bis zum oben genannten

Zeitpunkt sind hierin unter der Bezeichnung "Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde" 30 Hefte bereits erschienen bzw. befinden sich im Druck.

Das Zentralinstitut hat in den nunmehr fünf Jahren seines Bestehens bereits vier größere wissenschaftliche Symposien mit internationaler Beteiligung durchgeführt, bei denen auch die eigenen Forschungsergebnisse vorgelegt wurden. Die Vorträge dieser Symposien wurden bzw. werden vollständig in folgender Form veröffentlicht:

- a) Symposium "Geodäsie und Physik der Erde", Potsdam, 6. bis 8.5.1970; Vorträge publiziert in: Vermessungstechnik, Berlin 18 (1970) 12, und 19 (1971) 2;
- b) Stockwerkbau und Felderteilung (Symposium "25 Jahre geotektonische Forschungen an der Akademie der Wissenschaften der DDR", Potsdam, 21. und 22.10.1971); Veröffentlichungen des ZIPE, Potsdam (1973/74) 14, Tl. 1-3;
- c) Second International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth", Potsdam, May 7th - 11th, 1973; Proceedings publiziert in: Veröffentlichungen des ZIPE, Potsdam (1974) 30, Tl. 1 u. 2;
- d) Internationales Symposium über Seismologie und geophysikalische Festkörperforschung, Jena, 1. bis 6.4.1974; Vorträge erscheinen in: Veröffentlichungen des ZIPE, Potsdam (1975) 31.

Bei der Abfassung des vorliegenden Artikels ist der Verfasser von mehreren Mitarbeitern des ZIPE unterstützt worden, denen auch an dieser Stelle gedankt sei.

Neue Aspekte zum Geodynamics Project
aus hochdruck-festkörperphysikalischer und planetarer Sicht

von

F. FRÖLICH

Zusammenfassung

Durch die Einbeziehung (1.) der experimentellen Hochdruck-Hochtemperatur-Physik und ihrer Möglichkeiten zu Materietesten unter den extremen statischen Bedingungen des Erdinneren, (2.) der Festkörperphysik und ihrer höheren Näherungen und (3.) der Planetarphysik unter Berücksichtigung der Grenzen der Vergleichbarkeit in die geophysikalische Forschung einerseits und den Trend zu integrierender, interdisziplinärer Forschung im Bereich der Geowissenschaften andererseits sind eine Reihe neuer Aspekte erschlossen worden, die das international koordinierte Geodynamik-Programm beeinflussen. Hierzu gehören beispielsweise Auswirkungen (a) druckbedingter Gesetzmäßigkeiten sowie (b) entwicklungsbedingter Prozesse im Erde-Mond-System und Aspekte im Zusammenhang mit Atmosphärenveränderungen im Gebiet der "terrestrischen" Planetengruppe. Diese Aspekte werden nachstehend diskutiert.

Summary

Several new aspects affecting the internationally co-ordinated Geodynamics Programme have been opened by including in geophysical research work (i) experimental high-pressure and high-temperature physics and their possibilities for testing materials under the extreme conditions of the Earth's interior, (ii) theoretical solid-state physics and its higher approximations and (iii) planetary physics regarding the limits of the comparability. On the other hand, the tendency to an integrating, interdisciplinary research in the field of geosciences contributes to this too. Thus e.g. the effects of pressure-involved regularities as well as processes released by the evolution of the Earth-Moon system and aspects in connection with changes of the atmospheres of the "terrestrial" group of planets belong to that. These points will be discussed in the following paper.

Резюме

Благодаря применению (1.) экспериментальной физики высоких давлений и температур и её возможностей при исследовании материи под экстремальными статистическими условиями земных недр, (2.) физики твёрдого тела и её высших приближений и (3.) физики планет с учётом границ сравнимости в геофизическом исследовании с одной стороны, и стремлению к интегрированному, междоластному исследованию в области геологических наук с другой стороны, открылся ряд новых аспектов, которые оказывают влияние на международную геодинамическую программу. К ним относятся, например, следствия (а) вытекающие из закономерностей, обусловленных давлением, (б) процессы, обусловленные развитием в системе Земля - Луна и стороны в связи с изменением атмосферы в области "земной" группы планет. Эти стороны в дальнейшем будут обсуждаться.

1. Einführung

Die Komplexität der geodynamischen Probleme erzwingt bekanntermaßen eine integrierende, interdisziplinäre Forschungskonzeption im Bereich der Geowissenschaften, wofür etwa das Sea-floor spreading bzw. die Plate tectonics instruktive Beispiele liefern. Die in diesen Fällen praktizierte Koordinierung geologisch-geotektonischer, seismologischer, gravimetrischer und paläomagnetischer Ergebnisse mit festkörperphysikalischen Untersuchungen ermöglichte bekanntlich die Erarbeitung eines ersten zusammenfassenden Konzepts zur Lithosphärendynamik, das im Einklang steht mit den vielfältigen bereits vorliegenden globalen und regionalen Detailbefunden und das so als Grundlage für die notwendigen weiteren Spezialuntersuchungen dienen kann. Hierbei kann naturgemäß nicht ausgeschlossen werden, daß neue Beobachtungsergebnisse Modifizierungen des Konzepts zur Folge haben können. Aus festkörperphysikalischer Sicht ist in diesem obigen Zusammenhang beispielsweise der Begriff des **Z w e i k o m p o n e n t e n s y s t e m s** [8, 9] in die geowissenschaftliche Betrachtungsweise eingeführt worden, da anderenfalls Bewegungsvorgänge der erwähnten Art in Festkörpern unterhalb der Schmelztemperatur unverständlich wären. Erst auf der Basis eines Systems aus festen Kristalliten und nachgebenden Intergranularbereichen ist ja eine rheologische Mobilität begründbar, wobei die unterschiedliche "Anfälligkeit" der beiden Komponenten gegenüber steigenden Temperatureinwirkungen die Auslösungsursache hierfür ist. Die paläomagnetische Überprüfung und Bestätigung des Sea-floor spreading andererseits machte diese ergänzende Einführung unabdingbar. Sie bildet zugleich die Grundlage konvektiver Prozesse, selbst solcher episodischen Ablaufs im Bereich des tieferen Erdmantels [8, 24].

2. Aspekte aus Hochdruck-festkörperphysikalischer Sicht

In diesen Teilzusammenhang wirkt naturgemäß der stoffliche Aufbau des Erdinneren mit hinein - durch das **m a t e r i a l s p e z i f i s c h e V e r h a l t e n** der **G e s t e i n s b e s t a n d t e i l e** (der Silikate, Oxide, Sulfide) - unter den jeweiligen tiefenbedingten Verhältnissen (von Druck, Temperatur und geochemischen Einflüssen), wodurch der Ablauf geodynamischer Prozesse beeinflusst wird, beispielsweise an Grenzschichten von Hochdruck-Phasenübergängen.

In diesem Erkundungsbereich genügt es nicht, die zu erwartende generelle Verdichtung der Materie mit wachsender Tiefe durch das Pauschalkonzept zunehmender Koordination und von Veränderungen im Bindungszustand allein zu charakterisieren. Die **G e s e t z m ä ß i g k e i t e n** für den Ablauf eines solchen Verdichtungs Vorgangs sind im Übrigen hinreichend bekannt, was hier an einigen Beispielen - zunächst am Quarz → Coesit → Stishovit-Übergang - kurz erläutert werden soll. ¹⁾

¹⁾ Siehe hierzu die in [7 - 9] zitierten weiteren Arbeiten des Verf.

Der erste Schritt dieser druckbedingten Umwandlung verändert noch nicht die Koordination (SiO_2 : $\langle 4 \rangle$), wohl aber die Quarzbesonderheiten - die Sperrigkeit des Gerüst-Silikattyps -; er bewirkt mithin nur eine Strukturänderung, wodurch die Dichte von 2,64 auf $\sim 3 \text{ g/cm}^3$ ansteigt.

Der zweite Schritt, der zunächst eine weitere Verdichtung auf $3,16 \text{ g/cm}^3$ erbringt, wirkt sich nunmehr bereits auf die Grund- (Konstruktions-) Einheit aller silikatischen Strukturen - die SiO_4 -Tetraeder - aus. Diese partiell kovalent gebundenen SiO_4 -Tetraeder [9] sind jedoch nicht unbegrenzt verdichtbar, da bei extremer Durohdringung der Elektronenhüllen der Gitternachbarn (einer notwendigen Folge der Kovalenz) die Abstoßungskräfte der Kernladungen dieser Partner exponentiell ansteigen, zumal die Abschirmung der Kernladungen durch die Elektronenhüllen infolge der Bündelung der Elektronen-Aufenthaltsbereiche (der sp^3 -Hybridzustände) vermindert wird ²⁾; kovalente Bindungen sind ja bekanntlich - im Gegensatz zu ionaren - gerichtet, und zwar von der Zentralpartikel zu den nächsten Nachbarn hin.

Bei weiter zunehmender Verdichtung wird der kritische Druckwert daher erst dann erreicht, wenn die wachsenden Abstoßungskräfte den Zusammenhalt des Gitterverbandes zu gefährden beginnen. Da ein Koordinationswechsel $\langle 4 \rangle \rightarrow \langle 6 \rangle$ die Nächstnachbardistanz vergrößert, ist dies die einzige verbleibende Möglichkeit für eine Anpassung an die Gegebenheiten, die dementsprechend bei weiterer Druckzunahme genutzt wird, wobei sich die Dichte in der Stishovit-Phase (SiO_2 : $\langle 6 \rangle$) auf $4,50 \text{ g/cm}^3$ erhöht.

Nun läßt sich aus bindungstheoretischer Sicht leicht nachweisen ²⁾, daß in dieser $\langle 6 \rangle$ -Koordination des SiO_2 kovalente Bindungen nicht entstehen können, weil die Vorbedingungen hierfür nicht erfüllbar sind. Da andererseits hier aber keine Möglichkeiten mehr für einen Ionengittertyp bestehen ²⁾, muß erwartet werden, daß die Stishovit-Phase metallisch gebunden ist (entsprechende experimentelle Tests stehen allerdings zur Zeit noch aus). Die metallische Bindung gewährleistet schließlich auch eine gleichmäßige (und damit bessere) Abschirmung durch die Existenz des quasifreien Elektronengases - des Charakteristikums dieses Festkörperzustandes.

Aus diesen hier kurz dargelegten Gründen entfällt daher in größeren Tiefen die Grund-(Bau-)Einheit der Silikatstrukturen, so daß für den stofflichen Aufbau oberhalb der Erdmantelbasis im wesentlichen Magnesio-Wüstit (ggf. Mehrfachoxide) neben Stishovit verbleibt, m.a.W. das Vierstoffsystem $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Zu einem solchen Ergebnis wird man übrigens auch von anderen Blickwinkeln aus und den ihnen zugeordneten Untersuchungen (RINGWOOD 1969 [15]; ANDERSON & JORDAN 1971 [3]; COOK 1972 [5]; GRAHAM 1973 [10]) geführt, d.h. unabhängig von den hier diskutierten hochdruck-festkörperphysikalischen Aspekten.

Die vorstehende Darstellung liefert jedoch darüber hinaus neue Gesichtspunkte zum geodynamischen Prozeß der Entstehung des **E r d k e r n s** :

²⁾ Siehe Anm. 1

Bekanntlich ging die 1948 entwickelte R A M S A Y - H y p o t h e s e erstens von einer planetaren Vorstellung aus (nämlich der These: Große Planeten besitzen einen höheren Dichtemittelwert als kleine), die seinerzeit wahrscheinlich erschien, inzwischen aber widerlegt wurde; zweitens unterstellte sie Olivin als Modellsubstanz für das Innere der Planeten, eine Annahme also, der durch die vorstehenden Ausführungen die Grundlage entzogen wurde; drittens postulierte sie für die äußere Kernregion demgemäß eine metallische Hochdruck - S i l i k a t phase, die trotz zahlreicher Versuche experimentell nicht bestätigt werden konnte (AL'TSHULER 1968 [2]). Außerdem würde eine solche verdichtete Festkörper-Hochdruckphase in ihrer Inkompressibilität (K) und Rigideität (μ) zwangsläufig erhöht sein, und zwar stärker als hinsichtlich ihrer Dichte (ρ), so daß $v_s \geq 0$ gelten müßte - entgegen dem globalen Beobachtungsbefund. Auch die Vernachlässigung dieses Umstands ist übrigens historisch verständlich, und zwar durch die 1948 noch vorhandene Unsicherheit über das volle Verschwinden der seismischen Scherungswellen (v_s) im äußeren Kernbereich - wie aus den Lehrbüchern dieser Zeit ersichtlich ist. Dieser ungenügende Erkundungsstand trug wesentlich mit dazu bei, das Konzept von RAMSAY weltweit bekannt zu machen und zunächst zu einer der Grundlagen werden zu lassen.

Inzwischen ist eine "Metallisierung" - allerdings von Oxiden (α -Fe₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃, NiO) - im statischen Mbar-Bereich experimentell nachgewiesen worden (KAWAI & MOCHIZUKI 1971 [11]). Für FeO steht eine entsprechende Bestätigung vorerst noch aus; da es sich aber hier ausschließlich um Übergangsmetalloxide handelt und bindungstheoretisch leicht der Nachweis erbracht werden kann, daß ein Übergang vom NaCl-Gittertyp dieser Oxide zum CsCl-Typ, d.h. ein Wechsel in der Koordination $\langle 6 \rangle \rightarrow \langle 8 \rangle$, zugleich einen Wechsel im Bindungszustand (vom kovalenten zum metallischen) bedeutet³⁾, ist aus Analogiegründen auch eine Metallisierung des Wüstits (FeO) zu erwarten.

Andererseits setzt $\mu = 0$ und damit $v_s = 0$ (in Übereinstimmung mit dem ausgewiesenen Beobachtungsbefund) einen fluiden Zustand voraus, wobei der Terminus "fluid" kennzeichnen soll, daß auch ein geringer Anteil feinsten Festpartikeln in der Schmelze koexistent sein kann (und zwar mit einer tiefenbedingt unterschiedlichen Verteilung), was - zumindest vorerst - nicht auszuschließen ist.

Gegen die W I E C H E R T s o h e E r d k e r n - H y p o t h e s e, die dem Aspekt der Fluidität bekanntlich Rechnung trägt, spricht andererseits neben zahlreichen anderen Gründen das geodynamische Entstehungsproblem, das beispielsweise anhand des ELSASSER-Konzepts eine den Schmelzwert überschreitende Temperatur für das Erdinnere voraussetzt - im Widerspruch zu kosmogonischen Aspekten (TREDER 1971 [19]). Auch könnte ein solcher Prozeßablauf nicht zu einer scharfen Mantel-Kern-Grenze führen, wie sie auf Grund des Beobachtungsbefundes seismischer Array-Stationen zu fordern ist (BOLT 1972 [4]; PHINNEY 1973 [13]).

Dieses Dilemma läßt sich beheben, wenn man berücksichtigt, daß die Kohäsionsenergie und damit auch die Schmelztemperatur des metallischen Zustandes unter der des kovalen-

³⁾ Siehe Anm. 1

ten Falles liegt (UBBELOHDE 1965 [20]). Man sollte daher erwarten, zumindest auf Grund des bisher vorliegenden bzw. verfügbaren Datenmaterials, daß die Materie der äußeren Kernregion aus geschmolzenen Bestandteilen der Oxidzone und Sulfiden oberhalb der Erdmantelbasis besteht, wobei die Schmelze eine Folge des druckbedingten Übergangs in den metallischen Zustand ist. Nur in diesem Zusammenhang ist Übereinstimmung mit dem gegenwärtigen Gesamtbefund erreichbar, worauf noch zurückzukommen sein wird.

Ein weiterer Aspekt folgt aus der experimentell belegten Tatsache, daß der Olivin-Spinell-Phasenübergang im oberen Erdmantel eine sprunghafte Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit (um 10^2) zur Folge hat (AKIMOTO & FUJISAWA 1965 [1]). Berücksichtigt man hierbei die festkörperphysikalischen Gesetzmäßigkeiten [7, 9], die diesem Hochdruck-Phasenübergang zugrunde liegen, so wird erkennbar, daß dieser Leitfähigkeitssprung nicht nur, wie mitunter angenommen wird, auf Fayalit beschränkt bleibt, sondern den überwiegenden Mischungsbereich des Olivins vom Fayalit bis 70 Mol-% Forsterit betrifft und so einen wesentlichen Teil des stofflichen Aufbaus des oberen Erdmantels - ausgenommen den forsteritreichsten Anteil des Olivins, der nachgewiesenermaßen den Übergang in die Spinellphase und den erwähnten Folgesprung nicht mitvollzieht [7, 9]. Ein Leitfähigkeitssprung im ersteren Fall erhöht andererseits zwangsläufig die Opazität der entsprechenden Olivinregion und behindert so den Wärmestrahlungsanteil, wodurch eine thermische Abschirmung (sogar größeren Ausmaßes infolge des beträchtlichen Olivinvorkommens) entstehen kann, die ihrerseits die Wärmeübertragung im Erdmantel und letztlich auch die Differentiation im Krustenbereich beeinflussen würde [7 - 9]. Je nach der Zusammensetzung reagiert ja der Olivin im Bereich {fa ... 70 fo} thermisch hindernd, dagegen im Restgebiet {80 fo ... 100 fo} wärmedurchlässig.

Eine solche Möglichkeit, die bisher völlig unbekannt war und erst aus hochdruckfestkörperphysikalischer Sicht erschlossen wurde, könnte dazu beitragen, die thermische Vorgeschichte der Erde und ihre Auswirkungen in Einklang zu bringen mit dem globalen geophysikalischen Beobachtungsbefund, beispielsweise mit der zweigipfligen hypsometrischen Charakteristik der Topographie, die auf unterschiedliche Entstehung der kontinentalen und ozeanischen Krustenregion verweist. Alle bisherigen Versuche in dieser Richtung (mit Hilfe von Erdexpansions- bzw. Ozeanisierungshypothesen) schlugen ja bekanntlich fehl [7, 8].

3. Aspekte aus planetarer Sicht

Die Einbeziehung vergleichender Untersuchungen innerhalb der "terrestrischen" Planetengruppe erbringt eine zweckdienliche Erweiterung des Betrachtungszusammenhangs und die Möglichkeit, entwicklungsbedingte Auswirkungen mitzuerfassen, wobei - wie sich zeigt - völlig neue Aspekte erkennbar werden, die anderenfalls unberücksichtigt bleiben würden.

Für solche Untersuchungen macht sich naturgemäß zunächst eine Analyse der Grenzen der Vergleichbarkeit erforderlich. Hierfür können

die druckbedingten Gradienten von Materieparametern verwendet werden. So zeigt beispielsweise die Inkompressibilität (K) im Erdmantel auffälligerweise einen nahezu linearen Verlauf - auch durch die Mantel—Kern-Grenze hindurch. Eine Überprüfung dieser zunächst überraschenden Tatsache anhand experimentell bestimmter $\partial K/\partial P$ -Werte (COOK 1972 [5]) für verschiedene Minerale und Substanzen zeigt, daß 1. nur die Werte für FeO , Fe_2O_3 , MgO und SiO_2 beim Druck von 1,37 Mbar an der Mantelbasis nahezu übereinstimmen, 2. die entsprechenden Werte für reines Fe und andere Materiebestandteile dagegen dort abweichen, während 3. in den übrigen Druckbereichen der Verlauf generell unterschiedlich ist (vgl. die Ausführungen in Kap. 2 über die Oxidregion an der Erdmantelbasis).

Bei vergleichenden Untersuchungen innerhalb der "terrestrischen" Planetengruppe kann daher nur dann auf analoge Verhältnisse wie an der Mantel—Kern-Grenze der Erde geschlossen werden, wenn außer der gleichen Zusammensetzung auch der gleiche kritische Druckwert vorliegt, was bei der Venus erst in größerer Tiefe und bei den anderen planetaren Nachbarn überhaupt nicht erreicht werden kann. Hierbei wurde das neue (eingegrenzte) **K e r n k o n z e p t** mit der experimentell bestätigten "Metallisierung" von Oxiden, aber ohne die inzwischen überholten weiteren Prämissen, zugrunde gelegt, das im übrigen die Fluiditätsbedingung erfüllt, von den geodynamischen Entstehungsproblemen dagegen befreit ist, während es dem terrestrischen Beobachtungsbefund gerecht wird (so beispielsweise der "seismisch scharfen" Markierung, auch von lateralen (topographischen) Abweichungen im Verlauf der Kern—Mantel-Grenze, den verschiedenen möglichen Formen von Kopplungen zwischen Kern und Mantel einschließlich der topographischen, dem Meteoritenbefund u.a.).

Ein Aspekt, der die geodynamischen Prozesse zweifellos entscheidend mitbestimmt hat, ist der Entwicklungsablauf innerhalb der Planetarregion Erde - Mond, wofür bekanntlich z.Z. drei unterschiedliche Hypothesengruppen in der Diskussion sind:

- I. gleichzeitige Entstehung von Erde und Mond (SCHMIDT 1948, ...);
- II. nachträgliche Mondabtrennung (DARWIN 1890; CAMERON & WISE 1963);
- III. nachträglicher Mondeinfang (GERSTENKORN 1955; UREY 1963; MACDONALD 1966).

Beginnen wir mit der Gruppe II, und zwar der Fission-Hypothese mit ihren Modifizierungen. Ihre Grundvoraussetzung ist eine Temperatur des Erdinneren nahe dem Schmelzwert, was zu Widersprüchen hinsichtlich der Entstehung des solaren Planetensystems führt - im Gegensatz zur Grundkonzeption einer kalten Aggregation kosmischen Staubes (SCHMIDT 1948/49; TREDER 1971 [19]).

Sodann ist es zweckmäßig, zunächst die sehr detaillierten Untersuchungen, die zur Gruppe III vorliegen, zu diskutieren, da so (wie man erwarten sollte) Kontrollkriterien gewonnen werden können, die zugleich für die erste Hypothesengruppe mitentscheidend sind.

Vorausgeschickt sei, daß ein Früheinfang wesentlich wahrscheinlicher sein würde als ein Späteinfang, was auch von der UREYSchen Theorie des Planetensystems bestätigt wird, wonach die Anfangsphase zahlreiche planetare Objekte in Monddimensionen aufgewiesen haben muß.

Der Verlauf eines Mondeinfangs und seiner Auswirkungen (die hier speziell interessieren) läßt sich nun im Detail untersuchen, und zwar anhand verschiedener Zeitskalen, wobei als Variationsparameter die Verzögerung der Rotationsenergiedissipation (φ) im Erdinneren (als Folge der Anelastizität des Erdkörpers) dient. Ausgangspunkt solcher Betrachtungen ist naturgemäß der gegenwärtige Wert von $\varphi = 2,25^{\circ}$, der jedoch von vornherein nicht notwendigerweise als charakteristisch für die gesamte Prozeßdauer angesehen werden muß.

Die derzeitige (aus astronomischen Beobachtungen folgende) Ausweitungsrate der Mondumlaufbahn ($1,2 \text{ cm/Jahr}$) würde mit der erwähnten Ausgangszeitkala zu einem Mondeinfang vor $1,2 \cdot 10^9$ Jahren führen - mithin also zu einem Späteinfang (mit seiner verminderten Wahrscheinlichkeit). Er würde des weiteren sprunghafte Änderungen in den terrestrischen und lunaren Daten bewirken, so beispielsweise 1. in der Umlaufsperiode des Trabanten (von einigen Tagen kurz nach dem Einfang auf 27,32 Tage jetzt), 2. in der Rotationsdauer der Erde (von minimal 9,9 Stunden auf 24 Stunden jetzt), was beispielsweise nicht ohne Auswirkungen auf das Verhältnis der Fliehkraft zur Anziehung (V_{FA}) am Äquator und damit auf den Abplattungsverlauf bleiben könnte.

Dieses Datenmaterial liefert Testkriterien - auch für die notwendigen Folgerungen aus den Hypothesengruppen I und II. Hierbei zeigt sich, daß solche Kontrolluntersuchungen Widersprüche aufdecken gegenüber den dynamischen Gesetzmäßigkeiten, und zwar sowohl bei II wie auch bei I.

Die zur Zeit einzige Ausnahme hiervon bildet die Mehr-Trabanten-Variante der Einfanghypothesengruppe III (MACDONALD 1966 [12]), die Früheinfänge voraussetzen würde, das abschließende Event der Mondentstehung dagegen erst vor $1,2 \cdot 10^9$ Jahren.

Ein weiterer Aspekt, der im vorliegenden Zusammenhang von Interesse ist, sind die krassen Unterschiede im Zustand der Atmosphäre zwischen der Erde und ihren beiden planetaren Nachbarn. Diese Diskrepanzen können ausschließlich als Sekundäreffekte verstanden werden, und zwar als Folge von photochemisch ausgelösten Reaktionen mit anschließenden Entweichprozessen (z.B. von H) und infolge vulkanischer Aktivität: Die Entstehung des dominierenden CO_2 -Gehaltes der Venus-Atmosphäre beispielsweise ist schwer verständlich ohne einen ursprünglichen Wassergehalt und unverständlich, wenn gegenwärtig Wasser noch vorhanden wäre.

Solche Veränderungen können nicht ohne physikochemische Auswirkungen auf die oberflächennahen Gesteinsverbände geblieben sein. Andererseits besteht aber ein direkter

Zusammenhang zwischen der rheologischen Mobilität von Zweikomponentensystemen (s. Kap. 1), der Verteilung von Kristallit- und Intergranularbereichen und der "Anfälligkeit" gegenüber strukturellen Defekten, wobei die letztere durch photochemische Reaktionen obiger Art und Ursache notwendigerweise verändert wird.

Die Paläogeodynamik muß somit auch diese Aspekte in ihre Betrachtungen mit einbeziehen, wofür die sich rasch weiterentwickelnde Raumforschung dem Long Range Programme of Solid Earth Studies das zusätzlich erforderliche, aber zur Zeit noch ausstehende Datenmaterial liefern wird.

Literatur

- [1] AKIMOTO, S.; FUJISAWA, H. Demonstration of the electrical conductivity jump produced by the Olivine—Spinel transition. *J. geophys. Res.* 70 (1965), S. 443 ff.
- [2] AL'TSHULER, L.V.; u.a. On the chemical composition of the Earth's core. *Izv. Acad. Sci. USSR, Phys. solid Earth* 1 (1968), S. 1-3
- [3] ANDERSON, D.L.; JORDAN, T. Composition and evolution of the mantle and core. *Science* 171 (1971), S. 1103-1112
- [4] BOLT, B.A. Structure of the Earth's core from seismological evidence. *Trans. amer. geophys. Union* 53 (1972), S. 599
- [5] COOK, A.H. The dynamical properties and internal constitution of the Earth, the Moon and the planets. *Proc. roy. Soc. London A* 328 (1972), S. 301-336
- [6] ELSASSER, W.M. Early history of the Earth. In: *Earth sciences and meteoritics*. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp. 1963
- [7] FRÖLICH, F. Festkörperphysikalische Untersuchungen im Zusammenhang mit Ergebnissen der Hochdruck-Hochtemperatur-Physik. In: *Einige Ergebnisse zum thermischen und elektrischen Verhalten von Mineralen und Gesteinen*, hrsg. v. H. STILLER, S. 65-89. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 17, Potsdam 1972
- [8] FRÖLICH, F. Komplexuntersuchungen an Prozeßmodellen zur Paläogeodynamik. In: *Geodynamische Probleme*, hrsg. v. H. STILLER, S. 1-57. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 21, Potsdam 1973

- [9] FRÖLICH, F.; u.a. Complex studies on variations of the secular behaviour in the Earth's mantle. Monographs on terrestrial, solar, and cosmic physics, Vol. I. Leipzig: Akadem. Verl.-Ges. Geest & Portig 1973
- [10] GRAHAM, E.K. On the compression of stishovite. Geophys. J. roy. astron. Soc. 32 (1973), S. 15-34
- [11] KAWAI, N.; MOCHIZUKI, S. Insulator-metal transition in NiO. Phys. Lett. A 36 (1971), S. 54-55
- [12] MACDONALD, G.J.F. In: The Earth - Moon system. London: Plenum Press 1966
- [13] PHINNEY, R.A. Seismological evidence on the core-mantle boundary. Trans. amer. geophys. Union 53 (1973), S. 600
- [14] RAMSAY, W.H. On the nature of the Earth's core. Monthly Not. roy. astron. Soc., Geophys. Suppl. 5 (1949), S. 409-427
- [15] RINGWOOD, A.E. Phase transformations in the mantle. Earth and planet. Sci. Lett. 5 (1969), S. 401-412
- [16] STILLER, H. Betrachtungen zum Näherungscharakter von Festkörpermodellen für das Erdinnere. In: Physikalische Parameter und seismische Geschwindigkeiten, hrsg. v. H. STILLER, S. 8-14. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 16, Potsdam 1972
- [17] STILLER, H.; LUCKE, O.; WAGNER, F.C. Physik der Erdkruste und des oberen Erdmantels. Fortschr. Physik 15 (1967), S. 755-791
- [18] STILLER, H.; VOLLSTÄDT, H. Festkörper unter hohen Drücken und Temperaturen. In: Einige Ergebnisse zum thermischen und elektrischen Verhalten von Mineralen und Gesteinen, hrsg. v. H. STILLER, S. 7-31. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 17, Potsdam 1972
- [19] TREDER, H.-J. Thesen zur Kosmogonie und Erdentstehung. Ber. dt. Ges. geol. Wiss. A 16 (1971), S. 201-205
- [20] UBBELOHDE, A.R. Melting and crystal structure. Oxford: Clarendon Press 1965
- [21] UREY, H.C. The planets, their origin and development. New Haven: Yale Univ. Press 1952

- [22] VOLLSTÄDT, H.;
SEIPOLD, U.;
WÄSCH, R. Experimentelle Möglichkeiten zur Untersuchung der
Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen unter
extremen Bedingungen.
Ber. dt. Ges. geol. Wiss. B 15 (1970), S. 313-327
- [23] WALZER, U. Übersicht zu Arbeiten über Konvektion im Erdmantel.
In: Geodynamische Probleme, hrsg. v. H. STILLER,
S. 58-62.
Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 21, Pots-
dam 1973
- [24] WALZER, U. A convection mechanism for explaining episodicity
of magmatism and orogeny.
Pure and appl. Geophys. (im Druck)

Beiträge zum stofflichen Zustand des Erdinnern
aus physikalischen Messungen unter extremen p,T-Bedingungen

von

H. VOLLSTÄDT und U. SEIPOLD

Zusammenfassung

Es wird versucht, verschiedene Modelle für die mögliche stoffliche Konfiguration des tieferen Erdinnern einander gegenüberzustellen. Im Mittelpunkt stehen dabei Betrachtungen zum Anteil von Schwefel und anderen leichteren Elementen beim Aufbau des Erdkerns. Grundlage der Diskussion sind eigene Messungen. Es werden zuerst die elektrischen Eigenschaften der genannten Substanzen studiert und dann ihr Zusammenhang mit dem Leitfähigkeitsverhalten tieferer Schichten der Erde diskutiert.

Summary

Some models for the possible chemical composition of the deeper Earth's interior are confronted. Considerations are centred concerning the portion of sulfur and other light elements in the structure of the Earth's core. The discussion is based on the authors' own measurements of transition metal chalcogenides under extreme conditions. At first the electrical properties of the materials are studied and then their connections discussed with the electrical behaviour of the Earth's deeper layers.

Резюме

Сделана попытка сравнить различные модели земных недр для возможных вещественных составов. Основным при этом явилось рассмотрение участия серы и других легких элементов в строении земного ядра. Исходными данными служили собственные измерения электрических свойств переходных металлов халькогенидов при экстремальных условиях, которые сравнивались поведением проводимости глубоких слоев Земли.

1. Einleitung

Ein Teilgebiet geophysikalischer Forschungen beschäftigt sich mit dem Nachweis von Diskontinuitäten im tieferen Erdinnern sowie der Erforschung des stofflich-strukturellen Aufbaues des unteren Erdmantels. Neben seismologischen Untersuchungen einerseits sowie interpretatorischen und theoretischen Arbeiten andererseits stellen hochdruckphysikalische Laborexperimente ein wichtiges Bindeglied dar.

Die Verhältnisse im Erdinnern sind infolge der sich gegenseitig überlagernden Wirkungen mehrerer Komponenten so kompliziert, daß der Informationsgehalt verschiedener Quellen voll ausgeschöpft werden muß, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten. Für die experimentellen Untersuchungen bietet sich danach nur eine komplexe Anwendung der verschiedensten physikalischen, chemischen und mineralogischen Methoden an.

Eine Gewinnung immer zuverlässigerer Kenntnisse über die stofflichen Verhältnisse des Erdinnern ist auf zwei Wegen zu erreichen:

1. Vervollkommnung der Technologie zur Erzeugung höherer statischer Drücke bzw. Schaffung neuer Methoden zur Erzeugung extrem hoher Drücke mit den entsprechenden Meßmöglichkeiten für mechanische und Leitfähigkeitsparameter. Das bedeutet zugleich eine entsprechende Stoffauswahl für diese extremen Bedingungen.
2. Auf der anderen Seite bietet sich eine streng physikalisch-chemische Betrachtung von Stoffzusammenhängen in solcher Weise an, daß sich daraus berechnete Extrapolationen und Analogien herleiten lassen. Dabei soll von Einzelverbindungen zu logisch zusammenhängenden Stoffsystemen übergegangen werden, mittels deren man durch eine komplexe Betrachtungsweise zu qualitativ neuen Ergebnissen zu gelangen hofft.

Es ist un schwer abzuleiten, daß für umfassende Kenntnisse über die Verhältnisse im Erdinnern nur die konsequente, in einer vernünftigen Relation erfolgende Anwendung beider Wege erfolgversprechend ist.

Für das Verständnis der nachfolgend erläuterten Meßergebnisse ist eine tabellarische Zusammenstellung der eingesetzten Hochdruckapparaturen und entsprechenden Verfahren ausreichend. Es sei auf eine Reihe von Arbeiten hingewiesen, in denen die technischen Details des Hochdruckgeräteparkes des Zentralinstituts für Physik der Erde dargestellt werden [1, 4, 5].

Tabelle 1. Gerätepark der Hochdruckkammern sowie Verfahren am Zentralinstitut für Physik der Erde

| Hochdruckkammertyp | Druck/Temperatur | Gemessene Parameter, Bemerkungen |
|---|----------------------------------|---|
| 1. BRIDGMAN-Doppelstempel-Apparatur | 110 kbar/20 °C 40 kbar/300 °C | elektrischer Widerstand, DK |
| 2. Doppel-Diamantstempel-Apparatur "Squeezer" | 110 kbar/20 °C | optische und röntgenoptische Parameter, Druckkalibrierung |
| 3. Belt (II) | 60 kbar/1700 °C | Phasenübergänge, Hochdruck-synthese |
| 4. Stempel-Zylinderanordnung | 20 kbar/20 °C | Longitudinalwellengeschwindigkeit |
| 5. Triaxial-Druckeinrichtung | 50 kbar/20 °C | Ultraschall, Anisotropie, Temperaturleitfähigkeit |
| 6. Hydrostatische Druckkammern | 3 kbar/20 °C | vorwiegend für Messungen an Gesteinen: elektrische, thermische und elastische Parameter |

2. Meßergebnisse

Aus den verschiedensten Gründen, die im letzten Teil erläutert werden sollen, ist anzunehmen, daß die Sulfide der 3d-Übergangsmetalle eine wesentliche Rolle beim Aufbau der tieferen Erdschichten spielen. Diese Vermutung wird in letzter Zeit u.a. dadurch gestützt, daß im Mondmaterial als bisher einziges Sulfid Troilit - reines FeS - gefunden wurde.

Da über die physikalischen Eigenschaften dieser Verbindungen unter den Bedingungen des tieferen Erdinnern sehr wenig bekannt ist, wurde begonnen, zuerst die elektrischen Eigenschaften systematisch unter hohen Druck- und Temperaturverhältnissen zu untersuchen. Gegenüber den Silikaten z.B. besitzen die Sulfide recht hohe Leitfähigkeiten, die in viel geringerem Maße durch zufällige äußere Faktoren beeinflußt und so mit erheblich größerer Berechtigung als echte Materialparameter betrachtet werden können. Vom physikalischen Standpunkt sind die betrachteten Sulfide insofern von großem Interesse, als sie hinsichtlich des Absolutwertes der Leitfähigkeit zwischen den typischen Halbleitern und den Metallen stehen. Vereinfacht dargestellt ist zu erwarten, daß bei steigendem Druck die Stärke der atomaren Wechselwirkung wächst und es zu einer Verringerung der Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband kommt, d.h. die Leitfähigkeit also erheblich ansteigt und somit der metallische Zustand angenähert wird.

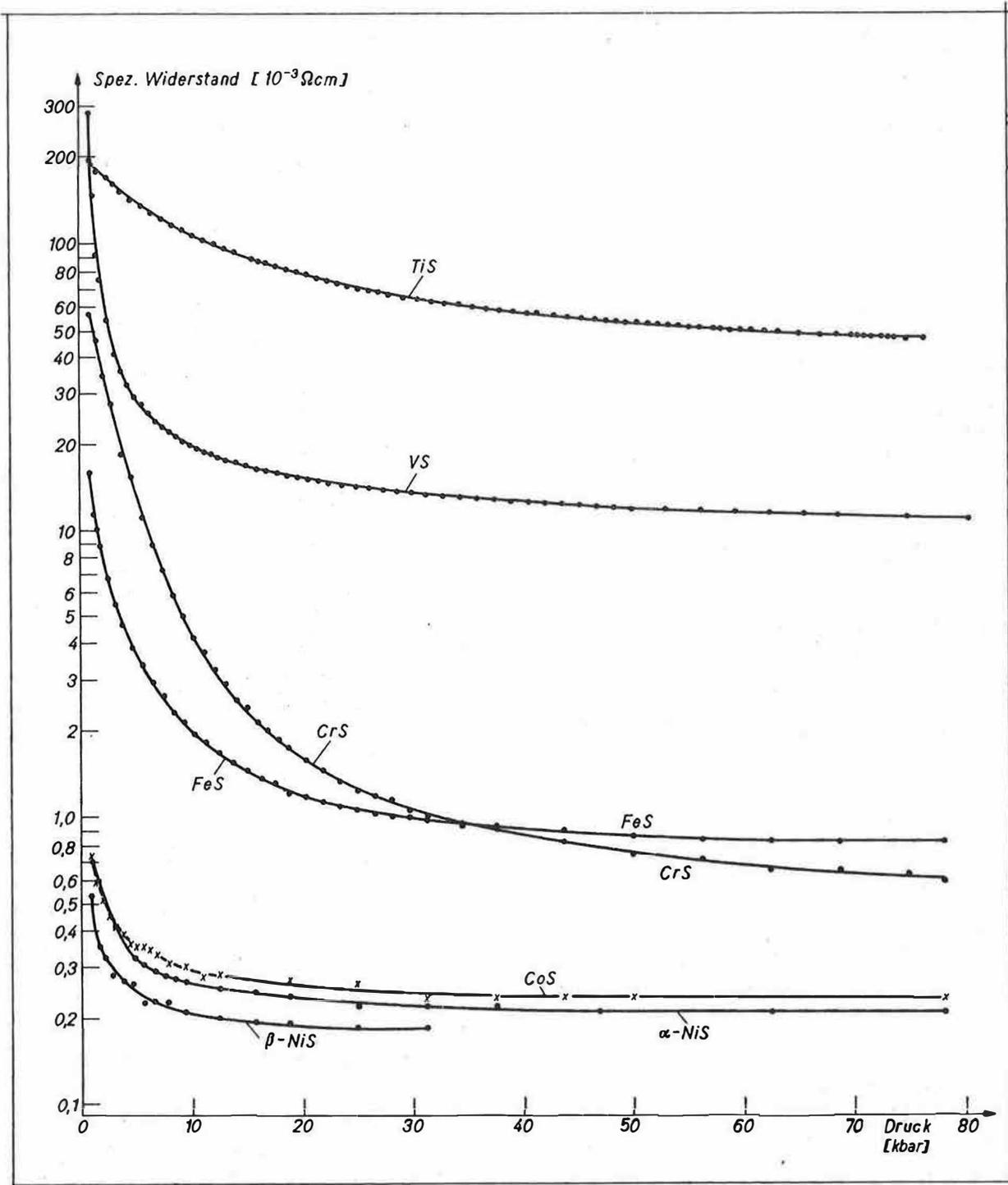


Abb. 1. Druckabhängigkeit des spez. Widerstandes von TiS, VS, CrS, FeS, CoS, α -NiS, β -NiS

Die Druckabhängigkeit des spezifischen Widerstandes der einzelnen Sulfide ist recht unterschiedlich. Wie Abb. 1 ausweist, wird bei den Co- und Ni-Sulfiden bereits bei niedrigen Drücken eine hohe Leitfähigkeit in der Größenordnung niedrigleitender Metalle (z.B. Hg, Bi) erreicht. Bei höheren Drücken wird nur eine geringe Druckabhängigkeit beobachtet. Überraschend ist das ähnliche Verhalten der beiden NiS-Phasen trotz der unterschiedlichen Struktur (NiAs - Millerit). Die elektrische Leitfähigkeit von TiS und VS liegt um etwa zwei Größenordnungen niedriger als beim NiS. Außerdem existiert hier auch bei relativ hohen Drücken noch ein erheblicher Druckkoeffizient. - Die Sulfide von Co und Fe liegen in ihrem elektrischen Verhalten zwischen den erläuterten Gruppen.

Das MnS nimmt unter den 3d-Übergangsmetallsulfiden eine Sonderstellung ein (Abb. 2). Das ist sicher auf die Tatsache zurückzuführen, daß es - neben MnSe - als einzige Verbindung der behandelten Gruppe NaCl-Struktur besitzt. Die elektrische Leitfähigkeit ist um 4 Größenordnungen geringer als bei den Sulfiden der NiAs-Struktur, bei der in [001]-Richtung Metall-Metall-Wechselwirkungen möglich werden können. Auffällig ist ferner die starke Abhängigkeit des Widerstandes vom Druck, die auch noch bei sehr hohen Drücken beträchtlich ist. Bei etwa 9 kbar tritt ein Maximum auf, das eventuell durch eine Strukturumwandlung bedingt sein kann. Nach Röntgenuntersuchungen von NEUHAUS u.a. [3] wurde eine Strukturumwandlung bei ca. 100 kbar festgestellt. Diese müßte sich auch im elektrischen Verhalten dokumentieren, wurde bei unseren Versuchen bis 110 kbar jedoch bisher nicht nachgewiesen. Auch bei MnSe fehlen bei entsprechend hohen Drücken derartige Diskontinuitäten. - Eine starke Druckabhängigkeit der Leitfähigkeit ließ sich auch bei MnTe (NiAs-Struktur) nachweisen. Allgemein liegt nahe, die Nutzung dieses Effektes für den Aufbau von Drucksensoren zu versuchen. Dafür sind jedoch noch eine Reihe von Arbeiten erforderlich.

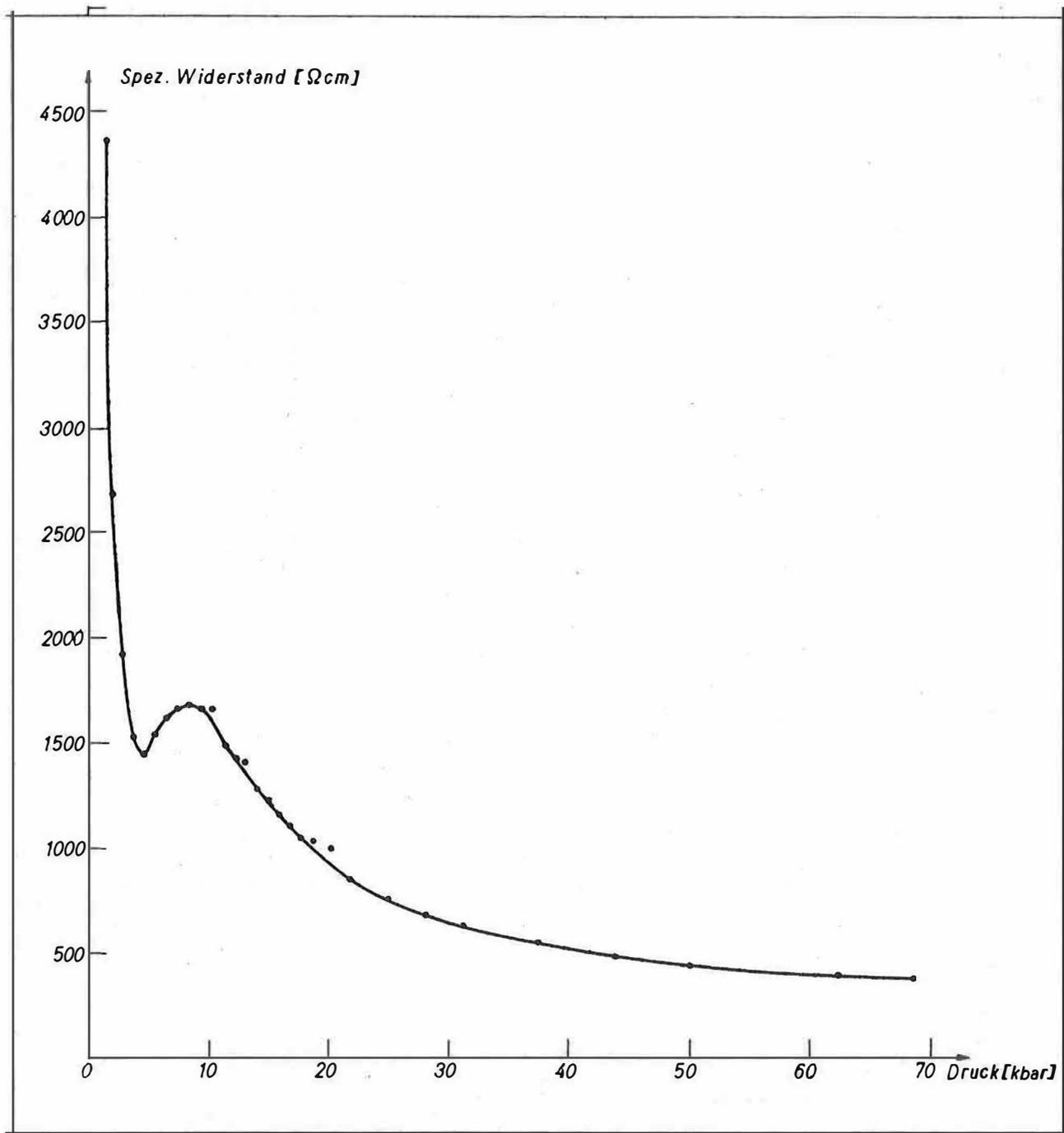


Abb. 2. Druckabhängigkeit des spez. Widerstandes von MnS

Von besonderer Bedeutung ist die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit, die bei Eisen- und Titansulfiden untersucht wurde (Abb. 3). Es ergibt sich die erwartete

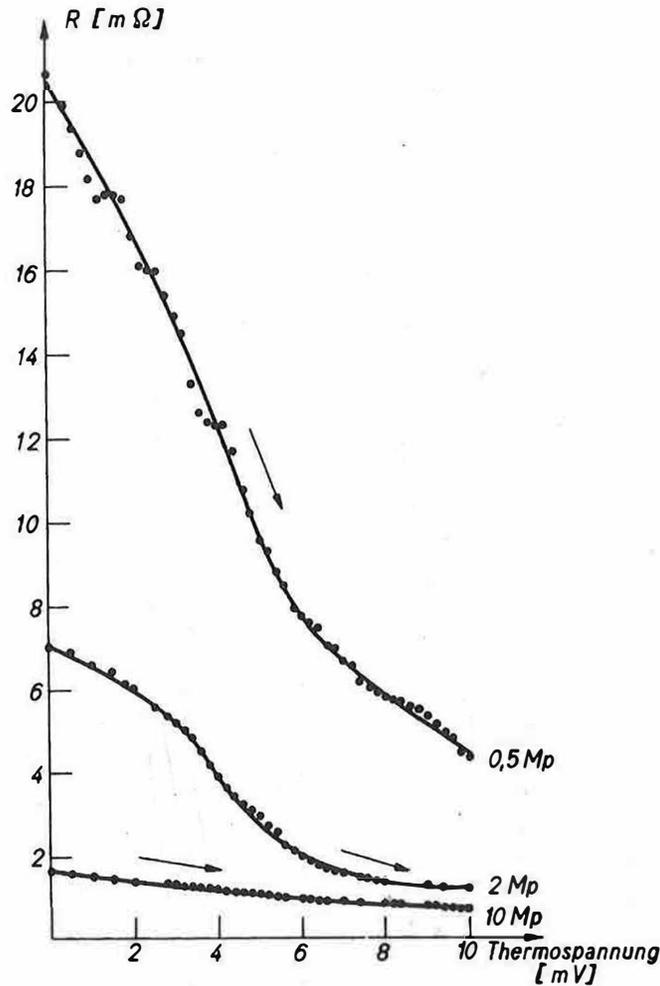


Abb. 3. Temperaturabhängigkeit des Widerstandes verschiedener Proben der gleichen Charge FeS Nr. 24

Abnahme des Widerstandes mit steigender Temperatur, deren Einfluß sich mit zunehmendem Druck verringert. Offensichtlich ist dieser Umstand für das Eisensulfid typisch und nicht ohne weiteres zu verallgemeinern. Er hängt sicher mit der bei Fe-Einkristallen beobachteten α -Anomalie zusammen.

Der Einfluß der Entstehungsbedingungen auf die Zusammensetzung der Eisensulfide wurde ebenfalls untersucht (Abb. 4). Ausgangspunkt war die Tatsache, daß die auf der Erde gefundenen Minerale dieser Gruppe stets mit einem Schwefelüberschuß vorkommen, also FeS_x ($x > 1,00$); besonders häufig ist die Zusammensetzung Fe_7S_8 - Pyrrhotin.

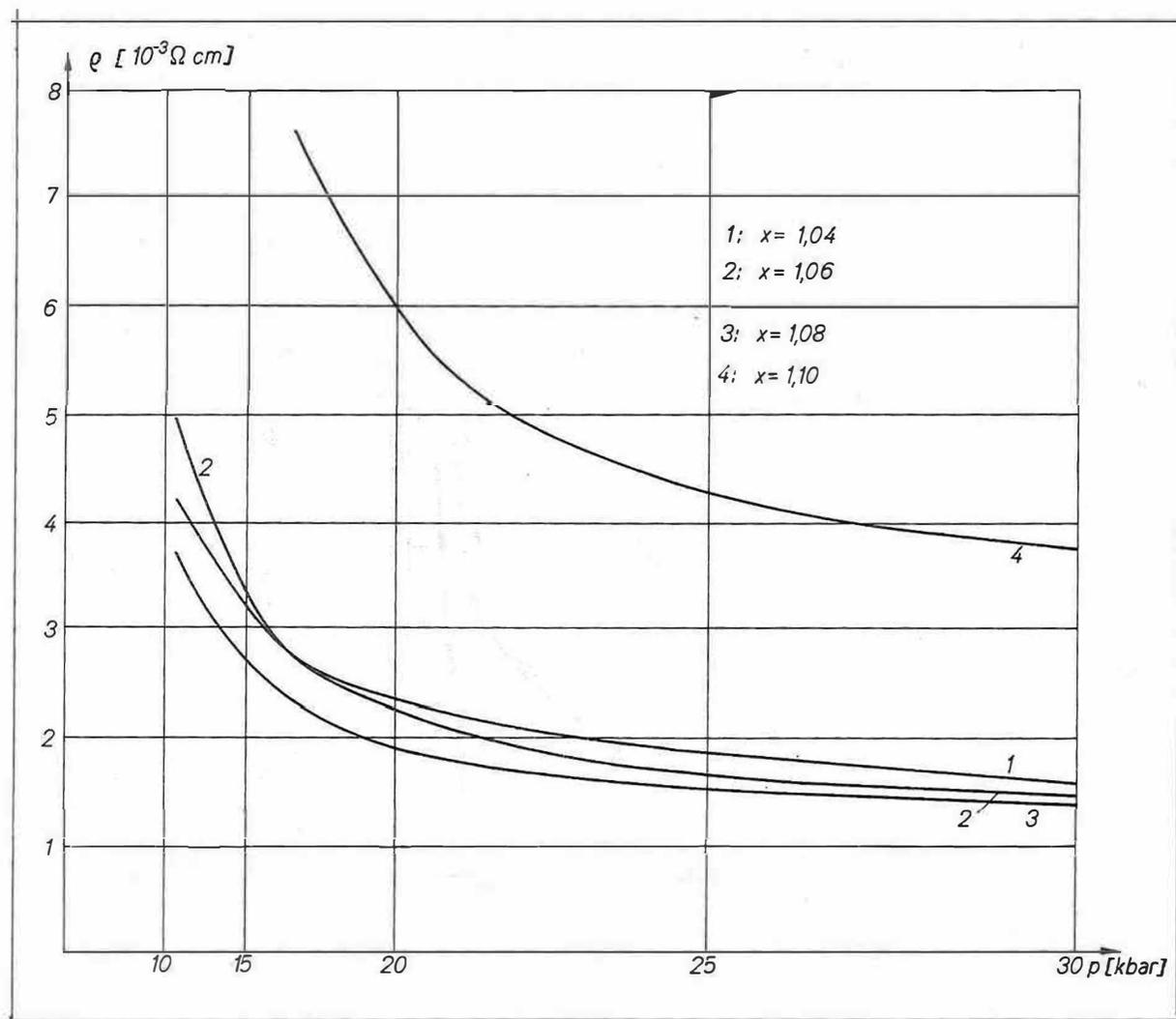


Abb. 4. Spezifischer Widerstand
 $\rho = \rho(p)$ für FeS_x

FeS mit stöchiometrischer Zusammensetzung ist - wie bereits erwähnt - nur aus Meteoriten und vom Mond bekannt. Unsere Untersuchungen haben ergeben, daß sich die Zusammensetzung zunehmend zum Troilit hin verschiebt, wenn ein Eisenüberschuß vorhanden ist. Ferner wird das Reaktionsprodukt durch die Höhe der Temperatur und die Einwirkungsdauer beeinflusst. - Die auftretenden Unterschiede in den Kurven sind mehr quantitativer als qualitativer Art.

3. Interpretation

Aus experimentellen Untersuchungen zum Olivin-Spinell-Übergang konnten die modellmäßigen Vorstellungen zum Mantelaufbau präzisiert werden. Danach kann mit zunehmender Tiefe (steigendem Druck) ein Wechsel im Bindungstyp auch ohne Koordinationswechsel eintreten. Aus der Druckabhängigkeit des Quarzes konnten Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Oxidschicht im Erdmantel gezogen werden.

Aus den zahlreichen Hochdruckresultaten ergibt sich für die pauschale Charakteristik des stofflichen Aufbaus des Erdmantels das folgende Vierstoffsystem ¹⁾, das auch die tiefenbedingten Veränderungen des stofflichen Aspektes richtig wiedergibt (Abb. 5):

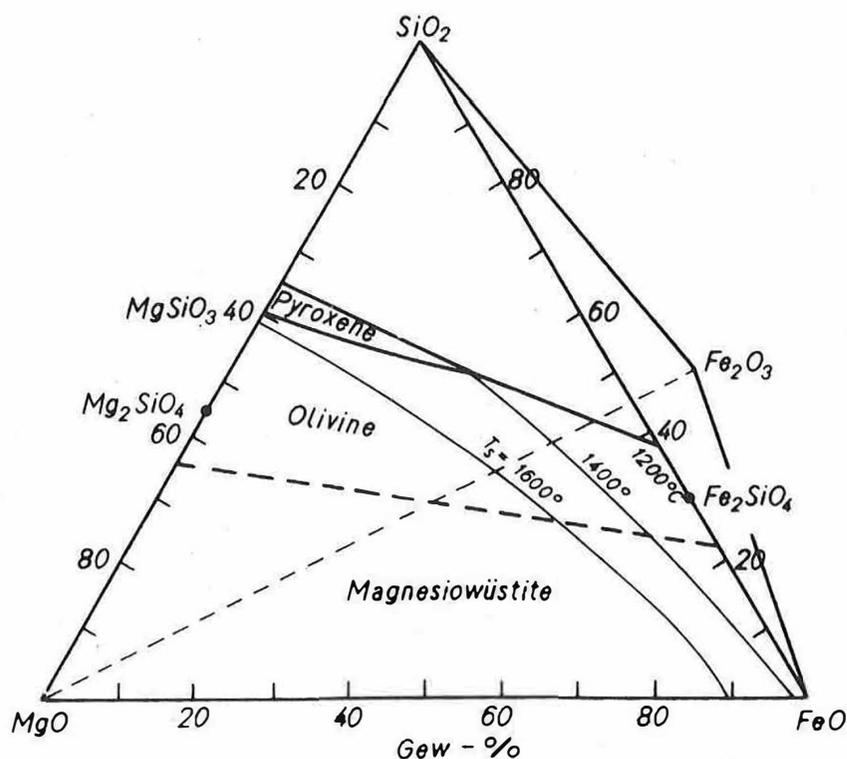


Abb. 5. System MgO-FeO-Fe₂O₃ - SiO₂ ; nur binäre Mischkristallbildung, keine ternären Verbindungen

1) F. Frölich, persönl. Mitteilung

1. Die oberflächennahen sauren Minerale gruppieren sich um die SiO_2 -Spitze, wobei die Alumosilikate diese Spitze geringfügig in die eine oder die andere Richtung verschoben, je nachdem ob das durch die Substitution $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Si}^{4+}$ gestörte Ladungsgleichgewicht entweder durch Alkali-Kationen (Na, K) oder durch Erdalkalien (Ca, ...) kompensiert ist.
2. Mit zunehmender Tiefe wächst die Basizität bei fallendem SiO_2 -Gehalt. Es folgt die Olivinregion, wobei die $\langle 4 \rangle$ -Koordination der Spitze durch die Kombination $\langle 4 \rangle \rightarrow \langle 6 \rangle$ abgelöst wird.
3. Aus den bekannten Gründen kann sich diese Region jedoch nicht bis zur Mantelbasis fortsetzen, so daß
4. in den tieferen Lagen des Erdmantels eine Magnesiowürstite-Zone entsteht mit Stishovit und anderen (Mehrfach-)Oxiden, wobei hier wieder eine einheitliche Koordination - nämlich $\langle 6 \rangle$ - und (abgesehen vom Stishovit) pauschal kovalente Bindung bestehen.
5. Auf Grund bindungstheoretischer Untersuchungen läßt sich ferner nachweisen, daß bei weiter steigendem Druck die NaCl-Struktur der Oxide in die CsCl-Phase umgewandelt wird, die metallisch ist, da die Bedingungen für Kovalenz in ihrer $\langle 8 \rangle$ -Koordination nicht mehr erfüllbar sind. Diese Metallisierung der Oxide wurde im Übrigen bereits durch statische Hochdruckexperimente von KAWAI & MOCHIZUKI [2] bestätigt.

Beim Übergang zur Diskussion der Stoffverhältnisse im Erdkern ergeben sich zwei Varianten:

1. Die eine schließt an die eben erläuterten Betrachtungen zum unteren Erdmantel an:
 - Es ist ein ausreichender Gehalt an FeO vorhanden.
 - Aus dem durch Schockwellenuntersuchungen berechneten seismischen Parameter Q von Fe_3O_4 kann man einen für FeO unter Kernverhältnissen günstigen Wert ableiten.
 - Eine Mischung von Fe und FeO ergibt ebenfalls einen den Verhältnissen entsprechenden Wert. Dabei ist das Fe/FeO-Verhältnis abhängig von der Dichte des FeO unter den Bedingungen des Erdkerns; d.h., je höher die Dichte des FeO, desto höher sein Anteil.
 - Aus der Extrapolation der Untersuchungen von KAWAI lassen sich auch die entsprechenden Leitfähigkeiten für den Erdkern erwarten.

Denkbar ist schließlich - nicht zuletzt aus der Analogie zu den Chalkogeniden - auch die Zusammensetzung Fe_3O oder Fe_2O für den Erdkern. Diesem Problem soll in Zusammenarbeit mit sowjetischen Kollegen nachgegangen werden.

2. Als zweite Variante ist das Vorkommen von Schwefel als leichterem Element im Kern zu diskutieren (vgl. die Meßergebnisse in Kap. 2). Dafür lassen sich die folgenden Argumente anführen, die sich zum Teil auch aus unseren Untersuchungen ergeben:

a) In der Kruste und im oberen Mantel ist Schwefel nur geringfügig vorhanden. Ursache dafür kann sein:

- S war nie in einem wesentlichen Gehalt vertreten, bedingt durch eine präterrestrische Fraktionierung.
- Hohes Temperaturfeld bei der Erdbildung - dann müßten jedoch auch die übrigen volatilen Elemente fehlen.
- Bei der Erdabkühlung setzte sich der Kern als eine schwefelreiche Eisenschmelze ab.

b) Die geforderten Dichteverhältnisse würden auch durch einen entsprechenden Schwefelgehalt befriedigt.

c) Die verschiedenen Verbindungen zwischen Eisen und Schwefel lassen die für das Erdinnere zu erwartenden Leitfähigkeiten zu.

Sollte FeS neben Fe im Erdinnern vorkommen, so spricht die Druckstabilität des FeS dagegen, wenn man es einzeln betrachtet. Es ist jedoch bekannt, daß FeS im Sinne einer eutektischen Phase Fe-FeS als Schmelze existiert. Dieses Eutektikum liegt bei ca. 1000 °C und besitzt eine sehr geringe Druckabhängigkeit. Das würde wiederum die oben formulierte Möglichkeit des Absinkens einer Fe-FeS-Schmelze unterstützen, da sie als erste gebildet wird und von hoher Dichte und niedriger Viskosität ist.

Literatur

- [1] FRÖLICH, F.; et al. Complex studies on variations of the secular behaviour in the Earth's mantle.
Leipzig: Akad. Verl.-Ges. Geest & Portig 1973
- [2] KAWAI, N.; Insulator-metal transition in NiO.
MOCHIZUKI, S. Solid State Comm. 9 (1971), S. 1393-1395
- [3] NEUHAUS, A.; et al. Über Phasen- und Materie-Zustände in den tieferen und tiefsten Erdzonen.
Geol. Rdsch. 57 (1968), S. 972-1001
- [4] STILLER, H.; Festkörper unter hohen Drücken und Temperaturen.
VOLLSTÄDT, H. In: Einige Ergebnisse zum thermischen und elektrischen Verhalten von Mineralen und Gesteinen, S. 7-31.
Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 17,
Potsdam 1972

[5] VOLLSTÄDT, H.;
SEIPOLD, U.;
WÄSCH, R.

Experimentelle Möglichkeiten zur Untersuchung der
Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen unter
extremen Bedingungen.

Ber. dt. Ges. geol. Wiss. B 15 (1970) 3/4,
S. 313-327

Untersuchung seismischer Oberflächenwellen im Hinblick
auf Beziehungen zur Geodynamik

von

H. NEUNHÖFER, D. GÜTH und P. MALISCHEWSKY

Zusammenfassung

Aus der Interpretation seismischer Oberflächenwellen können Angaben über die momentane Tiefenverteilung von elastischen und von gewissen anelastischen Materialparametern gewonnen werden. Sie stellen eine mittelbare Information zur Geodynamik dar. Es werden einige theoretische und praktische Probleme diskutiert, die die Dispersion und die Dämpfung von RAYLEIGH-Wellen und das Verhalten von Oberflächenwellen an einer Diskontinuität betreffen. Die angegebenen Beobachtungsbeispiele beziehen sich auf das Gebiet von Mitteleuropa.

Summary

The interpretation of seismic surface waves results in statements about the recent depth distribution of elastic and some inelastic parameters of the material in the Earth's interior. They include indirect information regarding geodynamics. Some theoretical and practical problems concerning dispersion and attenuation of RAYLEIGH waves and the behaviour of surface waves at a discontinuity are discussed. The given examples of the observations are related to the area of Central Europe.

Резюме

Из интерпретации сейсмических поверхностных волн получаются данные относительно моментального распределения глубин упругих и определённых неупругих параметров среды. Они являются посредственной информацией к геодинамике. Дискутируются некоторые теоретические и практические проблемы, которые касаются дисперсии и демпфирования волн Рэлея и поведения поверхностных волн относительно прерывности. Указанные примеры наблюдения относятся к территории средней Европы.

1. Einleitung

Bei der Konzipierung des Geodynamik-Projektes spielt die Seismologie eine nicht unbedeutende Rolle. Das hat beispielsweise einen Grund darin, daß seismische Aktivitäten als unmittelbarer Ausdruck geodynamischer Prozesse angesehen werden können. Die räumliche Verteilung der Hypozentren von Erdbeben gibt nämlich direkt an, in welchen Zonen der Erde Spannungen akkumuliert werden, die schließlich zu Bruchvorgängen und bleibenden Verschiebungen führen können. Durch die seismische Überwachung wurden auf diese Weise u.a. wichtige Erkenntnisse zur globalen Plattentektonik gewonnen. Neben solchen unmittelbaren Hinweisen kann die Seismologie auch mittelbare liefern. Es sei daran erinnert, daß im Zusammenhang mit dem Bestreben, Erdbeben vorherzusagen, von einer Reihe von Autoren - u.a. NERSESOV et al. [6], MJACKIN & ZUBKOV [5] - festgestellt wurde, daß vor starken Erdbeben Änderungen der seismischen Geschwindigkeiten im Herdgebiet beobachtet werden können. Alle diese geschilderten Zusammenhänge zwischen seismologischen Beobachtungen und ihren Ursachen beruhen auf relativ kurzzeitigen Veränderungen und helfen, die rezente Geodynamik zu charakterisieren.

Dem stehen andere Aussagen zur Seite, für die entweder wegen der Kürze der mit Messungen belegten Zeit oder auch wegen der heute geltenden Schranken der Meßgenauigkeit keine zeitlichen Veränderungen der geometrischen oder Materialparameter nachweisbar sind. Hierzu gehört, nimmt man seismisch aktive Gebiete aus, die Ableitung von Modellen für die Geschwindigkeits-Tiefen-Verteilung longitudinaler und transversaler seismischer Wellen. Eine Methode, solche Modelle zu erhalten, besteht in der Untersuchung seismischer Oberflächenwellen und der Inversion der erhaltenen Dispersionskurven. Die Ergebnisse sind als eine Momentaufnahme des Untersuchungsgebietes bezüglich der elastischen und u.U. auch gewisser anelastischer Parameter im Untergrund anzusehen, aus denen in der Kombination mit anderen Resultaten auf rezente, langsame oder auch auf abgeschlossene fossile geodynamische Vorgänge zu schließen ist.

Verteilt über die ganze Erde, sind im Rahmen des Upper Mantle Project zahlreiche Untersuchungen an seismischen Oberflächenwellen durchgeführt worden. Darauf aufbauend war es möglich, zunächst von der Interpretation der einzelnen Dispersionskurven abzugehen und zu einer Generalisierung in Form einer Klassifizierung unter Beachtung geologischer Gesichtspunkte zu kommen. Entsprechende Ergebnisse wurden von KNOPOFF [1] vorgelegt, der zwischen Ozeanen, Schilden, Hochgebirgen, Riften und aseismischen Kontinenten signifikante Unterschiede der Dispersion von RAYLEIGH-Wellen aufzeigt. Seine zusammenfassenden Ergebnisse sind in Abb. 1 zitiert, und sie zeigen, daß sich die Bereiche, in denen die Dispersionskurven für die genannten geotektonischen Einheiten liegen, zwischen den Perioden 20 und 150 s abschnittsweise deutlich unterscheiden. Die Inversion führt zu den in derselben Abbildung dargestellten generalisierten Tiefenverteilungen der Sehergeschwindigkeit, die nur bei Ozeanen und aseismischen Kontinenten deutlich eine Low-velocity-Schicht im oberen Erdmantel erkennen lassen. Mit dieser Generalisierung ist ein sehr wichtiges Ergebnis des Upper Mantle Project skizziert. An der Erweiterung dessen können die Untersuchungen rezenter und fossiler Geodynamik gemessen werden.

Geht man von einem Untersuchungsgebiet in Mittel- und Osteuropa aus, so muß man den Aspekt rezenter Geodynamik etwas in den Hintergrund rücken. Von Interesse ist hier die Erlangung von gesicherten Angaben über elastische und anelastische Parameter in relativ kleinen Gebieten. Dazu zählen im genannten Untersuchungsgebiet vor allem der Rand der Osteuropäischen Tafel und der Übergang zum variszisch gefalteten Gebiet (Bereiche der TORNQUISTschen Linie und des Mitteldeutschen Hauptabbruches).

Mit Hilfe von seismischen Oberflächenwellen ist man prinzipiell dazu in der Lage, ein Untersuchungsgebiet vertikal nach der Scherwellengeschwindigkeit zu gliedern, Dämpfungsbestimmungen durchzuführen und Diskontinuitäten mit einer vertikalen Erstreckung zu erkunden. Im folgenden soll darüber anhand von einigen experimentellen und theoretischen Ergebnissen berichtet werden.

2. Horizontale Diskontinuitäten

Wie allgemein bekannt ist, sind die Materialparameter in der Erde mit der Tiefe veränderlich und beeinflussen die Ausbreitung seismischer Oberflächenwellen. Man geht in erster Näherung davon aus, daß die Tiefenabhängigkeit durch stückweise konstante Funktionen ausgedrückt wird, was zur Annahme horizontaler Diskontinuitäten führt, wie z.B. der nach CONRAD und MOHOROVIČIĆ benannten. In einem so definierten Medium sind Oberflächenwellen dispersiv, was durch die Dispersionsrelationen

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{\gamma}(\gamma, \alpha_1, \beta_1, \rho_1, H_1, k) = 0 \quad \text{für RAYLEIGH-Wellen} \\ \text{und} \\ g_{\gamma}(\gamma, \beta_1, \rho_1, H_1, k) = 0 \quad \text{für LOVE-Wellen} \end{array} \right.$$

beschrieben wird. Dabei sind α_1 , β_1 und ρ_1 die Geschwindigkeiten von longitudinalen und transversalen Wellen sowie die Dichte in der Schicht 1, H_1 die Schichtdicke, γ die Phasengeschwindigkeit, k die Wellenzahl und γ der Modenindex.

Die Analyse von Seismogrammen liefert Dispersionskurven $\gamma_o(k)$. Wegen der Vieldeutigkeit ist keine direkte Inversion bezüglich der interessierenden Tiefenabhängigkeit der Materialparameter möglich, sondern es müssen Modelle aufgestellt werden, welche die beobachtete Dispersionskurve gut genug erklären. Die Vieldeutigkeit ist eingeschränkt, da das als gültig angenommene Modell für möglichst viele Moden die Beobachtungen annähern soll, vor allem aber auch geophysikalisch sinnvoll sein muß.

Es wird in den meisten Fällen, in denen Oberflächenwellen interpretiert werden, vorausgesetzt, daß das Material elastische Eigenschaften hat. Das ist zweifellos besonders für bestimmte Tiefenbereiche nur eine grobe Annäherung, aber die erhaltenen Ergebnisse rechtfertigen dieses Vorgehen durchaus. In Abb. 2 wird die Dispersion von RAYLEIGH-Wellen dargestellt, die für den Nordteil und den Südteil der DDR erhalten worden ist. Die Grenze zwischen beiden Gebieten liegt etwa am Mitteldeutschen Haupt-

abbruch. Gleichzeitig enthält die Abbildung die daraus resultierenden Modelle für die Tiefenabhängigkeit der Soherwellengeschwindigkeit. Es zeigen sich dabei Unterschiede zwischen den beiden Gebieten in der Ausbildung von Zonen geringerer Geschwindigkeit in der Erdkruste, des Kontrastes an der CONRAD-Diskontinuität und der Größe der Soherwellengeschwindigkeit unterhalb der MOHOROVICIC-Diskontinuität.

In letzter Zeit ist man dazu übergegangen, die Voraussetzung, daß sich die Oberflächenwellen in einem rein elastischen Medium ausbreiten, fallenzulassen und Modellrechnungen auch für viskoelastische Medien durchzuführen (s. SEIDL [9]). Damit zeichnet sich ein Trend ab, noch mehr Informationen aus der Dispersion von Oberflächenwellen zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit, das Verhalten von Oberflächenwellen in geschichteten dispersiven Medien mit Hilfe der Störungstheorie zu beschreiben, deuten ŽARKOV und OSNAČ [11] an.

Den Haupteinfluß auf die Dispersion von Oberflächenwellen hat die Tiefenverteilung der Soherwellengeschwindigkeit, d.h., durch eine Inversion kann in erster Linie eben diese Tiefenverteilung abgeleitet werden. Die Soherwellengeschwindigkeit ist aber deshalb besonders aufschlußreich, weil ihre Verminderung oft auf eine Vergrößerung der potentiellen Möglichkeit zu geodynamischen Prozessen hinweist.

3. Dämpfungsbestimmungen

Da die realen Medien nicht ideal-elastische Eigenschaften haben, unterliegen die sich in ihnen ausbreitenden Wellen einer Dämpfung. Es ist in der Seismologie üblich, als Dämpfungsmaß den sog. "quality factor" Q zu verwenden. Die relativ wenigen bisher veröffentlichten Beobachtungsergebnisse haben gezeigt, daß eine potentielle Mobilität in bestimmten Bereichen der Erde häufig verbunden ist mit relativ niedrigem Q für longitudinale und transversale Wellen. Q ist proportional dem reziproken Verhältnis der Gesamtenergie zum Energiebetrag, der je Schwingung in einem bestimmten Medium durch Dämpfung verlorengeht.

Mit dem Dämpfungsdekrement α für die Amplitude A -

$$(2) \quad A_1 = A_2 e^{-\alpha x}$$

(x ist der zurückgelegte Weg, $A_{1,2}$ sind die Amplituden an der relativ zum Erdbebenherd entfernteren bzw. näheren Station) - besteht der Zusammenhang

$$(3) \quad \alpha = \frac{k}{2Q}$$

(k ist die Wellenzahl). Daraus folgt die Bestimmungsgleichung

$$(4) \quad Q = \frac{kx}{2 \ln A_2/A_1}$$

Das für seismische Oberflächenwellen bestimmte Q muß in ähnlicher Weise wie die Phasengeschwindigkeit durch Modellrechnungen in Tiefenfunktionen des "quality factor" für longitudinale und transversale Wellen, Q_L bzw. Q_T , umgedeutet werden. Bei praktischen Messungen werden nicht die unverfälschten Amplituden A_1 und A_2 beobachtet, sondern durch mannigfaltige Ursachen verfälschte A_1^* und A_2^* .

Für den Zusammenhang zwischen beiden wird folgender Ansatz gemacht:

$$(5) \quad \ln \frac{A_2}{A_1} = \ln \frac{(A_2^* + a_2)}{(A_1^* + a_1)} + \ln \frac{V_1}{V_2} + 0,5 \ln \frac{\sin \Delta_2}{\sin \Delta_1} + \ln \frac{K_1}{K_2} + \ln \frac{f_2(A_z, \Delta_2)}{f_1(A_z, \Delta_1)} + \ln \frac{I_1}{I_2}.$$

Die einzelnen Terme der rechten Seite von (5) haben folgende Bedeutung:

- Verhältnis der um einen konstanten Betrag $a_{1,2}$ korrigierten beobachteten Amplituden (die Notwendigkeit der Korrektur kann u.U. bedingt sein durch den Einfluß lokaler Störungen);
- Korrektur der unterschiedlichen Instrumentenvergrößerungen;
- geometrische Dämpfung ($\Delta_{1,2}$ Epizentralentfernungen zur Station 1 bzw. 2);
- Einfluß der Stationskonstante;
- Einfluß des Bebenazimuts A_z und der Epizentralentfernung;
- systematische Interpretationsfehler.

Eine Berücksichtigung der einzelnen Einflüsse im Sinne einer Korrektur der Beobachtungswerte bereitet sehr große Schwierigkeiten, weil die wenigsten Anteile wirklich exakt erfaßbar sind. Das drückt sich in einer sehr großen Streuung der Ergebnisse aus, wie das die in Abb. 3 u.a. enthaltenen Resultate von TSAI & AKI [10] deutlich zeigen.

Relativ genau kann man den Einfluß der geometrischen Dämpfung eliminieren. Die Fehler infolge ungenauer Seismographenvergrößerungen und unterschiedlicher Stationskonstanten lassen sich durch die Mittelung über zwei Erdbeben, die sich im Azimut um 180° unterscheiden, ziemlich vollständig beseitigen. Wenn zusätzlich noch Erdbeben mit vergleichbaren Gruppenlaufzeiten untersucht werden, dann kann auch der Einfluß der Interpretation vermindert werden. Völlig unmöglich erscheinen deterministische Ansätze zur Elimination der Abhängigkeit von $\Delta_{1,2}$ und $a_{1,2}$. Bei genauerer Kenntnis der im Untersuchungsgebiet enthaltenen Störungen kann sicherlich ein Teil der Unbestimmtheit beseitigt werden. Damit wird aber auch die Notwendigkeit genauerer Untersuchungen über den Nachweis und die Auswirkung von Diskontinuitäten unterstrichen.

Ein Ausweg aus dieser mißlichen Situation kann z.Z. nur durch statistische Untersuchung von möglichst vielen Erdbeben gesucht werden, wobei die Azimute und die Entfernungen der berücksichtigten Erdbeben in einem Untersuchungsgebiet möglichst weit streuen sollen. Die Annahme, daß sich alle nicht korrigierbaren Fehler im Mittel aufheben, erscheint wegen der Vielzahl der Einflüsse gerechtfertigt.

Unter all diesen Einschränkungen wurde für das Untersuchungsgebiet der DDR ein erster Versuch mit maximal 5 Dämpfungsbestimmungen unter Berücksichtigung von zwei Azimuten gemacht. Die Ergebnisse, in Abb. 3 eingetragen, geben für RAYLEIGH-Wellen im Periodenbereich 15 bis 28 s einige mittlere Dämpfungswerte, die noch sehr streuen. Gleichzeitig wurde das untere Konfidenzintervall für 90 % dieses mittleren Q eingetragen.

4. Diskontinuitäten mit vertikaler Komponente

Die aufgezeichneten Oberflächenwellen stellen in vielen Fällen keinen einfachen Wellenzug dar, sondern setzen sich aus einer Reihe von Wellenzügen zusammen, die auf verschiedenen Wegen zum Empfänger gelangen. Das kann sich z.B., wie bei PILANT & KNOPOFF [8] beschrieben, im Auftreten sog. "beats" äußern, oder es liegt der günstige Fall vor, daß sich wie in Abb. 4 verschiedene Gruppen von Oberflächenwellen aussondern und als direkte und reflektierte Wellengruppen interpretieren lassen.

Ursache der komplizierten, heute noch in keiner Weise vollkommen als Informationsquelle genutzten Aufzeichnung der Oberflächenwellen sind Diskontinuitäten, die sich im Wellenweg, der hier im weitesten Sinne verstanden werden soll, befinden. Eine bessere Deutung der gesamten Seismogramme mit dem Ziel einer vollkommeneren Informationsentnahme führt deshalb auf das Problem des Nachweises einer Diskontinuität. Es hat methodisch gesehen zwei voneinander unabhängige Aspekte:

- das Aufsuchen noch unbekannter Diskontinuitäten,
- die Tiefenerkundung oberflächlich schon bekannter und den Nachweis des Kontrastes der beiden an einer Diskontinuität zusammentreffenden Medien.

Beide Fragestellungen können sich bei der Lösung wechselseitig ergänzen, was zu einer Genauigkeitssteigerung der Aussage führen kann.

Bei der Lokalisierung einer Diskontinuität beziehen wir uns auf eine Untersuchung von KNOPOFF & MAL [2], wonach sich eine Oberflächenwelle über eine geneigte Diskontinuität hinweg mit lokaler Phasengeschwindigkeit bewegt. Die Amplitude dagegen wird durch Reflexion und Transmission beeinflusst.

Es gilt für die Wellenfunktion $F(x)$ die Beziehung

$$(6) \quad F(x) = A \exp \left(i \int_{-a}^x k(v) dv \right) (T + R)$$

mit der Amplitude A , einem von der Geometrie der Diskontinuität und dem elastischen Kontrast abhängigen Transmissionsfaktor T und einer Größe R , die die reflektierten Anteile enthält, sowie einem betrachteten Wellen zwischen $-a$ und x . Unter der Annahme, daß R relativ klein ist, kann man für eine aus praktischen Gründen einfach angenommene Diskontinuität eine erste, natürlich noch verbesserungswürdige Näherung für $F(x)$ angeben und den Einfluß auf die RAYLEIGH-Wellen-Grundmode betrachten.

Zum besseren Verständnis der Ausbreitung von RAYLEIGH-Wellen über eine Diskontinuität hinweg wird auf der Grundlage von (6) ein Beispiel gegeben; in Abb. 5 ist es aufgezeichnet. In der Mitte der Abbildung ist das betrachtete Modell für die Diskontinuität eingetragen. Um einen besseren Überblick zu erlangen, wurde darunter die lokale Phasengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Periode dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß die Phasengeschwindigkeiten zu beiden Seiten der Diskontinuität bekannt sind, was in praxi durch gesonderte Messungen realisierbar ist, kann mit Hilfe eines von NEUNHÖFER & GÜTH [7] gegebenen Ansatzes für eine vorgegebene Seismographenanordnung die Lage einer fiktiven vertikalen Diskontinuität errechnet werden. Diese

Lage ist bei schräger Diskontinuität periodenabhängig und wird außerdem von der Anordnung der Seismographen beeinflusst. Solche Abhängigkeiten sind im oberen Teil der Abb. 5 eingezeichnet, wobei als Parameter das Verhältnis der Horizontalerstreckung der Diskontinuität zum Abstand zweier Stationen eingetragen ist. Es folgt daraus die qualitative Aussage, daß für große Perioden die Lage der fiktiven vertikalen Diskontinuität gegen die Mitte der wirklichen zustrebt und der Verlauf der Perioden-Lage-Abhängigkeit in Richtung der Neigung der Diskontinuität ausgebeult ist. Quantitativ sollte es prinzipiell möglich sein, aus mindestens zwei Perioden-Lage-Kurven ein Modell für die wirkliche Schiefe der Diskontinuität abzuleiten.

Wie im Zusammenhang der Dämpfungsbestimmungen schon erwähnt und in Formel (5) implizit enthalten, spielen die Wechselwirkungsphänomene einer Oberflächenwelle an einer Diskontinuität eine wichtige Rolle. Beim Auftreffen von Oberflächenwellen auf eine Diskontinuität kommt es einerseits zu einer relativen Schwächung oder Verstärkung der Oberflächenverrückungen infolge der Transmission von einem Medium in das andere oder zur Erzeugung einer reflektierten Oberflächenwelle. Da die Stetigkeitsbedingungen für die Verrückungen und Spannungen an der Grenzfläche durch eine einfallende, transmittierte und reflektierte Oberflächenwelle allein prinzipiell nicht erfüllt werden können, entstehen andererseits zusätzliche, d.h. im einfallenden Oberflächenwellenfeld nicht enthaltene, reflektierte und transmittierte Moden und Raumwellen (siehe Abb. 6).

Die reflektierten Wellen ergeben zusammen mit den direkten ein Interferenzfeld vor der Diskontinuität. Bei der Wechselwirkung der Oberflächenwellen mit der Diskontinuität wird die Frequenz nicht verändert. Wenn die Oberflächenwellen schräg einfallen, was im allgemeinen der Fall sein wird, müssen die verschiedenen Wellenanteile das SNELLIUSsche Brechungsgesetz erfüllen. Das führt dazu, daß die aus einem einfallenden monochromatischen Wellenzug entstehenden monochromatischen reflektierten und transmittierten Moden in verschiedene Richtungen abgestrahlt werden, und zwar so, daß die x_2 -Komponenten der einzelnen Wellenzahlvektoren auf die Normale zur Diskontinuität alle den gleichen Wert haben:

$$(7) \quad k_2 \text{ einf.} = k_2 \text{ refl.} = k_2 \text{ trans.} \cdot$$

Weiterhin ist zu bemerken, daß bei schrägem Einfall Wechselwellen auftreten können, d.h., aus RAYLEIGH-Wellen können LOVE-Wellen entstehen und umgekehrt. Bisher ist es nicht möglich, diese komplizierten Phänomene theoretisch exakt zu erfassen. Je nach dem Anwendungszweck kann man sich zur Lösung dieses Randwertproblems verschiedener Näherungsverfahren bedienen. Für den hier beschriebenen Zweck erweist sich das ALSOPsche Verfahren als praktikabel. Hierbei wird das resultierende Verrückungsfeld nach den Eigenfunktionen der geschichteten Medien zu beiden Seiten der Diskontinuität entwickelt:

$$(8) \quad U_1^{(1)} + \sum_{\alpha=1}^{N^{(1)}} a_{\alpha} U_1^{(1)*} = \sum_{\beta=1}^{N^{(2)}} b_{\beta} U_i^{(2)} + \tilde{U}_i, \quad i = 1, 2, 3;$$

$\alpha = 1, \dots, M^{(1)}$: RAYLEIGH-Moden Modell 1,

$\alpha = M^{(1)} + 1, \dots, N^{(1)}$: LOVE-Moden Modell 1;

$\beta = 1, \dots, M^{(2)}$: RAYLEIGH-Moden Modell 2,

$\beta = M^{(2)} + 1, \dots, N^{(2)}$: LOVE-Moden Modell 2.

Die Größe U_1 tritt auf, weil die Oberflächenwellen kein vollständiges Eigenfunktionsystem bilden. Die Reflexionskoeffizienten a_{α} und die Transmissionskoeffizienten b_{β} erscheinen als Entwicklungskoeffizienten und werden so lange variiert, bis die Randbedingungen, repräsentiert durch Gleichung (8) und eine analoge Gleichung für die Spannungen, optimal erfüllt sind. Die Oberflächenwellen bilden den diskreten und die Raumwellen den kontinuierlichen, hier vernachlässigten Anteil des Eigenfunktionsystems.

Im Rahmen der ALSOPschen Näherung sind die frequenzabhängigen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten der Oberflächenwellen für eine vertikale Diskontinuität reell, d.h., es können nur Phasensprünge je nach dem Kontrast der beiden Medien von 0 oder π auftreten. Bei einer geneigten Diskontinuität sind die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten dagegen im allgemeinen komplex, was zu Phasensprüngen führt, die von 0 und π verschieden sind (siehe [3]). Diese Methode liefert eine gute Übereinstimmung mit der Praxis, solange der Kontrast zwischen den beiden Medien nicht zu groß ist. Als Kriterium für die Anwendbarkeit des Verfahrens können Energie-transportbetrachtungen dienen.

Die Oberflächenwellen werden zweckmäßigerweise so normiert, daß jede Mode Einheitsenergie transportiert. Dann gibt die Größe

$$(9) \quad PEUF = \left(1 - \sum_{\alpha=1}^{N^{(1)}} a_{\alpha}^2 - \sum_{\beta=1}^{N^{(2)}} b_{\beta}^2\right) \cdot 100 \%$$

den prozentualen Anteil der Gesamtenergie an, der bei der Wechselwirkung mit der vertikalen Diskontinuität nicht im Feld der Oberflächenwellen verbleibt.

Modellexperimente mit RAYLEIGH-Wellen an einer Höhenstufe zeigten [4], daß das Variationsverfahren selbst dann noch gute Transmissionskoeffizienten liefert, wenn weniger als die Hälfte der Energie in den normalen Moden verbleibt. Das kann ein Hinweis darauf sein, daß die Wechselwirkungen der RAYLEIGH-Wellen untereinander mehr oder weniger unabhängig von den anderen entstehenden Wellenarten sind.

Literatur

- [1] KNOPOFF, L. Observation and inversion of surface wave dispersion.
Tectonophysics 13 (1972), S. 497-519
- [2] KNOPOFF, L.;
MAL, A.K. Phase velocity of surface waves in the transition zone of continental margins.
J. geophys. Res. 72 (1967) 6, S. 1769-1776
- [3] MALISCHEWSKY, P. Ausbreitung von seismischen Oberflächenwellen in Medien mit vertikalen Diskontinuitäten.
Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 24, Potsdam 1973
- [4] MCGARR, A.;
ALSOP, L.E. Transmission and reflection of Rayleigh waves at vertical boundaries.
J. geophys. Res. 72 (1967) 8, S. 2169-2180
- [5] MJACKIN, V.N.;
ZUBKOV, S.I. Svodnyj grafik predvestnikov zemletrjasenij.
Fizika Zemli (1973) 6, S. 28-32
- [6] NERSESOV, I.L.;
SEMENOV, A.N.;
SIMBIREVA, I.G. Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie otnošenij vremen probega poperečnyoh i prodol'nyoh voln v Garmskom rajone. In: Eksperimental'naja sejsmologija, S. 334-345.
Moskva: "Nauka" 1971
- [7] NEUNHÖFER, H.;
GÜTH, D. Dispersion of Rayleigh waves in Middle Europe and phase velocity splitting.
(Im Druok)
- [8] PILANT, W.L.;
KNOPOFF, L. Observations of multiple seismic events.
Bull. seism. Soc. Amer. 54 (1964) 1, S. 19-39
- [9] SEIDL, D. Spezielle Probleme der Ausbreitung seismischer Oberflächenwellen mit Beobachtungsbeispielen aus Europa.
Diss. Karlsruhe 1971
- [10] TSAI, Y.;
AKI, K.I. Simultaneous determination of the seismic moment and attenuation of seismic surface waves.
Bull. seism. Soc. Amer. 59 (1969) 1, S. 275-287
- [11] ZARKOV, V.N.;
OSNAC, A.U. Teorija vozmuščenij dlja poverohnostnyh voln.
Fizika Zemli (1970) 12, S. 10-21

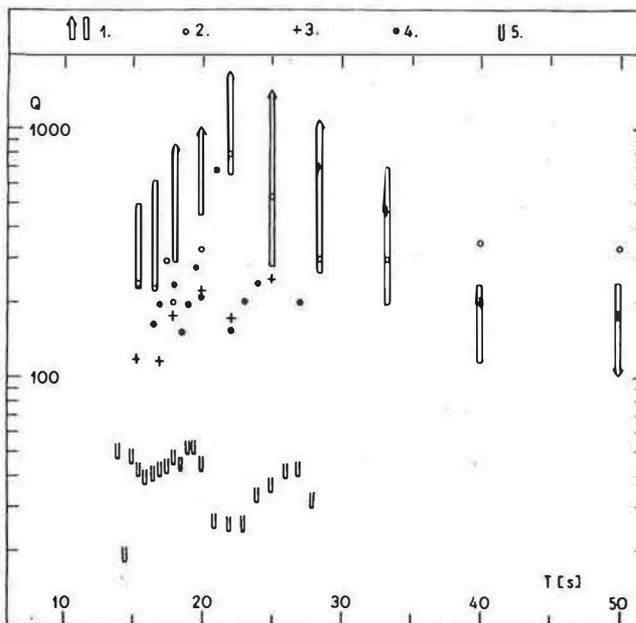
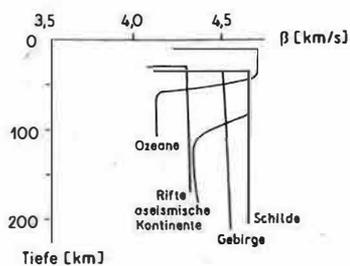
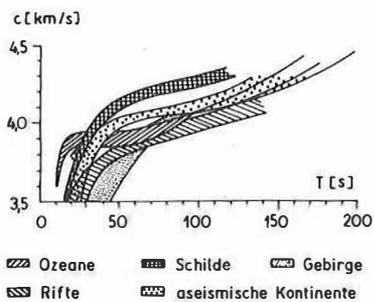


Abb. 1. Generalisierte Dispersionskurven für RAYLEIGH-Wellen und daraus resultierende Tiefenverteilungen der Scherwellengeschwindigkeit nach KNOPOFF [1]

Abb. 3. Dämpfung von RAYLEIGH-Wellen (1: statistische Ergebnisse von TSAI & AKI [10], 2: ozeanischer Wellenweg [10], 3: kontinentaler Wellenweg [10], 4: Mittel-europa und dazu 5: untere Konfidenz-grenze)

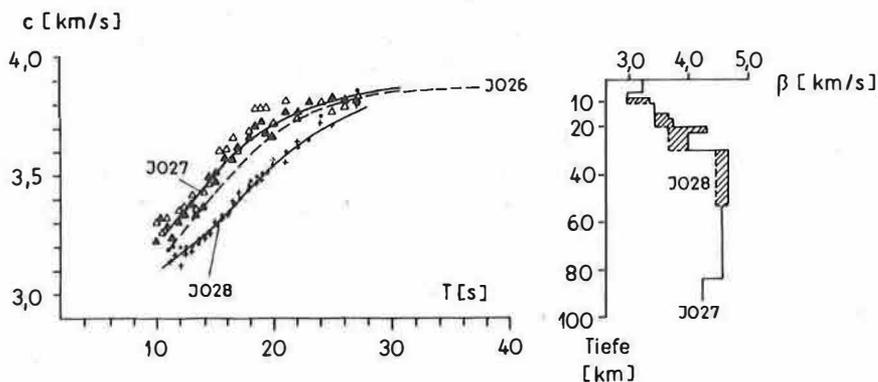


Abb. 2. Beobachtete und theoretische Dispersion von RAYLEIGH-Wellen für den Norden und Süden der DDR

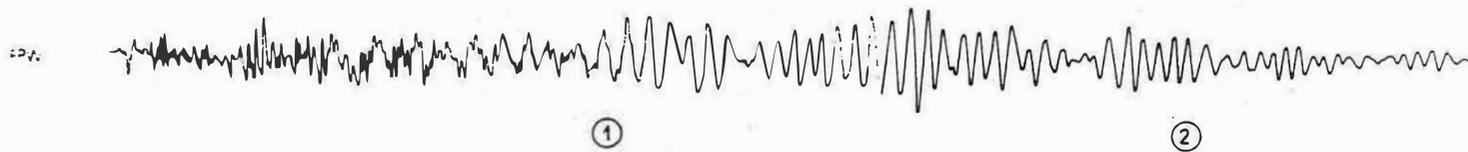


Abb. 4. Registrierung von direkter (1) und reflektierter
RAYLEIGH-Welle (2) an der Station Pritzwalk

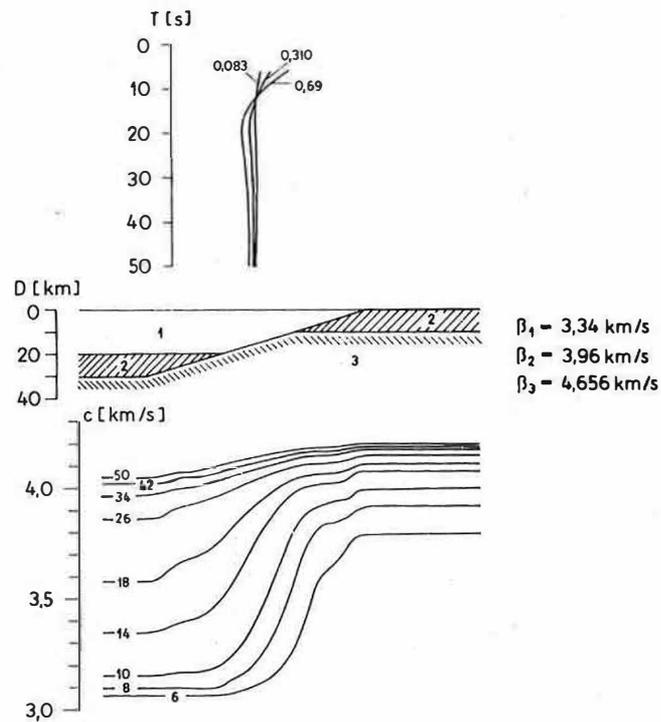


Abb. 5. Ausbreitung von RAYLEIGH-Wellen über eine Diskontinuität hinweg; unten: lokale Phasengeschwindigkeit von RAYLEIGH-Wellen für verschiedene Perioden, Mitte: Diskontinuität, oben: Lage der fiktiven vertikalen Diskontinuität

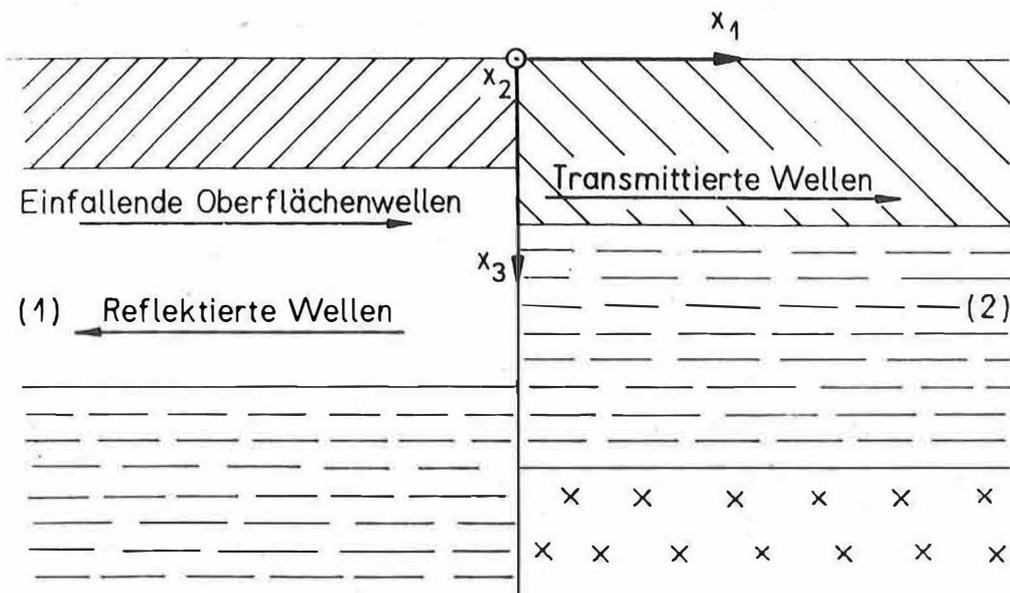


Abb. 6. Der geschichtete Halbraum mit Vertikaldiskontinuität

Über Beziehungen zwischen geothermischen und gravimetrischen Anomalien

von

E. HURTIG und H. WIRTH

Zusammenfassung

Einfache Abschätzungen der Temperaturverteilung bis zur Kruste—Mantel-Grenze ergeben, daß in 30 km Tiefe laterale Temperaturdifferenzen bis zu 200 °C über Entfernungen von 50 bis 100 km auftreten können. Bedingt durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Gesteine, kann der gravimetrische Effekt derartiger thermischer Inhomogenitäten die Größenordnung von 10 mgal erreichen. In Gebieten wie dem nördlichen Mitteleuropa ist dies bereits ein erheblicher Anteil der Gesamtanomalie. Zusätzliche Dichtevariationen können dadurch entstehen, daß die Isothermen im Untergrund Grenzen von Stabilitätsfeldern gewisser Mineralphasen schneiden.

Summary

Easy evaluations of steady-conduction temperature distribution in the upper crust down to the crust—mantle boundary in 30 km depth have been made, showing that horizontal variations of temperature up to 200 °C over distances of 50 to 100 km may appear. The gravimetric effect produced by the thermal expansion of the rock material is estimated to be 10 mgal of magnitude. In areas such as the northern part of Central Europe this is a considerable share of the entire gravity anomaly. In addition, density variations may occur if the isotherms in the underground are crossing boundaries of stable state of certain minerals.

Резюме

Простые расчёты распределения температуры до границы Кора—Мантия показывают, что на глубине в 30 км могут иметь место различия в температуре до 200 °C на расстоянии в 50 - 100 км. Гравиметрический эффект термических неоднородностей, обусловленный термическим коэффициентом расширения горных пород, может достичь величины порядка 10 мгал. В областях, как например, в северной Центральной Европе эта величина является значительной частью всей аномалии. Добавочные вариации плотности могут возникать от того, что изотермы в подпочве пересекают границы полей стабильности некоторых минеральных фаз.

1. Einleitung

Die Untersuchungen über Beziehungen der verschiedenen geophysikalischen Anomalienfelder zur Struktur und zum stofflichen Aufbau der Erdkruste nehmen im Rahmen der geophysikalischen Forschungen einen breiten Raum ein. Dabei besitzen die Anomalien des Schwerefeldes eine bevorzugte Stellung, zum einen wegen des relativ geringen Vermessungsaufwandes und der präzisen, hochauflösenden Meßgeräte und Meßverfahren, zum anderen, weil gerade eine Aussage über Massendichtedifferenzen für die geologische Interpretation sehr wichtig ist. Eine gewünschte Substanzaussage ist jedoch allein aus gravimetrischen Anomalienfeldern nicht eindeutig möglich. Um reelle Ergebnisse zu erzielen, müssen Erkenntnisse und Modelle, die aus anderen geophysikalischen Verfahren gewonnen wurden, herangezogen werden.

Von großer Bedeutung sind z.B. die Korrelationen zur Tiefenlage der MOHOROVIČIĆ-Diskontinuität (s. WOLLARD [16], KARATAEV [8], ANDREEV [1], OESBERG [10]), zum Verlauf geomagnetischer Anomalien (s. BALAVADZE [2], WIRTH [15]) und auch zu Anomalien des Wärmeflusses (s. RUSKOL [12]). So werden z.B. einfache Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Tiefenlage der MOHOROVIČIĆ-Diskontinuität aus Werten der BOURGUER-Anomalien angegeben. Würden dabei die Zusammenhänge zwischen den Schwerevariationen und magnetischen und thermischen Anomalien nicht vernachlässigt, so könnte eine Verbesserung der Resultate bei der Anwendung derartiger Regressionsgleichungen erwartet werden.

Welche Bedeutung speziell den Beziehungen zwischen geothermischen und gravimetrischen Anomalien zukommt, zeigen u.a. die Hinweise von KHAN [9] und GROTEN [5]. Für die Erzeugung der aus Satellitenbeobachtungen erhaltenen großräumigen Schweréanomalien würden Dichte-anomalien der Größenordnung $10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ in einer 100 km mächtigen Schicht ausreichen. Solche geringen Dichteänderungen können bereits durch laterale Temperaturvariationen im oberen Erdmantel von weniger als 100°C hervorgerufen werden. Es ist jedoch noch ungeklärt, welche Amplituden und räumlichen Dimensionen derartige Temperaturinhomogenitäten in verschiedenen Tiefenbereichen besitzen.

Die folgenden Betrachtungen sind ein Beitrag zur Klärung dieser Fragestellung für den Tiefenbereich bis zur Kruste—Mantel-Grenze und zur Abschätzung des durch laterale Temperaturvariationen zu erwartenden gravimetrischen Effektes.

2. Die statistischen Beziehungen zwischen Wärmefluß und Schwere

Das Datenmaterial für diese Untersuchungen stammt aus dem Gebiet des nördlichen Mitteleuropa, in dem das Schwere- und Wärmestromfeld hinreichend gut bekannt sind. Die wesentlichen Strukturen des Schwerefeldes in diesem Gebiet sind das Bramsoher Massiv, das Pritzwalker Massiv, das Magdeburger Schwerehoch und die Berliner Schwereesenke. Diese relativ großräumigen Anomalien mit maximalen Amplituden von oa. 40 mGal werden überlagert von zahlreichen kleineren Strukturen mit Amplituden bis 10 mGal.

Das thermische Feld (s. HURTIG & SCHLOSSER [6]) wird durch Wärmeflußmaxima in einer E—W streichenden Zone (Holland-Altmark-Vorsudeteten-Zone), in Nordostmecklenburg und in einer N—S-Zone, die vom Oberrheintalgraben bis in den Raum der Altmark zieht, beschrieben.

Zur statistischen Beurteilung des Zusammenhanges der Schwereanomalien mit den Anomalien des Wärmefflusses wurden fünf Teilgebiete ausgewählt. Es sind dies der Bereich des Bramscher Massivs (B.M.), ein Teil der Mittelmeer-Mjösen-Zone (M.M.Z.), das Magdeburger Schwerehoch (M.S.), die Ostflanke des Pritzwalker Massivs (P.M.) und die Berliner Schwereesenke (B.S.S.) unter Einsohluß des östlichen Teils des Magdeburger Schwerehochs. Es ist zu erwarten, daß zwischen den einzelnen Anomaliengebieten genetische Unterschiede bestehen.

Erste Anhaltspunkte über den Zusammenhang der gravimetrischen und der geothermischen Anomalienfelder gibt eine lineare Regressionsanalyse (Korrelationsanalyse). In Tab. 1 sind die Regressionskoeffizienten des Schwerefeldes bezüglich des Wärmestromfeldes für die genannten Teilgebiete zusammengefaßt. Die entsprechenden Regressionsgeraden zeigt Abb. 1.

Tab. 1. Regressionskoeffizienten des Schwerefeldes bezüglich des Wärmestromfeldes

| Gebiet | Freiheitsgrade n | Regressionskoeffizienten | | Signifikanz von a_1 |
|--------|---------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| | | a_0 [mGal] | a_1 [$\frac{\text{mGal cm}^2 \text{ s}}{\mu\text{cal}}$] | |
| B.M. | 179 | - 6,8 | 6,6 | - |
| M.M.Z. | 206 | - 0,45 | - 0,16 | - |
| M.S. | 71 | 178,2 | - 99,3 | hochsignifikant |
| B.S.S. | 227 | 87,7 | - 50,1 | hochsignifikant |
| P.M. | 204 | 17,7 | - 6,4 | - |

Bei der Ermittlung der statistischen Sicherheit der berechneten Regressionskoeffizienten ist - wie bei fast allen geophysikalischen Daten - die Erhaltungsneigung zu berücksichtigen (TAUBENHEIM [14]). Dadurch wird eine entsprechende Reduktion der Anzahl der Freiheitsgrade n der untersuchten Meßdaten auf n_{eff} unabhängige Daten notwendig. Um die Erhaltungsneigung beurteilen zu können, müssen die Autokorrelationsfunktionen (AKF) der betrachteten Zufallsvariablen herangezogen werden. Für die Gebiete B.M. und M.S. sind die AKF zusammen mit den Kreuzkorrelationsfunktionen (KKF) zwischen den beiden Anomalienfeldern in Abb. 2 dargestellt. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, daß bei diesen Beispielen eine drastische Reduktion der Freiheitsgrade zu erfolgen hat. Zur Festlegung der Signifikanzschranken für den t-Test bei der üblichen Vorgabe von 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit sind offensichtlich nur effektive Freiheits-

grade in einer Anzahl von 10 bis 15 zu vertreten. Dadurch werden jedoch die Signifikanzaussagen in Tab. 1 nicht geändert. Für die Beurteilung der KKF bedeutet diese Herabsetzung der Zahl der Freiheitsgrade, daß nur Werte der KKF statistisch gesichert sind, wenn ihr Betrag größer als 0,6 (0,2 ohne Reduktion) ist.

Korrelationsbeträge von 0,6 werden in den Gebieten M.S. und B.S.S. ausschließlich bei geringfügigen Verschiebungen (ca. 10 km) der Ausgangsdaten gegeneinander überschritten. In diesem Falle kann ein quellenmäßiger Zusammenhang zwischen Wärme- und Schwereanomalien angenommen werden. Im Gebiet B.M. wird dieser Wert erst bei einer großen Verschiebung (40 km) in Südostrichtung erreicht, wodurch die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenhang der Quellen sehr gering ist. Die vielen kleinen gravimetrischen Anomalien im Gebiet M.M.Z. zeigen bei beliebigen Verschiebungen keine signifikante Korrelation zu den Wärme- und Schwereanomalien.

Diese drei - deutlich unterschiedlichen - Typen von Zusammenhängen zwischen gravimetrischen und geothermischen Anomalien, wie sie sich in den KKF ausdrücken, können zur Klassifizierung von Krustenbereichen anhand der Beziehungen zwischen geophysikalischen Anomalienfeldern herangezogen werden.

3. Abschätzung der Temperatur (steady conduction temperature) in der Erdkruste

Die Untersuchungen von HURTIG & SCHLOSSER [7] zeigen, daß die Variationsbreite der Temperatur nach der Tiefe hin zunimmt. In ca. 7 km Tiefe treten im Norddeutsch-Polnischen Becken bereits laterale Temperaturunterschiede von 60 °C und mehr auf. Aus den in 4 km Tiefe gemessenen Temperaturwerten und dem für diesen Tiefenbereich ermittelten Wärme- und Schwereanomalien wurde die Temperaturverteilung nach der Tiefe bei Vorgabe eines Modells der vertikalen Verteilung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärme- und Schwereproduktion nach folgender Beziehung berechnet (steady conduction temperature):

$$T_u = T_o + \frac{q \cdot z}{\lambda} - \frac{H \cdot z^2}{2\lambda};$$

darin bezeichnen T_u und T_o die Temperatur an der Unter- bzw. Oberkante der betrachteten Schicht, q den Wärme- und Schwerefluß, z die Mächtigkeit der Schicht, H die Wärme- und Schwereproduktion und λ die Wärmeleitfähigkeit.

Für die Berechnung der Wärme- und Schwereproduktion wurde folgendes Modell verwendet:

| | U [ppm] | Th [ppm] | ^{40}K [%] | Wärme- und Schwereproduktion [cal/cm ³ s x 10 ⁻¹³] |
|----------------------|------------|-------------|------------------------|--|
| Sedimente | 1,0 | 8,0 | 2,0 | 2,37 |
| Granit | 4,0 | 18,0 | 2,0 | 5,93 |
| Untere "Granitsohle" | 2,3 | 9,0 | 2,0 | 3,50 |
| Untere Kruste | 0,8 | 5,0 | 1,0 | 1,00 |

Die Berechnung der Temperatur erfolgte für einige Bohrungen, die auf einem NE—SW verlaufenden Profil (Nordrügen - nördliches Harzvorland) liegen. Die Mächtigkeit der einzelnen Schichten (Sedimente, granitische Kruste, untere intermediäre bis basische Kruste) wurde vorliegenden Tiefenseismischen Angaben entnommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Es ergibt sich, daß in Tiefen von 30 km mit lateralen Temperaturdifferenzen in der Größenordnung bis zu 200 °C bereits auf Entfernungen von 50 bis 100 km gerechnet werden kann. Auch andere Autoren (s. z.B. SUGIMURA & UYEDA [13]) weisen auf ähnliche beträchtliche laterale Temperaturänderungen in der Kruste hin.

4. Thermisch bedingte Dichtedifferenzen

Der Zusammenhang zwischen thermischen und gravimetrischen Anomalien wird über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T, p)$ hergestellt. Es gelten folgende Beziehungen:

$$\Delta\rho = \rho_0 \alpha(T_0, p)\Delta T,$$

$$\alpha(T, p) = (\alpha_0 + a T)(1 - \beta p);$$

hier bezeichnen $\Delta\rho$ die Dichteänderung, ρ_0 die Bezugsdichte, T die Bezugstemperatur, $\alpha(T, p)$ den Ausdehnungskoeffizienten als Funktion von T und p , β die Kompressibilität, p den Druck und ΔT die Temperaturdifferenz. Bei kleinen Temperaturdifferenzen kann der thermische Ausdehnungskoeffizient α als konstant angesehen, bei größeren muß jedoch die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden. Die Druckabhängigkeit kann man dagegen auf Grund von Abschätzungen für die betreffenden Tiefenbereiche vernachlässigen.

Die Berechnungsergebnisse sind im unteren Teil der Abb. 3 dargestellt. Die unterschiedliche thermische Ausdehnung verursacht im Mittel bei homogener Gesteinsausbildung eine Dichtevariation von 0,01 g cm⁻³/100 °C. Für diese Dichtevariationen läßt sich die Schwerewirkung berechnen. In Abb. 4 sind die Ergebnisse für ebene Dreischichtmodelle dargestellt, die sich nur hinsichtlich der Breite des in die Schwereberechnung einbezogenen Streifens unterscheiden. Es ergibt sich, daß durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung in Abhängigkeit von den lateralen Temperaturvariationen Schwereanomalien bis zu 10 mGal hervorgerufen werden können. Ähnliche Ergebnisse erhält BUNTEBARTH [3] für den Alpenraum. Allerdings geht die dort berechnete thermisch bedingte Schwereanomalie nur mit etwa 5 % in die starke gravimetrische Gesamtanomalie der Alpen ein. Im nördlichen Mitteleuropa kann dagegen der thermisch bedingte Anteil an den BOUGUER-Anomalien über 25 % ausmachen.

5. Temperaturverteilung und Phasentransformationen

Neben der Einwirkung der Temperatur auf die Dichteverteilung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind Beziehungen zwischen den lateralen Temperaturvariationen und der Tiefenlage von Phasentransformationsgrenzen zu erwarten.

In Abb. 5 sind die Stabilitätsfelder für Eklogit, Granat-Granulit und Gabbro (nach RINGWOOD & GREEN [11]) in den berechneten Temperaturverlauf eingetragen. Dabei wird ein Gleichlauf zwischen BOUGUER-Schwere und dem Auftreten der Stabilitätsfelder deutlich. So korrelieren die Schwereminima mit den Bereichen, in denen das Granat-Granulitfeld auftritt, d.h. leichtere Gesteine zu erwarten sind. Ähnliche Phasentransformationen sind auch bei granitischen und intermediären Gesteinen bekannt. In Abb. 5 ist daher nach GREEN & LAMBERT [4] diejenige Grenze dargestellt, an der es zur Granatbildung in adamellitischen Gesteinen kommt. Auch hier zeigt sich, daß die Schwereminima mit den Bereichen korrelieren, in denen es noch nicht zu einer Granatbildung gekommen ist.

6. Schlußfolgerungen

Folgende Ergebnisse können herausgestellt werden:

- Auf Grund statistischer Zusammenhänge zwischen Schwere und Wärmefluß kann eine Typisierung von Schwereanomalien vorgenommen werden.
- Die Abschätzungen über die vertikale Temperaturzunahme bis zur Kruste-Mantel-Grenze ergeben, daß in 30 km Tiefe laterale Temperaturunterschiede bis zu 200 °C über Entfernungen von 50 bis 100 km auftreten können.
- Über den Zusammenhang mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten ergeben sich aus derartigen lateralen Temperaturunterschieden gravimetrische Effekte in der Größenordnung von 10 mGal.
- In Gebieten wie dem nördlichen Mitteleuropa kann die thermisch bedingte Schwereanomalie bereits einen erheblichen Anteil an der Gesamtanomalie darstellen. Derartige Effekte sind bisher bei Störkörperberechnungen nicht berücksichtigt worden.
- Bedingt durch die lateralen Temperaturvariationen, können die Isothermen im Untergrund Grenzen von Stabilitätsfeldern schneiden. Dadurch ergeben sich zusätzliche Dichtevariationen.

Literatur

- [1] ANDREEV, B.A. Relation between structural relief and gravity anomalies ...
Dokl. Akad. Nauk SSSR 124 (1959), S. 311-313
- [2] BALAVADZE, B.K. Gravitacionnoe pole i stroenie zemnoj kory v Gruzii.
Tbilisi: Izd. Akad. Nauk Gruz. SSR 1957

- [3] BUNTEBARTH, C. Über die Größe der thermisch bedingten Bouguer-Anomalie in den Alpen. Z.Geophysik 39 (1973), S. 109-114
- [4] GREEN, D.H.; LAMBERT, I.B. Experimental crystallization of anhydrous granite at high pressures and temperatures. J. geophys. Res. 70 (1965) 20, S. 5259-5268
- [5] GROTEN, E. On the masses necessary to produce the anomalous gravitational geopotential ... Boll. Geofis. teor. ed appl. 10 (1968) 39, S. 235
- [6] HURDIG, E.; SCHLOSSER, P. Der Wärmefluß in Mitteleuropa. Z. geol. Wiss. 1 (1973) 4, S. 461-466
- [7] HURDIG, E.; SCHLOSSER, P. Vertical changes of the heat flow in boreholes in the North-German sedimentary basin. In: KAPG-Monographie: Geoelectrical and geothermal studies in the central and eastern Europe. Im Druck
- [8] KARATAEV, G.I. O korreljacionnom linejnom prognozirovanii glubinnogo stroenija zemnoj kory ... Geol. i Geofiz. 12 (1963), S. 137-140
- [9] KHAN, M.A. Some geophysical implications of the satellite-determined geogravity field. Geophys. J. roy. astron. Soc. 23 (1971), S. 15-43
- [10] OESBERG, R.-P. Über den Stand und die Aufgaben bei der geologisch-geophysikalischen Erforschung der Erdkruste und des oberen Erdmantels in Mitteleuropa. Diplomarbeit, Leipzig 1965 (unveröff.)
- [11] RINGWOOD, A.E.; GREEN, D.H. An experimental investigation of the gabbro-eogite transformation and some geophysical implications. Tectonophysics 3 (1966) 5, S. 383-427
- [12] RUSKOL, J.I. O prirodne temperaturnyoh neodnorodnostej v nedraoh zemli. Fiz. Zemli (1965) 4, S. 1-8
- [13] SUGIMURA, A.; UYEDA, S. Island arcs - Japan and its environs. In: Developments in Geotectonics, Vol. 3. Amsterdam, London, New York: Elsevier 1973
- [14] TAUBENHEIM, J. Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Leipzig: Akadem. Verlagsges. Geest & Portig 1969

- [15] WIRTH, H. Komplexe Analyse der geomagnetischen und gravimetrischen Potentialfelder ...
Vermessungstechnik 18 (1970) 12, S. 457-459
- [16] WOLLARD, G.F. Crustal structure from gravity and seismic measurements.
J. geophys. Res. 64 (1959), S. 1521-1544

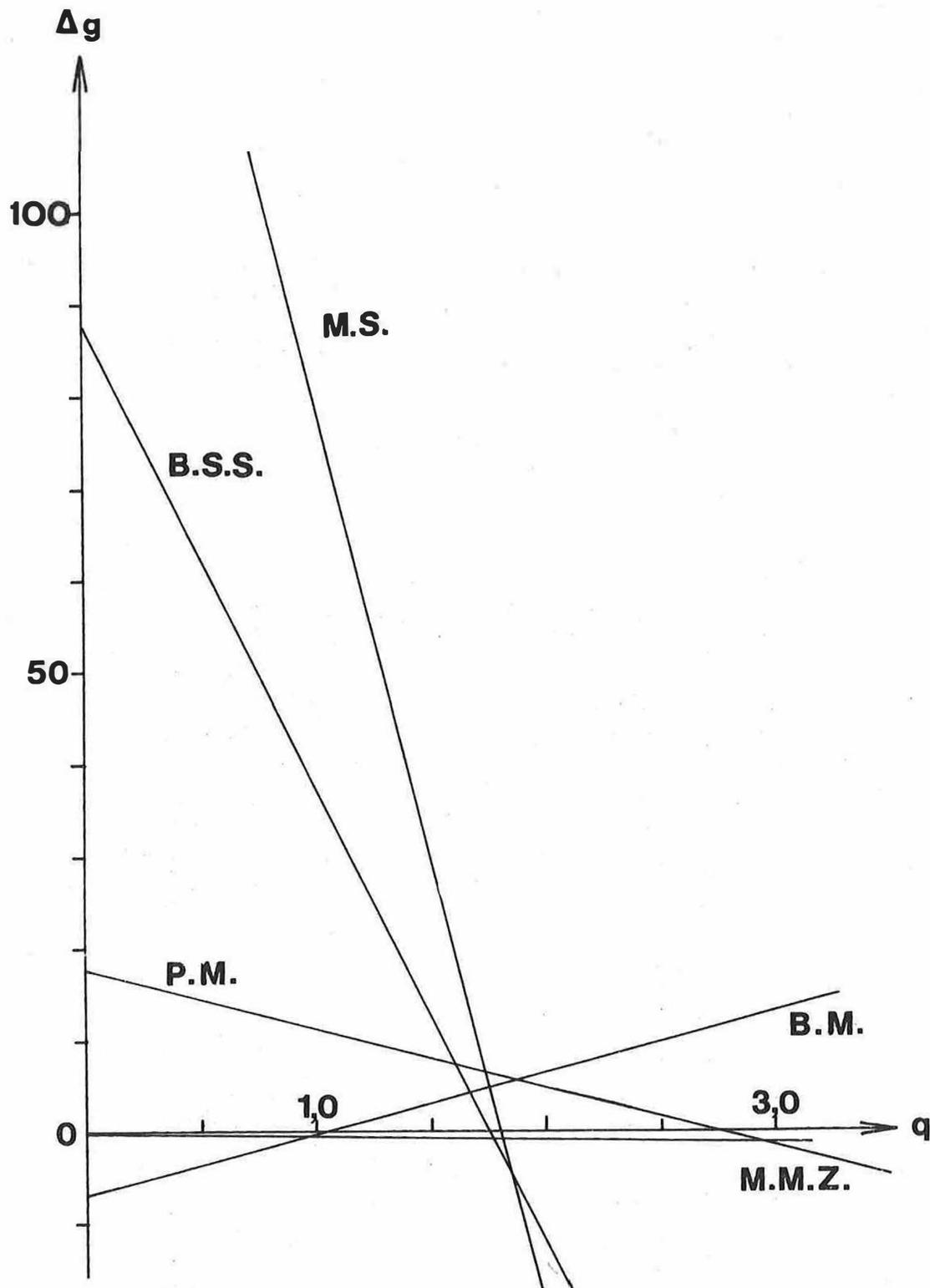


Abb. 1. Regressionsgeraden für die fünf untersuchten Teilgebiete

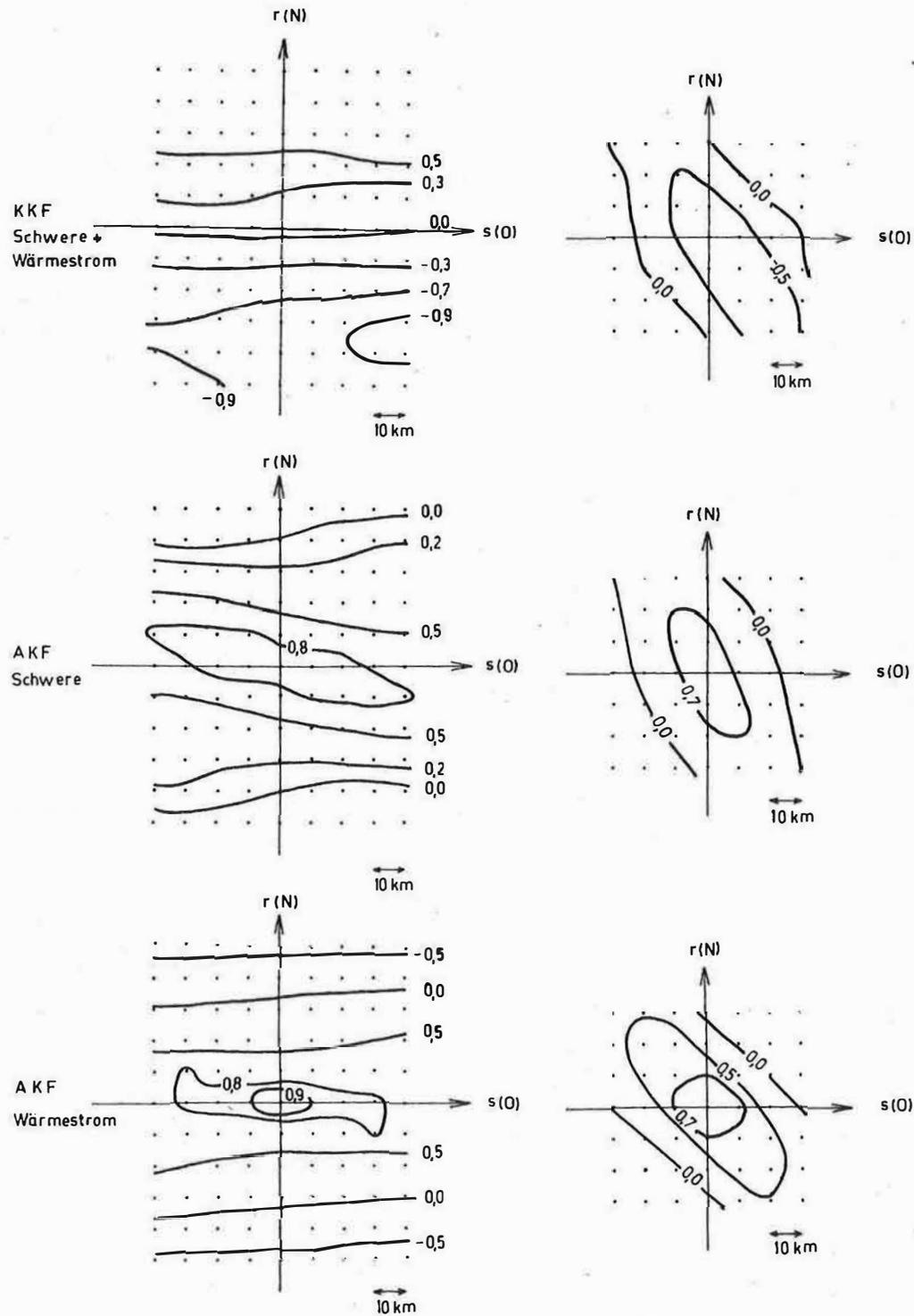


Abb. 2. Auto- und Kreuzkorrelationsfunktion von Schwere und Wärmestrom für zwei Teilgebiete; links: Bramscher Massiv, rechts: Magdeburger Schwerehoch

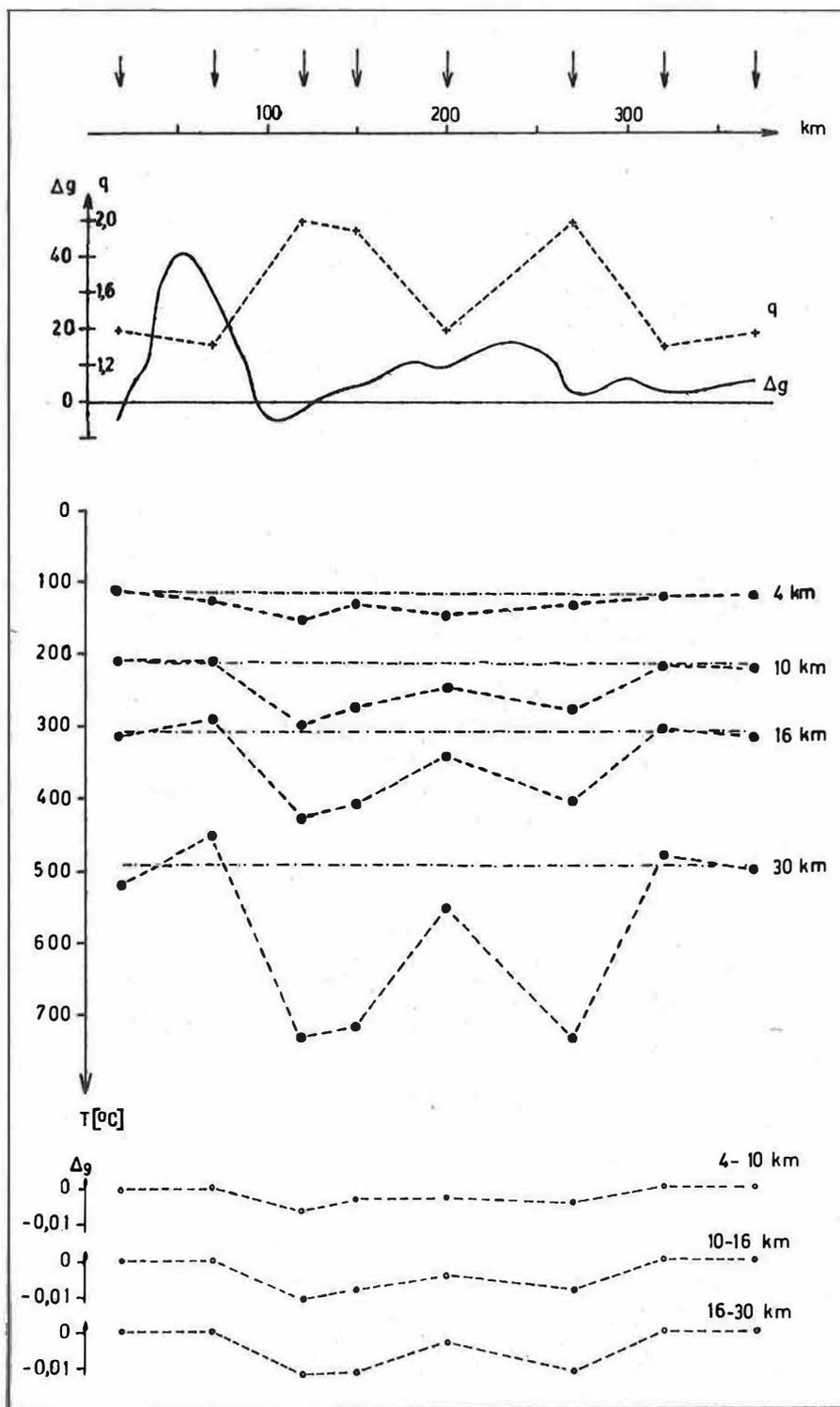
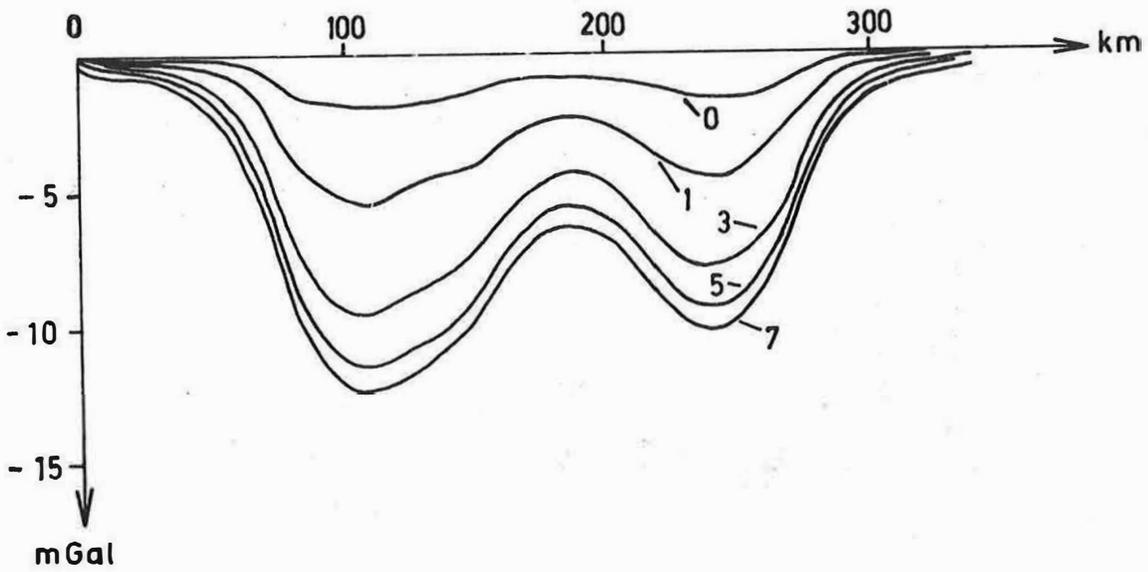


Abb. 3. SW—NE-Profil durch die Norddeutsch-Polnische Senke: BOUGUER-Schwere Δg [mGal], Wärme fluß q [$\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ s}$], Temperaturverteilung und thermisch bedingte Dichtevariation $\Delta \rho$ [g/cm^3]



zugehörige Modelle b zum Profil

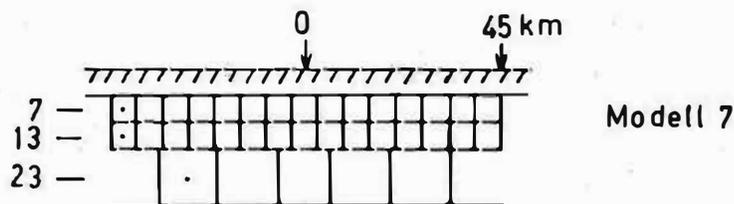
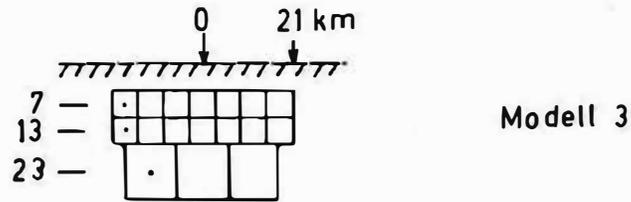
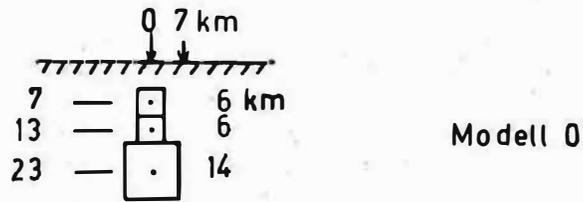


Abb. 4. SW-NE-Profil durch die Norddeutsch-Polnische Senke: thermisch bedingte Schwereanomalie

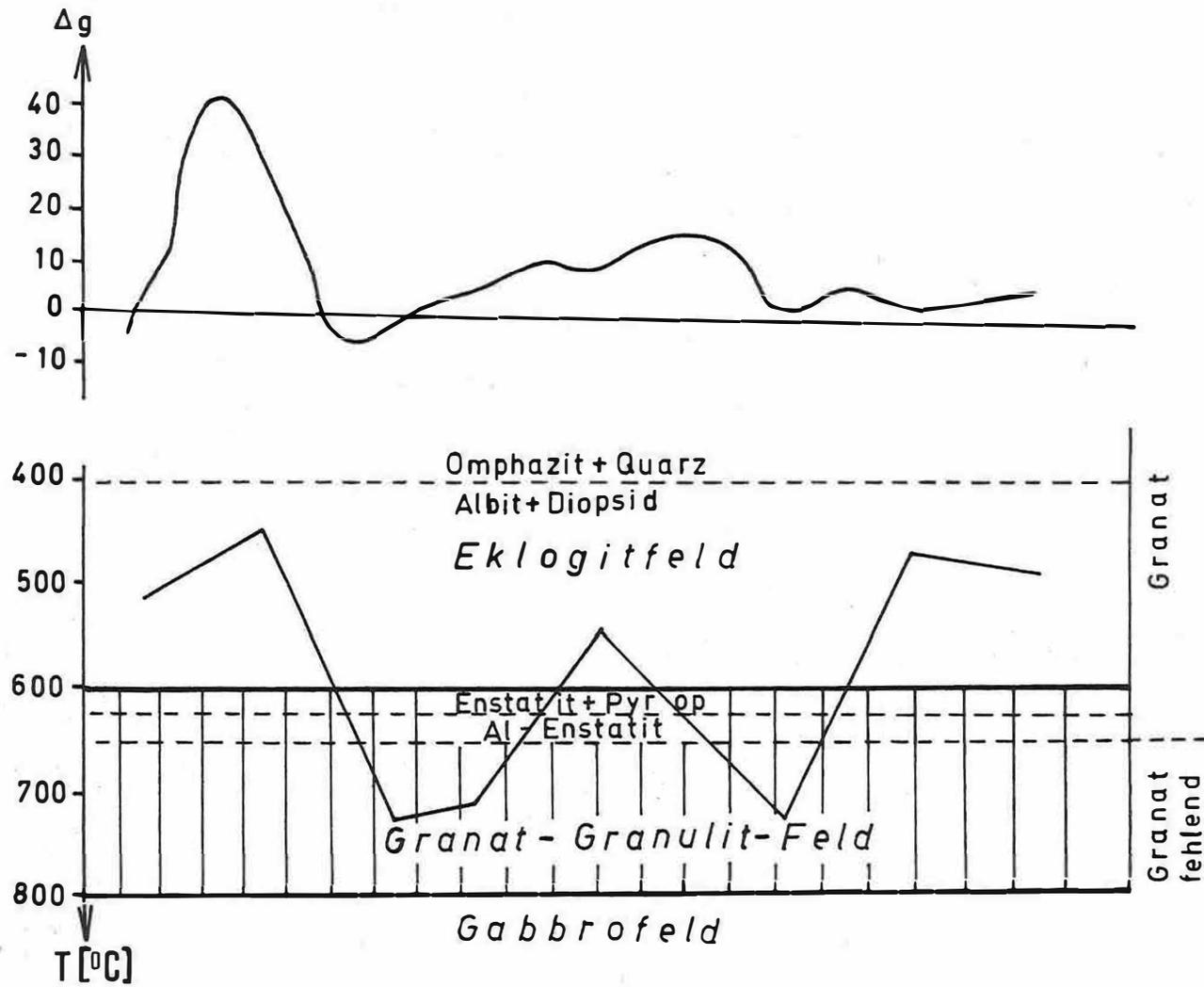


Abb. 5. SW-NE-Profil durch die Norddeutsch-Polnische Senke: BOUGUER-Schwere Δg [mGal], Temperatur in 30 km Tiefe und Stabilitätsfelder nach RINGWOOD & GREEN [11] sowie GREEN & LAMBERT [4]

Mobilisierung und Kratonisierung von Senkungsstrukturen
Ein Beitrag zur Mächtigkeitsanalyse des Deckgebirges in Europa

von

G. SCHWAB und H.-J. TESCHKE

Zusammenfassung

Ausgehend von einer Schemakarte der Unterkante bzw. der Mächtigkeiten des ungefalteten Deckgebirges Europas, werden Charakter und Entwicklung der Hauptsedimentationsbecken skizziert. Die Abfolge der Mächtigkeiten einzelner Senken wird in Tektonogrammen dargestellt. Es werden zwei Senkentypen ausgeschieden: Die in mehreren Etappen ablaufende Entwicklung der epirogenetischen Senken beginnt jeweils mit großen Wachstumsgeschwindigkeiten und endet nach einem langdauernden Differenzierungsstadium mit tektonischer Kratonisierung. Konsolidierungsstadien dieser Senken entsprechen zeitlich den Haupttektogenesen. Die an tektonische Mobilitätszonen gebundenen diktyogenetischen Senken werden im Gegensatz hierzu während dieser Zeiten aktiviert.

Summary

The authors proceed from a schematic map of the base and thicknesses, respectively, of the unfolded cover of Europe to outline the character and development of the main sedimentary basins. The succession of thicknesses of individual depressions is represented in tectonograms. Two types of depressions are distinguished, with the development of the epirogenic ones taking place in several stages, each period beginning with high rates of growth, and ending after a long-lasting stage of differentiation with a tectonic oratonization. With respect to time, the stages of consolidation of the depressions correspond to the main tectogeneses. Over against this, the diktyogenetic depressions, which are connected with zones of tectonic mobility, are activated during these times.

Резюме

На основе схематической карты подошвы/мощностей нескладчатого осадочного чехла Европы излагается характер и развитие главных бассейнов осадонакопления. Развитие мощностей некоторых бассейнов изображается в виде тектонограмм. Выделяются два типа бассейнов: развитие эпейрогенических бассейнов, проходящее в нескольких этапах, начинается с большими скоростями опускания и кончается после длительной стадии дифференциации тектоническим кратонизированием. Стадии консолидации этих бассейнов отвечают по времени главным тектогенезам. В противоположность этому диктиогенетические бассейны, связанные с тектоническими мобильными зонами, активизируются в этих стадиях.

1. Einführung

Die tektonische Geschichte von Kontinentalgebieten ist in den Sedimentserien ihrer Deckgebirge dokumentiert. Für die Rekonstruktion paläotektonischer Zustände der tektonischen Einheiten kommen neben Hebungsstrukturen insbesondere Tafelsenken in Betracht, deren vollständiger Schichtabfolgen umfassendere Aussagen zulassen. Horizontale und vertikale Verteilung von Mächtigkeiten und lithologischer Ausbildung werden im wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt: vom Mobilitätsverhalten der einzelnen Krustenblöcke, über denen sich die Strukturen bilden oder die diese umgrenzen (z.B. Vorsenken als Kompensationsstrukturen geosynklinaler/tektogener Vorgänge) sowie von weltweit wirkenden exogenen und endogenen Prozessen (Klimaänderungen, eustatischen Meeresspiegelschwankungen). Aus der historischen Abfolge der in den Sedimentserien dokumentierten paläotektonischen Zustände sind die Amplituden der Vertikalbewegungen eines gegebenen Krustenbereiches und dessen paläodynamische Entwicklung abzuleiten. Die paläodynamische Entwicklung wird weiterhin durch weiträumige epirogenetische/diktyogenetische Bewegungen beeinflusst, deren Wellenlänge sich aus dem zeitlichen Wechsel von Transgressionen und Regressionen ergibt.

Geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten (insbesondere auf Erdöl - Erdgas) haben in den letzten Jahrzehnten in den europäischen Tafelbereichen eine Fülle neuer Daten geliefert, die in einer Reihe überregionaler Kartenwerke (ROZANOV u.a. 1970 [15]; VINOGRADOV u.a. 1967-1969 [26]) dokumentiert sind und deren Interpretation nach verschiedenen Gesichtspunkten begonnen hat. So sind für den Strukturbau und die Entwicklungsgeschichte einiger Sedimentationsbecken des europäischen Kontinentes und seiner randlichen Schelfgebiete bereits relativ sichere Vorstellungen entwickelt worden (MURATOV 1972 [12]). Die Aufgabe der nächsten Zeit wird es sein, die dokumentierten Ergebnisse im Sinne der eingangs gegebenen Fragestellung zusammenzuführen und daraus übergeordnete Gesetzmäßigkeiten der Krustenentwicklung als eines paläodynamischen Geschehens abzuleiten. Ziel des vorliegenden Aufsatzes ist es, einige Aspekte der im Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR zu diesem Thema begonnenen Arbeiten zu skizzieren (JUBITZ 1973 [8]). Ausgegangen wird dabei von einer schematischen Karte der Unterkante bzw. der Mächtigkeiten des ungefalteten Deckgebirges zwischen Ural und Ostatlantik sowie zwischen Norwegischer See und westlichem Mittelmeer (Abb. 1 siehe Anlage).

2. Charakter der Hauptsedimentationsräume

Verglichen mit anderen Teilen des eurasiatischen Kontinentes, zeichnet sich das heutige tektonische Bild Europas durch eine bemerkenswerte Heterogenität aus. Diese ist das Ergebnis einer bereits präkambrisch vorgezeichneten Zerstückelung in Krustenblöcke unterschiedlicher Mobilität und damit unterschiedlicher Entwicklungstendenz: in die jungproterozoisch konsolidierte Osteuropäische Tafel, in die aus der Kratonisierung variszischer und kaledonischer Tektogene hervorgegangenen jungen Tafeln Westeuropas sowie in die alpidisch erneut regenerierten und aufgefalteten Bereiche der Tethys-Zone.

Alter, räumliche Verteilung, Ausdehnung und Profilaufbau von Tafelstrukturen stehen in direkter Abhängigkeit zum Mobilitätsgrad sowohl der unmittelbar unterlagernden Krustenschollen als auch der diese umgebenden tektonischen Einheiten. Als Prototyp für intrakratonische, d.h. von der Entwicklung angrenzender Faltengebiete nicht oder nur wenig beeinflusste Senken kann auf der Osteuropäischen Tafel die im Altpaläozoikum angelegte Orsoha-Senke (ROZANOV u.a. 1970 [15]), auf der Westeuropäischen Tafel das Pariser Becken angesehen werden. Bei den rändnahen Tafelstrukturen ist zu unterscheiden zwischen denjenigen, deren Entwicklung von den umgebenden Mobilzonen bzw. von den Tafelrändern in Form tiefgreifender Lateraldiskontinuitäten bestimmt wird. Dazu gehören die Vorsenken an den Außenseiten der Tektogene (Ural-, Karpaten-Vorsenke) sowie die über alten Tektogenen angelegten und meist Lineamenten folgenden Tafelrandsenken (Dänisch-Polnische Furche im Grenzbereich zwischen Ost- und Westeuropäischer Tafel) (MAREK & ZNOSKO 1972 [11]; TESCHKE 1974 [24]). Innerhalb der jungen Faltengebiete können als posttektogenetische Sedimentationsbecken intramontane Senken (z.B. Transkarpaten-Senke) sowie die an Blocktektonik gebundenen und aufgelagerten Zwischengebirgssenken vom Typ des Pannonischen Beckens (Alföld-Becken) unterschieden werden.

Die genauere Kenntnis der tieferen Deckgebirgsprofile läßt die Bedeutung bruchtektonischer Vorgänge auch bei der Anlage und weiteren Entwicklung der inneren Tafelsenken immer deutlicher erkennen. Als Beispiel seien die auf der Osteuropäischen Tafel erstmals beschriebenen Aulakogene genannt, einem NW—SE und NE—SW streichenden Störungssystem zugeordnete Grabenstrukturen, in denen im mittleren Proterozoikum die Deckgebirgssedimentation beginnt (sog. Frühaukogene). In einem späteren Stadium erfolgt während des Jungproterozoikums eine räumliche Erweiterung des Sedimentationsraumes in weitspannige epirogenetische Tafelsyneklisen (Spätauakogene). Die Moskauer Syneklise ist sehr wahrscheinlich das Ergebnis einer solchen Entwicklung.

Auch im Bereich der Westeuropäischen Tafel sind Anlage und Entwicklung der Tafelsenken an Aktivitätszonen des Untergrundes gebunden. So besteht die Mitteleuropäische Senke als eine dem variszischen Falten Gürtel vor- bzw. aufgelagerte Tafelsyneklise aus mehreren Teilsenken, deren spezifische Entwicklungscharakteristik z.T. von altangelegten, tiefreichenden und wiederholt wirksamen Störungssystemen bestimmt wird (SCHWAB u.a. 1973 [18]). Während die Entwicklung des Pariser Beckens nur in seiner ersten Bildungsetappe von aktiven Bruchzonen beeinflusst wird und die weitere Entwicklung weitgehend autonom verläuft, zeichnet sich im zentralen Bereich der Nordsee-Senke eine auch im Känozoikum aktive Senkungszone ab, die über tektonischen Brüchen in der nördlichen Fortsetzung des Oberrhein-Riftsystems angelegt ist und in das Senkensystem des europäischen Kontinentalrandes übergeht.

Die Norddeutsch-Polnische Senke folgt in ihrer Längserstreckung Parallelelementen des SW-Randes der Osteuropäischen Tafel. Ihre Hauptsenkungszentren liegen im Kreuzungsbereich von NW—SE und NNE—SSW streichenden Störungszonen. Unmittelbar der tektonischen Grenze gegen die Osteuropäische Tafel ist die z.T. auf paläozoisch konsolidiertem Untergrund liegende Dänisch-Polnische Senke zugeordnet. Sie stellt den nordwestlichen

Teilabschnitt einer zirkumkratonen Nahtzone und der dieser teilweise aufgelagerten Tafelrandsenken dar. Anlage und paläodynamisches Verhalten dieser Zone wird von zwei Hauptfaktoren bestimmt (TESCHKE 1973 [23]): 1. durch krustale Prozesse im Scharnierbereich zweier Großschollen und 2. durch die in den angrenzenden Geosynklinalen/Orogenen ablaufenden Vorgänge und die von diesen im Extraorogenbereich ausgelösten weitspannigen säkularen Krustenverbiegungen. Aus der Überlagerung beider Wirkungskomplexe resultiert das spezifische paläodynamische Verhalten der Tafelrandsenke.

3. Tendenzen der Mächtigkeitseentwicklung

Die in Kap. 2 genannten Entwicklungsgesetzmäßigkeiten sind aus den Deckgebirgsmächtigkeiten sowie deren räumlicher Verteilung und zeitlicher Abfolge zu erschließen, wobei die Sedimentmächtigkeiten in den Senkungsstrukturen des Deckgebirges Europas zwischen 2 und 20 km liegen (Abb. 1). Hohe Absenkungen über 8 km sind nicht an bestimmte Senkentypen gebunden, treten jedoch im alpidischen Bereich gehäuft auf. Als Mittelwerte können 3 bis 4 km angegeben werden. Eine differenziertere Aussage über das Mobilitätsverhalten genetisch und altersmäßig unterschiedlicher Senkungsstrukturen ist aus dem Vergleich der Sedimentationsraten zu gewinnen.

Die maximalen Mächtigkeiten der wichtigsten Sedimentationsbecken sind in Abb. 2 als mittlere Sedimentationsraten (m/Mill.J.), bezogen auf die Gesamtdauer der Sedimentation, zusammengestellt. Besonders ausgehalten sind alpidisch aktivierte Senken, Aulakogene sowie Senkungsgebiete des Kontinentalschelfes. Die Punktverteilung läßt eine direkte Beziehung zwischen Anlagezeit und Senkungsgeschwindigkeit in der Form erkennen, daß mit abnehmendem Alter der Senken die Absenkungsintensität zunimmt. So liegen z.B. die Mittelwerte in den altpaläozoisch angelegten Senken bei 5 m/Mill.J., in den jungpaläozoisch entstandenen Strukturen bei 25 m/Mill.J. und in den alpidischen zwischen 100 und 250 m/Mill.J.

Alpidisch aktivierte Senken sind ebenso wie Aulakogene durch besonders hohe mittlere Sedimentationsraten ausgezeichnet. Die logarithmische Darstellung läßt erkennen, daß die mittlere Senkungsgeschwindigkeit nicht linear zunimmt, sondern vom Kambrium bis zum Neogen, besonders jedoch während der alpidischen Ära, eine deutliche Beschleunigung erfährt.

Für eine genauere Interpretation der bisherigen Aussagen (Abb. 2) werden spezielle Tektonogramme einer Reihe von Senken herangezogen (Abb. 3 und 4). Dargestellt sind die Sedimentationsraten stratigraphischer Systeme bzw. Abteilungen von Senkungsstrukturen der Osteuropäischen Tafel, ferner epipaläozoische Tafelsenken, känozoisch aktivierte Senken sowie posttektonische Senken des Karpatenraumes. Unabhängig von spezifischen Besonderheiten, deren Analyse künftigen detaillierten Untersuchungen vorbehalten bleibt,

lassen sich in den Tektonogrammen zwei Senkentypen unterscheiden, auf die in Abschnitt 2 besonders verwiesen wurde: 1. epirogenetische und 2. diktyogenetische Senken ¹⁾.

3.1. Epirogenetische Senken

Die langzeitige Entwicklung der epirogenetischen Senken zu ihrem heutigen Mobilitätszustand erfolgte nicht kontinuierlich, sondern in einem rhythmischen Wechsel von Mobilisierung und Stabilisierung. Dabei beginnt ein Rhythmus mit einem relativ kurzfristigen initialen Senkungsimpuls, der zu hohen Sedimentationsraten führt. Daran schließen sich eine erheblich längere Phase der Differentiation mit Heraushebung bzw. Teilabsenkung tektonischer Teilstrukturen und eine Stabilisierungsetappe mit geringen Sedimentationsraten an. Als Beispiele seien die Senke von Archangelsk (Kambrium) und die Nordostdeutsche Senke (Perm bis Trias) genannt.

Die Rhythmik der Sedimentationsraten epirogenetischer Senken spiegelt in erster Linie die Paläodynamik des Untergrundes als Wechselwirkung von Absenkung, geothermischer Aufheizung und isostatischem Massenausgleich wider (SLEEP 1971 [22]). Die stofflich-lithologische Entwicklung wird jedoch durch zusätzliche Faktoren bestimmt, deren Beziehungen zueinander für das Gesamtgebiet der Osteuropäischen Tafel in Abb. 5 dargestellt sind. Nach Angaben von RONOVA u.a. (1969) [14] werden folgende Kurven gegenübergestellt: 1. mittlere Sedimentationsraten, 2. stoffliche Entwicklung in Form von Lithokennwerten, 3. paläotektonische Entwicklung auf Grund der paläogeographischen Bildungsbedingungen der Gesteinsfolgen und 4. Anteil der vollmarinen Entwicklung.

In der lithologisch-paläogeographischen Entwicklung spiegelt sich der Wechsel langzeitiger, vorwiegend epirogenetischer und diktyogenetischer Abschnitte mit kurzzeitigen Etappen wider, die den Haupttektogenesen entsprechen. Mit den epirogenetisch-diktyogenetischen Abschnitten stimmen zeitlich die Initial- und Differentiationsstadien der aus den Tektonogrammen (Abb. 3 und 4) abgeleiteten Rhythmik weitgehend überein, während in die Zeiten der Haupttektogenese die Stabilisierungsetappen der Deckgebirgsentwicklung fallen.

Zu berücksichtigen ist jedoch, daß sowohl die stoffliche Entwicklung als auch das paläogeographische Milieu zusätzlich von übergeordneten Faktoren beeinflusst werden. Hierzu zählen eustatische Meeresspiegelschwankungen und die von ihnen ausgehenden

¹⁾ Unter Diktyogenese wird nach BUBNOFF (1954) [2] eine zwischen Tektogenese und Epirogenese stehende tektonische Bewegungsart verstanden, die, episodisch und säkular wirksam, an tiefgründige Störungszonen gebundene Strukturveränderungen im Deckgebirge auslöst.

weltweiten Trans- und Regressionen (JANSIN 1973 [6]), Klimaschwankungen und schließlich die Intensität der Hebungsbewegungen in den die Tafel umgebenden Orogenen als Ursachen wechselnden Stoffangebotes. Sie äußern sich in dem z.T. abweichenden Kurvenverlauf und in der unterschiedlichen stofflichen Charakteristik innerhalb der ausgeschiedenen Etappen. In der Konsequenz resultiert aus den Wechselbeziehungen zwischen übergeordneten, "global" wirkenden Einflußfaktoren und untergrundbezogenen, regionalen Vorgängen sowie deren Überlagerung ein Entwicklungstrend in Richtung auf eine zunehmende Konsolidierung/Stabilisierung des gesamten Tafelgebietes, wie er z.B. in der rhythmisch erfolgenden Zunahme geokrater Verhältnisse sichtbar wird (Abb. 5, Kurve 3).

Die generelle Mächtigkeitsevolution der epirogenetischen Senken wird im Einflußbereich tektonischer Mobilitätszonen durch jüngere Aktivierungen modifiziert (JOHNSON 1971 [7]). Sie lassen sich insbesondere in Senkungsstrukturen nachweisen, die der Tethys-Geosynklinale benachbart sind. Beispiele hierfür sind die Ostkuban-Senke und die Mösische Platte, die sowohl während des Geosynklijalstadiums als auch im Anschluß an die Herausfaltung der Tektogene (Kaukasus, Karpaten-Balkan-Bogen), d.h. sowohl im Jura als auch im Tertiär, eine Aktivierung erfahren.

3.2. Diktyogenetische Senken

Bestimmend für die diktyogenetischen Senken ist die dominierend bruchtektonische Beeinflussung nicht nur während ihrer Initialphase, sondern auch in ihrer weiteren Ausgestaltung. Als Beispiel für diesen Senkungstyp seien das Dnepr-Donetz-Aulakogen und die Grabensenken im Verlauf des Oberrhein-Rifts genannt. Die tektonischen Impulse im Bereich des zwischen westlichem Mittelmeer und Nordseehelf gelegenen Riftes führten zu wiederholten, in seiner Gesamterstreckung jedoch nicht zeitgleichen Absenkungen (Abb. 3).

Während bei den epirogenetischen Senken die Entwicklung mehr oder weniger kontinuierlich bereits im jüngeren Mesozoikum zu einer Stabilisierung führte, deuten die Tektonogramme der diktyogenetischen Senken auf eine Zunahme der tektonischen Aktivierung im Känozoikum hin.

Eine detailliertere Darstellung diktyogenetischer Senken wird am Beispiel des Karpatenraumes gegeben (Abb. 4). Hier folgen auf die tektogenetischen Kompressionsphasen stets erhebliche Vertikalbewegungen, durch die sowohl Kompensationssenken vor dem Tektogen als auch intramontane und Zwischengebirgssenken entstehen. Dabei ist von Interesse, daß die in Abb. 2 deutlich erkennbare Zunahme der mittleren Absenkungsintensität zu einem großen Teil aus der Häufung der tertiären Senkungsmaxima resultiert. Darüber hinaus darf nicht übersehen werden, daß die Absenkungsamplituden selbst sehr hoch sind (zwischen 500 und 1800 m/Mill.J.) und im Verlauf des Tertiärs auch zunehmen. Von dieser Entwicklungsbeschleunigung werden in erster Linie diktyogenetische Senkungsstrukturen betroffen. Die Frage, inwieweit auch paläozoisch angelegte Tafelsenken einer allgemeinen Entwicklungsbeschleunigung unterliegen (vgl. Abb. 2), bedarf weiterer Untersuchungen.

4. Schlußfolgerungen

Verteilung und Abfolge der Mächtigkeiten des Deckgebirges, wie sie der Schemakarte (Abb. 1) und den Tektonogrammen der Akkumulationsgebiete zu entnehmen sind, verdeutlichen die Entwicklung der Senkungsstrukturen des Deckgebirges Europas als paläodynamische Geschichte vertikaler Krustenbewegungen unterschiedlicher Dimension und Genese. Die Tektonogramme lassen sowohl die engräumige Wirksamkeit untergrundgebundener tektonischer Strukturen, wie sie in den diktyogenetischen Senken überwiegen, als auch weiträumige vertikale Bewegungen erkennen, die besonders die stoffliche Entwicklung der epirogenetischen Senken beeinflussen. In ihrer Wechselwirkung bestimmen die Krustenbewegungen Ablauf und Charakter der Entwicklungsetappen der Beckenbildung. Sie beginnen in den beiden unterschiedenen Senkentypen mit großen Wachstumsgeschwindigkeiten und enden in den epirogenetischen Senken nach einem langdauernden Differenzierungsstadium mit tektonischer Konsolidierung. Wiederholte tektonische Aktivierungen unterbrechen diesen Prozeß in den diktyogenetischen Senken und bewirken einen raschen Wechsel der Absenkungsintensitäten. Känozoische Aktivierungen, im Einflußbereich tektonischer Mobilitätszonen, sind durch mächtige Sedimentakkumulationen ausgezeichnet und verstärken hierdurch die Tendenz zu allgemein erhöhter Entwicklungsbeschleunigung. Reaktivierungen von Untergrundstrukturen, z.B. im Bereich tiefer Bruchzonen, lösen Wiederholungen des oben gekennzeichneten Entwicklungsregimes epirogenetischer Senken aus, was sich in der Zyklizität ihrer Entwicklung äußert (KRYLOV 1973 [10]). Solche Aktivierungen haben im Untersuchungsgebiet mehrfach z.B. die in der Mobilzone des Südwestrandes der Osteuropäischen Tafel angelegten Senkungsstrukturen betroffen. Sie stehen räumlich und zeitlich mit den paläozoischen Haupttektonogenesen im Zusammenhang (TESCHKE 1973, 1974 [23, 24]). In postvariszischer Zeit erfordern sie als epirogenetische Senken, die auch im heutigen Bewegungsverhalten erkennbar sind, eine fortschreitende Konsolidierung (SCHWAB u.a. 1973 [17]).

Ausgehend von diesen noch vorläufigen Vorstellungen zur Problematik von Mobilisierung und Kratonisierung der Senkungsstrukturen im Deckgebirge, sei folgende abschließende Bemerkung erlaubt. Die Rekonstruktion von Chronologie, Periodizität, Amplitude und Wellenlänge vertikaler Bewegungen aus Mächtigkeits- und Stoffentwicklung der Senkungsstrukturen ist vor allem ein methodisches Problem, um die in großer Menge verfügbaren geologischen Informationen in geeigneter Weise zu verallgemeinern und vergleichbar zu machen. Von den vielfältigen Möglichkeiten erweisen sich hierbei als besonders geeignet: die Umwandlung von Mächtigkeitsangaben in Sedimentationsraten und die Umformung von Angaben über den lithologischen Gesteinsaufbau und über seine paläotektonischen Bildungsbedingungen zu Kennwerten, die paläotektonische Zustände der betreffenden geologischen Zeitabschnitte repräsentieren. Die Auswertung der gewonnenen Daten in Zeitreihen (Tektonogrammen, Lithogrammen) hilft nicht nur, auf dem Wege der strukturell-stofflichen Korrelation feststellbare geologische Entwicklungsgesetze zu erkennen, son-

dem sie gibt gleichzeitig auch Indikationen für Parameter, wie sie zur Klärung der geodynamischen Prozesse des Kontinentalbereiches benötigt werden.

Literatur

- [1] BERGGREN, W.A. A cenozoic time-scale - some implications for regional geology and palaeobiography. *Lethaia*, Oslo 5 (1972), S. 195-215
- [2] BUBNOFF, S. VON Grundprobleme der Geologie. 3. Aufl. Berlin: Akademie-Verlag 1954
- [3] DUNN, W.W.; u.a. North Sea is a tough theater for the oil hungry industry to explore. *Oil and Gas J.*, Tulsa 71 (1973) 2, S. 122-128, u. 3, S. 90-93
- [4] HÉRITIER, F.; VILLEMEN, J. Mise en évidence de la tectonique profonde du Bassin de Paris par l'exploration pétrolière. *Bull. Bur. Rech. géol. et min.*, 2. sér., sect. 1, Paris (1971) 2, S. 11-30
- [5] ILLIES, H. Bauplan und Baugeschichte des Oberrheingrabens. *Oberrhein. geol. Abh.*, Karlsruhe 14 (1965) 1-2, S. 1-54
- [6] JANSIN, A.L. Über sog. weltweite Transgressionen und Regressionen. *Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde*, Potsdam (1973) 14, Tl. 1, S. 23-24
- [7] JOHNSON, J.G. Timing and coordination of orogenic, epeirogenic and eustatic events. *Bull. geol. Soc. Amer.*, Tulsa 82 (1971) 12, S. 3263 bis 3298
- [8] JUBITZ, K.-B. Zu einigen allgemeinen Aspekten geotektonischer Forschung. *Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde*, Potsdam (1973) 14, Tl. 1, S. 17-21
- [9] KÖRÖSSY, L. Entwicklungsgeschichte der neogenen Becken in Ungarn. *Acta geol. Acad. Sci. hung.*, Budapest 14 (1970), S. 421-429

- [10] KRYLOV, N.A. Tektonische Differentiation junger Tafeln (russ.). Geotektonika, Moskau (1973) 5, S. 75-82
- [11] MAREK, S.; ZNOSKO, J. Die geologische Entwicklungsgeschichte Kujawiens (poln. m. engl. Zus.-Fassung). Kwart. geol., Warszawa 16 (1972) 2, S. 233-247
- [12] MURATOV, M.V. Die Haupttypen der Senken auf alten Tafeln und das Problem ihrer Entstehung (russ.). Bjull. MOIP, Moskva 47 (1972) 5, S. 61-71
- [13] RONA, P.A. Relations between rates of sediment accumulation on continental shelves, sea-floor spreading and eustasy inferred from the Central North Atlantic. Bull. geol. Soc. Amer., Tulsa 84 (1973) 9, S. 2851 bis 2872
- [14] RONOVIČ, A.B.; MIGDISOV, A.A.; BARSKAJA, N.V. Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der Sedimentgesteine und der paläogeographischen Sedimentationsbedingungen auf der Russischen Tafel (russ.). In: Litologija i poleznye iskopaemye, Nr. 6, S. 3-36. Moskva 1969
- [15] ROZANOV, L.N.; u.a. (Red.) Tektonische Karte der erdöl-erdgasführenden Gebiete der UdSSR, Maßstab 1 : 2,5 Mill. (russ.). Moskva 1970
- [16] SCHWAB, G. Zur Interpretation lithologisch-paläogeographischer Karten mit Hilfe eines einfachen Klassifizierungsverfahrens. Z. angew. Geol., Berlin 18 (1972) 7, S. 313-319
- [17] SCHWAB, G.; TESCHKE, H.-J.; JUBITZ, K.-B. Zur Raum-Zeit-Beziehung zwischen rezenten vertikalen Krustenbewegungen und Paläotektonik im Bereich der Norddeutsch-Polnischen Senke. Z. angew. Geol., Berlin 19 (1973) 11, S. 579-586
- [18] SCHWAB, G.; JUBITZ, K.-B.; MEIER, R. Zu einigen Grundaspekten der stofflichen und strukturellen Entwicklung im Tafeldeckgebirge von Mitteleuropa, speziell zu Fragen der Postmität. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde, Potsdam (1973) 14, Tl. 1, S. 85-111
- [19] SCHWAB, G.; u.a. Methodische Beiträge zur paläotektonischen Analyse im Tafeldeckgebirge der Norddeutsch-Polnischen Senke. Z. geol. Wiss., Berlin (1974) (im Druck)
- [20] SENES, J.; CICHÁ, I. Neogene of the West Carpathian Mts. In: X. Congr. Carpath.-Balkan-Geol. Assoc. Bratislava, Guide to Excursion F, 46 S. Bratislava 1973

- [21] SENES, J.; u.a. Korrelation des Miozäns der Zentralen Paratethys (Stand 1970).
Geol. Zbornik - Geologia Carpathica, Bratislava 22 (1971) 1, S. 3-9
- [22] SLEEP, N.H. Thermal effects of the formation of Atlantic continental margins by continental break up.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 24 (1971), S. 325-350
- [23] TESCHKE, H.-J. Zu einigen Fragen der Entwicklung des Südwestrandes der Osteuropäischen Tafel.
Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde, Potsdam (1973) 14, Tl. 3, S. 623-640
- [24] TESCHKE, H.-J. Entwicklung und tektonischer Bau des südwestlichen Randbereiches der Osteuropäischen Tafel.
Z. geol. Wiss., Berlin (1974) Themenheft (im Druck)
- [25] THOMAS, A.N.; u.a. Forties is multi-billion barrel field.
Petrol. and Petrochem. internat., London 13 (1973) 10, S. 80-84
- [26] VINOGRADOV, A.P.; u.a. (Red.) Atlas lithologisch-paläogeographischer Karten der UdSSR, Bd. 1-4 (russ.).
Moskva 1967 - 1969

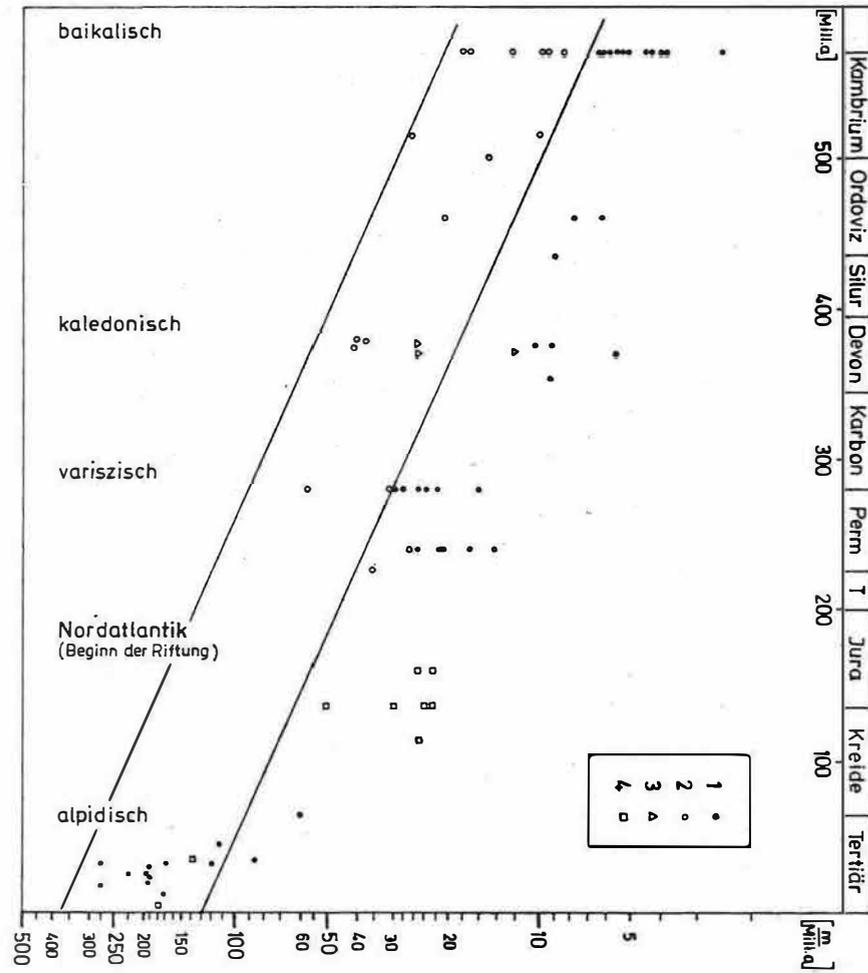


Abb. 2

Abb. 2. Mittlere Sedimentationsraten einiger Senkenstrukturen, bezogen auf die Gesamtzeit des Phanerozoikums
 1 - Senken auf präkambrisch konsolidiertem Untergrund; 2 - alpidisch aktivierte Senken auf präkambrisch bzw. paläozoisch konsolidiertem Untergrund; 3 - Aulakogene; 4 - kontinentale Randsenken

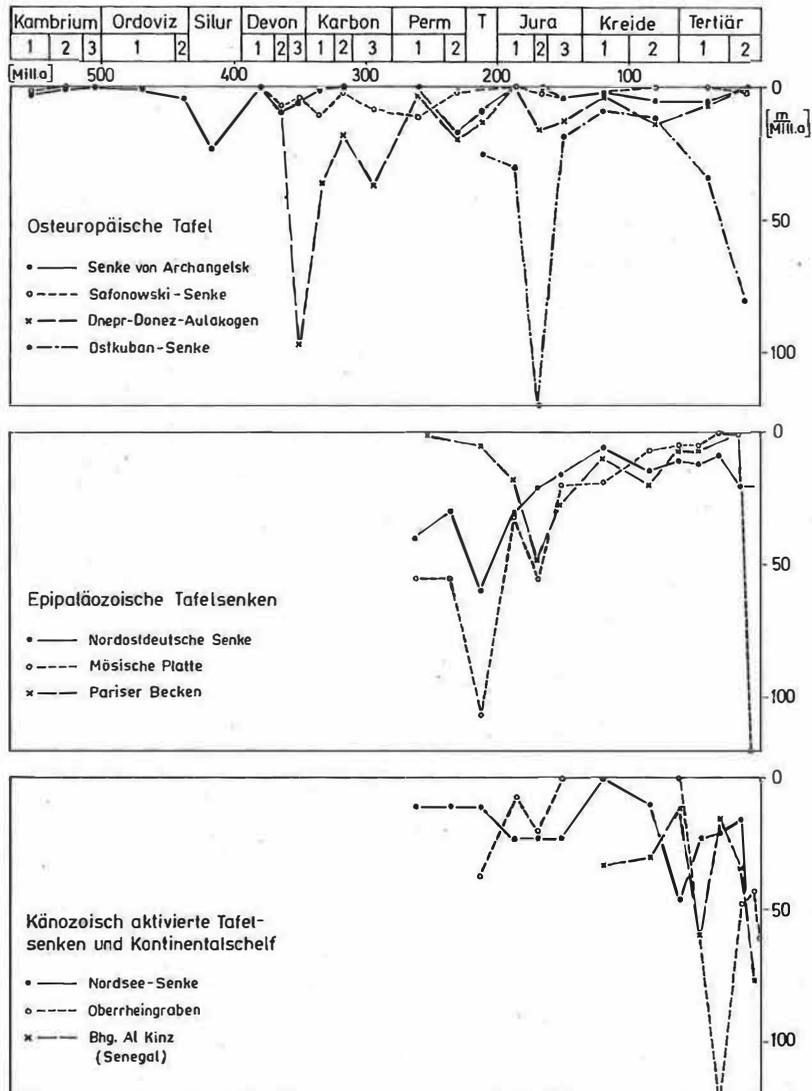


Abb. 3

Abb. 3. Tektonogramme ausgewählter Sedimentationsbecken. Dargestellt sind Sedimentationsraten in $m \cdot Mill.a^{-1}$ nach Mächtigkeitsangaben aus: VINOGRADOV u.a. (1967-1969) [26], HÉRITIER & VILLEMEN (1971) [4], SCHWAB u.a. (1974) [19], ILLIES (1965) [5], ROMA (1973) [13], DUNN (1973) [3], THOMAS u.a. (1973) [25]

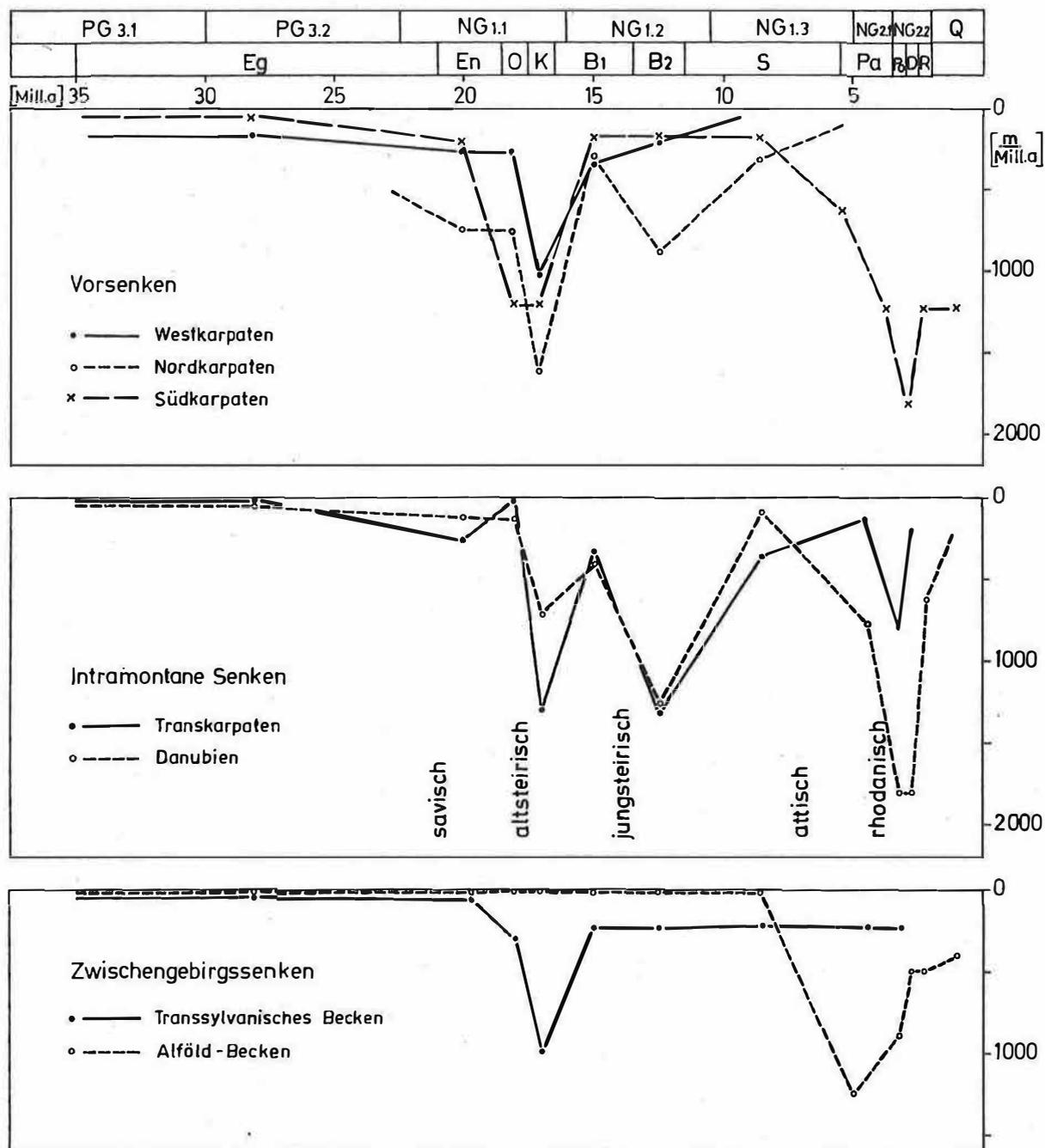


Abb. 4. Tectonogramme posttektonogenetischer Senken des Karpatenraumes (nach Angaben von SENEŠ u.a. 1971 [21], SENEŠ & CÍCHA 1973 [20], KÖRÖSSY 1970 [9]); absolute Zeitskala nach BERGGREN (1972) [1]
 Abkürzungen der stratigraphischen Stufen: Eg - Egerien, En - Eggenburgien, O - Ottnangien, K - Karpatien, B1 - unteres Badenien, B2 - oberes Badenien, S - Sarmatien, Pa - Pannonien, Po - Pontien, D - Dazien, R - Rumanien

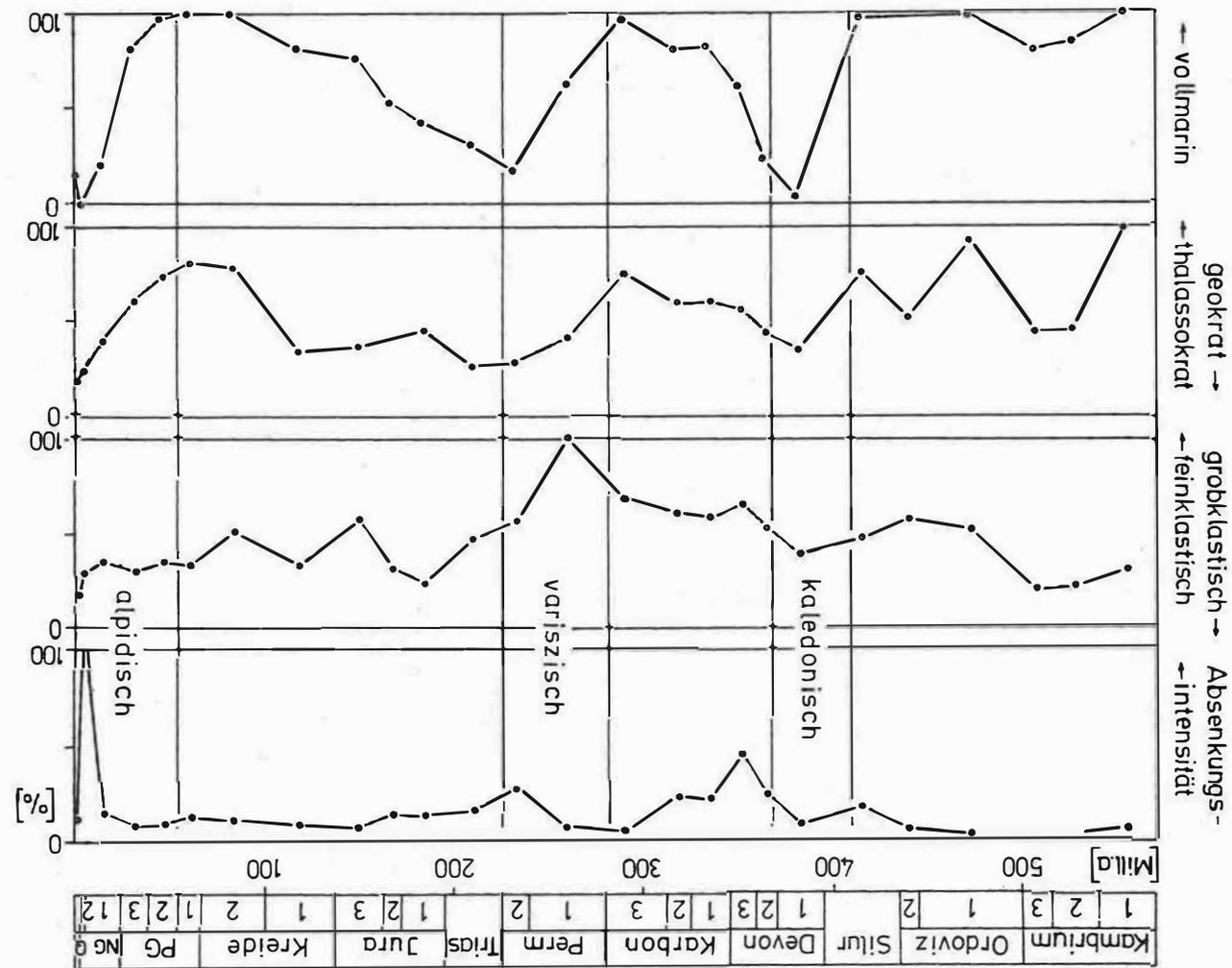


Abb. 5. Kurven der paläotektonischen und stofflichen Entwicklung der Osteuropäischen Tafel (nach Angaben von RONOVA u.a. 1969 [14])

Kurve 1 - Tektonogramm; **Kurve 2 - Lithogramm** (dargestellt sind lithologische Kennwerte, berechnet aus prozentualen Anteilen lithologischer Gesteinstypen); **Kurve 3 - paläotektonische Charakteristik** (berechnet aus den prozentualen Anteilen der paläogeographischen Bildungsbedingungen); **Kurve 4 - Flächenanteil der vollmarinen Bedingungen** (mariner Schelf). Die Umrechnung der Angaben RONOVA u.a. erfolgte nach einer von SCHWAB (1972) [16] beschriebenen Methode.

Konsequenzen der geodätischen Nutzung von Laserbeobachtungen
künstlicher Erdsatelliten

von

L. STANGE

Zusammenfassung

Die Möglichkeiten zur Ausnutzung der hohen Genauigkeit moderner Laserinstrumente für geodätische Aufgabenstellungen werden untersucht. Nach geometrischen Methoden können Netze, in denen Simultanbeobachtungen von zwei oder drei Stationen vorliegen, mit einer Genauigkeit von 10^{-6} abgeleitet werden. Zur Ausnutzung der Genauigkeitsleistung der Lasergeräte der zweiten Generation (10^{-7} und besser) müssen Netzformen aufgebaut werden, deren Geometrie allein durch die Streckenmessungen bestimmt wird. Es kommen zwei Netztypen in Betracht, die Simultanbeobachtungen von 4 bzw. 6 Stationen voraussetzen. Ferner können geodätische Informationen mit entsprechender Genauigkeit nach dynamischen Methoden aus Laserbeobachtungen von "Cannonball"-Satelliten abgeleitet werden. Kombinationen geometrischer und dynamischer Verfahren sowie die Einbeziehung von Lasermessungen nach dem Mond werden ebenfalls betrachtet.

Summary

The possibilities taking advantage of the high accuracy of recent laser instruments for geodetical purposes are investigated. Networks with simultaneous observations from two or three stations can be derived by geometrical methods with an accuracy of 10^{-6} . In order to profit by the accuracy efficiency of the laser devices of the second generation (10^{-7} and better) network configurations have to be built up whose geometry is determined by the range measurements only. Two types of networks come into question, which presuppose simultaneous observations from 4 or 6 stations. Furthermore, geodetical information can be derived from laser observations of "Cannonball" satellites by dynamical methods. Combinations of geometrical and dynamical techniques as well as the inclusion of laser ranging to the Moon are likewise considered.

Резюме

Исследуются возможности использования высокой точности современных лазерных инструментов для решения геодезических проблем. Сети, в которых имеются синхронные наблюдения с двух или трех станций, могут быть выведены геометрическими методами с точностью 10^{-6} . Чтобы использовать точность лазерных инструментов второго поколения (10^{-7} и лучше), необходимо построить конфигурации, геометрическая форма которых определяется исключительно линейными измерениями. Пригодны два вида сетей, предполагающих синхронные наблюдения с 4^Х или 6^{ТИ} станций. Кроме этого, геодезические данные соответствующей точности могут быть выведены динамическими методами из лазерных наблюдений сверхтяжелых спутников. Рассматриваются также комбинации из геометрических и динамических методов и включение лазерной локации Луны.

1. Einleitung

Die Laser-Entfernungsmessung nach künstlichen Satelliten hat sich zum genauesten Beobachtungsverfahren der Satellitengeodäsie entwickelt. Mit Laserinstrumenten der ersten Generation (Impulsbreite 20 ns, Laufzeitmessung auf 10 ns), von denen gegenwärtig etwa 20 Geräte weltweit im Einsatz sind, werden Meßgenauigkeiten von ± 1 bis 2 m erreicht. Die in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befindlichen Instrumente der zweiten Generation (Laufzeitmessung auf ≤ 1 ns) lassen eine Verminderung des Meßfehlers auf ± 1 dm erwarten. Von den instrumentellen Möglichkeiten her und unter Berücksichtigung der nicht beherrschbaren äußeren Einflüsse scheint für die Zukunft sogar eine Genauigkeit von ± 3 cm erreichbar zu sein.

Zur effektivsten Nutzung von Satellitenbeobachtungen für die Ableitung von Elementen geodätischer Netze und von Stationskoordinaten kommt man, wenn die Beobachtungsvektoren vollständig nach Richtung und Länge bestimmt und in das Problem eingeführt werden. Dazu sind simultane photographische Satellitenbeobachtungen und Laser-Entfernungsmessungen erforderlich. Aus Kamerabeobachtungen können die Richtungskomponenten des Beobachtungsvektors auf $\pm 0,5''$ bis $1,0''$ genau abgeleitet werden. Werden derartige Beobachtungen mit Laser-Entfernungsmessungen von Instrumenten der ersten Generation kombiniert, so sind die Genauigkeitsrelationen der Komponenten der Beobachtungsvektoren ausgewogen. Beim Einsatz von Lasergeräten der zweiten Generation treten dagegen erhebliche Inhomogenitäten auf, da die Längskomponenten um den Faktor 25 genauer bestimmt werden als die Richtungskomponenten. Deshalb ist die geodätische Ausnutzung der hohen Genauigkeit dieser Instrumente problematisch.

2. Nutzung nach geometrischen Methoden

Wenn von den beiden terrestrischen Stationen L_1 und L_2 simultane Richtungs- und Streckenmessungen nach den Satellitenpositionen S_1 (Abb. 1) ausgeführt werden, so ist eine vollständige Ableitung des geodätischen Vektors $\overrightarrow{L_1 L_2}$ möglich. Stehen nur simultane Richtungsbeobachtungen nach mindestens zwei Satellitenpositionen zur Verfügung, so kann die Richtung $L_1 L_2$ bestimmt werden. Allein aus Streckenmessungen von L_1 und L_2 läßt sich jedoch keine Information über die relative Lage dieser Stationen gewinnen. Auch wenn Simultanbeobachtungen von drei terrestrischen Punkten L_1, L_2, L_3 verfügbar sind, ändert sich an diesen Aussagen nichts. Erst wenn Streckenmessungen von vier oder mehr Stationen vorliegen, können die Entfernungen zwischen diesen Stationen und damit die innere Geometrie des Netzes ohne Nutzung von Richtungsbeobachtungen bestimmt werden.

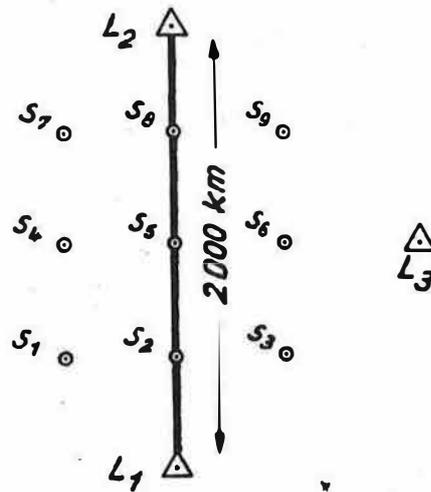


Abb. 1. Netzschema zur Ableitung des Vektors $\overline{L_1 L_2}$

Die Genauigkeitsleistung von Konfigurationen mit zwei oder drei terrestrischen Stationen entsprechend Abb. 1 für die Ableitung des Vektors $\overline{L_1 L_2}$ ist von SCHOEPS [4] in umfangreichen Variantenrechnungen untersucht worden. In Tab. 1 wird ein Auszug aus den erhaltenen Ergebnissen gebracht. Vorausgesetzt wurde eine Genauigkeit der Richtungskomponenten von $\pm 1,0''$ und der Streckenmessungen von ± 2 m. Der Längenfehler des Vektors $\overline{L_1 L_2}$ wird mit m_l , die Querfehler werden mit m_x (azimutal) und m_y (zenital) und der Positionsfehler des Vektorendpunktes L_2 wird mit M bezeichnet.

Wird bei gleicher Richtungsgenauigkeit ($\pm 1''$) ein Streckenmeßfehler $m_e = \pm 0,1$ m angenommen, so verringern sich die in Tab. 1 angegebenen mittleren Fehler im günstigsten Fall um 3 %; meistens tritt überhaupt kein Genauigkeitsgewinn ein.

Tab. 1. Genauigkeit des Vektors $\overrightarrow{L_1 L_2}$

| Satellitenhöhe | Fehlermaß | Simultanbeobachtungen | | |
|----------------|-----------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | | von 2 Stationen Streckenmessungen | | von 3 Stationen Streckenmessungen |
| | | nur von L_1 | von L_1 u. L_2 | von L_1, L_2, L_3 |
| 500 km | m_1 | $\pm 4,2$ m | $\pm 1,6$ m | $\pm 1,5$ m |
| | m_x | 2,9 | 2,7 | 2,4 |
| | m_y | 4,2 | 2,6 | 2,5 |
| | M | 6,6 | 4,1 | 3,8 |
| 1000 km | m_1 | 5,0 | 2,5 | 2,4 |
| | m_x | 3,7 | 3,3 | 3,1 |
| | m_y | 6,8 | 2,6 | 2,4 |
| | M | 9,2 | 4,9 | 4,6 |
| 2000 km | m_1 | 8,1 | 4,4 | 4,2 |
| | m_x | 5,6 | 4,9 | 4,7 |
| | m_y | 15,5 | 2,4 | 2,3 |
| | M | 18,4 | 7,0 | 6,7 |

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

1. Bei Vektorbestimmungen aus Beobachtungen von zwei und drei terrestrischen Stationen genügt es, eine Streckenmeßgenauigkeit von ± 2 m vorzusehen. Eine weitere Genauigkeitssteigerung der Streckenmessung verringert den Positionsfehler des Vektorendpunktes nicht mehr. Zur satellitengeodätischen Bestimmung von Vektorzügen benötigt man deshalb keine Laserinstrumente höchster Genauigkeit.
2. Wenn simultane Streckenmessungen von beiden Endpunkten des Vektors ausgeführt werden, erhöht sich die Genauigkeit um oa. 50 % gegenüber der Bestimmung des Vektors mit nur einer Streckenmessung.

3. Bei Einbeziehung einer dritten terrestrischen Station in die Beobachtungen ist die weitere Genauigkeitssteigerung gering. Die Lage der dritten Station ist dabei praktisch ohne Einfluß.
4. Zur Ableitung geodätischer Vektoren sind niedrige Satelliten fehlertheoretisch günstiger als hohe. Wenn hohe Satelliten beobachtet werden, ist der Genauigkeitsgewinn durch Streckenmessungen von beiden Endpunkten besonders groß.
5. Durch Streckenmessungen von beiden Endpunkten werden in der Hauptsache die zenitale und die Längskomponente, weniger die azimutale Komponente verringert.

Mit Netzkonfigurationen, bei denen Richtungsmessungen zur Festlegung der inneren Geometrie notwendig sind, kann eine Genauigkeit der Vektorbestimmung in der Ordnung von 10^{-6} erreicht werden. Eine Steigerung dieser Genauigkeit ist erst möglich, wenn die Präzision der Richtungsbestimmung erhöht werden kann.

Zur Ausnutzung der Genauigkeitsleistung der Lasergeräte der zweiten Generation (10^{-7} und besser) müssen Netzformen aufgebaut werden, deren Geometrie allein durch die Streckenmessungen bestimmt wird. Zur Orientierung dieser Netze sind natürlich außerdem Richtungen erforderlich, die aus photographischen Satellitenbeobachtungen, mit Hilfe der VLBI-Technik, oder indirekt aus dynamischen Positionsbestimmungen abgeleitet werden können.

Wir nehmen an, daß aus λ terrestrischen Stationen L_1 und aus \mathcal{G} Satellitenpositionen S_1 ein räumliches Streckennetz mit $r = \lambda + \mathcal{G}$ Netzpunkten gebildet wird. Zwischen den L- und den S-Punkten sollen alle $n = \lambda \cdot \mathcal{G}$ Strecken gemessen sein; für die Abstände zwischen den L-Punkten und zwischen den S-Punkten werden keine Informationen eingeführt. Die innere Geometrie dieses Raumnetzes wird eindeutig fixiert durch $u = 3r - 6$ unabhängige Bestimmungsstücke. Eine einfach determinierte Lösung ist möglich, wenn die Anzahl u der Unbekannten gleich der Anzahl n der unabhängigen Beobachtungen ist. Aus $n = u$ folgt

$$(1) \quad \lambda \mathcal{G} = 3\lambda + 3\mathcal{G} - 6.$$

Gleichung (1) hat zwei ganzzahlige Lösungen, nämlich

$$\lambda = 4, \quad \mathcal{G} = 6 \quad (\text{Netztyp I})$$

und

$$\lambda = 6, \quad \mathcal{G} = 4 \quad (\text{Netztyp II}).$$

Bei Netztyp I müssen Simultanbeobachtungen von 4 terrestrischen Stationen vorliegen, und es sind mindestens 6 Quadrupel von Streckenmessungen erforderlich. Netztyp II erfordert Simultanbeobachtungen von 6 Stationen nach mindestens 4 Satellitenpositionen.

Von praktischer Bedeutung ist das Problem der gefährlichen Örter, das in [3] untersucht wurde. Ein gefährlicher Ort liegt vor, wenn alle 10 Netzpunkte L_1 und S_1 auf einer Fläche zweiter Ordnung liegen oder wenn die Punkte der Vierergruppe – bei Netztyp I die L- und bei Netztyp II die S-Punkte – in einer Ebene liegen. Die letzte Forderung beeinträchtigt insbesondere die Genauigkeitsleistung von Netztyp I, weil die vier auf der Erdoberfläche liegenden Beobachtungsstationen meist nur relativ geringe Abweichungen von der Komplanarität zeigen. Ferner ergeben sich gefährliche Konfigurationen, wenn die Punkte der Sechsergruppe auf einem Kegelschnitt oder in einer Ebene liegen, der außerdem noch ein Punkt der Vierergruppe angehört.

Die Fehlerübertragung von den Beobachtungsfehlern m_E zu den Fehlern m_S der abgeleiteten Netzseiten wird durch eine Gleichung der Form (2) beschrieben:

$$(2) \quad m_S = \sqrt{Q_{SS}} \cdot m_E.$$

Der Fehlervergrößerungsfaktor $\sqrt{Q_{SS}}$ liegt bei Netztyp I und bei Netzseiten von 2000 km Länge nur bei optimalen Konfigurationen geringfügig unter 4 und ist sonst allgemein größer. Eine solche optimale Konfiguration liegt z.B. vor, wenn drei der terrestrischen Stationen ein gleichseitiges Dreieck bilden, in dessen Schwerpunkt die vierte Station liegt. Nach [1] liegt der Fehlervergrößerungsfaktor für Netzseiten von 7000 km Länge bei 2,8. Offensichtlich wird hier die Netzgeometrie durch die Erdkrümmung verbessert.

Günstiger ist die Fehlergeometrie von Netztyp II. Die Forderung, daß die vier beobachteten Satellitenpositionen nicht in einer Ebene liegen dürfen, ist nicht problematisch, insbesondere weil man stets überschüssige Beobachtungen und damit mehr als vier S-Punkte einführen wird. Deshalb ist die Fehlerübertragung nach (2) viel günstiger. Der Vergrößerungsfaktor $\sqrt{Q_{SS}}$ beträgt in einem weiten Bereich nur 2. Der Netztyp II bildet die Grundlage der in [2] vorgeschlagenen "3-D-Multilateration".

Es ist also möglich, terrestrische Basen mit Längen zwischen 1000 und 3000 km aus Beobachtungen mit Laser-Entfernungsmessern der zweiten Generation mit einer Genauigkeit von 10^{-7} abzuleiten. Längere Erdsehnen können noch genauer bestimmt werden. Allerdings ist der Aufwand erheblich. Es muß vorausgesetzt werden, daß 6 bzw. 4 kooperierende Stationen mit Lasergeräten der zweiten Generation ausgerüstet sind und daß Simultanbeobachtungen von allen Stationen erhalten werden. Nach vorliegenden Erfahrungen sind aber Simultanbeobachtungen von 6 oder 4 Stationen außerordentlich seltene Ereignisse; deshalb sind lange Beobachtungsperioden zur Sammlung des geeigneten Beobachtungsmaterials erforderlich. Der Ausnutzungsgrad des gesamten Beobachtungsmaterials wird gering sein.

3. Nutzung nach dynamischen Methoden

Die Koordinaten terrestrischer Stationen können auch nach der Bahnmethode auf dynamischem Wege abgeleitet werden. Für diese Aufgabe empfiehlt sich die Anwendung der sog. "halbdynamischen Variante" der Bahnmethode, bei der die Parameter des Schwerefeldes

und der übrigen Störfelder als bekannte Größen eingeführt und nur die Stationskoordinaten als Unbekannte behandelt werden. Eine eindeutige Bestimmung der Koordinaten ist aus drei Entfernungsmessungen nach Satellitenpositionen möglich, die nicht dem gleichen Durchgang eines Satelliten angehören. Da keine Forderungen hinsichtlich der Gleichzeitigkeit gestellt werden, wird die Anzahl der verfügbaren Beobachtungen stets viel größer sein.

Wenn die hohe Genauigkeit der Lasermessungen genutzt werden soll, muß eine adäquate Präzision der Bahnbestimmung gefordert werden. Diese ist abhängig von der Genauigkeit der zur Bahnbestimmung benutzten Beobachtungen, von der Verteilung der Beobachtungen längs der Bahn und von der Vollständigkeit und Genauigkeit des zugrunde gelegten mathematisch-physikalischen Störungsmodells. Gerade die genaue mathematische Modellierung aller Störungen begrenzt die erreichbare Genauigkeit, die mit gegenwärtig vorhandenen Theorien und zugehörigen EDV-Programmen bei Satelliten vom Geos-Typ bei einigen Metern liegt. Einen Fortschritt um eine Zehnerpotenz versprechen die in [5] vorgeschlagenen Satelliten vom "Cannonball"-Typ. Dabei handelt es sich um superschwere Satelliten aus Uran, besetzt mit Laserreflektoren, die sich in hohen, nicht resonant gestörten Bahnen bewegen. Infolge des hohen Masse-Querschnitts-Quotienten sind die nichtgravitativen Reibungsstörungen gering, und wegen der streng sphärischen Form des Satelliten können sie sehr genau berechnet werden. Man erwartet eine Prädiktionsgenauigkeit dieser Satelliten von 0,5 m über längere Bahnbogen. Die ersten Starts derartiger Satelliten sind bereits geplant; es handelt sich um den französischen Satelliten STARLETTE (50 kg, $r = 12$ cm, geplanter Start 1974) und um den US-amerikanischen Satelliten LAGEOS (660 kg, $r = 22$ cm, geplanter Start 1975).

Mit hochgenauen Laserbeobachtungen dieser Satelliten sind für die Stationskoordinaten Genauigkeiten von wenigen Dezimetern zu erwarten. Mit der gleichen Präzision können dann die gegenseitigen Abstände verschiedener Stationen abgeleitet werden. Es muß hervorgehoben werden, daß auf diesem dynamischen Wege allein aus Streckenmessungen auch Richtungsinformationen erhalten werden. Aus der zeitlichen Änderung der Stationskoordinaten kann auf das Verhalten des geozentrischen terrestrischen Koordinatensystems und auf geodynamische Prozesse geschlossen werden (Polbewegungen, Rotationsschwankungen, Krustenbewegungen). Selbstverständlich besteht die Notwendigkeit, daß ein weltweit verteiltes Netz von Beobachtungsstationen das zur Bahnbestimmung erforderliche Beobachtungsmaterial liefert. Aber es genügt, wenn in diesem Netz zur Erreichung der geforderten Genauigkeit nur einige gut verteilte Stationen mit Lasergeräten der zweiten Generation ausgestattet sind.

4. Nutzung nach kombinierten Verfahren

Optimale Ergebnisse wird man sicher erhalten, wenn geometrische und dynamische Methoden kombiniert angewendet werden. Dabei können die unterschiedlichen Fehlergesetzmäßigkeiten der verschiedenen Varianten zur Ausschaltung systematischer Fehler und zur Genauigkeitssteigerung ausgenutzt werden. Der Beobachtungsaufwand muß dabei nicht unbedingt erheblich ansteigen. Zur geometrischen Ableitung eines terrestrischen Streckennetzes müssen die beteiligten Laserstationen über einen längeren Zeitraum kontinuier-

lich beobachten, damit die erforderliche Anzahl von Quadrupeln oder Sextupeln simultaner Streokenmessungen erhalten wird. Die Gesamtzahl der erhaltenen Beobachtungen wird um das Mehrhundertfache größer sein. Das gesamte Material kann deshalb mit Vorteil zusätzlich zur dynamischen Nutzung Verwendung finden und dabei die Orientierung des Netzes und den Anschluß an das geozentrische Koordinatensystem vermitteln.

Günstige Aspekte für eine kombinierte Nutzung sind auch in Lasermessungen nach den auf dem Mond installierten Reflektoren enthalten. Abgesehen von den größeren beobachtungstechnischen Schwierigkeiten, ist die geodätische Ausnutzung der hohen Präzision von Laserdistanzmessungen bei Mondbeobachtungen mit weniger Komplikationen verbunden als bei Beobachtungen künstlicher Satelliten. Die verschiedenen Möglichkeiten der geodätischen Nutzung von Lasermessungen zum Mond können als Anwendungen der Bahnmethode mit minimal kurzen Bahnbogen aufgefaßt werden, die so spezifiziert sind, daß Ungenauigkeiten in den Mondbahnelementen und in den selenozentrischen Koordinaten des Reflektors ohne praktischen Einfluß bleiben. Die gemessenen Distanzen zum Mond erleiden durch die Rotation der Erde um ihre Achse eine stärkere Veränderung als durch die Bahnbewegung des Mondes. Deshalb wird die Erdrotation unmittelbar zur Ableitung von Positionsparametern der Beobachtungsstationen ausgenutzt. Die Verfahren liefern mit hoher Genauigkeit die Abstände der Beobachtungsstationen von der momentanen Rotationsachse und die Längenunterschiede $\Delta\lambda$ der Stationen. Daraus lassen sich die Ost—West-Komponenten der Stationsentfernungen genau ableiten, während die Nord—Süd-Komponenten nur mit geringerer Genauigkeit erhalten werden. Diese Inhomogenität der Netzgenauigkeit läßt sich durch Verfahrenskombinationen eliminieren, bei denen außer Mondbeobachtungen auch Laserentfernungsmessungen nach künstlichen Satelliten genutzt werden. Andererseits bilden die Ergebnisse der Mondverfahren sehr effektive Zusatzbedingungen zur Stabilisierung von aus Beobachtungen künstlicher Satelliten abgeleiteten Netzen.

Literatur

- [1] BENDER, P.L.; u.a. Satellite geodesy using laser range measurements only.
J. geophys. Res. 73 (1968) 16, S. 5353-5357
- [2] ESCOBAL, P.R.; u.a. 3-D Multilateration: A precision geodetic measurement system.
JPL quart. techn. Rev. 2 (1972) 3
- [3] RINNER, K.;
KILLIAN, K.;
MEISSL, P. Beiträge zur Theorie der geodätischen Netze im Raum.
Dt. geodät. Kommiss., R.A, H. 61 (1969)
- [4] SCHOEPS, D. Über den Einfluß von Streokenmessungen verschiedener Genauigkeit auf die Bestimmung von geodätischen Vektoren durch Beobachtung künstlicher Satelliten (russ.).
Nabljudeniya iskusstv. sputnikov zemli (1971) 11, S. 185-188
- [5] WEIFFENBACH, G.C.;
HOFFMAN, T.E. A passive stable satellite for Earth-Physics application.
SAO spec. Rep. Nr. 329 (1970)

Betrachtungen zum Nachweis von Gezeiteneffekten
in geodätisch-astronomischen Breitenbestimmungen

von

1)

CL. ELSTNER und J. HÖPFNER

Zusammenfassung

In Beobachtungsreihen der geographischen Breite sind die meridionalen Komponenten der gezeitenbedingten Lotschwankungen enthalten. Die Reihe der Potsdamer Beobachtungen, die 1957 mit einem Astrolab DANJON begonnen wurde, wird auf gezeitenperiodische Lotschwankungsanteile untersucht. Die Periode der größten Partialtide M_2 konnte mit einem Faltungsverfahren und als Schwebungsfrequenz im FOURIER-Spektrum nachgewiesen werden. Ihre Amplitude erweist sich infolge überlagerter Variationen als zeitlich variabel. Im Energiespektrum treten halb- und ganztägige Breitenschwankungen deutlich hervor, wobei auch Krustendeformationen und Refraktionswirkungen beteiligt sein können.

Summary

Geographical latitude observations are affected by the meridional components of the variations of the vertical arising by the tides. Latitude observations at Potsdam are performed with a DANJON astrolabe since 1957. These data were investigated with respect to tide-produced variations of the vertical. The period of the biggest tidal wave M_2 could be detected with the aid of a folding mechanism and by FOURIER analysis. Its amplitude is influenced by other short-period and random variations. The power spectrum significantly shows diurnal and semidiurnal latitude variations containing probably also crustal deformations and refraction disturbances.

Резюме

В рядах широтных наблюдений содержатся меридиональные составляющие, обусловленные приливными колебаниями отвесной линии. Ряд Потсдамских наблюдений, полученных начиная с 1957 года на астролябии Данжона, исследуются относительно членов приливо-периодических колебаний отвесной линии. Период наибольшего прилива M_2 доказывається способом складываний и анализом по методу Фурье. Амплитуда периода оказывається переменной по времени вследствие суперпозиционных вариаций. В спектральной плотности ярко выражены суточные и полусуточные колебания широты, в которых могут участвовать также деформации земной коры и рефракционные влияния.

1) Abb. 2 u. 6 als Anlage

1. Zur Veränderlichkeit der geographischen Breite

Bei geodätisch-astronomischen Beobachtungen der geographischen Breite wird der Winkel zwischen der Lotrichtung im Beobachtungspunkt und der Richtung des momentanen Rotationsvektors der Erde bestimmt. Das Komplement dieses Winkels stellt die geographische Breite dar. Deren Veränderung wird also durch die meridionalen Richtungsvariationen des lokalen Schwerevektors und des Rotationsvektors der Erde hervorgerufen, die im äquatorialen astronomischen Koordinatensystem beschrieben werden. Eine Trennung beider Richtungsvariationen aus dem Beobachtungsmaterial ist nur dann aussichtsreich, wenn Beobachtungsreihen von verschiedenen Punkten der Erdoberfläche vorliegen, so daß die unterschiedliche Breiten- und Längenabhängigkeit von Lot- und Polschwankungen ausgenutzt werden kann. Irreguläre, lokal bzw. regional auftretende Lotschwankungen dürften diese Auftrennung begrenzen.

Die Bewegung der Rotationsachse der Erde wird sowohl durch die freie EULER-CHANDLER-Bewegung gegenüber der Figurenachse (Hauptträgheitsachse) der Erde als auch durch die erzwungene Präzessions- und Nutationsbewegung im Inertialsystem bewirkt. Erstere kommt bekanntlich durch die unterschiedliche Richtung von Figuren- und Rotationsachse im Erdkörper zustande. Ursache der räumlichen Nutationsbewegungen sowie der Präzession sind die diurnen Komponenten der Gezeitenbeschleunigung, die eine tesserale Verteilung aufweisen und tagesperiodische Schwankungen der Trägheitsachsen und damit der Rotationsachse im Erdkörper verursachen, die von der Größenordnung der täglichen Lotschwankungen sind [8].

Da die Präzessions-Nutations-Terme durch Reduktion des Beobachtungsmaterials eliminiert sind, können nur noch die relativ geringen Restbeträge wirksam sein, die auf Grund der Unterschiede zwischen den für starre Erde berechneten Reduktionsdaten und den wahren Werten, die durch Elastizität und Rheologie des Erdkörpers modifiziert sind, bestehen. Der experimentelle Nachweis ist ähnlich problematisch wie bei den gezeitenbedingten Lotschwankungen, da die periodischen Veränderungen in der Schiefe der Ekliptik mit Ausnahme des halbjährigen (0 γ 55) und des 18,6jährigen Terms (9 γ 21) kleiner als 0 γ 1 sind. Nach Ergebnissen von ORLOV, FEDOROV & EVTOUCHENKO [4] sind Abweichungen von etwa 10 % in den halbmonatlichen Tiden nachgewiesen worden.

Die Lage der Rotationsachse im Erdkörper wird auch durch meridionale Massentransporte (Veränderungen der Luftdruckverteilung) und durch Resonanzeffekte eines flüssigen Erdkernes beeinflusst. Die Periode der resonanten Bewegung beträgt nach MOLODENSKIJ [9] $23^{\text{h}}52^{\text{m}}58,6^{\text{s}}$ und konnte von IATSKIV [6] am Breitenmaterial von Pulkowo bestätigt werden. Die ermittelten Amplituden liegen bei 0 γ 01 bis 0 γ 02.

Die Bewegung der Lotrichtung in der Meridianebene wird durch die N—S-Komponente der Gezeitenbeschleunigung und durch alle Veränderungen der Massenverteilung verursacht, deren Rückwirkungen über das Schwerepotential zu einer N—S-Komponente im Schwerfeld führen. Hierzu sind indirekte Gezeiteneffekte, Luftdruckvariationen sowie das thermische und das hydrologische Regime zu zählen. Während die direkten und indirekten Gezeitenwirkungen streng periodische Erscheinungen bekannter Frequenz sind [1], deren Spektrum in Abb. 1 wiedergegeben ist, sind die übrigen Lotschwankungen

quasiperiodischer Natur und besitzen ein zeitlich variables Spektrum. Bewegungen der Erdkruste, an denen nur geringe Massen beteiligt sind oder die in hinreichend großer Entfernung vom Beobachtungsort ablaufen, so daß keine Lotänderung damit verbunden ist, verursachen auch keine Breitenschwankungen.

Es ist zu beachten, daß bei geodätisch-astronomischen Beobachtungen die Veränderungen der Lotlinie gegenüber dem Rotationsvektor der Erde erfaßt werden, während bei geophysikalischen Lotschwankungsmessungen die Lotrichtung gegenüber der Normalen am Aufstellungsort des Gerätes registriert wird.

Betrachten wir nunmehr die Wirkung der meridionalen Komponenten der Gezeitenbeschleunigung. Gemäß der LOVEschen Theorie ist das Potential an der Oberfläche der elastisch deformierten Erde proportional der Gezeitenbeschleunigung. Für die Lotschwankung bezüglich der Rotationsachse gilt die Relation:

$$(\Delta\epsilon)_{N-S} = (1 + k - l) \frac{1}{a} \frac{\partial W_2}{g \partial \theta} .$$

k und l sind die Proportionalitätskonstanten für das Deformationspotential (Potentialänderung infolge der elastischen Deformation) und die elastische Horizontalverschiebung; a bezeichnet den mittleren Erdradius, g die Schwere, W_2 das Gezeitenpotential und θ die Poldistanz des Beobachtungspunktes. Bildet man das Verhältnis zwischen den Breitenschwankungen (bzw. Lotschwankungen) für elastische Erde ($k, l \neq 0$) und für starre Erde ($k, l = 0$), so bekommt man

$$\Lambda = 1 + k - l ,$$

einen Wert, der zwischen 1,20 und 1,30 zu erwarten ist, wenn alle anderen Störungsursachen eliminiert sind. Da die Beträge der wirksamen Meridionalen Komponenten der Lotschwankungen etwa um eine Größenordnung unter der Genauigkeit einer Breitenbeobachtung liegen, besteht nur dann Aussicht auf einen erfolgreichen Nachweis, wenn ein langjähriges homogenes Beobachtungsmaterial zur Verfügung steht.

2. Beobachtungsmaterial

In Potsdam werden seit Oktober 1957 geodätisch-astronomische Beobachtungen mit einem Astrolab DANJON nach der Methode der gleichen Zenitdistanzen angestellt [2, 13, 18 - 21]. Speziell beziehen sich diese Beobachtungen auf ein festes Beobachtungsprogramm von 12 Gruppen mit je 24 bis 29 Fundamentalsternen. Davon werden jeweils in einer Nacht möglichst zwei aufeinanderfolgende Gruppen beobachtet. Aus den gruppenweisen Beobachtungen (im Durchschnitt sind es 180 je Jahr) erhält man simultan die Ergebnisse für die Rotationszeit der Erde und für die geographische Breite. Den Untersuchungen liegen die erhaltenen Breitenwerte zugrunde; als Beispiel sind sie für das Jahr 1958 in Abb. 2 graphisch dargestellt. Die Einzelwerte werden hier durch den für die Beobachter benutzten Code 1, 2 und 4 markiert. Zusätzlich sind die jeweils um 15 Werte übergreifenden

Mittelwerte aus 20 Werten als Punkte eingetragen und miteinander verbunden. Es ist zu ersehen, wie sich die geographische Breite von Potsdam im Verlaufe des Jahres hauptsächlich wegen des Einflusses der Polbewegung ändert. Die Zahlenkolonne links sind die modifizierten Julianischen Daten (MJD).

In der Zeit von 1957 bis 1961 sind die Astrolab-Beobachtungen im Fundamentalsystem des FK 3R ausgewertet worden. Danach beziehen sich die Ausgleichungsergebnisse auf das FK-4-System. Hierzu muß allerdings noch bemerkt werden, daß von 1968 an die jährliche Aberrationskonstante von 20 \ddot{y} 47 auf 20 \ddot{y} 496 korrigiert wurde.

Wie bereits erwähnt, hat die langsame Breitenänderung ihre Ursache vornehmlich in der Polbewegung. Die Polkoordinaten im CIO-System (Conventional International Origin) [14 - 16] enthalten säkulare und langperiodische Komponenten. Sie wurden dazu benutzt, die Breitenwerte vom Trend zu befreien.

Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zweier Methoden mitgeteilt.

3. Faltungsanalyse

Die FOURIER-Darstellung des reduzierten Materials für den Zeitraum von 1957 bis 1969 zeigt die in Abb. 3 wiedergegebenen signifikanten Amplituden. Am auffälligsten sind die große Amplitude der Grundmode und die relativ hohen Anteile im Bereich der CHANDLER- und Jahreswelle, die vermutlich stärkere regionale und lokale Anteile repräsentieren. Zur schärferen Erfassung der Maxima im CHANDLER- und Jahresbereich wurde das Material durch eine periodische Funktion mit schrittweise variabler Periode approximiert. Es ergaben sich Amplitudenmaxima bei 449, 400 und 355 Tagen, von denen das bei 400 Tagen als eine Überlagerung (Addition) der CHANDLER- und der langperiodischen Mode angesehen werden kann. Die entsprechende Differenzfrequenz liegt bei 488 Tagen und ist in Abb. 3 zu erkennen (Maximum bei 495 Tagen). Die von der CHANDLER-Welle modulierte langperiodische Breitenschwankung in Potsdam ist in Abb. 4 dargestellt.

Aus den Untersuchungen von YUMI, ISHII & SATO [17] und OKUDA [10] geht hervor, daß die Potsdam benachbarte Station des Internationalen Breitendienstes in Carloforte die langsamen Breitenvariationen von mehr als 10 Jahren nicht enthält. Möglicherweise ist die aus geophysikalischen Lotschwankungsmessungen erschlossene größere Nachgiebigkeit der Erdkruste in Mittel- und Nordeuropa gegenüber dem Mittelmeerraum damit in Verbindung zu bringen. Die bisherigen Untersuchungen über lokale Breitenschwankungen führen zu der Auffassung, daß neben den Bewegungen der Rotationsachse Deformationen der Erdoberfläche mit zwei oder drei Perioden längs eines Breitenkreises und einer zeitlichen Periode von ca. 19 Jahren existieren könnten.

Zur Berechnung der M_2 -Tide wurden die Breitendaten von den langperiodischen Schwankungen gemäß Abb. 3 befreit und ihre Zeitkoordinate nach Teilintervallen der theoretischen M_2 -Phase geordnet. Die in den Teilintervallen enthaltenen Mittelwerte wurden zur Bestimmung von Amplitude und Phase der beobachteten M_2 -Welle benutzt. Das Verhältnis der beobachteten zur theoretischen M_2 -Amplitude, d.h. der Faktor A , und der

zugehörige mittlere Fehler sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Beobachtungen in Abb. 5 dargestellt.

Die Λ -Werte zeigen eine relativ starke Abweichung vom Erwartungswert. Das Verhalten der mittleren Fehler zeigt, daß die M_2 -Variationen der Lotrichtung von zeitlich variablen systematischen Einflüssen überlagert sind. Die Ausgleichung aller hier benutzten Beobachtungen, die $\Lambda = 1,34 \pm 0,46$ ergibt, erscheint aus diesem Grunde wenig aussagekräftig.

Der Einfluß der signifikanten langperiodischen Breitenschwankungen auf die Λ -Werte ist unwesentlich, die Phasenwinkel der M_2 -Welle werden jedoch auf etwa 1^h vergrößert (Zeitunterschied gegenüber der theoretischen M_2 -Welle). Die Phasenwerte für das reduzierte Datenmaterial ergeben sich zu etwa $-0,1^h$ ($2,90^0$), sind jedoch kaum signifikant von Null verschieden.

Die Existenz von Breitenschwankungen mit M_2 -Periode läßt sich auch noch durch die Schwankungsperiode mit einer 12stündigen Welle absichern, die 14,765 Tage beträgt und im FOURIER-Spektrum mit einer Amplitude von $0,0194 \pm 0,0068$ bei 14,76 Tagen auftritt.

Das mit Jahresbeginn 1962 eingeführte verbesserte astronomische Bezugssystem des FK 4 scheint keinen wesentlichen Einfluß auf die erzielten Ergebnisse auszuüben, wie man aus dem Verlauf der Λ -Faktoren in Abb. 5 ersieht. Auch die Mittelwerte von je zweihundert aufeinanderfolgenden Beobachtungen zeigen an dieser Stelle keine sprunghafte Veränderung. Inwieweit einzelne Sterngruppen eine stärkere Auswirkung auf die gesuchten Größen ausüben, könnte nach entsprechender Sortierung des Datenmaterials untersucht werden.

Bezüglich der in Potsdam größten Gezeitenpartialtide in meridionaler Richtung (M_2) ist festzustellen, daß sie sich in den Breitenbeobachtungen nachweisen läßt, ihre Amplitude jedoch wegen quasipersistenter kurzperiodischer Variationen, die wahrscheinlich meteorologischen Ursprungs sind, nur mit einer Sicherheit von 20 - 30 % bestimmbar ist. In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, daß Horizontalpendelbeobachtungen in Nähe der Erdoberfläche Tageswellen von etwa $1''$ erbringen, die sicher nicht ausschließlich als Bodenneigungen erklärt werden können, so daß mit Lotschwankungen in der Größenordnung von $0,1$ im Bereich von 12 und 24 Stunden zu rechnen ist. Analoge Analysen des Potsdamer Breitenmaterials ergaben für die 24stündige Schwankung

$$\Delta\varphi_{24} = 0,1 \cos(2\pi t/24 - 1,5) .$$

Es konnte gezeigt werden, daß die M_2 -Welle von dieser täglichen Variation praktisch nicht beeinflusst wird.

4. Statistische Analyse

In der geodätischen Astronomie wurden die modernen statistischen Verfahren zur Analyse von Beobachtungen bisher nur auf Mittelwerte (siehe z.B. [11, 12]), nicht aber wie sonst üblich auf Einzelwerte angewandt. Hier ist dies mit dem Ziel versucht worden, den kurzweiligen Teil der Breitenschwankungen zu untersuchen. Für das vorliegende Problem wurde die statistische Spektralanalyse benutzt, deren spezielle mathematische Grundlagen in [5] dargestellt sind. Der Verfahrensweg besteht aus zwei Schritten; im ersten Schritt wird eine Korrelationsanalyse ausgeführt und im zweiten das Energiespektrum berechnet.

Unter zulässiger Vernachlässigung der zeitlichen Abweichungen vom mittleren Zeitabstand der beobachteten aufeinanderfolgenden Gruppen kann die Wertereihe der Breite als unvollständige äquidistante Zeitfolge betrachtet werden. Diese Betrachtungsweise führt dazu, die Einzelwerte unmittelbar zur statistischen Spektralanalyse verwenden zu können, und bedeutet, daß kein Informationsverlust, der durch Mittelbildung auftritt, in Kauf genommen zu werden braucht.

Die anfänglichen Untersuchungen der praktischen Zeitfolge wurden für einzelne Zeitabschnitte ausgeführt und sind erfolgversprechend verlaufen [5]. Deshalb wurden die Arbeiten weitergeführt, und zwar parallel zueinander für die praktische Zeitfolge der Breite und die theoretische Zeitfolge der Gezeiten.

Bei den kurzperiodischen Breitenschwankungen dürfte es sich, wie einleitend beschrieben, vor allem um die MeridionalKomponenten direkter Gezeitenwirkungen handeln. Ihre theoretischen Werte sind aus der Gezeitentheorie bekannt. Für die Beobachtungsepoonen der Breitenwerte wurden sie durch harmonische Synthese der verschiedenen Tiden berechnet [1]. Insgesamt sind 84 Tiden berücksichtigt worden, davon 19 langperiodische, 28 ganztägige und 30 halbtägige aus dem Gezeitenpotential V_2 und die anderen 7 aus V_3 . Wie aus Abb. 1 zu ersehen, liefern die ganztägigen Tiden K_1 und O_1 und die halbtägigen Tiden M_2 , S_2 und N_2 die größten Anteile. Die so erhaltenen Resultate sind die der praktischen entsprechende theoretische Zeitfolge.

Für die theoretische Zeitfolge gilt als Zentrierfunktion gleich Null, während für die praktische Zeitfolge die Summe aus der Reduktion wegen des Einflusses der Polbewegung plus dem entsprechenden Mittelwert der reduzierten Einzelwerte für die einzelnen Beobachter verwandt wurde.

Der mittlere Zeitabstand zwischen den beobachteten aufeinanderfolgenden Gruppen

$$\Delta t = 1^{\text{h}}59,7^{\text{m}}$$

legt die NYQUIST-Frequenz fest zu

$$\nu_N = 90,226 \text{ }^\circ/\text{h.}$$

Da die Frequenzen der gezeitenbedingten Lotschwankungen kleiner als diese Frequenz sind, werden ihre MeridionalKomponenten also gut erfaßt.

Im beschriebenen Umfang wurden die Untersuchungen für die Zeiträume 1957 bis 1961 und 1962 bis 1971 ausgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse $P^*(v_q)$ für die geglätteten empirischen (unnormierten) Energiespektren der theoretischen und praktischen Zeitfolgen zeigt Abb. 6. Hierbei ist der m-Wert

$$m = 1855,$$

d.h., daß die Größe q , mit der die diskreten Frequenzen

$$v_q = \frac{q}{m} v_N$$

zu berechnen waren, alle ganzen Werte von 0 bis 1855 durchläuft. Wie zu ersehen, sind aber die Spektren nur abschnittsweise bis zu einem q -Wert von 625 dargestellt. Die Größe m beträgt dagegen in [5] nur $m = 399$. Auf der T-Achse ist die Periodendauer

$$T = (v_q)^{-1}$$

in Tagen abgetragen. Für die beiden Untersuchungszeiträume ist jeweils das Energiespektrum der theoretischen Zeitfolge durch die oberen Kurvenstücke und das der praktischen Zeitfolge durch die unteren Kurvenstücke veranschaulicht. Ersteres wurde aber mit dem Maßstabsfaktor 100 größer aufgetragen als letzteres. In den Energiespektren der praktischen Zeitfolgen sind zwei gut definierte Piks vorhanden. An den gleichen Stellen zeigen die Spektren der theoretischen Zeitfolgen ebenfalls Piks. Daraus kann gefolgert werden, daß das Ergebnis kurzperiodischen Charakter hat. Den Piks entsprechen Schwankungen von Tages- und Halbtagsperiode.

Zur genaueren Interpretation der Piks wegen evtl. vorhandener anderer Effekte wie beispielsweise der Meeresgezeiten und zur quantitativen Auswertung der Ergebnisse, was die Berechnung des Λ -Faktors der LOV Eschen Zahlen betrifft, werden die Studien fortgesetzt. Dabei macht es sich erforderlich, die Zentrierfunktion für die praktische Zeitfolge anders festzulegen, weil die aus den Polkoordinaten berechnete Kurve nicht phasengleich mit der tatsächlichen Kurve der Breitenänderungen verläuft.

5. Schlußbemerkungen

Die Untersuchung des Potsdamer Breitenmaterials nach der Faltungsanalyse zeigt, daß die Amplitude der Hauptkomponente der gezeitenbedingten Lotschwankungen (M_2) von quasipersistenten Störungen überlagert wird, die wahrscheinlich meteorologischer Natur sind. Aus diesem Grunde sind periodische Lotschwankungen, die in der Nähe der Sonntagsperiode oder ihrer Multiplen liegen, nur sehr unsicher zu bestimmen. Als Ursachen dieser Störungen müssen sowohl lokal-regionale Krustendeformationen als auch Refraktionsstörungen am Beobachtungsort angesehen werden. Es bleibt abzuwarten, ob die gleichen Ergebnisse auch mit der statistischen Analyse erhalten werden. Ferner zeigte sich, daß die Breitenschwankungen im langperiodischen Bereich ihre größten Amplituden aufweisen. Zur Deutung dieser Erscheinung müssen die Anteile von Rotationspol- und Lotschwankungen getrennt werden. Dabei sind vergleichende Analysen der Daten-

reihen verschiedener Breitenobservatorien notwendig, die auch zur Erkennung lokal verursachter Breitenschwankungen im kurzperiodischen Bereich erforderlich sind.

Literatur

- [1] BARTELS, J. Gezeitenkräfte. In: Handbuch der Physik, hrsg. v. S. FLÜGGE, Bd. XLVIII: Geophysik II. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1957
- [2] BUSCHMANN, E. Zeit- und Breitenbestimmung mit dem unpersönlichen Prismenastrolab von DANJON. Vermessungstechnik 6 (1959) 6, S. 2-8
- [3] ENSLIN, H. Die M_2 -Tide in den Breitenbeobachtungen in Hamburg. Vermessungstechnik 19 (1971) 2, S. 69-70
- [4] FEDOROV, E.P. Determination de l'amplitude du terme semi-mensuel de la nutation d'après les données des observations de latitude. Bull. Inform. Mar. terr. (1965) 39, S. 1440
- [5] HÖPFNER, J. Zur Ermittlung kurzperiodischer Schwankungen in den geodätisch-astronomisch bestimmten Breiten von Potsdam. Vortrag auf dem 2. Internat. Symposium "Geodäsie und Physik der Erde", Mai 1973 Potsdam, DDR. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 30, Potsdam 1974 (in Vorbereitung)
- [6] IATSKIV, JU.S. Nutation diurne libre de la Terre d'après les observations de Poulkovo de 1915 à 1928. Bull. Inform. Mar. terr. (1969) 54, S. 2548
- [7] MELCHIOR, P. The Earth tides, S. 214. Oxford etc.: Pergamon Press 1966
- [8] MELCHIOR, P.; GEORIS, B. Earth tides, precession - nutation and the secular retardation of Earth's rotation. Phys. Earth and planet. Interiors 1 (1968) 4, S. 267-287
- [9] MOLODENSKIJ, M.S. Erdgezeiten und Nutation der Erde (russ.). Trudy Inst. Fiz. Zem. Moskva (1961) 19
- [10] OKUDA, T. Local non-polar variation of latitude deduced from the ILS-data for the period 1933 - 1965. Publ. internat. Latitude Observ., Mizusawa 6 (1968) 2, S. 231-243

- [11] PIL'NIK, G.P. Korreljacionnyj analiz zemnyoh prilivov i nutaocii. Astron. Žurnal, Moskva 47 (1970) 6, S. 1308-1323
- [12] RUDNICK, P. The spectrum of the variation in latitude. Trans. amer. geophys. Union 37 (1956), S. 137
- [13] UHINK, W. Der Breitendienst im Geodätischen Institut Potsdam. Astron. Naohr. 286 (1960) 4, S. 145-152
- [14] VICENTE, R.O.; YUMI, S. Coordinates of the pole (1899-1968) referred to the Conventional International Origin. Publ. internat. Latitude Observ., Mizusawa 7 (1969) 1, S. 41-50
- [15] VICENTE, R.O.; YUMI, S. Revised values (1941-1962) of the coordinates of the pole referred to the CIO. Publ. internat. Latitude Observ., Mizusawa 7 (1970) 2, S. 109-112
- [16] YUMI, S. Annual report of the International Polar Motion Service for the years 1969, 1970, 1971. Central Bureau of the IPMS, Mizusawa
- [17] YUMI, S.; ISHII, H.; SATO, K. Assumed deformation of the Earth derived from observation of polar motion. Publ. internat. Latitude Observ., Mizusawa 6 (1968) 2, S. 161-184
- [18] ... Beobachtungsergebnisse im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58. Arb. geod. Inst. Potsdam (1964) 1
- [19] ... Astronomische Zeit- und Breitenbestimmungen. Empfangszeiten von Zeitsignalen 1959/60. Arb. geod. Inst. Potsdam (1964) 4
- [20] ... Astronomische Zeit- und Breitenbestimmungen. Empfangszeiten von Zeitsignalen 1961/62. Arb. geod. Inst. Potsdam (1965) 10
- [21] ... Astronomische Zeit- und Breitenbestimmungen. Empfangszeiten von Zeitsignalen. Bull. Abt. Geod. Astron., Potsdam (1962) 1 bis (1971) 6

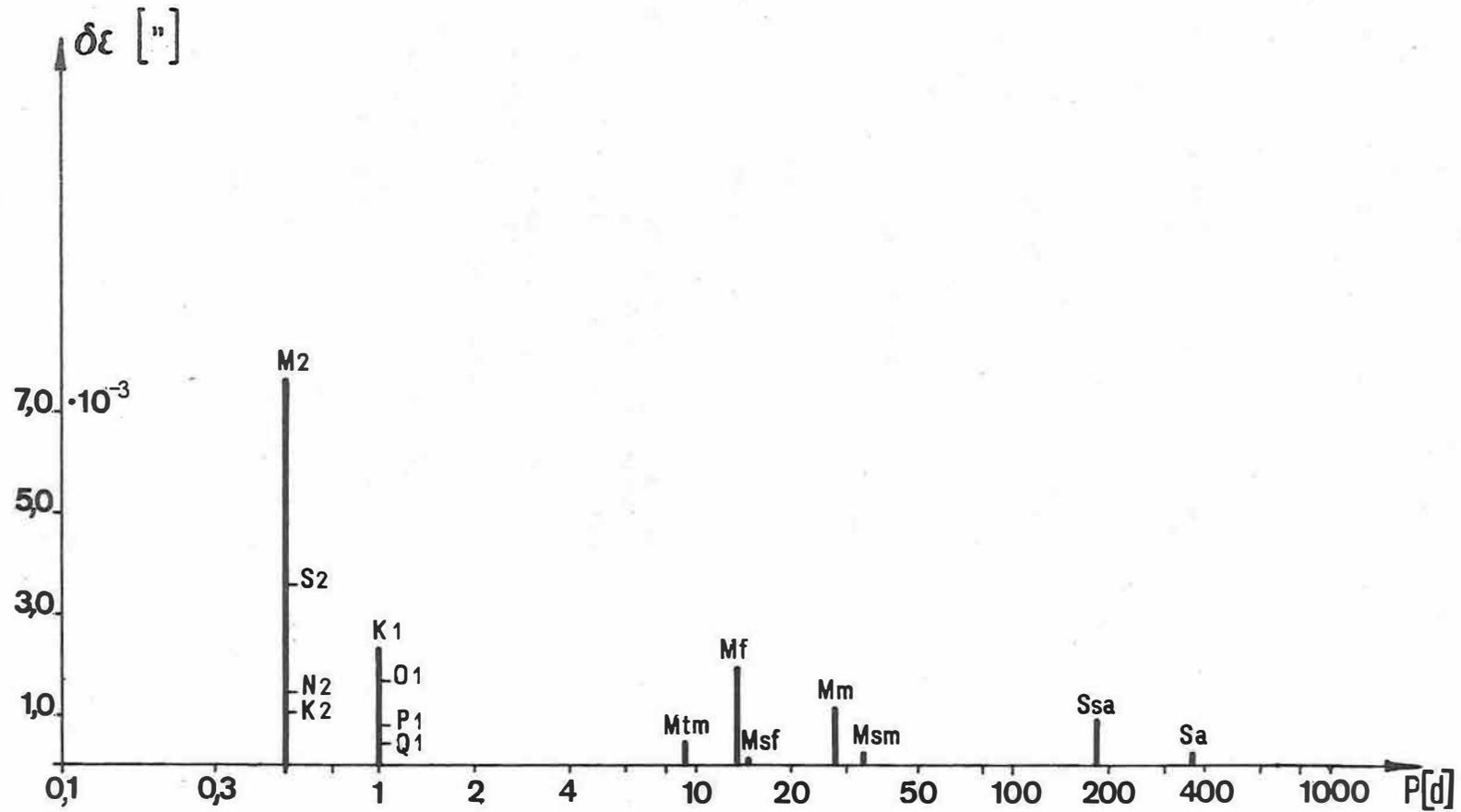


Abb. 1. N-S-Komponenten der Gezeitenbeschleunigungen in Potsdam

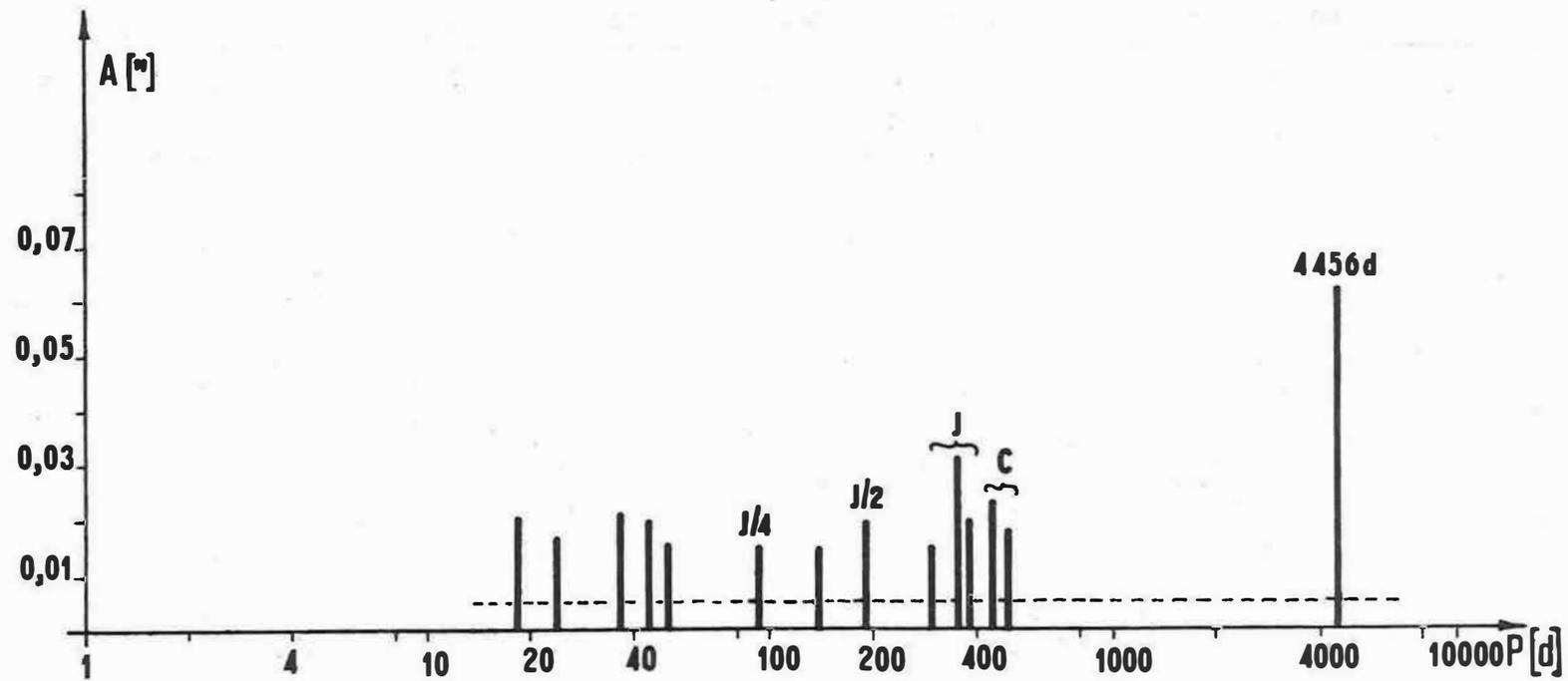


Abb. 3. Signifikante Amplituden der Breitenschwankungen 1957-1969

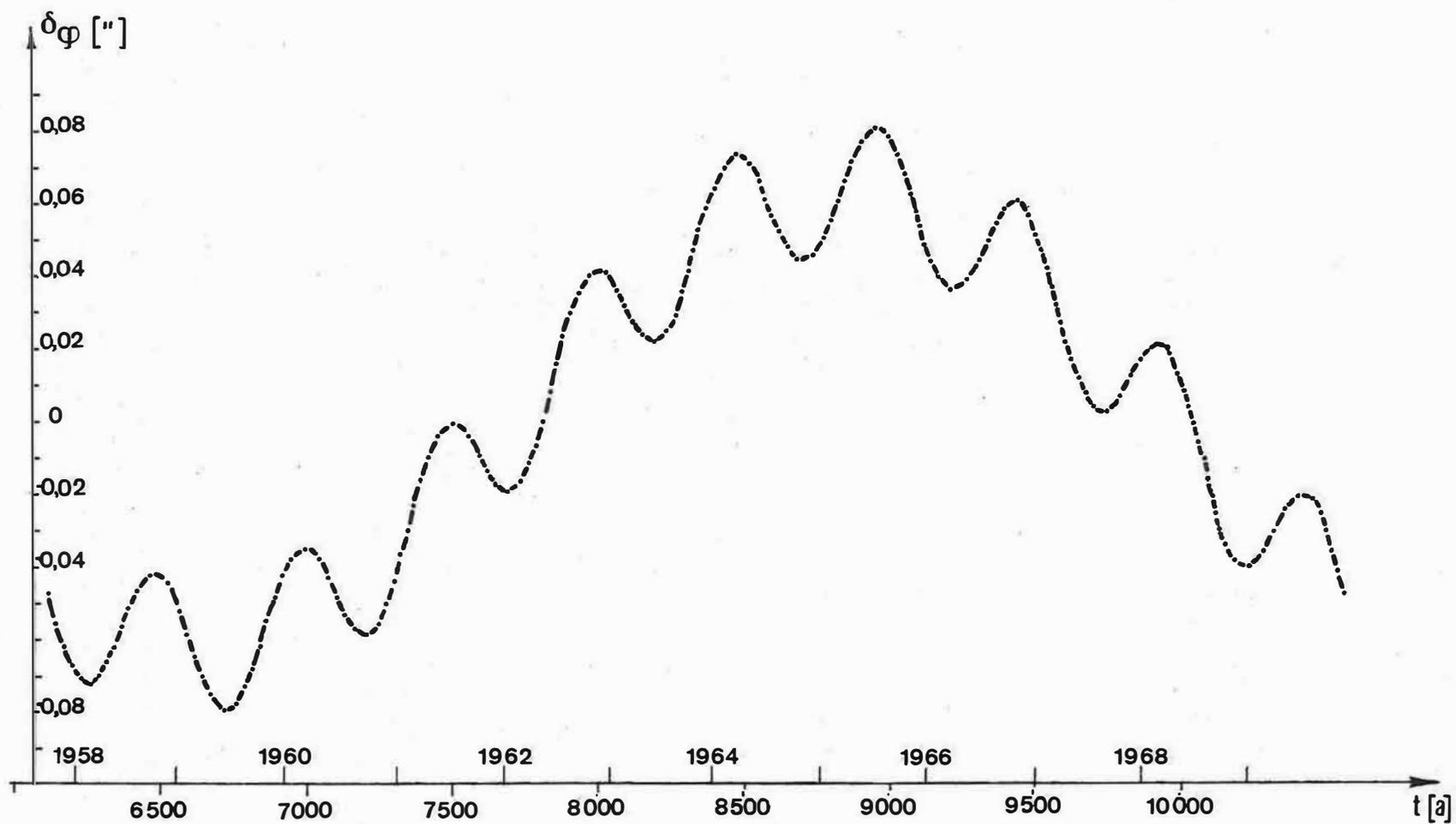


Abb. 4. Langperiodische Breitenschwankungen in Potsdam (P_L (4456 d) + P_{L-C} (495 d))

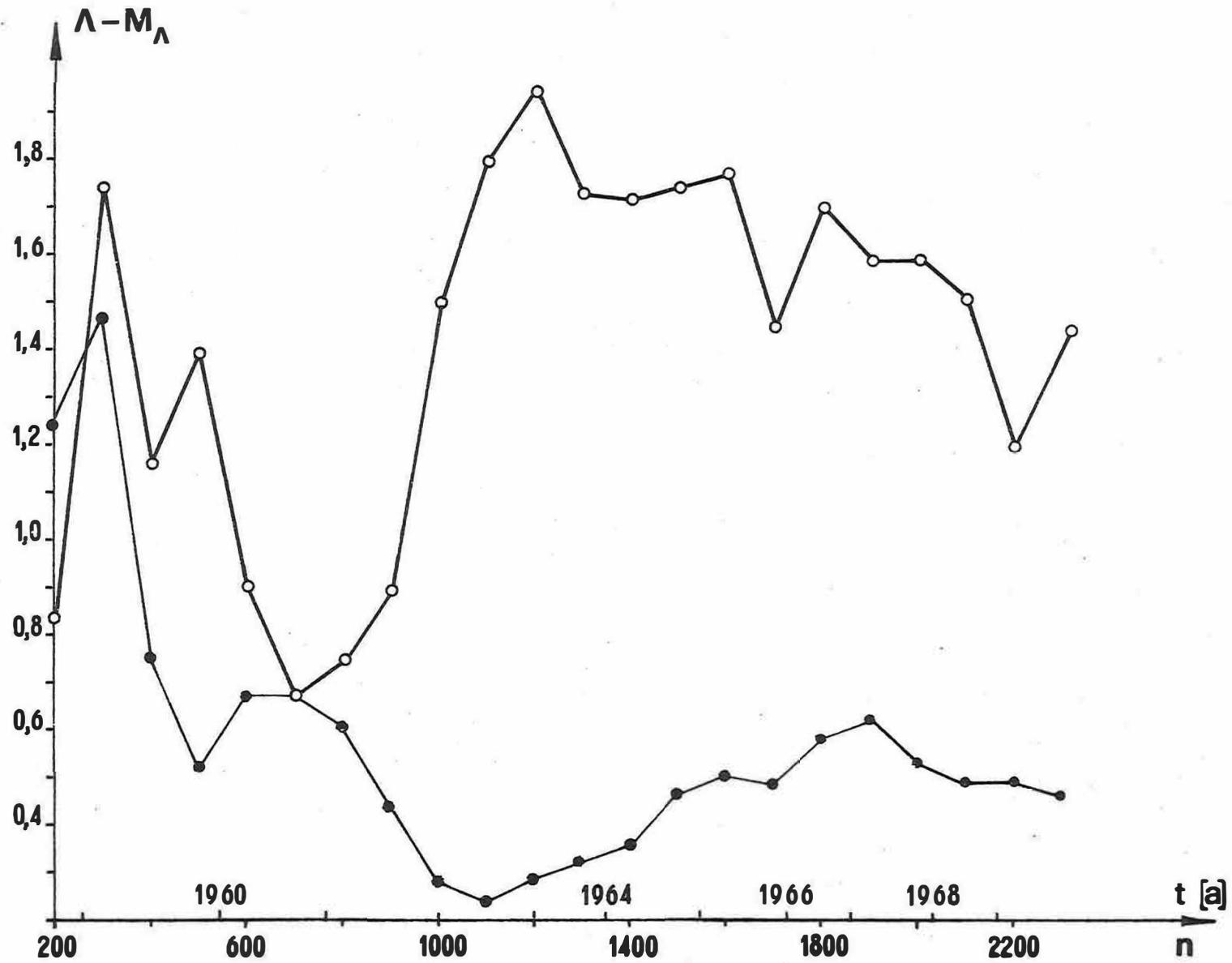


Abb. 5. Λ -Faktoren und ihre Genauigkeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Beobachtungen

Zur Verbesserung des Einsatzes von oberflächennahen Strainseismographen
am Beispiel der Station Moxa

von

CH. TEUPSER und E. UNTERREITMEIER

Zusammenfassung

Der Strainseismograph der seismologischen Station Moxa wurde durch eine Einrichtung zur Registrierung von Erdzeiten erweitert. Der Seismograph wurde gegenüber Temperaturschwankungen der Luft im Stollen abgeschirmt und an den temperaturkonstanten Untergrund angekoppelt. Damit wurden die Störungen der Klimaanlage ausgeschaltet und Gezeitenregistrierungen mit einer Empfindlichkeit von 10^{-9} ermöglicht. Zur Erweiterung der Registrierungsmöglichkeiten für Erdbeben wurden durch einen Bandpaßverstärker die Frequenzcharakteristik und die Vergrößerung langperiodischen Pendelseismographen angepaßt.

Summary

The linear strain seismograph of the seismological station Moxa has been furnished with an assembly recording earth tides. The seismograph has been screened against variations of air temperature in the tunnel and coupled with the floor having a good temperature constancy. By this the disturbances of the air-conditioning have been eliminated and the recording of earth tides has been enabled with a sensitivity of 10^{-9} . In order to enlarge the possibilities of earthquake registration the frequency response and the magnification have been fitted to long-period pendulum seismographs by a band-pass amplifier.

Резюме

Стрейн-сейсмограф сейсмологической станции Мокса был пополнён устройством для регистрации периодических колебаний земных приливов. Сейсмограф был отгорожен от колебаний температуры в штольне и привязан к подпочве с постоянной температурой. Вследствие этого помехи кондиционера были исключены и регистрация земных приливов возможна с чувствительностью 10^{-9} . Для увеличения возможностей регистрации землетрясений полосовым усилителем были приравнены частотная характеристика и увеличение к длиннопериодическим маятниковым сейсмографам.

1. Einführung

Beim Bau der Seismologischen Station Moxa in den Jahren 1959 - 1964 wurde in die Projektierung auch ein Stollen für die Installation eines Strainseismographen in zwei orthogonalen Komponenten (NS, EW) einbezogen. Dieser Strainseismograph wurde in den folgenden Jahren nach der Betriebsaufnahme 1964 realisiert (s. Abb. 1). Er besteht aus jeweils 13 Rohren von 2 m Länge aus Sinterquarz (Vitreosil). Jedes Rohr ist mit dem nächstfolgenden durch aufgeklebte Flansche verschraubt und an zwei Wolframdrähten aufgehängt. Die Festpunkte bestehen aus Stahlrohren, die in den Felsen einbetoniert sind. Als Wandler für die Registrierung von Erdbeben sind je zwei Spulen-Magnet-Systeme vorhanden. Zunächst wurde jede Komponente sowohl mit einem kurzperiodischen ($T_g \approx 1,5$ s) als auch mit einem langperiodischen Galvanometer ($T_g \approx 50$ s) registriert [3].

2. Veränderung der galvanometrischen Registrierung und Versuche zur Gezeitenregistrierung

Ende 1968 wurden die langperiodischen Galvanometer durch die Type SPG 4 ($T_g \approx 90$ s) ersetzt, wobei die Vergrößerung $V = 70$ bei einer Seheingeschwindigkeit $\sigma = 5$ km/s beträgt. Die Registrierung mit den kurzperiodischen Galvanometern wurde eingestellt und statt dessen die frei gewordenen Spulen hintereinandergeschaltet einem Galvanometer SPG 4 zugeführt. Mit dieser additiven Kopplung der NS- und der EW-Komponente werden transversale Seheinwellen nicht aufgezeichnet [1, 3]. Die Vergrößerung der Bodenbewegung beträgt $V \approx 40$ bei einer Seheingeschwindigkeit $\sigma = 5$ km/s. Diese Betriebsart in den drei Komponenten NS, EW und NS+EW wurde seit Dezember 1968 kontinuierlich benutzt.

Seit 1969 wurde am Strainseismographen ein wegproportionales Wandler-System UM 111 mit induktivem Brückengeber IWT betrieben. Mit diesem System waren Aufzeichnungen der Tiden, insbesondere der halbtägigen M_2 , über eine Registrierbreite von 120 mm zu erhalten. Die Qualität der Aufzeichnungen war jedoch stark beeinträchtigt durch die beim Betrieb der Klimaanlage (ca. 2 Stunden täglich) und während der Wartungsarbeiten auftretenden Temperatur- und Feuchteänderungen der Luft (Abb. 2). Abweichungen von einigen Zehntel Grad Temperatur und einem Prozent Luftfeuchtigkeit im Stollen führen zu den klar erkennbaren großen Ausschlägen in der Registrierung. Das schränkte den Anwendungsbereich und die Auswertung stark ein.

Die Untersuchung des Störphänomens zeigte, daß der Strainseismograph doch noch wegen der großen Länge eine beträchtliche Temperaturempfindlichkeit besitzt. Die Empfindlichkeit der Aufzeichnung ist in den beiden Komponenten

$$(1) \quad E_{NS} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^{-1} \quad \text{für NS ,}$$

$$(2) \quad E_{EW} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^{-1} \quad \text{für EW}$$

oder, auf die Verschiebungen in den Komponenten zu denen in der Registrierung bezogen,

$$(3) \quad \frac{X}{\text{mm}} = 24 \frac{\Delta l}{\mu\text{m}}, \quad X: \text{ NS-Registrierung,}$$

$$(4) \quad \frac{Y}{\text{mm}} = 36 \frac{\Delta l}{\mu\text{m}}, \quad Y: \text{ EW-Registrierung.}$$

Δl ist dabei die Relativverschiebung am Wandler in der jeweiligen Komponente. Den Einfluß der Längenänderung Δl des Quarzrohres durch Temperaturänderungen $\Delta \theta$ kann man wie folgt abschätzen. Das Quarzglas (Vitreosil) hat einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten

$$(5) \quad \alpha_Q = 0,54 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-1}.$$

Das ergibt für das Quarzrohr eine Längenänderung

$$(6) \quad \frac{\Delta l_Q}{\Delta \theta} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ mm } (\text{°C})^{-1}.$$

Der Beitrag der bis November 1972 verwendeten Wandlerbefestigung aus Stahl ST 38 ist mit

$$(7) \quad \frac{\Delta l_W}{\Delta \theta} (\text{Wandler}) \approx 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ mm } (\text{°C})^{-1}$$

anzusetzen. Das ergab für $\Delta \theta = 0,1 \text{ °C}$ schon Beträge von

$$(8) \quad \frac{\Delta l}{\Delta \theta} \approx 18 \mu\text{m } (\text{°C})^{-1}.$$

Da man beim Betrieb der Klimaanlage mit Temperaturänderungen von $|\Delta \theta| \leq 0,2 \text{ °C}$ rechnen muß - aus den Registrierungen für die Temperatur geht das nicht so klar hervor -, erklären sich daraus die großen "Störzaoken".

Der Einfluß der Feuchteänderungen über den Auftrieb auf die Registrierungen liegt unter dem der Temperaturänderungen, da er senkrecht zur Registrierrichtung angreift; er wird hier nicht betrachtet. Wichtig ist eine Stabilisierung der Luftdichte um das Strainrohr für den Betrieb bei höheren Vergrößerungen für seismische Registrierungen.

3. Die Verbesserung der Installation

Zur Reduzierung der Störungen wurde zunächst die Befestigung des Wandlersystems verbessert. Der Geber IWT wurde sehr kurz und massiv, mit festem thermischem Kontakt, am Stahlrohr des Festpunktes angebracht. Es wurde ein Werkstoff mit besonders geringem Ausdehnungskoeffizienten (Aurosil) gewählt. Die Hülse des Gebers ist verschiebbar

angeordnet, so daß die Position der Schlittenführung relativ zum Festpunkt abgetastet und der Strainseismograph mit einer Meßuhr und verringerter elektrischer Auflösung in 100- μ m-Schritten direkt geeicht werden kann. Damit war der Beitrag der Wandlerbefestigung bei Temperaturwechsel stark herabgesetzt.

Für die Verbesserung des Temperaturverhaltens des Strainrohres wurden die Erfahrungen mit langperiodischen, hochvergrößernden Seismographen [5] genutzt. Es hatte sich gezeigt, daß der Gang der Außentemperatur auf Sockel und Fundamente in einer seismischen Station stark gefiltert, geschwächt und verzögert durchgreift. Nur die langperiodischen Anteile treten mit größeren Beträgen auf. Die Kurzzeitkonstanz der Temperatur über Stunden ist hervorragend und hat eine Welligkeit von $< 1/100$ °C. Aus diesem Grunde wurde nicht das Rohr isoliert, sondern der ganze Strainseismograph mit U-Form-Teilen aus Schaumpolystyrol abgedeckt und die Abdeckung mit dem Untergrund verklebt (Abb. 3). Damit wird erreicht, daß das Luftvolumen V_L um das Rohr stark von der Außenluft im Stollen mit der wechselnden Feuchte F_{ST} und Temperatur θ_{ST} isoliert ist. Gleichzeitig haben V_L und das Rohr thermische Kopplung mit dem Untergrund. So wird die gute zeitliche Konstanz der Fundamenttemperatur im Stollen auf das Strainrohr und auf die das Rohr umgebende Luft übertragen. In Abb. 4 ist die NS-Komponente des gekapselten Strainseismographen zu sehen. Auch die Endpunkte, der Meßpunkt und die Aufhängungen sind mit den Formteilen gekapselt. Die Wirkung der Abschirmung veranschaulicht Abb. 5. Der Störeinfluß der Klimaanlage verschwindet in der Strichbreite der Registrierung. Rechnet man diese zu $\approx 0,3$ mm, so ergibt sich für die Abschirmung ein Durchgriff

$$(9) \quad D \cong \frac{1}{300} .$$

Damit ist eine einwandfreie Registrierung von Tiden bei gleichzeitiger Klimatisierung und Wartung in der Station möglich. Seit März 1973 arbeitet das Gerät in dieser Betriebsweise und liefert saubere Aufzeichnungen.

4. Die Erweiterung des Einsatzbereiches

Die guten Erfahrungen mit der Abschirmung des Strainseismographen und der verbesserten Wandlermontage legten die Idee nahe, für den Vergleich mit seismischen Registrierungen vom Pendelseismographen aus dem System UM 111 für die Tidenregistrierung einen Kanal höherer Vergrößerung und mit einer Standardcharakteristik durch Bandpaßfilterung zu realisieren. Abb. 6 zeigt das bisherige Einsatzschema des Strainseismographen und die Erweiterung (schematisch angedeutet) durch die zwei Kanäle höherer Vergrößerung.

Zur Festlegung der Eigenschaften des Filterverstärkers wird davon ausgegangen, daß der Trägerfrequenzverstärker UM 111 eine der Verschiebung Δl des Stangenendes proportionale Ausgangsspannung U liefert:

$$(10) \quad U = Q_U \Delta l .$$

Wenn eine seismische Welle am Stationsort die horizontale Verrückung ξ hervorruft, ist nach [1, 2] die Änderung des Abstandes L der beiden Pfeiler

$$(11) \quad \Delta l = \frac{R_p}{c} L s \xi ;$$

dabei ist c die Scheingeschwindigkeit der Welle und R_p der Richtungsfaktor, der von der Wellenart und dem Winkel zwischen der horizontalen Projektion der Wellennormale und der Richtung der Stange abhängt. Es ist stets

$$(12) \quad |R_p| \leq 1 .$$

In (11) sind Δl und ξ als Funktion im Bildraum nach einer LAPLACE-Transformation aufzufassen. $s \xi$ entspricht dann der zeitlichen Ableitung der Bodenverrückung. Wird dem Trägerfrequenzverstärker ein aktives Filter mit der Übertragungsfunktion $F(s)$ nachgeschaltet, so ist dessen Ausgangsspannung

$$(13) \quad E_A = F(s) U .$$

Damit die Frequenzcharakteristik des Strainseismographen mit Filter der eines elektrodynamischen Pendelseismographen mit den Eigenfrequenzen ω_s bzw. ω_g und den Dämpfungen D_s bzw. D_g des mechanischen Empfängers bzw. des Galvanometers entspricht, muß für $F(s)$ bis auf einen konstanten Faktor gelten:

$$(14) \quad F(s) = \frac{s^2}{(s^2 + 2 D_s \omega_s s + \omega_s^2)(s^2 + 2 D_g \omega_g s + \omega_g^2)} .$$

Voraussetzung dazu ist allerdings noch, daß die Scheingeschwindigkeit nicht von der Periode der Welle abhängt.

Eine Charakteristik nach (14) kann man durch zwei aktive Filter zweiter Ordnung realisieren, entweder durch zwei Bandpässe oder einen Hoch- und einen Tiefpaß. Damit die auftretenden Rauschspannungen und Driften der ersten Stufe durch die zweite sowohl für die tiefen als auch für die hohen Frequenzen beschnitten werden, empfiehlt sich die Lösung mit zwei Bandpässen. Haben diese die Verstärkungsgrade H_s und H_g , so ist

$$(15) \quad F(s) = \frac{H_s H_g \omega_s \omega_g s^2}{(s^2 + 2 D_s \omega_s s + \omega_s^2)(s^2 + 2 D_g \omega_g s + \omega_g^2)} .$$

Die Charakteristik soll dem Standardtyp C entsprechen, und daher muß

$$(16) \quad \begin{cases} T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = 30 \text{ s}, & T_g = \frac{2\pi}{\omega_g} = 90 \text{ s}, \\ D_s = \frac{1}{2} \frac{\omega_s}{\omega_g} = 1,5, & D_g = 0,5 \end{cases}$$

sein.

Die Ausgangsspannung wird mit einem Galvanometer registriert, dessen Eigenperiode T_R weit unterhalb des Periodenbereiches der maximalen Verstärkung zu liegen hat. Da dieser Bereich sich beim Typ C von 10 bis 90 s erstreckt, muß $T_R \ll 10 \text{ s}$ sein. In Abb. 7 ist die Ausgangsschaltung dargestellt. Danach fließt im Galvanometer der Strom

$$(17) \quad I_g = \frac{R_2 E_A}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_g) + R_1 R_2};$$

R_g ist der innere Widerstand des Galvanometers. Für den äußeren Galvanometerwiderstand gilt

$$(18) \quad R_{ag} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

R_{ag} ist so zu wählen, daß die Dämpfung des Registriergalvanometers $D_R \approx 0,7$ beträgt.

Aus (17) und (18) folgt

$$(19) \quad I_g = \frac{E_A}{n(R_{ag} + R_g)},$$

wobei

$$(20) \quad n = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

das Herabsetzungsverhältnis des Spannungsteilers ist. Ist C_1 die Stromempfindlichkeit des Galvanometers und L_g seine Lichtzeigerlänge, so beträgt der Galvanometerausschlag

$$(21) \quad A = \frac{L_g I_g}{C_1} = \frac{Q_A E_A}{n},$$

wobei

$$(22) \quad Q_A = \frac{L_g}{C_1(R_{ag} + R_g)}.$$

Die dynamische Vergrößerung des Strainseismographen mit Filterverstärker ergibt sich aus (10), (11), (13), (15) und (21), wenn man $s = i\omega$ setzt:

$$(23) \quad \mathcal{V} = \frac{A}{\xi} = \frac{H_s H_g Q_U Q_A L \omega_s \omega_g \omega^3}{n c \sqrt{[(\omega^2 - \omega_s^2)^2 + 4 D_s^2 \omega_s^2 \omega^2][(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4 D_g^2 \omega_g^2 \omega^2]}}$$

Bei $\omega \approx \omega_s$ hat \mathcal{V} ein Maximum:

$$(24) \quad \mathcal{V}_{\max} = \frac{H_s H_g Q_U Q_A \omega_g^2 L}{n c \omega_s}$$

Diese Größe entspricht dem Vergrößerungsfaktor eines Pendelseismographen. Wie aus (24) ersichtlich, hängt sie von der Scheingeschwindigkeit c der Welle ab, die im folgenden mit $c = 3,5$ km/s angenommen wird. Für den UM 111 ist bei maximaler Verstärkung mit $Q_U = 250$ mV/ μ m und für ein Galvanometer HA 5.1 bei $L_g = 1$ m mit $Q_A = 24$ mm/mV zu rechnen. Aus (24) erhält man dann

$$(25) \quad \mathcal{V}_{\max} = 1000 \frac{H_s H_g}{n}$$

Soll mit dieser Anordnung eine maximale Vergrößerung von 1000 erreicht werden, muß nach (25)

$$(26) \quad H_s H_g = n$$

sein.

Bevor der Verstärker berechnet werden kann, ist noch zu entscheiden, welcher Bandpaß die erste und welcher die zweite Stufe bilden soll. Es ist günstig, den die Galvanometereigenschaften simulierenden als zweite Stufe zu wählen, da er der schmalbandige ist und damit die Störfrequenzen der ersten Stufe besser filtert. Die Berechnung der aktiven Filter erfolgt nach den in [4] gegebenen Regeln, da wieder die bewährte Multiple-feedback-Schaltung verwendet werden soll. Danach ist

$$(27) \quad H_s = n, \quad H_g = 1$$

zu wählen.

Für beide Bandpässe wird die erste Möglichkeit der in [4] dargestellten Schaltung verwendet, damit der Eingangswiderstand der ersten Stufe rein ohmisch und größer als $30 \text{ k}\Omega$ ist, wie es die Anschaltung an den UM 111 erfordert. Prinzipiell könnte $n = 1$ gesetzt werden, dann würden aber die für die aktiven Filter benötigten Kapazitäten recht groß sein. Selbst bei Verwendung einfacher Operationsverstärker können nach einer Überschlagsrechnung noch Widerstände bis zu $1 \text{ M}\Omega$ in den Netzwerken verwendet

- [4] TEUPSER, CH.; u.a. An event-selecting seismograph system with digital recording.
Gerlands Beitr. Geophysik 82 (1973) 2, S. 143-150
- [5] UNTERREITMEIER, E. Zur Erhöhung der Störfreiheit langperiodischer Seismographensysteme.
Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde Nr. 25,
Potsdam 1973

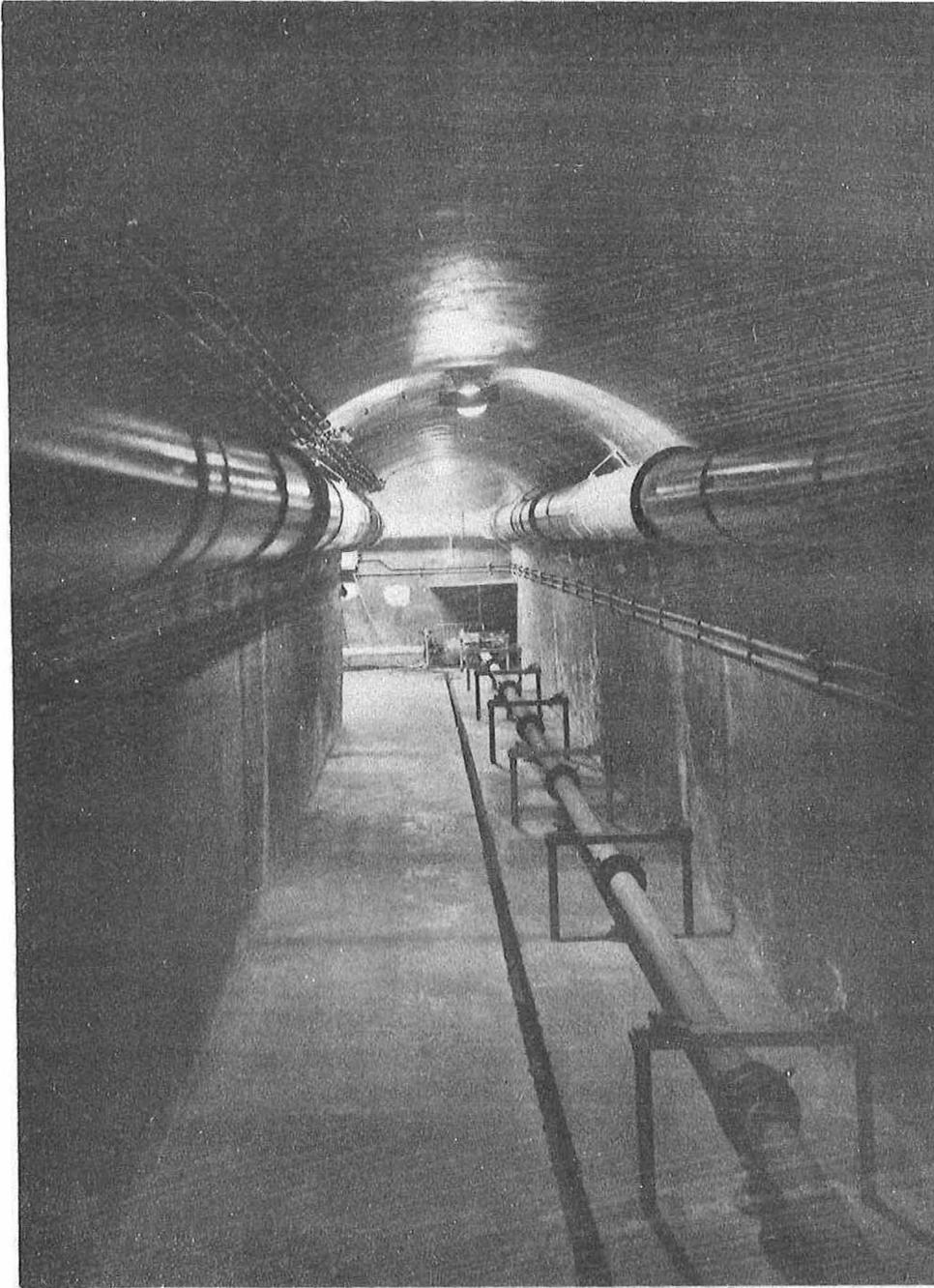


Abb. 1. Der Strainseismograph in Moxa (NS-Komponente)

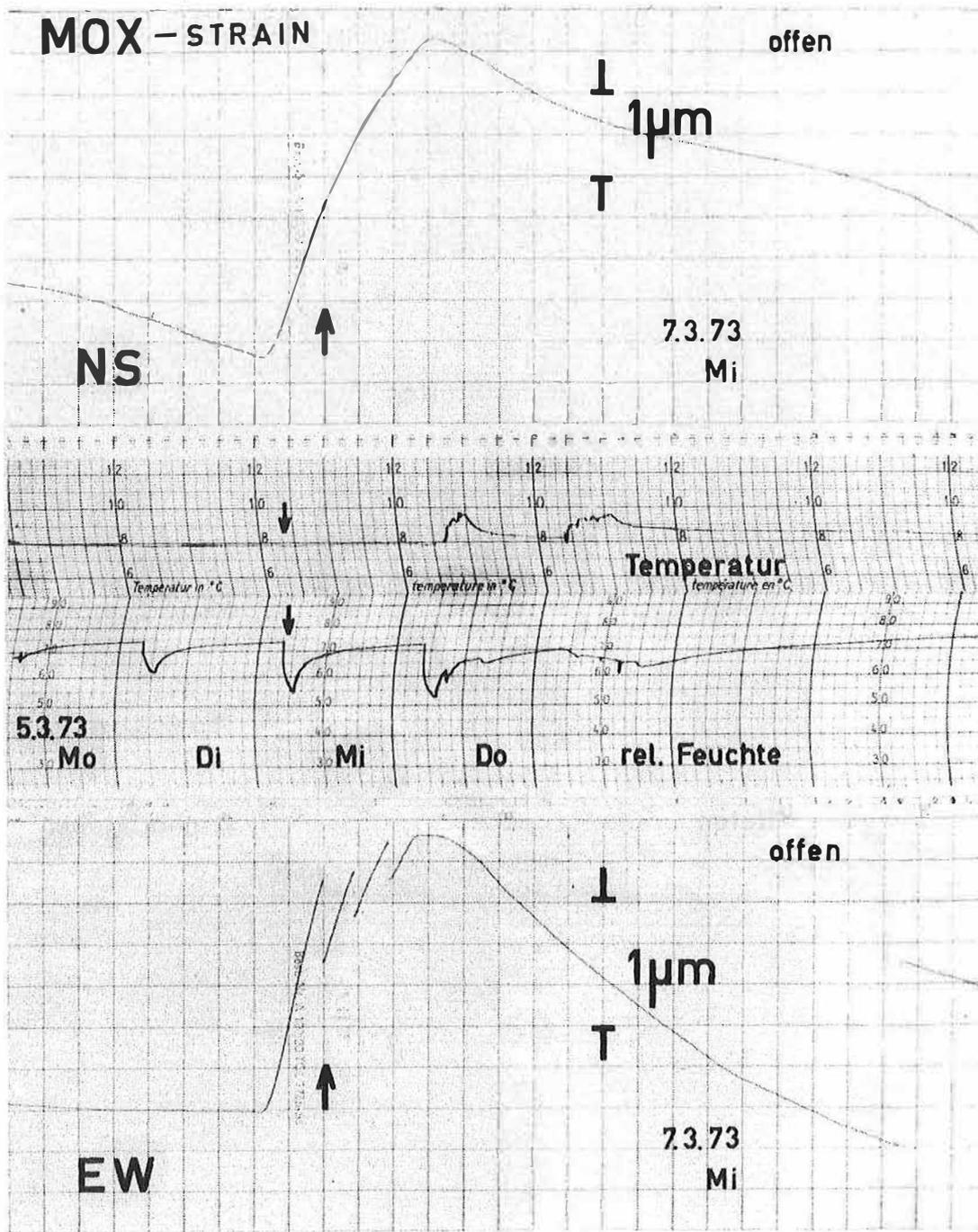


Abb. 2. Einfluß von Temperatur- und Feuchteschwankungen auf die Gezeitenregistrierung während des Betriebs der Klimaanlage

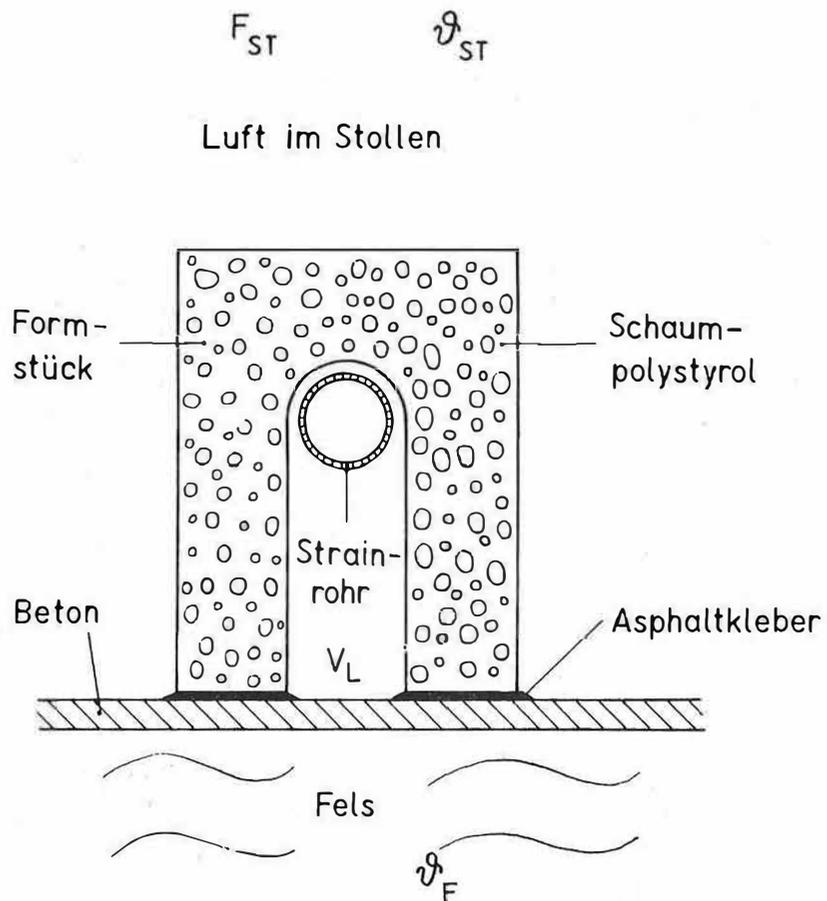


Abb. 3. Prinzip der thermischen Ankopplung des temperatur-empfindlichen Strainrohres an den Untergrund (vertikaler Schnitt)



Abb. 4. Ansicht des komplett mit Schaumpolystyrolformteilen
abgesohirmtten Strainseismographen (NS-Komponente)

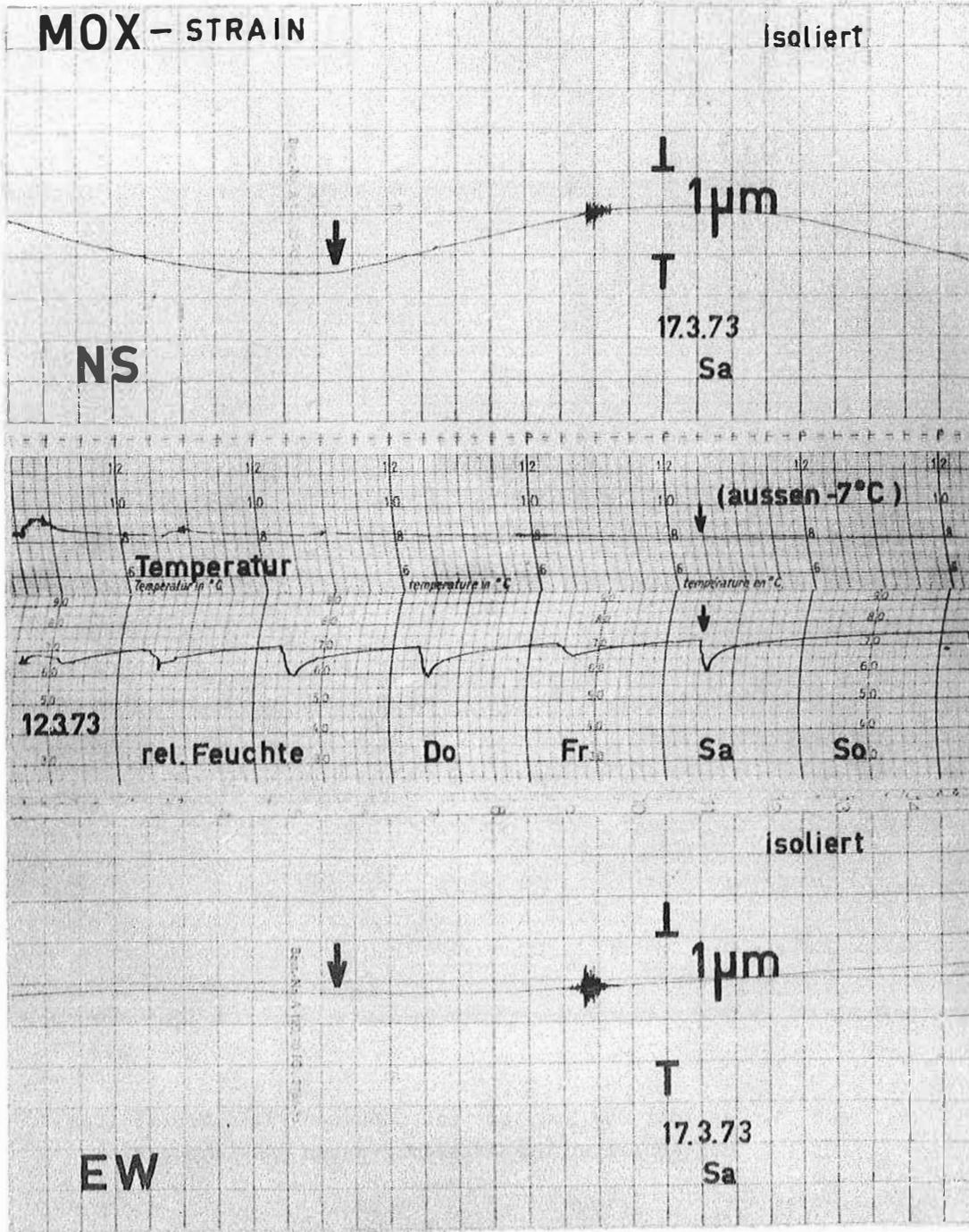


Abb. 5. Wirkung der Isolierung auf die Konstanz des Nullpunktes der Tidenregistrierung

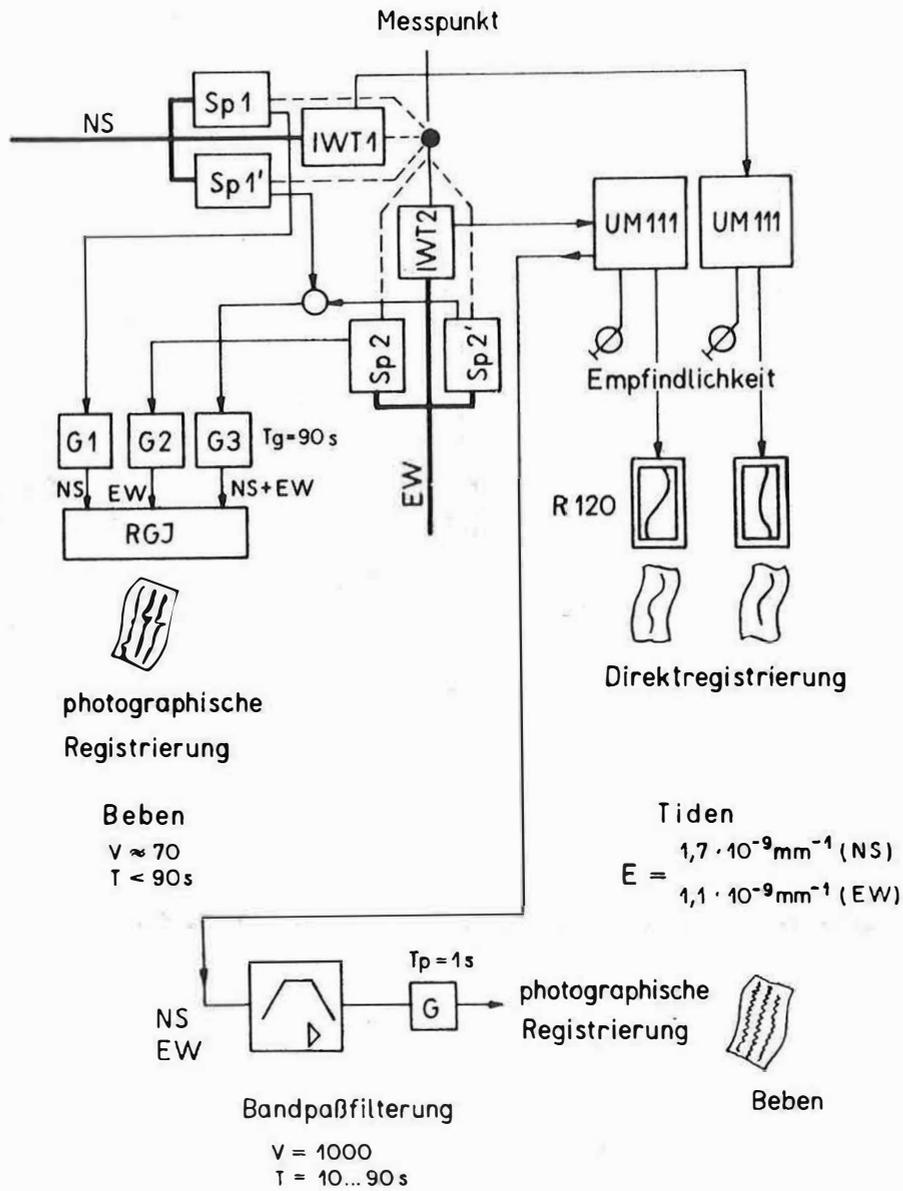


Abb. 6. Einsatzsohema des Strainseismographen

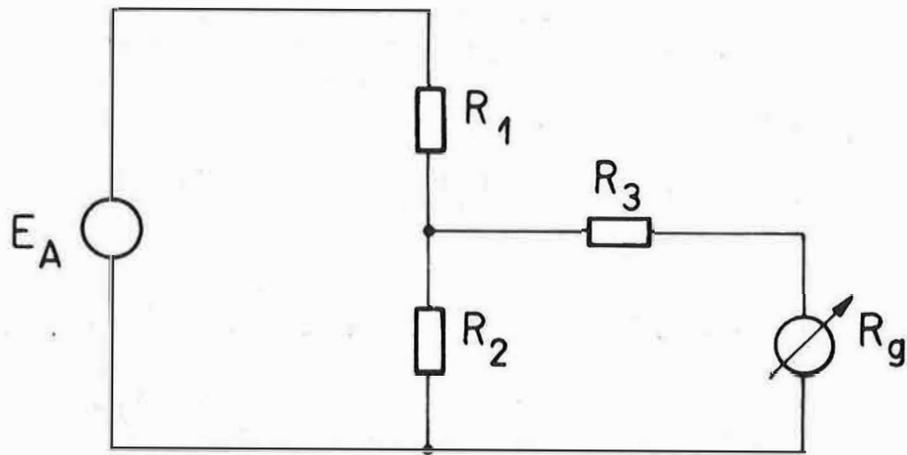


Abb. 7. Galvanometeranpassung an den Filterverstärker

Erweiterung der Satellitenkamera SGB zur Laserentfernungsmessung

von

H. FISCHER, R. NEUBERT, CH. SELKE und R. STECHER

Zusammenfassung

Für die Satellitenkamera SGB wurde eine Zusatzausrüstung zur Laserentfernungsmessung entwickelt. Mit Hilfe eines Klappspiegels kann rasch zwischen der photographischen und der photoelektrischen Betriebsart des Empfängers gewechselt werden. Erste Beobachtungen des Satelliten Geos A lieferten eine befriedigende Anzahl von Laserechos bei einem zufälligen Meßfehler von ± 1 m.

Summary

A laser-ranging equipment for the satellite camera SGB has been developed. Quick changes between the photographic and photoelectric modes of the receiver are able to be realized by means of a movable mirror. First observations of the satellite Geos A gave a sufficient number of laser echoes, the random error being ± 1 m.

Резюме

Камера для наблюдения искусственных спутников земли СБГ снабжена специально построенным дополнительным прибором для лазерных измерений расстояний. Откидное зеркало даёт возможность быстро изменять фотографический и фотоэлектрический режим работы. Первые наблюдения спутника Геос А дали удовлетворительное число лазерных отражений при случайной ошибке измерений в ± 1 м.

1. Einführung

Die Laserentfernungsmessung zu Satelliten [1] zeichnet sich durch kleine Meßunsicherheit bei geringem Auswertungsaufwand aus. Sie stellt daher eine wertvolle Ergänzung der Satellitenbeobachtungsverfahren dar [4].

Die im Zentralinstitut für Physik der Erde durchgeführte Entwicklung war darauf gerichtet, das im Institut vorhandene Satellitenbeobachtungsgerät (SBG) so zu erweitern, daß neben der Bestimmung der Richtungskomponenten auch die Messung der Satellitenentfernung mittels eines Laserzusatzgerätes ermöglicht wird. ¹⁾ Die Bestimmung von Richtung und Entfernung führt zu einer weiteren Verringerung der Unsicherheit bei der Bahnbestimmung. Außerdem ist sie für die Schaffung globaler satellitengeodätischer Netze erforderlich.

Zur Realisierung der gegebenen Aufgabenstellung wurde das SBG mit einem zusätzlichen Klappspiegel ausgerüstet, der bei der Laserentfernungsmessung in den Strahlengang eingeschwenkt wird. Er hat die Aufgabe, den vom Satelliten reflektierten Lichtimpuls zum photoelektrischen Empfänger zu leiten. Auf diese Weise ist ein so rascher Wechsel zwischen beiden Betriebsarten möglich, daß während eines Satellitendurchgangs sowohl photographische Richtungsbestimmungen als auch Laserentfernungsmessungen durchgeführt werden können.

Die am SBG erforderlich gewordenen mechanischen und optischen Umrüstungsarbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem VEB Carl Zeiss Jena konzipiert und von letzterem durchgeführt.

Der Gerätekomplex für die Laserentfernungsmessung kann unterteilt werden in Sender, Empfänger sowie Meß- und Steuerelektronik. Entsprechend dieser Einteilung soll das Gerät nachfolgend unter Berücksichtigung der bisher erzielten Ergebnisse beschrieben werden.

2. Beschreibung des Gerätes

2.1. Sender

Zur Erzeugung der Sendeimpulse wurde ein zweistufiger Rubinlaser aufgebaut, dessen wichtigste technische Daten aus Tafel 1 zu entnehmen sind. Abb. 1 zeigt eine Ansicht des am SBG montierten Lasers. Das optische Schema ist in Abb. 2 enthalten.

Zur Anregung der Rubinstäbe 5 und 10 dienen je zwei Blitzlampen in abbildenden Reflektoren (Doppelellipsen). Die Rubinstäbe und Laserköpfe werden mit deionisiertem Wasser gekühlt. Da die Blitzlampen z.Z. nicht direkt gekühlt werden, muß die Folgefrequenz auf 0,1 Hz begrenzt werden.

¹⁾ Über den Nachweis von Satelliten-Laserechos unter Verwendung des SBG in seiner ursprünglichen Form haben bereits NAVARA u.a. [2] berichtet.

Zur Güteschaltung des Lasers wird ein sättigbarer Farbstoff verwendet. Es hat sich gezeigt, daß mit diesem einfachen Verfahren ausreichend reproduzierbare Einzelimpulse erzielt werden können, wenn die Anregungsenergie auf ca. 1 % stabilisiert und eine günstige Farbstoffkonzentration gewählt wird.

Schaltkuvette und Prismenreflektor sind zu einer Baueinheit 11 verkittet, deren Strahleintrittsfläche unter dem BREWSTER-Winkel geneigt ist. Als Auskopplungsspiegel für den Laseroszillator dient ein 3-Platten-Etalon 9. Das vom Laseroszillator ausgestrahlte Lichtbündel durchsetzt nach einer Anpassungslinse 6 den Verstärkerstab und schließlich ein GALILEI-System 1, 2 zur Verminderung des Öffnungswinkels. Alle Linsen sowie die Stirnflächen der Rubine wurden entspiegelt. Ein Teil des Lichtes (ca. 2 %) wird von einer geneigten Glasplatte 3 ausgekoppelt und nach Abschwächung mittels Neutralglasfilter der Photodiode 4 zugeführt, die den Startimpuls für den Zeitintervallmesser liefert. Um reproduzierbare Startimpulse zu erhalten, muß dafür gesorgt werden, daß die Photodiode über den gesamten Strahlquerschnitt integriert. Dies wurde durch ein Streuvolumen vor der Photodiode erreicht.

2.2. Empfänger

Die gesamte Empfängeranordnung konnte im freien Raum der Hauptspiegelfassung des SBG untergebracht werden. Der Strahlengang ist aus Abb. 2 zu ersehen.

Das am Satelliten reflektierte Signal wird vom Teleskop gesammelt und gelangt über die Gesichtsfeldblende 22 und die Filteranordnung 23 auf den Photovervielfacher 25. Durch den Einbau eines zusätzlichen Klappspiegels 20 wurde das Teleskop für einen wechselweisen Betrieb als SCHMIDT- oder Quasi-CASSEGRAIN-System umgerüstet [5]. Hierzu mußte der Hauptspiegel 21 nachträglich durchbohrt werden. Die photographische Positionsbestimmung erfolgt damit unverändert mit dem SCHMIDT-System und die Entfernungsmessung mit dem CASSEGRAIN-System.

Die Gesichtsfeldblende im Fokus des CASSEGRAIN-Systems dient zur Herabsetzung des durch das Himmelslicht verursachten Hintergrundrauschens. Der zulässige Minimalwert des Gesichtsfeldes wird durch die Nachführungs- und Justiergenauigkeit festgelegt. Zur weiteren Störlichtunterdrückung dient ein dielektrisches Filter innerhalb der Filteranordnung. Das Maximum der spektralen Durchlässigkeit liegt für 20 °C bei der Rubinwellenlänge von 6943 Å. Um die hohe Selektivität von 10 Å voll auszunutzen, wird das Filter im parallelen Strahlengang betrieben. Zur thermischen Festlegung des Maximums der Durchlässigkeit wird die gesamte Filteranordnung thermostatiert.

Mit dem Photovervielfacher erfolgt die lichtelektrische Umwandlung des Echosignals, das über das Prisma 24 auf die Katode gelenkt wird. Die Form des Prismas wurde so gewählt, daß der an der Katodenschicht reflektierte Lichtanteil erneut auf den Photovervielfacher gelangen kann. Die maximale innere Verstärkung beträgt ca. $2 \cdot 10^8$. Zusammen mit einem Zusatzverstärker können damit an 75 Ohm Einelektronimpulse ²⁾ bis zu einigen Volt verstärkt werden.

2) Einelektronimpulse sind solche Ladungsimpulse an der Anode, die durch ein einziges aus der Katode befreites Elektron hervorgerufen werden.

Die Integrationszeit der gesamten Empfängeranordnung beträgt 10 ns und wird im wesentlichen durch den Zusatzverstärker bestimmt. Der Effektivwert des Katodendunkelstromes beträgt ca. 10^{-15} A. Der Anteil der Dunkelimpulse pro Zeiteinheit mit Amplituden über 15 Elektronenäquivalenten beträgt etwa $5 \dots 10 \text{ s}^{-1}$. Für den Meßbetrieb muß daher die Schwelle des Zeitintervallmessers bei einer Totzeit von $5 \dots 10 \text{ ms}$ auf diesen Wert eingestellt werden, damit der Stop-Vorgang mit ausreichender Sicherheit vom Signal und nicht durch Störungen ausgelöst wird. Der Einfluß des Himmelslichtes ist gegenüber dem Dunkelstrom zu vernachlässigen. Für den Meßbetrieb während der wärmeren Jahreszeit ist eine thermoelektrische Kühlung des Photovervielfachers mittels PELTIER-Batterien vorgesehen.

2.3. Meß- und Steuerelektronik

Die Meß- und Steuerelektronik umfaßt neben der Laserstromversorgung mit ihren Kontroll- und Auslöseeinrichtungen Meß- und Registriergeräte für die Laufzeitmessung und für die zeitliche Zuordnung der Messungen (Abb. 3).

Die für die Blitzlampen des Lasers erforderliche Energie wird über zwei Kondensatorbatterien bereitgestellt, wobei eine dem Oszillator, die andere dem Verstärker zugeordnet ist. Sie bestehen aus MP-Kondensatoren mit einer Gesamtkapazität von $420 \mu\text{F}$ bzw. $560 \mu\text{F}$ und werden über zwei spezielle Ladegeräte 4 innerhalb von 6 s auf 3 bzw. 4 kV aufgeladen. Zur Vermeidung von Mehrfachimpulsen des Lasers werden diese Spannungen auf $\pm 0,3 \%$ konstant gehalten. Ladegeräte und Kondensatorbatterien befinden sich im Beobachtungsturm in der Nähe einer heizbaren Meßkabine. In dieser Kabine sind alle nachfolgend beschriebenen Geräte als Einschübe in einem Meßgestell untergebracht.

Der Steuereinschub dient zur Spannungskontrolle und definierten Auslösung von Oszillator und Verstärker. Außer der Hochspannungsversorgung für den Photovervielfacher dienen alle weiteren Geräte unmittelbar der Meßwertgewinnung und Registrierung. Die Laufzeit wird mit einem 100-MHz-Zeitintervallmesser vom Typ EMG 1646 gemessen mit einer Auflösung von 10 ns, entsprechend $\pm 1,5 \text{ m}$. Das Startsignal wird über eine Photodiode vom abgehenden Laserimpuls abgeleitet. Um ein vorzeitiges Stoppen des Zeitintervallmessers infolge atmosphärischer Rückstreuung beim Senden bzw. durch Dunkelimpulse des SEV weitgehend auszuschließen, wird über eine besondere Torschaltung der Stop-Eingang des Zeitintervallmessers erst $1 \dots 2 \text{ ms}$ vor Eintreffen des Echsignals freigegeben. Außerdem liefert der Einschub "Torsteuerung" nach Ablauf einer vorher einstellbaren Zeit ein Stop-Signal, um bei ausbleibendem Echsignal die Bereitschaft des Zeitintervallmessers für die nächste Messung zu gewährleisten. Über einen Pegelumsetzer wird das Meßergebnis einem Meßwertdrucker vom Typ 3511 des VEB Funkwerk Erfurt zugeführt. Für eine oszillographische Kontrolle des Echsignals ist das 100-MHz-Oszilloskop EMG 1555 vorgesehen.

Neben der Entfernung ist für die Bahnbestimmung noch der Zeitpunkt der Messung mit einer Unsicherheit von $\pm 0,1 \text{ ms}$ erforderlich. Zur Zeitregistrierung wird eine Zeitgebereinheit vom Typ 3524 des VEB Funkwerk Erfurt verwendet, die nach entsprechenden Veränderungen eine Zeitauflösung von $0,1 \text{ ms}$ ermöglicht. Der Anschluß an eine Zeitskala

erfolgt durch definierten Start mit einem Minutenimpuls der Zeitbewahrungsanlage des Institutes. Über den formierten Photodiodenimpuls wird die Zeitgebereinheit zum Meßzeitpunkt abgefragt. Der Meßzeitpunkt wird ebenfalls unter Verwendung eines Meßwertdruckersystems vom Typ 3511 ausgedruckt.

3. Justierung

Der geringe Öffnungswinkel des Senders macht eine sorgfältige Justierung erforderlich (vgl. Abb. 2). Zunächst wurde die Parallelität der optischen Achsen von Leitrohr und Empfängersystem hergestellt und durch Beobachtung eines entfernten Zieles kontrolliert. Für die anschließende Justierung der Richtung des Senders wurde das Lichtbündel eines He-Ne-Lasers 8 mit Hilfe eines teildurchlässigen Spiegels 7 eingekoppelt und parallel zur optischen Achse des Senders ausgerichtet. Die Kontrolle der richtigen Justierung des Hilfslaserbündels geschieht durch Beobachtung von Mehrfachreflexionen an den Rubinendflächen und Laserspiegeln. Ein Tripelprisma 12 lenkt den Justierstrahl antiparallel in das Leitrohr und ermöglicht so die Beurteilung der Parallelität zwischen Leitrohrachse und Laser. Bei der Erprobung hat sich allerdings gezeigt, daß auch bei sorgfältiger Arbeitsweise geringe Richtungsabweichungen zwischen dem Justierstrahl und dem tatsächlich ausgestrahlten Rubinlaserbündel auftreten können. Zur endgültigen Kontrolle des Justierzustandes von Laser, Leitrohr und Teleskop zueinander wird deshalb eine Zieltafel in 2 km Entfernung benutzt, auf der auch bei Tage der vom Laser beleuchtete Fleck mit dem Leitrohr beobachtet werden kann.

4. Meßergebnisse

Zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit der gesamten Anlage sowie zur Abschätzung ihrer Empfindlichkeit wurden Laufzeitmessungen zur bereits erwähnten Zieltafel durchgeführt. Derartige Messungen sind auch zur Bestimmung der konstanten Laufzeitkorrektur notwendig. Wegen der dabei auftretenden hohen Signalstärke wurde die Eintrittsöffnung des Empfangsteleskopes auf 16 mm Durchmesser verkleinert. Zusätzlich wurden Neutralglasfilter zur Lichtschwächung angebracht. Es war dann noch eine sichere Laufzeitmessung möglich, wenn die Gesamttransmission der Filter $\tau_F \approx 8 \cdot 10^{-4}$ betrug. Wenn man annimmt, daß die Zieltafel vollkommen diffus 50 % des Lichts reflektiert, und für die Durchlässigkeit der Atmosphäre ebenfalls 50 % ansetzt, dann errechnet sich der Schwächungsfaktor bei dieser Messung zu $3 \cdot 10^{-15}$. Unter Benutzung der technischen Daten des Gerätes kann hieraus eine Reichweite von 5...7 Mm für die Geos-Satelliten bzw. 3,5...5 Mm für die Beacon-Satelliten abgeleitet werden.

Anfang 1974 wurden erfolgreiche Entfernungsmessungen des Satelliten Geos A durchgeführt. Zur Illustration ist in Abb. 4 das Zeit-Entfernungs-Diagramm für einen Durchgang dargestellt. Wie die eingetragenen Meßpunkte erkennen lassen, ist die Trefferrate zufriedenstellend. Sie beträgt im vorliegenden Fall 60 % der bei schnellster Schußfolge erzielbaren Anzahl. Dieser Wert wird entscheidend durch die scheinbare Helligkeit des Satelliten und die Geschicklichkeit des Beobachters beeinflusst. Bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen war die visuelle Anzielung extrem schwierig. Die größte bisher

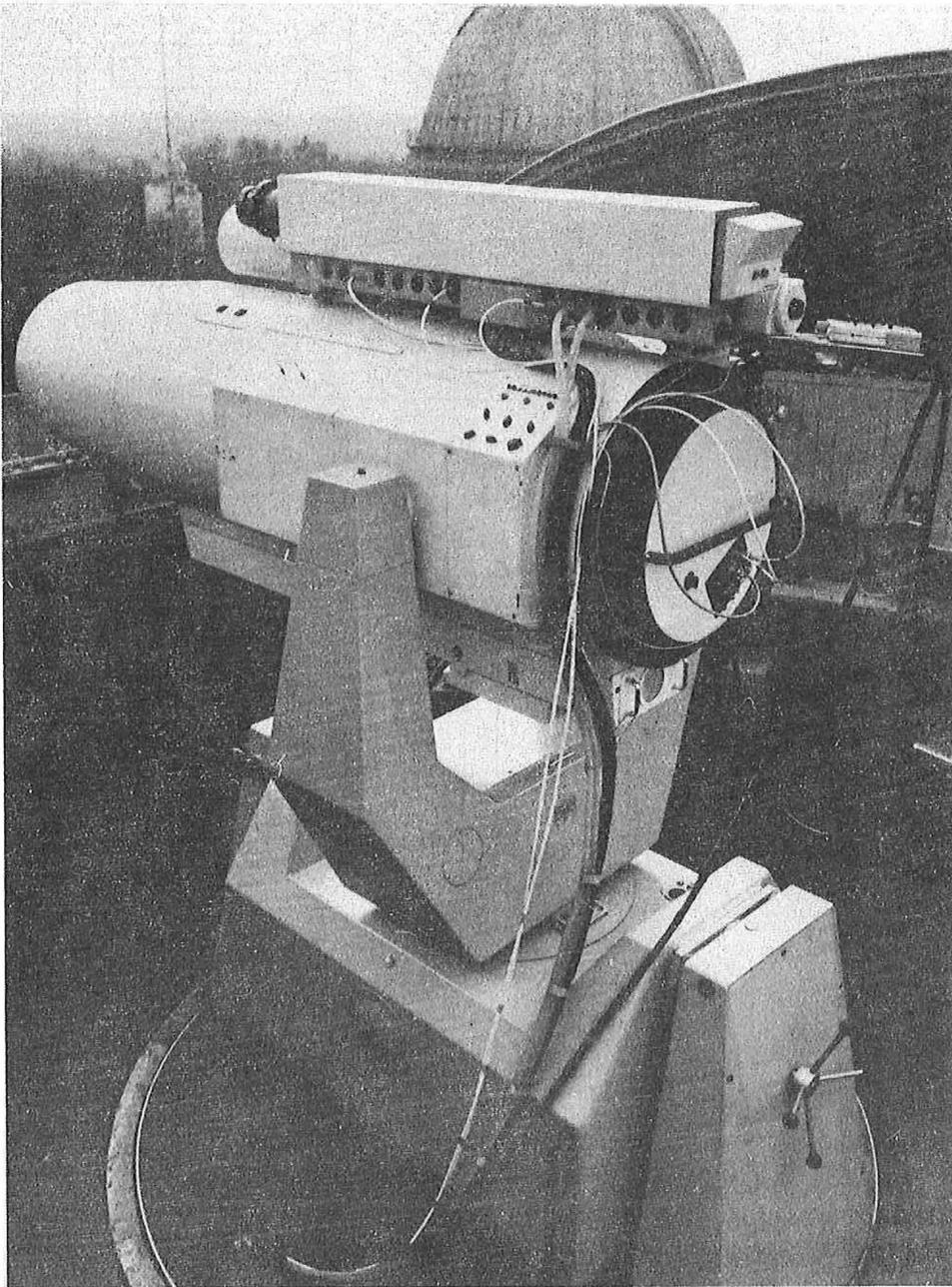


Abb. 1. Ansicht des SBG mit Lasersender

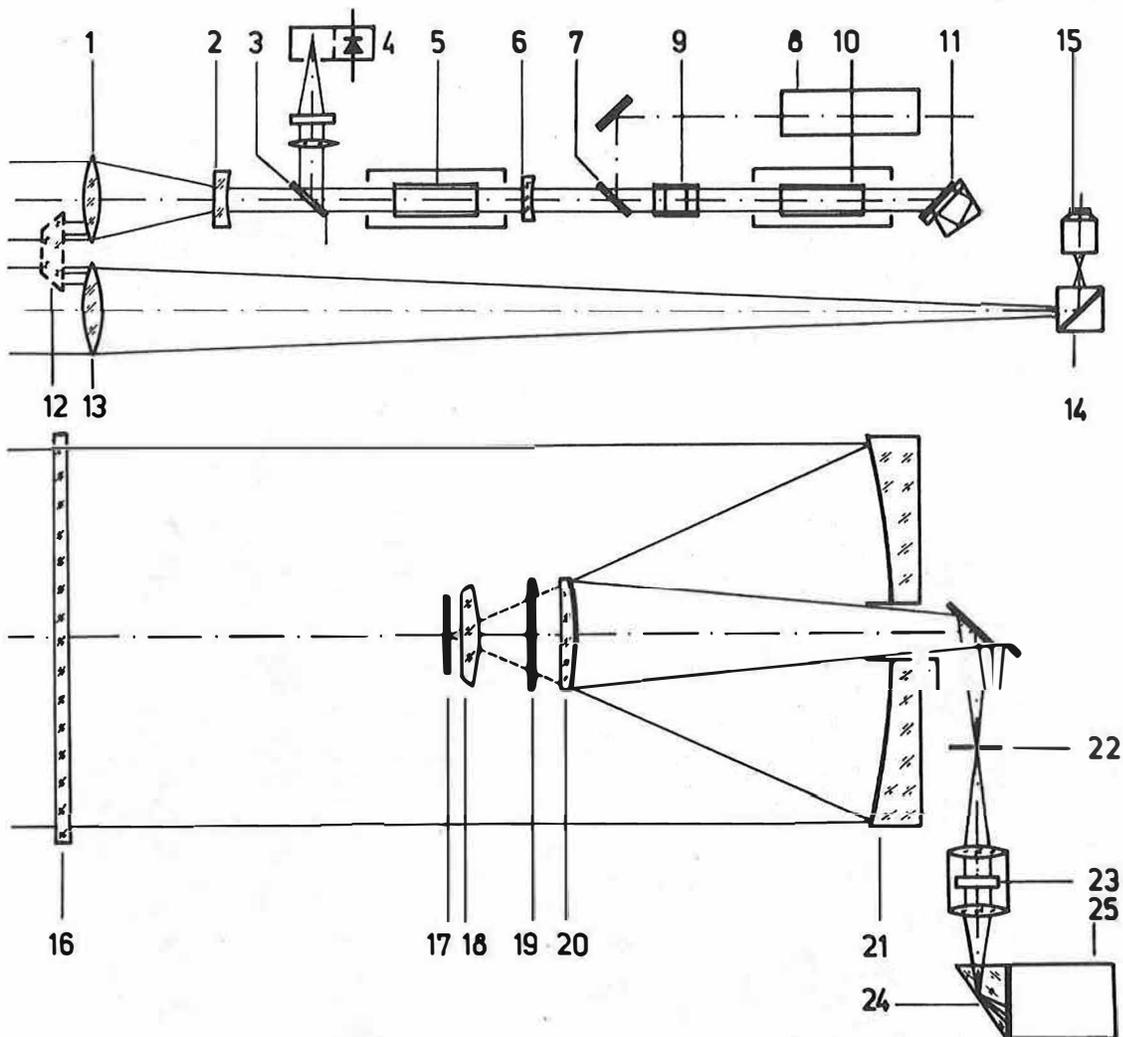


Abb. 2. Optisches Schema

1 Sendeobjektiv, 2 Negativlinse für Strahlaufweitung, 3 Glasplatte zur Photodiodenbeleuchtung, 4 Photodiode, 5 Verstärkerrubin, 6 Anpassungslinse, 7 teildurchlässiger Spiegel (nur für Justierung), 8 He-Ne-Laser, 9 Etalon-Reflektor, 10 Oszillator-Rubin, 11 Küvette und Prisma, 12 Tripelprisma (nur für Justierung), 13 Leitrohrobjektiv, 14 Umlenkspiegel, 15 Okular, 16 SCHMIDT-Platte, 17 Photoplatte, 18 Ebnungslinse, 19 Verschlussklappe, 20 Quasi-CASSEGRAIN-Spiegel, 21 Hauptsiegel, 22 Gesichtsfeldblende, 23 Interferenzfilter mit Thermostat, 24 Prisma, 25 Photovervielfacher

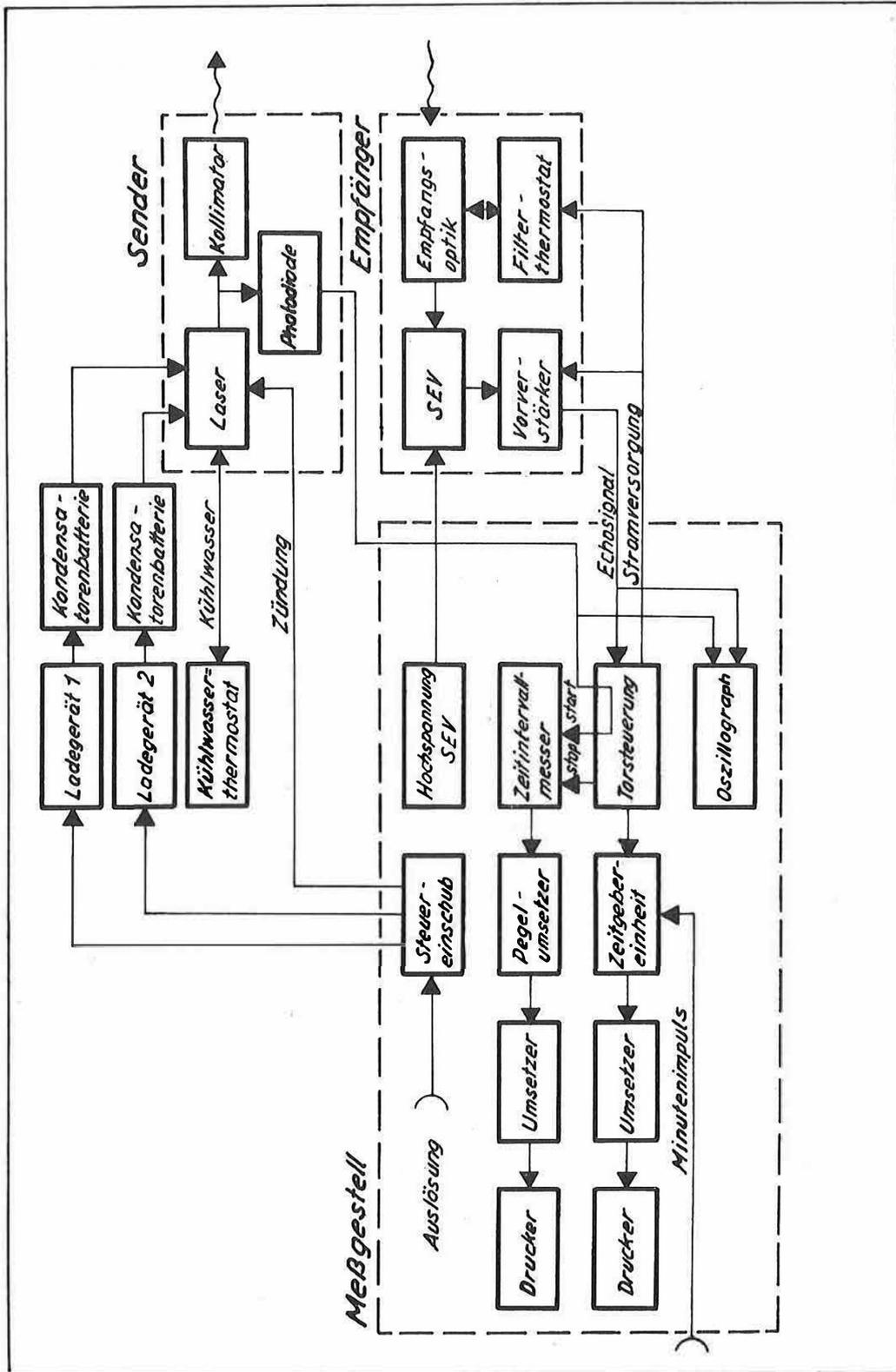


Abb. 3. Blockschalbild

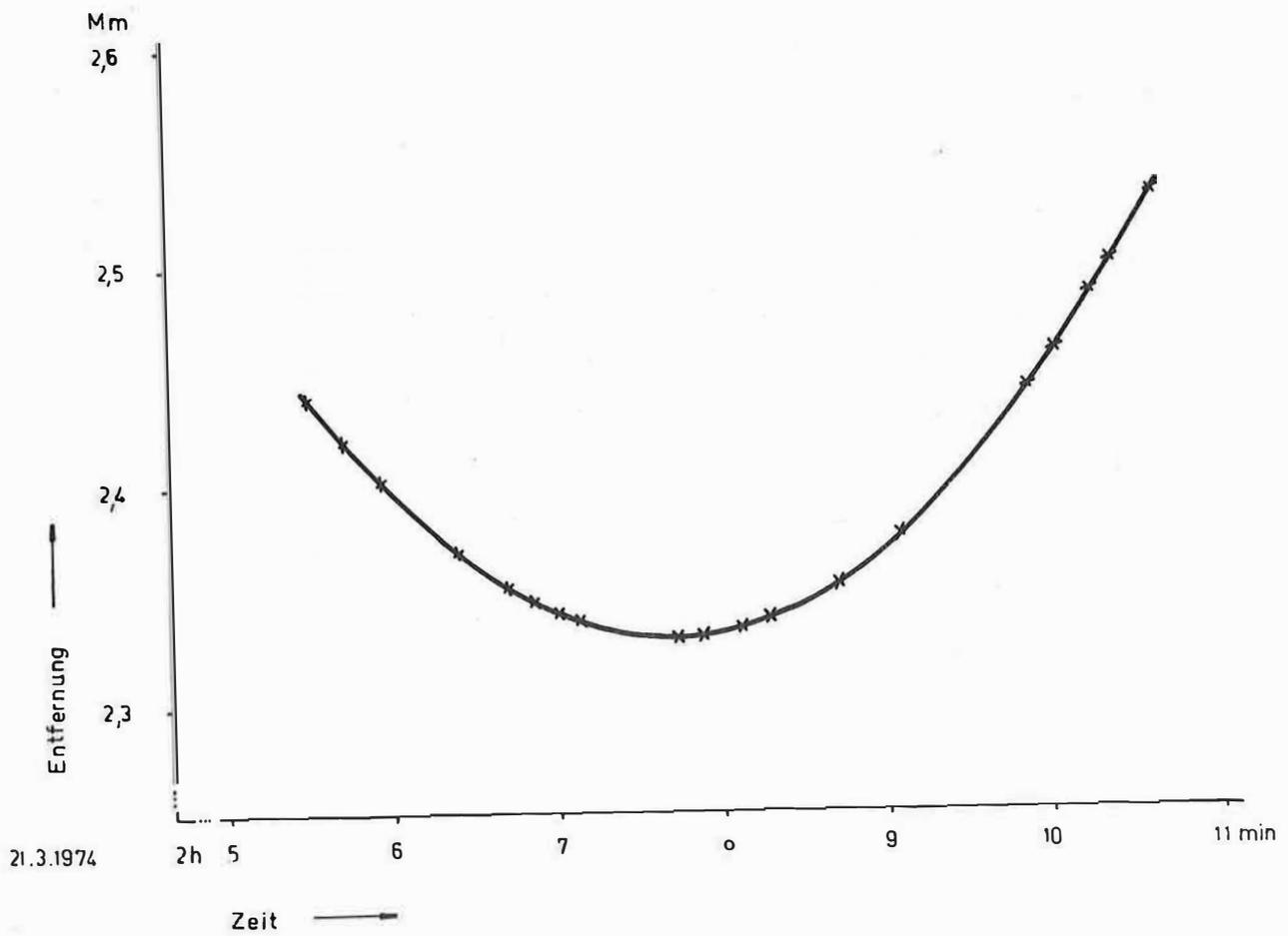


Abb. 4. Zeit-Entfernungs-Diagramm
Geos A, 21.3.1974, 2^h5^{min} ... 2^h11^{min} WZ

Tafel 1. Technische Daten

S e n d e r

| | |
|----------------------------|--------------------------------|
| Ausgangsenergie | 1...2 J |
| Impulsdauer | 15...25 ns |
| Öffnungswinkel | 0,3...0,5 mrad |
| Folgefrequenz | 0,1 Hz |
| Photodiode für Startimpuls | HP 5082-4220, $\tau \leq 1$ ns |

E m p f ä n g e r

| | |
|--------------------|---|
| Effektive Öffnung | ca. 320 mm ² |
| Gesichtsfeld | 0,3...3 mrad |
| Filter | Oriel G-527, $\Delta\lambda = 1$ nm, $T > 50\%$ |
| Photovervielfacher | RCA C 31000 A, $\tau \approx 2$ ns |

M e ß e l e k t r o n i k

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Auflösung der Laufzeitmessung | ± 10 ns |
| Unsicherheit der Zeitregistrierung | $\pm 0,1$ ms |

Untersuchungen zur Ermittlung und Elimination des Refraktionseinflusses
bei Interferenzlängenmessungen im freien Gelände
mit Hilfe der Luftdispersion

von

R. SCHÜLER

Zusammenfassung

Die Genauigkeit interferometrischer Längenmessungen im freien Gelände wird durch die ungenügende Kenntnis der unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen längs der Meßstrecke begrenzt. Diese erzeugen im Interferenzbild einen Dispersionseffekt, der bei photoelektrischer Erfassung und oszillographischer Darstellung des Interferenzbildes gut zu beobachten ist. Die Größe des Einflusses unterschiedlicher Brechungsindizes kann theoretisch und experimentell ermittelt werden. Durch Kompensation der Dispersion mittels geeigneter Medien wird es möglich, den Refraktionseinfluß weitgehend zu eliminieren.

Summary

The accuracy of length measurements by interferometric method in the open fields is limited by the insufficient knowledge of the refractive index of air along the beams of light. In consequence of the different conditions the interference figure shows an effect of dispersion, which can be clearly observed if photoelectric sensing and oscillographic representation is used. The order of magnitude of the influence of the refractive dispersion is theoretically and experimentally appreciable. By means of compensation of the refractive dispersion of air with the aid of an adaptable dispersing medium it will be possible to eliminate the influence of the refraction of air during the measurement.

Резюме

Точность при интерференционных измерениях длин в полевых условиях ограничена недостаточным знанием различных атмосферных условий вдоль пути измерения. Они же в интерференционной картине вызывают эффект дисперсии, хорошо наблюдаемый фотоэлектрическим приёмником при осциллографическом изображении интерференционной картины. Компенсация дисперсии при помощи подходящих средств даёт возможность в значительной мере исключить влияние рефракции.

1. Die Dispersion bei interferometrischen Längenmessungen

Im Rahmen der interferometrischen Längenmessung im freien Gelände, die eine Entwicklungsrichtung der geodätischen Meßtechnik im Zentralinstitut für Physik der Erde darstellt, wurden in den letzten Jahren Untersuchungen über den Einfluß der Luftdispersion auf das Interferenzbild bei interferometrischen Längenmessungen durchgeführt. Theoretische Studien führten dabei auf Formeln für dispersionsbehaftete Interferenzbilder, deren Auswertung Aussagen über die Größe und den Charakter des Dispersionsinflusses ermöglichte. Dieser Einfluß hatte bei den bisherigen Interferenzmessungen im freien Gelände kaum praktische Bedeutung und trat gelegentlich nur bei unterschiedlicher Anzahl von Reflexionen der interferierenden Strahlenbündel störend in Erscheinung [2]. Der Einfluß der Luftdispersion, hervorgerufen durch unterschiedliche atmosphärische Bedingungen, fand dabei bisher noch gar keine Beachtung, weil einerseits ein Einfluß erst bei merklich unterschiedlichen Brechungsindizes längs beider Strahlenwege zu erwarten ist, andererseits eine visuelle Beobachtung feinerer Details des Interferenzbildes wegen der ständigen Luftunruhe ohnehin nicht möglich war.

Bei den zur Zeit laufenden Untersuchungen über neue Möglichkeiten der interferometrischen Längenmessung im freien Gelände zeigte sich nun, daß bei photoelektrischer Aufzeichnung und oszillographischer Darstellung von Interferenzerscheinungen die Einzelheiten des Interferenzbildes deutlich zu erkennen sind und daß dies sogar dann noch der Fall ist, wenn das Interferenzbild starken atmosphärischen Störungen unterworfen ist. Dies ist in der Tat möglich, wenn bei der Umwandlung des optischen Interferenzsignals in ein elektrisches der Durchgang des Interferenzzuges in weniger als 0,1 ms erfolgt und durch Filterung von dem niederfrequenten Störpegel getrennt wird. Ziel dieser Arbeit war nun zu untersuchen, inwieweit ein Einfluß auf das Interferenzbild infolge unterschiedlicher Refraktionswirkungen zu erwarten ist, um daraus umgekehrt Schlußfolgerungen auf deren mögliche Erfassung bzw. Elimination zu ziehen. Es ergibt sich so, analog zur Dispersionsmethode bei der elektrooptischen Streckenmessung, eine Möglichkeit zur wesentlichen Genauigkeitssteigerung der interferometrischen Längenmessung im freien Gelände, bei der die Erfassung der atmosphärischen Bedingungen bisher sehr problematisch war.

2. Das Interferenzbild eines Spektrums

Die Überlagerung zweier sinusförmiger Lichtwellen $A_1 e^{i\omega t}$ und $A_2 e^{i(\omega t + \delta)}$ ergibt bekanntlich die Lichtintensität

$$(1) \quad J = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \delta$$

mit δ als Phasendifferenz der beiden Lichtwellen. In einem Interferenzbild mit parallelen und äquidistanten Streifen schwankt daher die Lichtintensität in zu diesem Streifensystem senkrechter Richtung mit der in (1) gegebenen Gesetzmäßigkeit. Führt man daher in dieser Richtung eine Koordinatenachse (X-Achse) ein, so kann man setzen

$$(2) \delta = \frac{2\pi x}{\lambda} + \gamma(\lambda)$$

mit δ als Wellenlänge und $\gamma(\lambda)$ als rein wellenlängenabhängigem Phasenglied. Ferner soll gleich von vornherein angenommen werden, daß die Amplituden beider interferierenden Wellen gleich sind:

$$(3) A_1 = A_2 = A.$$

Außerdem sollen beide Wellen zusätzlich zu (2) eine wellenlängenunabhängige Phasendifferenz π haben, wie sie z.B. beim MICHELSON-Interferometertyp vorhanden ist. Unter diesen Annahmen geht dann (1) über in

$$(4) J(x) = 2A^2 \left[1 - \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \gamma(\lambda) \right] \right].$$

Tragen jedoch zur Interferenz Lichtwellen eines kontinuierlichen Spektrums bei, so läßt sich leicht zeigen, daß die Intensität des Interferenzbildes durch das Integral

$$(5) J(x) = 2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) \left[1 - \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \gamma(\lambda) \right] \right] d\lambda$$

gegeben ist. Da das Integral

$$(6) J_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) d\lambda$$

bei gegebener spektraler Verteilung einen festen Wert besitzt, für (5) andererseits ein konstanter Faktor ohne Bedeutung ist, so kann man (5) in der Form

$$(7) J(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2J_0} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) \left[\cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \gamma(\lambda) \right] \right] d\lambda$$

schreiben und hat auf diese Weise die Maximalintensität auf den Wert 1 normiert. (7) stellt bereits den allgemeinsten Ausdruck für ein Interferenzbild dar. Für konkrete Fälle müssen daher $A^2(\lambda)$ und $\gamma(\lambda)$ angegeben werden. $\gamma(\lambda)$ gibt den Einfluß der Dispersion auf die Intensitätsverteilung im Interferenzbild wieder.

3. Das Interferenzbild bei Dispersion der Luft

Haben die beiden interferierenden Teilstrahlen in Luft verschiedene mittlere Brechungszahlen \bar{n}_1 und \bar{n}_2 , so ist der Unterschied der optischen Wellenlängen bekannt-

lich

$$(8) \quad \Delta s = \bar{n}_2 l_2 - \bar{n}_1 l_1 ,$$

wo l_1, l_2 die geometrischen Strahlenwege sind. Für das in Frage stehende Problem kann nun mit hinreichender Genauigkeit

$$(9) \quad l_2 = l_1 = l$$

angenommen werden, da eine geringfügige Änderung der Gangdifferenz am Dispersionseinfluß im Interferenzbild nichts ändert, sondern nur eine Verschiebung bewirkt. Es ist dann

$$(10) \quad \Delta s = (\bar{n}_2 - \bar{n}_1) l .$$

Ausgehend von der bekannten Refraktionsformel für den atmosphärischen Brechungsindex

$$(11) \quad n - 1 = (n_0 - 1) \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} - 0,41 \cdot 10^{-7} e \frac{T_0}{T} ,$$

erhält man durch Integration über den geometrischen Weg l des Lichtstrahles den mittleren integralen Brechungsindex \bar{n} zu

$$(12) \quad \bar{n} - 1 = \left[(n_0 - 1) \frac{\bar{p}}{p_0} - 0,41 \cdot 10^{-7} e \right] \left[1 - \frac{\Delta T}{T_0} \right] ,$$

wo \bar{p} und ΔT ebenfalls integrale Mittelwerte des Druckes p bzw. der Temperaturabweichung $\Delta T = T - T_0$ längs des Lichtweges sind. Sieht man hier von dem bei interferometrischen Messungen zunächst unbedeutenden Glied des Wasserdampfdruckes e ab, so kann man setzen

$$(13) \quad \bar{n}_2 - \bar{n}_1 = (n_0 - 1) \epsilon$$

mit

$$(14) \quad \epsilon = \frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_1}{p_0} - \frac{\bar{p}_2 \cdot \Delta T_2 - \bar{p}_1 \cdot \Delta T_1}{p_0 T_0} ,$$

worin die Abweichung der atmosphärischen Verhältnisse längs der beiden Strahlungswege zum Ausdruck kommt.

Mit (13) folgt nun zunächst aus (10)

$$(15) \quad \Delta s = (n_0 - 1) \varepsilon l .$$

Nach KOHLRAUSCH [1] gilt mit guter Näherung im Intervall

$$(16) \quad 4000 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 90000 \text{ \AA}$$

die Dispersionsformel

$$(17) \quad n_0^2 = 1,000\,576\,42 + \frac{327,7}{\lambda^2 - 568500} .$$

Rechnet man λ statt in \AA in μm , so ergibt sich für

$$(18) \quad n_0 - 1 = \left[288,17 + \frac{1,638\,028}{\lambda^2 - 0,005\,685} \right] \cdot 10^{-6} .$$

Bei der zusätzlichen Gangdifferenz Δs nach (15) liegt der schwarze Nullstreifen für eine Wellenlänge λ nicht mehr an der Stelle $x = 0$, sondern an der durch

$$(19) \quad x = \pm \left[n_0(\lambda) - 1 \right] \varepsilon l$$

bestimmten Stelle im Interferenzbild. Der sonst ohne Dispersion achromatische schwarze Streifen mit der Intensität Null hat somit einen Wert $J \neq 0$. Daher gilt statt (7)

$$(20) \quad J(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2J_0} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left[x \pm \left[n_0(\lambda) - 1 \right] \varepsilon l \right] d\lambda .$$

Setzt man nun nach (18)

$$(21) \quad n_0 - 1 = a + \frac{b}{\lambda^2 - c}$$

mit

$$(22) \quad a = 288,17 \cdot 10^{-6}, \quad b = 1,638\,028 \cdot 10^{-6}, \quad c = 5,685 \cdot 10^{-3},$$

so ist

$$(23) \quad J(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2J_0} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left[x \pm \left[a + \frac{b}{\lambda^2 - c} \right] \varepsilon l \right] d\lambda .$$

Die durch die Dispersion bewirkte Verschiebung der Stellen mit der Gangdifferenz 0 im Interferenzbild kann wenigstens für eine Wellenlänge λ_0 durch die Transformation

$$(24) \quad x = x' \mp \left[a + \frac{b}{\lambda_0^2 - c} \right]$$

rückgängig gemacht werden, so daß der verfarbte achromatische Streifen in der Nähe der Stelle $x' = 0$ liegt. Schreibt man gleich wieder x statt x' , so folgt aus (23) mit (24) endgültig

$$(25) \quad J(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2J_0} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A^2(\lambda) \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left[x \pm \left(\frac{1}{\lambda^2 - c} - \frac{1}{\lambda_0^2 - c} \right) \varepsilon l \right] d\lambda .$$

Die verschiedenen Vorzeichen \pm liefern nur symmetrische Bilder in bezug auf die Stelle $x = 0$, je nachdem der Brechungsindex in dem einen oder anderen Teilstrahl überwiegt.

Konkrete Interferenzbilder erhält man nun, wenn man für die Lichtquelle eine bestimmte spektrale Verteilung $A^2(\lambda)$ vorgibt. Man sieht aber bereits ab, daß die Auswertung der Integrale J_0 und $J(x)$ den Einsatz von Rechenautomaten erforderlich macht.

4. Beispiele von Interferenzbildern

Von den verschiedenen Interferenzbildern, die aus unterschiedlichen spektralen Verteilungen für bestimmte Typen von Lichtquellen berechnet wurden, sei hier der Fall einer Xenon-Hochdrucklampe wiedergegeben, bei der, von feineren Details abgesehen, die Intensität durch eine PLANCKsche Verteilung mit dem Strahlenmaximum bei $T = 5 \cdot 200$ °K wiedergegeben werden kann. Ferner sei angenommen, daß das Interferenzsignal von einem Photovervielfacher mit S1-Kathode aufgenommen wird, wobei der im blauen Spektralbereich liegende Teil allerdings nicht berücksichtigt wurde. Dann kann man setzen

$$(26) \quad A^2(\lambda) = \frac{e^{-15(\lambda-\lambda_0)^2}}{\lambda^5 \left[e^{\frac{14300}{\lambda T}} - 1 \right]} .$$

Der Nenner berücksichtigt die spektrale Verteilung der Lichtintensität und der Zähler die spektrale Empfindlichkeit des SEV, λ_0 wurde zu $0,8 \mu\text{m}$ angenommen, und die Integrationsgrenzen wurden zu $\lambda_1 = 0,4 \mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 1,2 \mu\text{m}$ festgesetzt. Auf diese Weise werden alle im Empfindlichkeitsbereich des SEV liegenden Wellenlängen weitgehend berücksichtigt. Die Berechnung der Integralwerte $J(x)$ erfolgte unter Anwendung der SIMPSON-Regel mit dem Rechenautomaten R 300.

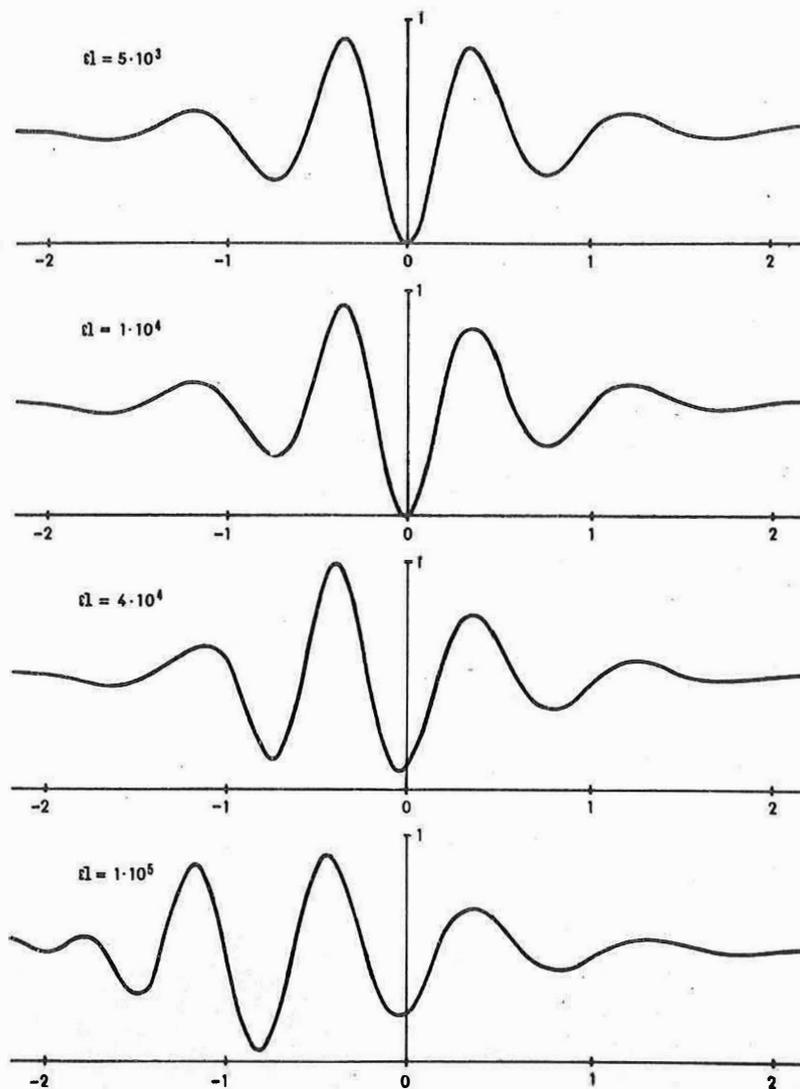


Abb. 1. Einfluß unterschiedlicher Luftdispersion auf Interferenzerscheinungen im weißen Licht

Nach der Formel (25) ist für die Größe des Dispersionseinflusses bei gegebenem $A^2(\lambda)$ das Produkt ϵl maßgebend, wo l die geometrische Weglänge in den jeweiligen Interferometerzweigen in μm ist und ϵ den Unterschied der Brechungsindizes längs dieser Wege zum Ausdruck bringt. In Abb. 1 sind vier Interferenzbilder für die Werte $\epsilon l = 5 \cdot 10^3$, $1 \cdot 10^4$, $4 \cdot 10^4$ und $1 \cdot 10^5$ dargestellt. Die Interferenzstreifen liegen in einem Intervall $-2,19 \mu\text{m} \leq x \leq 2,19 \mu\text{m}$. Während nun bei fehlender Dispersion eine völlige Symmetrie im Interferenzbild vorhanden ist, zeigt sich bereits bei $\epsilon l = 5 \cdot 10^3$

eine Andeutung der Unsymmetrie zwischen den ersten beiden Maxima. Bei $\epsilon l = 10^4$ ist dies bereits ganz deutlich erkennbar. In dem Bild mit $\epsilon l = 4 \cdot 10^4$, wo die Unsymmetrie schon beträchtlich ist, zeigt auch das Intensitätsminimum in der Nähe der Stelle $x = 0$ eine schon merklich von Null verschiedene Intensität. Desgleichen deutet sich eine Verschiebung des Minimums an, die bei $\epsilon l = 10^5$ schon beträchtlich ist. Das absolute Minimum geht hier bereits auf das benachbarte Minimum über. Ferner tritt die Asymmetrie der intensitätsschwächeren Interferenzstreifen deutlich in Erscheinung.

Die Interferenzbilder der Abb. 1 lassen drei charakteristische Merkmale bei zunehmendem Dispersionseinfluß erkennen:

1. eine sich verstärkende Asymmetrie des Interferenzbildes,
2. eine seitliche Verschiebung des sich verändernden Streifensystems in bezug auf die ursprüngliche Stelle mit dem Gangunterschied Null,
3. eine allgemeine Abnahme der Maxima bzw. eine Anhebung der Minima des Streifensystems.

Während man nun wegen des 2. und 3. Merkmals vermuten könnte, daß eine zunehmende Dispersion schließlich zu einem völligen Verschwinden des Interferenzbildes führt, zeigten experimentelle Untersuchungen, daß dies nur bedingt zutrifft. Bei der oszillographischen Darstellung von Interferenzbildern zeigte sich nämlich, daß

4. eine beträchtliche Erhöhung der Zahl der Interferenzstreifen eintritt, wie sie etwa beim Einbringen eines Farbfilters in den Strahlengang zu beobachten ist.

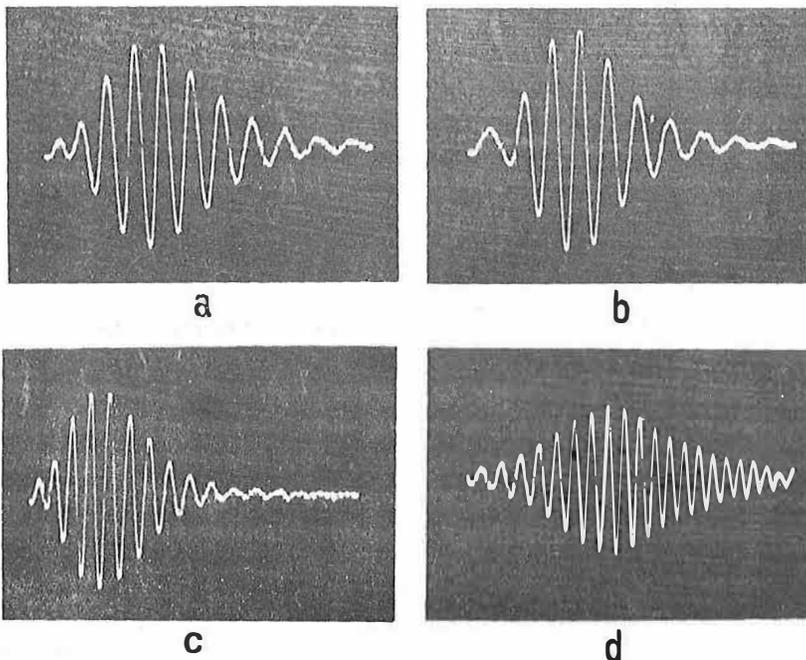


Abb. 2. Oszillogramme von Interferenzbildern:
a ohne, b - d mit zunehmender Dispersion

So wurden z.B. Interferenzbilder mit mehr als 100 Streifen beobachtet, die ohne Dispersion nur weniger als 10 deutliche Streifen lieferten. Abb. 2 zeigt einige Oszillogramme mit dispersionsbehafteten Interferenzbildern.

5. Elimination des Refraktionseinflusses

Ausgehend von den Beispielen, kann festgestellt werden, daß ein Einfluß unterschiedlicher Brechungsindizes bereits bei $\epsilon l = 10^4$ zu erkennen ist. Bringt man nun ein geeignetes Medium in den Strahlengang des Interferometers, z.B. einen Kompensator mit entsprechender Dispersion, so kann man bei geeigneter Stellung eine Kompensation der Dispersion im Interferenzbild erreichen. Dies ist aber gemäß den obigen Ausführungen der Fall, wenn das Interferenzbild eine symmetrische Form besitzt. Bei fehlendem Dispersionseinfluß sind aber die mittleren Brechungsindizes \bar{n}_1 und \bar{n}_2 nach (13) weitgehend einander gleich. Zeigt nun das Interferometer die Gangdifferenz

$$(27) \quad \Delta s = \bar{n}_2 l_2 - \bar{n}_1 l_1 = 0$$

an, so kann man aus der Gleichheit der optischen Weglängen $\bar{n}_1 l_1$ und $\bar{n}_2 l_2$ weitgehend auf die Gleichheit der geometrischen Weglängen l_1 und l_2 schließen.

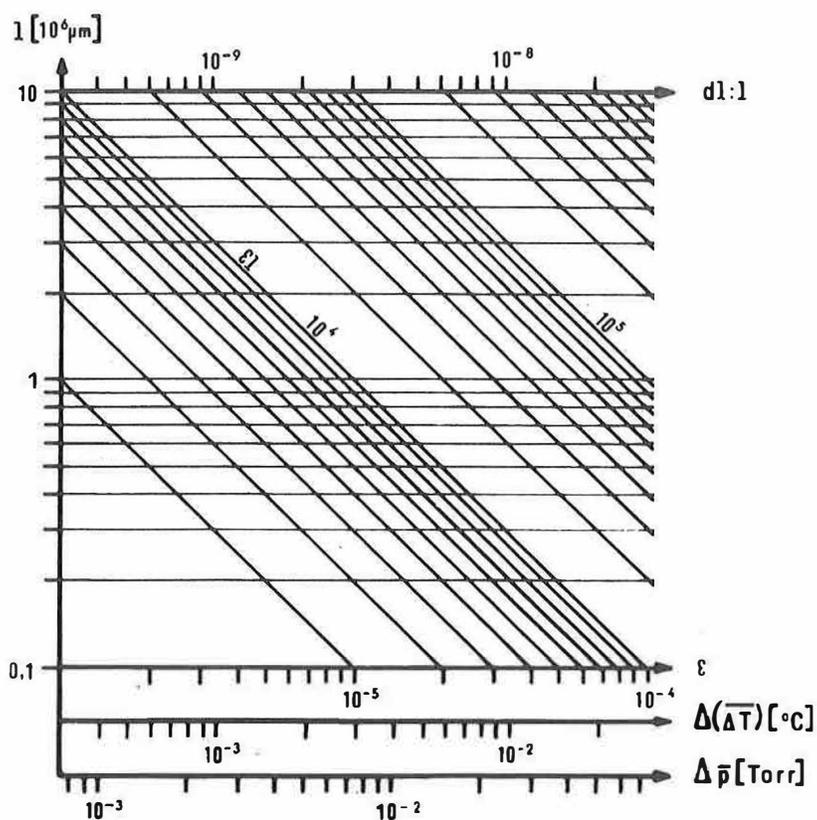


Abb. 3.
Diagramm zur Ermittlung der relativen Genauigkeit dl/l einer Interferenzlängenmessung bei Kompensation des Dispersionseinflusses ϵl

Aussagen zur Einführung neuer Beobachtungs- und Auswertemethoden
im geomagnetischen Beobachtungsbetrieb

von

V. AUSTER, K. LENGNING, D. LENNERS und H. SCHMIDT

Zusammenfassung

Nach einer Darstellung der Entwicklungslinien der geomagnetischen Meß- und Beobachtungstechnik werden die Gesichtspunkte erörtert, unter denen Erweiterungen und Verbesserungen vorzunehmen sind. Probleme der Meßgeräteentwicklung und des Einsatzes der Methoden der elektronischen Datenerfassung und -verarbeitung werden betrachtet und Beispiele von Ergebnissen mitgeteilt.

Summary

After an outline of development trends in the techniques of measuring and recording in the geomagnetic field the conceptions are discussed which result in better and more reliable systems. Problems of the development of measuring systems as well as possibilities of the employment of the methods of data acquisition and processing are considered. Examples of results are given.

Резюме

Дается обзор развития техники геомагнетических измерений и наблюдений. Потом обсуждаются точки зрения, которые надо принимать во внимание при расширениях и улучшениях этих методов. Рассматриваются проблемы развития измерительных приборов и применения способов электронного сбора и обработки данных. Сообщаются некоторые результаты.

1. Einleitung

Eines der Hauptziele der geophysikalischen und kosmischen Forschung ist die Untersuchung der physikalischen Phänomene, die die Umwelt des Menschen direkt oder indirekt beeinflussen. Zu diesem Zweck werden in weltweitem Maßstab Observatorien betrieben, die die von der Natur angebotenen Informationen erfassen, aufbereiten und interpretieren, um neue Gesetzmäßigkeiten und Erkenntnisse aus diesem Datenmaterial abzuleiten. Da das Niveau der Erkenntnisse und der Stand der Beobachtungstechnik den Charakter einer Wechselwirkung aufweisen, kommt der Einführung neuer Beobachtungsmethoden und Auswerteverfahren im Hinblick auf eine sichere und rationelle Informationsgewinnung und -ausbeute eine auch im internationalen Rahmen ständig steigende Bedeutung zu.

2. Entwicklungslinien der geomagnetischen Beobachtungstätigkeit

Die Realisierung dieser Umweltforschung auf dem Gebiete des Geomagnetismus erfordert eine permanente Überwachung des geomagnetischen Feldes, um Informationen über die Vorgänge im Erdinnern wie auch im erdnahen Raum zu erhalten. Es sind Langzeitbeobachtungen mit hoher innerer Genauigkeit und Kontinuität nötig, damit das geomagnetische Variationsspektrum voll erfaßt werden kann, das einen Bereich von 10^{-2} bis 10^{10} s überdeckt. Die Erfassung dieser sehr breiten Zeitskala erfordert unterschiedliche Meß- und Registriermethoden [4].

Der Komplex der klassischen erdmagnetischen Meßmethodik, dessen Grundlagen bereits GAUSS schuf, ist seiner hohen Nullpunktsicherheit wegen zur Beobachtung sehr langperiodischer Variationen, z.B. der Säkularvariation, besonders geeignet. Sämtliche geomagnetischen Observatorien in der Welt arbeiten außer mit neueren Verfahren auch mit dieser klassischen Methodik. Zu Beginn dieses Jahrhunderts wurde durch internationale Vereinbarungen eine einheitliche Auswertung der Beobachtungsergebnisse festgelegt, die später noch erheblich erweitert und verbessert werden konnte. Verschiedene spezielle Auswertemaßnahmen (Erfassung der Säkularvariation, des täglichen Ganges, der Nachstörungsercheinungen usw.) sind direkt Bestandteil der 1. Auswertungen, die in den Jahrbüchern der Observatorien veröffentlicht werden.

Die Anwendung dieser klassischen Methodik setzt eine präzise Kenntnis des magnetischen Niveaus voraus. In den Jahren 1950 bis 1952 konnte am Adolf-Schmidt-Observatorium eine Neubestimmung des Niveaus vorgenommen werden; es handelt sich hierbei um einen komplizierten Ablauf von Absolutbestimmungen und Präzisionsmessungen, zu deren Durchführung nur wenige Observatorien in der Lage sind. Mit dieser Maßnahme und weiteren Verbesserungen im Bestimmen der Temperaturwerte sowie durch Einführung einer elektronischen Schwingzeitmeßanlage (1954) konnte die Meßgenauigkeit der klassischen Methode entscheidend erhöht werden. - Die weltweite Einführung der elektronischen Meßtechnik, insbesondere der Protonenmagnetometer zur Totalintensitätsbestimmung, ermöglichte weitere Verbesserungen.

Die magnetische Säkularvariation ist eine der wenigen Quellen, die über Veränderungen im Erdinnern Auskunft geben können. Sie ist der hohen Aktualität des Forschungsgebietes wegen besonders wichtig, und es kommen ihr die oben geschilderten Verbesserungen in der geomagnetischen Meßtechnik direkt zugute. Besondere Aufmerksamkeit muß bei der Einführung verbesserter Beobachtungsmethoden dem Erhalt der Information von Langzeitreihen geschenkt werden, wie sie beispielsweise für Potsdam - Seddin - Niemeck seit 1880 existieren.

Wie in anderen Zweigen der Naturwissenschaften bringt die Einführung der elektronischen Datenerfassung und -verarbeitung gewisse Vorteile und Erleichterungen, aber auch einige Probleme mit sich. Eindeutige Vorteile im Hinblick auf effektiveren Personaleinsatz, Rationalisierung der Auswertung und Erhöhung der Datensicherheit ergeben sich in der maschinellen Berechnung des Jahrbuch-Datenflusses und in der Bearbeitung der Pulsationsdaten, wie später noch ausgeführt wird.

Die Untersuchungen der Vorgänge in der Magnetosphäre sind aktuell und werden intensiv mit großem Aufwand betrieben. Dabei hat sich gezeigt, daß neben den wichtigen Messungen an Bord von Satelliten und Raumsonden präzise bodennahe Beobachtungen unerlässlich sind. Dabei sollte man eine Angleichung der Beobachtungs- und Auswertemethoden anstreben, was für die Observatorien eine Anpassung an die Raumfahrtmethoden bedeutet. Wahrscheinlich ist es ausreichend, einige wenige Bodenstationen mit Apparaturen auszurüsten, die dem technisch höchsten Stand entsprechen. Es ergibt sich von selbst, daß diese Bodenstationen mit geomagnetischen Observatorien identisch sind, weil an ihnen wichtige Voraussetzungen erfüllt sind (langjährige Beobachtungsreihen mit bekanntem magnetischem Niveau, erprobte Meßpraxis, Existenz von Eich- und Prüfeinrichtungen, eisenfreie Meßplätze usw.). In dem Aufgabengebiet geomagnetischer Observatorien ist - wie auch in Niemeck - die Beobachtung des Erdstromes, genauer des Erdpotentialgradienten, mit enthalten. Es wird daher angestrebt, die elektromagnetische Induktion im Erdinnern am Beobachtungsort Niemeck in detaillierter Form zu untersuchen.

Für diese Vorhaben in der Veränderung der Beobachtungstechnik und auch in der Auswertemethodik, die bereits prognostisch Berücksichtigung fanden und zum Teil realisiert sind, wurden Ablaufpläne für drei Themenkomplexe aufgestellt, die im Niemecker Jahrbuch für 1972 [2] veröffentlicht sind; daher sollen sie hier nur kurz genannt werden:

1. Verarbeitung der Minutenwerte der magnetischen Registrierungen,
2. Verarbeitung der Sekunden- (bzw. 0,1-s- und 0,01-s-) Werte der geomagnetischen und geoelektrischen Werte,
3. Verarbeitung der Erdstromwerte (Minuten- und Sekundenwerte bzw. 0,1-s-Werte) und Korrelation mit entsprechenden magnetischen Werten.

Diese Themenkomplexe, die nach Art der Strukturdiagramme aufgestellt wurden, bilden die Grundlage auch für den später zu erläuternden Prozeßrechnereinsatz und haben sich auch in anderen Planungsfällen bewährt.

3. Meßgeräteentwicklung

Beim Übergang von der Analog- zur Digitaltechnik müssen auch für die Geräteentwicklung gewisse veränderte Aspekte beachtet werden. Die Auswahl für Systeme mit digitaler Datenausgabe aus den verschiedenen geomagnetischen Meßverfahren wurde nach folgenden Gesichtspunkten getroffen:

- lückenloses Überspannen des gesamten interessierenden Periodenbereiches mit Beachtung spezieller Forderungen für sehr lang- und sehr kurzperiodische Variationen;
- weitgehende Übernahme der bewährten Unterteilung aus dem klassischen Observatorium in Geräte zur Absolutmessung und zur lang- und kurzperiodischen Variationsaufzeichnung;
- weitgehende Wartungsfreiheit der Geräte, vertretbarer Aufwand an Meßzeit;
- Ausgabe von Digitalwerten mit minimalem Informationsverlust (Vermeidung von Amplituden- und Periodenfehlern).

Zweifellos spielen bei der Meßgeräteauswahl auch Tradition und Erfahrung am jeweiligen Observatorium eine Rolle.

In unserem Falle entschieden wir uns für die folgende Gerätekombination:

- Die absoluten Messungen sollen mit einem Protonen-Komponenten-Magnetometer für D, H, F und Z durchgeführt werden. Das bereits entwickelte Verfahren arbeitet mit horizontalen Zusatzfedern (Spulenanordnung auf theodolitartigem Untersatz), wobei sowohl die Kompensations- als auch die Feldumpolmethode Verwendung finden. Theoretische Berechnungen und erste praktische Versuche führten zu der gleichen Meßgenauigkeit wie mit dem klassischen Instrumentarium. Dies erklärt sich durch die Tatsache, daß bei einwandfrei arbeitender Elektronik der Meßfehler eines derartigen Gerätes letztlich durch das Einhalten mechanischer Forderungen bei der Justierung (Horizontierung usw.) bestimmt wird. Die Messung selbst bringt gegenüber der klassischen aber eine große Zeitersparnis, so daß man z.B. durch tägliche Messungen eine bessere Überlappung mit dem Periodenbereich der langperiodischen Variometer erreichen kann.
- Zur Erfassung der langperiodischen Variationen entschieden wir uns ebenfalls für Protonen-Komponenten-Magnetometer. Hierzu führten sowohl die langjährigen positiven eigenen Erfahrungen mit dem einfachen Protonenmagnetometer als auch Vergleichsmessungen mit einem Cäsium-Magnetometer (sowjetisches Fabrikat) und die Entwicklung eines besonderen Gerätes, das in einem einjährigen erfolgreichen Dauerbetrieb Meßwerte aller Minuten lieferte. Im Gegensatz zu den bekannten Verfahren besteht unser Variometersystem für F, Z und D aus drei gesonderten Geräten, wodurch sich eine Verminderung des mechanischen Aufwandes und ein leichteres Justieren für das Einzelgerät erreichen lassen. Relativ problemlose Digitalausgabe und geringe Langzeitdrift sind ebenso zu erwarten wie die oben erwähnte Überlappung des Periodenbereiches für Absolutmessung und langperiodische Variometer. Als kürzeste Periode ergibt

sich bei einem Meßwert pro Minute mit Sicherheit eine solche von 5 Minuten. Demzufolge genügt eine Meßgenauigkeit von $\pm 1 \gamma$. Dadurch werden Aliasing-Effekte vermieden, während z.B. die nunmehr als statistisch sicher anzusehende Meßwertabweichung eine Stundenmittelgenauigkeit von ca. $\pm 0,15 \gamma$ zuläßt.

- Die kurzperiodischen Variationen werden durch Induktionsvariometer mit Kernspulen erfaßt. Als großer Vorzug dieser Geräte ist zu werten, daß ihre periodenabhängige Empfindlichkeitscharakteristik sich sehr gut dem natürlichen Variationsangebot in diesem Periodenbereich in mittleren geomagnetischen Breiten anpaßt. Dadurch kann eine starke Dynamikkompression erreicht werden. Dies hat nicht nur Bedeutung für den Analogbetrieb (Schreiber am Geräteausgang), sondern auch für die Digitalausgabe, da mit 12 bit ein wahrer Dynamikbereich von $1 : 10^4$ übertragen werden kann. Da auf dem Gebiete des Induktionsspuleneinsatzes langjährige Erfahrungen am Observatorium Niemegk [1] vorliegen, führte die Konstruktion in mechanischer und elektronischer Hinsicht (auch in Verbindung mit der digitalen Datenerfassung) zu guter Langzeitstabilität. Die Identifizierung von Perioden der Größenordnung von 10^3 s war ohne weiteres möglich. So ist auch eine Überlappung mit dem Periodenbereich der langperiodischen Variometer gegeben. Die durch die gegenwärtigen Geräte übertragenen kürzesten Perioden liegen bei 0,5 s, so daß AD-Wandler mit 0,1 s Abfragerate vertretbar wären. Hier sind allerdings noch Untersuchungen erforderlich, um die Frage zu entscheiden, ob es nicht rentabler wäre, vor der Digitalisierung z.B. eine analoge Filterung durchzuführen und für die sehr kurzperiodischen Variationen (0,5 bis 5 s) gesondert eine weitere Datenverdichtung ohne umfangreiche Zwischenspeicherung vorzunehmen. Diese Probleme sind bereits in die Prozeßrechnerkonzeption eingegangen und sollen als eines der ersten mathematisch-phänomenologischen Bearbeitungsthemen gelten.

4. EDV-Entwicklungen

Wie die vorhergehenden Abschnitte zeigen, verlangen das hohe Datenaufkommen und die Auswerteverfahren den Einsatz rationeller maschineller Hilfsmittel. Diese Notwendigkeit wurde am Adolf-Schmidt-Observatorium relativ früh erkannt und führte zu einer langfristigen EDV-Konzeption, die in mehreren, voneinander technisch und methodisch getrennten Ausbaustufen einen systematischen Einsatz beinhaltet, von denen die Ausbaustufen 1 und 2 abgeschlossen sind und die dritte Ausbaustufe zur Zeit im Gange ist.

Ausbaustufe 1: Einsatz von Kleinrechenautomaten mit Lochstreifen als Datenträger [5]

Diese begonnene Phase ist durch den Einsatz von Kleinrechenautomaten vom Typ SER 2 mit dem Lochstreifen als Datenträger gekennzeichnet. Sie führte zur Umstellung der gesamten Jahrbuchberechnung auf ein mit programmgesteuerten Kleinrechenautomaten abarbeitbares Programmsystem, mit dem alle Jahrbücher seit 1965 laufend produziert werden. Damit sind ein schnelleres Erscheinen gegenüber der früheren Setzmethodik und eine Reduktion der Fehlermöglichkeiten gesichert, auch ein rationellerer Personaleinsatz ist zu verzeichnen. Weitere Entwicklungen dieser Phase betrafen die Kurvenabtastung und Umsetzung der Ordinatenwerte in Lochstreifeninformation.

Ausbaustufe 2: Nutzung mittlerer Rechenanlagen (R 300) mit computergerechtem Magnetband als Datenträger [3]

Da die zur Lochstreifenverarbeitung geeigneten Datenmengen begrenzt sind, mußte im Hinblick auf die zur Untersuchung kurzperiodischer Variationen nötigen hohen Datenvolumina zum Magnetband übergegangen werden, einem Datenträger, der sich in computergerechter Form ohne Zwischenumsetzung zur Aufnahme von Massendaten besonders eignet. Allerdings ist im Interesse einer hohen Datensicherheit der Betrieb eines Magnetbandgerätes zur Datenerfassung nur sinnvoll, wenn die in Rechenautomaten üblichen Organisations- und Datensicherungsmaßnahmen direkt angewandt werden können. Auf dieser Grundlage entstand die Konzeption einer 1972 realisierten Magnetband-Datenerfassungsanlage, die auf der R-300-Technik basiert und einen Teil des R 300 (Hauptspeicher, Magnetbandsteuergerät, 3 Magnetbandeinheiten und Stromversorgung) zur Datenerfassung vorsieht. Diese Einheiten erfuhren eine Ergänzung durch selbstentwickelte Erkennungs- und Steuerschaltungen. Das Datenangebot entspricht den in den vorhergehenden Abschnitten dargelegten Gesichtspunkten und besteht aus 5 dreistelligen Werten pro Sekunde (\dot{X} , \dot{Y} , \dot{Z} und E_x , E_y) sowie aus 15 Minutenwerten, je sechsstellig möglich, von denen 8 analogen Meßwertgebern (Komponenten, Temperaturen, Erdstrom) und 7 frequenzbestimmten Signalgebern (Protonenmagnetometer) zuzuordnen sind. Die Datenerfassungsanlage, deren Blockschaltbild im oberen Teil der Abb. 1 zu sehen ist, gliedert sich in Informationsaufbereitung, Informationszwischenspeicherung und Speicherung auf Magnetband. Alle über die Analog- und Digitaleingabe eingelesenen Daten werden nach einer entsprechenden Signalaufbereitung mit Hilfe der Ein-/Ausgabesteuerung in das Transportsteuerwerk übertragen, wobei auch Uhrzeit und Datum über die Digitaleingabe mit erfaßt werden. Alle Werte einer Minute werden in einem Datenblock konstanter Länge zusammengefaßt und im Ferritkernspeicher abgespeichert und entweder sofort oder längstens nach 31 Minuten dem Magnetbandgerät zur endgültigen Abspeicherung zugeführt. - Diese Anlage, von der Abb. 2 einen Ausschnitt zeigt, hat sich in mehrmonatigen Dauereinsätzen bewährt. Über Erfahrungen [3] ist bereits vorgetragen worden, über die ersten Auswertergebnisse berichtet Kap. 5.

Ausbaustufe 3: Rechnergesteuerte Datenerfassung und -vorverdichtung

Die vielfältigen Aufgaben, die die Erfassung, Kontrolle und Verarbeitung eines umfangreichen, kontinuierlich angebotenen Datenmaterials kennzeichnen, erfordern den Einsatz von Rechenanlagen, die in der Lage sind, die Daten im Echtzeitbetrieb zu erfassen, sie nach vielerlei Gesichtspunkten möglichst sofort zu verarbeiten und von Rechenergebnissen abhängige Maßnahmen zu veranlassen und zu steuern. Damit ist die Methodik der international immer stärker vordringenden rechnergesteuerten oder -gestützten Datenerfassung gekennzeichnet, zu deren Realisierung im Adolf-Schmidt-Observatorium Niemegk ein Prozeßrechnersystem PRS 4000 des VEB Robotron vorgesehen ist. Mit der bereits im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Datenerfassungsanlage wird der Prozeßrechner eine integrierte Einheit der rechnerkontrollierten Datenerfassung und -verarbeitung bilden (Prinzipdarstellung in Abb. 1), so daß sowohl Echtzeitaufgaben als auch weitere Berechnungen in der verbleibenden Zeit vorgenommen werden können. Die Kopplung des PRS 4000 mit der Datenerfassungsanlage (DEA) erfolgt

derart, daß alle bisher von der DEA erfaßten Meßstellen sowohl direkt zur Magnetbandaufzeichnung führen (bisherige Betriebsweise) als auch, erweitert um weitere 30 Meßstellen, über die Prozeß-Ein-/Ausgabe-Einrichtung (PEA) dem Prozeßrechner zugeführt werden können. Damit ist das Magnetband sowohl als Urdatenspeicher wie auch als vom Prozeßrechner gesteuerter Zwischenspeicher mit Rechenergebnissen zur weiteren Bearbeitung in größeren Rechnern nutzbar. - Umfangreiche Steuerprogrammsysteme - vom Hersteller des PRS 4000 erarbeitet - werden mit Anwenderprogrammen kombiniert und ergeben ein System, das die Informationsgewinnung nach dem neuesten technischen Stand und problemanalytischen Erkenntnissen gestattet.

5. Auswerteproblematik

Wie bereits einleitend erwähnt, schließt sich im allgemeinen im geomagnetischen Observatorium an die Meßwertgewinnung und -speicherung eine erste Routineauswertung an, die den Charakter einer problemorientierten Datenverdichtung hat. Hierher gehören z.B. die nach internationalen Empfehlungen vorgenommenen Bestimmungen der Stundenmittel oder die Aktivitäts-Charakterisierungen aus der langperiodischen (Normal-)Registrierung. Die Ableitung dieser Informationen aus den Digitalwerten ist ohne Probleme möglich, allerdings wird sich der höhere Aufwand nicht mit dem bisherigen Programm allein rechtfertigen lassen. Dies wird aber durch routinemäßige Bearbeitung spezieller Probleme geschehen. Hierher gehören z.B. die Betrachtung von Untergrundeinflüssen bei längeren Perioden, die Interpretation kurzperiodischer Anteile in der Säkularvariation und deren Abgrenzung von Außenfeldeinwirkungen sowie Untersuchungen zur maschinellen Aktivitätskennzeichnung.

Anders liegt die Problematik bei den kurzperiodischen Variationen. Eine Orientierung an einer bereits üblichen, mathematisch einigermaßen fundierten Routineauswertung ist hier nicht möglich. Vielmehr gibt es in vielen Ländern erst Bemühungen, zu einer solchen zu kommen, um Ausgangswerte für verschiedene geophysikalische Problemstellungen liefern zu können. Allgemein wird hier den Möglichkeiten der EDV noch zu wenig Beachtung geschenkt, möglicherweise werden die Schranken beim Umgang mit großen Datenmengen nicht immer gern überwunden.

Unser Beitrag zu dieser Problematik, dem wir bei den Bemühungen um die Einführung moderner Meßverfahren in den Observatoriumsbetrieb den zeitlichen Vorrang geben wollen, gliedert sich in die folgenden Schritte, von denen ein Großteil bereits mit den Werten der Magnetband-Datenerfassungsanlage und dem Rechenautomaten R 300 realisiert werden konnte:

- Die Konzeption für die visuelle Auswertung von Analogschrieben zur Schätzung von Stundenmitteln für Periode, Aktivität, Modulationsgrad usw. wurde von vornherein auf die Möglichkeiten einer späteren automatischen Berechnung ausgerichtet. Jetzt liegen Auswertungen für einige Jahre vor.

- [4] SCHMIDT, H.;
AUSTER, V. Neuere Meßmethoden der Geomagnetik. In: Handbuch
der Physik, hrsg. v. S. FLÜGGE, Bd. XLIX/3,
S. 323-383.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1971
- [5] SCHMIDT, H.;
LENNERS, D. Zum Stand der Datenverarbeitung am Adolf-Schmidt-
Observatorium in Niemegek.
Gerlands Beitr. Geophysik 78 (1969), S. 180-189

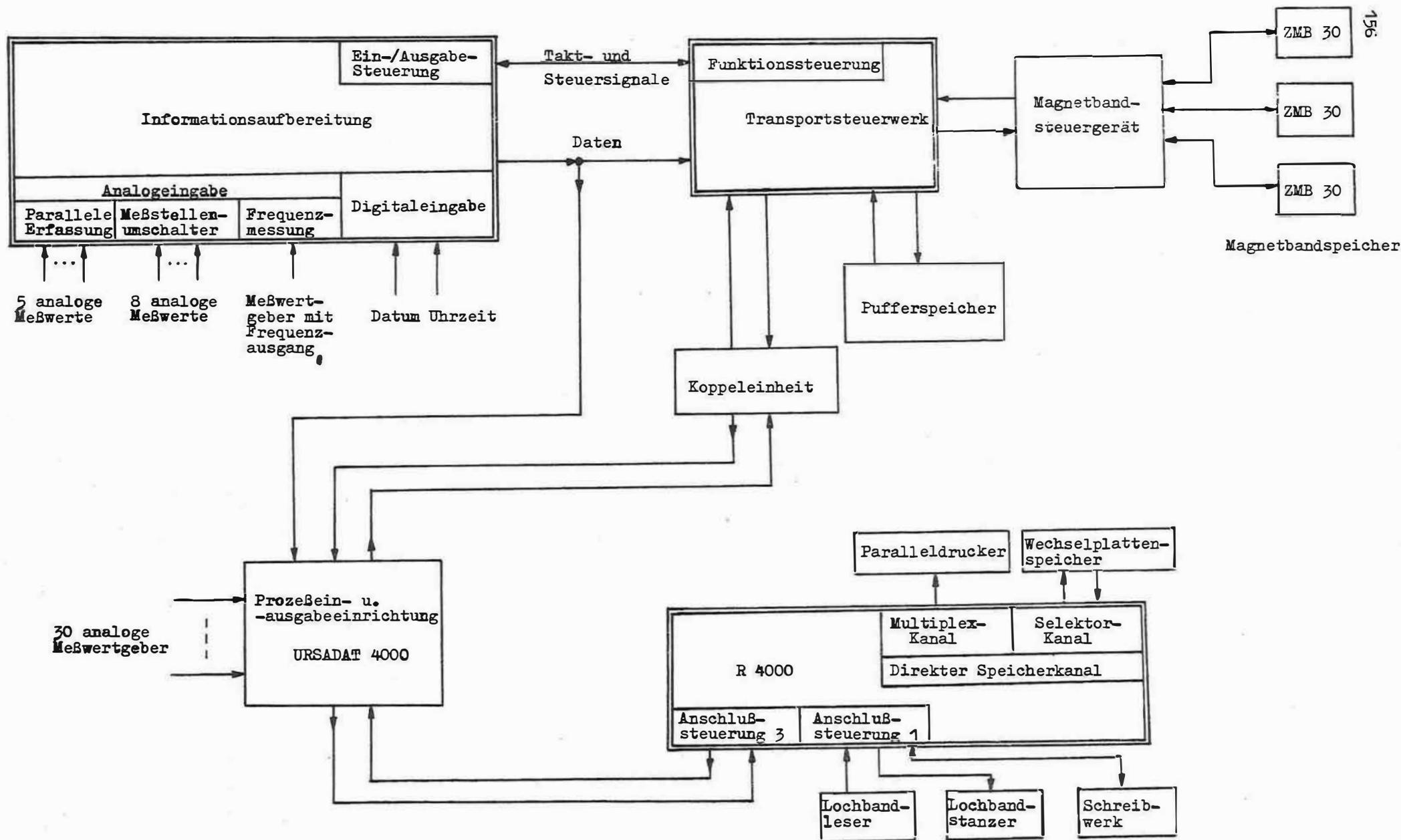


Abb. 1. Blockschaltbild der integrierten Einheit zur rechnerkontrollierten Datenerfassung, bestehend aus der Magnetband-Datenerfassungsanlage (oberer Teil), einer Koppeleinheit (Mitte) und dem Prozeßrechnersystem PRS 4000 (unten)

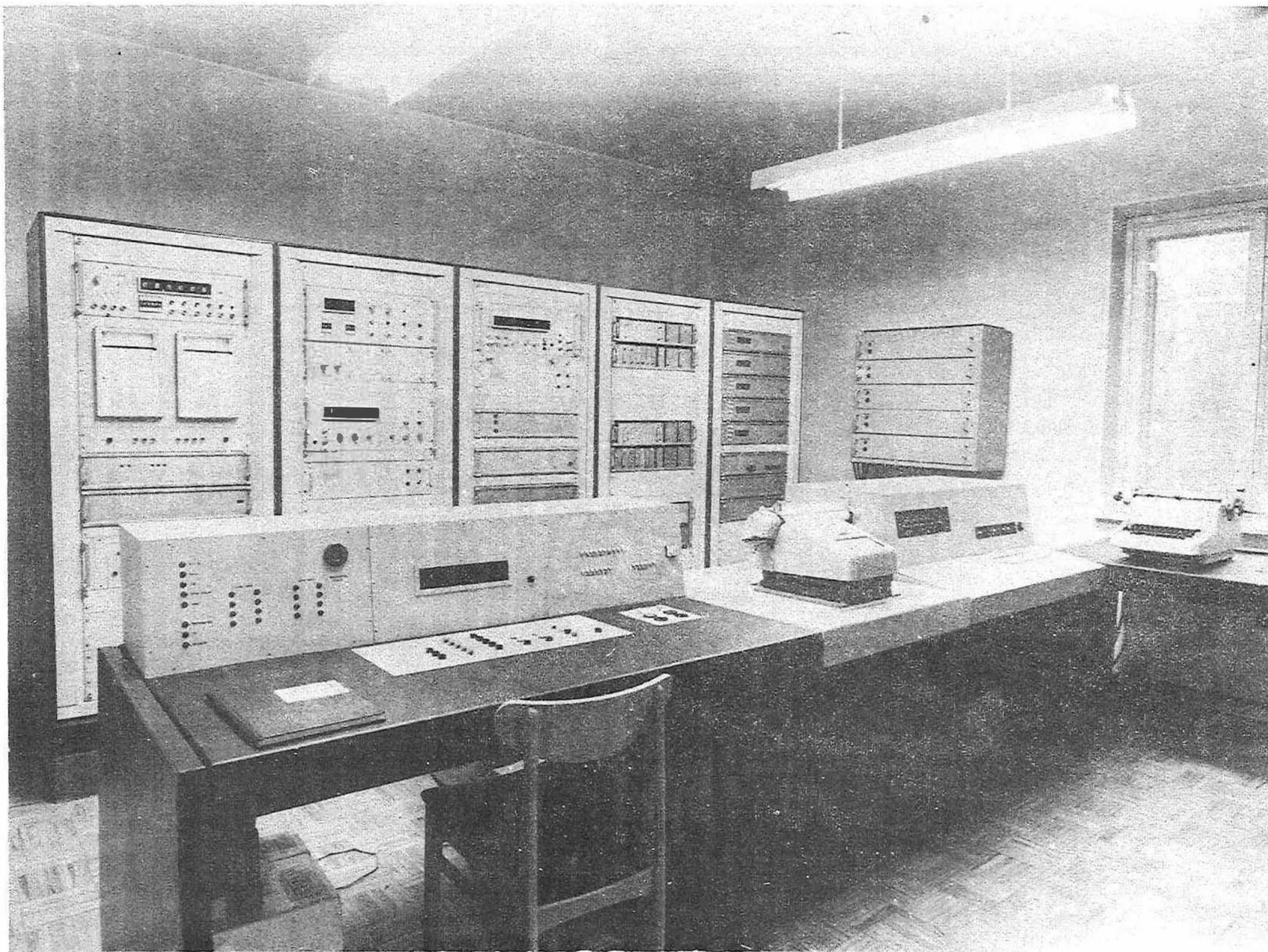


Abb. 2. Ansicht des Teiles "Datenaufbereitung" der Magnetband-Datenerfassungsanlage. Vorn Steuerpult zur Bedienung und Überwachung, dahinter Quarzuhr, Schreiber für analoge Größen, Digitalvoltmeter, Periodendauermesser und Analog-Digital-Umsetzer (rechts außen); davor Kleinrechenautomat SER 2

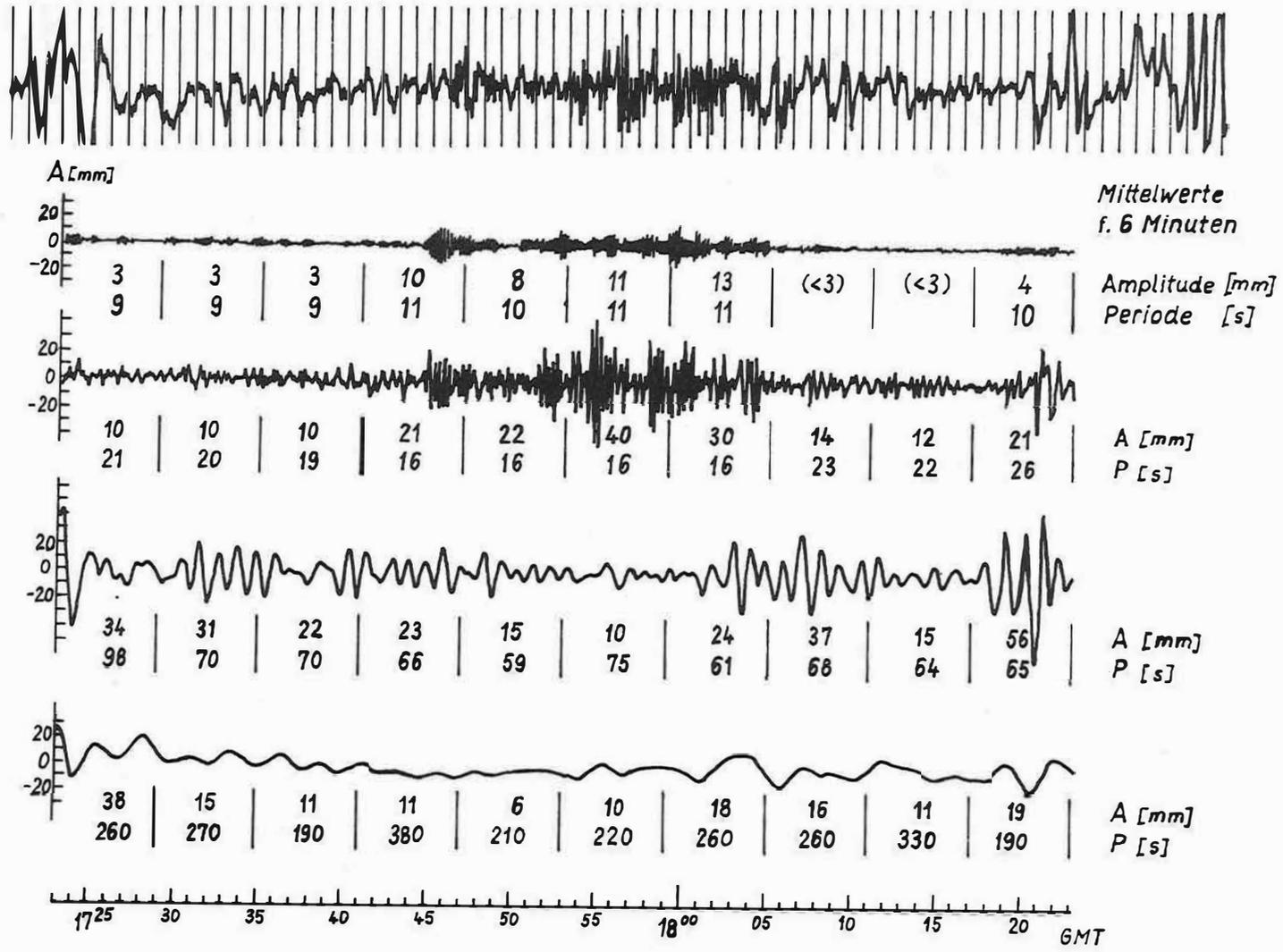


Abb. 3. Ergebnis der mathematischen Filterung einer Registrierung kurzperiodischer Variationen (zeitliche Ableitung der geomagnetischen Nordkomponente) mit 4 Bandpässen. Zahlen geben die mittleren Amplituden- und Periodenwerte für 6-Minuten-Intervalle an. Ganz oben Originalregistrierung

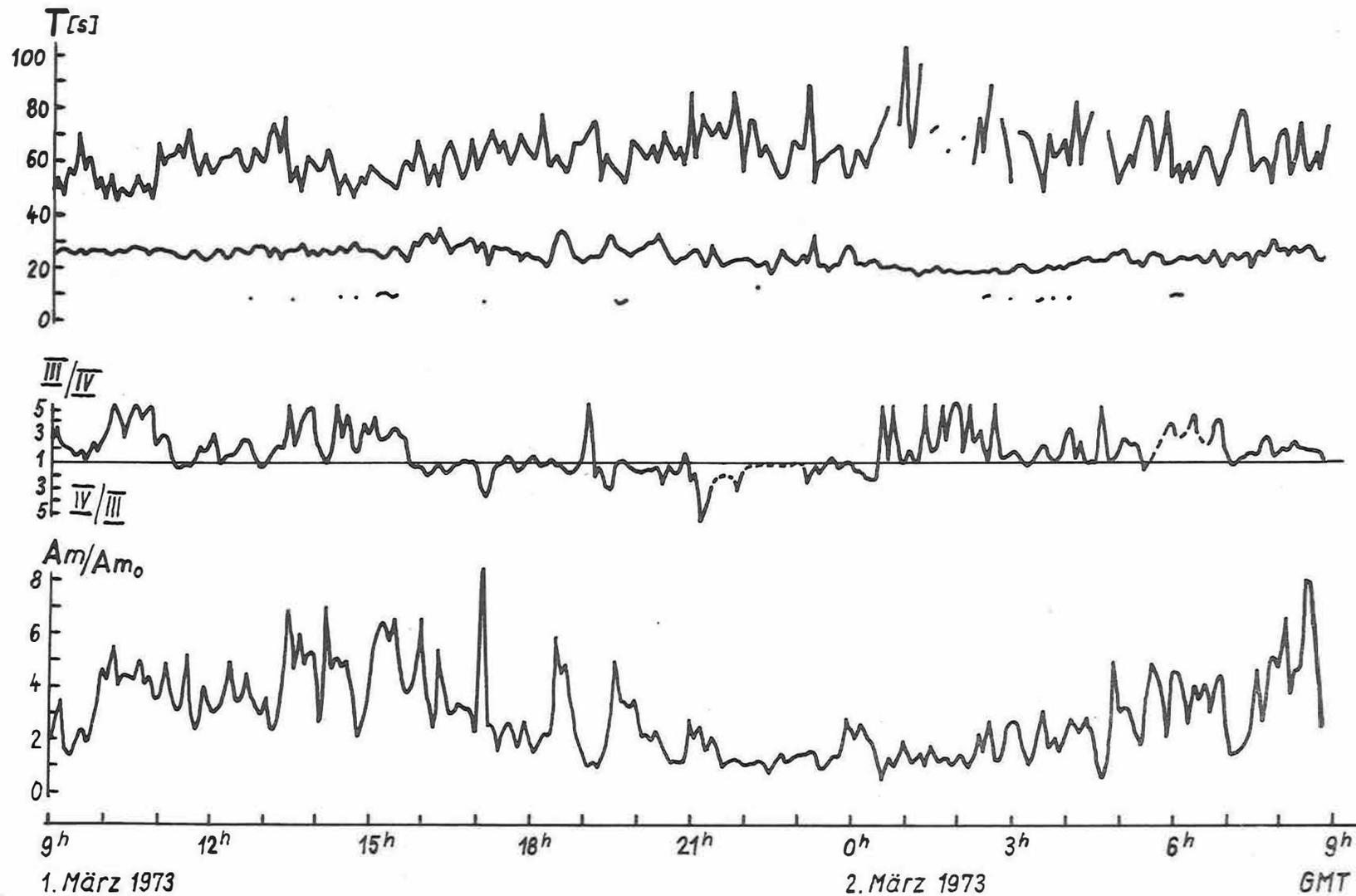


Abb. 4. Darstellung der 6-Minuten-Mittelwerte für die mittlere Periode in 3 Bändern für einen Tag (oberes Diagramm)
 Verhältnis der normierten mittleren Amplitude im Band 2 zu dem des Bandes 3 bzw. umgekehrt, so daß sich ein Wert ≥ 1 ergibt (mittleres Diagramm)
 Darstellung der auf ein langzeitiges Amplitudenmittel normierten Amplitudensummen von Band 2 und Band 3 (unteres Diagramm)

Geodätische und gravimetrische Forschungen in der Antarktis

von

M.M. SCHNEIDER

Zusammenfassung

Wissenschaftler der DDR nehmen seit 1959 an sowjetischen Antarktis-Expeditionen teil. Sie überwinterten an den Stationen Mirny, Molodoshnaja und Wostok und setzten die traditionsreichen Arbeiten der deutschen Antarktisforschung, die Ende des 19. Jahrhunderts begannen, erfolgreich fort. - Hauptbestandteil der Forschungsprogramme sind geodätische Aufgabenstellungen. Von mehreren Expeditionsgruppen wurden detaillierte Untersuchungen des Bewegungsmechanismus und des Massenhaushalts küstennaher Gebiete des antarktischen Inlandeises untersucht. Durch astrogeodätische Wiederholungsmessungen wurde erstmalig von DDR-Wissenschaftlern die absolute Verschiebung der Oberfläche der antarktischen Eiskuppel in der zentralen Antarktis quantitativ ermittelt. Durch gravimetrische Anschlußmessungen wurden die Schwerebasispunkte Mirny, Molodoshnaja und Wostok an das Potsdamer System angeschlossen. In Molodoshnaja und Wostok wurden kontinuierlich Registrierungen der belastungs- bzw. erdzeitenbedingten Schwerevariationen durchgeführt.

Summary

Scientists from the GDR have participated in Soviet Antarctic expeditions since 1959. They have wintered at Mirny, Molodoshnaya and Vostok stations successfully continuing the German tradition in Antarctic research, which began at the end of the 19th century. Geodetic problems form an essential part of the research programmes. Detailed investigations of the mechanism of movement and of the mass balance have been made by several expeditionary groups in coastal areas of the Antarctic inland ice. The absolute displacement of its surface has been quantitatively determined for the first time in central Antarctica by scientists from the GDR, using repeated astrogeodetic measurements. The gravity bases Mirny, Molodoshnaya and Vostok have been connected to the Potsdam system. At Molodoshnaya and Vostok load-induced and tidal gravity variations have been continuously recorded.

Резюме

Ученые ГДР принимают участие в советских антарктических экспедициях с 1959-ого года. Они зимовали на станциях Мирный, Молодёжная и Восток, успешно продолжая немецкую традицию антарктических исследований, начатых в конце 19-ого века. Геодезические проблемы являются главной составной частью исследовательских программ. Подробно исследовались несколькими экспедиционными группами механизм движения и массовый баланс областей антарктического ледового покрова, расположенных недалеко от берега моря. Первый раз во внутренней части континентального ледника ученые ГДР определили размер абсолютного сдвига его поверхности при помощи повторных астрогеодезических измерений. Базы Мирный, Молодёжная и Восток были привязаны к Потсдамской системе силы тяжести. На станциях Молодёжная и Восток удалось получить непрерывные регистрации вариаций силы тяжести, обусловленных земными приливами и нагрузкой земной поверхности вследствие морских приливов.

Wissenschaftler aus der DDR tragen als Teilnehmer sowjetischer Antarktisexpeditionen seit 15 Jahren aktiv zur Erforschung des Südpolargebietes bei. Sie setzen im Rahmen der sozialistischen Wissenschaftskooperation das traditionsreiche Werk fort, das von deutschen Forschern aus Anlaß des 1. Internationalen Polarjahres 1882/83 begonnen worden ist. Damals führte die Deutsche Südpolarexpedition unter Leitung von K. SCHRÖDER auf der subantarktischen Insel Süd-Georgien ein Jahr lang stationäre meteorologische und geomagnetische Beobachtungen durch. 1902/03 überwinterte die Deutsche Antarktisexpedition unter der Leitung von E. v. DRYGALSKI an Bord der "Gauß" im Eis der Davis-See, 85 km vom antarktischen Festland entfernt, unweit der heutigen sowjetischen Forschungsstation Mirny. Gleichzeitig wurde eine wissenschaftliche Station auf den Kerguelen unterhalten. Neben erdmagnetischen und meteorologischen Beobachtungen wurden unter anderem geodätische Messungen am Gaußberg und auf der später nach DRYGALSKI benannten nahegelegenen Insel durchgeführt. 1911/12 drang W. FILCHNER in die Weddell-See vor und entdeckte das nach ihm benannte Schelfeis. 1938/39 wurden unter A. RITSCHER große Gebiete des Königin-Maud-Landes aus der Luft erkundet und photogrammetrisch aufgenommen.

Das Nationalkomitee für Geodäsie und Geophysik der DDR rüstete 1959 eine Gruppe von drei Meteorologen aus, die mit der 5. Sowjetischen Antarktisexpedition (SAE) 1959 bis 1961 in Mirny überwinterte. Seitdem waren 30 Wissenschaftler und Techniker aus der DDR Teilnehmer sowjetischer Expeditionen in der Antarktis. In der 19. SAE 1973 - 1975 ist die DDR durch eine siebenköpfige Überwinterungsgruppe vertreten. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag anfangs im Bereich der Station Mirny. Seitdem die nach modernsten Gesichtspunkten angelegte Station Molodoschnaja zum Zentrum der sowjetischen Antarktisforschung geworden ist, konzentriert sich die Tätigkeit der DDR-Wissenschaftler auf deren Umgebung. Ausgewählte geodätisch-astronomische und gravimetrische Probleme sind auch an der innerkontinentalen Station Wostok untersucht worden. Anfang 1974 arbeitete ein Geologe im Rahmen des sowjetischen Programms an der Basis Amery. Abbildung 1 gibt eine Übersicht der bisherigen Einsatzgebiete der Expeditionsgruppen aus der DDR.

Dank der großzügigen Unterstützung durch die UdSSR sind in den vergangenen Jahren hervorragende wissenschaftliche Erfolge erzielt worden. Die bisherigen Aktivitäten liegen in erster Linie auf dem Gebiet der Geodäsie und Gravimetrie. Weitere Beiträge entfallen besonders auf die Disziplinen Meteorologie und Physik der Hochatmosphäre. Die Zielstellung der geodätisch-gravimetrischen Arbeiten ist in enger Abstimmung mit dem Sowjetischen Komitee für Antarktisforschung bei der Akademie der Wissenschaften der UdSSR festgelegt worden. Sie besteht konkret in der Anwendung von methodischen Erfahrungen auf spezifische Probleme der Antarktisforschung sowie im Einsatz und in der Erprobung von Geräten unter den besonderen Umwelt- und Meßbedingungen. Die Aufgaben der DDR-Gruppen befinden sich in völliger Übereinstimmung mit dem langfristigen Programm des Wissenschaftlichen Komitees für die Antarktisforschung (SCAR) des ICSU, zu dessen wesentlichen Punkten auf dem Gebiet der Geodäsie und Gravimetrie die topographische Kartierung des Kontinents und die Durchführung genauer Ortsbestimmungen sowie die Verdichtung des Schwerenetzes und die Registrierung der Erdzeiten an geeigneten Stationen gehören.

In zeitlicher Reihenfolge angeordnet, wurden von Wissenschaftlern der DDR folgende geodätischen und gravimetrischen Programme in der Antarktis bearbeitet:

| | | | |
|---------|---------|---------------------------------|--|
| 7. SAE | 1962 | Mirny | Vermessung einer trigonometrischen Kette auf dem Inlandeis [1] |
| | | Mirny | Untersuchung der trigonometrischen und nivellitischen Refraktion [1] |
| 8. SAE | 1963/64 | Mirny Wostok Molodoshnaja | Astronomische Ortsbestimmungen [10] |
| 10. SAE | 1965 | Mirny | Wiederholungsvermessung der trigonometrischen Kette [5] |
| | | Mirny Molodoshnaja | Schwereanschlußmessungen [2] |
| | 1965 | Molodoshnaja | Lokale gravimetrische Vermessungen [4] Erdzeitenregistrierungen [4] |
| 14. SAE | 1969/70 | Wostok | Schwereanschlußmessung [8] Erdzeitenregistrierungen [6, 7] |
| 17. SAE | 1972 | Mirny Wostok | Wiederholung der astronomischen Ortsbestimmung [3, 9] |
| | 1972/73 | Molodoshnaja | Geodätisch-glaziologische Traverse auf dem Hays-Gletscher [11] |
| 19. SAE | 1974 | Molodoshnaja | Geodätisch-meteorologische Komplexuntersuchungen der terrestrischen Refraktion |

In den Jahren 1957 - 1961 wurde durch sowjetische Geodäten von Mirny ausgehend mehrmals eine 50 km lange trigonometrische Kette vermessen, um das Verhalten des küstennahen Teils des Inlandeises im Queen-Mary-Land zu verfolgen. Während der 7. SAE (1962) wurde diese Kette von Geodäten aus der DDR neu signalisiert und bis auf eine Küstentfernung von 100 km erweitert [1]. Die Punkte wurden auf zwei Schlittenzügen im Abstand von 7 Monaten lage- und höhenmäßig beobachtet. Bis km 50 ergaben sich für das Jahr 1962 um 20 - 30 % geringere Werte der mittleren horizontalen Bewegungsgeschwindigkeit als für den Zeitraum 1957 bis 1962. Zur Klärung dieser Diskrepanz erfolgte während der 10. SAE 1965 eine Wiederholungsmessung durch eine weitere Expeditionsgruppe aus der DDR [5]; sie bestätigte im wesentlichen die Ergebnisse aus dem Jahre 1962. Die Abflußrichtung des Eises ist im allgemeinen orthogonal zu den Höhenlinien. Kurz vor der Küste wird die Bewegung durch kupiertes Gelände gehemmt. Die Fließgeschwindigkeit schwankt, wahrscheinlich durch das Untergrundrelief bedingt, zwischen 19 und 45 m/Jahr und nimmt im Einzugsgebiet des Helen-Gletschers sprunghaft auf einen Maximalwert von 130 m/Jahr zu. Landeinwärts nimmt die mittlere jährliche Horizontalbewegung allmählich ab und beträgt in 100 km Küstenabstand 20 m. Die vertikale Bewegung steht in enger Korrelation zur horizontalen, hervorgerufen durch die lokale Neigung der Eisoberfläche. Diese sinkt jährlich bis zu 6 m ab, im Südtail der Kette im Mittel auf 1,2 m. Jedoch bestehen hierfür örtliche Diskrepanzen um den Faktor 5 zwischen den Messungen 1962 und 1965. Dies erhellt die Bedeutung spezieller Untersuchungen der terrestrischen Refraktion unter antarktischen Bedingungen, um den Einfluß auf die Lage- und Höhenmessungen zuverlässig eliminieren zu können. Bei der Reduktion der Beobachtungen auf einen festen Zeitpunkt, der eine durchschnitliche konstante Eisbewegung zugrunde gelegt war, haben sich Hinweise ergeben, daß die Fließgeschwindigkeit des Eises jahreszeitlich schwankt. Eine systematische experimentelle Untersuchung dieser Frage über einen repräsentativen Zeitraum hinweg ist wegen des damit verbundenen Aufwandes bisher nicht erfolgt.

Nachdem während der 10. SAE 1965 Veränderungen eines lokalen Punktfeldes bei Molodoshnaja untersucht worden waren [4], wurden die geodätisch-glaziologischen Forschungen von DDR-Wissenschaftlern während der 17. SAE 1972/73 im Rahmen eines wesentlich erweiterten Programms fortgesetzt [11]. Am Hays-Gletscher, 20 km östlich der Station Molodoshnaja, wurden die Oberflächen- und Untergrundtopographie, die Dynamik und der Massenhaushalt komplex untersucht. Der Eisstrom gehört zu den typischen Ausflußgletschern, die bisher im Vergleich zum Inland- und Schelfeis der Antarktis auf Grund ihrer schwereren Zugänglichkeit noch wenig erforscht sind.

Von der Expeditionsgruppe wurde in der Nähe der Gletscherfront die zeitweilig besetzte Basis Abendberg errichtet (Abb. 2). Die Koordinaten sind $67^{\circ}39,5' S$, $46^{\circ}09,2' E$, die Höhe über dem Meeresspiegel ist 45 m. Als Grundlage für die kartographischen Aufnahmen und glaziologischen Untersuchungen wurde eine Traverse an der westlichen Seite des Gletschers angelegt. Sie überquert das 30 km breite Einzugsbecken im Küstenabstand von 50 km und endet auf dem Nunatak 1422 m. Die Gesamtlänge beträgt 120 km. Die Traverse ist an das sowjetische Netz, das von Molodoshnaja aus entlang der Küste angelegt wurde, angeschlossen. Für die Messung der Polygonseiten wurde erstmalig in der Antarktis das elektrooptische Entfernungsmeßgerät EOK 2000 des VEB Carl Zeiss Jena eingesetzt (Abb. 3). Trotz der außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen und des rauhen Transports hat sich das EOK 2000 ausgezeichnet bewährt. Es wurden Reichweiten bis 5,6 km mit einem mittleren Fehler von $\pm 0,8$ m für eine Messung in drei Sätzen erzielt. Das Oberflächenprofil der Traverse wurde durch trigonometrische und barometrische Nivellements bestimmt. Die terrestrische Photogrammetrie kam zur Präzisierung der vorhandenen topographischen Karten des Hays-Gletschers und als Hauptverfahren zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens seiner Oberfläche in größerem Umfang zum Einsatz. Auch während des Winters konnten die photogrammetrischen Arbeiten bei günstiger Sicht weitergeführt werden.

Zusätzlich zum Expeditionsprogramm wurde die bisher unbenannte Berggruppe mit dem Nunatak 1422 m am Ende der Traverse mit Hilfe eines trigonometrischen Netzes und terrestrisch-photogrammetrischer Modelle aufgenommen. Ergänzende trigonometrische Geschwindigkeitsmessungen und photogrammetrische Aufnahmen wurden am Campbell-Gletscher westlich Molodoshnaja gemacht.

Die Arbeiten wurden von der Expeditionsleitung der 17. SAE außerordentlich großzügig unterstützt. Durch die Bereitstellung von Hubschraubern und Flugzeugen wurden bereits die Erkundung des Meßgebietes sowie die Festlegung der Trassenführung und der Anlage der photogrammetrischen Standlinien beschleunigt. Für die Herstellung genauer topographischer Karten wurden zusätzlich Luftbildaufnahmen ermöglicht und vorhandenes Material zur Verfügung gestellt. Auf speziellen Meßflügen wurden auf 320 km Profillänge Radar-Eisdiokenbestimmungen durchgeführt und auf der unzugänglichen Zunge des Hays-Gletschers in Frontnähe Schweremessungen vorgenommen. Die vielseitigen Beobachtungsdaten werden im Hinblick auf glaziologische Aussagen komplex bearbeitet.

Die vorläufigen Hauptergebnisse der Untersuchung sind folgende: Der Hays-Gletscher gehört mit 1400 m Jahresverschiebung an der Front zu den schnellsten Gletschern Antarktiskas. Typische Merkmale eines Ausflußgletschers - saokförmiges Dränagesystem, tektonisch vorgebildeter Abflußgraben, Gleitbewegung am Untergrund und Beginn der Sohelfeilsbildung - werden an ihm bestätigt. Die Eismächtigkeit im Einzugsgebiet erreicht über 1000 m. Die Sohle liegt 200 - 300 m unter dem Meeresspiegel. Das Einzugsgebiet des untersuchten Gletschers reicht wesentlich weiter ins Innere des Kontinents, als bisher allgemein angenommen wurde.

Nach den vorliegenden Kenntnissen ist der Hays-Gletscher der am besten zugängliche Eisstrom in der Nähe der Station Molodoshnaja, der eine modellartige Bearbeitung ermöglicht. Die durchgeführten geodätisch-glaziologischen Untersuchungen sind ein aktueller Beitrag zum Internationalen Antarktischen Glaziologischen Projekt, das als gemeinsames Unternehmen von der UdSSR, Australien, Frankreich und den USA langfristig bearbeitet wird [12].

Der Frage der trigonometrischen und nivellitischen Refraktion ist bei allen geodätischen Messungen auf dem Inlandeis große Beachtung zu schenken. Die bei den Höhenmessungen auftretenden Refraktionsstörungen sind besonders problematisch, weil die Wärmeaustauschbedingungen und damit die Luftschichtung an der Grenzfläche Luft - Eis völlig von den bekannten normalen Verhältnissen über dem Festland abweichen. Untersuchungen der terrestrischen Refraktion sind bereits während der 7. SAE durchgeführt worden [1]. Während der 17. SAE wurden sie auf die elektrooptischen Streckenmessungen erweitert, um Angaben über den Fehler dieses Verfahrens zu erhalten [11].

Ein Mangel aller bisher aus der Antarktis bekannten Untersuchungen der Größe und des zeitlichen Verhaltens der Refraktionskoeffizienten liegt darin, daß systematische Beobachtungen nie über längere Zeit durchgeführt, sondern als Nebenaufgabe in Zeiten durchgeführt worden sind, in denen andere Meßarbeiten ruhten. Die notwendige repräsentative Erfassung der Lufttemperatur bereitet zudem auf Grund der starken Strahlungseffekte über der Eisoberfläche meßtechnische Schwierigkeiten. Eine Verallgemeinerung der vorliegenden Ergebnisse ist nur unter Einschränkungen möglich. Da die genaue Kenntnis der Refraktion aber für die Festlegung geeigneter Verfahren zur Durchführung präziser Nivellements und Lagebestimmungen auf dem Inlandeis prinzipiell erforderlich ist, wird von der DDR-Gruppe der 19. SAE 1974/75 bei Molodoshnaja ein komplexes Programm zur Untersuchung der terrestrischen Refraktion und der thermischen Struktur in der bodennahen Luftschicht bearbeitet, das bestehende Kenntnislücken schließen wird. Mit Hilfe gegenseitiger Höhenwinkel- und elektrooptischer Entfernungsmessungen in mehreren Niveaus und streng gleichzeitig durchgeführter Temperatur- und Temperaturgradientmessungen werden die täglichen und jahreszeitlichen Gänge der Refraktionskoeffizienten auf repräsentativen Meßstrecken untersucht.

Genauere Lagebestimmungen sind die Voraussetzung für die kartographische Aufnahme unerschlossener Gebiete und die Grundlage für die Arbeiten einer ganzen Reihe wissenschaftlicher Disziplinen auf dem antarktischen Kontinent. Sie dienen gleichermaßen der Orientierung trigonometrischer Netze und innerkontinentaler Profile. Für die Fest-

stellung absoluter Eisbewegungen im Inneren Antarktikas sind wiederholte astrogeodätische Ortsbestimmungen die einzige zur Verfügung stehende Methode.

Während der 8. SAE wurden 1963 von Geodäten aus der DDR eine Reihe Astropunkte II. und III. Ordnung in Molodoshnaja und im Arbeitsgebiet der sowjetischen Geologengruppe in den Scott- und Tjula-Bergen des Enderby-Landes bestimmt [10]. Außerordentliche Bedeutung haben die astrogeodätischen Ortsbestimmungen höchster Präzision an der Inlandstation Wostok und in Mirny, die von den gleichen Beobachtern 1972 während der 17. SAE wiederholt worden sind [3, 9]. Die Wahl einer geeigneten Technologie ermöglichte es in Wostok trotz extremer meßtechnischer und klimatischer Bedingungen (Temperatur zwischen -25°C und -55°C , 3488 m Höhe), Sternbeobachtungen am Tageshimmel mit so hoher Genauigkeit durchzuführen, daß die Koordinaten auf $\pm 0,11$ bzw. $\pm 0,045$ abgeleitet werden konnten (Abb. 4). Für den Astropunkt Mirny, der auf anstehendem Gestein vermarkiert ist, wurde eine noch größere Genauigkeit erzielt.

Aus dem Koordinatenvergleich der Wiederholungsmessung in Wostok ergibt sich für die zentrale Ostantarktis eine mittlere jährliche Bewegung der Oberfläche des Inlandeises von $3,7 \text{ m} \pm 0,7 \text{ m}$ in Richtung $S 38^{\circ} E \pm 10^{\circ}$. Das Ergebnis deckt sich mit Voraussetzungen anhand theoretischer Modelle der Dynamik der antarktischen Eiskuppel.

Untersuchungen dieser Art im Inneren der Antarktis sind bisher einmalig. Das Internationale Antarktische Glaziologische Projekt fordert die Anlage weiterer Astropunkte erster Ordnung an den Enden langer innerkontinentaler Profile und in isolierten Testgebieten, da nur die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen an ausgewählten Punkten des Inlandeises die Präzisierung der bestehenden Modellvorstellungen über Bewegungsverhalten und Massenbilanz der größten Eismasse der Erde gestatten. Die erfolgreichen Arbeiten der DDR-Wissenschaftler sind der erste entscheidende Beitrag zur Verwirklichung des Projektes.

Eine weitere geophysikalisch-geodätische Aufgabe bei der Erforschung der Antarktis ist die Bestimmung des Schwerfeldes durch gravimetrische Vermessungen. Im Verlaufe der ersten sowjetischen Antarktisexpeditionen wurde auf dem antarktischen Kontinent ein Basisnetz angelegt, an das die lokalen Messungen in verschiedenen Küstengebieten und auf den innerkontinentalen Profilen bis zum geographischen Südpol und zum Pol der relativen Unzugänglichkeit angeschlossen sind. Die großen Entfernungen zu Basispunkten auf der südlichen Halbkugel und die ungünstigen Meßbedingungen in der Antarktis bewirken eine relativ große Unsicherheit der übertragenen Schwerewerte. Für den Fundamentalpunkt Mirny wurde im Washingtoner System ein geschätzter Fehler von $\pm 2,0 \text{ mGal}$ angenommen.

Durch relative Pendelmessungen war es während der 10. SAE 1965 möglich, die Schwerpunkte Mirny und Molodoshnaja direkt an das Potsdamer System anzuschließen und die Genauigkeit des Schwereniveaus auf $\pm 0,3 \text{ mGal}$ zu erhöhen [2]. Die Schweredifferenz Mirny - Molodoshnaja wurde außerdem durch Messungen mit Gravimetern kontrolliert. Während der 14. SAE 1969/70 wurde der Schwerewert am Astropunkt Wostok, bezogen auf Mirny, von einem DDR-Wissenschaftler mit einem Gravimeter neu bestimmt [8]. Die Aktualität dieser Unternehmungen wird aus einem Beschluß der XV. Generalversammlung der

Internationalen Assoziation für Geodäsie 1971 in Moskau ersichtlich, in dem der Anschluß aller größeren antarktischen Basisstationen an das Weltsehwerenetz und die Errichtung eines Basisnetzes im Inneren der Antarktis empfohlen wurden. - Während der 10. SAE wurden im Gebiet der Station Molodoshnaja zwei Profile gravimetrisch vermessen, um Eisdiken abzuleiten [4].

Seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr ist die Beobachtung der gezeitenbedingten Änderungen des Schwerefeldes der Erde in verschiedenen Teilen der Welt systematisch ausgebaut worden. Der Anlage und Verdichtung eines Beobachtungsnetzes in der Antarktis steht die geringe Auswahl geeigneter Orte im Wege. Wissenschaftler aus der DDR haben erstmalig 1965 an der Station Molodoshnaja Messungen der gezeitenbedingten Schwerevariation und Lotrichtungsänderungen durchgeführt [4]. Insbesondere wurde deren Zusammenhang mit meteorologischen Parametern und den Pegelschwankungen des in unmittelbarer Nähe gelegenen Meeres untersucht.

Die Erdgezeitenmessungen wurden 1969 während der 14. SAE in Wostok mit dem Ziel neu aufgenommen, über die täglichen Partialtiden der Schweregezeiten im Inneren des Kontinents quantitative Aussagen zu erlangen, die möglichst frei von den indirekten ozeanischen Effekten sind [6, 7]. Dabei waren besondere meßtechnische Schwierigkeiten zu überwinden: die tiefe Umgebungstemperatur (mittlere Firntemperatur $-57,5^{\circ}\text{C}$), das Fehlen eines unveränderlich festen Aufstellungsortes der Meßinstrumente auf dem Firn des Inlandeises und die außergewöhnlich starken elektrostatischen Störpotentiale. Der gemessene mittlere Gravimeterfaktor 1,20 entspricht dem Wert an bekannten Erdgezeitenstationen der Nordhalbkugel. Ferner wurden im Inneren Antarktikas erstmals die gezeitenbedingten Lotschwankungen registriert.

Die Wissenschaftler aus der DDR haben als Teilnehmer an den sowjetischen Expeditionen auf dem Gebiet der Geodäsie und Gravimetrie seit mehr als einem Jahrzehnt anerkannte Leistungen bei der Erforschung der Antarktis erzielt. Sie haben im Rahmen der sozialistischen Kooperation mit der UdSSR mit großem persönlichem Einsatz dazu beigetragen, daß die DDR-Wissenschaft ein geachteter Partner in der internationalen Antarktischforschung geworden ist.

Literatur

- [1] DITTRICH, G.; SCHWARZ, G. Die geodätischen Arbeiten der deutschen Gruppe während der 7. Sowjetischen Antarktis-Expedition 1962. Geodät. u. geophys. Veröff. R. III (1966) 5, 112 S.
- [2] ELSTNER, C.; WIRTH, H. Relative Schweremessungen zwischen Potsdam und Antarktika. Geodät. u. geophys. Veröff. R. III (1968) 7, S. 3-29
- [3] LIEBERT, J. Astronomische Ortsbestimmungen in den Antarktisstationen Wostok und Mirny. Vermessungstechnik 21 (1973) 10, S. 381-382

- [4] LINDNER, K.;
WIRTH, H. Bericht der DDR-Teilnehmergruppe an der 10. Sowjetischen Antarktisch-Expedition Überwinterung 1965.
Geodät. u. geophys. Veröff. R. III (1968) 7,
S. 31-66
- [5] SCHMIDT, T.;
MELLINGER, G. Bestimmungen von Eisbewegungen am Rand des antarktischen Inlandeises.
Geodät. u. geophys. Veröff. R. III (1966) 4, 32 S.
- [6] SCHNEIDER, M.M. Bericht über die Überwinterung an der Station Wostok während der 14. Sowjetischen Antarktisch-Expedition 1968 - 1970.
Geodät. u. geophys. Veröff. R. III (1971) 23
- [7] SCHNEIDER, M.M. Erste Beobachtungen der Schwerezeiten in der zentralen Antarktis.
Gerlands Beitr. Geophysik 80 (1971) 6, S. 491-496
- [8] SCHNEIDER, M.M. Schwereanschlußmessung Mirny - Wostok (Antarktika).
Gerlands Beitr. Geophysik 81 (1972) 1/2, S. 76-78
- [9] ... Bericht der DDR-Arbeitsgruppe Wostok über die Teilnahme an der 17. Sowjetischen Antarktisch-Expedition (Saison 1971/72).
Potsdam 1972, 78 S. (unveröff.)
- [10] ... Bericht der DDR-Teilnehmergruppe an der 8. Sowjetischen Antarktisch-Expedition 1962 - 64.
Potsdam 1964, 125 S. (unveröff.)
- [11] ... Bericht der DDR-Teilnehmergruppe an der 17. Sowjetischen Antarktisch-Expedition 1971 - 1973 - Gruppe Molodoshnaja.
Potsdam 1973, 65 S., Anlagen (unveröff.)
- [12] ... International Antarotio Glaciological Project.
Internat. Council sci. Unions, SCAR-Bull.
Cambridge (1971) 38, S. 807-811

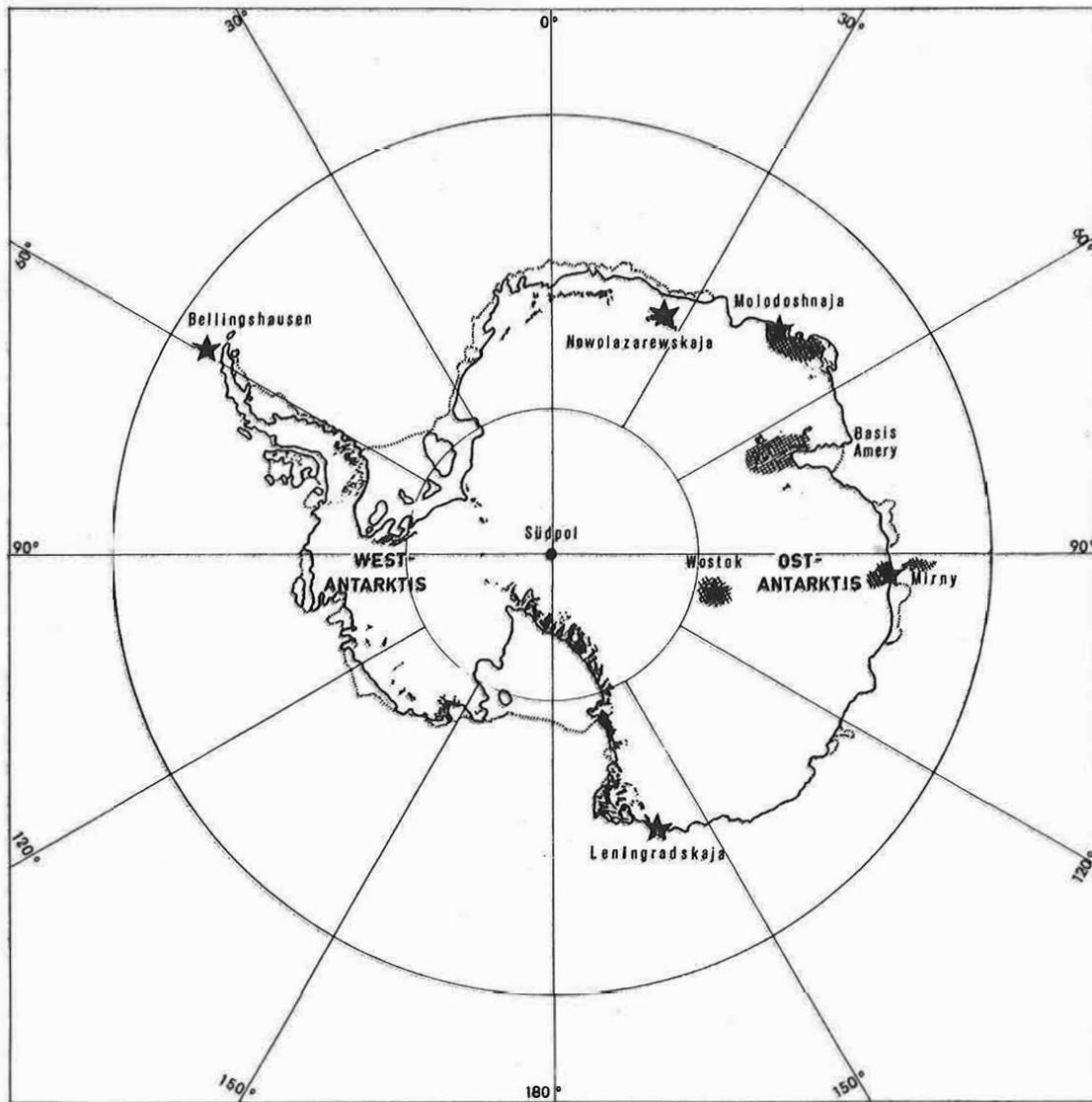


Abb. 1. Übersicht über die bisherigen Einsatzgebiete von DDR-Wissenschaftlern in der Antarktis (schraffiert)



Abb. 2. Basislager der DDR-Teilnehmergruppe der 17. SAE am Abendberg-
Massiv vor der Front des Hays-Gletschers (Foto: Dr.-Ing. K. DRESSLER)



Abb. 3. Elektrooptisches Entfernungsmeßgerät EOK 2000 des VEB Carl Zeiss Jena im Einsatz während der 17. SAE (Foto: Dr.-Ing. K. DRESSLER)

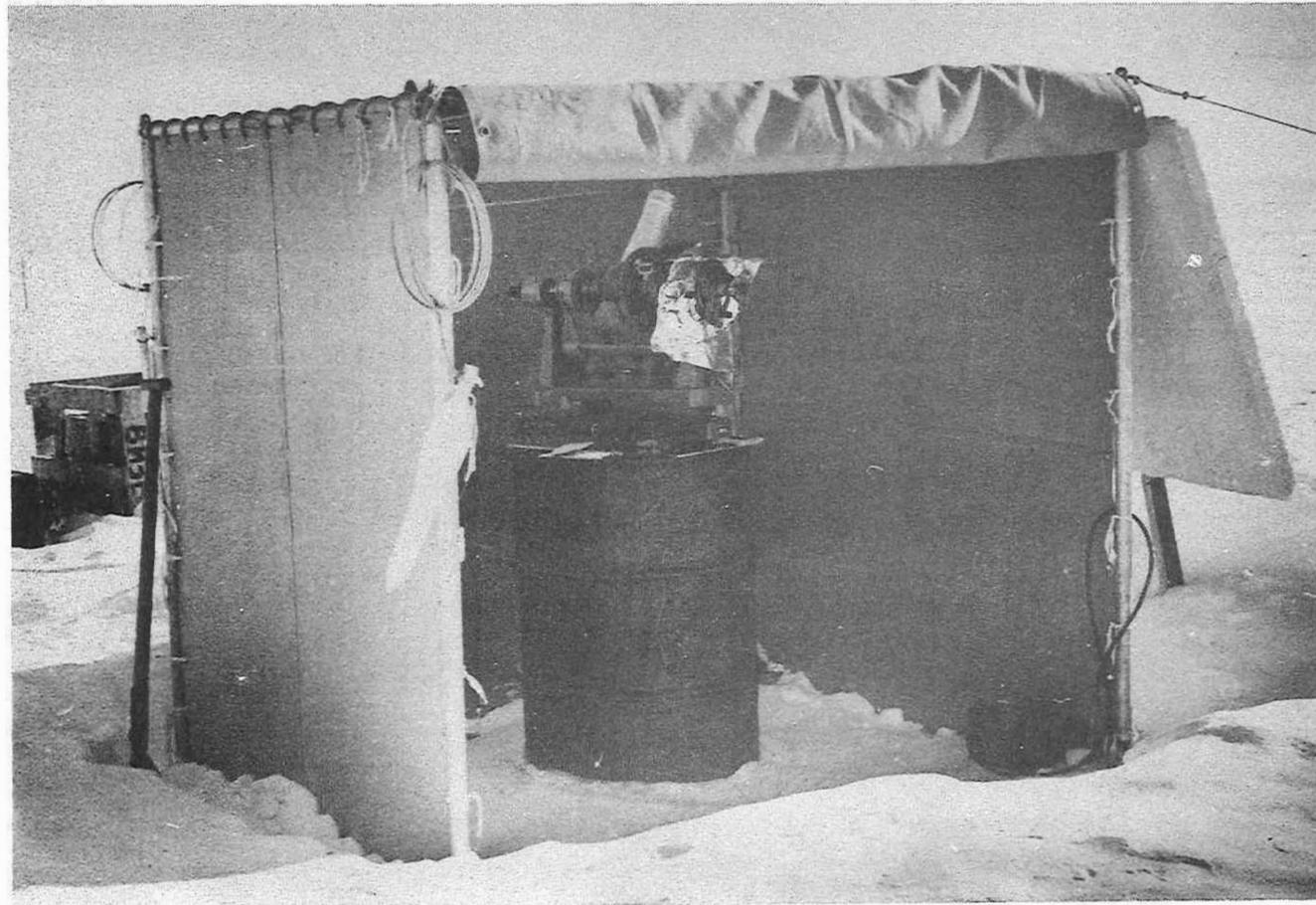
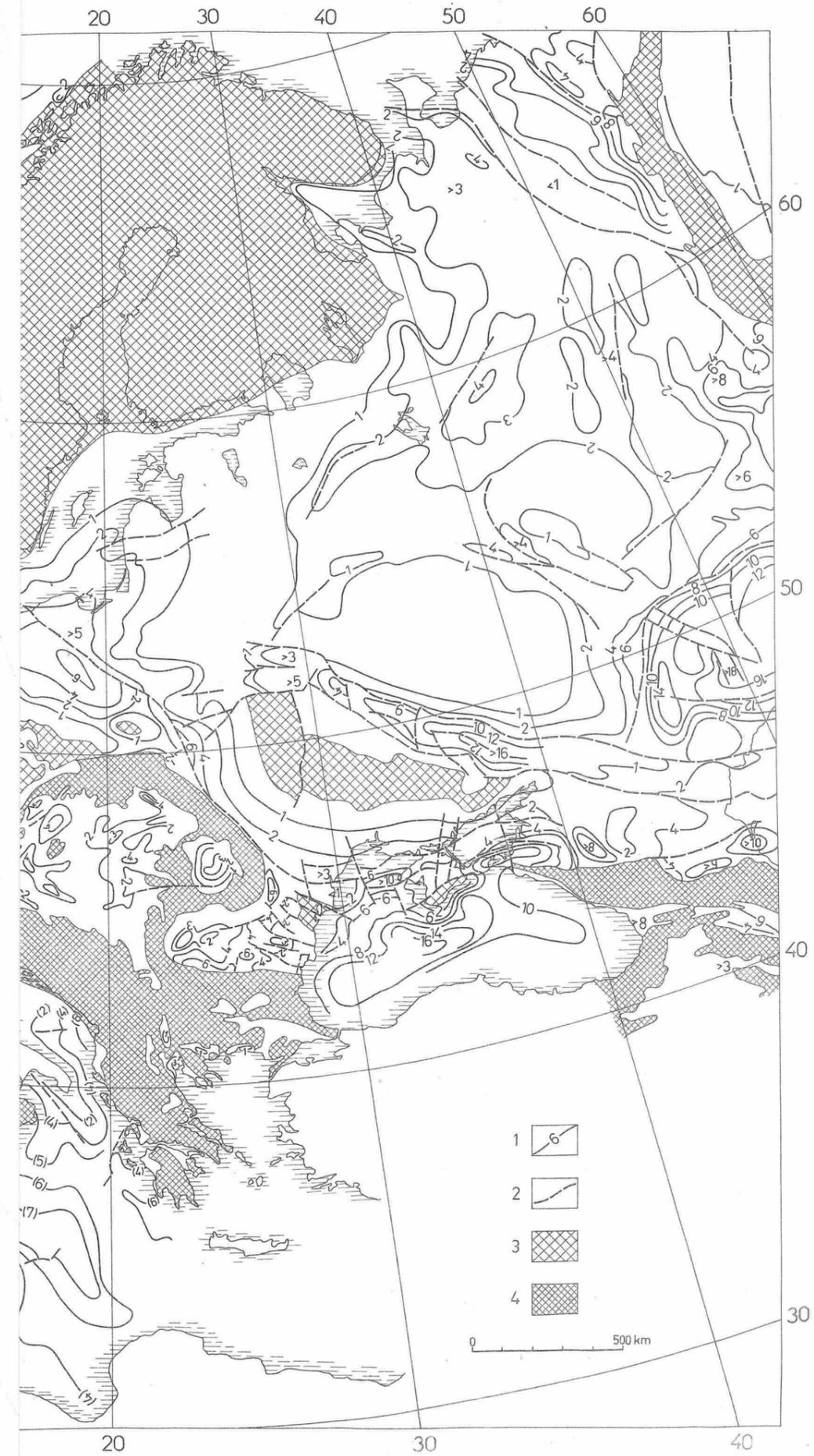
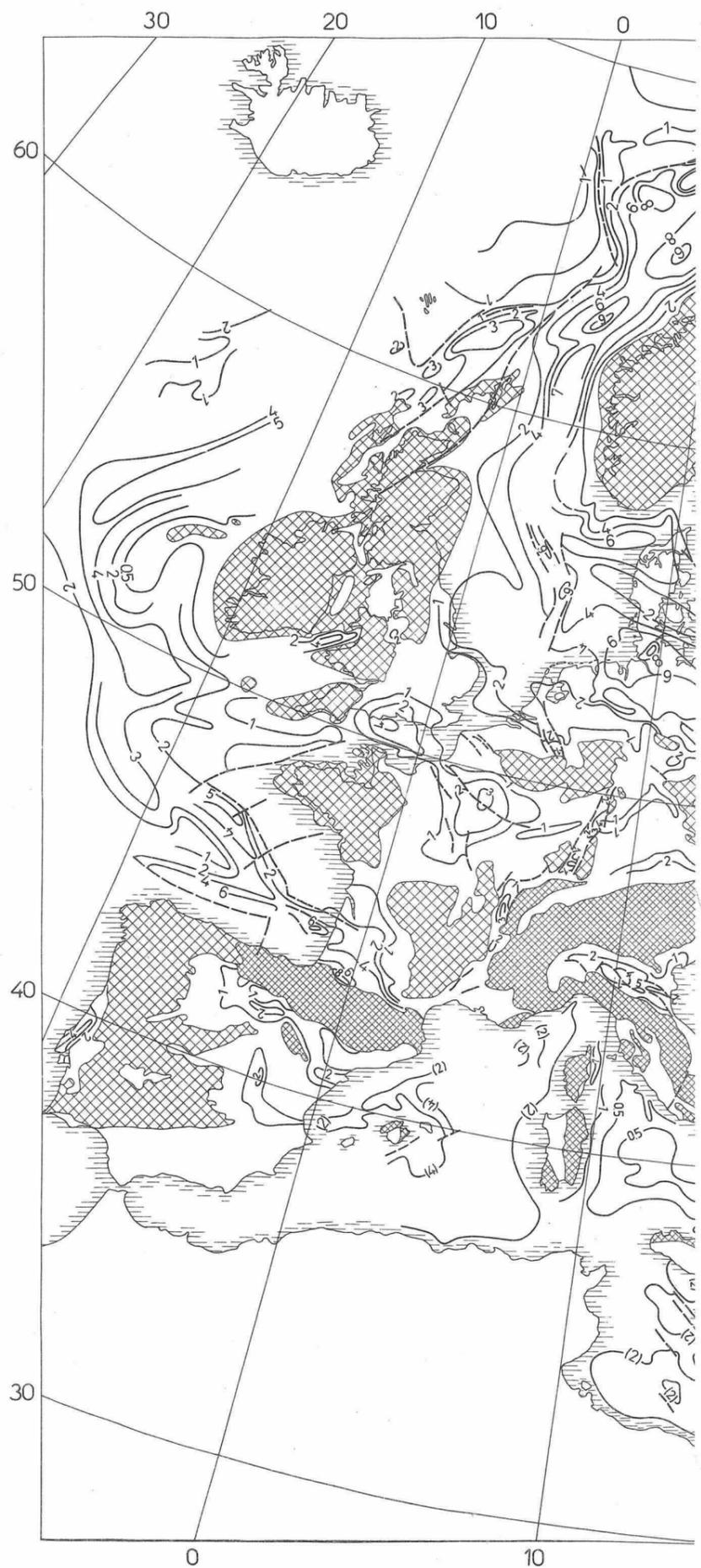


Abb. 4. Passageinstrument Askania AP 70 im Einsatz für die astrogeodätische Ortsbestimmung höchster Präzision in Wostok während der 17. SAE (Foto: Dr.-Ing. J. LIEBERT)

Geologische Karte:

Abb. 1. Schematische Karte der Mächtigkeiten/Unterkante des ungefalteten Deckgebirges in Europa

1 - Isolinien der Mächtigkeiten bzw. Unterkante des Deckgebirges (Angaben in km, Klammerwerte: doppelte seismische Laufzeiten in $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$); 2 - Störungen; 3 - alpidisch konsolidiertes Grundgebirge; 4 - alpidisches Faltungsgebiet



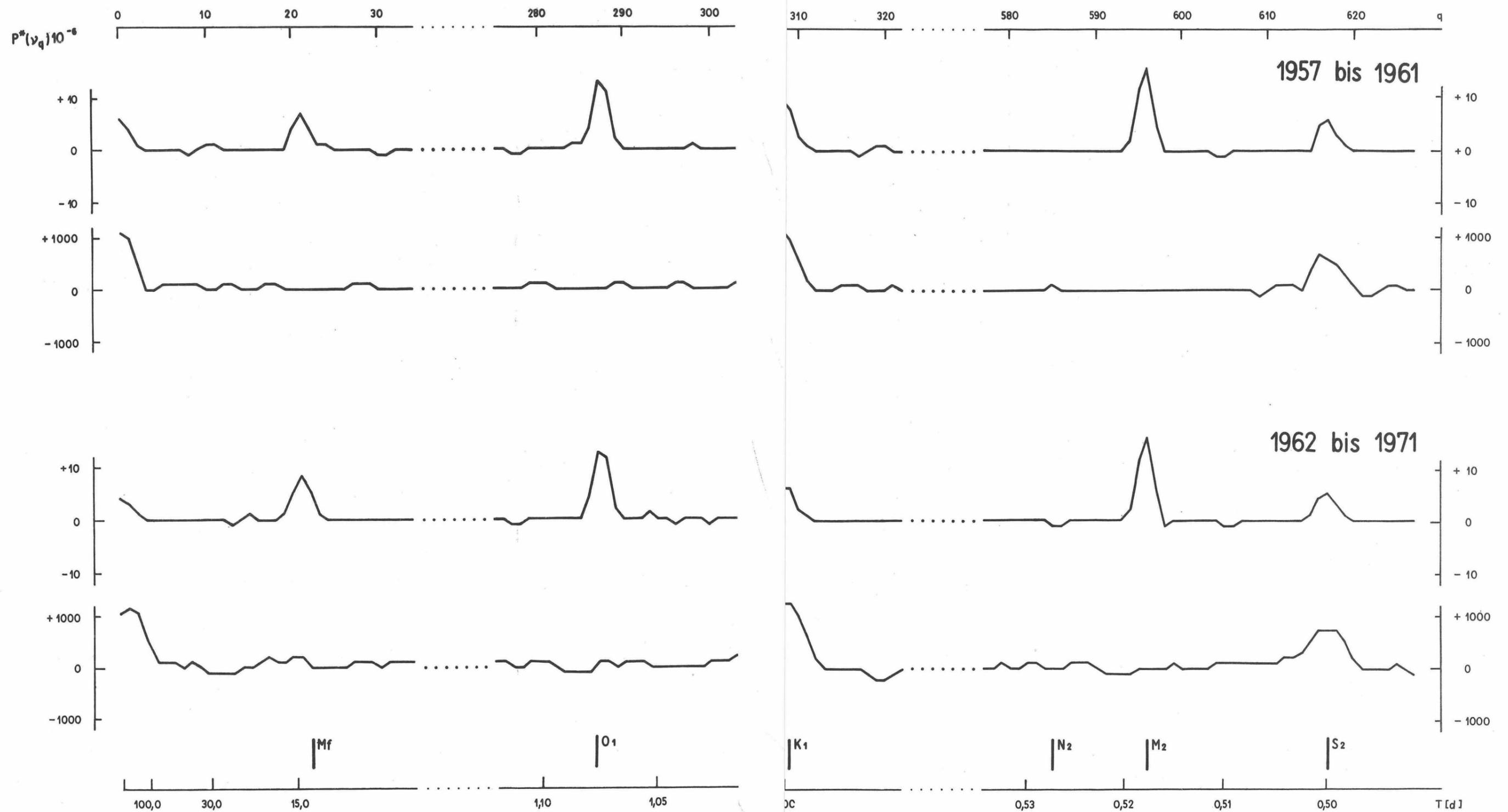


Abb. 6. Energiespektren der theoretischen und praktischen Zeitfolgen der Gezeiten bzw. der Breite für Potsdam

