

Interne Reflexionshorizonte in Eisschilden

O. Eisen, D. Steinhage

1. Einleitung

Die Struktur und der Aufbau der großen Eisschilde in Grönland und der Antarktis sind für das Verständnis des gegenwärtigen Klimas wie auch des Paläoklimas von großer Bedeutung, da Eis als einziges Medium Proben der Paläoatmosphäre archivieren kann. Zur Interpretation der im Eis konservierten Paläoklimaparameter, z.B. Staub, $\delta^{18}\text{O}$, etc., muss zur korrekten Interpretation die Schichtung des Eises ungestört erhalten sein. Schon in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden elektromagnetischen Wellen im MHz-Bereich (Radiowellen) zur Untersuchung von Eisschilden und Gletschern eingesetzt (Waite & Schmidt; 1961, Evans, 1963; Dowdeswell & Evans, 2004). Mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren (EMR) lassen sich sowohl Strukturen im Eiskörper als auch dessen Mächtigkeit bestimmen. Wurden während des Internationalen Polarjahres 1957/58 noch die meisten Eisdickenmessungen in der Antarktis auf Traversen mit seismischen Methoden bestimmt, so sind diese im Laufe der Zeit durch flugzeuggestützte EMR-Messungen zur Bestimmung der Eismächtigkeit abgelöst (siehe Datenbasis in Lythe et al., 2001) worden.

Im Rahmen der Vorerkundung einer Bohrlokation für das „European Project for Ice Coring in Antarctica“ (EPICA) wurden über mehrere Jahre hinweg zahlreiche Messflüge zur Kartierung der Eisdicken in dem bis dahin kaum untersuchten Dronning Maud Land (s.a. Abb.1) durchgeführt (Steinhage, 2001). Neben den flugzeuggestützten EMR wurden mittels bodengestützter EMR-Messungen laterale Variationen der Akkumulation zwischen flachen Eis- und Firnkernbohrungen kartiert (Rotschky et al. 2004). Reflexionen elektromagnetischer Wellen in Eis werden durch Leitfähigkeitskontraste und Variationen der Dielektrizitätszahl (= Dielektrizitätskonstante (DK)) verursacht. Da diese Parameter auch an Eis- und Firnkernen direkt gemessen werden können, ist es möglich, interne Reflexionen in EMR-Sektionen direkt mit den Kernen zu korrelieren und so die punktuell gewonnen Informationen, wie z.B. die Akkumulationsrate, mittels EMR-Kartierungen zu extrapolieren.

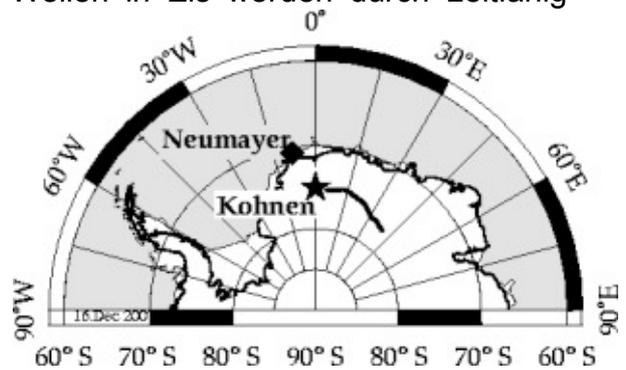


Abb. 1: Übersichtskarte des Messgebiets.

Im folgendem werden die mit Hilfe von Flugzeug-EMR-Messungen erfassten internen Strukturen sowie ihre Ursache an ausgewählten Beispielen vorgestellt und diskutiert.

2. Physikalische Grundlagen

Reflexionen von sich ausbreitenden elektromagnetischen Wellen treten bei Änderungen der DK, $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$, auf. Der Realteil ϵ' der komplexwertigen DK ist im Radiowellenbereich in Eis im wesentlichen frequenzunabhängig und wird hauptsächlich

von der Dichte bestimmt. Zudem weisen die hexagonalen Eiskristalle mit $\epsilon' = 3.1-3.2$ eine Anisotropie in ϵ' von ca. $\epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp} = 1\%$ ϵ' parallel (\parallel) und senkrecht (\perp) zur c-Achse auf. Der Imaginärteil der DK, $\epsilon'' = \sigma / (\epsilon_0 \cdot \omega)$, weist eine Frequenzabhängigkeit auf und wird durch die Leitfähigkeit σ bestimmt. Eine Besonderheit tritt im Zweiphasen-System Firn auf, der sich aus Luft und Eis zusammensetzt (Wilhelms, 2005): es kommt zu einer Mischung des Real- und Imaginärteils, wodurch der Imaginärteil auch durch Dichte bzw. der Realteil durch Leitfähigkeit beeinflusst werden kann.

Der operationelle Einsatz von EMR in der Antarktis ermöglicht schon länger eine vielversprechende Kartierung der internen Strukturen des Eises (Bogorodsky et al., 1985). Die Ursache der im MHz-Bereich beobachteten kontinuierlichen Reflektoren, sogenannte interne Schichten, wurde in den 70er Jahren kontrovers diskutiert, auch unter der Miteinbeziehung von Änderungen des Paläoklimas. In den oberen 100 m des Eises wurden Dichtefluktuationen für die Strukturen verantwortlich gemacht, während in den mittleren Bereichen erhöhte Leitfähigkeit aufgrund von vulkanischer Säure angeführt wurde. Diese Erklärungen wurden kürzlich anhand von Eiskern und EMR-Daten bestätigt (Hempel et al., 2000). Dies deutet an, dass die Mehrzahl der Reflektoren Isochronen sind, welche ihre Eigenschaften ursprünglich an der Oberfläche erhielten. Fujita et al. (1999) und darauf folgende Veröffentlichungen bekräftigten Annahmen, dass die anisotropen dielektrischen Eigenschaften sowie Doppelbrechung durch Unterschiede in der Kristallorientierung ebenfalls an der internen Schichtung beteiligt sind, insbesondere in Scherzonen der basalen Grenzschicht. Die Kristallorientierung wird dabei über die Verteilung (Textur) der c-Achsen beschrieben (COF: Crystal Orientation Fabric). In einer Reihe von Mehrfrequenz-EMR-Experimenten versuchten sie, interne Reflektoren nach ihrem Ursprung zu unterscheiden: einerseits Änderungen im Dichte- und COF-abhängigen Realteil der DK, andererseits Änderungen im leitfähigkeits- und frequenzabhängigen Imaginärteil. Die doppelbrechenden Eigenschaften führen jedoch zu unvorhersagbaren Fehlern in diesen Folgerungen, wenn nur Messungen in nur einer Polarisationsrichtung durchgeführt werden (Dowdeswell & Evans, 2004). Deswegen werden neuerdings Experimente häufiger mit mehreren Frequenzen in Kombination mit verschiedenen Polarisierungen in Intervallen entlang von Profilen durchgeführt, um die Ursache der beobachteten Radarreflexionen besser einzugrenzen (Fujita et al., 2006). Flugzeuggestützte Messungen bieten bis jetzt nur die Möglichkeit einer einzigen Polarisation. Durch Änderung der Flugrichtungen gelang es Matsuoka et al. (2004) trotzdem mehrere hundert Meter dicke, anisotrope Streuzonen nachzuweisen, anhand derer sie versuchten, Spannungszonen im Eis zu bestimmen.

Zur Verknüpfung der beobachteten internen Struktur aus EMR am Ort der EPICA-Eiskerntiefbohrung in Dronning Maud Land, Antarktis, wurde neben Flugprofilen ein etwas ungewöhnlicherer Weg für polarimetrische Messungen beschritten. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der internen Reflexionen im Eisschild von der Polarisationsrichtung wurde mit dem vom AWI betriebenen Messflugzeug *POLAR 2* (Dornier 228-101) ein Profil am Boden gemessen (Abb. 3). Zunächst wurde ein Kreis mit einem Durchmesser von ca. 100 m beschrieben, welcher anschließend in acht verschiedene Polarisationsrichtungen von geraden Profilen geschnitten wurde. Die Analyse der Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften von der Polarisation wird im späteren Teil dieses Artikels behandelt.

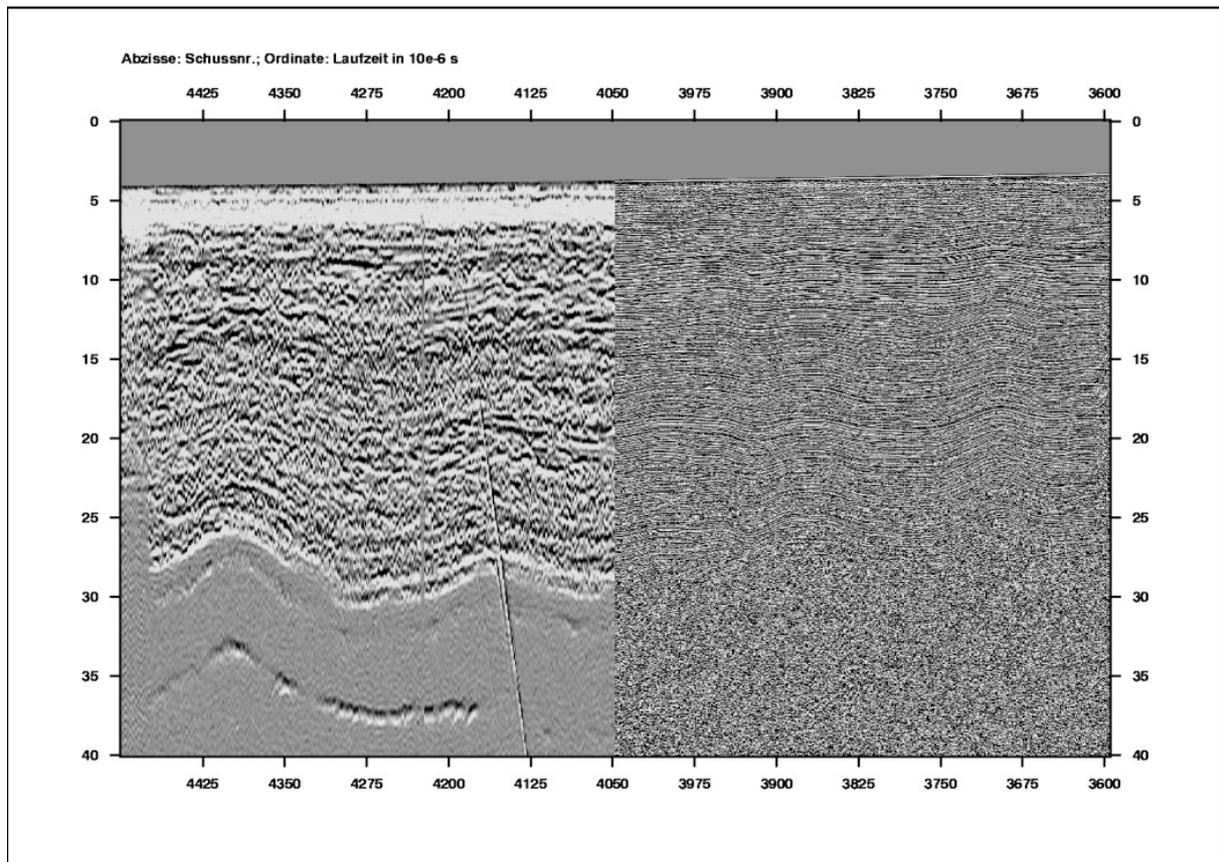


Abb. 2: Beispiel eines ca. 65 km langen Aero-EMR-Profil nahe der Kohnen-Station mit den beiden Pulslängen (600 ns Puls linke Seite, 60 ns Puls rechte Seite) der AWI EMR-Apparatur. Es sind noch Teile der von der bei Spur 4206 befindlichen Kohnen-Station verursachten Refraktionshyperbel zu erkennen.

3. EMR-Profile

Die EMR-Sektionen wurden mit der speziell für das AWI von der TU Hamburg-Harburg entwickelten Apparatur mit einer Datenrate von 20 Hz aufgezeichnet (Nixdorf et al., 1999). Dies entspricht bei einer typischen Messfluggeschwindigkeit von 240 km h^{-1} einem Schussabstand von 3,35 m. Eine Besonderheit der Apparatur ist es, zwischen zwei unterschiedlich langen Pulsen kontinuierlich hin- und herzuschalten und somit entlang eines Profils zwei Sektionen mit unterschiedlichen Charakteristika aufzuzeichnen. In Abb. 2 ist als Beispiel ein Ausschnitt der Profile 022150 und 023150 dargestellt. Der linke Abschnitt wurde mit dem längerem 600 ns Puls gemessen, der rechte mit dem kürzerem 60 ns Puls. Das größere Eindringvermögen des langen Pulses, bzw. die höhere vertikale Auflösung des kürzeren Pulses sind offensichtlich.

Die mit dem 60 ns Puls gemessenen hochaufgelösten Sektionen wurden zur Untersuchung der Stratigraphie im Umfeld der Kohnen-Station herangezogen. In Abb. 4 sind die Flächen von 7 Isochronen als 3D-Ansicht zusammen mit der Ober- und Unterseite des Eisschildes dargestellt. Um die abnehmenden Höhenvariation der Isochronen über dem Felsuntergrund hervorzuheben wurden alle Flächen mit Ausnahme des Untergrunds mit identischen Farbskalierung dargestellt. Die dargestellten Isochronen sind auf Variationen in der Leitfähigkeit des Eises zurückzuführen (Eisen et al., 2005).

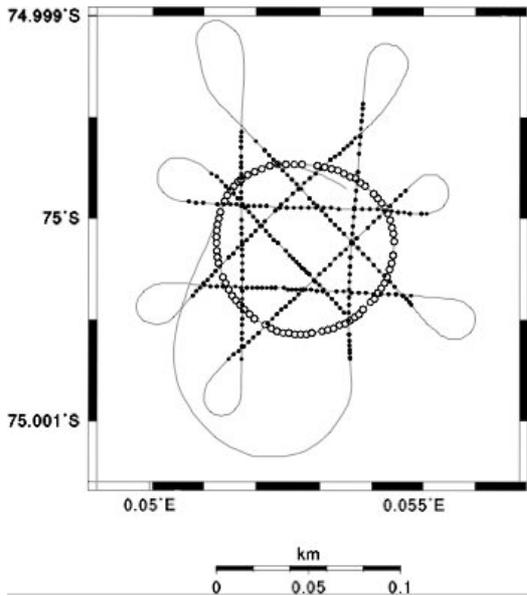


Abb. 3: Detailkarte des Bodenprofils 033042, aufgenommen mit dem Flugzeug am Boden (dünne Linie). Spuren des Kreissegments sind mit weißen Kreisen dargestellt, Spuren der linearen Segmente, die den Kreis schneiden, mit schwarzen Punkten.

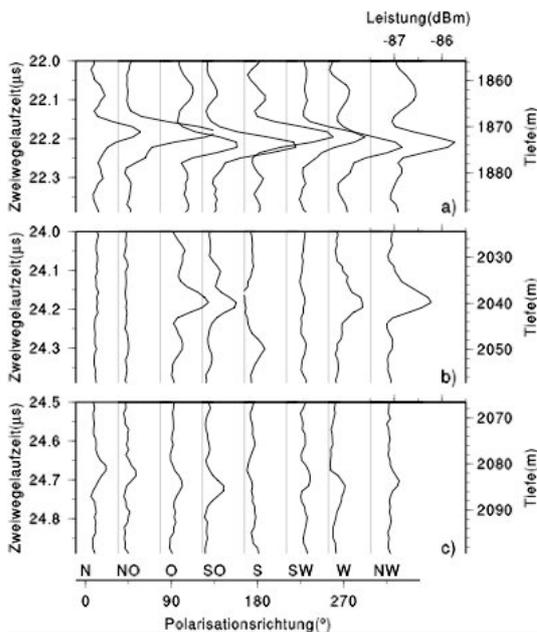


Abb. 5: Reflexionscharakteristika in Abhängigkeit der Polarisationssebene für drei Reflektoren und acht Richtungen. Reflexionen hervorgerufen durch Änderungen a), c) der Leitfähigkeit und b) der Kristalltextur. Jede Spur in a), b) und c) beruht auf der Stapelung von 70 Spuren entlang der acht linearen Segmente des Profils 033042 (Abb. 3). Die für die Polarisationsrichtung NW in a) angegebene Leistungsskala gilt für alle Spuren. Die vertikalen Basislinien entsprechen $-87,5$ dBm. Die Eisschneide verläuft in OSO-WNW Richtung

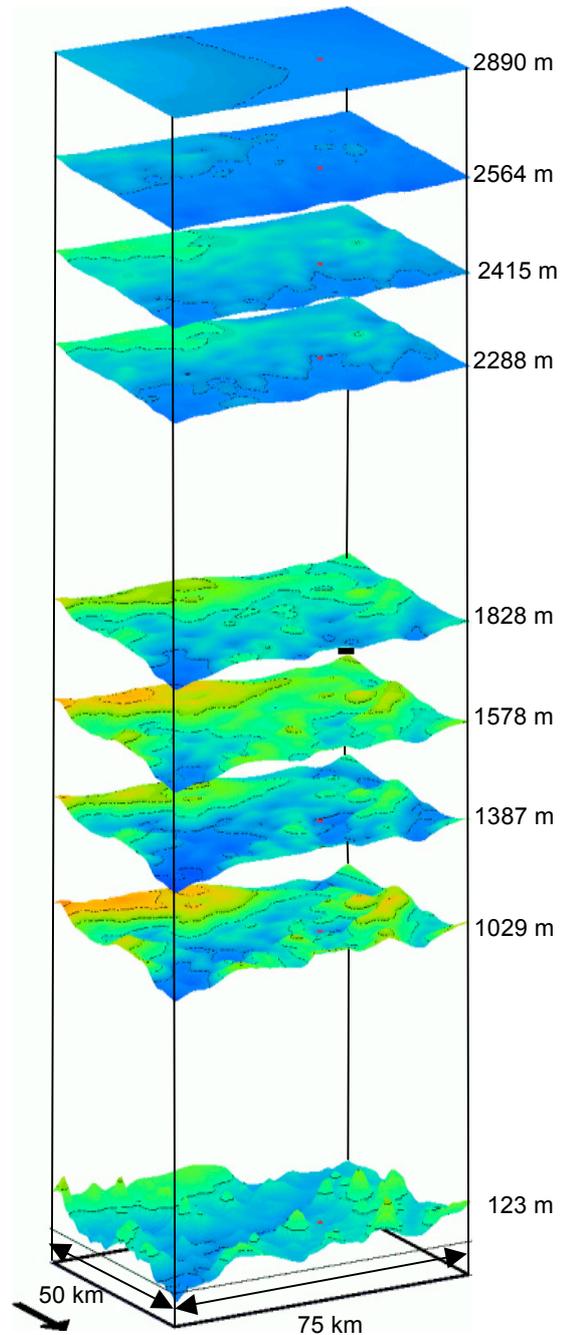


Abb. 4: 3D Ansicht mehrerer ausgewählter interner Horizonte sowie der subglazialen und Oberflächentopographie in der Umgebung der Kohnen-Station. Die Farbskalierung ist für alle Flächen – mit Ausnahme des Felsuntergrunds – identisch, wobei der Wert an der Kohnen-Station als Referenz herangezogen wurde (Tiefenwerte am rechten Rand). Das Isohypsenintervall beträgt 100m. Zur Darstellung des Felsuntergrunds wurde die Farbskalierung um den Faktor 3 gestreckt. Der rote Punkt auf den Flächen kennzeichnet die Position der Kohnen-Station (s.a. Abb1).

4 Analyse der polarimetrischen EMR-Messung

Zur Analyse der Ursache der Reflexionshorizonte wurde ein Profil mit dem Flugzeug am Boden rutschend kartiert. Das Profil 033042 wurde mit verschiedenen Kursen um einen Zentralpunkt und damit Polarisationsrichtungen des Flugzeugs nahe der Kohlen-Station aufgenommen (Abb. 3). Dadurch eröffnet sich in diesem Fall die Möglichkeit, den Ursprung der internen Schichten am EPICA-DML Bohrpunkt für drei ausgewählte Reflektoren zu bestimmen. Zudem können Mehrdeutigkeiten der Azimuth-Orientierung der in Eiskernen bestimmten Kristalltextur beseitigt werden.

Aus dem Eiskern ist bekannt, dass die Kristalltextur durch eine Gürtelverteilung im Tiefenbereich von 450-2025 m bestimmt wird. Unterhalb von 2025 m geht die Textur innerhalb von 20 m in eine stark vertikal konzentrierte Textur über. Die Variation der rückgestreuten Energie als Funktion der Polarisationsrichtung wird für drei kontinuierliche interne Reflektoren untersucht, die in Tiefen von 1870 m, 2040 m und 2085 m auftreten. Die Umrechnung der vom EMR-System erfassten Zweiwegelaufzeit in Tiefen erfolgte mittels der Korrelation von synthetischen EMR-Radargrammen mit gemessenen EMR-Radargrammen (Eisen et al., 2005). Die synthetischen Radargramme basieren auf der am EPICA-DML Eiskern mittels dielektrischer Abtastung (DEP) bestimmten DK, die anschließend für die Vorwärtsmodellierung mittels einer numerischen Implementierung der Maxwell-Gleichungen in einem parallelisierten finite-Differenzen-Modell verwendet werden (Eisen et al., 2003).

Der Reflektor, der am Bohrpunkt in einer Tiefe von 1865 m detektiert wird, zeigt keine wesentliche Änderung der reflektierten Leistung in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung (Abb. 5 a). Ebenso ist der Reflektor in einer Tiefe von 2085 m annähernd isotrop, wobei hier die Stärke der Rückstreuung deutlich geringer ausfällt als in 1870 m Tiefe (Abb. 5 c). Diese isotropen Muster werden in diesen Tiefen für Reflexionen erwartet, die entweder von Leitfähigkeitssignalen stammen, oder von isotropen Änderungen der Kristalltextur. Im Eiskern findet sich in den Tiefen von 1865 m und 2080 m jeweils ein starkes Leitfähigkeitssignal, welche auf Deposition vulkanischer Säuren zurückzuführen sind. Mittels der oben erwähnten Vorwärtsmodellierung konnte eine direkte Zuordnung der beiden beobachteten isotropen Reflexionen zu diesen Leitfähigkeitssignalen erreicht werden (Eisen et al., 2007).

In einer Tiefe von ca. 2040 m ist eine Reflexion nur für Polarisierungen in den Richtungen O, SO und in den entgegen gesetzten Richtungen W und NW sichtbar (Abb. 5 b). Diese Polarisationsrichtungen sind ungefähr parallel zur Eisscheide, die einige 100 m nördlich des Profils in Richtung OSO-WNW verläuft. In den anderen Polarisationsrichtungen ist keine Reflexion sichtbar. Wir interpretieren diese Beobachtung mit dem Übergang der Kristalltextur von einer in der horizontalen Ebene anisotropen Gürteltextur in eine vertikal stark konzentrierte und isotrope Verteilung, die in einer dem Reflexionsursprung vergleichbaren Tiefe von 2025-2045 m im Eiskern zu beobachten ist. Liegt die elektrische Polarisation in der Ebene, in welcher sich die Verteilung der c-Achsen ändert, also parallel zum Gürtel, so ändert sich ebenfalls die DK, und es tritt eine Reflexion auf. Ist hingegen die elektrische Polarisation senkrecht zu der vertikalen Ebene, die die Mehrzahl der c-Achsen enthält, so führt eine Änderung der Textur in diesem Fall nicht zu einer Änderung der DK in dieser Ebene, und eine Reflexion bleibt aus. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass die Abhängigkeit

der reflektierten Energie von der Polarisationsrichtung für den Reflektor in der Tiefe von 2040 m ein Beleg dafür ist, dass der Reflektor durch eine Änderung des Kristalltextur hervorgerufen wird. Zudem sind wir so in der Lage, den Azimut der Gürteltextur mittels unserer EMR-Daten in der horizontalen Ebene zu bestimmen: Der Gürtel liegt in der vertikalen Ebene parallel zur Eisscheide. Dies stimmt mit der Theorie des Fließregimes einer Eisscheide wie im vorliegenden Fall überein, welches in Fließrichtung Kompression und senkrecht dazu Dilatation ausweist.

5. Ausblick

Wir haben als Beispiele der Anwendung des EMR-Verfahrens hier die Kartierung isochroner Schichten und deren Ursprung im Eisschild vorgestellt. Weitere Anwendungen, die in den nächsten Jahren im Hinblick auf übergeordnete Fragestellungen von Bedeutung sein werden, sind die Kartierung der basalen Temperaturverteilung (angefroren, flüssig), die Kartierung der rezenten Akkumulation mittels hochfrequentem EMR, und die Verknüpfung der verschiedenen Eiskern-Tiefbohrungen zur unabhängigen Synchronisation der Eiskerne mittels geophysikalischer Methoden. Zu letzterem leistet der in der Antarktis-Saison 2007/8 stattfindende „Dome Connection“-Messflug im Rahmen des Internationalen Polarjahres einen entscheidenden Beitrag.

Literaturverzeichnis

- Dowdeswell, J.A. und S. Evans, S., 2004. Investigations of the form and flow of ice sheets and glaciers using radio-echo sounding. Reports on Progress in Physics 67, S. 1821-1841.
- Eisen, O., Hamann, I., Kipfstuhl, S., Steinhage, D. und F. Wilhelms, 2007. Direct evidence for continuous radar reflector originating from changes in crystal-orientation fabric. The Cryosphere, 1, S. 1-10.
- Eisen, O., Rack, W., Nixdorf, U. und F. Wilhelms, 2005. Characteristics of accumulation in the vicinity of the EPICA deep-drilling site in Dronning Maud Land, Antarctica. Annals of Glaciology 41, S. 41-46.
- Eisen, O., Wilhelms, F., Nixdorf, U. und H. Miller, 2003. Revealing the nature of reflections in ice: DEP-based FDTD forward modelling. Geophysical Research Letters 20, Nr. 5, S. 22-1 - 22-4.
- Evans, S., 1963. Radio techniques for the measurement of ice thickness. The Polar Record 11, Nr. 75, S. 406-411.
- Fujita, S., Maeno, H. und K. Matsuoka, 2006. Radio-wave depolarisation and scattering within ice sheets: a matrix based model to link radar and ice-core measurements and its application. Journal of Glaciology 52, Nr. 177, S. 407-424.
- Fujita, S., Maeno, H., Uratsuka, S., Furukawa, T., Mae, S., Fujii, Y. und O. Watanabe, 1999. Nature of radio echo layering in the Antarctic ice sheet detected by a two-frequency experiment. Journal of Geophysical Research, 104, Nr. B6, S. 13013-13024.
- Hempel, L., Thyssen, F., Gundestrup, N., Clausen, H.B. und H. Miller, 2000. A comparison of radio-echo sounding data and electrical conductivity of the GRIP ice core. Journal of Glaciology 46, Nr. 154, S. 369-374.
- Lythe, M.B., Vaughan, D.G. und BEDMAP Consortium, 2001. BEDMAP: a new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. Journal of Geophysical Research 106, Nr. B6, S. 11335-11351.
- Matsuoka, K., Saito, R. und Naruse, R., 2004. A novel backpackable ice-penetrating radar system. Journal of Glaciology 50, Nr.168, S. 147-150.

- Nixdorf, U., Steinhage, D., Meyer, U., Hempel, L., Jenett, M., Wachs, P. und Miller, 1990. The newly developed airborne RES-system of the AWI as a glaciological tool. *Annals of Glaciology* 29, S. 231-238.
- Rotschky, G., Eisen, O., Wilhelms, F., Nixdorf, U. und H. Oerter, 2004. Spatial distribution of surface mass balance derived from ice-penetrating radar studies. *Annals of Glaciology* 39, S. 265-270.
- Steinhage, D., 2001. Beiträge aus geophysikalischen Messungen in Dronning Maud Land, Antarktis, zur Auffindung eines optimalen Bohrpunktes für eine Eiskerntiefbohrung. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung* 384, 91 S.
- Waite, A.H. und S.J. Schmidt, 1961. Cross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *Institute of Radio Engineers International Convention Record* 5, S. 38-53.
- Wilhelms, F., 2005. Explaining the dielectric properties of firn as a density-and-conductivity mixed permittivity (DECOMP). *Geophysical Research Letters* 32, Nr. L16501, 4 S.

Anschrift der Autoren

- Dr. O. Eisen, Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven
- Dr. D. Steinhage, Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven