Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Computertomographie von Bandscheiben**
Diplomandin/Diplomand	**Despeaux, Fabio**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Medizintechnik**
Semester	**FS20**
Dozentin/Dozent	**Schütz, Philipp**
Expertin/Experte	**Jerjen, Iwan**

Abstract Deutsch
Diese Arbeit befasst sich damit, die innere Struktur einer bovinen Bandscheibe mit einem Micro-CT abzubilden. Dabei wird die Bandscheibe während der CT Messung belastet, um die Auswirkung auf die Struktur analysierbar zu machen. Es wird erwartet, dass durch ein geeignetes CT-Messprotokoll und einer Belastungseinheit, die durch die Belastung auftretenden strukturellen Veränderungen einer Bandscheibe dargestellt werden können. Dafür werden der absorbtionsbasierte CT Ansatz, der Phasenkontrast Ansatz und der Kontrastmittel Ansatz verwendet. Für die Belastung der Bandscheibe ist eine Belastungseinheit konstruiert worden. Eine 200 kV CT Messung mit Aluminiumfilter konnte einen Kontrastunterschied zwischen dem Kern und dem Ring darstellen. Die inneren Strukturen konnten nicht abgebildet werden.

Abstract Englisch
This thesis addresses the display of the internal structure of a bovine intervertebral disc by means of a Micro-CT. During the CT measurement the disc is loaded in order to make the impact on the structure analysable. By means of a suitable CT measurement report and a load unit, a visualization of the structural alterations of an intervertebral disc due to the load of the same is expected. The used approaches are the absorption based CT approach, the phase contrast approach and the contrast agent approach. To put load on the intervertebral disc a load unit was constructed. A 200 kV CT measurement with aluminium filter was able to show the contrast difference between the core and the ring. The internal structures could not be displayed.

Ort, Datum Horw, 19.06.2020

© Fabio Despeaux, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Material und Methoden 2
2.1 Aufbewahrung und Zubereitung der Bandscheiben 2
2.2 Angewandte Methoden bei der Erstellung der Belastungseinheit 3
2.2.1 Verwendetes CAD 3
2.2.2 Aufbau der statischen Belastungssimulation 3
2.2.3 Aufbau der Zugversuche 4
2.3 Nachahmung der Belastungseinheit 4
2.4 Messaufbau der absorbtionsbasierten Messungen 5
2.4.1 Messaufbau der initialen Messung 5
2.4.2 Messaufbau der Messung ohne umgebendes Wasser 5
2.4.3 Messaufbau der ersten Messung mit mehr als 1000 Projektionen 5
2.4.4 Messaufbau der Parameterstudie 6
2.4.5 Messaufbau mit 40 kV und Aluminiumfolie 6
2.5 Phasenkontrast Messungen 7
2.5.1 Theorie zum Phasenkontrast 7
2.5.2 Messaufbau der 200 kV Messung 7
2.5.3 Aufbau der 200 kV Messung mit Aluminium Filter 7
2.5.4 Aufbau der Phasenkontrastoptimierten Messung 7
2.6 Messaufbau der Kontrastmittel Messungen 8
2.6.1 Theorie zu den Kontrastmittel Messungen 8
2.6.2 Anwendung des Kontrastmittels 8
2.6.3 Messparameter der Messung mit Kontrastmittel 8
2.7 Aufsetzung des Paganinfilters 9
2.7.1 Theorie zum Paganinfilter 9
2.7.2 Anwendung des Paganinfilters 9
2.7.3 Validationsaufbau des Paganinfilters 10
3 Ergebnisse 11
3.1 Ergebnisse der Belastungseinheit 11
3.1.1 Anforderungen an die Belastungseineheit 11
3.1.2 Konstruktion 12
3.1.3 Funktionsweise der Belastungseinheit 14
3.1.4 Gebrauchsanweisung der Belastungseinheit 14
3.1.5 Resultate der statischen Simulation 15
3.1.6 Resultate des Zugversuches 16
3.2 Absorbtionsbasierte Messungen 19
3.2.1 Initiale Messung 19

3.2.2 Messung ohne umgebendes Wasser 20
3.2.3 Erste Messung mit mehr als 1000 Projektionen 21
3.2.4 Parameterstudie 22
3.2.5 Resultate aus der Messung mit 40 kV und Aluminiumfolie 26
3.3 Ergebnisse der Phasenkontrast-Messungen 27
3.3.1 Ergebnisse der 200 kV Messung 27
3.3.2 Ergebnisse der 200 kV Messung mit Aluminium Filter 28
3.3.3 Ergebnisse der Phasenkontrastoptimierte Messung 29
3.4 Ergebnisse der Messungen mit Kontrastmittel 31
3.5 Ergebnisse der Anwendung des Paganinfilters 32
3.5.1 Erhaltene Paganinfilter Bilder 32
3.5.2 Validation des Paganinfilters 33
4 Diskussion 35
5 Abbildungsverzeichnis 37
6 Tabellenverzeichnis 38
7 Literaturverzeichnis 39
8 Anhang 40
I. Messprotokoll: Initiale Messsung 40
II. Messprotokoll: Messung ohne umgebendes Wasser 42
III. Messprotokoll: Erste Messung mit mehr als 1000 Projektionen 44
IV. Messprotokoll: Parameterstudie 40 kV 46
V. Messprotokoll: Parameterstudie 60 kV 48
VI. Messprotokoll: Parameterstudie 80 kV 50
VII. Messprotokoll: Parameterstudie 100 kV 52
VIII. Messprotokoll: 40 kV und Aluminiumfolie 54
IX. Messprotokoll: 200 kV 56
X. Messprotokoll: 200 kV Messung mit Aluminium-Filter 58
XI. Messprotokoll: Phasenkontrast-optimierte Messung 60
XII. Messprotokoll: Käfer 62
XIII. Code für die Berechnung des Phasenkontrastes 64
XIV. Tabelle der Brennfleckgrössen 65
XV. Konstruktionspläne der Belastungseinheit 66

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit wird im Auftrag des Kompetenzzentrums für biomedizinische Weltraumforschung und Medizintechnik durchgeführt. Es soll ein Messverfahren entwickelt werden, um bovine Bandscheiben mit einem Computertomograph zu vermessen. Zusätzlich soll eine Belastungseinheit konstruiert werden, mit welcher die Bandscheibe während der Vermessung belastet werden kann.

Etwa 70 % der Bevölkerung in industrialisierten Ländern leidet an Rückenschmerzen. Dadurch brauchen Patienten Langzeitbehandlungen was ihre Lebensqualität beeinträchtigt. Solche Rückenschmerzen können durch Bandscheibenvorfälle versursacht werden, die wiederum durch hohe Belastungen ausgelösten werden können (Schmidt, 2007, S. 01). Eine Bandscheibe besteht aus Anulus fibrosus und Nucleus pulposus. Dabei besteht der Anulus fibrosus aus Typ 1 Kollagen Fasern. Der äussere Teil des Anulus fibrosus hält den flüssigeren Kern der Bandscheibe zusammen. Der Kern selbst, der Nucleus pulposus, besteht aus einem Proteoglykan- und Wassergel, welches von einer Struktur aus Typ 2 Kollagenfasern zusammengehalten wird. Durch diese Struktur kann seine Funktion mit einem Wasserbett verglichen werden. Die Bandscheibe kann in der Wirbelsäule auftretende Kräfte aufnehmen (Adams, 2006, S. 1).

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, die soeben erwähnten Kollagenstrukturen während einer Belastung abzubilden. Dafür muss untersucht werden, welche Computertomographie Messparameter sich am besten eigenen. Weiter wird untersucht, ob die Bildqualität durch eine gewisse Aufbereitungs- und Rekonstruktionsmethode verbessert werden kann. Zuletzt soll herausgefunden werden, wie die Bandscheibe während einer CT-Messung belastet werden kann.

Es wird erwartet, dass durch ein geeignetes CT-Messprotokoll und einer Belastungseinheit, die durch die Belastung auftretenden strukturellen Veränderungen einer Bandscheibe dargestellt werden können.

Für die Erstellung des Messprotokolls werden drei Computertomographie Methoden untersucht. Als erstes wir der absorbtionsbasierte Ansatz getestet. Weiter wird ein phasenkontrast Ansatz angewandt und zuletzt wird mit Kontrastmittel gearbeitet. Die Anwendung des Paganinfilters auf CT Bilder wird ebenfalls untersucht. Die Belastungseinheit wird mit Prototyping entwickelt und während des Prozesses am CT getestet. Zusätzlich wird die Belastungseinheit vorgängig mit einer statischen Simulation auf ihren minimalen Sicherheitsfaktor überprüft. Die Schraubverbindungen werden auch vorgängig auf ihre Zugfestigkeit überprüft. Dazu werden Zugversuche durchgeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Aufbewahrung und Zubereitung der Bandscheiben

Für diese Arbeit werden mit Formalin fixiert Kuhschwanzbandscheiben verwendet. Weiter kommen auch unbehandelte Bandscheiben zum Einsatz. Zuletzt werden Bandscheiben verwendet, die fixiert und mit Kontrastmittel eingefärbt sind. Alle drei Arten müssen in Wasser eingelegt werden, um nicht auszutrocknen. Damit die Bandscheiben länger haltbar sind, werden sie auch in 70% EtOH aufbewahrt. Die Bandscheiben werden entweder in Kunststoffröhrchen oder in einem zugeschnittenen Latexhandschuh aufbewahrt. Dabei handelt es sich um den Zeigefinger des Handschuhs, welcher mit Wasser gefüllt wird. Diese zwei verwendeten Aufbewahrungsarten werden in den Bildern rechts aufgezeigt. Des Weiteren wird ein circa 1 cm bis 1.5 cm langer Knochenansatz an den Bandscheiben gelassen. Die Knochen oberhalb und unterhalb der Bandscheibe werden mit einer Säge abgeschnitten.



Abbildung 1: Lagerung der Bandscheibe in einem Rohr



Abbildung 2:Lagerung der Bandscheibe in einem Latexhandschuh-Finger

2.2 Angewandte Methoden bei der Erstellung der Belastungseinheit

2.2.1 Verwendetes CAD

Die Belastungseinheit wurde im Programm Fusion 360 von Autodesk konstruiert. Fusion 360 besitzt ein Simulations-Modul, mit dem eine statische Belastung simuliert werden kann. Dieses Modul ist für Studenten frei zugänglich.

2.2.2 Aufbau der statischen Belastungssimulation

Die Belastungseinheit ist im Bild rechts im statischen Simulationsmodul von Fusion 360 zu sehen. Um die Simulation durchzuführen sind folgende Schritte nötig. Zuerst müssen die Materialien im Konstruktionsmodul gewählt werden. Für die Belastungseinheit wird Aluminium verwendet. Die CFK Stangen werden für die Simulation ebenfalls als Aluminium simuliert, da diese in einem separaten Zugversuch getestet werden. Anschliessend wird das Bodenstück auf die X Y Ebene fixiert. Dieser und jeder der weiteren Schritte geschehen im Simulationsmodul. Danach werden die induzierten statischen Lasten definiert. Diese sind im Bild mit blauen Pfeilen symbolisiert. Beide Pfeile üben je eine Last von 377 N aus. Das ist die Mindestlast, die die Belastungseinheit aushalten muss, damit die gewünschten 1.2 MPa auf der Bandscheibe erreicht werden. Diese Pfeile sollen die Schraube simulieren, die den Druck zwischen der oberen Komponente (Nummer 3) und der mittleren Komponente (Nummer 2) ausübt. Diese zwei Lasten werden in weiteren Schritten erhöht, um die Maximallast zu definieren. Zwischen dem Bodenstück (Nummer 1) und dem Mittelstück (Nummer 2) wird ein Platzhalter für die Bandscheibe eingefügt. Es handelt sich um ein Aluminiumstück. Anschliessend werden die Kontakte definiert. Die Kontakte zwischen den Komponenten eins und zwei und den Gewindestangen werden als «geklebt» simuliert. Die Schraubverbindungen an diesen Kontakten werden später mit Zugversuchen getestet. Weiter muss ein Netz erstellt werden. Die Berechnung erfolgt mit Fusion 360 und es müssen keine Parameter eingestellt werden. Bevor die Berechnung gestartet wird, wird eine Vorüberprüfung durchgeführt. Diese meldet dem Benutzer, ob alle relevanten Informationen vorhanden sind. Zuletzt kann die Simulation entweder in der Autodesk Cloud oder auf dem lokalen Computer durchgeführt werden. Fusion 360 liefert dann Werte für den Sicherheitsfaktor, die Spannung, die Verschiebung, die Reaktionskraft, die Dehnung und den Kontaktdruck.

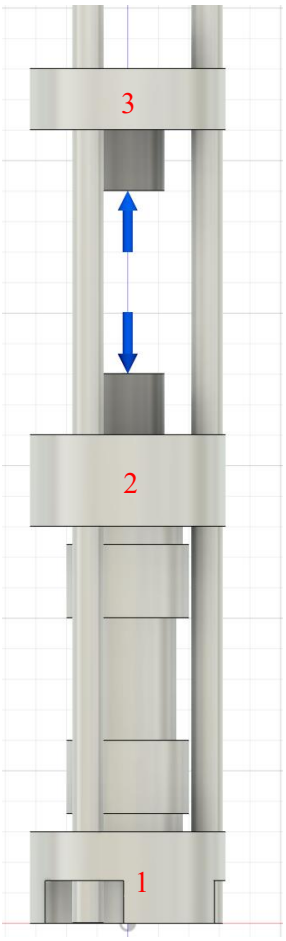


Abbildung 3: Belastungseinheit in der statischen Belastungssimulation

2.2.3 Aufbau der Zugversuche

Die Zugversuche werden an der Zwick Universalprüfmaschine Z150 durchgeführt. Die Maschine ist mit einem Computer mit der Software testXpert III verbunden. Es wird die Verbindung zwischen Kunststoffmuttern oder Stahlmuttern und GFK Gewindestange auf Zug getestet. Das Material der Kunststoffmutter ist dabei nicht bekannt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass GFK wegen eines Lieferfehlers verwendet wird. Das gewünschte Material wäre CFK gewesen. Folgende Versuche werden durchgeführt:

-GFK Gewindestange und Stahlmutter
-GFK Gewindestange und Kunststoffmutter
-GFK Gewindestange und zwei Stahlmuttern
-GFK Gewindestange und zwei Kunststoffmuttern

Dabei werden oben und unten an den Gewindestangen die Muttern angeschraubt. Weiter wird eine Unterlagsscheibe gebraucht, weil die Mutter zu klein für die Befestigung an der Maschine ist. Die Befestigung ist im Bild rechts zu sehen. Am anderen Ende der Gewindestange ist die Befestigung gleich realisiert. Bei den Versuchen mit zwei Muttern wurden diese von Hand angezogen, sodass die Muttern gegeneinander Druck ausüben.

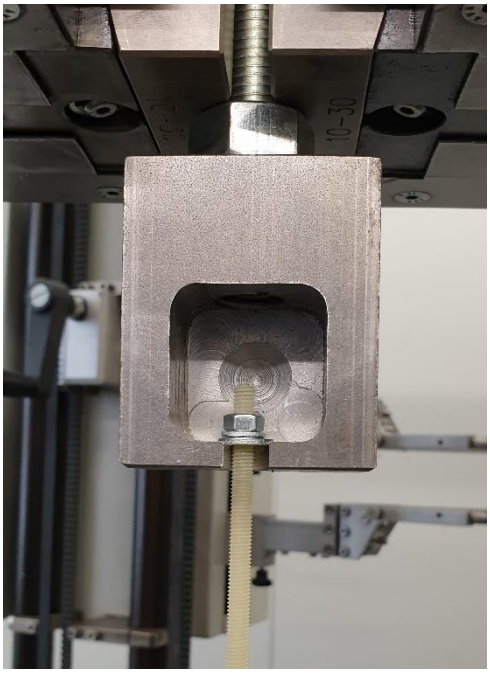


Abbildung 4: Befestigung der Gewindestange für den Zugversuch

Anschliessend wird die Messung gestartet und die Kraft erhöht bis entweder die Gewindestange oder die Muttern versagen. Die Software plottet den Kräfteverlauf in N in Abhängigkeit des Standardweges in mm automatisch.

2.3 Nachahmung der Belastungseinheit

Die Nachahmung der Belastungseinheit simuliert die Abbremsung der Strahlen der Belastungseinheit. Dafür werden drei M5 CFK Gewindestangen um die Bandscheibe befestigt. Die Halterungen unterhalb und oberhalb der Bandscheibe befinden sich nicht auf der Schussbahn der Strahlen. Somit muss das Material der Befestigungen nicht gleich dem der Belastungseinheit sein. Deshalb wird als Material XPS verwendet. Diese Komponenten werden wie im Bild zusammengefügt. Die CFK Gewindestangen werden durch 120° verschobene Löcher in die Halterungen platziert. Damit die Gewindestangen festsitzen, wird Klebeband um die Halterungen angebracht. Die Halterungen, mit der Bandscheibe dazwischen, werden so positioniert, dass sie unten genug lange sind, um sie an die Computertomograph Befestigung zu fixieren. Die Fixation geschieht ebenfalls mit Klebeband. Die Bandscheibe befindet sich in einem abgeschnittenen Finger eines Latexhandschuhs. Dieser wird mit Wasser gefüllt, damit die Bandscheibe nicht austrocknet. Ein Austrocknen würde die Bandscheibe schrumpfen lassen, was zu unscharfen CT-Bildern führen würde.



Abbildung 5: Nachahmung der Belastungseinheit

2.4 Messaufbau der absorbtionsbasierten Messungen

2.4.1 Messaufbau der initialen Messung

Dieser Messaufbau ist der erste Versuch, die Bandscheibe abzubilden. Dazu wird eine Spannung von 60 kV verwendet. Weiter werden 283 µA verwendet mit einer resultierenden Leistung von 16.98 W. Die Beleuchtungszeit liegt bei 3000 ms und es werden 360 Projektionen aufgenommen. Die Kapazität des Detektors liegt bei 1x1 4 pF. Es wird ein Abstand von 65 mm zwischen Bandscheibe und Quelle verwendet. Die Voxelgrösse liegt bei 10,69 µm. Der Abstand zwischen Quelle und Detektor liegt bei 860 mm. Die Bandscheibe befindet sich in einem Rohr mit 5 mm Wasser zwischen Bandscheibe und Rohrwand. Der Bandscheibe wurden die Konchenansätze weggeschnitten. Ober- und unterhalb der Bandscheibe sind Styroporstangen vorhanden, um die Bandscheibe örtlich zu fixieren. Ein Stück Schwamm zwischen Rohrdeckel und oberem XPS Stück erzeugt einen Druck. Damit sind die Komponenten im Rohr fixiert und können im Wasser nicht aufschwimmen. Ein Messprotokoll befindet sich im Anhang I.

2.4.2 Messaufbau der Messung ohne umgebendes Wasser

Diese Messung hat die gleichen Parameter wie die «Initiale Messung». Folgende Parameter wurden verwendet: 60 Kv, 283 µA, 16.98 W, 3000 ms und 360 Projektionen. Die Kapazität liegt bei 1x1 4 pF. Der Abstand zwischen Quelle und Objekt wird auf 65 mm gesetzt und der Abstand zwischen Quelle und Detektor auf 860 mm. Die Voxelgrösse liegt bei 10,69 µm. Bei dieser Messung befindet sich eine Bandscheibe mit abgeschnittenen Knochenansätzen nicht in einem wassergefüllten Rohr. Sie befindet sich direkt auf der Messoberfläche. Es wird angenommen, dass die 18.45 min Dauer dieser Messung kurz genug ist, damit die Bandscheibe nicht austrocknet und sich nicht zusammenzieht. Tritt eine Austrocknung trotzdem auf, ist dies im Bild als Bewegungsartefakt sichtbar. Das Messprotokoll ist im Anhang II.

2.4.3 Messaufbau der ersten Messung mit mehr als 1000 Projektionen

40 kV werden für diese Messung verwendet. Zusätzlich wird ein Pixelbinning von 2:2 und ein Framebinning von 2 aktiviert. Die Leistung beträgt bei 13 µA 0.52 W. Diese tiefe Leistung ist ebenfalls durch einen Softwarefehler entstanden. Die Beleuchtungszeit liegt bei 7000 ms. Es werden 1200 Projektionen aufgenommen. Die Kapazität liegt bei 1x1 4 pF. Der Abstand zwischen Quelle und Objekt liegt bei 62 mm und der Abstand zwischen Quelle und Detektor bei 860 mm. Die Voxelgrösse beträgt 10 µm. Während der Messung befindet sich die Bandscheibe in einem Rohr mit 30 mm Durchmesser bei 5 mm Wasser zwischen Bandscheibe und Rohrwand. Das Messprotokoll befindet sich im Anhang III.

2.4.4 Messaufbau der Parameterstudie

Die Parameterstudie verwendet Spannungswerte zwischen 40 kV und 100 kV. Sie beinhaltet vier Messungen mit Spannungserhöhungen von 20 kV. Der Strom wird leistungsabhängig angepasst, damit eine Leistung von ca. 10 W resultiert. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die CT Software einen Fehler beinhaltet, der den Stromparameter verändert. Dadurch ist bei der 40 kV Messung die Leistung fälschlicherweise auf 6.64 W gesunken. Die Beleuchtungszeit ist so gewählt, dass der Kontrast möglichst über 60% liegt. Der Abstand zwischen Probe und Quelle beträgt bei allen Messungen 59.998 mm und der Abstand zwischen Quelle und Detektor liegt bei 850.999 mm. Dadurch entsteht eine Vergrösserung von 14.184. Des Weiteren wird für keine dieser Messungen ein Framebinning verwendet, jede Messung enthält 1000 Projektionen und der Focus ist auf Microfocus eingestellt. Die Nachahmung der Belastungseinheit wird für diese Parameter Studie verwendet. In der unteren Tabelle sind die Parameter Werte aufgelistet und die Messprotokolle befinden sich in den Anhängen IV bis VII.

Tabelle 1: Messparameter der Parameterstudie

ID	P.M. 1	P.M. 2	P.M. 3	P.M. 4
Spannung [Kv]	40 kV	60 kV	80 kV	100 kV
Strom [µA]	166 µA	166 µA	125 µA	100 µA
Leistung [W]	6.64 W	9.96 W	10 W	10 W
Focus	Microfocus	Microfocus	Microfocus	Microfocus
Beleuchtungszeit [ms]	9000 ms	7000 ms	7000 ms	6000 ms
Projektionen	1000	1000	1000	1000

2.4.5 Messaufbau mit 40 kV und Aluminiumfolie

Bei dieser Messung werden 40 kV und 375 µA verwendet die in einer Leistung von 15 W resultieren. Die Integrationszeit liegt bei 3000 ms und es wird ein Framebinning von 5 verwendet. 1200 Projektionen werden aufgenommen. Die Kapazität wird auf 1x1 1 pF eingestellt. Der Abstand zwischen Quelle und Objekt liegt bei 60 mm und der Abstand zwischen Quelle und Detektor liegt bei 851 mm. Die Voxelgrösse liegt somit bei 9.8 µm. Zusätzlich wird eine Aluminiumfolie um die Nachahmung der Belastungseinheit gewickelt. Die Bandscheibe befindet sich im abgeschnittenen Finger eines Latexhandschuhs, der mit Wasser gefüllt ist. Das Messprotokoll befindet sich im Anhang VIII.

2.5 Phasenkontrast Messungen

2.5.1 Theorie zum Phasenkontrast

Es gibt verschiedene CT Phasenkontrast Techniken. Die simpelste davon ist die in-line Methode. Diese kann mit einem Micro Computertomographen durchgeführt werden, ohne zusätzlichem Material. Dafür muss die einfallende Strahlung des CT eine hohe räumliche Kohärenz besitzen. Phasenkontrast Messungen haben gezeigt, dass ein höherer Bildkontrast erzeugt werden kann als beim absorbtionsbasierten Ansatz. Dies gilt insbesondere für harte Strahlung zwischen 10 -100 keV. Der Hauptvorteil dieser Methode ist die Verbesserung des Kontrastes an den Kanten (Gureyev, 2008, S. 2). Diese Verbesserung des Kontrastes an den Kanten wird erreicht, indem ein angemessener Abstand zwischen Probe und Detektor gelassen wird. Falls dann die Strahlung einen genügenden Grad an transversaler Kohärenz besitzt, führen Fresnel Diffraktionen an mikroskopischen Strukturen zu Interferenz Fransen, die den Kontrast an den Kanten und Grenzflächen erhöhen (Weitkamp, 2011, S. 2). Dieser Hauptvorteil soll in diesen Messungen ausgenutzt werden. Gemäss Ushiki (1992, S. 1) «haben Kollagenfasern einen Durchmesser von 1 bis 20 µm.» Mit der Phasenkontrastmethode soll versucht werden, die Kanten dieser Kollagenfasern im Bild zu verstärken und so sichtbar zu machen. Der absorbtionsbasierte Ansatz scheiterte bei der Abbildung dieser Fasern.

2.5.2 Messaufbau der 200 kV Messung

Für diese Messung wird die auf dem Diondo D2 maximal verfügbare Spannung von 200 kV verwendet. Mit einem Strom von 50 µA wird eine Leistung von 10 W erzeugt. Die Voxelgrösse liegt bei 7.55 µm. Es wird ein Framebinning von 5 verwendet und 1200 Projektionen erstellt. Der Abstand zwischen Quelle und Bandscheibe beträgt 63 mm und zwischen Bandscheibe und Detektor 1160 mm. Die Bandscheibe befindet sich im wassergefüllten Latexhandschuh und ist in der Simulation der Belastungseinheit befestigt. Für die Rekonstruktion werden der Ringartefaktfilter und der Strahlenaufhärtungsfilter auf die tiefste Stufe gestellt. Das Messprotokoll ist im Anhang IX zu finden.

2.5.3 Aufbau der 200 kV Messung mit Aluminium Filter

Es wird wieder eine Spannung von 200 kV verwendet. Der Strom wird erhöht auf 100 µA was zu einer Leistung von 20 W führt. Weiter wird der High Power Fokus verwendet. Die Integrationszeit liegt bei 5000 ms und die Kapazität des Detektors wird auf 1x1 4pF eingestellt. Es werden wieder 3000 Projektionen erstellt. Es ist ein Abstand zwischen Quelle und Objekt von 63 mm vorhanden und zwischen Quelle und Detektor liegt er bei 1160 mm. Die Voxelgrösse ist 7.55 µm gross. Zusätzlich wird ein Aluminium Filter verwendet. Damit soll die niederenergetische Strahlung weggefiltert werden. Bei der Rekonstruktion befinden sich der Ringartefakt-Filter und der Strahlungsaufhärtungs-Filter auf der tiefsten Stufe. Das Messprotokoll ist im Anhang X zu finden.

2.5.4 Aufbau der Phasenkontrastoptimierten Messung

Die Berechnungen werden mit Spyder 4 durchgeführt. Der Code ist von Philipp Schütz geschrieben worden. Für die Erstellung des Codes werden die Formeln von Gureyev (2008) verwendet. Der Code befindet sich im Anhang XIII. Mit folgenden Parametern entsteht ein theoretischer Phasenkontrast-Wert von 1.29%. Es wird eine Spannung von
80 kV angelegt bei einem Strom von 188 µA. Die resultierende Leistung liegt somit bei 15.04 W. Es wird ein High Power Fokus verwendet. Die Integrationszeit beträgt 3000 ms und die Kapazität des Detektors wird auf 1x1 4 pF eingestellt. Es werden 2200 Projektionen aufgenommen. Der Abstand zwischen Quelle und Objekt ist bei 63 mm berechnet und der Abstand zwischen Quelle und Detektor ist bei 1160 mm errechnet. Die Voxelgrösse ist 7.55 µm. Bei der Rekonstruktion wird der Ringartefakt-Filter von VGStudio Max auf «mittel» eingestellt und der Strahlenaufhärtungs-Filter auf die tiefste Stufe. Zusätzlich wird für diese Messung eine Bandscheibe verwendet, die nicht mit Formalin fixiert ist. Das Messprotokoll befindet sich im Anhang XI.

2.6 Messaufbau der Kontrastmittel Messungen

2.6.1 Theorie zu den Kontrastmittel Messungen

Das PTA und PMA Kontrastmittel wird für diese Arbeit verwendet. Dabei handelt es sich um Kontrastmittel, das an Kollagen haftet und dieses so im CT sichtbar macht. Fürs Einfärben muss das Kontrastmittel mit 70 % EToH vermischt werden. Die Bandscheiben werden dann für eine Gewisse Zeit in diese Mischung eingetaucht. Es hat sich erwiesen, dass die Wirkung des Kontrastmittels mit zunehmender Eintauchzeit zunimmt. Die Seite der Bandscheibe, die am Knochen angrenzt, ist jedoch stark eingeschränkt was die Absorption des Kontrastmittels betrifft. Die Effektivität der Methoden wird gemessen, indem die Kollagenverteilung mit der FTIRI Methode verglichen wird. Dabei erwies sich die PTA Methode als eine geeignete, nichtdestruktive Methode, um die Kollagendistribution zu untersuchen (Nieminen, 2015).

2.6.2 Anwendung des Kontrastmittels

Für diese Arbeit werden die PTA und PMA Kontrastmittel verwendet. Obwohl für die Bestimmung der Kollagenverteilung das PTA dem PMA überlegen ist, wird hier auch das PMA verwendet (Nieminen, 2015). Das liegt daran, dass diese Messung das Ziel hat, die Kollagenfasern sichtbar zu machen und nicht die Verteilung zu messen. Es werden zwei verschiedene Arten von Färbung angewandt. Bei der ersten wird die Bandscheibe zuerst mit Formalin fixiert und anschliessend eingefärbt. Für die zweite Art werden die Fixation und die Färbung gleichzeitig durchgeführt. Somit entstehen vier gefärbte Bandscheiben.

Diese Konzentrationen werden für das Einfärben nach dem Fixieren angewandt. Sie gelten sowohl für die PTA als auch für die PMA Färbung. Pro Probe werden 50 ml Formalin verwendet. Die Proben werden anschliessend im Formalin Bad für zwei Wochen aufbewahrt. Danach werden sie mit Ethanol drei Mal gewaschen. Anschliessend werden die Bandscheiben nochmals zwei Wochen in der PTA und PMA Farblösung aufbewahrt. Diese Farblösungen bestehen aus 35 ml EtOH 100% und 15 ml Farbstoff. Die Farbstofflösung selbst besteht aus PMA oder PTA, das mit einer Konzentration von 2 g/l in destilliertem Wasser aufgelöst wurde. Dafür wurden 30 mg Farbstoff mit 15 ml Wasser vermischt.

Weiter werden diese Konzentrationen für das gleichzeitige Einfärben und Fixieren verwendet. Es werden wieder 50 ml Formalin pro Probe verwendet. Danach werden 7 ml EtOH 100% mit 3 ml destilliertem Wasser vermischt, damit EtOH 70% entsteht. Weiter werden 0.35 ml Färbelösung hergestellt indem 35 mg PTA oder PMA mit 0.35 ml EtOH 70% gemischt wird. Anschliessend werden 0.35 ml Färbelösung in 49.65 ml Formalin beigemischt damit sich 0.7 % Färbelösung im Formalin befindet.

2.6.3 Messparameter der Messung mit Kontrastmittel

Für diese Messung wird der Messaufbau von Nieminen (2015) möglichst nachgebaut. Wegen eines Wasserschadens am Server sind die Messparameter nicht vorhanden.

2.7 Aufsetzung des Paganinfilters

2.7.1 Theorie zum Paganinfilter

Erhaltene CT-Bilder sind nützlich für das Betrachten und Auswerten durch einen menschlichen Betrachter. Weitere quantitative Analysen sind mit flachen Phasenkontrast Daten jedoch nicht auf einfache Art möglich, da sie eine Segmentation des Volumens voraussetzen. Das liegt daran, dass die Graustufen an den Übergängen variieren. Das bedeutet, dass keine direkte Korrelation zwischen der Graustufe eines Voxels und dem Material oder der Dichte des entsprechenden Voxels besteht. Werden die Phasenkontrast Bilder durch einen phase-retrieval Prozess gefiltert und die Rekonstruktion an den dann erhaltenen phase projection maps durchgeführt, so wird das Bild einen Bereichskontrast aufweisen. Ohne diesen Prozess weisen die rekonstruierten Bilder einen kantenverstärkenden Kontrast auf. Das Vorhandensein des Bereichskontrastes bedeutet, dass jeder Pixel einer rekonstruierten Scheibe oder jeder Voxel eines rekonstruierten Volumens, mit dem Material des Objektes an dieser Position direkt zusammenhängend ist. Beim Paganinfilter handelt es sich um eine phase-retrieval Methode mit einer Einzel Distanz Messung. Dieser Filter hebt sich dadurch ab, indem es nicht nur eine vernachlässigbare Absorbtion voraussetzt, sondern er nimmt an, dass das Objekt aus einem einzigen Material besteht. Paganins Algorithmus wurde für monochromatische Beleuchtung geschrieben. Praxistests haben aber bewiesen, dass eine wesentliche Toleranz für nicht monochromatische Beleuchtungen besteht (Weitkamp, 2011, S. 2).

2.7.2 Anwendung des Paganinfilters

Die Anwendung des Paganinfilters erfolgt mit ANKAPhase. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung für das Programm ImageJ. Da der Versuch, die Bandscheibe mit einer Phasenkontrast Methode abzubilden, scheiterte, wird ein CT-Bild eines Käfers verwendet, auf dem der Phasenkontrast sichtbar ist. Dieses Bild ist unterhalb zu finden. Links sind der Kontrast und die Helligkeit so eingestellt, dass der Käfer erkennbar ist und rechts sind die Parameter so gewählt, dass Phasenkontrasteffekte sichtbar sind. Die roten Pfeile zeigen auf die Phasenkontrasteffekte.

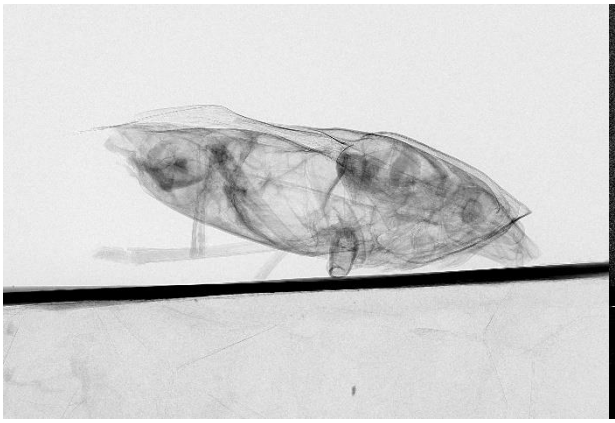


Abbildung 7: CT-Bild eines Käfers, Bearbeitet mit Fiji: Kontrast- und Helligkeitskorrektur

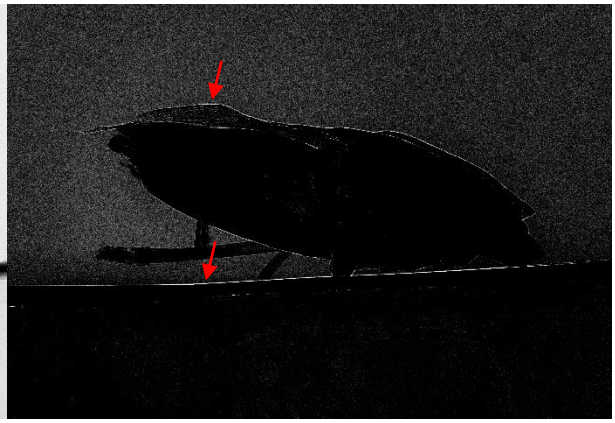


Abbildung 6: CT-Bild eines Käfers, Bearbeitet mit Fiji: Automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur so dass Phasenkontrasteffekte sichtbar sind

Diese Phasenkontrasteffekte sind ebenfalls erkennbar, wenn die Intensität der Graustufen in Abhängigkeit der Distanz in Pixel geplottet wird. Der Graph für die Kante beim oberen roten Pfeil ist im unteren Bild dargestellt. Der rot markierte Bereicht zeigt die Kontrastverstärkung der Kante auf. Charakteristisch für den Phasenkontrast ist der rot markierte, kurze Anstieg. Dementsprechend zeigt es den Phasenkontrasteffekt in einem Graphen auf.

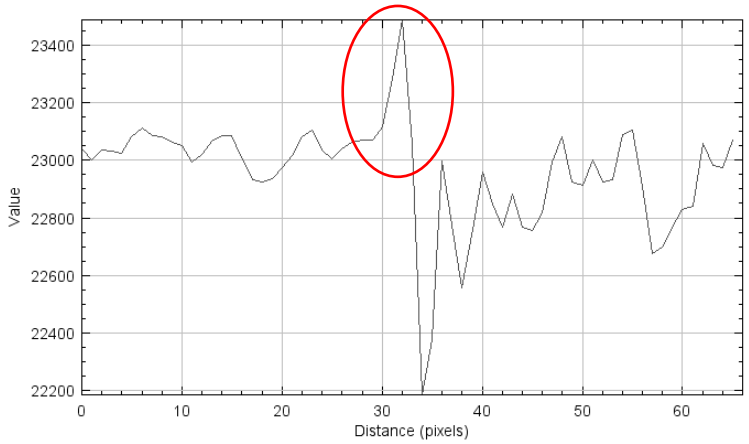


Abbildung 8: Phasenkontrast geplottet als Intensität der Graustufe in Abhängigkeit der Distanz in Pixel

ANKAPhase braucht verschiedene Parameter um ein phase-retrieval durchzuführen. Zwei davon sind der Röntgenstrahlungsrefraktär-Index und der Absorbtionskoeffizient. Diese wurden für den Käfer approximiert indem die Werte 0.50699 * 10^(-6) für den Röntgenstrahlungsrefraktär-Index und 3.7394* 10^(-9) für den Absorbtionskoeffizient verwerdent werden. Diese Werte entsprechend den Paramet für Kohlenstoff. Weiter wird eine Distanz zwischen Käfer und Detektor von 1165 mm verwendet. Die Energie wird auf 110 keV gesetzt und die Detektorpixelgrösse beträgt 139 µm. Die gefilterten Bilder sollen zuletzt als TIFF 16 bit abgespeichert werden. Anschliessend werden die phase retrieval map Bilder mit VGStudio Max rekonstruiert. Dafür wurden die Ringartefaktkorrektur und die Metallartefaktkorrektur deaktiviert. Das Messprotokoll des Käfers befindet sich im Anhang XII.

2.7.3 Validationsaufbau des Paganinfilters

Die Anwendung des Paganinfilters auf das CT-Käferbild geschieht mit einer nachgemachten Bearbeitung des Bildes. Dafür wird das Programm Fiji verwendet. Alle Projektionen des Käfers werden eingelesen und als erstes mit dem Enhance Contrast Prozess bearbeitet. Dabei wird eine Pixelsaturation von 3% verwendet. Danach wird der Find Edges Prozess angewandt. Weiter wird die automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur von Fiji verwendet. Durch diese Prozesse entsteht ein Bild, das dem Paganinfilter ähnlich ist. Diese bearbeiteten Projektionen werden anschliessend mit VGStudio Max rekonstruiert. Als letzter Prozess wird das Rauschen in der Rekonstruktion mit dem Substract Background Prozess von Fiji reduziert.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Belastungseinheit

3.1.1 Anforderungen an die Belastungseineheit

Es ist eine möglichst hohe Bildauflösung gewünscht. Dies stellt Anforderungen an die Belastungseinheit, denn je grösser der Abstand zwischen der Bandscheibe und der Quelle ist, desto tiefer wird die Auflösung sein. Wird die Dicke der Belastungseinheit um die Bandscheibe herum möglichst klein gehalten, so kann die Belastungseinheit mit einer minimalen Distanz zur Quelle platziert werden. Gewünscht ist eine Auflösung von 2 µm. Mit dem Strahlensatz kann somit der Abstand zwischen Quelle und dem Zentrum der Bandscheibe errechnet werden.

$$\frac{Px}{SOD} = \frac{PXDetektor}{SDD}$$

Mit einer Detekorpixelgrösse von 139 µm und einem SSD von 1.16 m ergibt das einen SOD von 16.69 mm. Mit einem Sicherheitsabstand zwischen Quelle und Detektor bedeutet das, dass die Belastungseinheit einen Radius von 14.69 mm haben darf. Das würde die maximale Grösse einer Bandscheibe sehr beeinträchtigen. Es wird gewünscht, Bandscheiben mit einem Durchmesser von 20 mm vermessen zu können, da kleinere Bandscheiben weniger fortentwickelt sind als grössere. Mit dieser Einschränkung erhält man einen Durchmesser von 32 mm für die Belastungseinheit. Dazu ragen die Muttern 1 mm über den Rand. Mit einem zusätzlichen Sicherheitsabstand zur Quelle von 2 mm erhält man einen SOD von 19 mm. Damit resultiert die mögliche Voxelgrösse von 2.28 µm. Somit darf die Belastungseinheit keinen grösseren Durchmesser als 32 mm besitzen.

Weiter stellt die Höhe der Belastung der Bandscheibe Anforderungen an die Belastungseinheit. Es soll ein Druck von 1.2 MPa auf die Bandscheibe wirken. Da der Durchmesser der Bandscheibe auf maximal 20 mm festgelegt ist, ergibt das eine Kraft von 377 N, die die Belastungseinheit ausüben muss. Somit müssen ihre Komponenten diese Kraft aushalten.

Eine weitere Anforderung entsteht dadurch, dass die Bandscheibe auch während der Messung in eine Flüssigkeit eingelegt werden muss. Somit muss die Belastungseinheit fähig sein, die Bandscheibe während der Belastung in Flüssigkeit zu halten.

Des Weiteren beinhaltet die verwendete Flüssigkeit Giftstoffe. Somit muss der Flüssigkeitsbehälter der Bandscheibe dicht sein.

Zusätzlich muss die Belastungseinheit möglichst röntgen transluzent sein, damit sie einen möglichst kleinen Einfluss auf das Bild hat. Dementsprechend sollten keine Metalle um die Bandscheibe verwendet werden, da diese Metallartefakte erzeugen.

3.1.2 Konstruktion

Die Belastungseinheit besteht aus drei Aluminium Komponenten. Hier darf ein Metall verwendet werden, da diese Komponenten nicht auf der Bahn der Strahlen liegen. Die Konstruktionspläne befinden sich im Anhang XV.

Bodenkomponente

Die Bodenkomponente ist im Bild rechts zu sehen. Das Loch bei Nummer 1 dient der Befestigung der Bandscheibe. Der Knochen wird dabei ins Loch positioniert und mit einem Klebstoff fixiert. Da das Loch einen Durchmesser von 16 mm hat, dürfen die Knochen nicht grösser sein. Die Einkerbung bei Nummer 2 hat eine Abdichtungsfunktion. Sie ermöglicht ein Gummiband zu befestigen, falls ein ballonähnliches Produkt als Flüssigkeitstank benutzt wird. Die drei Löcher bei Nummer 3 besitzen kein Gewinde. Das liegt daran, dass falls Klebstoff auslaufen würde und in die Gewinde laufen würde, das Bodenstück unbrauchbar wäre. Sie haben einen Durchmesser von 5.1 mm und sind um 120° gegeneinander verschoben. Ihr Ziel ist es, Gewindestangen bis M5 annehmen zu können. Jedes Loch hat am unteren Teil eine Bohrung (Nummer 4). Dort soll eine M5 Mutter reinpassen, um die Gewindestangen befestigen zu können. Am Boden dieser Komponente ist ein M6 Gewinde vorhanden (nicht sichtbar im Bild). Dieses dient der Befestigung mit dem CT-System. Die verwendeten Masse sind im unteren Bild ersichtlich.

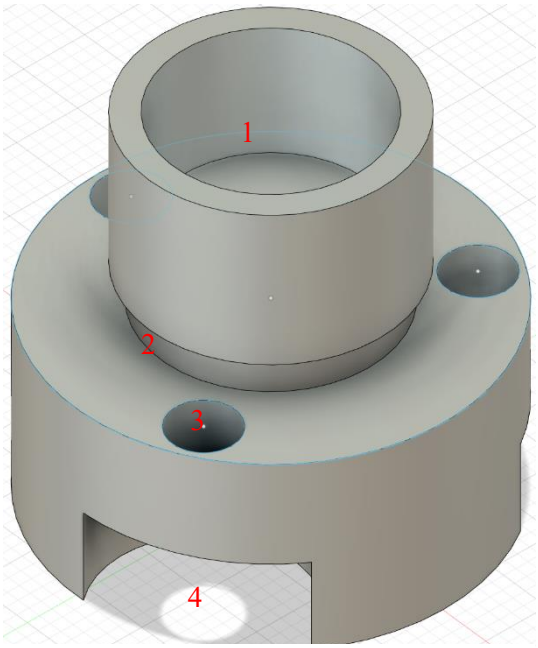


Abbildung 9:Bodenstück der Belastungseinheit

Mittelstück

In diesem Bild ist das Mittelstück zu sehen. Die Komponenten 1, 2 und 3 haben die gleichen Funktionen wie beim Bodenstück. Die Ausbohrung bei den Löchern (Nummer 3) fehlt jedoch. Diese ist nicht nötig, weil dieses Stück in der Z Achse frei beweglich ist. Somit werden keine Muttern angebracht. Das M6 Gewinde zur Befestigung ist hier ebenfalls nicht nötig.

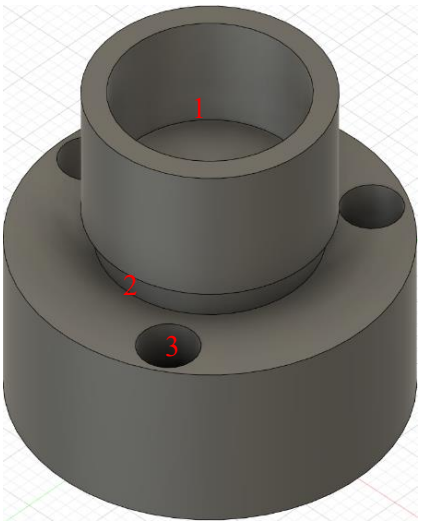


Abbildung 10:Mittelstück der Belastungseinheit

Dachstück

Das Dachstück besitzt ebenfalls drei Löcher mit einem Durchmesser von 5.1 mm die um 120° verschoben sind. Das zentrale Loch besitzt ein M12 Gewinde.



Abbildung 11:Dachstück der Belastungseinheit

Pressschraube

Es handelt sich um eine M12 Innensechskantschraube. Das untere Stück der Schraube (Nummer 1) ist zusätzlich abgerundet. So wird die Reibung aufs Mittelstück minimiert.



Abbildung 12: Innensechskant M12 Schraube mit abgerundetem Endstück

Gewindestangen

Es kommen GFK M5 Gewindestangen zum Einsatz. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Materialwahl durch einen Lieferfehler entstanden ist. Es hätte CFK verwendet werden sollen. CFK besitzt mit 1.6 g/ccm eine tiefe Dichte. Dadurch ist es für Röntgenaufnahmen geeignet. GFK hat hingegen eine Dichte von 1.6 bis 2 g/ccm. Dadurch ist es weniger geeignet für CT-Aufnahmen. Die Messung des Gewichtes beider Stangen bestätigt dies. Die 50 cm lange M5 GFK Gewindestange hat ein Gewicht von 16.5 g und die CFK Gewindestange, die die gleiche Länge und Durchmesser besitzt, hat ein Gewicht von 11.25 g. Weiter hat GFK eine Zugfestigkeit zwischen 200 bis 400 MPa. CFK hat hingegen eine Zugfestigkeit von 320 MPa. Somit liegen beide Materialien in der gleichen Grössenordnung. Im Bild ist das Endstück einer solchen GFK Stange zu sehen.



Abbildung 13: GFK M5 Gewindestange

3.1.3 Funktionsweise der Belastungseinheit

Das folgende Bild zeigt die realisierte Belastungseinheit. Die Bandscheibe wird mit Klebstoff zwischen dem Bodenstück und dem Mittelstück befestigt. Das Mittelstück ist auf der Z Achse frei beweglich, wobei die Gewindestangen als Führung dienen. Zieht man anschliessend die Schraube an, wird eine Kraft auf das Mittelstück ausgeübt, welches dann die Bandscheibe zusammendrückt. Die sechs Muttern beim Boden- und Dachstück drücken der Kraft entgegen.

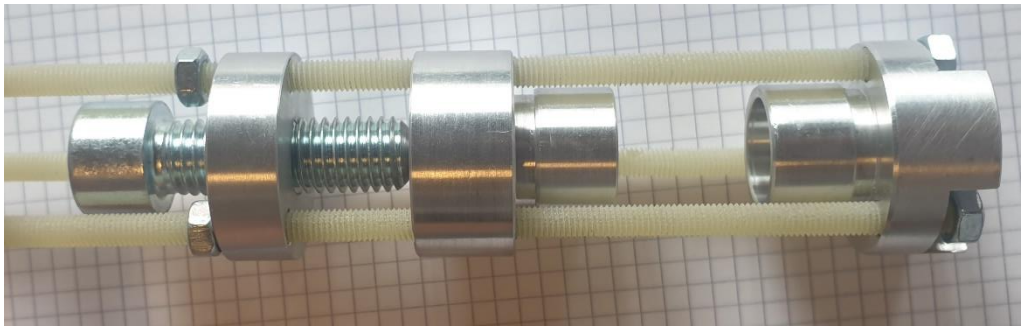


Abbildung 14: Realisierte Belastungseinheit

3.1.4 Gebrauchsanweisung der Belastungseinheit

Zuerst muss sich die Bandscheibe in einem mit Wasser gefüllten Behälter befinden. Es wird empfohlen einen Latexhandschuhfinger zu verwenden. Dies wird im Bild rechts aufgezeigt. Der Latexfinger muss oben mit einem Gummiband geschlossen werden und überschüssiger Latex muss abgeschnitten werden. Anschliessend legt man Frischhaltefolie in die Löcher des Boden- und Mittelstückes. Das erlaubt es, die Bandscheibe nach dem Verkleben wieder entfernen zu können. Danach wird der Knochen der Bandscheibe mit Klebstoff in diese Löcher verklebt. Zuerst sollte das Mittelstück verklebt werden. Während der Klebstoff des Bodenstückes noch nicht hart ist, müssen die Gewindestangen eingeführt werden. So ist sichergestellt, dass die Löcher für die Gewindestangenaufnahme aufeinanderpassen. Wenn beide Klebstoffe trocken sind, darf das Dachstück ebenfalls durch die Gewindestangen eingeführt werden. Zuletzt wird die Druckschraube eingeschraubt und die sechs Muttern angebracht. Die Gewindestangen müssen gegebenenfalls auf die entsprechende Länge abgeschnitten werden, damit man mit dem Drehschlüssel an die Schraube kommt. Die Bandscheibe wird anschliessend belastet indem man die Schraube anzieht. Für grössere Lasten wird empfohlen, das Dachstück mit einem Schraubstock zu verklemmen.



Abbildung 15:Aufbewarung der Bandscheibe in einem Latexhandschuh-Finger

3.1.5 Resultate der statischen Simulation

Das Ziel dieser Simulation ist es herauszufinden, ob die Komponenten der Belastungseinheit bei den auftretenden Kräften zerstört werden. Die Gewindestangen werden dabei nicht ausgewertet, da sie separat in einem Zugversuch getestet werden.

Simulation bei 377 N

377 N ist die Mindestlast, die die Belastungseinheit aushalten muss. Sie erreichte dabei einen minimalen Sicherheitsfaktor von 14.9. Dieser ist beim Mittelstück, am Rande des Gewindestangenloches entstanden (ersichtlich im Bild rechts).



Abbildung 16: Auftreten des Mindestfaktor zwischen Gewindestange und Mittelstück

Simulation bei 1000 N

Bei 1000 N entsteht ein Mindestsicherheitsfaktor von 6.076. Dieser ist am gleichen Ort aufgetreten wie bei der 377 N Simulation.

Simulation bei 2000 N

Dieser Lastfall hat einen Mindestsicherheitsfaktor von 3.038 ergeben. Dieser ist wieder am gleichen Ort aufgetreten wie bei der 377 N Simulation.

Simulation bei 3000 N

Bei 3000 N ist der Mindestsicherheitsfaktor auf 2.025 gesunken. Auch hier ist er wieder am gleichen Ort aufgetreten wie bei der 377 N Simulation. Neu haben die Gewindestangen einen Sicherheitsfaktor zwischen 3 und 6.

Auswertung

Bei allen Simulationen hatten die Boden-, Mittel- und Dachkomponente einen Sicherheitsfaktor über 8. Die tieferen Sicherheitsfaktoren sind durch die Verschiebung der Gewindestangen aufgetreten. Diese drücken an die Ränder der Gewindestangenlöcher und verursachen so hohe Spannungen. Dies ist im unteren Bild ersichtlich. Bei 3000 N sind 135.8 MPa entstanden. Somit sind die Gewindestangen der limitierende Faktor bei diesen Simulationen. Da die Gewindestangen für die Simulationen jedoch mit Aluminium approximiert wurden und später GFK Stangen zum Einsatz kommen, liefern diese Messungen keine Resultate über die Gewindestangen. Dadurch, dass GFK spröder ist als Aluminium, wird angenommen, dass die GFK Gewindestangen tiefere Kräfte aushalten. Somit würden sie zerstört werden, bevor sie hohe Kräfte auf die restlichen Komponenten ausüben können. Es kann aber daraus geschlossen werden, dass die restlichen Komponenten Kräfte bis Minimum 3000 N aushalten.

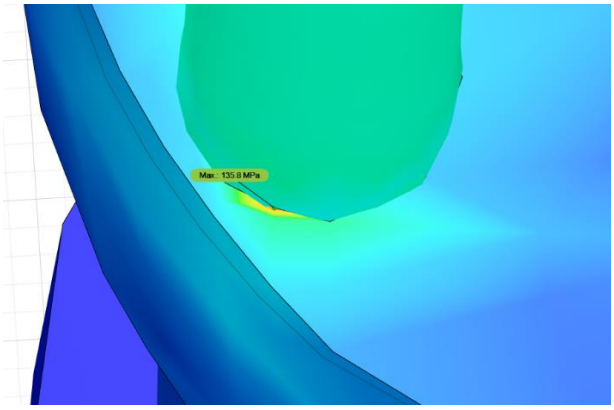


Abbildung 17: Auftreten des maximalen Druckes zwischen Gewindestange und Mittelstück

3.1.6 Resultate des Zugversuches

Folgend sind die Resultate der Zugversuche ersichtlich. Die Probenbezeichung «Met» steht für die Metallmutter. «Kst» steht für Kunststoffmutter. Falls ein «Do» davorsteht, wurden zwei Muttern verwendet. Bei allen Prüfungen sind M5 GFK Gewindestangen verwendet worden. In der Spalte F_{max} ist die maximale Kraft, die entweder die Mutter oder die Gewindestange ausgehalten hat. Die letzte Spalte «dL bei F_{max}» gibt die Längenausdehnung an, bis die maximale Kraft aufgetreten ist und somit eine Komponente beschädigt wurde. Um die Übersicht zu verbessern ist jede Messung im Graph um einen Millimeter verschoben.

Legende	Nr	Proben-Nr.	Probenbezeichnung	Datum/Uhrzeit	F_{max} N	dL bei F_{max} mm
	1	1	1_Met	22.04.2020 10:46:33	1110	1.2
	2	2	2_Kst	22.04.2020 10:54:11	1150	1.4
	4	3	2_Met	22.04.2020 11:07:08	1170	1.6
	5	4	2_DoMet	22.04.2020 11:16:54	1410	1.2
	6	5	1_DoKst	22.04.2020 11:26:19	1980	2.3
	7	6	1_Kst	22.04.2020 11:31:46	1200	1.3
	8	7	2_DoMet2	22.04.2020 11:49:45	1120	1.0

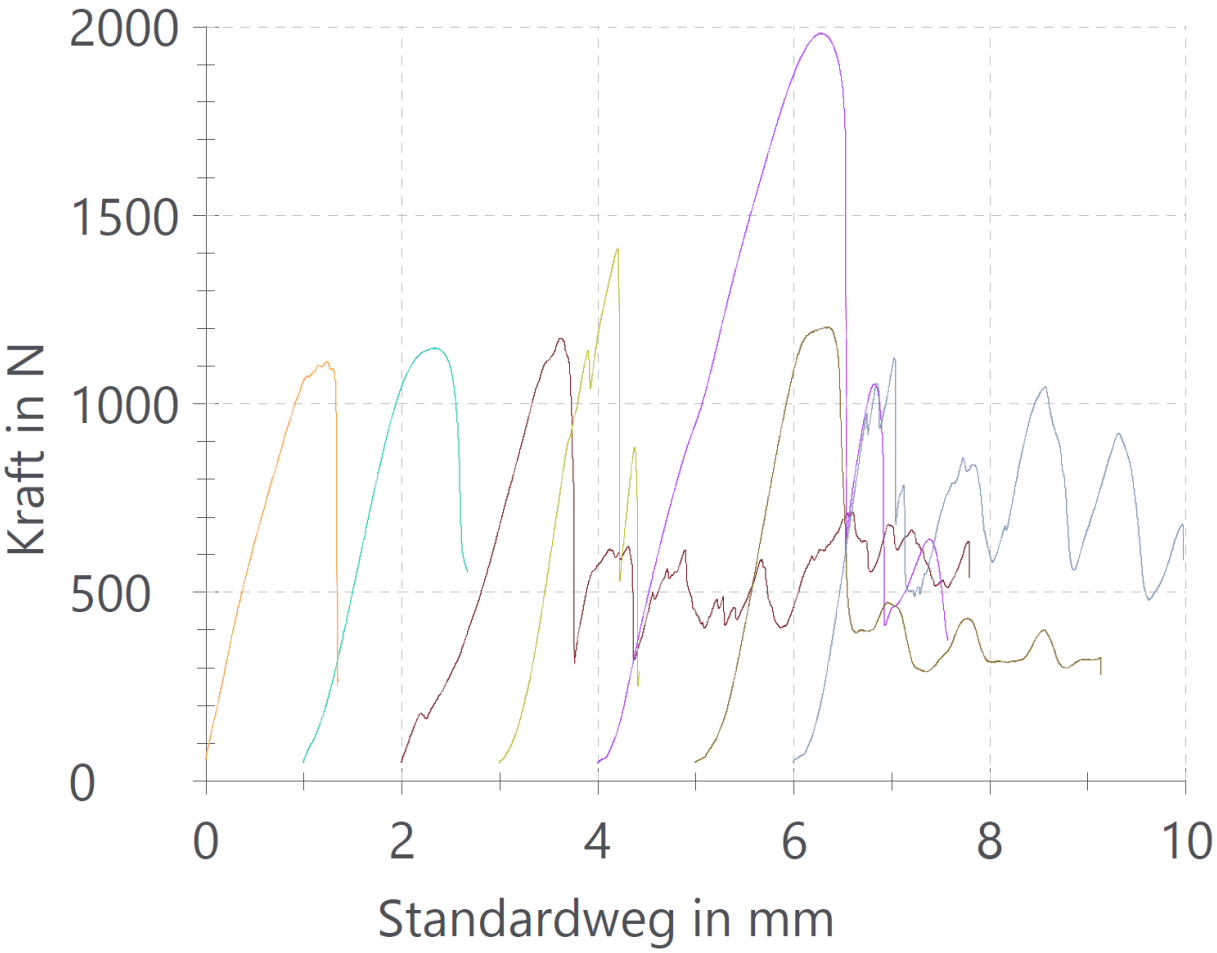


Abbildung 18: Messprotokoll des Zugversuches

GFK Gewindestange und Stahlmutter (Proben-Nr. 1 & 3)

Der erste Versuch erreichte eine maximale Kraft von 1110 N und der Zweite eine Kraft von 1170 N. Im Graphen ist ab 4mm ein Zickzack Muster erkennbar. Das liegt daran, dass nachdem F_{max} erreicht worden ist, die Messung nicht beendet wurde und somit die Mutter weiter über die Gewindestange gezogen wurde. Somit sind diese im Graphen ersichtlichen Zacken die Gewinde, die abgerissen werden. Die Auswertung hat ergeben, dass die Gewindestange versagt hat. Das ist im Bild erkennbar. Der mit dem Pfeil markierte Bereich besitzt kein Gewinde mehr. Die Zacken des Gewindes sind somit von der Metallmutter abgerissen worden. Somit kann bei Verwendung von Metallmuttern eine maximale Kraft von 1110 N angewandt werden bevor die GFK Gewindestange versagt.

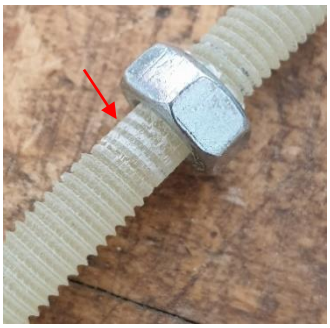


Abbildung 19: Versagen der Gewindestange bei einfacher Metallmutter

GFK Gewindestange und Kunststoffmutter (Proben-Nr. 2 & 6)

Hier ist ein F_{max} von zuerst 1150 N und danach eines von 1200 N erreicht worden. Die Längenausdehnung beträgt 1.4 mm und 1.3 mm. Beim zweiten Versuch ist die Messung, nach dem Erreichen von F_{max}, wieder nicht beendet worden. Dies führt zu Zacken im Graphen. Mit der Kunststoffmutter sind diese Zacken jedoch höher. Beim Auswerten zeigte sich, dass die Kunststoffmutter versagen hat. Die Gewindestange war jedoch ebenfalls beschädigt. Ihr Gewinde wurde abgerissen aber nicht gleich stark wie mit einer Metallmutter. Im Bild ist ersichtlich, dass sich unterhalb der Mutter Kunststoffresten des Gewindes befinden. Man erkennt ebenfalls die fehlenden Gewindezacken der Stange. Somit ist bei der Verwendung von Kunststoffmuttern eine maximale Kraft von 1150 N möglich.



Abbildung 20: Versagen der Gewindestange und der Kunststoffmutter

GFK Gewindestange und zwei Stahlmuttern (Proben-Nr. 4 & 7)

Bei dieser Messung liegen die F_{max} bei 1410 N und 1120 N. Bei der ersten Messung mit einem F_{max} von 1410 N ist ein Zacken im Graphen bei 1150 N sichtbar. Daraus ist zu schliessen, dass dort ein Gewindezacken versagt hat und der nächste eine höhere Kraft ausgehalten hat. Somit wird für die erste Messung die Kraft F_{max} auf 1150 N korrigiert. Die Auswertung zeigt, dass die Gewindestangen versagen haben. Im Bild ist erkennbar, wie das Gewinde der Stangen abgerissen wurde. Somit kann auch mit zwei Metallmuttern die Gewindestange mit maximal 1120 N belastet werden.

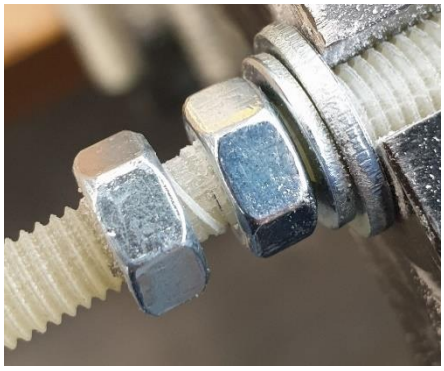


Abbildung 21: Versagen der Gewindestange bei einer doppelten Metallmutter

GFK Gewindestange und zwei Kunststoffmuttern (Proben-Nr. 5)

Hier ist nur eine Messung durchgeführt worden. Sie hat einen F_{max} von 1980 N ergeben bei einer Längenausdehnung von 2.3 mm. Dies ist die bisher höchste erreichte Kraft. Im Gegensatz zur doppelten Metallmutter Messung gibt es hier keinen Zacken im Graphen. Die Auswertung zeigt, dass sowohl Gewindestange als auch Mutter versagt haben. Im Bild sind Kunststoffresten erkennbar. Zusätzlich sieht man, dass Gewindezacken zerstört sind. Es wird angenommen, dass die Muttern einen besseren Kontakt gemacht haben als bei der Verwendung von zwei Metallmuttern. Dadurch hat sich die Kraft auf eine längere Strecke verteilt, was zu einem höheren F_{max} geführt hat. Somit kann mit der Verwendung von zwei Kunststoffmuttern eine maximale Kraft von 1980 N erzielt werden.

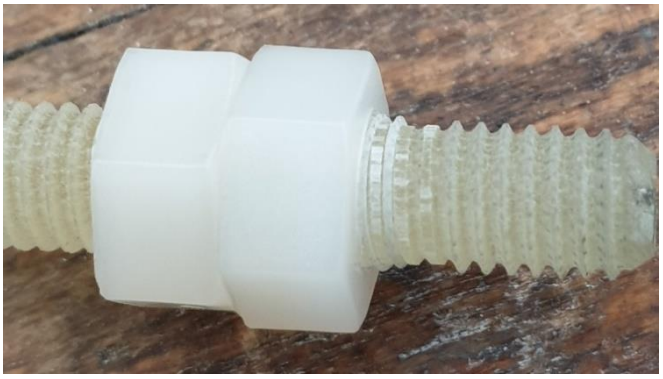


Abbildung 22: Versagen der Gewindestange und der beider Kunststoffmuttern

3.2 Absorbtionsbasierte Messungen

3.2.1 Initiale Messung

Erhaltene Bilder

Die untenstehenden Bilder sind bei dieser Messung entstanden.

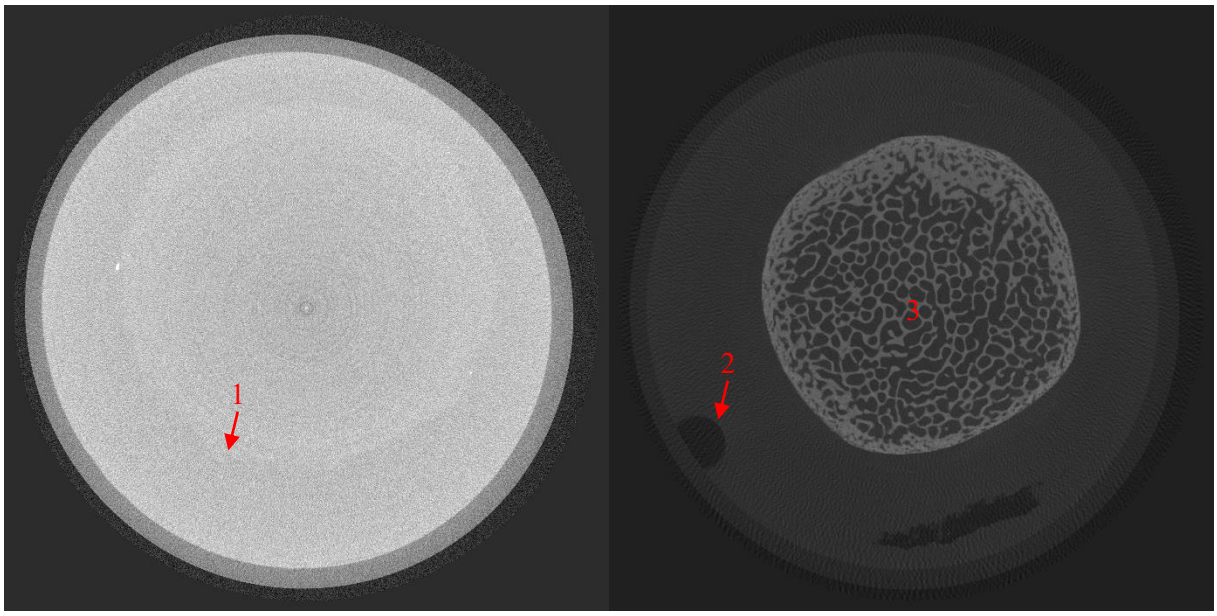


Abbildung 24: Initiale Messung, Bandscheibe bei 60 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

Abbildung 23: Initiale Messung, Bandscheibe bei 60 kV mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe.
2. Luftblase
3. Knochenstruktur des Knochenansatzes an der Bandscheibe

Auswertung

Der Übergang zwischen Bandscheibe und umliegendem Wasser ist sichtbar. Die Struktur der Bandscheibe ist jedoch nicht zu erkennen. Die Bandscheibe ist als hellster Fleck des linken Bildes erkennbar. Dabei sieht man keinen Kontrastunterschied zwischen dem Galertkern und dem Faserring. Im rechten Bild ist die knöcherne Struktur detailliert sichtbar. Dies deutet darauf hin, dass Knochen die Strahlung stärker absorbiert. Dadurch, dass der Knochen und die Bandscheibe verschieden stark absorbieren, haben sie im Originalbild unterschiedliche Kontrast- und Helligkeitswerte. Deshalb ist jeweils nur eine der beiden Strukturen sichtbar. Diese zwei Bilder wurden mit dem automatischen Helligkeit- und Kontrastkorrektur Modus von Fiji bearbeitet.

Nächste Schritte

Um zu untersuchen, wie sich das umgebende Wasser auf das Bild auswirkt, soll in einer nächsten Messung die Bandscheibe ohne Wasser vermessen werden.

3.2.2 Messung ohne umgebendes Wasser

Diese Messung halt folgendes Bild ergeben:

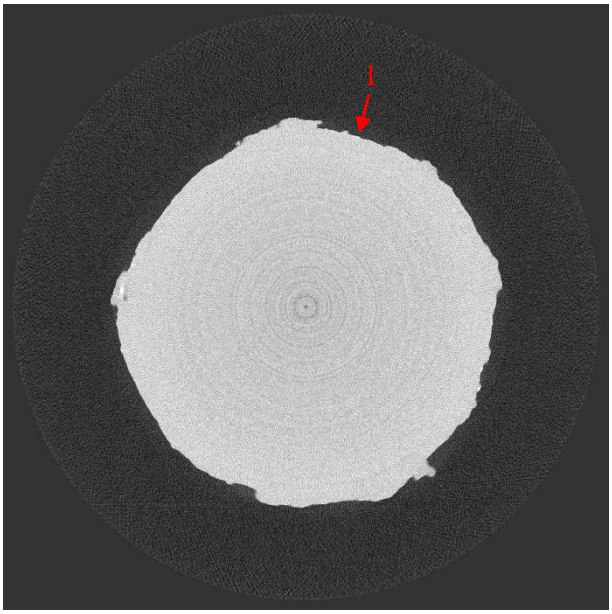


Abbildung 25: Messung ohne umgebendes Wasser, Bandscheibe bei 60 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

1. Übergang zwischen Luft und Bandscheibe

Auswertung

Im Vergleich zur «initialen Messung», ist die Form der Bandscheibe besser erkennbar. Der Kontrastunterschied zwischen Luft und Bandscheibe ist höher als der Kontrastunterschied zwischen Wasser und Bandscheibe. Die innere Struktur der Bandscheibe ist aber nicht erkennbar. Kein Wasser zu verwenden verbessert somit die Darstellung der Bandscheibe. Dieser Ansatz kann jedoch nicht weiterverfolgt werden, da ohne Wasser keine Langzeitmessungen möglich sind. Das liegt daran, dass sich die Bandscheibe austrocknen und somit zusammenziehen würde. Solche Bewegungen führen zu unscharfen Bildern.

Nächste Schritte

Es wird angenommen, dass 360 Projektionen nicht ausreichend sind, um die Kollagenfasern abzubilden. Deshalb soll eine Messung mit mehr als 360 Projektionen durchgeführt werden.

3.2.3 Erste Messung mit mehr als 1000 Projektionen

Folgendes Bild ist bei dieser Messung entstanden:

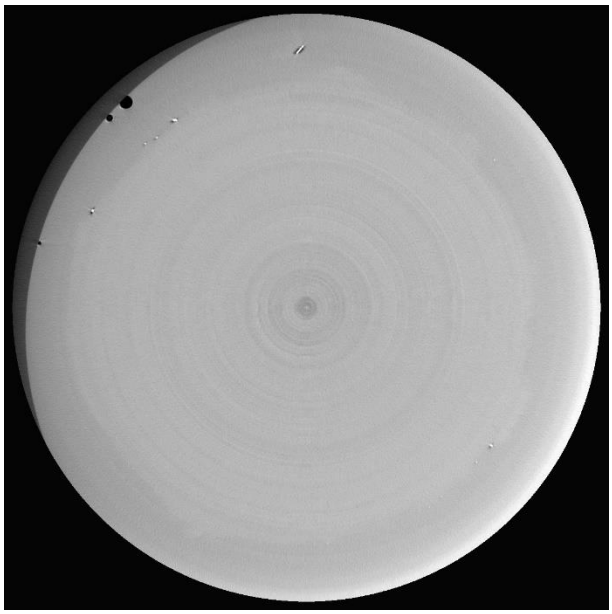


Abbildung 26: Erste Messung mit über 1000 Projektionen, Bandscheibe bei 40 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe.

Auswertung

Obwohl die Leistung mit 0.52 W zu tief ist, ist der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe sichtbar. Die Struktur der Bandscheibe ist auch mit 1200 Projektionen nicht erkennbar obwohl die Voxelgrösse bei 10 µm liegt und die Kollagenfasern zwischen 1 µm und 20 µm gross sind (Ushiki, 1992, S. 1).

Nächste Schritte

Da die Struktur der Bandscheibe auch mit 1200 Projektionen nicht sichtbar ist, aber die Auflösung der Grösse der Kollagenfasern genügt, soll in einem weiteren Schritt eine Parameterstudie durchgeführt werden. Damit sollen die optimalen Parameter identifiziert werden, um die Bandscheibe und ihre Strukturen abzubilden. Des Weiteren wird die Nachahmung der Belastungseinheit verwendet, um deren Einfluss auf die Bilder zu untersuchen.

3.2.4 Parameterstudie

3.2.4.1 40 kV Messung

Erhaltene Bilder

Das folgende Bild ist aus der 40 kV Messung entstanden. Die Bestandteile der Bilder sind nummeriert und eine Beschreibung folgt unterhalb der Bilder. Bei den Bildern handelt es sich um einen Viertel der Bandscheibe.

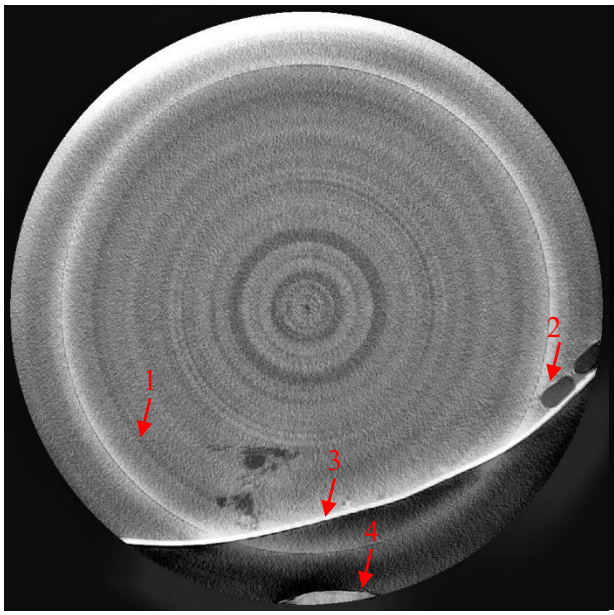


Abbildung 28: Parameterstudie, Bandscheibe bei 40 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

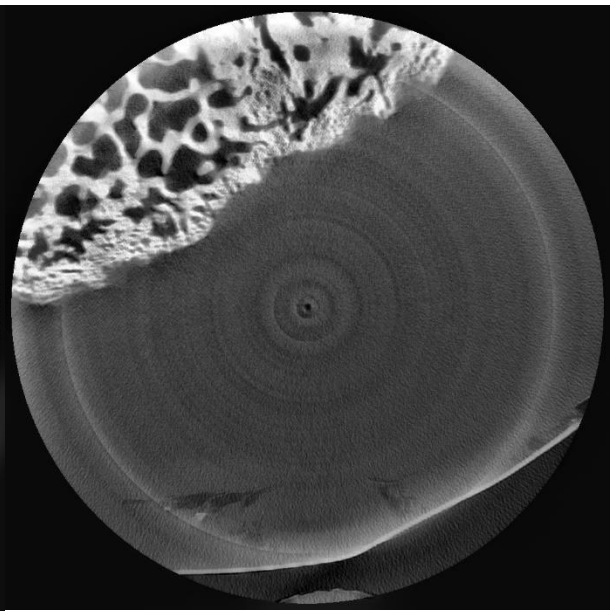


Abbildung 27: Parameterstudie, Bandscheibe bei 40 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

1. Übergang zwischen Bandscheibe und Wasser
2. Luftblasen
3. Latexhandschuh
4. M5 CFK Gewindestange

Auswertung

Der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe ist auch mit der Simulation der Belastungseinheit sichtbar. Die Strukturen der Bandscheibe können jedoch mit 40 kV nicht erkannt werden. Die Ringartefakte haben sich verstärkt, obwohl der Ringartefakt Filter von VG Studio Max auf «high» verwendet wird. Diese starken Ringartefakte werden von den CFK Gewindestangen verursacht, da diese bei früheren Messungen nicht vergleichbar stark vorhanden waren. Der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe kann nur auf der linken Seite des Bildes erkannt werden. Das liegt daran, dass dieser Übergang auf der rechten Seite parallel zu den Ringartefakten verläuft. Weiter verursacht die Reduktion der Wasserschicht durch den Latexhandschuh keine Verbesserung des Bildes.

3.2.4.2 60 kV Messung

Erhaltene Bilder

Folgendes Bild ist aus der 60 kV Messung entstanden. Da die gleichen Bestandteile wie bei der 40 kV Messung erkennbar sind, werden sie hier nicht weiter erläutert.

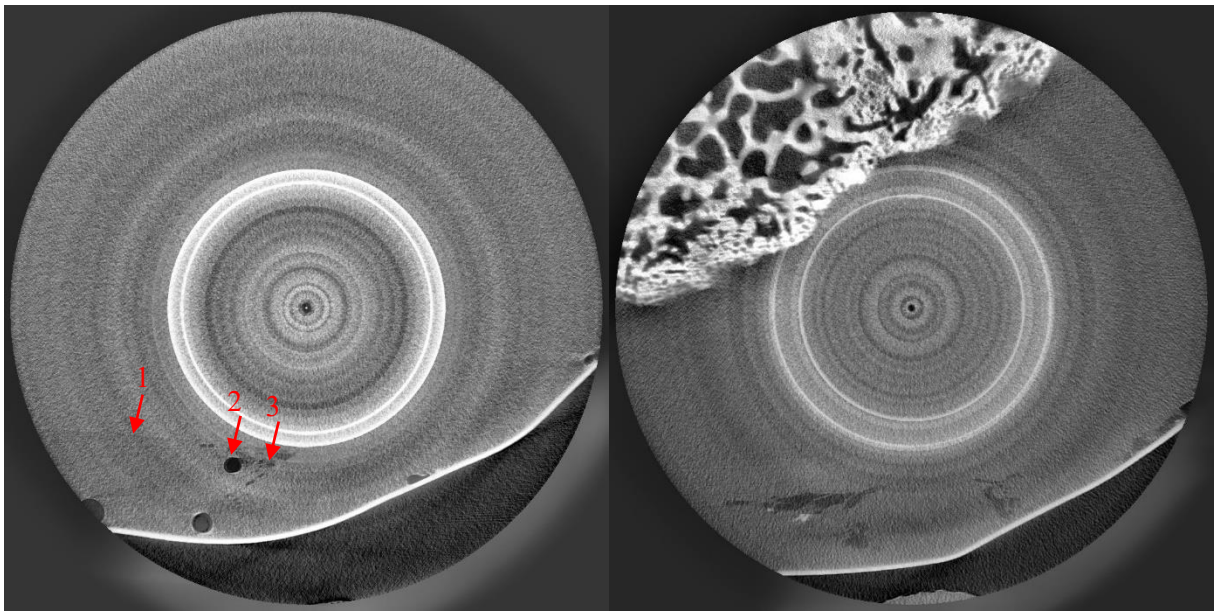


Abbildung 30: Parameterstudie, Bandscheibe bei 60 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

Abbildung 29: Parameterstudie, Bandscheibe bei 60 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe
2. Luftblase
3. Unbekanntes Material, das an der Bandscheibe klebt.

Auswertung

Die Erhöhung auf 60 kV hat den Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe nicht sichtbarer gemacht. Die Strukturen der Bandscheibe sind nicht sichtbar. Weiter bestätigt die Luftblase bei Nummer 2, dass dort der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe sein muss, denn sie muss entweder an der Latexschicht oder an der Bandscheibe kleben, um nicht aufzusteigen. Sie befindet sich jedoch nicht direkt beim markierten Übergang, sondern bei den dunkleren Flecken. Somit sind diese dunklen Flecke keine Artefakte. Es handelt sich um ein anderes Material, welches an der Bandscheibe klebt. Weiter gelten die gleichen Schlussfolgerungen wie bei der 40 kV Messung.

3.2.4.3 80 Kv Messung

Erhaltene Bilder

Folgende Bilder sind aus der 80 kV Messung entstanden. Die Bestandteile, die bereits bei früheren Messungen der Parameterstudie vorkommen, werden nicht weiter beschrieben.

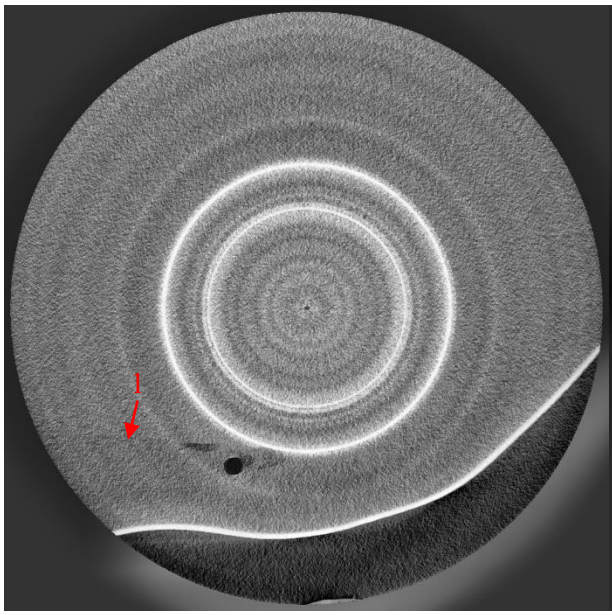


Abbildung 32: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

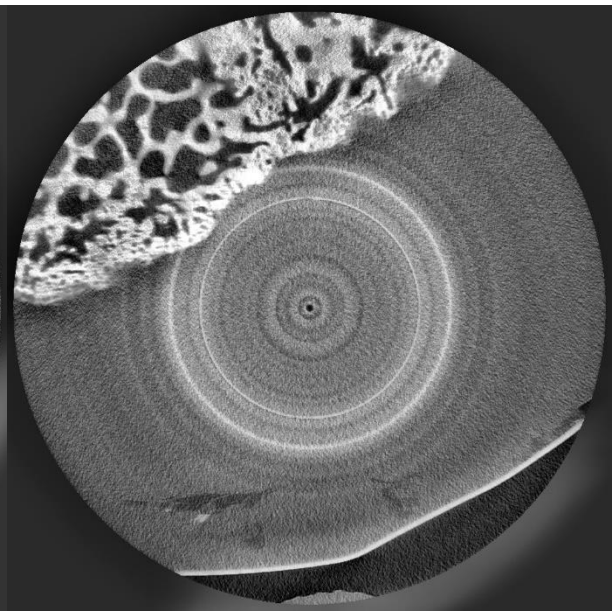


Abbildung 31: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe

Auswertung

Mit 80 kV ist der Übergang zwischen Bandscheibe und Wasser schlechter sichtbar. Die knöcherne Struktur wird jedoch detaillierter abgebildet. Die Erkenntnisse der vorherigen Parameterstudie-Messungen gelten auch hier noch.

3.2.4.4 100 kV Messung

Erhaltene Bilder

Folgende Bilder sind aus der 100 kV Messung entstanden. Die Bestandteile, die bereits bei früheren Messungen der Parameterstudie vorkommen, werden nicht weiter beschrieben.

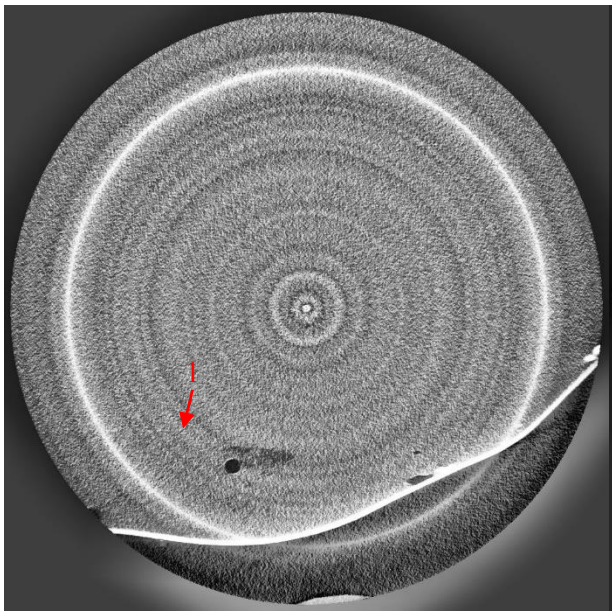


Abbildung 34: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

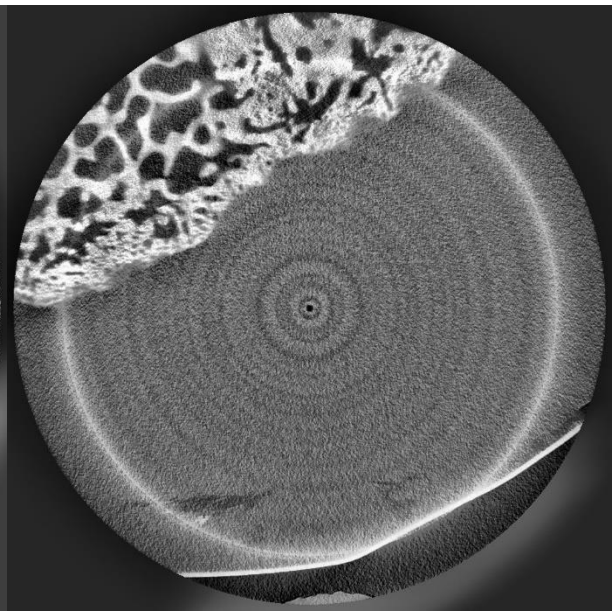


Abbildung 33: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe

Auswertung

Bei 100 kV ist der Übergang zwischen Bandscheibe und Wasser noch schlechter sichtbar geworden als bei 80 kV. Die 100 kV haben die knöcherne Struktur jedoch nochmals besser abgebildet als bei 80 kV. Die Erkenntnisse der vorherigen Parameterstudie-Messungen gelten auch hier noch.

3.2.4.5 Erkenntnisse aus der Parameterstudie und nächste Schritte

Keine der verwendeten Parameter konnten die Strukturen der Bandscheibe abbilden. Auffallend sind die starken Ringartefakte, obwohl der Ringartefaktfilter für jede dieser Messung auf der höchsten Stufe ist. Die Ringartefakte haben mit zunehmender Strahlung zugenommen und sind erst mit der Verwendung der Simulation der Belastungseinheit hinzugekommen. Somit eignen sich tiefe Spannungen wie 40 kV für die Verwendung der Belastungseinheit. Es wird immer noch angenommen, dass die Bandscheibe die Strahlung zu wenig abbremst. Weiter besitzt der Anulus fibrosus einen Wasseranteil von 68.3% (Périé, 2004, S. 3). Auch deshalb wird angenommen, dass der Übergang zwischen dem umgebenden Wasser und der Bandscheibe schwer darstellbar ist. Beide Materialien absorbieren mit einer ähnlichen Stärke. Es wird auch vermutet, dass der Detektor die eintreffende Strahlung nicht quantifizieren kann. Die Begründung liegt darin, dass die Bandscheibe die Strahlung zu schwach abbremst. Dementsprechend trifft die Strahlung, die durch die Bandscheibe dringt und die Strahlung, die die Bandscheibe verfehlt, mit einer ähnlichen Intensität auf den Detektor. Deshalb soll in einer nächsten Messung Aluminiumfolie um die Bandscheibe angebracht werden. Dadurch soll die Strahlung, die durch die Bandscheibe dringt, stärker abgebremst werden und somit einen grösseren Intensitätsunterschied zur Strahlung, die die Bandscheibe verfehlt, aufweisen.

3.2.5 Resultate aus der Messung mit 40 kV und Aluminiumfolie

Diese Messung liefert folgendes Bild:

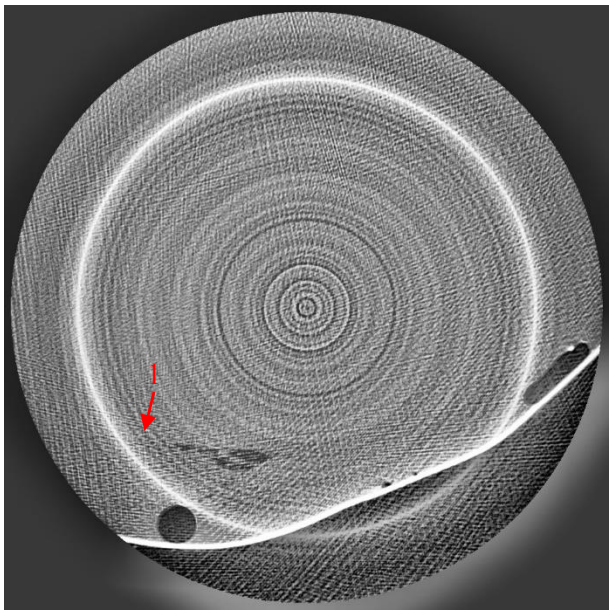


Abbildung 35: Messung mit 40 kV und Aluminiumfolie, Bandscheibe bei 40 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

1. Übergang zwischen Bandscheibe und Wasser

Auswertung

Durch die umgewickelte Aluminiumfolie sind neu Streifenartefakte entstanden. Der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe ist nun schlechter sichtbar als ohne Aluminiumfolie. Die Strukturen der Bandscheibe sind nicht sichtbar. Der Versuch, mit Aluminiumfolie die Strahlung durch die Bandscheibe abzubremsen und somit die inneren Strukturen abbilden zu können, gilt somit als gescheitert. An diesem Punkt wird angenommen, dass der absorbtionsbasierte Ansatz die Strukturen der Bandscheibe nicht darstellen kann. Deshalb wird in einem nächsten Schritt der Phasenkontrast-Ansatz getestet. Da bei den Spannungen zwischen 40 und 100 kV kein Phasenkontrast sichtbar ist, soll beim nächsten Versuch eine Messung mit 200 kV durchgeführt werden. Das Ziel ist, einen Phasenkontrasteffekt zu erzeugen.

3.3 Ergebnisse der Phasenkontrast-Messungen

3.3.1 Ergebnisse der 200 kV Messung

Erhaltene Bilder

Die 200 kV Messung hat folgende Bilder ergeben.

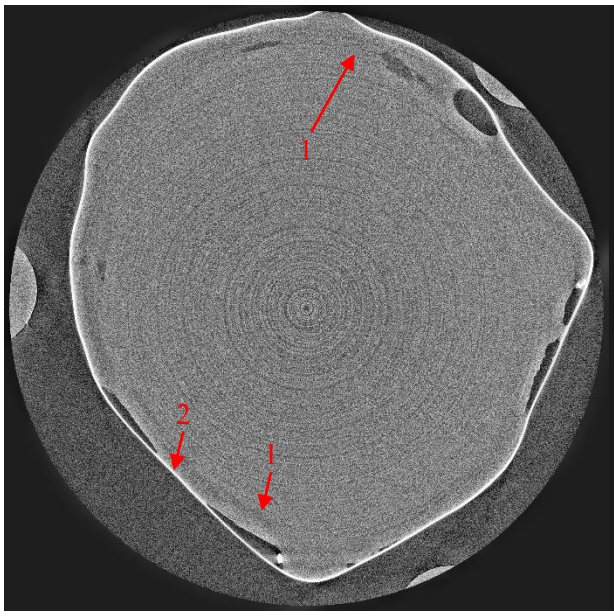


Abbildung 37: Bandscheibe bei 200 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

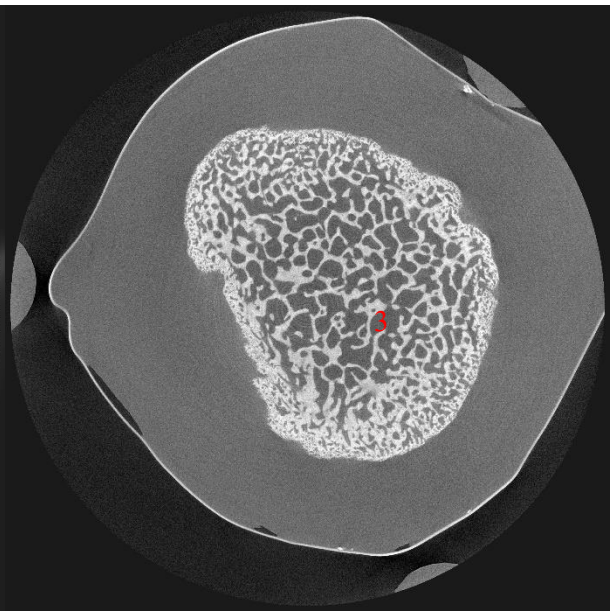


Abbildung 36: Bandscheibe bei 200 kV mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe
2. Latexschicht
3. Knöcherne Struktur

Auswertung

Bei der Parameterstudie wurde die Tendenz erkannt, dass sich der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe bei höheren Spannungen schlechter darstellen lässt. Diese 200 kV Messung bestätigt diese Tendenz. Der Übergang ist von Auge kaum erkennbar. Die Struktur der Bandscheibe ist ebenfalls nicht zu sehen. Die intensiven weissen Ränder, die durch einen Phasenkontrast entstehen, sind auf dem Bild auch nicht vorhanden. Dabei ist die Latexschicht nicht mit den Phasenkontrasteffekten zu verwechseln. Die knöcherne Struktur wird auch bei 200 kV detailliert abgebildet. Somit gilt der Versuch, einen Phasenkontrast bei 200 kV zu erzeugen, als gescheitert.

Nächste Schritte

Für diese Messung wurde kein Filter verwendet. Deshalb wird in einem nächsten Schritt untersucht, ob ein Phasenkontrast sichtbar wird, wenn die niederenergetische Strahlung eliminiert wird. Dafür wird weiter ein Aluminium Filter verwendet bei einer Spannung von 200 kV.

3.3.2 Ergebnisse der 200 kV Messung mit Aluminium Filter

Erhaltene Bilder

Die 200 kV Messung mit dem Aluminium Filter hat diese Bilder ergeben.

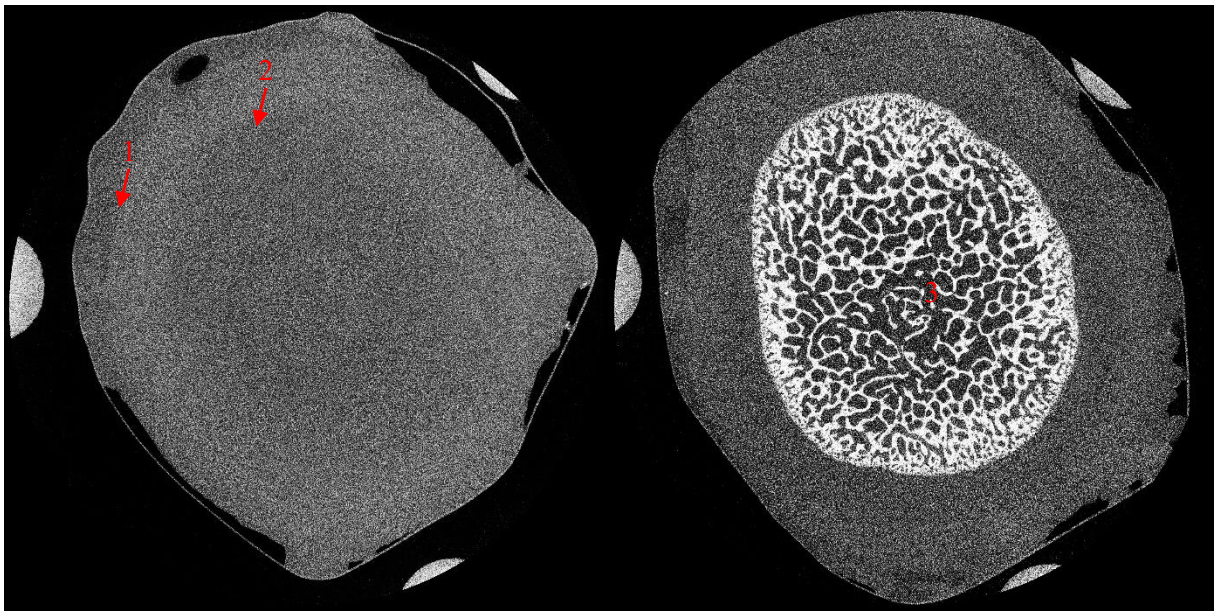


Abbildung 39: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) + Anisotropic Diffusion 2D

Abbildung 38: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter und sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

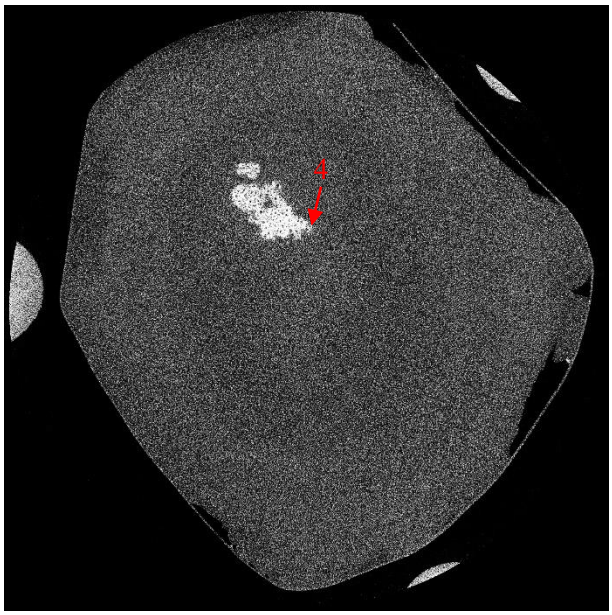


Abbildung 40: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter und sichtbarem Knochenansatz, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) + Anisotropic Diffusion 2D

1. Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe
2. Kontrastunterschied
3. Knöcherne Struktur
4. Anfang der knöchernen Struktur

Auswertung

Der Aluminium-Filter hat ein sehr starkes Rauschen verursacht. Der Übergang zwischen Wasser und Bandscheibe ist jedoch besser erkennbar als ohne Verwendung des Filters. Bei dieser Messung ist das erste Mal ein dunkler Fleck in der Mitte der Bandscheibe erkennbar. Laut Delphine Périé (2004, S. 3) hat der Nucleus pulposus einen Wasseranteil von 86.5% und der Anulus fibrosus einen Wasseranteil von 68.3%. Da der unterschiedliche Wasseranteil eine unterschiedliche Dichte zwischen Nucleus pulposus und Anulus fibrosus verursacht, bremsen sie die Strahlung unterschiedlich ab. Dies könnte die Ursache für den Kontrastunterschied sein. Bewegt man sich auf der y-Achse nach oben Richtung Knochen, ist ersichtlich, dass der Kontrastunterschied bis zum Knochen bestehen bleibt. Somit bedeutet das, dass gegen den Knochen eine dünnere Anulus fibrosus Schicht besteht als gegen aussen. Laut Adams (2006, S. 4) ist dies der Fall. Somit hat es diese Messung als erste dieser Arbeit geschafft, einen Kontrastunterschied zwischen Nucleus pulposus und Anulus fibrosus abzubilden. Diese Messung scheiterte ebenfalls, die Strukturen der Bandscheibe abzubilden. Es ist keine Querverstrebung der Kollagenfasern im Anulus erkennbar. Auch hier wird angenommen, dass das starke Rauschen verhindert, die Struktur zu erkennen. Die Voxelgrösse lag bei dieser Messung bei 7.55 µm, was klein genug ist, um die Kollagenfasern abzubilden.

Nächste Schritte

Da es auch diese Messung nicht erreicht hat, mit Phasenkontrast die Strukturen abzubilden, sollen für eine nächste Messung die Parameter berechnet werden, um einen möglichst grossen Phasenkontrast zu erhalten. Die Parameter sollen dann für die Messung verwendet werden.

3.3.3 Ergebnisse der Phasenkontrastoptimierte Messung

Auswertung der Berechnungen

Bei den Berechnungen wurde mit 1.29% ein tiefer, theoretischer Phasenkontrastwert berechnet. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Berechnungen einen Fehler enthalten. Im Code sind die zwei Faktoren 2.3546 und 1.353 vorhanden. Diese wurden hinzugefügt, um den berechneten Werten von Gureyev zu entsprechen. Deshalb werden die berechneten Werte als geschätzte Werte betrachtet.

Folgend werden die eingefügten Werte erläutert. Diese sind parallel am CT getestet worden. Die Berechnung befindet sich im Code im Anhang XIII. Die Detektorauflösung liegt bei 139 µm. Da die Kollagenfasern zwischen 1 und 20 µm gross sind, soll eine Vergrösserung von Faktor 10 entstehen (Ushiki, 1992, S. 1). Damit können die Kollagenfasern zwischen 13,9 und 20 µm abgebildet werden. Die Berechnung zeigt auf, dass je kleiner das abzubildende Objekt ist, desto höher der Phasenkontrast wird. Mit der erwähnten Detektorauflösung, der Vergrösserung und der Grösse einer Kollagenfaser, erreicht man den höchsten Phasenkontrastwert bei einem Abstand von 116 mm zwischen Quelle und Detektor. Diese Parameter müssen im Gleichgewicht mit der angelegten Spannung und dem Strom sein. Die Spannung wirkt sich direkt auf den Phasenkontrastwert aus und der Strom wirkt sich auf den Brennfleck aus. Dieser letzte wirkt ebenfalls auf den Phasenkontrastwert. Die optimale Spannung zwischen Phasenkontrast, Kontrast und Brennfleck wurde bei 80 kV gefunden. Bei einem High Power Fokus, einer Spannung von 80 kV und einer Leistung von 15 W erhält man einen Brennfleck zwischen 7 und 10 µm. Dieser Wert stammt aus der Tabelle des Herstellers die im Anhang XIV zu finden ist. Die Tabelle besitzt keine Brennfleckwerte für eine Leistung von 15 W und 80 kV. Deshalb kann der Brennfleck nur zwischen 7 und 10 µm geschätzt werden. Die zwei Faktoren, die den Phasenkontrast am stärksten einschränken, sind die Propagationsdistanz der Strahlen und die Auflösung des Detektors.

Erhaltene Bilder

Die Messung hat folgende Bilder geliefert.

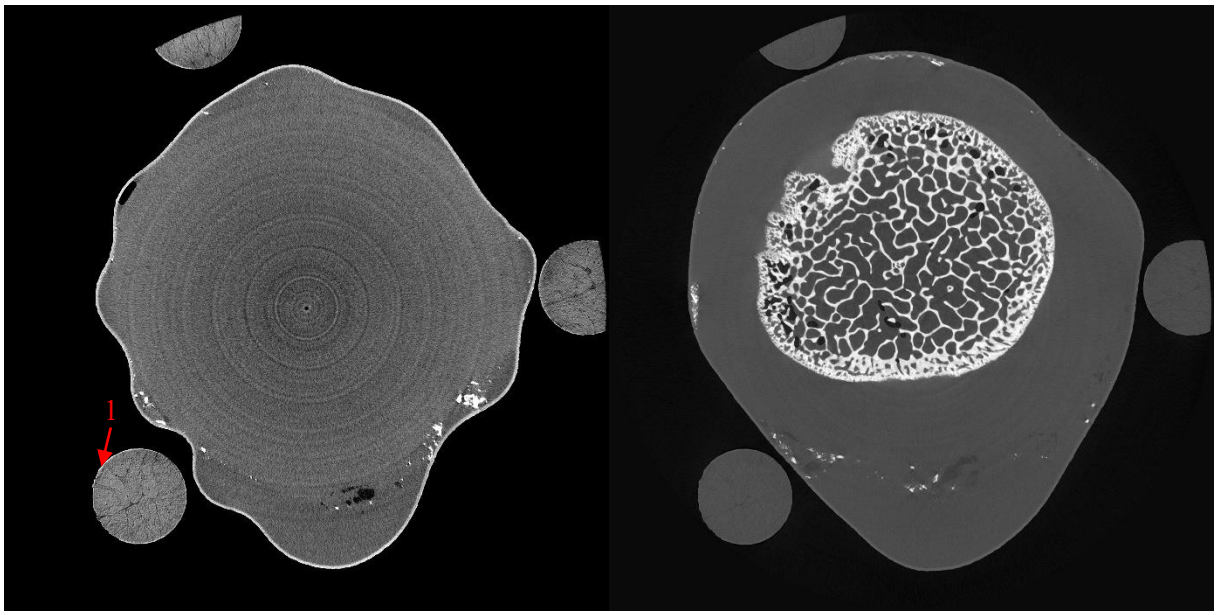


Abbildung 42: Phasenkontrast optimierte Messung, Bandscheibe bei 80 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)

Abbildung 41: Phasenkontrast optimierte Messung, Bandscheibe bei 80 Kv mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

1. Phasenkontrast-Effekt bei CFK Gewindestange

Auswertung

Der tiefe Phasenkontrast-Wert lässt sich auch im Bild erkennen. Phasenkontrasteffekte sind beim Übergang zwischen Gewindestange und Luft, und beim Übergang zwischen Latexschicht und Luft entstanden. Diese Effekte sind im nächsten Bild ersichtlich und sind mit roten Pfeilen markiert.

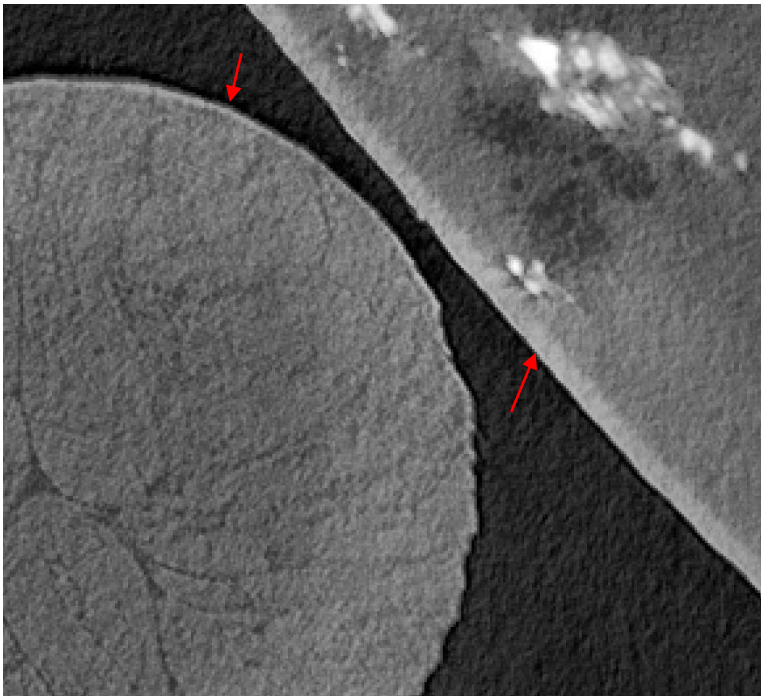


Abbildung 43: Sichtbare Phasenkontrasteffekte an den Gewindestangen und an der Latexschicht

Diese zwei markierten Kanten sind in den folgenden Graphen dargestellt. Dabei wurde die Graustufe in Abhängigkeit der Distanz in Pixel geplottet. Der linke Graph zeigt die Kante der Gewindestange und der rechte Graph zeigt die Kante der Latexschicht auf.

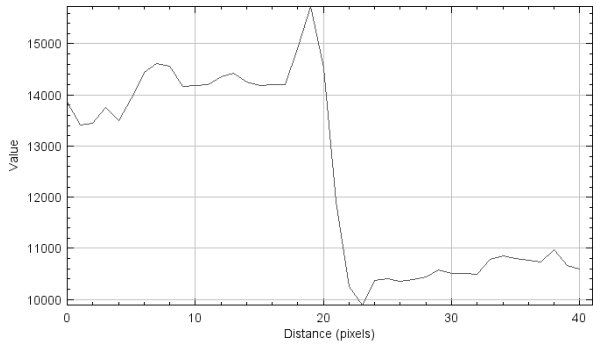


Abbildung 45: Geplotteter Phasenkontrasteffekt an der Gewindestange

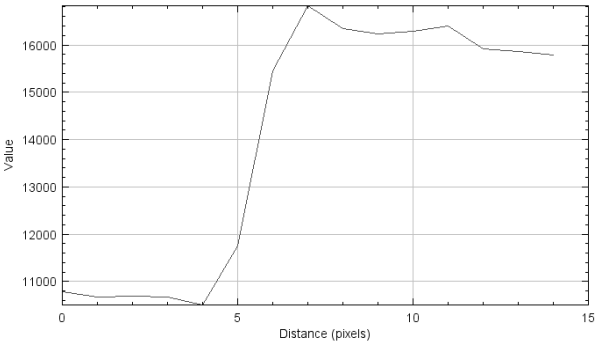


Abbildung 44: Geplotteter Phasenkontrasteffekt an der Latexschicht

Insbesondere bei der Gewindestange ist der für den Phasenkontrast-Effekt charakteristische kurze Anstieg bei einer Distanz von 20 Pixel zu sehen. Dieser Anstieg dauert bei der Gewindestange über vier Pixel an. Beim Latexhandschuh ist der Phasenkontrast von Auge schlechter erkennbar. Dies zeigt sich auch im Graphen, da der Anstieg halb so gross ist wie bei der Gewindestange. Er ist mit einer Verteilung über 2 Pixel auch halb so lang. Weitere Phasenkontrast-Effekte sind in den Bildern nicht zu finden.

Es wird angenommen, dass durch den hohen Wasseranteil des Anulus von 68.3% keine Phasenkontrasteffekte an den Rändern der Bandscheibe entstanden sind (Périé, 2004, S. 3). Auch in diesen Bildern ist das Rauschen stark präsent. Daraus lässt sich schliessen, dass falls ein Phasenkontrast-Effekt an den Kollagenfasern entstanden ist, dieser vom Rauschen dominiert wird und somit nicht sichtbar ist.

Nächste Schritte

Diese Messung erreichte es ebenfalls nicht, die Struktur der Bandscheibe abzubilden. Deshalb wird an diesem Punkt angenommen, dass es mit dem Phasenkontrast-Ansatz und den verfügbaren Messmitteln nicht möglich, ist die Bandscheibenstruktur abzubilden. Deshalb wird weiter ein CT-Messverfahren mit Kontrastmittel getestet.

3.4 Ergebnisse der Messungen mit Kontrastmittel

Die Messungen wurden durchgeführt, wegen eines Wasserschadens am Server sind aber keine Ergebnisse für die Kontrastmittelmessung vorhanden.

3.5 Ergebnisse der Anwendung des Paganinfilters

3.5.1 Erhaltene Paganinfilter Bilder

Folgend sind zuerst zwei Bilder von Projektionen des Käfers zu sehen. Beim linken Bild handelt es sich um das Original Projektionsbild. Beim rechten Bild wurde der Paganinfilter auf die Projektion angewandt. Direkt unterhalb der Projektionen befinden sich die entsprechenden Rekonstruktionen.

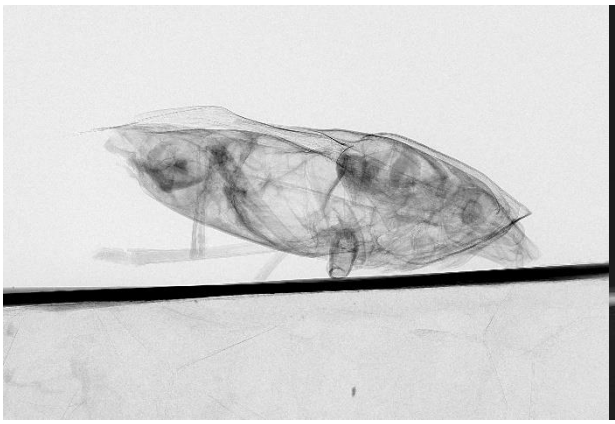


Abbildung 49: Originalbild des Käfers

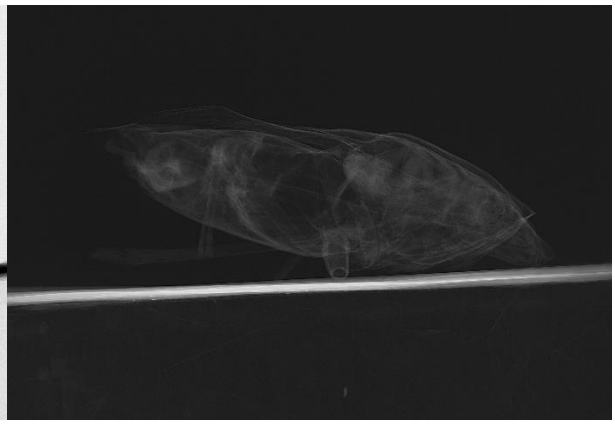


Abbildung 48: Käferbild nach Anwendung des Paganinfilters

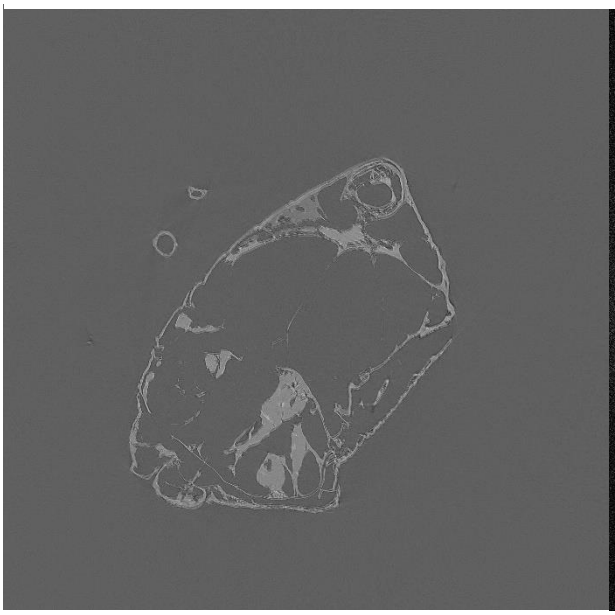


Abbildung 47: Originalkäferbild rekonstruiert

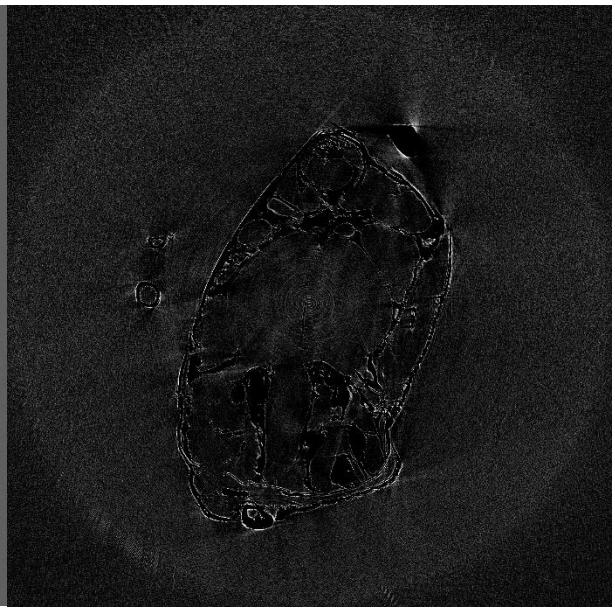


Abbildung 46: Käferbild nach der Anwendung des Paganinfilters und der Rekonstruktion

Beim Vergleich zwischen den oberen zwei Bildern erkennt man, dass der Paganinfilter ein negativ ähnliches Bild erzeugt. Die Kanten sind auf dem linken Bild jetzt weiss mit einem dunklen Hintergrund. Bei den Rekonstruktionen sieht man, dass die Rekonstruktion aus den Paganin-projektionen ein von Auge erkennbares, grösseres Rauschen besitzt. Die Kanten des Käfers werden auf der rechten Rekonstruktion durch ein weisses Leuchten hervorgehoben. Ausserdem handelt es sich bei der rechten Rekonstruktion um eine phase map. Das bedeutet, dass die Intensität des Voxels mit dem Material und der Dichte korreliert (Weitkamp, 2011, S. 2).

Da der Versuch, ein Phasenkontrast Bild der Bandscheibe zu erhalten gescheitert ist, wird an dieser Stelle die Arbeit mit dem Paganinfilter eingestellt. Falls der Filter richtig angewandt wird, sollte jedoch eine Segmentation des Volumens möglich sein. Dies wird in dieser Arbeit jedoch nicht mehr durchgeführt.

3.5.2 Validation des Paganinfilters

Diese Bilder sind beim Versuch entstanden, einen ähnlichen Effekt wie der des Pagninfilters zu erhalten. Links ist das Originalbild des Käfers. Rechts ist das mit Fiji bearbeitete Bild.

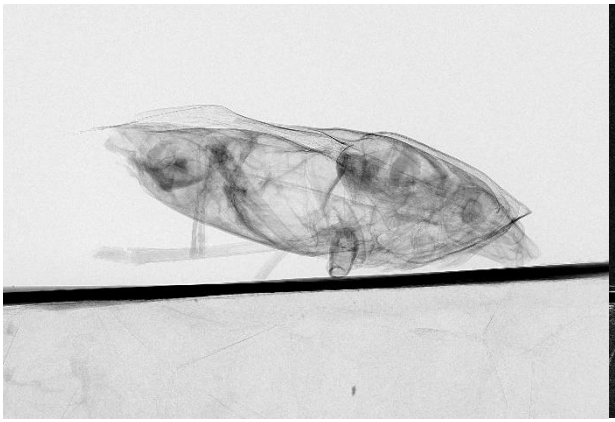


Abbildung 51: Originalbild des Käfers

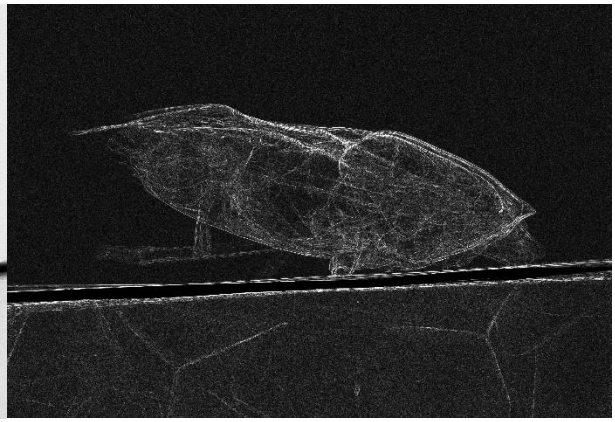


Abbildung 50: Käferbild nach der Bearbeitung mit Fiji: Enhance Contrast 3% + Find Edges + automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur

Vergleicht man das mit Fiji bearbeitete Bild mit dem Paganinbild aus Kapitel 3.5.1, ist ersichtlich, dass die Kanten stärker und schärfer sind. Weiter sind im unteren Bereich des Bildes neue Strukturen erkennbar. Durch den Enhance Contrast Prozess ist das Rauschen im bearbeiteten Bild deutlich höher.



Abbildung 52: Rekonstruiertes Käferbild mit den mit Fiji bearbeiteten Projektionen (in Abbildung 50 zu sehen)

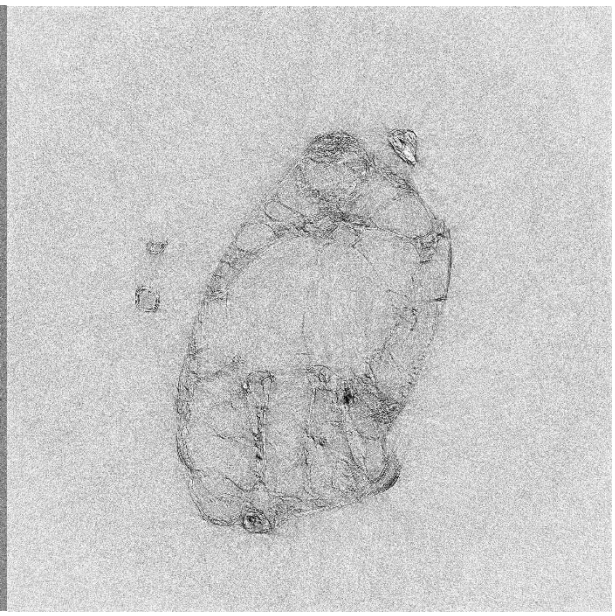


Abbildung 53: Rekonstruiertes Käferbild aus Abbildung 52 nach der Bearbeitung mit Fiji: Substract Background

Das linke Bild zeigt die Rekonstruktion bevor der Substract Background Prozess angewandt wurde, und das rechte Bild zeigt das Resultat dieses Prozesses. Im Linken ist ein starkes Rauschen erkennbar. Dieses Rauschen ist bei den Rekonstruktionen aus Kapitel 3.5.1 noch nicht sichtbar. Somit leitet sich ab, dass das Rauschen aus der Bearbeitung mit Fiji hinzugefügt oder verstärkt wurde. Weiter ist zu erkennen, dass die Rekonstruktionen keinen schwarzen Hintergrund mit weissen Kanten mehr haben. Es wird angenommen, dass das starke Rauschen zu einem grauen Hintergrund geführt hat. Die Kanten des Käfers sind schlechter erkennbar als diejenigen in den Rekonstruktionen aus Kapitel 3.5.1. Das liegt daran, dass die weissen Kanten nicht mehr vom grauen Hintergrund unterschieden werden können. Somit schafft es die mit Fiji bearbeitete Version nicht, die Kanten so zu verstärken, wie es der

Paganinfilter geschafft hat. Des Weiteren lässt sich sagen, dass obwohl die mit Fiji bearbeitete Projektion der Paganinprojektion ähnlich ist, sie ein wesentlich anderes Resultat liefert. Insbesondere erzeugt der Paganinfilter eine phase map was mit Fiji nicht möglich ist. Somit wird der Versuch, den Paganinfilter mit Fiji nachzuahmen, als gescheitert betrachtet. Das bedeutet, dass die Validation des Paganinfilters erfolgreich ist.

4 Diskussion

Belastungseinheit

Nach der Konstruktion der Belastungseinheit konnte sie nicht mit der Bandscheibe getestet werden. Das liegt daran, dass zu grosse Bandscheiben aus dem Kuhschwanz herausgeschnitten worden sind. Der Durchmesser der kleinsten verfügbaren Bandscheibe lag bei 30 mm, weshalb sie nicht in die Belastungseinheit passte.

Weiter wurde diese Arbeit während der Coronapandemie durchgeführt. Dadurch entstand Mehraufwand, was zu einer Verspätung im Terminplan führte. Deshalb konnte der Druck, der von der Belastungseinheit erzeugt werden kann, nicht mehr gemessen werden. Da beim Zugversuch der Gewindestangen Kräfte ab 1100 N gemessen worden sind, darf hier angenommen werden, dass die M12 Schraube mindestens 1100 N auf das Mittelstück geben kann. Dies weil der Zugversuch mit M5 Kunststoffschrauben und GFK Gewinden durchgeführt worden ist. Somit muss die Kombination aus Metallgewinde, Metallmutter und einer Gewindegrösse von M12 höhere Kräfte aushalten, respektiv erzeugen. An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob die Torsionskräfte, die beim Anziehen der M12 Schraube entstehen, die Gewindestangen zerstören. Um dies zu testen müsste eine Bandscheibe mitverwendet werden und der gewünschte Druck von 1.2 MPa erzeugt werden.

Absorbtionsbasierte Bilder

Alle durchgeführten Messungen scheiterten daran, die innere Strukturen der Bandscheibe abzubilden. Es ist jedoch sichtbar, dass bei höheren Spannungen ab 60 kV die Ringartefakte zunehmen. Der Übergang ist von Auge am besten bei 40 kV zu erkennen. Weiter führte die mit Aluminium umwickelte Bandscheibe zu starken Metallartefakten.

Phasenkontrast Bilder

Diese Messungen scheiterten daran, einen Phasenkontrast an den Kollagenfasern zu erzeugen. Hier stellt sich die Frage, ob das starke Rauschen den Phasenkontrast überdeckt. Die 200 kV Messung mit Aluminiumfilter ist die einzige Messung dieser Arbeit, die es geschafft hat, einen Kontrastunterschied zwischen dem Kern und dem Ring der Bandscheiben aufzeigen zu können. Da die Berechnungen zum Phasenkontrast unbekannte Konstanten enthalten, ist es möglich, dass diese fehlerhaft oder ungenau sind. Weiter zeigten diese Berechnungen, dass es möglich ist, mit der Verwendung eines Detektors mit kleineren Pixels als 139 µm, einen höheren Phasenkontrast zu erzeugen. Somit könnte dieser Ansatz mit einem anderen Detektor weitergeführt werden.

Paganinfilter

Diese Arbeit validierte den Paganinfilter indem versucht wurde, den Filter mit Fiji nachzubilden. Diese Methode ist aus Zeitgründen gewählt worden. Möchte man den Paganinfilter in Zukunft mit den gleichen Parametern nochmals verwenden, sollte dieser anhand einer Volumensegmentation und eines analytischen Verfahrens validiert werden. Durch den Paganinfilter sind die Kanten des Käfers durch ein helles Leuchten verstärkt worden. Da die Phasenkontrast Messungen keine Bilder lieferten, in welchen der Phasenkontrast an den Kollagenfasern sichtbar ist, konnte der Filter nicht auf die Bandscheibenbilder angewandt werden.

Kontrastmittel Bilder

Die Bilder dieser Messung sind nicht vorhanden. Durch einen Wasserschaden am Server konnten die Bilder nicht ausgewertet werden und auch keine neuen Messungen durchgeführt werden. Beim Aufsetzen dieser Messung zeigte sich jedoch, dass Niemien (2015) einen Detektor mit einer Kapazität von 180 NF verwendet. Dies erlaubt ihm, Bilder mit wenig Rauschen zu erstellen, was die Annahme, dass das Rauschen die Kollagenfasern überdeckt, stützen würde. Der in dieser Arbeit verwendete Detektor hat eine Kapazität von 4 pF. Falls die Bilder nach der Reparatur des Servers die Kollagenfasern nicht aufzeigen, kann der Kontrastmittel Ansatz mit einem Detektor weitergeführt werden, der eine höhere Kapazität besitzt.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lagerung der Bandscheibe in einem Rohr 2
Abbildung 2:Lagerung der Bandscheibe in einem Latexhandschuh-Finger 2
Abbildung 3: Belastungseinheit in der statischen Belastungssimulation 3
Abbildung 4: Befestigung der Gewindestange für den Zugversuch..... 4
Abbildung 5: Nachahmung der Belastungseinheit 4
Abbildung 6: CT-Bild eines Käfers, Bearbeitet mit Fiji: Automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur so dass Phasenkontrasteffekte sichtbar sind..... 9
Abbildung 7: CT-Bild eines Käfers, Bearbeitet mit Fiji: Kontrast- und Helligkeitskorrektur 9
Abbildung 8: Phasenkontrast geplottet als Intensität der Graustufe in Abhängigkeit der Distanz in Pixel..... 10
Abbildung 9:Bodenstück der Belastungseinheit 12
Abbildung 10:Mittelstück der Belastungseinheit 12
Abbildung 11:Dachstück der Belastungseinheit 13
Abbildung 12: Innensechskant M12 Schraube mit abgerundetem Endstück 13
Abbildung 13: GFK M5 Gewindestange..... 13
Abbildung 14: Realisierte Belastungseinheit 14
Abbildung 15:Aufbewarung der Bandscheibe in einem Latexhandschuh-Finger..... 14
Abbildung 16: Auftreten des Mindestfaktor zwischen Gewindestange und Mittelstück 15
Abbildung 17: Auftreten des maximalen Druckes zwischen Gewindestange und Mittelstück..... 15
Abbildung 18: Messprotokoll des Zugversuches 16
Abbildung 19: Versagen der Gewindestange bei einfacher Metallmutter..... 17
Abbildung 20: Versagen der Gewindestange und der Kunststoffmutter..... 17
Abbildung 21: Versagen der Gewindestange bei einer doppelten Metallmutter..... 18
Abbildung 22: Versagen der Gewindestange und der beider Kunststoffmuttern..... 18
Abbildung 23: Initiale Messung, Bandscheibe bei 60 kV mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 19
Abbildung 24: Initiale Messung, Bandscheibe bei 60 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 19
Abbildung 25: Messung ohne umgebendes Wasser, Bandscheibe bei 60 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 20
Abbildung 26: Erste Messung mit über 1000 Projektionen, Bandscheibe bei 40 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 21
Abbildung 27: Parameterstudie, Bandscheibe bei 40 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 22
Abbildung 28: Parameterstudie, Bandscheibe bei 40 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 22
Abbildung 29: Parameterstudie, Bandscheibe bei 60 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 23
Abbildung 30: Parameterstudie, Bandscheibe bei 60 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 23
Abbildung 31: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 24
Abbildung 32: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 24

Abbildung 33: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV mit sichtbarem Knochen, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 25
Abbildung 34: Parameterstudie, Bandscheibe bei 80 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 25
Abbildung 35: Messung mit 40 kV und Aluminiumfolie, Bandscheibe bei 40 kV, 1/4 der Bandscheibe sichtbar, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 26
Abbildung 36: Bandscheibe bei 200 kV mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 27
Abbildung 37: Bandscheibe bei 200 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 27
Abbildung 38: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter und sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) 28
Abbildung 39: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) + Anisotropic Diffusion 2D.. 28
Abbildung 40: Bandscheibe bei 200 kV mit Aluminium Filter und sichtbarem Knochenansatz, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE) + Anisotropic Diffusion 2D..... 28
Abbildung 41: Phasenkontrast optimierte Messung, Bandscheibe bei 80 Kv mit sichtbarem Knochen, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 30
Abbildung 42: Phasenkontrast optimierte Messung, Bandscheibe bei 80 kV, bearbeitet mit Fiji: automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur + Enhance Local Contrast (CLAE)..... 30
Abbildung 43: Sichtbare Phasenkontrasteffekte an den Gewindestangen und an der Latexschicht 30
Abbildung 44: Geplotteter Phasenkontrasteffekt an der Latexschicht 31
Abbildung 45: Geplotteter Phasenkontrasteffekt an der Gewindestange..... 31
Abbildung 46: Käferbild nach der Anwendung des Paganinfilters und der Rekonstruktion 32
Abbildung 47: Originalkäferbild rekonstruiert..... 32
Abbildung 48: Käferbild nach Anwendung des Paganinfilters..... 32
Abbildung 49: Originalbild des Käfers 32
Abbildung 50: Käferbild nach der Bearbeitung mit Fiji: Enhance Contrast 3% + Find Edges + automatische Kontrast- und Helligkeitskorrektur..... 33
Abbildung 51: Originalbild des Käfers 33
Abbildung 52: Rekonstruiertes Käferbild mit den mit Fiji bearbeiteten Projektionen (in Abbildung 50 zu sehen)..... 33
Abbildung 53: Rekonstruiertes Käferbild aus Abbildung 52 nach der Bearbeitung mit Fiji: Substract Background 33

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messparameter der Parameterstudie..... 6

7 Literaturverzeichnis

Adams, M. A., & Roughley, P. J. (2006). What is Intervertebral Disc Degeneration, and What Causes It?: *Spine*, *31*(18), 2151–2161. Aufgerufen von https://doi.org/10.1097/01.brs.0000231761.73859.2c (15.06.2020)

Gureyev, T. E., Nesterets, Y. I., Stevenson, A. W., Miller, P. R., Pogany, A., & Wilkins, S. W. (2008). Some simple rules for contrast, signal-to-noise and resolution in in-line x-ray phase-contrast imaging. *Optics Express*, *16*(5), 3223–3241. Aufgerufen von https://doi.org/10.1364/OE.16.003223 (15.06.2020)

Nieminen, H. J., Ylitalo, T., Karhula, S., Suuronen, J.-P., Kauppinen, S., Serimaa, R., Hæggström, E., Pritzker, K. P. H., Valkealahti, M., Lehenkari, P., Finnilä, M., & Saarakkala, S. (2015). Determining collagen distribution in articular cartilage using contrast-enhanced micro-computed tomography. *Osteoarthritis and Cartilage*, *23*(9), 1613–1621. Aufgerufen von https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.05.004 (15.06.2020)

Périé, D., Korda, D., & Iatridis, J. C. (2005). Confined compression experiments on bovine nucleus pulposus and annulus fibrosus: Sensitivity of the experiment in the determination of compressive modulus and hydraulic permeability. *Journal of Biomechanics*, *38*(11), 2164–2171. Aufgerufen von https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.10.002 (15.06.2020)

Schmidt, H., Kettler, A., Heuer, F., Simon, U., Claes, L., & Wilke, H.-J. (o. J.). *Intradiscal Pressure, Shear Strain, and Fiber Strain in the Intervertebral Disc Under Combined Loading*. 8. Aufgerufen von https://journals.lww.com/spinejournal/Abstract/2007/04010/Intradiscal_Pressure,_Shear_Strain,_and_Fiber.8.aspx (15.06.2020)

Ushiki, T. (1992). The three-dimensional ultrastructure of the collagen fibers, reticular fibers and elastic fibers: A review. *Kaibogaku Zasshi. Journal of Anatomy*, *67*(3), 186–199. Aufgerufen von https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1523957/ (15.06.2020)

Weitkamp, T., Haas, D., Wegrzynek, D., & Rack, A. (2011). *ANKAphase*: Software for single-distance phase retrieval from inline X-ray phase-contrast radiographs. *Journal of Synchrotron Radiation*, *18*(4), 617–629. Aufgerufen von https://doi.org/10.1107/S0909049511002895 (15.06.2020)

8 Anhang

I. Messprotokoll: Initiale Messsung

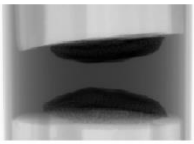
diondo
X-ray systems and services

20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_5nu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

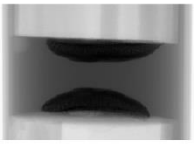
Xray parameter:

Voltage [kV]:	60.000
Current [µA]:	283.000
Power [W]:	16.980
Focus:	High Power
Filter:	Al 1,00mm



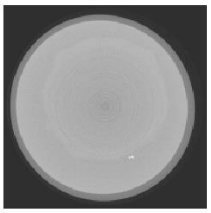
Detector parameter:

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	2004
Rows [mm]:	278.556
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	3000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	360
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:18:45



20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_5nu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.032
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	1446
Median:	Off
Volume Size X:	31.520
Volume Size Y:	31.520
Volume Size Z:	15.152
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	65.000
FDD [mm]:	860.000
Height [mm]:	378.599
Magnification:	13.231

II. Messprotokoll: Messung ohne umgebendes Wasser

diondo
X-ray systems and services

20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_10nu_direkt
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	60.000
Current [µA]:	283.000
Power [W]:	16.980
Focus:	High Power
Filter:	Al 1,00mm



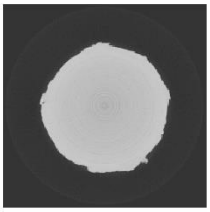
Detector parameter:

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	2004
Rows [mm]:	278.556
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	3000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1.4pF
Pitch [mm]:	0.139

Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	360
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:18:45





20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_10nu_direkt
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-0.729
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	1446
Median:	Off
Volume Size X:	31.520
Volume Size Y:	31.520
Volume Size Z:	15.152
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	65.000
FDD [mm]:	860.000
Height [mm]:	337.500
Magnification:	13.231

III. Messprotokoll: Erste Messung mit mehr als 1000 Projektionen

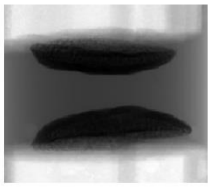
diondo
x-ray systems and services

20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_10nu_in_der_Kanuele
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-14-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	40.000
Current [µA]:	13.000
Power [W]:	0.520
Focus:	High Power
Filter:	

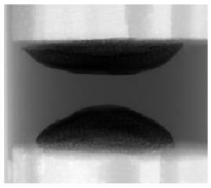


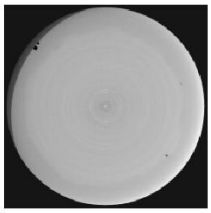
Detector parameter:

Columns [px]:	1248
Columns [mm]:	346.944
Rows [px]:	1098
Rows [mm]:	305.244
Pixelbinning:	2:2
Integration time [ms]:	7000
Framebinning:	2
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.278

Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	04:42:35





20200224

Measurement name:	20200224-Bandscheibe_10nu_in_der_Kanuele
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-14-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.160
Voxel size X [mm]:	0.020
Voxel size Y [mm]:	0.020
Voxel size Z [mm]:	0.020
Dimension X [px]:	1248
Dimension Y [px]:	1248
Dimension Z [px]:	832
Median:	Off
Volume Size X:	25.034
Volume Size Y:	25.034
Volume Size Z:	16.689
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	3
Beam Hardening:	2
Truncation Correction:	10

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	62.000
FDD [mm]:	860.000
Height [mm]:	378.000
Magnification:	13.871

IV. Messprotokoll: Parameterstudie 40 kV

diondo
x-ray systems and services

20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS40kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	40.000
Current [µA]:	166.000
Power [W]:	6.640
Focus:	Microfocus
Filter:	Cu 0,75mm



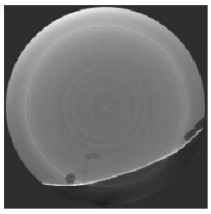
Detector parameter:

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	138.444
Rows [px]:	600
Rows [mm]:	83.400
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	9000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1.4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	02:31:45



20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS40kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.200
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	522
Median:	Off
Volume Size X:	9.753
Volume Size Y:	9.753
Volume Size Z:	5.132
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	3
Truncation Correction:	10

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	59.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	373.999
Magnification:	14.184

V. Messprotokoll: Parameterstudie 60 kV

diondo
X-ray systems and services

20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS60kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

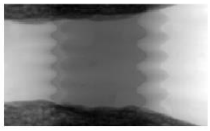
Xray parameter:

Voltage [kV]:	60.000
Current [µA]:	166.000
Power [W]:	9.960
Focus:	Microfocus
Filter:	Cu 0,75mm



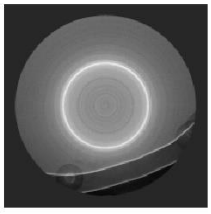
Detector parameter:

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	138.444
Rows [px]:	600
Rows [mm]:	83.400
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	7000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	01:58:05



20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS60kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.200
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	522
Median:	Off
Volume Size X:	9.753
Volume Size Y:	9.753
Volume Size Z:	5.132
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	59.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	373.999
Magnification:	14.184

VI. Messprotokoll: Parameterstudie 80 kV

diondo
X-ray systems and services

20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS80kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

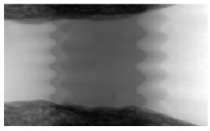
Xray parameter:

Voltage [kV]:	80.000
Current [µA]:	125.000
Power [W]:	10.000
Focus:	Microfocus
Filter:	Cu 0,75mm



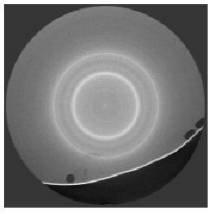
Detector parameter:

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	138.444
Rows [px]:	600
Rows [mm]:	83.400
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	7000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	01:58:05



20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS80kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.200
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	522
Median:	Off
Volume Size X:	9.753
Volume Size Y:	9.753
Volume Size Z:	5.132
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	59.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	373.999
Magnification:	14.184

VII. Messprotokoll: Parameterstudie 100 kV

diondo
X-ray systems and services

20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS100kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

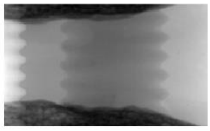
Xray parameter:

Voltage [kV]:	100.000
Current [µA]:	100.000
Power [W]:	10.000
Focus:	Microfocus
Filter:	Cu 0,75mm



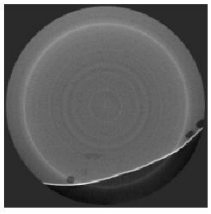
Detector parameter:

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	138.444
Rows [px]:	600
Rows [mm]:	83.400
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	6000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	Off
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	Continous Mode:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	01:41:15



20200326

Measurement name:	20200326-Prototype_PS100kV_10W
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.200
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	522
Median:	Off
Volume Size X:	9.753
Volume Size Y:	9.753
Volume Size Z:	5.132
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	59.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	373.999
Magnification:	14.184

VIII. Messprotokoll: 40 kV und Aluminiumfolie

diondo
X-ray systems and services

20200327_2

Measurement name:	20200327_2-Prototype_mitAlu2
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	40.000
Current [µA]:	375.000
Power [W]:	15.000
Focus:	High Power
Filter:	Cu 0,75mm



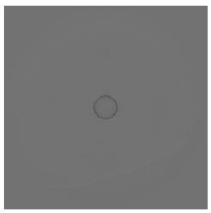
Detector parameter:

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	138.444
Rows [px]:	504
Rows [mm]:	70.056
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	3000
Framebinning:	5
Capacity [pF]:	1x1 1pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	05:02:45



20200327_2

Measurement name:	20200327_2-Prototype_mitAlu2
Division:	Software-Entwicklung
Date:	March-27-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.30
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-1.200
Voxel size X [mm]:	0.010
Voxel size Y [mm]:	0.010
Voxel size Z [mm]:	0.010
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	438
Median:	Off
Volume Size X:	9.764
Volume Size Y:	9.764
Volume Size Z:	4.311
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	59.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	373.999
Magnification:	14.184

IX. Messprotokoll: 200 kV

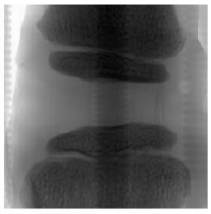
diondo
X-ray systems and services

200415_BandscheibeHighPower

Measurement name:	200415_BandscheibeHighPower-Bandscheibe200kV_Alu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-16-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.34
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	200.000
Current [µA]:	50.000
Power [W]:	10.000
Focus:	Microfocus
Filter:	

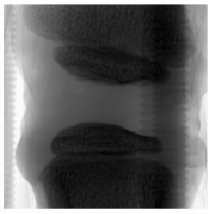


Detector parameter:

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	3000
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	4000
Frameblinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139

Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	3000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	03:20:55



200415_BandscheibeHighPower

Measurement name:	200415_BandscheibeHighPower-Bandscheibe200kV_Alu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-16-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.34
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.008
Voxel size Y [mm]:	0.008
Voxel size Z [mm]:	0.008
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	2344
Median:	Off
Volume Size X:	22.647
Volume Size Y:	22.647
Volume Size Z:	17.648
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	60

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	63.000
FDD [mm]:	1160.000
Height [mm]:	373.600
Magnification:	18.413

X. Messprotokoll: 200 kV Messung mit Aluminium-Filter

diondo
X-ray systems and services

200423_BandscheibeHighPowerMitFilter

Measurement name:	200423_BandscheibeHighPowerMitFilter-Bandscheibe200kV_Alu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-24-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.34
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

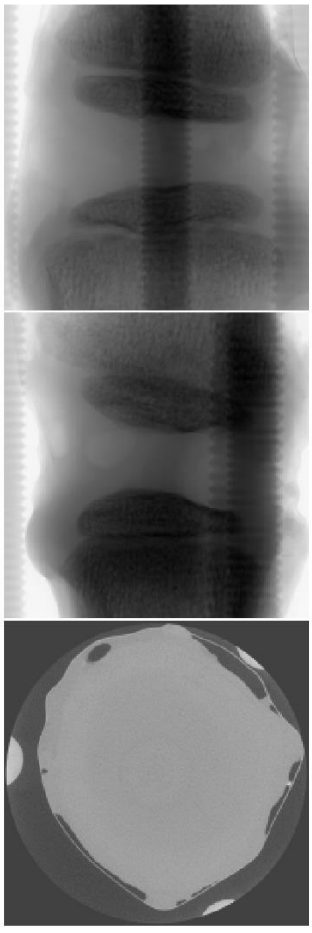
Voltage [kV]:	200.000
Current [µA]:	100.000
Power [W]:	20.000
Focus:	High Power
Filter:	

Detector parameter:

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	3000
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	5000
Frameblinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139

Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	3000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	04:11:05



200423_BandscheibeHighPowerMitFilter

Measurement name:	200423_BandscheibeHighPowerMitFilter-Bandscheibe200kV_Alu
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-24-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.34
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	0.332
Voxel size X [mm]:	0.008
Voxel size Y [mm]:	0.008
Voxel size Z [mm]:	0.008
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	2344
Median:	Off
Volume Size X:	22.647
Volume Size Y:	22.647
Volume Size Z:	17.648
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	60

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	63.000
FDD [mm]:	1160.000
Height [mm]:	373.600
Magnification:	18.413

XI. Messprotokoll: Phasenkontrast-optimierte Messung

diondo
X-ray systems and services

200522_BandSchUnbehandelt

Measurement name:	200522_BandSchUnbehandelt-BS_Unbehandelt
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-22-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Xray parameter:

Voltage [kV]:	80.000
Current [µA]:	188.000
Power [W]:	15.040
Focus:	High Power
Filter:	



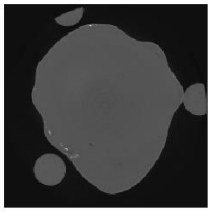
Detector parameter:

Columns [px]:	2004
Columns [mm]:	278.556
Rows [px]:	3000
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	3000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139

Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	2200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	01:50:30





200522_BandSchUnbehandelt

Measurement name:	200522_BandSchUnbehandelt-BS_Unbehandelt
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-22-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	0.139
Voxel size X [mm]:	0.014
Voxel size Y [mm]:	0.014
Voxel size Z [mm]:	0.014
Dimension X [px]:	2000
Dimension Y [px]:	2000
Dimension Z [px]:	2502
Median:	Off
Volume Size X:	27.865
Volume Size Y:	27.865
Volume Size Z:	34.859
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	2
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	60

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	116.000
FDD [mm]:	1160.000
Height [mm]:	373.600
Magnification:	10.000

XII. Messprotokoll: Käfer

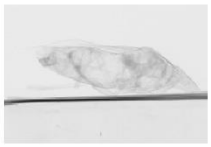
diondo
X-ray systems and services

20200120

Measurement name:	20200120-Kaefer
Division:	Software-Entwicklung
Date:	January-21-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.19
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

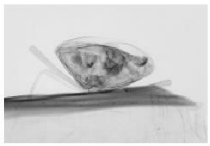
Xray parameter:

Voltage [kV]:	110.000
Current [µA]:	90.000
Power [W]:	9.900
Focus:	Microfocus
Filter:	Al 1,00mm



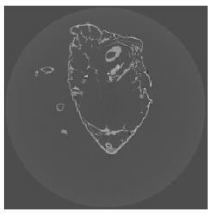
Detector parameter:

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	2052
Rows [mm]:	285.228
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1800
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	3000
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	01:30:33



20200120

Measurement name:	20200120-Kaefer
Division:	Software-Entwicklung
Date:	January-21-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.19
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	
Inspection Task:	
Notes:	Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

Recon parameter:

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-0.192
Voxel size X [mm]:	0.005
Voxel size Y [mm]:	0.005
Voxel size Z [mm]:	0.005
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	1604
Median:	Off
Volume Size X:	16.115
Volume Size Y:	16.115
Volume Size Z:	8.593
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Truncation Correction:	100

Manipulator parameter:

FOD [mm]:	45.000
FDD [mm]:	1165.000
Height [mm]:	414.000
Magnification:	25.889

XIII. Code für die Berechnung des Phasenkontrastes

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed May  6 09:04:41 2020

@author: Philipp Schütz
"""

#%%
# Import statements
import numpy as np
import matplotlib.pylab as plt

# System parameters
SOD=0.02 # m
for SOD in [0.02,0.064,0.08,0.116,0.4,1]:
    SDD=1.16 # m
    FocalSpotSize=2e-6 # m FWHM  Source point spread
    DetectorSize=139e-6 # m FWHM Detector point spread

    peakXrayEnergy=26# keV

    # Calculations
    R1=SOD
    R2=SDD-SOD
    rPrime=np.sqrt((R1+R2)/R1/R2)


    c=299792458
    h=6.626e-34

    EnergyXray=peakXrayEnergy*1.6e-19*1000
    print(EnergyXray)

    lambdaXray=c/(EnergyXray/h)
    print(lambdaXray)

    sigmaSource=FocalSpotSize/2.3546

    coherenceLength=lambdaXray*R1/2/np.pi/sigmaSource

    #https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/07E4821E-79BD-45E1-AFAB5F9BCC9690DD_154632/oe-16-5-3223.pdf?da=1&id=154632&seq=0&mobile=no
    WaveNumber=2*np.pi/lambdaXray

    # resolutions
    sigmaDetector=DetectorSize/2.3546
    Magnification=SDD/SOD
    sigmaSystem=np.sqrt((Magnification-1)**2/Magnification**2*sigmaSource**2+sigmaDetector**2/Magnification**2)

    sigmaObject=8e-6 # in m Smallest feature in Objekt

    sigmaM=np.sqrt(sigmaSystem**2+sigmaObject**2)

    bigrPrime=R2/Magnification

    KPI1=sigmaM*sigmaObject/bigrPrime/lambdaXray

    #Fresnel Number
    NF=sigmaM**2*WaveNumber/bigrPrime/1.353 # 1.353 magic scaling factor (no idea where this comes from)

    print("CHECK NF/27.8 ",NF/18.2)

    def integrateF(t,NF):
        return np.exp(-t**2/2)*np.sin(0.5*np.arctan(1/NF)-t**2/2/NF)

    import scipy.integrate as integrate

    def f(x,NF):
        return integrate.quad(lambda x: integrateF(x,NF),0,x)[0]

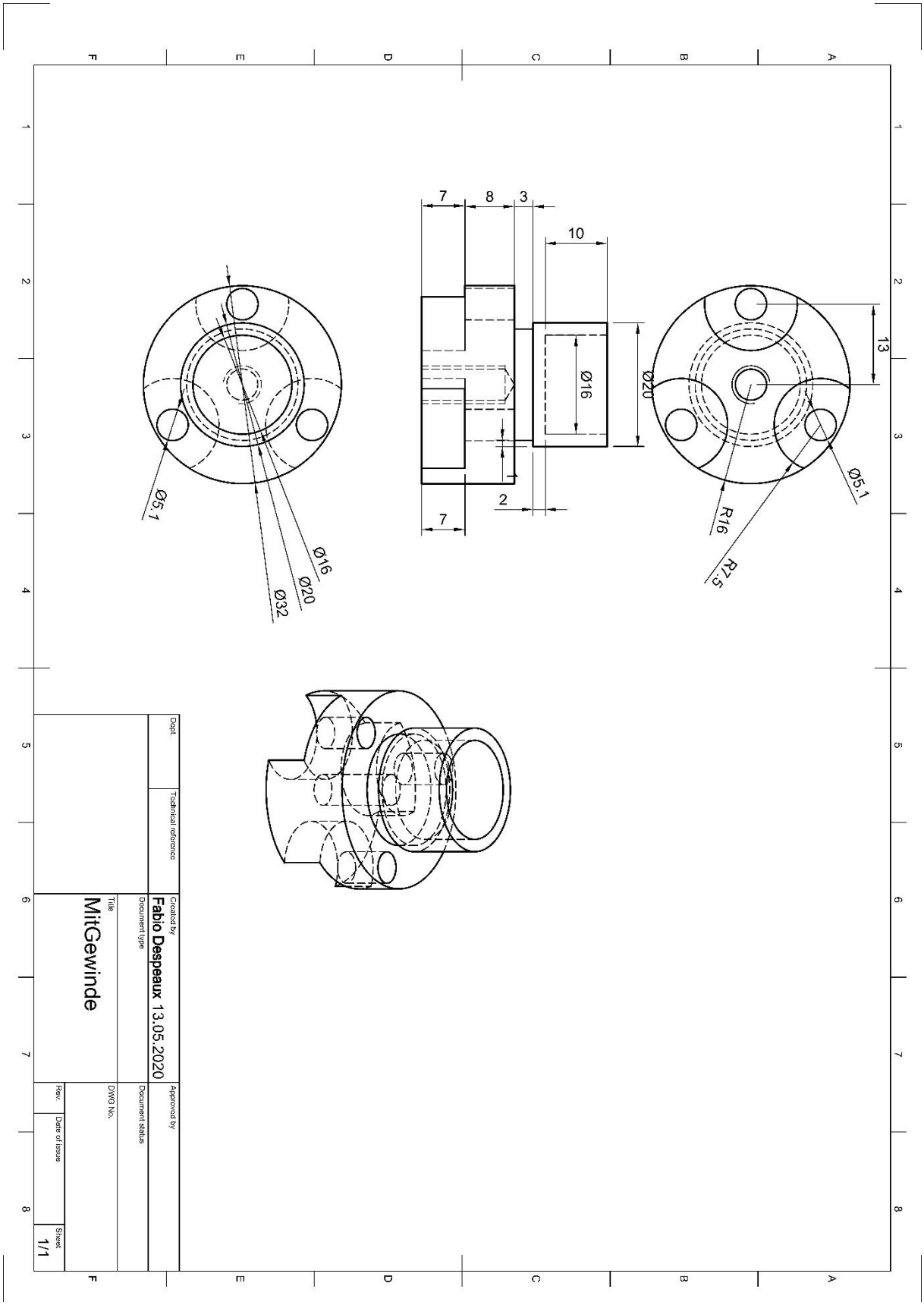

    # Max concentration
    phiMax=np.pi*4/3
    CMax=np.sqrt(2/np.pi)*(1+NF**(-2.0))**(0.25)*f(np.sqrt(NF*np.arctan(1.0/NF)),NF)*phiMax
    CTIE=(2*np.pi*np.exp(1))**(-0.5)/NF*phiMax
    print("M=",Magnification,"\tKPI1=",KPI1,"\tNF=",NF," R'=",bigrPrime*1000," C[%]=",CMax*100," CTIE[%]=",CTIE*100)
```

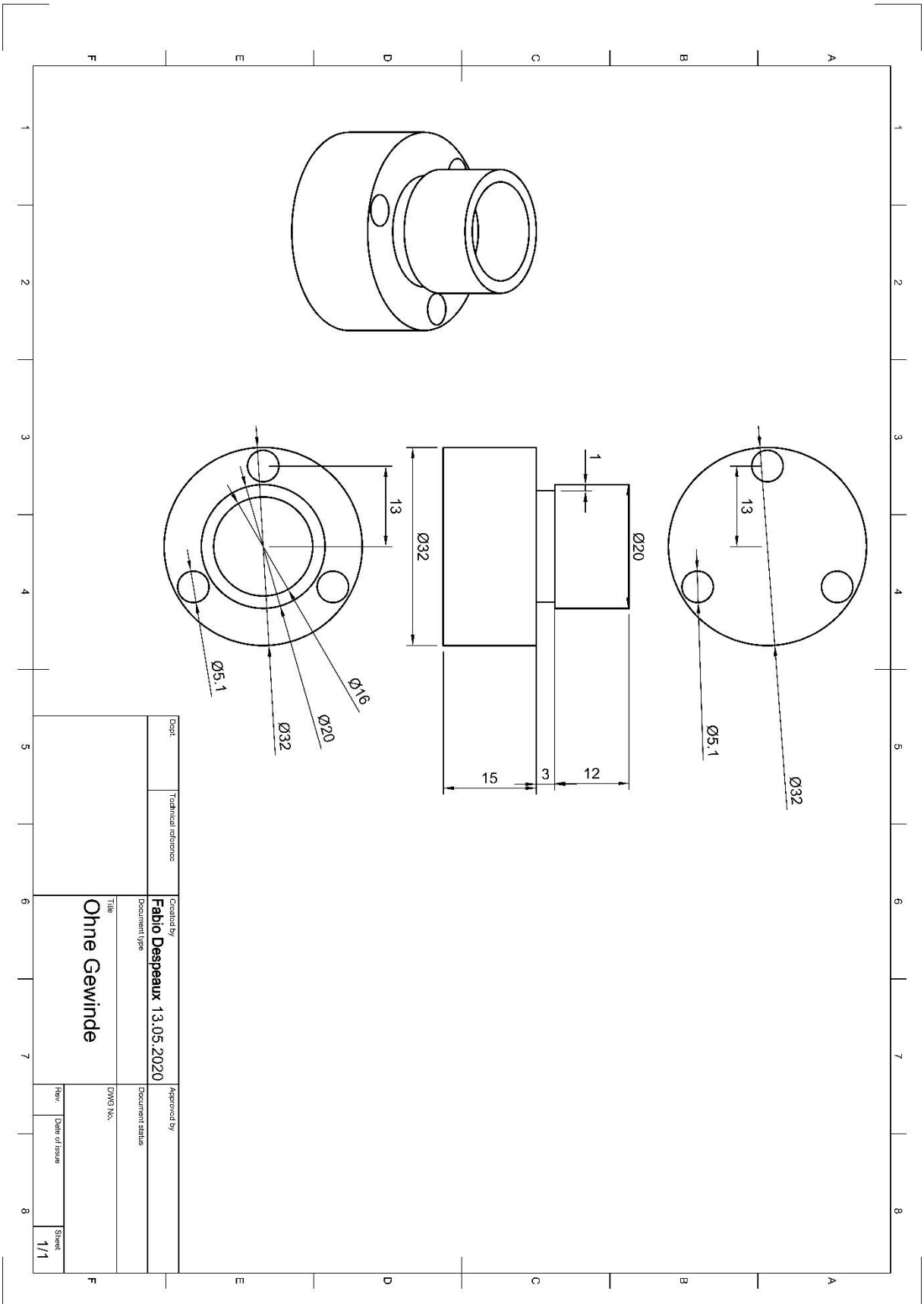
XIV. Tabelle der Brennfleckgrössen

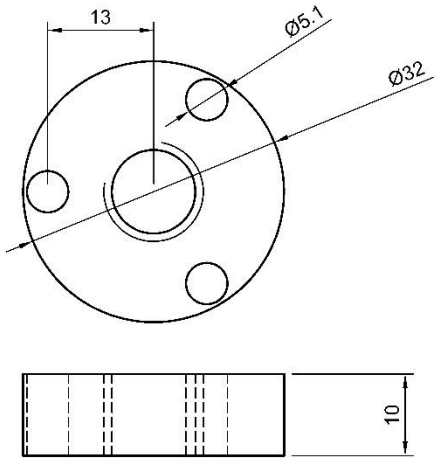
JIMA resolution

*High Resolution Diamond target**			Voltage [kV]					
			60	100	150	190	225	240
Mode / Target power [W]	Nano-focus	0.5	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
		1.0	1.0	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
		1.5	1.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	Microfocus	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		5.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		7.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		10.0	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	High Power	10.0	7.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0
		17.5	10.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0
		25.0	15.0	10.0	7.0	7.0	7.0	7.0
		50.0	35.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0

XV. Konstruktionspläne der Belastungseinheit




13
Ø32
1
Ø20
15
3
12
Ø5.1
Ø16
Ø20
Ø32
13
Ø5.1
Ø32
Dept.
Tool/Inhcal reference
Created by
Fabio Despeaux 13.05.2020
Document type
Title
Ohne Gewinde
Approved by
Document status
DWG No.
Rev.
Date of issue
Sheet
1/1



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Fabio Despeaux 13.05.2020	
		Document type	Document status
		Title: Pressstück	DWG No.
			Rev. / Date of issue / Sheet: 1/1