

# Computertomographiesystem (CT) zur automatisierten Prüfung von Eisbohrkernen

Virginia VOLAND<sup>\*1</sup>, Michael SALAMON<sup>\*</sup>, Susanne BURTZLAFF<sup>\*</sup>, Jonathan HESS<sup>\*\*</sup>,  
Matthias HABL<sup>\*\*</sup>, Markus FIRSCHING<sup>\*</sup>, Steven OECKL<sup>\*\*</sup>, Tobias SCHÖN<sup>\*\*</sup>, Stefan  
SCHRÖPFER<sup>\*</sup>, Roland GRUBER<sup>\*\*</sup>, Anja MÜLLER<sup>\*</sup>, Stephan MOHR<sup>\*</sup>, Johannes  
FREITAG<sup>\*\*\*</sup>, Norman UHLMANN<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik, Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth

<sup>\*\*</sup> Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth

<sup>\*\*\*</sup> Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Am Alten Hafen 26, 27568  
Bremerhaven

**Kurzfassung.** Mittels Radar werden die mit Eis bedeckten Polargebiete der Erde vermessen. Zuverlässige Informationen über die Schichtdicke des Eises sind allerdings nur unter Berücksichtigung der Eisbeschaffenheit zu gewinnen. Mittels Computertomographie werden Eisbohrkerne aus unterschiedlicher Tiefe von 10 cm Durchmesser und 1 m Länge auf ihre Porosität überprüft. Da eine hohe Bildqualität und Ortsauflösung notwendig ist, entstehen enorme Datenmengen. Die Aufnahmegeometrie und eine Umgebungstemperatur von -15°C erhöhen die Anforderungen an die Röntgenkomponenten.

## Einführung

Zylinderförmige Eiskerne mit einem Durchmesser von 10 cm und 1 m Länge werden über ihre volle Größe gemessen und rekonstruiert, um die mittlere Porosität und die Porositätsverteilung zu bestimmen. Es muss zwischen zwei Arten von Eis unterschieden werden: Firn, das bis zu einer Tiefe von 100 Metern vorkommt und sich durch zusammenhängende Eis- und Luftstrukturen kennzeichnet, und Blaseneis, das aus bis zu 3000 Metern Tiefe gewonnen wird und segmentierbare Lufteinschlüsse unterschiedlicher Größe und Form besitzt. Des Weiteren können Einschlüsse von Staub oder Vulkanasche in den Bohrkernen vorkommen.

Die vollständigen Firnbohrkerne werden mittels einer Helix-CT mit niedriger Ortsauflösung von mindestens 100 µm Voxelgröße gemessen. Durch eine quantitative Kalibriermessung eines Phantoms ohne Porosität, kann die mittlere Dichte und folglich die mittlere Porosität des Firnkerns gemessen werden. Die geringe Ortsauflösung führt zu vergleichsweise kurzen Mess- und Rekonstruktionszeiten, zu geringeren Datenmengen und einer schnelleren Analyse des Volumens.

Für die Analyse des Blaseneis wird ein rekonstruiertes Volumen mit einer Voxelgröße von bis zu 12,5 µm benötigt. Auf Grund der Objektgröße und der strengen Anforderungen an die Voxelgröße entstehen während der Messung ca. 9 TB an Projektionsdaten und ca. 5 TB an rekonstruierten Volumendaten. Um eine bessere Erkennbarkeit auch kleinerer Luftblasen zu erzielen, muss die Voxelgröße weiter verringert

<sup>1</sup> virginia.voland@iis.fraunhofer.de, Tel: +49-911-5 80 61-7563, Fax: +49-911-5 80 61-7599

werden. Eine höhere Vergrößerung hat allerdings zur Folge, dass Information über die Hintergrundintensität in den Projektionen verloren geht. Neuartige ROI-Rekonstruktionsverfahren haben die Möglichkeit, über Messungen mit unterschiedlichen Vergrößerungen selektiv Zusatzinformation zur Reduktion von in Standard-ROI-Verfahren entstehenden Artefakten zu verwenden.

Für die Analyse von Einschlüssen von Fremdmaterialien stoßen qualitative Messmethoden schnell an ihre Grenzen. Durch die Messung der Bohrkerne in zwei unterschiedlichen Röntgenspektren können Informationen über die Schwächungskoeffizienten mittels einer mathematischen Basistransformation in quantitative Informationen über die Dichte  $\rho$  des Materials und das Material selbst in Form der effektiven Kernladungszahl  $Z_{\text{eff}}$  umgewandelt werden.

Zunächst wird der Aufbau der CT-Anlage vorgestellt und die Auswahl der Röntgenkomponenten erläutert. Anschließend werden Mess- und Analysemethoden vorgestellt.

## Messaufbau

Für ein CT-Laborsystem mit Kegelstrahlgeometrie sind die Röntgenkomponenten der limitierende Faktor, um eine spezifizierte Ortsauflösung zu erreichen. Die Vergrößerung  $M$  ist definiert als der Quotient von Fokus-Detektor-Abstand (FDD) und Fokus-Objekt-Abstand (FOA). Da für die geometrische Unschärfe  $U_F$  der Zusammenhang

$$U_F = (M - 1) * D_F = \left( \frac{FDD}{FOD} - 1 \right) * D_F, \quad (1)$$

mit Brennfleckgröße  $D_F$  gilt, erhöht sich mit einem ansteigenden Abstand zwischen Quelle und Detektor auch die geometrische Unschärfe des Systems. Wie in Abbildung 1 sichtbar ist, ist die Brennfleckgröße essentiell, um in hochvergrößernden Anwendungen Abbildungen mit einer geringen Unschärfe zu erreichen.

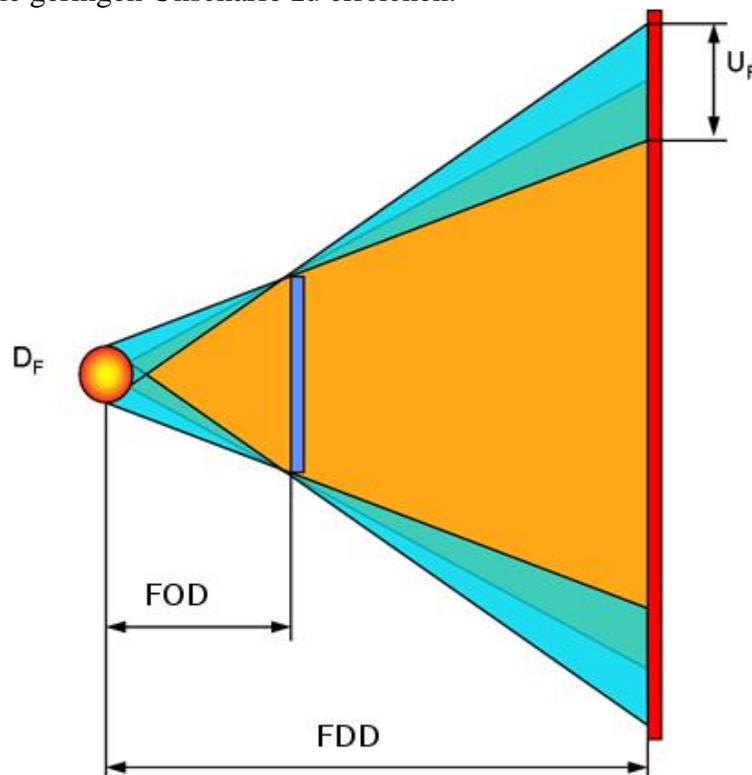


Abbildung 1: Die geometrische Unschärfe erhöht sich sowohl mit vergrößertem Brennfleck, als auch mit vergrößertem Fokus-Detektor-Abstand

Gleichzeitig ist ein möglichst minimaler Fokus-Detektor-Abstand wünschenswert, um den für die Messung benutzten Photonenfluss zu maximieren. Ein Detektor mit geringer Pixelgröße und großer aktiver Fläche ist daher nötig, um diesen Anforderungen zu genügen. Darüber hinaus muss der verwendete Detektor über eine lange Zeit signalstabil sein, da mit langen Messzeiten und einer hohen applizierten Dosis zu rechnen ist, die zur Degradation des Sensors bereits während einer Messung führen kann.

Für diesen Messaufbau wurde eine YXLON FXE-225.48/51 Mikrofokus Röntgenröhre mit einem wechselbaren Röhrenkopf. Auf diese Art und Weise kann zwischen einem Reflexions- und Transmissionsmodus gewechselt werden. Die Brennfleckgrößen sind auf 6  $\mu\text{m}$  (Reflexion) und 2  $\mu\text{m}$  (Transmission) spezifiziert. Im Transmissionsmodus sind zwar einerseits nur geringere Leistungen zu realisieren, andererseits kann der Abstand zwischen Bohrkern und Brennfleck minimiert werden, was deutlich größere Vergrößerungen als im Reflexionsmodus erlaubt.

Der röntgenempfindliche Detektor, der bei dieser Anlage zum Einsatz kam, ist eine Weiterentwicklung des am Fraunhofer IIS entwickelten strahlenharten Detektors XEye. Dieser Detektor verfügt über eine aktive Fläche von 400 mm x 200 mm mit einer Pixelgröße von 50  $\mu\text{m}$  und 8000 x 4000 Pixeln pro Detektorbild. Um die Messzeiten minimal zu halten, verfügt der Detektor über einen externen Triggermodus und ein sehr kurzes Nachleuchtverhalten von weniger als 0,1% Image Lag.

## Messmethoden

Um den Bohrkern in seiner vollen Höhe von 1 m abbilden zu können, wird das Helix-CT-Verfahren angewandt. Neben einer Objektdrehung erfährt das Objekt bei diesem Verfahren auch einen vertikalen Vorschub, was eine nahtlose Messung langer zylindrischer Objekte erlaubt (s. Abbildung 2). Durch die Verschiebung des Objekts in seiner Höhe werden außerdem die durch Schrägdurchstrahlung entstehenden Feldkampffartefakte reduziert. Bei diesem Verfahren entsteht in einer Messung eines Bohrkerns maximaler Größe ein Datensatz von ca. 140.000 Projektionen à 64 MB. Es kann eine Voxelgröße von 12,5  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

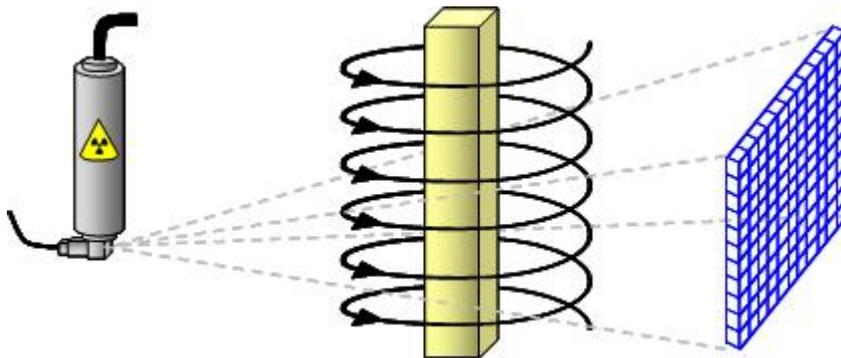
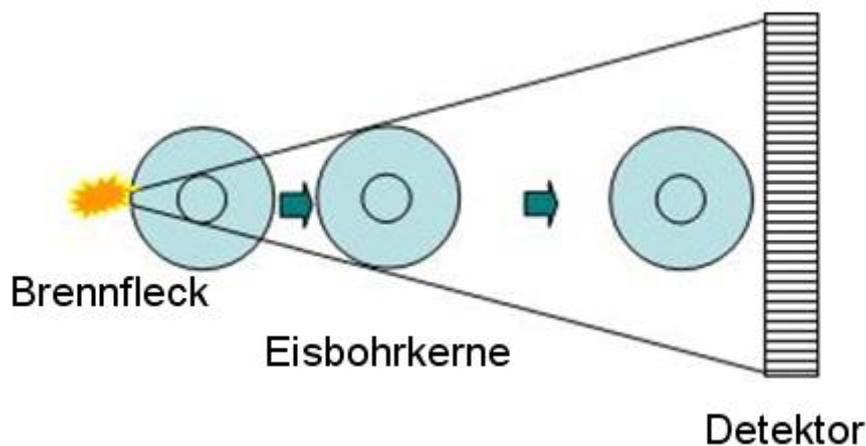


Abbildung 2: Prinzip der Helix-CT

Für eine präzise Bestimmung der Porenvolumenverteilung im Bohrkern ist allerdings eine höhere Detailerkennbarkeit nötig, als mit diesem Verfahren bei maximaler Bohrkerngröße erreicht werden kann. Es muss folglich eine höhere Vergrößerung erreicht werden. Trotz der großen aktiven Detektorfläche kann der Bohrkern bei maximaler Vergrößerung nicht mehr vollständig auf dem Detektor abgebildet werden. Nur der innere Teil des Bohrkerns kann mit einer Voxelgröße von bis zu 3,5  $\mu\text{m}$  abgebildet werden. Informationen über die äußeren Teile des Bohrkerns sowie über die Primärintensität  $I_0$

gehen verloren. Diese Information ist aber zwingend notwendig, um das Innere des Bohrkerns artefaktfrei rekonstruieren zu können.

Eine Multiresolutionsanalyse (MRA-ROI-CT) nimmt Projektionsdatensätze des Objekts in unterschiedlichen Vergrößerungen auf. Ziel dieses Verfahrens ist die Erhaltung der Dichtetreue in der ROI-CT. Zwischen jeder Messung wird dazu die Vergrößerung um Faktor 2 reduziert, bis das Objekt vollständig und mit Information über die Primärintensität auf dem Detektor abgebildet werden kann. Die Verknüpfung dieser Daten geschieht dann entweder bereits auf Projektionsebene, indem die Daten unterschiedlicher Vergrößerung direkt fusioniert werden, oder aber im Schritt der Rückprojektion. Im Vergleich zu einer konventionellen CT-Messung wird die Menge der Projektionsdaten bei  $n$  Messungen um Faktor  $n$  erhöht. Die Abbildung 3 zeigt eine schematische Übersicht über den Messablauf.



**Abbildung 3:** Schematische Aufsicht auf die Mehrfachscans der MRA-ROI-CT. Die Vergrößerung wird in jedem Schritt um den Faktor 2 reduziert, bis das Objekt vollständig und mit Primärintensität auf dem Detektor abgebildet werden kann.

Eine alternative Möglichkeit, Daten ohne Information über die Primärintensität zu rekonstruieren ist die Gradientenrekonstruktion. Anstatt absolute Grauwerte zu rekonstruieren, wird bei diesem Verfahren die diskrete Grauwertableitung rekonstruiert. Dies führt zu einer Darstellung der Übergänge zwischen Luft und Eis. Zusätzliche Daten fallen bei diesem Verfahren nicht an, allerdings bedeutet diese Art der Rekonstruktion zusätzliche Anforderungen an die automatisierte Bohrkernanalyse. Zudem ist auch hier Information über die Primärintensität nötig.

Eine naheliegende Möglichkeit, einen unabgeschwächten Grauwert auch für den Fall bereitzustellen, dass diese Information in den Projektionen nicht enthalten ist, ist die Vorgabe eines festen Werts, der vorab bestimmt wird und für alle Projektionen gültig ist. Eventuelle Schwankungen in der Intensität, die beispielsweise durch die Röntgenröhre verursacht werden können, werden auf diese Art und Weise allerdings nicht erkannt und führen zu Artefakten in der Rekonstruktion. Um dies zu vermeiden, wurde ein Röntgensensor entwickelt, der  $I_0$ -Monitor, der eine Dosis misst und diese durch eine Kalibrierung auf den Detektor und die Aufnahmegeometrie in Grauwerte umwandelt. Durch eine Kombination dieser Methoden können bei voller Größe des Bohrkerns die inneren 28 mm der Probe mit einer Voxelgröße von bis zu  $3,5 \mu\text{m}$  rekonstruiert werden.

Um Einschlüsse von Fremdkörpern analysieren zu können, eignet sich das Mehrenergieverfahren. Ziel dieses Verfahrens ist es, quantitative Informationen über das Objekt und die darin enthaltenen Materialien zu erhalten. Hierfür wird das Objekt einmal mit einem niederenergetischen und einmal mit einem höherenergetischen Röntgenspektrum aufgenommen. So entstehen Informationen über die Schwächungskoeffizienten  $\mu_1$  bei dem

niederenergetischen Spektrum und  $\mu_2$  beim höherenergetischen Spektrum. Mittels einer Basistransformation

$$\begin{pmatrix} \mu_1(\rho, Z) \\ \mu_2(\rho, Z) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \rho(\mu_1, \mu_2) \\ Z(\mu_1, \mu_2) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

erhält man nun quantitative Informationen über die Dichte  $\rho$  des Materials und das Material selbst in Form der effektiven Kernladungszahl  $Z_{\text{eff}}$  (s. [3]). Insbesondere Materialien, die in der Durchstrahlung wenig Kontrast gegenüber Wasser bilden, können mit diesem Verfahren besser analysiert werden.

## Analysemethoden

Auf Grund der Objektgröße und der damit verbundenen geometrischen Möglichkeiten können nur die inneren 28 mm eines Bohrkerns mit einer Voxelgröße von bis zu  $3,5 \mu\text{m}$  rekonstruiert werden. Nichtsdestotrotz möchte man globale Informationen über die Porosität des Eiskerns und folglich über die klimatische Situation in der entsprechenden Zeitspanne erhalten. Im Fall von Blaseneis gehen wir wie folgt vor: Die hochauflösende Messung des Bohrkerninneren erlaubt präzise Rückschlüsse über die statistische Porenvolumenverteilung und über das Volumen einzelner Poren. Eine weniger hoch aufgelöste Messung über den gesamten Bohrkern gibt Informationen über die Porenanzahl und ihre lokale Verteilung. Eine Kombination dieser beiden Erkenntnisse erlaubt Rückschlüsse über die mittlere Porosität des Bohrkerns und die Porositätsverteilung im gesamten Volumen.

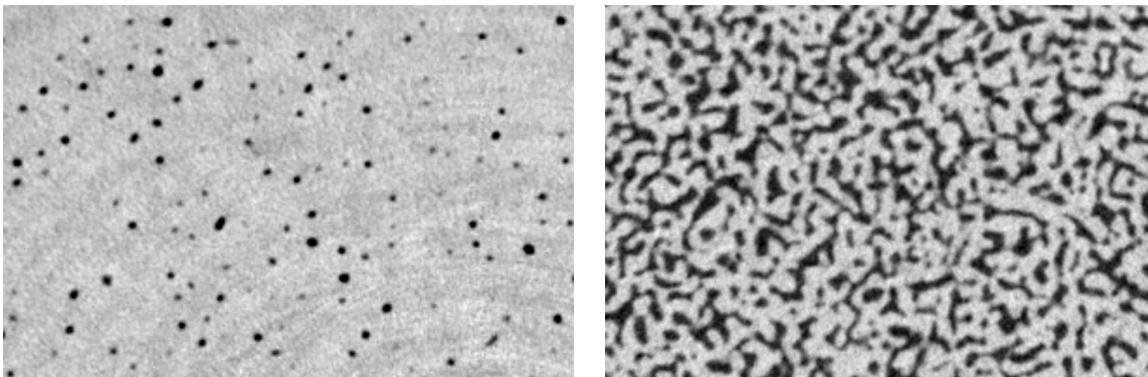


Abbildung 4: Schnitte von Blaseneis (links) und Firn (rechts)

Im Fall von Firn können naturgemäß keine Luft einschüsse separiert und analysiert werden (vgl. Abbildung 4, rechts). Lediglich eine mittlere Porosität pro Schicht wird berechnet. Die Analyse der Firnbohrkerne besteht aus zwei Schritten:

1. Kalibrierung: Eine Kalibrierungsmessung eines idealen Phantoms ohne Luftanteil wird mit exakt den Messparametern durchgeführt, mit denen auch der Firnkern gemessen werden soll. Die Messung benötigt nur eine geringe Ortsauflösung, da nur gemittelte Grauwerte pro Schicht von Interesse sind. Mittels der Rekonstruktion dieser Messung wird eine Lookup-Table (LUT) erstellt, die eine Linearisierung der Grauwerte in der Messung des Firnkerns ermöglicht.
2. Messung: Eine Helix-CT mit derselben niedrigen Ortsauflösung und den identischen Messparametern wie in Schritt 1 wird durchgeführt. Durch die Anwendung der in Schritt 1 generierten LUT werden die Grauwerte linearisiert. Auf diese Weise entstehen in der Rekonstruktion vergleichbare Schwächungskoeffizienten. Die Schwächungskoeffizienten der Messung können also direkt mit den Schwächungskoeffizienten der Kalibrierung verglichen werden. Die schichtweise

Dichte und folglich die Porosität der entsprechenden Schicht können direkt berechnet werden.

## Messbedingungen

Da die Bohrkern in einer Umgebungstemperatur von  $-15^{\circ}\text{C}$  gelagert werden, müssen die CT-Messungen idealerweise auch bei dieser Temperatur durchgeführt werden. Die CT-Anlage ist daher in eine Klimakammer eingebracht worden, die eine entsprechende Umgebungstemperatur erzeugt. Um Sublimation zu verhindern wird eine Objekthalterung in Form eines CFK-Rohrs benutzt, das über einen Deckel verfügt. Ebenso wie durch die Objekthalterung werden durch Kältehauben, die den Detektor und die Röntgenröhre vor extremen Temperaturen schützen, Strahlaufhärtingsartefakte in der Rekonstruktion erzeugt, die es zu korrigieren gilt. Alle Komponenten bis hin zu den benutzten Kabeln müssen für den Betrieb bei Minustemperaturen spezifiziert sein und entsprechend vorsichtig behandelt werden.

Eine weitere Herausforderung ist die Handhabung der enormen Datenmengen. Eine Messung über den gesamten Bohrkern bei maximaler Ortsauflösung erzeugt ein Rekonstruktionsvolumen von 80.000 Schichten mit einer Höhe von jeweils  $12,5\ \mu\text{m}$ . Eine Schichtgröße von  $8000 \times 8000$  Pixeln führt zu einem Speicherbedarf von über 5 TB für das rekonstruierte Volumen. Falls zusätzlich die Projektionen gespeichert werden, fallen weitere 9 TB an Speicherbedarf an. Aus Stabilitätsgründen wird das Volumen blockweise rekonstruiert und analysiert.

## Ergebnisse

Unterschiedliche Messungen wurden bereits mit der Eiskern-CT-Anlage durchgeführt. Mittels neuartiger ROI-Rekonstruktionsverfahren konnten Artefakte, die durch fehlende Informationen über die tatsächlichen Durchstrahlungslängen entstehen, reduziert werden. Es wurde ein Projektionsdatensatz mit fehlender Information über die Primärintensität

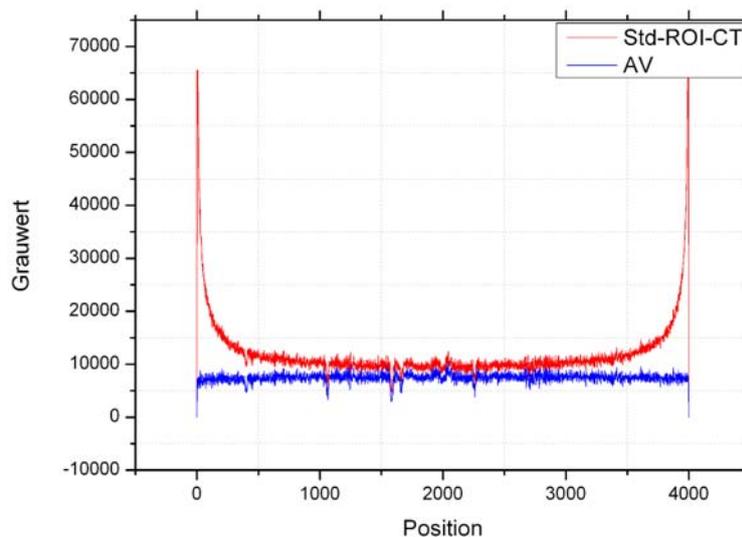
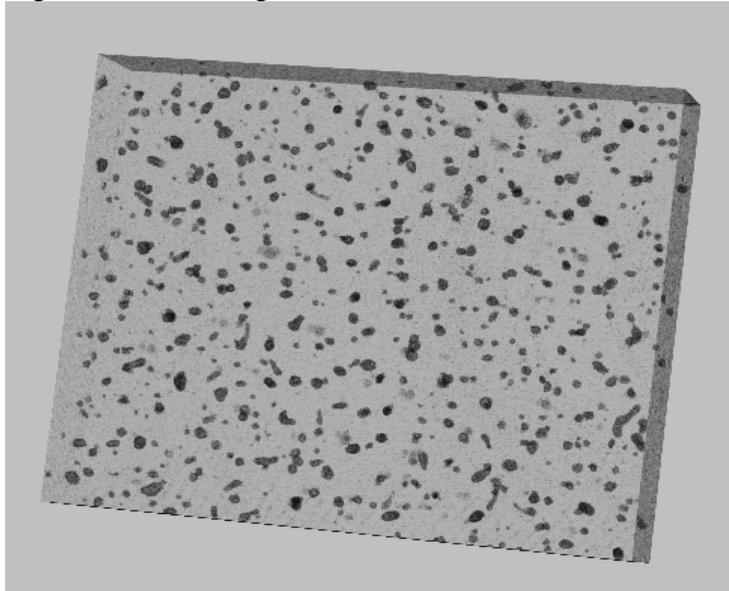


Abbildung 5: Grauwertprofil über zwei rekonstruierte Volumina. Die rote Linie zeigt das Profil durch das mit einem Standard-ROI-Rekonstruktionsverfahren rekonstruierte Volumen, die blaue Linie zeigt das Profil durch das mit einem artefaktreduzierenden Verfahren rekonstruierte Volumen.

aufgenommen und zweimal rekonstruiert. Eine Rekonstruktion wurde mit einem Standard-Rekonstruktionsverfahren durchgeführt, eine zweite Rekonstruktion wurde mit einem neuartigen artefaktreduzierenden Rekonstruktionsverfahren durchgeführt. Abbildung 5 zeigt zwei Grauwertprofile durch die rekonstruierten Volumina an derselben Stelle im Volumen. Zwar ist der Rauschanteil bei beiden Verfahren in etwa identisch. Deutlich zu sehen ist jedoch die Grauerhöhung am Rand des Rekonstruktionsbereichs im Fall des Standard-ROI-Rekonstruktionsverfahrens, die sich bis weit ins Innere des Volumens fortsetzen. Im Fall des artefaktreduzierenden Verfahrens ist ein homogener Grauwertverlauf über den gesamten Rekonstruktionsbereich zu erkennen.

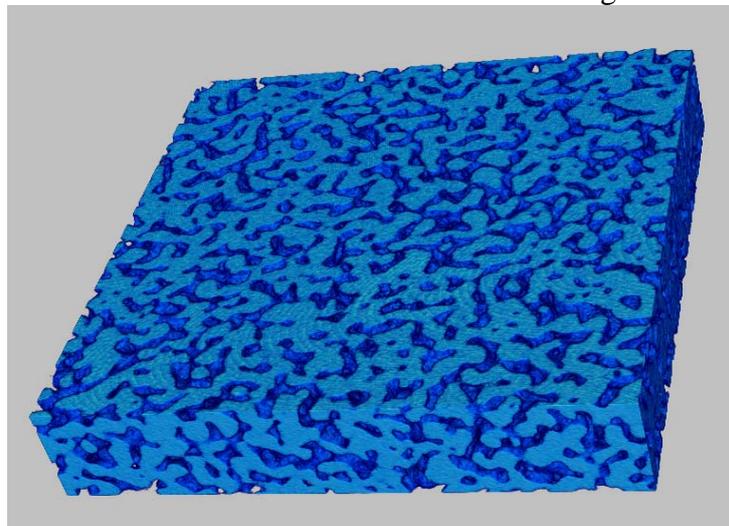
Der Ausschnitt eines rekonstruierten Blaseneisbohrkerns, der aus 159 m Tiefe gewonnen wurde, ist in der folgenden Abbildung zu sehen:



**Abbildung 6: Ausschnitt von Blaseneis. Das Eis wurde aus 159 m Tiefe gewonnen und mit 16  $\mu\text{m}$  Voxelgröße rekonstruiert.**

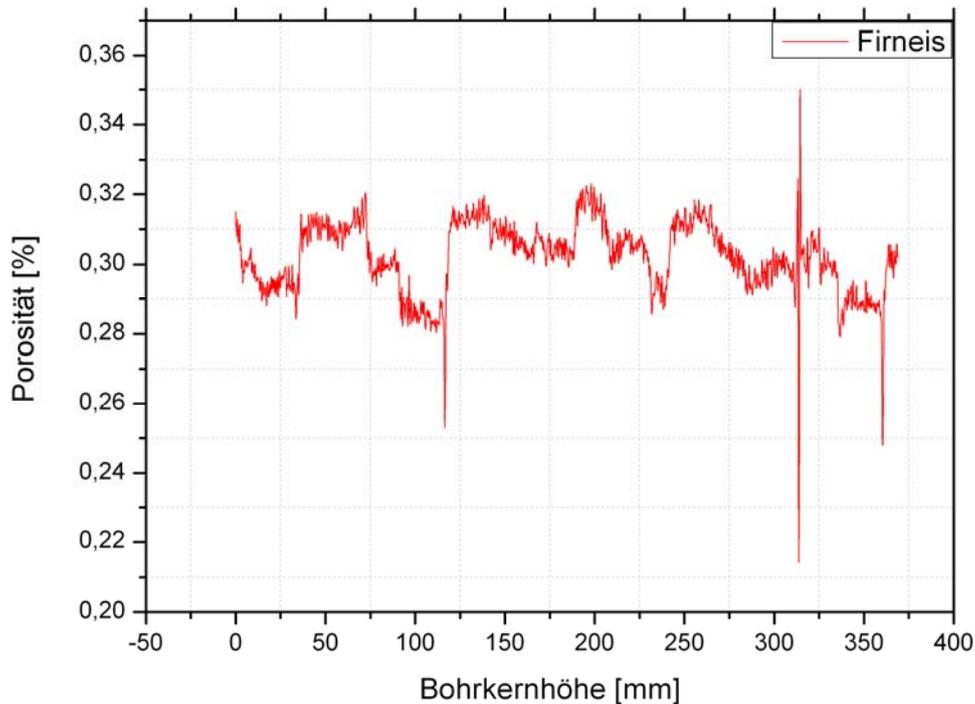
Klar zu erkennen sind die trennbaren Lufteinschlüsse. Entsprechend der Voxelgröße kann an Hand dieses Datensatzes die Porenvolumenverteilung und Porositätsverteilung im Bohrkern ermittelt werden.

Der Ausschnitt eines rekonstruierten Firnkerns ist im folgenden Bild zu sehen:



**Abbildung 7: Ausschnitt eines rekonstruierten Firnkerns. Der Kern wurde aus 35 m Tiefe gewonnen und mit einer Voxelgröße von 56  $\mu\text{m}$  rekonstruiert.**

Deutlich zu sehen sind die zusammenhängenden Luftanteile und die zusammenhängenden Materialstrukturen. Ein vergleichbarer Bohrkern wurde mit  $100\ \mu\text{m}$  Voxelgröße rekonstruiert und über eine Länge von 400 mm analysiert. Das Ergebnis ist im folgenden Graphen zu sehen:



Hier ist die mittlere Porosität pro Schicht gegenüber der Bohrkernlänge aufgetragen. Die mittlere Porosität schwankt im Allgemeinen zwischen 28% und 32%, wobei Bereiche unterschiedlicher Porosität zu erkennen sind. Die drei Abweichungen von den sonstigen Schwankungen im Plot sind auf Schichten im Volumen mit einer stark verringerten Porosität zurückzuführen. Diese Effekte sind in Bereichen von ca. 5 bis 10 Schichten im Volumen zu beobachten, erstrecken sich im Bohrkern also über einen Bereich von 0,55 mm bis 1,1 mm und entstehen durch einen Schmelzprozess und ein erneutes Überfrieren des Firn.

## Referenzen

- [1] M. Salamon et al. "Upcoming challenges in high resolution CT below 1 micron", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 607 (2009) 176-178
- [2] M. Salamon et al. "Comparison of different methods for determining the size of a focal spot of microfocus X-ray tubes below 1 micron", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 591 (2008) 54-58
- [3] B. J. Heismann, J. Leppert, K. Stierstorfer, J. Appl. Phys. 94, 2073 (2003)
- [4] F. Nachtrab et al. „Quantitative Material Analysis by Dual-Energy Computed Tomography for Industrial NDT Applications“, accepted for publication in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
- [5] S. Oeckl et al.: "Multiresolution 3D-Computerized Tomography and its Application to NDT", 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Berlin 2006
- [6] S. Oeckl et al.: „Dichtetreue Region-of-Interest-Computertomographie mittels Multiresolutionsanalyse“, DGZfP-Jahrestagung, Münster 2009
- [7] S. Oeckl et al.: „Dimensionelles Messen mit Helix-Computer-tomographie“, Fraunhofer Vision Technologietag, Kaiserslautern 2009