

Department of Physics and Astronomy
University of Heidelberg

Bachelor Thesis in Physics
submitted by

Josef Lier

born in Würzburg (Germany)

2014

**Messung der dielektrischen Permittivität
eines alpinen Firnkerns im MHz-Bereich
mittels eines Koaxialzellensetups**

This Bachelor Thesis has been carried out by Josef Lier at the
Institute of Environmental Physics in Heidelberg
under the supervision of
Prof. Olaf Eisen

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es durch Messung des Realteils der relativen Permittivität des alpinen Firnkerns KCO mit der Koaxialzellenmethode zu überprüfen, wie repräsentativ die am selben Kern im kHz-Bereich vorgenommenen DEP-Messungen für den GPR-MHz-Bereich sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei erstmals das zur Eisbearbeitung konzipierte Bearbeitungssetup zur Herstellung der koaxialen Probengeometrie für einen Firnkern verwendet und bewertet. Für die damit hergestellten Proben wurden mit dem Koaxialsetup in einem Frequenzbereich von 0.3 MHz bis 1.0 GHz die Streuparameter gemessen und daraufhin mittels eines Inversionsalgorithmus aus diesen die Permittivität bestimmt. Anschließend wurde zur Korrektur der Luftspalte zwischen Probe und Zelle rechnerisch eine Gap Correction durchgeführt. Es stellt sich heraus, dass durch das Setup zur Herstellung der Proben auch für Firn die koaxiale Geometrie erreicht werden kann, allerdings unter erheblichen Zeitaufwand (ca. 2 h). Der Präzision sind bei der Probenherstellung aufgrund der Brüchigkeit des Firns Grenzen gesetzt, die darüber hinaus auch eine standardmäßige Bearbeitung langer Eiskerne zu zeitaufwendig machen. Für die in einem Tiefenbereich von 8.00 m bis 25.86 m und dem dazu korrespondierendem Dichteintervall zwischen $0.527 \frac{g}{cm^3}$ und $0.814 \frac{g}{cm^3}$ aufgenommenen Werte zeigt sich, dass die Messung der Koaxialmethode mit den DEP-Daten sowohl im relativen Verlauf als auch für den Absolutwert innerhalb der Unsicherheiten übereinstimmt. Im Rahmen der bestimmten experimentellen Unsicherheiten konnte kein systematischer Unterschied zwischen DEP- und Koaxialzellenmessungen festgestellt werden. Sollte ein dispersionsbestimmter Unterschied im Realteil bestehen, so ist dieser kleiner als ± 0.047 .

Abstract

The present thesis aims at investigating the real part of the dielectric permittivity of an alpine ice core at radio-frequencies by means of a coaxial transmission line cell. Due to previous deployment of dielectrical profiling on the same core, information of the dielectric properties at kHz-frequencies is readily available. For the first time the preparation setup, which was originally designed for the mechanical adjustment of ice samples is now deployed on firn. Due to the brittle mechanical properties of firn, a new assessment of the suitability of the setup for this purpose was necessary. For the crafted samples scattering parameters were measured with the coaxial transmission line cell. The applied frequency range encompasses from 0.3 MHz to 1.0 GHz. Based on the measured S-parameters, the permittivity is inferred by means of an inversion algorithm. A gap correction was performed to adjust the air gap between the sample holder and the firn sample. The suitability of the setup for mechanical sample adjustment was successfully demonstrated. However, based on the brittle nature of firn crafting samples with high precision is limited. Hence, achieving the best possible geometry with the present setup is highly time consuming (2 h per sample). The real part in permittivity at a depth of 8.00 m to 25.86 m and the corresponding density range of $0.527 \frac{g}{cm^3}$ to $0.814 \frac{g}{cm^3}$ from DEP and coaxial cell measurements is found in agreement within the estimated uncertainty. If a remaining frequency dependent effect is present it should be below ± 0.047 .

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen	6
2.1	Dielektrische Permittivität	6
2.2	Permittivität von Eis	7
2.3	Debyeähnlicher Relaxationsmechanismus	7
2.4	Permittivität von Firn	8
2.4.1	Bestimmung der Permittivität aus der Dichte nach Kovac	8
2.4.2	Bestimmung der Permittivität durch eine Mischformel nach Looyenga	8
2.5	Frequenztransfer zwischen GPR und DEP	9
2.6	Probeentnahmegebiet und Firneigenschaften am Colle Gnifetti	9
2.7	Bisher bekannte Eigenschaften des KCO-Kerns	12
2.8	Permittivitätsbestimmung mittels des IUP-Koaxialzellensetups	12
2.8.1	Bestandteile des Setups	12
3	Methodik	14
3.1	Anforderungen an die Probe	14
3.1.1	Maße des Probenhalters der Koaxialzelle	14
3.2	Probenherstellung	14
3.2.1	Auswahlkriterien für die Proben	15
3.2.2	Dokumentation des Kerns	15
3.2.3	Arbeitsablauf zur Herstellung der Proben	16
3.2.4	Probleme der Probenherstellung und Verbesserungsvorschläge	18
3.3	Der Messaufbau	21
3.4	Ablauf der Messung	21
3.5	Ermitteln der Permittivität aus den S-Parametern mittels <i>deimos</i>	24
4	Ergebnisse	24
4.1	Gap Correction nach Baker-Javis für Außen- und Innenleiter	24
4.2	Bestimmung der apparative Unsicherheit des Koaxialsetups über den POM-Laborstandard	29
4.3	Tiefenunsicherheit der Koaxialmessung und des DEPs	29
4.4	Fehler der DEP-Daten	30
4.5	Bestimmung der Permittivität über die gemessene Dichte der Proben (Kovac, siehe Grundlagen)	31
5	Diskussion	36
5.1	Vergleich der Koaxial- und DEP-Daten	36
5.1.1	Relativer Verlauf	36
5.1.2	Große Abweichungen am Peak	36
5.2	Offset zwischen Koaxialdaten und DEP-Daten	38
5.3	Imaginärteil	38
5.4	Kovac-Wert	38

5.5	Statistische Verteilung der DEP-Werte im Intervall	38
5.5.1	Fehlende Längenkorrektur	40
5.5.2	Parameter im <i>jobfile</i>	40
5.5.3	Fazit: Bearbeitungssetup	41
5.5.4	Fazit: Messungen	42
5.6	Ausblick	42
	Literaturverzeichnis	45
	Anhang	47

1 Einleitung

GPR (*ground penetrating radar*) ist ein in der Glaziologie inzwischen standardmäßiges Verfahren um polare Eisschilde auf ihre innere Struktur zu untersuchen. Das Verhalten von elektromagnetischen Wellen in Eis wird maßgeblich durch die dielektrische Permittivität des Eises bestimmt. Dadurch ist ein tiefes Verständnis dieses Parameters für die Interpretation der GPR-Daten von entscheidender Bedeutung.

Die Messung an Eiskernen ermöglicht das Erstellen eines vertikalen Profils der Permittivität. Dafür wird routinemäßig das dielectrical profiling (DEP) angewandt, welches die Permittivität in einer Tiefenaufösung von 0.5 cm im kHz-Bereich misst [Wilhelms, 2005][Wilhelms, 1996]. Das Wissen über das Verhalten von elektromagnetischen Wellen in Eis und Firn basieren hauptsächlich auf Experimenten, die bei Frequenzen im kHz- und im GHz-Bereich stattfanden [Fujita, 2000][Bohleber et al., 2012(1)].

GPR arbeitet jedoch mit Radarwellen, also im MHz-Bereich und hierzu gab es bislang wenige Messungen der Permittivität, die zusätzlich mit großen Unsicherheiten behaftet waren [Fujita et al., 2000][Bohleber et al., 2012(2)]. Außerdem war nicht bekannt ob es verbleibende geringe Dispersion im MHz-Bereich gibt. Die Unsicherheit der Daten im MHz-Bereich kann bei der Interpretation von GPR-Daten in der Tiefenaufösung und somit in der Synchronisation von Eiskernen einen Fehler von einigen Prozent verursachen [Bohleber, 2011].

Bohleber et al. [2012(1)][2012(2)] konnte anhand von Messungen an Eis mit dem am IUP in Heidelberg entwickelten und von Hoppe und Bohleber für präzise Eismessungen umgebauten Koaxialzellensetup zeigen, dass beim Transfer der Frequenzbereiche noch ein dispersiver Effekt zu erwarten ist. Dieses Koaxialzellensetup ermittelt über die Messung von Streuparametern (S-Parametern) und mithilfe eines Inversionsalgorithmus die Permittivität von Proben. Das Messsystem mit einer Koaxialzelle hat den Vorteil, dass damit im MHz-Bereich über ein großes Frequenzspektrum gemessen werden kann. Bei den Untersuchungen mit der Koaxialzelle zur Permittivität von Eis im MHz-Bereich von Bohleber et al. [2012(1)] lag der Fokus vor allem auf künstlichem Eis. An realen Proben wurden nur wenige Versuche gemacht.

Ein direkter Vergleich einer Koaxialmessung mit einer DEP-Messung stand noch aus. Am IUP in Heidelberg war für solch eine Vergleichsmessung kein polarer Eiskern vorhanden, jedoch gibt es den KCO Bohrkern vom Colle Gnifetti. Einem alpinen Gletscher im Monte Rosa Massiv, der aufgrund seiner speziellen glaziologischen Eigenschaften (niedrige Akkumulationsrate und tiefe Firntemperatur) Ziel mehrerer Eiskernbohrungen war [Wagenbach et al., 2012][Bohleber et al., 2013].

Für den KOC-Kern bestehen bereits DEP-Messungen (bei 250 kHz) und nun soll zum ersten Mal mit dem Koaxialsetup ein Vergleich des gleichen Kernmaterials erfolgen. Hierbei wird auch zum ersten mal sowohl vom Bearbeitungssetup als auch vom Koaxialzellensetup extensiver Gebrauch gemacht um einen Firnkern zu vermessen.

Die folgende Arbeit besteht im Wesentlichen aus drei Teilen. Im ersten Schritt werden aus dem Bohrkern geeignete Proben präpariert. Die besondere Herausforderung besteht hierbei in der prinzipiellen Schwierigkeit der Eisbearbeitung nahe des Schmelzpunktes und der Anforderung hoher Präzision an die Proben. Von besonderem Interesse sind Kernab-

schnitte mit Eislagen, Eislinsen oder Staublagen.

Im nächsten Schritt werden mit dem Koaxialsetup die S-Parameter der jeweiligen Probe gemessen, aus welchen mittels des Programms *deimos* der Realteil der relativen Permittivität bestimmt wird [Oswald et al., 2006].

Anschließend wird eine Gap Correction zur Korrektur von Luftspalten zwischen Probe und Zelle durchgeführt [Baker-Javis et al., 2004]. Zuletzt werden die Unsicherheiten der Messungen bestimmt und ein Vergleich der Koaxialmessungen mit den DEP-Werten vorgenommen.

2 Grundlagen

2.1 Dielektrische Permittivität

Die Wechselwirkung von elektromagnetischen Feldern mit Materie wird durch die makroskopischen Maxwellgleichungen beschrieben [Jackson, 1962].

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \nabla \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad \nabla \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

Die dielektrische Permittivität ε beschreibt den Zusammenhang zwischen einem äußeren elektrischen Feld \mathbf{E} der elektrischen Flussdichte \mathbf{D} in einem Medium, wobei \mathbf{J} die Stromdichte ist. Dieser Zusammenhang kann für kleine Felder als linear angenommen werden und gilt analog für magnetische Felder \mathbf{H} , wobei μ die magnetische Permeabilität und \mathbf{B} die magnetische Flussdichte ist.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.4)$$

Im Weiteren wird nur die dielektrische Permittivität betrachtet, da Eis im Allgemeinen als nicht magnetisch angesehen werden kann [Bohleber, 2011]. Nur für isotrope Medien ist ε eine skalare Größe. Für anisotrope Medien ist ε eine Tensor zweiter Stufe [Fujita et al., 2000].

Mikroskopisch beschreibt die dielektrische Permittivität die Reaktion der atomaren oder molekularen Ladungsdichte auf ein äußeres Feldes. Die Ladungsdichte erfährt eine Verzerrung und es kommt im Medium zu einer elektrischen Polarisation, die dem äußeren Feld entgegenwirkt und es abschwächt [Jackson, 1962].

Gewöhnlich wird die dimensionslose relative Permittivität angegeben d.h. $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, wobei ε_0 die Permittivität des Vakuums ist. Im Allgemeinen ist die relative Permittivität eine komplexe Größe, die von der Frequenz abhängig ist.

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) + i\varepsilon_r''(\omega) \quad (2.5)$$

Im Folgenden ist $i = \sqrt{-1}$ und $\omega = 2\pi f$. Über das Ohm'sche $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ Gesetz und die Maxwellgleichungen kann eine effektive Permittivität eingeführt werden, die die ohm'sche Leitfähigkeit beinhaltet.

$$\varepsilon_{r_{eff}}(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) + i(\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}) \quad (2.6)$$

Detaillierte Ausführungen finden sich bei Jackson [1962] und Bohleber et al. [2012(2)]. Folgende Polarisationsmechanismen finden bei Eis statt:

- Verschieben der Ladungsverteilung: Die atomare oder molekulare Ladungsverteilung wird durch ein äußeres Feld verschoben.
- Verzerrung der Moleküle: Das äußere elektrische Feld führt zu Polarisierungseffekten mit den H_2O -Molekülen und verzerrt deren Struktur. Dies kann der Verschiebung der elektronischen Ladungsverteilung entgegenwirken. Dieser Effekt kann Wechselfeldern bis 10^{11} Hz folgen.
- Orientierungspolarisation: Die permanente Dipole von H_2O wollen sich nach dem äußeren Feld ausrichten. Der Effekt geht auf Defekte im Kristallgitter zurück. Dieser Polarisierungseffekt dominiert bei niedrigen Frequenzen.
- Defektwanderung: Das Wandern von Defekten im Kristallgitter führt zu ohm'scher und dielektrischer Leitfähigkeit.

2.2 Permittivität von Eis

Die komplexe Permittivität von Eis kann mittels eines Debyemodells beschrieben werden. Dabei werden zwei Grenzfälle betrachtet. Einmal der Fall für ein statisches Feld, dem durch den Parameter ε_{static} Rechnung getragen wird und einmal der Fall für ein hochfrequentes Feld, der durch den Parameter ε_{∞} beschrieben wird. Mithilfe dieser beiden Größen und der Relaxationsfrequenz f_r lässt sich die relative Permittivität von Eis mit der Formel

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{static} - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (2.7)$$

berechnen. Real- und Imaginärteil können dann zu folgenden Formeln abgeleitet werden:

$$\varepsilon_r'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{static} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon_r''(\omega) = \omega\tau \frac{\varepsilon_{static} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.8)$$

wobei $\tau = \frac{1}{2\pi f_r}$ die Relaxationszeit und f_r die Relaxationsfrequenz ist und $\omega = 2\pi f$ [Fujita et al., 2000]. Typische Werte der Parameter für Eis sind $\varepsilon_{static} = 100$, $\varepsilon_{\infty} = 3.17$ und $f_r = 10$ kHz [Bohleber et al., 2012(2)]. Für Firn als Gemisch aus Eis und Luft erwartet man den Wert für ε_{∞} durch den Luftanteil ($\varepsilon_{Luft} < \varepsilon_{Eis}$) niedriger.

Der Imaginärteil der relativen Permittivität ε_r'' auch Verlustfaktor genannt, beschreibt die dispersiven Verluste, die durch Umwandlung von elektrischer in thermische Energie bei Wechselfeldern und ohm'sche Verluste, die auch bei statischen Feldern auftreten [Bohleber, 2011].

2.3 Debyeähnlicher Relaxationsmechanismus

Der Relaxationsmechanismus ähnelt der Debyerelaxation und kann mit dem Debyemodell beschrieben werden. In Abb. 2.1 ist der Permittivitätsverlauf für Eis eines solchen Modells dargestellt. Für hohe Frequenzen ist der Realteil annähernd konstant und somit gilt $\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_{\infty}$. Für Frequenzen über der Relaxationsfrequenz fällt der Imaginärteil auf einen sehr kleinen Wert ab (typischerweise 10^{-2}) [Bohleber, 2011]. Somit ist die relative Permittivität im MHz-Bereich überwiegend durch den Realteil bestimmt. Für den MHz-Bereich wird die Permittivität vom Relaxationsverhalten der permanenten Dipole des H_2O dominiert.

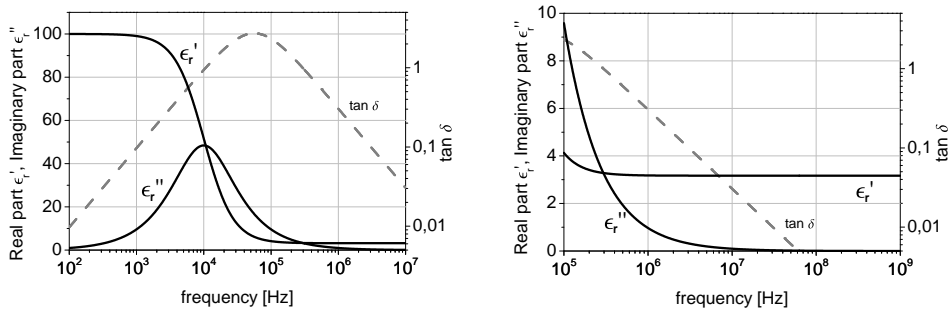


Abbildung 2.1: **Debyemodell der Permittivität für Eis:** Verlauf des Realteils ϵ_r' und des Imaginärteils ϵ_r'' der Permittivität nach dem Debyemodell. Die grau gestrichelte Linie zeigt die Verlusttangente $\tan \delta = \tan \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$. Wie man sieht ist der Imaginärteil im Frequenzbereich, der in dieser Arbeit verwendet wurde (0.3 MHz - 1.0 GHz) sehr klein [Bohleber, 2011].

2.4 Permittivität von Firn

Firn ist ein Gemisch aus Eis und Luft [Wilhelms, 2005] und bedarf somit bei der Permittivität einer gesonderten Betrachtung. Hierzu gibt es sowohl empirische Ansätze wie von Kovac als auch theoretische Ansätze wie von Looyenag und Wilhelms.

2.4.1 Bestimmung der Permittivität aus der Dichte nach Kovac

Die Zusammensetzung von Schnee, Firn und Gletschereis kann als ein Gemisch aus Eis und Luft betrachtet werden. Je nach Volumenanteil der beiden Komponenten resultiert das in einer unterschiedlichen Dichte ρ . Kovac beschreibt den Zusammenhang von Permittivität und Dichte über folgende Formel, wobei sein Ergebnis auf empirischen Untersuchungen basiert [Kovac et al., 1995].

$$\epsilon_{r_{Kovac}}' = (1 + 0.845\rho)^2 \quad (2.9)$$

2.4.2 Bestimmung der Permittivität durch eine Mischformel nach Looyenga

Die Beschreibung von Looyenga [1965] fundiert auf einer heterogenen Mischrechnung, die für Materialien mit unterschiedlichen Komponenten benutzt werden kann und somit für Firn geeignet ist. Dichter Firn wird als Luftmatrix in einer Eismatrix und wenig dichter Firn als Eismatrix in einer Luftmatrix beschrieben. Diesen Zusammenhang drückt sich über ein Powerlaw aus. Bei Wilhelms [2005] ist beschrieben, dass sich die Kubikwurzel der Permittivität eines Gemischs aus der Summe der Kubikwurzeln der Permittivitäten der Konstituenten darstellt.

$$\epsilon_F' = (\nu_I(\epsilon_I'^{1/3} - \epsilon_A'^{1/3}) + \epsilon_A'^{1/3})^3, \quad (2.10)$$

wobei die Indizes F, I und A für Firn, Ice und Air stehen und ν_I der Volumenanteil des Eises ist [Looyenga, 1965][Wilhelms, 2005]. Bei Wilhelms [2005] wird die Permittivität von Firn mit Formel (2.10) und Formel (2.5) über die DECOMP-Formel berechnet. DECOMP

steht für *density and conductivity mixed permittivity*.

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{F^*}} = 1 + \left(\frac{\rho_F}{\rho_I}\right) \left(\sqrt[3]{\varepsilon'_I - i\varepsilon''_I} - 1\right) \quad (2.11)$$

Hierbei steht ε_{F^*} für die komplexe Permittivität des Firns, ρ_F und ρ_I für die Dichte des Firns beziehungsweise des Eises und ε'_I und ε''_I für den Realteil und Imaginärteil der Permittivität des Eises. Formel (2.11) ist für die meisten Anwendungen invertierbar. Die Dichte des Firns und die Permittivität des Eises kann dann mittels DEP (*dielectric profiling*) in hoher räumlicher Auflösung bestimmt werden [Wilhelms, 2005].

Neben der Dichte ist die Permittivität von Eis und Firn auch von der Temperatur und dem Säuregehalt abhängig. Mit steigender Temperatur sinkt die relative Permittivität, da durch die größere Beweglichkeit der Moleküle ihre Polarisierbarkeit durch ein äußeres Feld abnimmt [Fujita et al., 2000]. Der Säuregehalt des KCOs ist nicht bekannt, wirkt sich aber vor allem auf den Imaginärteil aus. Durch die Ionen, die durch Aerosol und Vulkanausbrüche mit dem Schnee abgelagert werden, steigt die Leitfähigkeit und damit der Imaginärteil. Der Realteil wächst linear mit der Säurekonzentration, wobei der Gradient selbst frequenzabhängig ist [Fujita et al., 2000].

2.5 Frequenztransfer zwischen GPR und DEP

GPR steht für Ground Penetrating Radar und ist ein standardmäßig angewandtes Verfahren um Bodenstrukturen aber auch Eisschilde zu untersuchen. Dabei werden Radarwellen (MHz-Bereich) in das Eis gesendet und an internen Reflexionshorizonten reflektiert, worüber sich Rückschlüsse auf die innere Struktur des Eises ziehen lassen [Jepsen, 2010][Eisen, 2003]. Dielektrische Messungen an Eiskernen erfolgen mittels des DEP-Verfahrens, welches im kHz-Bereich arbeitet. Im folgenden Plot (Abb. 2.2) ist zu sehen, dass zwischen dem kHz- und dem MHz-Bereich für die Permittivität noch ein geringer dispersiver Effekt zu erwarten ist, welcher die Interpretation der GPR-Daten mit den Erkenntnissen über die Permittivität aus den DEP-Daten beeinflusst.

2.6 Probeentnahmegebiet und Firneigenschaften am Colle Gnifetti

Der in dieser Arbeit untersuchte KCO-Bohrkern stammt vom Gletscher Colle Gnifetti (Monte Rosa, 4450 m ü. NN). Dieser Gletscher hat in sofern eine Sonderstellung in den Alpen weil es ein kalter Gletscher ist und er eine Akkumulationsrate (0.3 - 1.2 m Wasseräquivalent pro Jahr [Hoelzle et al., 2011]) hat, die niedrig genug um ihn für Langzeitaufzeichnungen (jenseits der instrumentellen Periode) durchzuführen. Die Firntemperatur beträgt je nach Tiefe etwa -14°C bis -10.38°C [Hoelzle et al., 2011]. Es bilden sich somit kaum Schmelzwasser und damit sind wenige Eislagen in den Bohrkernen zu finden. Des Weiteren weist der Gletscher mit 0.3 bis 1.2 m Wasseräquivalent a^{-1} eine sehr geringe Akkumulationsrate auf [Hoelzle et al., 2011]. Die geringe Akkumulationsrate macht den Colle Gnifetti für weit zurückliegende Paläoklimarekonstruktionen interessant [Bohleber et al., 2013]. Seit über 30 Jahren werden Eiskerne an diesem Gletscher gebohrt [Hoelzle et al., 2011].

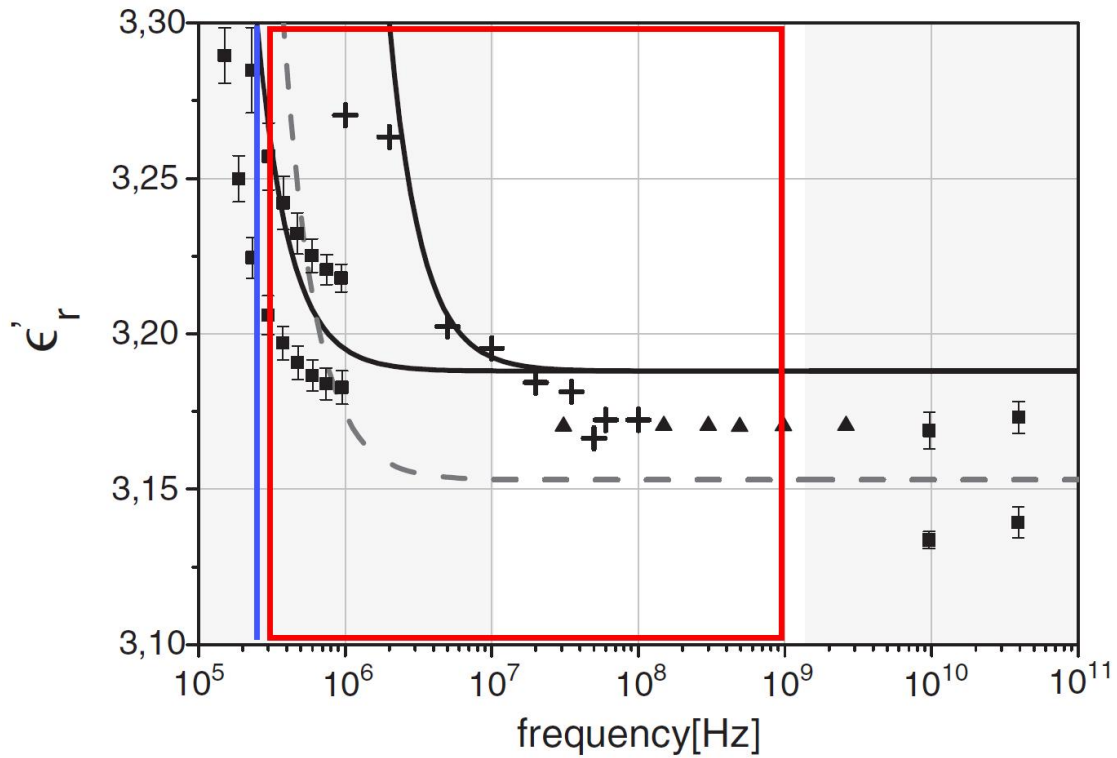


Abbildung 2.2: **Dispersives Verhalten des Realteils der Permittivität von Eis:** Das rote Rechteck kennzeichnet den Bereich, in dem die Messungen der Koaxialzelle misst (0.3 MHz bis 1.0 GHz). Die blaue vertikale Markierung zeigt die 250 kHz, bei der die DEP-Messung erfolgte. Weitere Datenpunkte: Fujita et al.; Matsuoka et al. (Quadrate, bei 252 K), Johari und Charette (Punkte, bei 253 K), Johari (Kreuze, bei 268 K) und Westphal in Evans (Dreiecke). Die maximale Unsicherheit durch die Streuung der Relaxationsfrequenz f_r ist mit der grauen Kurve dargestellt. Die maximale Unsicherheit durch Streuung von ϵ_∞ ist mit der grau gestrichelten Kurve dargestellt [modifiziert nach Bohleber, 2012(2)].



Abbildung 2.3: **Colle Gniffeti im Monte Rosa Massiv:** Rechts: Signalkuppe (4554 m ü. NN). Links: Zumsteinspitze (4563 m ü. NN). Im Sattel zwischen diesen beiden Gipfeln befindet sich der Colle Gniffeti [Wikipedia.it, 2014][map.geo.admin.ch, 2014].

2.7 Bisher bekannte Eigenschaften des KCO-Kerns

Der in dieser Arbeit untersuchte KCO-Eiskern wurde im August 2005 in 4452 m ü. NN auf dem Colle Gniffeti gebohrt [Jepsen, 2010]. Da ein Schraubenzieher in das Bohrloch gefallen ist, musste die Bohrung in ca. 26 m Tiefe abgebrochen werden [Logbuch KCO, 2005]. Die oberen 1.4 m des Kerns sind nicht erhalten. Außerdem entfallen 1.55 m aufgrund von unzuverlässigen DEP- und Dichtedaten. Es fehlen somit 6% der Gesamtlänge des Kerns [Jepsen, 2010]. Aufgrund der geringen Länge des Kerns besteht dieser vollständig aus Firn und ist nur mit einzelnen Eislagen durchzogen. Somit ist eine Betrachtung der dielektrischen Eigenschaften vor allem von Firn von Nöten. Neben den Eislagen und Eislinsen im Firnkern sind auch Staublagen in den untersuchten Proben zu finden. Durch die damit verbundene Erhöhung der Ionenkonzentration steigt dort die Leitfähigkeit, die sich in einem Anstieg des Imaginärteils niederschlägt [Bohleber, 2011], was in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet wird. Das Eis und der Firn vom Colle Gniffeti können als isotrop angesehen werden, weshalb Einflüsse auf die Permittivität aufgrund von Kristallorientierung nicht betrachtet werden müssen.

Die DEP-Daten wurden von Kalle Jepsen und Frank Wilhelms im Dezember 2009 mit dem standardmäßig verwendeten DEP-Verfahren am AWI in Bremerhaven bei 250kHz und in einer Tiefenauflösung von 0.5 cm aufgenommen [Jepsen, 2010].

2.8 Permittivitätsbestimmung mittels des IUP-Koaxialzellensetups

Das Koaxialzellensetup, dass zur Messung der KCO-Proben verwendet wurde, ist ein Messverfahren, dass von Oswald [2000] am IUP in Heidelberg ursprünglich für die Bodenphysik entwickelt hat und später für Eis und Firn modifiziert und übernommen wurde [Bohleber, 2011]. Eigentlich ist das Setup zur Bestimmung von Dispersion und Absorption von elektromagnetischen Wellen in Bodenproben konzipiert [Wagner et al., 2011]. Wie von Baker-Javis et al. [1990] gezeigt, ist dieses Verfahren jedoch auch zur Messung von frequenzabhängiger Permittivität von lowloss Materialien geeignet.

2.8.1 Bestandteile des Setups

Der Messaufbau besteht aus den in Abb. 2.4 dargestellten Komponenten. Prinzipiell funktioniert die Permittivitätsmessung mit der Zelle folgendermaßen:

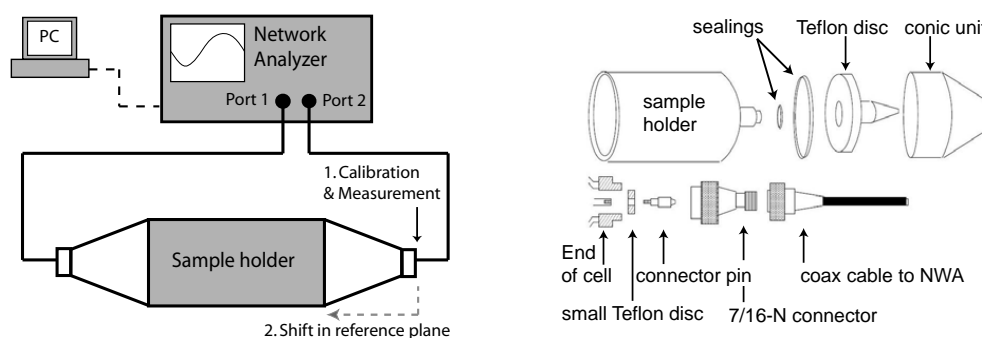


Abbildung 2.4: **Schematische Darstellung des gesamten Messaufbaus:** Einzelne Komponenten der Koaxialzelle [Bohleber, 2011]

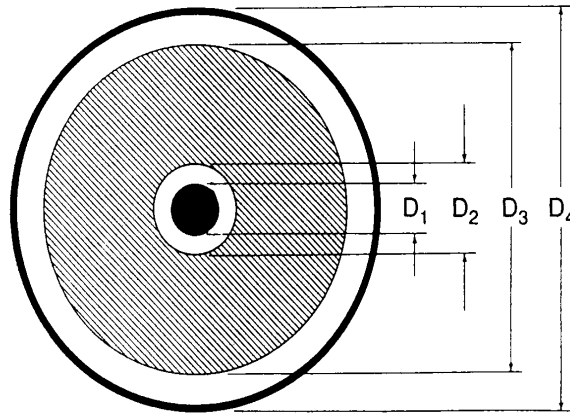


Abbildung 2.5: **Querschnitt der Koaxialzelle:** Im weiteren Text werden die Radien $R_i = \frac{D_i}{2}$ verwendet. Wobei die Differenz der Radien $R_4 - R_3$ und $R_2 - R_1$ die Luftspalte charakterisiert. Die Maße der Probe sollen den Maßen der Zelle R_1 und R_4 entsprechen [Baker-Javis et al., 2004].

- Wird ein dielektrisches Medium in die Zelle eingebaut, so ändert sich die Impedanz der transmission line. An Ebenen, an denen sich Impedanzänderungen befinden, wird die hineinlaufende Welle teilweise reflektiert.
- Der Messaufbau nimmt an zwei Ports S-Parameter (scattering parameters) der transmission line auf. Die S-Parameter sind Einträge der Streumatrix, die das Netzwerk charakterisiert. Da es sich bei diesem transmission line cell setup um ein 2-port Netzwerk handelt, können die S-Parameter und die hineinlaufende \mathbf{a} und herauslaufende Welle \mathbf{b} folgendermaßen beschrieben werden. Die Indizes 1 und 2 geben den port an.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

S_{ii} charakterisiert die Reflexion und $S_{ij}, i \neq j$ die Transmission der Zelle. Beispielsweise beschreibt S_{21} die Änderung des Signals an port 2 durch ein eingegebenes Signal an port 1. Sowohl S_{ij} als auch a_i und b_i sind komplexe Größen [Bohleber, 2011][Zhang and Li, 2008].

- Aus den gemessenen S-Parametern kann die Permittivität nicht direkt berechnet werden, da die Inversion der Formeln $S_{ij}(\varepsilon'_r) \rightarrow \varepsilon'_r(S_{ij})$ (aufgrund der Nichtlinearität) nicht möglich ist. Genaueres dazu befindet sich im Anhang: *Impedanz und S-Parameter für Koaxialleiter* und bei Oswald et al. [2006]. Deshalb wird mittels einer Vorwärtsrechnung über einen genetischen Optimierungsalgorithmus die Parameter des modifizierten Debyemodells $\varepsilon_\infty, \varepsilon_{static}, f_r$ und σ bestimmt. Dazu werden mit einem modifizierten Debyemodell künstliche S-Parameter erstellt und an die gemessenen S-Parameter gefittet. Durch Minimierung der Differenz der künstlichen und gemessenen S-Parameter wird der beste Satz von Debyeparametern ermittelt [Oswald et al., 2006]. Dieser Algorithmus wird vom Programm *deimos* ausgeführt. Ausführliches kann dazu bei Oswald et al. [2006] nachgelesen werden.

Durchmesser	Wert [cm]	Radien	Wert [cm]
Außen	8.95	Außen	4.475
Innen	2.60	Innen	1.30

Länge 20.00

Tabelle 3.1: **Maße der Probe:** Durchmesser, Radien und Länge

3 Methodik

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Probenherstellung mit dem von Hoppe und Bohleber entwickelten Setup vorgestellt. Ursprünglich wurde dieses zur Bearbeitung von Eis konzipiert [Hoppe, 2009]. Der KCO-Eiskern besteht jedoch fast ausschließlich aus Firn. In diesem Zusammenhang findet eine Bewertung des Setups für die Bearbeitung von Firn statt. Außerdem ist der Messvorgang am ebenfalls von Hoppe und Bohleber installierten Koaxialsetup in Grundzügen beschrieben.

3.1 Anforderungen an die Probe

Um die Permittivität im Koaxialsetup möglichst präzise messen zu können, ist die wichtigste Anforderung an die Proben, dass sie möglichst exakt der Geometrie des Probehalters entsprechen. Damit vermeidet man Luftspalte zwischen Probe und Zelle, die die Permittivitätsmessung verfälschen und später rechnerisch korrigiert werden müssen.

3.1.1 Maße des Probehalters der Koaxialzelle

Da die Proben so exakt wie möglich in den Probehalter passen sollen, entsprechen die Maße der Proben den Maßen der Zelle. Siehe Abb. 2.5 im Grundlagenteil. Da an den Proben die Durchmesser gemessen werden, die Berechnungen allerdings Radien verwenden, sind hier beide Größen angegeben.

3.2 Probenherstellung

Bei der Probenherstellung werden aus dem KCO-Bohrkern, der in 1 m langen Stücken (runs) vorliegt, Proben ausgewählt und entsprechend präpariert. Im Rahmen von Vorstudien zu dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass eine grundlegende Schwierigkeit darin besteht, dass sich der Bohrkern mit -24°C bei Bearbeitung im Kühlraum nahe an seinem Schmelzpunkt befindet und somit bei mechanischer Belastung sehr leicht bricht und splittert. Es ist also anspruchsvoll die Proben zerstörungsfrei zu präparieren. In den Vorstudien hat sich herausgestellt, dass Firn bei einer Dichte von unter $0.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ nicht zerstörungsfrei gefräst werden kann. Prinzipiell ist jeder Arbeitsschritt bei der Bearbeitung von Firn mit geringer Dichte wegen der Vibrationen der Maschinen kritisch, jedoch ist das Bohren und Sägen gut möglich. Da der Bohrkern im oberen Abschnitt aus immer weniger dichtem Firn besteht, kann der KCO-Kern voraussichtlich erst ab einer Tiefe von etwa 7 Metern zu Proben verarbeitet werden.

Die möglichst exakte Bearbeitung der Probe auf vorgegebene Maße wird durch diese prinzipielle Schwierigkeit der Firnbearbeitung noch anspruchsvoller.

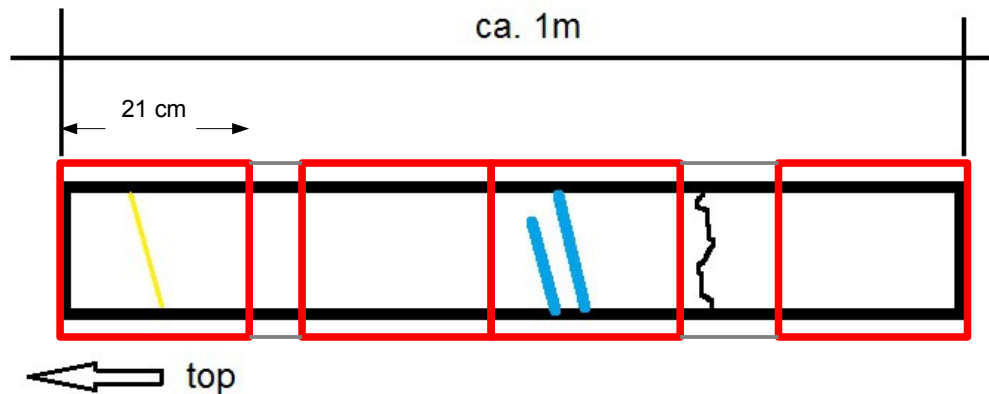


Abbildung 3.1: **Auswahl der Proben (schematisch)**: Die runs sind in der Regel 1 m lang. Da die Proben in 21 cm Länge (rote Rechtecke) herausgesägt werden, können maximal 4 Proben pro run entstehen. Beispielfhaft sind hier Eislagen (blau), Staublagen (gelb) und ein Bruch (schwarz) dargestellt.

Aufgrund des Aufwands der Probenherstellung ist es im Rahmen dieser Arbeit gelungen nur 10 der insgesamt 19 für eine Probenherstellung geeigneten runs zu bearbeiten.

3.2.1 Auswahlkriterien für die Proben

- Von besonderem Interesse sind Proben mit Eislin sen, Eislagen und Staublagen. An Eislagen und Eislin sen erwartet man aufgrund des Dichteanstiegs im Vergleich zum Firn einen Sprung in der Permittivität. An Staublagen ist aufgrund der damit verbundenen größeren Ionenkonzentration ebenfalls ein Anstieg des Realteils und vor allem des Imaginärteil der Permittivität zu erwarten.
- Der Kern sollte über eine Länge von mindestens 21 cm bruchfrei sein, da über einen Bruch hinweg die Messung nicht in hoher Präzision durchgeführt werden kann.
- Wenn möglich sollten immer benachbarte Abschnitte gemessen werden um einen stetigen Verlauf der Daten zu erhalten. Dies hat aber geringere Priorität.

Der letzte Punkt erfüllt auch die Anforderung, dass der Restkern möglichst wenig zersägt und mit den aus ihm gewonnen Proben immer noch möglichst vollständig sein soll. Minimaler Verschnitt ist also wünschenswert, siehe Abb. 3.1.

3.2.2 Dokumentation des Kerns

Die Orientierung des Kerns relativ zur Oberfläche darf keinesfalls vertauscht werden. Eine sorgfältige Dokumentation wurde während der Probenherstellung vorgenommen und umfasst folgende Punkte:

- Nummer der Verpackungskiste
- Bezeichnung der Verpackungsfolie
- Anfangs- und Endtiefe und Länge des runs

- Aufteilung des runs
- Probe oder Reststück
- Neue Verpackungsfolie
- Anfangs- und Endtiefe von Probe/Reststück
- Länge der Probe mit Unsicherheit
- Außendurchmesser der Probe mit Unsicherheit
- Innendurchmesser der Probe mit Unsicherheit
- Gewicht der Probe mit Unsicherheit
- Bezeichnung der Bohrmehldosen
- Besondere Eigenschaften der Probe (z.B. Eislagen)
- Merkmale der Probe (Schäden o.ä. durch die Bearbeitung)

Abgeleitete Größen aus den oben ermittelten Werten

- Volumen der Probe mit Unsicherheit
- Dichte der Probe mit Unsicherheit
- Permittivität nach Kovac mit Unsicherheit
- Differenz zwischen Außendurchmesser der Probe und der Zelle
- Differenz zwischen Innendurchmesser der Probe und der Zelle
- Differenz zwischen Länge der Probe und Länge der Zelle

Das Zustandekommen der Unsicherheiten ist im Kapitel Ergebnisse geschildert. Die Berechnung der Permittivität erfolgt über Formel (2.9)[Kovac et al., 1995].

3.2.3 Arbeitsablauf zur Herstellung der Proben

Der Arbeitsablauf zur Herstellung der Proben teilt sich in vier wesentliche Teile, die im folgenden beschrieben werden. Die Probenherstellung ist ein sehr aufwendiger Prozess, der darüber hinaus auch Erfahrung in der Bearbeitung von Eis erfordert. Der durchschnittliche Zeitaufwand für die vier unten beschriebenen Arbeitsschritte beträgt mindestens 2 Stunden. Hinzu kommt die Dokumentation und Verpackung des Kerns.

1. **Sägen des Kerns:** Nach Auswahl, Einteilung und Markierung der Proben, werden die geeigneten Stücke von Hand in einer Länge von 21 cm aus dem Kern gesägt. Eigentlich steht hierfür eine Bandsäge bereit. Jedoch hat sich im Vorfeld herausgestellt, dass der Anschlag dieser Säge zu klein ist um die Proben im geeigneten Maß aus dem Kern zu sägen. Da das Sägen von Hand weniger präzise ist, musste eine Längentoleranz von 1.0 cm einkalkuliert werden um später den Kern auf die exakte Länge zuschneiden zu können. Beim Sägen mit der Hand ist darauf zu achten, dass keine Stücke aus dem Eis herausplittern oder der Kern an der Sägestelle abbricht. Außerdem soll der Schnitt senkrecht zur Längsseite des Kerns sein um Unsicherheiten in der Tiefenauflösung zu vermeiden.

Kiste [#]	Alte Verpackung				Neue Verpackung					Maße										
	Verpackung [#]	Anfangstiefe [m]	Endtiefe [m]	Länge [m]	Datum Bearbeitung	Aufteilung [#]	Probe #	Beschriftung Neue Verpackung	Tiefenabschnitt [m]	Mittlere Tiefe [m]	Länge L [cm]	ΔL [cm]	Außendurchm. d_a [cm]	Außendurchm. Korrigiert d_k [cm]	Δd_a [cm]	Innendurchm. d_i [cm]	Δd_i [cm]	Gewicht M [g]	ΔM [g]	
1823	KCO 026	25	25,86	0,86	Reststück	5 / 5	x	KCO # 026 ← top 25-25,86	25,790	- 25,860	7,000	-	-	-	-	-	-	-	-	
					19.11. Bis 26.11.13	4 / 5	1		25,580	- 25,790	25,6850	19,950	0,10	8,910	8,925	0,03	2,620	0,03	889,6	0,2
					27.11. Bis 28.11.13	3 / 5	2		25,370	- 25,580	25,4750	20,000	0,10	8,850	8,865	0,06	2,630	0,03	908,6	0,2
					28.11.13	2 / 5	3		25,160	- 25,370	25,2650	20,000	0,10	8,920	8,935	0,03	2,630	0,03	851,7	0,2
					Reststück	1 / 5	x		25,000	- 25,160	16,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abgeleitete Größen					Bohrmehl				Dokumentation			
Volumen V [cm ³]	ΔV [cm ³]	Dichte ρ [g/cm ³]	$\Delta \rho$ [g/cm ³]	Rel. Fehler der Dichte [%]	Bohrmehldose (Innen 1/2) (10cm)	Bohrmehldose (Innen 2/2) (11cm)	Bohrmehldose (Außen 1/2) (21cm)	Bohrmehldose (Außen 2/2) (21cm)	Besonderheiten	Sonstiges	Messung	Foto
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1140,510	10,447	0,780	0,007	0,916	25,580-25,680	25,680-25,790	25,580-25,790	25,580-25,790	4 Eislagen	klemmt etwas beim Einbauen	26.11.13	x
1125,777	17,806	0,807	0,013	1,582	25,370-25,470	25,470-25,580	25,370-25,580	25,370-25,580	eine Eislage am oberen Rand	relativ großer Luftspalt zum Außenleiter	28.11.13	x
1145,349	10,481	0,744	0,007	0,915	25,160-25,260	25,260-25,370	25,160-25,370	25,160-25,370	homogen, keine Eislagen	am unteren Rand kleines Stück abgebrochen	28.11.13	x
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$\hat{\rho}$ Erwartungswert (Kovac) $\hat{\rho}(\rho) = (1+0,845 \cdot \rho)^2$	$\Delta \hat{\rho}$	$\hat{\rho}$ Messung	Luftspalt zw. Probe und Außenleiter [cm]	Längendifferenz zw. Probe und Zelle [cm]	Luftspalt zw. Probe und Innenleiter [cm]
-	-	-	-	-	-
2,7526	0,0200	2,70	0,0125	0,05	0,01
2,8291	0,0363	2,73	0,0425	0	0,015
2,6515	0,0187	2,62	0,0075	0	0,015
-	-	-	-	-	-

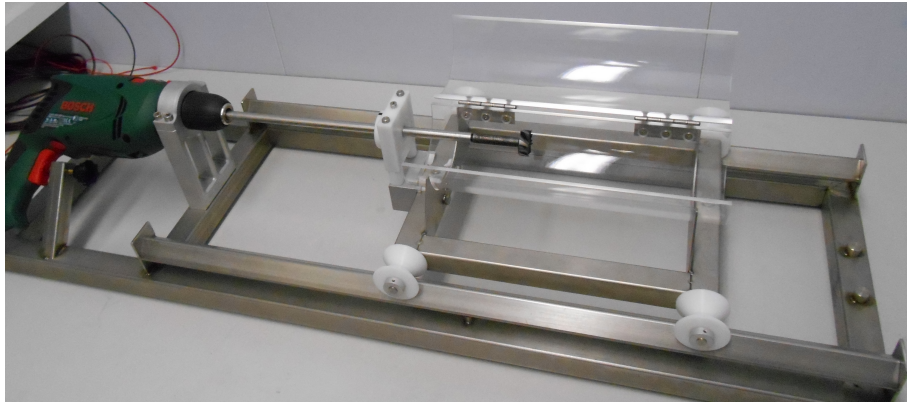
Abbildung 3.2: Dokumentationstabelle (Auszug): Hier sind die oben genannten Eigenschaften beispielhaft für den run KCO#26 dargestellt. Jede Zeile entspricht einer Probe oder einem Reststück.

2. **Bohrung für den Innenleiter:** Im zweiten Schritt wird die Probe in der Trogvorrichtung der Bohrmaschine fixiert und das 2.60 cm weite Loch für den Innenleiter gebohrt. Um bei weiterer Verwendung des Bohrmehls eine bessere Tiefenauflösung zu haben, wird das Bohrmehl der Bohrtiefen 0 - 10 cm und 10 - 21 cm getrennt aufbewahrt. Besondere Sorgfalt ist beim Bohren auf dem letzten Zentimeter vor dem Durchbruch geboten, da bei zu großem Druck das letzte Stück großflächig absplittert und nicht mehr korrigierbare Schäden an der Probe entstehen.
3. **Fräsen:** Durch das Fräsen wird die Probe auf den benötigten Außendurchmesser von 8.95 cm gebracht. Detaillierte Darstellungen dieses Prozesses finden sich bei [Hoppe, 2009]. Da der Umfang der Probe in sehr kleinen Schichten verringert wird, ist das Fräsen ein langwieriger Prozess (> 0.5 h). Es ist jedoch notwendig da nur dadurch eine große Passgenauigkeit erzielt werden kann.
4. **Einstellen der benötigten Länge:** Zuletzt wird mit der Bandsäge die Probe auf eine Länge von 20.00 cm zugesägt. Schwierig und aufwendig ist es die beiden Stirnseiten der Probe so zu sägen, dass sie in der Zelle plan mit den Teflonscheiben abschließen. Die Länge von 20.00 cm kann stets nachgemessen werden und somit die benötigte Länge einfach erreicht werden. Doch die Proben stehen nur genau dann plan auf den Teflonscheiben wenn die Stirnseiten der Probe genau senkrecht zur ihrer Mittelachse sind. Dies lässt sich dadurch gewährleisten, indem man die Probe auf einer ebenen Unterlage auf die Stirnseiten stellt und schaut ob der Winkel zwischen Probe und Unterlage 90° beträgt. Durch Absägen von kleinen Schichten der Stirnseite lässt sich somit ein rechte Winkel einstellen.

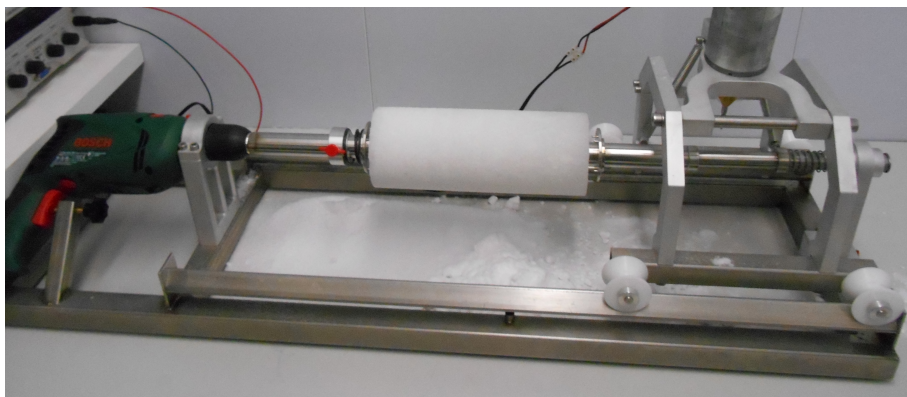
3.2.4 Probleme der Probenherstellung und Verbesserungsvorschläge

Neben der prinzipiellen Schwierigkeit der Eisbearbeitung ist der zweite wesentliche Faktor, der die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Probenherstellung einschränkt das verwendete Bearbeitungssetup. Prinzipiell ließ sich im Laufe der Arbeit feststellen, dass das mit dem Bearbeitungssetup schwierig ist, Firnproben in hoher Präzision anzufertigen. Aufgrund der körnigen und porigen Zusammensetzung von Firn bricht dieser deutlich leichter als Eis. Eis ist gegenüber mechanischen Belastungen und Erschütterungen als gesamter Kristallverbund deutlich robuster. Außerdem ist es wegen der körnigen Oberfläche der Firnproben schwierig nach der Bearbeitung die Durchmesser genau zu bestimmen. Im Laufe der Bearbeitungsphase haben sich einige Komponenten des Setups als Einschränkungen herausgestellt. Die Wichtigsten und die dadurch entstehenden Ungenauigkeiten werden neben Verbesserungsvorschlägen im Folgenden erläutert.

1. **Bandsäge:** Die Längentoleranz, die für die Probe einkalkuliert wird, schlägt sich in einer Unsicherheit der Tiefenauflösung von bis zu einem Zentimeter nieder. Das kommt dadurch, dass die Probe 20 cm lang sein muss zunächst aber als 21 cm Stück vom Kern gesägt wird. Dieser überschüssige Zentimeter wird später entfernt, wobei von beiden Seiten je nach Bearbeitbarkeit unterschiedlich viel Kernmaterial weggenommen wird, sodass sich kein pauschaler offset für alle Proben bestimmen lässt. Der Anschlag der Bandsäge ist nicht gerade und somit sind keine geraden Schnitte möglich. Um dieses Problem zu lösen, wurden in kleinen Schritten keilförmige Scheiben



- (a) **Innenleiterbohrung:** Die Probe wird in den Plexiglastrog gelegt und mit dem Deckel fixiert. Auf dem beweglichen Schlitten wird die Probe in Richtung Bohrer geschoben.

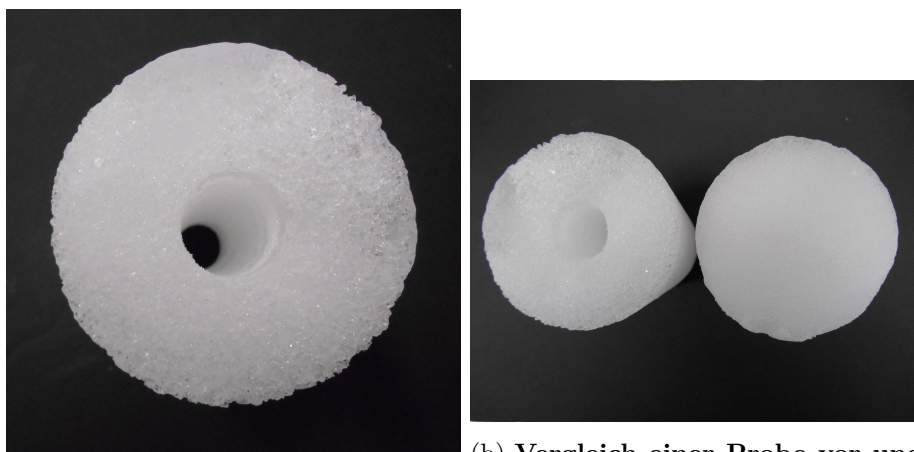


- (b) **Fräsen:** Die Probe ist auf die Achse gespannt. Rechts der Schlitten für den Fräser. Das entstehende Bohrmehl wird für weitere Untersuchungen gesammelt.



- (c) **Sägen:** Bandsäge, mit der die Probe auf die endgültige Länge zugesägt wird. Im Hintergrund der Anschlag aus Plexiglas.

Abbildung 3.3: **Elemente des Bearbeitungssetups:** Die drei Arbeitsschritt werden in dieser Reihenfolge durchgeführt.



(a) **Bearbeitete Probe:** Eine typische Probe nach der Bearbeitung. Man erkennt gut, dass der äußere Rand der Probe kleine Abbrüche aufweist, was beim Fräsen zustande kommt. Außerdem sieht man die körnige Struktur der Firnprobe, die es erschwert die Durchmesser präzise zu messen.

(b) **Vergleich einer Probe vor und nach der Bearbeitung:** Man erkennt deutlich den verringerten Durchmesser und das Loch für den Innenleiter. Die unbearbeitete Probe weist Verformungen im Durchmesser auf, die durch das Fräsen jedoch verschwinden.

Abbildung 3.4: **Proben**

abgetrennt, bis die Probe gerade ist. Dies ist enorm zeitaufwendig und kann keine hohe Präzision gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass zwischen den Stirnflächen der Probe und der Zelle ein keilförmiger Luftspalt bleibt, der die Messung verfälscht.

Verbesserungsvorschlag: Die Konstruktion der Bandsäge ist nicht zu ändern. Das Zersägen des Kerns von Hand funktioniert zuverlässig, jedoch ist der Verlust von etwa einem Zentimeter Kernmaterial aufgrund der benötigten Längentoleranz unumgänglich. Es sollte jedoch möglich sein den Anschlag der Säge geradzustellen oder einen Neuen anfertigen zu lassen. Dies würde das Zusägen der Probe enorm beschleunigen und eine wesentliche Erhöhung der Präzision mit sich bringen.

2. **Bohrung:** Nach Bohrung des Loch für den Innenleiter, stellt man fest, dass der Innenleiter zunächst nicht hineinpasst. Vermutlich liegt das daran, dass der Bohrer nicht gerade ist oder die Fixierung für den Bohrer nicht auf einer Achse mit dem Bohrfutter liegt. Siehe dazu Abb. 3.5. Besonders ab einer gewissen Tiefe weicht der Bohrer von seiner ursprünglichen Richtung ab. Gelöst wurde das Problem indem das Loch mehrmals nachgebohrt wurde, bis der Innenleiter passte. Hierdurch entsteht jedoch ein Luftspalt zwischen Probe und Innenleiter, der die Messung beeinflusst und mithilfe der Gap Correction ausgeglichen werden muss.

Verbesserungsvorschlag: Mit der vorliegenden Konstruktion der Fixierung des Bohrers ist diese Problem schwer zu lösen. Es muss gewährleistet sein, dass der Bohrer gerade ist und das Bohrfutter und die Fixierung genau auf einer Achse liegen

3. **Fräsen:** Die wesentliche Unzulänglichkeit der Fräsvorrichtung ist, dass die Achse, auf die die Probe zum Fräsen gespannt wird nicht fest im Gegegenlager fixiert wer-

den kann. Das Lager wird mit einer Feder gegen die Achse gedrückt und soll diese in der Horizontalen halten, siehe Abb. 3.6. Die Feder ist jedoch nicht stark genug der Achse mit der Probe eine genügende Kraft entgegenzusetzen. Die Folge ist, dass die Achse durchhängt und der Fräskopf am den beiden Enden der Probe einen unterschiedlichen Abstand hat. Dadurch hat die Probe nach dem Fräsen eine konische Form. Die Durchmesser der beiden Enden unterscheiden sich um etwa einen halben Millimeter. Das Problem wurde entschärft, indem die Probe an einer Seite auf den benötigten Durchmesser gefräst wurde und anschließend umgekehrt auf die Achse gespannt wurde und erst dann die andere Seite der Probe auf den benötigten Durchmesser gefräst wurde. Dadurch war die Probe in der Mitte etwas dicker. Dies musste beim Bestimmen des Außendurchmessers miteinbezogen werden.

Da die Achse nicht fest eingespannt werden konnte, präzedierte sie beim Verwenden des Bohrers so stark, dass die Probe beim Fräsen zerstört worden wäre. Somit musste die Probe jeweils um einen kleinen Winkel weitergedreht werden. Die Probe bekam dadurch keinen runden sondern einen polygonartigen Querschnitt, was zu einem größeren Luftspalt führt und eine genaue Messung des Durchmesser erschwert. **Verbesserungsvorschlag:** Um eine effiziente und präzise Bearbeitung beim Fräsen zu gewährleisten ist ein verbessertes Gegenlager zur Achse unbedingt notwendig. Hierzu muss das Gegenlager auch Unwuchten aushalten, die durch Unregelmäßigkeiten an der Probe entstehen. Die dadurch ermöglichte Verwendung der Bohrmaschine beim Fräsen würde den Arbeitsschritt stark beschleunigen. Des Weiteren wäre ein gerades Fräsen gewährleistet, was die Güte der Probe wesentlich erhöhen würde.

3.3 Der Messaufbau

Der gesamte Messaufbau der Koaxialzelle befindet sich in einer auf -15°C gekühlten Klimakammer. Die Temperatur kann während des Verlaufs der Messungen als weitgehend konstant betrachtet werden. Der PC und der Netzwerkanalysator befinden sich in einem Nebenraum. Der Messaufbau besteht aus der Koaxialzelle, in die die Proben eingebaut werden und ist über RG 58 Koaxialkabel mit einem Agilent ET8714 Network-Analyzer (NWA) verbunden [Bohleber et al., 2012(1)]. Dieser wiederum ist an einen Computer angeschlossen, auf dem die Daten gespeichert und ausgewertet werden. Die Zelle an sich besteht aus den in Abb. 2.4 dargestellten Komponenten.

3.4 Ablauf der Messung

Es wurde in dieser Arbeit das von Bohleber et al. [2012(1)] beschriebene Messverfahren verwendet. Im Wesentlichen besteht die Messung aus den folgenden 4 Schritten:

1. **Kalibration:** Um später nur die Probe zu messen und die Signale durch die Zelle selbst auszublenden wird zunächst mit der leeren Zelle eine Kalibration durchgeführt, die bei den späteren Messungen immer abgezogen wird. Die Zelle wird nach der ersten Kalibration gedreht und wiederholt, da mit dem verwendeten NWA keine vollständige 2-port Kalibration möglich ist [Bohleber, 2011]. Die S-Parameter der Reflexion sollen nach der Kalibration einen Wert von -20 dB nicht überschreiten.

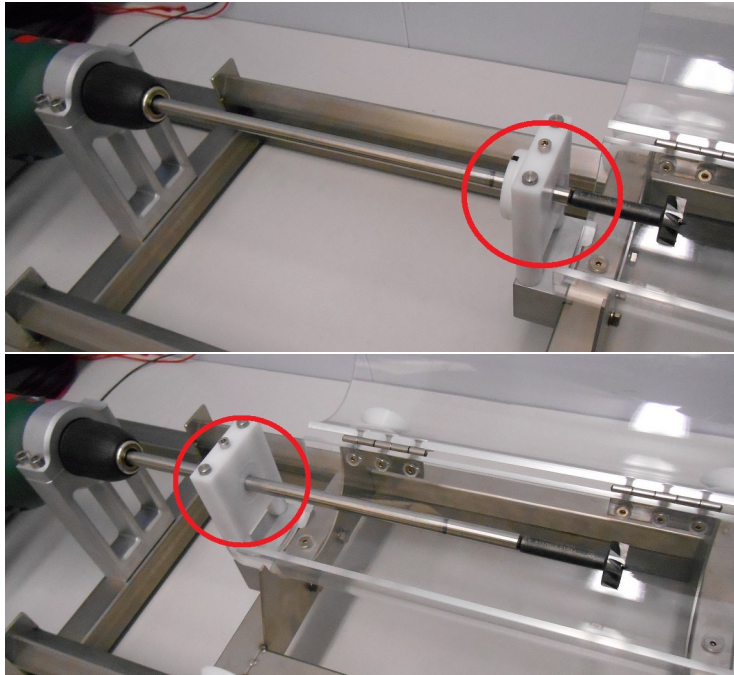


Abbildung 3.5: **Fixierung des Bohrers:** Im oberen Bild ist die Fixierung (roter Kreis) an einer anderen Stelle des Bohrers als im unteren Bild. Liegt das Bohrfutter und die Fixierung nicht auf einer Achse und ist der Bohrer nicht gerade, so ändert sich beim Bohren die Ausrichtung des Bohrkopfes.

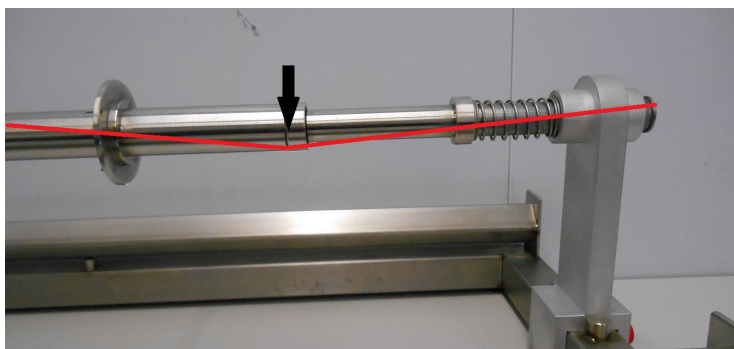


Abbildung 3.6: **Gegenlager des Fräsers:** Gegenlager der Achse mit der Feder, die die Gegenkraft erzeugen soll. Mit den roten Linien ist (zur Verdeutlichung übertrieben) dargestellt wie die Achse am Lager unter der Last einer Probe (schwarzen Pfeil) durchhängt.



Abbildung 3.7: **Koaxialzelle** **zusammgebaut in der Klimakammer:** Links und rechts sind die beiden Koaxialkabel angeschlossen, die zum Netzwerkanalysator im Nebenraum führen, siehe Abb.3.8

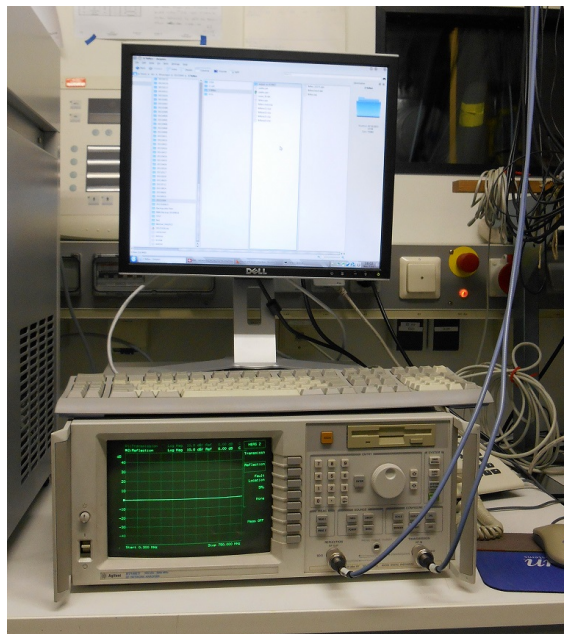


Abbildung 3.8: **Netzwerkanalysator mit PC:** Man beachte die Koaxialkabel, wie in Abb. 3.7, die in die ports 1 und 2 am Netzwerkanalysator gehen.

Die Kalibration muss vor jeder Messung durchgeführt werden und ist etwa für 24 h gültig.

2. **Messungen:** Es werden die S-Parameter für die Reflexion und Transmission aufgenommen. Hierbei wird für die Reflexionsmessung der load-Widerstand an der Zelle angebracht. Nach Messung der ersten zwei S-Parameter wird die Zelle gedreht und die Messung wiederholt, sodass vier S-Parameter pro Messung aufgenommen werden.
 - a) **Luftmessung:** Zunächst wird eine Permittivitätsmessung der leeren Zelle - also von Luft durchgeführt. Da die Permittivität von Luft bekannt ist, gibt diese Messung Aufschluss über die Qualität der Kalibration und kann als erster Laborstandard verwendet werden.
 - b) **POM-Messung:** Als nächstes wird eine Polyoxymethylenprobe (ein teflon-ähnliches Material, im Folgenden mit POM abgekürzt) gemessen. Diese ist der eigentliche Laborstandard und hat dem Eis ähnliche dielektrische Eigenschaften. Anhand der POM-Messungen lässt sich die apparative Genauigkeit des Messaufbaus ermitteln.
 - c) **Eismessung:** Erst im letzten Schritt wird die Eisprobe gemessen. Dabei wird genauso verfahren wie bei der POM-Messung.

3.5 Ermitteln der Permittivität aus den S-Parametern mittels *deimos*

Der Messaufbau ermittelt die S-Parameters des 2-port Netzwerks, das die Koaxialzelle darstellt. Aus diesen muss die Permittivität mithilfe des Programms *deimos* bestimmt werden. Wie bei [Bohleber et al., 2012(1)] und [Oswald et al., 2006] dargestellt führt *deimos* einen genetischen Algorithmus aus, der mittels Optimierung den besten Satz der Debyeparameter ermittelt. Hierzu werden für das *deimos*-Programm in einem *jobfile* Grenzen der Debyeparameter und Daten der Zelle für den Algorithmus vorgegeben. Die berechneten Parameter werden in einem *outputfile* ausgegeben. Ein beispielhaftes *jobfile* und *outputfile* befindet sich im Anhang: *Beispielhaftes jobfile und outputfile*.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Permittivitätsmessungen an der Koaxialzelle dargestellt. Dabei wird auf die Gap Correction eingegangen und gezeigt wie die Unsicherheiten der mit dem Koaxialsetup erzeugten Daten ermittelt wurden. Darüber hinaus wird gezeigt, wie die Unsicherheiten der DEP-Daten bestimmt wurden. In sämtlichen Plots der Koaxialmessungen sind auch die DEP-Werte eingezeichnet, die jedoch erst im nächsten Kapitel vergleichend diskutiert werden.

4.1 Gap Correction nach Baker-Javis für Außen- und Innenleiter

Da auch nach sorgfältiger Bearbeitung der Proben ein Luftspalt zwischen Zelle und Probe bleibt, misst die Zelle ein Gemisch aus dem Probenmaterial und Luft. Doch nur der Wert der Probe interessiert. Daher wird über die Korrekturrechnung von Baker-Javis dieser Luftspalt sowohl am Innen- als auch am Außenleiter korrigiert. Diese Korrektur berücksichtigt keine Luftspalte, die durch eine zu kurze Probe entstehen. Jedoch ist die Länge

der Probe im Vergleich zu den Durchmessern mit relativ hoher Genauigkeit gefertigt. Die Koaxialzelle kann als Zylinderkondensator angesehen werden, bestehend aus der Probe als Dielektrikum und den Luftspalten. Die Gesamtkapazität der Koaxialzelle kann dann durch eine Reihenschaltung von Kapazitäten betrachtet werden [Baker-Javis et al., 2004].

$$\frac{1}{C_m} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_P} + \frac{1}{C_2}, \quad (4.1)$$

wobei C_m die gemessene Kapazität, C_1 und C_2 die Kapazität der Luftspalte und C_P die Kapazität der Probe entspricht.

Über die radiale Feldverteilung und die Kapazität einer Koaxialleitung ergibt sich die Formel:

$$\frac{\ln \frac{R_4}{R_1}}{\varepsilon'_{rm}} = \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{\varepsilon'_{r1}} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_2}}{\varepsilon'_{rc}} + \frac{\ln \frac{R_4}{R_3}}{\varepsilon'_{r2}}, \quad (4.2)$$

wobei ε'_{rm} für die gemessene, ε'_{rc} für die korrigierte und ε'_{r1} bzw. ε'_{r2} für die Permittivität der beiden Luftspalte steht. Formel (4.2) lässt sich nach ε'_{rc} umstellen, wobei für die Luftspalte $\varepsilon'_{r1} = \varepsilon'_{r2} = 1$ gesetzt werden.

$$\varepsilon'_{rc} = \varepsilon'_{rm} \frac{L_2}{L_3 - \varepsilon'_{rm} L_1}, \quad (\text{Näherungsformel}) \quad (4.3)$$

$$\text{wobei} \quad L_1 = \ln \frac{R_2}{R_1} + \ln \frac{R_4}{R_3}, \quad L_2 = \ln \frac{R_3}{R_2}, \quad L_3 = \ln \frac{R_4}{R_1} \quad (4.4)$$

Formel (4.3) versagt wenn $\varepsilon'_{rm} \geq \frac{L_3}{L_1}$. Diese ist aber bei keiner Probe der Fall.

In die exakten Lösung der Gap Correction gehen Werte der Art $\tan^2 \delta_d$ ein, wobei $\delta_d = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r}$ und ε''_r der Imaginärteil der komplexen Permittivität ist [Baker-Javis et al., 2004]. Mit der Koaxialzelle lässt sich dieser jedoch nicht genau genug messen, daher wurde die Näherungsformel verwendet. Des Weiteren ist der Imaginärteil sehr viel kleiner als der Imaginärteil wodurch die $\tan^2 \delta_d$ Terme sehr klein werden und Formel (4.3) eine gute Näherung darstellt. Detailliert kann das bei Baker-Javis et al. [2004] nachgeschlagen werden.

Die Unsicherheit von ε'_{rc} wurde mit gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt, welche im Anhang: *Fehlerrechnung der Gap Correction* ausgeführt ist. Die Unsicherheit der Radien R_i entspricht der Genauigkeit, mit der der Radius der Proben mit einer Schieblehre gemessen werden kann. Die Unsicherheit der Messung von ε'_{rm} entspricht der apparativen Unsicherheit des Koaxialzellensetups (siehe folgender Abschnitt).

Parameter	Wert	Unsicherheit	Parameter	Wert
ε'_{rm}	variabel	$\Delta \varepsilon'_{rm}$		0.867 %
R_1	13 mm	ΔR_1		± 0.025 mm
R_2	variabel	ΔR_2		± 0.25 mm
R_3	variabel	ΔR_3		± 0.25 mm
R_4	47.5 mm	ΔR_4		± 0.025 mm

Tabelle 4.1: Unsicherheiten der Parameter, die in die GAP Correction eingehen

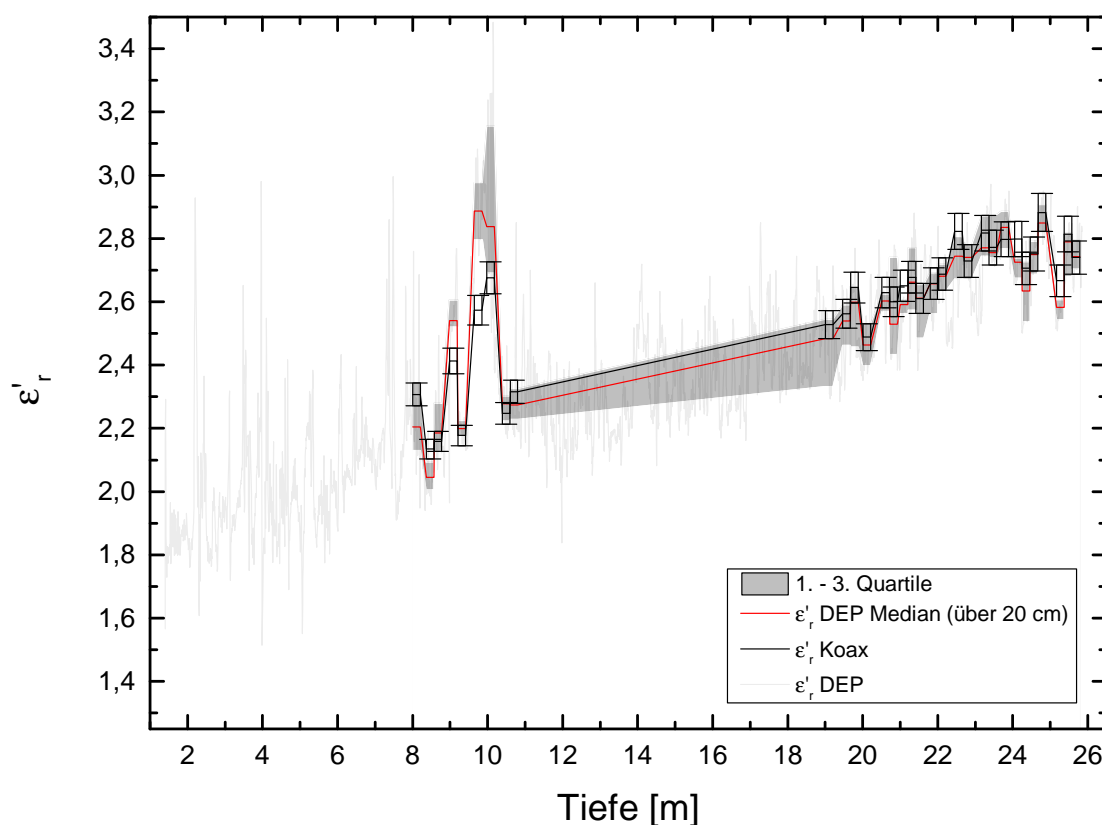


Abbildung 4.1: **Übersicht:** DEP- und Koaxialdaten über die gesamte Kernlänge. Wie man sieht, beschränken sich der in dieser Arbeit untersuchte Bereich auf den unteren Kernabschnitt und den Permittivitäts-Peak bei ca. 10 m Tiefe. Im Folgenden sind zur besseren Übersichtlichkeit jeweils nur diese beiden Bereiche geplottet. Der graue Bereich stellt wie in den folgenden Plots auch den Bereich der Streuung der DEP-Werte im Intervall dar und geht von der 1.Quartil bis zur 3.Quartil. Die rote Kurve zeigt den Median der DEP-Messungen im 20 cm Intervall.

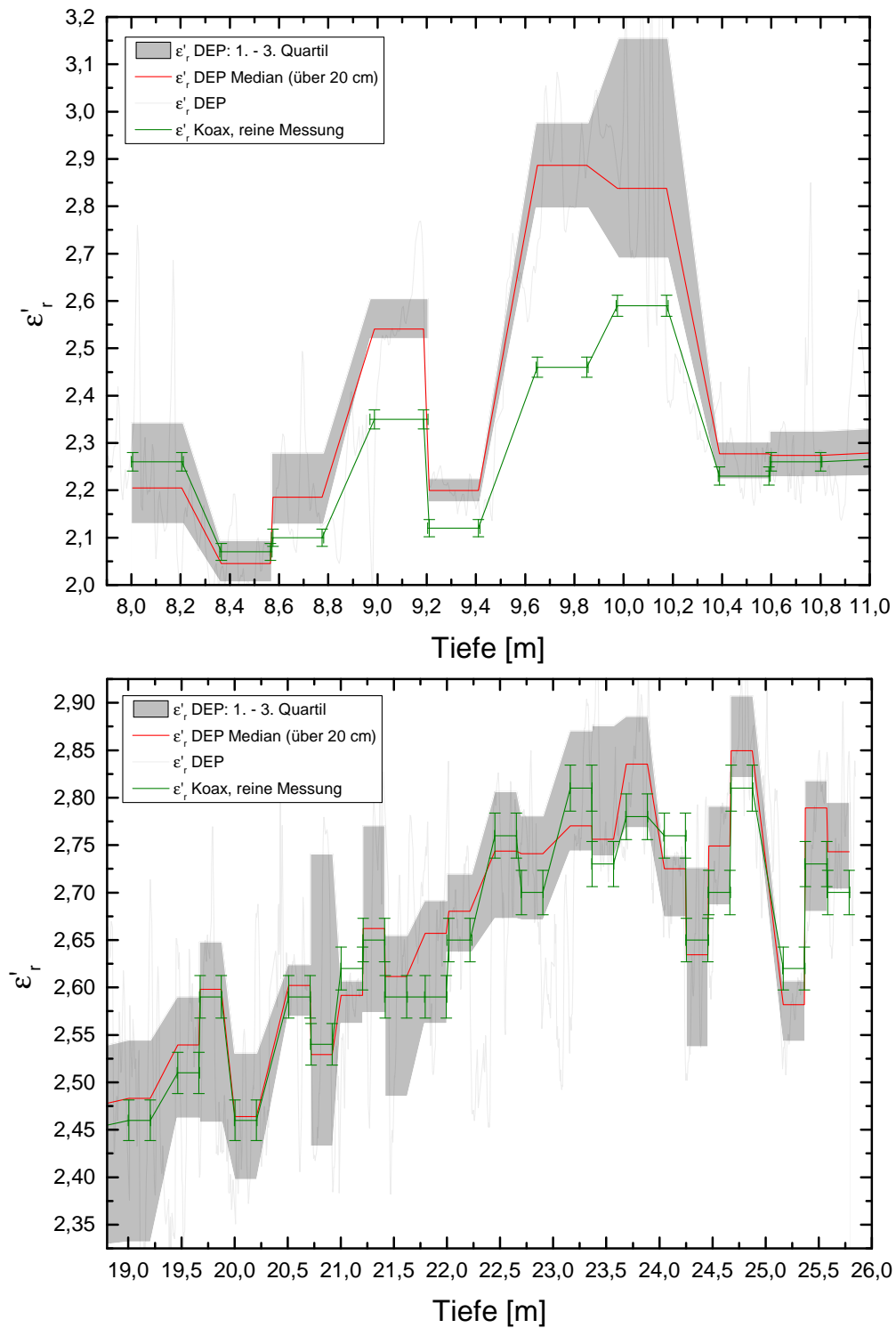


Abbildung 4.2: **Koaxialmessung ohne Gap Correction:** In grün sind die reinen Messungen der Koaxialzelle ohne Gap Correction geplottet. Man sieht, dass die Messungen zum überwiegenden Anteil unter dem Median (rot) der DEP-Daten liegt. Die Unsicherheit der Koaxialmessung entspricht der apparativen Unsicherheit des Koaxialsetups.

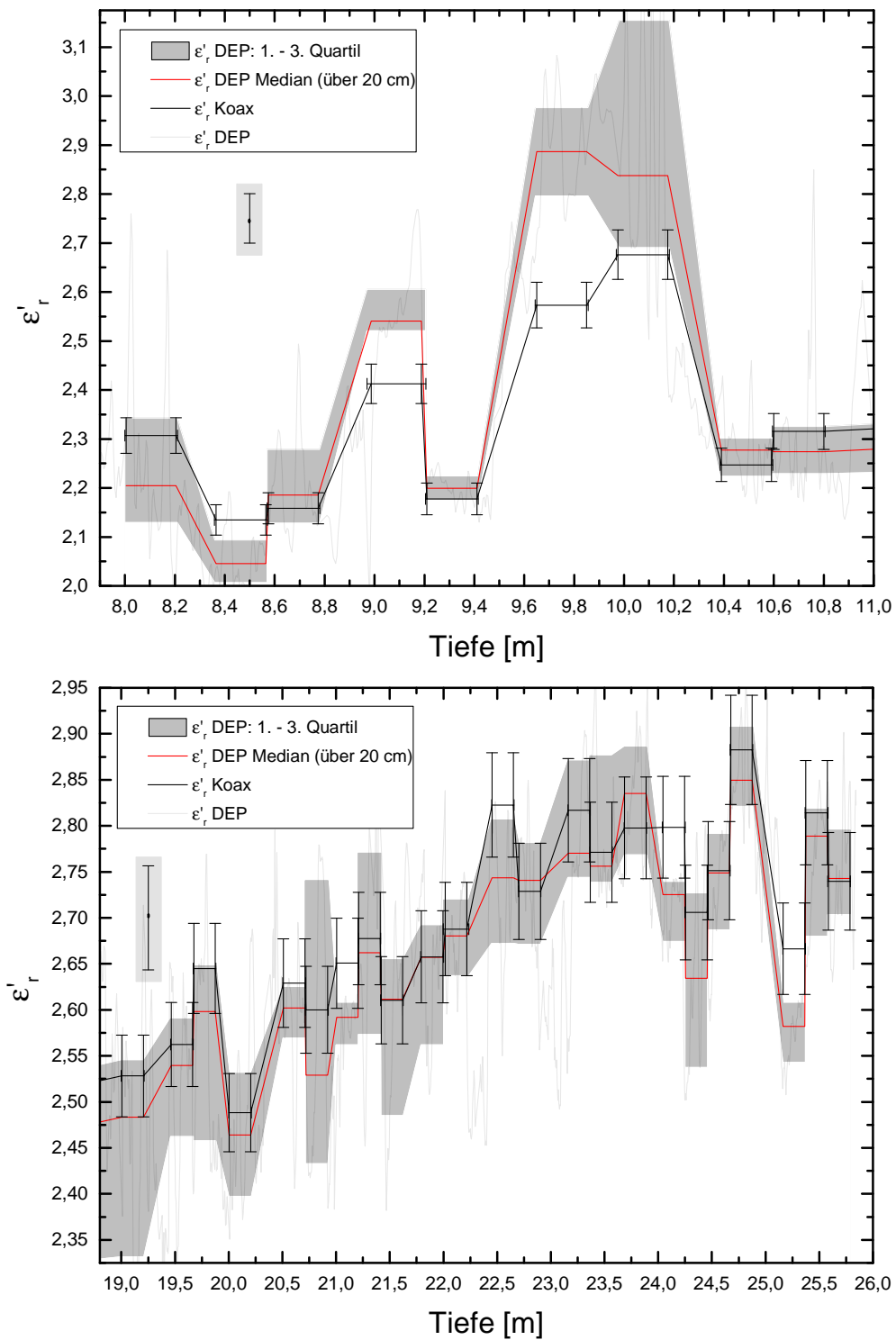


Abbildung 4.3: **Koaxialmessungen und DEP-Daten im Vergleich:** Hier sind die Koaxialdaten nach der Gap Correction geplottet. Die Unsicherheit ist über Fehlerfortpflanzung bestimmt. Man beachte die Tiefenunsicherheit der Koaxialdaten. Der einzelne Fehlerbalken (grau hinterlegt) ist ein exemplarischer Fehler für einen repräsentativen Wert am Peak und am unteren Kernende für die DEP-Permittivität.

4.2 Bestimmung der apparative Unsicherheit des Koaxialsetups über den POM-Laborstandard

Ein wesentlicher Punkt bei der Bestimmung der Ungenauigkeiten der Messungen mit der Koaxialzelle ist die apparative Unsicherheit des Koaxialsetups. Diese wurde anhand der Messungen des POM-Laborstandards bestimmt. Insgesamt lagen acht Messungen des POM-Standards vor, die im gleichen Frequenzbereich (0,3 MHz - 1 GHz) und bei gleicher Temperatur (-15°C) gemessen wurden. Aus den S-Parametern dieser Messungen wurden ein neuer Satz von S-Parametern mit den Mittelwerten der 8 Messungen erstellt und dieser erneut mit *deimos* ausgewertet. Für die Permittivität der S-Parameter mit den Mittelwerten kam 2.89 heraus. Es wurde verfahren wie in [Bohleber et al., 2012(1)].

Minimal	Maximal	Mittelwert	Differenz	rel. Unsicherheit [%]
2.87	2.92	2.895	± 0.025	0.867

Tabelle 4.2: Rechnerisch bestimmte apparative Unsicherheit des Koaxialsetups

Kleinste Messung	Größte Messung	Messung Mittelwert-S-Parameter	Diff. zur kleinsten Messung	Diff. zur größten Messung	rel. Abw. zur kleinsten Messung	rel. Abw. zur größten Messung
2.87	2.92	2.89	+0.03	-0.02	1.04 %	0.69 %

Tabelle 4.3: Bestimmung der apparativen Unsicherheit des Koaxialsetups mittels Auswertung von Mittelwert-S-Parametern

4.3 Tiefenunsicherheit der Koaxialmessung und des DEPs

Die Tiefenauflösung der Koaxialmessung ist mit Unsicherheiten behaftet und muss beim Vergleich mit den DEP-Daten beachtet werden. Folgende Fehlerquellen tragen bei:

1. Das Tiefenlogging, das aus dem Logbuch der KCO-Bohrung entnommen werden kann, stimmt nicht mit den Längenmessungen der runs überein, die vor der Bearbeitung durchgeführt wurden. Vermutlich ist durch Abrieb an den Enden und an den Bruchkanten im Zuge von Transporten ect. die Gesamtlänge etwas geschrumpft. Die Längendifferenz zwischen Logbuch und Messung ist in einer Tabelle im Anhang: *Längendifferenzen der runs zwischen KCO-Logbuch und Längenmessungen* festgehalten.
2. Die Proben wurden in 21 cm langen Stücken (bis auf wenige Ausnahmen) aus dem Kern gesägt. Die Probe selbst hat eine Länge von 20 cm. Die zusätzliche Längentoleranz geht beim Zuschnitt auf die exakte Länge verloren. Dadurch entsteht ein entsprechender Fehler in der Tiefenauflösung (siehe Abb. 4.4).
3. Durch die ungeraden Enden und Brüche des Eiskerns ist eine genaue Längenmessung nicht möglich.

- Punkt 1 war mit dem zugänglichen Material nicht genauer zu quantifizieren. In dieser Arbeit wurde das Logbuch des KCOs als Grundlage für die Längeneichung des Kerns verwendet. Das bedeutet die Position der Proben sind an den Tiefenangaben der runs im Logbuch ausgerichtet. Dadurch kommt eine Tiefenunsicherheit relativ zum Logbuch nur innerhalb eines runs zustande und die Unsicherheiten wirken nicht kumulativ auf die gesamte Kernlänge.
- Die durch Punkt 2 und 3 entstehende Unsicherheit ist quantifizierbar. Für die Proben entsteht (mit ein paar Ausnahmen, siehe Tabelle 4.4) durch die Toleranz für den Längenzuschnitt eine Unsicherheit von $\pm 0.5\text{cm}$. Die Unsicherheit durch die Längenmessung beträgt $\pm 0.3\text{cm}$ pro Messung. Die Gesamtunsicherheit der Tiefenauflösung für eine Probe setzt sich durch die quadratische Addition der beiden Komponenten zusammen.

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta l)^2} \quad (4.5)$$

wobei ΔT der Gesamttiefenunsicherheit ist, Δu der Fehler durch die Längentoleranz und Δl die Unsicherheit der Längenmessung. Der Gesamtunsicherheit der Tiefenauflösung ist in folgender Tabelle festgehalten.

Wert der Längentoleranz $\Delta u[\text{cm}]$	Unsicherheit der Längenmessung $\Delta l [\text{cm}]$	Fehler der Gesamt- tiefenunsicherheit $\Delta T [\text{cm}]$
1.0	0.3	0.583
0.7	0.3	0.461
0.8	0.3	0.5
3.5	0.3	1.78

Tabelle 4.4: **Gesamttiefenunsicherheit**

4.4 Fehler der DEP-Daten

Für eine eingehende Analyse und Fehlerbetrachtung beim Vergleich der DEP-Daten mit den Koaxialdaten muss für die DEP-Daten eine Unsicherheit der Permittivität und der Tiefe angegeben werden. Die apparative Unsicherheit der DEP-Methode beträgt 2.1% [Wilhelms, 1996]. Diese Unsicherheit ist exemplarisch für einen repräsentativen Wert im jeweiligen Plot dargestellt. In den Plots für die Messungen am Peak ist die Unsicherheit für $\varepsilon'_r = 2.4$ und damit $\Delta\varepsilon'_r = \pm 0.0504$ und für die Plots mit den Messungen am unteren Kernende für $\varepsilon'_r = 2.7$ und damit $\Delta\varepsilon'_r = \pm 0.0567$ eingezeichnet. Hier ist zu bemerken, dass der repräsentative Fehlerbalken zur besseren Übersichtlichkeit nicht bei $\varepsilon'_r = 2.4$ respektive $\varepsilon'_r = 2.7$ eingezeichnet ist.

Da die Koaxialmethode eine Permittivitätsmessung über 20 cm darstellt, muss auch bei den DEP-Daten eine Mittelung über 20 cm stattfinden. Wie in Diagramm 4.7 zu sehen ist, sind die Permittivitätswerte in den 20cm-Intervallen nicht gaußverteilt. Somit ist eine Verwendung des arithmetischen Mittelwerts nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wurde der Median gewählt.

Als Abschätzung für die Streuung der DEP-Werte im betrachteten Intervall sind die 1. Quartil (25%-Quantil) und die 3. Quartil (95%-Quantil) gewählt. Dies ist nicht als Fehlerbereich zu verstehen, sondern ein Maß für die Streuung. Die Tiefenunsicherheit des DEP-Datensatzes ist nicht bekannt. Um die Tiefenunsicherheit der Koaxialdaten auf die DEP-Daten beziehen zu können, wurden die Tiefenunsicherheit der DEP-Werte abgeschätzt, indem der Median zusätzlich zum ursprünglichen Intervall in zwei weiteren Intervallen bestimmt wurde. Einmal um einen Zentimeter nach unten und einmal um einen Zentimeter nach oben verschoben. Die dadurch entstehende Änderung der mittleren Permittivität im Intervall gibt einen Bereich für die Schwankung der Permittivität an, wenn die Probe in der Tiefe um ± 1.0 cm variiert. Ein Zentimeter Variation begründet sich dadurch, dass der DEP-Datensatz zwar eine Tiefenauflösung von 0.5 cm hat, die Gesamtunsicherheit der Koaxialmessungen jedoch für die meisten Messungen über 0.5 cm liegt.

4.5 Bestimmung der Permittivität über die gemessene Dichte der Proben (Kovac, siehe Grundlagen)

Aus den gemessenen Daten der Probe (Gewicht, Abmessungen ect.) können das Volumen, die Dichte und daraus die Kovac-Permittivität bestimmt werden. Die Fehler berechnen sich über die Fehlerfortpflanzung (Anhang: *Fehlerberechnung zu Volumen, Dichte, Kovac-Permittivität*). Der Vergleich mit den Koaxialwerten findet in der Diskussion statt.

$$V = \pi L(R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (4.6)$$

$$\rho = \frac{m}{\pi L(R_{out}^2 - R_{in}^2)} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon'_{rKovac} = (1 + 0.845\rho)^2 \quad (4.8)$$

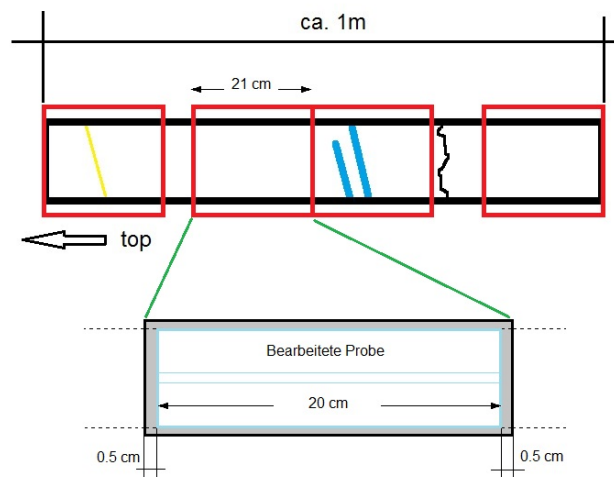


Abbildung 4.4: **Kernteilung und Längentoleranz:** Die Probe wird in 21 cm Stücken aus dem run gesägt. Der graue Bereich wird im Lauf der Bearbeitung entfernt. Die Längentoleranz sind die 0.5 cm Überstand pro Seite (siehe Methodik). Die gelbe und blaue Markierung stellt Staub- bzw. Eislagen dar.

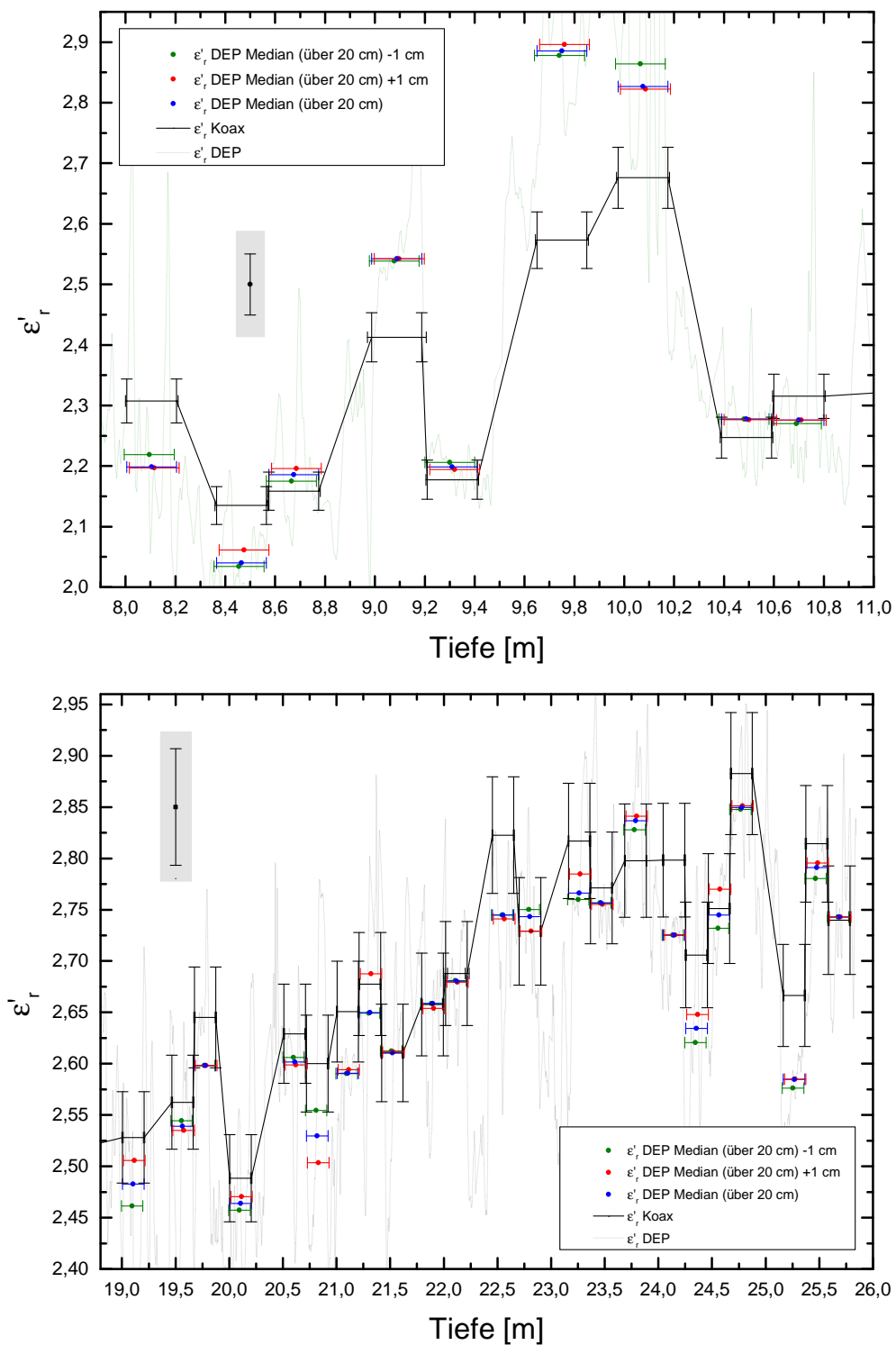


Abbildung 4.5: **Variation des Intervalls um ± 1 cm:** Auswirkung einer Tiefenunsicherheit auf den Median der DEP-Daten. Wie in Abb. 4.3 ist der apparative Fehler der DEP-Daten (grau hinterlegt) wieder exemplarisch eingezeichnet.

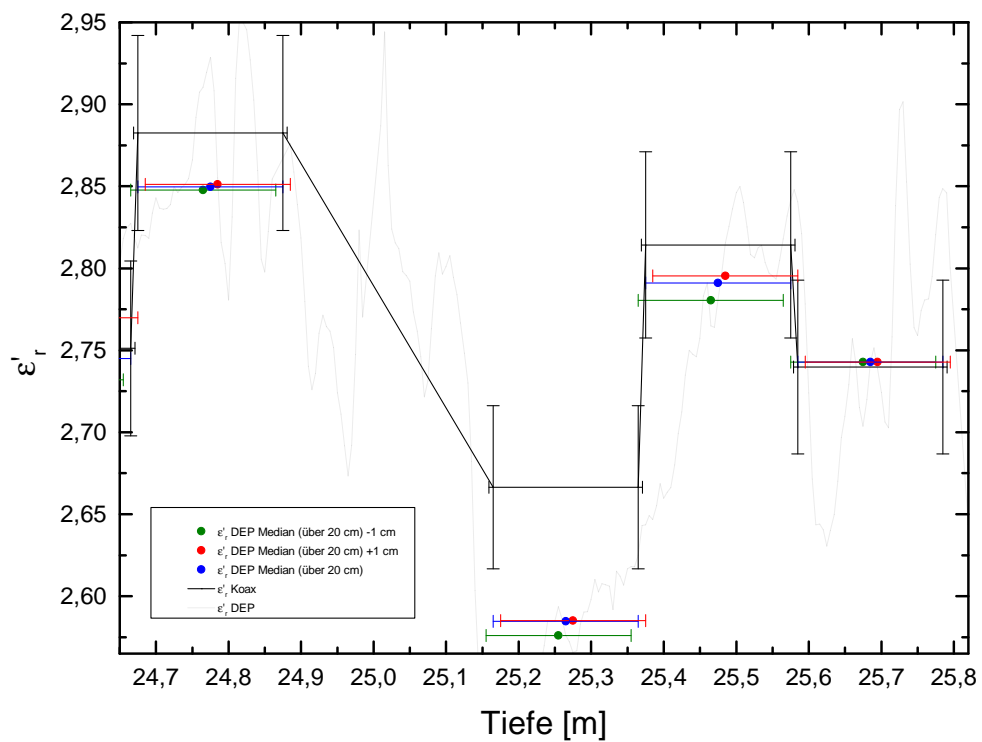


Abbildung 4.6: **Probe mit großen Abweichungen:** Anhand der Proben #3 (in der Mitte) ist illustriert, dass die Koaxialwerte nach der Gap Correction teilweise weit oberhalb des Medians der DEP-Daten liegen. Dies ist auch in Abb. 4.5 am Peak deutlich zu sehen.

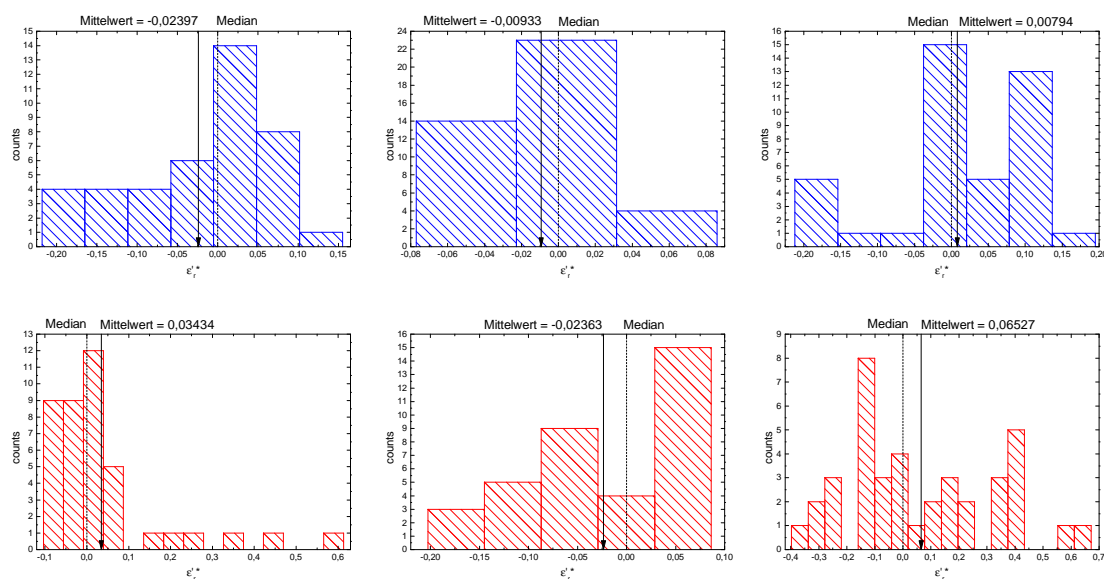


Abbildung 4.7: **Statistische Verteilung der DEP-Werte in einem 20 cm-Intervall:**

Hier exemplarisch für drei aus homogenem Firn (blau) bestehende und drei mit Eislagen und Eislinen durchzogene Proben (rot). Die Binbreite ergibt sich über die apparative Unsicherheit des DEPs (2.1%) [Wilhelms, 1996] bezogen auf den Median des betrachteten Intervalls. $\varepsilon_r'^*$ ist der DEP-Wert minus den Median der DEP-Werte im betrachteten Intervall. Somit befindet sich der Median in diesem Diagramm immer bei $\varepsilon_r'^*=0$ und die Verteilung bezieht sich auf die Abweichung zum Median ins positive oder negative. Zu beachten ist, dass insbesondere für die Proben mit Eislagen keine Gaußverteilung angenommen werden kann. Auch für die homogenen Firnproben wäre die Annahme einer Gaußverteilung der Werte nicht gut. Dies sieht man auch daran, dass der Mittelwert vom Median abweicht.

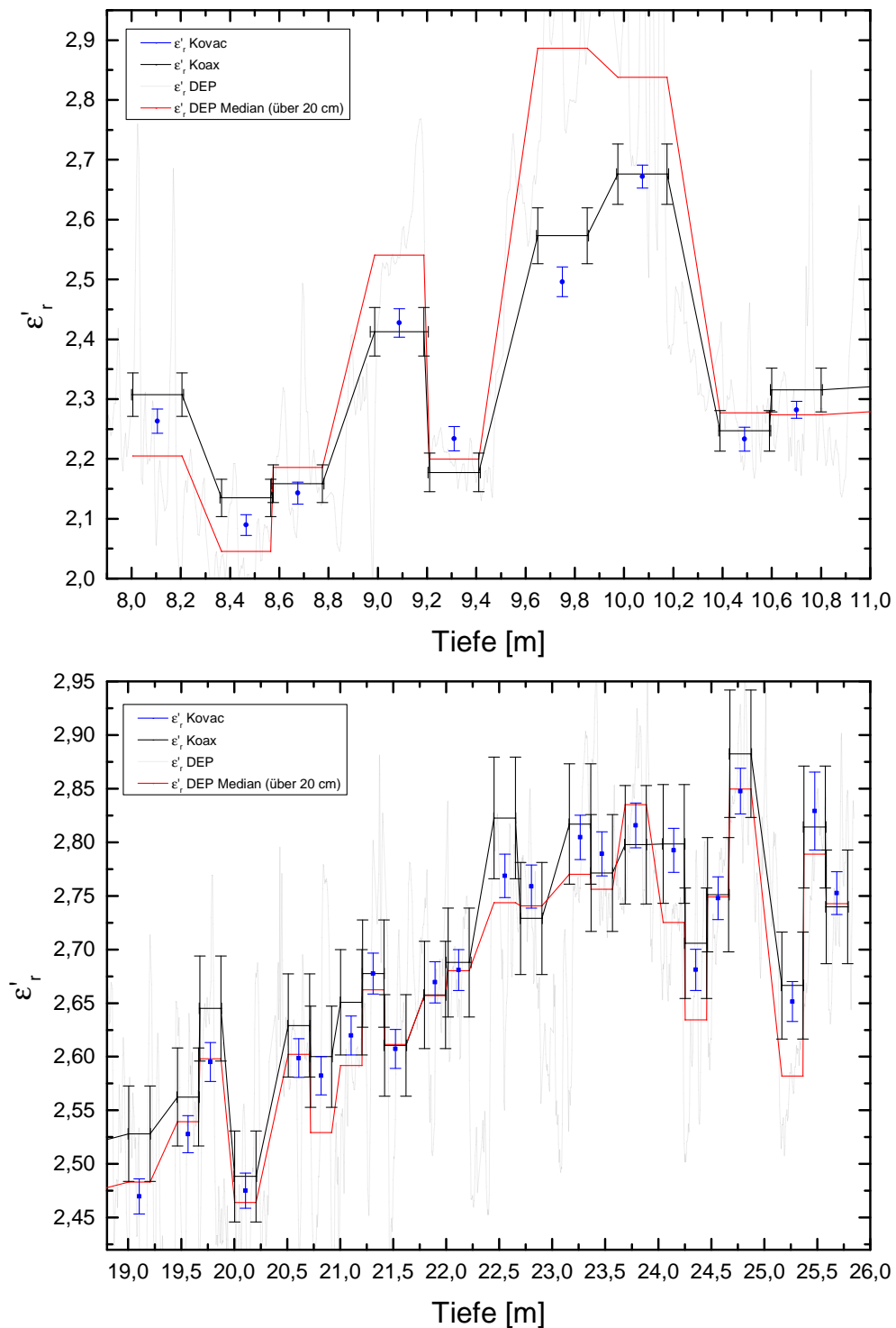


Abbildung 4.8: Vergleich der Permittivität nach Kovac mit den Koaxial- und DEP-Daten: Berechnung der Kovac Permittivität über Formel (2.9).

5 Diskussion

Im diesem Kapitel sollen die entstandenen Ergebnisse im Hinblick auf die grundlegende Fragestellung diskutiert werden: Wie repräsentativ sind die im kHz-Bereich vorgenommenen Messungen für den GPR-MHz-Bereich? Zusätzlich wird die Eignung des Bearbeitungssetups für den routinemäßigen Einsatz bewertet. Zuletzt wird ein Ausblick über weitere Untersuchungen gegeben, die an diese Arbeit anknüpfen können.

5.1 Vergleich der Koaxial- und DEP-Daten

Von wesentlichem Interesse bei dieser Arbeit ist die Frage in welcher Genauigkeit mit der Koaxialmethode Firnproben gemessen werden können und inwieweit die Ergebnisse mit den bestehenden DEP-Daten übereinstimmen.

5.1.1 Relativer Verlauf

- Wie man in den Plots in Abb. 5.1 erkennen kann, stimmt der relative Verlauf der reinen Koaxialmessungen (ohne Gap Correction) mit den DEP-Werten sehr gut überein. Die meisten Koaxialwerte liegen jedoch unter den DEP-Werten (22 von 32 Messpunkte liegen darunter). Dies ist aber zu erwarten, da der Luftspalt zwischen Probe und Zelle den Permittivitätswert herabsenkt.
- Der relative Verlauf nach dem Durchführen der Gap Correction stimmt wie man in Abb. 5.1 sieht ebenfalls überein.

Datensätze	Pearson	
	Korellationskoeffizient	RMSE
Koaxial (ohne Gap Correction) & DEP	0.908	0.171
Koaxial (mit Gap Correction) & DEP	0.929	0.081

Tabelle 5.1: **Pearson Korrelationskoeffizient:** Berechnet in Origin.

5.1.2 Große Abweichungen am Peak

Auffällig ist, dass sowohl die unkorrigierten als auch die korrigierten Koaxialmessungen am Peak bei ca. 10 m Tiefe weit unterhalb der DEP-Werte liegen (siehe Abb. 5.1). An dieser Stelle ist der KCO-Bohrkern mit sehr vielen Eislagen und Eislinsen durchzogen. Eine mögliche Erklärung für die große Diskrepanz der Werte ist, dass der Inversionsalgorithmus Mehrfachreflexionen, die an Eislagen und Eislinsen auftreten nicht berücksichtigt [pers. Mitteilung von P. Bohleber, 2014]. Ein weiterer Grund für die Abweichungen könnte sein: Am Peak war der Kern in einem sehr schlechten Zustand, wodurch selbst nach der Bearbeitung große unregelmäßige Luftspalte blieben, wodurch eine Messung der Durchmesser und somit eine geeignete Gap Correction schwierig ist.

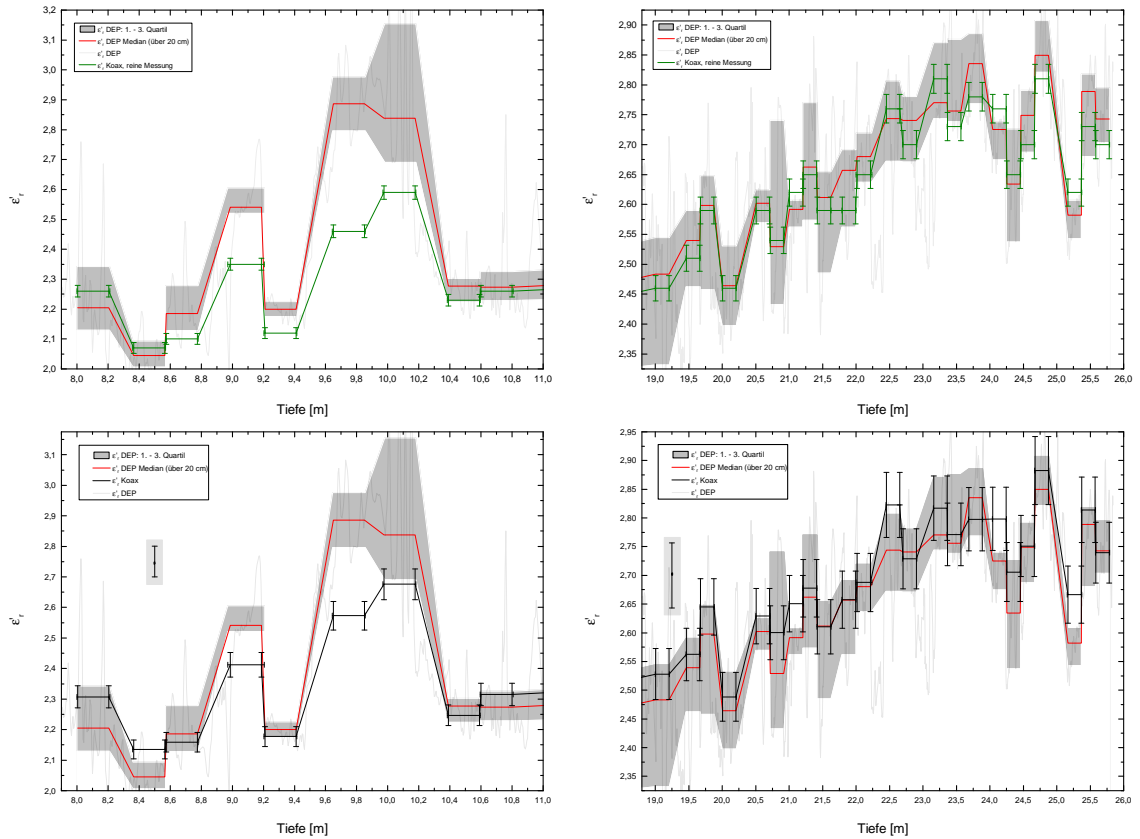


Abbildung 5.1: **Vergleich der Koaxialdaten vor und nach Gap Correction:** Oben: Koaxialdaten vor der Gap Correction. Unten: Koaxialdaten nach der Gap Correction. Man beachte wieder den einzelnen grau hinterlegten Fehlerbalken. Dieser stellt exemplarisch die apparative Unsicherheit der DEP-Daten dar.

5.2 Offset zwischen Koaxialdaten und DEP-Daten

Zu beachten ist, dass die meisten Koaxialwerte nach der Gap Correction über den DEP-Werten liegen (22 von 32 Messpunkten liegen darüber). Hinzu kommt die Tatsache, dass zum Vergleich der Koaxialwerte (MHz-Bereich) mit den DEP-Werten (kHz-Bereich) die Werte im Bezug auf die Frequenz ineinander umgerechnet werden müssen. Dies ist aus Abb. 2.2 von Bohleber et al. [2012(2)] im Grundlagenteil ersichtlich. Die DEP-Daten würden anhand dieser Grafik durch den Transfer in den MHz-Bereich um 0.115 kleiner werden und der Offset zu den Koaxialdaten würde somit noch größer werden. Es ist jedoch zu beachten, dass ein abschließender Vergleich der Absolutwerte beider Datensätze noch nicht geleistet werden kann, da viele Unsicherheiten und mögliche Fehlerquellen noch weiter untersucht werden müssen.

5.3 Imaginärteil

Der Imaginärteil ε_r'' der komplexen Permittivität kann mit der Koaxialzelle nicht gut gemessen werden. Das liegt daran, dass der Imaginärteil im MHz-Bereich für Eis und Firn sehr klein ist. Außerdem findet die Messung weit entfernt von der Relaxationsfrequenz statt und somit sind die Debyeparameter für den Algorithmus zu wenig eingegrenzt wodurch sie nicht genau genug bestimmbar sind [pers. Mitteilung von P. Bohleber, 2014]. ε_r'' kann jedoch aus dem Realteil für eine feste Frequenz berechnet werden (siehe Anhang: *Berechnung und Plot des Imaginärteils*). Man beachte, dass der Imaginärteil der Koaxialmessung stark vom DEP-Wert abweicht. Der Plot der dadurch berechneten Werte befindet sich im Anhang: *Berechnung und Plot des Imaginärteils*.

5.4 Kovac-Wert

Aus der gemessenen Dichte lässt sich die Permittivität gemäß Kovac (siehe Formel (2.9)) berechnen. Die Formel von Kovac hängt nur von der Dichte ab. Sie bezieht beispielsweise nicht den Säuregehalt des Firns mit ein. Je nach dem wie groß die Ionenkonzentration im KCO ist, würde man die Permittivität nach Kovac eher unter den DEP-Daten erwarten. Jedoch liegt sie eher über den DEP-Daten. Mit den Koaxialmessungen stimmen die Kovac-Werte besser überein.

5.5 Statistische Verteilung der DEP-Werte im Intervall

Da die Koaxialmethode eine Messung über ein 20 cm Intervall ist, müssen zur Vergleichbarkeit auch die DEP-Daten über dieses Intervall gemittelt werden. Wie man in Abb. 4.7 sieht, sind die Permittivitätswerte im betrachteten Intervall nicht gaußverteilt. Das sieht man auch daran, dass der Mittelwert und der Median nicht gleich sind. Da keine Gaußverteilung gegeben ist, ist der Mittelwert und alle damit verbundenen Unsicherheiten (Standardabweichung ect.) für das Intervall nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wurde der Median gewählt und die 1. und 3. Quartil als Maß für die Streuung der Werte angegeben.

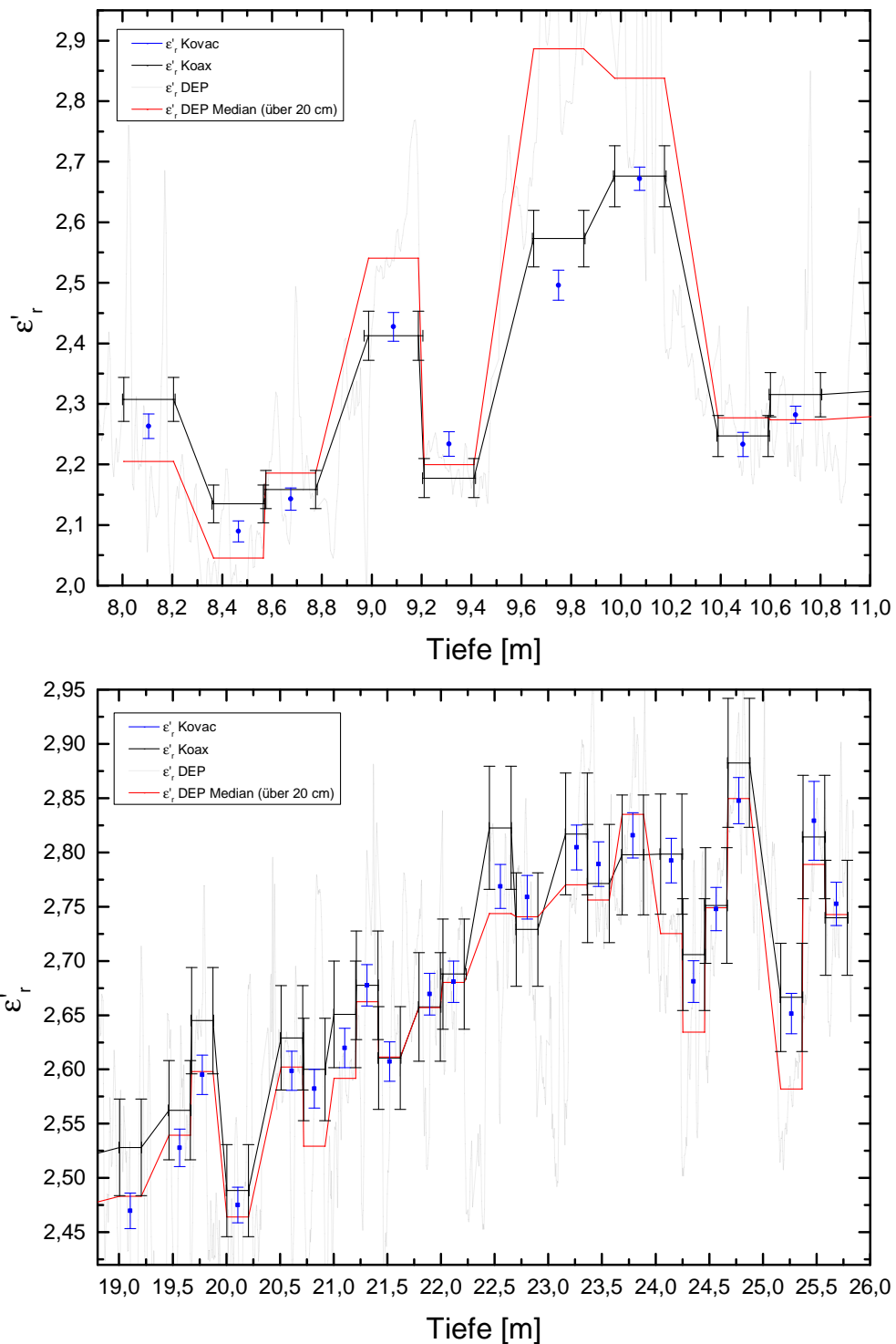


Abbildung 5.2: Vergleich der Permittivität nach Kovac mit den DEP-Daten: Man beachte, dass die Kovac-Werte systematisch über den DEP-Werten liegen.

Probe	Abweichung [cm]
KCO#26, 4/5	0.05
KCO#24, 2/6	0.20
KCO#23, 6/7	0.05
KCO#21, 1/7	0.05
KCO#10, 1/6	0.10
KCO#09, 5/6	0.02

Tabelle 5.2: **Zu kurze Proben**

5.5.1 Fehlende Längenkorrektur

Ein wesentlicher Punkt, der unbedingt beachtet werden muss, ist, dass die Gap Correction nur Luftspalte berücksichtigt, die durch Differenzen der Durchmesser auftreten. Eine Korrektur für Luftspalte, die durch zu kurzen Proben entstehen wurde nicht durchgeführt. Die Länge geht jedoch sehr sensitiv in die Bestimmung der Permittivität ein. Im Allgemeinen konnte die Länge mit dem Bearbeitungssetup relativ genau eingestellt werden und nur wenige Proben weichen ab. In Tabelle 5.2 sind die Proben aufgeführt, die kürzer als 20 cm geworden sind.

5.5.2 Parameter im *jobfile*

Ein weiterer wichtiger Punkt, der diskutiert werden muss, ist, dass für die dem Algorithmus vorzugebenden Parametergrenzen im *jobfile* zwar durch Minimieren des Fitfehlers möglichst gut bestimmt wurden, jedoch bleibt der Fitfehler für die vorwärtsgerechneten S-Parameter bei etwa 500 (siehe *outputfile* im Anhang: *Beispielhaftes jobfile und outputfile*). Zum Vergleich: Der Fitfehler der Koaxialzelle mit kleinerem Durchmesser beträgt etwa 100. Momentan ist noch unklar wodurch dieser größere Fitfehler entsteht. Untersuchungen dazu sind allerdings im Gange.

In diesem Zusammenhang wurde auch die Auswirkung auf den Fit und die vorwärtsgerechnete Permittivität durch Änderung von Parametern im *jobfile* betrachtet. Untersucht wurde dieses Problem anhand der Referenzimpedanz Z_{ref} der Zelle. Z_{ref} lässt sich für einen Koaxialleiter berechnen (Anhang: *Berechnung der Referenzimpedanz für Koaxialleiter*) und ergibt für die entsprechenden Radien der Koaxialzelle $Z_{ref} = 74$. Versucht man durch Variieren dieses Parameters den Fitfehler zu minimieren, so ist der beste Wert $Z_{ref} = 86.5$. Die sich dadurch ergebenden Unterschiede für die vom Optimierungsalgorithmus gefundene Permittivität sind in Tabelle 5.3 festgehalten.

Mit der Koaxialzelle gemessene S-Parameter für Firnproben und POM-Proben wurden testweise mit anderen Algorithmen zur Bestimmung der Permittivität (in [Bohleber et al., 2012(1)] aufgeführt) überprüft, wobei sich in den Ergebnissen deutliche Unterschiede zeigten. Der Algorithmus und alle bekannten Einstellungen wurden ursprünglich für eine Zelle mit anderer Geometrie erstellt. Dass die Auswertung mit der in dieser Arbeit verwendeten Zelle Schwierigkeiten bereitet, liegt vermutlich am nicht genau bekannten Impedanzsprung in der Zelle. Womöglich kommt es zu weiteren Effekten, die bislang unberücksichtigt blieben [pers. Mitteilung von P. Bohleber, 2014]. Dies wird anhand von Abb. 5.3 deutlich. Hier wurden die S-Parameter durch eine Vorwärtsrechnung aus den Debyeparametern be-

stimmt, die der Optimierungsalgorithmus ausgegeben hat. Das dazu verwendete *outputfile* befindet sich im Anhang: *Beispielhaftes jobfile und outputfile*.

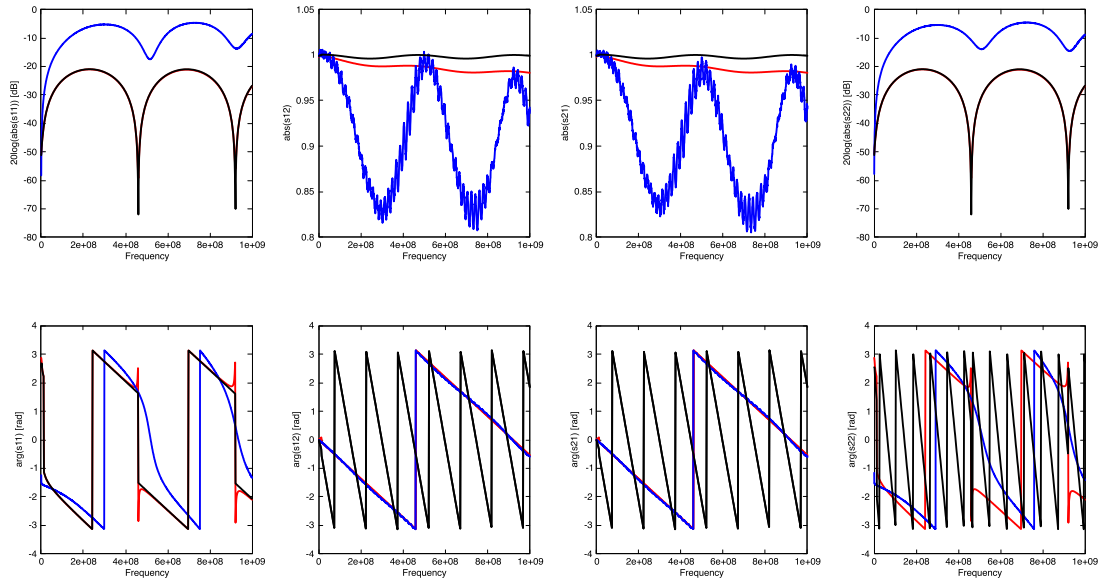


Abbildung 5.3: **Vorwärtsrechnung von S-Parametern aus den von *deimos* ausgegebenen Debyeparametern:** Blau: gemessene S-Parameter einer Firnprobe. Rot: Berechnung nur für die Zelle (50Ω für alle Komponenten). Schwarz: Berechnung für den gesamten Zellaufbau bei 50Ω [pers. Mitteilung von P. Bohleber, 2014].

Probe	ϵ'_r bei $Z_{ref} = 74.0$	ϵ'_r bei $Z_{ref} = 86.5$	Differenz	relative Abweichung [%]
POM_1	2.92	2.89	0.03	1.04
POM_2	2.92	2.92	0	0
POM_3	2.89	2.87	0.02	0.70
$KCO\#25, 2/6$	2.81	2.76	0.05	1.81
$KCO\#22, 2/5$	2.67	2.65	0.02	0.75
$KCO\#11, 1/5$	2.62	2.59	0.03	1.16
$KCO\#10, 1/6$	2.35	2.35	0	0

Tabelle 5.3: **Abweichung der Permittivität durch unterschiedliche Impedanzen im *jobfile*:** Alle Proben wurden bei gleicher Temperatur (-15°C) und im gleichen Frequenzbereich (0.3 MHz -1.9 GHz) gemessen. Differenz: $\epsilon'_{r,Z=74.0} - \epsilon'_{r,Z=86.5}$, relative Abweichung: $\left(\frac{\epsilon'_{r,Z=74.0}}{\epsilon'_{r,Z=86.5}} - 1\right) \cdot 100\%$

5.5.3 Fazit: Bearbeitungssetup

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das von Hoppe zur Eisbearbeitung entwickelte Bearbeitungssetup in großem Umfang auf einen Firnkern angewandt. Die Bearbeitung der Proben

funktioniert prinzipiell zuverlässig. Die aus den Proben gewonnenen Daten bestätigen den Verlauf der DEP-Daten sehr gut. Inwieweit Unzulänglichkeiten des Bearbeitungssetups für den Offset zwischen Koaxialdaten und DEP-Daten verantwortlich sind, lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend klären, jedoch liegt die größere Unsicherheit eher in der Auswertung der Daten mit den Optimierungsalgorithmen. Das Bearbeitungssetup weist in aktuellem Zustand konstruktive Einschränkungen auf, die es schwierig machen die an die Proben gestellten Anforderungen zu erfüllen. Die folgenden Punkte nennen Schwierigkeiten, die im Zusammenhang mit dem Bearbeitungssetup entstehen.

1. Der Zeitaufwand zur Herstellung der Proben ist sehr groß (ohne Dokumentation und Verpackung ect. min. 2 h für eine Probe). Somit ist eine Bearbeitung von langen Eiskernen und somit sehr vielen Proben nicht sinnvoll.
2. Besonders Firnproben gehen unter einer gewissen Dichte leicht kaputt (Absplittierungen, Kern bricht). Es ist also unter Umständen nicht möglich gerade aus den oberen Bereichen von Eiskernen Proben zu präparieren.
3. Die Proben können nicht in hoher Genauigkeit hergestellt werden, was einen Einfluss auf die Messung hat und über die Gap Correction angeglichen werden muss.

5.5.4 Fazit: Messungen

- Im Rahmen der Unsicherheiten konnte die Übereinstimmung von Koaxial- und DEP-Messungen sowohl im relativen Verlauf als auch im Absolutwert gezeigt werden.
- Der Absolutwert der Koaxialmessungen ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch nicht voll belastbar.
- Möglicherweise können weitere auf diese Messdaten aufbauende Auswertungen zeigen, ob es doch einen signifikanten Unterschied zwischen Koaxial- und DEP-Daten gibt.

5.6 Ausblick

Im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich alle vermuteten Fehlerquellen zu untersuchen. Im Folgenden sind Ansatzpunkte genannt, die durch die Ergebnisse und Erfahrungen dieser Arbeit motiviert als weitere Schritte dienen können. Die Punkte sind nach Priorität geordnet.

1. **Algorithmen und *jobfile*:** Den vermutlich größten Einfluss auf die Messungen hat das Zusammenspiel zwischen den Eigenschaften der Zelle (vor allem die Referenzimpedanz) und dem Optimierungsalgorithmus für die S-Parameter. An dieser Stelle muss die geeignete Referenzimpedanz der Zelle und der beste Satz Parameter für das *jobfile* des Algorithmus gefunden werden. In diesem Zusammenhang wurden zum Test mit anderen Inversionsalgorithmen bereits bestehende Kontakte zu Norman Wagner, MFPA Weimar genutzt .

2. **Längenkorrektur:** Da die Koaxialzelle empfindlich auf Längendifferenzen zwischen Probe und Zelle reagiert, lohnt es sich die Auswirkung solch eines Luftspalt abzuschätzen oder zu korrigieren. Dafür besteht bereits eine Methode von Bohleber, die durchgeführt werden kann.
3. **Untersuchung von Proben mit Eislagen (inhomogene Proben):** Ein besseres Verständnis der Messergebnisse von Proben mit Eislagen könnte die Verwendung von Transfer-Matrizen bringen [Bohleber et al. 2012(1)] [Zhang and Li, 2008]. Solch eine Modellierung der Inhomogenitäten könnten die Schwierigkeiten des Inversionsalgorithmus bei Messungen mit inhomogenen Proben auffangen. Untersuchungen von inhomogenen Probeneigenschaften hat sich bereits Andreas Weu [2013] anhand von Wasser in Sandproben zugewendet. In diesem Zusammenhang sind in Abb. 5.4 die Position von Eis- und Staublagen eingezeichnet wodurch Abweichungen der Messungen auf Korrelation mit Vorkommen von Eis- oder Staublagen überprüft werden können.
4. **Gap Correction, Näherungsformel:** Die verwendete Formel zur Berechnung der Gap Correction ist nur eine Näherungsformel. Die exakte Rechnung können wir aufgrund von einem zu ungenau bestimmten Imaginärteil der Permittivität nicht verwenden. Es würde sich lohnen den Fehler zu ermitteln, den man durch Verwendung der Näherungsformel macht.
5. **Unsicherheit der DEP-Daten:** Die 1. und 3. Quartile als Maß der Streuung der DEP-Werte entspricht keiner Unsicherheit. Eine genaueren Betrachtung der Verteilung der DEP-Permittivitätswerte in den 20 cm Intervallen ließe eine bessere Fehlerabschätzung der DEP-Werte zu und führte zu einer besseren Vergleichbarkeit mit den Koaxialmessungen. Es könnte zum Beispiel an sämtlichen Proben überprüft werden, ob sich die Verteilung der DEP-Werte für homogene Proben und Proben mit Eislagen prinzipiell unterscheidet, und eine individuelle Mittelung und Unsicherheitsbetrachtung pro Intervall erarbeitet werden.
6. **Verbesserung des Bearbeitungssetups:** Obwohl das Bearbeitungssetup gut funktioniert, gibt es einige Veränderungsvorschläge, die eine Bearbeitungen der Proben präziser und schneller werden lassen. Diese sind im Methodikkapitel aufgezählt.

Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse haben diese Arbeit zu einem erfolgreichen Projekt gemacht, das durch weiterführende Studien sinnvoll fortgesetzt werden kann.

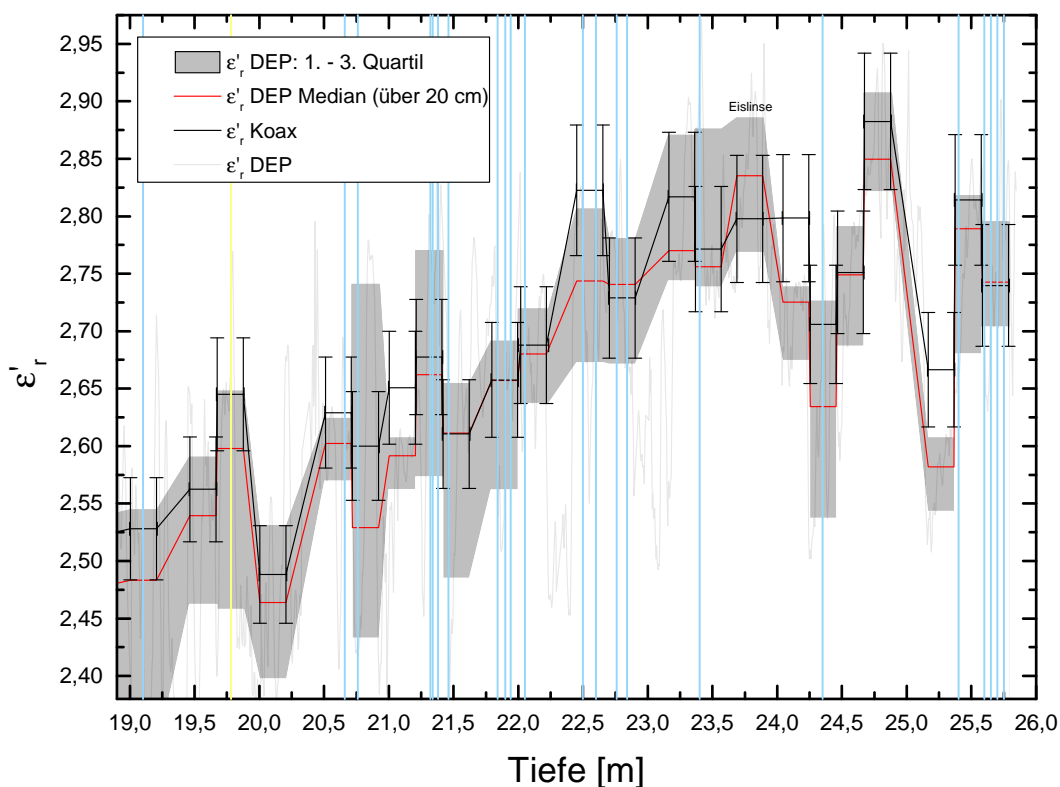
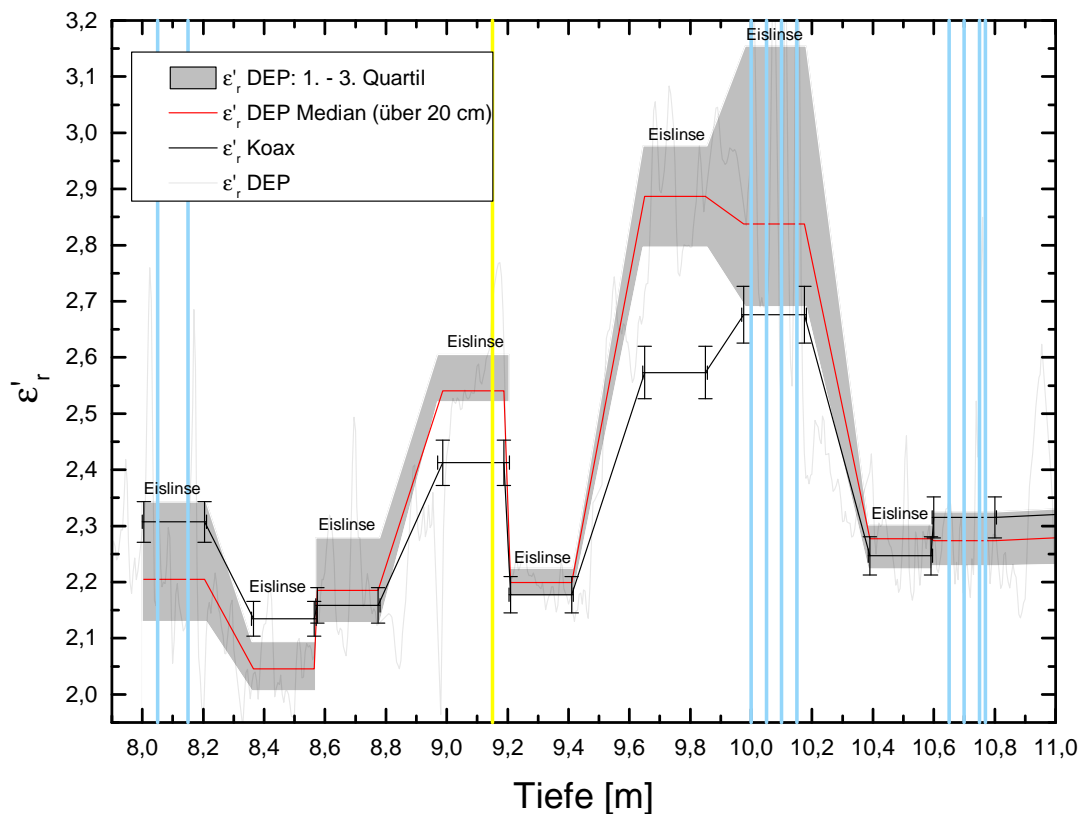


Abbildung 5.4: **Position der Eis- und Staublagen:** Blau: Eislagen. Gelb: Staublagen. Außerdem sind Eislinseen markiert.

Literatur

- [Baker-Jarvis et al. 1990] Baker-Jarvis, J. ; Vanzura, E. J. ; Kissick, W. A.: Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 38(8) , p. 1096–1103. 1990
- [Baker-Jarvis et al. 2004] Baker-Jarvis, James ; Janezic, Michael D. ; Riddl, Bill ; Johnk, Robert T. ; Kabos, Pavel ; Holloway, Christopher L. ; Geyer, Richard G. ; Grosvenor, Chriss A.: *Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metal, Building Materials, and Negative-Index Materials / National Institute of Standards and Technology - NIST TN1536*. 2004. - research report
- [Bohleber 2011] Bohleber, P.: *Ground-penetrating radar assisted ice core research: The challenge of Alpine glaciers and dielectric ice properties*, IUP Heidelberg, Doctoral thesis, 2011
- [Bohleber et al. 2012(1)] Bohleber, P.; Wagner N., Eisen O.: Permittivity of ice at radio frequencies: Part 1. Coaxial transmission line cell, IUP Heidelberg, 2012 Erschienen in: *Cold Regions's Science and Technology* 82 (2012) S. 56-67
- [Bohleber et al. 2012(2)] Bohleber, P.; Wagner N., Eisen O.: Permittivity of ice at radio frequencies: Part 2. Artificial and natural polycrystalline ice, IUP Heidelberg, 2012 Erschienen in: *Cold Regions's Science and Technology* 83-84 (2012) S. 13-19
- [Bohleber et al, 2013] Bohleber, P.; Wagenbach, D.; Schöner, W.; Böhm, R.: To what extent do water isotope records from low accumulation Alpine ice cores reproduce instrumental temperature series? Erschienen in *Tellus, Series B*, 2013
- [Eisen, 2003] Eisen, O.: On the nature, interpretation and application of electromagnetic reflection in cold ice. *Bericht der Polarforschung* 474, 2003
- [Fujita et al. 2000] Fujita, S. ; Matsuoka, T. ; Ishida, T. ; Matsuoka, K. ; Mae, S.: *The Physics of Ice Core Records*. chap. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its application for radar sounding of polar ice sheets, p. 185–212, Hokkaido University Press, Sapporo, Japan, 2000
- [Hoelzle et al. 2011] Hoelzle, M.; Darms, G.; Lüthi, M.P.; Suter, S.: Evidence of accelerated englacial warming in the Monte Rose area, Switzerland/Italy. Department of Geosciences, University of Fribourg, 2011
- [Hoppe 2009] Hoppe, M.: *Frequenzabhängige Messungen der dielektrischen Eigenschaften von Eis mit einer Koaxial-Zelle*, IUP Heidelberg, Diploma thesis, 2009
- [Jackson 1962] Jackson, J. D.: *Klassische Elektrodynamik*. de Gruyter, 1962
- [Jepsen 2010] Jepsen, K.: *Leitfähigkeits- und Dichtemessungen an einem alpinen Eiskern*, Georg-August-Universität Göttingen, Bachelor thesis, 2010

- [Kovacs et al. 1995] Kovacs, A. ; Gow, A.J. ; Morey, R.M.: The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology* 23 , p. 245– 256. 1995
- [Logbuch KCO 2005]:
- [Looyenga 1965] Looyenga, H.: Dielectric Constants of Heterogenous Mixtures. *Physica* 31 , p. 401–406. 1965
- [Oswald 2000] Oswald, B.: Full wave solution of inverse electromagnetic problems - Application in environmental measurement techniques, Swiss Federal Institute of Technology, Dissertation, 2000
- [Oswald et al. 2006] Oswald, B. ; Doetsch, J. ; Roth, K.: A new computational technique for processing transmission-line measurements to determine dispersive dielectric properties. *Geophysics* 71(2) , p. K31–K35. 2006
- [Wagenbach et al. 2012] Wagenbach, D.; Bohleber, P.; Preunkert, S.: Cold, alpine ice bodies revisited: What may we learn from their impurity and isotope content? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, p. 245–263. 2012
- [Wagner et al. 2011] Wagner, N. ; Emmerich, K. ; Bonitz, F. ; Kupfer, K.: Experimental investigations on the frequency and temperature dependent dielectric material properties of soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(8), 2011
- [Wilhelms 1996] Wilhelms, F.: Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen. *Berichte zur Polarforschung* 191 . 1996
- [Wilhelms 2005] Wilhelms, F.: Explaining the dielectric properties of firn as a density-and-conductivity mixed permittivity (DECOMP). *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 2005
- [Zhang and Li 2008] Zhang, K. ; Li, D.: *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics*. 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [Wikipedia.it, 2014] Bild des Colle Gniffeti:
[http : //it.wikipedia.org/wiki/Punta_zumstein](http://it.wikipedia.org/wiki/Punta_zumstein), 02.02.2014
- [map.geo.admin.ch, 2014] Höhenangaben von Signalkuppe und Zumsteinspitze:
[http : //map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch), 02.02.2014

Anhang

Anhang zur Methodik

Impedanz und S-Parameter für Koaxialleiter

Der entscheidende Parameter zur Charakterisierung einer transmission line ist die Impedanz Z . Für einen Koaxialleiter ist diese gegeben durch:

$$Z = \sqrt{\frac{R' + i\omega L'}{G' + i\omega C'}}$$

Dabei ist R' der Widerstand, L' die Induktivität, G' die Konduktivität und C' die Kapazität der Koaxialleitung [Bohleber, 2011]. Weiterhin gilt für diese Größen:

$$\begin{aligned} R' &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_{out}} + \frac{1}{R_{in}} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \\ L' &= \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R_{out}}{R_{in}} \\ G' &= \frac{2\pi}{\ln \frac{R_{out}}{R_{in}}} (\varepsilon_r'' \varepsilon_0 + \sigma) \\ C' &= \frac{2\pi \varepsilon_r' \varepsilon_0}{\ln \frac{R_{out}}{R_{in}}} \end{aligned}$$

wobei $\mu = \mu_r \mu_0$ und μ_0 die Permeabilität des Vakuums und μ_r die relative Permeabilität des Mediums ist. Weiterhin bezeichnet σ die Leitfähigkeit des Dielektrikums [Hoppe, 2009] [Bohleber, 2011].

Nach Oswald et al. [2006] hängen die S-Parameter wie im Folgenden dargestellt mit der Impedanz Z , der Länge der Koaxialzelle l , dem Referenzwiderstand Z_{ref} und dem Ausbreitungsfaktor γ zusammen.

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R' + i\omega L')(G' + i\omega C')} \\ S_{11} = S_{22} &= \frac{(Z^2 - Z_{ref}^2) \tanh(\gamma l)}{2Z Z_{ref} + \tanh(\gamma l) (Z^2 + Z_{ref}^2)} \\ S_{12} = S_{21} &= \frac{2}{2 \cosh(\gamma l) + \sinh(\gamma l) \left(\frac{Z}{Z_{ref}} + \frac{Z_{ref}}{Z} \right)} \end{aligned}$$

Z ist eine Funktion von ε_r' und damit sind S_{ij} und S_{ii} Funktionen von ε_r' . Da die Formeln für S_{ij} und S_{ii} jedoch nicht linear sind, ist die Inversion $S_{ij}(\varepsilon_r') \rightarrow \varepsilon_r'(S_{ij})$ nicht möglich. Die Werte des Debyemodells ε_∞ , ε_{static} , σ und f_r können numerisch mit dem genetischen Algorithmus berechnet werden. Die geometrischen Größen der Koaxialzelle R_{out} , R_{in} , l sind bekannt oder können nachgemessen werden. Für die Debyeparameter ε_∞ , ε_{static} , σ und f_r werden dem Algorithmus physikalisch motivierte Grenzen vorgegeben. So ist z.B. die obere Grenze der Frequenz durch den Radius des Innen- und Außenleiters der Zelle und der Tatsache beschränkt, dass man keine höhere Moden in der Zelle anregen will. Daraus folgt die cutoff-Frequenz:

$$f_{cutoff} = \frac{c_0}{\pi(R_{in} + R_{out})\sqrt{\varepsilon_r'}}$$

wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit und ε'_r der Realteil der Permittivität der Probe ist und für Eis und Firn mit den Literaturwerten abgeschätzt werden kann. Damit ergibt sich eine obere Grenze der Frequenz von etwa 1 GHz. Somit können durch fitten und Optimieren der künstlichen an die gemessenen S-Parameter die Debyeparameter bestimmt werden, woraus sich die relative Permittivität bestimmen lässt. Betrachtet man Formel (2.7) und zieht in Betracht, dass die Messung im MHz bis GHz-Bereich stattfindet, so sieht man leicht, dass $\varepsilon'_r \simeq \varepsilon_\infty$, da $(\omega\tau)^2 = \left(\frac{f}{f_r}\right)^2$ bei $f = 10^6 - 10^9$ Hz und $f_r \approx 10^2$ Hz sehr groß wird.

Beispielhaftes *jobfile* und *outputfile*

Siehe hinterer Teil des Anhangs.

Anhang zu den Ergebnissen

Fehlerrechnung der Gap Correction

Aus Formel (4.3) folgen mit gaußscher Fehlerfortpflanzung:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon'_{rc} = & [((\partial_{\varepsilon'_{rm}} \varepsilon'_{rc})\Delta\varepsilon'_{rm})^2 + ((\partial_{\varepsilon'_{r1}} \varepsilon'_{rc})\Delta\varepsilon'_{r1})^2 \\ & + ((\partial_{R_1} \varepsilon'_{rc})\Delta R_1)^2 + ((\partial_{R_2} \varepsilon'_{rc})\Delta R_2)^2 \\ & + ((\partial_{R_3} \varepsilon'_{rc})\Delta R_3)^2 + ((\partial_{R_4} \varepsilon'_{rc})\Delta R_4)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Für die Ableitungen gilt:

$$\begin{aligned} \partial_{\varepsilon'_{rm}} \varepsilon'_{rc} &= \frac{\varepsilon'_{r1} \ln \frac{R_3}{R_2} \ln \frac{R_4}{R_1}}{B} \\ \partial_{\varepsilon'_{r1}} \varepsilon'_{rc} &= -\frac{\varepsilon'^2_{rm} \ln \frac{R_3}{R_2} \left(\ln \frac{R_4}{R_3} + \ln \frac{R_2}{R_1} \right)}{B} \\ \partial_{R'_1} \varepsilon'_{rc} &= \frac{C}{R_1 B} \\ \partial_{R'_2} \varepsilon'_{rc} &= \frac{A}{R_2 B} \\ \partial_{R'_3} \varepsilon'_{rc} &= -\frac{A}{R_3 B} \\ \partial_{R'_4} \varepsilon'_{rc} &= \frac{C}{R_4 B} \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} A &= \varepsilon'_{rm} \varepsilon'_{r1} \left(\varepsilon'_{rm} \left(\ln \frac{R_3}{R_2} + \ln \frac{R_4}{R_3} + \ln \frac{R_2}{R_1} \right) - \varepsilon'_{r1} \ln \frac{R_4}{R_1} \right) \\ B &= \left(\varepsilon'_{rm} \ln \frac{R_4}{R_3} + \varepsilon'_{rm} \ln \frac{R_2}{R_1} - \varepsilon'_{r1} \ln \frac{R_4}{R_1} \right)^2 \\ C &= \varepsilon'_{rm} \varepsilon'_{r1} \left(\varepsilon'_{rm} - \varepsilon'_{r1} \frac{R_3}{R_2} \right) \end{aligned}$$

Die zugehörigen Parameter und zugehörigen Unsicherheiten finden sich in den Kapiteln Methodik und Ergebnisse.

Längendifferenzen der runs zwischen KCO-Logbuch und Längenmessungen

Siehe hinter Teil des Anhangs.

Fehlerrechnung zu Volumen, Dichte, Kovac-Permittivität

Die Fehlerrechnung erfolgt mit gaußscher Fehlerfortpflanzung.

$$\Delta V = \sqrt{((\partial_L V)\Delta L)^2 + ((\partial_{R_{out}} V)\Delta R_{out})^2 + ((\partial_{R_{in}} V)\Delta R_{in})^2}$$

Berechnung der Referenzimpedanz für Koaxialleiter:

$$\partial_L V = \pi(R_{out}^2 - R_{in}^2)$$

$$\partial_{R_{out}} = 2\pi L R_{out}$$

$$\partial_{R_{in}} = -2\pi L R_{in}$$

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

$$\Delta\varepsilon'_{rKovac} = 2 \cdot 0.845 \Delta\rho \sqrt{\varepsilon'_{rKovac}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{R' + i\omega L'}{G' + i\omega C'}}$$

wobei $R' = G' = 0$ für nichtmagnetische Medien

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$Z = \frac{60\Omega}{\sqrt{\varepsilon'_r}} \sqrt{\frac{R_{out}}{R_{in}}}$$

Berechnung und Plot des Imaginärteils

Berechnung Imaginärteil ε''_r :

$$\varepsilon''_r = \frac{f}{f_r} \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \left(\frac{f}{f_r}\right)^2}$$

Plot: Siehe hinterer Teil des Anhangs.

Abweichungen der Permittivitätsmessung durch unterschiedliche Referenzimpedanzen im *jobfile*

```
SCATTERING_DATA ./Eis.mod.s1p
FILE_EXTENSION Eis
POPULATION_SIZE 40
MAX_GENERATIONS 1000
NUMBER_RELAXATION_SAMPLES 1
MUTATION_PERCENTAGE 20
PLOT_FREQUENCY_VALUE 100000
EPSILON_INFINITY_MIN 1.0e0
EPSILON_INFINITY_MAX 8.0e0
DELTA_EPSILON_MIN 1.0e1
DELTA_EPSILON_MAX 1.0e2
SIGMA_DIELECTRIC_MIN 1.0e-9
SIGMA_DIELECTRIC_MAX 1.0e-4
WEIGHT_MIN 1.0e-6
WEIGHT_MAX 1.0
RELAX_FREQ_MIN 1.0e2
RELAX_FREQ_MAX 1.0e6
MODEL_FREQ_MIN 0.3e6
MODEL_FREQ_MAX 1.0e9

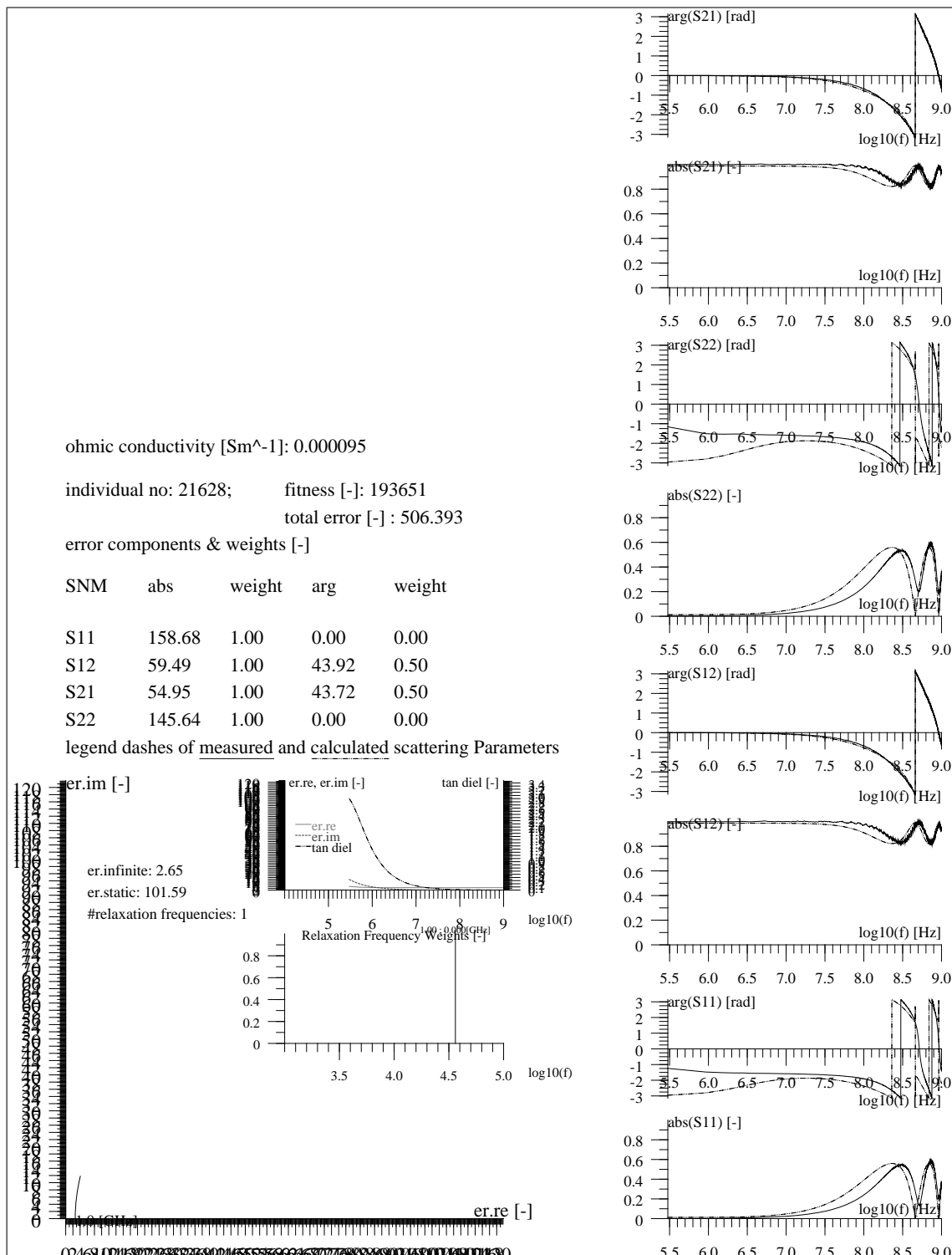
WEIGHT_ERROR_FREQ 1.0e2
WEIGHT_S11_MAGNITUDE 1.0e0
WEIGHT_S11_ANGLE 0.0e-1
WEIGHT_S12_MAGNITUDE 1.0e0
WEIGHT_S12_ANGLE 5.0e-1
WEIGHT_S21_MAGNITUDE 1.0e0
WEIGHT_S21_ANGLE 5.0e-1
WEIGHT_S22_MAGNITUDE 1.0e0
WEIGHT_S22_ANGLE 0.0e-1

FITNESS_WEIGHT 1.0e8

INNER_COAX_RADIUS 0.013
OUTER_COAX_RADIUS 0.045
LENGTH_OF_COAX 0.200
COAX_CONDUCTOR_MATERIAL BRASS

REFERENCE_IMPEDANCE 86.5
```

jobfile: Vorgabe der Parameter oder Parametergrenzen für den Optimierungsalgorithmus.



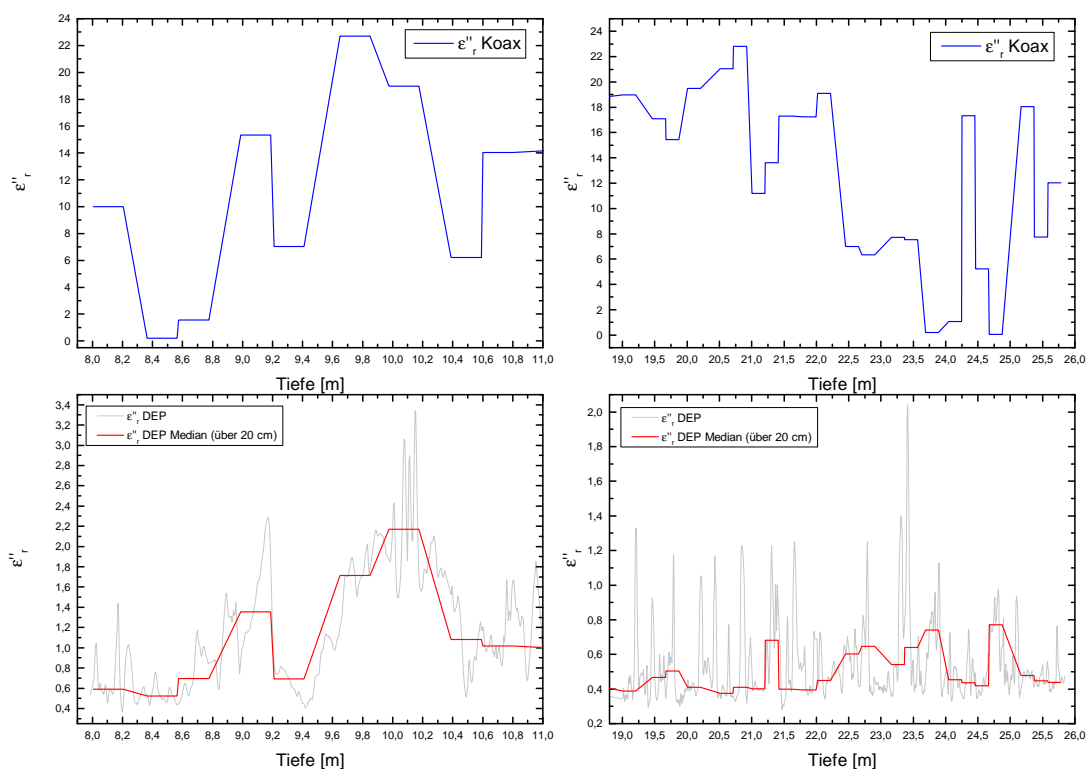
outputfile für Vorwärtsrechnung der S-Parameter: Man beachte die Abweichungen des Fits an die gemessenen S-Parameter und den Fitfehler.

Kern Name	Tüte Nr	Anfangstiefe	Endtiefe	Kiste Nummer
KCO	KCO-002	1,4	2	1802
KCO	KCO-003	2	3	1802
KCO	KCO-004	3	4	1802
KCO	KCO-005	4	5	1802
KCO	KCO-006	5	6	1802
KCO	KCO-007	6	7	1802
KCO	KCO-008	7	8	1824
KCO	KCO-009	8	8,97	1824
KCO	KCO-010	8,97	9,97	1824
KCO	KCO-011	9,97	10,97	1824
KCO	KCO-012	10,97	11,97	1824
KCO	KCO-013	11,97	13	1824
KCO	KCO-014	13	14	1804
KCO	KCO-015	14	15	1804
KCO	KCO-016	15	16	1804
KCO	KCO-017	16	17	1804
KCO	KCO-018	17	18	1804
KCO	KCO-019	18	19	1804
KCO	KCO-020	19	20	1800
KCO	KCO-021	20	21	1800
KCO	KCO-022	21	22	1800
KCO	KCO-023	22	23	1800
KCO	KCO-024	23	24	1800
KCO	KCO-025	24	25	1800
KCO	KCO-026	25	25,86	1823
KCO	KCO-Bohrmehl-17			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-18			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-19			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-20			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-21			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-22			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-23			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-24			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-25			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-26			1823
KCO	KCO-Bohrmehl-27			1823

KCO-Tiefenlogging: Anhand dieser Daten wurden die Proben innerhalb der jeweiligen runs ausgerichtet.

Kern Name	Tüte Nr	Anfangstiefe [m]	Endtiefe [m]	Kiste Nummer	Nettolänge log [m]	gemessene Länge [m]	Differenz [m]
KCO	KCO-009	8	8,97	1824	0,97	0,964	0,006
KCO	KCO-010	8,97	9,97	1824	1	0,993	0,007
KCO	KCO-011	9,97	10,97	1824	1	0,9735	0,0265
KCO	KCO-020	19	20	1800	1	0,9925	0,0075
KCO	KCO-021	20	21	1800	1	0,992	0,008
KCO	KCO-022	21	22	1800	1	0,9915	0,0085
KCO	KCO-023	22	23	1800	1	1,0265	0,0265
KCO	KCO-024	23	24	1800	1	0,9965	0,0035
KCO	KCO-025	24	25	1800	1	0,994	0,006
KCO	KCO-026	25	25,86	1823	0,86	0,875	0,015

Auszug aus den KCO-Loggingdaten: Längendifferenzen der runs zwischen KCO-Logbuch und Längenmessungen in dieser Arbeit.



Imaginärteil aus Realteil der Koaxialmessungen berechnet: Man beachten die großen Abweichungen. Lediglich am Peak passen die Werte vom Verlauf zusammen. Die Achsen sind in unterschiedlichen Maßstäben, da die Messungen in unterschiedlichen Frequenzbereichen gemacht wurden.

Erklärung

Erklärung

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

Heidelberg, den 03.02.2014,

Unterschrift

*you never change to fire if you're ice
even if you melt on a table and dry
and that table is burned*

John Frusciante

Ich bin all den Menschen dankbar, die dazu beigetragen haben diese Arbeit zu ermöglichen und wage den Versuch einer Aufzählung.

- Zunächst danke ich Prof. Olaf Eisen dafür, dass ich die Möglichkeit bekam diese Arbeit zu schreiben und für das Übernehmen der Prüfung.
- Dank gebührt auch Prof. Kurt Roth, der sich bereit erklärt hat die Zweitprüfung zu übernehmen.
Darüber hinaus danke ich Ihm und der Bodengruppe des IUP Heidelberg, vor allem in Person von Angelika Gassama für die gute Kooperation und die Bereitstellung der Infrastruktur für die Koaxialzelle.
- Ganz besonders will ich mich bei Pascal bedanken. Für die geduldige und zuverlässige Betreuung. Für die reibungslose Kommunikation auch über große Entfernungen. Dafür, dass ich Vieles in wissenschaftlicher Herangehensweise und wissenschaftlichem Schreiben von ihm gelernt habe und für das hilfreiche Korrekturlesen gegen Ende der Arbeit. Kurz gesagt für all die Zeit, die er investiert hat um mir etwas beizubringen.
Danke Pascal!
- Vielen Dank an die ganze Eisgruppe am IUP in Heidelberg. Dafür, dass ihr mich so nett aufgenommen habt und für alles was ich bei euch lernen und miterleben durfte.
- An dieser Stelle will ich auch mal all meinen Freunden Danke sagen, mit denen ich das Physikstudium bis hierher geschafft habe.

Elisa	Jascha ¹	Romy
Fabian	Micha	Smia
Hendrik	Nadia	Steffen

- Danke Markus fürs gemeinsame Musikmachen und die gute Freundschaft weit weg von der Physik.
- Danke auch an Friedbert und Anita für die vielen schönen Stunden.
- Danke Laura für die Ablenkung und eine optimistisch-kritische Sicht aufs Lebens.
- Danke an mein Volleyballteam, dass die letzten Wochen ohne mich auskommen musste.
- Danke Mama für die Fußwärmer, die die Eiskammer zu einem gemütlichen Ort gemacht haben.
- Danke Papa fürs Korrekturlesen, das Verständnis für die unaufgeräumte Wohnung und dafür, dass ich ihm all meine Schwierigkeiten mit dem Eis erzählen konnte.

- Und vielen Danke an meine Geschwister Friederike, Valentin und Konrad.
Einfach nur dafür, dass es euch gibt. Ihr seid die Besten.

¹, der sich trotz Klausurstress als Korrekturleser ausgezeichnet hat.