

**Zerstörungsfreie hochauflösende  
Dichteuntersuchungen mariner Sedimente**

**Non-destructive high resolution density  
measurements on marine sediments**

---

**Sebastian Gerland**

**Ber. Polarforsch. 123 (1993)  
ISSN 0176 - 5027**

### Physikalische Größen, Einheiten und Symbole:

A	Atomgewicht
a	Konstante in der Gleichung von Archie
Aktivität	in: Ci und GBq
$\alpha$ (° bzw. rad)	Drehwinkel
d (cm bzw. mm)	Kerndurchmesser
$d_{\text{korrr}}$ (cm bzw. mm)	korrigierter Kerndurchmesser
Energie	in: keV, MeV
$\Phi$	Porosität
$\gamma$	Gamma
I, I <sub>0</sub> , I <sub>0,g</sub> (V)	Spannung proportional zur Strahlungsintensität, mit und ohne Absorption sowie Signal bei geschlossenem Quellenbehälter
m (g bzw. kg)	Masse, Gewicht
m	Konstante in der Gleichung von Archie
$\mu$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\gamma$ -Massenabsorptionskoeffizient
$\mu_{\text{Wasser}}$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\gamma$ -Massenabsorptionskoeffizient für Wasser
$\mu_{\text{Gestein}}$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\gamma$ -Massenabsorptionskoeffizient für Gestein
$\mu_x$ (cm <sup>2</sup> /g)	Röntgen-Massenabsorptionskoeffizient für ein durchstrahltes Medium
$\mu_{xw}$ (cm <sup>2</sup> /g)	Röntgen-Massenabsorptionskoeffizient für Wasser
N (HU)	Grauwert im Tomogramm
Q (g/cm <sup>3</sup> )	Feuchtraumdichte (gr.: Korn, Mittel: mittlere)
Q <sub>sed</sub> (Ωm)	spezifischer elektrischer Sedimentwiderstand (Kap. 4.4.1)
Q <sub>w</sub> (Ωm)	spezifischer elektrischer Porenwasserwiderstand (4.4.1)
Strahlung	in: Sv, mSv, μSv
V (cm <sup>3</sup> )	Volumen (p: Poren, ges.: gesamt, Innenliner)
v <sub>p</sub> (m/s)	Kompressionswellengeschwindigkeit
w (m)	Weg
Z	Ordnungszahl, Kernladungszahl
z (m)	Kerntiefe

---

Sebastian Gerland

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung  
Postfach 120161  
D-2850 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer Dissertation, die 1992 dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen vorgelegt wurde.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	Seite	3
<b>Abstract</b>		5
<b>1 Einleitung, Ziele</b>		7
<b>2 Methoden, Theorie und Geräte</b>		9
2.1 Physikalische Grundlagen		9
2.1.1 Strahlungsarten		9
2.1.2 Wechselwirkungseffekte		10
2.1.3 Der Zusammenhang zwischen Absorption und Dichte		12
2.1.4 Strahlungsquellen		14
2.1.5 Messung der Strahlung		14
2.2 Das Dichtemeßsystem (DMS)		15
2.2.1 Grundbestandteile		15
2.2.2 Weitere Komponenten		21
2.3 Röntgentomographie		23
2.3.1 Das Meßprinzip		24
2.3.2 Computertomograph Somatom DR		24
2.4 Konventionelle Dichtemessungen an marinen Sedimenten		26
<b>3 Durchführung von Dichtemessungen</b>		28
3.1 Meßsteuerung, Datenerfassung und Meßablauf		28
3.1.1 Meßsteuerung und Meßdatenerfassung		28
3.1.2 Ablauf der Messung		30
3.2 Statistische Eigenschaften des Dichtemeßsystems und Fehlerbetrachtung		33
3.2.1 Zeitliche Statistik der Absorptionsmessung		33
3.2.2 Stufenkernmessungen		36
3.2.3 Glasplattenmessungen		36
3.2.4 Experimente zum Abbildungsverhalten des Dichtemeßsystems		42
3.2.5 Fehlerbetrachtung		46
3.3 Meßarten und ergänzende Auswertmöglichkeiten		50
3.3.1 Messungen ohne Kernrotation		50
3.3.2 Messungen mit Kernrotation		50

3.3.3 Dichtemessungen an Halbkernen	52
3.3.4 Berechnung von räumlicher Standardabweichung und 90°-Differenzenquotienten	54
3.4 Vergleich der Dichtemessungen mit Daten aus konventionellen Messungen an Einzelproben	57
3.5 Darstellung der Ergebnisse	64
3.6 Diskussion der Ergebnisse	80
<b>4 Weiterführende Arbeiten</b>	89
4.1 Berechnung der Porosität und Datenbearbeitung	89
4.2 Vergleich der Dichtedaten mit Tomogrammen	93
4.3 Vergleich der Dichtedaten mit Sedimentechogrammen (Parasound)	102
4.4 Vergleich der Dichtedaten mit weiteren physikalischen Eigenschaften	105
4.4.1 Spezifischer elektrischer Widerstand	105
4.4.2 Magnetische Suszeptibilität	109
4.4.3 Ultraschallwellengeschwindigkeit	111
4.5 Integrative Diskussion	114
<b>5 Schlußfolgerungen und Ausblick</b>	117
<b>6 Literatur</b>	119
<b>Anhang</b>	126
A: Kerndaten und Probennahmegeräte	126
B: Anmerkungen zum Strahlenschutz	129
<b>Danksagung</b>	130

## Zusammenfassung

Die Dichte ist einer der Schlüsselparameter unter den physikalischen und geologischen Eigenschaften mariner Sedimente. Sie steht mit der Sedimentationsgeschichte und einer Reihe von Sedimenteigenschaften in direktem Zusammenhang. Die Kenntnis der feinskaligen Dichte-Tiefenstruktur in marinen Sedimenten ist die Voraussetzung für viele Modellrechnungen sowie für sedimentologische und klimarelevante Arbeiten.

Um die Dichte an Sedimentkernen hochauflösend und zerstörungsfrei bestimmen zu können, wurde am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven ein Dichtemeßsystem entworfen und aufgebaut. Das Meßprinzip beruht auf der Messung der Absorption von Gammastrahlen, ein Verfahren, das bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich in der Materialforschung und auch in den Geowissenschaften eingesetzt wird. Als radioaktives Präparat dient im Rahmen dieser Arbeit  $\text{Cs}^{137}$ , die Strahlintensität wird mit einem Detektorsystem, bestehend aus einem Szintillator und einem Photomultiplier, gemessen. Die Kerne können sowohl in Abhängigkeit von der Kerntiefe, als auch innerhalb einer Tiefe unter wählbaren Winkeln durchstrahlt werden. Die Kernrotation ermöglicht eine Untersuchung der Kerne auf Inhomogenitäten. Diese Option ist insbesondere zur Detektion eistransportierten Materials (IRD) geeignet. Das Dichtemeßsystem arbeitet rechnergesteuert. Neben der Absorptionsmessung wird der Kerndurchmesser an jedem Meßpunkt potentiometrisch bestimmt. Die Meßwerte werden auf einem Personal Computer abgespeichert.

Vor den Messungen an Sedimentkernen im Routinebetrieb wurden verschiedene Experimente zum statistischen Verhalten des Gammastrahlsignals sowie zum Auflösungsvermögen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Versuche sollten u.a. die optimalen Einstellparameter der Gerätekomponenten gefunden werden. Durch den mit 4mm Durchmesser sehr schmalen Gammastrahl kann eine hohe räumliche Auflösung im mm-Bereich erreicht werden. Bei einer Meßdauer von 5 Sekunden pro Meßpunkt kann die Sedimentdichte absolut auf  $\pm 0.5\%$  genau bestimmt werden. Ein Vergleich zwischen mit dem neuen System gemessenen Sedimentdichten und Daten, die über konventionelle Methoden an Sedimentproben nach der Öffnung zweier Sedimentkerne bestimmt wurden, zeigt eine bis auf wenige Ausnahmen sehr gute Übereinstimmung der Datensätze mit Maximalabweichungen von ca.  $\pm 5\%$ .

Im Rahmen dieser Arbeit wurden an zehn Sedimentkernen Dichteuntersuchungen durchgeführt. Bereits in den Profildaten ohne Kernrotation sind viele verschiedene Sedimentcharakteristiken erkennbar. Neben oft deutlichen Unterschieden in der Absolutdichte können dank des hohen räumlichen Auflösungsvermögens des Dichtemeßsystems auch Unterschiede in der Variabilität bzw. der "Frequenz" des Dichte-Tiefenverlaufs gut erkannt werden. Einige Beispiele von Messungen mit Kernrotation mit kleinen ( $9^\circ$ ) und großen Winkelinkrementen ( $90^\circ$ ) zeigen, daß abrupte und sanft ansteigende Horizontwechsel sowie im Sediment eingebettetes eistransportiertes Material unterschiedlicher Größe, einzeln und auch an Horizonte gebunden, klar erkannt bzw. unterschieden werden können.

Nach der Vorstellung der Ergebnisse aus den Dichtemessungen wird ein Vergleich mit Daten aus anderen Untersuchungen angestellt. Messungen des spezifischen elektrischen Widerstandes an Sedimenten korrelieren sehr gut mit den Dichtedaten, da beide Größen eng über die Porosität miteinander verknüpft sind.

Ebenfalls in eine integrative Betrachtung einbezogen werden die magnetische Suszeptibilität und die Ultraschallwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kerntiefe. Die Güte der Korrelation von Dichte und diesen beiden letztgenannten Größen hängt stark von den regionalen Randbedingungen ab. Schließlich wurden die Dichtedaten auch mit sedimentechographischen Aufzeichnungen und mit röntgentomographischen Untersuchungen in Beziehung gesetzt. In einer integrativen Interpretation können die individuellen Aussagemöglichkeiten aus den unterschiedlichen Verfahren zu einem schlüssigen Gesamtbild zusammengefügt werden. Mehrdeutigkeiten, die bei Messungen von nur einer Größe meist bestehen, können auf diese Art und Weise, je nach Sedimentcharakteristik und Zahl der Parameter, u.U. deutlich reduziert werden. Der große Nutzen und die Bedeutung der Dichtedaten innerhalb solcher integrativen Arbeiten wird bei der Gegenüberstellung der Dichteergebnisse zu anderen Parametern deutlich. Die hohe räumliche Auflösung, die hohe Absolutwertgenauigkeit und die Schlüsselstellung der Dichte innerhalb der Vielzahl von Methoden und Meßgrößen sind hier ausschlaggebend.

Das Dichtemeßsystem wird inzwischen im Rahmen sedimentologischer Arbeiten am Alfred-Wegener-Institut im Routinebetrieb eingesetzt.

## Abstract

The wet bulk density is one of the most important parameters of the physical and geological properties of marine sediments. The density is connected directly with sedimentation history and a few sediment properties. Knowledge of the fine scale density-depth structure is the base for many model calculations, for both sedimentological and palaeoclimatic research.

A density measurement system was designed and built at the Alfred Wegener Institute in Bremerhaven for measuring the wet bulk density of sediment cores with high resolution in a non-destructive way. The density is determined by measuring the absorption of Gamma-rays in the sediment. This principle has been used since the 50's in materials research and in the geosciences. In the present case, Cs<sup>137</sup> is used as the radioactive source and the intensity is measured by a detector system (scintillator and photomultiplier). Density values are obtainable in both longitudinal core sections and planar cross-sections (the latter are a function of the axial rotation angle). Special studies on inhomogeneity can be applied with core rotation. Detection of ice rafted debris (IRD) is made possible with this option. The processes that run the density measurement system are computer controlled. Besides the absorption measurement the core diameter at every measurement point is determined with a potentiometric system. The data values taken are stored on a personal computer.

Before starting routine measurements on the sediment cores, a few experiments concerning the statistical aspects of the gamma-ray signal and its accuracy were carried out. These experiments led to such things as the optimum operational parameters. A high spatial resolution in the mm-range is possible with the 4mm-thin gamma-ray measurements. Within five seconds the wet bulk density can be determined with an absolute accuracy of 1%. A comparison between data measured with the new system and conventional measurements on core samples after core splitting shows an agreement within +/- 5% for most of the values.

For this thesis, density determinations were carried out on ten sediment cores. A few sediment characteristics are obtainable from using just the standard measurement results without core rotation. In addition to differences and steps in the absolute density range, variations in the "frequency" of the density-depth structure can be detected due to the close spatial measurement interval and high resolution. Examples from measurements with small (9°) and great (90°) angle increments show that abrupt and smooth transitional changes of sediment layers as well as ice rafted debris of several dimensions can be detected and distinguished clearly.

After the presentation of the wet bulk density results, a comparison with data from other investigations was made. Measurements of the electrical resistivity correlated very well with the density data because both parameters are closely related to the porosity of the sediment. Additionally, results from measurements of the magnetic susceptibility and from ultra-sonic wave velocity investigations were considered for an integrative interpretation. The correlation of these both parameters and wet bulk density data is strongly dependent on the local (environmental) conditions. Finally, the densities were compared with recordings from sediment-echographic soundings and an x-ray computer tomography analysis. The individual results of all investigations were then finally combined into an accurate picture of the core. Problems of ambiguity, which exist when

just one parameter is determined alone, can be reduced more or less according to the number of parameters and sedimentary characteristics measured. The important role of the density data among other parameters of such an integrated interpretation is evident. Evidence of this role include the high resolution of the measurement, the excellent accuracy and the key position within methods and parameters concerning marine sediments.

The density measurement system has recently been incorporated into sedimentological research at the Alfred Wegener Institute.

## 1 Einleitung, Ziele

Die Bestimmung der Dichte von Materialien mit Hilfe der Absorption von Gammastrahlen ist ein seit mehreren Jahrzehnten bewährtes Verfahren. So wird diese Methode beispielsweise in der Materialforschung (Smith und Whiffin, 1952; Harris und Megill, 1953), zur Dickenmessung von Blechen, zu Massenstrommessungen (Löffel, 1979; Spindler et al., 1988) oder im Rahmen der Kunststoffaufbereitung (Fritz und Löffel, 1990) eingesetzt. In dieser Arbeit wird eine Anwendung dieses Prinzips auf marine Sedimente vorgestellt. Am Alfred-Wegener-Institut wurde eine Meßapparatur für die Dichtebestimmung gebaut. Bestimmt wird die Dichte des Sediments, indem die Absorption eines Gammastrahls, der das Sediment durchstrahlt, gemessen wird. Die Dichte kann so zerstörungsfrei, absolut und räumlich hochauflösend an Sedimentkernen bestimmt werden. Dank der Zerstörungsfreiheit steht das Sedimentmaterial nach der Dichtemessung uneingeschränkt weiteren Untersuchungen zur Verfügung. Mit den Ergebnissen der Dichteuntersuchungen können Aussagen über die Dichte-Tiefenstruktur sowie über die Homogenität der Sedimente gemacht werden. Die Dichteinformationen sollen gemeinsam mit weiteren physikalischen Eigenschaften später eine integrative Interpretation ermöglichen. Mit "integrativer Interpretation" ist hierbei die Synthese verschiedener, einzeln betrachtet oft mehrdeutiger Parameter zu einem eindeutigen und schlüssigen Gesamtbild gemeint. Darüberhinaus sollten später neben verschiedenen geologischen Parametern insbesondere Datierungsmethoden zur Erstellung einer Zeit/Tiefenskala wie die Untersuchungen von Isotopen, Mikrofossilien (Paläontologie), die Bestimmung magnetischer Parameter (Paläomagnetik) sowie radiometrische Methoden hinzugezogen werden.

Der Dichte kommt im Rahmen sedimentphysikalischer Betrachtungen eine wichtige Rolle zu, da sie direkt mit Prozessen in der Vorgeschichte des Sediments (Ablagerung, Kompaktion und Diagenese) in Verbindung steht (siehe z.B. in Leeder, 1982). Die Dichte in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe ist Basisparameter für eine Vielzahl geologischer Modellrechnungen. Ferner sind Dichteinformationen sehr hilfreich z.B. bei der Betrachtung von Sedimenten als Flüssigkeitsspeicher, für die Bestimmung von Sättigungsgraden, für die Abschätzung der Geschwindigkeiten akustischer Wellen und auch als Beprobungs-"Leitfaden" für geologische Untersuchungen (Harms und Choquette, 1965). Der Dichte als einer der Schlüsselparameter mariner Sedimente wurde in einer Vielzahl von Veröffentlichungen Beachtung geschenkt (siehe z.B. Nafe und Drake, 1957; Sutton et al., 1957; Hamilton, 1970). Wie später anhand der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit deutlich werden wird, können hochauflösende Dichtedaten zudem auch Informationen beinhalten, die wertvolle Hinweise für die Rekonstruktion von Klimavorgängen in der Vergangenheit geben. Die unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen in den Ozeanen während Glazial- und Interglazialzeiten können sich deutlich in der Tiefenstruktur der Tiefseesedimente und den eng mit der Dichte verknüpften Parametern Porosität und Korngrößenverteilung niederschlagen. Als Beispiel im Bereich hoher Breiten seien hier repräsentativ für kältere Umweltbedingungen relativ dichte glazial-marine Sedimente genannt, die auf den Materialtransport durch Eisberge zurückgehen (IRD = ice rafted debris); biogene Sedimente mit geringerer Dichte z.B. aus Radiolarien werden dagegen vornehmlich bei wärmeren Bedingungen gebildet (Shepard, 1973).

Im folgenden soll ein Überblick über einige in den Geowissenschaften bisher angestellte Dichteuntersuchungen mit Hilfe von Gammastrahlen gegeben werden. Bernhard und Chasek (1955), Davidson et al. (1963), Corey und Hayes (1970) sowie Evans (1965), Preiss (1968a) und Lorch (1970) führten bereits entsprechende Untersuchungen an Böden bzw. marinen Sedimenten durch; seit den sechziger Jahren wird im Rahmen der DSDP- und ODP-Untersuchungen routinemäßig auf See die Dichte und Porosität der Bohrkerne über Gammastrahlenabsorption bestimmt (Evans, 1965, Harms und Choquette, 1965). Bohrkerne aus Kristallin sowie solche aus Eis wurden ebenfalls auf ihre Dichte hin mit Methoden der Gammastrahlenabsorption untersucht (Bunker und Bradley, 1961; Bücken et al., 1990; Kipfstuhl und Minniken, 1993). Die in der Bohrlochmeßbranche häufig benutzten Gamma-Gamma-Logs arbeiten zwar auch mit einer radioaktiven Quelle und einem Detektorsystem, jedoch wird hier nicht die Absorption eines transmittierenden Strahls, sondern die Rückstreuung im Gestein gemessen (Belcher et al., 1953, Tittman und Wahl, 1965; Wahl, 1983; Ellis, 1987). Das Meßvolumen ist dabei relativ groß und die räumliche Auflösung entsprechend begrenzt. Auch für den marinen Bereich wurden Meßsysteme nach dem Prinzip des Gamma-Gamma-Logs entwickelt (Keller, 1965). Für in-situ Untersuchungen an marinen Sedimenten wurden sogar Geräte mit transmittierenden Gammastrahlen entwickelt, hierbei dringen meist Quelle und Detektor parallel an zwei getrennten Lanzen ins Sediment ein (Vomocil, 1954; Eife, 1959; McHenry und Dendy, 1964; Preiss, 1968b; Fanger et al., 1985). Die Tiefenzuordnung der Meßwerte wird hier z.B. mit Hilfe von Druckmessungen vorgenommen (Fanger et al., 1985). Es wurden auch Dichtemessungen von Böden in situ durchgeführt, indem eine Gammaquelle in ein Bohrloch eingebracht und die Strahlungsintensität an der Oberfläche gemessen wurde (Wendt, 1954; Homilius und Lorch, 1957). Schließlich werden auch im Bereich der marinen Geotechnik Verfahren zur Dichtebestimmung mit Gammastrahlenabsorption eingesetzt (pers. Mitt. A.F. Richards, 1992), ebenso für die Bestimmung von Wassergehalt und Permeabilität von Böden (Gurr, 1962).

Nach einigen Ausführungen über die theoretischen und technischen Grundlagen der Dichtebestimmung im folgenden Kapitel 2 werden im dritten Kapitel die Meßmöglichkeiten und die Eigenschaften des hier benutzten Dichtemeßsystems vorgestellt. Anhand verschiedener Experimente und einiger theoretischer Überlegungen sollen die Möglichkeiten, die das System bietet, veranschaulicht werden. Der Vergleich mit Ergebnissen aus konventionellen Dichtebestimmung soll zur Verifikation der Dichten aus Gammastrahl-Absorptionsmessungen dienen. Nach der Präsentation der Anwendung auf marine Sedimente werden dann im vierten Kapitel weiterführende Arbeiten vorgestellt und diskutiert. Hierbei sind insbesondere die Vergleiche mit röntgentomographischen Untersuchungen und die integrative Betrachtung verschiedener physikalischer Eigenschaften hervorzuheben. Schließlich gibt das fünfte Kapitel einen Abriß über die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit sowie einen Ausblick auf sich öffnende Perspektiven.

## 2 Methoden, Theorie und Geräte

In diesem zweiten Kapitel werden zunächst die physikalischen Grundlagen zum Meßprinzip der Dichtemessung mit Gammastrahlenabsorption vorgestellt. Nach der darauffolgenden Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten und benutzten Dichtemeßsystems schließen sich einige Ausführungen zur Methode der Röntgentomographie sowie zu konventionellen Dichtemessungen an Sedimentproben an.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

#### 2.1.1 Strahlungsarten

Zum elektromagnetischen Strahlungsfeld gehören neben der für den Menschen wahrnehmbaren Strahlung im optischen Bereich (ca. 350-750nm Wellenlänge, 1.65-3.4eV Energie) eine Reihe weiterer Strahlungsarten. Von tiefen zu hohen Frequenzen sind das Radiowellen ( $10^{-6}$ eV), Infrarotstrahlung ( $10^{-2}$ eV), Ultraviolette Strahlung ( $10^1$ - $10^2$ eV), Röntgenstrahlung (um 50keV), Gammastrahlung (um 1MeV) und Kosmische Strahlung ( $> 10^8$ eV) (Gerthsen et al., 1986). Energie und Frequenz der elektromagnetischen Strahlung sind direkt miteinander gekoppelt:

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

Hierbei ist E die Energie,  $\nu$  die Frequenz und h das Plancksche Wirkungsquantum (Naturkonstante,  $h=4.14 \cdot 10^{-15}$ eV·s). Zur Durchstrahlung von Festkörpern eignen sich nur die relativ energiereichen und durchdringenden Röntgen- und Gammastrahlen. Erstere entstehen beim Auftreffen schnell bewegter Elektroden (Kathodenstrahlung) auf ein Hindernis (schwere Materialien wie Wolfram oder Platin) und werden mit Röntgenröhren unter Hochspannung erzeugt, Gammastrahlen entstehen u.a. beim natürlichen radioaktiven Zerfall von Atomkernen, deshalb werden für Anwendungen mit ihnen radioaktive Präparate benötigt (Schultz und Vogt, 1977). Für die Bestimmung der Absolutdichte von Materialien sind Gammastrahlen am zweckmäßigsten, da hier bei geeignetem Strahler und geeigneter Untersuchungssubstanz ein weitestgehend eindeutiger Zusammenhang zwischen Absorption der Strahlung und Dichte des untersuchten Materials besteht. Die Wechselwirkungseffekte, der Zusammenhang zwischen Absorption und Dichte, einiges über Strahlungsquellen und die Möglichkeiten, Strahlung zu messen, werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

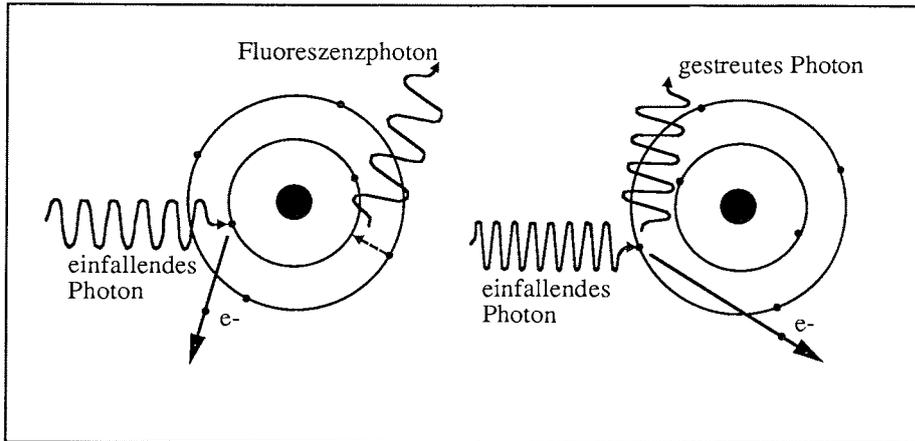
### 2.1.2 Wechselwirkungseffekte

Bei den im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Absorptionsmessung treten zwei verschiedene Wechselwirkungseffekte auf. Dies sind der Photoelektrische Effekt und der Comptoneffekt (beide Effekte werden sehr ausführlich z.B. bei Evans (1955) beschrieben).

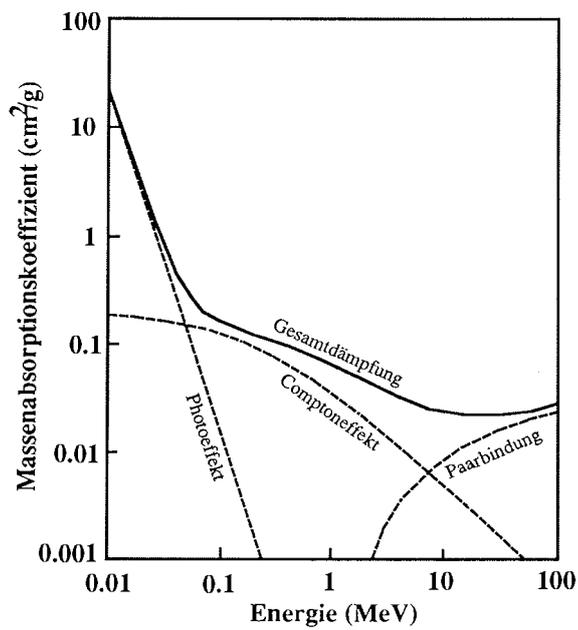
Der bei der auch hier angewendeten Röntgentomographie (siehe Kapitel 2.3) ausschlaggebenden Wechselwirkungseffekt zwischen Strahlung und Materie ist der sogenannte **Photoelektrische Effekt** und zum Teil auch der weiter unten beschriebene Compton-Effekt. Beim Photoelektrischen Effekt (siehe Abbildung 2.1a links) trifft ein ankommendes Photon auf ein Atom der durchstrahlten Materie, es überträgt seine Energie auf ein Elektron, das bei ausreichender Energie als Photoelektron aus dem Atom herausgeschlagen werden kann. Durch das Herausschlagen können Außenelektronen ihr Energieniveau verändern und dabei charakteristische Fluoreszenz abgeben (Birks, 1964; Gerthsen et al., 1986). Der Photoelektrische Effekt ist neben der Energie auch von den Kernladungszahlen bzw. den durchstrahlten Elementen abhängig. Er ist im Energiebereich von 40 bis 80keV dominierend, spielt bei den im Fall der Röntgentomographie (125keV) neben dem Comptoneffekt aber immer noch eine wichtige Rolle (siehe Abbildung 2.1b). Die Elementabhängigkeit des Photoeffektes führt dazu, daß die Abschwächung des Röntgenstrahls nicht nur von der Dichte, sondern auch von der chemischen Zusammensetzung des durchstrahlten Materials abhängt. Somit beinhalten die Ergebnisse der röntgentomographischen Untersuchungen neben den Dichteunterschieden auch Variationen, die die Zusammensetzung des untersuchten Materials betreffen.

Grundlage für die Dichtebestimmung mit Gammastrahlenabsorption im Rahmen dieser Arbeit ist der sogenannte **Compton-Effekt**, der beim Durchlaufen eines Gamma- oder Röntgenstrahls durch ein Medium abläuft. Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung zwischen einer elektromagnetischen Welle (Gamma- oder Röntgenstrahlung) bestimmter Energie bzw. den Photonen und der Elektronenhülle der Atome, mit denen die Photonen wechselwirken (Streuung). Ein ankommendes Photon (Gamma-Quant) gibt einen Teil seiner Energie an ein Elektron der Elektronenhülle ab, welches seitlich wegfliegt (siehe Abbildung 2.1a rechts). Da die Energie des Photons sehr viel größer als die Bindungsenergie des Elektrons ist, kann das Elektron als frei angesehen werden (Birks, 1964). Das Photoelektron bewegt sich frei weiter und kann ggf. auch z.B. mit einer Nebelkammer nachgewiesen werden (Heber und Kozik, 1971). Das Photon bewegt sich mit verminderter Energie, d.h. verringerter Frequenz oder erhöhter Wellenlänge weiter. Somit kann der Compton-Effekt für die Dichtebestimmung von Materialien genutzt werden, da Dichte und Streuung direkt zusammenhängen. Vereinfacht gesagt gilt also: Je dichter eine Substanz, desto mehr Wechselwirkungsvorgänge in der oben beschriebenen Art geschehen, und desto mehr wird ein Gamma- oder Röntgenstrahl geschwächt.

Bei der Absorption von Gammastrahlung von einem Cs<sup>137</sup>-Präparat (Energie 0.662MeV) dominiert der Compton-Effekt im Vergleich zum Photoeffekt. In Abbildung 2.1b ist der Einfluß der Wechselwirkungsvorgänge bzw. der Massenabsorptionskoeffizient (hier für Aluminium) in Abhängigkeit von der Energie dargestellt. Der Paarbindungseffekt (Energiebereich > 2MeV) spielt für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle.



**Abbildung 2.1a:** Wechselwirkungsprozeß von Photonen und Materie beim Photoeffekt (links) und Comptoneffekt (rechts) (umgezeichnet aus Schultz und Vogt, 1977).



**Abbildung 2.1b:** Massenabsorptionskoeffizient für Aluminium als Funktion der Strahlungsenergie. Die Anteile der Wechselwirkungseffekte im jeweiligen Energiebereich ist gestrichelt eingezeichnet (umgezeichnet aus Ellis, 1987).

### 2.1.3 Der Zusammenhang zwischen Absorption und Dichte

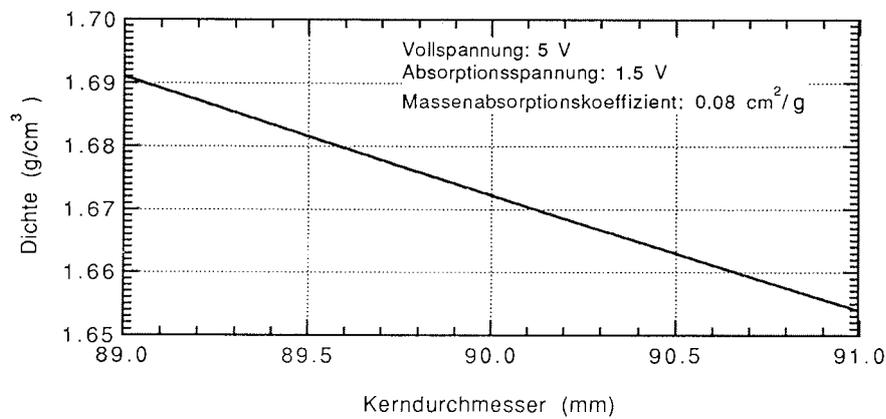
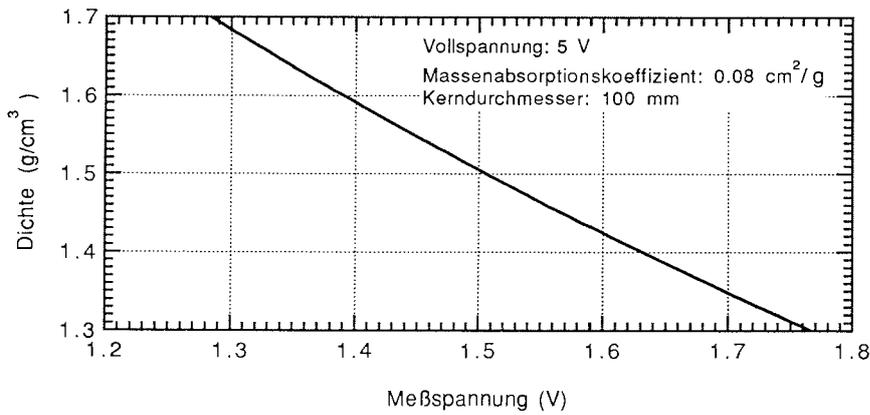
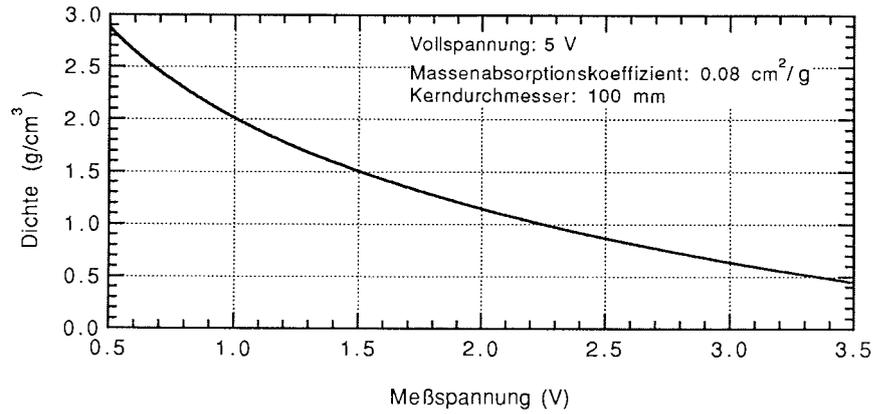
Die Gammastrahlenabsorption bei der Durchstrahlung einer Substanz aufgrund der im vorherigen Kapitel beschriebenen Wechselwirkungsvorgänge kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\rho \cdot \mu \cdot d)} \quad (2)$$

hierbei bedeuten: I: Intensität des Gammastrahls nach dem Durchgang durch das absorbierende Medium;  $I_0$ : Ausgangsintensität des Gammastrahls;  $\rho$ : Dichte des durchstrahlten Materials ( $\text{g/cm}^3$ );  $\mu$ : Massenabsorptionskoeffizient des Materials (für Wasser:  $0.0840\text{cm}^2/\text{g}$ , für Gestein:  $0.0774\text{cm}^2/\text{g}$  (Grasty, 1979)); d: Laufweg des Strahls durch das absorbierende Material (cm). Wichtig ist hierbei, daß es sich um eine strahlengeometrische Betrachtung handelt. Das bedeutet, daß der Gammastrahl als "idealer", nicht aufgeweiteter Linienstrahl betrachtet wird. Um nun Informationen über die Dichte eines Materials zu erhalten, muß die Gleichung entsprechend umgestellt werden:

$$\rho = \frac{1}{\mu \cdot d} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (3)$$

Sehr wichtig bei Gleichung (3) ist die Tatsache, daß die Dichte der durchstrahlten Substanz bei Kenntnis der Größen  $\mu$  und d ohne Kalibrierung absolut bestimmt werden kann. Der Massenabsorptionskoeffizient  $\mu$  (oder Schwächungskoeffizient) wird durch die Energie des Strahlers, die Dichte und das Produkt aus Streuquerschnitt und Elektronendichte bestimmt. Hierbei geht auch das Z/A-Verhältnis (Ordnungszahl zu Atomgewicht) mit ein. Für die meisten gesteinsbildenden Elemente liegt das Z/A-Verhältnis bei 0.5, beim Element Wasserstoff allerdings hat es einen Wert von ca. 1 (z.B. in Ellies, 1987). Hieraus resultiert der unterschiedliche  $\mu$ -Wert für Wasser und Gestein. Massenabsorptionskoeffizienten sind in Abhängigkeit von Energie und Material vielfach in der Literatur zu finden so z.B. bei Grodstein (1957), McGinnies (1959), Berry (1961), Vankova (1968), Grasty (1979) oder Hubbel (1982). Gehen wir zunächst von einem konstanten Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu$  aus, so ergeben sich die Fehlergrenzen für die Dichte aus den Meßfehlern bei der Absorptions- und Durchmesserbestimmung (siehe unten). Wie die Dichte vom Kerndurchmesser und von der der Strahlungsintensität proportionalen gemessenen Spannung abhängt, ist in Abbildung 2.2 graphisch dargestellt. Die Graphen wurden aus Gleichung 3 berechnet, wobei die nichtvariablen Parameter mit realistischen Werten besetzt wurden.- Da aber  $\mu$  auch nicht für alle Kerne als *ein* konstanter Wert angesehen werden kann, muß hier für die Dichteberechnung noch eine Processing-Porosität (PP) eingeführt werden. Der bei der Anwendung von Gleichung (3) verwandte Massenabsorptionskoeffizient  $\mu$  setzt sich dann aus dem für Wasser und für Gestein (s.o.) zusammen.



**Abbildung 2.2:** Graphische Darstellung der Formel (2). Die Graphik oben und in der Mitte zeigt den Zusammenhang zwischen Dichte und Meßspannung  $I$  (für unterschiedliche Wertebereiche) bei Konstanthaltung der übrigen Parameter. Die Graphik unten zeigt den entsprechenden Verlauf für Dichte und Kerndurchmesser.

$$\mu = PP \cdot \mu_{\text{Wasser}} + (PP-1) \cdot \mu_{\text{Gestein}} \quad (4)$$

Vorinformationen über einen Kern (andere physikalische Eigenschaften, Probennahme und "Smear Slides" (Mikroskop-Proben auf Glasplättchen) an den Kernsegment-schnittstellen, Kernsegmentgewicht und Region) geben Kenntnis über die hauptsächlich vertretenen Sedimentkomponenten. Entsprechend wählt man eine mittlere Porosität, mit Hilfe der (als PP) dann anteilmäßig  $\mu$  berechnet wird. Die Bedeutung der Wahl dieser PP, weitere Möglichkeiten und die Folgen sollen weiter unten diskutiert werden.

#### 2.1.4 Strahlungsquellen

Für die Dichtebestimmung an Materialien kamen bereits verschiedene radioaktive Quellen in früheren Arbeiten zum Einsatz, diese waren u.a. Ba<sup>133</sup>, Co<sup>60</sup>, Cs<sup>137</sup> und Ir<sup>192</sup>-Präparate (Belcher et al., 1953; Bunker und Bradley, 1961; McHenry und Dendy, 1964; Evans, 1965 und Fritz und Löffel, 1990). Für die Wahl der am besten geeigneten Strahlungsquelle sollten folgende Punkte erfüllt sein:

- relativ lange Halbwertszeit, um Drifteffekte und Austauschintervalle klein bzw. lang zu halten
- geringe Abhängigkeit des Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu$  von der Ordnungszahl Z des durchstrahlten Mediums
- geeigneter und scharfer Energiebereich des Isotops (im Bereich der Compton-Wechselwirkung)

Aus diesem Anforderungsprofil hat sich das Isotop Cs<sup>137</sup> als bisher meistverwendetes Präparat für Dichtebestimmungen herauskristallisiert. Cs<sup>137</sup> erfüllt alle vier Eigenschaften mit seiner Halbwertszeit von 30.14 Jahren und einer Energie von 662keV relativ gut. Im Vergleich zu den meisten anderen Isotopen ist die Abhängigkeit von  $\mu$  von Z gering (Fritz und Löffel, 1990). Auch für die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Dichtemessungen wurde eine Cs<sup>137</sup>-Quelle gewählt. Sie wird in Kapitel 2.2.1 näher beschrieben.

#### 2.1.5 Messung der Strahlung

Das am weitesten verbreitete und relativ einfache Instrument zur Messung ionisierender Strahlung bzw. zum Nachweis schneller Teilchen ist das Zählrohr nach Geiger. Noch älter ist die Strahlungsmessung mittels Szintillationszähler (Gerthsen et al., 1986). Dieses Meßprinzip wurde auch im Rahmen dieser Arbeit angewandt und soll im folgenden kurz vorgestellt werden: Ein Szintillationszähler besteht aus einem

(fluoreszierenden) Material, z.B. aus einem Zinksulfidkristall, NaJ, Toluol mit Zusätzen oder aus bestimmten Kunststoffen. Trifft ein ein Gamma-Teilchen auf den Szintillator, entsteht ein Lichtimpuls (Blitz), der beobachtet werden kann. In der praktischen Anwendung wird das Licht bzw. die Lichtimpulse aber meist mit einem Elektronenvervielfacher (Photomultiplier) verstärkt und anschließend gezählt oder in Spannungssignale umgewandelt (Schultz und Vogt, 1977; Gerthsen et al., 1986).

## 2.2 Das Dichtemeßsystem (DMS)

Im folgenden werden die einzelnen Bestandteile des Dichtemeßsystems (DMS) vorgestellt und beschrieben. Hierbei soll zunächst auf die Grundbestandteile des DMS, das sind die Quelle, der Gammastrahlendetektor (zusammen als Densitometer bezeichnet), die Durchmessermeßeinheit und das Meßgerät eingegangen werden. Anschließend werden dann alle übrigen Komponenten des DMS beschrieben. Um einen ersten Überblick über das gesamte DMS zu geben, ist in Abbildung 2.3 die Verbindungsstruktur des Meßsystems dargestellt. Abbildung 2.4 zeigt das DMS in einer Schwarzweißaufnahme.

### 2.2.1 Grundbestandteile

#### - Löffel-Densitometer

Die für die Absorptionsmessung entscheidenden Geräte sind die radioaktive Quelle und der Gammastrahlendetektor.

#### - $Cs^{137}$ -Quelle

Als radioaktive Quelle dient ein umschlossenes  $Cs^{137}$  Präparat (Energie: 0.662MeV) mit einer Halbwertszeit von 30.14 Jahren und einer Aktivität von 26GBq (entspricht 0.7Ci). Dieser Gammastrahler ist in einem bauartgenehmigten Behälter (Klasse A) untergebracht. An der Austrittsöffnung dieses Quellenbehälters hat der Gammastrahl einen Durchmesser von 2mm. Der Quellenbehälter kann von der GTI-Control-Unit über eine Fernbedienung (s.u.) geöffnet und geschlossen werden. Für den Meßbetrieb wird der Quellenbehälter mit Quelle auf die dafür vorgesehene Kerndurchführung (s.u.) aufgesetzt.

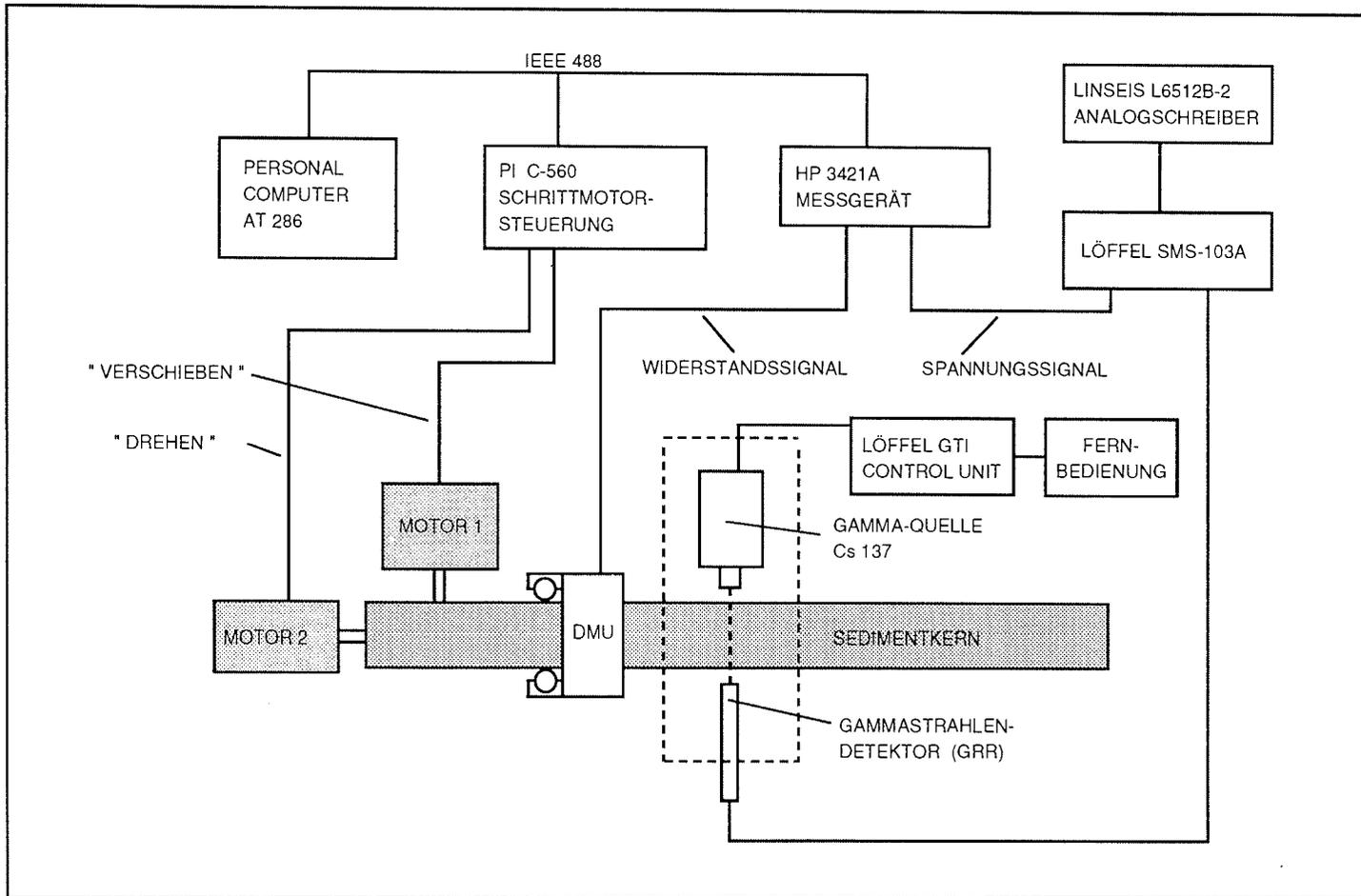
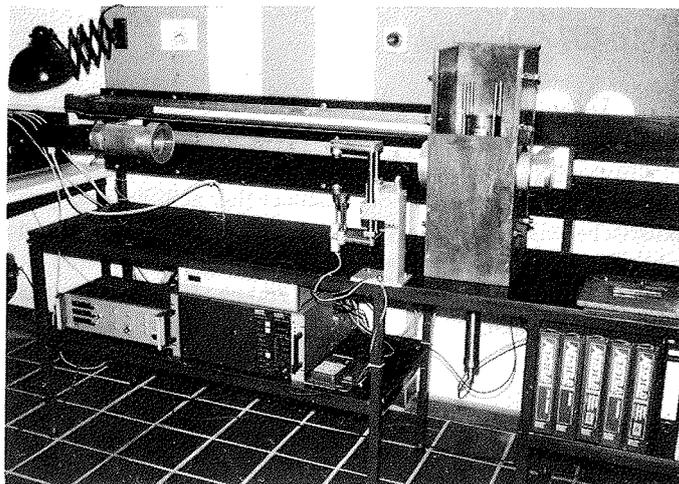
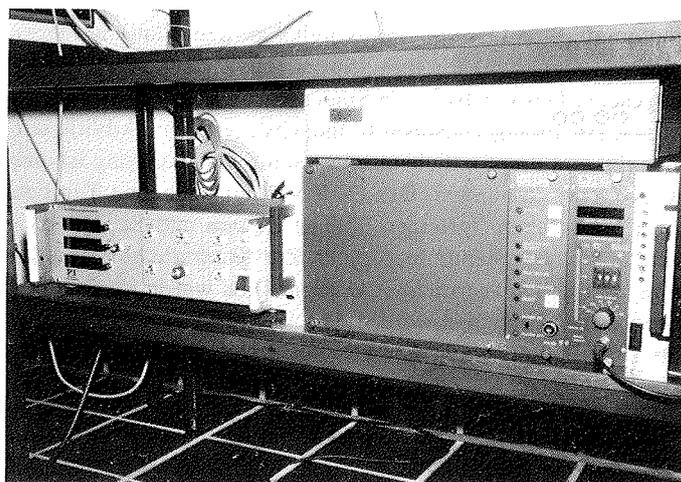


Abbildung 2.3: Prinzipskizze mit allen Komponenten des Dichtemeßsystems (DMS).

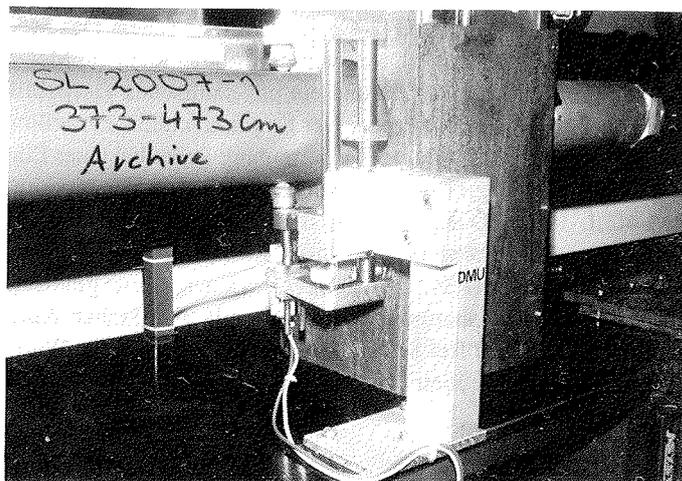
**Abbildung 2.4:**  
Das Dichtemeß-  
system (DMS) im  
Sedimentphysika-  
lischen Labor.



**Abbildung 2.5:**  
Schrittmotorsteuer-  
ung, Meßgerät und  
Densitometer-  
elemente des DMS.



**Abbildung 2.6:**  
Die Durchmesser-  
Meßeinheit (DMU)  
des DMS während  
der Vermessung  
eines Kerns.



#### *- Löffel-GTI-Control-Unit*

Dieses Gerät ist in der Schwarzweißfotographie in Abbildung 2.5 im rechten Bildteil zu sehen. Mit diesem Modul kann die radioaktive Quelle geöffnet und geschlossen werden, außerdem wird der aktuelle Betriebszustand angezeigt. Leuchtdioden zeigen an, ob der Quellbehälter geöffnet oder geschlossen ist, optische und akustische Alarmsignale werden bei Störungen des Motors, der die Quelle öffnet und schließt, sowie bei Zeitüberschreitung beim Öffnen und Schließen, ausgelöst. Die Control Unit enthält außerdem auch Akkus, die einen Weiterbetrieb bei Netzausfällen sicherstellen sollen.

#### *- Löffel-Gamma Ray Receiver (GRR)*

Der GRR wird an der Unterseite der Kerndurchführung (s.u.) mittels einer schraubbaren Klemmvorrichtung befestigt. Er besteht aus einem Szintillator und einem Photomultiplier. Das vom Polyvinyltoluol-Szintillator ausgehende optische Signal wird vom (stabilisierten) Photomultiplier (Hamamatsu R268) in ein elektrisches Signal umgesetzt. Das resultierende Spannungssignal wird verstärkt, letztlich erhält man eine Ausgangsspannung zwischen 0 und 10V, je nach Aktivität der Quelle, durchstrahltem Material und Empfindlichkeitseinstellung. Der Ausgang ist direkt mit dem Löffel SMS-103A-Gerät verbunden. Der GRR verfügt über eine Temperaturkompensation, d. h. sonst bei solchen Systemen übliche Driften und Schwankungen mit der Temperatur werden weitestgehend unterdrückt. Zur Kontrolle kann die Sensortemperatur im GRR abgefragt und aufgezeichnet werden. Dies wurde im Rahmen der Messungen, die in dieser Arbeit behandelt werden, jeweils vor und nach einer Kernsegmentmessung getan. Die Temperaturdaten werden im Infofile abgespeichert (siehe Kapitel 3.1.2).

#### *- Löffel SMS-103A*

Dieses Gerät ist in der Schwarzweißfotographie in Abbildung 2.5 im rechten Bildteil, rechts neben der GTI-Control-Unit, zu sehen. Das Modul dient zum Empfang, Filtern und Verstärken der Daten vom GRR. Hier kann die Meßempfindlichkeit über eine Dekade (von 100 bis 999%) und ein physikalisches Tiefpaßfilter (Zeitkonstanten von 0.01s bis 3s) eingestellt werden. Der Empfindlichkeitseinstellung liegt eine Verstärkung des Signals zugrunde; die "1:1"-Übertragung findet bei einer Einstellung von 100% statt, alle darüberliegenden Einstellungen bewirken eine Verstärkung des Signals (pers. Mitt., R. Löffel, 1991). Die Spannungssignale proportional zum Absorptionswert und zur GRR-Temperatur können am Löffel SMS-103A abgegriffen werden. Beide Signale werden an das HP3421A-Meßgerät (s.u.) weitergeleitet. Die der Absorption proportionale Meßspannung wird dort mit 3<sup>1/2</sup>-facher Auflösung auf 1mV genau gemessen. Da das Löffel SMS-103A Gerät eine sehr lange Warmlaufzeit benötigt, wurde es bei häufigem Meßbetrieb zwischen den Messungen (nachts und an Wochenenden) nicht abgeschaltet.

### - Durchmessermeßeinheit (DMU)

Zur möglichst genauen Messung des Kerndurchmessers wurde gemeinsam mit der Institutswerkstatt des AWI ein Durchmesser-Meßsystem entwickelt. In Abbildung 2.6 ist der Aufbau der Meßeinheit in einer Schwarzweißaufnahme dargestellt, Abbildung 2.7 zeigt in einer Prinzipskizze die Funktionselemente.

Zwei gegenüberliegende Andruckelemente sind mechanisch so mit dem Wegaufnehmer gekoppelt, daß sich Wegänderungen des Abstandes zwischen beiden Andruckkugeln direkt auf den Wegaufnehmer übertragen. Die obere Andruckkugel wird hierbei von der Schwerkraft, die untere durch eine Spiralfeder am Sedimentkern fixiert. Die Andruckkugeln sind frei gelagert, so daß Kernbewegungen in allen Richtungen reibungsfrei möglich sind. Der Durchmesser eines Sedimentkerns kann mit der Durchmessermeßeinheit (DMU) für jeden Meßpunkt mit einer Absolutgenauigkeit besser als 0.5mm bestimmt werden.

Das eigentliche Meßelement der DMU ist ein potentiometrischer Wegaufnehmer (Typ Megatron CLP 20-50) mit einem Meßbereich von 0 bis  $2k\Omega$  bei einem Meßweg von 50mm. Dieser Meßweg ermöglicht Durchmessermessungen sowohl bei Schwerelotkernen (mittlerer Durchmesser 125mm) als auch bei Kolbenlotkernen (mittlerer Durchmesser 90mm) ohne weitere Änderungen. 0.1mm Wegdifferenz entsprechen  $4\Omega$  Widerstandsunterschied am Potentiometer. Die Widerstände werden mit dem HP3421A-Meßgerät (s.u.) mit  $4^{1/2}$ -facher Auflösung gemessen (0 bis  $1.9999k\Omega$ ), so können Werte bis auf  $0.1\Omega$  aufgelöst werden. Die gesamte Meßeinheit wird für die Durchmessermessung an den Kern angeklappt und arretiert. Die Möglichkeit des Wegklappens der DMU nach der Messung ermöglicht das Verfahren des Kerns zur Absorptionmessung, da nun die Andruckrollen kein Hindernis mehr für die über die Kernendkappen ragenden Kernaufnahmen darstellen. Über einen Mikroschalter wird im Programmablauf überprüft, ob die DMU auch wirklich weggeklappt ist. Sollte der Benutzer einmal vergessen, die DMU vor der Absorptionmessung zurückzuklappen, wird der Meßablauf automatisch unterbrochen.

Um aus den Widerstandswerten, die am Potentiometer gemessen werden, Durchmesser oder Abstände berechnen zu können, ist eine Kalibrierung der DMU notwendig. Hierzu wurden von der Institutswerkstatt zwei "Stufenkerne" aus PVC angefertigt. Die Stufenkerne bestehen aus je einem massiven PVC-Stück Rundmaterial, dessen Durchmesser mit einer Drehbank variiert wurde. Das dünnere Stück weist Durchmesser von 85 bis 95mm, das dickere solche von 120 bis 130mm auf. Mit diesen beiden Durchmesserbereichen werden alle vorkommenden Meßbereiche bei den vorliegenden Kolben- und Schwerelotkernen abgedeckt. Die Stufenunterschiede sind im Durchmesser 1mm, im Radius dementsprechend die Hälfte. Dies ist auch die Steigung, die die DMU "überwinden" muß um zur nächsten Stufe zu kommen. Gemessen wurden nun die Widerstandswerte für die einzelnen Stufen, außerdem wurden die Durchmesser mit einer Schieblehre auf  $1/20$ mm bestimmt. Mit einer linearen Regression wurden nun zwei Kalibrierfunktionen bestimmt, eine für Kolben- und eine für Schwerelotkerne. Innerhalb jeweils beider Durchmesserbereiche wurde die Charakteristik des Potentiometers als ausreichend linear angenommen. Abbildung 2.8 zeigt die Widerstände und Durchmesser für beide Stufenkerne. Die Regressionsparameter stehen für die Durchmesserberechnung im Datenfile "dichte.kal" und werden vom Hauptprogramm

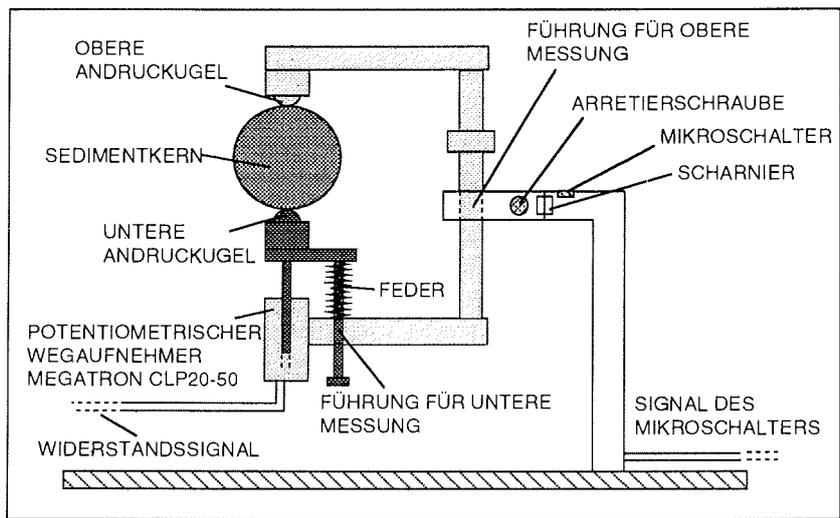


Abbildung 2.7: Prinzipskizze des Durchmessermeßsystems (DMU).

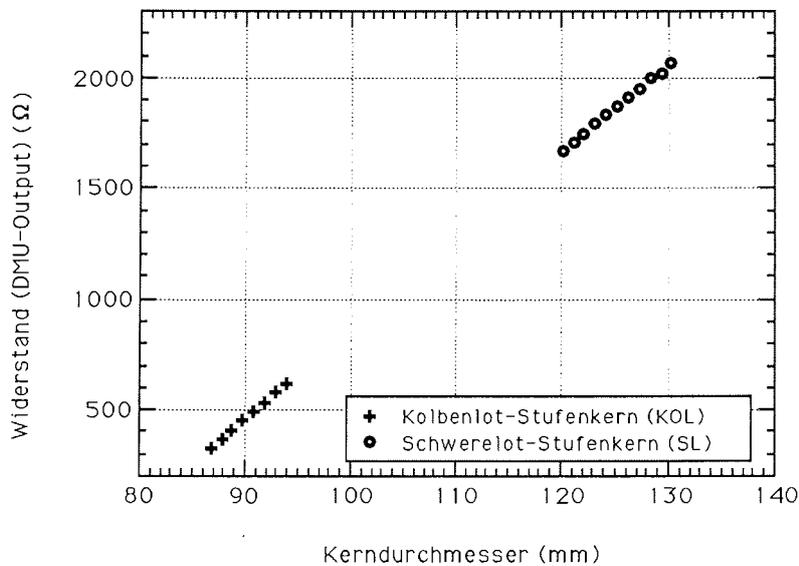


Abbildung 2.8: Kalibrierung der Durchmessermeßeinheit (DMU). Aufgetragen sind die gemessenen Widerstände am Potentiometer gegen die manuell gemessenen Durchmesser der PVC-Stufenkerne für Kolben- und Schwerelote.

"dichte.gnn" eingelesen. Ist eine erneute Kalibrierung notwendig, können diese Werte entsprechend einfach aktualisiert werden. Eine Wiederholung der Kalibrierung sollte in jedem Fall bei baulichen Änderungen an der DMU, Demontagen etc. vorgenommen werden. Auch nach längerer Zeit ohne irgendwelche Veränderungen ist eine Wiederholung der Kalibrierung anzuraten, da sich beispielsweise die Meßeigenschaften des Potentiometers altersbedingt verändern können.

#### - HP3421A Meßgerät

Das HP3421A (in der Schwarzweißfotographie in Abbildung 2.5 oben rechts) ist ein mehrkanaliges Meßgerät, es verfügt in der hier benutzten Version über eine IEEE-488-Schnittstelle. In der vorliegenden Geräteanordnung ist das HP3421A über die IEEE-488-Schnittstelle mit dem Personal Computer verbunden. Beim DMS wird das HP3421A zur Gleichspannungs- (Absorptions- und Temperaturwerte vom Löffel SMS 103A-Gerät) und Widerstandsmessung (Durchmesserwerte vom DMU, Kontrolle des Mikroschalters an der DMU) benutzt. Somit sind vier der insgesamt zehn zur Verfügung stehenden Kanäle genutzt. Die Konfiguration des Systems (Kanalwahl, Meßart, Meßbereich, Genauigkeit, Triggerart) wird komplett vom PC aus innerhalb des Programmpakets DICHTe (siehe Kapitel 3.1.1) vorgenommen.

#### 2.2.2 Weitere Komponenten

Als weitere Komponenten des Dichtemeßsystems werden hier die Kerndurchführung mit Kollimator, die Fernbedienung zur GTI-Control-Unit, die Abschirmung, der Personal Computer mit Peripherie sowie notwendige technische Komponenten vorgestellt.

Zentral im Dichtemeßsystem befindet sich die **Kerndurchführung mit Kollimator**. An der Kerndurchführung werden sowohl der Quellenbehälter als auch GRR befestigt, der Kern wird von den Kernaufnahmen (s.u.) durch die Kerndurchführung transportiert. Somit ist eine ortsfeste, nicht veränderbare Anordnung für die Absorptionsmessungen gewährleistet. In der Kerndurchführung befindet sich außerdem ein (austauschbarer) Kollimator, der den Gammastrahl vor dem Auftreffen auf den GRR auf 6mm Durchmesser kollimiert und somit die räumliche Mittelung der Dichte begrenzt. Die Kerndurchführung ist Teil der Abschirmung rund um den Durchstrahlungsbereich.

In Ergänzung zur GTI-Control-Unit wurde im Elektroniklabor des AWI eine **Fernbedienung** gebaut, die über ein 10m langes Kabel mit der GTI-Control-Unit verbunden ist. Über einen 25-Pin-Anschluß an der Rückseite der GTI-Control Unit können die Zustände und Befehle der GTI-Control-Unit auch extern abgefragt bzw. gegeben werden. Die Fernbedienung ermöglicht somit ein Abfragen der Systemzustände, Öffnen und Schließen der Quelle auch aus größerer Entfernung. Außerdem verbindet die

Fernbedienung die GTI-Control Unit mit einer roten Warnlampe ("Quelle offen").

Neben der Kerndurchführung dienen 15mm starke Bleiplatten, die die Kerndurchführung, den Quellenbehälter, sowie Teile des GRR umgeben, zur **Abschirmung** nach außen. Zum Transport der Sedimentkerne durch die Kerndurchführung sind an den Seiten zwei Öffnungen (Durchmesser: 130mm) ausgespart. Mit der Bleiabschirmung kann die Gammastrahlung um mehr als 90% (somit auf 1/10) verringert werden, die verbleibende Reststrahlung ist  $< 3\mu\text{Sv}$ .

Als zentrales Steuer-, Speicher- und Processingelement fungiert ein handelsüblicher **Personal-Computer** (mit mathematischem Coprocessor) vom Typ Compaq Portable 286. Er ist über eine IEEE-488-Schnittstelle mit der Motorsteuerung und dem HP3421A-Gerät verbunden. Wesentliche Softwareelemente sind das Betriebssystem MS-DOS (Version 3.2), das Meßdatenerfassungspaket Asyst und damit erstellten Programmelemente (Programmpaket DICHTe). Über ein 5.25"-Diskettenlaufwerk und ein Streamerlaufwerk (DC1000) können Datensicherungen vorgenommen werden.

Über einen Zweikanal-**Analogschreiber** (Typ Linseis L6512B-2) ist eine ständige Kontrolle des Meßablaufs bei der Absorptionsmessung zusätzlich zur Datenerfassung und Protokollierung durch den PC möglich.

Für die Bewegung des eingespannten Sedimentkerns sind zwei **Schrittmotoren** (Typ Berger Lahr RDM 599/50 mit Getriebe 3:1) verantwortlich. Einer der beiden Motoren sorgt für den Transport des Kerns in z-Richtung (Längsachse des Kerns), der andere für dessen Rotation. Letzterer ist direkt an der Kernhalterung montiert, der andere treibt die Halterung über einen Zahnriemen an. Die Steuerung der Motoren geschieht über die **PI C-560 Schrittmotorsteuerung** (in der Schwarzweißphotographie in Abbildung 2.5 links). Es handelt sich hierbei um eine 3-Kanal-Motorsteuerung; für das DMS werden allerdings nur zwei der drei zur Verfügung stehenden Kanäle genutzt. Die Steuereinheit wird via IEEE-488-Schnittstelle programmiert und angesprochen. Für Kernbewegungen außerhalb des Meßprogrammablaufs (z.B. beim Einlegen und Herausnehmen des Kerns) können die Motoren auch direkt manuell von der Steuereinheit aus betrieben werden. Bei ausgeschalteter Schrittmotorsteuerung lassen sich die Kernhalterungen bzw. der Sedimentkern frei drehen und verschieben.

Das zu messende Sedimentkernsegment wird an den beiden Kernenden in zwei von der Institutswerkstatt des AWI angefertigten **Kernhalterungen** eingespannt und kann dann verfahren und rotiert werden. Die auftretenden Kräfte müssen voll von den beiden Kernhalterungen aufgenommen werden, da der Kern nicht zusätzlich gestützt wird. Sonst übliche Halbschalensysteme erlauben keine präzise definierte automatische Drehung, deshalb scheidet ein solches System für die Anwendung hier aus. Eine der beiden Kernhalterungen wird von einem Schrittmotor angetrieben, die andere rotiert frei mit. Die aus Aluminium gefertigten Halterungen verfügen über je eine Klemme, mit der der Kern fest arretiert werden kann. Mittels zweier Reduzierstücke aus PVC können außer Schwerelotkernen auch Kolbenlotkerne mit ein und derselben Vorrichtung

eingespannt werden. Die Kernhalterungen eignen sich ebenfalls zum Einspannen von Halbkernen (Kolben- und Schwerelote).

Beide Kernhalterungen fahren auf einer **Führungsschiene**, welche direkt auf die Unterkonstruktion (s.u.) montiert ist. Zur Führungsschiene (Längsführungseinheit) vom Typ INA LF52120E gehören zwei Fahrschlitten, an die dann direkt die beiden Kernhalterungen angeschraubt sind. Um mechanische Überbeanspruchungen oder Beschädigungen zu vermeiden, wurden an den vier Schienenenden neben den mechanischen Anschlägen Mikroschalter eingebaut, die ein unbeabsichtigtes Weiterfahren der Kernhalterungen über den zulässigen Bewegungsbereich verhindern. Die Mikroschalter sind direkt mit der Schrittmotorsteuerung verbunden und unterbrechen unmittelbar bei Betätigung eine Weiterfahrt in die Richtung, in der die Führungsschiene am jeweiligen Schalter endet.

Schließlich dient als Basis für das gesamte Dichtemeßsystem eine von der Institutswerkstatt gebaute **Rahmenkonstruktion** aus 30mm-Vierkant-Eisenelementen. Die Bank ist 3.01m lang, 1.56m hoch, 0.52m tief und über Stahlwinkel mit der rückwärtigen Laborwand verschraubt. Die oben beschriebenen Gerätegruppen Densitometer, DMU, Motoren und Kernbewegungselemente sind direkt auf die Unterkonstruktion montiert. Die besonders stabile und schwere Auslegung der Bank ist notwendig um die statischen Elemente, insbesondere die Abschirmung, sowie die dynamischen Bestandteile, also Kernhalterungen und Kern, zu tragen bzw. möglichst präzise zu bewegen. Die vertikale Durchstrahlungsrichtung wurde einer horizontalen vorgezogen, um auch Halbkerne mit diesem Dichtemeßsystem messen zu können. Ferner konnte so die erforderliche Laborfläche für das DMS reduziert werden. Auf Regalelementen im unteren Teil der Bank finden die Meß- und Steuergeräte (HP3421A, Löffel SMS-103A, Löffel-GTI-Control Unit, PI-Motorsteuerung) sowie Gerätebeschreibungen und ähnliches Platz.

### 2.3 Röntgentomographie

Ergänzend und zum Zweck der Verifikation wurden im Rahmen dieser Arbeit an ausgewählten Kernen auch röntgentomographische Untersuchungen durchgeführt. Zunächst soll eine Übersicht über die Computertomographie (CT) gegeben werden. Anschließend wird in den beiden folgenden Abschnitten das Meßprinzip und das hier benutzte Meßgerät beschrieben.

Hauptzweck von Computertomographen ist die Untersuchung von Menschen zu medizinischen Zwecken (siehe z.B. in Ledley et al., 1974, Klingenberg, 1988). In diesem Bereich haben Computertomographen hervorragende Dienste geleistet und die Möglichkeiten der Erkennung und Diagnose von Erkrankungen oder Verletzungen erheblich verbessert. Die Grundlagen der Computertomographie wurden ab 1967 im wesentlichen von G.N. Hounsfield entwickelt. Die Weiterentwicklung der Röntgen-Computertomographie in den letzten Jahrzehnten ging sehr rasch vor sich, entsprechend schnell verbesserten sich die Meß- und Registriersysteme. Beispielsweise konnte

innerhalb der 10 Jahre von 1972 bis 1982 die Meßzeit für ein Bild um zwei Größenordnungen verringert werden, gleichzeitig verbesserte sich die Auflösung dabei noch um über das Doppelte (Keil, 1983). Neben dem Röntgen-CT wurde in der medizinischen Technik auch der sogenannte Kernspintomograph (KST) entwickelt (Klingenbeck, 1989), das physikalische Untersuchungsprinzip ist hier aber ein völlig anderes, deshalb soll hierauf im Rahmen dieser Arbeit auch nicht weiter eingegangen werden. Im Bereich der Geowissenschaften konnten Röntgen-CTs inzwischen auch schon nutzbar gemacht werden, so zum Beispiel zur Untersuchung von Eis (Kawamura, 1990, Wieschollek, 1990), Kristallingesteinen (Vinegar, 1986; Bücken et al., 1990) und Sedimenten (Withjack, 1987; Holler und Kögler, 1990; Colletta und Ballard, 1991).

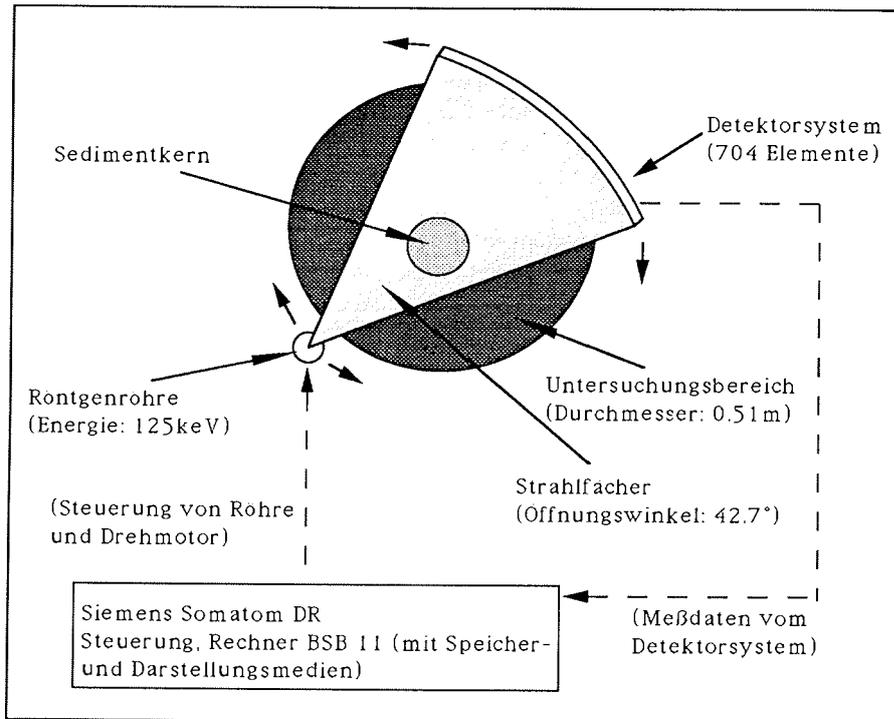
### **2.3.1 Das Meßprinzip**

Die Computertomographie ermöglicht es, einen Eindruck von der inneren räumlichen Struktur des untersuchten Objekts zu erhalten. Bedingung für eine Tomographie ist die Möglichkeit, einen Untersuchungsgegenstand mit einer gerichteten Welle oder Strahlung unter möglichst vielen Winkeln zu durchstrahlen, wobei die Anzahl der Kreuzungspunkte der Strahlwege hoch sein sollte. Sie ist letztlich auch ausschlaggebend für die räumliche Auflösung der Ergebnisse (Tomogramme). Mit Hilfe der erhaltenen Daten für jeden Strahlweg kann dann über Inversionsverfahren das Tomogramm berechnet werden. Ausführlicher werden die Prinzipien der Methode z.B. bei Hounsfield (1973) beschrieben.

### **2.3.2 Computertomograph Somatom DR**

Der Ganzkörper-Computertomograph Siemens Somatom DR ist für die hochauflösende Untersuchung und quantitative Auswertung von Gewebe- und Knochenstrukturen des menschlichen Körpers konzipiert. Mit ihm können schnell und unkompliziert Schnittbilder (Tomogramme) vom Innern des Körpers angefertigt werden. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde der Tomograph zur Untersuchung der Struktur ungeöffneter Sedimentkerne benutzt.

In der Prinzipskizze in Abbildung 2.9 sind alle wesentlichen Elemente des Hauptsystems zusammen mit einigen technischen Daten dargestellt. Die Grundelemente des Tomographen sind ein beweglicher Röntgenstrahler, eine ebenfalls bewegliche Empfängeranordnung, eine Bankkonstruktion, auf die diese beiden Gruppen montiert sind, sowie zwei Rechner mit den zugehörigen Peripheriegeräten zur Steuerung, Berechnung, Speicherung und zur Ausgabe der Bildinformationen. Die drehbare Röntgenanodenröhre hat eine Röhrenleistung von 30 bis 50kW (gepulste Strahlung) und arbeitet mit einer Energie von 125keV. Letzteres ist wichtig bei der Betrachtung der Wechselwirkungsvorgänge (s.o.) Röntgenstrahl/Sediment und natürlich dann auch bei der Interpretation der Tomogramme. Das Halbleiter-Detektorsystem besteht aus 704 Empfangselementen, die auf einem 42.7° weiten Kreissegment angeordnet sind. Bei der



**Abbildung 2.9:** Prinzipskizze zur Funktion des Computertomographen Siemens Somatom DR.

maximalen Zahl von 1440 Projektionen (Meßdauer 14 Sekunden) erhält man somit ca. 1 Million Strahlwege bzw. Strahlwegdaten für die spätere Inversion oder Bildberechnung. Die Strahlbreite bzw. Schichtdicke eines "Schnitts" beträgt 2mm. Der Bildrechner BSP 11 errechnet in wenigen Sekunden eine Bildpunktmatrix von 256 x 256 Bildpunkten; an diesen Bilddaten können unter anderem interaktiv über den Steuerrechner Bereiche besonderen Interesses (region of interest, "ROI") oder ähnliches für weitere Untersuchungen ausgewählt oder Skalierungen variiert werden. Die Ergebnisbilder können sowohl photomechanisch dargestellt als auch für spätere Untersuchungen digital abgespeichert werden. Röntgenstrahler und Detektorfeld sind so auf die Bankkonstruktion montiert, daß eine kreisförmige Meßfläche vom Durchmesser 0.51m erfaßt werden kann. Ein ferngesteuerter, fahrbarer Schlitten transportiert den Patienten bzw. den zu untersuchenden Sedimentkern in die Meßebe. Die Steuerung der Meßanlage befindet sich aus strahlenschutztechnischen Gründen in einem separaten Raum, der durch ein Bleiglasfenster Sichtkontakt zum Tomographen zuläßt. Außer tomographischen Aufnahmen können auch "gewöhnliche" Röntgenaufnahmen mit dem Somatom DR-Gerät gemacht werden. Hierzu verharrt die Röntgenröhre in einer Position, das Untersuchungsobjekt wird durch die Meßebe gefahren. Solche Aufnahmen eignen sich sehr gut zur Vorauswahl interessanter Abschnitte für spätere tomographische Aufnahmen.

Alle tomographischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden im Zentralkrankenhaus Reinkenheide, Bremerhaven, durchgeführt. Auf dem fahrbaren Patientenschlitten wurden ein oder zwei Kernsegmente in dafür angefertigten Halterungen aufgelegt. Über einen Draht konnten Markierungen am Kern angebracht werden, die dann auch im Röntgenbild zu sehen sind. Dies ist beispielsweise bei der Tiefenzuordnung von Horizonten aus Übersichtsaufnahmen sehr hilfreich. Die Aufnahmen werden auf einem Monitor sichtbar gemacht, außerdem als Datenfiles digital sowie über ein Peripheriegerät photomechanisch abgespeichert bzw. dargestellt. Fotos und Daten auf Disketten (8") stehen nach der Untersuchung zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Sedimentkernsegmente der Kerne PS1725-2, PS1831-1 und PS2089-1 untersucht. Auf die Ergebnisse dieser Messungen wird in Kapitel 4.4 näher eingegangen.

## **2.4 Konventionelle Dichtemessungen an marinen Sedimenten**

Nach der Kernöffnung werden im Rahmen der allgemeinen Probenbearbeitung konventionelle Dichtemessungen an Einzelproben durchgeführt. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen sind für den Vergleich mit Dichten aus DMS-Untersuchungen und deren Bewertung sehr wertvoll. Die eigentlichen Meßgrößen für die Feuchtraumdichtebestimmung an Einzelproben sind Naßgewicht, Trockengewicht und Trockenvolumen. Nach Entnahme der Probe am geöffneten Sedimentkern mit einer abgeschnittenen Spritze (Durchmesser: 1cm) wird mit einer Laborwaage das Naßgewicht bestimmt. Die Probe wird anschließend in einem Gefriertrockner zwei Tage getrocknet und anschließend wiederum gewogen, um das Trockengewicht zu bestimmen. Die darauffolgende Trocken-Volumenbestimmung wird mit einem Pycnometer durchgeführt. Das Meßprinzip des Pycnometers beruht auf der Messung eines Gasvolumens, das von der Probe in

einem Meßzylinder verdrängt wird. Über den Vergleich von Naß- und Trockengewicht kann, unter Annahme eines bestimmten Salzgehalts des Porenwassers, der absolute Wasser- und Salzgehalt der Probe bestimmt werden. Mit den ermittelten Größen kann nun die Feuchtraumdichte berechnet werden:

$$\rho = \frac{m_{\text{trocken}} + m_{\text{w}}}{V_{\text{trocken}} + V_{\text{Salz}} + V_{\text{Porenlsg.}}} \quad (5)$$

Die Masse des evaporierten Wassers, das Salzvolumen und das Porenlösungsvolumen lassen sich aus dem Wasser- und Salzgehalt bestimmen. Etwas ausführlicher ist die Dichtebestimmung an Einzelproben bei Gealy (1971), Melles (1991) und bei Schmiedl (1990) beschrieben. Für die Dichtebestimmung an Einzelproben kamen übliche Geräte aus dem geologischen Laborbereich zum Einsatz. Dies sind Laborwaagen zur Bestimmung von Naß- und Trockengewichten, ein Gefriertrockner (Typ Lyoval GT2, Leybold-Heraeus) sowie ein Pycnometer (Beckmann Air Comparison Pycnometer, Model 930) zur Bestimmung des Trockenvolumens der Sedimentprobe.

Außer diesen konventionellen Dichtemessungen an geöffneten Kernen wurden auch Wägungen der ungeöffneten Kernsegmente vorgenommen, um die mittlere Dichte ganzer Kernsegmente zu bestimmen. Hierzu wurden die Kernsegmente unmittelbar nach der DMS-Messung mit einer gewöhnlichen Personenwaage (Auflösung 100g) gewogen. Mit dem Ergebnis und der Kenntnis des Kernvolumens konnte nun eine mittlere Sedimentdichte für jedes Kernsegment bestimmt werden. Um nur das Nettogewicht der Sedimentkerne zu berücksichtigen, mußten die Gewichte des PVC-Liners und der Kappen abgezogen werden (siehe auch Kapitel 3.4).

### **3 Durchführung von Dichtemessungen**

In diesem dritten Kapitel wird zunächst gezeigt, wie Messungen mit dem Dichtemeßsystem ablaufen. Anhand einiger Experimente sollen anschließend die statistischen Eigenschaften des Systems verdeutlicht werden. Nach der Vorstellung verschiedener Meßstrategien und einiger Auswertemöglichkeiten folgt der sehr wichtige Vergleich zwischen Dichtedaten, die mit dem hier vorgestellten Dichtemeßsystem bestimmt wurden, und solchen, die auf konventionelle Weise durch Wägungen und Volumenbestimmungen an Einzelproben aus den geöffneten Kernen ermittelt wurden. Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse von Dichtemessungen mit dem Dichtemeßsystem an zehn Sedimentkernen sowie von Feinuntersuchungen an ausgewählten Kernabschnitten schließen dieses Kapitel ab.

#### **3.1 Meßsteuerung, Datenerfassung und Meßablauf**

Im folgenden wird der Ablauf von Dichtemessungen mit dem Dichtemeßsystem an Sedimentkernen skizziert. Nach der Beschreibung des Steuerungs- und Datenerfassungsprogramms wird der allgemeine Meßablauf beschrieben.

##### **3.1.1 Meßsteuerung und Meßdatenerfassung**

Zur Durchführung der Messungen mit dem DMS wurde das Programmpaket DICHTe erstellt. Programmiersprache ist Asyst, eine Anwendersoftware speziell zur Meßdatenerfassung. Asyst ist der Sprache "Forth" ähnlich, Grundelement sind die sogenannten Colon-Befehle, mit denen einzelne Arbeitsschritte abschnittsweise aufgerufen und abgearbeitet werden können. Außer dem Hauptprogrammfile "dichte.gnn" besteht das Paket DICHTe noch aus dem Kenndatenfile "dichte.par", dem Nullmessungsdatenfile "dichte.nul" und dem Kalibrierdatenfile "dichte.kal". Für die Kommunikation des PC mit den Peripheriegeräten HP3421A und PI-C560 via IEEE-488 wurden zwei Files mit den jeweiligen Befehlssätzen erstellt ("hpaqu.gnn" und "3kpos.gnn").

Die Programmoberfläche besteht aus verschiedenen Menüs, auf die in dem im folgenden beschriebenen Programmablauf näher eingegangen wird. In Abbildung 3.1 wird die Programmstruktur zudem bildlich dargestellt. Nach dem Start des Programms erscheint ein Hauptmenü, von dem aus die Untermenüs "Kenndaten", "Messung", "Processing" und "Darstellung" aufgerufen werden können. In einem gewöhnlichen Programmablauf wird nach Eingabe der Kenndaten des Sedimentkerns im Untermenü "Messung" die Meßart ausgewählt. Hier stehen "Verschiebung", "Drehung", "Drehung und Verschiebung" und "Nullmessung" zur Wahl. Nach der Messung, die die Abspeicherung der Rohdaten beinhaltet, können die Daten im "Processing"-Menü zu Feuchtraumdichtewerten umgerechnet werden. In diesem Menü besteht außerdem die Möglichkeit, Meßdaten von verschiedenen Segmenten eines Kerns zu einem Datenfile

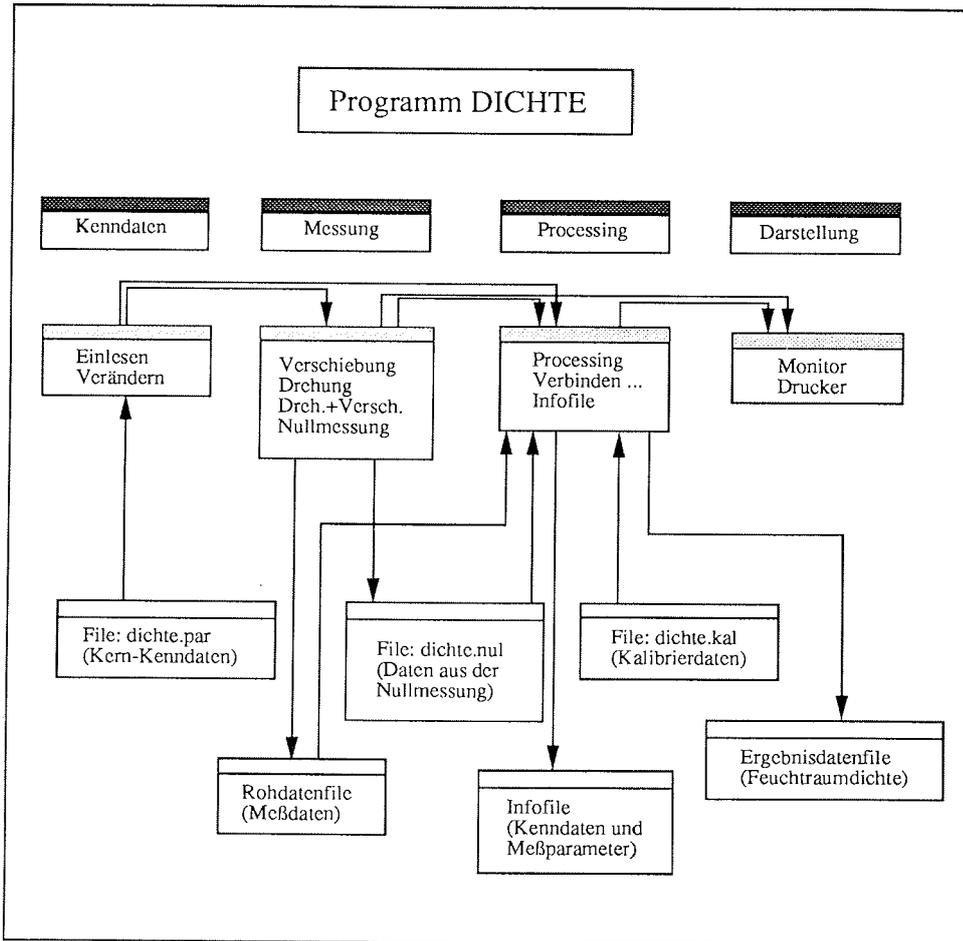


Abbildung 3.1: Struktur des Steuerungs- und Meßdatenerfassungsprogrammes dichte.gnn ("nn" steht für die jeweils neueste Versionsnummer des Programms). Eine detaillierte Beschreibung zum Programmablauf erfolgt im Text.

aneinanderzuhängen. Alle Kenndaten des untersuchten Kerns sowie die Meßparameter können in einem Infofile abgespeichert werden (Option "Infofile" im Processingmenü). Schließlich können die Ergebnisse im Menü "Darstellung" mit der Routine "Monitor" auf dem Bildschirm graphisch und mit der Routine "Drucker" auf demselben als Zahlenwerte dargestellt werden. Die Routinen zur Bearbeitung und Darstellung bereits gemessener Daten können auch ohne unmittelbar vorher durchgeführte Messung aktiviert werden, beispielsweise wenn mit früher gemessenen Rohdaten erneut Dichtewerte (z.B. mit einer anderen Processing-Porosität) berechnet werden sollen.

### 3.1.2 Ablauf der Messung

Vor der Darstellung verschiedener Meßstrategien wird hier der prinzipielle Meßablauf skizziert. Dieser ist im wesentlichen für die meisten Meßformen gleich, wobei Änderungen aller grundsätzlichen Parameter problemlos möglich sind.

Zunächst muß vor Beginn der Kernmessung eine sogenannte Nullmessung vorgenommen werden. Diese Nullmessung ist nicht vor jeder Segmentmessung notwendig, sollte aber spätestens nach zwei bis drei Wochen wiederholt werden, da sonst das Abklingen der Quellenaktivität oder Umwelteinflüsse (Temperatur) die Randbedingungen und damit auch die Nullmessungsgrößen verändert haben könnten. Generell ist es empfehlenswert, vor der Messung eines neuen Kerns eine Nullmessung zu machen. Unbedingt ist dies auch notwendig, wenn nach einer SL-Messung eine KOL-Messung durchgeführt wird und umgekehrt, da hier die Absorptionsmaterialien (PVC-Rohre) unterschiedlich sind. Bei der Nullmessung, die innerhalb des Programms "dichte.gnn" (siehe Kapitel 3.1.1) durchgeführt wird, bestimmt man den Absorptionswert in Luft plus PVC-Rohr ("Vollspannung") und den Spannungswert bei geschlossener Quelle ("Nullspannung"). Ersteres wird bewerkstelligt, indem ein leerer Liner (SL oder KOL, entsprechend der nachfolgenden Kernmessung) in das Dichtemeßsystem eingespannt und dann bei offener Quelle der Absorptionswert gemessen wird. Der Nullspannungswert wird anschließend bei geschlossener Quelle bestimmt. Beide Werte werden aus je 500 Einzelmessungen berechnet (Mittelwertbildung).

Vor Beginn der eigentlichen Messung eines Kernsegmentes wird der reale Tiefenmeßbereich (Kernanfang/Kernende) festgestellt. Die Sedimentkerne sind an ihren Enden mit Deckeln verschlossen, über dessen Rand und das anschließende Kernrohr wiederum Klebeband zur Abdichtung geklebt ist. Da eine Dichtemessung in diesem Kappen- und Klebebandbereich deutlich ungenauer als im sonstigen Kernbereich wäre, werden die Kernenden nicht mitvermessen. Die erhöhte Ungenauigkeit an den Kernsegmentenden wäre vor allem auf die verschlechterten Bedingungen für die Durchmesserbestimmung und hohen räumlichen Durchmessergradienten zurückzuführen. Die Gesamtqualität der Daten und Ergebnisse konnte durch diesen Verzicht auf einem deutlich höheren Niveau gehalten werden, als wenn die Bereiche mit Klebeband oder Kappen mitvermessen worden wären. Die Folge ist allerdings, daß an jedem Kernende ca. 8cm Kern unvermessen bleiben und somit Datenlücken entstehen. Dies ist auf den später dargestellten Dichteprofilen zu sehen.

Nun wird auf dem Kernliner die Tiefe markiert, bei der die Messung beginnen soll. Das Kernsegment wird in die Kernaufnahmen eingelegt und an die Startposition verfahren. Nach Eingabe der Kernparameter im Programm "dichte.gnn" und der entsprechenden Menüwahl kann die Messung beginnen. Es findet zunächst eine "Kernfahrt" zur Durchmesserbestimmung statt. Das Programm "dichte.gnn" informiert nach jeder Messung an einer bestimmten Position den Benutzer über den aktuellen Stand wie Meßpunkt-Nummer, Kerntiefe, Zählerstände der Schrittmotorsteuerung, Roh-Meßdaten über den Monitor. Ist die Durchmesserbestimmung beendet, wird die DMU zur Seite geklappt und der Kern nach einer Eingabe am PC zum Start zur Absorptionsmessung gefahren. Jetzt wird über die Löffel-GTI-Control Unit oder die Fernsteuerung der Verschluss des Quellenbehälters, in dem das umschlossene radioaktive Präparat gelagert ist, geöffnet. Nach einer Warmlaufzeit der Detektorseite (GRR) von einigen Minuten und dem Anschalten des Analogschreibers kann jetzt die Absorptionsmessung beginnen. Das Kernsegment wird wie bei der Durchmesserbestimmung entsprechend der vorgegebenen Verschiebungs- bzw. Drehinkremente verfahren. Ist die Messung beendet, wird die Quelle wieder geschlossen und die Rohdaten können prozessiert und dargestellt werden. Die Dichteberechnung geschieht zunächst in der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Art und Weise innerhalb des Programms "dichte.gnn" (siehe Kapitel 3.1.1). Gegenüber Formel (3) für die Dichtebestimmung muß jetzt noch eine meßtechnisch bedingte Größe ergänzt werden, dies ist die Nullspannung  $I_{0,g}$  am Löffel SMS-103A Gerät bei geschlossener Quelle. Diese Nullspannung muß von der Vollspannung (ohne Kern) und von der Meßspannung (mit Kern) abgezogen werden.  $I_{0,g}$  wird im Rahmen der Nullmessung mitgemessen und im "dichte.nul"-File und auch im Infofile (s.u.) abgespeichert. Außerdem muß vom gemessenen Kerndurchmesser die zweifache PVC-Stärke des PVC-Rohrs subtrahiert werden, da für die Dichteberechnung nur die durchstrahlte Sedimentsubstanz entscheidet. Die Formel für die Dichteberechnung lautet dann:

$$\rho = \frac{1}{-\mu \cdot d_{\text{kor}}}} \cdot \ln \left( \frac{I - I_{0,g}}{I_0 - I_{0,g}} \right) \quad (6)$$

Als Processing-Porosität (PP) für die Berechnung von  $\mu$  (siehe Gleichung 4) wird in Abhängigkeit von der Kernart 0.5 ("terrigene Kerne"), 0.7 ("biogene Kerne") oder 0.6 ("Mischkerne") angesetzt. Diese Werte wurden aus Erfahrungen früherer Messungen spezifischer elektrischer Widerstände an marinen Sedimenten gewählt, die ebenfalls Schlußfolgerungen auf die Porosität zulassen (siehe Kapitel 4.4.1). Die ermittelten Feuchtraumdichten werden gemeinsam mit den Rohdaten dann in einem Dichtedatenfile abgespeichert. Die zugehörigen Headerdaten stehen im entsprechenden Infofile (siehe Kapitel 3.1.1). Nach der graphischen Darstellung der Dichtedaten auf dem Bildschirm werden mit dem angeschlossenen Nadeldrucker Protokollausdrucke der Meßdaten und Infofiles erstellt. In Abbildung 3.2a-c sind als Beispiel Ausschnitte aus einem Meßdatenfile und einem prozessierten File mit einer kurzen Erklärung der einzelnen Spalten sowie ein Infofile mit allen wichtigen Informationen zu einem Kern und der entsprechenden Messung dargestellt.

1	.1000	.0000	1849.7000	.3272	.0017
2	.1050	.0000	1855.4000	.3347	.0017
3	.1100	.0000	1854.1000	.3400	.0026
4	.1150	.0000	1853.2000	.3446	.0022
5	.1200	.0000	1852.2000	.3456	.0026
6	.1250	.0000	1851.9000	.3468	.0020
7	.1300	.0000	1851.8000	.3471	.0034

**Abbildung 3.2a:** Ausschnitt aus einem Meßdatenfile; in den einzelnen Spalten stehen: 1. fortlaufende Meßpunkt-Nr., 2. Kerntiefe in m, 3. Drehwinkel gegenüber 0-Linie in °, 4. DMU-Widerstand in Ω, 5. Meßspannung aus der Absorptionsmessung in V, 6. Standardabweichung zu den Einzelmessungen des Mittelwerts (5.).

1	.1000	.0000	1849.7000	.3272	.0017	119.7439	1.7148
2	.1050	.0000	1855.4000	.3347	.0017	119.8900	1.6892
3	.1100	.0000	1854.1000	.3400	.0026	119.8567	1.6733
4	.1150	.0000	1853.2000	.3446	.0022	119.8336	1.6596
5	.1200	.0000	1852.2000	.3456	.0026	119.8080	1.6570
6	.1250	.0000	1851.9000	.3468	.0020	119.8003	1.6535
7	.1300	.0000	1851.8000	.3471	.0034	119.7977	1.6526

**Abbildung 3.2b:** Ausschnitt aus einem prozessierten Datenfile. Die Spalten 1 bis 6 entsprechen dem Meßdatenfile (s.o.), in der siebten Spalte steht der berechnete Kerndurchmesser in mm und in der achten Spalte steht die berechnete Dichte für den jeweiligen Meßpunkt in g/cm<sup>3</sup>.

```

Infofile zu Messfile : 1723-101.den

Kernnummer       : 1723-1
Filename         : 1723-101.den
Expedition       : ARK V/3b
Schiff           : POLARSTERN
Gebiet           : off Scoresby Sund
Datum/Zeit (Kern) : 11.08.1988/12:48
geogr. Breite/Laenge : 70 7.10 N 19 59.93 W
Wassertiefe (m)  : 283.
Kernart          : s1
Eindringtiefe (m) : 12.
Max. Kernlaenge (m) : 0.85
Kernoberkante (m) : 0.10
Kernunterkante (m) : 0.76
m. Kerndurchmesser (mm) : 125.
Messung          : Dichte
Kommentar        : Standardmessung
sensitivity (o/oo) : 100
low pass (s)     : 0.3
Messort und -datum : AWI 24.04.1992
Bearbeiter       : S. Gerland

Messrate (abso)      : 100.
Pro-Porositaet      : .5000
Vollspannung (V)    : 1.7072
Nullspannung (V)    : .0020
Receiver-Temperatur Messbeginn (Grad C) : 25.0000
Receiver-Temperatur Messende (Grad C) : 25.1000

```

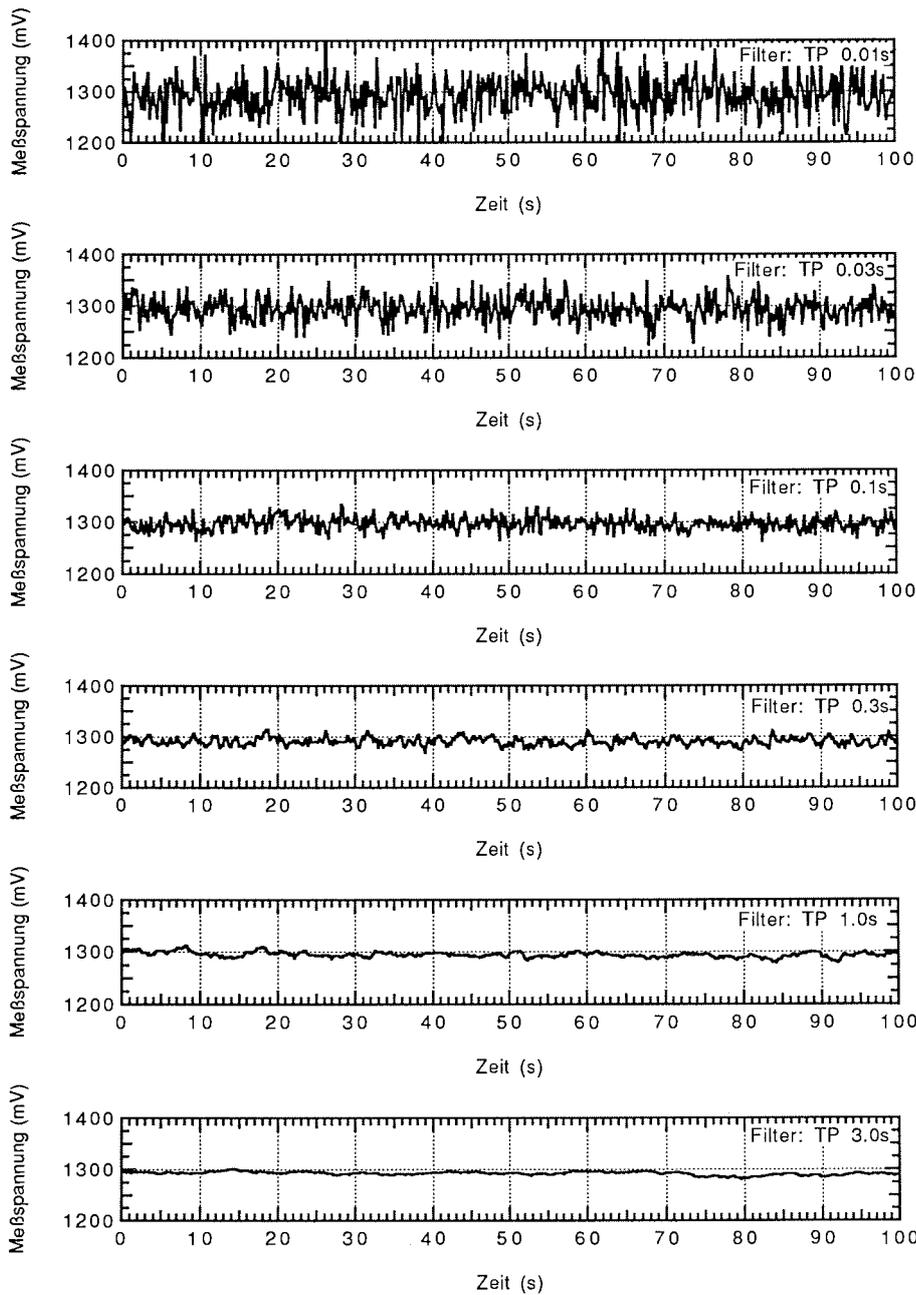
**Abbildung 3.2c:** Inhalt eines Infofiles; es enthält alle wichtigen Stationsinformationen zu einem Kern, die auch im Kenndatenmenü des Programms "dichte.gnn" stehen, außerdem die wesentlichen Meß- und die Processing-Parameter.

## **3.2 Statistische Eigenschaften des Dichtemeßsystems und Fehlerbetrachtung**

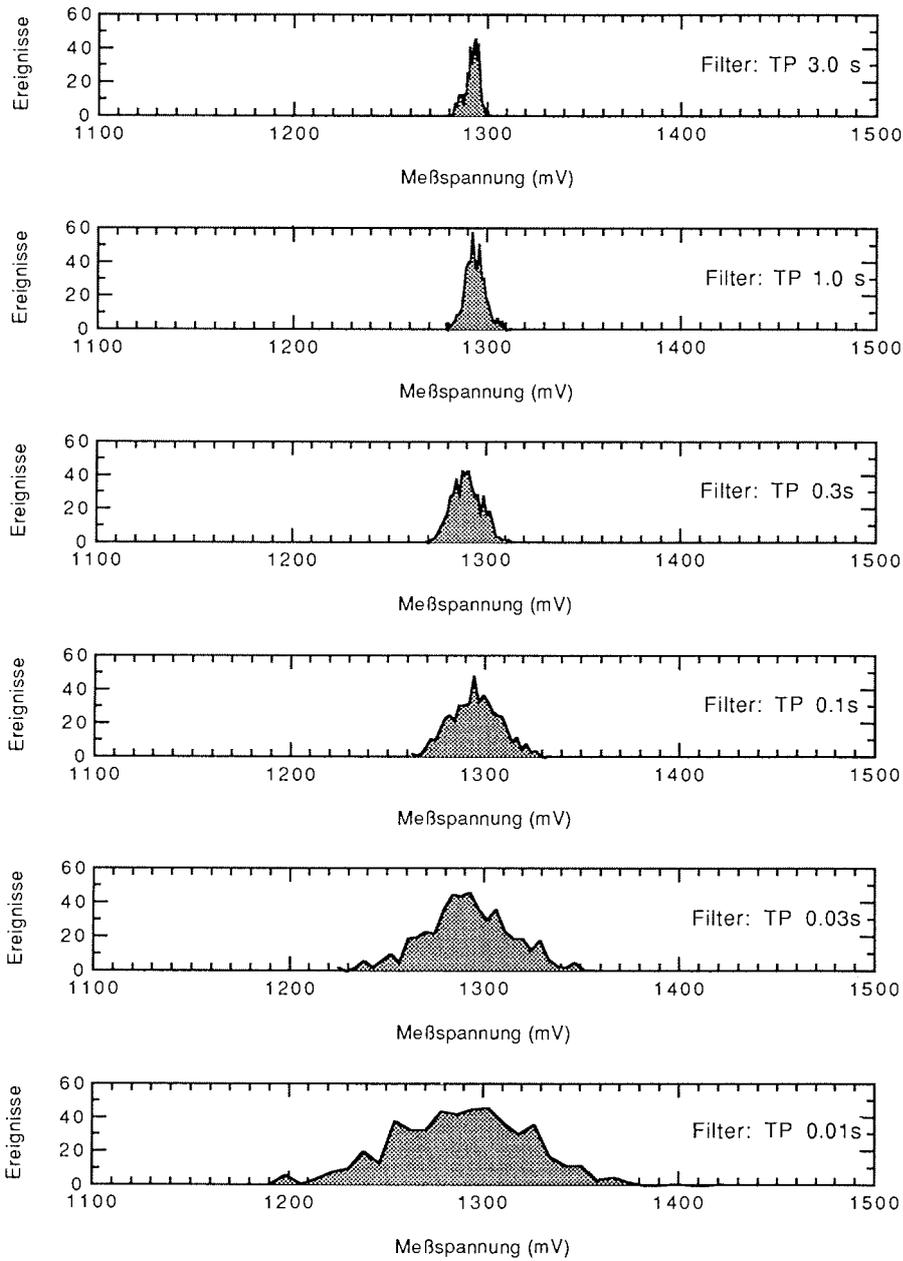
Die im folgenden beschriebenen Experimente dienen zur Untersuchung der Meßeigenschaften und Fehlerbereiche des Dichtemeßsystems. Schwerpunkte sind die räumliche Auflösung der Meßapparatur sowie die Absolutwertgenauigkeit der Dichtedaten. Für die Untersuchung der Meßeigenschaften sind Messungen an Probekörpern, die in Geometrie und Beschaffenheit definiert und bekannt sind, besonders geeignet. Um Fehler besser eingrenzen und Meßeffekte deutlicher erkennen zu können, wurden für die beschriebenen Versuche Materialien einheitlicher Dichte bzw. Geometrie herangezogen.

### **3.2.1 Zeitliche Statistik der Absorptionsmessung**

Um zunächst ein Bild von den Übertragungs- und Meßeigenschaften des Detektor- und Meßsystems zu gewinnen, wurden stationäre Zeitreihenmessungen mit verschiedenen Filtereinstellungen am SMS-103A-Gerät durchgeführt. Bereits die erhaltenen Zeitreihen geben ein deutliches Bild von der Wirkungsweise der Filterungen (Abbildung 3.3). Um nun die optimale Einstellung für die Messungen an Sedimenten zu finden, wurden einerseits die Verteilungen der Meßwerte aus den stationären Messungen und andererseits die Filterparameter berücksichtigt. Bei kernphysikalischen Vorgängen entsprechen die beobachteten Verteilungen sogenannten Poisson-Verteilungen (Riezler und Kopitzki, 1963). Dies wird auch bei Betrachtung der gemessenen Verteilungskurven deutlich (Abbildung 3.4). Je länger die Zeitkonstante des Filters (bzw. je tiefer die Grenzfrequenz) desto kleiner wird die Halbwertsbreite der Verteilungskurve. Die Vorteile eines möglichst tieffrequenten Tiefpasses sind offensichtlich, die Zahl der Einzelmessungen an einem Meßpunkt kann durch diese "online"-Mittelung reduziert werden. Auf der anderen Seite kann ein Filter mit zu großer Zeitkonstante den Wert des Meßpunktes, der der aktuellen Messung vorausgegangen ist, in den aktuellen Meßwert "verschmieren", da das vorherige Signal möglicherweise dann noch nicht ganz abgeklungen ist. Bei einer Zeitkonstante von drei Sekunden und Kernfahrzeiten von einer Sekunde wäre dies der Fall. Um nun dem zuletzt genannten Effekt aus dem Weg zu gehen, und aber auch möglichst schmale Verteilungskurven der Einzelwerte zu haben, wurde das Filter mit einer Zeitkonstante von 0.3s als Standard für die Sedimentkernmessungen ausgewählt. Bei einer Einstellung von 0.3s können (sehr geringe) Anteile während des Endes der Kernfahrt dem aktuellen Meßwert überlagert sein (geringfügige räumliche Verschmierung zwischen zwei Werten). Dies verringert die Flankensteilheit der Übertragungsfunktion geringfügig und wird in Kauf genommen. Bei näherer Betrachtung des Frequenzgehalts der Signale aus den Zeitreihen fällt auf, daß durchaus auch Fluktuationen mit Frequenzen tiefer als 1Hz vorkommen. Bei der Wahl der Länge des Zeitraums, in dem die Meßwerte an einem Punkt gemessen werden, muß nun darauf geachtet werden, daß er nicht so kurz ist, so daß nur hochfrequente Schwankungen in ihm registriert würden, sondern auch die etwas tieffrequenteren. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit war die Meßdauer an einem Meßpunkt 4 Sekunden bei 100 registrierten Spannungswerten. Somit konnte auch den Variationen mit etwas tieferen Frequenzen Rechnung getragen werden.



**Abbildung 3.3:** Sechs stationär registrierte Zeitreihen mit den möglichen Tiefpaßfiltereinstellungen am SMS-103A-Gerät. Es wurden jeweils 500 Meßwerte über 100 Sekunden registriert. Die Empfindlichkeitseinstellung betrug 350‰, im Strahlengang befand sich ein PVC-Kern ( $\varnothing=120\text{mm}$ ).



**Abbildung 3.4:** Verteilungskurven der Spannungswerte zu den Zeitreihen in Abbildung 3.3. Die jeweiligen Filtereinstellungen sind in den Graphiken vermerkt.

### 3.2.2 Stufenkernmessungen

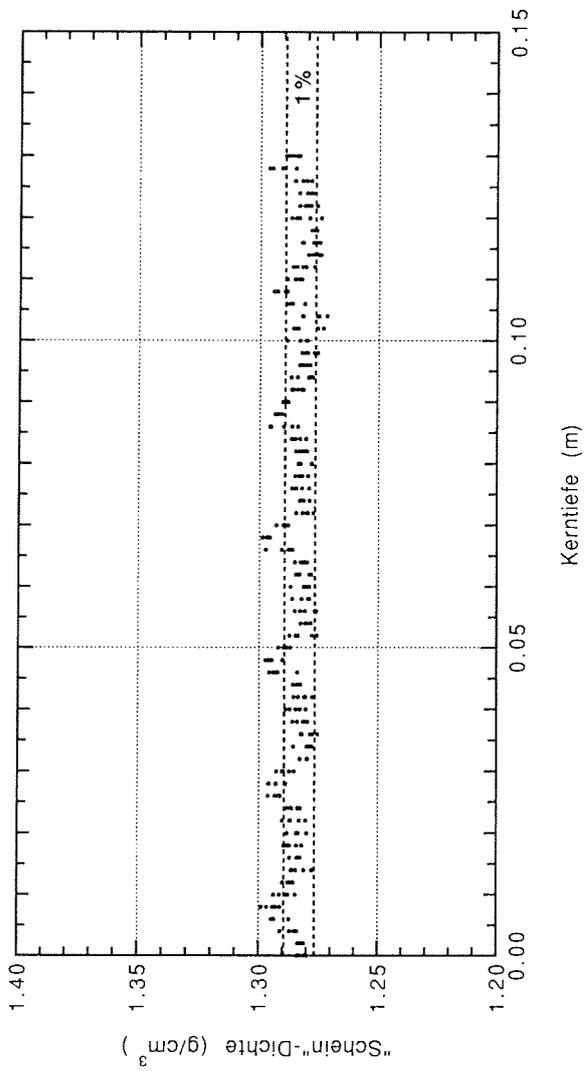
Die für die Kalibrierung der Durchmessermeßeinheit (DMU) aus PVC angefertigten Stufenkerne (siehe Kapitel 2.2.1) konnten auch für ein weiteres Experiment zur Untersuchung der Qualität der DMU, deren Kalibrierung und der Reproduzierbarkeit der Durchmesserwerte dienen. Da das Rohmaterial der Stufenkerne als nahezu homogen anzusehen ist, sollte eine Dichtemessung des Kerns unter Berücksichtigung des jeweiligen Durchmessers über alle Stufen einen mehr oder weniger gleichen Dichtewert ergeben. Dieser Dichtewert muß zwar, bei Unkenntnis des genauen Massenabsorptionskoeffizienten, nicht dem Absolutdichtewert des PVC-Materials entsprechen, er sollte aber immer einen ähnlichen Wert annehmen. Abweichungen sind in den Übergangsbereichen zwischen den einzelnen Stufen, also an den Absätzen, zu erwarten. Hier führen die Strahlbreite und die Steigung des Absatzes zu Verhältnissen, bei denen eine eindeutige Dichtebestimmung mit Gleichung (3) nicht mehr möglich ist. Abbildung 3.5 zeigt die Dichtemessung am Kolbenlot-Stufenkernsegment. Der Stufenkern wurde in 90°-Inkrementen rotiert, so daß in jeder Tiefe fünf Dichtemessungen durchgeführt wurden. (0° bis 360°). Es ist zu sehen, daß die genannten Annahmen zutreffen. Mit Ausnahme der Übergangsbereiche (hohe räumliche Durchmessergradienten) ist der ermittelte Dichtewert über den gesamten Meßbereich innerhalb 1% konstant. Die gestrichelten Linien in Abbildung 3.5 geben den Bereich  $\pm 0.5\%$  um  $1.283\text{g/cm}^3$  an.

### 3.2.3 Glasplattenmessungen

Die Notwendigkeit von Experimenten mit Körpern bekannten Materials und bekannter Dimensionen wurde bereits angesprochen. Bei der Verwendung besonders homogener Materialien mit konstanten geometrischen Dimensionen können die Meßeigenschaften des DMS besonders gut untersucht werden. Für diesen Zweck bietet sich ein Versuch mit Glas an. Moderne Herstellungsverfahren garantieren sehr kleine Toleranzen in der Homogenität des Materials sowie in der Dicke (die größten Dickenvariationen der für diesen Versuch beschafften Glasplatte betragen nach eigenen Messungen  $\pm 25\mu\text{m}$ ). Mit dem im folgenden vorgestellten Experiment sollen die bisher dargestellten Erkenntnisse zur Auflösung und zur Strahlgeometrie weiter vertieft werden.

Nun zur Idee des Experimentes: Eine Glasplatte wird im Strahlengang des Dichtemeßsystems definiert rotiert und Absorptionsmessungen in Abhängigkeit vom Drehwinkel durchgeführt. Je nach Rotationswinkel verändert sich die durchstrahlte Querschnittsfläche bzw. das durchstrahlte Glasvolumen. Die Meßergebnisse sollen mit theoretischen Überlegungen und Rechnungen verglichen werden.

Für die Durchführung des Experiments wurde eine 12mm starke Glasplatte (Fläche  $0.1\text{m} \times 0.26\text{m}$ ) beschafft und an den schmalen Enden mit zwei PVC-Scheiben versehen, um sie mit den Standard-Kernhalterungen einspannen zu können. Eine Dickenmessung der Platte mit der Durchmessermeßeinheit ist nicht möglich, aber auch nicht notwendig. Die Messung reduziert sich somit auf eine reine Gammastrahlabsorptionsmessung. Im folgenden wird das Problem zweidimensional betrachtet, statt von einem Glasvolumen wird somit von einer Glasfläche gesprochen.



**Abbildung 3.5:** DMS-Messung am KOL-Stufenkern aus PVC mit offener Quelle. Es wurden scheinbare Dichten mit Gesteins-Massenabsorptionskoeffizienten berechnet, um den Einfluß der unterschiedlichen Durchmesser auf die Messung zu berücksichtigen. Für jede Kerntiefe wurden fünf Meßwerte registriert (volle Rotation in 90°-Inkrementen). Die gestrichelten Linien geben den Fehlerbereich  $\pm 0.5\%$  um  $1.283\text{g/cm}^3$  an.

Für einen Vergleich der Messungen mit Modellrechnungen wurde das Problem sogar auf ein eindimensionales Modell reduziert (strahlengeometrische Betrachtung). Somit wurde also kein durchstrahltes Volumen, sondern lediglich ein vom Strahl "durchlaufener Weg" berechnet. Es ist klar, daß damit gewisse Abweichungen zwischen Meßergebnis und Modell vorprogrammiert sind, jedoch sollte der prinzipielle Verlauf der Absorption in Abhängigkeit vom Drehwinkel reproduziert werden können.

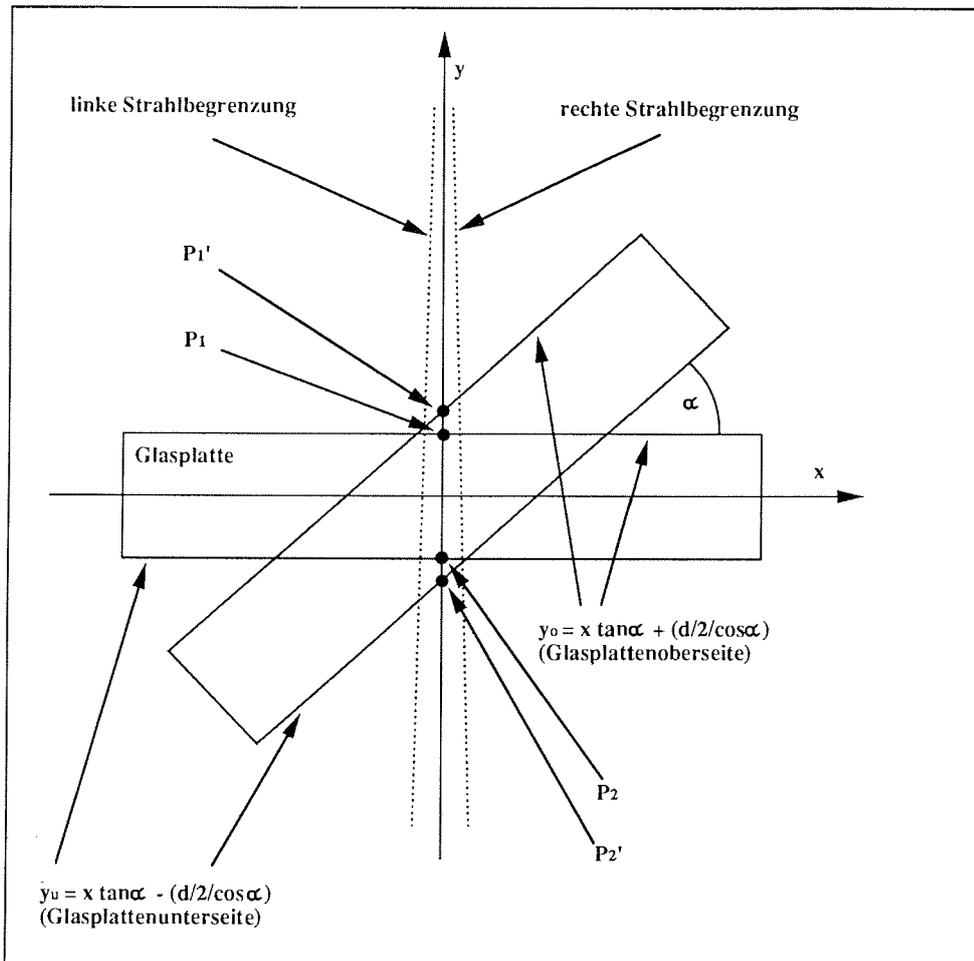
Abbildung 3.6 zeigt die prinzipielle Meßanordnung im Querschnitt. Die radioaktive Quelle befindet sich über dem Bild, der Detektor darunter. Die Glasplatte ist als quaderförmige Struktur in zwei Positionen eingezeichnet, zum einen in einer Horizontallage (minimale durchstrahlte Fläche), zum anderen in einer Schräglage. Die Platte rotiert um den in der Skizze eingezeichneten Koordinatenursprung. Für die Messung wurde ein Drehwinkelinkrement von  $0.6^\circ$  gewählt. Der von oben nach unten führende Gammastrahl ist mit den gepunkteten Linien angedeutet, die Strahlaufweitung von 2mm am Quellenbehälter auf 6mm am Kollimator bzw. Detektor/GRR ist hier nicht maßstabsgerecht eingezeichnet, der wirkliche Öffnungswinkel des Gammastrahls beträgt nur ca.  $0.9^\circ$ . Entscheidend für die Absorption ist das Schnittvolumen zwischen Strahlkegel und Glasplatte bzw. bei strahlengeometrischer Betrachtung die Weglänge  $P_1P_2$ . Diese Weglänge, die im folgenden  $w$  genannt werden soll, wurde nun für das Modell berechnet. Hierzu wurden zunächst die Geradengleichungen in Abhängigkeit vom Drehwinkel für Ober- und Unterseite der Glasplatte bestimmt:

$$y_o = x \cdot \tan \alpha + \frac{d/2}{\cos \alpha} \quad \text{Oberseite} \quad (7)$$

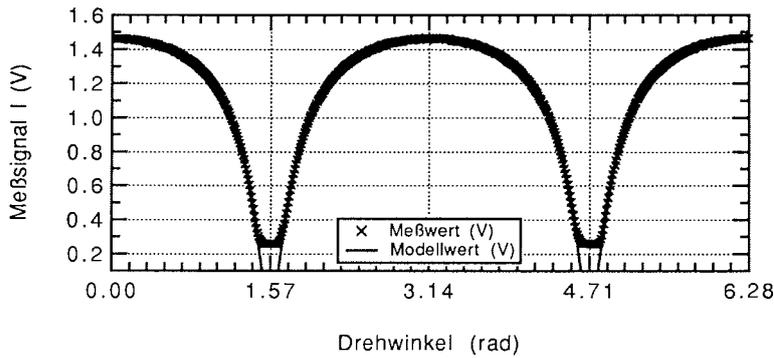
$$y_u = x \cdot \tan \alpha - \frac{d/2}{\cos \alpha} \quad \text{Unterseite} \quad (8)$$

In den Gleichungen ist  $\alpha$  der Rotationswinkel der Glasplatte,  $d$  deren Dicke. Der erste Term in beiden Gleichungen beschreibt die Steigung der Glasoberseite bzw. Glasunterseite im Koordinatensystem. Der jeweils zweite Term ist der einmal positive und einmal negative  $y$ -Achsenabschnitt der Geraden. Dieser Abschnitt kann mit dem Sinussatz für rechtwinklige Dreiecke bestimmt werden, indem man das Lot auf der Glasplattenoberseite durch den Rotationspunkt bzw. Koordinatenursprung fällt. Das resultierende Dreieck, gebildet aus dem Schnittpunkt Glasplattenoberseite, Koordinatenursprung und  $P_1$  enthält einen rechten Winkel sowie den Winkel  $(90^\circ - \alpha)$ , außerdem die Strecken  $d/2$  und  $w/2$ . Um nun die  $y$ -Koordinaten der Schnittpunkte  $P_1$  und  $P_2$  mit der  $y$ -Achse zu bestimmen, setzt man  $x$  gleich 0. Die Differenz beider  $y$ -Koordinaten ergibt die gesuchte Weglänge  $w$  zwischen  $P_1$  und  $P_2$ :

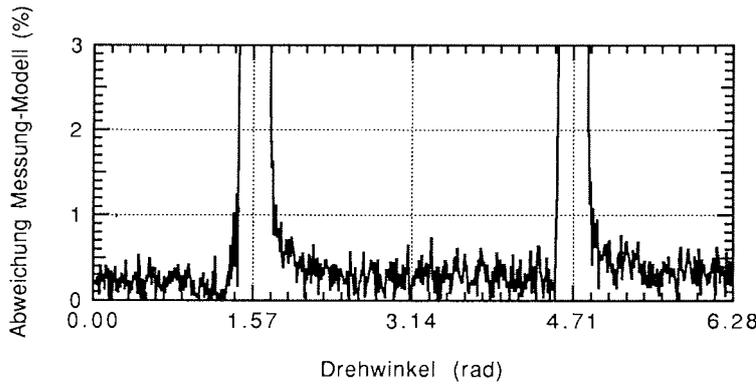
$$w = \frac{d}{\cos \alpha} \quad (9)$$



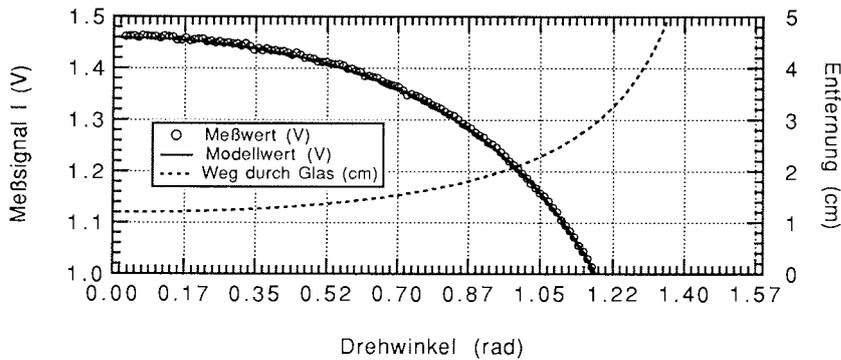
**Abbildung 3.6:** Prinzipielle Meßanordnung des Glasplattenexperimentes im Querschnitt. Es sind zwei mögliche Positionen für die Rotationsposition der Glasplatte eingezeichnet.



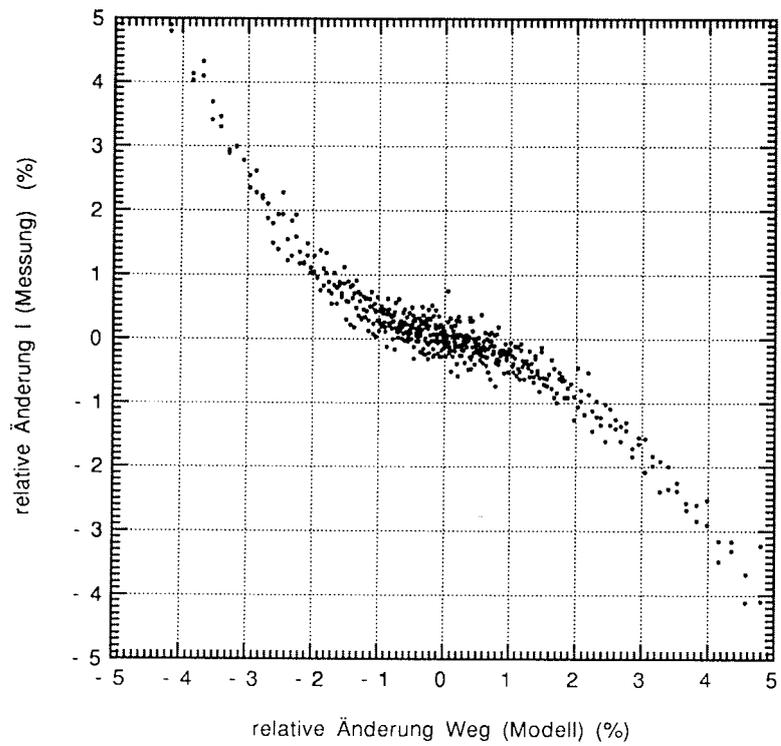
**Abbildung 3.7:** Ergebnis aus Messung und Modell zum Glasplattenexperiment im Überblick. Aufgetragen sind die Meßspannungen  $I$  gegen den Drehwinkel der Glasplatte für eine vollständige Rotation ( $360^\circ$  oder  $2\pi$ ).



**Abbildung 3.8:** Abweichung zwischen Messung und Modell in %. Um  $90^\circ$  und  $270^\circ$  steht die Glasplatte senkrecht und die Meßwerte unterscheiden sich von den Modellwerten deutlich, da hier die Modellkonfiguration nicht mehr besteht. In den übrigen Bereichen liegen die Abweichungen bei maximal 0.8%.



**Abbildung 3.9:** Gegenüberstellung von gemessenen Restspannungen mit der 12mm-Glasplatte und berechneten Modellwerten aus der Meßkonfiguration für eine Vierteldrehung ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ). Außerdem ist der vom Strahl im Glas zurückgelegte Weg aufgetragen.



**Abbildung 3.10:** Relative Änderung des Meßsignals  $I$  (%) in Abhängigkeit von der relativen Änderung des Weges  $w$  (%) (aus dem Modell berechnet).

Dieser Weg wurde nun für Winkel von 0 bis 360° und die Glasplattendicke von 12mm berechnet. Mit Hilfe von Gleichung (2) wurden dann synthetische Spannungswerte berechnet, die direkt mit Meßwerten verglichen werden können. Bei dieser Berechnung wurde als Dichte ein mittlerer Wert für Quarz mit 2.65g/cm<sup>3</sup> (Schön, 1983) eingesetzt. Der Massenabsorptionskoeffizient wurde empirisch über den Vergleich mit den Meßdaten zu 0.073cm<sup>2</sup>/g angepaßt. Dieser Wert liegt nahe beim  $\mu$ -Wert für Gesteine (0.0774cm<sup>2</sup>/g). Abbildung 3.7 zeigt zunächst das Ergebnis des Experiments im Überblick. Dargestellt sind die gemessenen Spannungswerte (Kreuze) gegen den Drehwinkel (hier im Bogenmaß) über eine volle Drehung (2 $\pi$  bzw. 360°). Die Spannungswerte aus dem beschriebenen Modellansatz sind als durchgezogene Linie miteingezeichnet. Schon hier fällt eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung auf. Die Güte dieser Übereinstimmung wird in Abbildung 3.8 deutlich. Hier sind die relativen Abweichungen zwischen Messung und Modell gegen den Drehwinkel aufgetragen. Die Abweichungen liegen im Mittel bei 0.3% (ausgenommen die Bereiche, in denen die Glasplatte sehr steil bzw. senkrecht steht). In Abbildung 3.9 ist dann der Bildausschnitt von 0 bis 90° (bzw. 0 bis 1.57 rad) vergrößert zu sehen. Zusätzlich ist auch noch der für das Modell berechnete Weg  $w$ , den der Strahl im Glas zurücklegt, mit eingezeichnet (gestrichelte Linie). Abbildung 3.10 schließlich zeigt die relative Änderung der Meßspannung  $I$  zwischen zwei benachbarten Meßpunkten (Drehwinkelinkrement 0.6°) aufgetragen gegen die relative Wegänderung. Anhand dieser Graphik wird deutlich, daß sich Wegänderungen >1% in jedem Fall in der Absorptionsmessung niederschlagen (1% sind im Fall der Glasplatte über einen großen Bereich weniger als 0.2mm). Folgendes Gedankenexperiment soll dieses Ergebnis veranschaulichen: Würde man ein Buch mit 100 Seiten (ohne Einband) mit dem Dichtemeßsystem durchstrahlen, so könnte man also anhand des Ergebnisses dieses Buch eindeutig von einem mit 99 oder 101 Seiten unterscheiden und auch bei entsprechender Kalibrierung die Seitenzahl eines unbekanntes Buchs mit ca. 100 Seiten bestimmen. Es konnte also sehr anschaulich gezeigt werden, daß mit dem Dichtemeßsystem bereits verhältnismäßig kleine Dickenänderungen detektiert werden können. Die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell ist ferner ein Zeichen dafür, daß eine strahlengeometrische Betrachtung ("Weg" statt "Fläche" oder "Volumen") keine inakzeptablen Fehler im Ergebnis bewirkt und somit eine Dichteberechnung mit den genannten Vereinfachungen zu verantworten ist.

### 3.2.4 Experimente zum Abbildungsverhalten des Dichtemeßsystems

Zur Untersuchung des räumlichen Abbildungsverhaltens des Dichtemeßsystems werden hier noch zwei weitere Experimente an künstlichen Kernen vorgestellt. An diesen künstlichen Kernen können Anomalien isoliert ohne Störeinflüsse untersucht werden. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Versuche soll später die Interpretation von Sedimentkerndaten erleichtert werden.

### **a. PVC-Kern mit Spalt und Stufe**

Um die Meßeigenschaften des Dichtemeßsystems an Sedimenthorizontwechseln zu verdeutlichen, wurde eine Messung an einem PVC-Körper durchgeführt, der einen ca. 2mm schmalen Spalt in der Strahlebene und eine Stufe identischen Dichtekontrastes enthält (siehe Skizze in Abbildung 3.11). Der künstliche Kern besteht im Zentrum aus einer Stahlstange (Durchmesser 12mm), die mehrere zylindrisch geformten PVC-Teile unterschiedlichen Durchmessers trägt. Wegen der ungefähr doppelt so großen Strahlbreite im Vergleich zur Spaltbreite ist im Bereich des Spaltes bei der Messung ein kleineres, etwa halb so großes Signal gegenüber dem bei der Stufe zu erwarten.

In Abbildung 3.12 ist nun das Meßergebnis aufgetragen, wobei hier keine Dichten, sondern Meßspannungen, also reine Rohdaten, dargestellt sind. Rein qualitativ entspricht das Ergebnis den Erwartungen, das Signal beim Spalt ist kleiner als das im oberen Abschnitt klar zu erkennende Stufensignal. Der Meßpunktabstand beträgt 1mm, die Anzahl der Werte im Übergangsbereich der Stufe sind mit der mittleren Strahlbreite von ca. 4mm zu erklären, ebenso die Zahl der vom Spalt "beeinflussten" Datenpunkte. Es bleibt die Frage nach dem Absolutverhältnis der Signale an Stufe und Spalt zueinander. Daß das Signal beim Spalt, setzt man das Niveau mit Stahlstange und dünnem PVC-Zylinder als "Null" an, etwas mehr als die Hälfte des Signals an der Stufe beträgt, könnte damit erklärt werden, daß der Spalt geringfügig breiter als 2mm ist, oder daß die Strahlbreite geringfügig geringer als 4mm ist (im der Quelle näheren Abschnitt, also beim Auftreffen des Strahls auf den Kunstkern, ist das ja der Fall). Welche Erklärung auch immer die richtige ist, dieses Experiment konnte sehr anschaulich die zwar sehr scharfe Übertragungsfunktion (Halbwertsbreite ca. 3mm), aber doch deren "endliche Flankensteilheit" verdeutlichen. Dem Ergebnis sollte auch bei der späteren Betrachtung von Messungen an Sedimenten Beachtung geschenkt werden.

### **b. PVC-Kern mit asymmetrisch positioniertem Loch**

Um das räumliche Auflösungsvermögen des Dichtemeßsystems bei der Untersuchung von Inhomogenitäten mit Hilfe einer Kernrotation zu untersuchen und zu verdeutlichen, wurde ein PVC-Kern mit einem Loch parallel zur Kernachse angefertigt (siehe Skizze in Abbildung 3.13). In Sedimentkernen können entsprechende Inhomogenitäten als Dropstones (IRD) oder auch als Bioturbationen in Erscheinung treten.

Der Kern hat einen Durchmesser von 125mm, das (auch befüllbare) Loch ist 30mm groß und ebensoweit von dessen Zentrum entfernt. Somit erscheint das Loch bei strahlengeometrischer Betrachtung unter einem Winkel von ca.  $60^\circ$  (siehe Abbildung 3.13). Für das hier gezeigte Meßbeispiel wurde das Loch ungefüllt gelassen, d.h. der Dichtekontrast ist Luft/PVC. Die Messungen wurden über  $360^\circ$  im  $6^\circ$ -Abstand durchgeführt. Abbildung 3.14 zeigt das Meßergebnis. Erwartungsgemäß zeichnet sich das Signal, bedingt durch das luftgefüllte Loch, ab. Da der Anteil Luft des Gesamtstrahlweges aufgrund des kreisförmigen Querschnittes des Lochs nur in einem Punkt maximal wird, ist das Ergebnis im Anomaliebereich eine Parabel und nicht etwa ein Plateau. Der Winkelbereich, unter dem das Loch für das Dichtemeßsystem bei strahlengeometrischer Betrachtung erscheint, ist mit den gestrichelten Linien in

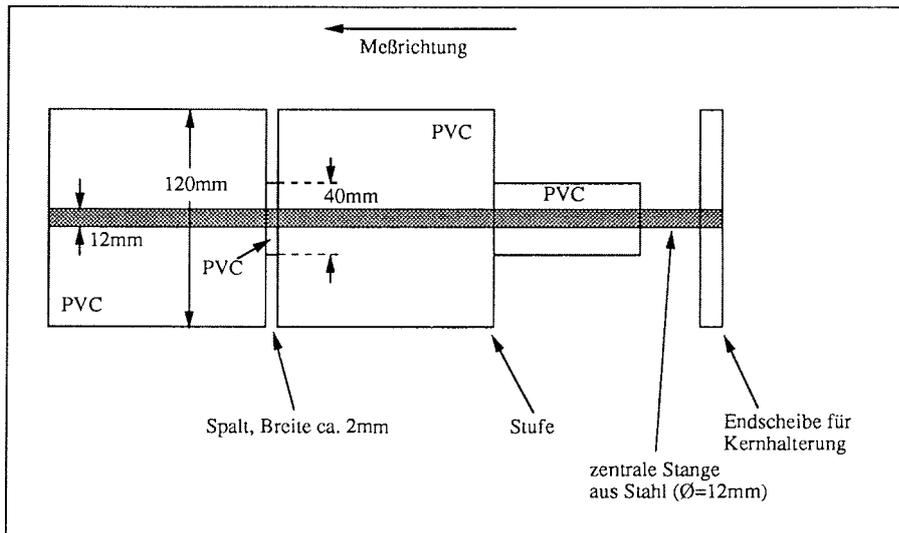


Abbildung 3.11: Skizze des künstlichen Kerns aus PVC für die Spalt- und Stufenmessung.

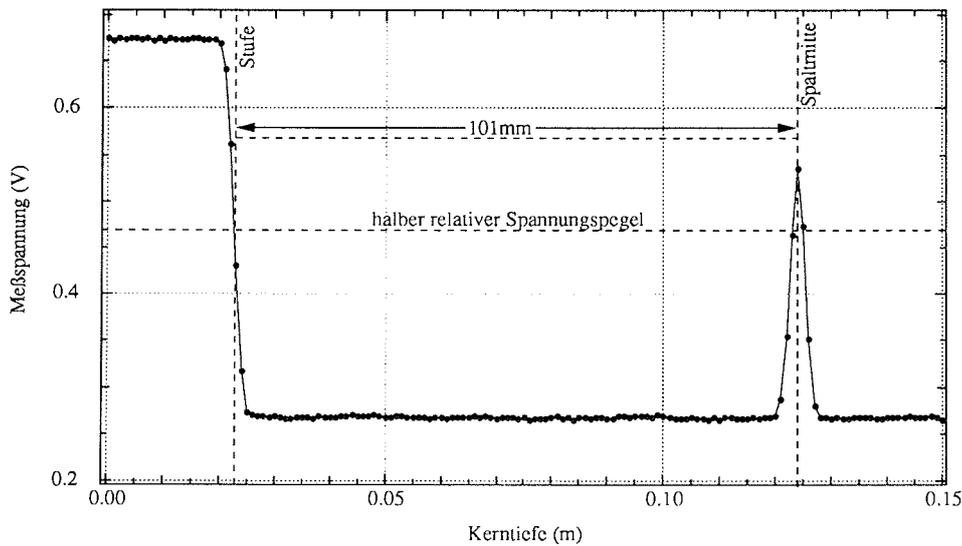
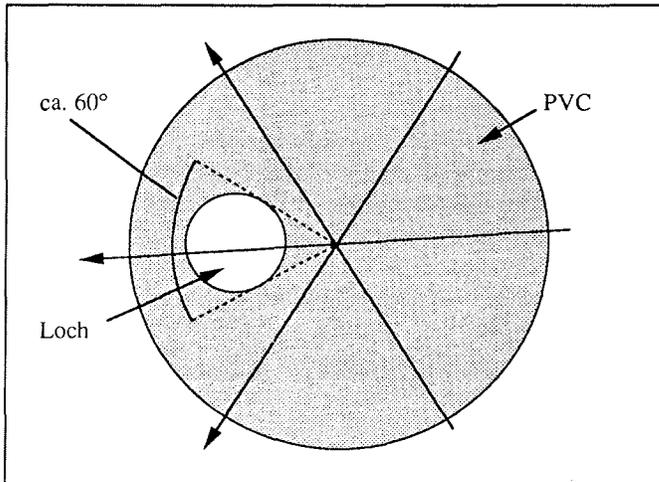
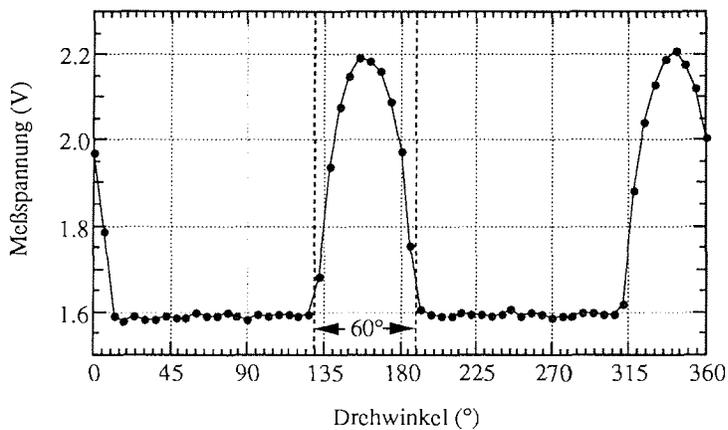


Abbildung 3.12: DMS-Messung über eine Stufe und einen 2mm breiten Spalt gleichen Kontrastes. Die Strahlbreite von ca. 4mm bewirkt, daß die Dynamik der Stufenmessung bei der Spaltmessung nicht erreicht wird.



**Abbildung 3.13:** Skizze des Querschnitts durch den PVC-Kern mit asymmetrisch positioniertem Loch. Das Loch ist verschließbar und so mit Flüssigkeiten o.ä. befüllbar. So kann der Dichtekontrast zwischen PVC und Loch-Material ggf. geändert werden. In der Skizze sind einige mögliche Strahlwege sowie der Winkel, unter dem das Loch bei strahlengeometrischer Betrachtung erscheint, eingezeichnet.



**Abbildung 3.14:** Dichtemessung am künstlichen Kern mit asymmetrisch positioniertem Loch (hier luftgefüllt). Der Winkelbereich von  $60^\circ$ , unter dem das Loch in der Aufzeichnung bei strahlengeometrischer Betrachtung erscheint, ist eingezeichnet. Die Signale beim zweimaligen Überstreichen des Lochs durch den Strahl sind deutlich erkennbar. Die Messspannung ist gegenüber den später durchgeführten Kernmessungen relativ hoch, da hier eine höhere Verstärkung am Löffel SMS-103A-Gerät gewählt wurde.

Abbildung 3.14 eingezeichnet. Das Winkelinkrement von  $6^\circ$  entspricht bei einem Radius von 30mm einer Bogenlänge von etwa 3mm. Dadurch wird klar, daß bei einer Strahlbreite von 4mm außerhalb des  $60^\circ$ -Bereichs maximal ein Meßwert vom Loch mitbeeinflußt sein kann.

Als wichtiges Merkmal dieser Art von Anomalien bzw. Inhomogenitäten sollte man berücksichtigen, daß der Absolutdichtewert der einzelnen Anomaliestruktur (hier das Luftloch, später ein Gesteinsstück) letztlich nicht bestimmt werden kann, da der Weganteil im Verhältnis zum Umgebungsmaterial nicht bekannt ist. Innerhalb eines Anomaliekörpers unterscheidet sich dieser Weganteil zudem meist noch. Abschätzungen aufgrund der vertikalen Gesteinsausdehnung über die Dicke eines Gesteinsstückes in Strahlrichtung können hier zwar Anhaltspunkte geben, sind jedoch nicht als sehr sicher anzusehen. Treten in Sedimentkernen also Inhomogenitäten in Form von IRD oder ähnlichem auf, so setzen sich die Absolutdichtewerte aus der Sedimentdichte und der Dichte von z.B. IRD-Komponenten anteilmäßig zusammen. Bei einer Dichtemessung ohne Kernrotation besteht somit die Gefahr, IRD-Komponenten nicht als solche zu erkennen und die Absolutdichten falsch, nämlich als reine Sedimentdichten ohne IRD-Komponenten, zu interpretieren.

### 3.2.5 Fehlerbetrachtung

Im folgenden soll die Qualität der Meßwerte bzw. störende Fehlereinflüsse diskutiert werden. Hierbei werden die Einflußgrößen Kerndurchmesser, Gammastrahlenabsorption und Massenabsorptionskoeffizient nacheinander betrachtet. Am Ende der Fehlerbetrachtung wird dann auf den aus den Einzelfehlern resultierenden Gesamtfehler (Fehlerfortpflanzung) eingegangen. Die Fehlerbetrachtung ist zum einen für die Wahl der Geräteeinstellungen (Auflösung der Meßwerte, Meßzeit, Filter) und zum anderen für die Interpretation der Meßdaten wichtig. Aus dem zuerst genannten Grund wurde sie vor Durchführung der Sedimentkernmessungen angestellt.

#### a. Durchmesser

Die gemessenen Durchmesser bzw. die Widerstände sind mit Fehlern unterschiedlicher Art behaftet. Der Gesamtfehler setzt sich aus Ungenauigkeiten in Verbindung mit Lagerspielen, aus Toleranzen des Potentiometers sowie aus dem Meßfehler des Widerstandsmeßgerätes (HP3421A) zusammen.

Der Meßfehler insgesamt liegt unter 0.5mm bei einer Dynamik von 50mm und einer Absolutmeßgröße von 90 bis 120mm (entspricht ca. 0.5%). Die Streuung der Werte an einer fixen Position ist gering, dadurch sind Mehrfachmessungen nicht notwendig. Den Hauptfehleranteil bestimmen die Lagerspiele der Anordnung (Kugellager, Führungen). Um die Fehler niedrig zu halten, ist es also besonders wichtig, den Meßvorgang immer gleich (z.B. Fahrriechung des Kerns) und dabei möglichst erschütterungs- und störungsfrei ablaufen zu lassen. Deshalb werden Schwingungen der Meßbank durch Verschraubungen über Eisenwinkel mit der Rückbank aufgefangen. Sehr wichtig für die Kleinhaltung der Meßfehler ist auch die möglichst aktuelle Kalibrierung der Durchmessermeßeinheit mit Probekörpern bekannten Durchmessers. Hierzu wurden,

wie schon weiter oben angesprochen, Stufenkerne aus PVC angefertigt.

#### **b. Absorption**

Die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Versuche zur Untersuchung der zeitlichen Statistik gaben auch Aufschluß über den Rauschpegel des Detektorsystems mit den angeschlossenen Geräten. Bei der gewählten Filtereinstellung von 0.3s beträgt der Rauschpegel bei offener Quelle ca. 3% vom Absolutwert (siehe Abbildung 3.3). Die Einstellung der Meßempfindlichkeit des Löffel-SMS103A-Gerätes wurde für die Anwendung zur Dichtemessung an Sedimenten mit 100‰ so gewählt, daß die maximal zu messenden Spannungen <1.999V sind, somit kann über das angeschlossene Meßgerät (HP3421A) mit 3<sup>1/2</sup>-facher Auflösung auf 1mV genau gemessen werden.

Versuche zeigten, daß die Abweichungen der Mittelwerte von 100 und von 500 Meßwerten an einer Position unter 0.4% liegen. Um die Meßzeiten möglichst niedrig zu halten, wurde für alle Kernmessungen mit 100 Werten pro Meßpunkt gearbeitet. Gespeichert werden letztlich Mittelwert und Standardabweichung. Allein für die Nullmessungen wurden 500 Werte gemessen, da hier die Meßzeit wegen der Einmaligkeit der Messung eine untergeordnete Rolle spielt.

Wie bei der Betrachtung des Gesamtfehlers speziell deutlich werden wird, variiert der relative Fehler der Absorptionsmessung bei unterschiedlichem Verhältnis  $I/I_0$ . Somit ändert sich der Fehlerbeitrag bei stark variierenden Sedimentdichten bzw. bei stark unterschiedlicher Absorption. In realistischen Meßbereichen zeigte sich aus den verschiedenen gezeigten Experimenten (s.o.) und den meßtechnischen Randbedingungen (Genauigkeit und Auflösung der Meßgeräte), daß die Absorption mit einem relativen Fehler von <0.5% bestimmt werden kann.

#### **c. Massenabsorptionskoeffizient**

Fehler durch falsche Massenabsorptionskoeffizienten können theoretisch maximal bei +/-4% liegen. Dies ist der relative Fehlerbereich vom Massenabsorptionskoeffizienten für Wasser bis zu dem für Gestein (siehe Kapitel 2.1.3). Wird für die Dichteberechnung ein mittlerer Massenabsorptionskoeffizient gewählt, so betragen die Fehler hier unter realistischen Annahmen weniger als +/-1%. Kann zudem durch iterative Rechnungen (siehe Kapitel 4.1) der Massenabsorptionskoeffizient für jeden Meßwert individuell angepaßt werden, so läßt sich dieser Fehlerbeitrag minimieren.

#### **d. Gesamtfehler, zusätzliche Fehlerquellen und Schlußfolgerungen**

Der Einfluß der Meßgrößen Kerndurchmesser und Absorptionsspannung wurde bereits in Abbildung 2.2 bildlich dargestellt. Nun soll der Einfluß der Einzelfehler auf das Ergebnis allgemein dargestellt werden (Fehlerfortpflanzung):

Ausgehend von Gleichung (3) kann der absolute Standarddichtefehler folgendermaßen ausgedrückt werden (totales Differential):

$$\Delta \rho = \frac{\partial \rho}{\partial \mu} \Delta \mu + \frac{\partial \rho}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial \rho}{\partial I} \Delta I \quad (10)$$

Hier gehen die Fehler für den Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu$ , für den Kerndurchmesser  $d$  und für die intensitätsproportionale Meßspannung  $I$  ein. Um den relativen Standardfehler für die Dichte zu erhalten, müssen nun die einzelnen Summanden berechnet werden. Anschließend werden beide Seiten der Gleichung durch die Dichte  $\rho$  dividiert. Für den relativen Fehler gehen dann jeweils die Absolutbeträge der Summanden ein und man erhält:

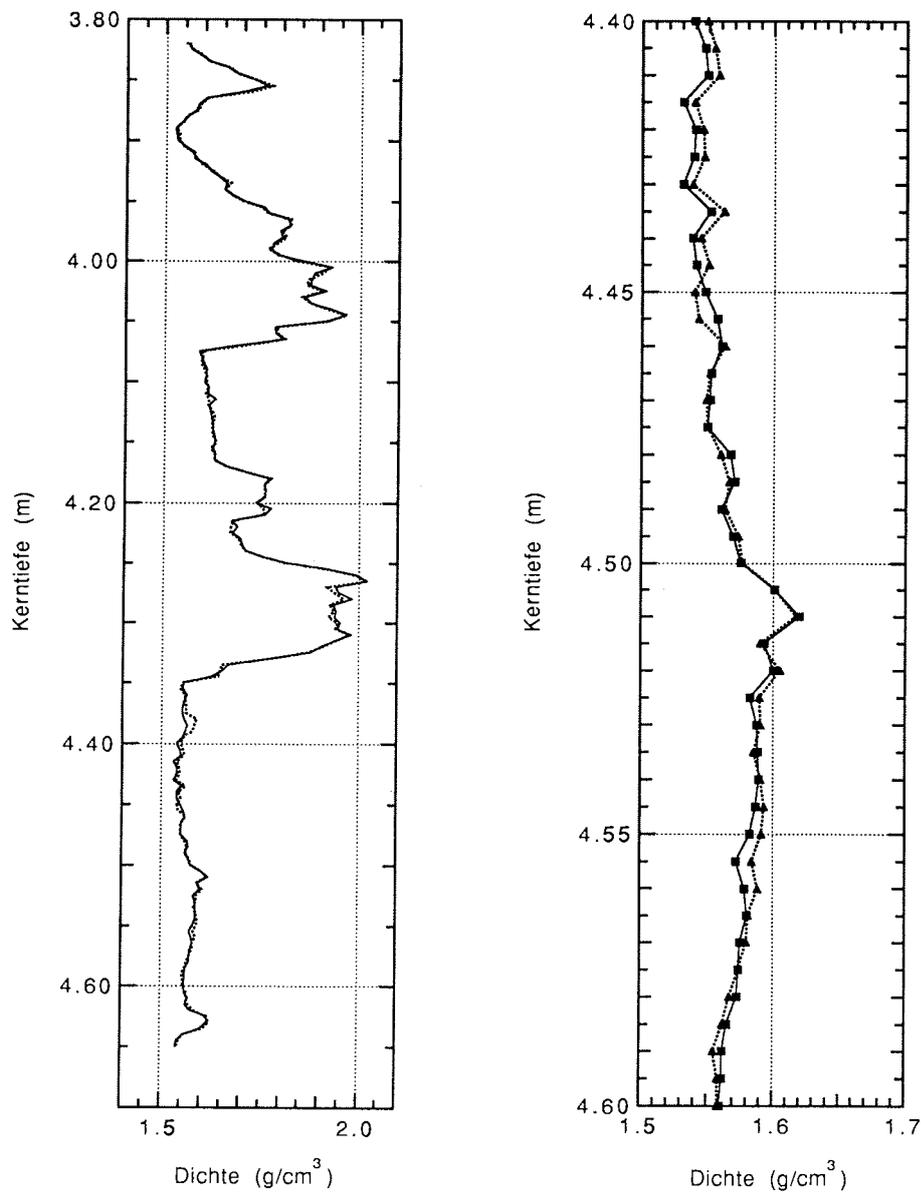
$$\frac{|\Delta\rho|}{\rho} = \frac{|\Delta\mu|}{\mu} + \frac{|\Delta d|}{d} + \frac{|\Delta I| \cdot \ln(I/I_0)}{I} \quad (11)$$

Die Fehler von Kerndurchmessermessung und Massenabsorptionskoeffizient gehen also gleichermaßen additiv in den relativen Gesamtstandardfehler für die Dichte ein. Beim Fehler, der der Absorptionsmessung überlagert ist, spielt der Faktor  $\ln(I/I_0)$  eine gewichtende Rolle. In unrealistischen Extremfällen würde dieser Fehlerbeitrag unverhältnismäßig groß oder klein (eben dann, wenn das Verhältnis nahe 0 oder 1 wäre). Für realistische Fälle wie z.B. ein Verhältnis von 1/3, liegt dieser Gewichtungsfaktor bei 1 und somit sind dann alle Fehlerbeiträge ähnlich stark vertreten.

Der Gesamtdichtefehler liegt nun bei etwa 1%, wenn die Fehleranteile des Massenabsorptionskoeffizienten vernachlässigt werden. Letzteres sollte insbesondere bei relativ konstanten Porositäten und Korndichten bzw. iterativem Processing der Dichtedaten (siehe Kapitel 4.1) zulässig sein.

Ein bisher noch nicht angesprochener Fehlerbeitrag kann aufgrund von Luft oder freiem Seewasser innerhalb eines Kernsegmentes zwischen Sediment und PVC-Rohr generell nicht ausgeschlossen werden. Diese Störungen können z.B. bei Problemen bei der Kerngewinnung auftreten. Da die Dicke solcher Spalte im ungünstigsten Fall Größenordnungen von 1mm erreichen kann, können sie einen entscheidenden Unsicherheitsfaktor im Ergebnis darstellen. Ein ähnliches Problem sind deformierte, am Rand verbogene Sedimenthorizonte, die die wirkliche Breite von Horizonten und Horizontwechsellinien in der Messung verfälschen. Ein relativ scharfer Horizontwechsel kann so zu einem "weichen" Übergang werden. Eine vollkommene Lösung beider Probleme ist ohne weiteres nicht in Sicht. Wie weiter unten zu sehen sein wird, kann eine zumindest qualitative Einschätzung dieser Fehlermöglichkeit mit Hilfe der Röntgentomographie versucht werden.

In seltenen Fällen wurden auch Störungen in den Meßdaten, die auf Spannungsspitzen im Netz zurückgehen, beobachtet. Durch die Kontrolle der Analschriebe können diese Störungen meist erkannt und damit Fehlinterpretationen vermieden werden. Ein Beispiel für eine Störung durch einen solchen Spannungsspike im Netz ist in Abbildung 3.27i zu sehen (Kerntiefe: 3.78m, Drehwinkel: 100°). Die Störung schlägt sich als "falsche" Dichteanomalie mit einer Verzerrung nach rechts (zeitliche Abfolge der Meßwerte) nieder. Da es sich hier um eine Messung mit "feiner" Kerndrehung um 360° handelt, ist die Störung auch anhand ihres einfachen Auftretens sofort zu erkennen. Alle geologisch bedingten Dichteanomalien werden durch die zweimalige Durchstrahlung bei einer vollen Kerndrehung auch in der Darstellung zweimal abgebildet.



**Abbildung 3.15a, b:** Reproduzierbarkeitstest, durchgeführt an Kern PS2007-1, Segment 3.73-4.73m. Dargestellt sind zwei voneinander unabhängig durchgeführte Dichtemessungen. Links (a) der gesamte Tiefenbereich des Segments, rechts (b) ein Ausschnitt. Die Abweichungen der Absolutwerte sind  $< 1\%$ .

Letztendlich sollte mit einem Reproduzierbarkeitstest der Einfluß der Fehlerbeiträge experimentell direkt überprüft werden. Hierzu wurde ein Kernsegment des Schwerelotkerns PS2007-1 zweimal hintereinander unabhängig, d.h. jeweils neu positioniert, gemessen (Abbildung 3.15a und b). Die Meßparameter entsprechen den sonst üblichen Größen, die für die Standardmessungen vorgewählt wurden. Die sichtbaren Abweichungen zwischen beiden Messungen sind  $<1\%$ , so wie es auch nach den obigen Fehlerbetrachtungen zu erwarten war. Widrige Umstände, die zu größeren Abweichungen der Messungen führen könnten (z.B. freies Wasser und Luft im Kernrohr, Spannungsstörungen im Netz), lagen bei diesem Reproduzierbarkeitstest allem Anschein nach nicht vor.

### **3.3 Meßarten und ergänzende Auswertemöglichkeiten**

Hier werden verschiedene Meßarten ohne und mit Kernrotation vorgestellt. Drei Meßarten werden schwerpunktmäßig angesprochen: Messungen ohne Kernrotation mit 5mm Tiefeninkrementen sowie Messungen mit Kernrotation mit denselben Tiefen- und  $9^\circ$ - bzw.  $90^\circ$ - Drehwinkelinkrementen. Allen Messungen gemeinsam ist die Meßdauer mit fünf Sekunden für einen Meßpunkt, wobei vier Sekunden auf die Absorptionmessung und eine auf die Durchmessermessung entfallen.

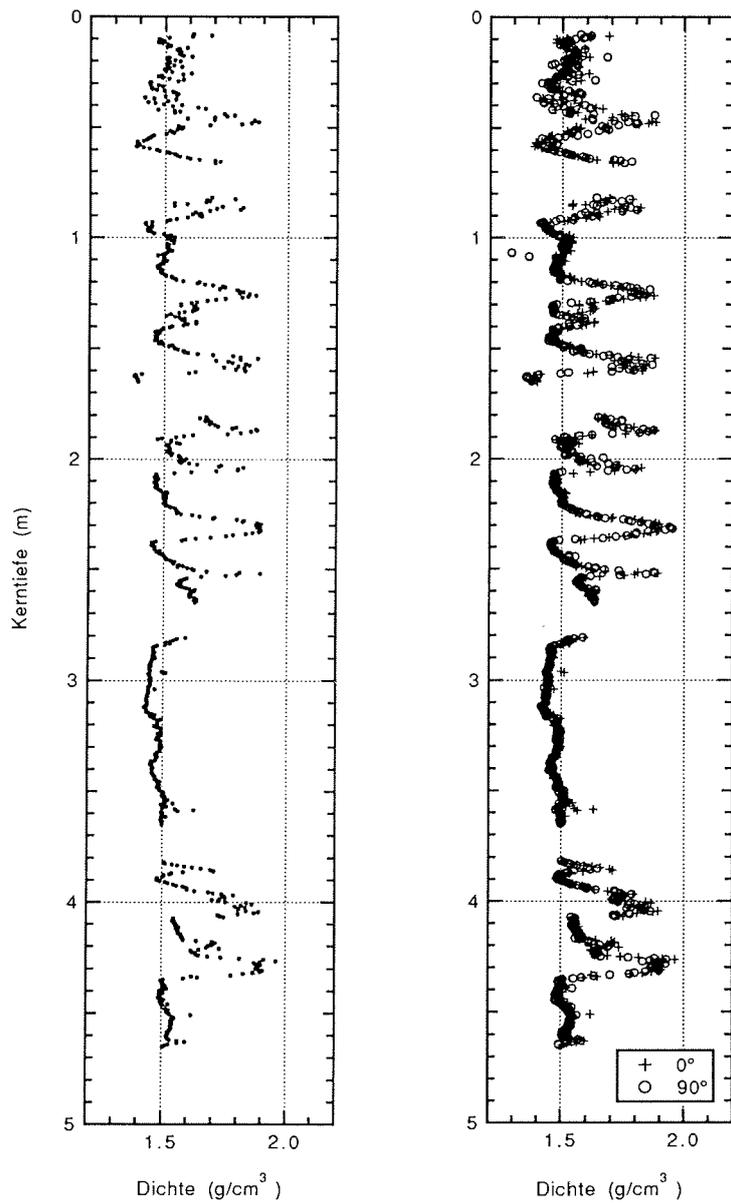
#### **3.3.1 Messungen ohne Kernrotation**

Die Standardmessung ohne Kernrotation ist die Meßart, nach der ein Sedimentkern im Normalfall zuerst auf seine Dichte hin untersucht wird. Ausgehend von den Ergebnissen aus dieser Untersuchung können dann weitere Vorgehensweisen entwickelt und interessante Kernabschnitte genauer untersucht werden.

Aus der Standardmessung erhält man Dichteinformationen in Abhängigkeit von der Kerntiefe. Der Meßpunktabstand wurde mit 5mm in der Größenordnung des Strahldurchmessers im Meßbereich (4mm) gewählt. Gemessen wurde an einer Position jeweils der äußere Kerndurchmesser sowie 100 Absorptionswerte. Letztlich abgespeichert wurden außer dem Durchmesser- bzw. Widerstandswert der Mittelwert sowie die Standardabweichung der 100 Absorptionmessungen. Auf die Geräteeinstellungen wurde bereits weiter oben eingegangen (Kapitel 2.2.1 und 3.2.5). Ein Beispiel für das Ergebnis einer Standardmessung ist in Abbildung 3.16 zu sehen.

#### **3.3.2 Messungen mit Kernrotation**

Ausgehend von den Standardmessungen können nun besonders interessante Kerne bzw. Kernabschnitte auch innerhalb einzelner Horizontalebene untersucht werden. Hiermit ist es möglich, laterale Inhomogenitäten, zum Beispiel eistransportierte



**Abbildung 3.16:** (links) Beispiel für eine Standardmessung mit dem Dichtemeßsystem an einem Sedimentkern (hier PS2007-1).

**Abbildung 3.17:** (rechts) Beispiel für eine "schnelle" Messung mit dem Dichtemeßsystem mit Kernrotation um 90° am Kern PS2007-1. Für eine Kerntiefe sind je zwei Meßwerte eingezeichnet.

Gesteinsstücke (IRD/Dropstones) oder Bioturbationen (von Organismen durchmengte Sedimentstrukturen), von ungestörten Horizonten mit variierender Dichte trennen zu können. Experimente mit Kerndrehungen, allerdings mit großen Winkelinkrementen ( $\geq 45^\circ$ ), wurden auch schon in der Literatur beschrieben (z.B. Harms und Choquette, 1965; Bücker et al., 1990).

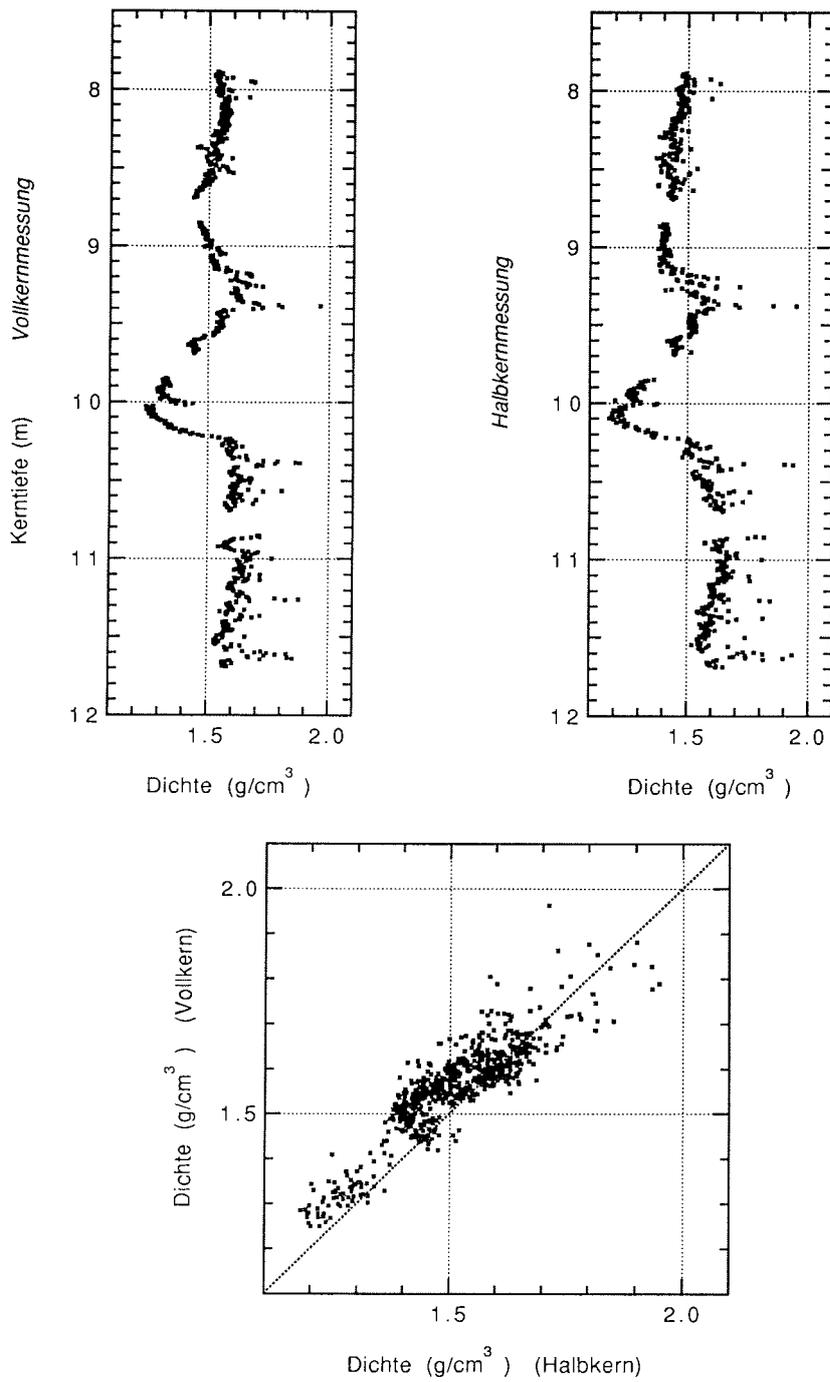
Unterschieden werden zunächst zwei Arten von Drehmessungen: Solche in nur einer Tiefenebene und solche in vielen Tiefenebenen. Alle Inkremente (Tiefen, Drehwinkel) sind frei wählbar, jedoch haben sich gewisse Werte als Standard bewährt. Dies sind für Feinuntersuchungen  $9^\circ$  Winkelinkrement und 5mm Tiefenschritte, für schnellere Übersichts-drehmessungen  $90^\circ$  und 5mm. Die sonstigen Meßparameter sind dieselben wie bei der Standardmessung. Durch die entsprechende Menüwahl im Programm "dichte.gnn" lassen sich die Drehmessungen starten. Die Abspeicherung und die Dichteberechnung aus den Rohdaten geschehen ebenfalls analog zur Standardmessung. Ein Beispiel für eine Messung mit Kernrotation ist in Abbildung 3.17 dargestellt. In diesem Fall wurde die Dichte in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen bestimmt. Pro Tiefe wurden fünf Dichtewerte bestimmt ( $0^\circ$  bis  $360^\circ$  in  $90^\circ$ -Inkrementen). Die in der Abbildung dargestellten Werte für die beiden Hauptrichtungen sind Mittelwerte aus den beiden bzw. drei Dichtewerten für  $90^\circ$  und  $270^\circ$  sowie für  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $360^\circ$ .

### 3.3.3 Dichtemessungen an Halbkernen

Neben der Möglichkeit, ungeöffnete Sedimentkerne mit dem DMS zu untersuchen, kann auch an bereits geöffneten Schwere- und Kolbenlotkernen die Feuchtraumdichte über die Gammastrahlenabsorption bestimmt werden. Dies ist dank der senkrechten Durchstrahlung ohne Mehraufwand möglich. Oft ist bei bereits auf See kurz nach der Kernnahme geöffneten Kernen eine nachträgliche hochauflösende Dichteuntersuchung interessant.

Halbkernsegmente lassen sich genauso wie ungeöffnete Kerne in die Kernhalterungen einsetzen. Die Durchmesser/Distanzmessung ist allerdings jetzt nicht mehr mit der Durchmessermeßeinheit (DMU) möglich, da der Abstand kleiner als der kleinstmögliche für die DMU-Messung ist. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, daß unter dem Kerndeckel ein geringer Luftzwischenraum existiert. Die Praxis zeigt, daß dies hier wesentlich wahrscheinlicher ist als bei Messungen an ungeöffneten Kernen. Da die Sedimentkerne der Länge nach in drei Teile (Archivhälfte, Arbeitshälfte und dazwischenliegende Radiographie-Probe) unterteilt werden, kann es leicht passieren, daß das Sediment etwas zur Seite gedrückt wird. Deshalb und wegen des kleineren Durchstrahlungsweges nimmt die Genauigkeit der Dichtewerte aus Messungen an Halbkernen gegenüber der an Vollkernen ab.

Als Distanzwert für die Ermittlung der Dichtedaten wurde ein fixer Wert angesetzt (52mm), ansonsten werden die Dichtewerte so wie bei den Messungen an Vollkernen berechnet. Für die Zukunft könnten beim Wunsch nach genaueren Halbkernmessungen sicher genaue Dickenmeßsysteme entwickelt werden. Im Rahmen dieser Studie wurde dies jedoch noch nicht getan.



**Abbildung 3.18:** Vergleich von Voll- und Halbkernmessungen an Kern PS1821-6 (SL). Oben links ist die Vollkernmessung, rechts daneben die Halbkernmessung dargestellt. Darunter sind die Daten aus beiden Messungen gegeneinander aufgetragen. Hier ist zusätzlich eine 1:1 Hilfslinie mit eingezeichnet.

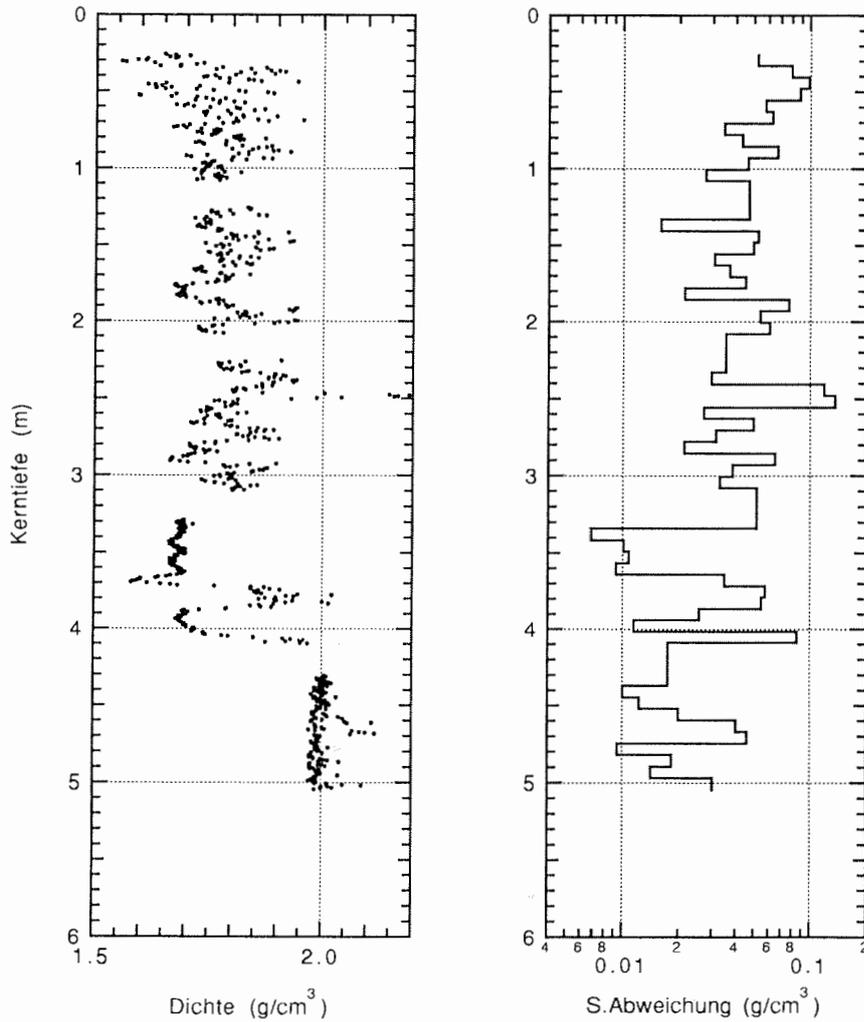
Halbkernmessungen wurden an einem Teil des Schwerelotkerns PS1821-6 vorgenommen. Dieser Kern wurde ja auch schon vor seiner Öffnung mit dem Dichtemeßsystem untersucht und sollte dank seiner starken Dichteveränderungen eine gute Möglichkeit bieten, Halbkernmessungen zu demonstrieren und zu bewerten (siehe Abbildung 3.18). Durch Betrachten der Kernlogs wird deutlich, daß alle wesentlichen Variationsmerkmale, die schon bei der Vollkernmessung (linke Seite in Abbildung 3.18) festgestellt wurden, auch bei der Halbkernmessung (rechte Seite der Abbildung) erkannt werden können. Es sei hierbei auf den "ruhigen" Dichteverlauf zwischen 8 und 9m Kerntiefe, auf das Minimum bei 10m Kerntiefe und auf den eher "unruhigen" Dichteverlauf unterhalb von 11m Kerntiefe hingewiesen. Lediglich die Absolutdichten der beiden Messungen unterscheiden sich insbesondere zwischen 8 und 8.50m Kerntiefe um maximal ca. 7%, wobei die Vollkernmessung etwas größere Dichten als die Halbkernmessung ergab. Dies könnte an Verdunstungseffekten des Porenwassers oder auch an möglichen Fehlern der Durchmesserwahl (s.o.) liegen. Der Versatz beider Datensätze, wie er gut anhand des dritten Graphen (Dichte Vollkern gegen Dichte Halbkern) in Abbildung 3.18 sichtbar wird, könnte durch eine Anpassung der Halbkernndicke unterdrückt werden. Unabhängig davon ist die gute Korrelation beider Dichteprofile in dieser Abbildung deutlich zu erkennen. Der vorgestellte Vergleich zeigt den beachtlichen Wert der Meßdaten und die Qualität, die mit Halbkernmessungen ohne Mehraufwand erreicht werden kann.

### 3.3.4 Berechnung von räumlicher Standardabweichung und 90°-Differenzenquotienten

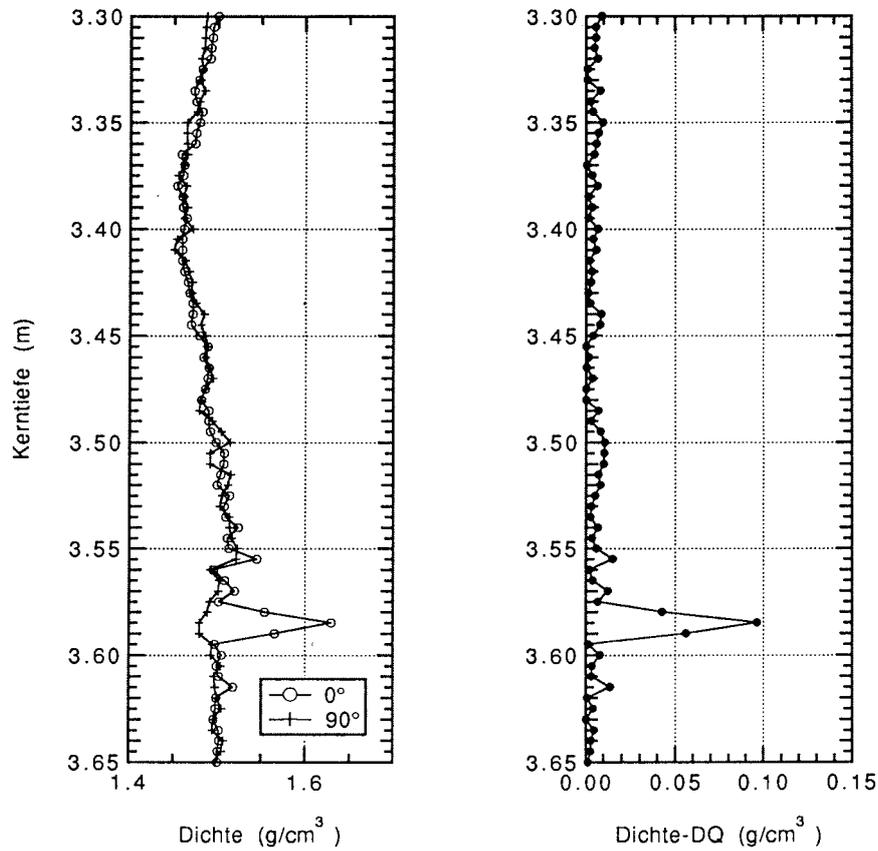
Um die Dichtestruktur in Sedimentkernen entlang der Tiefenachse besser zu charakterisieren, wurden auch räumliche Standardabweichungen berechnet. Hierzu wurden die Dichtedaten in gleichgroße Tiefenausschnitte aufgeteilt, innerhalb derer dann die Standardabweichung der Werte berechnet wurde. Bei einer Fensterbreite von z.B. 7.5cm liegen dann bei einem Meß-Tiefeninkrement von 5mm 15 Dichtewerte in einem Intervall:

$$S = \sqrt{\frac{1}{15} \cdot \sum_{i=1}^{15} (Q_i(z_i) - Q_M)^2} \quad (12)$$

$Q_i(z_i)$  ist der Dichtewert an der Tiefe  $z_i$ ,  $Q_M$  der Mittelwert aus den 15 Dichtewerten innerhalb eines Tiefenausschnitts. Mit Hilfe dieser Standardabweichungen können Bereiche mit räumlich höherfrequenten von solchen mit geringeren bzw. längerperiodischen Schwankungen besser unterschieden werden. Diese Form der Auswertung ist erst dank der hohen räumlichen Auflösung, mit der die Dichten bestimmt werden können, möglich; Dichtewerte aus Pycnometermessungen mit Tiefeninkrementen von 10-20cm liegen zu weit auseinander, um die genannten Charakteristika zuverlässig trennen zu können.



**Abbildung 3.19:** Dichte (links) und Berechnung der räumlichen Standardabweichung (rechts) in 7.5cm-Fenstern, hier an den Daten von Kern PS1725-2. Der Unterschied zwischen Bereichen mit viel grobem IRD (0 bis 3m Kerntiefe) bzw. Schichtung und feinem IRD (4.30-5m Kerntiefe) bzw. wenig IRD (3.20-3.60m) wird in den Standardabweichungen deutlich. Die Aussagekraft dieser Methode ist jedoch individuell verschieden, je nachdem, wie mächtig einzelne Horizonte oder wie groß IRD-Komponenten sind. Eine geeignete Wahl der Breite des Tiefenausschnittes kann die Aussagekraft verbessern.



**Abbildung 3.20:** Berechnung von Differenzenquotienten aus Dichtedaten von Messungen mit "schneller" Kerndrehung ( $90^\circ$ -Inkrement) an einem Beispiel aus Kern PS2007-1. Links sind die Dichtedaten für die  $0^\circ$  und  $90^\circ$ -Messung dargestellt. Rechts die daraus nach Gleichung (6) berechneten Differenzenquotienten. Die Dichte-anomalie bei einer Kerntiefe von 3.585m, die aller Wahrscheinlichkeit nach durch ein einzelnes Gesteinsstück hervorgerufen wird, erscheint in der Differenzenquotientendarstellung entsprechend deutlich.

In Abbildung 3.19 ist ein Dichteprofil für den Sedimentkern PS1725-2 zusammen mit den räumlichen Standardabweichungen dargestellt. Auffällig sind die Bereiche mit starken Änderungen (oberer Kernabschnitt) und solche mit nur geringen Änderungen (unterer Kernabschnitt) entlang der Tiefenachse (siehe dazu auch Bildunterschrift sowie die Kerndiskussion in Kapitel 3.6). Allerdings ist die Wahl der Tiefenfensterbreite entscheidend für die Güte dieser Methode. Je nach Kern kann diese optimale Breite unterschiedlich sein.

Außer der Berechnung räumlicher Standardabweichungen können aus Daten von Messungen mit Kernrotation (90°-Inkrement) Differenzenquotienten (DQ) innerhalb einer Tiefenebene gebildet werden:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho(z)} = \frac{2 \cdot |\rho(z, 0^\circ) - \rho(z, 90^\circ)|}{\rho(z, 0^\circ) + \rho(z, 90^\circ)} \quad (13)$$

Abbildung 3.20 zeigt für Kern PS2007-1 das Ergebnis einer solchen Messung mit Kernrotation (90°-Inkrement) und der Differenzenquotientenbildung. Bei der Berechnung gingen pro Tiefe fünf Dichtewerte ein; da Messungen für Drehwinkel von 0°, 90°, 180°, 270° und 360° durchgeführt wurden, konnten jeweils Mittelwerte aus zwei (90° und 270°) bzw. drei (0°, 180° und 360°) Dichtewerten berechnet und so der Gesamtfehler weiter reduziert werden (siehe Kapitel 3.3.2). In Tiefenabschnitten, in denen der Dichteverlauf für beide Durchstrahlungsrichtungen nahezu gleich ist, liegen die Differenzenquotienten bei 0. Unterscheiden sich beide Verläufe, so steigt der DQ an, so wie es im gezeigten Beispiel bei einer Kerntiefe von 3.585m der Fall ist. Es wird deutlich, daß mit dieser Methode Dropstones und Horizonte unter gewissen Voraussetzungen gut unterschieden werden können. Ist jedoch ein Dropstone sehr groß und zentral gelegen, so daß er unter beiden Winkeln durchstrahlt wird, oder ist ein Horizont deformiert bzw. geneigt, so kann es schwierig sein, beides auseinanderzuhalten.

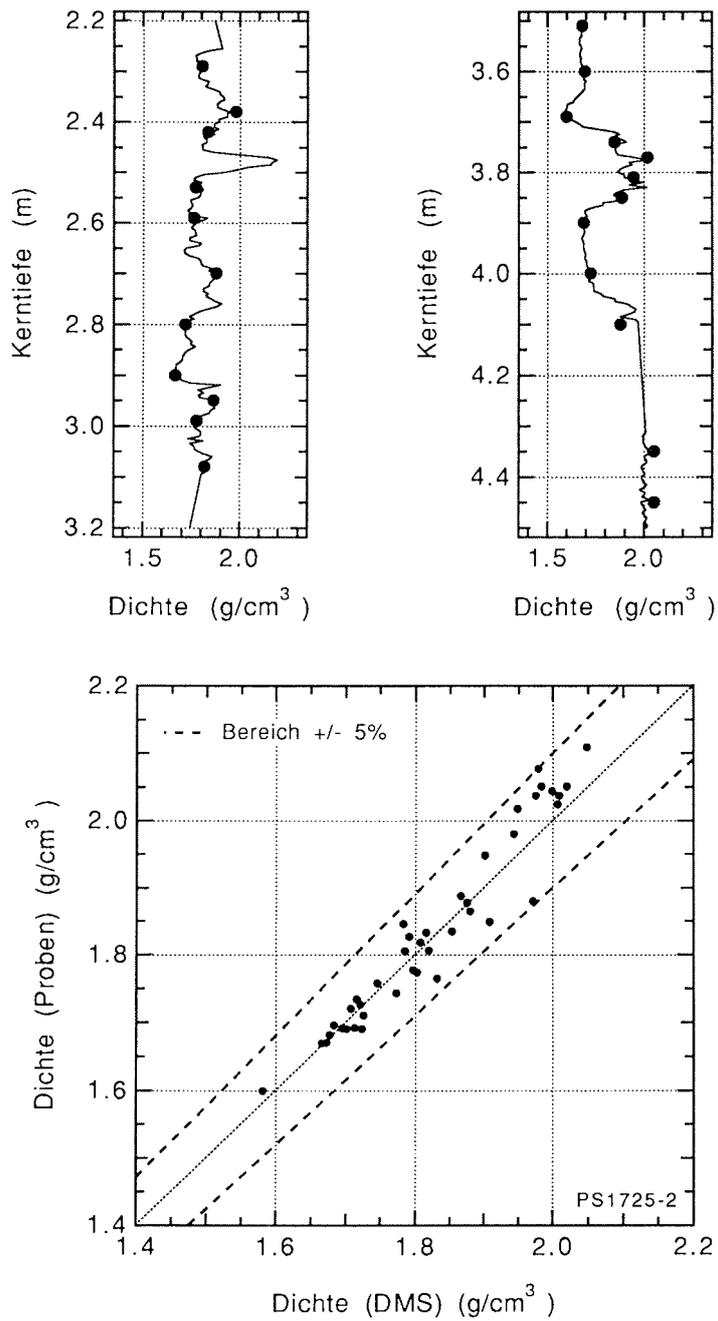
### 3.4 Vergleich der Dichtemessungen mit Daten aus konventionellen Messungen an Einzelproben

Ein wichtiges Kriterium für die Brauchbarkeit der Dichtedaten ist die Frage, inwieweit die gemessenen Dichten aus Messungen mit dem Dichtemeßsystem mit den tatsächlichen Sedimentdichten übereinstimmen. Erst bei Kenntnis dieses Zusammenhangs können verlässliche Aussagen über die Sedimente anhand der Meßdaten gemacht werden. Da die tatsächlichen Dichten nicht fehlerfrei ermittelt werden können, sollen die über Gamma-Absorption bestimmten Werte mit konventionellen Messungen an Einzelproben (siehe Kapitel 2.4) verglichen werden. Für diesen Vergleich wurden die Sedimentkerne PS1725-2 und P1821-6 (Kerndaten im Anhang A) herangezogen. Wichtig für die Kernausswahl war zum einen, daß die Kerne möglichst kurz nach der Gammaabsorptionsmessung geöffnet werden, damit die Möglichkeit der Einzelproben-

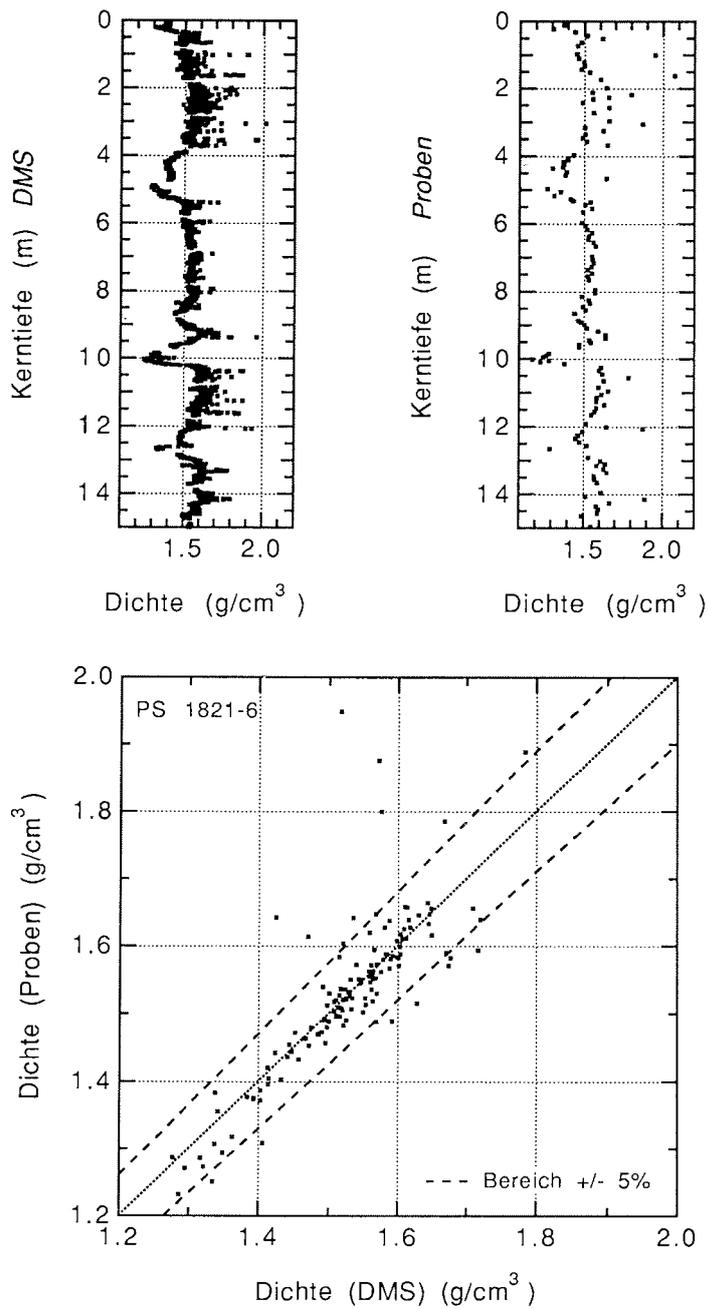
untersuchung gewährleistet ist, und zum anderen möglichst unterschiedliche Sedimente, um nicht nur einen speziellen Sedimenttyp zu betrachten. Beides traf für die beiden ausgewählten Kerne zu.

Zunächst soll auf die Meßvolumina beider Methoden eingegangen werden. Der Gammastrahl bei der Messung der Absorption hat einen mittleren Durchmesser von 4mm. Bei einem Schwerelotkern (120mm Durchmesser ohne PVC-Rohr) entspricht dies einem Meßvolumen von ca.  $6\text{cm}^3$ . Die Einzelproben für die konventionellen Dichtebestimmungen werden mit Spritzen aus dem Kerninneren genommen. Der Durchmesser dieser Spritzen ist mit 1cm deutlich größer als der des Gammastrahls, die Länge des Probenzylinders beträgt dagegen mit ca. 6cm nur die Hälfte der Länge des Gammastrahls. Sediment vom Kernrand wird bei der konventionellen Dichtebestimmung also nicht berücksichtigt. Das Meßvolumen der Spritzenprobe ist ca.  $5\text{cm}^3$  groß und damit dem bei der Gammaabsorptionsmessung sehr ähnlich. Ändert sich die Sedimentdichte mit der Tiefe abrupt, so können die Dichten für eine Meßtiefe aus beiden Methoden also schon wegen der unterschiedlichen Geometrie (Durchmesser Strahl und Spritze) voneinander abweichen.

Nun zum eigentlichen Vergleich: Beide Kerne wurden im Standardverfahren mit dem Dichtemeßsystem untersucht. Nach einigen zusätzlichen Dichtemessungen mit feiner Kernrotation an ausgewählten Tiefenabschnitten sowie der Messung weiterer sedimentphysikalischer Parameter wurden die Kerne geöffnet. In einem Tiefenabstand von 10 bis 20cm wurden am geöffneten Kern Spritzenproben entnommen und die Feuchtraumdichte in der in Kapitel 2.4 beschriebenen Art und Weise bestimmt. Die Einzelprobenuntersuchungen wurden von G. Kuhn (AWI) und Mitarbeitern vorgenommen. In den Abbildungen 3.21a und b sind Profile bzw. Profilausschnitte dargestellt, wobei für PS1725-2 (Abbildung 3.21a) Daten aus Messungen mit dem Dichtemeßsystem (Linie) und Einzelprobenmessungen (Punkte) direkt verglichen werden. Für PS1821-6 (Abbildung 3.21b) sind beide Datensätze nebeneinander dargestellt. Unten sind jeweils beide Datensätze für beide Kerne gegeneinander aufgetragen. Für Kern PS1725-2 wurde das oberste Kernsegment hier nicht berücksichtigt, da es merklich gestört war (freies Wasser und Luft im Kernliner). Zunächst fällt eine gute Übereinstimmung der Dichtewerte auf, wobei bis auf sehr wenige Ausnahmen alle Werte in einem  $\pm 5\%$  - Bereich (durch gestrichelte Linien angedeutet) liegen. Dies ist, auch im Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen anderer Autoren (Evans, 1965; Gealy, 1971), ein erfreuliches Ergebnis. Bei Dichten  $>1.8\text{g/cm}^3$  liegen die Probendichten meist signifikant höher als die DMS-Dichten. Dies könnte möglicherweise mit Fehlern bei der Naßgewichtsbestimmung zusammenhängen. Sediment mit hohem Sandanteil neigt dazu, im Porenraum vorhandenes Wasser besonders schnell abzugeben. Daraus resultierende Fehler in der Naßgewichtsbestimmung können sich bei der Anwendung von Gleichung 5 verstärkt auf das Ergebnis auswirken. Ein um 5% zu niedriges Naßgewicht kann sich beispielsweise im Feuchtraumdichtewert als 10% Fehler niederschlagen. Auch die pycnometrische Volumenbestimmung kann die Dichtewerte weiter verfälschen, Reproduzierbarkeitstests von Melles (1991) ergeben Fehler im Bereich von 2%. O'Brien und Manghnani (1992) erhalten auch für Sedimente hoher Dichte (geringerer Wassergehalt) größere Fehler als für solche mit niedrigen Dichten. Schließlich seien auch die Fehler aus der Gammaabsorptionsmessung (Kapitel 3.2.5) genannt. Bei Betrachtung der Absolutdichten wirken sich außer den geräte- und methodespezifischen Fehlern ja auch noch Fehler bei



**Abbildung 3.21a:** Vergleich von Dichtedaten aus Messungen mit dem Dichtemeßsystem und von Dichtebestimmungen an Einzelproben an Kern PS1725-2. Oben sind zwei Kernausschnitte zu sehen, darunter die Dichtedaten gegeneinander. Das offensichtlich stark gestörte oberste Kernsegment dieses Schwerelotkerns wurde für diesen Vergleich nicht berücksichtigt.



**Abbildung 3.21b:** Vergleich von Dichtedaten aus Messungen mit dem Dichtemeßsystem und von Dichtebestimmungen an Einzelproben an Kern PS1821-6. Oben sind links die DMS-Daten, rechts die Einzelprobendaten zu sehen. In der unteren Graphik sind die auf verschiedene Weise ermittelten Dichten gegeneinander aufgetragen.

falschen Massenabsorptionskoeffizienten bei der Dichteberechnung aus den Rohdaten aus. Sind die Dichten relativ hoch, so ist der Massenabsorptionskoeffizient im allgemeinen nach oben hin falsch (es wird wegen der Wahl einer mittleren Processing-Porosität (PP) ein zu hoher Wasseranteil angenommen). Hieraus resultierende Dichtefehler können aber kaum > 1.5% sein. Auf eine mögliche Abhilfe dieses Problems wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen. In der Literatur wurden auch Korrekturfaktoren für Dichten ermittelt, die den unterschiedlichen Anteil von Photo- und Comptoneffekt-Wechselwirkung in Abhängigkeit von der Massenzahl der Elemente berücksichtigt (Danes, 1960). Eine solche Korrektur wurde hier nicht gemacht.

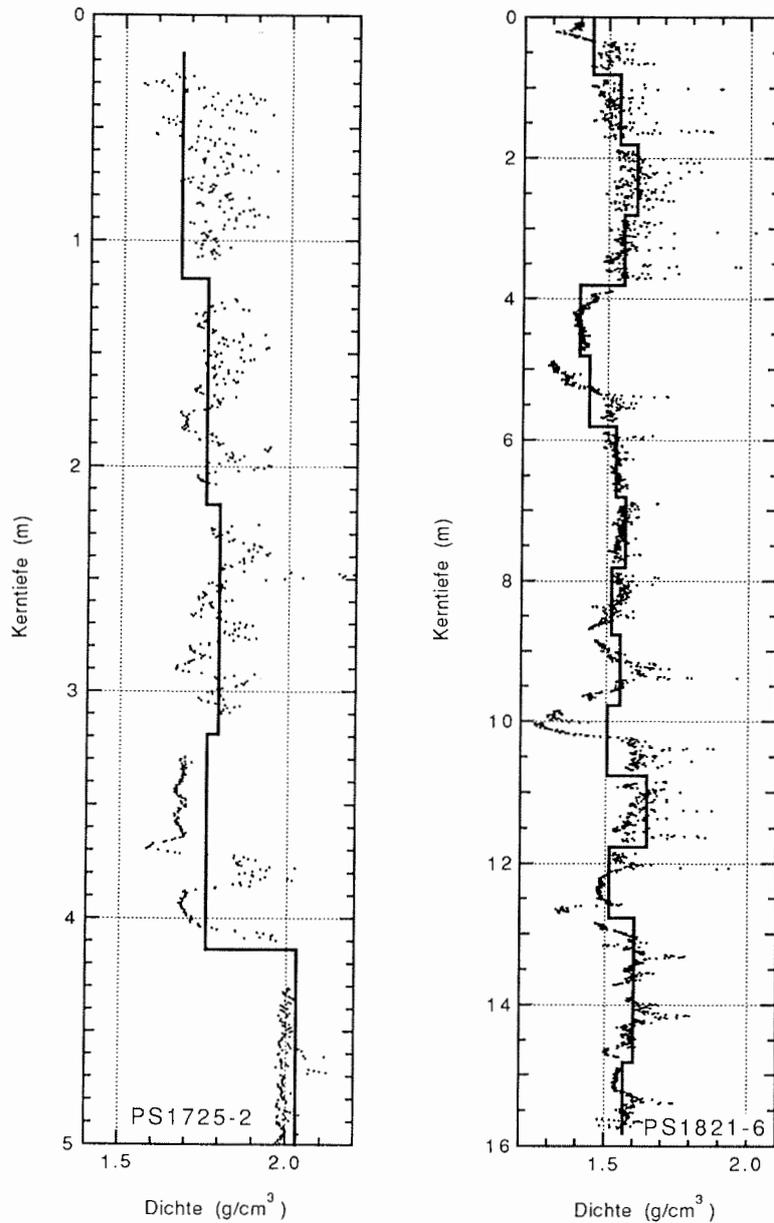
Letztlich besteht auch noch die Möglichkeit, anhand der Kernsegmentwägungen (siehe Kapitel 2.4) Informationen über Absolutdichten zu erlangen. Die Wiegedaten aller gewogenen Kerne sind der Tabelle in Abbildung 3.22 zu entnehmen. Unterschiedliche Segmentlängen finden hier noch keine Berücksichtigung, deshalb sind insbesondere bei den meist kurzen ersten Segmentstücken geringe Gewichte zu finden. Die mittlere Dichte  $\rho_{\text{Mittel}}$  eines Segments berechnet sich aus der Kernwägung wie folgt:

$$\rho_{\text{Mittel}} = \frac{m_{\text{ges}} - m_{\text{Liner}} - m_{\text{Deckel}}}{V_{\text{Innenliner}}} \quad (14)$$

Die einzelnen Gewichtsbeiträge  $m$  müssen für jedes Segment anhand des Kerntyps (Schwerelot oder Kolbenlot) und anhand der Segmentlänge berechnet werden. Das Innenvolumen des PVC-Rohrs (Liners)  $V$  muß ebenfalls aus der Segmentlänge und den Kerndurchmessern berechnet werden. Die Berechnung der mittleren Dichten aus Kernwägungen hier an den Kernen PS1725-2 und PS1821-6 gezeigt. 1cm Schwerelotliner-PVC wiegt 14.92g, entsprechend berechnet sich das Gewicht für die jeweilige Kernsegmentlänge. Zwei Schwerelotkernkappen wiegen 84.40g. Dieses Gewicht muß im Zähler von Gleichung 14 abgezogen werden. In Abbildung 3.23 sind die Daten aus den Messungen mit dem Dichtemeßsystem sowie die mittleren Dichten aus Kernwägungen für die Kerne PS1725-2 und PS1821-6 dargestellt. Abweichungen der Profile aus Messungen mit dem Dichtemeßsystem und Wägungen voneinander sind u.a. durch unterschiedliche Meßvolumina zu erklären. So können beispielsweise Gesteinsstücke (Dropstones), die bei der Gammaabsorptionsmessung nicht erfaßt wurden (Lage am Kernende oder -rand seitlich des Strahls) bei der Berechnung der mittleren Dichte für ein Segment einen höheren Wert bewirken, als der Dichteverlauf aus der Gammaabsorptions- und Einzelprobenuntersuchung ergab. Die Kernenden im Bereich der Verschlusskappen werden außerdem bei der Durchstrahlung nicht berücksichtigt und stellen somit eine weitere Unsicherheit im Rahmen dieses Vergleichs dar. Deshalb wurden auch keine Vergleiche zwischen Kernwägedaten und über ein Segment gemittelten Gammaabsorptionsdaten angestellt. Es ist interessant, daß trotz aller Fehler bereits durch die einfache Kernwägung eine erste Charakterisierung eines Kerns möglich ist. So kommt allein anhand der Wiegedaten die Homogenität von PS1827-1 sehr deutlich zum Vorschein, ebenso die enorm dichten Sedimente im unteren Kernabschnitt von PS1725-2. Auch der Übergang von Foraminiferen zu Diatomeen zeigt sich bereits an den Wiegedaten von PS1831-1 im fünften Segment. Dies unterstreicht den Nutzen dieser einfachen Methode, die zwar auf See schlecht, an Land aber sehr gut durchführbar ist.

Kern/ Segment -Nr.	PS1723-1	PS1724-2	PS1725-2	PS1821-6	PS1822-6	PS1826-1	PS1827-1	PS1831-1	PS2007-1	PS2089-1
1	18.4	7.5	20.5	14.5	9.8	keine Daten	10.9	4.3	14.7	keine Daten
2		20.6	21.4	19.0	21.9		17.0	9.7	19.8	
3			22.3	19.7	20.6		17.0	9.7	20.3	
4			21.5	19.2	19.6		17.0	9.7	19.0	
5			23.8	17.4	22.1		17.0	9.3	20.2	
6				17.8			17.0	8.5		
7				18.9			17.0	8.9		
8				19.3			17.0	10.6		
9				18.0			17.4			
10				19.1			17.4			
11				18.6			16.9			
12				20.2						
13				18.7						
14				20.7						
15				19.7						
16				19.3						

**Abbildung 3.22:** Tabelle mit den Daten aus Kernwägungen. An den Kernen PS1826-1 und PS2089-1 wurden keine Wägungen durchgeführt. Die Daten sind noch nicht auf die Kernlänge bezogen, stellen also absolut das jeweilige Segmentgewicht dar. Die obersten Stücke eines Kerns sind jeweils meist leichter als der Rest, da sie normalerweise kürzer als 1m sind (beim Teilen des kompletten Liners auf See wird an der Kernunterseite begonnen).



**Abbildung 3.23:** Vergleich der Wägedaten (durchgezogene Linien) und Daten, die mit dem Dichtemeßsystem bestimmt wurden (Punkte) für die Kerne PS1725-2 und PS1821-6. Das oberste Segment von PS1725-2 enthielt größere Mengen freien Wassers und Luft. Deshalb muß berücksichtigt werden, daß alle Messungen daran mit größeren Fehlern behaftet sind.

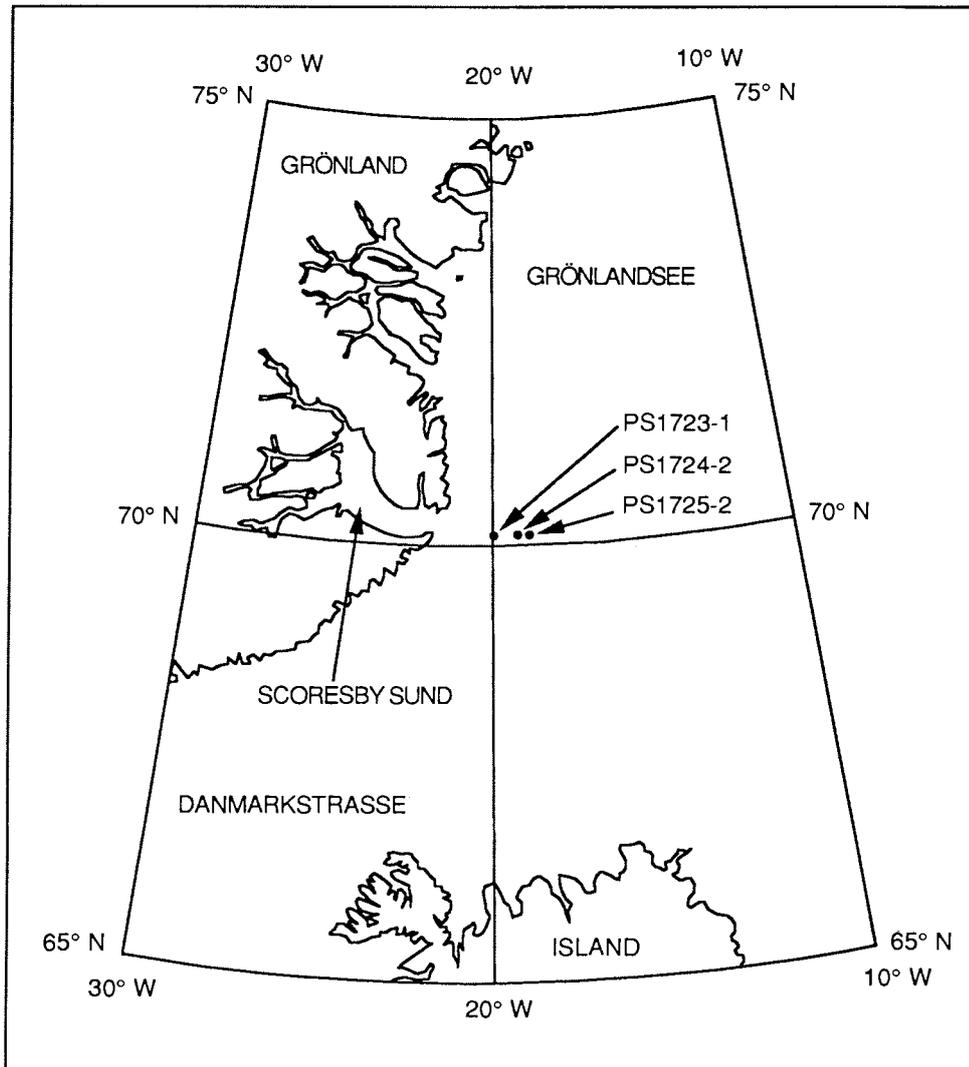
### 3.5 Darstellung der Ergebnisse

Vor der Präsentation der Ergebnisse aus den Dichtemessungen an Sedimenten sei noch kurz auf die zur Darstellung benutzten Softwarepakete und damit verbundenen Datenbearbeitungsschritte eingegangen.

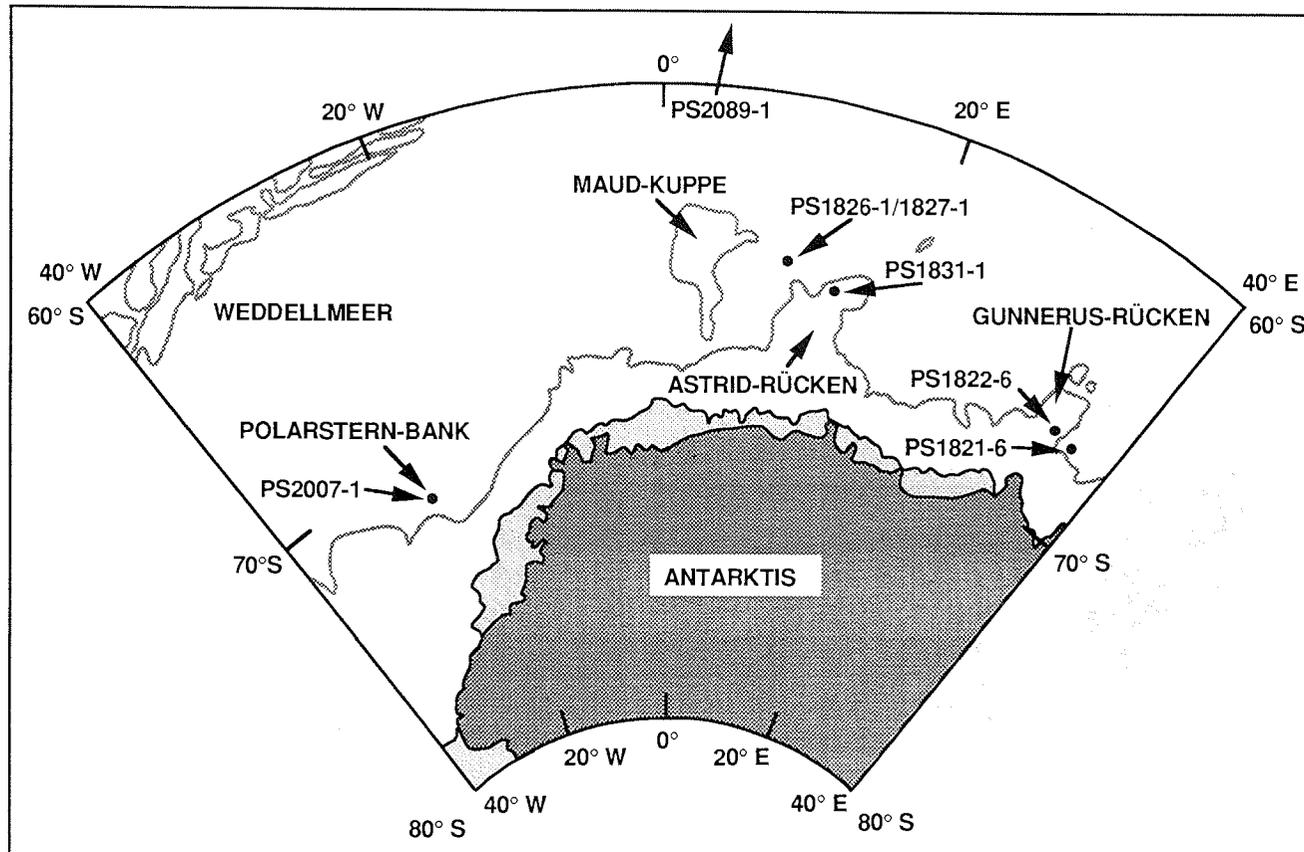
Im Rahmen der Standardmessungen wurden zehn Sedimentkerne für die Untersuchungen mit dem Dichtemeßsystem ausgewählt. Die Kerne stammen aus der Arktis, der Antarktis sowie aus dem Südatlantik. Ihre geographische Lage ist in den Karten in Abbildung 3.24 (Arktis) und 3.25 (Antarktis) eingezeichnet. Die Abbildungen 3.26a und 3.26b zeigen die Kernlogs der zehn Sedimentkerne. Die Dichteskalierung ist in allen Darstellungen gleich, damit die Profile vergleichbar sind und Anomalien zueinander leicht in Relation gesetzt werden können. Die Tiefenskalierung ist der jeweiligen maximalen Kernlänge angepaßt. Dies ist beim Vergleich der Logs untereinander zu beachten.

Zur Illustration der Daten aus Dichtemessungen an ausgewählten Tiefenabschnitten mit Kernrotation in 9°-Inkrementen wurden Darstellungsmöglichkeiten gesucht, die flächenhafte Datenmengen, also Werte mit zwei Koordinaten (hier Kerntiefe und Rotationswinkel) bewältigen und sinnvoll sichtbar machen können. Solche Darstellungen sind z.B. Isolinienbilder oder Grauwerte/raster- und Falschfarbendarstellungen. Da bei Isolinienbildern vornehmlich die Gradienten, in zweiter Linie aber erst die Absolutwerte hervorgehoben werden, sollte im Rahmen dieser Arbeit eine Grauwerte- bzw. Falschfarbendarstellung zur Anwendung kommen. Auch hier sind durch Auswahl bzw. Erzeugung geeigneter Farbpaletten die Vorteile von Isolinienbildern mit nutzbar (Verwendung vieler Farben in einer Wertepalette). Dies geht allerdings meist nur auf Kosten der Erkennbarkeit absoluter Dichteniveaus. Für diese Arbeit wurde das Programm Image IP vom National Center for Supercomputing Applications (NCSA) in Urbana-Champaign, Illinois, USA, benutzt. Dieses "Public Domain"-Programm wurde auf einem Apple-Macintosh Rechner angewendet. Um von diesem Programm gelesen werden zu können, mußten die Daten in binär dargestellte 1 byte bzw. 8 bit Zeichen umgewandelt und auf einen Bereich von 0 bis 255 skaliert werden. Diese Umrechnung wurde mit einem Fortran-Programm auf einem Personal Computer durchgeführt. Als Skalierungsparameter dienten die größten und kleinsten vorkommenden Werte. Da sich eine später noch angewandte Interpolation (s.u.) innerhalb von Image IP nicht sehr robust gegen am Bildrand liegende Extremwerte zeigte, wurden 50 unbelegte Skalenwerte (=0) am oberen und unteren Skalierungsende eingeführt. Somit stehen dann für die Umwandlung der Dichten nur noch die Skalenwerte von 50 bis 205 zur Verfügung. Eine geringfügige Verschlechterung der Dynamik muß zugunsten der Robustheit in Kauf genommen werden.

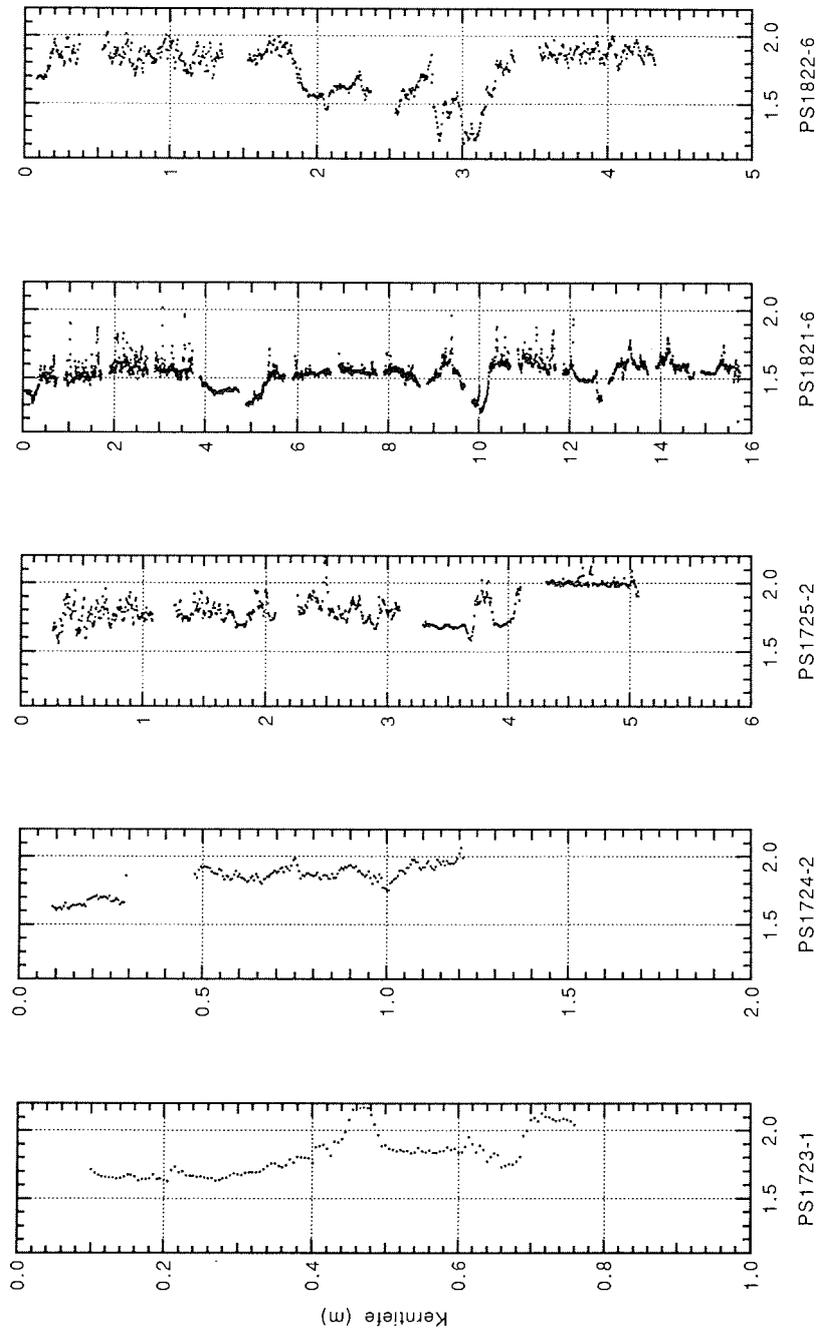
Zunächst wurden die Dichtedaten in ihrem Rohzustand dargestellt. Bei üblichen Feinmessungen erhält man hierbei ein Rasterbild von 41 x 37 Bildpunkten (41 Drehwinkelinkremente entsprechen Dichtemessungen alle 9° über einen Vollkreis, 37 Tiefeninkremente entsprechen Messungen alle 5mm über 18cm Kerntiefe). In Abbildung 3.27a ist als Beispiel ein solches Bild in einer Grauwertedarstellung zu sehen. Da durch die z.T. sprunghaften Übergänge zwischen einzelnen Bildpunkten die Übersicht über die gesamte Fläche gestört wird, wurde eine flächenhafte Interpolation auf die Daten angewandt. Bei der Interpolation der Bilddaten handelt es sich um eine bilineare Interpolation, wobei ein gleitendes, gewichtendes Mittel über das Datenfeld geschoben



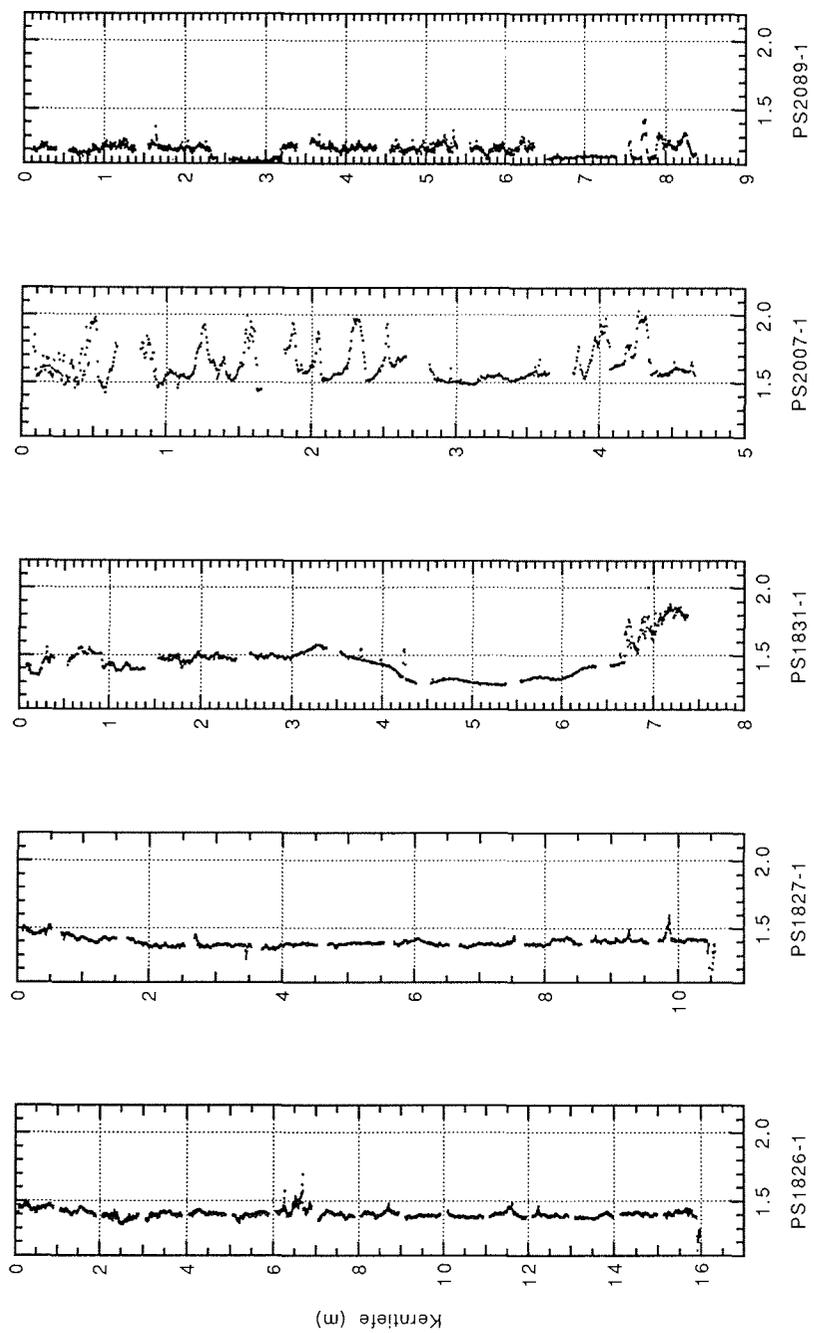
**Abbildung 3.24 :** Karte mit den Stationspunkten der drei Schwermetallkerne aus der Arktis. Die Kerne stammen vom ostgrönländischen Kontinentalhang (Bildmitte).



**Abbildung 3.25:** Karte der Stationen der Sedimentkerne aus der Antarktis. Grau ist die 4000m- Tiefenlinie eingezeichnet. Die Station von Kern PS2089-1 liegt im Südatlantik außerhalb dieses Kartenausschnittes (Koordinaten im Anhang).



**Abbildung 3.26a:** Dichteprofile für die ersten fünf Sedimentkerne, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Der Dichtemaßstab ist für alle Kerne gleich, der Tiefenmaßstab ist der jeweiligen Kernlänge angepaßt.

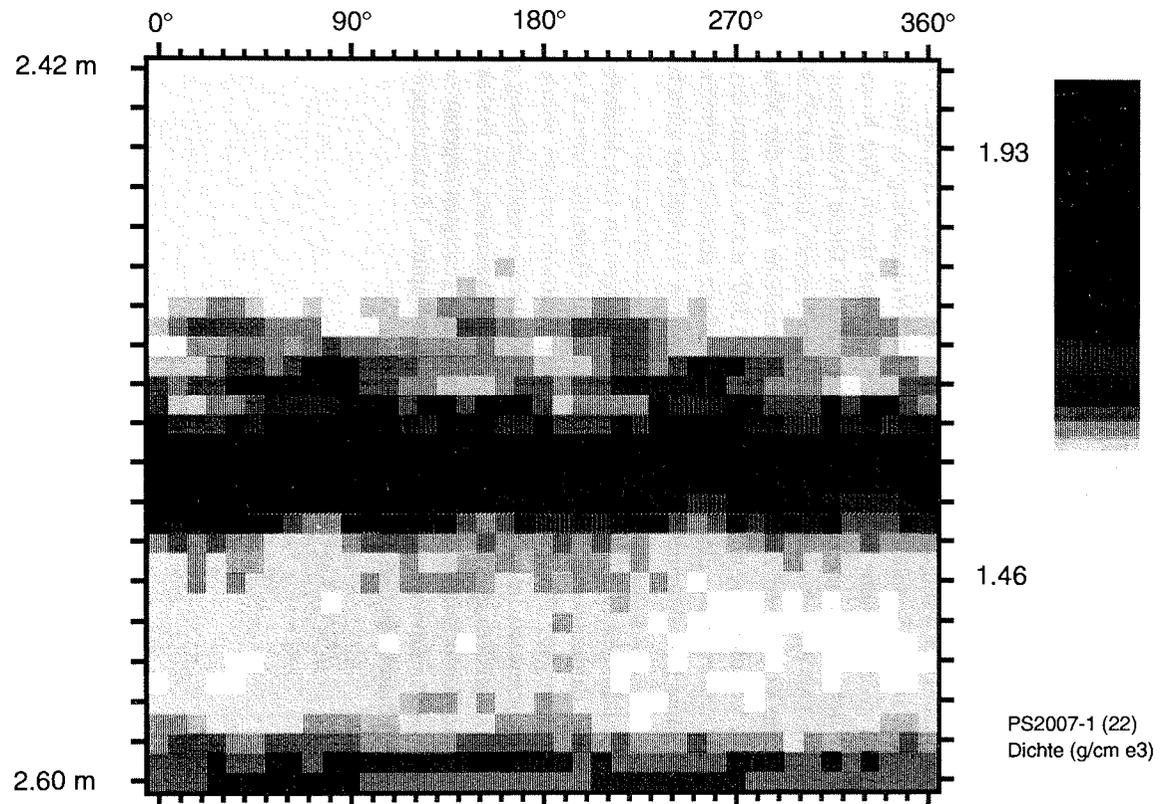


**Abbildung 3.26b:** Dichteprofile für die zweiten fünf Sedimentkerne, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Der Dichtemaßstab ist für alle Kerne gleich, der Tiefenmaßstab ist der jeweiligen Kernlänge angepaßt.

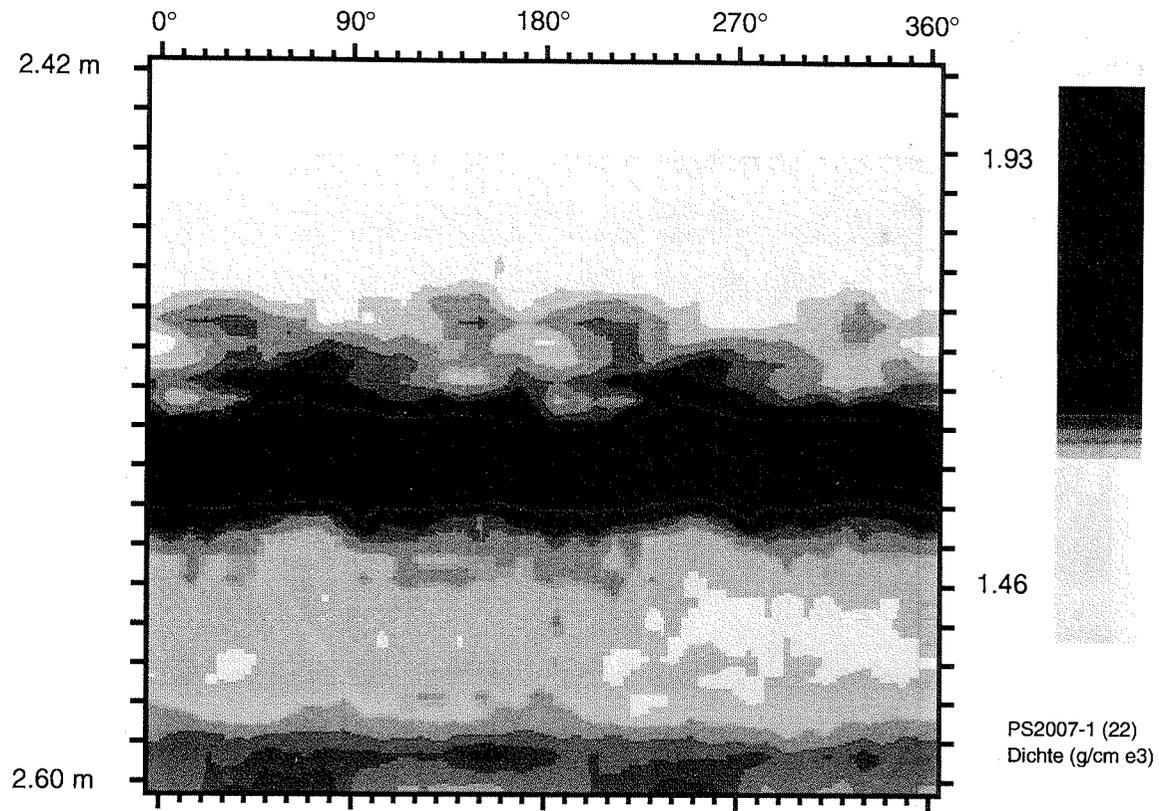
wird und unter Berücksichtigung der Nachbarwerte neue Pixelwerte berechnet. Abbildung 3.27b zeigt die schon in Abbildung 3.27a dargestellten Daten jetzt nach der Interpolation. Der Vorteil wird insbesondere bei der Betrachtung räumlich sehr kleiner Dichteveränderungen deutlich. Diese sind nämlich jetzt besser zu erkennen und einzugrenzen. Ein Nachteil der Interpolation ist die Möglichkeit der Fehlinterpretation der Daten. Die interpolierte Darstellung kann bei einem unzureichend informierten Betrachter eine größere Anzahl von Meßwerten pro Fläche vortäuschen. Deshalb sollte immer das Bild der Rohdaten (Abbildung 3.27a) in Erinnerung behalten werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Betrachtung der Bilder ist die einmalige Wiederholung aller realen Dichteanomalien bei einer Messung mit vollständiger Kernrotation. Jeder durchstrahlte Weg im Sedimentkern wird zweimal, einmal von jeder Richtung, durchstrahlt. Deshalb erscheinen alle markanten Inhomogenitäten zweimal. Ist eine solche Anomalie nur einmal vertreten, so gibt es zwei Erklärungsmöglichkeiten: Zum einen tritt dies auf, wenn Anomalien nur äußerst gering von den Umgebungswerten abweichen, also mehr oder weniger im Rauschen der Werte liegen. Eine andere Ursache können Störungen in der Spannungsversorgung sein (Netzstörungen, siehe Kapitel 3.2.5). Sie treten aber nur sehr selten auf und sind dann durch ihre Komet- oder Tropfenform deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 3.27i). Diese Form resultiert aus dem zeitlichen Verlauf einer Netzstörung. Nach einem Versatz folgt ein allmähliches Angleichen an den vorherigen Zustand. Durch die zeitliche Folge der Messungen, Drehung um  $360^\circ$ , Verschiebung um 5mm, Drehung um  $360^\circ$  u.s.w., kommt letztlich die waagerechte Tropfenform zustande. Wegen des nur äußerst seltenen Auftretens dieser Störung wurden keine Korrekturmaßnahmen dazu getroffen. Vorstellbar wäre hier etwa ein Vergleich der Daten für gleiche Strahlwege durch ein Rechenprogramm.

In den Abbildungen (3.27c-j) sind weitere Messungen an verschiedenen Kernausschnitten (siehe Bildunterschriften) mit Kernrotation (Tiefeninkremente ebenfalls 5mm, Rotationsinkremente  $9^\circ$ ) dargestellt. Statt der Grauwertpalette wurde für die Wiedergabe der Dichtewerte in Abbildung 3.27c eine Falschfarbendarstellung gewählt. Diese Form der Visualisierung ermöglicht bei geeigneter Skalierung der Farbskala eine besonders deutliche Hervorhebung der Dichtekontraste. Die gezeigten Ergebnisse aus den Messungen mit Kernrotation werden im nachfolgenden Kapitel 3.6 zusammen mit den Resultaten aus den Standardmessungen (s.o.) diskutiert.



**Abbildung 3.27a:** Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS2007-1. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in g/cm<sup>3</sup> angegeben. In dieser Darstellung sind die Dichtemeßdaten ohne räumliche Interpolation (wie in den übrigen Darstellungen in Abb. 3.27) wiedergegeben.



**Abbildung 3.27b:** Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS2007-1. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in  $g/cm^3$  angegeben. Diese Darstellung zeigt die bereits in Abbildung 3.27a dargestellten Daten, jetzt aber mit räumlicher Interpolation, wie sie sonst auch angewandt wurde.

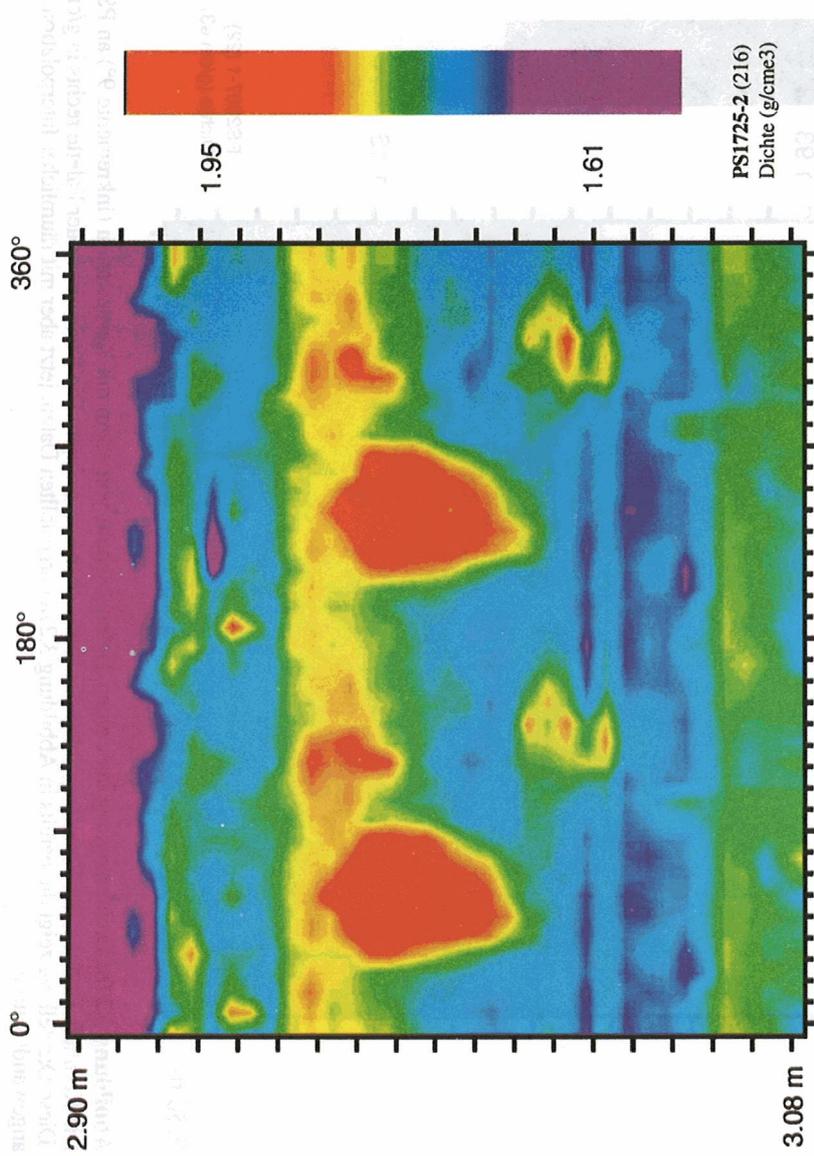
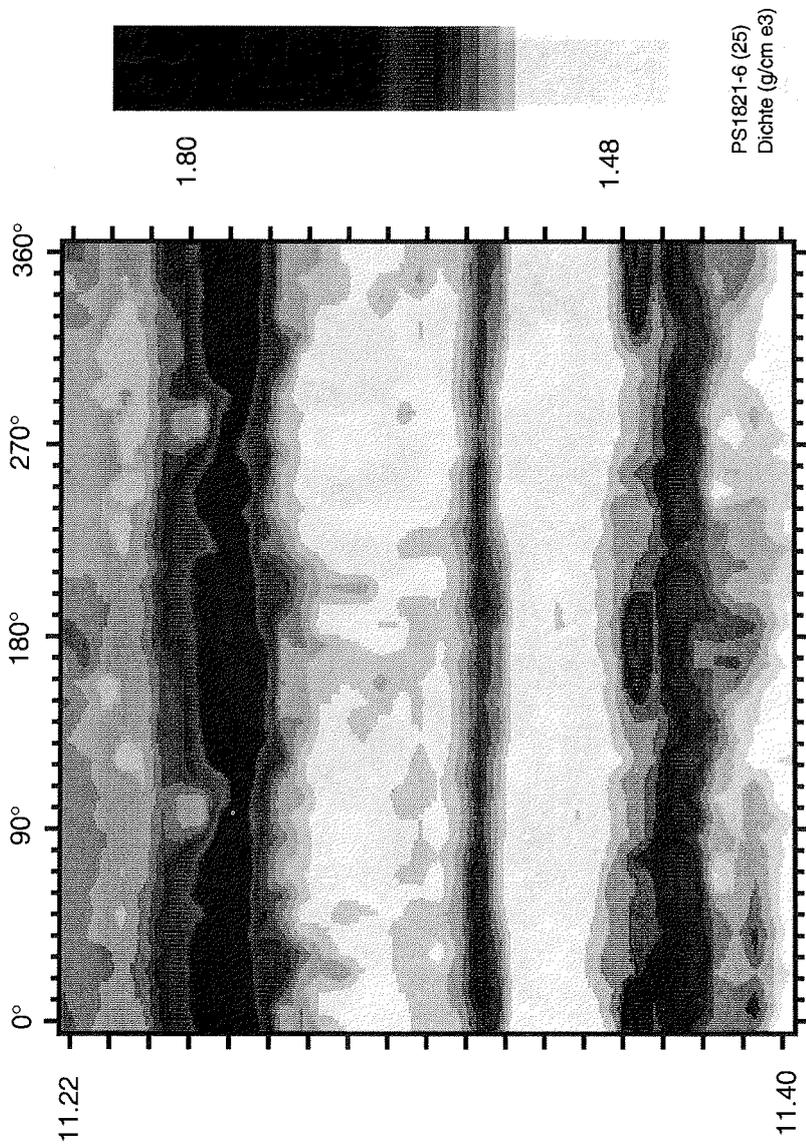
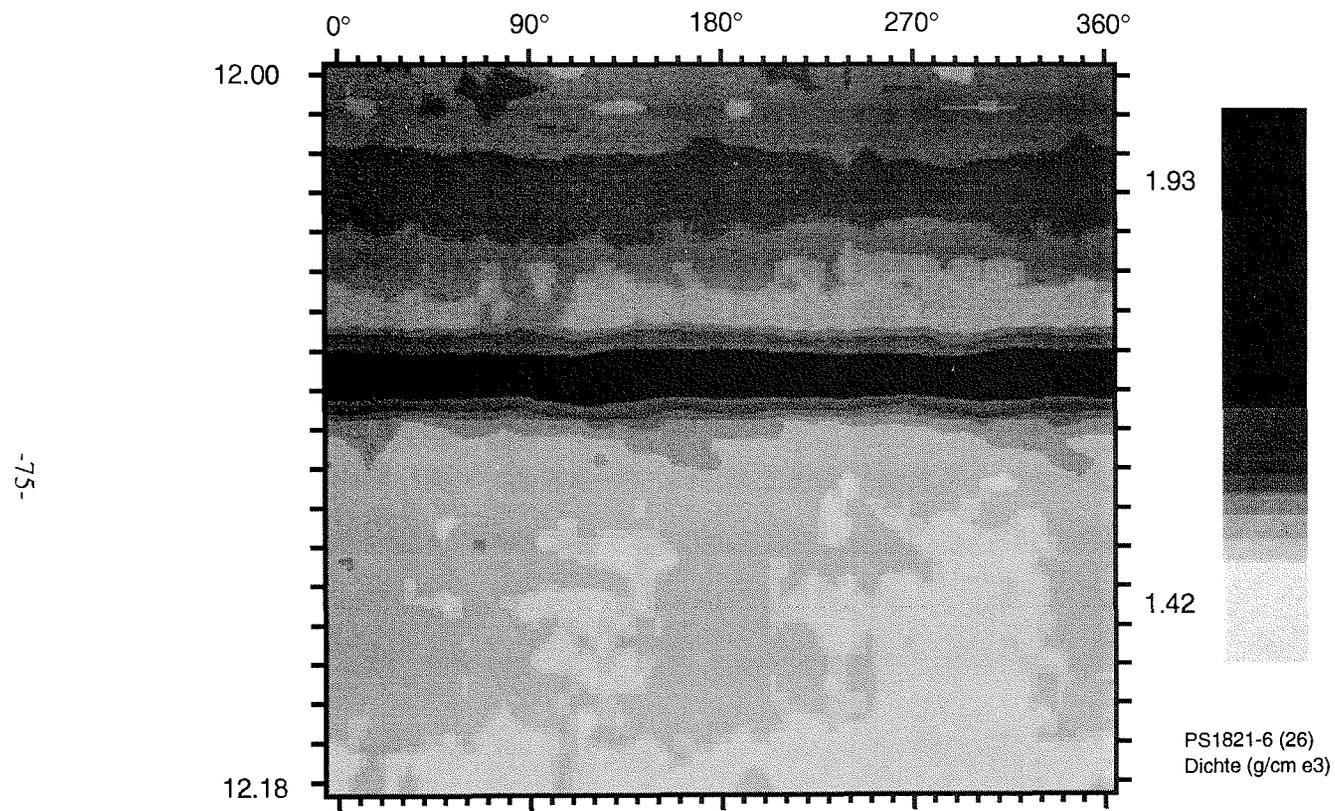


Abbildung 3.27c: Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1725-2. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in  $\text{g/cm}^3$  angegeben.

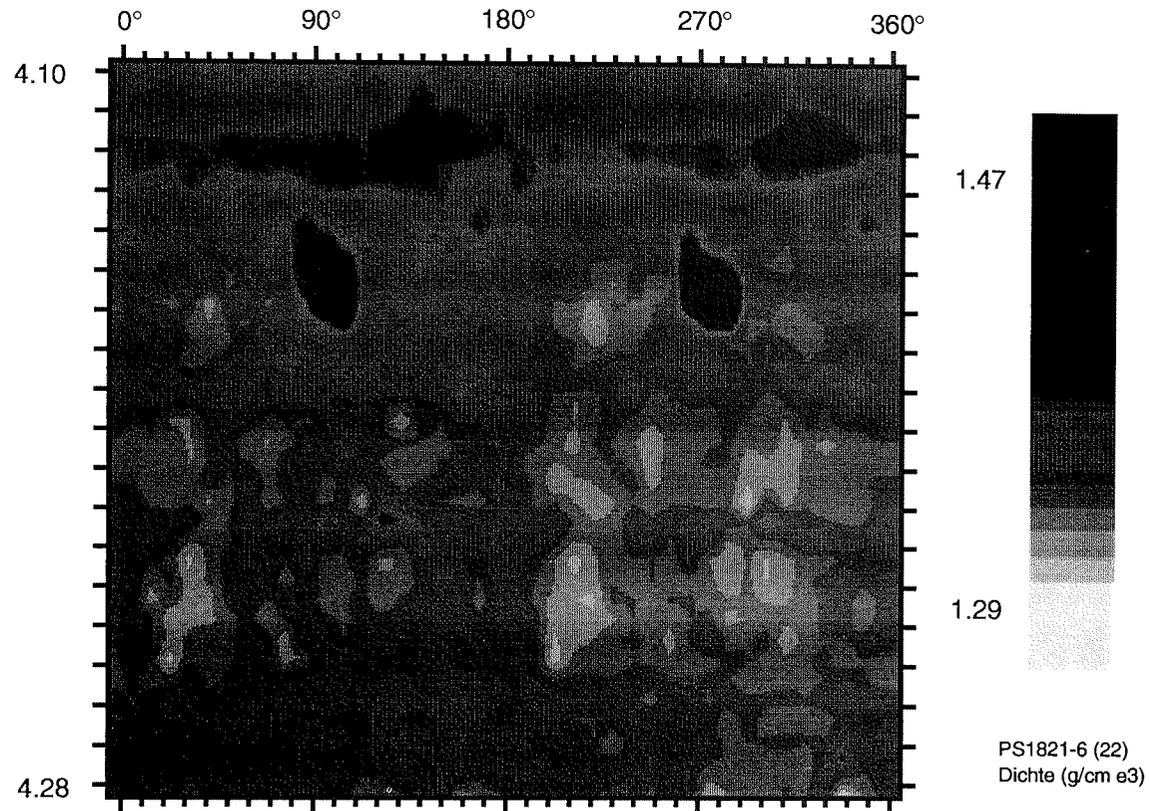




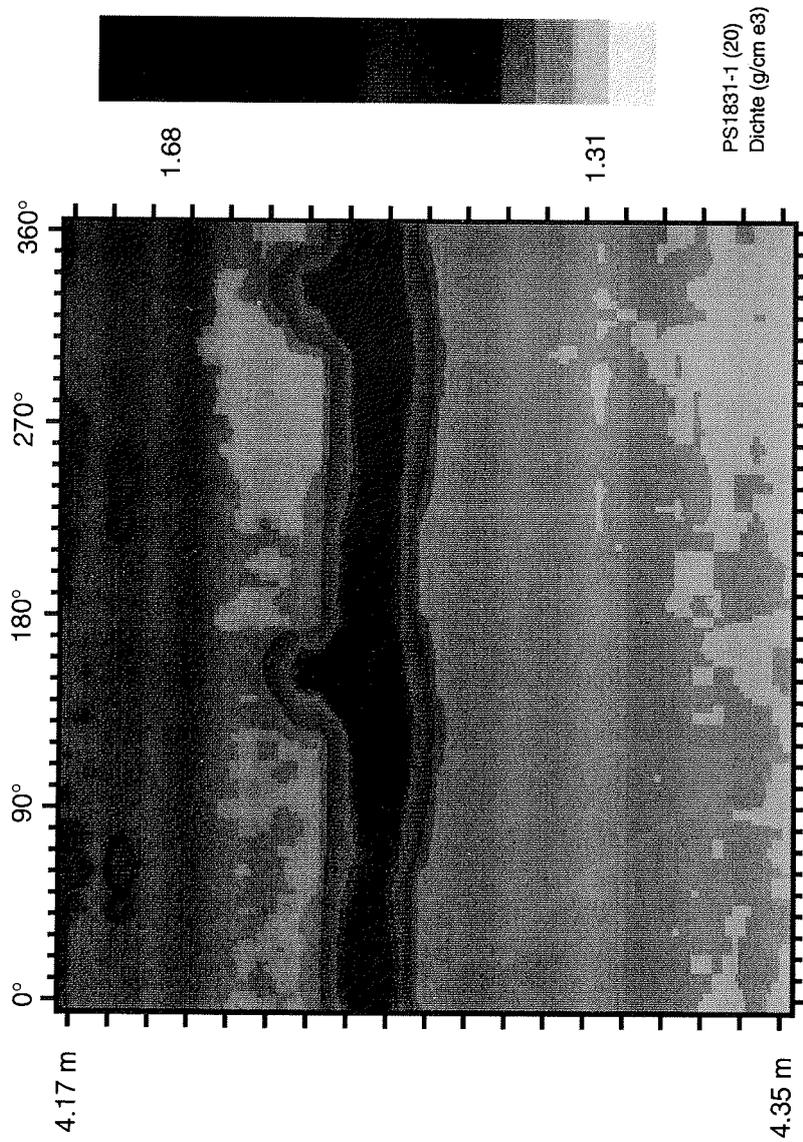
**Abbildung 3.27e:** Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1821-6. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in g/cm<sup>3</sup> angegeben.



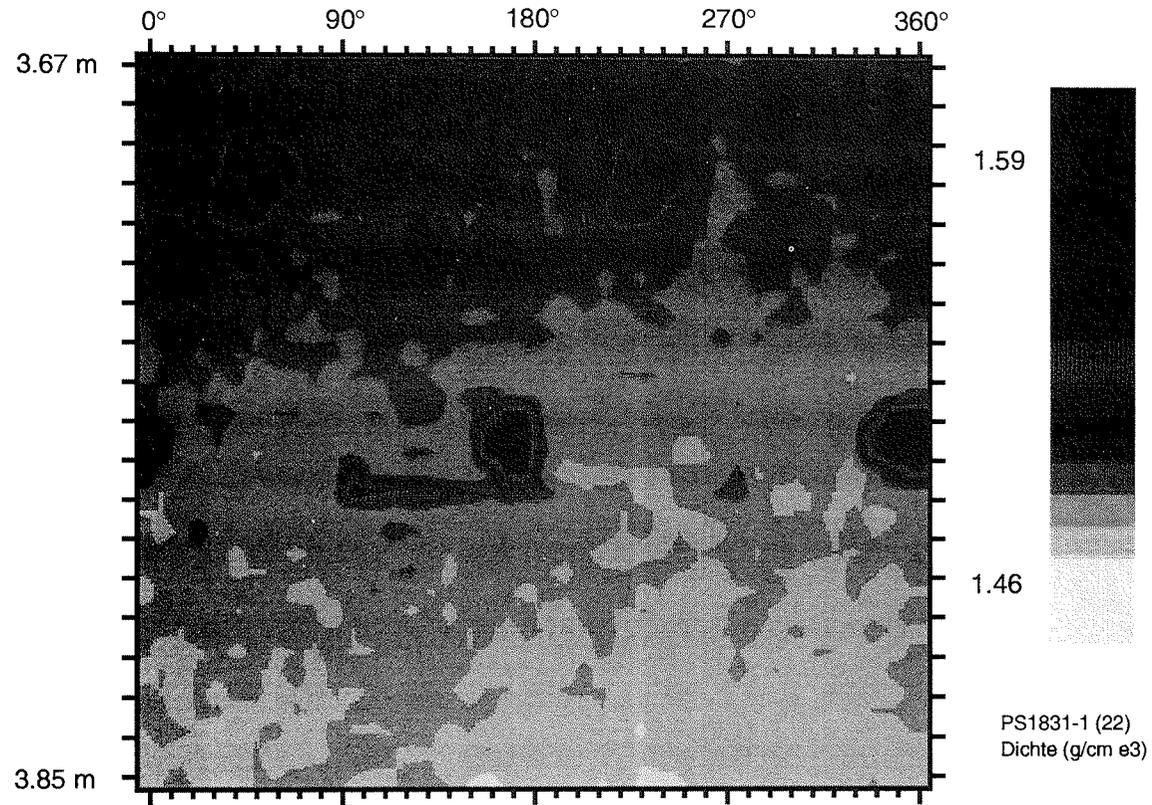
**Abbildung 3.27f:** Die zweite Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1821-6. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in  $\text{g/cm}^3$  angegeben.



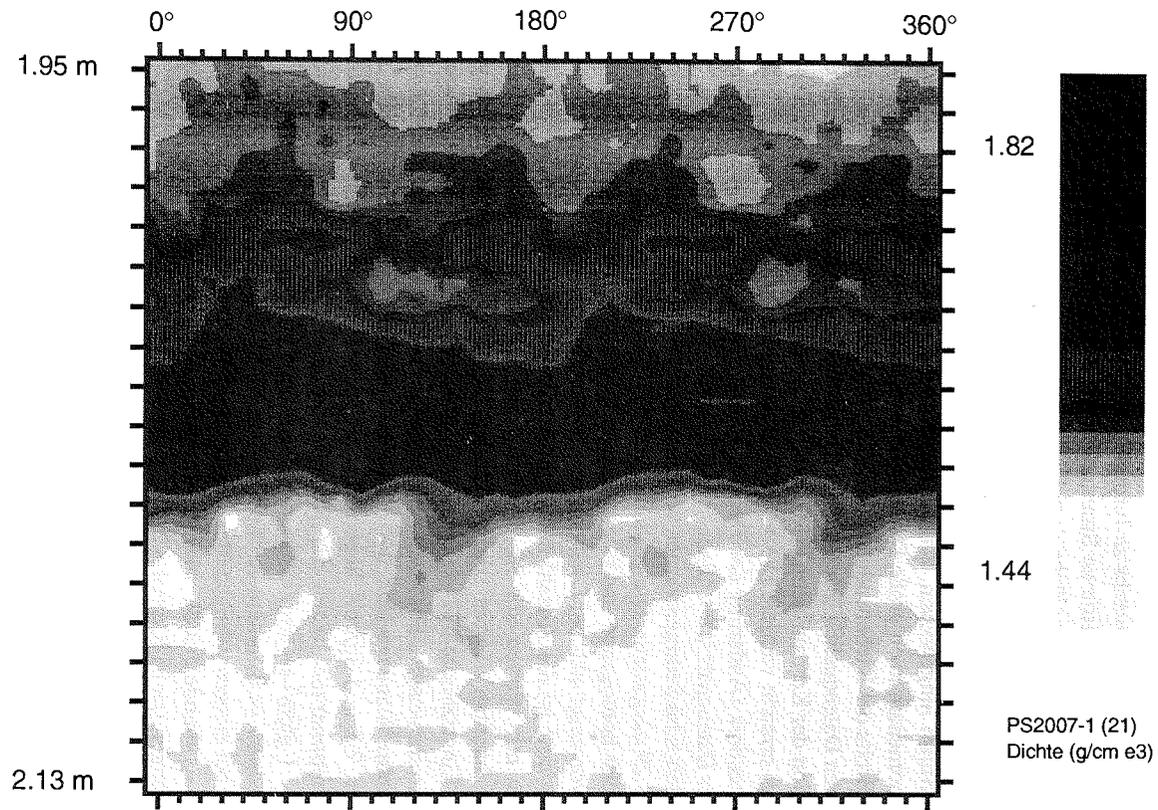
**Abbildung 3.27g:** Die dritte Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1821-6. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in g/cm<sup>3</sup> angegeben.



**Abbildung 3.27h:** Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1831-1. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in g/cm<sup>3</sup> angegeben.



**Abbildung 3.27i:** Eine weitere Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS1831-1. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in  $\text{g/cm}^3$  angegeben.



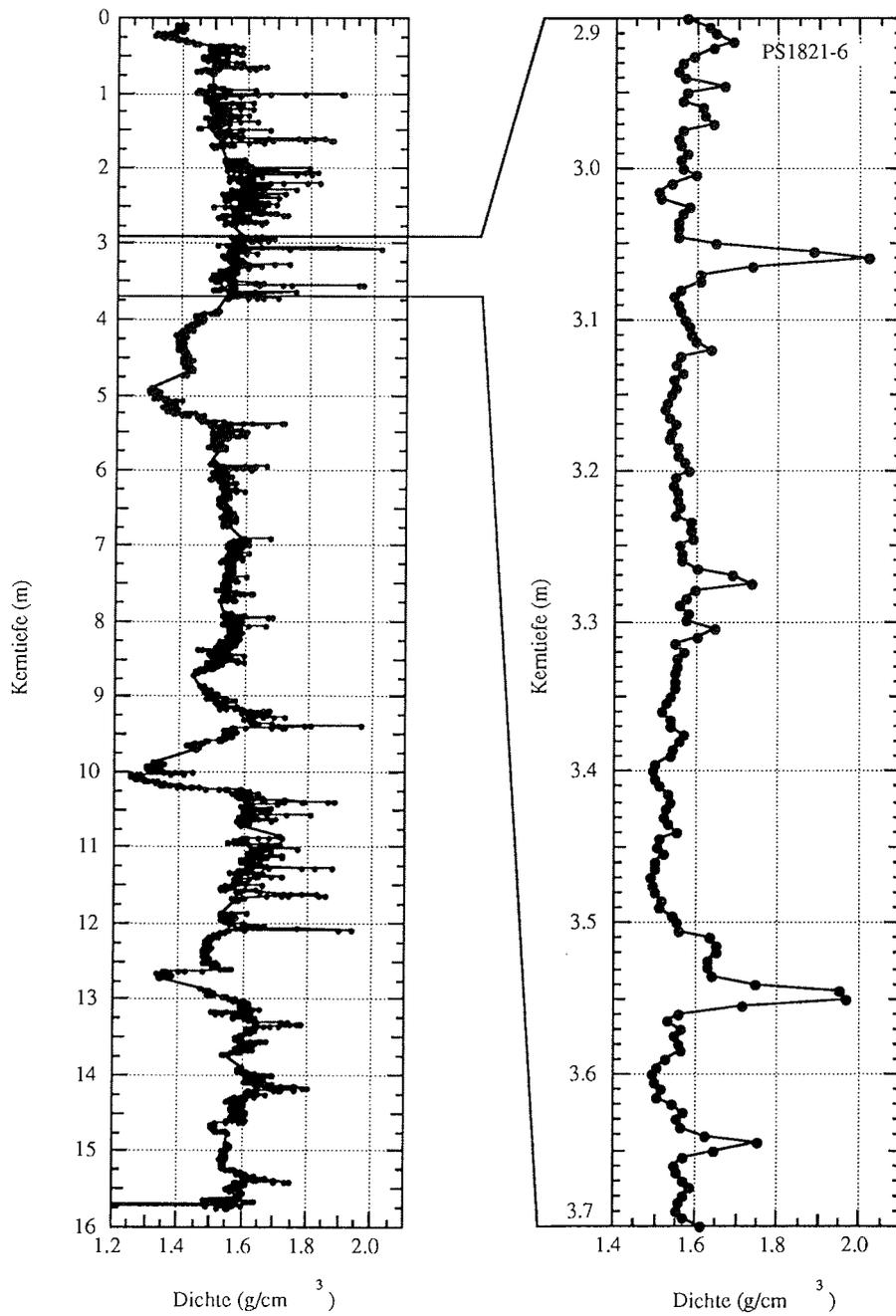
**Abbildung 3.27j:** Dichtemessung über einen Tiefenabschnitt von 18cm mit Kernrotation (Inkrement 9°) an PS2007-1. Die Kerntiefe ist links, der Rotationswinkel des Kerns oben verzeichnet. Die Dichte ist in der Palette rechts in  $\text{g/cm}^3$  angegeben.

### 3.6 Diskussion der Ergebnisse

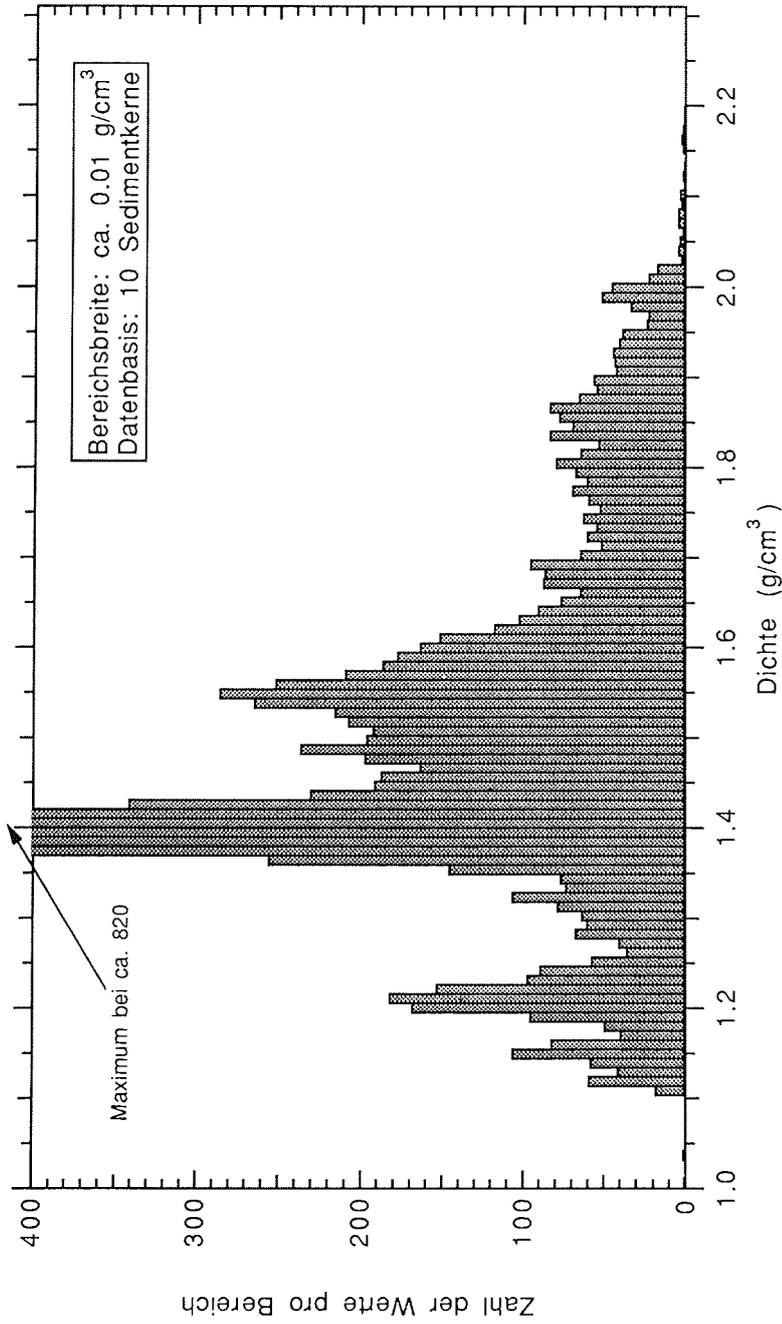
Bei den Standardmessungen erweist sich das ausgewählte Meßinkrement (5mm) als gut brauchbar, auch schmale Sedimenthorizonte können gut erfaßt werden. Die in den Übersichtsdarstellungen (Abbildung 3.26a und 3.26b) als "Rauschen" erscheinenden Bereiche mit größeren Mengen terrigener Sedimente z.B. bei Kern PS1821-6 während der Glazialzeiten (s.u.) erweisen sich bei einer gestreckteren Darstellung als völlig kohärente Signale (Abbildung 3.28). Eine feinere Abtastung entlang der Tiefenachse der Kerne würde somit keinen Zuwachs an Information, sondern nur eine Verlängerung der Meßzeit bewirken. Mit der mittleren Strahlbreite von ca. 4mm erreicht man bei einem Vorschub von 5mm eine nahezu lückenlose Dichtebestimmung innerhalb der Meßfenster der Kernsegmente. Lediglich 1mm zwischen zwei Meßpunkten bleibt undurchstrahlt. In diesem Zusammenhang sei auf das weiter oben beschriebene Experiment zur Untersuchung des Abbildungsverhaltens des Dichtemeßsystems in Kapitel 3.2.4 (PVC-Kern mit Spalt und Stufe) hingewiesen. Ein Nachteil für die geologische Interpretation der Daten ist die momentan noch große Datenlücke zwischen zwei Kernsegmenten mit ca. 15cm, je nach Breite der Klebebandabdichtung. Eine Abhilfe könnte durch Inkaufnahme einer schlechteren Datenqualität (Messung im Klebeband- und Kappenbereich) und durch eine Modifikation der Kernaufnahme (Meßschlitze in den Aufnahmen für ungehinderte Durchstrahlung) erreicht werden. Die Modifikation gemeinsam mit einer abgeänderten Kernverschlußtechnik (Änderung der Deckel) könnte die Datenlücken auf ca. 5cm mit gleichbleibender Datenqualität bewirken.

Der in den zehn Sedimentkernen vorkommende Dichtebereich ist im Histogramm in Abbildung 3.29 dargestellt. Die größten Maxima der Verteilungskurve bei  $1.4\text{g/cm}^3$  fallen den äußerst homogenen und relativ langen Kernen PS1826-1 und PS1827-1 zu. Abgesehen davon zeigt sich bei Dichten um  $1.55\text{g/cm}^3$  ein relatives Maximum. Bis zu Dichten um  $2\text{g/cm}^3$  ist die Anzahl der Dichtewerte pro Bereich (Breite:  $0.01\text{g/cm}^3$ ) jeweils ähnlich mit Werten um 50. Weiterhin ist sichtbar, daß die kleinsten vorkommenden Dichten bei  $1.1\text{g/cm}^3$ , die größten bei  $2.2\text{g/cm}^3$  liegen. Das Dichtemeßsystem hat eine große Einsatzbreite und eignet sich für die verschiedensten Anwendungen im Bereich von Kernmessungen. Ergänzend zur Verteilungskurve der Feuchtraumdichten sei in diesem Zusammenhang erwähnt, daß die Korndichten bei marinen Sedimenten in der Regel zwischen  $2.1$  und  $3\text{g/cm}^3$  liegen. Bei marinen Sedimenten mit hauptsächlich terrigenen Komponenten liegen die Korndichten um  $2.7\text{g/cm}^3$ . Zu Feuchtraumdichtewerten  $<1.1\text{g/cm}^3$  sei angemerkt, daß diese meist von Luft bzw. Schaumstoff am Kernende herrühren (z.B. untere Kernenden von PS1826-1 und PS1827-1). Weitere Störungen sind bei einigen wenigen Messungen mit  $9^\circ$ -Kernrotation (Abbildungen 3.27) zu erkennen, es handelt sich hierbei um die schon weiter oben diskutierten Spannungsstörungen (siehe Kapitel 3.2.5).

Für die Genauigkeit der Absolutdichten insbesondere bei sehr hohen oder sehr niedrigen Dichten spielt die gewählte Processing-Porosität (PP, siehe Kapitel 2.1.3 und 3.2.5) auch eine wichtige Rolle. Alle hier gezeigten Daten sind mit einer jeweils für einen Kern fixen PP berechnet, wobei für terrigen dominierte Kerne 0.5, für Kerne mit Abschnitten aus hauptsächlich terrigenen *und* biogenen Sedimenten 0.6 und für Kerne mit hauptsächlich biogenen Komponenten 0.7 gewählt wurde (siehe Kapitel 3.1.2). Als terrigen wurden die Kerne PS1723-1, PS1724-2, PS1725-2 und PS2007-1, als



**Abbildung 3.28:** Ausschnitt aus dem Dichteprofil der Standardmessung ohne Kernrotation an Kern PS1821-6 (rechts). Links ist das gesamte Kernprofil dargestellt.



**Abbildung 3.29:** Histogramm für alle in den Standardmessungen ohne Kernrotation an den zehn Sedimentkernen gemessenen Dichten. Links ist die Zahl der Dichtemeßwerte innerhalb eines Dichtebereichs aufgetragen.

"Mischkerne" PS1821-6, 1822-6, PS1826-1, PS1827-1 und als biogen dominierte Kerne PS1831-1 und PS2089-1 eingestuft. Abhilfe bei Fehlern der Absolutdichte aufgrund falscher Processing-Porositäten (PP) kann das in Kapitel 4.1 diskutierte Iterationsverfahren schaffen.

Die Messungen an Kern PS2089-1 wurden durchgeführt, als sich das Dichtemeßsystem noch in der Aufbauphase befand, da dieser Kern nur zu dieser Zeit zur Messung zur Verfügung stand. Deshalb konnten hier noch nicht die endgültigen Meßparameter (Meßrate, Einstellungen, Art der Nullmessung) berücksichtigt werden. Trotzdem wurde das Meßergebnis mit in diese Arbeit hineingenommen, da der Kern insbesondere im Zusammenhang mit den weiter unten diskutierten tomographischen Untersuchungen sehr interessant ist und zumindest die relativen Dichteänderungen mit dem sonst üblichen Standard vergleichbar sind. Alle anderen neun Kernmessungen wurden mit den bereits weiter oben aufgeführten Geräteeinstellungen vorgenommen. In der folgenden Tabelle sind die Geräteeinstellungen und Meßparameter noch einmal zusammengefaßt:

Parameter	Einstellung bzw. Wert
Meßrate Absorptionsmessung	100 Werte pro Meßpunkt
Meßzeit Absorptionsmessung	4 s pro Meßpunkt
Auflösung Spannungsmessung	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> -fach, d.h. 1mV von 0 bis 1.999 V
Meßrate Ø-Messung	1 Wert pro Meßpunkt
Meßzeit Ø-Messung	< 1 s pro Meßpunkt
Auflösung Widerstandsmessung	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> -fach, d.h. 0.1Ω von 0 bis 1.9999 kΩ
Empfindlichkeit Löffel SMS-103A	100‰
Zeitkonstante Tiefpaß SMS-103A	0.3 s
Tiefeninkrement	5 mm
Rotationswinkelinkrement	9°

Als Auswahlkriterien für die Standardmessungen ohne Kernrotation (Abbildungen 3.26a und 3.26b) und für die Messungen mit Kernrotation (9°-Inkrement) an Abschnitten wurden in erster Linie Ergebnisse aus bereits an den ungeöffneten Kernen vorgenommenen Messungen anderer Parameter herangezogen. Aufgrund der guten Korrelation von Dichte und spezifischem elektrischem Widerstand (siehe Kapitel 4.4.1) konnte für einige Kerne anhand von Widerstandsprofilen aus induktiven Messungen die Dichtetiefenstruktur, zwar mit verschlechterter Auflösung, aber trotzdem als Auswahlkriterium ausreichend gut, abgelesen werden. Ziel war es bei den Standardmessungen, ein möglichst breites Spektrum an Sedimentcharakteristiken zu untersuchen. Das gleiche gilt für die Auswahl der Abschnitte für Messungen mit Kernrotation in 9°-Inkrementen. Hier halfen sowohl die Dichtemessungen ohne Kernrotation als auch die weiter unten (Kapitel 4.2) vorgestellten röntgentomographischen Untersuchungen mit, eine entsprechende Auswahl treffen zu können. An Sedimenten mit eistransportiertem Material unterschiedlicher Größe, verschiedenen Horizonttypen und -wechseln bis hin zu

Turbiditlagen sollten die Möglichkeiten der Messung mit Kernrotation in kleinen ( $9^\circ$ ) Winkelinkrementen aufgezeigt werden. Die Abbildungen 3.27a bis j zeigen neun Beispiele für solche Messungen, wobei neben markanten Dropstones (Abbildungen 3.27c,d,g,h, und i) auch verschiedenartige Horizonte (Abbildungen 3.27a,b,e und f) zu sehen sind. In Abbildung 3.27e kommt besonders gut zum Ausdruck, welche unterschiedliche Horizonttypen innerhalb eines Kernabschnitts von nur 18cm Tiefe auftreten können. Abbildung 3.27f zeigt einen sehr dünnen Horizont in einem ansonsten völlig homogenen Sediment. In Abbildung 3.27j schließlich ist anhand der Dichtedaten die Basis eines Turbidithorizontes zu erkennen.

Im folgenden werden die wesentlichen sedimentologischen Merkmale der zehn in Kapitel 3.5 dargestellten Sedimentkerne (Abbildungen 3.26a und b sowie 3.27a bis j) erläutert. Informationen über Herkunft etc. der Kerne sind aus dem Anhang, Abschnitt A, zu entnehmen. Die im folgenden Text häufiger benutzten englischsprachigen Begriffe "Mud" und "Ooze" wurden nicht ins Deutsche übersetzt. Mit "Mud" wird allgemein ein Sediment aus terrigenen oder aus terrigenen und biogenen Bestandteilen (bis 50%) bezeichnet. Ein "Ooze" enthält mehr als 50% biogene Komponenten.

**- PS1723-1 und PS1724-2 (beide Kerne bereits geöffnet)**

Wegen ihrer benachbarten geographischen Lage, ihrer Ähnlichkeit und Kürze werden diese beiden Kerne hier gemeinsam diskutiert. PS1723-1 ist ein verhältnismäßig kurzer Schwerelotkern aus der Arktis vom östlichen Kontinentalschelf Grönlands (Miller und Weigel, 1993), östlich des Scoresby Sund. Der Dichteverlauf zeigt Werte von ca.  $1.7\text{g/cm}^3$  im oberen Teil bis  $2.2\text{g/cm}^3$  im mittleren und unteren Teil des Kerns. Dies sind die höchsten Werte von allen zehn vorgestellten Kernen. Sie sind durch die regionalen Sedimentationsbedingungen plausibel zu erklären. Bedingt durch den hohen terrigenen Anteil von Sedimentationsmaterial und nur äußerst wenige biogene Komponenten (Marienfeld, 1991) aus dem Scoresby Sund sind hohe Sedimentdichten zu erwarten. Die Korndichten für beide Kerne liegen meist etwas über  $2.7\text{g/cm}^3$ . Dem lokalen Dichtemaximum bei einer Kerntiefe von 0.46m liegt ein Dropstone ( $\varnothing=9\text{cm}$ ) zu Grunde, der vermutlich von einem Eisberg aus den Gletschern innerhalb des Scoresby Sunds stammt (pers. Mitt. S.-I. Nam, 1992). Auch der übrige Kernbereich enthält eistransportiertes Material (IRD). Das Sediment kann insgesamt als "sandy mud" angesprochen werden (Stein et al., 1993). Bei ca. 0.7m Kerntiefe steigt die Dichte erneut an, hier sind stark konsolidierte Sedimente zu finden. PS1724-2 ist nur geringfügig länger als PS1723-1. Beide Kerne ähneln sich im Dichteverlauf und den sedimentologischen Parametern, wobei bei PS1724-2 der Sandanteil des Sediments noch etwas stärker mit der Tiefe zunimmt (pers. Mitt. S.-I. Nam, 1992). Zeitlich werden die Sedimente beider Kerne dem Holozän zugeordnet (Stein et al., 1993; pers. Mitt. S.-I. Nam, 1992).

**- PS1725-2 (Kern bereits geöffnet)**

Als dritter Kern aus dem Gebiet östlich des Scoresby Sund ist PS1725-2 sowohl der längste Kern als auch der mit der größten Wassertiefe (879m am Kontinentalhang). Innerhalb des Dichteprofiles sind vier markante Zonen zu differenzieren. 1.: Der Bereich bis zu einer Kerntiefe von 3.10m ist ein terrigen dominierter "mud", er enthält viel IRD mit einzelnen Gesteinsstücken bis zu einem Durchmesser von 3cm. Die im Dichtelog als

räumliches Rauschen erscheinenden Variationen haben eine Dynamik von  $0.3\text{g/cm}^3$  (bei großer räumlicher Auflösung der graphischen Darstellung erweisen sich diese Signale als ebenso kohärent wie die von PS1821-6 (s.o., Abbildung 3.28). 2.: Der Bereich zwischen 3.20m und 3.65m Kerntiefe ist gekennzeichnet von weniger IRD im Vergleich zum übrigen Kern. Der "ruhigere" und vergleichsweise niedrige Dichteverlauf spiegelt dies deutlich wieder. 3.: Zwischen 3.65m und 4m folgt eine Zone, die dem oberen Kernbereich ähnelt. Durch den Fund einer Aschenlage in diesem Bereich kann das Mindestalter des Kerns auf 200.000 Jahre (Isotopenstadium 7) geschätzt werden (pers. Mitt. S.-I. Nam, 1992). 4.: Unterhalb von 4m Kerntiefe schließen sich sehr dichte Sedimente an (Dichten um  $2\text{g/cm}^3$ , Korndichten 2.76 bis  $2.81\text{g/cm}^3$ , pers. Mitt. S.-I. Nam, 1992), die geprägt sind von feinkörnigerem IRD. Die beiden vorgestellten Dichteuntersuchungen mit Kernrotation von PS1725-2 (Abbildungen 3.27c und d) geben den hohen Anteil eistransportierten Materials im Sediment deutlich wieder. Beide Tiefenbereiche zeigen zahlreiche Inhomogenitäten. Dieser Kern wurde gemeinsam mit Kern PS1821-6 für den Vergleich zwischen Daten aus Gammaabsorptionsmessungen und an Einzelproben bestimmten Dichten herangezogen (siehe Kapitel 3.4).

**- PS1821-6 (Kern bereits geöffnet)**

Kern PS1821-6 stammt aus dem Kosmonautmeer östlich des Gunnerus-Rückens vor der Ost-Antarktis. Der 15.82m lange Schwerelotkern enthält hauptsächlich terrigenen Ton-Silt ("mud") sowie Diatomeen (Ehrmann und Grobe, 1991a). Das Dichteprofil zeigt eine deutliche Zonierung der Sedimente in Abschnitte mit Sedimentmaterial niedriger Dichte und solche höherer Dichte. Die Kernbereiche hoher Dichte zeichnen sich lithologisch durch grau-olivene Ton-Silt ("mud") aus, immer wieder unterbrochen durch sandige, einige Zentimeter dünne, Horizonte. Die dazwischenliegenden Abschnitte niedriger Dichte bestehen hauptsächlich aus Diatomeen ("diatomaceous ooze"), zum Teil vermischt mit terrigenem Material ("diatomaceous mud"). Sie sind sehr oft geprägt von starker Bioturbation, d.h. Sedimentvermischung durch Organismen (pers. Mitt. G. Kuhn, 1992). Der in diesem Kern besonders prägnant auftretende Wechsel zwischen terrigenen und biogenen Sedimentkomponenten wird allgemein mit den wechselnden Sedimentationsbedingungen in hohen Breiten zu Glazial- und Interglazialzeiten interpretiert. Aus den bisher verfügbaren Informationen kann das untere Kernende auf ein Alter von ca. 450000 Jahren geschätzt werden (Isotopenstadium 12) (pers. Mitt. H. Grobe, 1992). Der Verdünnungseffekt durch Diatomeen in den Interglazialzeiten senkt die Dichte gegenüber den Glazialzeiten deutlich ab. Insbesondere hervorzuheben im Zusammenhang mit den Dichteuntersuchungen ist die Möglichkeit, daß nun gerade die Übergangsbereiche Glazial/Interglazial und umgekehrt hochauflösend untersucht werden können. Durch integrative Arbeiten können möglicherweise in Zukunft wichtige neue Erkenntnisse im Bereich der Klimageschichte erlangt werden. Die drei in Abbildung 3.27e-g vorgestellten Messungen mit Kernrotation zeigen Ausschnitte aus zwei als Glazial eingestuftem Bereichen (e, g) sowie aus einem Übergangsbereich (f). Der hohe Anteil terrigener Komponenten in den Sedimenten der Glazialzeiten kommt hier deutlich zum Ausdruck.

**- PS1822-6 (Kern bereits geöffnet)**

Dieser von der Ostflanke des Gunnerus-Rückens stammende Schwerelotkern enthält etwas grobkörnigere Sedimente als PS1821-6, hauptsächlich siltige Sande, zum Teil auch Foraminiferen (Ehrmann und Grobe, 1991a). Das Auftreten grober Sedimentkomponenten steht vermutlich in kausalem Zusammenhang mit der vergleichsweise geringen Eindringtiefe (4.41m) des Kernrohres. Sehr interessant ist der Vergleich der Kerne PS1822-6 und PS1821-6. Der Minimumsbereich in PS1822-6 zwischen 2 und 3m Kerntiefe ähnelt dem in PS1821-6 zwischen 4 und 5.50m sehr. Eine sichere Parallelisierung mit Hilfe weiterer Parameter könnte interessante Erkenntnisse über die lokalen Sedimentationsbedingungen bei PS1821-6 und PS1822-6 erbringen.

**- PS1826-1 und PS1827-1 (beide Kerne bereits geöffnet)**

Dieser Schwerelotkern sowie PS1827-1 stammen vom Nordwestende des Astrid-Rückens in der Antarktis. Die Sedimente in diesem Bereich sind äußerst homogen, was bereits anhand der Dichteprofile ersichtlich ist. Sie bestehen zum Großteil aus Diatomeen-"mud", also einer Mischung aus biogenen und terrigenen Bestandteilen (Ehrmann und Grobe, 1991b). Sehr selten sind diese Komponenten von diskreten Horizonten unterbrochen, so z.B. in einer Tiefe von ca. 6.70m. Hier tritt ein Turbidithorizont mit erhöhten Siltanteilen auf (pers. Mitt. G.Kuhn, 1992; die Entstehung von Turbiditen wird ausführlich z.B. bei Kennett (1982) oder bei Press und Siever (1986) beschrieben). Die Dichteprofile zeigen eine geringfügige Dichteabnahme bis zu einer Tiefe von ca. 2.50m, anschließend nimmt die Kerndichte kaum sichtbar zum jeweiligen Kernende hin zu. Das Alter der tiefsten im Kern befindlichen Sedimente wurde anhand von Mikrofossilien auf oberes Miozän (ca. 6 bis 8 Millionen Jahre) geschätzt. Die Sedimentationsraten werden auf wenige Millimeter pro 1000 Jahre vermutet (Gersonde, 1991). Ein Dichteminimum am unteren Ende des Kerns korrespondiert, wie auch bei Kern PS1827-1, aller Wahrscheinlichkeit nach mit Luft im PVC-Liner. In der Nähe der Position von PS1826-1 wurde der Schwerelotkern PS1827-1 gewonnen. Er ist mit etwas über 10m nicht ganz so lang wie PS1826-1, zeigt aber ganz ähnlich auch sehr homogene Sedimente, deren Dichte über die gesamte Kerntiefe kaum variiert. Das Sediment wird ebenso wie bei Kern 1826-1 als Diatomeen-"mud" angesprochen (Ehrmann und Grobe, 1991b). Zur Dichte-Tiefenstruktur von PS1827-1 sei bemerkt, daß ähnlich wie bei PS1826-1 auf eine Dichteabnahme hier bis zu einer Tiefe von ca. 2.50m eine langsame und stetige Dichtezunahme bis zum Kernende folgt. Zeitlich wird PS1827-1 älter als PS1826-1 eingestuft, da schon im oberen Teil des Kerns (4 bis 5m) Mikrofossilien gefunden wurden, die so alt sind, wie die am unteren Kernende von PS1826-1 (Gersonde, 1991).

**- PS1831-1 (Kern noch ungeöffnet)**

PS1831-1 ist, so wie sonst in dieser Kernausswahl nur PS2089-1, ein Kolbenlotkern (Informationen zu den Probenahmetechniken im Anhang A). Der vom Astrid-Rücken in der Antarktis stammende Kern kann in vier Tiefenabschnitte eingeteilt werden. Bis zu einer Kerntiefe von ca. 3.50m besteht das Sediment aus "foraminiferal ooze", ein biogenes Sediment, das sich fast ausschließlich aus Foraminiferen zusammensetzt. Nach einem Übergangsbereich, der ca. 1m mächtig ist, folgen in einer Kerntiefe von 4.50m Sedimente, die als "diatomaceous mud", das ist ein Sediment aus Diatomeen und

terrigenen Bestandteilen, angesprochen werden. Die kalkigen Foraminiferen (Calciumcarbonat) und die kieseligen Diatomeen (Opal) können aufgrund ihrer unterschiedlichen Porosität im Dichteprofil klar unterschieden werden (der enge Zusammenhang zwischen Dichte und Porosität wird weiter unten in Kapitel 4.1 angesprochen). Während die Dichten für die Foraminiferen um  $1.5\text{g/cm}^3$  liegen, sinkt die Dichte für die Diatomeen auf Werte um  $1.3\text{g/cm}^3$  ab. Ähnliche Strukturen konnten auch bei anderen Kernen aus dieser und benachbarten Regionen beobachtet werden. Am Kernende schließlich folgt ein von terrigenen, sandigen Sedimenten dominierter Bereich, in dem die Dichte stark auf Werte um  $1.9\text{g/cm}^3$  ansteigt. Dieser Abschnitt konnte auch in den entsprechenden Parasound-Sedimentechogrammen (siehe auch Kapitel 4.3) erkannt werden (Ehrmann und Grobe, 1991b). Die beiden in den Abbildungen 3.27h und i dargestellten Ergebnisse aus Messungen mit Kernrotation zeigen Dropstones im sonst relativ homogenen Übergangssediment (s.o.). Dabei sei angemerkt, daß die in Abbildung 3.27h in einer Tiefe von 4.25m angetroffenen Dropstones als solche erst sicher aufgrund der Zusatzinformation durch die tomographische Untersuchung (siehe Abbildung 4.5 oben) identifiziert werden konnten.

**- PS2007-1 (Kern noch ungeöffnet)**

Dieser 4.73m lange Schwerelotkern stammt aus dem östlichen Weddellmeer (Antarktis). Insgesamt wird das Sediment des Kerns anhand von Proben aus den Kernsegmentenden als hauptsächlich terrigen angesprochen, wobei "mud" und Silt vorkommt (Kuhn et al., 1992). Durch die Lage der Kernposition direkt an der Polarstern-Bank (beschrieben bei Miller et al., 1990) ist hier das Vorkommen von Turbidithorizonten im Sediment sehr wahrscheinlich. Im Dichteprofil sind einige Dichtemaxima mit Wellenlängen von ca. 20cm zu erkennen. Typisch für diese Anomalien sind die meist an der Oberseite, zum Teil auch an der Unterseite, mit der Tiefe sich allmählich, und nicht etwa sprunghaft, verändernde Dichten. Das Dichtemaximum bei einer Tiefe von 45 bis 50cm zeigt eine leichte Asymmetrie, ein leicht ansteigendes "Plateau" der Dichte mit der Tiefe. Diese Struktur korrespondiert vermutlich mit einem "gradierten Intervall", das typisch für die Basis von Turbiditen ist (Bouma, 1962). Hier nimmt die Korngröße gleichmäßig mit der Tiefe zu. Lediglich im Tiefenbereich zwischen 2.70m und 3.70m wird diese Abfolge von einem eher homogenen Bereich unterbrochen. Der Kern enthält auch IRD, wie durch Dichteuntersuchungen mit Kernrotation festgestellt werden konnte. Ein bereits auf See geöffneter Kern, der auf dem Top der Polarstern Bank gewonnen wurde (PS2003-2), zeigte hauptsächlich terrigene Sedimentkomponenten und IRD (Kuhn et al., 1992). Dies spiegelte sich auch im Profil der magnetischen Suszeptibilität wider (Gerland et al., 1992). Mithilfe der Dichtemessungen mit Kernrotation konnte der Basisbereich einer Turbiditstruktur näher untersucht werden (Abbildung 3.27j). Die stetige Dichtezunahme mit der Tiefe bis zur Turbiditbasis bei einer Tiefe von 2.06m ist in der Abbildung zu erkennen. Darunter fällt die Dichte relativ steil ab. Die Sedimentkomponenten über dem Turbidithorizont scheinen zum Teil auch gröbere Komponenten zu enthalten. Im zweiten Bild (Abbildung 3.26a bzw. b) ist ein Horizont erhöhter Dichte in sonst relativ homogenem Umgebungsmaterial zu sehen.

- PS2089-1 (*Kern bereits geöffnet*)

Dieser Kolbenlotkern stammt als einziger der hier vorgestellten nicht aus polaren Regionen hoher Breiten, sondern vom Südatlantik aus dem Gebiet des südwestlichen Indischen Rückens. Die Absolutdichten des Dichteprofiles aus diesem Kern sind aufgrund der zum Zeitpunkt der Messung noch nicht feststehenden Einstellparameter und Nullmessungsprozedur nicht von der für die übrigen Kerne diskutierten Genauigkeit (s.o.). Zwei hauptsächlich auftretende Sedimenttypen und eine Besonderheit prägen den Kern. Die beiden Typen sind Diatomeen-"Ooze" und Diatomeen-"Mud", ersterer zeichnet sich durch extrem niedrige Dichtewerte aus (um  $1.15\text{g/cm}^3$ ), letzterer hat etwas höhere Dichten um  $1.25\text{g/cm}^3$ , außerdem ist hier der Dichteveriationsbereich etwas größer, je nachdem welche Korngrößen und wieviel terrigene Bestandteile im "Mud" vorhanden sind. Die "Mud"-Bereiche erstrecken sich von 0 bis 2.30m, von 3.10 bis 6.50m sowie um 8m. Sie können zum Teil auch viele sandige Komponenten enthalten. Dazwischen ist der Diatomeen-"Ooze" zu finden (pers. Mitt. G. Bohrmann, 1992). Seine Dichte ist deutlich geringer als die des Diatomeen-"Mud" in Kern PS1831-1. Im Dichteprofil ist der Wechsel dieser Komponenten sichtbar. Bei einer Kerntiefe von 7.72m tritt die schon angesprochene Besonderheit auf: Die Dichte steigt hier auf den maximalen Wert an, im Sediment befindet sich ein ca. 3cm starker Porzellanit-Horizont. Porzellanite sind monomineralische Gesteine aus Opal-CT, die während der Sedimentdiagenese als knollige oder schichtgebundene Lagen aus Festgestein gebildet werden (Bohrmann, 1992). Ausgangsmaterial ist Skelettopal von kieseligen Organismen wie Diatomeen oder Radiolarien.

#### 4 Weiterführende Arbeiten

Dieses vierte Kapitel soll weiterführende Arbeiten vorstellen, die, aufbauend auf den bisher diskutierten Möglichkeiten, durchgeführt wurden. Hierzu gehören zunächst die Berechnung von Porositäten sowie eine Möglichkeit, die Dichtedaten in ihrer Genauigkeit weiter zu verbessern (Kapitel 4.1). Außerdem werden Vergleiche mit anderen Meßverfahren, die zur Verifikation und vor allem zur späteren integrativen Interpretation dienen sollen, vorgestellt (Kapitel 4.2 bis 4.4).

##### 4.1 Berechnung der Porosität und Datenbearbeitung

Die Dichte von Mischungen aus verschiedenen Materialien setzt sich anteilmäßig aus den Dichten der beteiligten Einzelmaterialien zusammen. Mit Seewasser gesättigte marine Sedimente können in diesem Zusammenhang zunächst vereinfacht als Mischungen aus zwei Komponenten betrachtet werden: Gesteinsmaterial (Dichte um  $2.6\text{g/cm}^3$ ) und Porenwasser (Dichte um  $1\text{g/cm}^3$ ). Da die Porosität

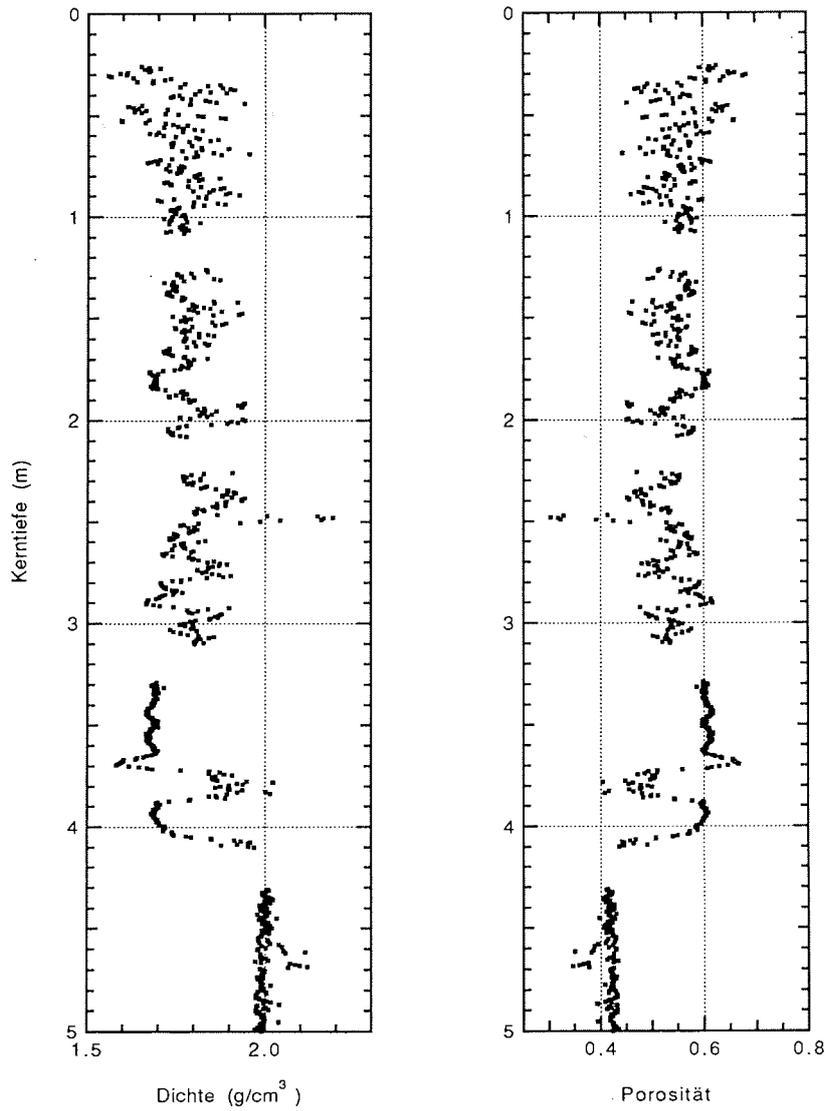
$$\Phi = \frac{V_p}{V_{ges}} \quad (15)$$

bei mit Seewasser gesättigten marinen Sedimenten den Anteil von Porenraum im Verhältnis zum Gesamtvolumen und somit auch direkt das Verhältnis zwischen Anteilen von Porenwasser und Gesteinsmaterial beschreibt, stehen Porosität und Feuchtraumdichte hier in engem Zusammenhang (Gleichung 16).

$$\rho = \Phi \cdot \rho_w + (1-\Phi) \cdot \rho_{gr} \quad (16)$$

Sind zudem die Korndichten der Sedimentkomponenten bekannt und liegen in einem schmalen Dichtebereich, so läßt sich aus der Dichte sehr gut die Porosität bestimmen. Entsprechende Untersuchungen wurden u.a. bereits von Nafe und Drake (1957) und Hamilton (1970) gemacht.

Die Korndichte muß meist aufgrund von Zusatzinformationen oder aus Angaben aus der Literatur bestimmt bzw. geschätzt werden. Anhand der Dichtedaten des Schwerelotkerns PS1725-2 wurden Porositäten mit Gleichung (16) exemplarisch berechnet. Als Korndichte wurde hier  $2.7\text{g/cm}^3$  eingesetzt. Dieser mittlere Wert für die Korndichte war aus Einzelprobenmessungen bekannt, die nach der Kernöffnung durchgeführt wurden. Das Ergebnis ist gemeinsam mit den Dichtedaten in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Sedimente des Kerns PS1725-2 haben Porositäten von 0.4 (unterer Kernteil) bis 0.6 (oberer Kernteil). Vereinzelt treten auch noch kleinere bzw. größere Porositätswerte auf.

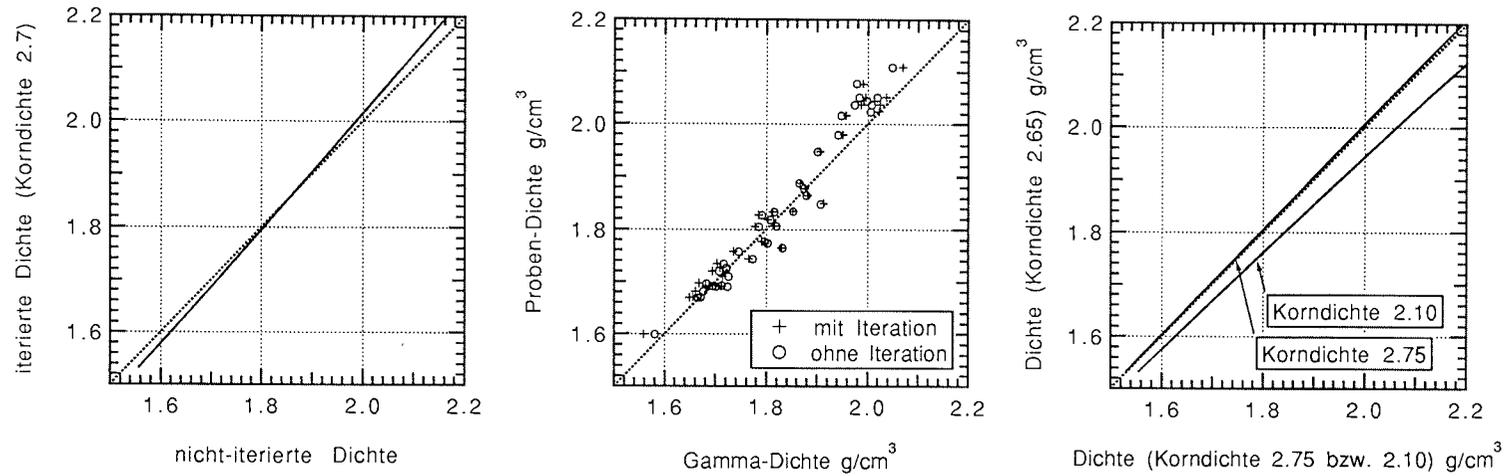


**Abbildung 4.1:** Dichte aus der Gammaabsorptions-Standardmessung (links) und mit Gleichung (14) daraus berechnete Porosität (rechts) für Kern PS1725-2 nebeneinander.

Der Zusammenhang in Gleichung (16) kann außerdem für eine unter Umständen verbesserte Dichtebestimmung genutzt werden. Diese Optimierung, die bereits Whitmarsh (1971) an marinen Sedimenten erfolgreich durchgeführt hat, läuft folgendermaßen ab: Nach der gewöhnlichen Dichteberechnung (siehe Kapitel 2.1.3) werden aus den ermittelten Dichten Porositäten mit Hilfe von Gleichung (14) berechnet. Die ermittelten Porositäten werden nun als Processing-Porositäten (PP) ihrerseits für eine erneute Dichteberechnung aus den Gammaabsorptionsmessungen berücksichtigt. Es sei daran erinnert, daß die Porosität bei der Bestimmung des Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu$  eingeht (Kapitel 2.1.3, Gleichung 4). Die nun aus der erneuten Dichteberechnung resultierenden Dichten ermöglichen wiederum eine verbesserte Porositätsberechnung. Das Verfahren kann iterativ so lange ablaufen, bis die Änderungen der Ergebnisse nur noch sehr klein sind.

Voraussetzung für den Erfolg einer solchen Vorgehensweise sind allerdings, wie schon oben erwähnt, relativ konstante Korndichten. Ein Sedimentkern wie beispielsweise PS1821-6 enthält mit seinen terrigenen Komponenten (Korndichten um 2.65) und seinen biogenen Bestandteilen, hier Diatomeen (Korndichten um 2.1) deutliche Unterschiede, hier wäre ein iteratives Verfahren in der beschriebenen Art und Weise nicht unbedingt anzuraten. Allerdings kann bei Kernen mit in diesem Sinne besseren, weniger variablen Verhältnissen durch die Verwendung der Beziehung (16) die Absolutgenauigkeit der Dichtedaten weiter verbessert werden. Exemplarisch wurde diese iterative Korrekturrechnung an Kern PS1725-2, der nur sehr geringe biogene Anteile enthält, angewandt. Mit einer Wasserdichte von  $1.024\text{g/cm}^3$  und einer mittleren Korndichte von  $2.7\text{g/cm}^3$  wurde der beschriebene Iterationsalgorithmus auf alle Meßdaten angewendet, wie auch bei Whitmarsh (1971) konvergierten die Dichten sehr schnell. Die Iteration wurde beendet, wenn sich am entsprechenden Meßpunkt die neue Dichte von der alten um weniger als 0.1% unterscheidet. Hierfür wurden maximal fünf Iterationsdurchläufe benötigt. Lag die Start-Processing-Porosität nahe bei der wirklichen, so genügten meist zwei Durchläufe. In Abbildung 4.2a sind die Dichtedaten aus den Gammaabsorptionsmessungen vor und nach der Iteration gegeneinander aufgetragen. Abweichungen bei relativ großen und kleinen Dichten von der 1:1-Linie durch die Kreuzungspunkte der Hilfslinien sind erkennbar. In Abbildung 4.2b sind Einzelprobenuntersuchungen gegen die Daten vor und nach der Iteration aufgetragen. Bei sehr kleinen und sehr großen Dichten ändern sich die Werte entsprechend stark, da hier mit nur einer mittleren Porosität der Fehler ohne Iteration größer ist. Es fällt auf, daß im Bereich hoher Dichten der Vergleich zwischen Gammadichten und Einzelprobendichten nach der Iteration etwas besser ausfällt. Der Versatz kann allerdings nicht völlig unterdrückt werden. Die in Kapitel 3 genannten Argumente bezüglich der Fehler, die den Einzelproben anhaften, gewinnen somit an Bedeutung.

Der Iterationsalgorithmus ist äußerst robust, auch bei Start-Processing-Porositäten von 0 oder 1 wird das "richtige" Ergebnis nach weniger als zehn Iterationen gefunden. Wird allerdings eine stark abweichende Korndichte in Gleichung (16) eingesetzt, so werden zum einen mehr Iterationsschritte benötigt als bei einer nahezu richtigen Korndichte, außerdem aber, und das ist viel schwerwiegender, ändert sich auch das Ergebnis mehr oder weniger stark. Hierzu wurden drei Beispiele gerechnet (Abbildung 4.2c), die Daten von Kern PS1725-2 wurden dem Iterationsprozeß mit Korndichten von 2.65, 2.75 und 2.1 unterworfen. Der Vergleich von der Rechnung mit 2.65 und 2.75



**Abbildung 4.2a, b und c:** Iteratives Processing mit Hilfe der Berechnung der Porosität unter Annahme einer Korndichte, angewendet auf Kern PS1725-2. Links (a) sind die Dichtedaten vor und nach der Iteration gegeneinander aufgetragen. In der Mitte (b) sind die Ergebnisse aus den Einzelprobenuntersuchungen gegen die Dichtedaten mit und ohne Anwendung des iterativen Processings dargestellt. Schließlich ist rechts (c) der Einfluß der Wahl der Korndichte für das iterative Processing an drei Beispielen dokumentiert.

zeigt nur eine geringe Abweichung, dies unterstützt die legitime Anwendung dieses Verfahrens auf Kerne mit hauptsächlich terrigenem Sedimentmaterial. Die in solchen Kernen auftretenden Variationen der Korndichten wirken sich also kaum auf das Ergebnis aus. Der Vergleich der Rechnung mit einer Korndichte von 2.65 mit der mit 2.10 (dies entspricht einer mittleren Korndichte für Diatomeen) zeigt insbesondere bei hohen Dichten eine Abweichung der Ergebnisse von ca. 3%.

#### 4.2 Vergleich der Dichtedaten mit Tomogrammen

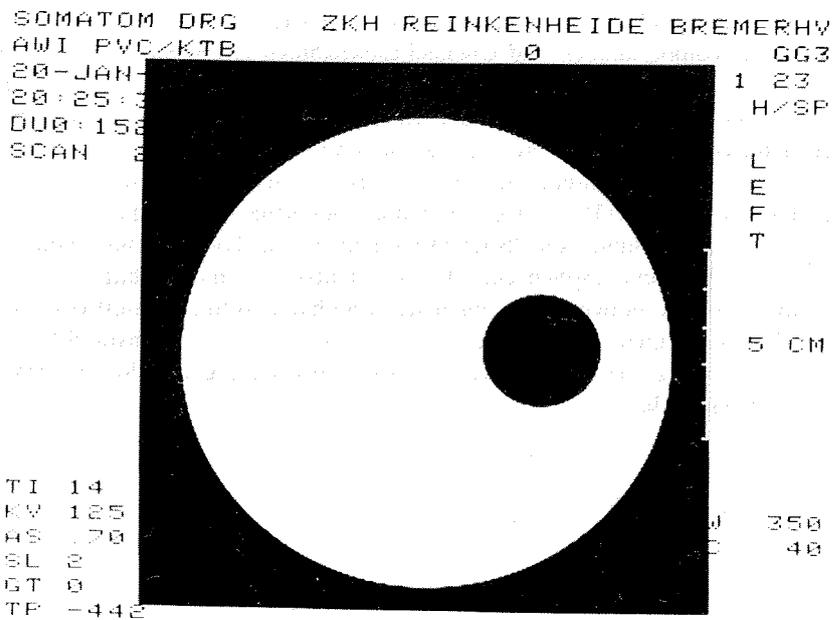
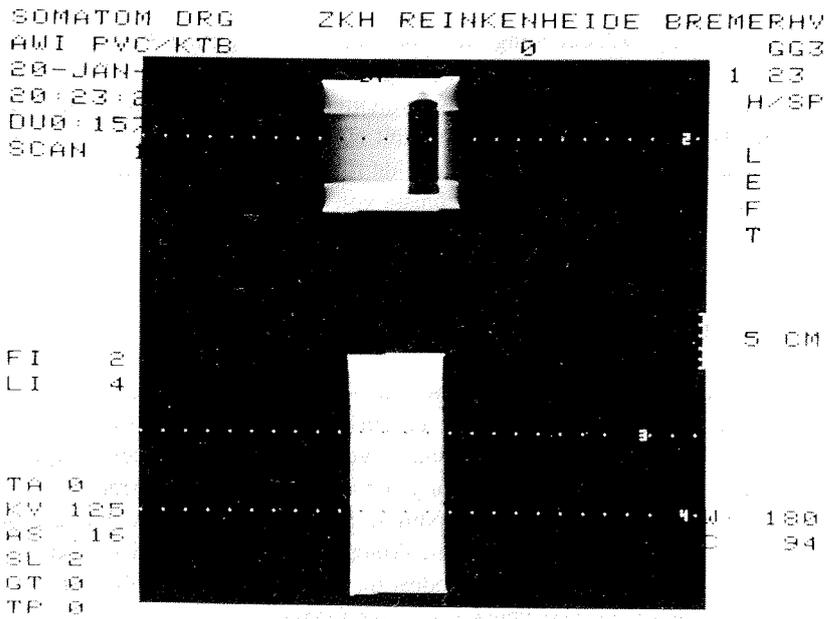
Ergänzend und zur Verifikation der Dichtemessungen wurden tomographische Untersuchungen an Sedimentkernen an einem Röntgen-Computertomographen im Zentralkrankenhaus Reinkenheide in Bremerhaven vorgenommen (siehe Kapitel 2.3). Zwar können mit den Röntgenuntersuchungen die Gammaabsorptionsmessungen nicht quantitativ verifiziert werden, da beide Strahlungsarten unterschiedliche Energien haben und damit auch unterschiedliche Wechselwirkungseffekte ablaufen (siehe Kapitel 2.1.1 und 2.1.2); da aber die Ergebnisse zumindest qualitativ gut vergleichbar sind, ist eine Verifikation hinsichtlich der räumlichen Auflösung möglich.

Um einen Eindruck der mit der Röntgentomographie gegebenen Untersuchungsmöglichkeiten zu vermitteln, sind in Abbildung 4.3 Messungen an dem bereits in Kapitel 3.2.4 vorgestellten PVC-Kern mit asymmetrischer Bohrung dargestellt. In diesen und allen weiteren Tomogrammen und Übersichtsaufnahmen ist jeweils rechts ein 5cm-Maßstab abgebildet. In dieser und auch den folgenden Abbildungen sind Werte hoher Dichte durch helle Töne, solcher geringer Dichten durch dunkle Töne wiedergegeben. Entsprechend ist beim PVC-Kern die Luft innerhalb der Bohrung weiß, das PVC schwarz. An der Tomographie des PVC-Kerns wird deutlich, daß bei großen Dichtekontrasten (hier Luft/PVC) eine extrem hohe räumliche Auflösung zu erreichen ist.

Neben der Erstellung von Übersichtsaufnahmen und Tomogrammen können mit dem Rechner des Tomographen auch Grauwertehistogramme erstellt werden. Die Histogramme können entweder für einen frei wählbaren Bildausschnitt oder für ein gesamtes Bild berechnet werden. Die Grauwerte N werden in Hounsfield-Einheiten angegeben (abgekürzt "HU"=Hounsfield Units), die abhängig von den Absorptionseigenschaften des Mediums sind:

$$N = \frac{\mu_x - \mu_{xw}}{\mu_{xw}} \cdot 1000 \quad (17)$$

(z.B. in Kawamura, 1990).  $\mu_x$  sind die Röntgen-Massenabsorptionskoeffizienten für Wasser (mit Index w) bzw. für das durchstrahlte Medium. Auf die Absolutwerte N in den Tomogrammen soll im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft eingegangen werden, hier wird lediglich ein qualitativer Vergleich mit den DMS-Untersuchungen angestellt. Trotzdem beinhalten die Grauwerte eine auch absolut gesehen wertvolle Information. Für



**Abbildung 4.3:** Übersichtsaufnahme und Tomogramm (Schnittlinie 2 in der Übersicht) des PVC-Kerns mit asymmetrischer Bohrung (Röntgen-CT Somatom DR).

die Zukunft könnte hier unter Zuhilfenahme von Kalibrierungen ein Absolutvergleich gemacht werden und so Unterschieden im Chemismus aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkungsvorgänge Photoeffekt (bei Röntgenuntersuchungen)/Comptoneffekt (bei Gammauntersuchungen) nachgegangen werden.

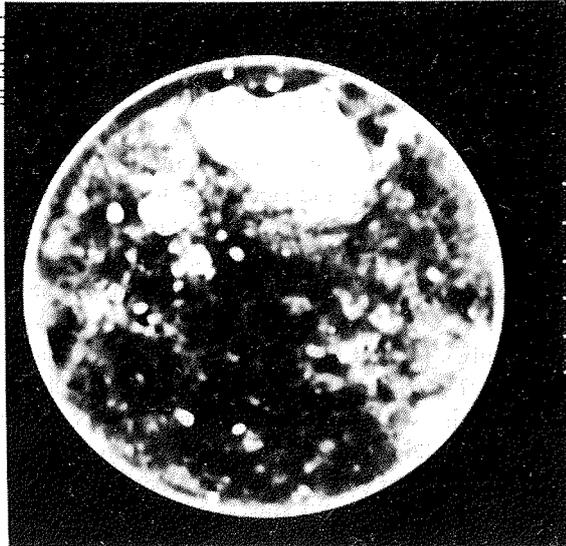
Bei der Erstellung von Tomogrammen kann es in ungünstigen Fällen zur Artefaktbildung kommen. Artefakte sind hier durch die Anordnung bedingte imaginäre Strukturen, die dem eigentlichen Tomogramm überlagert sind. Sie treten in Form von Streifen oder Schatten meist im Bereich starker Dichtekontraste auf. Ist die benutzte Röntgenröhre schon relativ alt, so kann dies Artefaktbildung begünstigen.

Im folgenden sollen an fünf Beispielen Fein- und Standardmessungen, die mit dem Dichtemeßsystem (DMS) durchgeführt wurden, entsprechenden Tomogrammen gegenübergestellt werden. Vertreten sind Messungen aus den Kernen PS1725-2, PS1831-1 und PS2089-1. Die Beispiele aus den ersten beiden Beispielen zeigen ausschließlich Bereiche mit mehr oder weniger IRD, bei Kern PS2089-1 wird der schon in Kapitel 3.6 diskutierte Porzellanit-Horizont betrachtet. Bei den dargestellten Untersuchungen wurden zuerst Übersichtsaufnahmen erstellt, mit denen dann Tiefenbereiche, in denen Tomographien aufgenommen werden sollten, ausgewählt werden konnten. Die hier vorgestellten Abbildungen sind photomechanische Bilder, also Analogaufzeichnungen. In diesem Stadium der Untersuchung wurde von digitalen Speichermöglichkeiten z.B. für eine spätere Datenbearbeitung auf anderen Rechner-systemen noch kein Gebrauch gemacht.

#### **PS1725-2**

Beide Beispiele aus diesem Kern zeigen Bereiche mit sehr viel IRD (siehe Tomogramme in Abbildung 4.4). Dadurch das die markanten großen Dropstones (Durchmesser in beiden Fällen ca. 4cm) jeweils dicht am Kernrand liegen, ist auch auf den Feinmessungen mit dem Dichtemeßsystem (DMS) (siehe Abbildungen 3.27c und d, Kapitel 3.5) die eindeutige Identifizierung als Dropstone möglich. In den DMS-Messungen sind ebenfalls die kleineren IRD-Komponenten gut erkennbar, wobei die räumliche Auflösung deutlich schlechter ist als bei der Tomographie. Die Tomogramme zeigen allerdings auch nur Schnitte in der jeweiligen Tiefe auf Höhe der großen Dropstones. Bei einem genaueren Vergleich im zweiten Beispiel fällt auf, daß das kleinere Gesteinsstück (Durchmesser ca. 2cm) am rechten Bildrand im Tomogramm auch in der DMS-Feinmessung (Abbildung 3.27d) eindeutig erkennbar ist (bei 160°, gleiche Tiefe wie großer Dropstone). Der horizontale dünne Strich erhöhter Dichte über die volle Drehung auf dieser Höhe rührt vom kleinen, aber zentral gelegenen Dropstone her, der im Tomogramm deutlich sichtbar ist. Nicht unerwähnt bleiben soll, daß im oberen Tomogramm eine spaltähnliche Struktur zu erkennen ist, die aber mit Seewasser gefüllt zu sein scheint. Auf Störungen durch luft- oder wassergefüllte Spalte wurde bereits in Kapitel 3.2.5 eingegangen. Solche Störungen können Verfälschungen in Gamma-absorptionsmessungen bewirken. In den nachfolgend dargestellten Tomogrammen traten solche Störungen nicht auf.

SOMATOM DRG. ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 AMI PS 1725-2/D 0 GG3  
 20-JAN- 1 26  
 21:03:3 H/SP  
 DUB: 173  
 SCAN 12

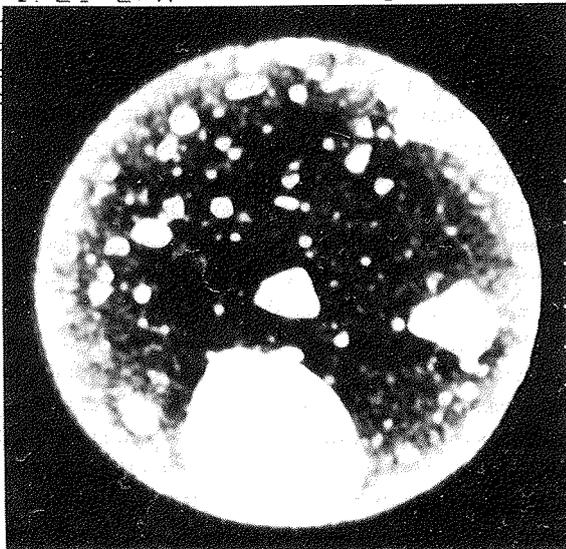


L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM

TI 14  
 KV 125  
 AS 70  
 SL 2  
 GT 0  
 TP -236

M 350  
 D 1194

SOMATOM DRG. ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 AMI PS 1725-2/H 0 GG3  
 20-JAN- 1 28  
 21:41:4 H/SP  
 DUB: 194  
 SCAN 7



L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM

TI 14  
 KV 125  
 AS 70  
 SL 2  
 GT 0  
 TP -494

M 342  
 D 1435

**Abbildung 4.4:** Zwei Tomogramme, aufgenommen an Segmenten von Kern PS1725-2 (Röntgen-CT Somatom DR). Die Aufnahmen stammen aus den Bereichen, in den auch Messungen mit dem Dichtemeßsystem mit 9°-Kernrotation vorgenommen wurden (siehe Abbildungen 3.27c und d).

### PS1831-1

Für diesen Kolbenlotkern wurden ebenfalls zwei Bereiche exemplarisch herausgegriffen. Beide liegen in einem Übergangsbereich von Sedimenten aus Foraminiferen zu solchen aus Diatomeen (siehe Kapitel 3.5 und 3.6). Diese Übergangszone zeigt verglichen mit PS1725-2 äußerst homogene Sedimente, in denen lediglich einige wenige IRD-Bestandteile eingelagert sind. Im ersten Fall sind drei Dropstones mit Durchmessern um 2-3cm innerhalb einer Tiefe nebeneinander angeordnet (Abbildung 4.5 oben). Das entsprechende Bild aus der DMS-Feinuntersuchung (Abbildung 3.27h, Kapitel 3.5) vermag diese Struktur nicht entsprechend aufzulösen, da hier keine Strahlwege an den Gesteinsstücken vorbeiführen können. Da aber doch je nach Drehwinkel des Kerns der Laufweg des Strahls durch die IRD-Komponenten länger oder kürzer ist, sind im Bild der Feinuntersuchung entsprechende Einschnürungen bei 50° zu erkennen. Mit etwas Erfahrung sollte es möglich sein, aufgrund solcher Ergebnisse auch allein aus der Feinuntersuchung die Anomalie als von IRD-Komponenten herrührend zu erkennen. Die Vorteile einer Tomographie sind in diesem speziellen Fall allerdings offensichtlich.

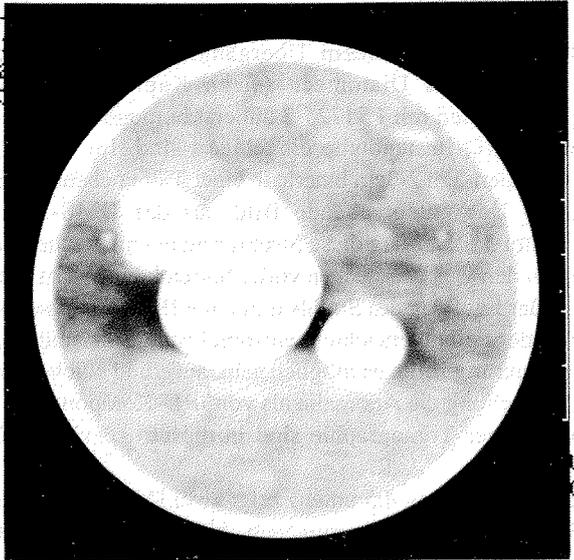
Das zweite Bild (Abbildung 4.5 unten) zeigt zwei Dropstones (Durchmesser ca. 2cm) auch wieder in Umgebung des homogenen, biogenen Übergangssediments. Zu sehen ist eine Übersichtsaufnahme, wobei mittlere Bereich des rechten der drei Kernsegmente betrachtet werden soll. Beide Gesteinsstücke sind klar zu erkennen. Im korrespondierenden Bild der DMS-Feinuntersuchungen (Kapitel 3.5, Abbildung 3.27i) sind ebenfalls beide Gesteinsstücke einwandfrei sichtbar. In Abbildung 4.6 schließlich ist ein Tomogramm in der Tiefe des höher gelegenen Dropstones dargestellt. Die Wiedergabequalität des Tomogramms ist aus phototechnischen Gründen relativ schlecht, Gewicht soll hier aber auf die Verteilung der Absorptionswerte in den kreisförmigen Tomogrammausschnitten (ROI 1 und 2, "ROI"=region of interest) gelegt werden. Im oberen Bild ist die ROI (1) im Bereich des Dropstones, im unteren im Bereich des umgebenden Sediments (2) gelegen. Die zugehörigen Histogramme geben deutlich die markante Homogenität des Sediments wieder, während die Verteilung der N-Werte im IRD-Bereich (1) breiter ist.

### PS2089-1

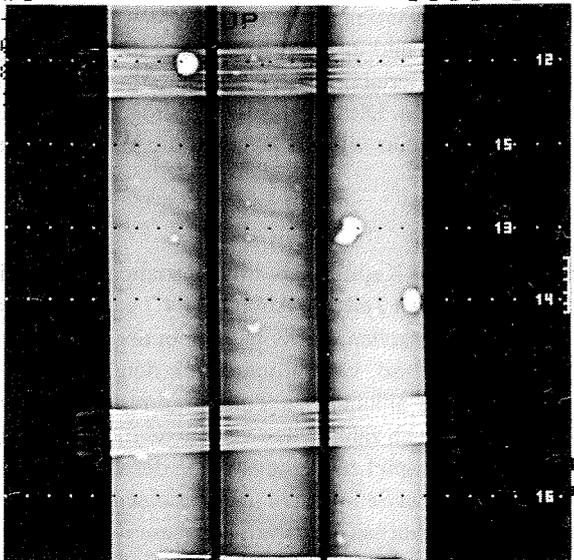
Hier wird der bereits in Kapitel 3.6 angesprochene Porzellanit-Horizont tomographisch untersucht. Im oberen Teil von Abbildung 4.7 ist im rechten Kernsegment in der Übersichtsaufnahme der Porzellanithorizont etwa in der Mitte klar zu sehen. Der Horizont erscheint ca 4cm dick und, vermutlich durch den Kernprozeß, auch stark deformiert. Dies wird besonders anhand des Tomogramms (Abbildung 4.7, unten) deutlich. Die Porzellanitstruktur ist an zahlreichen Stellen gebrochen. Diese Tomographie des Porzellanits ist ein schönes Beispiel zu Demonstration der vielfältigen Möglichkeiten tomographischer Untersuchungen an Sedimenten und Gesteinen.

Da dieser Kern nur in der Aufbau- und Anfangsphase des Dichtemeßsystems zur Untersuchung bereitstand, liegt für diese Stelle keine Feinuntersuchung vor. Ein Ausschnitt der Standardmessung jedoch zeigt die durch den Porzellanit bedingte Dichteanomalie deutlich (Abbildung 4.8). Der Tiefenausschnitt stimmt mit dem gesamten in der Röntgen-Übersichtsaufnahme wiedergegebenen Bereich überein (rechtes Kernsegment). Beim direkten Vergleich beider Untersuchungen wird deutlich, daß die

SOMATOM DRG      ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 TEST AWI            / 1831 D      GG2  
 18-SEP-            1 28  
 20:14:            H/SP  
 DU2: 128  
 SCAN 20  
 L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM  
 TI 14  
 KV 125            W 700  
 AS .70            C 444  
 SL 4  
 GT 0  
 TP -236



SOMATOM DRG      ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 TEST AWI            /1831 C      GG2  
 18-SEP-            1 25  
 19:23:            H/SP  
 DU2: 058  
 SCAN 10  
 L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM  
 FI 12  
 LI 16  
 TA 0  
 KV 125            W 180  
 AS .16            C 41  
 SL 2  
 GT 0  
 TP 0



**Abbildung 4.5:** Tomogramm, aufgenommen an einem Segment des Kerns PS1831-1 (siehe auch Dichteuntersuchung in Abbildung 3.27h), darunter eine Übersichtsaufnahme, aufgenommen an drei Segmenten des Kerns PS1831-1 (Röntgen-CT Somatom DR).

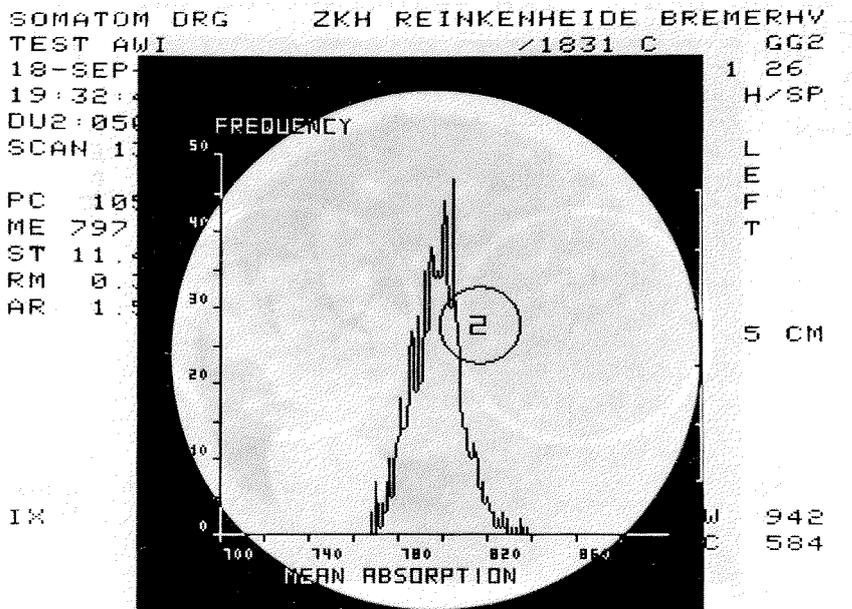
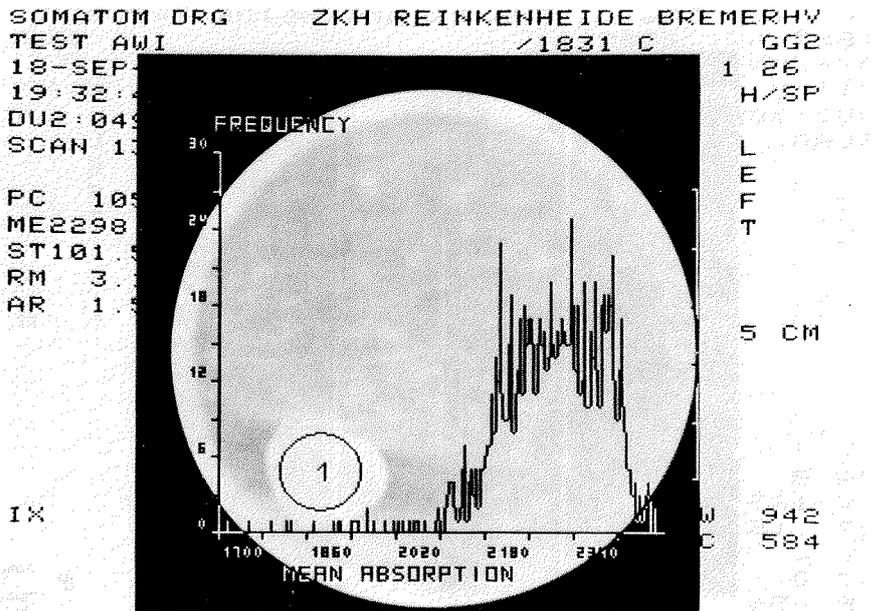
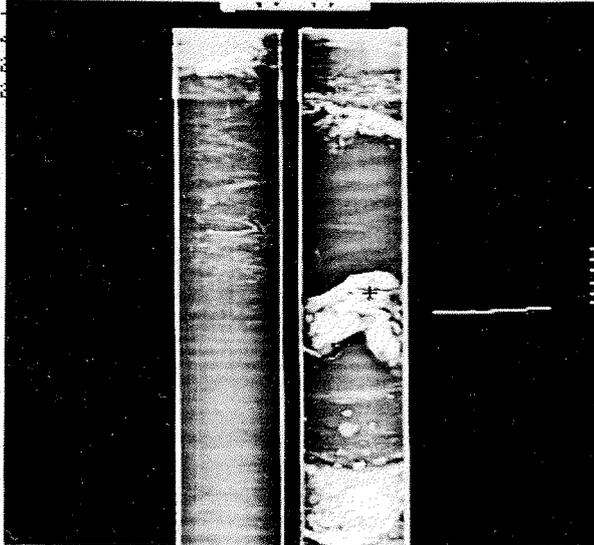


Abbildung 4.6: Zwei Tomogramme (Schnittlinien 13 und 14 in Abbildung 4.5, rechtes Segment) mit Grauwertehistogrammen, aufgenommen an einem Segment des Kerns PS1831-1 (siehe auch Dichteuntersuchung in Abbildung 3.27i) (Röntgen-CT Somatom DR).

SOMATOM DRG ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 TEST AWI 2089-1 GG2  
 07-JUN-1988 1 27  
 21:02:4 H/SP  
 DU3:305  
 SCAN

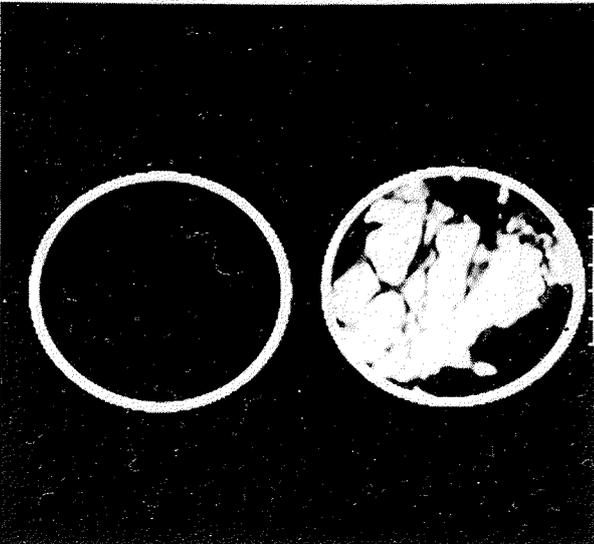


TA 0  
 KV 125  
 AS 16  
 SL 2  
 GT 0  
 TP -56

L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM

M 26  
 C 31

SOMATOM DRG ZKH REINKENHEIDE BREMERHV  
 TEST AWI 2089-1 GG2  
 07-JUN-1988 1 28  
 21:14:8 H/SP  
 DU3:305  
 SCAN

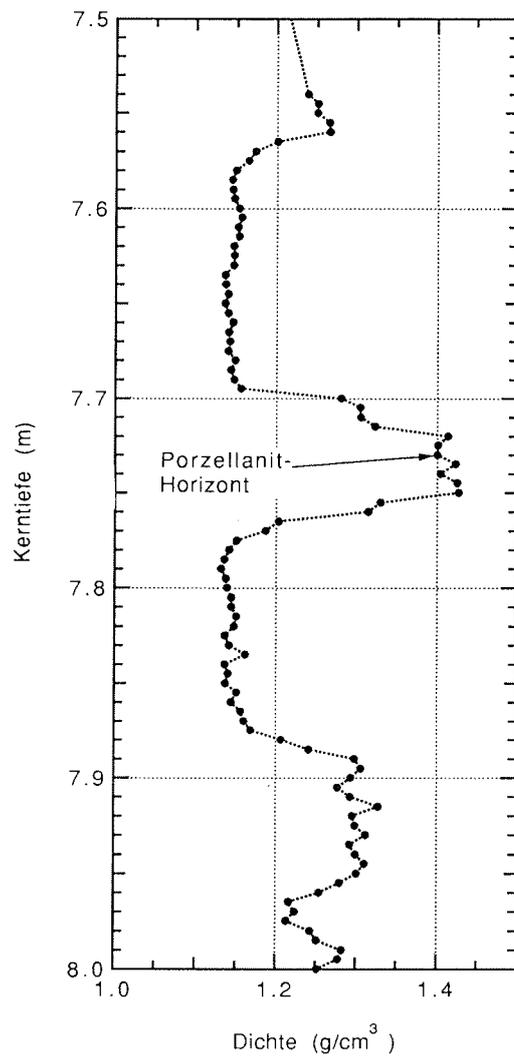


TI 14  
 KV 125  
 AS 70  
 SL 2  
 GT 0  
 TP -288

L  
 E  
 F  
 T  
 5 CM

M 250  
 C 507

Abbildung 4.7: Übersichtsaufnahme (siehe auch Dichteprofil in Abbildung 4.8) und Tomogramme, aufgenommen an zwei Segmenten des Kerns PS2089-1 (Röntgen-CT Somatom DR).



**Abbildung 4.8:** Ausschnitt aus dem DMS-Dichteprofil von Kern PS2089-1. Dargestellt ist hier der Bereich, der auch in der Röntgenaufnahme in Abbildung 4.7 oben im rechten Kernsegment vollständig zu sehen ist. Auffallend sind die Bereiche erhöhter Dichte im Segment oben, in der Mitte (Porzellanit-Horizont) und unten.

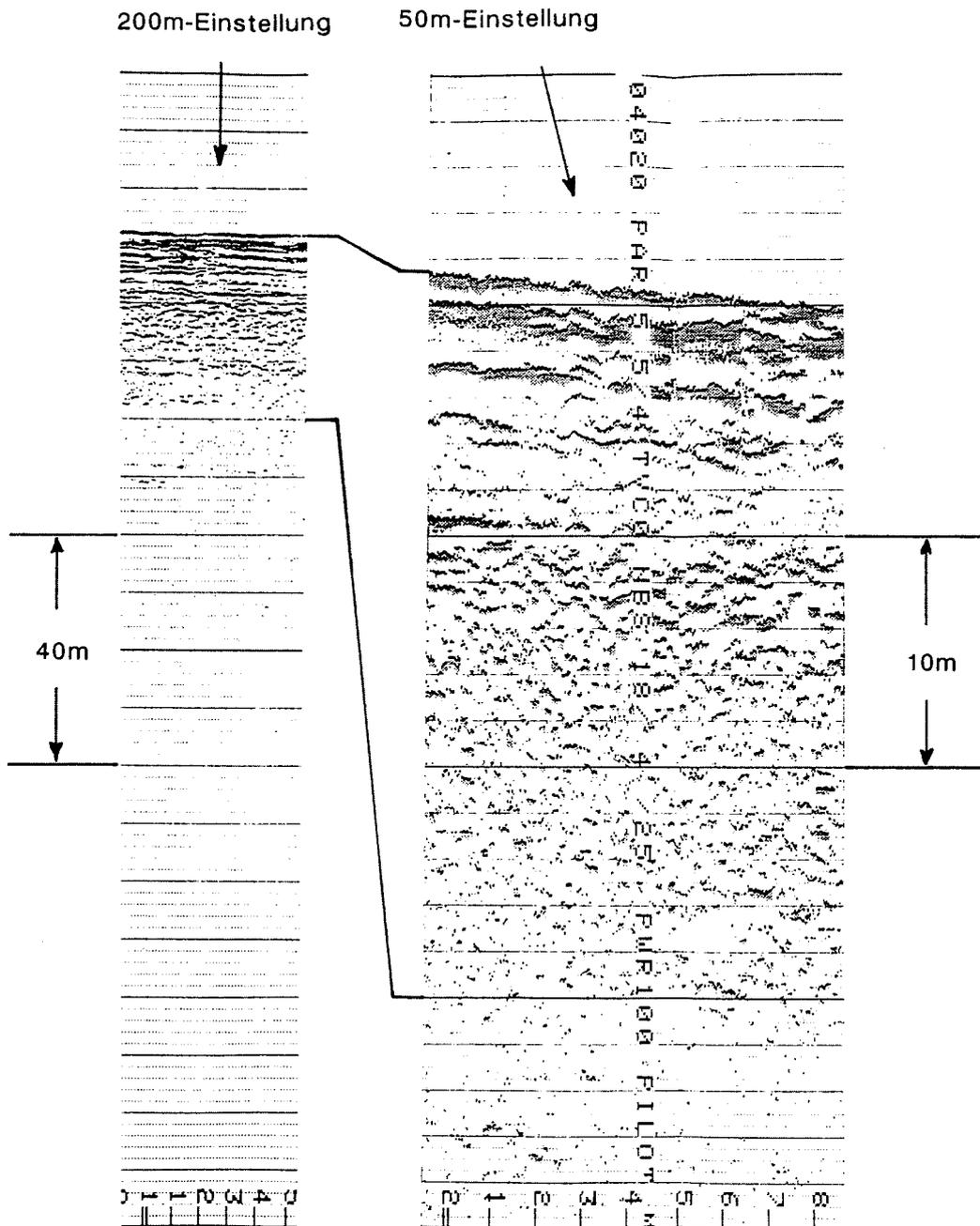
DMS-Messung alle signifikanten Dichteveriationen, die in der Röntgenübersichtsaufnahme zu sehen sind, ebenfalls aufweist.

Die vorgestellten Beispiele zeigen, daß mit Hilfe der Dichtemessung mit 9°-Kernrotation bereits ohne die vor allem apparativ aufwendige Tomographie eine zufriedenstellende Untersuchung der Feinstruktur von Sedimenten möglich ist. Fälle wie das erste Beispiel von Kern PS1831-1 zeigen jedoch auch die Grenzen der Möglichkeiten des Dichtemeßsystems auf. Die zwar räumlich hochauflösenden Röntgentomogramme enthalten wegen des Photoeffekts eine schlechtere Absolutdichteinformation im Vergleich zu den Gammaabsorptionsmessungen (Comptoneffekt), da beim Photoeffekt der Chemismus der Sedimente eine wichtige Rolle spielt.

#### **4.3 Vergleich der Dichtedaten mit Sedimentechogrammen (Parasound)**

Mit sedimentechographischen Messungen können marine Sedimente von der Meeresoberfläche aus untersucht werden. Das Verfahren spricht auf Impedanzänderungen mit der Tiefe an. Die akustische Impedanz ist das Produkt aus Dichte und P-Wellengeschwindigkeit des Sediments. Dieser Zusammenhang macht die Sedimentechographie in Verbindung mit hochauflösenden Dichteuntersuchungen besonders interessant. Ein Vorteil der Sedimentechographie gegenüber Messungen an Kernen ist das Wegfallen von Kernnahmeeffekten, die die ursprüngliche Sedimentstruktur verändern. Allerdings treten andere Probleme auf, die bei Kernmessungen nicht existieren (s.u.). Das Sedimentecholot wurde Mitte dieses Jahrhunderts aus dem Echolot entwickelt (siehe z.B. in Luskin et al., 1954).

Zunächst soll kurz auf das Meßprinzip der Sedimentechographie eingegangen werden: Vom Schiff aus werden Wellen im Kilohertzbereich nach unten abgestrahlt und kurz darauf die Signale registriert, die am Meeresboden und darunterliegenden Schichthorizonten (Impedanzänderungen) reflektiert werden. Je nach Abstrahlmodus und Sedimenttyp können solche Untersuchungen Information bis zu Größenordnungen von 100m Sedimenttiefe erbringen. Das Meßprinzip entspricht dem der Reflexionsseismik, die Signalformen sind der Fragestellung speziell angepaßt. An Bord des FS Polarstern befindet sich eine Krupp Atlas Parasound-Anlage für sedimentechographische Untersuchungen. Dieses System arbeitet nach dem sogenannten parametrischen Prinzip, wobei zwei Wellen mit einer Frequenzdifferenz von einigen Kilohertz abgestrahlt werden (Grant und Schreiber, 1990). Die vertikale Auflösung des Systems wird von Max et al. (1992) mit besser als 10cm angegeben. Die empfangenen Signale werden routinemäßig analog, optionell auch digital (Programm Paradigma von V. Spieß, 1992), aufgezeichnet. Langfristiges Ziel wäre eine Korrelation von Reflexionsmustern mit Ergebnissen aus Kernuntersuchungen. Hierzu müßten aus Kerndaten Impedanz-Tiefenprofile und anschließend Reflektogramme berechnet werden (Faltung des Sendesignals mit dem Impedanz-Tiefenprofil). Die hohe Genauigkeit und Auflösung der Dichtedaten aus Gammaabsorptionsmessungen könnten hierbei eine gute Basis bilden. Nur mit räumlich hochauflösenden Daten ist es beispielsweise möglich, kontinuierliche von abrupten Dichteänderungen zu unterscheiden. Für die Reflexionseigenschaften haben solche



**Abbildung 4.9:** Analogaufzeichnung des Sedimentecholots (Parasound-System) im Bereich der Station PS1821-6. Links erstreckt sich der gesamte Tiefenbereich auf 200m, rechts auf 50m. Die Tiefen resultieren aus den Laufzeiten (die Geschwindigkeit des Signals wird hierbei gleich 1500m/s gesetzt).

Unterschiede entscheidende Bedeutung. Für Vergleiche zwischen Kerndaten und Sedimentechographie müßten die im Labor an Kernen gemessenen physikalischen Eigenschaften auf in situ Bedingungen korrigiert werden (Temperatur, Druck). Die Korrekturfaktoren für die Dichte liegen hierbei unter 1% (Hamilton, 1971). Im Rahmen dieser Arbeit soll im folgenden zunächst lediglich ein qualitativer Vergleich zwischen analoger Parasound-Aufzeichnung und Dichteprofil angestellt werden.

Der Vergleich soll anhand des bereits weiter oben diskutierten Kerns bzw. der Station PS1821-6 gemacht werden. Eine analoge Parasound-Aufzeichnung für die Station ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Im linken Teil ist der eingestellte Gesamttiefenbereich 200m, im rechten Bildteil 50m. Die Tiefen sind aus der aufgezeichneten Laufzeit und einer mittleren Geschwindigkeit von 1500m/s bestimmt worden. Durch leichtes Verdriften des Schiffes über Grund verändert sich die Meeresbodentiefe mit der Zeit um ca. 2m. Die Eindringtiefe der Signale beträgt hier ca. 30m, wobei zusammenhängende Strukturen bis zu einer Tiefe von etwa 15m erkennbar sind. In den oberen 10m der Sedimente sind einige markante Signale erkennbar, deren Tiefenabstände einige Meter betragen. Zum Teil werden diese Signale mit im Dichteprofil (siehe Abbildung 3.26a) sichtbaren Horizontwechseln korrespondieren. Die Dichte ist ja gemeinsam mit der P-Wellengeschwindigkeit ausschlaggebend für die Impedanz-Tiefenstruktur. Die akustische Impedanz wiederum korrespondiert mit der Wechselwirkung zwischen Parasound-Signal und Sediment. Da die Geschwindigkeitsvariationen vergleichsweise gering sind, kann zumindest qualitativ die Dichte als Anhaltspunkt für das zu erwartende Reflexionsmuster angesehen werden. Die Tatsache, daß die Übergänge von niedriger zu hoher Dichte und umgekehrt im Fall von PS1821-6 meist mehr allmählich ansteigend bzw. fallend als abrupt sind, erschwert die Interpretation und den Vergleich der Daten. Der Versuch von Parallelisierungen von Parasound-Aufzeichnungen und synthetischen Reflektogrammen aus Sedimentkernmessungen wurde bereits vorgenommen (Rostek et al., 1991). Eine Parallelisierung im Fall von PS1821-6 wurde hier bewußt unterlassen; außer der Möglichkeit von Echogramm-Verfälschungen durch die Nichtberücksichtigung von Geschwindigkeitsvariationen und durch konstruktive oder destruktive Interferenz sind auch deutliche Kernverkürzungseffekte beim Schwerelotkern gegenüber den in-situ Bedingungen zu erwarten. All diese Probleme erschweren eine Parallelisierung sehr und machen so eine entsprechende Interpretation fragwürdig. Der Effekt der Kernverkürzung bei Schwerelotkernen ist aus der Literatur hinlänglich bekannt (Parker und Sills, 1990; Crusius und Anderson, 1991) und es wäre somit nicht unwahrscheinlich, daß die 16m Sedimentkern einer in situ Mächtigkeit von 20m oder mehr entsprechen. Da die Verkürzung von der Eindringgeschwindigkeit des Kerngerätes und den Sedimenteigenschaften abhängig ist, ist eine rechnerische Korrektur nicht ohne weiteres möglich. Trotzdem könnten gerade hier die hochauflösenden Dichtedaten helfen, gemeinsam mit anderen physikalischen Eigenschaften und digitalen Sedimentechogrammen die genannten Unsicherheiten zumindest teilweise auszuräumen. Nicht zuletzt für die Rekonstruktion der Sedimentations- und Klimageschichte, bei der die Sedimentationsraten eine außerordentlich wichtige Rolle spielen, wäre dies von großer Bedeutung.

#### 4.4 Vergleich der Dichtedaten mit weiteren physikalischen Eigenschaften

In diesem Kapitel werden Vergleiche der Dichte zu den physikalischen Eigenschaften spezifischer elektrischer Widerstand, magnetische Suszeptibilität und P-Wellengeschwindigkeit ( $v_p$ ) gezogen. In eine integrative Diskussion gehen dann die Informationen aus den verschiedenen Messungen ein.

##### 4.4.1 Spezifischer elektrischer Widerstand

Der spezifische elektrische Widerstand mariner Sedimente ist ein physikalischer Parameter, der in enger Beziehung zur Porosität und damit auch zur Dichte steht. Hauptbeitrag ist hier die Menge des Meerwassers bzw. bei voller Sättigung die Größe des Porenraums (Porosität). Meerwasser als sehr guter Leiter dominiert hier gegenüber anderen, in der Geophysik sonst oft wichtigen "Leitern". Dieser Umstand ermöglicht nun eine Porenraumabschätzung auf der Basis von Widerstandsinformationen.

Die hier benutzte Meßmethode und Apparatur zur Widerstandsmessung wird ausführlich bei Gerland et al. (1993) beschrieben. Hier die wichtigsten Merkmale in kürze: Grundlage der zerstörungsfreien Widerstandsmessung ist die Messung von Spuleneigenschaften (induktive Messung). Gemessen wird ein dem Gütefaktor (Q-Faktor) einer Eigenbau-Meßspule, in die der Sedimentkern eingebracht wird, proportionales Signal. Je nach spezifischem Widerstand des Kernmaterials ändert sich der meßbare Q-Faktor der Spule. Die Meßspule ist auf eine automatische Meßbank montiert, auf der der Sedimentkern rechnergesteuert durch die Spule transportiert werden kann. Mit Hilfe einer Kalibrierung können aus den Meßsignalen spezifische elektrische Widerstände berechnet werden. Die räumliche Auflösung der Widerstandsmessung ist durch die Spulengeometrie begrenzt. Die Halbwertsbreite der Übertragungsfunktion für die hier benutzte Spule ist 4cm. Das Meßsystem ist sowohl an Land als auch auf See einsetzbar.

Für die bereits angesprochene Porenraumabschätzung wurde bereits eine Reihe empirischer Beziehungen aufgestellt, die die Größen spezifischer Sedimentwiderstand  $Q_{sed}$  und Porosität  $\Phi$  miteinander verknüpfen. Hierzu gehören u.a. die Gleichung von Archie (1942)

$$\Phi = \left( a \cdot \frac{Q_w}{Q_{sed}} \right)^{\left( \frac{1}{m} \right)} \quad (18)$$

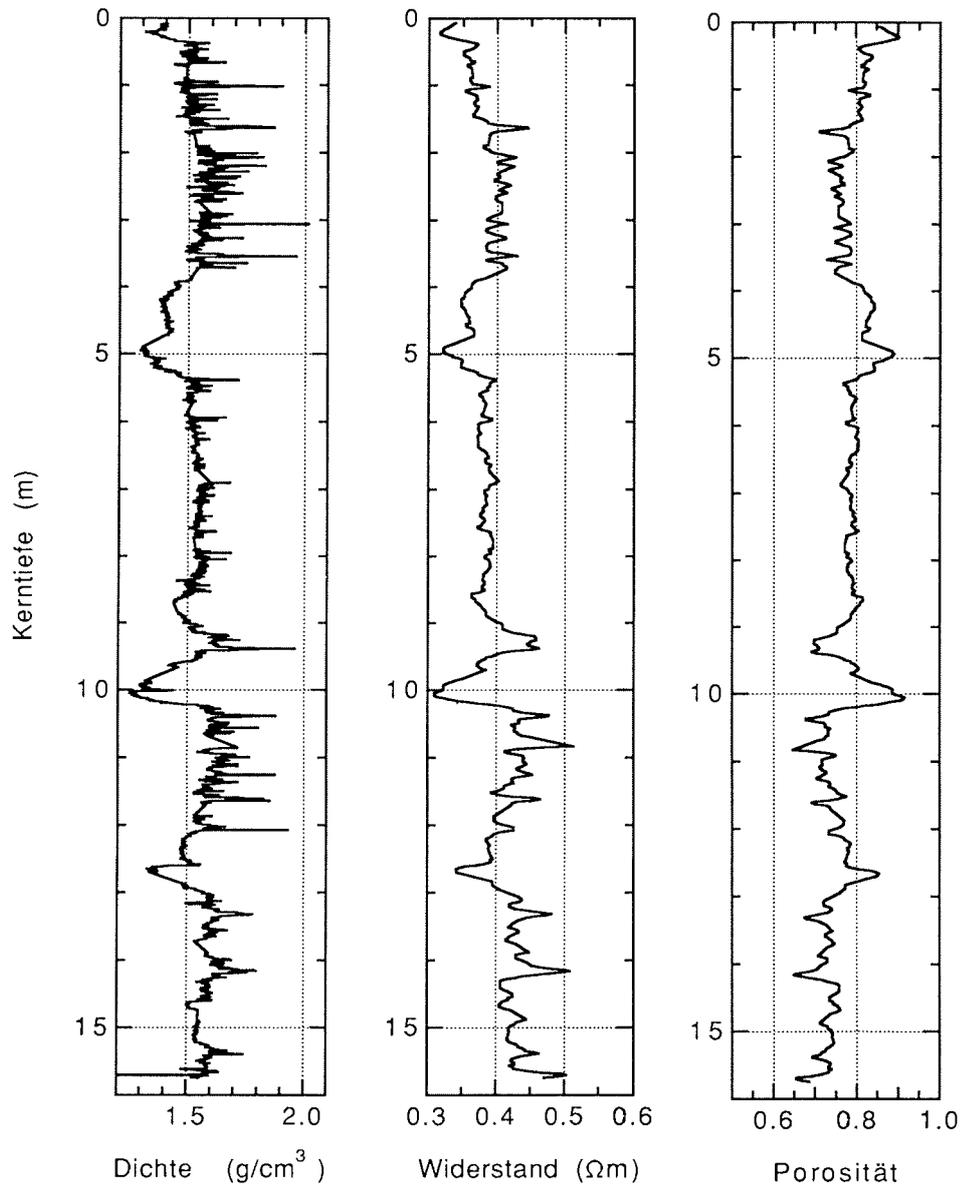
und auch die Gleichung von Boyce (1968)

$$\rho_{sed} = \rho_w \cdot 1.3 \cdot \phi^{-1.45} \quad (19)$$

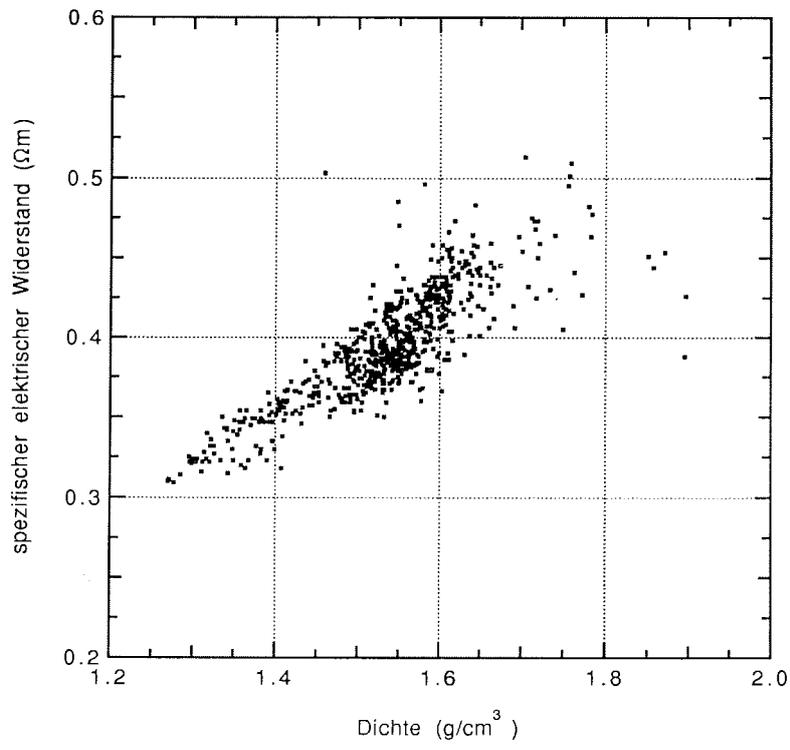
In der Gleichung von Archie, die ursprünglich für Sandsteine formuliert wurde, sind die Größen  $\rho_{w/sed}$  der spezifische Widerstand der Porenflüssigkeit bzw. des gesättigten Gesteins/Sediments und  $a$  und  $m$  gesteinspezifische, anzupassende Parameter. In der ursprünglichen Form von Archie (1942) ist  $a=1$  und  $m=2$  gesetzt. Die Gleichung von Boyce stützt sich auf Untersuchungen an marinen Sedimenten. Weichen die mit diesen empirisch bestimmten Funktionen bestimmten Porositäten von den tatsächlichen Porositätswerten ab, so kann dies verschiedene Ursachen haben:

- unvollständige Sättigung des Porenraums
- besondere Porenraumstruktur/ Geometrie
- zusätzliche Leitungsmechanismen z.B. durch Ton
- Einfluß der Übertragungsfunktion bei der Widerstandsmessung

Zunächst soll das Widerstandsprofil für den Schwerelotkern PS1821-6 den Dichtedaten aus den Gammaabsorptionsmessungen gegenübergestellt werden (Abbildung 4.10a). Dichte und spezifischer Widerstand korrelieren sehr gut, wie in Abbildung 4.10b zu sehen ist (Widerstand gegen Dichte). Allerdings wird anhand der Profile auch das bessere räumliche Auflösungsvermögen der Dichtemessung, bedingt durch die Übertragungseigenschaften des Meßsystems, deutlich. Ähnlich gute Korrelationen an Kernen aus der Arktis, allerdings beim Vergleich von konventionellen Einzelprobenmessungen (Dichte) und galvanischen Widerstandsbestimmungen, erhielten auch Bergmann et al. (1992). Ergänzend ist in Abbildung 4.10a rechts die Porosität der Sedimente des Kerns PS1821-6 dargestellt, berechnet mit der Gleichung von Boyce (1968). Der Porenwasserwiderstand wurde gleich  $0.209 \Omega m$  gesetzt. Dies entspricht Randbedingungen von 35‰ Salzgehalt und  $+20^\circ C$  Temperatur (Siedler und Peters, 1986). Die Sedimente der Interglazialzeiten zeichnen sich durch sehr hohe Porositäten aus (bis 0.9), der Mittelwert der Porosität für die Sedimente der Glazialzeiten liegt bei 0.7. Im Gegensatz zu Porositätsbestimmungen aus Dichtedaten (siehe Kapitel 4.1) bestehen hier keine Probleme bei stark variierenden Korndichten, da diese ja nicht in die Rechnung mit eingehen. Andererseits ist die Gültigkeit der Gleichung von Boyce bei unterschiedlichen Sedimenttypen nicht immer gewährleistet, wie Vergleiche der Porositäten aus Widerstandsdaten und aus Einzelproben (Volumen- und Gewichtsbestimmung) ergaben (Gerland et al., 1993). Wenngleich die gezeigten Widerstandsinformationen nicht die Auflösung und Aussagekraft der Dichtemessungen mit Gammaabsorption erreichen können, so sind solche Messungen doch gerade wegen der höheren Meßgeschwindigkeit des Widerstandsmeßsystems und des Wegfallens strahlenschutztechnischer Vorkehrungen eine interessante Alternative für erste Übersichtsmessungen.



**Abbildung 4.10a:** Dichte aus der DMS-Standardmessung (links), spezifischer elektrischer Widerstand aus der induktiven Messung (Mitte) für Kern PS1821-6 und Porosität (rechts), berechnet mit der Gleichung von Boyce (1968) aus den Widerstandsdaten nebeneinander.



**Abbildung 4.10b:** Spezifischer elektrischer Widerstand aufgetragen gegen die Dichte für Kern PS1821-6.

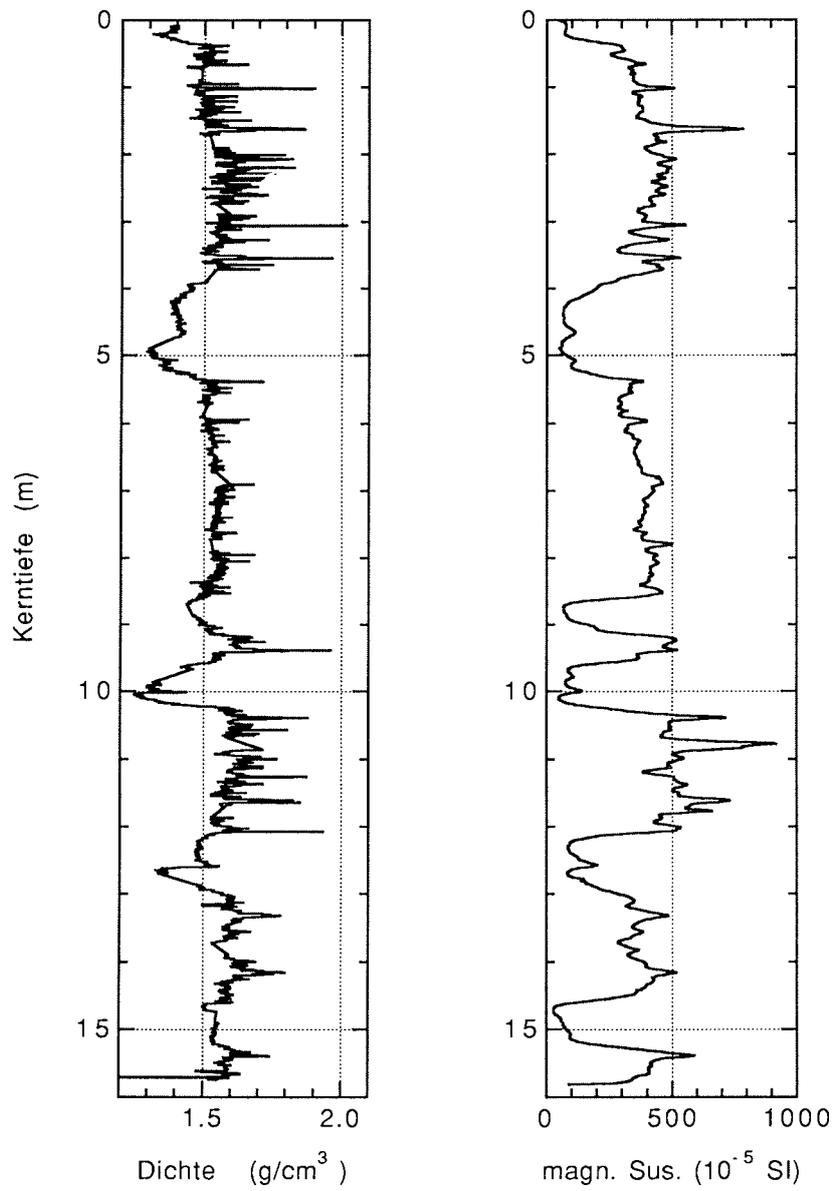
#### 4.4.2 Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität ist ein Maß der Magnetisierbarkeit einer Substanz; sie ist eine dimensionslose Größe, eine Proportionalitätskonstante zwischen Magnetisierung und Magnetfeld (Sheriff, 1984). Bei der Untersuchung mariner Sedimente ist die magnetische Suszeptibilität ein sehr wertvolles Hilfsmittel. So ist beispielsweise die magnetische Suszeptibilität terrigener Sedimente im Gegensatz zu biogenen Sedimenten meist besonders hoch, da terrigene Sedimente oft hohe Anteile an Magnetit und ähnlichen Mineralen haben. Das gleiche gilt für Dropstones; Entsprechend sind Turbidite in hohen Breiten wegen ihres hohen Anteils terrigener Komponenten meist durch Suszeptibilitätsmaxima gekennzeichnet. Besonders hoch ist die Suszeptibilität hierbei im Bereich der Turbiditbasis (erhöhter Anteil grober Kornfraktionen). Hier ist dann auch die Dichte des Turbidits am größten. Entsprechend korrelieren Dichte und Suszeptibilität auch bei Sedimenten mit unterschiedlich hohem Anteil an (leichten) biogenen und (schweren) terrigenen Komponenten. Allerdings können sich die Zusammenhänge zwischen Suszeptibilität und weiteren physikalischen und sedimentologischen Parametern je nach Untersuchungsgebiet deutlich unterscheiden. Deshalb müssen Interpretationen mit entsprechender Vorsicht angestellt werden, insbesondere wenn die Randbedingungen nicht genauer bekannt sind.

Die magnetische Suszeptibilität kann schnell und zerstörungsfrei mit kommerziellen Geräten bestimmt werden. Die hier dargestellten Suszeptibilitätsmessungen wurden mit derselben Meßbank wie der für die induktiven Widerstandsmessungen vorgestellten (siehe Kapitel 4.4.1) durchgeführt, es wurden lediglich eine andere Meßspule, ein anderes Meßgerät (Bartington, Typ MS2C) sowie ein anderes Meßdatenerfassungsprogramm angewendet. Die Meßbank wird genauer bei Villinger et al. (1990) beschrieben. Die räumliche Auflösung der Meßdaten ist, bedingt durch die Meßspule, deutlich schlechter als bei der Dichtemessung.

Abbildung 4.11 zeigt die magnetische Suszeptibilität und die Dichte für Kern PS1821-6 nebeneinander. Die Wechsel der typischen Sedimente zu Glazial- und Interglazialzeiten wird in beiden Profilen deutlich wiedergegeben (vgl. Kapitel 3.6). Der Anteil terrigener Sedimentkomponenten während der Glazialzeiten ist erheblich höher als während der Interglazialzeiten. Betrachtet man jedoch die Bereiche niedriger Suszeptibilität und niedriger Dichte (Interglazial, Tiefen um 4-5m, 8.50-10m, 12-13m, 15m) isoliert, so so ist im Dichteprofil eine weitere Unterteilung (Diatomeen-Mud und Diatomeen-Mud/Ooze) zu finden, die in der Kurve der Suszeptibilität nur sehr undeutlich zum Ausdruck kommt.

Durch die unterschiedliche Aussagerichtung beider Methoden sind Untersuchungen, bei denen Dichte *und* Suszeptibilität bestimmt werden, besonders wertvoll. Beide Parameter ergänzen sich, durch die gekoppelte Information wird die Aussagekraft der Einzelprofile vergrößert. Hier ist eine integrative Interpretation, möglicherweise mit weiteren petrophysikalischen und geologischen Parametern, sehr sinnvoll und aussichtsreich (s.u.).



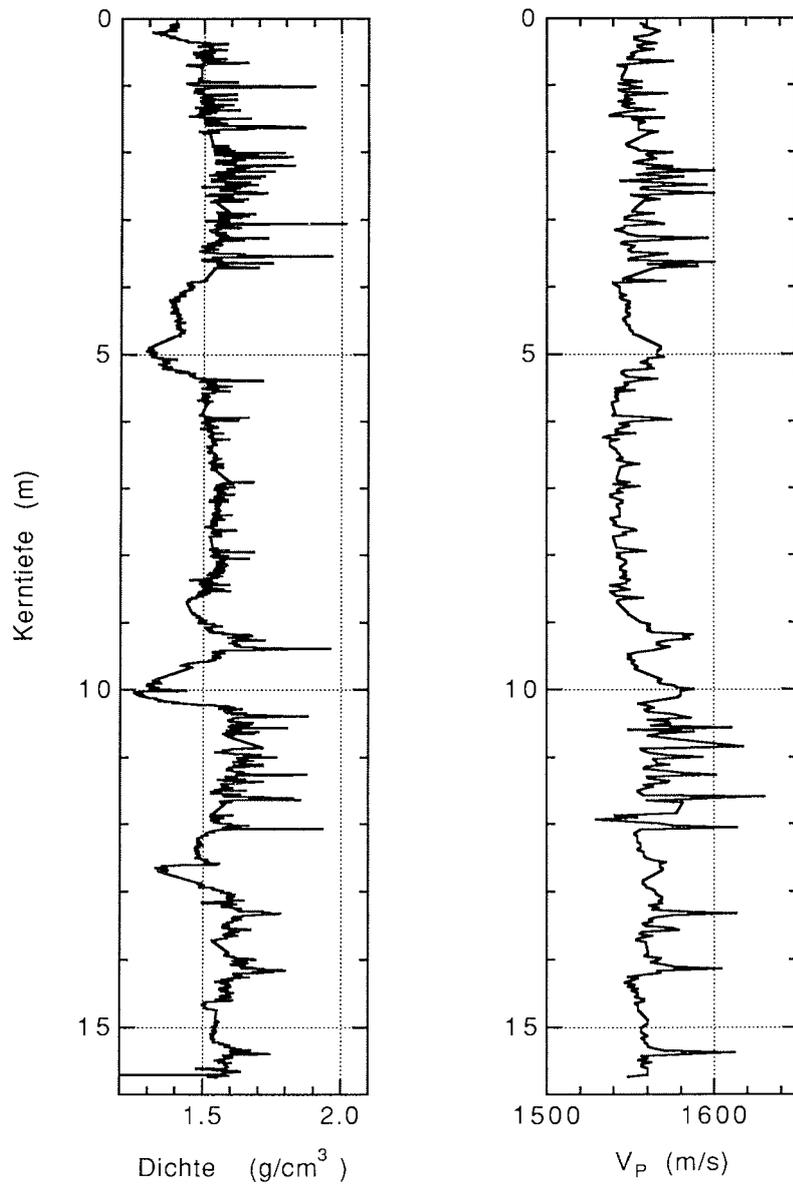
**Abbildung 4.11:** Dichte aus der DMS-Standardmessung (links) und magnetische Suszeptibilitätsmessung (rechts) für Kern PS1821-6 nebeneinander.

#### 4.4.3 Ultraschallwellengeschwindigkeit

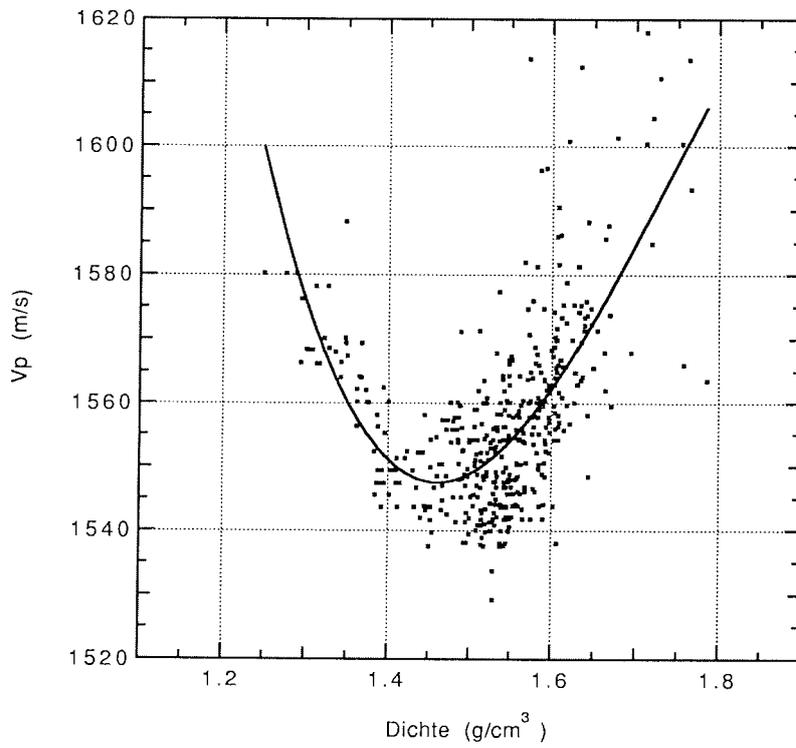
In diesem Kapitel soll auf die Ultraschallwellengeschwindigkeit ( $v_p$ ) von marinen Sedimenten in Verbindung mit Dichteuntersuchungen eingegangen werden.  $v_p$ -Untersuchungen an marinen Sedimenten sind ein in der Literatur bereits ausführlich behandeltes Thema (siehe z.B. Nafe und Drake, 1957; Hamilton, 1970). Speziell bei der Betrachtung sedimentechographischer Untersuchungen (siehe Kapitel 4.3) spielt die Bestimmung der Ultraschallwellengeschwindigkeit an Sedimentproben eine wichtige Rolle, da ja  $v_p$  direkt in die akustische Impedanz eingeht. Deshalb ist die Kenntnis von  $v_p$  wichtig für die Berechnung von Reflektogrammen. Allerdings ist die Interpretation einzelner Geschwindigkeitsprofile von Sedimentkernen nicht trivial, wie später noch anhand eines Beispiels deutlich werden wird. Verglichen mit der Dichte variiert  $v_p$  bezogen auf die Absolutwerte deutlich weniger. Im weiter unten dargestellten Fall ändert sich beispielsweise  $v_p$  um maximal ca. 5%, die Dichte hingegen variiert um maximal ca. 25%.

Die Ultraschallwellengeschwindigkeit wurden mit einer halbautomatischen Apparatur bestimmt, die bei Villinger et al. (1990) ausführlich beschrieben wird. Zur Messung wird ein Ultraschallsignal (Frequenz: 370kHz) mittels eines Piezogebers radial waagrecht durch das ungeöffnete Kernsegment geschickt; Gemessen wird dann mit einem Piezoempfänger das auf der anderen Seite des Kernsegments ankommende Signal. Aus der Zeit, die das Signal benötigt hat, und dem Weg, den es zurückgelegt hat, kann dann die Geschwindigkeit berechnet werden. Die Messung wird in Tiefenabständen von 3cm durchgeführt. Probleme treten vor allem bei Luftspalten zwischen Sediment und PVC-Liner auf. Hier kann das Ultraschallsignal das Sediment nicht ungehindert durchlaufen, eine Bestimmung von  $v_p$  ist dann nicht möglich.

In Abbildung 4.12 ist die nun Dichte gemeinsam mit den  $v_p$ -Daten für den schon in den vorherigen Kapiteln näher betrachteten Schwerelotkern PS1821-6 dargestellt. Im Vergleich zu den Dichtedaten sind im  $v_p$ -Profil keine markanten Maxima oder Minima der Absolutwerte, korrelierend mit dem Wechsel von Glazial- und Interglazialzeiten (siehe auch Kapitel 3.6) festzustellen. Auffallend ist aber eine deutlich unterschiedliche Variationsbreite der Geschwindigkeiten in den Sedimenten der Glazialzeiten (ca. 20 bis 50m/s) und der Interglazialzeiten (ca. 5 bis 20m/s); auch zwischen den glazial geprägten Sedimenten in der Kernmitte (ca. 20m/s) und im oberen und unteren Kerndrittel (ca. 50m/s) sind deutliche Unterschiede in der Variationsbreite sichtbar. Widerstands- und Suszeptibilitätsmessungen (s.o.) können diese räumlich hochfrequenten Variationen in diesem Maße nicht auflösen. Um zu überprüfen, wie sich die Ultraschallwellengeschwindigkeit im Verhältnis zur Dichte für diesen Kern verhält, wurden beide Größen gegeneinander aufgetragen (Abbildung 4.13). Es zeigt sich, daß bis zu einer Dichte von ca. 1.5g/cm<sup>3</sup>  $v_p$  kleiner wird, bei höheren Dichten jedoch steigt  $v_p$  auch wieder an. Dies wird besonders gut beim Betrachten der Kurve deutlich, die aus den Meßdaten berechnet wurde (Polynom vierter Ordnung). In den Kernprofilen kann dieses Verhalten gut in den Tiefenbereichen mit Sedimenten aus den Interglazialzeiten beobachtet werden. Das Verhältnis von  $v_p$  und Dichte stimmt zumindest qualitativ auch gut mit einer Relation von Shumway (1960a,b) überein, die Hamilton (1970) eigenen Daten gegenüberstellte.



**Abbildung 4.12:** Dichte aus der DMS-Standardmessung (links) und P-Wellengeschwindigkeit aus Ultraschallmessungen (rechts) für Kern PS1821-6 nebeneinander.



**Abbildung 4.13:** P-Wellengeschwindigkeit aufgetragen gegen die Dichte für Kern PS1821-6. Die durchgezogene Linie ist eine aus den Daten entwickelte Funktion (Polynom vierter Ordnung).

#### 4.5 Integrative Diskussion

Nun sollen schließlich die Dichtedaten gemeinsam, integrativ mit allen in diesem Kapitel bisher diskutierten Untersuchungen bzw. Parametern betrachtet werden. Hierzu werden in der folgenden Übersicht zunächst die Parameter und Verfahren mit ihren individuellen Aussagemöglichkeiten aufgelistet.

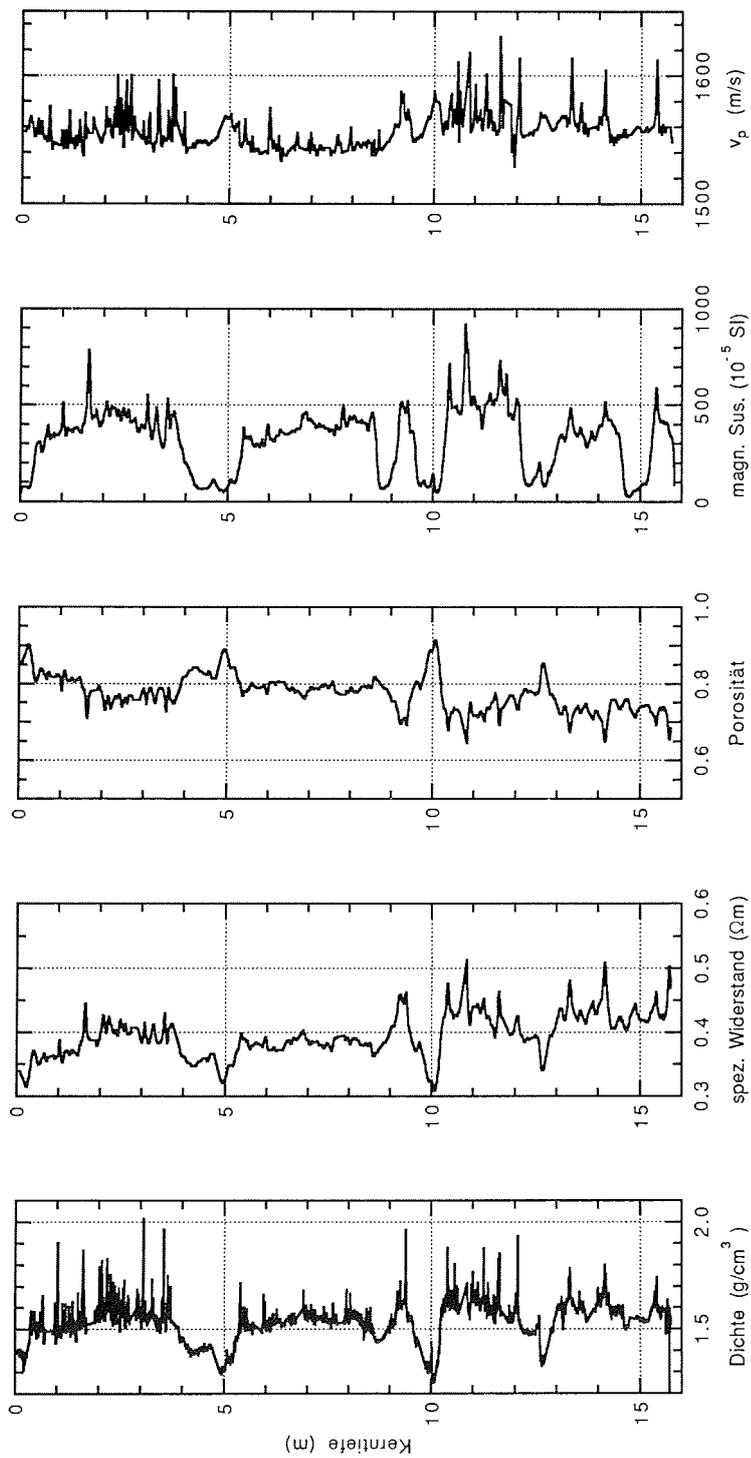
Parameter/ Verfahren	Untersuchung	Primär- information	räumliche Auflösung	Sekundär- information
Dichte (Gamma- absorption)	am ungeöffneten Kern	Dichte- Tiefenstruktur, Inhomogenität	mm	hochauflösende Dichte/ Tiefenstruktur, Inhomogenität, Erkennung z.B. von Turbiditen und IRD, Schluß auf Porosität
Widerstand (ind. Messung)	am ungeöffneten Kern	Widerstands- Tiefenstruktur	cm	Schluß auf Porosität und Wassergehalt
magnetische Suszeptibilität	am ungeöffneten Kern	Suszeptibilitäts- Tiefenstruktur	cm	Unterscheidung terrigen/ biogene Sedimente, Anteil Magnetit und ähnliche Minerale
$v_p$ (Durchschallung)	am ungeöffneten Kern	Geschwindigkeits- Tiefenstruktur, u.U. Dämpfungsei- genschaften	cm	elastische/ mechanische Eigenschaften
Sedimentecho- graphie (Parasound)	vom Schiff/ "in-situ"-Zustand	Änderungen der akustischen Im- pedanz mit der Tiefe	dm	Lithologie, Kartierung/ Klassifizierung nach Sedimenttypen
Röntgen- Computer- Tomographie (CT)	am ungeöffneten Kern	räumliche Dichte- struktur	mm	Erkennung von IRD, Kernnahme- effekten, Inhomogenität

Die Sekundärinformationen (rechte Spalte) können regional unterschiedlich sein und beziehen sich hier auf Tiefseegebiete in hohen Breiten. Aus den aufgeführten Sekundärinformationen und Kenntnissen über die Randbedingungen wie Meerestiefe,

Meeresbodentopographie in der Umgebung der Beprobungsstation oder Ozeanographie kann eine systematische Sedimentcharakterisierung vorgenommen werden. Hierbei ist trotz aller Meßwerte Erfahrung in der Bewertung sedimentphysikalischer Daten sehr wertvoll.

Für den in den vorherigen Kapiteln (4.4.1-4.4.3) ausgiebig diskutierten Schwerelotkern PS1821-6 sind in Abbildung 4.14 nochmal alle Profilparameter nebeneinander aufgetragen. Alle Meßgrößen zeigen zunächst deutlich unterscheidbare Signale für die Sedimente aus Glazial- und Interglazialzeiten (siehe Kapitel 3.6). Dies drückt sich beim Widerstand und bei der Suszeptibilität in Änderungen der Absolutwerte, bei den  $v_p$ -Daten in Änderungen der räumlichen Frequenz aus. Die Dichte zeigt Änderungen sowohl absolut als auch in der Frequenz. Daß dies nicht bei den Suszeptibilitäts- und Widerstandsdaten der Fall ist, hängt mit der schlechteren räumlichen Auflösung der Meßsysteme zusammen. Die z.T. hohen Suszeptibilitätswerte sprechen für hauptsächlich terrigene Sedimente mit eistransportiertem Material (IRD) (Glazialzeiten). Dies wird durch die sehr kleinräumigen Änderungen der Dichte- und  $v_p$ -Daten unterstützt. Einzelne IRD-Komponenten konnten mit Hilfe der Dichte-Feinuntersuchungen sichtbar gemacht werden. Die Sedimente der dazwischenliegenden Interglazialzeiten weisen niedrigere Suszeptibilitätswerte auf. Dies läßt auf erhöhte Anteile biogener Komponenten in diesen Sedimenten schließen. Die aus den Widerstandsdaten bestimmten Porositäten unterstützen dies, sie liegen hier bei 0.8 bis 0.9. Allerdings unterscheiden sich diese Interglazial-Sedimente auch noch in sich, wie an Variationen in allen Meßgrößen zu erkennen ist. Allerdings sind diese Variationen nicht so hochfrequent wie die für die Sedimente der Glazialzeiten. Für die Sedimente der Glazialzeiten deuten Porositäten um 0.7 darauf hin, daß diese mehr terrigen geprägten Sedimente immer noch biogene Anteile enthalten, da terrigene Sedimente ohne biogene Komponenten meist niedrigere Porositäten haben. Die Absolutwerte aus den Geschwindigkeitsuntersuchungen können in dieser Diskussion keinen wesentlichen Beitrag leisten, da der Zusammenhang zwischen  $v_p$  und den Schlüsselparametern Dichte und Porosität mehrdeutig ist (siehe Abbildung 4.13, Kapitel 4.4.3). Der Wert dieser Daten liegt hauptsächlich in ihrem Frequenzgehalt und in ihrem Beitrag für spätere, im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommene Reflektogrammberechnungen.

Die Messung verschiedener physikalischer Eigenschaften an Sedimentkernen liefert die Basis für solche integrativen Betrachtungen. Unsicherheiten, die bei der Messung einzelner Parameter bestehen, können z.T. erfolgreich ausgeräumt werden. Trotz allem sollte für eine erfolgreiche integrative Betrachtung Erfahrung in der Bewertung sedimentphysikalischer Daten nach wie vor mit in die Interpretation einfließen.



**Abbildung 4.14:** Dichte, spezifischer elektrischer Widerstand, Porosität (berechnet aus den Widerstandsdaten) sowie Ultraschallwellengeschwindigkeit (von links nach rechts) nebeneinander für den Schwerlotkern PS1821-6.

## 5 Schlußfolgerungen und Ausblick

In diesem Kapitel sollen einige bedeutende Erkenntnisse aus dieser Arbeit aufgegriffen und zusammengefaßt werden. Ein Ausblick auf Zukunftsperspektiven, basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, bildet den zweiten Abschnitt dieses Kapitels.

Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt werden konnte, sind mit dem Dichtemeßsystem zerstörungsfreie hochauflösende Dichtebestimmungen an Sedimentkernen mit einer Absolutwertgenauigkeit von ca. 1% und einer räumlichen Auflösung im mm-Bereich möglich. Zudem kann durch Kernrotation die Homogenität untersucht werden; dies ermöglicht Aussagen über das Vorhandensein von eistransportiertem Material (IRD und dropstones). Das Meßsystem hat sich inzwischen am Alfred-Wegener-Institut auch im Routinebetrieb bei der Benutzung durch Geologen bewährt.

Räumlich hochauflösende Informationen über die physikalischen Eigenschaften mariner Sedimente erweisen sich u.a. auch als wichtiges Werkzeug zur Rekonstruktion klimatisch bedingter Signale. Hier liefern die Dichtedaten einen wertvollen Beitrag, was auch an Beispielen gezeigt werden konnte. Die Untersuchung von Klimaveränderungen in der Vergangenheit ist eines der Schlüsselemente in der aktuellen Global-Change-Diskussion. Insofern kommt diesen klimarelevanten Aspekten eine besondere Bedeutung zu.

Für alle Dichteuntersuchungen an Sedimentkernen gilt, daß eine optimale Interpretation der Meßergebnisse erst durch eine integrative Betrachtung realisierbar ist. Physikalische Eigenschaften wie spezifischer elektrischer Widerstand, magnetische Suszeptibilität und Ultraschallwellengeschwindigkeit sollten gemeinsam für die Interpretation herangezogen werden, wie dies im vierten Kapitel dieser Arbeit am Beispiel des Schwerelotkerns PS1821-6 exemplarisch getan wurde. Mehrdeutigkeiten und Widersprüche können auf diesem Wege leichter ausgeschlossen werden. Erfahrung in der Bewertung sedimentphysikalischer Daten ist für solche integrativen Interpretationen trotz der vielen Meßparameter unverzichtbar.

Neben all den genannten positiven Ergebnissen treten bei den Dichtemessungen mitunter auch unerwünschte Probleme auf, die in diesem Abriß nicht ungenannt bleiben sollen. Durch eine Störung der Kernnahme kann es zu luft- oder wassergefüllten Spalten zwischen Sediment und Kernrohrmaterial kommen. Solche Spalte wirken sich nachteilig auf die Dichtedaten aus, da der Luft- oder Wasseranteil nicht bei der Dichteberechnung berücksichtigt werden kann. Ferner sind verbogene, deformierte Horizonte im Kern ein weiteres Problem. Die Deformationen können bei der Kernnahme auftreten und so schmale Horizonte oder Horizontwechsel in der Dichtemessung breiter und weniger scharf abgegrenzt erscheinen lassen. Eine Unterscheidung solcher Effekte von wirklichen "weichen" Horizontwechseln ist ohne Zusatzinformationen nicht möglich. Insbesondere bei der Berechnung von Reflektogrammen für den Vergleich mit sedimentechographischen Aufzeichnungen (Parasound) würden sich solche Fehler negativ auswirken. Schließlich stellen die momentan doch erheblichen Datenlücken an den Enden der einzelnen Kernsegmente ein weiteres Problem dar.

Überleitend zum Ausblick sollen die zuletzt genannten Probleme erneut

aufgegriffen werden. An einer Verkleinerung der Datenlücken wird bereits gearbeitet. Durch eine Abänderung der Segmentendkappen könnte die derzeitige Datenlückenlänge von ca. 15cm um etwa die Hälfte reduziert werden. Dies wäre gerade für die Korrelation von Signalen aus benachbarten Kernen erstrebenswert. Eine Verkürzung der Meßzeit wäre durch technische Änderungen oder auch durch Änderungen des Meßablaufs (z.B. Rotation nur um 180° statt 360°) denkbar. Die Probleme der Luftzwischenräume und verbogenen Schichten können in Zukunft stichprobenartig durch Vergleiche mit Röntgen-tomographie und Kernphotographie nach der Kernöffnung eingegrenzt, mit vertretbarem Aufwand aber nicht völlig ausgeräumt werden.

Ein Einsatz des Dichtemeßsystems oder einer abgewandelten Meßbank auf See wäre gerade im Hinblick darauf, daß bereits an Bord oft eine erhebliche Anzahl von Kernen geöffnet und geologisch bearbeitet wird, sehr vielversprechend. Um den Aufwand im Rahmen strahlenschutztechnischer Vorkehrungen möglichst klein zu halten, wäre hierbei zu erwägen, radioaktive Quellen mit einer geringeren Aktivität als der hier vorgestellten zu benutzen. Beim ODP (Ocean Drilling Program) werden seit langem Dichteuntersuchungen mit Gammaabsorption auf See durchgeführt (System GRAPE), allerdings mit einer weitaus schlechteren räumlichen und absoluten Auflösung, verglichen mit dem hier beschriebenen Dichtemeßsystem. Ein Einsatz eines Systems in der Art des Dichtemeßsystems, so wie es in dieser Arbeit beschrieben wurde, könnte möglicherweise den wissenschaftlichen Ertrag der ODP-Arbeiten im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften deutlich mehren.

In Zukunft sollte vor allem der integrativen Betrachtung physikalischer Eigenschaften, so wie sie beispielsweise im Rahmen des ODP durchgeführt wird, vermehrt Betrachtung geschenkt werden. Die Ansätze in dieser Arbeit haben gezeigt, wie bereichernd solche Interpretationen mit der gleichzeitigen Betrachtung verschiedener Parameter sein können. Das Hinzuziehen weiterer physikalischer Eigenschaften sowie der Rückgriff auf Datenbanken mit Fallbeispielen könnte für erfolgreiche Interpretationen sehr hilfreich sein. Nicht unerwähnt bleiben sollen in diesem Zusammenhang auch die sedimentechographischen Methoden sowie in-situ Untersuchungen. Die Rekonstruktion des in-situ Zustandes anhand von Kernmaterial kann nur durch vergleichende Arbeiten mit Methoden, die am Meeresboden direkt oder von der Meeresoberfläche aus arbeiten, erreicht werden. Hierzu sind hochauflösende Methoden, wie die in dieser Arbeit vorgestellten Dichtemessungen, sehr bereichernd. Gerade beim Vergleich von Kernen und Sedimentechogrammen werden diese Dichtedaten für die Berechnung von Reflektogrammen aus Kerndaten in naher Zukunft ein Schlüsselparameter sein.

## 6 Literatur

- Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. (AIME)* 146, S. 54-62.
- Belcher, D.J., Herner, R.C., Cuykendall, T.R. und Sack, H.S., 1953: Use of radioactive material to measure soil moisture and density; *American Society for Testing and Materials*, No. 134, S. 10-22.
- Bergmann, U., Frederichs, T. und Nowaczyk, N., 1992: Electrical Resistivity in Sediment Cores; in: Fütterer, D.K. (Hrsg.), 1992: Arctic '91: The Expedition ARK-VIII/3 of RV "Polarstern" in 1991, *Reports on Polar Research*, 107, S. 104-105.
- Bernhard, R.K. und Chasek, M., 1955: Soil Density Determination by direct Transmission of Gamma Rays; *American Society for Testing Materials, Proceedings*, 55, S. 1199-1223.
- Berry, P.F., 1961: Gamma-Ray Attenuation Coefficients; *Nucleonics*, Vol. 19, Nr. 6, S. 62.
- Birks, J.B., 1964: *The Theory and Practice of Scintillation Counting*; Pergamon Press, Oxford, 662 Seiten.
- Bohrmann, G., 1992: Porzellanitbeprobung; in: Bathmann, U., Schulz-Baldes, M., Fahrbach, E., Smetacek, V. und Hubberten, H.-W. (Hrsg.), 1992: Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes "Polarstern" 1990/91; *Berichte zur Polarforschung*, 100, S. 301.
- Bouma, A.H., 1962: *Sedimentology of some Flysch Deposits. A graphic approach to facies interpretation*; Elsevier, Amsterdam, 168 Seiten.
- Boyce, R.E., 1968: Electrical Resistivity of Modern Marine Sediments from the Bering Sea, *Journal of Geophysical Research*, 73, S. 4759-4766.
- Bücker, C., Löffel, R. und Schult, A., 1990: Hochauflösende Dichtemessungen an Bohrkernen mittels Absorption von Gamma-Strahlung; in: KTB-Report 90-4, Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLFb), Hannover, S. 132-145.
- Bunker, C.M. und Bradley, W.A., 1961: Measurement of bulk density of drill core by gamma-ray absorption; *U.S. Geological Survey Research*, No. 424-B, S. B310-B313.
- Colletta, B. und Ballard, J.F., 1991: Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models: Examples of thin-skinned thrust systems; *Geology*, Vol. 19, S. 1063-1067.
- Corey, J.C. und Hayes, D.W., 1970: Determination of density and water content of marine sediment in an unextruded core using fast neutron and gamma ray attenuation; *Deep-Sea Research*, Vol. 17, S. 917-922.
- Crusius, J. und Anderson, R.F., 1991: Core compression and surficial loss of lake sediments of high porosity caused by gravity coring; *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36 Nr. 5, S. 1021-1031.

Danes, Z.F., 1960: A Chemical Correction Factor in Gamma-Gamma Density Logging; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65, Nr. 7, S. 2149-2153.

Davidson, J.M., Biggar, J.W. und Nielsen, D.R., 1963: Gamma-Radiation Attenuation for Measuring Bulk Density and Transient Water Flow in Porous Materials; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, Nr. 16, S. 4777-4783.

Ehrmann, W. und Grobe, H., 1991a: Gunnerus-Rücken und Kosmonaut-Meer; in: Fütterer, D.K. und Schrems, O., 1991: Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS "Polarstern" 1989/1990, Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7; *Berichte zur Polarforschung*, 90, S. 101-109.

Ehrmann, W. und Grobe, H., 1991b: Lazarev-Meer und Astrid-Rücken; in: Fütterer, D.K. und Schrems, O., 1991: Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS "Polarstern" 1989/1990, Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7; *Berichte zur Polarforschung*, 90, S. 109-111.

Eife, K.-H., 1959: Die Bestimmung des Raumgewichtes von Böden und Gesteinen durch Gamma-Strahlen; *Freiberger Forschungshefte*, C61, 92 Seiten.

Ellis, D. V., 1987: *Well Logging for Earth Scientists*, Elsevier, New York, 532 Seiten.

Evans, H.B., 1965: GRAPE - A Device for Continuous Determination of Material Density and Porosity; *Transactions of the 6th SPWLA Annual Logging Symposium*, Vol. 6, Nr. 2, S. 1-25 (B).

Evans, R.D., 1955: *The Atomic Nucleus*; McGraw-Hill, New York, 972 Seiten.

Fanger, H.-U., Bössow, E. und Kuhn, H., 1985: Eine Gammasonde zur Schlickdichte-Bestimmung: ihre Entwicklung, Erprobung und Bewährung im Feldeinsatz, *Die Küste*, Heft 42, S. 189-207, Hrsg.: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.

Fritz, H.-G. und Löffel, R., 1990: Radiometrische Dichtemessung in der Kunststoffaufbereitung; *Kunststoffe*, Vol. 80, Nr. 2, S. 178-182.

Gealy, E.L., 1971: Saturated bulk density, grain density and porosity of sediment cores from the western equatorial Pacific: Leg 7, *Glomar Challenger*; in Winterer, E.L. et al., 1971: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, Vol. VII, Washington, S. 1081-1104.

Gerland, S., Kuhn, G., Gingele, F., Kringel, R. und Maus, B., 1992: Physical properties of the sediments and other geophysical investigations; in: Bathmann, U., Schulz-Baldes, M., Fahrbach, E., Smetacek, V. und Hubberten, H.-W. (Hrsg.), 1992: *The Expeditions ANTARKTIS IX/1-4 of the Research Vessel "Polarstern" in 1990/91*; *Reports on Polar Research*, 100, S. 245-246 sowie S.231.

Gerland, S., Richter, M., Villinger, H. und Kuhn, G., 1993: Non-destructive porosity determinations of Antarctic marine sediments derived from resistivity measurements with an inductive method; *Marine Geophysical Researches*, im Druck.

Gersonde, R., 1991: Alterseinstufung der Sedimentkerne; in: Fütterer, D.K. und Schrems, O., 1991: *Die*

Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS "Polarstern" 1989/1990, Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7; Berichte zur Polarforschung, 90, S. 116-130.

Gerthsen, C., Kneser, H.O. und Vogel, H., 1986: Physik; 15. Auflage, Springer Verlag Berlin, 920 Seiten.

Grant, J.A. und Schreiber, R., 1990: Modern Swathe Sounding and Sub-Bottom Profiling Technology for Research Applications: The Atlas Hydrosweep and Parasound Systems; Marine Geophysical Researches, Vol. 12, S. 9-19.

Grasty, R.L., 1979: Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration - theory and operational procedures; Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores, Hrsg.: P. J. Hood, Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, S. 147-161.

Grodstein, G.W., 1957: X-ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV; National Bureau of Standards, Circular 583, U.S. Dep. of Commerce, 54 Seiten.

Gurr, C.G., 1962: Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil; Soil Science, Vol. 94, S. 224-229.

Hamilton, E.L., 1970: Sound Velocity and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific; Journal of Geophysical Research, Vol. 75, Nr. 23, S. 4423-4446.

Hamilton, E.L., 1971: Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments; Geophysics, Vol. 36, Nr. 2, S. 266-284.

Harms, J.C. und Choquette, P.W., 1965: Geologic Evaluation of Gamma-Ray Porosity Device; Transactions of the 6th SPWLA Annual Logging Symposium, Vol. 6, Nr. 2, S. 1-37 (C).

Harris, J.N. und Megill, L.R., 1953: Techniques used in measuring uniformity of materials with gamma radiation; Nondestructive Testing, Vol. 11, Nr. 6, S. 9-14.

Heber, G. und Kozik, B., 1971: Physik; Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt am Main, 512 Seiten.

Holler, P. und Kögler, F.-Ch., 1990: Computer Tomography: A Nondestructive, High-Resolution Technique for Investigation of Sedimentary Structures, Marine Geology, Vol. 91, S. 263-266.

Homilius, J. und Lorch, S., 1957: Density determination on near-surface layers by gamma absorption; Geophysical Prospecting, Vol. 5, S. 449-468.

Hounsfield, G.N., 1973: Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system; British Journal of Radiology, Vol. 46, S. 1016-1022.

- Hubbel, J.H., 1982: Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1keV to 20 MeV; Int. J. Appl. Radiat. Isot., Vol. 33, S. 1269-1290.
- Kawamura, T., 1990: Nondestructive, Three-Dimensional Density Measurements of Ice Core Samples by X Ray Computed Tomography, Journal of Geophysical Research, Vol. 95, Nr. B8, S. 12.407-12.412.
- Keil, P., 1983: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgen-Computer-Tomographie; Phys. Bl., Vol. 39, Nr. 1, S. 2-8.
- Keller, G.H., 1965: Deep-sea nuclear sediment density probe; Deep-Sea Research, Vol. 12, S. 373-376.
- Kennett, J.P., 1982: Marine Geology; Prentice-Hall, New Jersey, 813 Seiten.
- Kipfstuhl, J. und Minniken, A., 1993: Erste Ergebnisse der Bohrkernmessungen; in: Miller, H. und Schrems, O. (Hrsg.), 1993: Die Expeditionen ANTARKTIS-X/1-2 des Forschungsschiffes "Polarstern" 1991/92, Berichte zur Polarforschung, in Vorbereitung.
- Klingenbeck, K., 1988: Bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik, Teil 1; Physik und Didaktik, 16 (4), S. 320-333.
- Klingenbeck, K., 1989: Bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik, Teil 2; Physik und Didaktik, 17 (1), S. 23-35.
- Kuhn, G., 1986: Erprobung des AWI-Kolbenlotes ( $\varnothing=84\text{mm}$ ) und Vergleich mit anderen Kernverfahren; in: Gersonde, R. (Hrsg.), 1986: Die Expedition ARKTIS III mit FS "Polarstern" 1985; Berichte zur Polarforschung, 28, S. 70-74.
- Kuhn, G., Ehrmann, W.U., Melles, M., Schmiedl, G. und Hambrey, M.J., 1992: Glaciomarine sedimentary processes in the Weddell Sea and Lazarev Sea; in: Bathmann, U., Schulz-Baldes, M., Fahrbach, E., Smetacek, V. und Hubberten, H.-W. (Hrsg.), 1992: The Expeditions ANTARKTIS IX/1-4 of the Research Vessel "Polarstern" in 1990/91; Reports on Polar Research, 100, S. 223-244.
- Ledley, R.S., Di Chiro, G., Luessenhop, A.J. und Twigg, H.L., 1974: Computerized X-ray Tomography of the Human Body; Science, Vol. 186, Nr. 4160, S. 207-212.
- Leeder, M.R., 1982: Sedimentology - Process and Product; George Allen & Unwin, London, 344 Seiten.
- Löffel, R., 1979: Massenstrommessungen an Ein- und Mehrphasenströmungen, Atomkernenergie/Kerntechnik, Vol. 33, S. 139-143.
- Lorch, S., 1970: Zerstörungsfreie Dichte- und Wassergehaltsbestimmungen an auf See gewonnenen Sedimentkernen mit Hilfe von Gamma-Absorptionsmessungen; Beih. geol. Jb. , Vol. 98, S. 65-76, Hannover.
- Luskin, B., Heezen, B.C., Ewing, M. und Landisman, M., 1954: Precision measurement of ocean depth; Deep-Sea Research, Vol. 1, S. 131-140.

Marienfeld, P., 1991: Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland; Berichte zur Polarforschung, 96, 162 Seiten.

Max, M.D., Schreiber, R. und Cherkis, N.Z., 1992: Geological Control of Shallow Gas and Pockmarcks in the Norwegian Channel; High Resolution Shallow Subbottom Profiling of Small Scale Features; Marine Geophysical Researches, Vol. 14, S. 77-85.

McGinnies, R.T., 1959: X-ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV; National Bureau of Standards, Supplement to Circular 583, U.S. Dep. of Commerce, 10 Seiten.

McHenry, J.R. und Dendy, F.E., 1964: Measurement of Sediment Density by Attenuation of Transmitted Gamma Rays; Proceedings of the Soil Science Society of America, Vol. 28, S. 817-822.

Melles, M., 1991: Paläoglazilogie und Paläozeanographie im Spätquartär am Kontinentalrand des südlichen Weddellmeeres, Antarktis; Berichte zur Polarforschung, 81, 190 Seiten.

Miller, H., De Batist, M., Jokat, W., Kaul, N., Steinmetz, St., Uenzelmann-Neben, G., und Versteeg, W., 1990: Revised Interpretation of Tectonic Features in the Southern Weddell Sea, Antarctica, from New Seismic Data; Polarforschung, Vol. 60, Nr. 1, S. 33-38.

Miller, H. und Weigel, W. (Hrsg.), 1993: Die Expedition ARK-V/3 mit FS "Polarstern" 1988; Berichte zur Polarforschung, in Vorbereitung.

Nafe, J.E. und Drake, C.L., 1957: Variation with depth in shallow and deep water marine sediments of porosity, density and the velocities of compressional and shear waves; Geophysics, Vol. 12, Nr.3, S. 523-552.

O'Brien, D.K. and Manghnani, M.H., 1992: Physical Properties of Site 762: A comparison of shipboard and shore-based laboratory results; in von Rad, U., Haq, B.U., et al., Proc. ODP, Sci. Results, 122: College Station, TX (Ocean Drilling Program), S. 349-362.

Parker, W.R. und Sills, G.C., 1990: Observation of Corer Penetration and Sample Entry during Gravity Coring; Marine Geophysical Researches, Vol. 12, S. 101-107.

Preiss, K., 1968a: Non-destructive laboratory measurement of marine sediment density in a core barrel using gamma radiation, Deep-Sea Research, Vol. 15, S. 401-407.

Preiss, K., 1968b: In situ measurement of marine sediment density by gamma radiation; Deep Sea Research, Vol. 15, S. 637-641.

Press, F. und Siever, R., 1986: Earth; 4. Auflage, Freeman & Company, New York, 656 Seiten.

Riezler, W. und Kopitzki, K., 1963: Kernphysikalisches Praktikum; B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 150 Seiten.

Rostek, F., Spieß, V. und Bleil, U., 1991: Parasound echosounding: Comparison of analogue and digital echosounder records and physical properties of sediments from the Equatorial South Atlantic; *Marine Geology*, Vol. 99, S. 1-18.

Schmiedl, G., 1990: Quartäre Sedimentationsprozesse in der Tiefsee des Riiser-Larsenmeeres westlich des Gunnerus-Rückens, Ost-Antarktis; unveröffentlichte Diplomarbeit, Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven, 113 Seiten.

Schön, J., 1983: *Petrophysik*; Akademie Verlag Berlin, 405 Seiten.

Schultz, H. und Vogt, H.-G., 1977: *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*, Verlag Karl Thieme, München.

Shepard, F.P., 1973: *Submarine Geology*; 3. Auflage, Harper and Row Publishers, New York.

Sheriff, R.E., 1984: *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*; Society of Exploration Geophysicists (SEG), Second Edition, 323 Seiten.

Shumway, G., 1960a: Sound Speed and Absorption Studies of Marine Sediments by a Resonance Method - Part I; *Geophysics*, Vol. 25, Nr. 2, S. 451-467.

Shumway, G., 1960b: Sound Speed and Absorption Studies of Marine Sediments by a Resonance Method - Part II; *Geophysics*, Vol. 25, Nr. 3, S. 659-682.

Siedler, G. und Peters, H., 1986: Physical properties of sea water; in: *Landolt-Börnstein, New Series*, Vol. V/3a Oceanography, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 233-264.

Smith, E.E. und Whiffin, A.C., 1952: Density of Concrete Slabs Using Gamma Radiation; *The Engineer*, Vol. 194, Nr. 5040, S.278-281.

Spieß, V., 1992: *Digitale Sedimentechographie - Neue Wege zu einer hochauflösenden Akustostratigraphie*; Habilitationsschrift, Universität Bremen.

Spindler, K., Löffel, R. und Hahne, E., 1988: Gamma-Strahl-Dichtemeßsystem zur Messung des Dampfgehalts in Zweiphasen-Strömungen; *Technisches Messen*, Vol. 55, Nr. 6, S. 228-233.

Stein, R., Grobe, H., Hubberten, H., Marienfeld, P. und Nam, S., 1993: Latest Pleistocene to Holocene changes in glaciomarine sedimentation in Scoresby Sund and along the adjacent East Greenland Continental Margin: Preliminary Results; *Geo-Marine Letters*, im Druck.

Sutton, G.H., Berckhemer, H. und Nafe, J.E., 1957: Physical analysis of deep sea sediments; *Geophysics*, Vol. 22, Nr. 4, S. 779-812.

Tittman, J. und Wahl, J.S., 1965: The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma); *Geophysics*, Vol. 30, S. 284-294.

Vankova, V., 1968: Cs<sup>137</sup> Gamma-Ray Absorption and Density of Rocks; *Studia geophysica et geodaetica*, Vol. 12, S. 63-73.

Veith, H.-M. (Hrsg.), 1989: Strahlenschutzverordnung 1989, Bundesanzeiger Verlags-GmbH, Köln.

Villinger, H., Spieß, V. und Potozki, F., 1990: Sedimentphysikalische Untersuchungen; in: Gersonde, R. und Hempel, G. (Hrsg.), 1990: Die Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS "Polarstern" 1989; *Berichte zur Polarforschung*, 74, S. 76-89.

Vinegar, H.J., 1986: X-Ray CT and NMR Imaging of Rocks; *Journal of Petroleum Technology*, März 1986, S. 257-259.

Vomocil, J.A., 1954: In Situ Measurement of Soil Bulk Density; *Agricultural Engineering*, September 1954, S. 651-654.

Wahl, J.S., 1983: Gamma-ray logging; *Geophysics*, Vol. 48, Nr. 11, S. 1536-1550.

Weaver, P.P.E. und Schultheiss, P.J., 1990: Current Methods for Obtaining, Logging and Splitting Marine Sediment Cores; *Marine Geophysical Researches*, Vol. 12, S. 85-100.

Wendt, I., 1954: Versuche zur Dichtebestimmung an Sandschüttungen durch Messung der Absorption von Gamma-Strahlung; *Geol. Jb.*, Vol. 70, S. 1-6.

Whitmarsh, R.B., 1971: Precise Sediment Density Determination by Gamma-Ray Attenuation alone; *Journal of Sedimentary Petrology*, September 1971, S. 882-883.

Wieschollek, U., 1990: Gefügeabhängige Geschwindigkeit akustischer Wellen in Meereis; unveröffentlichte Diplomarbeit, Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven / Universität Münster, 63 Seiten.

Withjack, E.M., 1987: Computed Tomography for Rock Property Determination and Fluid-Flow Visualization; *Society of Petroleum Engineers*, 62nd Annual Technical Conference and Exhibition, S.183-196.

## Anhang A: Kerndaten und Probennahmegeräte

### PS1723-1 (SL) *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ARK V/3b (1988), Polarstern  
Region : östlich Grönland vor Scoresby Sund, Arktis  
Position, Datum : 70° 7.1' N 19° 59.9' W 11.08.1988  
Wassertiefe : 283 m  
Kerngewinn : 0.85 m

### PS1724-2 (SL) *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ARK V/3b (1988), Polarstern  
Region : östlich Grönland vor Scoresby Sund, Arktis  
Position, Datum : 70° 7.3' N 19° 13.0' W 12.08.1988  
Wassertiefe : 363 m  
Kerngewinn : 1.29 m

### PS1725-2 (SL) *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ARK V/3b (1988), Polarstern  
Region : östlich Grönland vor Scoresby Sund, Arktis  
Position, Datum : 70° 7.2' N 18° 50.6' W 12.08.1988  
Wassertiefe : 879 m  
Kerngewinn : 5.16 m

### PS1821-6 (SL) *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT VIII/6 (1990), Polarstern  
Region : Kosmonautmeer/ Gunnerus-Rücken, Antarktis  
Position, Datum : 67° 3.9' S 37° 28.8' E 03.04.1990  
Wassertiefe : 3986 m  
Kerngewinn : 15.87 m

### PS1822-6 (SL) *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT VIII/6 (1990), Polarstern  
Region : Kosmonautmeer/ Gunnerus-Rücken, Antarktis  
Position, Datum : 66° 55.1' S 34° 18.0' E 03.04.1990  
Wassertiefe : 3983 m  
Kerngewinn : 4.41 m

**PS1826-1 (SL)** *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT VIII/6 (1990), Polarstern  
Region : Lazarevmeer/ Astrid-Rücken, Antarktis  
Position, Datum : 65° 1.6' S 9° 10.7' E 13.04.1990  
Wassertiefe : 4758 m  
Kerngewinn : 16.05 m

**PS1827-1 (SL)** *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT VIII/6 (1990), Polarstern  
Region : Lazarevmeer/ Astrid-Rücken, Antarktis  
Position, Datum : 65° 0.6' S 9° 11.0' E 13.04.1990  
Wassertiefe : 4799 m  
Kerngewinn : 10.64 m

**PS1831-1 (KOL)** *Kern noch ungeöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT VIII/6 (1990), Polarstern  
Region : nördlicher Astrid-Rücken, Antarktis  
Position, Datum : 65° 44.9' S 13° 39.6' E 15.04.1990  
Wassertiefe : 2347 m  
Kerngewinn : 7.44 m

**PS 2007-1 (SL)** *Kern noch ungeöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT IX/3 (1991), Polarstern  
Region : "Polarstern-Bank", Weddellmeer, Antarktis  
Position, Datum : 71° 23.4' S 24° 10.2' W 10.02.1991  
Wassertiefe : 4217 m  
Kerngewinn : 4.73 m

**PS2089-1 (KOL)** *Kern bereits geöffnet*

Fahrt, Schiff : ANT IX/4 (1991), Polarstern  
Region : Südwestlicher Indischer Rücken, Südatlantik  
Position : 53° 11.3' S 5° 19.8' E 08.04.1991  
Wassertiefe : 2615 m  
Kerngewinn : 8.46 m

## **Probennahmegeräte**

Für den Gewinn der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kerne wurden das **Schwerelot (SL)** und das **Kolbenlot (KOL)** eingesetzt. Diese und andere Probennahmegeräte und deren Eigenschaften werden z.B. bei Kuhn (1986) sowie Weaver und Schultheiss (1990) ausführlich beschrieben. Beide Geräte werden am Draht vom Schiff aus durch die Wassersäule zum Meeresboden herabgelassen und dringen dort etwa 5-15 Meter ins Sediment ein. Die Lote bestehen aus Eisenrohren und einem darin eingesetzten PVC-Rohr (Liner), in dem dann der Sedimentkern geborgen werden kann. Der generelle Unterschied zwischen Schwere- und Kolbenlot ist der Probennahmemechanismus, außerdem unterscheiden sich die hier benutzten Geräte im Durchmesser (ca.-Durchmesser mit PVC-Rohr für SL: 125mm, KOL: 90mm). Schwere- und Kolbenlot dringen, beschwert durch Blei, ins Sediment ein, beim Kolbenlot unterstützt außerdem ein Kolben, der im Rohr einen Unterdruck erzeugt, die Probennahme. Nachdem das Kerngerät an Bord gehievt ist, wird der gewonnene Kern aus dem Kerngerät herausgezogen, in 1-Meter-Segmente zerteilt und an den Segmentenden mit Plastikkappen und Klebeband verschlossen.

## **Anhang B: Anmerkungen zum Strahlenschutz**

### **1. Allgemeines, Verordnungen und Gesetze**

Das Atomgesetz vom 31.10.76 bildet die Grundlage des Strahlenschutzrechtes (Schultz u. Vogt, 1977).

Die Strahlenschutzverordnung vom 13.10.76 wurde für die nähere Regelung des Strahlenschutzes in der Praxis erlassen (Schultz und Vogt, 1977). 1989 wurde die Strahlenschutzverordnung in den meisten Punkten überarbeitet (Veith, 1989).

**Grundregeln des Strahlenschutzes** (Schultz und Vogt, 1977):

- a) Verwendung von Strahlungsquellen mit möglichst kleiner Quellstärke
- b) möglichst kurze Aufenthaltszeiten im Strahlenfeld
- c) möglichst große Abstände von den Strahlenquellen
- d) Verwendung von Abschirmwandungen

### **2. Vorkehrungen, die im Rahmen der Dichteuntersuchungen mit dem Dichtemeßsystem (DMS) getroffen wurden**

- Teilnahme an einem Strahlenschutzkurs (entspr. Fachgruppe) bzw. Belehrung durch den Strahlenschutzbeauftragten - Kurs: Umgang mit umschlossenen radioaktiven Stoffen, Fachkundegruppe 2.2 (nach der Strahlenschutzverordnung v. 13.10.1976)

- "Bestellung" von Strahlenschutzverantwortlichem u. -beauftragtem

- Abnahme des DMS durch Gewerbeaufsicht zur Erlangung der Umgangsgenehmigung

- ärztliche Untersuchungen bei dafür zugelassenen Ärzten

### **3. Auflagen des Gewerbeaufsichtsamtes Bremerhaven**

- geeignete Einrichtung der Räumlichkeiten (Kennzeichnung, Sicherung gegen Diebstahl)

- geeignete Abschirmung (hier: Quellenbehälter, Kerndurchführung sowie Bleiplatten, Stärke: 15mm)

- Strahlenschutzplan mit dazugehörigen Messungen

- FilmDOSimeter (monatliche Auswertung durch das Staatliche Materialprüfungsamt NRW in Dortmund) bzw. geeignete Überwachungsgeräte

## Danksagung

Zuerst danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Heinrich Villinger (AWI, jetzt Universität Bremen) und Herrn Prof. Heinz Miller (AWI) für die Themenvergabe dieser Arbeit und die ausgezeichnete Unterstützung während meiner Doktorandenzeit. Während vieler intensiver Gespräche konnte ich von beiden sehr viel lernen. Die angenehme Arbeitsatmosphäre werde ich in sehr guter Erinnerung behalten.

Der Institutswerkstatt, insbesondere Erich Dunker und Günter Rastedt danke ich herzlich für den Einsatz und die unermüdliche Arbeit bei der Planung, dem Aufbau, der Optimierung und der Wartung des Dichtemeßsystems. Ohne diese Arbeit wäre diese Dissertation sicherlich nicht in dieser Form zu verwirklichen gewesen.

Ich danke meinen Kollegen und Zimmernachbarn Sepp Kipfstuhl und Hajo Eicken aus der Glaziologie-Gruppe herzlich für vielfältige Unterstützungen, auch für Tee und Stückchen. Den übrigen Kollegen aus der Glaziologie sei auch herzlich gedankt.

Der gesamten Sektion Geophysik danke ich für die vielen anregenden Diskussionen und die angenehme Arbeitsatmosphäre, in der sich wirklich gut forschen läßt. Besonderer Dank geht hier an Christl Hoffmann und Brunhilde Kunsch. Dankeschön auch an Bernd Heesemann, der mir oft bei technischen Fragen mit Rat und Tat zur Seite stand.

Gerd Kuhn und Mitarbeitern aus der Sektion Geologie danke ich für die Zurverfügungstellung von Dichtedaten aus Einzelprobenuntersuchungen. Franz Gingele und anderen Geologen des AWI danke ich für die Diskussionsbereitschaft bei geologischen Fragestellungen.

Frank Pototzki danke ich für die Suszeptibilitäts- und  $v_p$ -Messungen an Kern PS1821-6 während der Expedition ANT-VIII/6.

Allen übrigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Alfred-Wegener-Instituts, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei hiermit herzlich gedankt.

Den Schiffsbesatzungen der Polarstern-Expeditionen ARK-V/3, ANT-VIII/6 und ANT-IX/3+4 danke ich für ihre gute Arbeit, ohne die ich nicht das schöne Sedimentmaterial zur Untersuchung bekommen hätte.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Zentralkrankenhauses Reinkenheide danke ich herzlich für die Möglichkeit, dort Sedimentkerne tomographisch untersuchen zu können und Frau Kaldewey-Notmann für die großzügige Zurverfügungstellung ihrer nächtlichen Bereitschaftszeit für tomographische Untersuchungen an Sedimentkernen.

Christian Bücken und Armin Rauen vom KTB-Feldlabor danke ich für das Ausleihen eines KTB-Kerns und des Widerstandsmeßgerätes sowie für viele interessante Diskussionen.

Regine Villinger und nochmals Heinrich Villinger danke ich sehr herzlich für die freundliche und großzügige Aufnahme bei sich zu Anfang meiner Doktorandenzeit. Dies hat den Start in Bremerhaven für mich immens vereinfacht.

Hertha und Hermann Meyer aus Wremen danke ich für die Unterstützung zur Ermöglichung wunderbarer Surfstunden, die mir immer wieder die sicherlich nötige Abwechslung von der Arbeit gaben.

Herzlich danke ich meinen Eltern, Geschwistern, Großeltern und Freunden aus dem Frankfurter Raum für die vielfältige Unterstützung während meiner Doktorandenzeit.

Nicht zuletzt sei allen, die auch zum Gelingen dieser Arbeit direkt oder indirekt beigetragen haben, hier aber nicht namentlich erwähnt wurden, herzlich gedankt.