

werden. Der übrige Teil der Magnetfeldmessungen deutet auf homogen magnetisiertes Material im Felsbett hin, das zum größten Teil aus Gneisen und Graniten besteht (s. BROCKAMP 1965; ESCHER & WATT 1976).

Mit diesem Vergleich soll gezeigt werden, daß mit Hilfe des vorliegenden präzisen Verlaufs des Felsuntergrundes die Möglichkeit besteht, viele der geophysikalischen und geodätischen Messungen aus früheren Expeditionen genauer zu analysieren (s. HOCHSTEIN 1961; HOISL 1965; BROCKAMP 1965; BROCKAMP & KOHNEN 1965; BROCKAMP & PISTOR 1967; BROCKAMP & THYSSEN 1967; THYSSEN 1969; KOHNEN 1969). So kann man z.B. die genaue Geländekorrektur für das gravimetrische Profil zumindest 2-dimensional bestimmen, um den Effekt der Felstopographie auf die Bouguer-Anomalie zu eliminieren. Damit bestünde dann die Möglichkeit für einen genaueren Vergleich mit den magnetischen Messungen. Eine Analyse der Felstopographie und des Verlaufs der Eisoberfläche wird zeigen, daß die Wellen an der Eisoberfläche eindeutig den Undulationen des Felses zugeordnet werden können. Eine Phasenanalyse kann theoretische Überlegungen zum Fluß des Eises über Felstopographien ergänzen (BUDD 1970, 1971; BUDD & CARTER 1971; PATERSON 1981; HUTTER et al. 1981; HUTTER 1983). Beides sprengt allerdings den Rahmen der vorliegenden Arbeit und soll daher hier nicht weiter verfolgt werden.

4.5 Resumé

Mit Hilfe einer modifizierten Flug-EMR-Anlage ist es gelungen, auf dem rekonstruierten EIGIG-Profil von der Eisoberfläche aus Eisdicken und damit die Felstopographie sowie tiefere Schichtungen im Eis mit großer Genauigkeit zu erfassen. Diese Messungen konnten an die beiden Eiskernbohrungen GRIP und GISP2 in der Nähe des Summits von Grönland angeschlossen werden. Auf dem Profil zwischen den beiden Bohrungen weisen die Eisschichten der Weichsel-Eiszeit auf eine gegenüber heute nur um wenige Kilometer nach Westen verschobene Eisscheide hin. Das zeigt, daß dieser Teil des grönländischen Eisschildes gegenüber klimatischen Schwankungen von eiszeitlichem Ausmaß weitgehend stabil ist. In der Nähe der Bohrungen zeigen sich weitgehend ungestörte Eisschichtungen bis in ca. 2800 m Tiefe. Die Schichten des Eem darunter, die in den Bohrkernen z.T. überfaltet sind, bilden sich in den Messungen nicht mehr ab. Die Schichten im obersten Teil des Eisschildes bis zu einem Alter von ca. 4000 Jahren B.P. wurden mit höherer Auflösung von einer parallel betriebenen Meßapparatur erfaßt. Diese Messungen und deren Ergebnisse werden im folgenden Kapitel 5 vorgestellt.

5 Der innere Aufbau des grönländischen Inlandeises

Die in den Jahren 1989...1992 durchgeführten hochauflösenden EMR-Messungen entlang der EGIG-Linie und auf den Verbindungsstrecken zu den Eiskernbohrungen GRIP und GISP2 zeigen den Verlauf von inneren Schichtungen über die gesamte Profilstrecke. Einige Ergebnisse aus diesen Messungen sowie deren glaziologische und klimatologische Bedeutung sollen in den folgenden Kapiteln dargelegt werden.

5.1 Erfassung der inneren Strukturierung

Die bereits in Kap. 4.1 beschriebene innere Strukturierung eines Inlandeises durch den jährlichen Schneefall sowie durch chemische und feste Ablagerungen z.B. von Vulkanausbrüchen läßt sich insbesondere im oberen Teil eines Eisschildes mit Hilfe von hochauflösenden EMR-Messungen erfassen. Diese abgetauchten ehemaligen Eisoberflächen stellen Isochronen innerhalb des Eiskörpers dar. Eine Schicht mit besonders hohem Säuregehalt, der durch die Eruption eines Vulkans hervorgerufen wurde, kann als Referenzhorizont zur Datierung der Eisschichten in Bohrkernen herangezogen werden (LANGWAY et al. 1988; DIBB 1989; HAMMER & CLAUSEN 1990; JOHNSEN et al. 1992). Diese Referenzhorizonte bilden sich als besonders starke Reflektoren in den EMR-Messungen ab. So können mit dem EMR-Verfahren Schichten verschiedenen Alters innerhalb eines Eisschildes aufgezeichnet werden.

Die im folgenden vorgestellten Messungen umfassen etwa das oberste Drittel des über 3 km mächtigen grönländischen Inlandeises und entsprechen damit Altersstufen bis maximal ca. 4000 Jahre B.P. in Zentralgrönland. Aus diesen lassen sich bei genügend hoher Genauigkeit besonders im Randbereich Phänomene wie der Einfluß der Felstopographie sowie das Fließverhalten anhand von oberflächennahen Strukturen ableiten. Aus der Dicke einzelner Schichtpakete können mittlere jährliche Schichtdicken abgeleitet werden. Aus diesen kann man schließlich Größen wie Akkumulationsraten etc. gewinnen. Diese Aussagemöglichkeiten erweitern die punkthafte Analyse von Bohrkernen wie denen der Bohrungen GRIP und GISP2 in Zentralgrönland linienhaft. Wenn man diese Meßstrecken in geeigneter Weise dicht genug über das Inlandeis legt, kommen sie quasi flächenhaftem Charakter nahe.

5.2 Meßgeräte und Messungen

Während der Grönlandexpeditionen 1989, 1990, 1991 und 1992 wurde neben der in Kap. 4.2 beschriebenen Meßapparatur zur Erfassung der Felstopographie parallel eine hochauflösende EMR-Anlage eingesetzt. Diese Meßapparatur besteht im wesentlichen aus den am Institut für Geophysik in Münster entwickelten Komponenten, die von BLINDOW (1986) ausführlich beschrieben worden sind. Analog zu Kap. 4.2 werden in Abschnitt 5.2.1 dieser Arbeit nur die prinzipiellen Funktionsblöcke kurz erklärt. Ausführlich dagegen werden auch hier die Veränderungen oder Neukonstruktionen erläutert. Unter 5.2.2 werden Art und Umfang der in Grönland durchgeführten Messungen und unter 5.2.3 die grundsätzlichen Datenbearbeitungsschritte behandelt. Dabei kann gleichzeitig auf die Schwierigkeiten hingewiesen werden, die bei der glaziologischen Interpretation der Messungen auftauchen werden.

5.2.1 Die Meßapparatur

Die hochauflösende EMR-Meßapparatur, die im Laufe der Jahre an der Universität Münster entwickelt und immer wieder verbessert wurde, hat den im folgenden beschriebenen prinzipiellen Aufbau. Sie ist von der Funktionsweise der in Kap. 4.2.1 beschriebenen Anlage ähnlich. Ein Sender erzeugt einen Hochfrequenzimpuls, welcher von einer angeschlossenen breitbandigen Sendeantenne abgestrahlt wird. Dieser Impuls und die von ihm hervorgerufenen Reflexionssignale aus dem Untergrund werden von einer gleichartigen Empfangsantenne aufgefangen. Sie werden von nachgeschalteten elektronischen Komponenten gefiltert, verstärkt und weiter zur Registrieranlage geleitet. Hier werden die Empfangssignale durch ein Samplingsystem aus dem Hochfrequenzbereich in den niederfrequenten Audibereich transformiert. Gleichzeitig wird der Störspannungsabstand durch die für das Sampling notwendigen Wiederholungsmessungen erheblich verbessert. Diese Audiosignale werden schließlich digital auf Audio-PCM-Geräten (**P**ulse **C**ode **M**odulation) aus dem HiFi-Bereich aufgezeichnet, von wo sie später auf einen Computer überspielt und weiter bearbeitet werden können. Zusätzlich wird das Signal über eine automatische Verstärkungsregelung auf einem Graustufendrucker als Monitorschrieb ausgegeben.

Die Sender bestehen aus kaskadierten Avalanchetransistoren, die Impulse mit einer Ausgangsspannung von ca. 1.2 kV bei einer mittleren Abstrahlfrequenz von ca. 34 MHz erzeugen. Als Alternative wurde testweise ein CMOS-Hochspannungsschalter eingesetzt, mit dem Ausgangsamplituden bis zu ca. 2.4 kV produziert werden können. Die Ansteuerung des Senders erfolgt von der Registriereinheit über ein Glasfaserkabel. Dadurch werden überflüssige Metallteile vermieden, die in unmittelbarer Nähe der Sende- und Empfangsantennen erheblichen Einfluß auf die Signalform hätten.

Die normalerweise eingesetzten, nach WU & KING (1965) mit Widerständen bedämpften V-Dipolantennen wurden durch eigens konstruierte bedämpfte Schmetterlings-Schleifendipole ersetzt, die einen sehr viel größeren Wirkungsgrad aufweisen, ohne das Sende- bzw. Empfangssignal unnötig zu verlängern. Die Konstruktionszeichnung ist in Abb. 5.1, die praktische Ausführung aus Kupferblechen in Abb. 5.2 zu sehen. Die Antennen wurden so dimensioniert, daß die Sendefrequenz möglichst im spektralen Strahlungsmaximum der Antenne liegt. Gleichzeitig kann die Antenne auf die bewährte Schlittenkonstruktion montiert werden, ohne daß deren Ausmaße geändert werden müssen. In der Praxis zeigte sich, daß eine zusätzliche Signalverkürzung ohne nennenswerten Amplitudenverlust durch Parallelschaltung von bedämpften V-Dipolen erreicht werden konnte.

Von einer zweiten Antenne wird das Meßsignal empfangen, das durch einen Hochpaßfilter

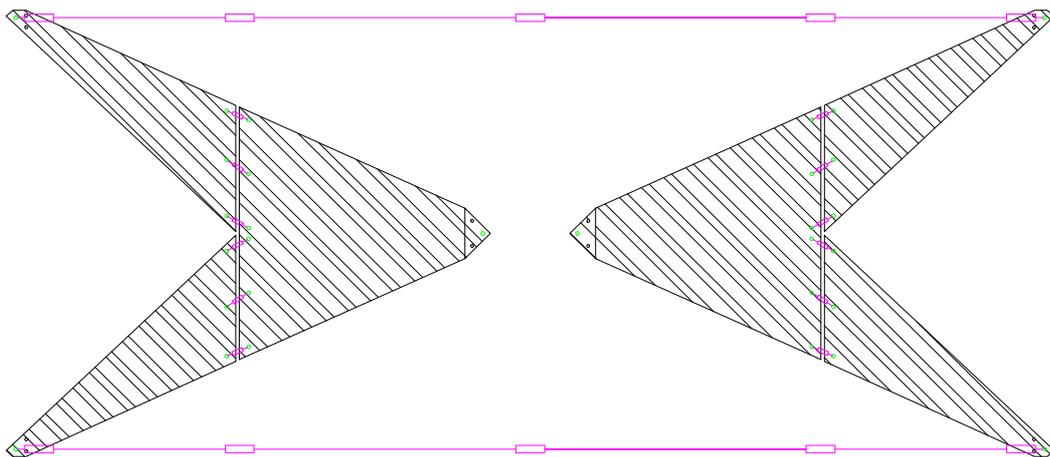


Abb. 5.1: Konstruktionszeichnung eines Schmetterlingsdipols. Dieser Aufbau bewirkt gegenüber nach WU & KING (1965) bedämpften Antennen einen höheren Wirkungsgrad bei etwa 2.5-facher Signallänge.

von störenden Kurzwellenanteilen befreit und von Hochpegelverstärkern aufbereitet wird. Über ein Koaxialkabel, das mit Ferritperlen gegen Mantelwellenausbreitung versehen ist, wird es der eigentlichen Registrierapparatur zugeführt. Diese besteht aus einem modifizierten Hochfrequenzkabeltester, dessen Samplingsystem für die Transformation des Meßsignals aus dem Hochfrequenz- in den Niederfrequenzbereich benutzt wird. Hier lassen sich Verstärkung, Hochfrequenz-Meßzeitfenster und die Stapelrate für eine einzelne Messung einstellen, womit auch die zeitliche Auflösung des aufgezeichneten Signals verändert wird. Eine komplette Messung dauert je nach Anforderung an die Eindringtiefe und Störunterdrückung zwischen 0.25 und 2 Sekunden.

Das so gewonnene Audiosignal wird Standard PCM-Komponenten zur Aufzeichnung zugeführt, die es mit 16 Bit Auflösung entsprechend 96 dB Dynamikumumfang digitalisieren und auf Videoband aufzeichnen. Diese digitalen Signale können später über eine speziell entwickelte Schnittstelle direkt von einem IBM-kompatiblen Personal-Computer übernommen und gespeichert werden, so daß sie ohne weiteren Qualitätsverlust zur Bearbeitung zur Verfügung stehen.

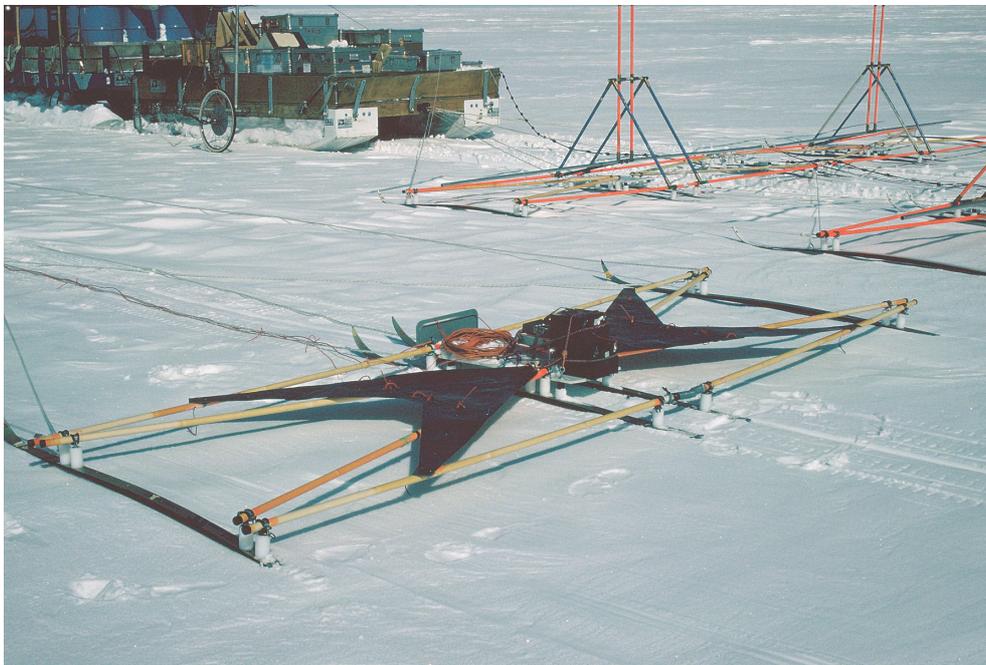


Abb. 5.2: Der praktische Aufbau einer Antenne auf der bewährten Leichtbaukonstruktion aus Langlaufski und GFK-Stangen.

Die komplette Anlage wurde auf einem Nansen-Schlitten montiert, die Antennenschlitten in einigen Metern Abstand dahinter gehängt und der gesamte Zug von einem Motorschlitten mit ca. 18...20 km/h über das Eis gezogen (s. Abb. 5.3).

5.2.2 Art und Umfang der Messungen

Diese Meßapparatur wurde parallel zu den in Kap. 4 beschriebenen Untersuchungen zur Eismächtigkeit auf den gleichen Meßstrecken betrieben. So wurde auf der rekonstruierten EGIG Linie zwischen Camp VI (T1) und Jarl Joset (T53), auf der Nord-Süd-Traverse von der Tiefbohrung GRIP zum Punkt Crête (T43) der EGIG Linie und zwischen den beiden Bohrungen GRIP und GISP2 gemessen (s. Karte in Abb. 4.7, Kap. 4.2.2).

Um den inneren Aufbau des Eisschildes in den obersten Schichten zu erfassen, wurde auf diesen Strecken mit nur wenigen Ausfällen alle 5...10 m je nach Eindringtiefe eine

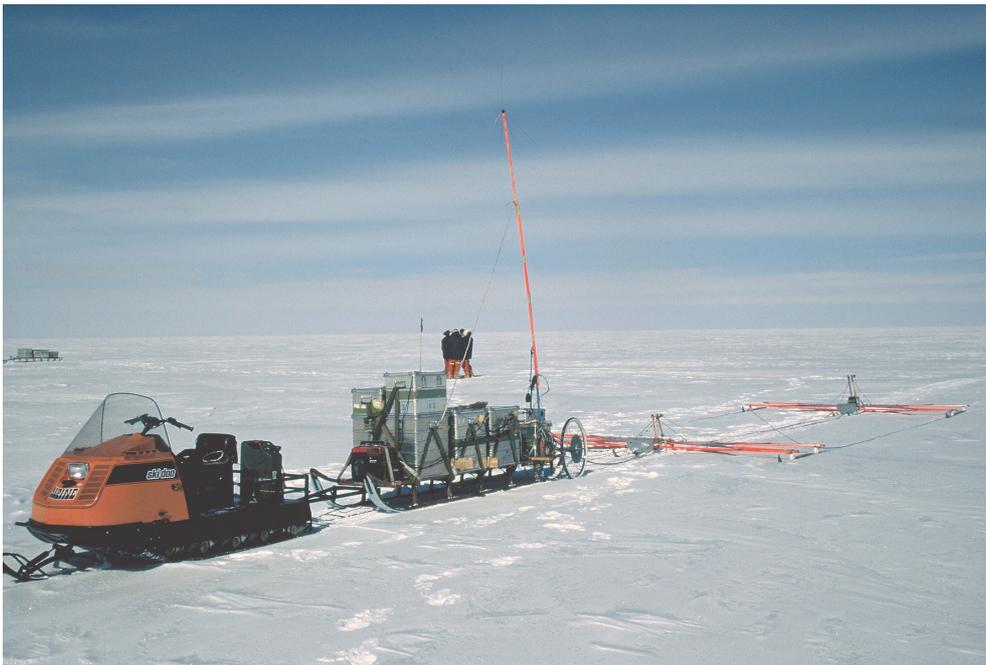


Abb. 5.3: Die hochauflösende EMR-Anlage aufgebaut auf einem Nansen-Schlitten. In den Zargesboxen befindet sich die Aufzeichnungs- und Überwachungselektronik. Die Stromversorgung erfolgt sowohl über Akkus als auch aus einem 1 kW-Generator. Dahinter sind die Antennenschlitten gehängt. Das Gespann wird von einem ca. 35 PS starken Ski-Doo auf dem Eis gezogen (vgl. Abb. 2.1, Kap. 2.2).

Messung aufgezeichnet. Der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne betrug dabei zwischen 10 und 20 m. Das HF-Meßzeitfenster lag zumeist bei etwa 10 μ s. Eine weitere Verlängerung hätte das Auflösungsvermögen des Systems erheblich verschlechtert. Dieses Zeitfenster entspricht einer Reflexionstiefe von ca. 800 m, aus der bei GRIP von einigen prominenten Reflektoren noch Signale aufgezeichnet werden konnten (s. Kap 5.3.3).

Zur Bestimmung der Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion von elektromagnetischen Wellen im Eis und deren räumlicher Variation wurden in regelmäßigen Abständen auf dem Meßprofil CMP-Messungen (Common Mid Point) durchgeführt. Hierbei wurden Sende- und Empfangsantenne bis zu 400 m Auslage voneinander entfernt. Damit läge das "move out" von Reflexionen aus 800 m Tiefe bei ca. 0.3 μ s entsprechend ca. 10 Periodenlängen bei 35 MHz Meßfrequenz, was zur Geschwindigkeitsbestimmung mit einem der üblichen Algorithmen zur Analyse ausreicht.

5.2.3 Grundsätzliche Bearbeitungsschritte für EMR-Messungen

Die Aufbereitung der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Meßdaten wird wie bei der Untersuchung des Felsuntergrundes an den digitalen Daten mit Hilfe eigens entwickelter Programme durchgeführt (s. a. Kap. 4.2.3). Sie werden bereits digital vom PCM-Bandgerät über eine speziell konstruierte Schnittstelle auf einen Personal Computer übertragen. Hier wird zunächst der Zeitmaßstab der Spuren geeicht. Dadurch lassen sich Schwankungen innerhalb des Zeitfensters mit Hilfe von aufgezeichneten Zeitmarken eines Quarzgenerators korrigieren. Anschließend werden Zeitversätze von Spur zu Spur durch Korrektur des Luftsignaleinsatzes eliminiert. Auf dieses Ausgangsdatenmaterial können verschiedene Frequenzfilter und Amplitudenregelungen angewandt werden, um Signaleinsätze zu verdeutlichen oder erst sichtbar zu machen. CMP-Messungen werden einer Geschwindigkeitsanalyse zugeführt. Sie dient dazu, mit der daraus berechneten Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion die Reflexionszeiten der Kartierungen in Tiefenlagen unter der Eisoberfläche zu transformieren. Diese Datensätze können schließlich abgespeichert und auf dem Bildschirm oder auf Druckern ausgegeben werden. Ebenso ist es möglich, bestimmte Reflexionseinsätze zu "picken", als Datensatz abzuspeichern und weiter zu bearbeiten. Das Programmpaket dazu wurde im Laufe der Jahre speziell für EMR-Messungen entwickelt. Im folgenden werden einige Aspekte der Datenbearbeitung noch einmal besonders erörtert.

· **Datenübertragung**

Bei einer Meßrate von einer Spur pro Sekunde, einer Abtastrate des Audio-PCM-Gerätes von ca. 44.1 kHz und jeweils 2 Kanälen á 16 Bit erhält man ca. 176400 Byte pro Spur. Dies führt bei einem Stück Kartierung von 10 km Länge zu einer Datenmenge von ca. 176 MByte, die auf dem PCM-Band abgespeichert werden. Das überfordert bei längeren Meßprofilen die derzeitigen Speichermedien von Computern – Rechenzentren einmal ausgenommen – bei weitem, so daß die Daten bei der Übertragung zum PC bereits auf akzeptablen Umfang reduziert werden, ohne zuviel Detailinformationen zu verlieren. So bleiben auf dem Rechner mit 4096 Punkten pro Spur und Mittelung über 3 Spuren noch ca. 5.5 MByte für 10 km Kartierung, was mit modernen PC's leicht zu bearbeiten ist. Die Übertragung selbst erfolgt seriell mit ca. 1.4 MBit pro Sekunde vom PCM-Gerät über eine speziell entwickelte Hochgeschwindigkeitsschnittstelle in den Arbeitsspeicher des PC's. Sie wird später auf Festplatten oder optischen Platten gespeichert. Dadurch, daß die Meßdaten nur ein einziges Mal mit hoher Abtastrate digitalisiert werden, stehen sie mit hoher Qualität auf dem Rechner zur Verfügung, was den folgenden Bearbeitungsschritten und der Präzision des Endergebnisses sehr zugute kommt.

· **Kalibrierung des Zeitmaßstabes**

Die Kalibrierung des Zeitmaßstabes ist der erste Bearbeitungsschritt, von dem die spätere Genauigkeit der Reflektortiefen entscheidend abhängt. Sie dient in erster Linie dazu, Unlinearitäten im Verlauf der Abtastung durch das analoge Samplingsystem des Kabeltesters zu kompensieren. Dazu werden zu Beginn und am Ende einer Meßfahrt Zeitmarken in Form von Rechteckschwingungen aus einem Quarzoszillator von wahlweise 5, 10 oder 20 MHz aufgezeichnet. Anhand dieser kann die jeweilige Abtastrate in 200, 100 oder 50 ns Zeitintervallen innerhalb einer Spur bestimmt werden. Sie werden dazu benutzt, die Spuren innerhalb dieser Zeitintervalle im Rechner neu abzutasten und sie auf einheitliche Zeitmaßstäbe zu bringen. Diese Technik des "Resampling" wird in späteren Schritten auch dazu verwandt, um die Transformation von Reflexionszeiten in Tiefenlagen durchzuführen. Dabei ändern sich die Abtastraten von einem Abtastpunkt der Spur zum nächsten entsprechend der Geschwindigkeitstiefenfunktion, und es muß eine kontinuierliche Neuabtastung erfolgen.

· **Eichung des direkten Signals**

Zu den üblichen Bearbeitungsschritten gehört der Ausgleich der zeitlichen Drift von Spur zu Spur, die durch thermische Effekte hervorgerufen wird. Dies gilt insbesondere für die Drift des Sendeimpulses, weil sich die Kaskadensender im Laufe des Betriebes im Inneren deutlich gegenüber ihrer Anfangstemperatur von bis zu -30°C erwärmen. Da das erste am Empfänger eintreffende Signal aber immer jenes ist, welches direkt entlang der Eisoberfläche durch die Luft von der Sende- zur Empfangsantenne läuft, kann man bei bekanntem Abstand zwischen Sender und Empfänger berechnen, zu welchem Zeitpunkt relativ zum Triggersignal des Senders es hätte eintreffen müssen. So werden sämtliche Ersteinsätze auf diesen Sollwert festgelegt. Die Signale werden innerhalb der Spuren zeitlich entsprechend verschoben.

· **Auswertung von Reflexionseinsätzen**

Nach diesen oben beschriebenen Bearbeitungsschritten hat man es mit einheitlichen Kartierungsstücken zu tun. Man kann sie direkt miteinander vergleichen und bis auf kleine Versätze von 1...2 Samplepunkten aneinanderhängen. Diese Versätze beruhen im allgemeinen auf thermischen Effekten im Empfangssystem, die nicht so ohne weiteres ausgeglichen werden können. Sie tragen bei der weiteren Auswertung zur Verminderung der Genauigkeit bei. Jene einheitlichen Datensätze dienen als Ausgangsmaterial für die weitere Bearbeitung mit Frequenzfiltern, Amplitudenregelungen usw.. Am Ende einer solchen Bearbeitungsfolge steht das Ausmessen einzelner Reflexionseinsätze, um mit diesen Werten glaziologische Fragestellungen z.B. nach Akkumulation und Fließverhalten zu bearbeiten. Die Ausgabe der Messungen erfolgt auch hier mit den in Kap. 4.2.3 beschriebenen Methoden auf Laserdrucker oder Farbkopierer.

Bei einem nutzbaren Meßzeitfenster von etwa $9\ \mu\text{s}$ erhält man eine Abtastrate von $2.3\ \text{ns}$ nach der Zeitkalibrierung. So wird ein $35\ \text{MHz}$ Signal mit ca. 12 Punkten für beide Halbwellen abgetastet. Man kann einen Reflexionseinsatz mit einer Genauigkeit von ± 2 Punkten bzw. $\pm 4.6\ \text{ns}$ festlegen, was dem größeren Teil einer Halbwelle entspricht. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa $220\ \text{m}/\mu\text{s}$ an der Eisoberfläche erhält man so einen Fehler von ca. $\pm 0.5\ \text{m}$ für die Tiefenlage eines Reflektors. Geht man davon aus, daß die übrigen Bearbeitungsschritte wie Resampling und Verschieben des Luftsignaleinsatzes,