

Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität

Bachelorarbeit in Physik
eingereicht von

Jonas Ziegler

geboren in Heidelberg (Deutschland)

2014

Charakterisierung eines alpinen Eisbohrkerns des Colle Gnifetti anhand seiner Gleichstromleitfähigkeit

Diese Bachelorarbeit wurde von Jonas Ziegler am
Institut für Umweltphysik in Heidelberg
durchgeführt.

Gutachter:
Prof. Dr. Olaf Eisen
Prof. Dr. Kurt Roth

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, den im Jahr 2013 auf dem Colle Gnifetti (Schweizer Zentralalpen) gebohrten Eisbohrkern KCC auf seine Gleichstromleitfähigkeit mittels ECM (Electrical Conductivity Measurement) zu untersuchen. Im Vordergrund stand dabei die Datenaufnahme unter Berücksichtigung einer genauen Tiefenzuordnung, die Untersuchung und Charakterisierung des Signalverlaufs sowie der Vergleich mit älteren Bohrkernen des Colle Gnifetti (CC, KCH, KCS, KCI). Als Resultat liegt nun ein vollständiger ECM-Datensatz über die gesamte Länge des alpinen Eisbohrkerns KCC vor. Der Tritiumpeak, welcher aus oberirdischen Atombombentest hervorgeht und sein Maximum im Jahr 1963 aufweist, ist beim KCC einer Tiefe von (11.325 ± 0.075) m we zuzuordnen. Die Untersuchung der Daten zeigt einen Regimewechsel in der chemischen Zusammensetzung von sauer zu alkalisch, der durch Vergleich mit den älteren bereits datierten Kernen auf das Jahr $1954 \pm$ festgelegt werden konnte und im KCC einer Tiefe von (13.5 ± 0.2) m we entspricht. Alle Bohrkern des Colle Gnifetti weisen diesen Regimewechsel auf und zeigt im Signalverlauf allgemein viele Gemeinsamkeiten. Bedingt durch seine niedrige Akkumulationsrate nimmt der Signalverlauf des KCI eine Sonderstellung ein. Beim Vergleich der basalen Schichten der Kerne sind keine eindeutigen Gemeinsamkeiten zu erkennen. Mit dem DEP-Datensatz des KCC fallen jedoch sehr wohl Parallelen als auch Unterschiede zwischen der Permittivität und dem ECM-Signal auf.

Abstract

The present thesis aimed to analyse the ice core KCC, which was drilled in 2013 at the Colle Gnifetti (Swiss Central Alps), for its electrical direct current conductivity by ECM (Electrical Conductivity Measurement). Priority was given to recording the ECM-signal considering a precise assignment in depth, describing the signal curve and comparing the curve with older drilling cores from the Colle Gnifetti (CC, KCH, KCS, KCI). As a result a complete ECM dataset along the whole length of the Alpin ice core KCC exists. The tritium peak, which has its origin in surface nuclear tests and features its maximum in 1963, was found at the KCC at a depth of (11.325 ± 0.075) m we. The study of the data shows a change of regime of the chemical composition from acid to alkaline which can be assigned to the year $1954 \pm$ and a depth of (13.5 ± 0.2) m we at the KCC due to comparison with the older already dated cores. All drilling cores exhibit this change of regime and show in general many similarities. Due to the low accumulation rate the KCI takes an exceptional position. By comparing the basal layers no obvious similarities between the different cores were found. Instead, the permittivity from DEP (Dielectric Profiling) measurements shows both similarities and differences with the ECM signal.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Gebiet der Probennahme	3
3	Zielsetzung der Arbeit	6
4	Theoretischer Hintergrund	7
4.1	Kristallstruktur von Eis	7
4.2	Ionen- und Bjerrumdefekte	8
4.3	Leitung von Protonen im Eis	9
5	Messaufbau und Messprinzip der ECM	12
5.1	Abhängigkeiten des ECM-Signals	12
5.2	Ersatzschaltbild der ECM-Messung	14
5.3	Versuchsaufbau der Heidelberger ECM-Bank	14
6	Konventionelle Anwendung: Vulkanhorizonte	16
7	Datenaufnahme	17
8	Datenauswertung	19
8.1	Wegkalibrierung	19
8.2	Tiefenskalierung	19
8.3	Reproduzierbarkeit des ECM-Signals	20
8.4	Messergebnis der ECM-Messung am KCC	21
9	Auffälligkeiten im ECM-Signalverlauf des KCC	23
9.1	Skalierung der Tiefe in m we.	23
9.2	Charakterisierung des Signalverlaufs	25
10	ECM-Daten-Vergleich der CG-Kerne	26
10.1	Normierung der ECM-Signale	26
10.2	Beschreibung der normierten Signalverläufe	29
10.3	Datierungshorizonte am KCC	29
10.3.1	Tritiumpeak 1963	29
10.3.2	Regimewechsel sauer-alkalisch in den 1950er Jahren	30
10.3.3	Vulkaneruption des Tambora 1815, Indonesien	30
10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	31
10.5	Robuste Filterung der ECM-Datensätze	34
10.6	Signalverlauf der basalen Schichten	36

11 Vergleich von ECM- mit DEP-Signal des KCC	38
11.1 Dielectric Profiling (DEP)	38
11.2 Vergleich der Datensätze	38
12 Diskussion der Ergebnisse	42
13 Ausblick	44
14 Anhang A.1	52
15 Anhang A.2	53
16 Anhang A.3	56
17 Anhang A.4	58

1 Einleitung

Gezielte Aufnahmen von Klimadaten der Neuzeit durch uns Menschen liefern Informationen über die Sonnenaktivität, Niederschlag, Temperatur und Zusammensetzung der Atmosphäre. Um weiter in die Vergangenheit schauen zu können werden Untersuchungen an Baumringen, Torflagern, See- und Meeressedimenten vorgenommen. Seit einigen Jahrzehnten dienen auch Bohrungen an polaren Gletschern als Informationsquelle über das Klima lang vergangener Zeiten [1]. Über die Wasserisotope $\delta^{18}O$ und δD in Gletschereis lassen sich indirekte Aussagen über die Temperaturen machen und über gelöste Aerosolkonzentrationen in Schneekristallen und eingeschlossene Luftbläschen in Eis lassen sich Informationen über die Komponenten der Atmosphäre gewinnen [2]. Seit rund 60 Jahren untersuchen Wissenschaftler Eiskernbohrungen aus den polaren Regionen unserer Erde. Chemische und physikalische Eigenschaften von diesen Eisproben werden durch eine Vielzahl und über die Jahre hochentwickelte Methoden untersucht, wie beispielsweise mittels CFA (Continuous Flow Analysing) und DEP (Dielectric Profiling). Die elektrischen Eigenschaften von Eis, vor allem die Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit, hat einen hohen Stellenwert in der Glaziologie. Oft bildet es sogar die Basis für stratigrafische Messtechniken, welche an Eiskernen vorgenommen werden, und für das Verständnis von Radarmessungen an Eisschilden [3]. Die ECM-Methode (electrical conductivity measurement) nach Hammer [4] liefert ein Messverfahren, mit der die elektrische Leitfähigkeit von Eisbohrkernen gemessen werden kann. Schon Ende der Siebziger Jahre konnte Hammer experimentell nachweisen, dass es in grönländischen Eisbohrkernen erhöhte Konzentrationswerten von wasserlöslichen Säuren in bestimmten Lagen im Kern gab [5, 6]. Diese säurehaltigen Lagen ergaben sich aus den starken Vulkanausbrüchen in den Jahren 1770-1972 in der nördlichen Hemisphäre. Bei Vulkanausbrüchen gelangen die magmatischen Gase über atmosphärische Transportprozesse nach Grönland. Dort setzten sich die vulkanogenen Ioneneinträge wie SO_4^{2-} und Cl^- per Niederschlag und Deposition auf den Oberflächenschnee des grönländischen Eisschilds ab, wobei SO_4^{2-} den Hauptteil darstellt. Aus einem aufgenommen ECM-Signal eines polaren Eisbohrkernes können genau diese säurehaltigen Schichten identifiziert und bestenfalls einzelnen Vulkanausbrüchen zugeordnet werden. Dem entgegengesetzt sind Stäube, wie beispielsweise Saharastäube, sehr alkalisch und sorgen für ein Unterdrücken des Signals: Die mineralienhaltigen Stäube neutralisieren die Säureeinträge. Dennoch bietet ECM für polare Eiskerne eine schnelle Datierung des Kerns, welche unabdingbar ist für weiter zeitliche Zuordnungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften.

Eine für uns heute zunehmend interessante Fragestellung ist, ob und in welcher Intensität die Veränderung unseres Klimas anthropogen bedingt ist. Aus dieser Motivation

heraus werden Bohrungen an alpinen Gletschern vorgenommen. Diese erlauben uns einen Überblick über das regionale Klima und Klimawandel. Zudem kann der Effekt von Tourismus und der direkte Einfluss des Menschen auf seine unmittelbare Umgebung untersucht werden [7]. Bei alpinen Gletschern wird das Eis direkt oberhalb des Felsbettes auf mehrere 1000 Jahre alt geschätzt, hingegen liefern Bohrungen in den Polarregionen bis zu mehreren 100.000 Jahre altes Eis [8]. Der Blick in die Vergangenheit ist somit nicht so weit wie bei polaren Bohrungen, jedoch informativer in Hinsicht auf den Einfluss des Menschen auf unser Klima.

Nicht jeder Gletscher außerhalb der Polarregionen eignet sich aber als Probennahmegebiet. Für alpine Gletscher sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. Die Stratigraphie alpiner Gletscher darf nicht von Schmelzwasserflüssen durchzogen sein
2. Schmelzvorgänge finden selten und wenn dann nur auf der Oberfläche statt, so dass es zu keinen Vermischungen des stratigrafischen Signals kommt
3. Der Kern ist bis zum Felsbett durch gefroren
4. Der Gletscher unterliegt keinem „Basal Sliding“

Gletscher, die die oben aufgeführte Merkmal vorweisen, werden als „Kalte Gletscher“ bezeichnet. In den Alpen trifft dieses Muster auf zwei Gebiete zu, dem Mont Blanc Gebiet in Frankreich mit dem Hängegletscher Col du Dôme (4250m ü NN) und dem Monte Rosa Gebiet in den Schweizer Zentralalpen mit dem Colle Gnifetti (4450m ü NN). Der größte Unterschied beider Gletscher liegt in der Akkumulationsrate.

In dieser Arbeit soll ein alpiner Eisbohrkern auf seine Gleichstromleitfähigkeit mittels ECM untersucht werden. Hierbei stellt sich vor allem die Frage, welche Informationen man aus ECM an alpinen Bohrkernen erhalten kann und wovon die erfolgreiche Interpretation des Signals abhängt. Durch den Vergleich mit weiteren Bohrkernen vom Colle Gnifetti sollen erste vorläufige Datierungspunkte bestimmt werden, die als Anhaltspunkte für weitere Datierungsmethoden dienen können. Abschließend soll ein Vergleich der zwei Methoden ECM und DEP vorgenommen werden, welche beide die Leitfähigkeit des Eises messen.

2 Gebiet der Probennahme

Der Colle Gnifetti (CG) liegt inmitten der Schweizer Zentralalpen im Monte Rosa Gebiet und mit einer Höhe von 4450 m ü. NN [9] in der freien kontinentalen Troposphäre. Umgeben wird er von den Gipfeln der Zumsteinspitze im Nordwesten und der Signalkuppe im Südosten. Auf seiner Nordostflanke ist er begrenzt von einer 100 m tiefen Eisklippe und auf der westlichen Seite, hinter der Signalkuppe, befindet sich ein Bergschrund. Der CG hat eine Gletscherdicke von 60 – 120 m und in einer Tiefe von 20 m eine Firntemperatur von -14 °C [10]. Zudem wird ein Niederschlag von $1.4\text{ m}\frac{\text{we}}{\text{a}}$ angenommen [9]. Der Hang des CG liegt in Windrichtung, so dass vor allem im Winter Neuschnee vom CG durch starke Winde abtransportiert und somit dem Archiv entnommen wird. Im Sommer ist die Konsistenz des Schnees „nasser“, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Deposition auf dem CG und der Bildung einer neuen Schnee- und späteren Eisschicht höher ist [11]. Leider kann es aber vorkommen, dass ganze Jahresschichten vom Wind abgetragen werden. Die Schneeakkumulation ist am CG somit sehr unregelmäßig [12] und die Jahresschichten sind im Vergleich zur gesamten Gletschertiefe sehr dünn [13]. Die Netto Oberflächen-Akkumulationsrate des CG wird mit $0.1 - 1\text{ m}\frac{\text{we}}{\text{a}}$ auf eine sehr geringe Rate berechnet [13].

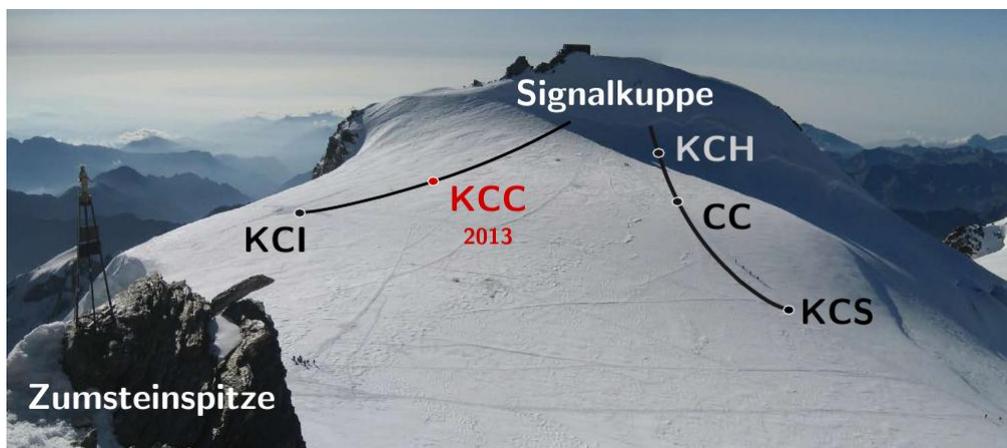


Abbildung 2.1: Lage des Colle Gnifetti im Monte Rosa Massiv in den Schweizer Zentralalpen zwischen der Signalkuppe und der Zumsteinspitze, entnommen aus [14]

Am Colle Gnifetti wurden bisher 5 Bohrungen vorgenommen. Der CC wurde 1982, der KCS und KCH 1995 und der KCI 2005 gebohrt. Im Sommer 2013 kam mit dem KCC ein fünfter Eisbohrkern hinzu. Die drei Kerne CC, KCS und KCH befinden sich auf einer Flusslinie, ebenso der KCI und der KCC.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Bohrkern KCC. Er wurde sehr wahrscheinlich bis zum Felsbett gebohrt. Wie für alle Eisbohrkerne des CG, wird auch die Akkumulati-

onsrate des KCC als sehr gering geschätzt. Durch eine Messung des radioaktiven Zerfalls am Tritiumpeak wird die Akkumulationsrate auf $0.25 \text{ m } \frac{\text{we}}{\text{a}}$ geschätzt [persönliche Mitteilung von Helene Hoffmann]. Die Besonderheit einer Nicht-Linearität der Alters-Tiefe-Beziehung schon in einer geringen Tiefe, welche alle Bohrungen im Monte Rosa Gebiet aufweisen, trifft auch auf den KCC zu [15].

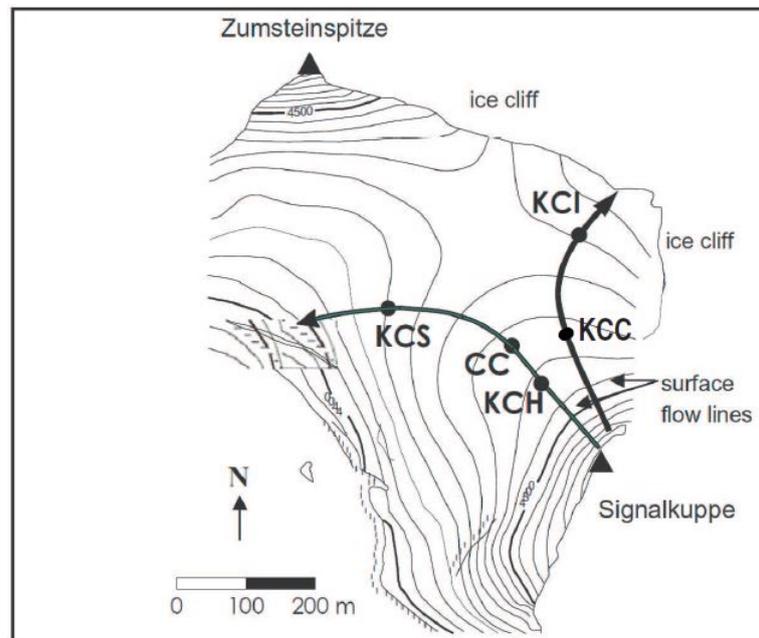


Abbildung 2.2: Topografie vom CG mit Höhenlinien im 10m-Schritten. Die Bohrungen sind als schwarze Punkte dargestellt. Die Pfeile stellen die oberflächlichen Fließlinien dar, entnommen aus [9]

Für eine Datierung der Kerne am CG wird eine Kombination von Messmethoden verwendet. Folgende Datierungsmethoden finden in der Praxis ihre Anwendung:

- Abzählen von Jahresschichten mittels saisonalen Parametern ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte oder die Variabilität des Staubeintrages) [16]
- Datierung mit Hilfe von radioaktiven Isotopen im Eis wie z.B. ^{14}C
- Detektion von Referenzhorizonten wie Vulkanausbrüchen (Katmai 1912), Saharastäuben (1977, 1947, 1901), dem Tritiumpeak von 1963 aus Atombombentests, Eislagen usw.
- Datierung mit Hilfe theoretischer glaziologischer Modelle (wie bsp. das Modell nach Nye)

Eine Datierung durch Abzählen der einzelnen Jahresschichten mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten erweist sich als schwierig, da starke Winde zum Abtransport des Neuschnees sorgen.

Warme Sommer, wie in den Jahren 1947-1950, verursachen eine Anhäufung von Schmelzlagen. Für den KCI waren diese Lagen in einer absoluten Tiefe von 16 – 18 m zu finden. In Linescan-Aufnahmen sind die Schmelzlagen gut zu erkennen [15].

Glaziologische Modelle wie das Nye-Modell sind an Eisbohrkernen des CG kaum anwendbar, da das Modell eine konstante Akkumulationsrate voraussetzt.

Bei der Untersuchung des KCC auf seine dielektrischen Eigenschaften [17] fällt auf, dass es einen Regimewechsel in der Eischeemie in den 1950er Jahren gibt. Es erfolgt ein Übergang von der Zeit vor den 1950er Jahren in eine Zeit danach vom Alkalischen ins Saure. An dieser Stelle befindet sich ebenso der Firn-Eis-Übergang, wobei erst ab einer Dichte von $830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ von Eis gesprochen wird. Auch dies kann als Datierungsansatz herangezogen werden.

Eine Besonderheit beim KCC ist, dass er tiefer gebohrt wurde als durch Radarmessungen prognostiziert. Laut diesen sollte der Kern die 70 m-Marke nicht überschreiten, gebohrt wurden jedoch 71.9 m. Möglicherweise könnte man auf eine Kuhle im Felsbett gestoßen sein mit sogenanntem Toteis. Solches Toteis ist vom Rest des Gletschers isoliert und bewegt sich infolgedessen nicht mit dem Gletscher mit. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die Färbung der letzten Meter nicht „Fanta-gelb“ [15] wie beim KCI, sondern nur leicht gelblich ist.

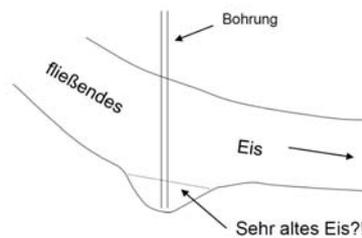


Abbildung 2.3: Skizzenhafte Veranschaulichung einer möglichen Konstellation der Bohrung des KCC

3 Zielsetzung der Arbeit

Aus den Grundlagen und Erkenntnissen der ersten zwei Kapitel werden für die vorliegende Arbeit folgende Ziele definiert:

- Aufnahme der elektrischen Leitfähigkeit mittels ECM des alpinen Eisbohrkerns KCC vom Colle Gnifetti (Hängegletscher in den Schweizer Zentralalpen) mit besonderem Fokus auf die sorgfältige Zuordnung der Messergebnisse zur allgemein verwendeten Tiefenskala, um den genauen Vergleich mit anderen Datensätzen des KCC zu gewährleisten
- Qualitative Beschreibung der erfassten Daten und Auffälligkeiten im ECM-Signal
- Vergleich der ECM-Messungen vom KCC mit anderen Eisbohrkernen des Colle Gnifetti (CC, KCH, KCS, KCI)
- Zuordnung einiger Auffälligkeiten im ECM-Signal zu entsprechenden Umwelt-ereignissen (Tritiumpeak, Regimewechsel in der chemischen Zusammensetzung, Vulkanausbruch)
- Genaue Betrachtung der letzten Meter der Bohrung auf Besonderheiten
- Vergleich der ECM-Messung vom KCC mit der DEP-Messung vom KCC (untersucht von Martin Hackel [17])

4 Theoretischer Hintergrund

Schon seit Jahrzehnten wird Eis auf seine elektrischen Eigenschaften hin untersucht und wurde anfangs oft fehlinterpretiert [18]. Erst Jaccard's Theorie [19–21] und die Erläuterungen von Petrenko [22] schafften ein gutes Verständnis darüber, wie das Eis zu seiner elektrischen Leitfähigkeit kommt.

4.1 Kristallstruktur von Eis

Wenn wir uns die Kristallstruktur von Eis genauer anschauen so gibt viele Unterschiede. Heute sind bereits 16 kristalline Formen von Eis bekannt. Abbildung 4.1 zeigt das Phasendiagramm von Eis in Abhängigkeit der Temperatur und des vorherrschenden Druckes. Dieser hydrostatische Druck wird nahe dem Felsbett eines ca. 3500 m dicken Eisschildes auf 0.0343 GPa geschätzt [23]. Betrachten wir diesen Bereich in unserer Abbildung und nehmen wir eine Temperatur von über 100 K an, so befinden wir uns im Eis I_h . Das Eisschild des in dieser Arbeit betrachteten Gletschers (Colle Gnifetti) ist mit einer maximalen Gletscherdicke von 120 m weit unterhalb dieser Annahme für den hydrostatischen Druck, so dass wir hier von I_h -Eis ausgehen können.

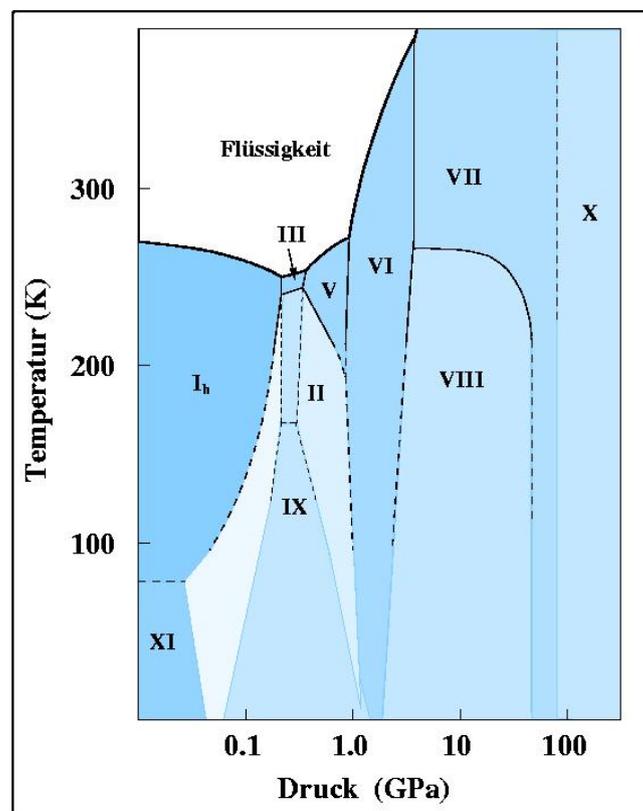


Abbildung 4.1: Phasendiagramm der festen Zustandsformen von Wasser, entnommen aus [24]

Die Kristallstruktur in Eis ist abhängig von der Ladungsverteilung und der geometrischen Ausrichtung der Moleküle. Beim Wassermolekül nehmen die beiden H-Atome einen Winkel zueinander von $104,45^\circ$ ein. Die beiden Elektronenpaare und die zwei H-Atome bilden dann zusammen mit dem O-Atom einen Tetraeder. Gefriert nun Wasser zu Eis, so werden die Wassermoleküle räumlich fixiert und bilden die maximale Anzahl an Wasserstoffbrücken aus. Dabei kann sich eine hexagonale oder eine kubische Kristallstruktur bilden [25]. Durch Röntgenstrukturanalyse konnte festgestellt werden, dass sich bei I_h Eis die O-Atome in hexagonalen Ring-Systemen anordnen [23].

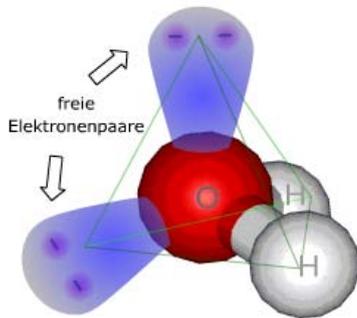


Abbildung 4.2: Molekularorbital von Wassermolekülen, entnommen aus [26]

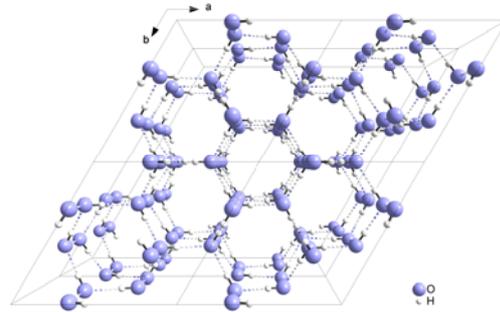


Abbildung 4.3: Hexagonale Kristallstruktur von I_h , entnommen aus [27]

Für den Aufbau von Eis haben Bernal und Fowler [28] folgende Eisregeln aufgestellt:

1. Jedem Sauerstoffatom sind zwei Protonen zugeordnet
2. Jeder Wasserstoffbrückenbindung ist ein Proton zugeordnet

Nach diesen Regeln befindet sich das Proton nicht im Zentrum einer Verbindungsachse, sondern es ist näher an dem O-Atom, welchem es fest zugeordnet ist [23]. Quantenmechanisch betrachtet, ist es für das Proton möglich, zwischen den beiden räumlichen Zuordnungen der benachbarten Sauerstoffatome zu tunneln, da die Potentialbarriere sehr klein ist [22]. In defektfreiem Eis darf dieser Effekt aufgrund der Eisregeln aber nicht für ein einzelnes Proton stattfinden. In der Realität sind solche Defekte aber meistens der Standard, die auftreten können durch spontane paarweise Bildung eines Defektpaares oder durch Fremdstoffe im Eis. In der Theorie von Jaccard [19–21] werden vier Defekte beschrieben, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

4.2 Ionen- und Bjerrumdefekte

Ionendefekte kommen sowohl im flüssigen als auch im festen Aggregatzustand von Wasser vor. Dabei handelt es sich um Vorkommnisse von H_3O^+ - und OH^- -Ionen im Kristallgitter. Die Bewegung eines Defekts geschieht über die Übertragung eines Protons von einem O-Atom zum nächsten.

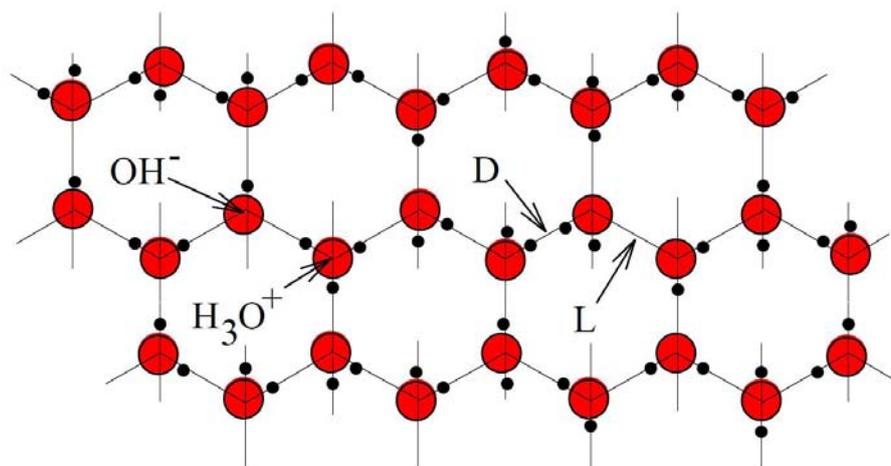


Abbildung 4.4: Defekte in der hexagonalen Kristallstruktur von Eis, entnommen aus [23]

Bjerrumdefekte kommen nur im Eiskristall vor und man unterscheidet sie nach L- und D-Defekt. Von einem L-Defekt spricht man dann, wenn eine Wasserstoffbindung ohne Proton vorliegt. Bjerrum [29] nannte sie L-Defekte, da dass "L" für "leer" stehen soll. Beim D-Defekt tritt genau der entgegengesetzte Fall auf. Hier ist eine Verbindung mit zwei Protonen gewissermaßen überbesetzt. Das "D" steht somit für "doppelt".

4.3 Leitung von Protonen im Eis

Die Leitung im Eis entspricht der Wanderung der Protonen entlang der Wasserstoffbindungen. Der Übergang des Protons von einem Kristallpunkt zum nächsten erfordert dabei eine gewisse Aktivierungsenergie. In defektem Eis sorgt das Anlegen eines externen elektrischen Feldes für diese Energie und somit dafür, dass sich die Defekte in Bewegung versetzen. Jedoch bringt eine solche Bewegung eines Protons von Kristallpunkt zu Kristallpunkt eine Umorientierung der Wassermoleküle mit sich, so dass kein weiterer Defekt derselben Sorte exakt den gleichen Weg in der gleichen Richtung durchlaufen kann.

Für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Eises benötigt es einer theoretischen Betrachtung, welche bei Petrenko [22] nachgelesen werden kann. Dabei führt Petrenko für die vier Defekte einen Vierervektor ein und integriert die bereits vollführten

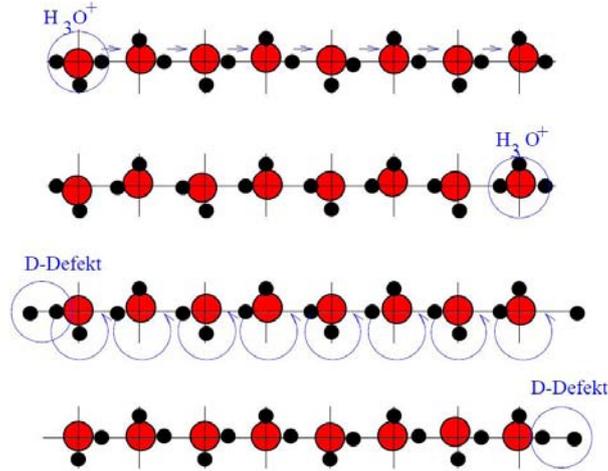


Abbildung 4.5: Leitung von Protonen im Eiskristall durch Defekte, entnommen aus [23]

Wanderungen in verschiedene Richtungen auf. Der resultierende Stromfluss entspricht dem durch das extern angelegte elektrische Feld auftretenden Stromfluss addiert mit den Defektflüssen. Petrenko gelang bei seiner theoretischen Herleitung auf eine Formel für die komplexe Leitfähigkeit $\tilde{\sigma}(\omega)$:

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \sigma_S + \frac{i\omega\tau_D(\sigma_\infty - \sigma_S)}{1 + i\omega\tau_D} \quad (1)$$

σ_S stellt die Leitfähigkeit bei niederen Frequenzen bzw. Gleichstrom dar, ω entspricht der Frequenz und τ_D ist die Relaxationszeit, welche die charakteristische Abklingzeit der Stromdichte von hohen Frequenzen zum Gleichstrom angibt. σ_∞ ist die Leitfähigkeit bei hoher Frequenz:

$$\sigma_\infty = \sum_{i=1}^4 \sigma_i \quad (2)$$

wobei die einzelnen σ_i für die jeweilige Leitfähigkeit der Defekte steht. Diese wiederum hängen ab von der effektiven Ladung e_i , der Häufigkeit im Vorkommen n_i und der Beweglichkeit μ_i . Die Formel für σ_i lautet

$$\sigma_i = |e_i|n_i\mu_i \quad (3)$$

Für den Realteil der Leitfähigkeit ergibt sich somit:

$$\sigma(\omega) = \sigma_S + \frac{(\omega\tau_D)^2(\sigma_\infty - \sigma_S)}{1 + (\omega\tau_D)^2} \quad (4)$$

Desweiteren gilt

$$\frac{e^2}{\sigma_S^2} = \frac{e_1^2}{\sigma_1 + \sigma_2} + \frac{e_3^2}{\sigma_3 + \sigma_4} \quad (5)$$

mit $e = e_1 + e_3 = e_2 + e_4$ als eine Elementarladung. Dieser Zusammenhang lässt sich einfach erläutern: H_3O^+ und OH^- sowie L- und D-Defekt entstehen und zerschlagen sich immer paarweise, so dass

$$e_1 = -e_2 \text{ und } e_3 = -e_4 \quad (6)$$

offensichtlich ist. Setzen wir in einem Gedankenexperiment ein Proton in eine beliebige Stelle des Kristallgitters von Eis, so entstehen gleichzeitig zwei Defekte: ein H_3O^+ -Ion und ein D-Defekt. Die Summe dieser beiden Defektladungen muss nun der Ladung eines Protons e gleich sein

$$e_1 + e_3 = e \quad (7)$$

Um jetzt eine Aussage über die Verteilung der Elementarladung auf die beiden Defektladungen zu machen, betrachten wir die beiden Umstände

- (I) den Bruchteil der zwischenmolekularen Distanz, welches das Proton im Falle eines Ionen- und Bjerrumdefektes wandert
- (II) die Verlagerung der Elektronendichte, wenn es zur Protonenwanderung entlang der Wasserstoffkette kommt

Scheiner und Nagle [30] fanden in ihrer theoretischen Analyse dieses Problems heraus, dass gilt:

$$e_3 = (0.36 \pm 0.03) e \quad (8)$$

Die elektrische Leitfähigkeit von Eis schwankt aber stark in Bezug auf deren Spurenstoffe im Eis. Spurenstoffe, welche die Leitfähigkeit des Eises erhöhen sind HCl , HF , NaCl , KF , NH_4F ; jene, die die Leitfähigkeit vermindern NH_4OH , NH_4Cl , NH_5CO_3 , NaHCO_3 [22]. Dabei ist zu beachten, dass an Korngrenzen ebenfalls Spurenstoffe auftreten können. Dort geht man von einem dünnen Flüssigkeitsfilm aus, in dem sich Ionen bewegen können. Die Verbindung von Leitfähigkeit und Ionengehalt in einem Flüssigkeitsfilm bedarf aber keiner weiteren Motivation, da die elektrolytische Leitung sehr gut verstanden ist.

Abschließend ist anzumerken, dass die Volumenleitfähigkeit beim Eis die Oberflächenleitfähigkeit dominiert [31].

5 Messaufbau und Messprinzip der ECM

Die ECM (Electrical Conductivity Measurement) ist eine zerstörungsfreie Messmethode, mit der die elektrische Leitfähigkeit von Eisbohrkernen gemessen werden kann. Das ECM-Signal ist stark von der Konzentration der H^+ -Ionen im Eis abhängig. Laut Hammer [4] korreliert das ECM-Signal mit der H^+ -Konzentration zu mehr als 99 %.

Beim Messvorgang fahren zwei Elektroden mit konstanter Geschwindigkeit von 10 – 20 $\frac{cm}{s}$ parallel zur Kernachse über das Eis. Zuvor wird der oberste Zentimeter mit einem Mikrotom parallel zum Schnitt des Eisstückes abgenommen. Dies schafft eine glatte Oberfläche für die Elektroden und repräsentiert in chemischer Hinsicht besser das Innere des Eiskörpers. Die beste Auflösung gewinnt man, wenn die Elektroden zeitgleich den Kontakt über dieselbe Eisschicht des Eiskerns herstellen.

Zwischen den beiden Elektroden liegt eine Hochspannung an. Beim Fahren über das Eis entsteht somit ein Stromfluss durch das Eis, welcher gemessen wird [4]. Eine entsprechende Spannung wird dann über einen Analog-Digital-Wandler als digitales Signal über ein USB-Kabel an einen Rechner gesendet, wo es live dargestellt und gespeichert wird. Zusätzlich wird der Weg mit aufgenommen, um später eine Tiefenskala konstruieren zu können.

5.1 Abhängigkeiten des ECM-Signals

Bei der Untersuchung des ECM-Signals zeigen sich immer wieder Abhängigkeiten verschiedener Parameter. Für die Messung sollten somit folgende Gegebenheiten erfüllt sein:

1. *Die Cut-off Tiefe* sollte nach Möglichkeit mindestens einen Zentimeter betragen, um repräsentatives Eis annehmen zu können.
2. *Die minimale Dicke* der Eisstücke sollte 4 cm messen. Dadurch ist sichergestellt, dass man dasselbe Stück Eis nochmals messen kann. Zudem verändert ein Messvorgang die elektrischen Eigenschaften des Eises bis in eine Tiefe von 1 – 2 mm, bedingt durch die Defektwanderung (siehe Kapitel 4.3). Vermutet wird, dass als zusätzlicher Effekt die übertragene elektrische Leistung IR^2 in Form von Wärme dafür verantwortlich ist [32].
3. *Die Hochspannung* zwischen den beiden Elektroden muss innerhalb eines gewissen Spannungsintervalls liegen. Als untere Grenze ist dabei eine Spannung von 200 V gesetzt [33]. Unterhalb dieser Spannung ist der Unterschied zwischen Signal und Rauschen zu gering um ein Signal als solches erkennen zu können. Übersteigt die Spannung 3000 V, so wird die Messung des Stromes zwischen

den beiden Elektroden abhängig von der Geschwindigkeit und Feldemissionen können auftreten [4]. Diese komplizieren die Aufstellung einer genauen Beziehung zwischen gemessenem Strom und dem Säuregehalt im Eis.

Die Änderung im Signal durch eine Änderung der Hochspannung hat einen nicht-linearen Zusammenhang, jedoch gilt, umso höher die Spannung zwischen den Elektroden, umso stärker das ECM-Signal. Als mögliche Erklärung gilt hier das Aufheizen an den Elektroden [33].

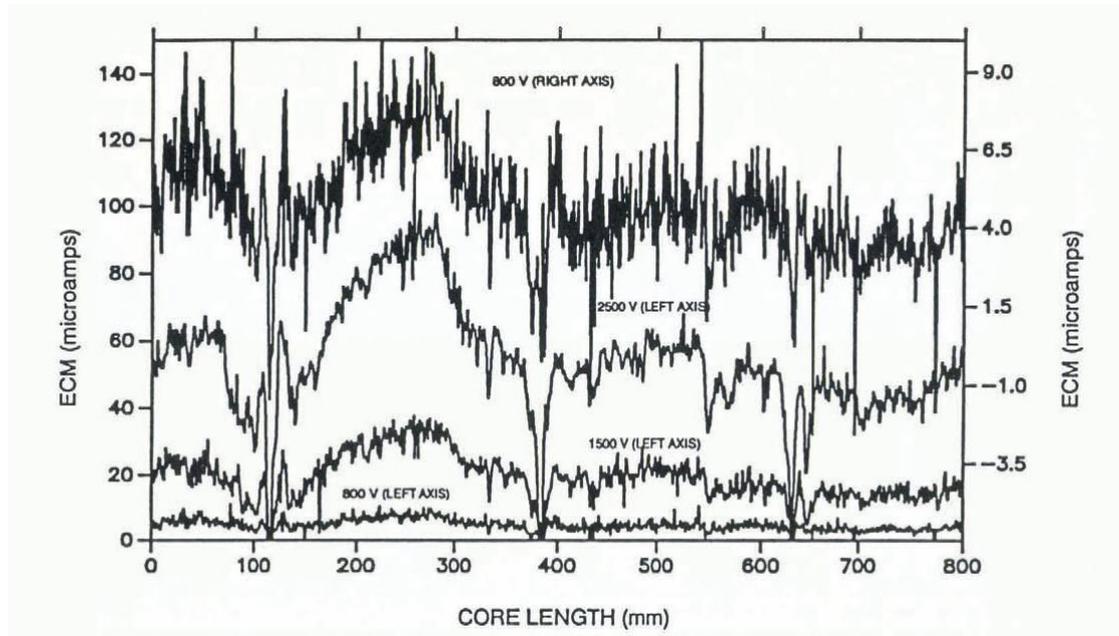


Abbildung 5.1: Nicht-lineare Abhängigkeit des ECM-Signals von der angelegten Hochspannung zwischen den beiden Elektroden. Zu betrachten sind die 3 unteren Verläufe für die „linke Achse“, entnommen aus [33]

4. Der Einfluss des Elektrodenmaterials wurde von Petrenko [34] hin untersucht und kann dort nachgelesen werden.
5. Die Temperatur des Eises ruft in einer Temperaturvariation von -22°C zu -7°C eine Variation des Signals von 50 bis 100 % hervor.
6. Die Reproduzierbarkeit der ECM-Messung ist nur bedingt erfüllbar. Wird nach der ersten Messung die oberste Schicht des Eises abmikrotomiert, so ist das Signal reproduzierbar. Werden hintereinander mehrere Messungen am selben Stück Eis wiederholt, so kommt es zu einer Veränderung des ECM-Signals. Mit jedem weiteren Messlauf nimmt der Wert der Amplitude ab.

5.2 Ersatzschaltbild der ECM-Messung

Die Messung an Eisbohrkernen lässt sich anhand eines Ersatzschaltbildes vereinfacht darstellen. Das Prinzip der Signalerfassung ist somit leicht zu verstehen.

Eine Gleichspannung U_0 wird an ein Stück eines Eisbohrkerns angelegt. Diese Hochspannung liefern die beiden Elektroden. Wird ein Widerstand R in Reihe hinter das Eis geschaltet, kann der Verlauf der Stromstärke I beobachtet werden. Direkt beim Einschalten der Gleichspannung U_0 zum Zeitpunkt $t = t_0$ steigt der Stromfluss auf einen maximalen Wert I_{max} . Innerhalb einer Zeitperiode von τ verharrt die Stromstärke auf diesem Maximum. τ liegt dabei im Bereich von 0.1 bis 0.5 Sekunden, je nach Beschaffenheit des Eises [4]. Anschließend fällt das Signal exponentiell ab und nähert sich einem minimalen Wert I_{min} an [4].

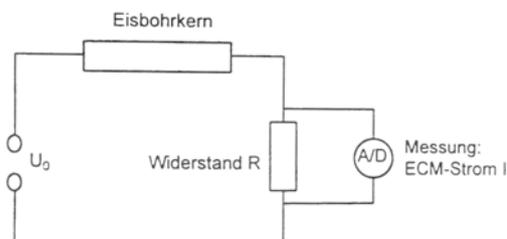


Abbildung 5.2: Ersatzschaltbild für die ECM-Messung, entnommen aus [32]

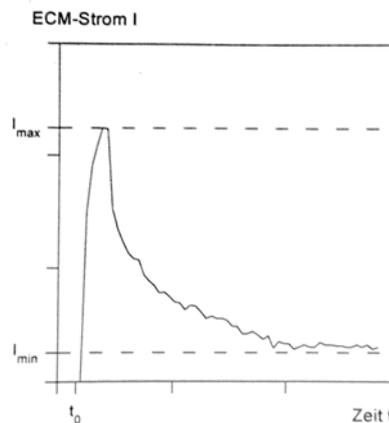


Abbildung 5.3: Typischer Stromverlauf des ECM-Stroms, entnommen aus [32]

5.3 Versuchsaufbau der Heidelberger ECM-Bank

Die Messungen am KCC in Hinsicht auf die elektrische Leitfähigkeit mit ECM werden für diese Arbeit an der ECM-Bank des Institutes für Umweltphysik an der Universität Heidelberg durchgeführt. Bei diesem Messaufbau handelt es sich um eine fahrbare Bank, auf welcher die Wegaufnahme und die Aufnahme des ECM-Signals fest installiert sind. Die beiden Elektroden sind auf der Unterseite eines beweglichen Schlittens angebracht. Dieser kann in eine rotierende Kette, welche durch einen elektrischen Motor in konstante Geschwindigkeit versetzt wird, eingehängt und gezogen werden. Am unteren Ende der Stirnseite des Schlittens ist ein Mikrotom angebracht, welches den besagten oberen Zentimeter für eine glatte Oberfläche des Eises abheben soll. Dahinter befinden sich die beiden Elektroden. Die Wegaufnahme geschieht

über einen Seilzug-Wegaufnehmer, der ebenfalls wie das ECM-Signal, eine zweite, wegabhängige Spannung über einen Analog-Digital-Wandler via USB-Kabel an den PC liefert.

Insgesamt besteht die Heidelberger ECM-Bank aus dem Wegaufnehmer, der Hochspannung, dem Analog-Digital-Wandler und einer Anzeige für den zurückgelegten Weg, deren Anzeige im Dezimeterbereich bis zu einer Nachkommastelle genau angegeben wird. Weitere Informationen finden sich im Anhang 16.

6 Konventionelle Anwendung: Vulkanhorizonte

In polaren Kernen sind Vulkanhorizonte gut im Signalverlauf zu erkennen, daher wird ECM im Wesentlichen dazu verwendet diese Horizonte zu identifizieren und auf dieser Grundlage die Kerne zu datieren. Hempel et al. [35] zeigt im Rahmen des GRIP (Greenland Ice Core Project), wie gut Vulkanhorizonte in grönländischen Eisbohrkernen ersichtlich sind (Abbildung 6.1).

Hauptgrund ist, dass es in den polaren Gebieten keine kontinuierlichen Staubeinträge gibt, die das ECM-Signal unterdrücken. Bei alpinen Eisbohrkernen ist dies leider der Fall, so dass die Detektion von Vulkanausbrüchen stark erschwert ist. Zudem sind alpine Kerne reich an Verschmutzungen, die ebenfalls Peaks im ECM-Signal vortäuschen können. Winde am CG sind ein weiterer Faktor. Sie können zur Erosion von Vulkanhorizonten sorgen. Eine Vulkaneruption am CG genau identifizieren zu können ist somit sehr umstritten.

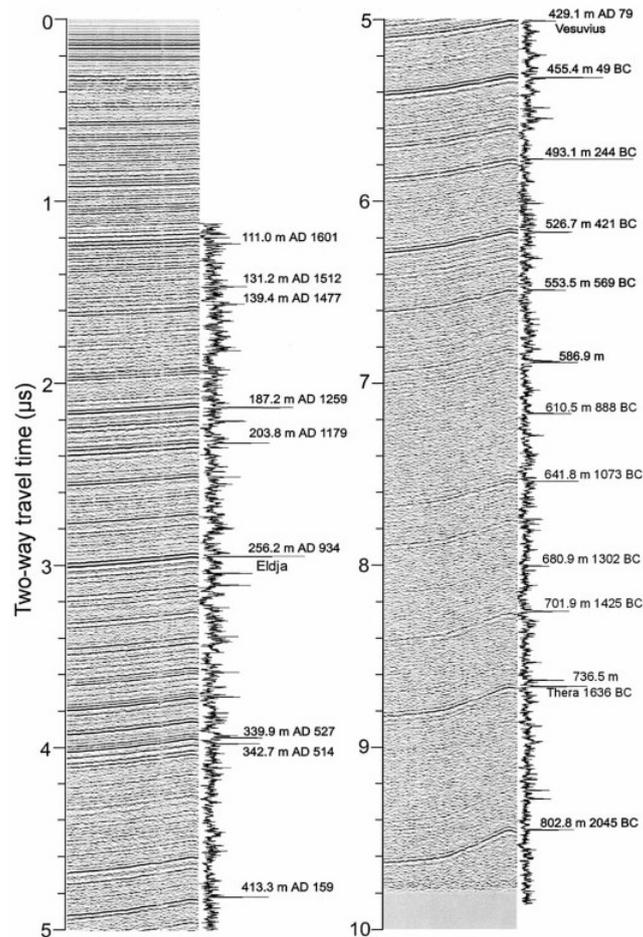


Abbildung 6.1: Darstellung des Radar-Profiles eines grönländischen 10km Kerns. Rechts daneben ist das ECM-Signal wiedergegeben, entnommen aus [35]

7 Datenaufnahme

Im Vergleich zum Aufbau der ECM-Messung nach Hammer [4] werden für diese Arbeit die Daten auf etwas andere Art und Weise aufgenommen. Der größte Unterschied besteht in der Wahl der beiden Elektroden. Im Gegensatz zu Hammer [4] werden zwei Pinsel aus Kohlefaser verwendet. Grund hierfür ist, dass einzelne Runs des Eisbohrkerns zu lange sind um sie ab zu mikrotomieren. Die Gefahr von Brüchen ist in diesem Falle zu hoch. Das Mikrotomieren von Eisoberflächen funktioniert nur in kleinen Schritten gut, wobei der Vorgang des Mikrotomierens schnell gehen muss. Durch die Lagerung der einzelnen Runs in Styroporkisten kam es auch zu Verformungen innerhalb einiger Stücke, da diese nicht perfekt plan lagen. Dies alles macht das Mikrotomieren unmöglich. Die Pinsel gleichen weiterhin etwaige Unebenheiten auf der Oberfläche der Kernstücke gut aus, was vor allem beim grobkörnigen Firn von Vorteil ist. Zudem wird das Eis durch die Pinsel nicht beschädigt.

Die Hochspannung zwischen den Pinseln wurde auf 1500 V eingestellt, so dass die Unabhängigkeit der Geschwindigkeit des Schlittens und mögliche Feldemissionen ausgeschlossen sind.

Mit eckigen Plexiglasstäben (siehe roter Stab in Abbildung 7.2) sorgt man dafür, dass die zu messenden Runs von den Elektroden symmetrisch mittig überfahren werden und diese auch immer exakt gleich auf der ECM-Bank positioniert sind. Bei Brüchen innerhalb eines Runs werden die Einzelteile so gut es geht zusammengeschoben und über den Bruch hinweg gemessen.

Bevor der Schlitten mit den Pinseln über das Eis gleitet, schweben die beiden Elektroden einige Zentimeter durch die Luft. Aus diesen Daten wird ein Untergrund ermittelt, der anschließend von den Daten abgezogen wird. Da die Konzentration auf eine gute Tiefenskalierung liegt, wird zusätzlich während der Messung jedes Runs die Lage der jeweiligen Marker und die Länge datiert.

Die auf dem PC installierte Software zur Auffassung der Daten führt keine integrale Messung der elektrischen Leitfähigkeit zwischen den einzelnen Datenpunkten durch, sondern speichert innerhalb eines gewissen Zeitintervalles immer nur den Wert einer Punktmessung. Das Zeitintervall zwischen den Messungen ist auf 100 ms eingestellt. Der aufgenommene Datensatz konnte als .csv-Datei gespeichert werden, wobei sich der Inhalt der Datei auf drei Spalten beschränkt. In der ersten Spalte befindet sich, chronologisch geordnet, die Nummer der jeweiligen Punktmessung. In der zweiten Spalte sind die Werte der Wegmessung in Millivolt (mV) und in der letzten die des ECM-Signals (mV) eingetragen.

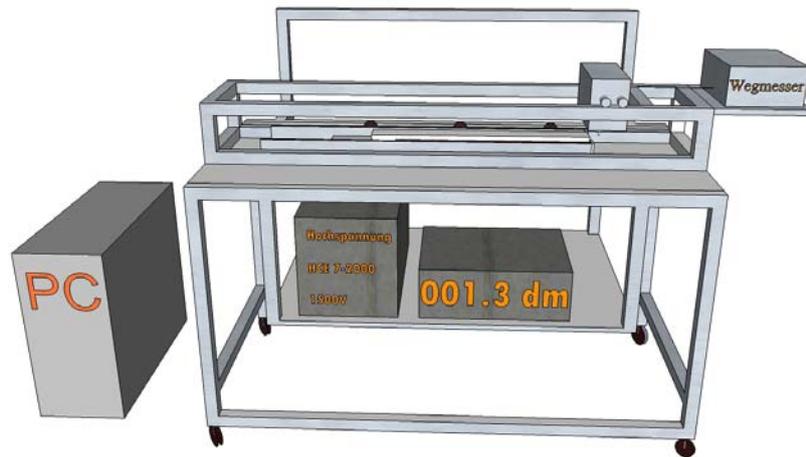
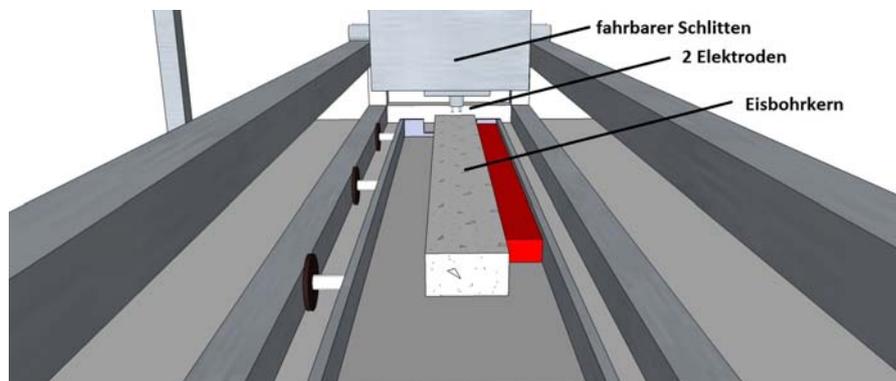


Abbildung 7.1: Schematischer Aufbau der Heidelberger ECM-Bank



*Abbildung 7.2: Schematische Darstellung des Messvorgangs der ECM-Bank.
Die Dreiecke im Eis sollen die Luftbläschen symbolisieren*



Abbildung 7.3: Typische Lage der zu messenden Runs vor der Datenaufnahme

8 Datenauswertung

Die Aufnahmen der Wegmessung und des ECM-Signals werden in Form einer .csv Datei auf einem PC gespeichert. Durch ein selbst geschriebenes Bash-Script (siehe Anhang 15), wird von jeder Messung der Untergrund durch die Luftmessung gemittelt und abgezogen und anschließend aus dem entsprechenden Datensatz gelöscht. Werte, die nach Abzug des Untergrundes negativ sind, werden Null gesetzt.

8.1 Wegkalibrierung

Mit Hilfe einer Wegkalibrierung ist es möglich, den zurückgelegten Weg in mV in einen entsprechenden Abstand in Zentimeter zu transformieren. Mit der Anzeige des Wegmessers, welcher den Abstand vom Nullniveau des Schlittens aus in Dezimeter angibt, werden nacheinander die Abstände $\{0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 141, 152.5\}$ cm eingestellt und über etwa 20 Sekunden die Spannung aufgenommen. In den erwähnten 20 Sekunden kommen dabei in etwa 160 Messwerte zustande, so dass Statistik betrieben werden kann. Die jeweiligen 9 Einzelmessungen der Spannungen werden gemittelt und mit dem Fehler der Standardabweichung versehen. Für den eingestellten Weg wird ein Fehler von ± 0.25 cm geschätzt, so dass die eingestellten Abstände gegen die gemittelten Spannungen inklusive beider Fehlerbalken aufgetragen werden können (siehe Anhang 14). Da der Wegmesser den Weg nur bis zur ersten Nachkommastelle in Dezimeter angibt, gibt es beim Einstellen der einzelnen Anzeigen eine gewisse Toleranz. Es wird versucht immer die Mitte einzustellen zwischen einem Übergang zur nächst größeren und zur nächst kleineren Anzeige. Ein Fehler von $\pm 0,25$ cm erscheint deshalb als angemessen. Das Ergebnis der Wegkalibrierung ist:

$$s = 0.01736 \cdot U - 0.51193 \quad (9)$$

Wobei s der Weg in cm ist und U die Spannung in mV. Für die Steigung ergibt sich ein statistischer Fehler von $\pm 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{cm}}{\text{mV}}$ und für den Ordinatenabschnitt ± 0.28 cm. Es wird bei der Fit-Anpassung der Ordinatenabschnitt nicht fest auf 0 gesetzt, da der Fit sonst schlechter an die Werte passt.

Mit dieser Kalibrierung ist es jetzt möglich, die Datensätze der einzelnen Runs genau auf ihre Gesamtlänge zuzuschneiden.

8.2 Tiefenskalierung

Um eine gute Tiefenskalierung zu bekommen, wird vor jedem Messvorgang gemessen, wo sich die Marker des Loggings auf dem entsprechenden Run befinden. Gemessen wird dabei der Abstand vom TOP-Ende des jeweiligen Runs. Die Lage der Marker

des Loggings liegen in absoluten Tiefen vor. Mit einer linearen Verschiebung wird nun die datierte Tiefe des Markers auf die eigentliche Tiefe des Logging Markers verschoben. Befinden sich mehrere Marker auf einem Run, so wird nur der in der Gesamttiefe höher gelegene Marker angepasst und die Lage des zweiten, u. U. auch dritten, Markers ignoriert. Auf diese Art und Weise kann aus den Einzelmessungen ein zusammenhängender Datensatz des KCC gewonnen werden.

8.3 Reproduzierbarkeit des ECM-Signals

Das ECM-Signal wird als Vorlauf dieser Arbeit auf seine Reproduzierbarkeit überprüft. Ein Run (Run17b) wird im Abstand von je einer Minute 40 mal hintereinander gemessen, wobei darauf geachtet wird, dass beim Zurückfahren des Schlittens die beiden Elektroden nicht über das Eisstück fahren.

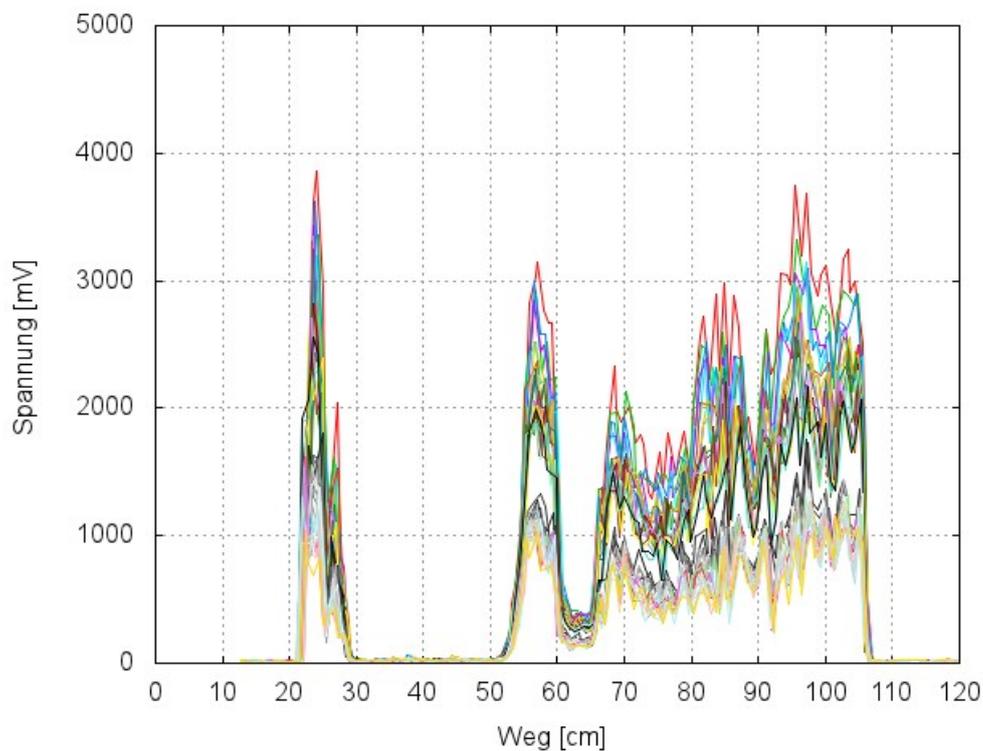


Abbildung 8.1: Graphische Darstellung von 40 Messungen eines Runs im zeitlichen Abstand von einer Minute. Der leere Bereich zwischen zwei dieser Messungen stellt eine längere Messpause von 90 Minuten dar

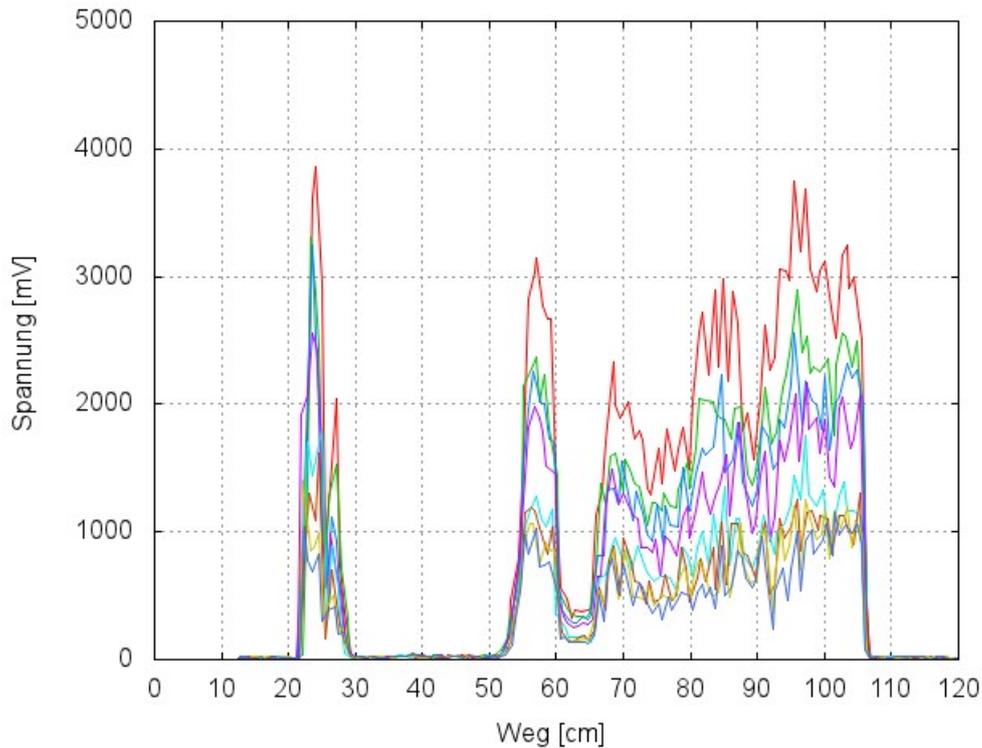


Abbildung 8.2: Graphische Darstellung von 8 der 40 Messungen für eine bessere Übersicht

Auf beiden Abbildungen ist der Abfall des ECM-Signals von Messung zu Messung eindeutig zu erkennen. Eine weitere Auffälligkeit ist auch, dass nach einer Pause von 90 Minuten die Amplitude des Signals deutlich abgefallen ist, als nach einer Pause von nur einer Minute. Es scheint, als ob durch die Messung Prozesse im Kristallgitter ausgelöst werden, die das ECM-Signal in Folgemessungen abschwächen. Jedoch bleibt bei der Wiederholung einer Messung das qualitative Signal dasselbe und Peaks sind auch nach mehreren Messungen noch als Peaks zu identifizieren. Um bei der Aufnahme der Daten diesen systematischen Fehler immer gleich zu halten, wird von jedem Run immer die erste Messung für die Auswertung der Daten verwendet.

8.4 Messergebnis der ECM-Messung am KCC

Die in Kapitel 8.2 erläuterte Tiefenzuordnung durch das Verschieben von der gemessenen Lage des Markers auf die Lage des entsprechenden Logging Markers geschieht anhand eines Bash-Scripts (siehe Anhang 15). Wir erhalten damit einen zusammenhängenden Datensatz des ECM-Signals des KCC in Bezug auf die Tiefe in m.

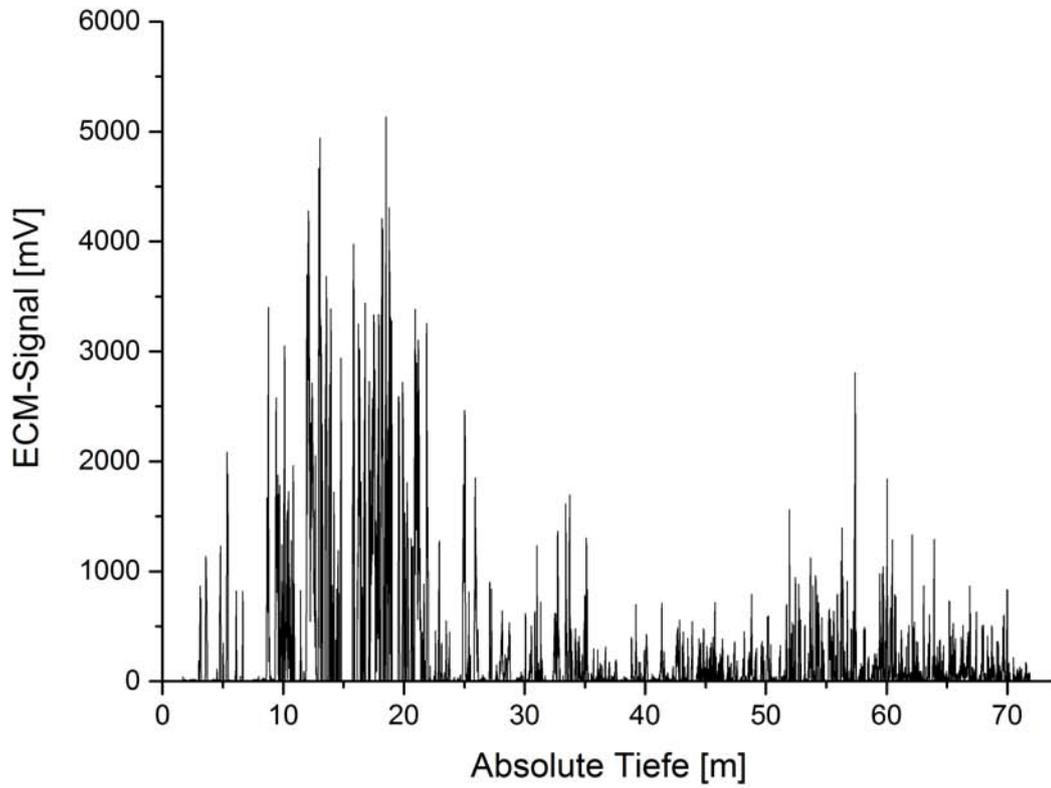


Abbildung 8.3: Graphische Darstellung des aufgenommenen ECM-Signals des KCC gegen die Tiefe in Meter

Der KCC ist unterteilt in 101 Runs, welche wiederum teilweise in die Kleinbuchstaben a und b unterteilt sind, so dass es insgesamt 123 Einzelteile gibt.

9 Auffälligkeiten im ECM-Signalverlauf des KCC

9.1 Skalierung der Tiefe in m we.

In diesem Abschnitt wird die Änderung der Tiefenskalierung des KCC von m in m we vorgenommen, damit eine einheitliche Interpretation der Messergebnisse und ein Vergleich mit den anderen Eisbohrkernen des CG möglich ist. Das Wasseräquivalent we gibt die Wassermenge an, welche durch das Schmelzen einer Schneedecke bestimmter Höhe entsteht.

$$\text{Länge (m we)} = \text{Länge (m)} \cdot \frac{\text{Dichte Firn/Eis} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \quad (10)$$

Für den KCC liegt bis dato allerdings keine hochaufgelöste Dichteskalierung vor, sondern nur die durchschnittliche Dichte für jeden Run.

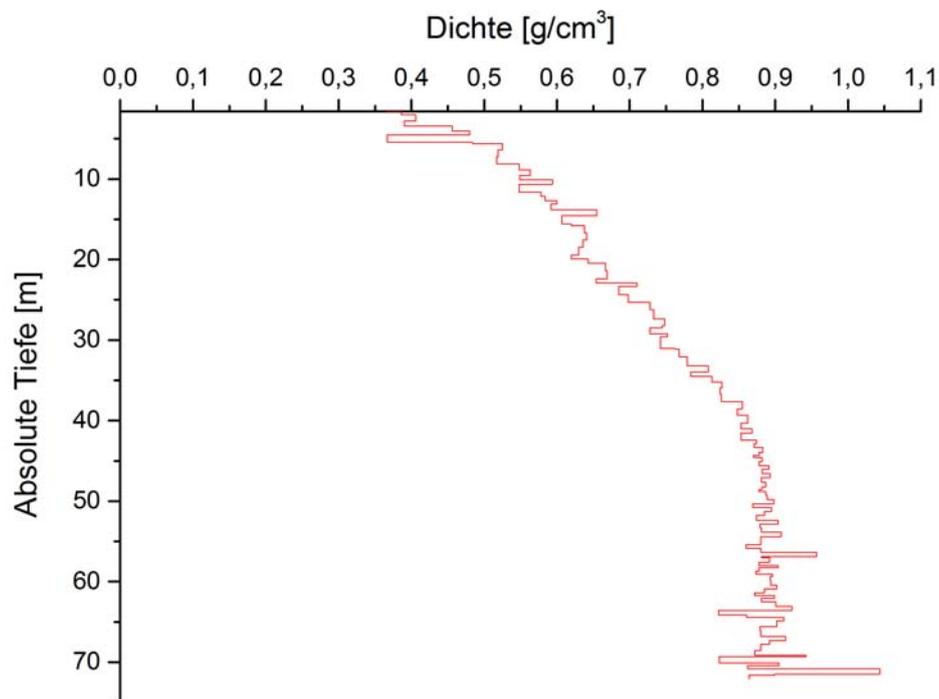


Abbildung 9.1: Durchschnittlicher Dichteverlauf der einzelnen Runs des KCC

Mit diesen Werten erfolgen die ersten Umrechnungen von m in m we. Anschließend werden die Tiefen auf die aufgenommenen ECM-Tiefen mit Origin interpoliert (siehe Abbildung 9.2). Dadurch lässt sich das ECM-Signal in Abhängigkeit der Tiefe in m we darstellen (siehe Abbildung 9.3).

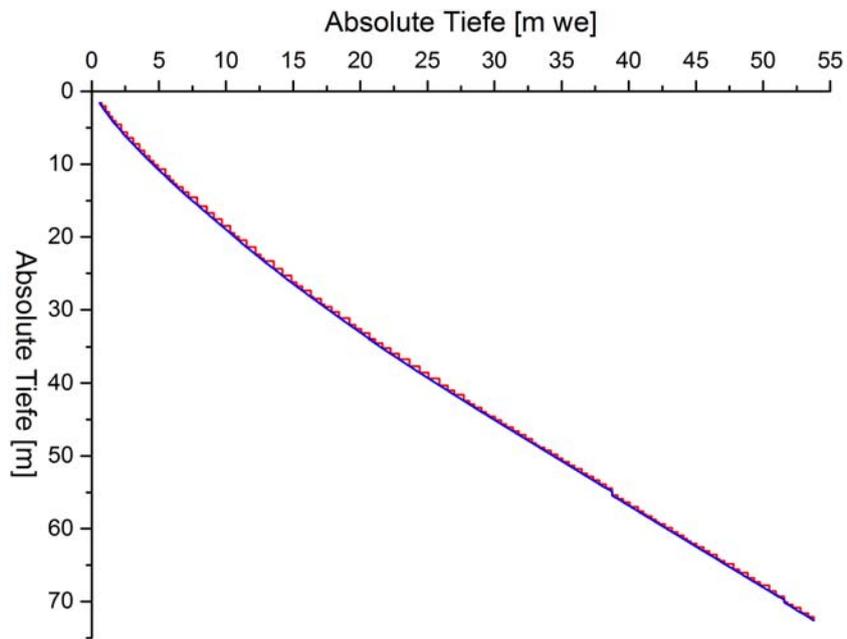


Abbildung 9.2: Erste Umrechnungen der Tiefe von m in m we aus der Gesamtdichte eines Runs und deren Interpolation mit Hilfe von Origin auf die ECM-Tiefen

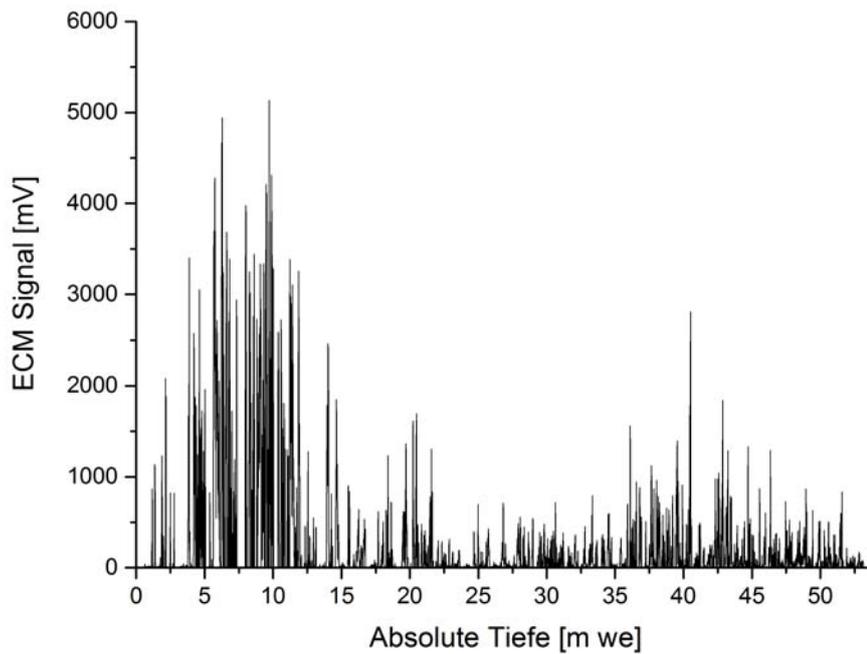


Abbildung 9.3: Graphische Darstellung des aufgenommenen ECM-Signals des KCC gegen die Tiefe in we

9.2 Charakterisierung des Signalverlaufs

Der Signalverlauf in Abbildung 9.3 zeigt deutlich einen erhöhten Säuregehalt im Firn bis zu einer Tiefe von etwa 13.5 m we und einen kleineren Anstieg in einer Tiefe von 17.5 – 21.5 m we. Bis in eine Tiefe von 35.8 m we weist das Signal eine alkalische Phase auf, in der das ECM-Signal schwach ist. Anschließend kommt es wieder zu einem Anstieg in einer Tiefe von 35.8 – 41 m we und einem darauf folgenden Abfall des Signals bis 51.6 m we und einem ganz niedrigen Signal am Ende. Auffällig ist unter anderem, dass das Signal zwischen 6.3 und 9.7 m we Tiefe stark einbricht und sogar in einer Tiefe von 7.3 – 7.9 m we auf Null absackt. Die Peaks in einer Tiefe von 14 und 14.6 m we, sowie jener in 41 m we Tiefe stechen ebenfalls heraus.

10 ECM-Daten-Vergleich der CG-Kerne

Um den erhaltenen Datensatz interpretieren zu können, bedient man sich des Vergleichs mit älteren Kernen, von denen es sowohl bereits Datierungen als auch Interpretationen gibt.

10.1 Normierung der ECM-Signale

Um ein besseres Bild des Colle Gnifetti in Bezug auf ECM zu bekommen werden die bisher vorhandenen Daten der anderen Eisbohrkerne des CG miteinander verglichen. Für den CC, KCH und KCS sind vollständige Datensätze vorhanden, nur für den KCI wurde die Datenaufnahme vorzeitig bei einer Tiefe von 36 m we wegen technischer Probleme abgebrochen [36]. Beim Datensatz des CC fällt auf, dass die Daten wohl schon einer Mittelung unterzogen sind und es sich somit nicht mehr um die Rohdaten handelt (siehe Abbildung 10.1). Leider sind keine anderen Daten des CC vorhanden, so dass die gemittelten Daten verwendet werden.

Die Aufnahmen der ECM-Messung der Eisbohrkerne CC, KCH und KCS liegen unter anderem nur in μA vor. Die Daten des KCI und die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Daten des KCC sind in mV aufgenommen. Da das jeweilige Mess-Setup ebenfalls nicht bekannt ist, gibt es auch keine Informationen über die angelegte Hochspannung, von welcher die Messwerte abhängen (siehe Kapitel 5.1). Um einen Vergleich aller 5 Kerne zu erreichen, werden die Signale daher auf ihr Maximum normiert. Dies geschieht, indem jede Einzelmessung durch das Maximum des jeweiligen Datensatzes dividiert wird:

$$\text{ECM-Signal}_{\text{norm}} = \frac{\text{ECM-Signal}_{\text{gem}}}{\text{ECM-Signal}_{\text{max}}} \quad (11)$$

Da die Kerne zudem eine unterschiedliche Gesamttiefe haben, wird auch die Tiefe auf ihr Maximum normiert:

$$\text{Tiefe}_{\text{norm}} = \frac{\text{Tiefe}}{\text{Gesamttiefe}} \quad (12)$$

Tabelle 1 weiß einige wichtige Parameter der verschiedenen Eisbohrkerne auf, welche auch für die Normierung der Tiefe verwendet werden.

	CC	KCH	KCS	KCI	KCC
Bohrjahr	1982	1995	1995	2005	2013
Absolute Tiefe (m)	64	60	100	62	71.9
Absolute Tiefe (m we)	50	45	79	48	53.1
Tiefe des Firn-Eis-Übergangs (m)	31	28	43	27	34.9*

Tabelle 1: Einige Parameter der fünf Kerne des Colle Gnifetti, welche unter anderem zur Tiefennormierung verwendet werden, entnommen aus [36]

Der Firn-Eis Übergang wird beim KCC (*) aus einer Interpolation des Dichteverlaufs von Abbildung 9.1 in einer Tiefe von 34.9 m geschätzt. Durch die Interpolation der Tiefe in Abbildung 9.2 ergibt sich für den KCC eine Gesamttiefe von 53.1 m we.

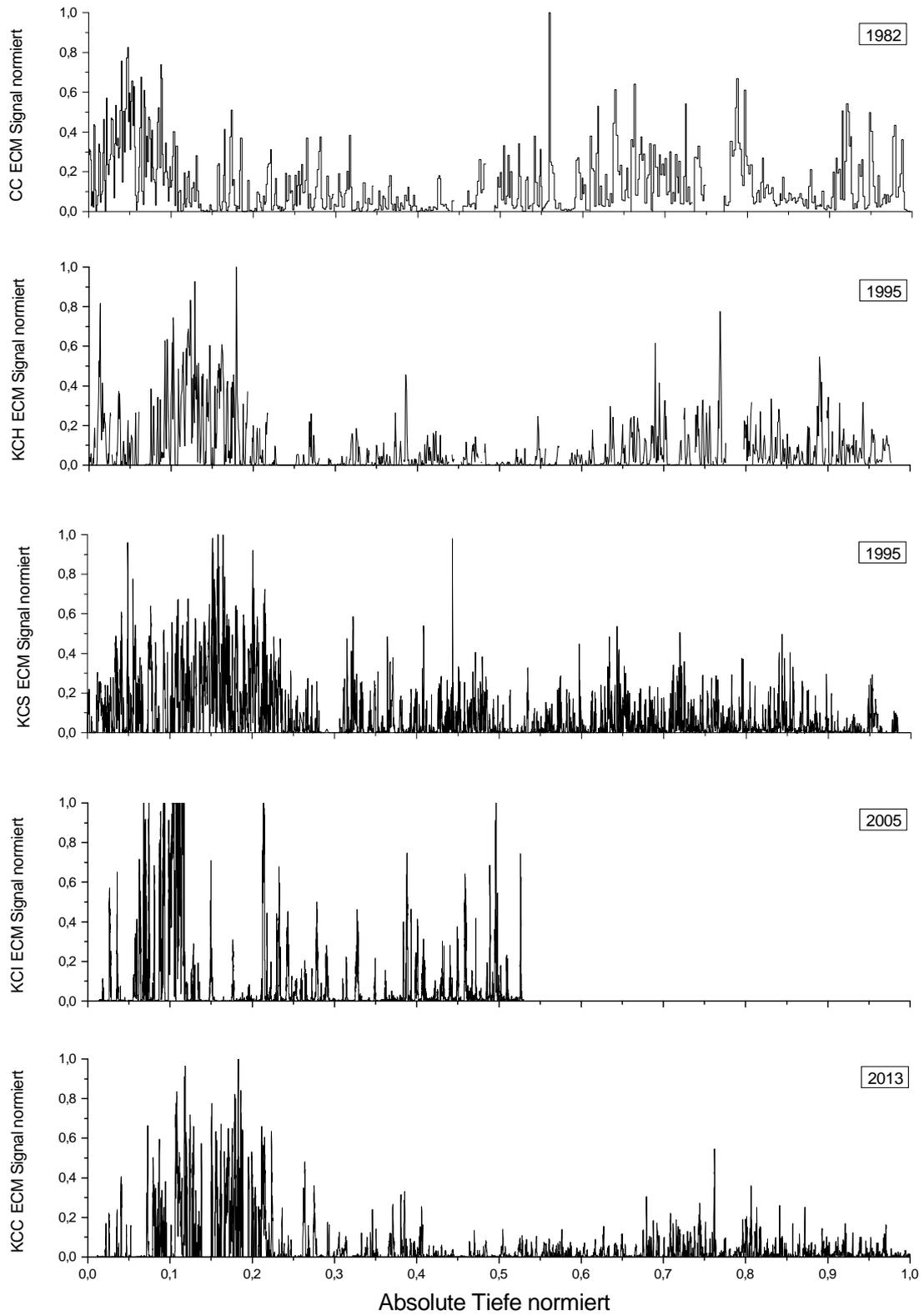


Abbildung 10.1: Darstellung der vorhandenen ECM-Daten aller fünf Bohrkerne des Colle Gnifetti. Signal und Tiefe sind jeweils auf ihr Maximum normiert

10.2 Beschreibung der normierten Signalverläufe

Beim Vergleich der fünf Kerne fällt auf, dass alle einen Säureanstieg in einer geringen Tiefe aufweisen. Das Signal des CC, KCH und KCS spiegelt dabei sogar ein gewisses Grundniveau wieder. Die Lage des Säureanstieges stimmen für den KCH, KCS und KCC gut überein. Der des CC ist in eine geringere Tiefe hin verschoben. Zu erklären ist das mit dem neugewonnenen Schnee und Firn, der sich über die Jahre auf den jeweils jüngeren Kernen deponiert hat. Dies unterstreicht auch die Übereinstimmung der Lage des Säureanstiegs des KCH und KCS. Allerdings sollte sich demnach der Säureanstieg im KCC in einer größeren Tiefe befinden. Jedoch ist hier im Vergleich zum KCH und KCS keine weitere Verschiebung ersichtlich. Beim KCI hat es den Anschein, als ob das ECM-Signal ab einer gewissen Stärke abgeschnitten ist, besonders im Bereich der normierten Tiefe von 0.1 bis 0.12. Um 0.15 gibt es sogar eine regelrechte Lücke. Zudem spiegelt sich der Säureanstieg beim KCI im Vergleich zu den anderen Kernen anders wieder. Er ist viel schmäler als die der anderen Kerne und sein Anstieg und Abfall sind sehr steil. Im Gegensatz zum Signalverlauf der anderen Eisbohrkerne erscheint der des KCI somit gestaucht. Ebenfalls bemerkenswert sind die höheren Peaks vor dem eigentlichen Säureregime, wo bei den anderen Kernen weniger Peaks zu sehen sind.

10.3 Datierungshorizonte am KCC

Mit bekannten Ereignishorizonten sollen nun erste Datierungsversuche unternommen werden. Dazu wird der Tritiumpeak, der Übergang sauer-alkalisch und ein starker Vulkanausbruch gewählt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgezeigt.

10.3.1 Tritiumpeak 1963

Der Tritiumpeak hat seinen Ursprung aus oberirdischen Atombombentests und weist ein Maximum im Jahre 1963 auf [15], da nach dem NTBT (Nuclear Test Ban Treaty) 1963 weitere Atombombentests weitgehend eingestellt wurden. Jung [37] datiert den Tritiumpeak für den CC in einer Tiefe von 4 m we. Bohleber [38] teilt im KCI dem Tritiumpeak eine Tiefe von 5.75 m we zu und Armbruster [39] datiert ihn für den KCS in einer Tiefe von 16.18 m we. Für den KCH ergibt sich aus der Datierung von Armbruster [39] eine Tiefe von (7.2 ± 0.2) m we für das Jahr 1963. Beim KCC ist die genaue Tiefe des Tritiumpeaks bis dato noch nicht bekannt. Aus ersten Untersuchungen kann der Bereich des Peaks auf eine Tiefe von 20.97 m bis 21.17 m eingegrenzt werden [persönliche Mitteilung Johanna Kerch]. Dies entspricht einem Tiefenbereich von 11.25 m we bis 11.4 m we. Für die Lage des Tritiumpeaks im Signalverlauf des KCC wird somit eine Tiefe von (11.325 ± 0.075) m we angenommen.

10.3.2 Regimewechsel sauer-alkalisch in den 1950er Jahren

Bei der Untersuchung der Eisbohrkerne CC, KCH, KCS und KCI ist ein Säureanstieg zu Beginn des industriellen Zeitalters in den 1950er Jahren zu erkennen. Dieses Phänomen hat somit einen anthropogenen Hintergrund und sollte für alle Kerne des CG das gleiche Alter repräsentieren.

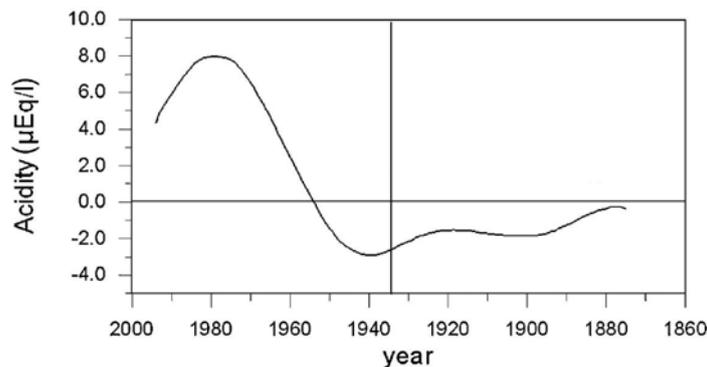


Abbildung 10.2: Genereller Trend des Säureverlaufs an CG-Kernen durch Ionenmessungen, entnommen aus [40]

Wird das ECM-Signal gegen die Tiefe aufgetragen, so kann der Übergang bestimmt werden. Dabei wird eine Kurve durch den Säureanstieg gelegt und abgelesen; jedoch erfolgt dies nach einer subjektiven Einschätzung. Durch die Datierungen der Kerne durch Arbeiten von Jung [37], Schäfer [12], Armbruster [39], Jahn [15] und Bohleber [38] können die ermittelten Tiefen in m we einem bestimmten Alter zugeordnet werden. Für den CC ergibt sich mit einer Tiefe des Übergangs von 5.5 m we das Jahr 1954 ± 0.5 , für den KCI mit 5.65 m we das Jahr 1964 ± 0.2 , für den KCS mit 20.8 m we das Jahr 1953 ± 0.5 und für den KCH mit 9.2 m we das Jahr 1954 ± 1 . Der Übergang von sauer zu alkalisch wird beim KCC einer Tiefe von 13.5 m we zugeteilt. Vernachlässigt man bei der Betrachtung den KCI, so ist beim KCC der Tiefe (13.5 ± 0.2) m we das Jahr 1954 zuzuordnen, da dieses Jahr bei 2 von 4 Kernen übereinstimmt und ein dritter Kern nur um Jahr davon abweicht. Dies liefert neben dem Tritiumpeak einen weiteren Datierungspunkt des KCC.

10.3.3 Vulkaneruption des Tambora 1815, Indonesien

Trotz der Erläuterungen im Kapitel 6 soll nun versucht werden einen starken Vulkanausbruch im ECM-Signal zu finden und dieser Tiefe ebenfalls ein Jahr zuzuschreiben. Als Vulkanausbruch wird der des Tambora, Indonesien, im Jahre 1815 gewählt. Für den Tamboraausbruch spricht, dass es eine große Eruption war und sie somit am CG gesehen werden könnte. Zudem liegt dieser im ECM-Signalverlauf nicht im

Säureanstieg, sondern darunter, und vor der problematischen Tiefenumrechnung und eignet sich somit gut für die Untersuchung. Mit der problematischen Tiefenumrechnung ist gemeint, dass ab einer gewissen Tiefe Saisonalitäten, wie bei der CFA, nicht mehr erkannt werden können und eine Datierung somit schwierig ist. Selbst durch den Vergleich zweier oder mehrerer Datierungsmethoden ist eine exakte Vulkanchronologie nicht möglich [15]. Im CC hat Schäfer [12] den Tambora 1815 einer Tiefe von 27.2 m we zugeordnet. Bohleber [38] schreibt dem Tambora eine Tiefe von 15.68 m we zu. Aus den Ergebnissen der Arbeit von Armbruster [39] kann im KCS das Jahr 1815 einer Tiefe von (44.1 ± 0.1) m we zugeordnet werden. In derselben Arbeit [39] ist jedoch zu lesen, dass der Tambora 1815 im ECM-Signal nicht gefunden werden kann, da die ECM-Daten für diese Tiefe fehlen. Im KCH ist das Jahr 1815 etwa einer Tiefe von (29.5 ± 0.5) m we zuzuordnen.

In Abbildung 10.3 werden die jeweiligen normierten Tiefen der Tamboraeruption der Kerne in den Signalverlauf des KCC eingezeichnet.

10.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 2 werden alle betrachteten Ereignishorizonte der fünf Kerne für eine schnelle Übersicht dargestellt.

	CC	KCH	KCS	KCI	KCC
Tritiumpeak 1963 Tiefe in m we	3.5	7.2 ± 0.2	16.18	5.75	11.325 ± 0.075
Tritiumpeak 1963 normierte Tiefe	0.07	0.160 ± 0.004	0.20	0.1198	0.212 ± 0.003
Regimewechsel Tiefe in m we	5.5	9.2	20.8	5.65	13.5 ± 0.2
Regimewechsel normierte Tiefe	0.11	0.20	0.26	0.1177	0.254 ± 0.004
Regimewechsel Jahr	1954 ± 0.5	1954 ± 1	1953 ± 0.5	1964 ± 0.2	1954*
Tambora 1815 Tiefe in m we	27.2	29.5 ± 0.5	44.1 ± 0.1	15.68	?
Tambora 1815 normierte Tiefe	0.54	0.66 ± 0.01	0.558 ± 0.001	0.33	?

Tabelle 2: Tabellarische Übersicht der Datierungspunkte Tritiumpeak 1963, Regimewechsel sauer-alkalisch und Tambora 1815 am Colle Gnifetti

Das Jahr 1954 wird beim KCC durch den festgelegten Regimewechsel von sauer zu alkalisch definiert (*). Nach verschiedenen Vergleichsrechnungen wird davon abgesehen

die Tamboraeruption 1815 im Signalverlauf des KCC zuzuordnen.

In Abbildung 10.3 sind die Ereignishorizonte des jeweiligen Eisbohrkerns in deren ECM-Signalverlauf eingezeichnet. Für Resultate aus Schätzungen werden die Horizonte als gestrichelte Linien eingetragen. Die durchgezogenen Linien stellen dabei die als fix datierten Ereignishorizonte dar. Die Ergebnisse der normierten Tiefe der Tamboraeruption werden in den Signalverlauf des KCC gestrichelt eingezeichnet, da es sich im KCC implizit nur um Tiefen handelt, wo die Tamboraeruption sich aus dem Vergleich der einzelnen Kerne befinden könnte.

Beim KCI liegen der Regimewechsel und der Tritiumpeak nahe beieinander. Zudem ist in dieser Lage das Maximum des ECM-Signals des KCI und somit sind die beiden Linien in Abbildung 10.3 nur schwer zu erkennen.

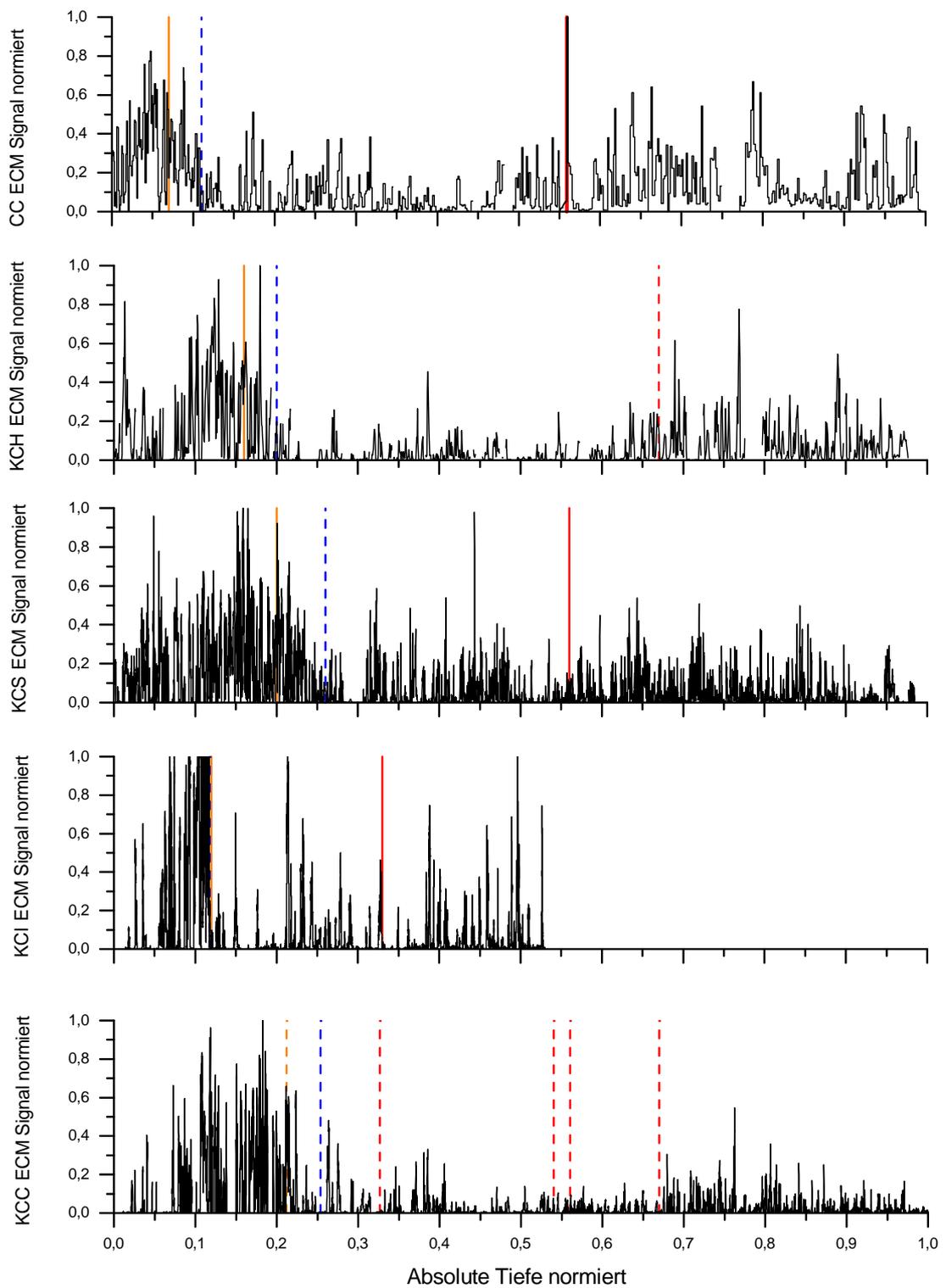


Abbildung 10.3: Datierung des Tritiumpeaks 1963 (orange), des Übergangs sauer-alkalisch ca. 1954 (blau) und des Vulkanausbruches Tambora 1815 (rot). Alle durchgezogenen Linien sind fix datierte Horizonte, gestrichelte sind Schätzungen

10.5 Robuste Filterung der ECM-Datensätze

Für einen tendenziellen Verlauf der ECM-Signale der am Colle Gnifetti gebohrten Eisbohrkerne werden die Datensätze mit der Software AutoSignal einer robusten Filterung unterzogen. Mit der Funktion "Eigendecomposition Filtering and Reconstruction" ist es möglich einzelne Signalkomponenten vom Signal selbst abzutrennen [41]. Dies geschieht jedoch nicht über eine Fouriertransformation und deren Aufspaltung in harmonische Schwingungen, sondern mit einer Eigenform-Filterung. Vielmehr wird das Signal in unterschiedliche Signalstärken unterteilt. Dafür sorgen anpassungsfähige, nicht-parametrisierte, willkürliche Basis-Funktionen. Eine Auswahl der Eigenwerte bestimmt die Härte der Separation. Werden für die Filterung alle möglichen Eigenwerte ausgewählt, so ist die Filterung gleich null und die Daten vor und nach der Filterung sind die gleichen.

Die Filterung der Datensätze erfolgt für die Kerne des CG für die normierten Tiefen und ECM-Signale, damit diese gut miteinander verglichen werden können. Die Anzahl der Eigenwerte wird für jeden Kern separat gewählt, da die Auflösung der jeweiligen Messungen immer eine andere ist. Für den CC werden fünf Eigenwerte gewählt, da die Auflösung der ECM-Daten des CC sehr niedrig sind. Für den KCH werden drei Eigenwerte gewählt und für den KCS, KCI und KCC jeweils nur ein Eigenwert.

In Abbildung 10.4 ist die Filterung der einzelnen grafisch dargestellt. Mit der Filterung ist eine bessere Beschreibung der Baseline möglich.

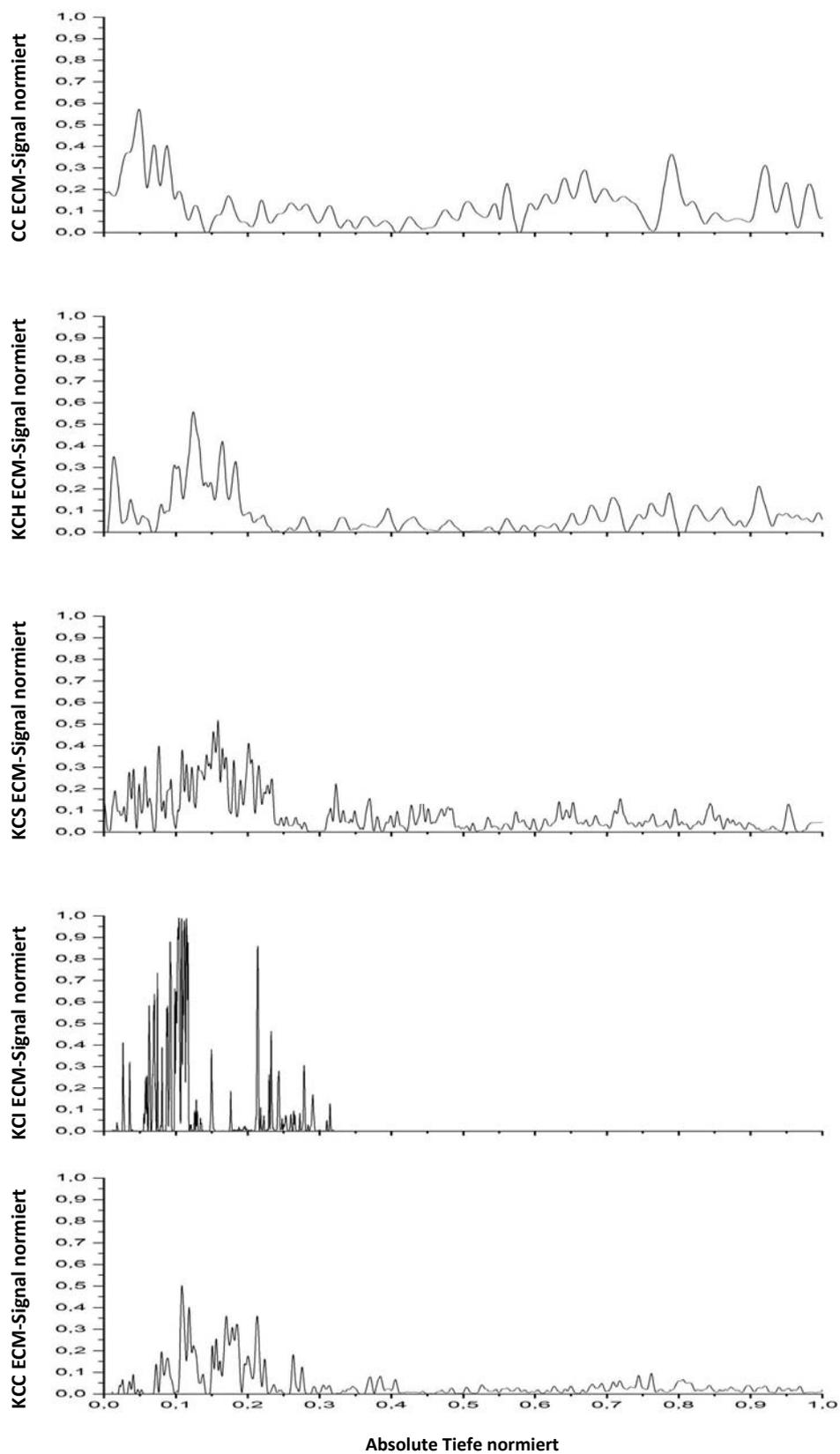


Abbildung 10.4: Robuste Filterung der ECM-Datensätze der am CG gebohrten Eisbohrkerne mit der Software Autosignal

10.6 Signalverlauf der basalen Schichten

Die Untersuchung der basalen Schichten der Eisbohrkerne sind sehr interessant, da dort das älteste Eis gelagert ist. Schätzungen zufolge beträgt das Alter dieses Eises am Colle Gnifetti bis zu 10.000 Jahre [36].

Bei der Bohrung des KCH wurde nicht so nahe ans Felsbett gebohrt wie bei den anderen Kernen des CG. Das Felsbett wurde nicht erreicht [39]. Für den KCI gibt es die ECM-Daten der unteren Hälfte des Kerns überhaupt nicht. Im Folgenden werden deshalb nur der CC, KCS und KCC in Hinsicht auf die letzten Meter untersucht.

Für eine bessere Interpretation der Daten wird das ECM-Signal normiert und die Tiefe in m we betrachtet. Zusätzlich wird in die unteren Tiefen gezoomt (siehe Abbildung 10.5). Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Signalverläufe der letzten m we der Kerne alle unterschiedlich aussehen. Der CC weist noch bis kurz vor Erreichen der Gesamttiefe Peaks mit einer normierten Höhe von 50 % auf. Ab einer Tiefe von etwa 48.2 m we fällt das Signal schlagartig auf Null ab. Beim Signalverlauf des KCS ist in einer Tiefe von 75.5 m we bis 76.6 m we ähnliches zu beobachten, jedoch geschieht es dort in einer geringeren normierten Tiefe. Gegensätzlich zeigt sich beim KCS aber in einer Tiefe von 78.1 m we bis 78.5 m we ein erneuter Anstieg. Danach bleibt das Signal bis zum Ende des Kerns auf Null. Der KCC weist wiederum einen anderen Verlauf der letzten m we auf: Ab einer Tiefe von 51.6 m we ist ein klarer Cut zu erkennen und im Signal sind keine klaren Peaks mehr ersichtlich.

	CC	KCH	KCS	KCI	KCC
Tiefe der ECM-Daten in m we	48.6	43.9	79.8	25.4	53.1
Absolute Tiefe in m we	50	45*	79	48*	53.1

Tabelle 3: Tabellarische Übersicht der Tiefen laut den Aufnahmen des ECM-Signals und der absoluten Tiefe laut Konrad [42] der Kerne des CG. Alle mit * gekennzeichneten Felder weisen darauf hin, dass womöglich ein kleiner Teil des basalen Eises oberhalb des Felsbettes nicht geborgen wurde

Auffällig an der Tabelle ist, dass beim KCS und KCC die Tiefe laut den Aufnahmen des ECM-Signals größer ist als die absolute Tiefe laut Konrad [42]. Die ECM-Tiefen stammen aus Berechnungen des Dichteverlaufs, womit sich mit Gleichung 10 die Tiefe in m we berechnen lässt. Die absolute Tiefen sind mit GPR (Bodenradarmessung) gemessen worden [42]. Durch die unterschiedlichen Messmethoden und Berechnungen ist die Abweichung bei den Tiefen zu erklären.

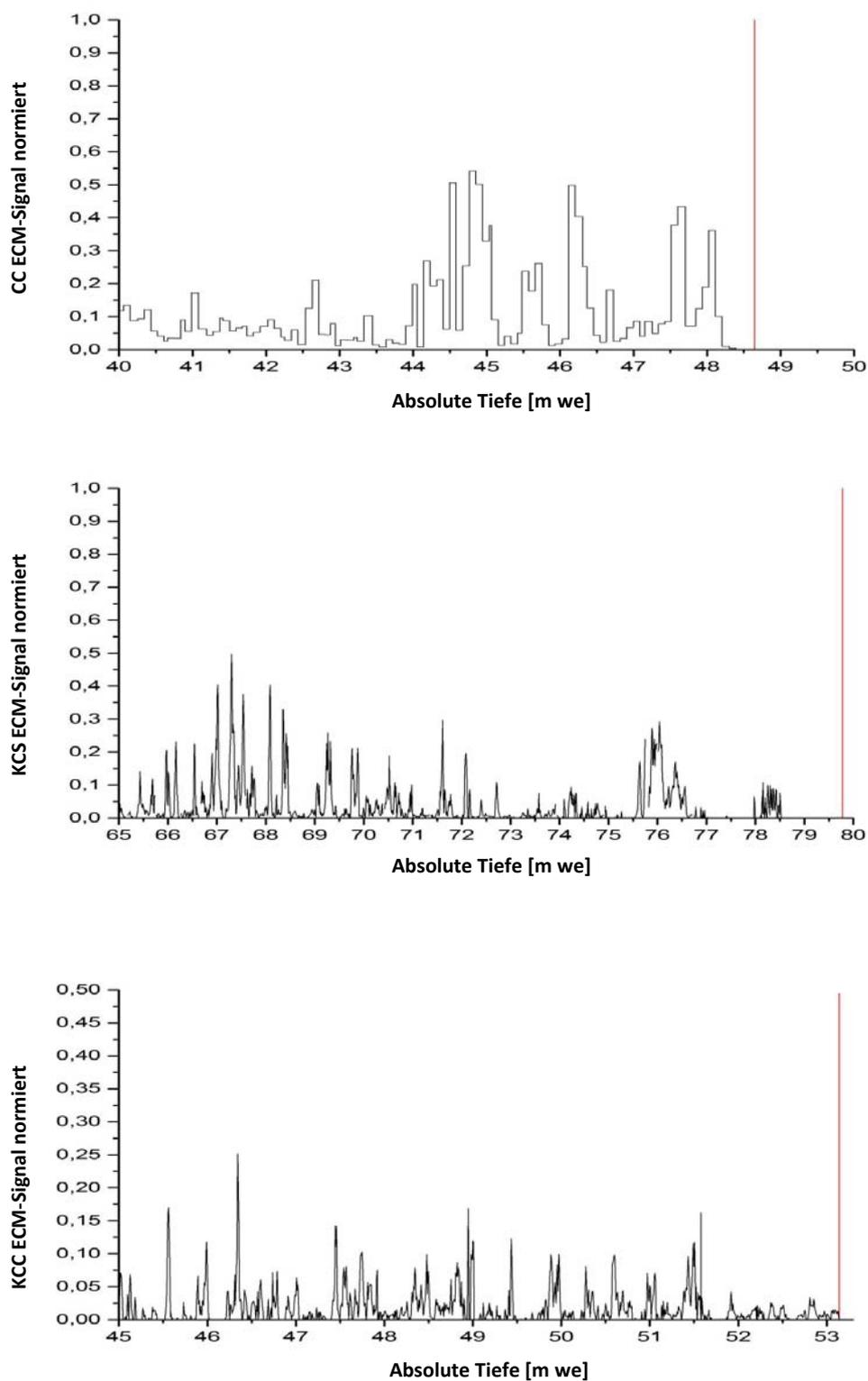


Abbildung 10.5: Basale Schichten der Kerne CC, KCS und KCC. Das ECM-Signal ist auf das jeweilige Maximum normiert und die rote Vertikale stellt das Ende der ECM-Daten dar

11 Vergleich von ECM- mit DEP-Signal des KCC

11.1 Dielectric Profiling (DEP)

Eine weitere Messmethode, die elektrischen Eigenschaften von Eis zu messen, ist das Dielectric Profiling, bei dem die Permittivität des Eises bestimmt wird. Die Permittivität ist als komplexer Faktor definiert, welcher die Kapazität eines Kondensators erhöht, wenn der Zwischenraum im Vergleich mit Luft mit einem Material gefüllt wird. Im Fall eines Eisbohrkerns besteht der Kondensator aus den zwei Hälften eines Zylinders. Die Formel der komplexen Permittivität lautet

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - i \cdot \epsilon''_r \quad (13)$$

wobei ϵ'_r für den Realteil und ϵ''_r für den Imaginärteil der Permittivität steht, $i = \sqrt{-1}$ ist die imaginäre Einheit. Weitere Informationen sind der Arbeit von Martin Hackel [17] zu entnehmen.

Das ECM-Signal ist nur von der Säure abhängig. Auch bei sehr hohen neutralen Salzgehalten bleibt das ECM-Signal aus. Dies unterscheidet das ECM-Signal vom Ergebnis einer DEP-Messung. DEP ist sowohl vom Säure- als auch vom Salzgehalt im Eis abhängig. Salz im Eis erhöht die Anzahl an Bjerrumdefekten, bzw. an L-Defekten, welche Ladungen binden und somit eine Leitfähigkeit verhindern. Aber genau jene Defekte erzeugen eine dielektrische Wechselstromleitfähigkeit. Da DEP eine Messmethode mit Wechselstrom verschiedener Frequenzen ist, kann damit neben der Säure auch der Salzgehalt gemessen werden [43]. Da aber beide Methoden den Säuregehalt messen, ist ein direkter Vergleich beider sehr interessant.

Die halb-empirische Kovac Formel bringt die Dichte des Firn ρ_F mit dem relativen Realteil der Permittivität in Zusammenhang:

$$\epsilon'_F = \left(1 + 0.000845 \rho_F \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)^2 \quad (14)$$

Mit dieser Näherungsformel kann die Permittivität jedoch nur bis zur ersten Ordnung berechnet werden.

11.2 Vergleich der Datensätze

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit liegt nur ein vollständiger Datensatz einer anderen Analyseverfahren vor und zwar jener mittels DEP. Die Datenaufnahme ist in der Arbeit von Martin Hackel [17] nachzulesen. Die Resultate in Abbildung 11.1 wurden bei einer Frequenz von 250 kHz aufgenommen. Der Imaginärteil der Permittivität ist auch abhängig von der Konzentration der Verschmutzung und für einen Vergleich

mit ECM somit sehr interessant. Der Realteil ist von der Dichte abhängig. Für eine Untersuchung des Realteils der Permittivität auf Anomalien wird der mit Gleichung 14 aus den bulk densities berechnete Dichteverlauf abgezogen, damit der Trend, welcher durch den Dichteverlauf kommt, herausgefiltert ist. In Abbildung 11.1 ist in der obersten Grafik der Dichteverlauf des KCC eingezeichnet. Die Skalierung der Dichte ist eine andere als der der Permittivität, jedoch spielt diese hier keine Rolle und wird deshalb weggelassen.

Im Folgenden wird aus dem resultierenden Verlauf des Realteils mehrere Peaks untersucht. Der Fokus liegt dabei auf einem Vergleich mit dem Imaginärteil und dem ECM-Signal. Peaks in diesem Realteil weisen oft auf Schmelzlagen, d.h. Anomalien im Dichteverlauf, hin.

In Abbildung 11.2 ist ein Zoom in die Tiefe von 10 bis 14 m dargestellt. Dadurch sollen Realteil und Imaginärteil der Permittivität mit dem ECM-Signal verglichen werden. Die roten Linien in dieser Abbildung stellen zwei im Realteil gefundene Peaks dar und sind in den Imaginärteil und das ECM-Signal eingezeichnet. Die grau hinterlegte Fläche stellt einen Bereich dar, in dem alle drei Signale einen qualitativ gleichen Verlauf aufzeigen. Die blaue Linie repräsentiert einen Peak im ECM-Signal und ist in den Real- und Imaginärteil eingezeichnet.

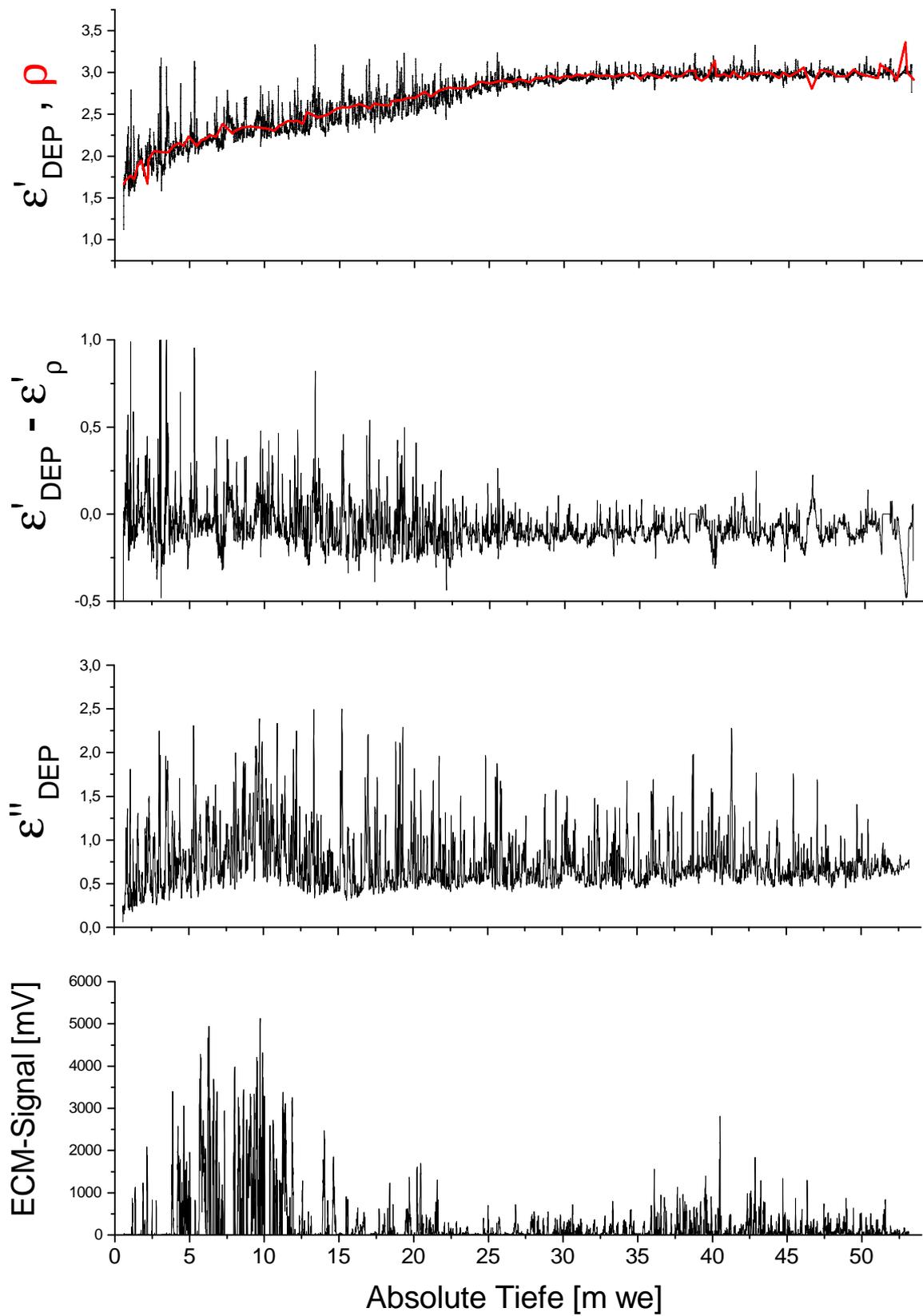


Abbildung 11.1: Grafischer Vergleich der DEP-Messungen mit der ECM-Messung. In der Darstellung des Realteils ist in rot der Dichteverlauf mit eingezeichnet

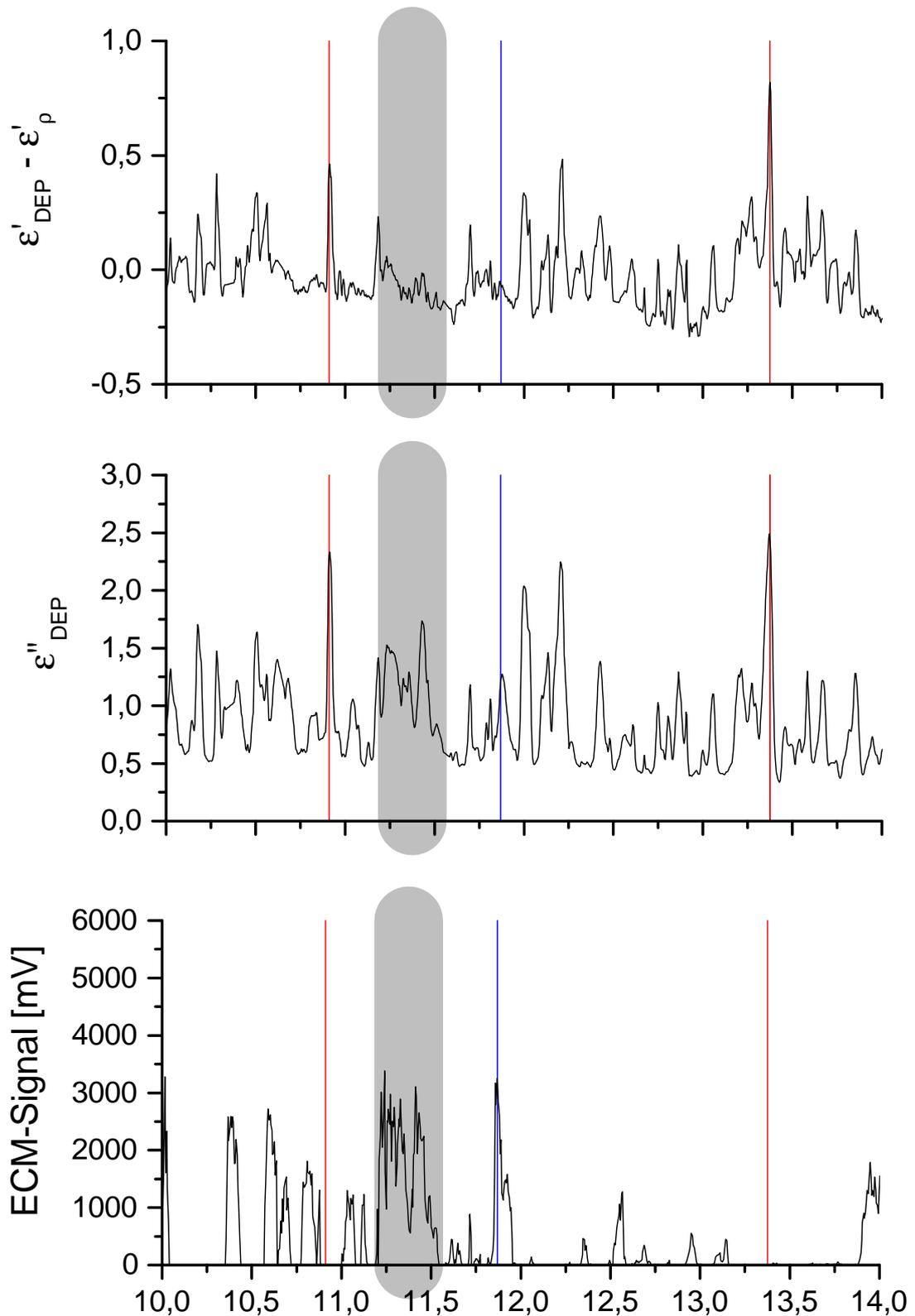


Abbildung 11.2: Zoom in einer Tiefe von 10 bis 14 m. Die roten Linien dienen als Vergleich der im Realteil gefundenen Peaks, die blauen Linien als Vergleich der im ECM-Signal gefundenen Peaks. Grau hinterlegt ist ein Bereich qualitativ gleichen Signalverlaufs

12 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die erzielten Resultate der Messung noch einmal aufgegriffen und diskutiert werden.

Ohne größeren Datenverlust ist der gesamte KCC mit der Heidelberger ECM-Bank vermessen worden. Nur die Anpassung der selbst gemessenen Marker an die Logging Marker sorgt für kleinere Datenlücken zwischen den Runs im Millimeterbereich. Durch das Anpassen der Marker und eine gewisse Breite der Marker ist bei der Angabe der Tiefe mit einem Fehler von ± 1 cm zu rechnen.

Mit der Vorgehensweise, immer die erste ECM-Messung von einem Run zu verwenden, ist es möglich einen qualitativen Verlauf des ECM-Signals zu erhalten. Ein Erreichen der Reproduzierbarkeit durch Mikrotomieren an alpinen Eisbohrkernen wird in der Zukunft wohl dennoch nicht möglich sein, da der hohe brüchige Firnanteil das Mikrotomieren, ohne Brüche zu verursachen, nahezu unmöglich macht. Dennoch kann man mit dem Ergebnis der ECM-Aufnahme am KCC sehr zufrieden sein. Der Verlauf des Signals weist viele Parallelen zu den Signalverläufen der anderen Eisbohrkerne des Colle Gnifetti auf 10.1. Bei der Berechnung der Länge in m we sind die Dichtewerte aus der Interpolation jedoch nur grobe Werte und mit einem Fehler behaftet. Für die Interpolation werden die Dichtemessungen pro Run verwendet. Innerhalb eines Runs können aber stark unterschiedliche Dichten herrschen, aufgrund der Schmelzlagen.

Im Rahmen der Arbeit ist es möglich erste vorläufige Datierungspunkte am KCC vorzunehmen. Durch eine erste Abschätzung des Tritiumpeaks kann dieser im KCC einer Tiefe von (11.325 ± 0.075) m we zugeordnet werden. Eine subjektive Betrachtung des Regimewechsels in der chemischen Zusammensetzung von sauer zu alkalisch liefert durch den Vergleich der Eisbohrkerne CC, KCH und KCS, dass sich dieser Übergang im Jahr 1954 ± 1 vollzogen hat. Auch der Signalverlauf des KCC lässt diesen Regimewechsel erkennen und der Tiefe (13.5 ± 0.2) m we kann damit vorläufig das Jahr 1954 ± 1 zugeordnet werden. Bei dieser Vorgehensweise ist das Ergebnis allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da es sich um eine rein subjektive Betrachtungsweise handelt. Das Ergebnis wird jedoch qualitativ dadurch bestätigt, dass sich der Tritiumpeak in einer geringeren Tiefe befindet als der Regimewechsel. Alle Eisbohrkerne des CG erfüllen diese Zuordnung, nur der KCI nicht. Dort liegt der Tritiumpeak knapp unter dem Übergang sauer-alkalisch, was nicht möglich sein dürfte. Grund dafür könnte die Festlegung der Tiefe des Regimewechsels mit bloßem Auge sein und seine geringe Akkumulationsrate.

Beim Versuch den Vulkanausbruch des Tambora 1815 im Signalverlauf des KCC aus dem Vergleich der normierten Lagen der anderen Kerne des CG zu finden, hat sich

die Theorie von Kapitel 6 insofern bestätigt, dass es bei den untersuchten alpinen Kernen kaum möglich ist, Vulkanhorizonte klar gegenüber dem restlichen Signal zu identifizieren. In die grafische Darstellung des KCC (siehe Abbildung 10.3) sind die normierten Ergebnisse der Lage des Vulkanausbruchs Tambora 1815 der Kerne CC, KCH, KCS und KCI eingezeichnet. Beim CC, KCH und KCS liegt der Tambora-Peak am Anfang des erneuten leichten Anstieges des Säuregehalts. Überträgt man dies auf den KCC, so passt die Zuordnung der Tamboraeruption durch den KCH am besten. Alle Linien befinden sich jedoch nicht in der näheren Umgebung eines eindeutigen Peaks, welcher man dem Tambora zuschreiben könnte. Der Versuch, einen Vulkanpeak im ECM-Signal des auf dem Colle Gnifetti gebohrten Eisbohrkerns zu finden, ist anhand des Beispiels am KCC somit leider misslungen. Das ECM-Signal der alpinen Kerne ist zu sehr verrauscht um mit nur dieser Datierungsmethode eindeutig eine Vulkaneruption ausfindig zu machen.

Die in Kapitel 10.5 durchgeführte Filterung zeigt deutlich das Säureplateau für die einzelnen Kerne des CG. Beim CC und KCI sind diese am schlechtesten zu erkennen. Dies liegt beim KCI daran, dass seine Auflösung der Daten zu groß ist. Mehrfache Filterungen könnten hier ein besseres Ergebnis liefern. Beim KCH, KCS und KCC ist ein Grundlevel an Säure im oberen Drittel des jeweiligen Kerns eindeutig herausgefiltert worden. Weiterhin ist beim CC, KCH und KCC ein erneuter Anstieg im Signalverlauf mit einem geringen Grundniveau an Säure in der unteren Hälfte des Kerns zu erkennen. Dies passt gut mit den Erläuterungen von Kapitel 10.1 überein. Der KCS weist ein nicht so deutliches erneutes Ansteigen des Grundniveaus auf, so dass dieses bei der Filterung ausgesondert wird.

Die Betrachtung der basalen Schichten erbringt keine klare Erkenntnisse. Gemeinsamkeiten sind nicht oder nur subjektiv zu sehen. Das abgeflachte oder gar auf Null fallende Signal bei den Kernen CC, KCS und KCC könnte als ähnlicher Verlauf gedeutet werden. Jedoch ist diese Aussage sehr spekulativ.

In Abbildung 11.1 zeigt der Imaginärteil der Permittivität aus den DEP-Daten gut das Säure-Grundlevel im oberen Drittel des Kerns. Aus Abbildung 11.2 geht hervor, dass Peaks im Real- und Imaginärteil ein Minimum im ECM-Signal aufweisen können, begründet im zweiten Abschnitt des Kapitels 11.1. Es ist aber auch möglich, dass der qualitative Verlauf aller drei Signale derselbe ist, wie die grau hinterlegten Ausschnitte zeigen. Auffällig hier ist, wie auch der Vergleich der blauen Linien zeigt, dass die Peaks im ECM-Signal am stärksten ausgeprägt sind. Im Imaginärteil sind die Peaks weniger und im Realteil nur noch schwach zu erkennen.

13 Ausblick

In diesem Kapitel soll ein spezifischer Ausblick der Arbeit gegeben werden.

Analytischer Ausblick:

- Im Nachhinein könnten die Bruchstellen des KCC, über welche hinweg gemessen wurde, einer Korrektur unterzogen werden.
- Es wäre interessant, die ersten Zentimeter der Oberfläche einiger Runs abzusägen und zu schauen, ob der Signalverlauf derselbe ist.
- Die Messung einer hoch aufgelösten Dichteverteilung ist angebracht, damit die Umrechnung der Tiefe von m in m_{we} genauer wird.
- Aus einer logarithmischen Darstellung des ECM-Signals könnten aus den Minima gut datierte Stäube gefunden werden.
- Mit den jetzigen Datierungspunkten könnten die dafür notwendigen Akkumulationsraten bestimmt werden, welche nach dem Modell von Nye notwendig wären.
- Schlussendlich ist zu untersuchen, ob die Ergebnisse der Continuous Flow Analysis am KCC die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen vorläufigen Datierungspunkte bestätigen können.

Methodischer Ausblick:

- Es ist eine Überlegung wert, ob man bei einem Run, bestehend aus 2 oder mehreren Teilen, wobei auf jedem Einzeilstück ein Logging Marker angebracht ist, jedes Stück einzeln zu messen und getrennt an die jeweiligen Marker anzupassen.
- Eine genauere Auflösung bei der Datenerfassung ist mittels einer Einstellung in der Computer-Software möglich. Das Zeitintervall zwischen den Messungen kann auf $100 \mu s$ eingestellt werden. Dies bringt jedoch eine viel größere Datenmenge mit sich.
- In der Zukunft könnten bessere Messergebnisse mit der ECM-Bank des Umweltinstituts Heidelberg verwirklicht werden, wenn das Nullniveau bzw. der Beginn der Eisstücke besser bestimmt ist.

- Eine Verbesserung in der Hardware wäre ein neueres Wegmessgerät. Ein Wegmessgerät basierend auf Sensortechnologie bestimmt den Abstand zum fahrbaren Schlitten genauer und würde das störende Seil des Seilzug-Wegmessers beseitigen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lage des Colle Gnifetti im Monte Rosa Massiv in den Schweizer Zentralalpen zwischen der Signalkuppe und der Zumsteinspitze, entnommen aus [14]	3
2.2	Topografie vom CG mit Höhenlinien im 10 m-Schritten. Die Bohrungen sind als schwarze Punkte dargestellt. Die Pfeile stellen die oberflächlichen Fließlinien dar, entnommen aus [9]	4
2.3	Skizzenhafte Veranschaulichung einer möglichen Konstellation der Bohrung des KCC	5
4.1	Phasendiagramm der festen Zustandsformen von Wasser, entnommen aus [24]	7
4.2	Molekularorbital von Wassermolekülen, entnommen aus [26]	8
4.3	Hexagonale Kristallstruktur von I_h , entnommen aus [27]	8
4.4	<i>Defekte in der hexagonalen Kristallstruktur von Eis, entnommen aus [23]</i> .	9
4.5	Leitung von Protonen im Eiskristall durch Defekte, entnommen aus [23]	10
5.1	Nicht-lineare Abhängigkeit des ECM-Signals von der angelegten Hochspannung zwischen den beiden Elektroden. Zu betrachten sind die 3 unteren Verläufe für die „linke Achse“, entnommen aus [33]	13
5.2	Ersatzschaltbild für die ECM-Messung, entnommen aus [32]	14
5.3	Typischer Stromverlauf des ECM-Stroms, entnommen aus [32]	14
6.1	Darstellung des Radar-Profiles eines grönländischen 10km Kerns. Rechts daneben ist das ECM-Signal wiedergegeben, entnommen aus [35]	16
7.1	Schematischer Aufbau der Heidelberger ECM-Bank	18
7.2	Schematische Darstellung des Messvorgangs der ECM-Bank. Die Dreiecke im Eis sollen die Luftbläschen symbolisieren	18
7.3	Typische Lage der zu messenden Runs vor der Datenaufnahme	18
8.1	Graphische Darstellung von 40 Messungen eines Runs im zeitlichen Abstand von einer Minute. Der leere Bereich zwischen zwei dieser Messungen stellt eine längere Messpause von 90 Minuten dar	20
8.2	Graphische Darstellung von 8 der 40 Messungen für eine bessere Übersicht	21
8.3	Graphische Darstellung des aufgenommen ECM-Signals des KCC gegen die Tiefe in Meter	22
9.1	Durchschnittlicher Dichteverlauf der einzelnen Runs des KCC	23
9.2	Erste Umrechnungen der Tiefe von m in m _{we} aus der Gesamtdichte eines Runs und deren Interpolation mit Hilfe von Origin auf die ECM-Tiefen	24

9.3	Graphische Darstellung des aufgenommenen ECM-Signals des KCC gegen die Tiefe in we	24
10.1	Darstellung der vorhandenen ECM-Daten aller fünf Bohrkerne des Colle Gnifetti. Signal und Tiefe sind jeweils auf ihr Maximum normiert .	28
10.2	Genereller Trend des Säureverlaufs an CG-Kernen durch Ionenmessungen, entnommen aus [40]	30
10.3	Datierung des Tritiumpeaks 1963 (orange), des Übergangs sauer-alkalisch ca. 1954 (blau) und des Vulkanausbruches Tambora 1815 (rot). Alle durchgezogenen Linien sind fix datierte Horizonte, gestrichelte sind Schätzungen	33
10.4	Robuste Filterung der ECM-Datensätze der am CG gebohrten Eisbohrkerne mit der Software Autosignal	35
10.5	Basale Schichten der Kerne CC, KCS und KCC. Das ECM-Signal ist auf das jeweilige Maximum normiert und die rote Vertikale stellt das Ende der ECM-Daten dar	37
11.1	Grafischer Vergleich der DEP-Messungen mit der ECM-Messung. In der Darstellung des Realteils ist in rot der Dichteverlauf mit eingezeichnet	40
11.2	Zoom in einer Tiefe von 10 bis 14 m. Die roten Linien dienen als Vergleich der im Realteil gefundenen Peaks, die blauen Linien als Vergleich der im ECM-Signal gefundenen Peaks. Grau hinterlegt ist ein Bereich qualitativ gleichen Signalverlaufs	41
14.1	Linearer Fit zur Bestimmung einer Wegkalibrierung von mV in cm . .	52
16.1	Die ECM-Bank vor den Umbauten	57
16.2	Die ECM-Bank nach den Umbauten	57

Literatur

- [1] Fischer H. Räumliche Variabilität in Eiskernzeitreihen Nordostgrönlands - Rekonstruktion klimatischer und luftchemischer Langzeittrends seit 1500, 1997. Dissertation.
- [2] Delmas R. J. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Reviews of Geophysics*, 30(1):1–21, 1992.
- [3] Wolff W., Miners W.D., Moore J. C. and Paren J. G. factor controlling the electrical conductivity of ice from polar regions - a summary. *Journal of physical Chemistry B*, 101:6090–6094, 1997.
- [4] Hammer C.U. Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism, and radioechoes. *Journal of Glaciology*, 25:359–372, 1980.
- [5] Hammer C. U. Past volcanism revealed by Greenland ice sheet impurities. *nature*, 270(5637):482–486, 1977.
- [6] Hammer C. U. and others. Dating of greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust. *Journal of Glaciology*, 20(82):3–26, 1978.
- [7] Wagenbach D. *Environmental Record in Alpine Glaciers and Ice Sheets*. Dahlem Konferenzen, 1989.
- [8] Wagner S. Dreidimensionale Modellierung zweier Gletscher und Deformationsanalyse von eisreichem Permafrost, 1996. Dissertation.
- [9] Wagenbach D., Bohleber P. and Preunkert S. Cold, Alpine ice bodies revisited: what may we learn from their impurities and isotope content? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94:245–263, June 2012.
- [10] Hoelzle M., Darms G., Lüthi M.P. Evidence of accelerated englacial warming in the Monte Rosa area, Switzerland/Italy. *The Cryosphere*, 2011.
- [11] Preunkert S. Glazio-chemische Verhältnisse des Colle Gnifetti im Vergleich zu seiner regionalen Umgebung, 1994. Diplomarbeit.
- [12] Schäfer J. Rekonstruktion bio-chemischer Spurenkreisläufe anhand eines alpinen Eisbohrkerns, 1995. Diplomarbeit.
- [13] Wagenbach D. Environmental and Climate Record from High Elevation Alpine Glaciers. *ALPCLIM - Final Report*, 2001.
- [14] <http://f.hikr.org/files/1727691.jpg>. (Stand: 02.02.2014).

- [15] Jahn F. Einsatz der Continious Flow Analysis zur vorläufigen Datierung eines alpinen Eiskerns, 2006. Diplomarbeit.
- [16] Preunkert S., Wagenbach D., Legrand M., Vincent C. Col du Dôme (Mt Blanc Massif, French Alps) suitability for ice-core studies in relation with past atmospheric chemistry over Europe. *Tellus B*, 2000.
- [17] Hackel M. Dielectric Profiling of Alpine Ice Cores as Assistance for Ground Penetrating Radar, 2013. Diplomarbeit.
- [18] Decroly J.C., Gränicher H. V. and Jaccard C. Caractère de la conductivité électrique de la glace. *Helvetica Physica Acta*, 30:465–467, 1957.
- [19] Jaccard C. Étude théorique et expérimentale des propriétés électriques de la glace. *Helvetica Physica Acta*, 32:89–128, 1959.
- [20] Jaccard C. Thermodynamics of irreversible processes applied to ice. *Physik der kondensierten Materie*, 3:99–118, 1965.
- [21] Jaccard C. Four-point method for measuring the volume and surface conductivities of a thin sample. *Zeitschrift Angewandte Mathematik und Physik*, 17:657–663, 1966.
- [22] Petrenko V. F. Electrical properties of ice. *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, Special Report 93-20, august 1993.
- [23] Wilhelms F. Measuring the Conductivity and Density of Ice Cores, 1995. Diplomarbeit.
- [24] <http://www.fkp.tu-darmstadt.de/media/fkp/proffujara/fkpfujararesearch/fkpfujaraicephases.jpg>. (Stand: 28.01.2014).
- [25] Paterson W. *The Physics of Galciers*, pages 79–80. Pergamon Press, 3. edition, 1994.
- [26] http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/8/bc/chemische_grundlagen/bilder/wasser2.png. (Stand: 28.01.2014).
- [27] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/31/Cryst_struct_ice.png/300px-Cryst_struct_ice.png. (Stand: 28.01.2014).
- [28] Bernal J. D. and Fowler R. H. A Theory of Water and Ionic Solution, with Particular Referende to Hydrogen and Hydrxyl Ions. *The Journal of Chemical Physics*, 1:515–548, 1933.

- [29] Bjerrum N. Structure and properties of ice I. the position of the hydrogen atoms and zeropoint entropy of ice. *danske Vidensk Selsk. Skr.*, 27:1–57, 1951.
- [30] Scheiner S. und Nagle J. Ab initio molecular orbital estimates of charge partitioning between Bjerrum and ionic defects in ice. *Journal of Physics and Chemistry*, 87:4267–4272, 1983.
- [31] Schwander J., Neftel A., Oeschger H. and Stauffer B. Measurement of Direct Current Conductivity on Ice Samples for Climatological Applications. *Journal of Physical Chemistry B*, 87:4157–4160, 1983.
- [32] Werner M. Vergleichende Studie über die Verteilung vulkanogener Spurenstoffdepositionen in Nord-Ost-Grönland, 1995. Diplomarbeit.
- [33] Taylor K., Alley R., Fiacco J., Grootes P., Lamorey G., Mayewski P. and Spencer M. J. Ice-core dating and chemistry by direct-current electrical conductivity. *Journal of Glaciology*, 38(130):325–332, 1992.
- [34] Petrenko V. F. The effect of static electric fields on ice friction. *Journal of Applied Physics*, 76(2), July 1994.
- [35] Hempel L., Thyssen F., Gundestrup N., Clausen H.B., Miller H. A comparison of radio-echo sounding data and electrical conductivity of the GRIP ice core. *Journal of Glaciology*, 46(154):369–374, 2000.
- [36] Bohleber P. Ground-Penetrating radar assisted ice core research: The challenge of Alpine glaciers and dielectric ice properties, 2011. Dissertation.
- [37] Jung W. Hundertjährige Zeitreihen der Aerosoldeposition auf einem hochalpinen Gletscher, 1993. Diplomarbeit.
- [38] Bohleber P. Age distribution and $\delta^{18}O$ variability in a low accumulation Alpine ice core: perspective for paleoclimate studies, 2008. Diplomarbeit.
- [39] Armbruster M. Stratigraphische Datierung hoch-alpiner Eisbohrkerne über die letzten 1000 Jahre, 2000. Diplomarbeit.
- [40] Eisen O., Nixdorf U., Keck L., Wagenbach D. Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body. *Tellus B*, 55B:1007–1017, 2003.
- [41] *AutoSignal Users Guide*. 235 Walnut St., Suite 7, Framingham, MA 01702, 2003.

- [42] Konrad H., Bohleber P., Wagenbach D., Vinent C., Eisen O. Determining the age distribution of Colle Gnifetti, Monte Rosa, Swiss Alps, by combining ice cores, ground-penetrating radar and a simple flow model. *Journal of Glaciology*, 59(213):179–189, 2013.
- [43] Moore J. C., Wolff E. W. The Chemical Basis for the Electrical Stratigraphy of Ice. *Journal of Geophysical Research*, 97(B2):1887–1896, February 1992.

14 Anhang A.1

Wegkalibrierung

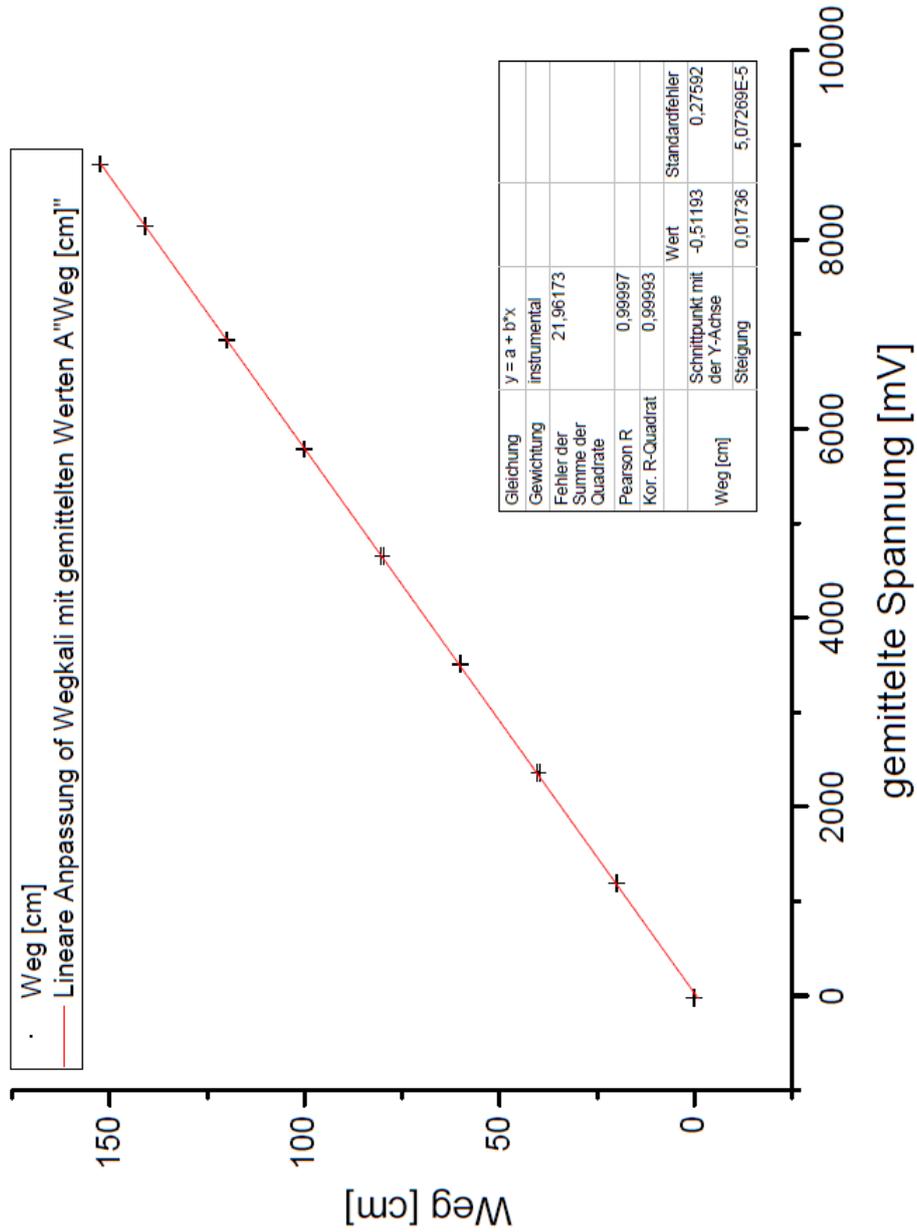


Abbildung 14.1: Linearer Fit zur Bestimmung einer Wegkalibrierung von mV in cm

15 Anhang A.2

Bash-Script

Vorbereitungen für die Ausführbarkeit des Scripts

Im Rahmen der Arbeit wird ein Bash-Script erstellt, das die Auswertung der aufgenommenen Daten automatisiert. Das Script ist für ein Linux Betriebssystem geschrieben und benötigt die freie Software Gnuplot. Diese muss auf dem Betriebssystem installiert sein.

Beim Messvorgang wird alle $100 \mu\text{s}$ der Weg und das ECM-Signal per Punktmessung in einer dreispaltigen Tabelle als Textdatei (.csv) gespeichert. Das Format der ersten fünf Zeilen der gewonnenen Datei sieht dabei immer gleich aus. Anschließend ist in der ersten Spalte chronologisch die Nummer der jeweiligen Punktmessung aufgelistet. In der zweiten Spalte sind die Werte der Wegmessung in Millivolt (mV) gegeben, welche zum Weg in cm korrelieren. In der dritten Spalte stehen die Werte der ECM-Messung in mV. Jeder Wert in der Tabelle wird in "" angeben und die Spalten werden jeweils durch ein Komma getrennt. Nach der Auflistung der eigentlichen Messung folgen nach einer Leerzeile weitere Informationen zur jeweiligen Messung. Abschließend folgen wieder vier Leerzeilen.

Um das Script ausführbar zu machen benötigt es noch einiger Vorbereitung. Auf dem Desktop muss ein Ordner mit dem Namen "Auswertung" angelegt werden mit einem Unterordner namens "Rohdaten". Zudem muss jeder Run nach folgendem Format benannt und im Unterordner "Rohdaten" gespeichert sein: Runk_m.csv. Für den Platzhalter k setzt man dabei die Nummer des Runs ein und für m den entsprechenden Buchstaben a,b,c etc.. Ist der Run nicht in mehrere Kleinbuchstaben unterteilt, so wird er unter dem Namen Runk.csv gespeichert. Ebenfalls müssen in einer .csv Datei in verschiedenen Spalten jeweils der Name der Runs (Spalte 1), die beim Messvorgang gemessenen Längen der Runs in cm (Spalte 2), die gemessenen Lagen der Markers von TOP in cm (Spalte 4) und die Lagen des Logging Markers von TOP in cm (Spalte 5) stehen. Die einzelnen Spalten sind dabei mit einem Semikolon zu trennen und die Datei muss sich im Order "Auswertung" befinden. Der Name der Datei ist im Script in Zeile 7 einzutragen. Der Name des Runs in Spalte 1 muss für Run15 beispielsweise nur als "15" benannt werden und für Run15_b als "15b". Weiterhin benötigt die Tabelle in Spalte 3 den Wert der Anpassung in mV um den gemessenen Marker auf den Logging Marker zu verschieben. Diese Spalte wird nach folgender Formel berechnet:

$$\textit{modification}(\text{mV}) = (57.6037 * \textit{Col}(E) + 29.4893) - (57.6037 * \textit{Col}(D) + 1259.74) \quad (15)$$

Es bietet sich an zuerst eine Excel-Tabelle zu erstellen und darin die Anpassung zu berechnen. Danach kann die Tabelle dann als .csv Datei gespeichert werden.

Im Script ist noch einzutragen wie viele Runs es insgesamt gibt und in wie weit die Runs nochmal in Kleinbuchstaben unterteilt sind. Es muss also die obere Grenze von k und m

definiert werden. Dabei ist m als ganze Zahl anzugeben, welche über ein Array intern im Script die ersten Buchstaben des Alphabetes durchläuft. Wird m auf 0 gestellt, so entspricht das einem a. Wird m auf 23 gesetzt, so werden alle Runs bis zum Kleinbuchstaben z durchlaufen.

Abschließend sind nur noch die Scripte "bash-ecm" und "meanvalue.awk" in den Ordner "Auswertung" zu verschieben.

Sind alle oben genannten Vorbedingungen erfüllt, so wertet das Script die Daten mit nur einem Knopfdruck aus. Die Rohdaten bleiben dabei unverändert! Jede Zwischenspeicherung wird dabei als neues file gespeichert und nach Durchlauf des Scripts wieder gelöscht.

Arbeitsvorgänge im Script

Aus den aufgenommenen Werten der Luftmessung (bevor die beiden Elektroden auf das Eis treffen) wird ein Untergrund gemittelt und von allen ECM-Werten abgezogen. Alle entstandene und schon vorher vorhandene negativen ECM-Werte werden auf Null gesetzt. Dann werden die Runs auf ihre gemessene Länge zugeschnitten. Jeder Run wird anschließend mit der Software Gnuplot grafisch dargestellt und im, vom Script neu erstellten Unterordner "Grafische_Darstellung_der_Einzelruns" des Ordners "Auswertung", als .jpeg Datei gespeichert. Die Darstellung der Diagramme ist auf die Länge des jeweiligen Runs angepasst.

Für einen zusammenhängenden Datensatz des Eisbohrkerns passt das Script den gemessenen Marker so an, dass er auf dem Logging Marker liegt. Es werden quasi die auf ihre Länge zugeschnittenen Runs so auf die Logging Marker verschoben, dass sie als zusammenhängender Datensatz den gesamten Kern repräsentieren. Als Resultat wird eine 2-spaltige .csv Datei erstellt. In der ersten Spalte stehen die Tiefen in m und in der zweiten das ECM-Signal in mV. Getrennt sind die Spalten durch ein Semikolon. Der Name der erstellten Datei des gesamten Datensatzes ist "gesamterDatensatz.csv" und wird im Ordner "Auswertung" gespeichert. Zum Schluss wird in selben Ordner der gesamte ECM-Verlauf durch Gnuplot als grafische Darstellung im .jpeg Format gespeichert.

Am Ende dieser Arbeit ist eine DVD beigelegt, auf welche sowohl das Bash-Script als auch alle weiteren wichtigen Tabellen und Daten, welche im Rahmen dieser Arbeit relevant waren, gespeichert sind.

```

"Start Date:","dd.mm.yyyy"
"Start Time:","hh:mm:ss"
"Sample Interval:","100 ms"

"Sample Number","ChA Voltage (mV)","ChB Voltag (mV)","Memo"
"1","778,6","25,7",""
"2","794,0","15,4",""
"3","773,5","20,5",""
"4","768,4","20,5",""
"5","768,4","15,4",""
"6","778,6","10,3",""
"7","768,4","-10,3",""
"8","783,8","20,5",""

"Stop Date:","dd.mm.yyyy"
"Stop Time:","hh:mm:ss"
"Total Samples:","8,000","8,000"
"Maximum (mV):","794,0","25,7"
"Minimum (mV):","768,4","-10,3"
"Missed Samples:","0,000","0,000"

```

Beispielhafte Darstellung einer Rohdatei eines aufgenommenen Runs

```

Drilling Run;Length (cm);anpassung (mV);Marker TOP run (cm);Marker (cm)
1;39;8216,76;36;200
2;75;10722,52;72,5;280
3;56,5;15042,79;47,5;330
4a;59;18671,83;54,5;400
4b;51,5;22081,97;45,3;450
5a;88;25134,96;82,3;540
5b;16,5;30192,57;14,5;560
6b;78;31200,63;67;630
7;87;35705,24;78,8;720
8;87;40820,45;80;810

```

Beispielhafte Darstellung der Tabelle im .csv Format mit den wichtigsten Parametern zur Ausführbarkeit des Scripts

16 Anhang A.3

Arbeiten an der Heidelberger ECM-Bank

In einem siebenwöchigen Projektpraktikum am Institut für Umweltphysik in der Arbeitsgruppe "Klimaarchiv Eis" wurde die ECM-Bank in Stand gesetzt und für den mobilen Einsatz im Eislabor erweitert. Zudem wurden Messungen zur Wegkalibrierung durchgeführt und die Datendarstellung angepasst.

Aufgabe des siebenwöchigen Projektpraktikums am IUP war es, die ECM-Bank der Arbeitsgruppe "Klimaarchiv Eis" wieder in Betrieb zu nehmen. Um sich zuerst eine Übersicht über die eigentliche Messaufnahme der ECM-Bank zu verschaffen, wurde für eine Testmessung ein Halbzylinder aus Plexiglas, auf den ein Blatt Papier mit darauf gezeichneten Graphitstreifen aufgeklebt wurde, verwendet. Die Messung ergab, dass die ECM-Bank prinzipiell messtauglich war, sodass direkt mit der Mobilisierung der ECM-Bank begonnen werden konnte.

Im Keller des IUP fand sich die Bodenkonstruktion, auf der die ECM-Bank wohl früher bei Messungen stand. Mit 4 Flügelschrauben wurde die ECM-Bank nun fest mit der Bodenkonstruktion verschraubt. Flügelschrauben wurden deshalb gewählt, um die Bank bei Bedarf wieder schnell von ihrer Unterlage lösen zu können. Weiter wurden an die Bodenkonstruktion 4 Lenkrollen befestigt, um die ganze Konstruktion fahrbar zu machen. Zwei davon sind mit Feststellern versehen um einen festen Stand der Bank zu garantieren. Mit der Bodenkonstruktion bot sich jetzt auch genügend Platz um die einzelnen Messapparaturen der ECM-Bank fest installiert transportieren zu können. Dazu zählte neben der Wegmessanzeige auch das Hochspannungsnetzgerät und der A/D-Wandler. Hierzu wurde eine praktische Hängekonstruktion unterhalb der Bank am Wagen befestigt. Die Länge der Hängekonstruktion wurde extra großzügig gewählt um Platz für weitere Messgeräte zu bieten. Des Weiteren wurde eine Reling an einer Längsseite des Wagen angebracht, die als Kabellauf dient. Das Kabel für die Spannungsaufnahme der beiden Pinsel, welches am fahrbaren Schlitten der Bank befestigt ist und beim Messvorgang mitgezogen wird, hängt nun nicht mehr im Weg beim Messen und es besteht nicht mehr die Gefahr, dass es sich irgendwo verhakt (dies könnte Auswirkungen auf die Wegaufnahme haben). Die mobile Bank kann nun für die Messung im Eislabor bequem durch eine Person bedient werden.

Als nächstes standen Verbesserungen zur Messaufnahme an. Ein Problem bestand darin, dass wenn die Pinsel zu tief eingestellt waren, es beim Gleiten über den Motorblock zum Funkenüberschlag kam, der den Motor beschädigen kann. Abhilfe brachte die Anbringung eines „Stoppers“, der es zwar dem beweglichen Schlitten erlaubte komplett über den Bereich der Eiskernmessung zu fahren, aber verhinderte, dass der Schlitten mit den Pinseln über den Motorblock fährt. Um für einen besseren Halt der Eisstücke bei der Messung (vor allem beim Einsatz des Mikrotoms) zu sorgen, wurde eine feste Metallplatte mit Gummiüberzug an einem Ende der Vorrichtung für die Eiskerne installiert. Eine weitere verschiebbare Plexiglas-Konstruktion dient als zweiter Anschlagpunkt um die Eisproben zu fixieren. Der Gum-

miüberzug und das Plexiglas verhindern dabei einen Funkenüberschlag. Mit laminierten Schildern wurde die TOP Richtung mit Pfeilen und der Aufschrift „TOP“ gekennzeichnet. Zudem wurde eine Skala angebracht um Merkmale der Runs sofort loggen zu können.



Abbildung 16.1: Die ECM-Bank vor den Umbauten

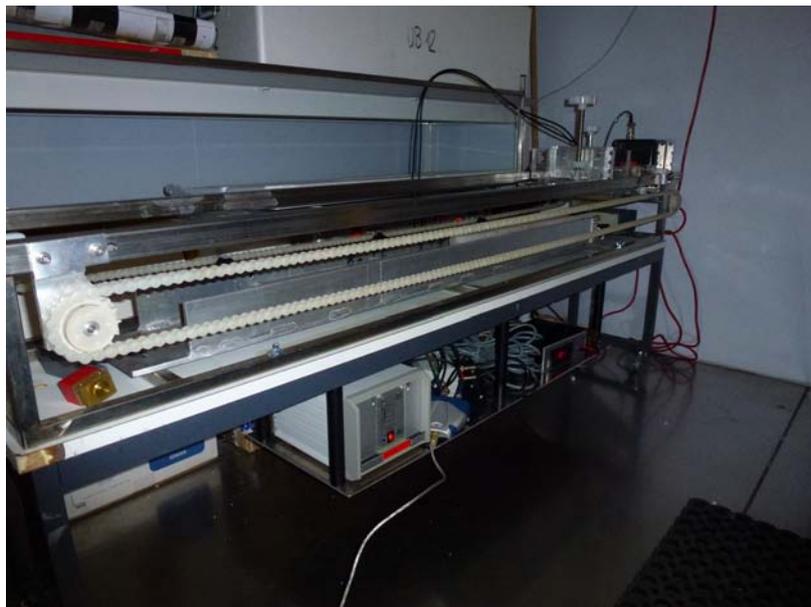


Abbildung 16.2: Die ECM-Bank nach den Umbauten

17 Anhang A.4

Versuch der Herstellung eines Laborstandards

Weiterhin wurde während des Projektpraktikum ein Versuch gestartet einen Laborstandard herzustellen. Das ECM-Signal sollte anhand von reproduzierbaren, künstlichen Eisproben bestimmten pH-Werten zugeordnet werden. Hintergrund war, dass das ECM-Signal nur vom Säuregehalt abhängig ist und dieser äquivalent zum pH-Wert ist. Da die Aufnahme des ECM-Signals zum Auffinden von Vulkanhorizonten benutzt wird, wurde für das Erstellen des Laborstandards eine Lösung mit Schwefelsäure gewählt. Mit ursprünglich 0.5 molarer H_2SO_4 -Lösung wurde mit VE (voll entsalzenes) Wasser eine 0.01 molare Lösung erstellt. Das VE Wasser wurde gewählt, da dieses reiner ist als Leitungswasser und somit die reale Mischung der Lösung den theoretischen näher kommt. Beim Korrekturmessen, ob unsere Lösung die theoretische bestimmte Konzentration hat, ist aufgefallen, dass dem nicht so war. Auch mehrere Wiederholungsversuche blieben leider ohne Erfolg. Das VE-Wasser reagiert wohl zu sehr mit der Luft der Umgebung und kann deshalb nicht als Flüssigkeit mit einem pH-Wert von 0 betrachtet werden. Einen Laborstandard aus einer H_2SO_4 -Lösung zu erstellen ist fehlgeschlagen.

Selbst wenn man eine Lösung bestimmter Konzentration hätte, so ist nicht gewährleistet, dass die Ionen im Eis isotrop gefrieren. Der Schmelzpunkt von Wasser liegt mit 0°C unterhalb der von Schwefelsäure mit $10,38^\circ\text{C}$. Das Wasser gefriert von außen nach innen und drängt dadurch die Säure ins Zentrum. Die gefrorene Lösung ist somit anisotrop und zur Verwendung als reproduzierbarer Laborstandard nicht geeignet.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 03.03.2014,