

## **Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur**

<b>Titel</b>	<b>Prototyp für einen 3D Kopierer</b>
<b>Diplomandin/Diplomand</b>	<b>Stadelmann David</b>
<b>Bachelor-Studiengang</b>	<b>Bachelor Medizintechnik</b>
<b>Semester</b>	<b>FS20</b>
<b>Dozentin/Dozent</b>	<b>Prof. Dr. Schütz, Philipp</b>
<b>Expertin/Experte</b>	<b>Dr, Jerjen, Iwan</b>

Ort, Datum     Horw, 08.06.2020

© **David Stadelmann, 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.

## Abstract Deutsch

Die industrielle Computertomographie ist ein integraler Bestandteil moderner Bauteilentwicklung und Qualitätssicherung, da sie eine exakte, zerstörungsfreie Inspektion eines Objektes in kurzer Zeit ermöglicht, indem sie eine digitale Rekonstruktion des Ist-Zustandes generiert. Eine Computertomographie-Messung kann auch dazu verwendet werden, die Vorlagedaten für eine additive Fertigung einer Kopie eines Objektes zu liefern und bestehende Produkte oder Objekte zu kopieren. Diese Bachelorarbeit, am Institut für Medizintechnik an der Hochschule Luzern, hat das Ziel, mit einem Computertomographen, einer Segmentierungssoftware und einem additiven Fertigungswerkzeug, ein Prototyp eines 3D Kopierers zu entwickeln. Diese Methode verspricht bei der Reproduktion von Bauteilen, deren Konstruktionspläne nicht mehr vorhanden sind, eine grosse Zeiteinsparung bei gleichbleibender Qualität. Um die Genauigkeit der Datensätze, die vom Computertomographen unter verschiedenen Parametern generiert werden, zu überprüfen, wird ein vermessener Aluminiumzylinder zu Hilfe genommen. Des Weiteren werden ein Objekt, das nur aus einem Material besteht, ein Objekt mit zwei verschiedenen Kunststoffkomponenten und ein Objekt mit einem Stahlkomponenten gescannt. Anschliessend werden diese mit der Software Volume Graphics Studio Max 3.3.4 segmentiert und nachträglich auch mit einem 3D Drucker gedruckt. Die 3D Drucke werden wiederum gescannt und mit den Originaldatensätzen auf ihre Genauigkeit verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die verschiedenen Röntgen- und Detektorparameter einen Einfluss auf die Genauigkeit der Scans haben. Allerdings weichen die Werte nur um wenige zehntel Millimeter voneinander ab. An den Objekten können qualitativ hochstehende Computertomographie-Scans durchgeführt werden, die eine Voxelgrösse von 0.041 Millimeter besitzen und einen maximalen Zeitaufwand von 36 Minuten benötigen. Die Ergebnisse der Soll-Ist-Vergleiche zwischen dem gescannten Originalobjekt und der gescannten 3D Kopie zeigen, dass sich der grösste Teil der Abweichungen zum Original im Bereich von  $-200\ \mu\text{m}$  bis  $+200\ \mu\text{m}$  bewegt. Die Standardabweichung der Abweichungen bewegt sich je nach Grösse und Komplexität des Objekts zwischen 58 und 81 Mikrometer. Im Allgemeinen ist zu sagen, dass der Prozess des 3D Kopierers mit Hilfe eines Computertomographen einwandfrei funktioniert. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Geräten bereiten keine Probleme. Die grössten Massabweichungen entstehen durch die angewendeten 3D Drucker, da sie mit der Genauigkeit der Scans nicht mithalten können.

## Abstract English

Industrial computed tomography is an integral part of modern component development and quality assurance, as it enables an exact, non-destructive inspection of an object in a short time by generating a digital reconstruction of the actual state. A computed tomography measurement can also be used to provide the template data for additive manufacturing of a copy of an object and to copy existing products or objects. This bachelor thesis, at the Institute for Medical Technology at the Lucerne University of Applied Sciences and Arts, aims to develop a prototype of a 3D copier using a computer tomograph, a segmentation software and an additive manufacturing tool. This method promises to save a great deal of time while maintaining the same quality when reproducing components whose construction plans are no longer available. A measured aluminium cylinder is used to check the accuracy of the data sets generated by the computer tomograph under various parameters. Furthermore, an object consisting of only one material, an object with two different plastic components and an object with a steel component are scanned. These are segmented with the software Volume Graphics Studio Max 3.3.4 and printed with a 3D printer. The 3D prints are scanned again and compared with the original data sets for accuracy. The results show that the different X-ray and detector parameters have an influence on the accuracy of the scans. However, the values only differ by a few tenths of a millimeter. High-quality computed tomography scans can be performed on the objects, which have a voxel size of 0.041 millimeters and require a maximum time of 36 minutes. The results of the nominal/actual comparisons between the scanned original object and the scanned 3D copy show that most of the deviations from the original are in the range of  $-200\ \mu\text{m}$  to  $+200\ \mu\text{m}$ . The standard deviation of the deviations varies between 58 and 81 micrometers. They are depending on the size and complexity of the object. In general, it can be said that the process of 3D copying with the help of a computer tomograph works irreproachable. The interfaces between the individual devices do not cause any problems. The biggest dimensional deviations are caused by the 3D printers used, as they cannot keep up with the accuracy of the scans.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.2. Erkenntnisinteresse .....	1
1.3 Ausgangslage .....	1
1.4 Fragestellung.....	1
1.5 Zielsetzung .....	2
1.6 Hypothese .....	2
1.7 Methodenwahl .....	2
2. Material und Methoden .....	4
2.1 Verwendete Geräte und Software.....	4
2.1.1 Diundo D2.....	4
2.1.2 VG Studio Max 3.3.4 .....	4
2.1.3 Ultimaker 3 .....	4
2.1.4 Formlabs Form 2.....	4
2.2 CT Grundlagen .....	5
2.2.1 Erzeugung eines CT-Schnittbildes .....	5
2.2.2 Röntgenstrahl Parameter .....	6
2.2.3 Detektor Parameter.....	7
2.2.4 Manipulation Parameter .....	7
2.2.5 Artefakte.....	8
2.3 Objekte.....	10
2.3.1 Anfotec Kalibrierteil universal-30 mm 100694-V2 .....	10
2.3.2 Hase aus Lindenholz .....	10
2.3.3 Legomann .....	11
2.3.4 Füllhalter.....	11
2.4. Messaufbau.....	12
2.5 CT-Messungen Anfotec Kalibrierteil .....	12
2.6 Vermessung von Anfotec Kalibrierteil mit VGSTUDIO Max 3.3.4.....	13
2.7 CT Messungen der Objekte.....	15
2.8 Segmentierung der Objekte mit VGSTUDIO MAX 3.3.4 .....	15
2.8.1 Segmentierung Holzhasen.....	16
2.8.2 Segmentierung Legomann .....	17
2.8.3 Segmentierung Füllhalter .....	18

2.9 Oberflächenvergleich der Objekte.....	19
3. Resultate.....	20
3.1 Resultate Parameterbestimmungen Anfotec Kalibrierteil .....	20
3.2 Resultate Holzchase.....	22
3.3 Resultate Legomann .....	26
3.4 Resultate Füllhalter.....	31
4. Diskussion .....	35
5. Schlussfolgerung.....	37
6. Danksagungen .....	39
Abbildungsverzeichnis.....	XXXI
Tabellenverzeichnis .....	XXXIII
Literaturverzeichnis.....	XXXIV
Anhang.....	XXXVI

## 1. Einleitung

In der vorliegenden Bachelorarbeit, welche im Frühlingssemester 2020 am Institut für Medizintechnik an der Hochschule Luzern geschrieben wurde, soll ein Prototyp für einen 3D Kopierer basierend auf einem Röntgen Computertomographen (CT), einer Segmentierungssoftware und einem 3D Drucker entwickelt werden. Ziel ist, dass das resultierende 3D Objekt dem Original möglichst nahekommt, was abschliessend verifiziert wird.

### 1.2. Erkenntnisinteresse

Die Bachelorarbeit wird in Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher (CC TES) durchgeführt. Seit dem Frühjahr 2020 stehen der Hochschule Luzern ein industrielles CT System von Diondo und ein umfangreiches Datenanalysewerkzeug (Volume Graphics Studio Max) zur Verfügung. Gemeinsam mit einem 3D Drucker (Formlabs Form 2, Ultimaker 3) soll ein Prozess entwickelt werden, damit ein 3D Kopierer realisiert werden kann. Um die Funktionsweise nachzuweisen, werden die verfügbaren Werkzeuge (CT, Segmentierungsprogramm, 3D Drucker) miteinander kombiniert, damit in einem Prototyp eine Kopie von selbstgewählten Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien erstellt werden kann.

### 1.3 Ausgangslage

Die industrielle CT wird sehr häufig im Zusammenhang mit der Materialprüfung und der Vermessung von Bauteilen verwendet. Die CT ermöglicht aber auch eine exakte, zerstörungsfreie Inspektion eines Objektes in kurzer Zeit, indem sie eine digitale Rekonstruktion des Ist-Zustandes eines Objektes generiert. Aus diesem Grund ist die industrielle CT ein integraler Bestandteil moderner Bauteilentwicklung und Qualitätssicherung. Eine CT Messung kann aber auch dazu verwendet werden, die Vorlagedaten für eine additive Fertigung einer Kopie eines Objektes zu liefern und bestehende Produkte oder Objekte zu kopieren. Ein Objekt kann mit Hilfe der CT gescannt und digitalisiert werden. Dadurch können zum Beispiel innen- und ausenliegende Strukturen eines Objektes vermessen und Aussagen über Materialeigenschaften getroffen werden. Diese Methode kann zum Beispiel bei verlorengegangenen Konstruktionsplänen von Bauteilen und Kunstgegenständen sehr gut angewendet werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit das Erstellen eines Prototyps eines 3D Kopierers mit einem industriellen CT und einer Segmentierungssoftware angestrebt.

### 1.4 Fragestellung

Abhängig vom Objektmaterial müssen unterschiedliche CT-Parameter aber auch Rekonstruktionsalgorithmen der Segmentierungssoftware verändert und aufeinander abgestimmt werden, um eine wahrheitsgetreue Kopie eines Objekts zu erreichen. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, welche Werte der verschiedenen Scan-Parameter für welche Materialien am geeignetsten sind, um möglichst schnell und mit ausreichender Qualität ein Objekt scannen zu können. Es stellt sich auch die Frage, wie sich die 3D Rekonstruktion bei Objekten mit mehreren Materialien von verschiedener Dichte verhält. Sind die Oberflächen der verschiedenen Materialien gut zu unterscheiden und gut nachzubearbeiten? Ausserdem stellt sich die Frage, wie stark Metallartefakte die Qualität der Scans und deren Reproduktion beeinflussen und wie gut die Metallartefakte oder andere Artefakte mit der Segmentierungssoftware korrigiert werden können, so dass eine originalgetreue 3D Kopie der Oberfläche möglich ist.

## 1.5 Zielsetzung

Diese Bachelorarbeit, am Institut für Medizintechnik an der Hochschule Luzern, hat das Ziel herauszufinden, ob und wie mit einem CT, einer Segmentierungssoftware und einem additiven Fertigungswerkzeug ein 3D Kopierer entwickelt werden kann. Dieser 3D Kopierer soll das Ausgangsobjekt möglichst effizient und genau kopieren können. Mit der Hilfe eines 3D Druckers soll eine Kopie des Ausgangsobjekt erstellt werden. Dieser Prozess soll etabliert und an drei selbstgewählten Objekten durchgeführt werden. Das erste Objekt besteht aus einem Material (Holz), das zweite Objekt besteht aus zwei Materialkomponenten (verschiedene Kunststoffe), das dritte Objekt besitzt mindestens eine metallische Komponente. Anhand der Prozessdurchführung an den drei gewählten Objekten soll herausgefunden werden, welche CT- und Segmentierungsparameter für welche Materialien gewählt werden können, um ein Objekt einwandfrei und in möglichst kurzer Zeit additiv zu fertigen.

## 1.6 Hypothese

Mit Hilfe der industriellen CT können Objekte, abhängig von deren Grösse, Mikrometer genau und zerstörungsfrei vermessen werden. Das sind ideale Voraussetzungen für einen 3D Kopierer. Gelingt die Verknüpfung der verschiedenen technischen Komponenten, kann ein hochqualitativer 3D Kopierer erstellt werden. Die optimale Scanzeit des CTs soll weniger als 30 Minuten betragen und die Genauigkeit soll sich im Bereich von 40 Mikrometer bewegen. Die optimierte Wahl der CT-Parameter hat eine positive Auswirkung auf die Präzision der Oberflächenbestimmung und die Segmentierung der Datensätze. Die CT- Daten sollen so nachbearbeitet werden, dass schlussendlich originalgetreue digitale 3D Nachbildungen der ursprünglichen Objekte entstehen. Die 3D Drucker sollen anhand der nachbearbeiteten Datensätzen Kopien erstellen, bei denen die Masse von Auge nicht unterscheidbar vom Originalobjekt sind.

## 1.7 Methodenwahl

Zuerst wird eine Recherche über industrielle CT, die Segmentierung von CT Daten und additive Fertigungsverfahren durchgeführt. So können die nötigen Anforderungen an das zusammenhängende System ermittelt werden. Um die Genauigkeiten der verschiedenen Komponenten aufeinander abzustimmen, müssen die zur Verfügung gestellten Systemelemente (CT, 3D Drucker) analysiert werden. In einem nächsten Schritt werden anhand eines einfachen Kalibrierstücks aus Aluminium die optimalen Messparameter ermittelt. Das Ziel ist die Röhrenspannung, die Objektlage im Kegelstrahl, den Röhrenstrom beziehungsweise die Röhrenleistung, sowie die Belichtungszeit und die Anzahl der Projektionen aufeinander abzugleichen. So soll schlussendlich ein Messergebnis erzielt werden, das von der Genauigkeit mit der Performance des 3D Druckers übereinstimmt und eine möglichst tiefe Scanzeit besitzt. Mit Hilfe der Software Volume Graphics Studio Max 3.3.4 sollen verschiedene Oberflächenbestimmungsmethoden angewendet werden. Die Genauigkeit der Methoden wird verglichen. In einem nächsten Schritt wird ein Objekt aus Holz mit dem CT gescannt. Danach wird mit der Segmentierungssoftware ein 3D Model generiert, das anschliessend in einen STL Datensatz umgewandelt und mit einem 3D Drucker additiv gefertigt wird. Das gefertigte 3D Model wird dann wiederum mit dem CT gescannt, mit dem Datensatz des Originalobjekts verglichen und auf seine Masse und Oberfläche überprüft. Die gleiche Vorgehensweise wird bei einem weiteren Objekt, das mehrere Werkstoffe (verschiedene Kunststoffe) enthält und einem Objekt, das zusätzlich einen Anteil

aus Metall besitzt, angewendet. Durch das erlangte Wissen können Empfehlungen in Bezug auf die Messparameter und die Segmentierung von Objekten mit verschiedenen Materialien abgegeben werden.

## 2. Material und Methoden

Im Kapitel Material und Methoden werden wichtige Grundlagen in Bezug auf die CT und die Bilderzeugung erläutert. Ausserdem werden die verwendeten Objekte und deren Materialeigenschaften vorgestellt. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird der Messaufbau, das Vorgehen bei der Nachbearbeitung mit der Segmentierungssoftware und der Soll-Ist-Vergleich mit der 3D-Kopie genau erklärt.

### 2.1 Verwendete Geräte und Software

#### 2.1.1 Diondo D2

Das verwendete hochauflösende Mikro-CT System wurde von der Firma Diondo entwickelt. Der Computertomograph ist mit einem Transmissionstrahler der Produktlinie XWT-225-TCHE PLUS der Firma X-RAY WorX ausgestattet. Dieser Transmissionstrahler stellt eine JIMA -Auflösung von  $0.9 \mu\text{m}$ , eine maximale Target-Leistung von 50 Watt und eine maximale Spannung von 225 Kilovolt bereit. Die Röhre besitzt drei Betriebsmodi: Nanofocus, Microfocus und High-power. Ausserdem wird im Diondo D2 ein digitaler Flachdetektor angewendet (Münker, 2020).

#### 2.1.2 VG Studio Max 3.3.4

Für die Ausmessung und die Nachbearbeitung der gescannten Objekte wird die Software VG Studio Max 3.3 verwendet. VG Studio Max 3.3 ist ein Softwarepaket der Firma Volume Graphics, das zur Analyse und Visualisierung von Voxeldaten genutzt werden kann. Die Software hat sich in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen etabliert und wird vor allem bei der Analyse industrieller CT-Daten, in der medizinischen Forschung, in den Biowissenschaften, für Animationen und in vielen anderen Bereichen eingesetzt (Reinhart, 2020).

#### 2.1.3 Ultimaker 3

Um den Prozess des 3D Kopierers abzuschliessen wird für die additive Fertigung unter anderem ein 3D Drucker des Typs Ultimaker 3 verwendet. Die Technologie des Ultimaker 3 Systems basiert auf dem Fertigungsverfahren der Fused Filament Fabrication (FFF). Bei diesem Fertigungsverfahren wird ein Objekt schichtweise aus einem schmelzfähigen Kunststoff hergestellt. Der Ultimaker 3 kann eine minimale Schichtauflösung von bis zu  $20 \mu\text{m}$  erreichen. In den meisten Fällen wird ein PLA Kunststoff verwendet. Dieses Material ist biologisch abbaubar und kostengünstig (Ultimaker, 2020).

#### 2.1.4 Formlabs Form 2

Ein weiterer 3D Drucker, der angewendet wurde, ist der Formlabs Form 2. Der Formlabs Form 2 wendet die sogenannte Stereolithografie (SLA) an. Bei diesem Prozess wird flüssiges Kunstharz selektiv einem Laser ausgesetzt. So werden sehr dünne und feste Schichten gebildet. Durch das Anheben der Konstruktionsplattform wird die Schicht vom Boden abgelöst und neues Kunstharz wird nachgeliefert. Dieser Prozess wiederholt sich bis der 3D Druck beendet ist. Mit dem Formlabs Form 2 können Schichtdicken von  $25\text{-}300 \mu\text{m}$  erzeugt werden (Holländer, 2020).

## 2.2 CT Grundlagen

Um ein besseres Verständnis zu erlangen wird im Kapitel 2.1.1 kurz erklärt wie Röntgenstrahlen entstehen und wie ein CT-Schnittbild generiert wird. In einem nächsten Schritt werden die wichtigsten Parameter in Bezug auf die Bildgebung aufgelistet und erläutert. Die Parameter werden in Röntgenstrahlen Parameter, Detektor Parameter und in Manipulation Parameter aufgeteilt. Zudem werden deren Manipulationsmöglichkeiten aufgezeigt, um einen möglichst artefaktfreien CT-Scan zu gewährleisten. Im Kapitel 2.2.5 wird erklärt was Artefakte sind und wie sich die verschiedenen Artefakte auf ein CT-Bild auswirken.

### 2.2.1 Erzeugung eines CT-Schnittbildes

In einer Vakuum-Röhre wird eine Kathode durch einen Heizstrom erhitzt. Zwischen Kathode und Anode wird eine Hochspannung angelegt. Diese Spannung erzeugt die Beschleunigung der Elektronen von der Kathode zur Anode. Dieses Ereignis basiert auf einem thermoelektrischen Effekt, auch Seebeck-Effekt genannt. Die kinetische Energie der Elektronen ( $E_{kin}$ ) wird in der Anode komplett oder teilweise in elektromagnetische Strahlung ( $E_{photon}$ ) umgewandelt (Dössel, 2016, S.5). Die Umwandlung resultiert grundsätzlich aus zwei physikalischen Prozessen. Einerseits werden die ausgesendeten Elektronen durch die Elektronen im Anodenmaterial abgebremst. Dieser Prozess wird Bremsstrahlung genannt. Andererseits kollidieren die ausgesendeten Elektronen mit einem Elektron des Anodenmaterials. Das gebundene Elektron wird herausgeschlagen. Der freie Platz in der Elektronenschale wird demzufolge von einem Elektron aus einer nächst höheren Schale ersetzt. Die freigesetzte Energie wird als elektromagnetische Welle, auch Photon genannt, ausgesendet. Bei diesem Prozess wird von charakteristischer Strahlung gesprochen. (Dössel, 2016, S.6).

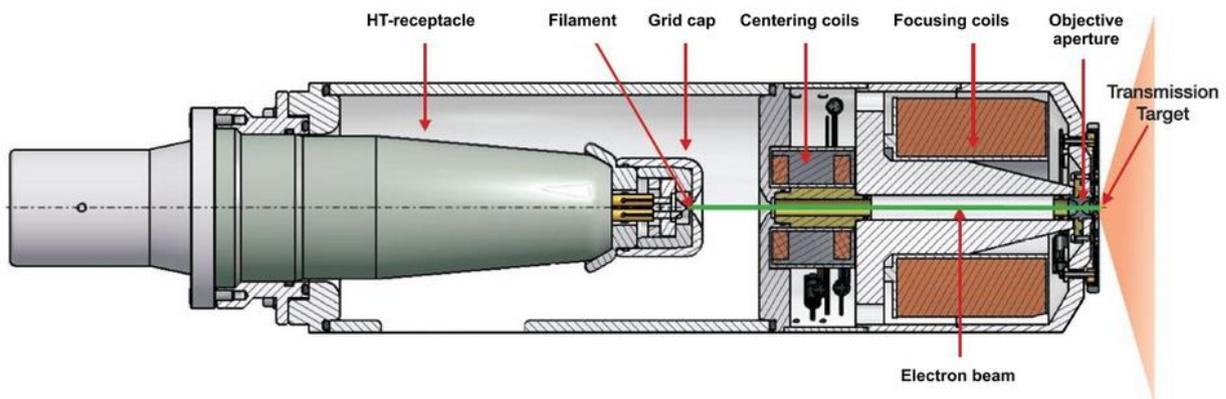


Abbildung 1: Transmissionsröhre (Behnsen & Fröba, 2020)

In der Abbildung 1 ist eine Transmissionsröhre abgebildet. Transmissionsröhren gehören zu den Mikrofokus-Röhren und werden sehr häufig in der industriellen CT verwendet. Bei diesem Röhrentyp wird der Elektronenstrahl durch mehrere Spulen fokussiert und wird auf ein Transmissionstarget im Strahlkopf geschossen. Je kleiner der Brennfleck desto schärfer die Auflösung (Behnsen & Fröba, 2020).

Die erzeugten Photonen treten anschliessend mit dem zu scannenden Material in Wechselwirkung und werden je nach Dichte und Dicke des Materials verschieden stark abgeschwächt.

Röntgenstrahlen können im Material gestreut oder absorbiert werden. Diese beiden Prozesse beteiligen sich am Schwächungskoeffizienten  $\mu$ . Je höher die Materialdichte ist, desto stärker ist die Wechselwirkung im Material. (Dössel, 2016, S. 15) Auf die verschiedenen Wechselwirkungseffekte wird in dieser Bachelorarbeit nicht eingegangen, da es den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde.

Für ein homogenes, dickes Material kann folgende Gleichung angewendet werden, um die Abnahme der Strahlungsintensität zu berechnen.

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

Formel 1: Schwächung von Röntgenstrahlen  
(Dössel, 2016)

mit:  $N_0$ = Zahl der auftretenden Quanten pro Sekunde  
 $d$ = Dicke des Materials  
 $\mu$ = Schwächungskoeffizient, Einheit:  $m^{-1}$

Nach der erfolgreichen Materialdurchdringung treffen die vom Material nicht absorbierten Photonen auf einen Detektor. Die Photonen werden nachfolgend in einem Szintillator in sichtbares Licht umgewandelt. Diese Lichtpartikel werden in alle Richtungen gestreut und können auf mehrere Pixel-Arrays treffen. Das würde ein hohes Rausch Level verursachen. Aus diesem Grund wurden Detektoren entwickelt, die in der Szintillator Schicht ein Raster aus Cäsiumjodid enthalten, das das Licht zu den einzelnen Pixelarrays umlenkt. Mit dieser Methode kann eine hohe räumliche Auflösung erzielt werden. (Diondo, 2019, S.24)

Bei einem normalen Röntgenbild wird mit dem oben genannten Prozess ein Summationsbild von einem Objekt dargestellt. Wie sich die Ausdehnung des Objekts in Strahlrichtung verhält, ist jedoch unbekannt. In der CT ist das Ziel Schichtbilder zu erzeugen. Laut Dössel (2016, S.137) „werden möglichst viele Projektionen mit einer möglichst großen Zahl von Messpunkten aufgenommen ( $p\theta(s)$ ). Die Projektionen werden 1D-fouriertransformiert ( $P\theta(w)$ ). Die transformierten Projektionen werden in eine Matrix  $F(u,v)$  eingetragen. Hierbei muss zwischen den bekannten Werten auf Radialstrahlen und den benötigten Werten in einem quadratischen Gitter interpoliert werden („gridding“). Die Matrix  $F(u,v)$  besteht aus komplexen Zahlen. Wenn gewünscht oder nötig kann  $F(u,v)$  mit einer Filterfunktion multipliziert werden. Durch eine inverse (2D) -Fouriertransformation wird das Bild  $f(x,y)$  gewonnen.“

### 2.2.2 Röntgenstrahl Parameter

**Strom [ $\mu A$ ]:** Der in einer Röntgenröhre eingespeiste Strom bestimmt die Quantität der Röntgenstrahlen. Je höher die Stromstärke ist, desto mehr Elektronen werden auf die Anode beschleunigt (Münker & Rokitta, 2019, S. 55). Mehr Röntgenstrahlen bedeuten, dass sich der Kontrast in einem CT-Bild verbessert. Jedoch nimmt die Streustrahlung zu (Münker & Rokitta, 2019, S.18). In der Abbildung 2 wird aufgezeigt, wie sich der Kontrast im Zusammenhang mit der Stromstärke verändert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Aufnahme mit 150  $\mu A$  klarere Graustufen aufzeigt als die Aufnahme mit 100  $\mu A$

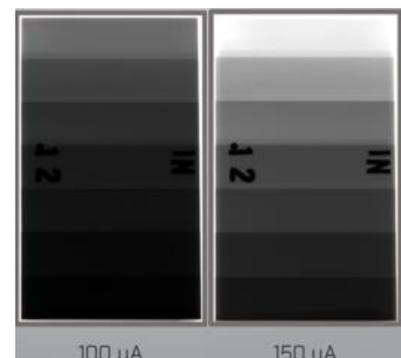


Abbildung 2: Einfluss der Stromstärke auf den Kontrast (Münker & Rokitta, 2019)

**Spannung [kv]:** Die angelegte Spannung zwischen Kathode und Anode bestimmt die Qualität der Röntgenstrahlen. Je höher die Spannung, desto stärker ist

die Beschleunigung der Elektronen auf die Anode und somit auch ihre Energie (Münker & Rokitta, 2019, S.55). Das bedeutet, dass die erzeugten Röntgenstrahlen härter sind. Härtere Röntgenstrahlen ermöglichen eine bessere Darstellung der Schichtdicken, jedoch nimmt der Kontrast der Grauwerte ab (Münker & Rokitta, 2019, S.18).

**Leistung [W]:** Die Leistung ist das Produkt aus dem Strom und der Spannung und wird in Watt angegeben. Bei einem Gebrauch eines Mikrofokus sollte die Leistung in etwa der Auflösung in Mikrometer entsprechen (Münker & Rokitta, 2019, S.55).

### 2.2.3 Detektor Parameter

**Sättigungsgrad:** Der Sättigungsgrad des Detektors sollte unter 80 Prozent liegen. Je näher die Sättigung bei den 80 Prozent liegt, desto besser ist die Dynamik des Detektors. Wird eine Sättigung von über 80 Prozent erreicht, kann der Detektor die Linearität nicht einhalten. Ausserdem kann eine zu hohe Sättigung den Detektor beschädigen (Münker & Rokitta, 2019, S.56).

**Detektorgröße:** Ein Detektor gliedert sich in Reihen und Spalten auf. Die gewählte Detektorgröße ist abhängig von der Größe und der angezielten Vergrößerung des Objekts. Die Detektorgröße sollte möglichst klein gehalten werden, um die Datenmenge möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund darf die unnötige Luft rund um das Objekt abgeschnitten werden. Eine kleinere Datenmenge verkürzt die Rekonstruktionszeit (Münker & Rokitta, 2019, S.59)

**Integrationszeit [ms]:** Die Integrationszeit beschreibt die Aufnahmezeit einer einzelnen Projektion. Diese hängt vom Sättigungsgrad ab. Der maximale Grauwert verhält sich linear zur Integrationszeit. Ist der Sättigungsgrad zu niedrig, kann er durch eine Erhöhung der Integrationszeit angepasst werden. Eine Erhöhung der Integrationszeit hat jedoch immer eine Verlängerung der Scanzeit zu Folge (Münker & Rokitta, 2019, S.58).

**Kapazität [pF]:** Mit der Kapazität kann die Empfindlichkeit des Detektors beeinflusst werden. Wird mit einer tiefen Kapazität gemessen, wird eine höhere Sättigung erreicht. Jedoch nimmt das Rauschen im Bild zu. Wird die Kapazität erhöht, nehmen die Sättigung und das Rauschen ab (Münker & Rokitta, 2019, S.66).

**Pixelbinning:** Wenn mehrere Detektorelemente zu einem Detektorelement vereint werden, wird von Pixelbinning gesprochen. Wird zum Beispiel ein 2x2 Pixelbinning durchgeführt, wird die Auflösung verdoppelt und die Pixelanzahl halbiert, da sich die Pixelgröße auch verdoppelt (Münker & Rokitta, 2019, S.64).

### 2.2.4 Manipulation Parameter

**Fokus Objekt Distanz (FOD):** Mit der FOD wird die Distanz zwischen dem Objekt und dem Brennfleck angegeben. Befindet sich das Objekt nahe an der Röntgenröhre nimmt die Auflösung ab, da das Objekt vergrößert dargestellt wird (Münker & Rokitta, 2019, S.53).

**Fokus Detektor Distanz (FDD):** Mit der FDD wird die Distanz zwischen dem Detektor und dem Fokus gemessen. Der Fokus sollte so nah wie möglich am Detektor sein, um eine hohe Sättigung zu erreichen und die Scanzeit zu verkürzen. Der FDD wird durch die Objektgröße begrenzt. Das Verhältnis der FOD zu der FDD bestimmt den Vergrößerungsfaktor (Münker & Rokitta, 2019, S.54)

### 2.2.5 Artefakte

Laut Kasperl (2005, S.22) sind Artefakte „(lat. Arte factum) künstliche Strukturen in Bildern, für die es in der Struktur des abgebildeten Objektes keine Entsprechung gibt.“ Gründe dafür können technische oder physikalische Einschränkungen des Bilderzeugungssystems sein, die durch die falsche Parameterwahl oder eine falsche Lagerung des Messobjekts entstehen. Die Bilder in der CT entstehen nicht direkt durch eine physikalische Messung, sondern durch ein mathematisches Rekonstruktionsverfahren. Daher ist ein rekonstruiertes Bild nur eine Approximation von der wahren Verteilungsfunktion  $f(x,y)$ . Wenn die gemessenen Projektionen inkorrekt oder inkonsistent sind, wird die Bildqualität von den entstandenen Artefakten negativ beeinflusst. An den Positionen der Messfehler entstehen Störungen im Bild. Diese Störungen können nur schwierig interpretiert und zu dem richtigen Material zugeordnet werden. Im Allgemeinen werden Messfehler in zwei verschiedene Arten eingeteilt. Zum einen sind das statistische Messfehler, die vor allem ein Bildrauschen erzeugen können, das sich gleichmässig über das gesamte Bild verteilt. Durch das Erhöhen des Röhrenstroms und eine längere Messzeit lässt sich das Rauschen vermindern. Zum anderen sind das systematische Messfehler. Diese Messfehler können einzelne Messwerte verfälschen oder können zu einem Fehlen von Projektionen führen. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Ursachen von systematischen Messfehlern behandelt und erklärt (Kasperl, 2005, S.22):

Eine Ursache ist die Unterabtastung auch Undersampling genannt. Laut Mayor A. (2015) wird „die zu geringe Aufnahme oder Verwendung von Projektionsdaten, die zu artefaktfreien Rekonstruktionen benötigt werden“ als Unterabtastung bezeichnet. Es können sogenannte Aliasing-Effekte entstehen. Diese Artefakte können sich vor allem in der Nähe von den Objektkanten bemerkbar machen. Sie können sich als feine, eher gitternetzartige Linien darstellen.

Weitere Ursachen sind die Partialvolumenartefakte. Diese entstehen, wenn verschiedene Strukturen mit hohen Kontrastunterschieden auf nur einem Detektorelement, also in nur einem Voxel, abgebildet werden. Wenn demnach zwei Röntgenstrahlen, die durch zwei Materialien mit unterschiedlicher Dichte gedrungen sind, auf ein Detektorelement treffen, registriert der Detektor eine nicht lineare Mittelung von den zwei Schwächungskoeffizienten. Die entstehende Graustufe entspricht nicht dem realen Dichteprofil der abzubildenden Struktur (Mayor, 2015).

Auch Kreisartefakte können systematische Messfehler verursachen. Diese entstehen, wenn ein fehlerhaftes Detektorelement kontinuierlich zu grosse oder zu kleine Signale liefert. Im rekonstruierten Bild stellt sich dieser Effekt als heller oder dunkler Kreis um den Drehmittelpunkt dar (Kasperl, 2005, S.24).

Strahlaufhärtungsartefakte können sich als inhomogene Grauwerte in einem homogenen Material oder auch als dunkle Streifen zwischen zwei Objektstrukturen mit starker Strahlenabsorption darstellen. Sie können sich aber auch als verwaschene Kanten abbilden. Aufhärtungsartefakte treten auf, weil Röntgenstrahlen nicht monochromatisch sind. Das heisst, die von einer Strahlenquelle emittierten Röntgenstrahlen gehören nicht nur einem Energiespektrum an. Für die Bildgebung bedeutet das, dass die niederenergetischen Photonen vom Objekt absorbiert werden und die hochenergetische Strahlung das Objekt durchdringt.

Dementsprechend treffen hauptsächlich hochenergetische Photonen auf dem Detektor ein. Dieser Effekt kann zu den oben genannten Bildverzerrungen führen.

Ein wichtiger Strahlauvhärtungsartefakt ist der Metallartefakt. Metallartefakte sind meist sternförmige Bildstörungen. Ist die Energie der Photonen zu niedrig, können diese die metallischen Werkstoffe aufgrund der hohen Dichte nicht durchdringen. Das hat eine vollständige Absorption der Strahlung zur Folge (Kasperl, 2005, S.25).

Wie im Kapitel 2.2.1 erwähnt wurde, kann ein Röntgenstrahl durch Absorption oder Streuung geschwächt werden. Die Art des Schwächungsprozesses hängt vom Energiebereich der Strahlung ab. Bei der Absorption wird ein Röntgenquant vollkommen eliminiert, wohingegen der Röntgenquant beim Streuprozess nur eine oder mehrere Richtungs- und Energieänderung erfährt. Nach der Streuung kann der Röntgenquant auf ein Detektorelement treffen, das Quanten von einem anderen Linienintegral sammelt. Die CT-Rekonstruktion wird dadurch erschwert und der Streustrahleffekt zieht somit eine Kontrastminderung auf das CT-Bild mit sich. Da die Streustrahlung der Rekonstruktion zusätzlich noch eine zu geringe Abschwächung vor-täuscht, entsteht der sogenannte Cupping Effekt. Beim Cupping Effekt erscheinen zentrale gelegene Bereiche weniger dicht als Randzonen (Kasperl, 2005, S. 51).

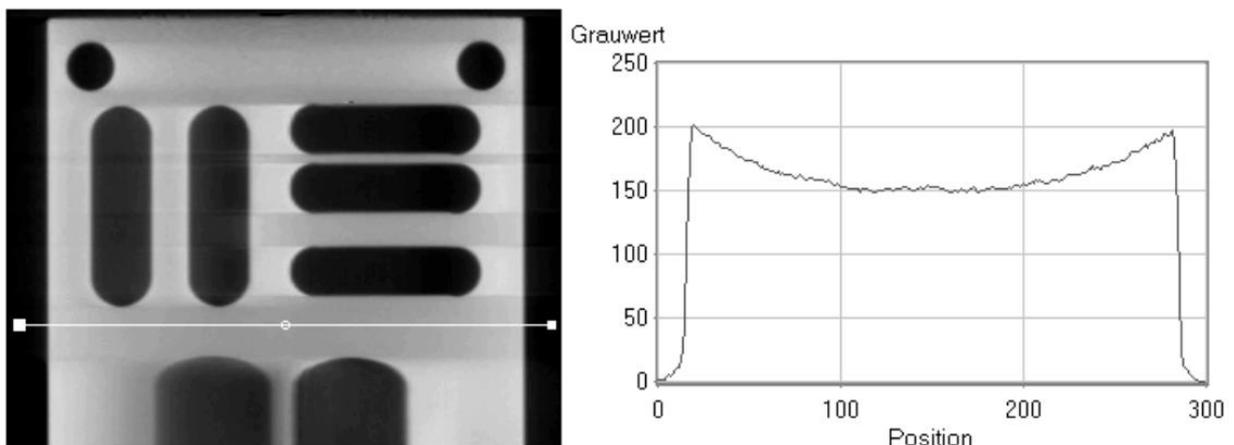


Abbildung 3: Cupping Effekt (Kasperl, 2005)

In der Abbildung 3 ist ein Querschnitt eines Testkörpers abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass die Grauwerte, die sich im Innern der Struktur befinden, weniger intensiv sind. Der Profilschnitt im rechten Bild zeigt den Cupping Effekt noch besser auf.

Auch minimale Bewegungen des Objekts während der Messung können Artefakte hervorbringen. Bewegungsartefakte werden aber hauptsächlich in der medizinischen CT durch Organbewegungen vorgefunden. Bei einer stabilen Lagerung des Objekts können Bewegungsartefakte in der industriellen CT vollkommen eliminiert werden und sind darum zu vernachlässigen (Kasperl, 2005, S.24).

## 2.3 Objekte

In diesem Unterkapitel werden die Objekte vorgestellt, die in dieser Bachelorarbeit für die CT Messungen verwendet wurden. Es wird auf die Komponenten der Objekte und deren Materialeigenschaften eingegangen.

### 2.3.1 Anfotec Kalibrierteil universal-30 mm 100694-V2

Beim Anfotec Kalibrierteil handelt es sich um einen genau vermessenen Aluminiumzylinder von der Anfotec Antriebstechnologie GmbH. Er enthält zwei Bohrlöcher im Abstand von 25 mm, einen Innendurchmesser von 20 mm und einen Aussendurchmesser von 30 mm. Die genauen Masse sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Name	Messwert	Nennmass	+Tol	-Tol
Distanz polar 2d1	25.0085 mm	25.0000 mm	0.0200 mm	-0.0200 mm
Durchmesser 20	20.0042 mm	20.0000 mm	0.0200 mm	-0.0200 mm
Durchmesser 30	30.0080 mm	30.0000 mm	0.0200 mm	-0.0200 mm
Durchmesser 3 H7 links	3.0092 mm	3.0000 mm	0.0100 mm	0.0000 mm
Durchmesser 3 H7 rechts	3.0086 mm	3.0000 mm	0.0100 mm	0.0000 mm

Tabelle 1: Masse Anfotec Kalibrierteil (Hast & Meissner, 2019)

### 2.3.2 Hase aus Lindenholz

Als erstes Versuchsobjekt wurde ein Holzhasen (siehe Abbildung 4) von der Firma Trauffer Holzspielwaren gewählt. Dieses Objekt besteht aus Lindenholz. Durch die verschiedenen Jahresringe ist das Lindenholz inhomogen. Lindenholz ist ein schlichtes Holz, das mittelschwer, zäh, aber wenig elastisch und fest ist. Es besitzt eine gleichmässige Dichte und ist fein strukturiert. Der Mittelwert der Rohdichte ( $r_N$ ) beträgt  $0.53 \text{ g/cm}^3$  und die Grenzwerte betragen  $0.35 - 0.65 \text{ g/cm}^3$  (Grosser, n.d.).

Lindenholz gehört zu den Mittelschweren Hölzern und ist darum ein guter Referenzwert für die Parameterbestimmung von Holz.

Des Weiteren wurde dieses Objekt aufgrund seiner Form gewählt. Es besitzt klare Kanten und gerade Flächen.



Abbildung 4: Hase aus Lindenholz

### 2.3.3 Legomann

Das zweite Versuchsobjekt ist ein Legomann (siehe Abbildung 5). Legoteile bestehen aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). ABS-Kunststoffe sind Thermoplaste und verfügen über eine homogene Struktur. Sie werden hinsichtlich ihres chemischen Aufbaus in die Gruppe der hochschlagfesten Styrol-Copolymerisate eingeteilt. Die monomeren Bestandteile sind Acrylnitril, Butadien und Styrol. Durch verschiedene Mengenverhältnisse der genannten Monomeren kann mittels Misch- oder Pfropfpolymerisation eine grosse Anzahl von ABS-Typen hergestellt werden, die verschiedene Eigenschaften besitzen. ABS-Kunststoff ist im Vergleich zu anderen Kunststoffen leicht. Er besitzt eine Dichte von  $1.02 - 1.12 \text{ g/cm}^3$ . ABS ist relativ hart und steif und besitzt eine hohe Zähigkeit. Die hohe Temperaturwechselfestigkeit und die geringe Wasseraufnahme sind hervorzuheben (Kintra, 2020).



Abbildung 5: Legomann

Der Legomann wurde als Versuchsobjekt ausgewählt, da er aus verschiedenen Komponenten besteht. Diese zeigen verschiedene geometrische Formen auf und greifen wie ein Stecksystem ineinander. Dadurch kann die Segmentierungssoftware gut auf ihre Sensibilität getestet werden und es kann aufgezeigt werden, wie verschiedene Komponenten mit ähnlichen Materialdichten voneinander abgegrenzt werden können.

### 2.3.4 Füllhalter

Als drittes Objekt wird der vordere Teil eines Füllhalters verwendet (siehe Abbildung 6). Der Füllhalter besitzt eine Edelstahlfeder. Edelstahl ist sehr korrosionsbeständig und kann nicht rosten. Er besitzt eine Dichte von ca.  $7.8 \text{ g/cm}^3$  und verfügt somit eine deutlich höhere Dichte als der im Füllhalter verwendete Kunststoff (Heubner, 2014).



Abbildung 6: Füllhalter

Anhand des Füllhalters soll aufgezeigt werden, wie die Segmentierungssoftware mit möglichen Metallartefakten umgehen kann, um eine saubere Oberfläche zu erhalten. Mit dem grossen Dichteunterschied der verschiedenen Materialien steht eine weitere Herausforderung für die Oberflächenbestimmung an. Es stellt sich die Frage, wie gut die Oberfläche des Kunststoffs in der Nähe des Edelstahls rekonstruiert werden kann.

### 2.4. Messaufbau

Für die CT-Messungen wurden in einem ersten Schritt Halterungen aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) für die verschiedenen Objekte angefertigt. XPS besitzt eine tiefe Dichte und absorbiert und streut die Röntgenstrahlung nur sehr gering. Aus diesem Grund ist dieses Material sehr gut für die Lagerung der Objekte geeignet. Bei der Objektpositionierung wurde darauf geachtet, dass die Objekte eine Schräglage zwischen 10°- 45° besitzen. Diese Objektlage liefert die besten Ergebnisse bezüglich der CT-Datenqualität, weil so das orthogonale Auftreffen der Röntgenstrahlen auf lange gerade Flächen vermieden werden kann (Kastner, 2009, S.4).

In einem nächsten Schritt wurden die Objekte möglichst zentral auf vier verschiedene Flächen einer Etage positioniert. Wenn mehrere Objekte nacheinander gescannt werden müssen, ermöglicht eine Etage eine einfachere und schneller Planung, da nur eine Drehplattform benötigt wird. Die Etage wurde auf einer Drehplattform fixiert und vor die Röntgenröhre gefahren. In der Abbildung 7 ist der Messaufbau mit den vier Objekten ersichtlich. Aus technischen Gründen wurde die unterste Fläche freigelassen.



Abbildung 7: Messaufbau mit Etage

Abbildung 7 zeigt den Messaufbau mit vier Objekten auf einer Etage. Die Objekte sind auf vier verschiedenen Ebenen positioniert. Die unterste Ebene ist freigelassen. Der Aufbau ist auf einer Drehplattform montiert und vor die Röntgenröhre gefahren.

### 2.5 CT-Messungen Anfotec Kalibrierteil

Nach Abschluss des Messaufbaus wurde die Schiebetüre des Computertomographen geschlossen. An der Workstation wurden die Messungen geplant. Anhand des Anfotec Kalibrierteils wurde eine Parameterbestimmung durchgeführt. Die Parameter Spannung, Kapazität und Integrationszeit wurden zwischen den Messungen modifiziert, um die Auswirkungen der Messparameter auf die Bildqualität, die Genauigkeit und die Qualität der Oberflächennachbearbeitung aufzuzeigen. In der Tabelle 2 werden die verschiedenen Messungen und deren Parameter dargestellt. Die FDD und die FOD, wie auch die Anzahl Watt wurden über alle Messungen konstant gehalten.

<b>X-Ray Parameter</b>	Spannung [kv]	100	150	190			
	Strom [ $\mu$ A]	300	200	158			
	Leistung [W]	30					
	Focus	High Power					
	Filter	1 mm Kupferfilter					
<b>Detektor Parameter</b>	Integrationszeit [ms]	90	360	90	310	300	1000
	Kapazität [pF]	2	8	2	8	2	8
	Pixelbinning	2x2					
<b>Scan Parameter</b>	Anzahl Projektionen	1500					
	Scantechnik	Rotation					
<b>Rekon Parameter</b>	Pixelgrösse [mm]	0.041					
<b>Manipulator Parameter</b>	FOD [mm]	127					
	FDD [mm]	850					

Tabelle 2: Parameterbestimmung Anfotec Kalibrierteil

Eine ausführliche Aufführung der Messparameter der verschiedenen Messungen befindet sich im Anhang 1. Dort sind auch Bilder der Rohdaten ersichtlich.

## 2.6 Vermessung von Anfotec Kalibrierteil mit VGSTUDIO Max 3.3.4

Um die Einflüsse der verschiedenen CT-Parameter bezüglich der Scan Genauigkeit zu bestimmen, wurde der 2D und 3D Datensatz des Anfotec Kalibrierteils mit Hilfe der Segmentierungssoftware VGSTUDIO Max 3.3.4 vermessen. Bei jedem Datensatz wurden in einem ersten Schritt verschiedene Methoden der Oberflächenbestimmungen durchgeführt. Die angewendeten Methoden werden im folgenden Absatz kurz erläutert.

**Globales Schwellwertverfahren (Isowert-basiert):** Als erste Methode wurde die isowert-basierte Bestimmung der Materialgrenze durchgeführt. Bei dieser Methode wird die Oberfläche des Objekts anhand eines einzigen Grauwertes, der auf den gesamten Datensatz angewendet wird, ermittelt. Normalerweise wird die Grenze zwischen dem Material und dem Hintergrund (zum Beispiel Luft) gezogen. Die Oberfläche wurde mit dem Iso-50-Wert bestimmt. Der Iso-50-Wert ist der mittlere Grauwert des Materials addiert mit dem mittleren Grauwert des Hintergrunds dividiert durch zwei (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 140).

**Lokales Schwellwertverfahren (Erweitert):** Mit der Methode «Erweitert» wird die Oberfläche anhand der lokalen Grauwertunterschieden bestimmt. Das bedeutet, dass derselbe Grauwert je nach Voxelumgebung unterschiedlich interpretiert wird. Gegenüber der Isowert-basierten Oberflächenbestimmung wird bei der erweiterten Oberflächenbestimmung die Komponenten-geometrie genauer erfasst, da lokale Abweichungen zum Beispiel durch Aufhärtungsartefakte überwiegend kompensiert werden. Die Startkontur wird durch eine rote Isowertlinie im Grauwert Histogramm im Dialog der Oberflächenbestimmung automatisch festgelegt, Für Multimaterialobjekte besteht die Möglichkeit eine erweiterte Multimaterialoberflächenbestimmung durchzuführen. Auf diese Methode wird in Kapitel 2.8.3 eingegangen (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 140).

Die Abbildung 8 zeigt ein Beispiel eines Grauwert Histogramms mit der erwähnten roten Isowertlinie. Ausserdem zeigt das Histogramm zwei klare Peaks an. Mit dem ersten Peak wird immer der Grauwert des Hintergrundes, der in den meisten Fällen Luft ist, bestimmt. Der zweite Peak wird als Materialpeak definiert. Für die erweiterte Oberflächenbestimmung ist zusätzlich ein Expertenmodus verfügbar. Im Expertenmodus kann zusätzlich eine iterative Oberflächenbestimmung durchgeführt werden. Dabei wird der Suchabstand der Voxel abhängig vom lokalen Grauwertgradienten erweitert.

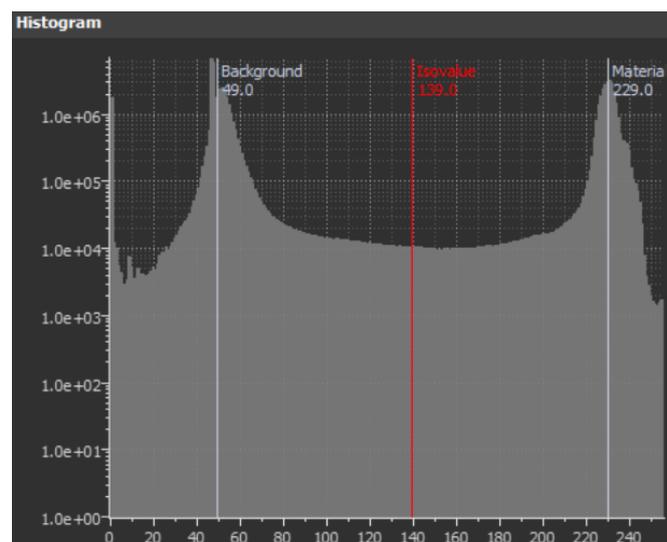


Abbildung 8: Histogramm mit roter Isowert Linie ((Volume Graphics GmbH, 2019).

Ausserdem kann ein Kantenschwellwert berechnet werden, der die Festlegung einer Mindest-

Grauwertdifferenz zur lokalen Korrektur der Startkontur arrangiert. Liegt die Grauwertdifferenz unter diesem Wert, wird die Startkontur als bestimmte Oberfläche genutzt (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 147)

Die oben erwähnten Methoden der Oberflächenbestimmung wurden bei den verschiedenen Datensätzen des Anfotec Kalibrierteils angewendet. Nach jeder Oberflächenbestimmung wurden die verschiedenen Durchmesser des Anfotec Kalibrierteils (siehe Tabelle 1) mit dem Messtechnik Modul Geometrielement Kreis vermessen und mit den originalen Messwerten verglichen. Die polare Distanz wurde mit einer Linie zwischen den Mittelpunkten des linken und des rechten H7 Bohrlochs ermittelt.

In Abbildung 9 ist ein 3D Datensatz des Kalibrierteils zu erkennen. Die roten Kreise zeigen die Durchmesser an und die grüne Linie die polare Distanz. Die genauen Messwerte werden im Kapitel 3.1 Resultate genauer erläutert.

Bei jedem Datensatz wurde zusätzlich eine Datenqualitätsanalyse nach der ASTM Norm E 1695 «Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance» durchgeführt. Bei dieser Analyse wird eine gleichmässige Materialscheibe über ein CT-Bild gelegt. Somit können verschiedene Werte zur Kontrastempfindlichkeit und zur räumlichen Auflösung des CT-Datensatzes bestimmt werden. (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 986). In dieser Bachelorarbeit interessiert vor allem das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis.

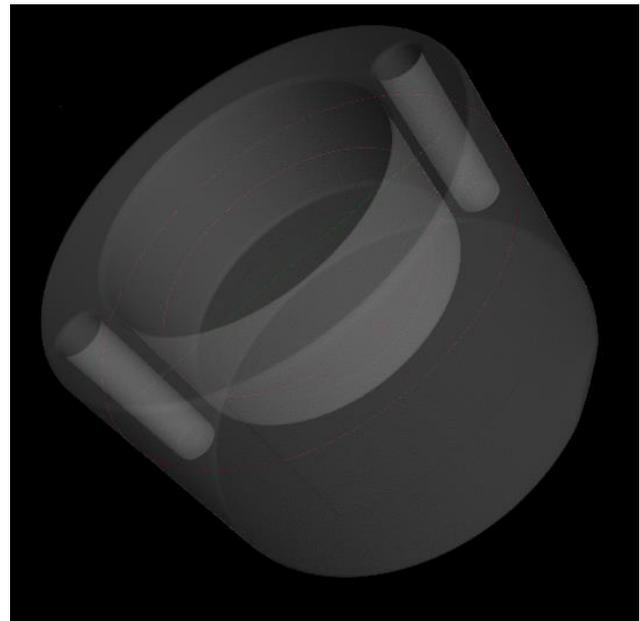


Abbildung 9: Vermessung Anfotec Kalibrierteil

## 2.7 CT Messungen der Objekte

An den drei ausgewählten Objekten wurden je vier Messungen mit unterschiedlichen Röhrenspannungen durchgeführt. Anhand der verschiedenen Röhrenspannungen soll aufgezeigt werden, welche Röhrenspannung für die Oberflächenbestimmung der verschiedenen Materialien der Objekte geeignet ist. Ausserdem soll dargelegt werden, wie gut sich die Komponenten der Multimaterialobjekten voneinander segmentieren lassen. Die Integrationszeit wurde je nach Röhrenspannung angepasst, um einen Sättigungsgrad von 70 Prozent zu erreichen. Ab 155 kv wurde ein 1 mm Kupferfilter eingesetzt. In der Tabelle 3 werden die verschiedenen Messungen und deren Parameter dargestellt.

<b>X-Ray Parameter</b>	Spannung [kv]	80	120	155	190
	Strom [ $\mu$ A]	375	250	194	158
	Leistung [W]	30			
	Focus	High Power			
	Filter	1 mm Kupferfilter			
<b>Detektor Parameter</b>	Integrationszeit [ms]	450	330	1300	1200
	Kapazität [pF]	8			
	Pixelbinning	2x2			
<b>Scan Parameter</b>	Anzahl Projektionen	1200			
	Scantechnik	Rotation		Füllhalter mit Helix	
<b>Rekon Parameter</b>	Pixelgrösse [mm]	0.042			
<b>Manipulator Parameter</b>	FOD [mm]	127			
	FDD [mm]	850			

Tabelle 3: Parameter Objekte

Bei dem Holzhasen und dem Legomann wurde die Scantechnik «Rotation» angewendet. Das bedeutet, dass das zu scannende Objekt sich auf der Drehplattform während dem Scan um seine eigene Achse dreht. Bei jeder Aufnahme wird die Rotation gestoppt. Eine Projektion wird aufgenommen. Beim Füllhalter wurde die Scantechnik «Helix» angewendet, da das Objekt relativ lange ist. Bei der Anwendung einer Rotation Scantechnik hätte der Füllhalter das maximale FOV überschritten. Bei einer Helix CT bewegt sich die Rotationsplattform, neben der horizontalen Rotation, in vertikaler Richtung. So kann der Scan des gesamten Objekts gewährleistet werden (Münker & Rokitta, 2019, S.73).

Eine ausführliche Aufführung der Messparameter der verschiedenen Messungen befindet sich im Anhang 2 (Holzhase), 3 (Legomann) und 4 (Füllhalter). Dort sind auch die Bilder der Rohdaten ersichtlich.

Zusätzlich wurde eine Messung des Legomanns mit einer Kapazität von 4 pF und einem 1x1 Pixelbinning durchgeführt. Die genauen Parameter befinden sich im Anhang 3. Daraus resultierte eine Voxelgrösse von 0.019 mm. Diese Messung soll mit den Messungen, mit der Kapazität von 8 pF, des Legomanns auf ihre Genauigkeit verglichen werden.

## 2.8 Segmentierung der Objekte mit VGSTUDIO MAX 3.3.4

Nach dem CT-Scan wurden die Datensätze rekonstruiert und mit der Segmentierungssoftware VGStudio Max 3.3.4 importiert. Im Dialog Importvorschau wurde bei jedem Datensatz die unnötige Luft abgeschnitten. So konnten die Objekte auf ihre Objektgrenzen reduziert und der Speicherplatz des Datensatzes vermindert werden.

### 2.8.1 Segmentierung Holzhasen

Da der Holzhasen nur aus einem Material besteht, war die Segmentierung, im Vergleich zu den anderen Objekten, einfach. Als erstes wurde eine erweiterte Oberflächenbestimmung inklusive einer iterativen Oberflächenbestimmung durchgeführt. Zusätzlich wurde im Dialog bei der Drop-down-Liste «Startkontur korrigieren» die Option «Rauschpartikel und kleine Hohlräume entfernen» ausgewählt. Diese Option diente dazu, die kleinen Partikel der XPS-Halterung zu eliminieren. Die Partikel stellen sich in der Abbildung 11 (A) dar. In einem nächsten Schritt wurde die Oberfläche in eine Region of Interest (ROI) umgewandelt.

Da sich noch immer einzelne Partikel der XPS Halterung in der ROI befanden, wurde die Funktion «ROI aufteilen» verwendet. Diese Funktion zerlegt den ROI in getrennte Komponenten und erzeugt für jede Komponente eine einzelne ROI. Werden mehrere Komponenten erkannt, besteht die Möglichkeit eine Mindestgröße einer ROI festzulegen. ROI Komponenten die kleiner als der festgelegte Wert sind, werden nicht beachtet. Beim Holzhasen war das Ziel den Wert so hoch zu wählen, dass schlussendlich im Dialog nur noch eine ROI-Komponente angezeigt wurde. Die Abbildung 10 zeigt ein Beispiel des Dialogfensters «ROI aufteilen».

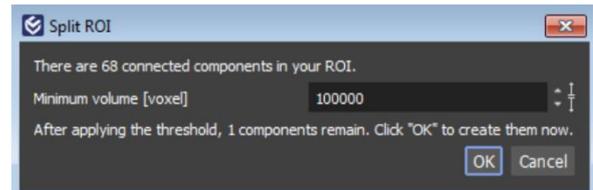


Abbildung 10: Aufteilen der ROI, um eine Komponente zu erhalten (Volume Graphics GmbH, 2019).

Einzelne Partikel, die auch mit der Funktion «ROI aufteilen» nicht entfernt werden konnten, wurden mit dem Auswahlmodus «Rechteck» und «Linienzug» umrahmt und von der ursprünglichen ROI subtrahiert. Um die Kanten des Objekts weicher zu machen wurde eine Verfeinerung mit einer ROI-Genauigkeit von 8 Bit und anschliessend auch eine Glättung von 8 Bit angewendet. Der resultierende 3D Datensatz ist in Abbildung 11 (B) sichtbar.

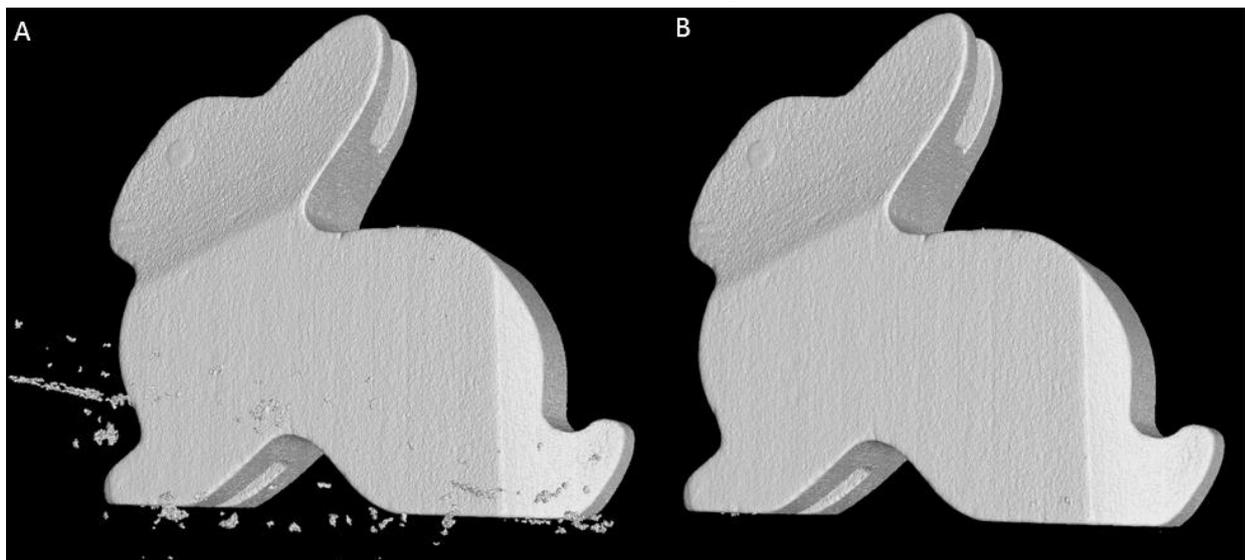


Abbildung 11: Holzhasen vor (A) und nach (B) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4

Um den 3D Datensatz für den später verwendeten 3D Drucker kompatibel zu machen, wurde die VGL-Datei in eine STL-Datei umgewandelt.

### 2.8.2 Segmentierung Legomann

Die einzelnen Teile des Legomanns bestehen aus verschiedenen zusammengesetzten ABS-Kunststoffen. Das bedeutet, dass sich die Beine, der Oberkörper und der Kopf dichtemässig voneinander unterscheiden und somit in der 2D Darstellung einen anderen Grauwert besitzen. Jedoch sind die Dichteunterschiede minimal. Das heisst, im Grauwert Histogramm konnten die Materialpeaks nicht klar voneinander getrennt werden. Aus diesem Grund konnte keine erfolgreiche erweiterte Multimaterialoberflächenbestimmung durchgeführt werden.

Darum wurde, wie bei dem Holzhasen, auch beim Legomann als erster Schritt eine erweiterte Oberflächenbestimmung inklusive einer iterativen Oberflächenbestimmung umgesetzt.

Wie beim Holzhasen wurden mit gleichem Vorgehen die XPS Partikel entfernt. Anschliessend wurden die einzelnen Körperteile segmentiert. Dazu wurde der Auswahlmodus «Region-Grower» zu Hilfe genommen. Der Region-Grower fertigt eine Auswahl anhand eines Flutungsalgorithmus an. Zuerst wird mit dem Cursor ein Startpunkt in einer 2D-Ansicht gesetzt. Die Auswahl wächst mithilfe des Algorithmus weiter, bis keine Voxel mehr gefunden werden, deren Grauwerte innerhalb einer festgelegten Toleranz zum Grauwert des Startpunkts liegen (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 250).

Die Tabelle 4 zeigt die Grauwerttoleranzen des Oberkörpers und der Beine des Legomanns. Mit dieser Funktion konnten der Oberkörper und die Beine klar voneinander abgegrenzt werden. Von beiden Regionen wurde je eine weitere ROI erstellt. Um den Kopf vom Rest des Legomanns zu segmentieren, wurden von der ursprünglichen ROI die zwei neu erstellten ROIs mit der Schaltfläche «ROI abziehen» subtrahiert. Aus dem Ergebnis wurde wiederum eine neue ROI erstellt.

Körperteil	Toleranz
Oberkörper	209
Beine	190

Tabelle 4: Toleranzen Region-Grauwert

Anschliessend mussten mit dem Auswahlmodus «Zeichenstift» einzelne Oberflächen korrigiert werden, da vor allem bei den Stecksystemen einzelne Materialkomponenten schwierig voneinander zu trennen waren. Der Zeichenstift ist eine Art kugelförmiger Pinsel, bei dem ein Grauwertintervall festgelegt werden kann. Innerhalb dieses Intervalls werden alle Voxel zur ausgewählten ROI addiert, sobald mit dem Pinsel darauf gezeichnet wird. Nach der Korrektur, dem Verfeinern und Glätten der Kanten wurden die einzelnen ROIs in STL Datensätze umgewandelt. In Abbildung 12 wird der unbearbeitete (Bild A) und der bearbeitete (Bild B) Datensatz

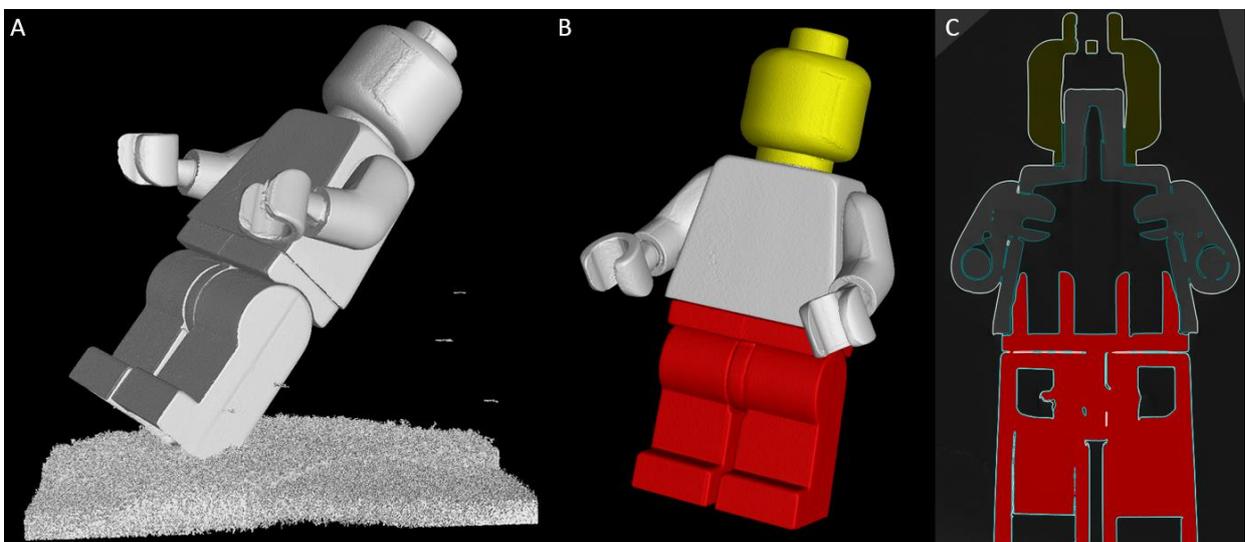


Abbildung 12: Legomann vor (A) und nach (B) (C) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4

dargestellt. Im Bild C ist der Legomann in der 2D Projektion abgebildet. In der 2D Projektion ist gut zu erkennen, wie die einzelnen Teile ineinandergreifen. Die einzelnen Komponenten werden mit unterschiedlichen Farben im bearbeiteten Datensatz abgebildet.

### 2.8.3 Segmentierung Füllhalter

Der verwendete Füllhalter besitzt eine Feder aus Stahl. Ebenfalls wurde bei der Herstellung ein Stahlring am unteren Ende des Griffs integriert. Diese zwei Komponenten verursachten, wie erwartet, starke Metallartefakte. Diese Artefakte galt es zu eliminieren, damit eine möglichst genaue Oberfläche rekonstruiert werden konnte.

Auch beim Füllhalter wurde zuerst eine Oberflächenbestimmung durchgeführt. Da sich die Grauwerte von den Stahl- und den Kunststoffkomponenten stark unterscheiden, konnte die Oberflächenbestimmung mit der Methode «Erweitert (Multimaterial)» durchgeführt werden. Bei dieser Methode wird pro Materialpeak ein Isowert gesetzt. Nach der Bestimmung wird jedes Material durch eine eigene Komponente im Szenenbaum dargestellt. Mit dieser Methode konnten die Stahlkomponenten sehr gut von dem Kunststoff abgegrenzt werden und mussten auch nicht weiter nachbearbeitet werden. Aus den Metallkomponenten wurden ROIs erzeugt. Um sicherzustellen, dass sich in der Kunststoffkomponente keine Voxel der Stahlkomponenten befanden, wurde für den Kunststoff eine ROI erzeugt. Von dieser ROI wurde die Stahl-ROI subtrahiert. Daraufhin galt es die Metallartefakte zu eliminieren. Dazu wurde der Auswahlmodus «Erosion/Dilatation» verwendet. Im Dialog wurde in der Drop-down-Liste «Methode» die Funktion «Öffnung/Schliessung» ausgewählt. Diese Funktion schrumpft bei einer negativen Voxelanzahl die ROI, um sie nachher sofort wieder auszudehnen. So können kleine Partikel ausserhalb der ROI besser entfernt werden. Der Wert für die Voxelanzahl betrug  $-3$ . Dieser wurde im Drehfeld «Radius» eingetragen. Mit dem Befehl «Ersetzen» wurde die alte ROI mit der neuen ROI ausgetauscht (Volume Graphics GmbH, 2019, S. 261).

In einem nächsten Schritt wurden mit der Funktion «ROI aufteilen» (siehe 2.8.1) die restlichen unerwünschten Artefakte, die noch in der ausgewählten ROI miteinbegriffen waren, beseitigt.

Auch beim Füllhalter mussten einzelne Bereiche mit dem Auswahlmodus «Zeichenstift» korrigiert werden. Es waren hauptsächlich die Bereiche, die sich innerhalb von wenigen Millimetern Abstand von den Metallkomponenten befanden. In diesen Bereichen zeigten sich im Objektinnern Artefakte, die sich mit Hilfe von den vorgängig angewendeten Schritten nicht korrigieren liessen. Nach den Korrekturen, dem Verfeinern und Glätten der Kanten wurde der VGL-Datensatz des Füllhalters in ein STL-Datensatz umgewandelt.

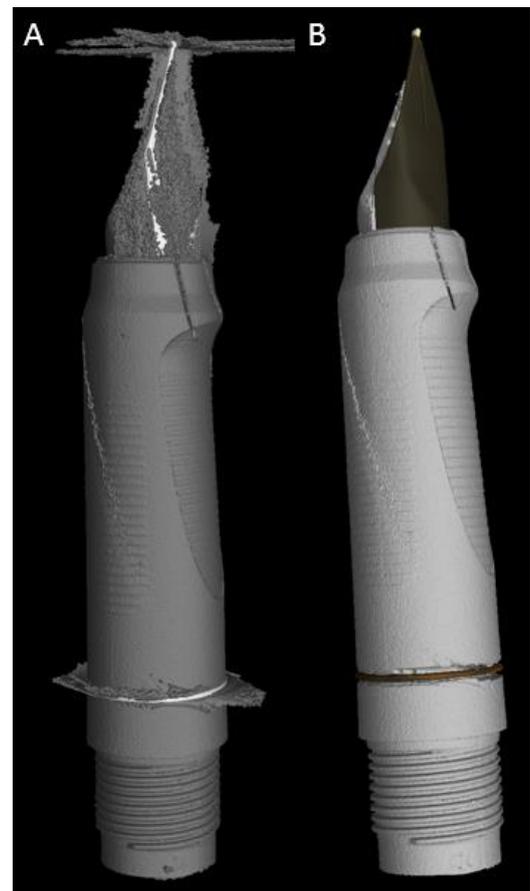


Abbildung 13: Füllhalter vor (A) und nach (B) (C) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4

In Abbildung 13 ist die 3D Projektion des Füllhalters vor und nach der Segmentierung zu erkennen. Im Bild A sind die Metallartefakte zu sehen, die sich teils sternförmig um die Stahlkomponenten ausgebreitet haben.

## 2.9 Oberflächenvergleich der Objekte

Die STL-Files der Objekte wurden dem 3D Drucker Ultimaker 3 übergeben und ausgedruckt. Der Füllhalter und das Oberteil des Legomanns wurde zusätzlich mit dem Formlabs Form 2 ausgedruckt. Dabei wurde ein Hightemp Harz verwendet. Der Füllhalter wurde in zweifacher Ausführung gedruckt. Eine Ausführung wurde zusätzlich mit UV Licht gehärtet.

Das segmentierte Legomannoberteil von der 1x1 4 pF Messung wurde zusätzlich im Massstab 2:1 ausgedruckt. Das bedeutet, dass sich das Volumen für den Drucker 8-mal grösser darstellt. Mit der Vergrößerung soll herausgefunden werden, wie sich die 3D Drucker bei grösseren Objekten verhalten und ob beim Soll-Ist Vergleich mit dem Originalobjekt eine Verbesserung betreffend Genauigkeit erzielt werden kann, da sich die Oberflächenabweichung dadurch theoretisch um die Hälfte vermindern sollte.

Die Drucke wurden wiederum mit dem Computertomographen gescannt, um die Oberflächenabweichungen der Drucke gegenüber den originalen Datensätze der Objekte zu ermitteln und darzustellen. Der Oberflächenvergleich wurde auch mit der Software VGSTUDIO MAX 3.3.4 durchgeführt. Dazu musste das originale STL-File in den Szenenbaum des gescannten Druckes importiert werden. Als zweiter Schritt musste eine Best-Fit-Registrierung durchgeführt werden. Die Best-Fit-Registrierung legt zwei Objekte übereinander und richtet das eine Objekt an einem anderen Objekt aus. Anschliessend konnte unter dem Menüpunkt «Analyse» ein Soll-Ist-Vergleich von zwei Objekten erstellt werden. Bei einem Soll-Ist-Vergleich werden Abweichungen von den einzelnen Strukturen farbcodiert dargestellt. Im Dialog wurde der maximale Abstand auf - 0.5 mm - +0.5 mm festgelegt. Innerhalb dieses Suchabstands berechnet die Analyse die exakten Abweichungswerte (Volume Graphics GmbH, 2019, S.8).

Das gescannte Objekt des Oberteils mit der zweifachen Vergrößerung wurde auf die Grösse des originalen Oberteils heruntergerechnet. So konnten auch in diesem Fall die Oberflächen verglichen werden.

### 3. Resultate

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der Ausmessungen des Anfotec Kalibrierteils aufgelistet und die Auswirkungen der einzelnen Parameterveränderungen aufgezeigt. Im Anschluss werden auch die Auswirkungen der verschiedenen Röhrenspannungen auf die drei Objekte dargelegt und anhand der Soll-Ist-Oberflächenvergleiche zwischen dem Originalscan und dem Scan des 3D Drucks wird die Genauigkeit der 3D Kopie bestimmt. Bilder der 3D Drucke von allen Objekten befinden sich im Anhang 6.

#### 3.1 Resultate Parameterbestimmungen Anfotec Kalibrierteil

Die Tabelle 5 stellt die Resultate der Datenqualitätsanalyse (ASTM E 1695) bei den Datensätzen mit einer Spannung von 190 Kilovolt mit 1mm Kupferfilter dar. Sie enthält Angaben zum Pixelrauschen, also zum Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis. Ebenfalls werden die ISO-50% Werte und die Scanzeit aufgelistet. Wie erwartet, steigt das CNR mit zunehmender Integrationszeit und grösserer Anzahl Projektionen. Obwohl der Sättigungsgrad bei einer höheren Kapazität und gleichbleibender Integrationszeit stark sinkt, ist keine Änderung des CNR zu beobachten. Damit bei einer höheren Kapazität eine Sättigung von ca. 70 % erreicht werden kann, muss die Integrationszeit mindestens verdreifacht werden. Das hat einen grossen Einfluss auf die Scanzeit. Die Iso-50-Werte variieren stark, nehmen jedoch mit erhöhten Parametern immer mehr zu.

Parameter	CNR	ISO-50-Wert	Scanzeit
190kv_2x2_2pF_1000IT_800NP	11	28962.5	13.45 min.
190kv_2x2_8pF_1000IT_800NP	11	36474.5	13.45 min.
190kv_2x2_8pF_3000IT_800NP	20	31520.5	40.45 min.
190kv_2x2_8pF_3000IT_1200NP	32	35052.0	60.45 min.

Tabella 5: Auswirkung Parameter auf CNR

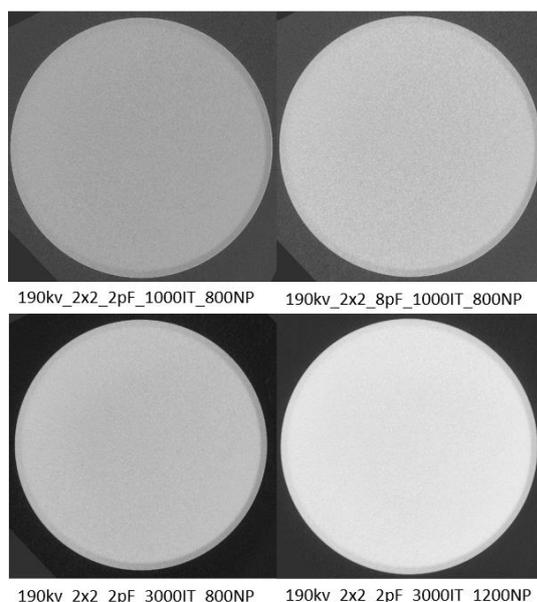


Abbildung 14: Anfotec Kalibrierteil, 2D Darstellung der Messresultate

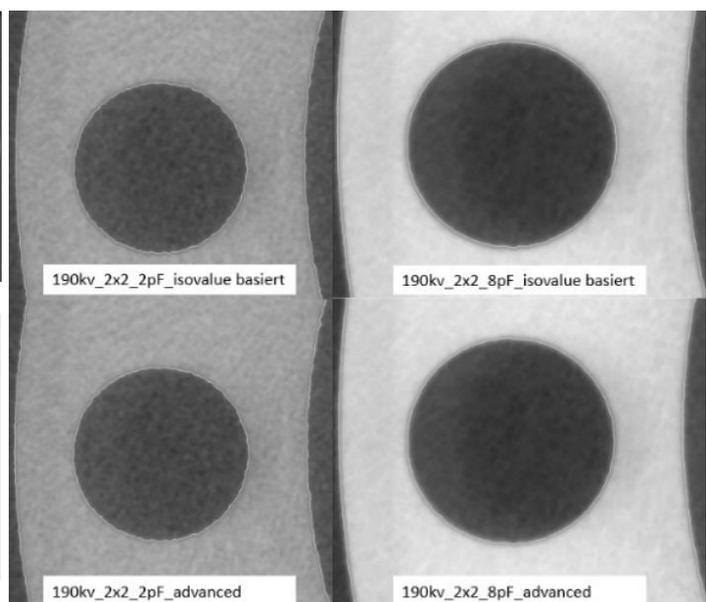


Abbildung 15: Anfotec Kalibrierteil, Darstellung der Kanten nach der Oberflächenbestimmung.

In Abbildung 14 sind Schnittbilder der Messungen bildlich dargestellt. Bei genauem betrachten, stellt sich heraus, dass das Rauschen in den Schnittbildern mit zunehmenden Parametern abnimmt. Auch der Kantenübergang zwischen Objekt und Luft wird klarer dargestellt. Die Abbildung 15 zeigt einen Vergleich zwischen der Messung mit einer Kapazität von 2 pF und der Messung mit einer Kapazität von 8 pF. Es ist gut zu sehen, dass die Kanten bei einer höheren Kapazität geradliniger dargestellt werden. Somit stellt sich die Oberfläche weniger rau dar als bei einer tieferen Kapazität. Das wirkt sich positiv auf den 3D Druck aus.

In den folgenden Tabellen wird eine Auswahl von Messresultaten dargestellt, die sich auf die Genauigkeit der Scans beziehen. Es handelt sich hier wiederum um alle Messungen, die mit einer Spannung von 190 kv und mit einem 1 mm Kupferfilter durchgeführt wurden. Bei den Messungen mit 100 kv und 150 kv ist ein Messfehler aufgetreten. Der Kalibrierzylinder befand sich während dem Scan nicht im Isozentrum. Aus diesem Grund haben sich die Radien des Objekts leicht verzogen. Die verschiedenen Durchmesser wurden mit einem zu tiefen Wert gemessen. Die genauen Messwerte befinden sich in einer Tabelle im Anhang 5.

Alu Kalibrierteil	190kv_2x2 2pF_1000IT_800NP					
Oberflächenbestimmung:	isovalue based, automatisch (globales Schwellwertverfahren)		advanced classic, from histogram (lokales Schwellwertverfahren)		+ iterative surface determination	
		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)
Distanz polar (mm):	25.019	+0.0105	25.02272	+0.01422	25.04518	<b>+0.03668</b>
Durchmesser 20 (mm):	19.9967	-0.0075	20.02228	+0.01808	20.0242	<b>+0.02</b>
Durchmesser 30 (mm):	30.05468	+0.04668	30.0573	<b>+0.0493</b>	30.0556	+0.0476
Durchmesser 3 links (mm):	2.98512	<b>-0.02408</b>	3.00102	-0.00818	3.00928	+0.00008
Durchmesser 3 rechts (mm):	2.9898	<b>-0.0188</b>	3.00956	+0.00096	3.00978	+0.00118

Tabelle 6: Messung mit 190kv, Kapazität: 2pF, Integrationszeit: 1000, Anzahl Projektionen: 800

Alu Kalibrierteil	190kv_2x2 8pF_1000IT_800NP					
Oberflächenbestimmung:	isovalue based, automatisch (globales Schwellwertverfahren)		advanced classic, from histogram (lokales Schwellwertverfahren)		+ iterative surface determination	
		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)
Distanz polar (mm):	25.01127	+0.00277	25.02862	+0.02012	25.03633	<b>+0.02783</b>
Durchmesser 20 (mm):	19.9977	-0.0065	20.02118	+0.01698	20.02308	<b>+0.01888</b>
Durchmesser 30 (mm):	30.05664	+0.04864	30.05698	<b>+0.04898</b>	30.05608	+0.04808
Durchmesser 3 links (mm):	2.99488	<b>-0.01432</b>	3.00762	-0.00158	3.00818	-0.00102
Durchmesser 3 rechts (mm):	2.98228	<b>-0.02632</b>	3.00442	-0.00418	3.0081	-0.0005

Tabelle 7: Messung mit 190kv, Kapazität: 8pF, Integrationszeit: 1000, Anzahl Projektionen: 800

Alu Kalibrierteil	190kv_2x2 8pF_3000IT_800NP					
Oberflächenbestimmung:	isovalue based, automatisch (globales Schwellwertverfahren)		advanced classic, from histogram (lokales Schwellwertverfahren)		+ iterative surface determination	
		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)		Abweichung zum Original (mm)
Distanz polar (mm):	25.02167	+0.01317	25.02578	+0.01728	25.04912	<b>+0.04062</b>
Durchmesser 20 (mm):	19.99574	-0.00846	20.0195	+0.0153	20.02086	<b>+0.01666</b>
Durchmesser 30 (mm):	30.0436	+0.0356	30.05472	<b>+0.04672</b>	30.0544	+0.0464
Durchmesser 3 links (mm):	2.99506	<b>-0.01414</b>	3.00476	-0.00444	3.01058	0.00138
Durchmesser 3 rechts (mm):	2.98528	<b>-0.02332</b>	3.00634	-0.00226	3.00756	-0.00104

Tabelle 8: Messung mit 190kv, Kapazität 8pF, Integrationszeit: 3000, Anzahl Projektionen: 800

Alu Kalibrierteil	190kv_2x2 8pF_3000IT_1200NP					
Oberflächenbestimmung:	isovalue based, automatisch (globales Schwellwertverfahren)		advanced classic, from histogram (lokales Schwellwertverfahren)		+ iterative surface determination	
		Abweichung zum Original		Abweichung zum Original		Abweichung zum Original
Distanz polar (mm):	25.01785	+0.00935	25.03593	+0.02743	25.03729	<b>+0.02879</b>
Durchmesser 20 (mm):	19.9922	-0.012	20.01818	0.01398	20.01976	<b>0.01556</b>
Durchmesser 30 (mm):	30.05474	+0.04674	30.05594	<b>0.04794</b>	30.05594	<b>0.04794</b>
Durchmesser 3 links (mm):	2.996	<b>-0.0132</b>	3.0086	-0.0006	3.0093	0.0001
Durchmesser 3 rechts (mm):	2.99757	<b>-0.01102</b>	3.00582	-0.00278	3.00852	-0.00008

Tabelle 9: Messung mit 190kv, Kapazität: 8pF, Integrationszeit: 3000, Anzahl Projektionen: 1200

Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass nach Anwendung des globalen Schwellwertverfahrens die verschiedenen Innendurchmesser zu klein gemessen werden. Nach Anwendung des lokalen Schwellwertverfahrens werden die Innendurchmesser zu gross gemessen. Bei beiden Anwendungen wird der Aussendurchmesser bei allen Messungen um mindesten 35 µm zu gross gemessen. Aussagen zu den Messungen bezüglich, welche Parameter wie stark einen Einfluss auf die Genauigkeit der Oberfläche haben, sind mit diesen Messresultaten schwierig zu treffen, da sich von den Werten keine klare Struktur und Tendenz ableiten lassen.

### 3.2 Resultate Holzhasen

Beim Holzhasen wurden, wie im Kapitel 2.7 erwähnt, insgesamt vier verschiedene Messungen durchgeführt. An den vier verschiedenen Datensätzen wurden die gleichen Segmentierungsmethoden und Bearbeitungsfunktionen angewendet. Diese wurden im Kapitel 2.8.1 Segmentierung Holzhasen ausführlich beschrieben. Die Oberflächenbestimmungen konnten bei allen vier Datensätzen erfolgreich durchgeführt werden. Jedoch hat sich bei den Messungen mit dem Kupferfilter herausgestellt, dass die Segmentierung und die Fremdpartikelentfernung wesentlich weniger Zeit in Anspruch nahmen, da durch die harte Strahlung, die einzelnen Partikel der XPS Halterung besser von dem Lindenholz abgegrenzt werden konnten.

Die Abbildung 16 zeigt Schnittbilder der verschiedenen Datensätzen bei unterschiedlicher Spannung. Die Breite des Scans des Holzhasen wurde mit einer Linie an der gleichen Stelle im Objekt gemessen. Es ist zu beobachten, dass die Breite mit zunehmender Spannung abnimmt. Der Materialübergang von Lindenholz zu Luft wird bei einer höheren Spannung schärfer abgebildet. Die Oberfläche des Objekts kann originalgetreuer dargestellt werden, da sich die Grauwerte abrupter ändern.

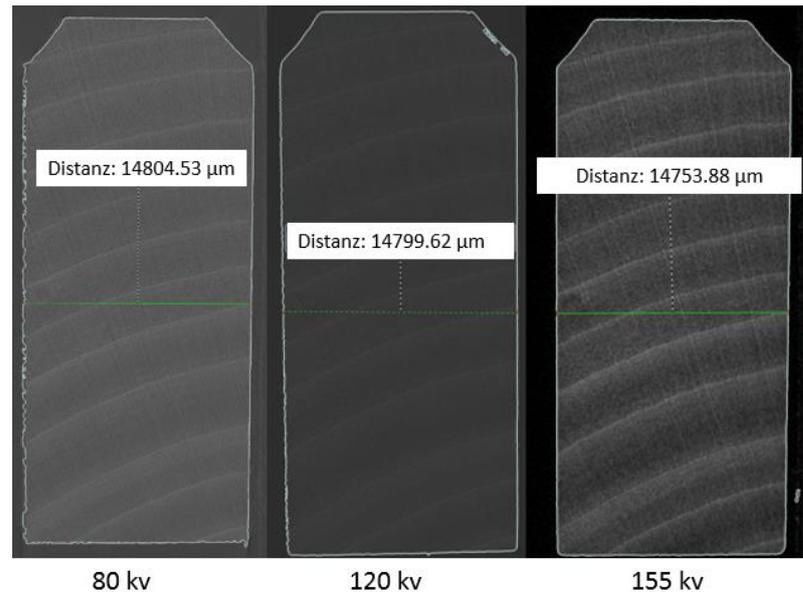


Abbildung 16: Vermessung von Schnittbildern bei unterschiedlicher Spannung

Da sich die Oberfläche im Datensatz mit einer Röhrenspannung von 155 kv, im Vergleich zu den anderen Messungen, am homogensten darstellt und sich die Segmentierung als einfach erwiesen hat, wurde dieser Datensatz für den 3D Druck mit dem Ultimaker 3 verwendet.

Das 3D gedruckte Objekt wurde mit dem Computertomographen gescannt. Das Datenblatt mit den verschiedenen Parametern befindet sich im Anhang 7.

Die Abbildung 17 stellt den Soll-Ist-Vergleich farbcodiert dar.

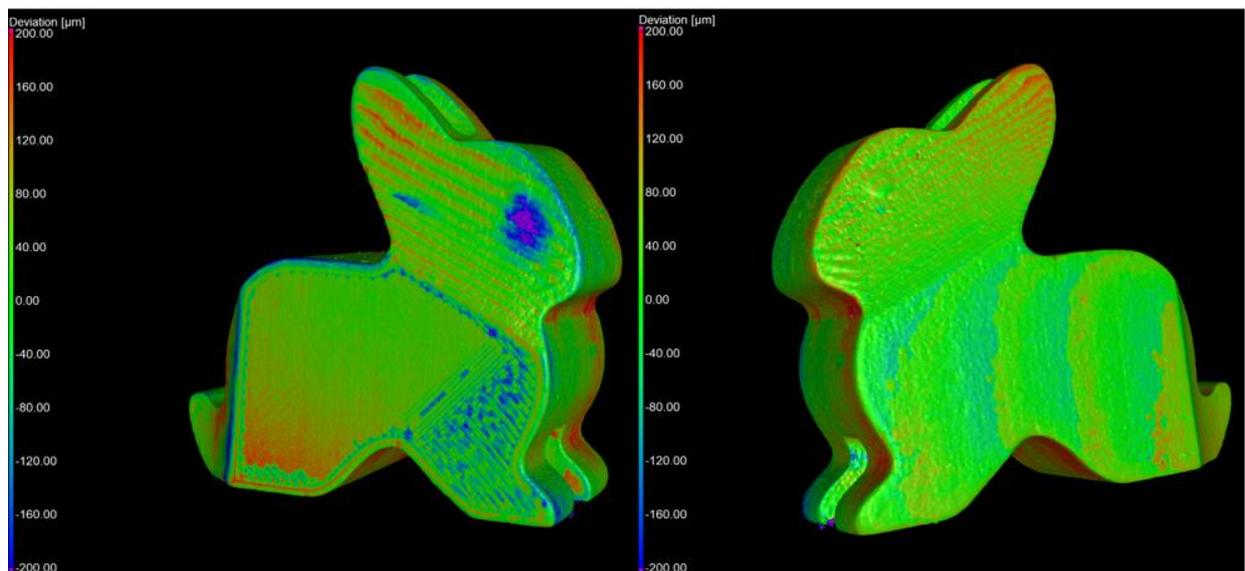


Abbildung 17: Soll-Ist-Vergleich Holzhasen, farbcodierte 3D-Bilder

Die grün eingefärbten Bereiche im 3D Bild weisen eine Abweichung zwischen  $-40 \mu\text{m}$  und  $+40 \mu\text{m}$  vom 3D Druck zum Original Objekt auf. Die dunkelblau eingefärbten Bereiche weisen eine negative Abweichung von maximal  $200 \mu\text{m}$  auf. Das bedeutet, dass in diesen Bereichen der 3D Drucker zu wenig Material verwendet hat. Die roten Bereiche wiederum weisen eine positive Abweichung von maximal  $200 \mu\text{m}$  auf. Somit wurde in diesen Bereichen von 3D Drucker zu viel

Material verwendet. Nicht gedruckte Bereiche werden mit der Farbe violett markiert. Bereiche, die eine positive Abweichung von 200  $\mu\text{m}$  überschreiten, werden pink markiert. Im 3D Bild fällt der Bereich um das rechte Auge des Hasen auf. Dieser Bereich wurde pink eingefärbt und besitzt darum einen hohen Abweichungswert. Dieser Wert ist aber nicht auf eine Ungenauigkeit des 3D Druckers zurückzuführen. Beim Entfernen des Objekts aus dem 3D Drucker wurde in dieser Zone ein zu starker Druck ausgeübt. Aus diesem Grund hat sich die Oberfläche minimal ins Negative verformt.

Für eine genauere Analyse müssen die 2D Schnittbilder betrachtet werden (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Soll-Ist-Vergleich Holzhase, farbcodierte 2D-Schnittbilder in Seitenansicht (links) und Frontalansicht (rechts)

Die Abweichung wird mit Haarlinien dargestellt. Je länger die Haarlinien sind, desto stärker ist die Abweichung. So ist zum Beispiel an der Stirn des Holzhasen zu erkennen, dass dort die Abweichung minimal ist. Jedoch treten bei Bereichen mit kleineren Radien stärkere Abweichungen auf. Dieses Phänomen kann man gut am Nacken des Holzhasen beobachten. Die Haarlinien an dieser Stelle sind pink gekennzeichnet und sind länger dargestellt. Das bedeutet, dass beim 3D Druck zu viel Material aufgetragen wurde. Die gleiche Problematik ist in der Frontalansicht beim Bohrloch zu betrachten. Das Bohrloch ist eine sehr feine Struktur. Je dünner das Bohrloch ist, desto weniger genau kann der Ultimaker 3 auf die Strukturen eingehen. An den dünnsten Stellen wurde der Hohlraum komplett mit Material aufgefüllt.

Um einen Überblick über die berechneten Abweichungen für die gesamte analysierte Oberfläche des ausgewählten Objekts zu erhalten, bildet der Soll-Ist-Vergleich ein Abweichungshistogramm ab. Das Abweichungshistogramm des Holzhasen wird in Abbildung 19 dargestellt. Im Abweichungshistogramm ist die Verteilung der Oberflächenabweichungen gut ersichtlich. In diesem Histogramm wurde ein Intervall zwischen -200  $\mu\text{m}$  und +200  $\mu\text{m}$  erstellt. Der Mittelwert im festgelegten Intervall befindet sich bei 38.39  $\mu\text{m}$ . Die Standardabweichung der Abweichungen beträgt 58.42  $\mu\text{m}$ . 99.44% von der gesamten Oberfläche befindet sich im

festgelegten Intervall. Die blaue vertikale Linie bei dem Wert  $-300 \mu\text{m}$  und die pinke vertikale Linie bei  $+300 \mu\text{m}$  zeigen die Oberflächen an, die über dem Maximalabstand liegen.

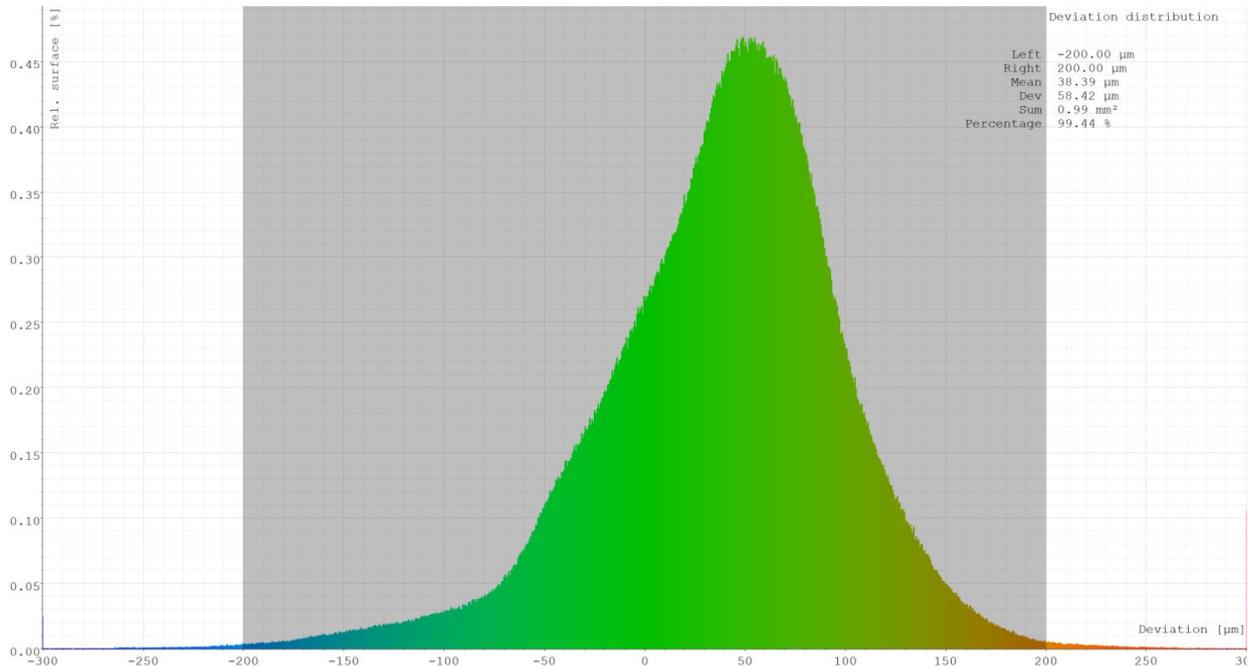


Abbildung 19: Abweichungshistogramm Holzase

Es wird zusätzlich ein kumuliertes Histogramm berechnet. Dieses Histogramm zeigt die kumulierte Oberfläche für einen bestimmten Abweichungswert in relativen Werten an. Dieser Wert ist eine Ableitung von den Histogramm Daten. Die y-Achse zeigt die normalisierte Oberfläche an. Die x-Achse zeigt die absolute Abweichung. Im kumulierten Histogramm in der Abbildung 20 ist zu erkennen, dass 38% der analysierten Oberfläche weniger als  $40 \mu\text{m}$  vom Soll-Wert abweichen.

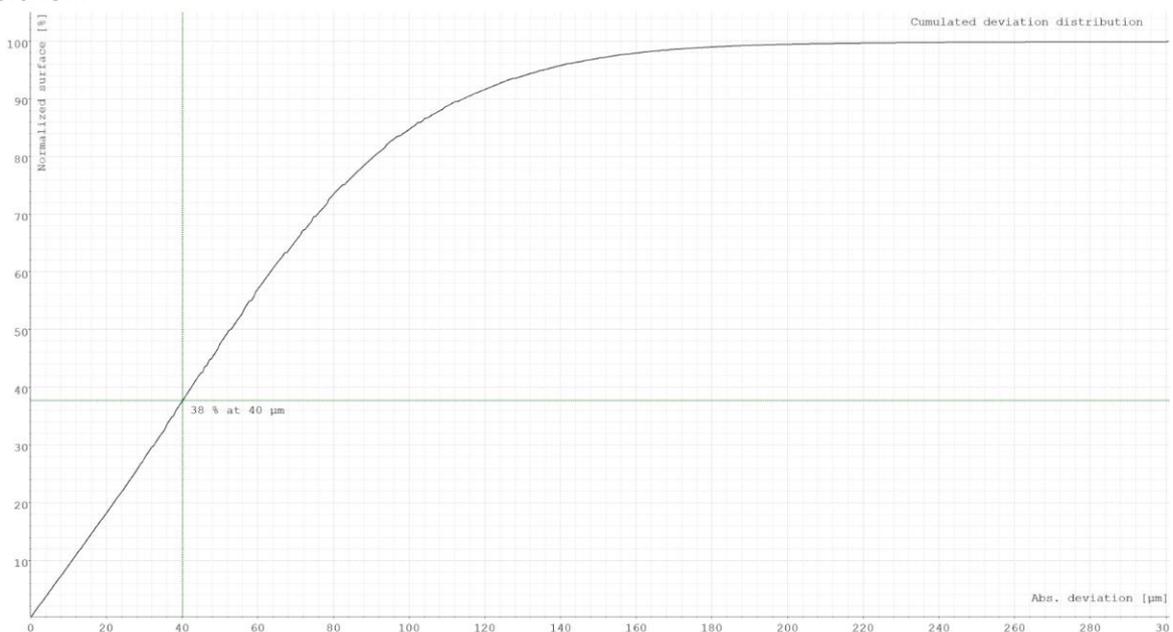


Abbildung 20: kumulatives Abweichungshistogramm Holzase

### 3.3 Resultate Legomann

Wie im Kapitel 2.7 erwähnt, wurden beim Legomann insgesamt vier verschiedene Messungen durchgeführt. An den vier verschiedenen Datensätzen wurden die gleichen Segmentierungsmethoden und Bearbeitungsfunktionen angewendet. Diese wurden im Kapitel 2.8.2 Segmentierung Legomann ausführlich beschrieben.

Die Abbildung 21 zeigt Schnittbilder im Bereich des Stechsystems zwischen der Hose und dem Oberteil. Die Beschriftungen weisen auf die verschiedenen Spannungen hin. Es ist zu erkennen, dass die Schnittbilder mit der Spannung 80 kv/ 120 kv einen besseren Kontrast zwischen den zwei Komponenten aufweisen.

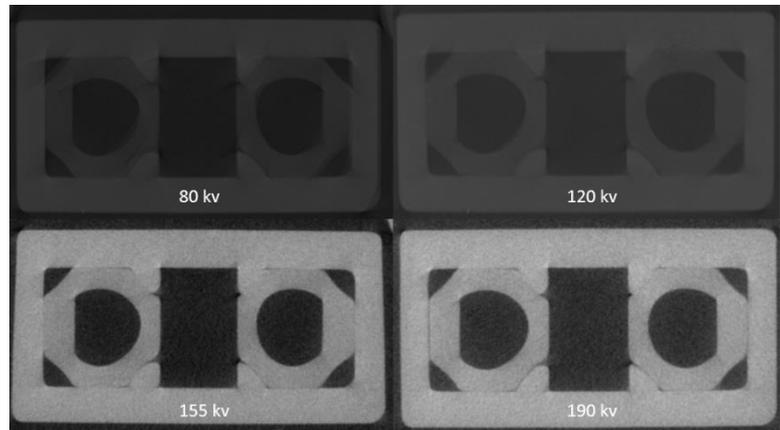


Abbildung 21: Darstellung der Schnittbilder von dem Stechsystem zwischen Hose und Oberteil im Zusammenhang mit verschiedenen Spannungen

Der Grund dafür ist der höhere Röhrenstrom. Da die Leistung bei den verschiedenen Messungen konstant 30 Watt betrug, resultierten bei den tieferen Spannungen höhere Röhrenströme. Der Röhrenstrom hat einen grossen Einfluss auf den Kontrast (siehe Kapitel 2.2.2). Die Kanten werden bei den Schnittbildern mit der Spannung 155 kv/190 kv klarer dargestellt. Bei der Segmentierung stellte sich heraus, dass bei den tieferen Spannungen die einzelnen Komponenten besser voneinander getrennt werden konnten. Aus diesem Grund konnte der Segmentierungsprozess bei dem Datensatz mit 120 kv am erfolgreichsten durchgeführt werden. Dieser Datensatz wurde für den 3D Druck verwendet. Das Oberteil wurde mit dem Ultimaker 3 und dem Formlabs Form 2 gedruckt.

Die Abbildung 22 stellt den farbcodierten Soll-Ist-Vergleich zwischen dem Originalobjekt und dem Ultimaker 3 3D Druck dar.

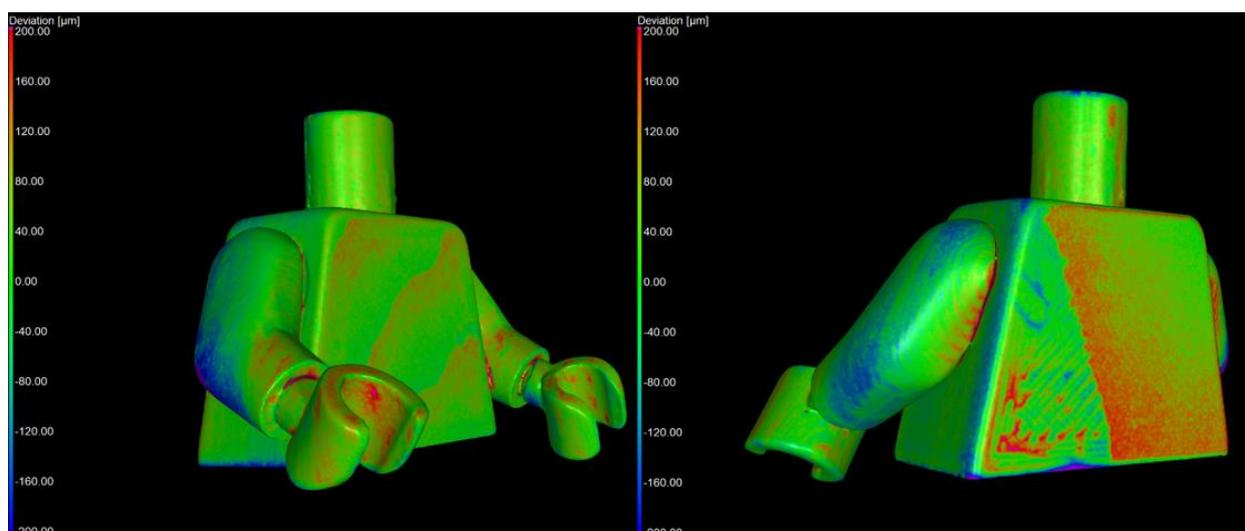


Abbildung 22: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, farbcodierte 3D-Bilder

Auffällig sind die blau eingefärbten Ellbogen und die leicht rot eingefärbten Stellen am Hals und am Rücken. Die Ungenauigkeit beim Ellbogen könnte auf die komplizierte geometrische Struktur zurückzuführen sein. Es ist auch gut zu erkennen, dass dem 3D Drucker feinere Strukturen mehr Mühe bereiten.

Die Abbildung 23 zeigt farbcodierte Schnittbilder von der frontalen und der transversalen Ansicht.



Abbildung 23: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, farbcodierte 2D-Schnittbilder in Frontalansicht (links) und Transversalansicht (rechts)

Beide Ansichten streichen hauptsächlich die inneren Strukturen des Oberteils heraus. Diese werden fast komplett pink markiert. Das bedeutet, dass die einzelnen feinen Hohlräume vom Drucker mit Material aufgefüllt wurden. Für eine 3D Kopie, bei der die äussere Oberfläche relevant ist, spielen die starken Abweichungen im Inneren des Objekts keine Rolle.

Die Abbildung 24 stellt den farbcodierten Soll-Ist-Vergleich zwischen dem STL-File und dem Formlabs Form 2 3D Druck dar.

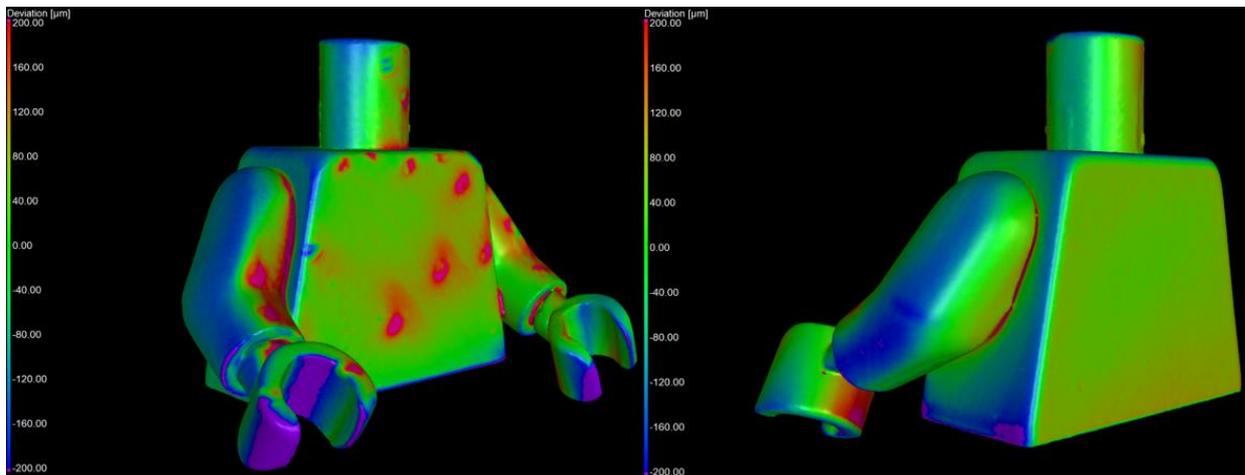


Abbildung 24: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil (Formlabs Form 2), farbcodierte 3D-Bilder

Es ist zu erkennen, dass sich die Kanten und Flächen gegenüber dem 3D Druck des Ultimaker 3 viel glatter darstellen. Jedoch weichen die Strukturen stärker vom Original ab. Diese Problematik ist hauptsächlich bei den Armen und den Händen ersichtlich. Augenfällig sind auch die roten Punkte auf der Vorderseite des Objekts. Diese Bereiche sind die Bruchstellen der Stützstrukturen, die bei der Herstellung des 3D Drucks benötigt wurden. Die Bruchstellen könnten mit einer Feile korrigiert werden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die restliche Oberfläche nicht beschädigt wird.

Die Abbildung 25 zeigt ein farbcodiertes Schnittbild in der Frontalansicht. Der Formlabs Form 2 konnte die inneren Strukturen besser wiedergeben als der Ultimaker 3. Die Abweichungen über 200  $\mu\text{m}$  im Inneren des Objekts sind minimal. Sie befinden sich mehrheitlich im grünen Bereich. Die Hohlräume in den Armen des Objekts wurden bei dem 3D Druck ausgefüllt.

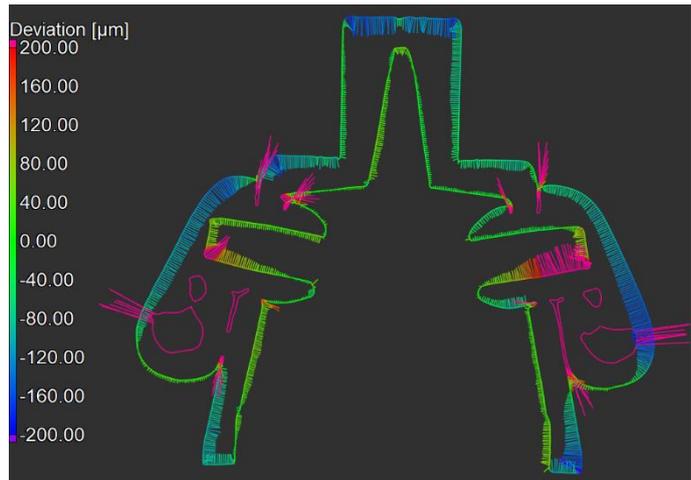


Abbildung 25: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil (Formlabs Form 2), farbcodiertes 2D-Schnittbild in Frontalansicht

In Abbildung 26 sind die farbcodierten 3D Darstellungen der Soll-Ist-Vergleiche von dem 1x1 4 pF Datensatz ersichtlich. Die oberen zwei Bilder vergleichen den 1:1 3D Druck mit dem Originalobjekt. Die unteren zwei Bilder vergleichen den 2:1 3D Druck mit dem Originalobjekt. Da

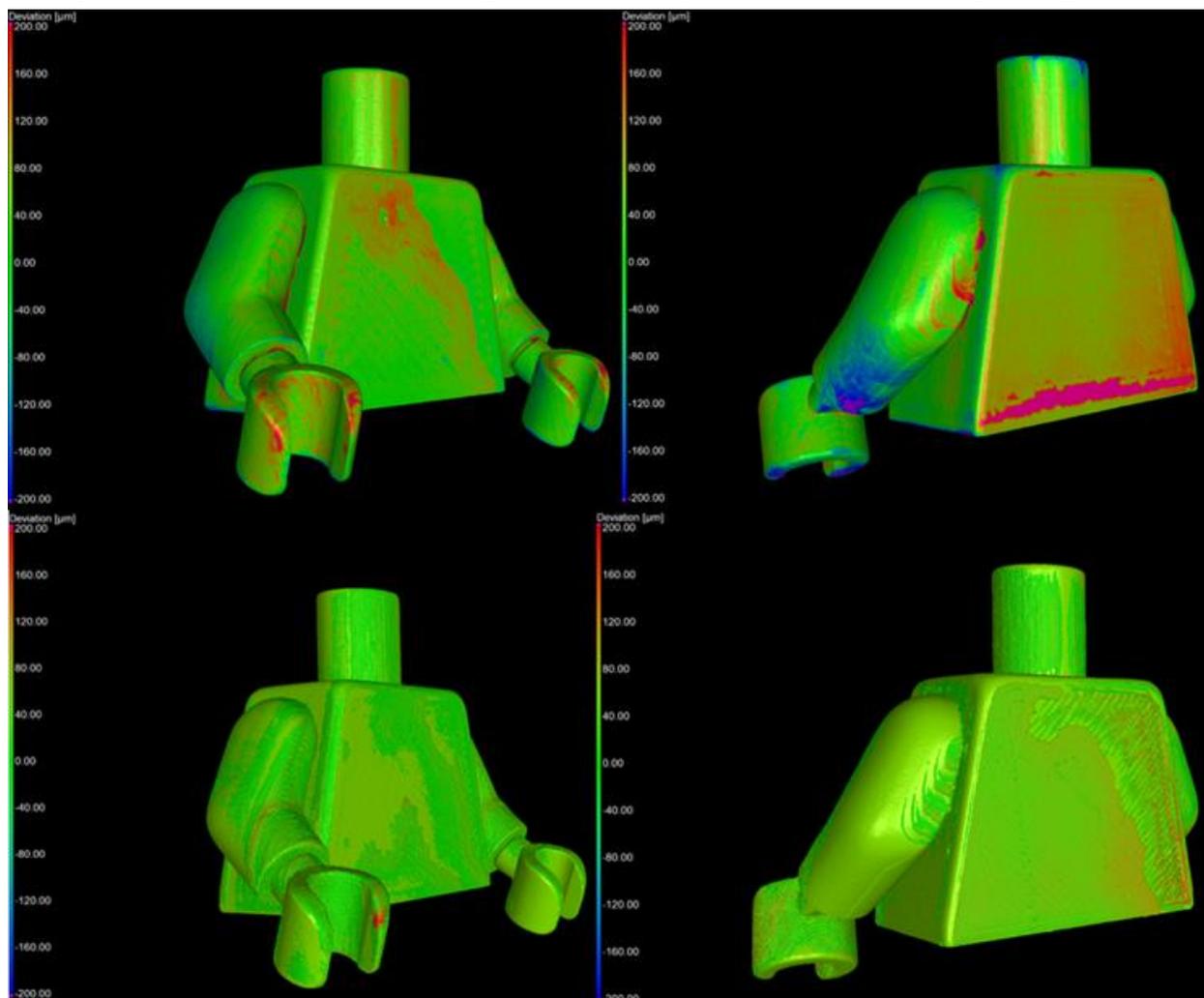


Abbildung 26: Soll-Ist-Vergleiche Legomann Oberteil, 1x1\_4pF (oben), 1x1\_4pF 2:1 vergrößert (unten)

das Volumen beim 2:1 3D Druck auf die Masse des Originalobjekts angepasst werden konnte,

konnten die Abweichungen um einen Faktor 2 verringert werden. Es ist sehr gut zu sehen, dass sich die Flächen im unteren Bild, bis auf ein paar Ausnahmen, hauptsächlich grün darstellen. Das ist auf eine geringere Abweichung vom Original zurückzuführen.

In Abbildung 27 sind Schnittbilder von der Frontalansicht der Soll-Ist-Vergleiche des 1:1 3D Drucks, der sich links in der Abbildung befindet, und des 2:1 3D Drucks, welcher sich rechts in der Abbildung darstellt, zu sehen. Die Haarlinien an der Aussenfläche des 2:1 3D Drucks stellen sich sehr kurz dar. Die Oberflächen des 3D Drucks und des Originals sind also fast identisch. Die inneren Strukturen weisen vor allem beim Hals und in den Schultergelenken grössere Abweichungen auf. Spannenderweise konnte der 3D Drucker beim 1:1 3D Drucks trotz des kleineren Volumens die inneren Halsstrukturen originalgetreuer ausdrucken. Jedoch weicht die Aussenfläche stärker vom Original ab.

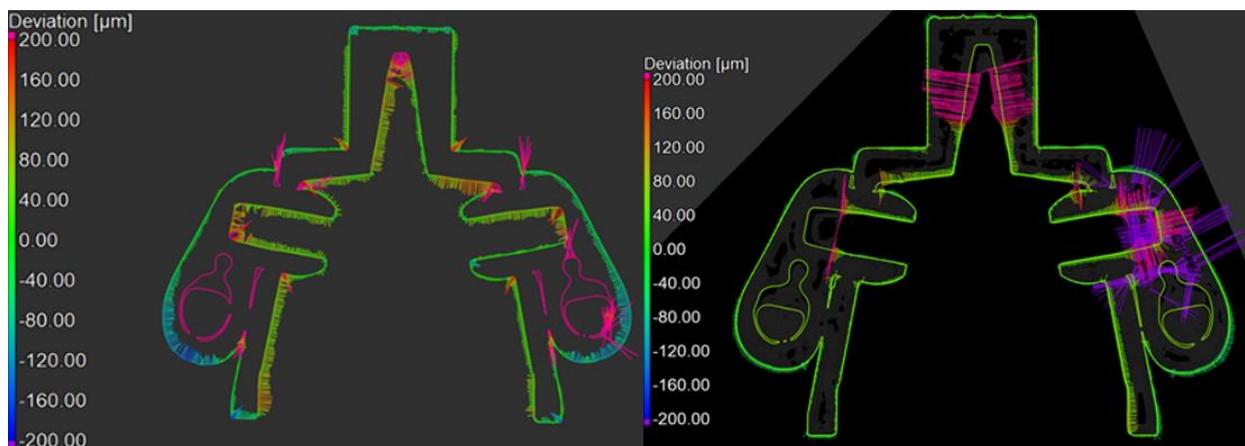


Abbildung 27: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, 2D-Schnittbilder in Frontalansicht, 1x1\_4pF (links), 1x1\_4pF 2:1 vergrößert (rechts)

Auf Seite 31 sind die Abweichungshistogramme der vier genannten Soll-Ist-Vergleiche des Oberteils abgebildet. Wenn die Abweichungshistogramme von Abbildung 28 und Abbildung 29 miteinander verglichen werden, muss festgestellt werden, dass der Prozentsatz der Abweichungen im festgelegten Intervall bei dem Formlabs Form 2 3D Druck minimal höher ist. Jedoch ist die Streuung der Abweichungen grösser als beim Ultimaker 3. Die Standardabweichung der Abweichung beträgt 19.2 µm mehr. Es ist bei beiden Histogrammen zu erkennen, dass sich mehrere Bereiche über der Grenze von +500 µm befinden. Damit sind die Hohlräume im Innern des Objekts gemeint, die von beiden Druckern ungenügend genau kopiert wurden. Bei einer Gegenüberstellung der Abbildung 28 (2x2\_8 pF) mit der Abbildung 30 (1x1\_4 pF) ist festzustellen, dass die Standardabweichung der Abweichung bei einem Scan mit einer halb so grossen Voxelgrösse leicht kleiner ist. Bei diesem Vergleich beträgt der Unterschied 5.95 µm. Dieser Unterschied hat jedoch eine grössere Auswirkung auf die Oberfläche (Sum) und den Prozentsatz der Oberfläche (Percentage) innerhalb des Intervalls.

Die Abbildung 31 zeigt das Abweichungshistogramm des 2:1 3D Drucks. Das Histogramm zeigt, dass sich 86.05% der gesamten Oberfläche im gesetzten Intervall zwischen -100 µm und +100 µm befinden. Trotz halb so grossem Intervall wie bei dem 1:1 Ausdruck ist der Prozentsatz praktisch gleichgeblieben. Werden der Mittelwert und die Standardabweichung miteinander verglichen, sind auch dort verbesserte Werte, um ungefähr den Faktor 2 zu beobachten.

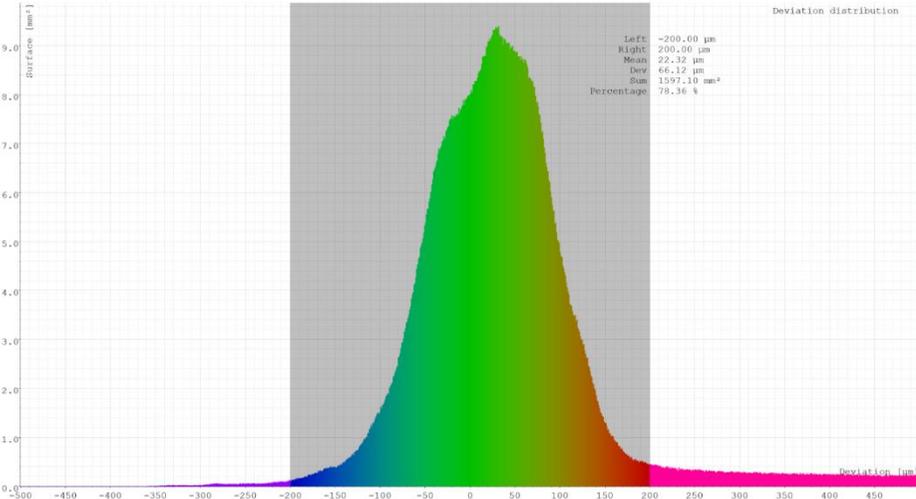


Abbildung 29: Abweichungshistogramm 2x2\_8pF mit Ultimaker 3

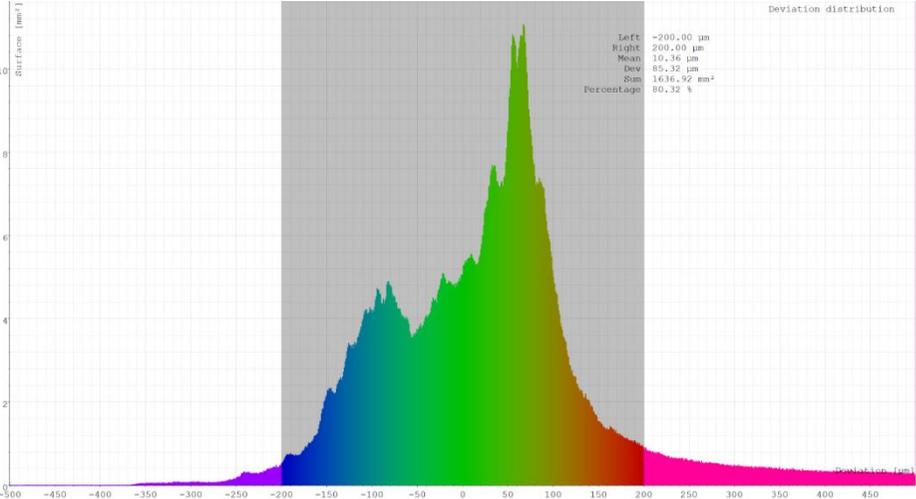


Abbildung 28: Abweichungshistogramm 2x2\_8pF mit Formlabs Form 2

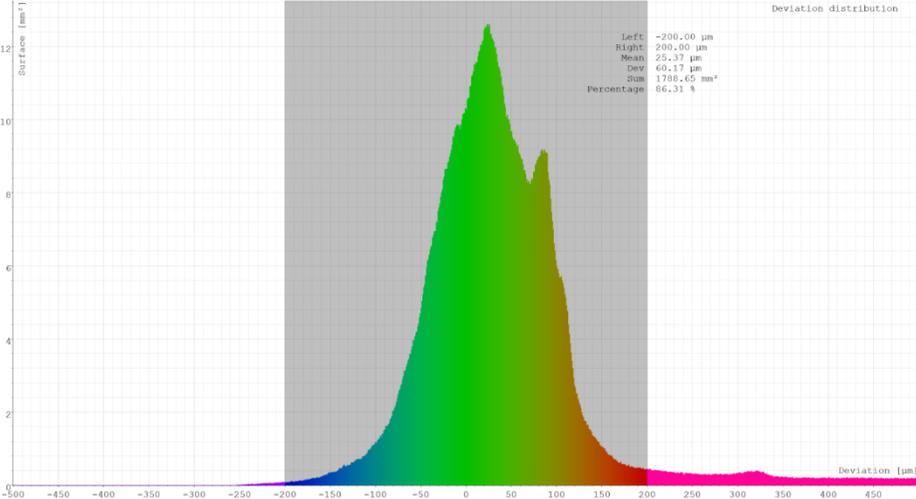


Abbildung 31: Abweichungshistogramm 1x1\_4pF mit Ultimaker 3

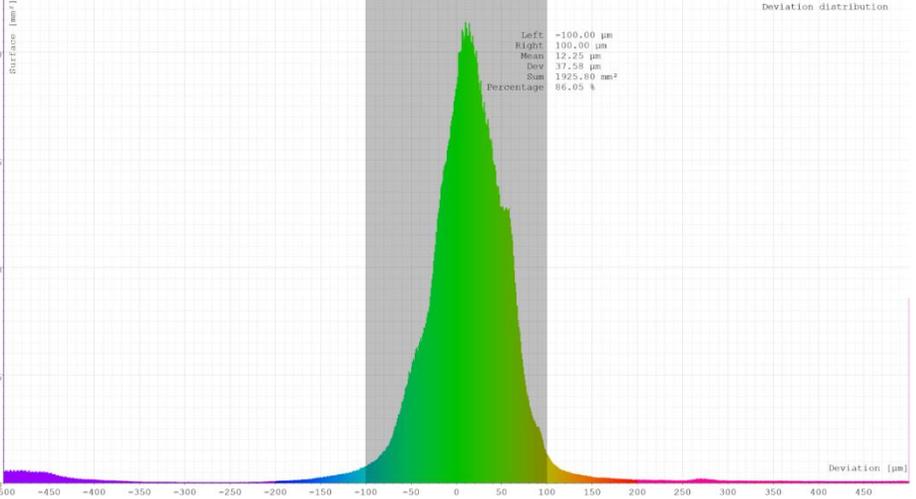


Abbildung 30: Abweichungshistogramm 1x1\_4pF mit Ultimaker 3: 2:1 3D Druck

Ein Vergleich zwischen den kumulativen Histogrammen bestätigt die Beobachtungen an den Abweichungshistogrammen. Die Tabelle zeigt die gemessenen Werte der kumulativen Histogramme. Die kumulativen Histogramme werden im Anhang 8 dargestellt.

Name	Prozentsatz der Oberfläche unter 40 $\mu\text{m}$
2x2_8pF mit Ultimaker 3	33%
2x2_8pF mit Formlabs Form 2	22%
1x1_4pF mit Ultimaker 3	41%
1x1_4pF mit Ultimaker 3: 2:1 3D Druck	57%

Tabelle 10: Prozentsätzen der Oberflächen unter 40  $\mu\text{m}$

Bei der allgemeinen Betrachtung der kumulativen Histogramme ist festzustellen, dass je steiler der Anstieg der Kurve ist, desto besser ist das Resultat des Oberflächenvergleichs.

Anhand des Kopfs des Legomanns wurde ebenfalls einen Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Dort wurde der Scan des Originals mit einem Ultimaker 3 3D Druck verglichen. Die Resultate dieses Vergleichs befinden sich im Anhang 9.

### 3.4 Resultate Füllhalter

Wie im Kapitel 2.7 erwähnt, wurden beim Füllhalter insgesamt vier verschiedene Messungen durchgeführt. Diese vier Datensätze wurden, nach dem im Kapitel 2.8.3 erwähnten Prozess, nachbearbeitet. Jedoch konnten an den Datensätzen mit den Röhrenspannungen 80 kv und 120 kv keine genügend gute Multimaterialoberflächenbestimmungen durchgeführt werden, da die Metallartefakte zu dominant waren und diese darum die Oberflächen der Kunststoffanteile im Griff des Füllhalters zu stark beeinträchtigten. Aus diesem Grund wurden die Datensätze mit den Röhrenspannungen 155 kv mit Filter und 190 kv mit Filter für die Segmentierung und Nachbearbeitung ausgewählt.

Um die Auswirkungen der Metallartefakte auf die Präzision der Oberflächenbestimmung zu überprüfen, wurde die Dicke der Stahlfeder des Füllhalters gemessen. Die Abbildung 32 zeigt Schnittbilder von der gleichen Position der Datensätze mit 155 kv/190 kv Röhrenspannung. Die bestimmte Oberfläche wird durch cyanfarbene Linien gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass die gemessene Dicke der Feder beim 155 kv Datensatz 1.02  $\mu\text{m}$  mehr beträgt als beim 190 kv Datensatz, obwohl eine Lücke zwischen der Oberfläche der Stahlfeder und des Kunststoffteils existiert. Dieser Effekt ist auf die erhöhte Anzahl der Streustrahlung von den niederenergetischen Röntgenstrahlen zurückzuführen. Die Streustrahlen verfälschen die CT Darstellung des Stahls enorm und somit kann keine

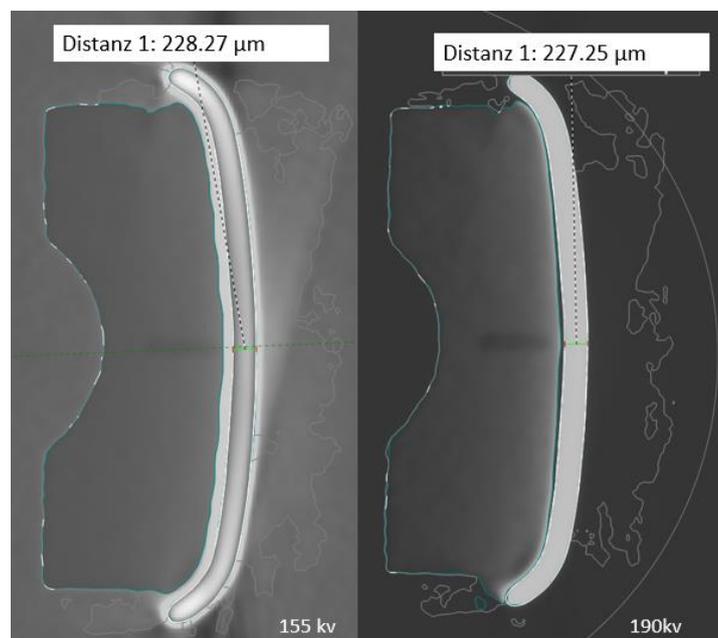


Abbildung 32: Darstellung des Übergangs zwischen Stahl und Kunststoff abhängig von unterschiedlichen Spannungen

wahrheitsgetreue Reproduktion mehr gewährleistet werden. Beim Datensatz mit einer Röhrenspannung von 190 kv liegen die Oberflächen der zwei Komponenten dicht aufeinander und die Abgrenzung der Graustufen zwischen Stahl und Luft ist klarer dargestellt. Aus den genannten Gründen wurde der 190 kv Datensatz für den 3D Druck vorbereitet und anschliessend mit dem Ultimaker 3 und dem Formlabs Form 2 gedruckt.

Die Abbildung 33 zeigt den Soll-Ist-Vergleich des Füllhalters mit der Ultimaker 3 3D Kopie. In de 3D Ansichten fällt vor allem die violett eingefärbte Spitze der Feder auf. Das bedeutet, dass dieser Teil nicht kopiert wurde. Diese Struktur war für die Filamente des Ultimaker 3 zu dünn. Die nötige Stabilität konnte nicht aufgebaut werden. In der 2D-Ansicht ist zu erkennen, dass die dünnen Schnitte, durch welche die Tinte, die durch den Kapillareffekt von der Patrone zur Federspitze fliesst, ebenfalls nicht kopiert werden konnten. Diese Bereiche wurden mit dem PLA-Kunststoff aufgefüllt. Auch der dünne Hohlraum zwischen der Feder und dem Kunststoffteil wurde komplett mit Material aufgefüllt.

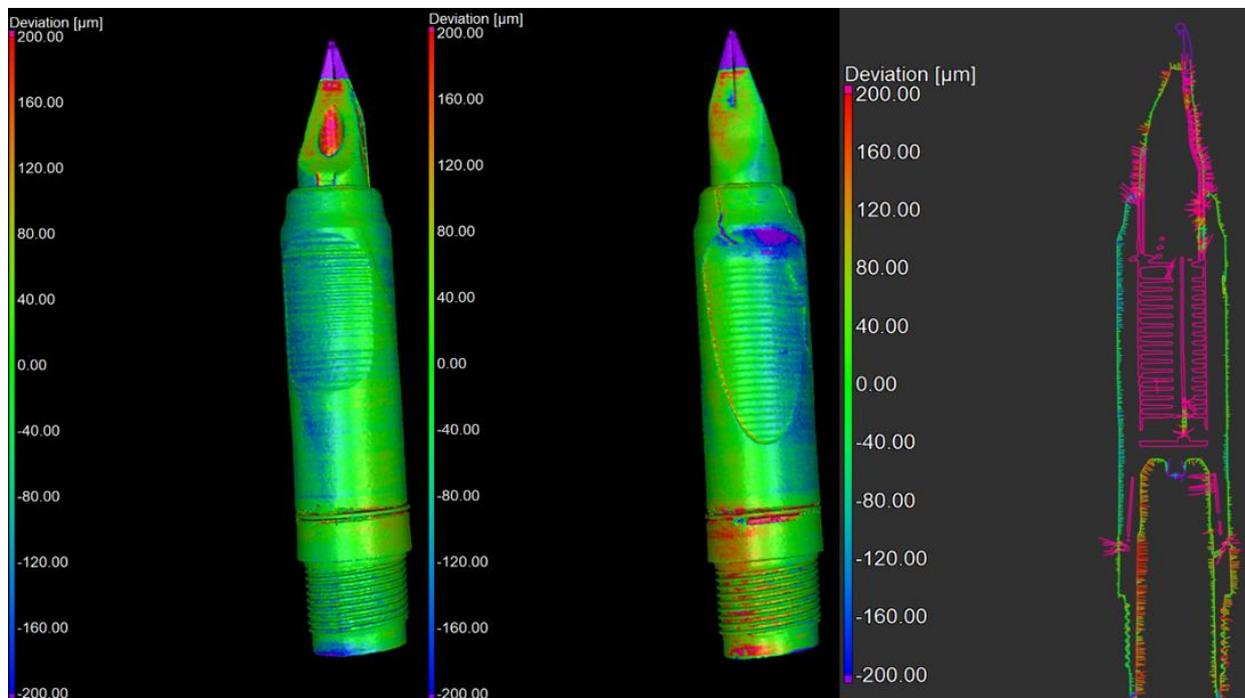


Abbildung 33: Soll-Ist-Vergleich Füllhalter (Ultimaker 3), farbcodierte 3D-Bilder (links, mitte), farbcodiertes 2D-Schnittbild (rechts)

Die Abbildung 34 zeigt den Soll-Ist-Vergleich des Füllhalters mit der Formlabs Form 2 Kopie. Verglichen mit dem Soll-Ist-Vergleich von Abbildung 33 konnte die Federspitze genauer reproduziert werden. Jedoch konnte auch hier nicht die ganze Spitze gedruckt werden. Weiter sind die Bruchstellen der Stützstrukturen noch gut zu erkennen. Ausserdem konnten die dünnen Schnitte für die Kapillarwirkung nicht reproduziert werden.

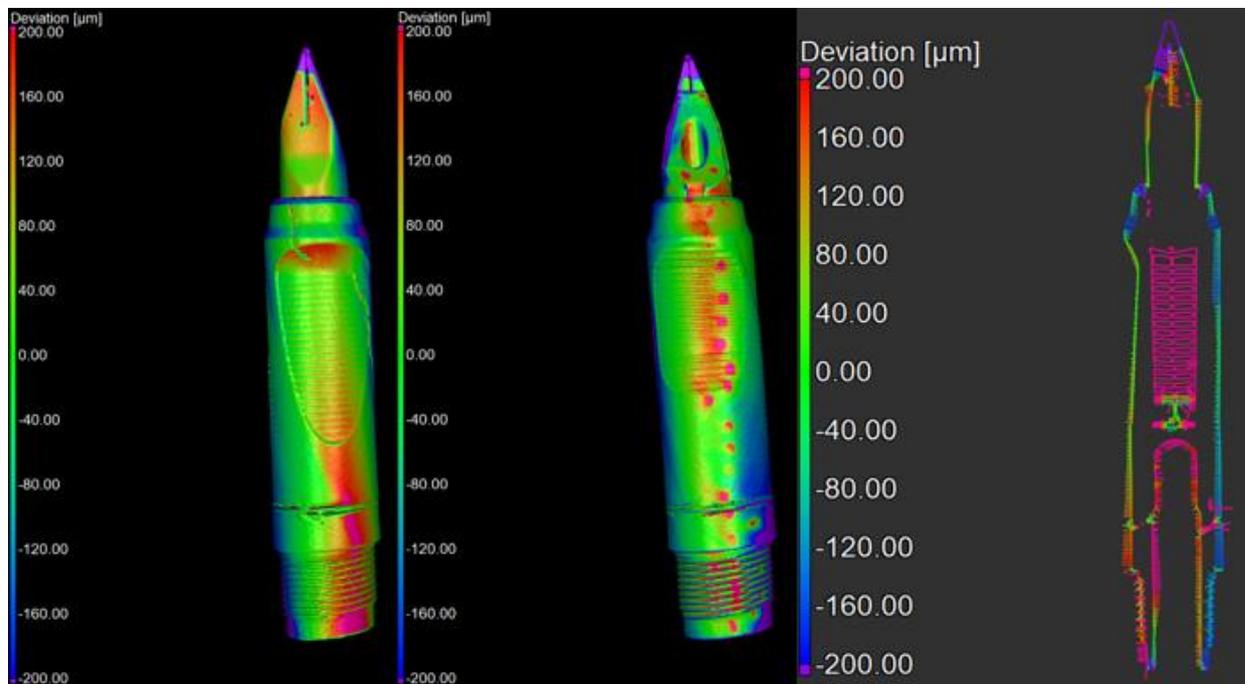


Abbildung 34: Soll-Ist-Vergleich Füllhalter (Formlabs Form 2), farbcodierte 3D-Bilder (links, mitte), farbcodiertes 2D-Schnittbild (rechts)

Auf der Seite 35 befinden sich die Abweichungshistogramme der Soll-Ist-Vergleiche des Füllhalters. Die 3D Kopie des Formlabs Form 2 schneidet gegenüber der Kopie des Ultimaker 3 schlechter ab. Die Standardabweichung der Abweichungen beträgt  $98.66 \mu\text{m}$ . Das sind  $17.61 \mu\text{m}$  mehr als beim Ultimaker 3. Jedoch befindet sich mit  $58.72\%$  ein höherer Prozentsatz der Oberfläche im festgelegten Intervall (Prozentsatz Ultimaker 3:  $50.71\%$ ). Beide Abweichungshistogramme zeigen einen hohen Anteil von Oberflächen an, die ausserhalb des gewählten Intervalls liegen. Der violette Anteil ist bei beiden Vergleichen auf die fehlende Federspitze zurückzuführen. Der pinke Anteil bezieht sich auf die aufgefüllten Strukturen im Inneren des Füllhalters. Der UV-gehärtete 3D Druck wurde ebenfalls mit dem Originalobjekt verglichen. Bei diesem Soll-Ist-Vergleich ist festzustellen, dass bei der Härtung eine minimale Schrumpfung des Materials stattgefunden hat. Die Bilddaten und die Histogramme befinden sich im Anhang 11. In den kumulativen Histogrammen, die im Anhang 10 aufgeführt sind, stellt sich heraus, dass bei der Ultimaker 3 Kopie  $18\%$  der gesamten Oberfläche weniger als  $40 \mu\text{m}$  vom Original abweichen. Die Formlabs Form 2 Kopie weist einen Prozentsatz von  $16\%$  der gesamten Oberfläche auf, die weniger als  $40 \mu\text{m}$  vom Original abweichen.

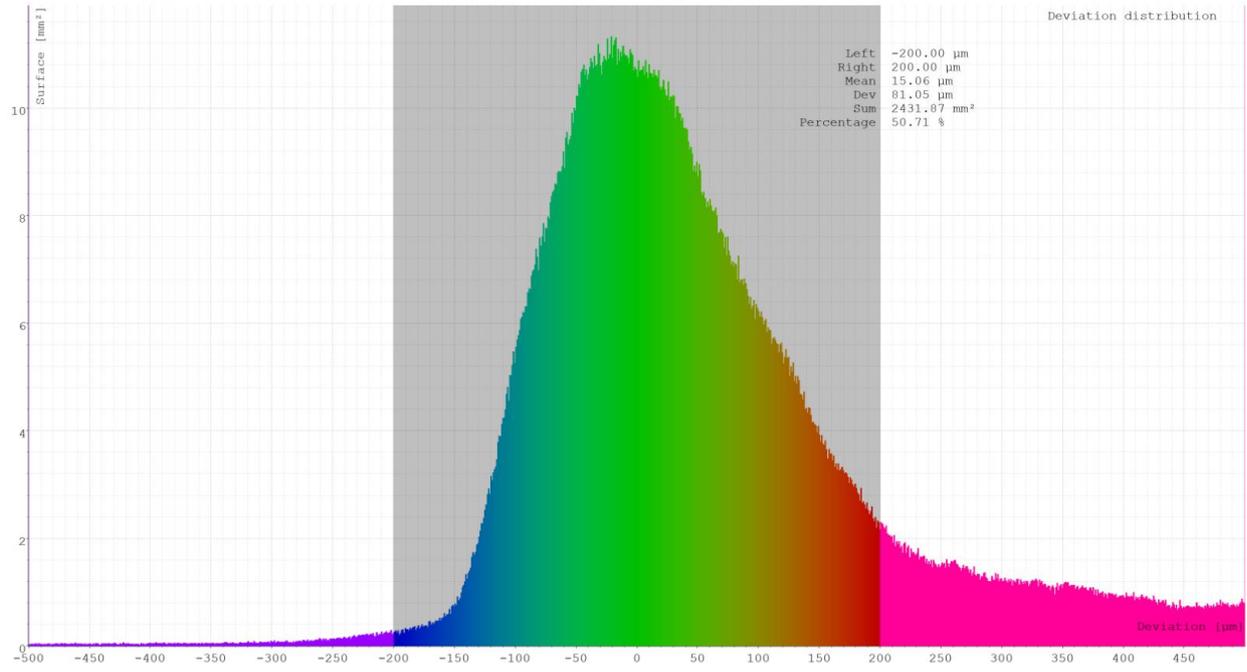


Abbildung 35: Abweichungshistogramm Füllhalter (Ultimaker 3)

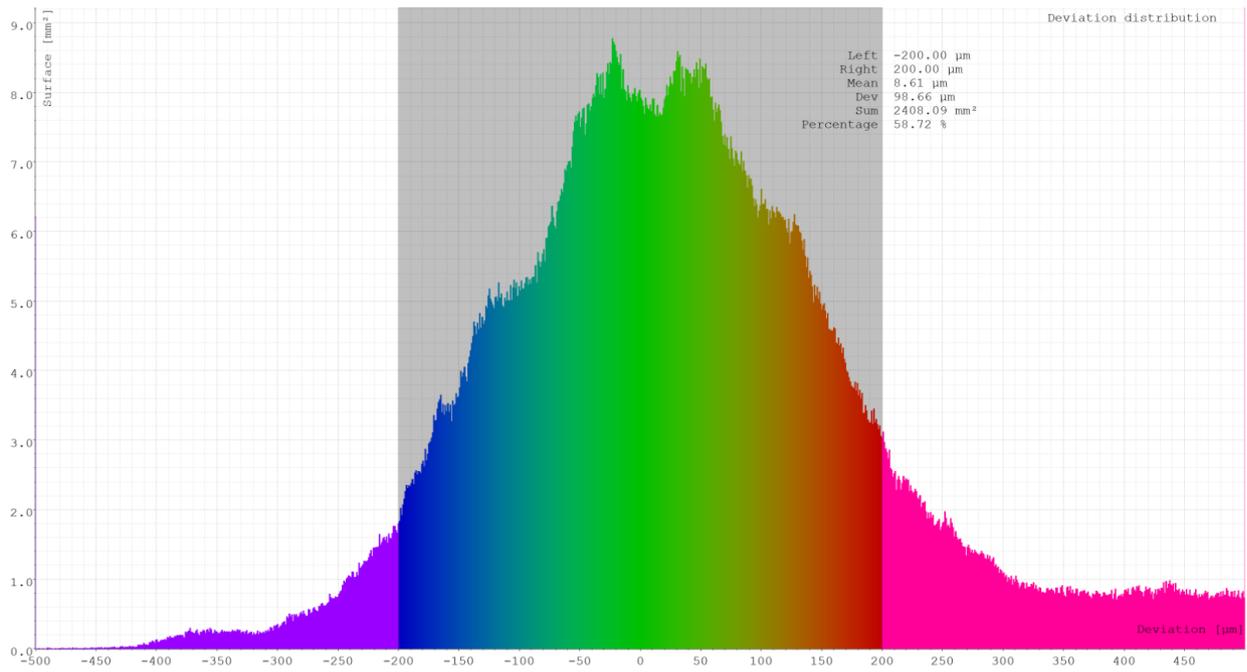


Abbildung 36: Abweichungshistogramm Füllhalter (Formlabs Form 2)

## 4. Diskussion

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit im Frühlingssemester 2020 am Institut für Medizintechnik an der Hochschule Luzern wurde bewiesen, dass das Umsetzen eines 3D Kopierers mit Hilfe eines Computertomographen durchaus möglich ist. Bei der Verwendung der optimalen CT-Parameter, gestaltet sich der Prozess der Segmentierung als unkompliziert und kann durch die immer grösser werdende Routine beschleunigt und verbessert werden.

Die Wahl der richtigen Röntgenstrahlparameter ist essenziell für eine gute 3D Kopie. Vor allem die Röhrenspannung, die für die Härte der Strahlung zuständig ist, spielt eine wesentliche Rolle für eine artefaktfreie Darstellung eines Objekts. Bei Objekten, die aus nur einem Material bestehen, kann mit einer hohen Spannung und dem Einsatz eines Streustrahlenfilters das beste Resultat bezüglich Genauigkeit der Masse und Homogenität der Oberfläche erzielt werden. Der Kantenübergang vom Material stellt sich dadurch klarer dar. Bei multimateriellen Objekten mit mehreren Komponenten, die sich aber dichtemässig nur wenig unterscheiden, ist es von Vorteil, wenn dem Röhrenstrom mehr Beachtung geschenkt wird. Demnach hat die Segmentierungssoftware VGStudio Max 3.3.4 bei einer besseren Kontrastdarstellung weniger Probleme die Komponenten voneinander zu trennen. Bei Multimaterialobjekten, die einen Metallkomponenten besitzen, stellt sich heraus, dass Scans mit einer Spannung unter 155 kv und ohne Filter für die spätere Segmentierung nicht brauchbar sind. Die Metallartefakte stellen sich in diesen Fällen als zu dominant dar. Bei Röhrenspannungen von über 155 kv und mit dem Einsatz eines Kupferfilters können die Metallartefakte deutlich verringert werden und der Graustufenübergang von Metall zu einem Material mit geringerer Dichte wird deutlich klarer dargestellt.

Die einzelnen Detektorparameter haben auf die spätere Segmentierung wesentlich kleinere Einflüsse als die Röntgenstrahlparameter. Wichtig ist, dass der Sättigungsgrad bei 70% gehalten wird. Tiefere Sättigungsgrade haben durch das niedrig resultierende CNR einen schlechten Einfluss auf die Oberflächendarstellung. Die Oberfläche stellt sich sehr rau dar. Natürlich hat das Optimieren des Sättigungsgrads immer einen Einfluss auf die Scanzeit, da die Integrationszeit zum Teil stark erhöht werden muss. Bei einer Anwendung eines Filters wird darum die Scanzeit deutlich verlängert, da mehr Strahlung benötigt wird. Mit der Erhöhung der Kapazität wird die Genauigkeit des Scans beeinflusst. Jedoch stellt sich die digitale Oberfläche eines Objekts deutlich geglätteter dar und die Scanzeit wird verringert.

Die verschiedenen Schwellwertverfahren der Oberflächenbestimmung mit VGStudio Max 3.3.4 haben auf die Genauigkeit einen Einfluss. Bei dem globalen Schwellwertverfahren werden die Masse eher zu klein dargestellt, während bei dem lokalen Schwellwertverfahren die Masse eher zu gross dargestellt werden. Nach beiden Schwellwertverfahren weichen die Masse jedoch nur minimal von den Massen des Originals ab. Bei Multimaterialobjekten ist die ist ein lokales Schwellwertverfahren unumgänglich, da die einzelnen Komponenten besser voneinander getrennt werden können. Ein spannender Ansatz wäre, wenn an den einzelnen erstellten ROIs, nachträglich eine Oberflächenbestimmung mit dem globalen Schwellwertverfahren durchgeführt wird. Da der Mittelwert der Abweichungen der Drucke im positiven Bereich liegt und das globale Schwellwertverfahren die Masse unterschätzt, könnten so die einzelnen Ungenauigkeiten ausgeglichen werden.

Nach der Oberflächenbestimmung gestaltet sich die Segmentierung bei Objekten mit einer Komponente einfach. Bei gut gewählten Röntgenstrahlparameter reduzieren sich Fremdpartikel. Die verbleibenden Fremdpartikel können mit Hilfe einfacher Befehle automatisch entfernt werden. Bei Multimaterialobjekten stösst die Software VGStudio Max 3.3.4 bezüglich Segmentierung an ihre Grenzen. Hauptsächlich bei enganliegenden Stecksystemen und Metallartefakten ist eine manuelle Nachbearbeitung der Oberfläche nicht zu vermeiden. Die manuelle Nachbearbeitung entpuppt sich als zeitintensiv und zieht immer die Gefahr mit sich Ungenauigkeiten an der Oberfläche zu generieren.

Allerdings ist hervorzuheben, dass die gravierendsten Ungenauigkeiten von den angewendeten 3D Druckern herbeigeführt wurden. Der exakteste Scan und die exakteste Segmentierung ist nichts wert, wenn der 3D Drucker mit der Genauigkeit nicht mithalten kann. Auffällig ist, dass die 3D Drucker die Masse der Oberflächen durchschnittlich leicht überschreiten. Ausserdem bereiten kleine Hohlräumen den 3D Druckern grosse Mühe. Es ist jedoch festzuhalten, dass je grösser das zu druckende Objekt ist, desto kleiner werden die Abweichungen zum Originalobjekt. Eine Vergrösserte Version eines Objekts 3D zu drucken ist ein sehr spannender Ansatz. Bei einem Vergleich mit dem Originalobjekt konnten die Abweichungen halbiert werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Methode sinnvoll ist, wenn eine originalgetreue Kopie eines Objekts verlangt wird. Überraschend war, dass die 3D Drucke mit dem Ultimaker 3 bezüglich Abweichungen zum Originalobjekt, die besseren Resultate erzielt hat als die 3D Drucke des Formlabs Form 2. Das könnte am verwendeten Material liegen, da das verwendete Harz sich nach dem Druck, vor allem nach einem Nachhärten, noch leicht verformen kann. Es ist demgegenüber zu bemerken, dass sich die Oberfläche der 3D Drucke des Formlabs Form 2 rein optisch, schöner und fehlerfreier darstellt.

Da im Zusammenhang mit der Parameterbestimmung am Kalibrierteil Messfehler entstanden sind, konnten keine genaue Resultate erzielt werden, bezüglich der Genauigkeit in Verbindung mit der Spannung. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Genauigkeit mit zunehmender Spannung zunimmt, solange der Röhrenstrom genügend hoch ist. Ausserdem wurden in dieser Arbeit ausschliesslich die Volumen der gescannten Originalobjekte mit den Volumen der gescannten 3D Drucken verglichen. Eine Aussage darüber, wie die Masse der 3D Kopien von den Massen der Originalobjekte abweichen, ist schwierig zu treffen. Für einen mikrometergenauen Vergleich sind die ursprünglichen CAD Modelle der verwendeten Objekte von Nöten. Werden die Originalobjekte jedoch mit den Kopien von Auge verglichen sind diese Abweichungen kaum zu erkennen. Ergänzend zu einem CT-Scan könnten optische Scanner herbeigezogen werden, die vor allem die Erfassung des optischen Erscheinungsbildes der Objekte ermöglichen. Bei einer Kombination dieser zwei Verfahren kann eine Verbesserung der Genauigkeit erzielt werden. Das Anwenden von optischen Scannern war nicht das Ziel dieser Arbeit, wäre aber für eine weiterführende Forschung ein interessanter Ansatz.

## 5. Schlussfolgerung

Das Ziel dieser Arbeit war einen Prozess für einen Prototypen eines 3D Kopierers zu entwickeln. Dazu wurde ein Computertomograph, eine Datenanalysesoftware und einen 3D Drucker miteinander kombiniert. Um die Genauigkeit der Datensätze, die vom Computertomographen unter verschiedenen Parametern generiert wurden zu überprüfen, wurde ein vermessener Aluminiumzylinder zu Hilfe genommen. Im Gesamten wurden drei verschiedene Objekte mit verschiedenen Materialzusammensetzungen gescannt und nachträglich auch gedruckt. Die Drucke wurden gescannt und mit den Originaldatensätzen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die verschiedenen Röntgen- und Detektorparameter einen Einfluss auf die Genauigkeit der Scans haben, jedoch weichen die Werte nur um wenige zehntel Millimeter voneinander ab. Die angesprochenen Parameter beeinflussen viel mehr das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis. Das CNR beeinflusst wiederum die zu segmentierende Oberfläche. Bei Scans mit einem höheren CNR können Oberflächen geglätteter dargestellt werden und Komponenten können besser voneinander getrennt werden. Jedoch müssen die Röntgenstrahl Parameter an den zu scannenden Objekten angepasst werden. Die Dichte des Materials und die Dichteunterschiede der Materialien bei Multimaterialobjekten spielen dabei eine grosse Rolle. CT-Scans unter 30 Minuten mit einer Auflösung von 40 Mikrometer wurden zum Ziel gesetzt. Bei den Objekten ohne Metallkomponenten kann diese Zielsetzung ohne Probleme erfüllt werden. Die Scanzeit kann bei einer Voxelgrösse von 0.041 mm bis auf 8.33 Minuten verringert werden. Bei Objekten mit dünnen Metallkomponenten wird für eine optimale Darstellung der Komponenten eine Scanzeit von 36 Minuten gebraucht. Dieser Zeitanstieg ist auf den eingesetzten Filter zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Soll-Ist-Vergleiche zwischen dem gescannten Originalobjekt und der gescannten 3D Kopie haben gezeigt, dass sich der grösste Teil der Abweichungen zum Original im Bereich von  $-200\ \mu\text{m}$  bis  $+200\ \mu\text{m}$  bewegt. Mit dem Ultimaker 3 bewegt sich die Standardabweichung der Abweichungen zwischen  $58\ \mu\text{m}$  und  $81\ \mu\text{m}$ . Beim Formlabs Form 2 bewegt sich die Standardabweichung für die gleichen Objekte zwischen  $80\ \mu\text{m}$  und  $100\ \mu\text{m}$ . Je kleiner das Volumen des Objekts ist und je mehr feine Strukturen das Objekt besitzt, desto mehr Probleme haben die angewendeten Drucker die Kopien wahrheitsgetreu zu gestalten. Bei grösseren Objekten schaffen es die Drucker, genauer zu arbeiten.

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass der Prozess des 3D Kopierers mit Hilfe eines Computertomographen funktioniert. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Geräten bereiten keine Probleme. Obwohl noch einzelne Optimierungen im Prozess im Zusammenhang mit den einzelnen Parametern möglich sind, kann davon gesprochen werden, dass die Ziele erreicht wurden.

Bei Objekten, die nur aus einem Material bestehen, ist zu empfehlen, immer Messungen mit einem Streustrahlenfilter durchzuführen. Das erleichtert die Oberflächenbestimmung und die Nachbearbeitung an der Datenanalysesoftware extrem. Jedoch bietet sich ein dünnerer Filter als der 1mm Kupferfilter an. So kann die Scanzeit noch tiefer gehalten werden. Bei heterogenen Objekten ohne Metall ist ein hoher Röhrenstrom zu empfehlen. Um anständige

Segmentierungsergebnisse bei Objekten mit Metallkomponenten wie Stahl zu erhalten, wird eine Röhrenspannung von mindestens 190 kv benötigt.

Zukünftig ist zu empfehlen, Messungen bei multimateriellen Objekten mit einer höheren Leistung durchzuführen, um die Kontrastunterschiede der Komponenten noch besser darstellen zu können. Messungen mit einer kleineren Auflösung als 20  $\mu\text{m}$  sind nicht anzuraten, da die Genauigkeit der 3D Drucker mit der Genauigkeit des CT Scans nicht mithalten können. Bei der Anwendung von 3D Druckern mit einer höheren Präzision und einer besseren Auflösung als die der angewendeten Drucker, darf dieser Ansatz überdenkt werden. Der Vergleich zwischen 1x1\_4pF und 2x2\_8pF sollte im Auge behaltet werden, da sich mit der 1x1\_4pF Messung und der besseren Auflösung eine leichte Verbesserung der Resultate im Soll-Ist-Vergleich hervorgebracht haben.

## 6. Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. Philipp Schütz bedanken, welcher meine Bachelorarbeit betreut und begutachtet hat. Ich möchte mich vor allem für die konstruktive Kritik, die hilfreichen Anregungen und die unkomplizierte Zusammenarbeit bedanken.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Damian Gwerder bedanken, der mich bei der Arbeit am Computertomographen erstklassig unterstützte und grosse Flexibilität bewies.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Transmissionsröhre (Behnsen & Fröba, 2020).....	5
Abbildung 2: Einfluss der Stromstärke auf den Kontrast (Münker & Rokitta, 2019).....	6
Abbildung 3: Cupping Effekt (Kasperl, 2005).....	9
Abbildung 4: Hase aus Lindenholz.....	10
Abbildung 5: Legomann.....	11
Abbildung 6: Füllhalter.....	11
Abbildung 7: Messaufbau mit Etagere.....	12
Abbildung 8: Histogramm mit roter Isowert Linie ((Volume Graphics GmbH, 2019). ....	13
Abbildung 9: Vermessung Anfotec Kalibrierteil.....	14
Abbildung 10: Aufteilen der ROI, um eine Komponente zu erhalten (Volume Graphics GmbH, 2019).....	16
Abbildung 11: Holzhasse vor (A) und nach (B) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4.....	16
Abbildung 12: Legomann vor (A) und nach (B) (C) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4.....	17
Abbildung 13: Füllhalter vor (A) und nach (B) (C) der Bearbeitung mit VGSTUDIO MAX 3.3.4 ..	18
Abbildung 14: Anfotec Kalibrierteil, 2D Darstellung der Messresultate.....	20
Abbildung 15: Anfotec Kalibrierteil, Darstellung der Kanten nach der Oberflächenbestimmung. ....	20
Abbildung 16: Vermessung von Schnittbildern bei unterschiedlicher Spannung.....	23
Abbildung 17: Soll-Ist-Vergleich Holzhasse, farbcodierte 3D-Bilder.....	23
Abbildung 18: Soll-Ist-Vergleich Holzhasse, farbcodierte 2D-Schnittbilder in Seitenansicht (links) und Frontalansicht (rechts).....	24
Abbildung 19: Abweichungshistogramm Holzhasse.....	25
Abbildung 20: kumulatives Abweichungshistogramm Holzhasse.....	25
Abbildung 21: Darstellung der Schnittbilder von dem Stecksytem zwischen Hose und Oberteil im Zusammenhang mit verschiedenen Spannungen.....	26
Abbildung 22: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, farbcodierte 3D-Bilder.....	26
Abbildung 23: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, farbcodierte 2D-Schnittbilder in Frontalansicht (links) und Transversalansicht(rechts).....	27
Abbildung 24: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil (Formlabs Form 2), farbcodierte 3D-Bilder.....	27
Abbildung 25: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil (Formlabs Form 2), farbcodiertes 2D-Schnittbild in Frontalansicht.....	28
Abbildung 26: Soll-Ist-Vergleiche Legomann Oberteil, 1x1_4pF (oben), 1x1_4pF 2:1 vergrößert (unten).....	28
Abbildung 27: Soll-Ist-Vergleich Legomann Oberteil, 2D-Schnittbilder in Frontalansicht, 1x1_4pF (links), 1x1_4pF 2:1 vergrößert (rechts).....	29
Abbildung 29: Abweichungshistogramm 2x2_8pF mit Formlabs Form 2.....	30
Abbildung 28: Abweichungshistogramm 2x2_8pF mit Ultimaker 3.....	30
Abbildung 31: Abweichungshistogramm 1x1_4pF mit Ultimaker 3: 2:1 3D Druck.....	30
Abbildung 30: Abweichungshistogramm 1x1_4pF mit Ultimaker 3.....	30
Abbildung 32: Darstellung des Übergangs zwischen Stahl und Kunststoff abhängig von unterschiedlichen Spannungen.....	31

Abbildung 33: Soll-Ist-Vergleich Füllhalter (Ultimaker 3), farbcodierte 3D-Bilder (links, mitte), farbcodiertes 2D-Schnittbild (rechts) ..... 32

Abbildung 34: Soll-Ist-Vergleich Füllhalter (Formlabs Form 2), farbcodierte 3D-Bilder (links, mitte), farbcodiertes 2D-Schnittbild (rechts) ..... 33

Abbildung 35: Abweichungshistogramm Füllhalter (Ultimaker 3)..... 34

Abbildung 36: Abweichungshistogramm Füllhalter (Formlabs Form 2) ..... 34

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Masse Anfotec Kalibrierteil (Hast & Meissner, 2019) .....	10
Tabelle 2: Parameterbestimmung Anfotec Kalibrierteil .....	12
Tabelle 3: Parameter Objekte .....	15
Tabelle 4: Toleranzen Region-Grauwert.....	17
Tabelle 5: Auswirkung Parameter auf CNR .....	20
Tabelle 6: Messung mit 190kv, Kapazität: 2pF, Integrationszeit: 1000, Anzahl Projektionen: 800 .....	21
Tabelle 7: Messung mit 190kv, Kapazität: 8pF, Integrationszeit: 1000, Anzahl Projektionen: 800 .....	21
Tabelle 8: Messung mit 190kv, Kapazität 8pF, Integrationszeit: 3000, Anzahl Projektionen: 800 .....	22
Tabelle 9: Messung mit 190kv, Kapazität: 8pF, Integrationszeit: 3000, Anzahl Projektionen: 1200 .....	22
Tabelle 10: Prozentsätzen der Oberflächen unter 40 $\mu\text{m}$ .....	31

## Literaturverzeichnis

- Behnsen, H. & Fröda, T. (2020). *Mikrofokus Röntgenröhren – Technologie*. Aufgerufen von <https://www.x-ray-worx.com/index.php/mikrofokus-roentgenroehren-produktuebersicht/mikrofokus-transmissionsroehren/produktlinie-tche-plus> (06.06.2020)
- Dössel, O. (2016). *Bildgebende Verfahren in der Medizin*. (2.Auflage), Berlin: Springer-Verlag
- Grosser, D. & Ehmcke, G. (n.d.). *Das Holz der Winterlinde – Eigenschaften und Verwendung*. LWF-Wissen. Aufgerufen von: <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldbau-bergwald/bilder/w78-holz-der-winterlinde.pdf> (20.04.2020).
- Heubner, U. (2014). *Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften*. Aufgerufen von: [https://www.edelstahl-rostfrei.de/fileadmin/user\\_upload/ISER/downloads/MB\\_821.pdf#page=21&zoom=auto,-82,821](https://www.edelstahl-rostfrei.de/fileadmin/user_upload/ISER/downloads/MB_821.pdf#page=21&zoom=auto,-82,821) (05.05.2020).
- Hast, C. & Meissner, K. (2019). *Anfotec Kalibrierteil universal-30 mm 100694-V2*. Medebach: Anfotec Antriebstechnologie GmbH
- Holländer, S. (2020). *SLA vs. DLP: 3D-Drucktechnologien für Kunstharze im Vergleich (Leitfaden 2020)*. Aufgerufen von: <https://formlabs.com/de/blog/vergleich-3d-druck-sla-dlp/> (01.05.2020).
- Kasperl, S. (2005). *Qualitätsverbesserungen durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-CT*. Aufgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:29-opus-1204> (05.04.2020).
- Kastner, J. & Heinzl, C. (2009). *Genauigkeitsoptimierung der Röntgen-CT für die Geometriebestimmung und Visualisierung der Messunsicherheit*. Wels: FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH
- Kintra, H. (2020). *Technische Information ABS*. Aufgerufen von: [http://www.3d-plastic.eu/shop\\_3d-plastic/images/ABS.pdf](http://www.3d-plastic.eu/shop_3d-plastic/images/ABS.pdf) (20.04.2020).
- Mayor, A. (2015). *Artefakte in der CT. Radiopraxis*. Aufgerufen von: <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/html/10.1055/s-0041-102575#N72600> (05.04.2020)
- Münker, M. & Rokitta, O. (2020). *diondo d2: Leistungsstarkes Mikro-CT System für kleinste bis mittelgroße Bauteile*. Aufgerufen von: <https://www.diondo.com/produkte/diondo-d2> (20.04.2020).
- Münker, M. & Rokitta, O. (2019). *Operator Training*. Hattingen: diondo GMBH
- Reinhart, C. (n.d.). *Direkte CT-Datenanalyse mit VGStudio MAX 2.0. Konzepte, Funktionen, erreichbare Performance und Messunsicherheit anhand realer Beispiele. (Dissertation)*. Heidelberg: Volume Graphics GmbH
- Volume Graphics GmbH (2019). *VG Studio Max, Referenzhandbuch*. Heidelberg
- Volume Graphics GmbH (2019). *VG Studio Max, Tutorial Oberflächenbestimmung*, Heidelberg

Ultimaker (2020). *Ultimaker 3*. Aufgerufen von: <https://ultimaker.com/de/3d-printers/ultimaker-3> (01.05.2020)

## Anhang

Im Anhang befinden sich alle Datenblätter der Messungen, zusätzliche Bilder, Tabellen und Histogramme. Es wurde ebenfalls eine ZIP-Datei erstellt, die die Originaldaten beinhaltet. Auf der Workstation des Computertomographen an der Hochschule Luzern befindet sich ein Ordner (NASData1 (\\ 192.168.214.5) (N:) > 01\_Lehre > David\_Stadelmann). In diesem Ordner sind alle von den Objekten VGL-Files und deren STL-Files abgelegt. Für die Oberflächenvergleiche wurde ein eigener Ordner erstellt.

### Inhaltsverzeichnis Anhang

1. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Anfotec Kalibrierteil) .....	XXXVII
2. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Holzhase) .....	LVII
3. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Legomann) .....	LXV
4. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Füllhalter).....	LXXV
5. Messresultate 100 kv und 150 kv Anfotec Kalibrierteil .....	LXXXIII
6. Bilder 3D Drucke .....	LXXXIV
7. Ausführliche Auflistung der Messparameter (3D Drucke) .....	LXXXVI
8. Kumulative Histogramme: Oberflächenvergleiche des Legomannoberteils .....	CIV
9. Oberflächenvergleich Kopf .....	CVI
10. Kumulative Histogramme: Oberflächenvergleich des Füllhalters.....	CVIII
11. Oberflächenvergleich Füllhalter UV-gehärtet .....	CIX

# 1. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Anfotec Kalibrierteil)



## 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Alu_Kalibrierteil_100kv_2x2_2pF_90IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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:

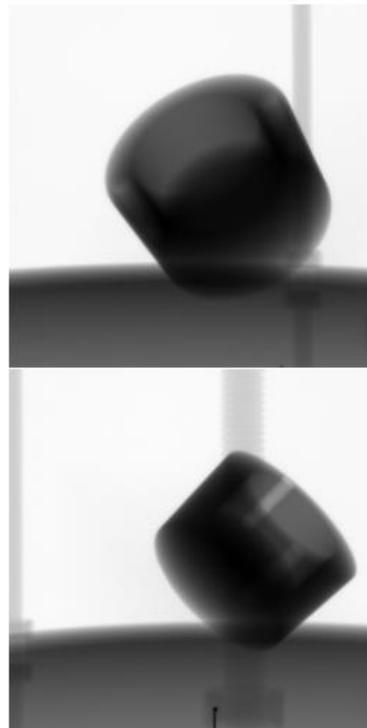
Voltage [kV]:	100.000
Current [µA]:	300.000
Power [W]:	30.000
Focus:	High Power
Filter:	

### Detector parameter:

Columns [px]:	1500
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	1500
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	90
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 2pF
Pitch [mm]:	0.278

### Scan Parameter:

Mode:	CTMode
Number of Projections:	1500
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:02:30



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Alu_Kalibrierteil_100kv_2x2_2pF_90IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	4.274
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_100kv\_2x2\_8pF\_90IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:**

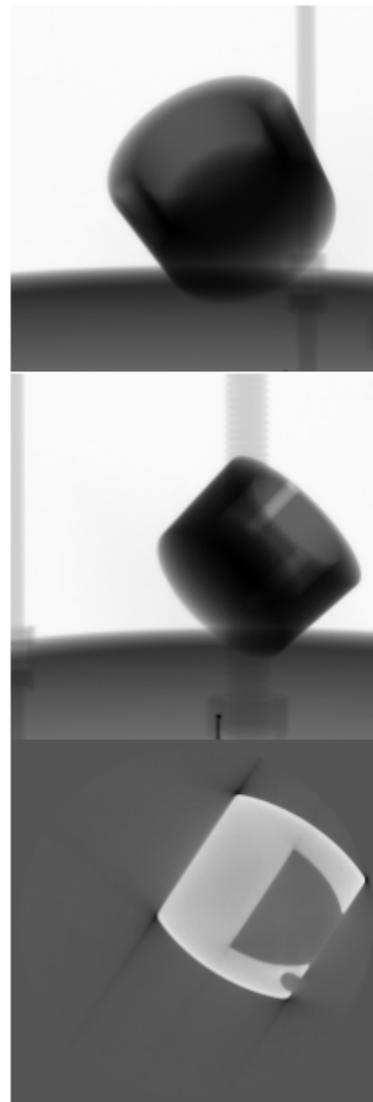
Voltage [kV]: 100.000  
Current [µA]: 300.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

**Detector parameter:**

Columns [px]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [px]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 90  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
ScanTime [HH:MM:SS]: 00:02:30



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Alu_Kalibrierteil_100kv_2x2_8pF_90IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	-0.721
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_100kv\_2x2\_8pF\_360IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:**

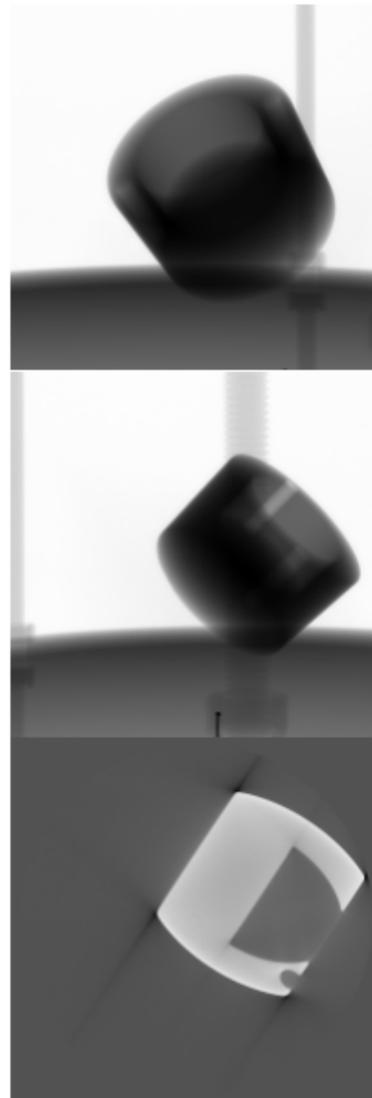
Voltage [kV]: 100.000  
Current [µA]: 300.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

**Detector parameter:**

Columns [px]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [px]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 360  
Framebinning: 1  
Capacity [µF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
ScanTime [HH:MM:SS]: 00:09:18



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Alu_Kalibrierteil_100kv_2x2_8pF_360IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	-0.676
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701

### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_150kv\_2x2\_2pF\_90IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:

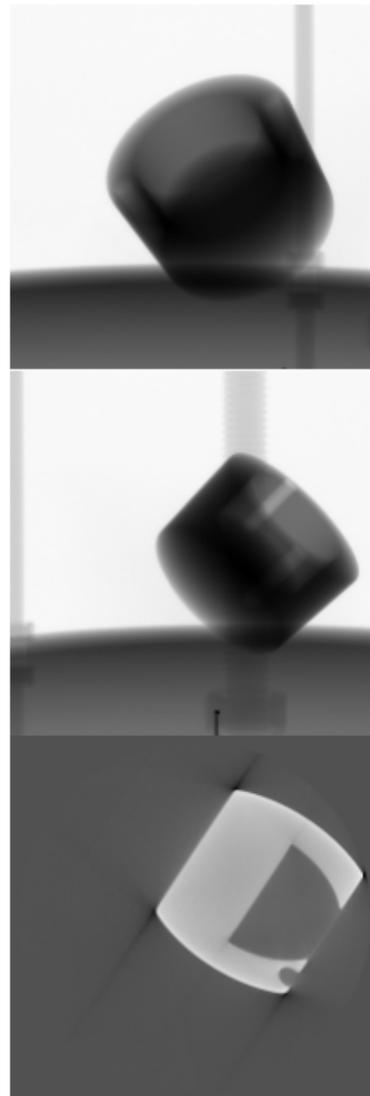
Voltage [kV]: 150.000  
Current [µA]: 200.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

#### Detector parameter:

Columns [pix]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [pix]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 90  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 2pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGainMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:02:30



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Alu_Kalibrierteil_150kv_2x2_2pF_90IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Dianda GmbH
Product number:	
Product description:	

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20160802 und 20160801

**Recon parameter:**

Projection Tilt A:	0.000
Projection Tilt B:	0.000
Projection Tilt C:	0.000
Recon mode:	FovExtOff
Detector offset X [mm]:	-0.593
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	548.000
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_150kv\_2x2\_8pF\_90IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:**

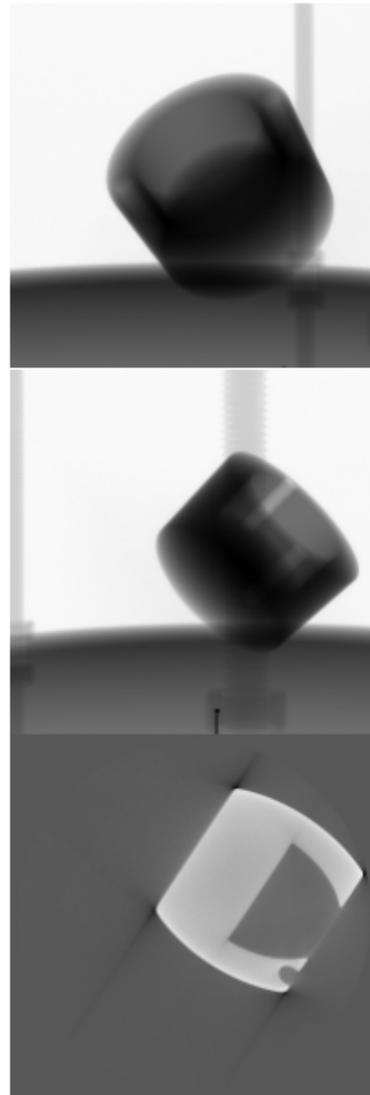
Voltage [kV]: 150.000  
Current [µA]: 200.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

**Detector parameter:**

Columns [pix]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [pix]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 90  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGainMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:02:30



### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_150kv\_2x2\_8pF\_90IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.35  
Company Name: Dianda 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]:	-0.626
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Alu\_Kalibrierteil\_150kv\_2x2\_8pF\_310IT\_800NP  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:**

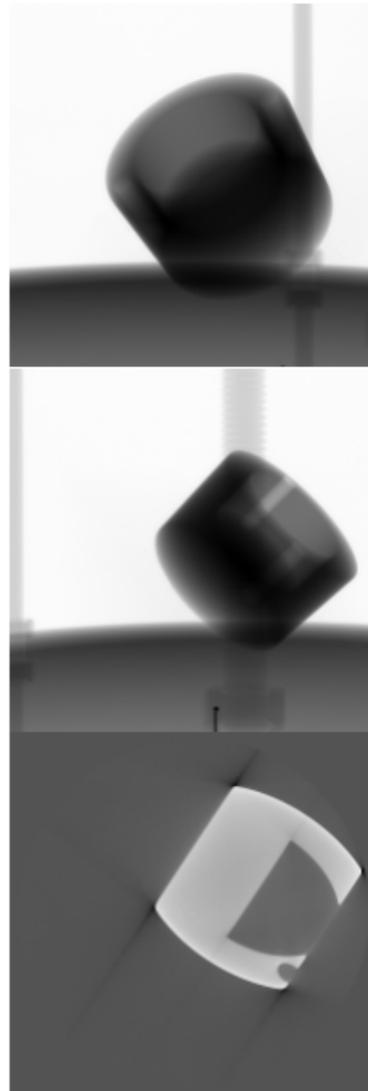
Voltage [kV]: 150.000  
Current [µA]: 200.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

**Detector parameter:**

Columns [px]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [px]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 310  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:08:03



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben+Alu_Kalibrierteil_150kv_2x2_8pF_310IT_800NP
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	-0.637
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [pix]:	1504
Dimension Y [pix]:	1504
Dimension Z [pix]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701



### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Alu\_Kalibrierteil\_190kv\_2x2\_2pF\_1000IT\_800NPmitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
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:

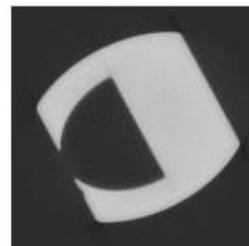
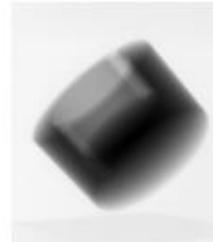
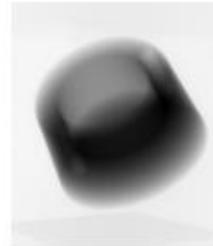
Voltage [kV]: 190.000  
Current [µA]: 158.000  
Power [W]: 30.020  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

#### Detector parameter:

Columns [px]: 1032  
Columns [mm]: 286.896  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1000  
Framebinning: 1  
Capacity [µF]: 2x2 2pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
Number of Projections: 800  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
ScanTime [HH:MM:SS]: 00:13:45



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Alu_Kalibrierteil_190kv_2x2_2pF_1000IT_800NpmitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	1024
Dimension Y [px]:	1024
Dimension Z [px]:	940
Median:	Off
Volume Size X:	42.838
Volume Size Y:	42.838
Volume Size Z:	39.324
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	361.300
Magnification:	6.701

### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name:  
Division:  
Date:  
Version Number:  
Company Name:  
Product number:  
Product description:

200513\_BAT\_DStadelmann>Alu\_Kalibrierteil\_190kv\_2x2\_8pF\_1000IT\_800NP\_mitFilter  
Software-Entwicklung  
May-14-2020  
diControl V1.5.2.35  
Diondo GmbH

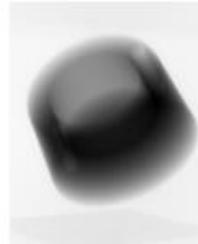
Inspection Task:

Notes:

Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

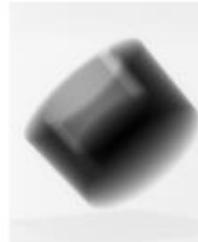
#### Xray parameter:

Voltage [kV]:	190.000
Current [µA]:	158.000
Power [W]:	30.020
Focus:	High Power
Filter:	Cu 1,00mm



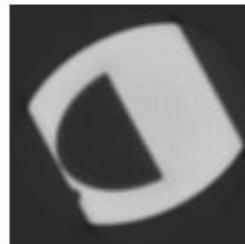
#### Detector parameter:

Columns [px]:	972
Columns [mm]:	270.216
Rows [px]:	1200
Rows [mm]:	333.600
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1000
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278



#### Scan Parameter:

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	800
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:13:45



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Alu_Kalibrierteil_190kv_2x2_8pF_1000IT_800NP_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-14-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	978
Dimension Y [px]:	978
Dimension Z [px]:	962
Median:	Off
Volume Size X:	40.366
Volume Size Y:	40.366
Volume Size Z:	39.787
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]:	128.999
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	360.999
Magnification:	6.701

### 200513\_BAT\_DStadelmann

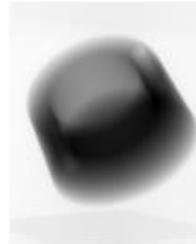
Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Alu\_Kalibrierteil\_190kv\_2x2\_8pF\_3000IT\_800NP\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.35  
Company Name: Diondo GmbH  
Product number:  
Product description:

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

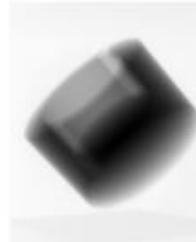
#### Xray parameter:

Voltage [kV]: 190.000  
Current [µA]: 158.000  
Power [W]: 30.020  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm



#### Detector parameter:

Columns [px]: 972  
Columns [mm]: 270.216  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 3000  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278



#### Scan Parameter:

Mode: CiMode  
Number of Projections: 800  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:40:45



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Alu_Kalibrierteil_190kv_2x2_8pF_3000IT_800NP_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
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]:	0.126
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	962
Median:	Off
Volume Size X:	40.366
Volume Size Y:	40.366
Volume Size Z:	39.787
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]:	126.999
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	360.999
Magnification:	6.701

### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann>Alu\_Kalibrierteil\_190kv\_2x2\_8pF\_3000IT\_1200NpmitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
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:

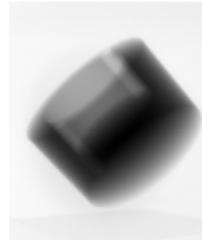
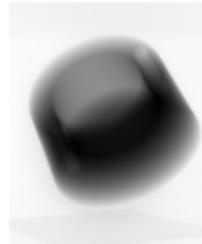
Voltage [kV]: 190.000  
Current [µA]: 158.000  
Power [W]: 30.020  
Focus: High Power  
Filter:

#### Detector parameter:

Columns [px]: 996  
Columns [mm]: 276.888  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 3000  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CiMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 01:00:45



### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Alu\_Kalibrierteil\_190kv\_2x2\_8pF\_3000IT\_1200NpmitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
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]:	-0.163
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	950
Median:	Off
Volume Size X:	41.353
Volume Size Y:	41.353
Volume Size Z:	39.602
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

#### Manipulator parameter:

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	361.000
Magnification:	6.701

## 2. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Holzhase)



### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Holzchase\_80kv  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-22-2020  
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:

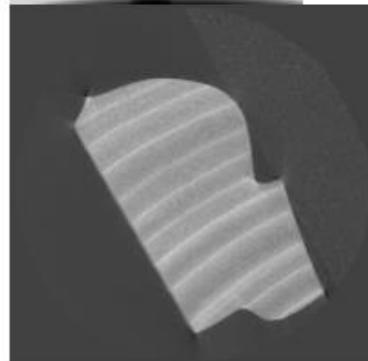
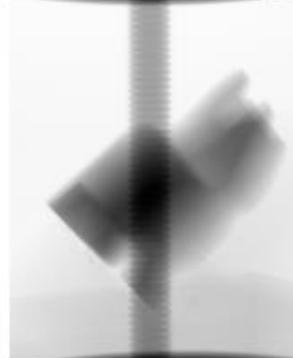
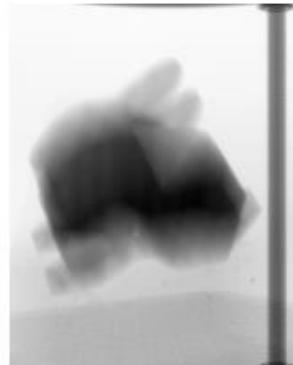
Voltage [kV]: 80.000  
Current [µA]: 375.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

#### Detector parameter:

Columns [px]: 1200  
Columns [mm]: 333.600  
Rows [px]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 450  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtiMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:09:19



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Holzchase_80kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-22-2020
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]:	0.217
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1200
Dimension Y [px]:	1200
Dimension Z [px]:	1148
Median:	Off
Volume Size X:	49.772
Volume Size Y:	49.772
Volume Size Z:	47.532
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	300.500
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Holzchase_120kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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:**

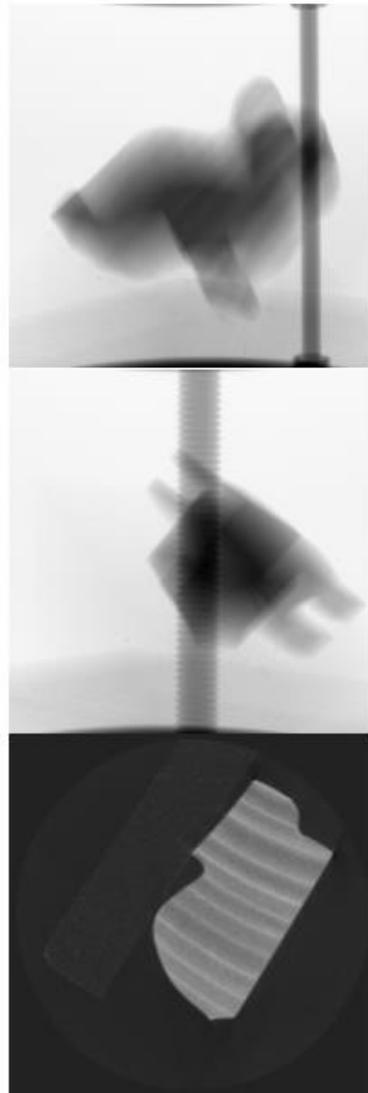
Voltage [kV]:	120.000
Current [µA]:	250.000
Power [W]:	30.000
Focus:	High Power
Filter:	

**Detector parameter:**

Columns [px]:	1500
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	1500
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	330
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

**Scan Parameter:**

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1500
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:08:33



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Holzchase\_120kv  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.35  
Company Name: Diendo 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]:	-0.413
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	300.500
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Holzchase\_155kv\_mitFilter  
 Division: Software-Entwicklung  
 Date: April-24-2020  
 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]: 155.000  
 Current [µA]: 194.000  
 Power [W]: 30.070  
 Focus: High Power  
 Filter: Cu 1,00mm

**Detector parameter:**

Columns [px]: 1344  
 Columns [mm]: 373.632  
 Rows [px]: 1500  
 Rows [mm]: 417.000  
 Pixelbinning: 1:1  
 Integration time [ms]: 1300  
 Framebinning: 1  
 Capacity [pF]: 2x2 8pF  
 Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
 Number of Projections: 1200  
 ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
 StopAndGo: On  
 ScanFieldExtensionVertical: Off  
 RotationMode: StopAndGainMotion:  
 Image Type: RAW  
 Scantime [HH:MM:SS]: 00:26:28



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Holzchase_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-24-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diando 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:	FovExitOff
Detector offset X [mm]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [pix]:	1344
Dimension Y [pix]:	1344
Dimension Z [pix]:	1112
Median:	Off
Volume Size X:	55.769
Volume Size Y:	55.769
Volume Size Z:	46.142
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	300.500
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Holzchase_190kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-24-2020
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:**

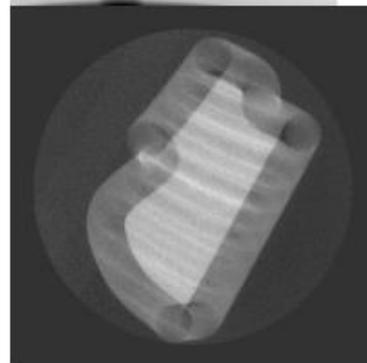
Voltage [kV]:	189.000
Current [µA]:	158.000
Power [W]:	29.862
Focus:	High Power
Filter:	Cu 1,00mm

**Detector parameter:**

Columns [px]:	1344
Columns [mm]:	373.632
Rows [px]:	1500
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1200
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

**Scan Parameter:**

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
ScanTime [HH:MM:SS]:	00:24:27



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Holzchase_190kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-24-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diendo 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]:	0.097
Voxel size Y [mm]:	0.097
Voxel size Z [mm]:	0.097
Dimension X [pix]:	1344
Dimension Y [pix]:	1344
Dimension Z [pix]:	1114
Median:	Off
Volume Size X:	130.507
Volume Size Y:	130.507
Volume Size Z:	108.173
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	300.000
FDD [mm]:	859.999
Height [mm]:	300.500
Magnification:	2.867

### 3. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Legomann)



#### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Legomann\_80kv  
 Division: Software-Entwicklung  
 Date: April-28-2020  
 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:

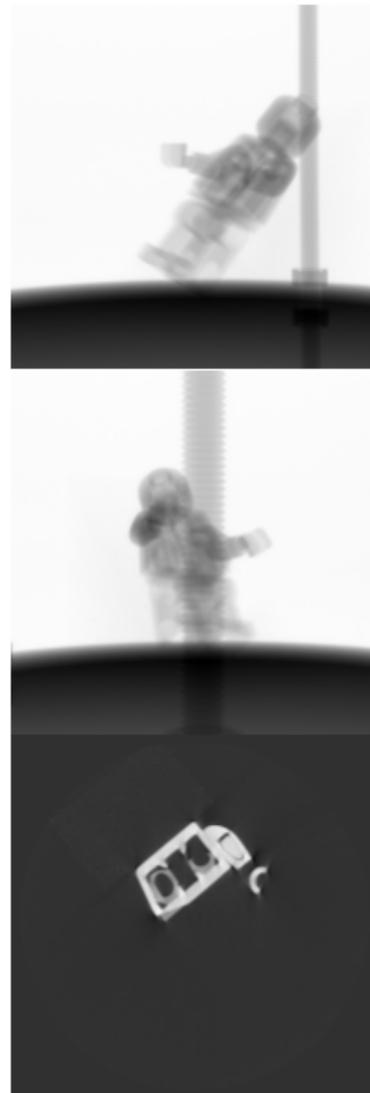
Voltage [kV]: 80.000  
 Current [µA]: 375.000  
 Power [W]: 30.000  
 Focus: High Power  
 Filter:

#### Detector parameter:

Columns [px]: 1500  
 Columns [mm]: 417.000  
 Rows [px]: 1500  
 Rows [mm]: 417.000  
 Pixelbinning: 1:1  
 Integration time [ms]: 450  
 Framebinning: 1  
 Capacity [pF]: 2x2 8pF  
 Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
 Number of Projections: 1500  
 ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
 StopAndGo: On  
 ScanFieldExtensionVertical: Off  
 RotationMode: StopAndGoInMotion:  
 Image Type: RAW  
 Scantime [HH:MM:SS]: 00:11:34



### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Legomann_80kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	-0.435
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	372.900
Magnification:	6.701

### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Legomann\_120kv  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-28-2020  
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:

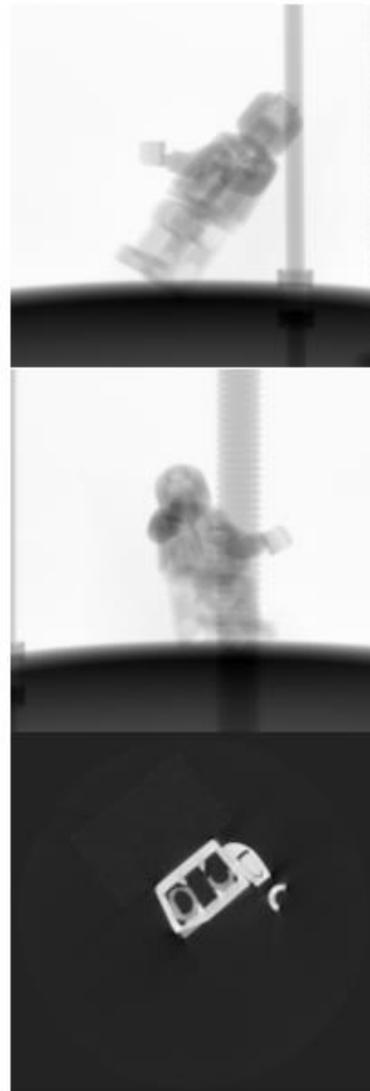
Voltage [kV]: 120.000  
Current [µA]: 250.000  
Power [W]: 30.000  
Focus: High Power  
Filter:

#### Detector parameter:

Columns [px]: 1500  
Columns [mm]: 417.000  
Rows [px]: 1500  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 330  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CiMode  
Number of Projections: 1500  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:08:33



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Legomann_120kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	-0.477
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	372.900
Magnification:	6.701

### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Legomann\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-23-2020  
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]: 155.000  
Current [µA]: 194.000  
Power [W]: 30.070  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

#### Detector parameter:

Columns [px]: 996  
Columns [mm]: 276.868  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1300  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGainMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:26:28



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Legomann_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-23-2020
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]:	0.048
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	950
Median:	Off
Volume Size X:	41.353
Volume Size Y:	41.353
Volume Size Z:	39.602
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	372.900
Magnification:	6.701

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Legomann\_190kv\_mitFilter  
 Division: Software-Entwicklung  
 Date: April-23-2020  
 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:**

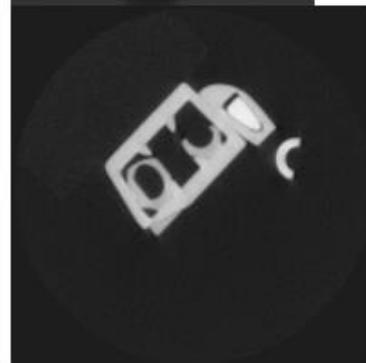
Voltage [kV]: 190.000  
 Current [µA]: 158.000  
 Power [W]: 30.020  
 Focus: High Power  
 Filter: Cu 1,00mm

**Detector parameter:**

Columns [px]: 996  
 Columns [mm]: 276.888  
 Rows [px]: 1200  
 Rows [mm]: 333.600  
 Pixelbinning: 1:1  
 Integration time [ms]: 1200  
 Framebinning: 1  
 Capacity [pF]: 2x2 8pF  
 Pitch [mm]: 0.278

**Scan Parameter:**

Mode: CtMode  
 Number of Projections: 1200  
 ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
 StopAndGo: On  
 ScanFieldExtensionVertical: Off  
 RotationMode: StopAndGainMotion:  
 Image Type: RAW  
 Scantime [HH:MM:SS]: 00:24:27



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Legomann_190kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-23-2020
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]:	0.060
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	950
Median:	Off
Volume Size X:	41.353
Volume Size Y:	41.353
Volume Size Z:	39.602
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	372.900
Magnification:	6.701

20200222

Measurement name: 20200222-Legoman  
Division: Software-Entwicklung  
Date: February-22-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.19  
Company Name: Diondo GmbH  
Product number:  
Product description:

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20180602 und 20180601

**Xray parameter:**

Voltage [kV]: 120.000  
Current [µA]: 200.000  
Power [W]: 24.000  
Focus: High Power  
Filter: Al 1,00mm



**Detector parameter:**

Columns [px]: 1800  
Columns [mm]: 250.200  
Rows [px]: 3000  
Rows [mm]: 417.000  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 700  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 1x1 4pF  
Pitch [mm]: 0.139



**Scan Parameter:**

Mode: CifMode  
Number of Projections: 1800  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: Off  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: Continuous Mode:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:21:22



**20200222**

Measurement name: 20200222-Legoman  
 Division: Software-Entwicklung  
 Date: February-22-2020  
 Version Number: diControl V1.5.2.19  
 Company Name: Dicono 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]: 0.248  
 Voxel size X [mm]: 0.019  
 Voxel size Y [mm]: 0.019  
 Voxel size Z [mm]: 0.019  
 Dimension X [px]: 1792  
 Dimension Y [px]: 1792  
 Dimension Z [px]: 2420  
 Median: Off  
 Volume Size X: 33.814  
 Volume Size Y: 33.814  
 Volume Size Z: 45.664  
 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]: 115.000  
 FDD [mm]: 851.000  
 Height [mm]: 364.800  
 Magnification: 7.400

#### 4. Ausführliche Auflistung der Messparameter (Füllhalter)



### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_80kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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:

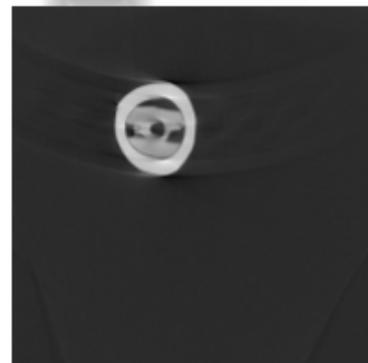
Voltage [kV]:	80.000
Current [µA]:	375.000
Power [W]:	30.000
Focus:	High Power
Filter:	

#### Detector parameter:

Columns [px]:	972
Columns [mm]:	270.216
Rows [px]:	1200
Rows [mm]:	333.600
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	450
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

#### Scan Parameter:

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	On
VSFE start [mm]:	426.300
VSFE end [mm]:	545.200
VSFE distance [mm]:	118.900
VSFE number of slices [mm]:	1
RotationMode:	StopAndGainMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:13:48



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_80kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	1672
Median:	Off
Volume Size X:	40.348
Volume Size Y:	40.348
Volume Size Z:	69.121
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.498

**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_120kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	120.000
Current [µA]:	250.000
Power [W]:	30.000
Focus:	High Power
Filter:	

**Detector parameter:**

Columns [px]:	972
Columns [mm]:	270.216
Rows [px]:	1200
Rows [mm]:	333.600
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	330
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

**Scan Parameter:**

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	On
VSFE start [mm]:	426.300
VSFE end [mm]:	545.200
VSFE distance [mm]:	118.900
VSFE number of slices [mm]:	1
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:10:11



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_120kv
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-28-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	1672
Median:	Off
Volume Size X:	40.348
Volume Size Y:	40.348
Volume Size Z:	69.121
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.498

200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Füller\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-23-2020  
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:

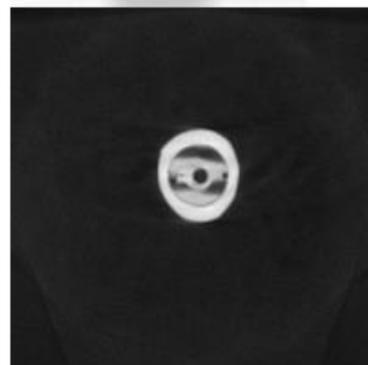
Voltage [kV]: 155.000  
Current [µA]: 194.000  
Power [W]: 30.070  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

Detector parameter:

Columns [px]: 972  
Columns [mm]: 270.216  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1300  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2.8pF  
Pitch [mm]: 0.278

Scan Parameter:

Mode: CifMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: On  
VSFE start [mm]: 426.300  
VSFE end [mm]: 545.200  
VSFE distance [mm]: 118.900  
VSFE number of slices [mm]: 1  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:39:24



**200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben**

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-23-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.34
Company Name:	Diando 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]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [pix]:	976
Dimension Y [pix]:	976
Dimension Z [pix]:	1672
Median:	Off
Volume Size X:	40.348
Volume Size Y:	40.348
Volume Size Z:	69.121
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.498

### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name: 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben-Füller\_190kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: April-23-2020  
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]: 190.000  
Current [µA]: 158.000  
Power [W]: 30.020  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

#### Detector parameter:

Columns [px]: 972  
Columns [mm]: 270.216  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1200  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CiMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: On  
VSFE start [mm]: 426.300  
VSFE end [mm]: 545.200  
VSFE distance [mm]: 118.900  
VSFE number of slices [mm]: 1  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:36:23



### 200422\_BAT\_David\_Stadelmann\_Alle\_Proben

Measurement name:	200422_BAT_David_Stadelmann_Alle_Proben-Füller_190kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	April-23-2020
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]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	1672
Median:	Off
Volume Size X:	40.348
Volume Size Y:	40.348
Volume Size Z:	69.121
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

#### Helix Mode Parameter:

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.498

## 5. Messresultate 100 kv und 150 kv Anfotec Kalibrierteil

ALU-Kalibrierteil	2x2 8pF_90IT_1500NP		cnr:9.4		
		isoalue based, automatic	advanced classic, from histogram		iterative surface determination
Distanz polar	24872.75		24905.37		24905.32
Durchmesser 20	19896.06		19917.5		19918.8
Durchmesser 30	29963.14		29915.52		29914.94
Durchmesser 3 links	2972.8		2988.2		2989.42
Durchmesser 3 rechts	2926.12		2989.3		2989.14
ALU-Kalibrierteil	2x2 8pF_360_IT_1500NP		cnr: 32		
Distanz polar	24869.85		24909.36		24912.22
Durchmesser 20	19903.84		19918.46		19918.98
Durchmesser 30	29960.02		29913.52		29913.3
Durchmesser 3 links	2921.96		2988.36		2990.06
Durchmesser 3 rechts	2975.56		2982.22		2988.68
Alu Kalibrierteil	150 kv_2x2 2pF_90_1500		cnr: 16		
Distanz polar	24885.87		24912.22		24910.77
Durchmesser 20	19891.18		19920.06		19921.4
Durchmesser 30	29969.14		29920.52		29920.14
Durchmesser 3 links	2928.46		2986.68		2989.76
Durchmesser 3 rechts	2969.22		2987.98		2988.5
Alu Kalibrierteil	150kv_2x2 8pF 90 1500		cnr: 14		
Distanz polar	24877.54		24912.62		24910.63
Durchmesser 20	19889.82		19919.2		19920.6
Durchmesser 30	29970.64		29921.16		29930.92
Durchmesser 3 links	2923.06		2984.5		2988.18
Durchmesser 3 rechts	2964.5		2987.58		2988.24
Alu Kalibrierteil	150kv_2x2 8pF 310 1500		cnr: 27		
Distanz polar	24875.36		24910.42		24915.4
Durchmesser 20	19895		19919.4		19920.62
Durchmesser 30	29967.58		29921.26		29920.86
Durchmesser 3 links	2933.76		2987.12		2988.86
Durchmesser 3 rechts	2969.12		2987.34		2987.98

6. Bilder 3D Drucke





## 7. Ausführliche Auflistung der Messparameter (3D Drucke)



### 200513\_BAT\_DStadelmann

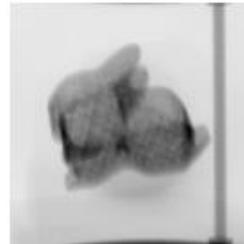
Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Holzchase_3D_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

#### Xray parameter:

Voltage [kV]:	155.000
Current [µA]:	194.000
Power [W]:	30.070
Focus:	High Power
Filter:	Cu 1,00mm



#### Detector parameter:

Columns [px]:	1500
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	1500
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1300
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 BpF
Pitch [mm]:	0.278



#### Scan Parameter:

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1500
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
ScanTime [HH:MM:SS]:	00:32:58



### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Holzchase\_3D\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.35  
Company Name: Diendo 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]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	1504
Dimension Y [px]:	1504
Dimension Z [px]:	1078
Median:	Off
Volume Size X:	62.274
Volume Size Y:	62.274
Volume Size Z:	44.635
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

#### Manipulator parameter:

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	300.500
Magnification:	6.701

### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Hose\_3D\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
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:

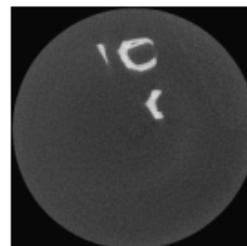
Voltage [kV]: 155.000  
Current [µA]: 194.000  
Power [W]: 30.070  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

#### Detector parameter:

Columns [px]: 828  
Columns [mm]: 230.184  
Rows [px]: 948  
Rows [mm]: 263.544  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1300  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGainMotion:  
Image Type: RAW  
ScanTime [HH:MM:SS]: 00:26:28



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Hose_3D_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diando 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]:	0.112
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	832
Dimension Y [px]:	832
Dimension Z [px]:	782
Median:	Off
Volume Size X:	34.377
Volume Size Y:	34.377
Volume Size Z:	32.311
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	372.900
Magnification:	6.701

### 200513\_BAT\_DStadelmann

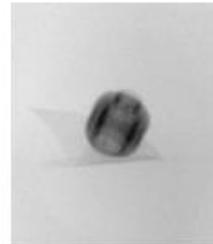
Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Kopf\_3D\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-14-2020  
Version Number: diControl V1.5.2.35  
Company Name: Diondo GmbH  
Product number:  
Product description:

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

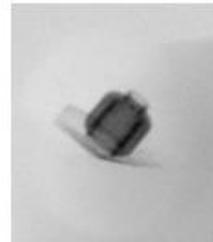
#### Xray parameter:

Voltage [kV]: 155.000  
Current [µA]: 194.000  
Power [W]: 30.070  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm



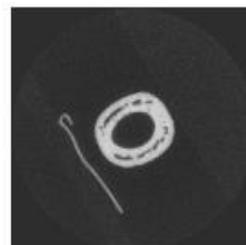
#### Detector parameter:

Columns [px]: 864  
Columns [mm]: 240.192  
Rows [px]: 996  
Rows [mm]: 276.888  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1300  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 BpF  
Pitch [mm]: 0.278



#### Scan Parameter:

Mode: CtMode  
Number of Projections: 900  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: Off  
RotationMode: StopAndGainMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:19:58



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Kopf_3D_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-14-2020
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:	FovExitOff
Detector offset X [mm]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	864
Dimension Y [px]:	864
Dimension Z [px]:	812
Median:	Off
Volume Size X:	35.874
Volume Size Y:	35.874
Volume Size Z:	33.715
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	126.998
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	403.799
Magnification:	6.701

**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Oberteil_3D_155kv_filter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
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:**

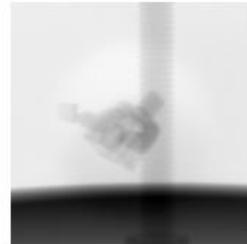
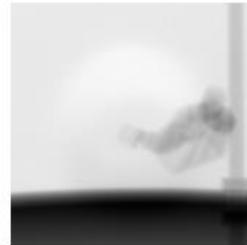
Voltage [kV]:	155.000
Current [µA]:	194.000
Power [W]:	30.070
Focus:	High Power
Filter:	

**Detector parameter:**

Columns [px]:	1200
Columns [mm]:	333.600
Rows [px]:	1200
Rows [mm]:	333.600
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1300
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

**Scan Parameter:**

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:26:28



## 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Oberteil_3D_155kv_filter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	1200
Dimension Y [px]:	1200
Dimension Z [px]:	916
Median:	Off
Volume Size X:	49.816
Volume Size Y:	49.816
Volume Size Z:	38.026
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	546.000
Magnification:	6.701

**200528\_BAT\_DStadelmann2**

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann2-Oberteil_Formlab_3D_140kv_Alufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20180602 und 20180601

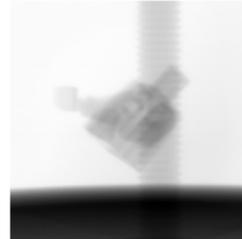
**Xray parameter:**

Voltage [kV]:	140.000
Current [µA]:	214.000
Power [W]:	29.960
Focus:	High Power
Filter:	Al 1,00mm



**Detector parameter:**

Columns [px]:	996
Columns [mm]:	276.888
Rows [px]:	996
Rows [mm]:	276.888
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	900
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278



**Scan Parameter:**

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:18:19



**200528\_BAT\_DStadelmann2**

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann2-Oberteil_Formlab_3D_140kv_Alufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	992
Dimension Y [px]:	992
Dimension Z [px]:	788
Median:	Off
Volume Size X:	41.339
Volume Size Y:	41.339
Volume Size Z:	32.838
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	852.000
Height [mm]:	544.700
Magnification:	6.709

**200528\_BAT\_DStadelmann2**

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann2-Oberteil__3D_gross_140kv_Alufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
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]:	140.000
Current [µA]:	214.000
Power [W]:	29.960
Focus:	High Power
Filter:	Al 1,00mm



**Detector parameter:**

Columns [px]:	3000
Columns [mm]:	417.000
Rows [px]:	3000
Rows [mm]:	417.000
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	1700
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	1x1 4pF
Pitch [mm]:	0.139



**Scan Parameter:**

Mode:	CtMode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	Off
RotationMode:	StopAndGainMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:34:23



## 200528\_BAT\_DStadelmann2

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann2-Oberteil__3D_gross_140kv_Alufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.022
Voxel size Y [mm]:	0.022
Voxel size Z [mm]:	0.022
Dimension X [px]:	3008
Dimension Y [px]:	3008
Dimension Z [px]:	2158
Median:	Off
Volume Size X:	66.083
Volume Size Y:	66.083
Volume Size Z:	47.409
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

### Manipulator parameter:

FOD [mm]:	135.000
FDD [mm]:	852.000
Height [mm]:	298.000
Magnification:	6.311

### 200513\_BAT\_DStadelmann

Measurement name: 200513\_BAT\_DStadelmann-Füller\_3D\_155kv\_mitFilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-13-2020  
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:

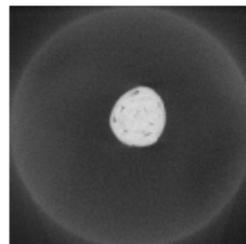
Voltage [kV]: 155.000  
Current [µA]: 194.000  
Power [W]: 30.070  
Focus: High Power  
Filter: Cu 1,00mm

#### Detector parameter:

Columns [px]: 972  
Columns [mm]: 270.216  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 1300  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278

#### Scan Parameter:

Mode: CiMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: On  
VSFE start [mm]: 426.300  
VSFE end [mm]: 545.200  
VSFE distance [mm]: 118.900  
VSFE number of slices [mm]: 1  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:39:24



**200513\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200513_BAT_DStadelmann-Füller_3D_155kv_mitFilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-13-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	1672
Median:	Off
Volume Size X:	40.348
Volume Size Y:	40.348
Volume Size Z:	69.121
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]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.498

**200528\_BAT\_DStadelmann**

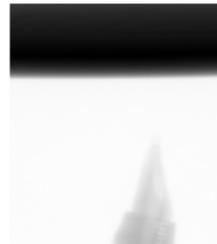
Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann-Füller_Formalab_3D_140kv_mitAlufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Diondo GmbH
Product number:	
Product description:	

Inspection Task:

Notes: Gleiche Geometrie wie vom 20160602 und 20160601

**Xray parameter:**

Voltage [kV]:	140.000
Current [µA]:	214.000
Power [W]:	29.960
Focus:	High Power
Filter:	Cu 1,00mm



**Detector parameter:**

Columns [px]:	804
Columns [mm]:	223.512
Rows [px]:	900
Rows [mm]:	250.200
Pixelbinning:	1:1
Integration time [ms]:	900
Framebinning:	1
Capacity [pF]:	2x2 8pF
Pitch [mm]:	0.278

**Scan Parameter:**

Mode:	CI Mode
Number of Projections:	1200
ScanFieldExtensionHorizontal:	Off
StopAndGo:	On
ScanFieldExtensionVertical:	On
VSFE start [mm]:	426.300
VSFE end [mm]:	545.200
VSFE distance [mm]:	118.900
VSFE number of slices [mm]:	1
RotationMode:	StopAndGoInMotion:
Image Type:	RAW
Scantime [HH:MM:SS]:	00:35:26

**200528\_BAT\_DStadelmann**

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann-Füller_Formalab_3D_140kv_mitAlufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
Version Number:	diControl V1.5.2.35
Company Name:	Dianda 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]:	0.042
Voxel size Y [mm]:	0.042
Voxel size Z [mm]:	0.042
Dimension X [px]:	800
Dimension Y [px]:	800
Dimension Z [px]:	1956
Median:	Off
Volume Size X:	33.359
Volume Size Y:	33.359
Volume Size Z:	81.562
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	426.300
Magnification:	6.701

**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	426.300
Helix end [mm]:	545.200
Helix distance [mm]:	118.900
Number of Helix turns:	1.951

### 200528\_BAT\_DStadelmann2

Measurement name: 200528\_BAT\_DStadelmann2-Füller\_Formalab\_3D\_gehärtet\_140kv\_mitAlufilter  
Division: Software-Entwicklung  
Date: May-28-2020  
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]: 140.000  
Current [µA]: 214.000  
Power [W]: 29.960  
Focus: High Power  
Filter: Al 1,00mm



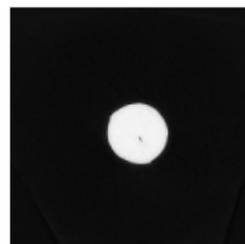
#### Detector parameter:

Columns [px]: 972  
Columns [mm]: 270.216  
Rows [px]: 1200  
Rows [mm]: 333.600  
Pixelbinning: 1:1  
Integration time [ms]: 900  
Framebinning: 1  
Capacity [pF]: 2x2 8pF  
Pitch [mm]: 0.278



#### Scan Parameter:

Mode: CtiMode  
Number of Projections: 1200  
ScanFieldExtensionHorizontal: Off  
StopAndGo: On  
ScanFieldExtensionVertical: On  
VSFE start [mm]: 324.600  
VSFE end [mm]: 461.176  
VSFE distance [mm]: 136.576  
VSFE number of slices [mm]: 1  
RotationMode: StopAndGoInMotion:  
Image Type: RAW  
Scantime [HH:MM:SS]: 00:31:17



**200528\_BAT\_DStadelmann2**

Measurement name:	200528_BAT_DStadelmann2-Füller_Formalab_3D_gehärtet_140kv_mitAlufilter
Division:	Software-Entwicklung
Date:	May-28-2020
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]:	0.000
Voxel size X [mm]:	0.041
Voxel size Y [mm]:	0.041
Voxel size Z [mm]:	0.041
Dimension X [px]:	976
Dimension Y [px]:	976
Dimension Z [px]:	2100
Median:	Off
Volume Size X:	40.336
Volume Size Y:	40.336
Volume Size Z:	86.788
Cubic voxel:	On
Opt. Volume Height:	On
Optimize:	On
Image Type:	RAW
Ring artifact filter:	1
Bad pixel filter:	On
Beam Hardening:	1
Truncation Correction:	100

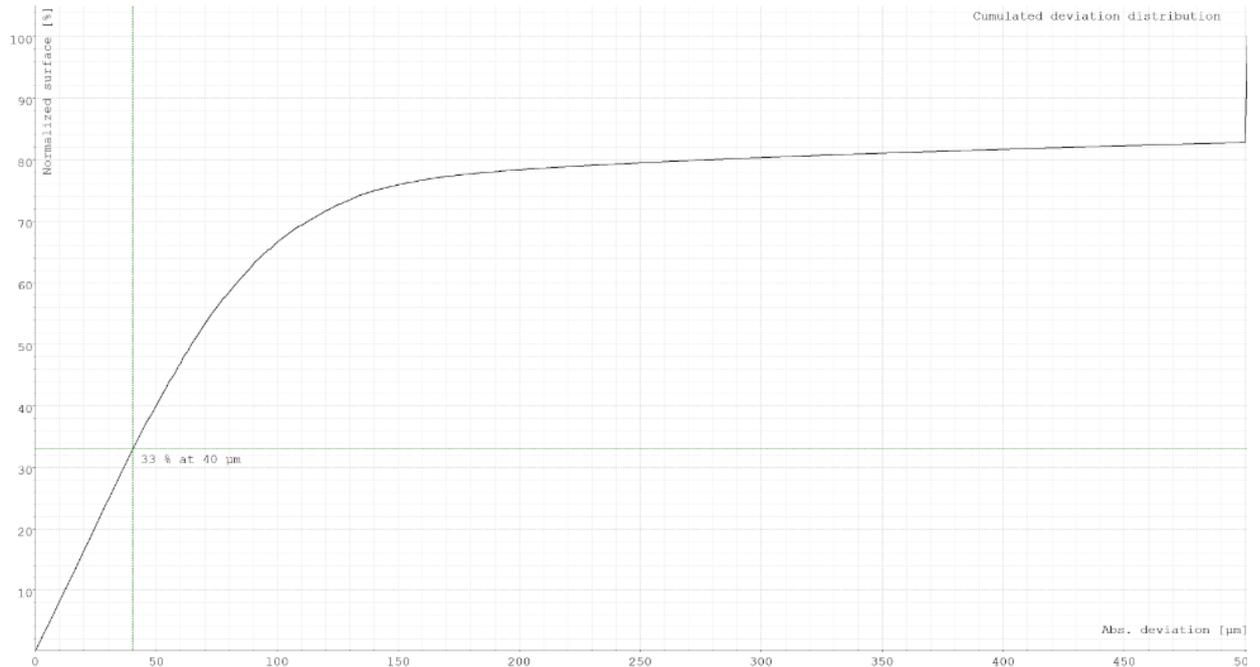
**Manipulator parameter:**

FOD [mm]:	127.000
FDD [mm]:	850.999
Height [mm]:	324.600
Magnification:	6.701

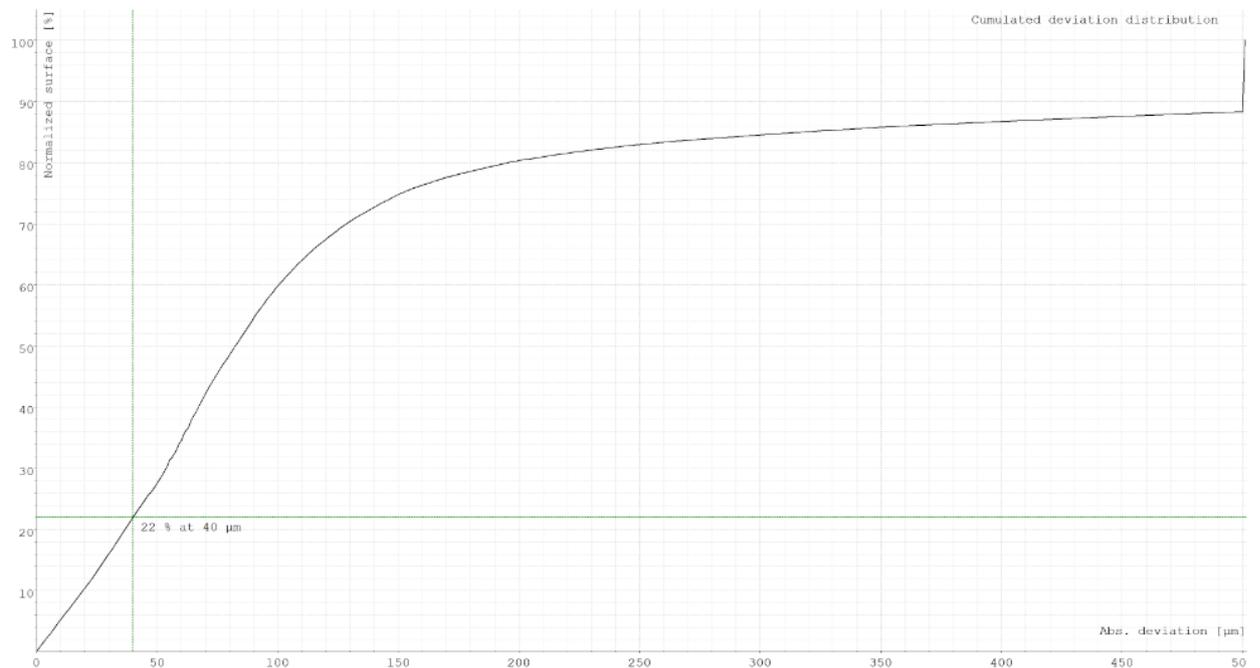
**Helix Mode Parameter:**

Helix start [mm]:	324.600
Helix end [mm]:	461.176
Helix distance [mm]:	136.576
Number of Helix turns:	1.720

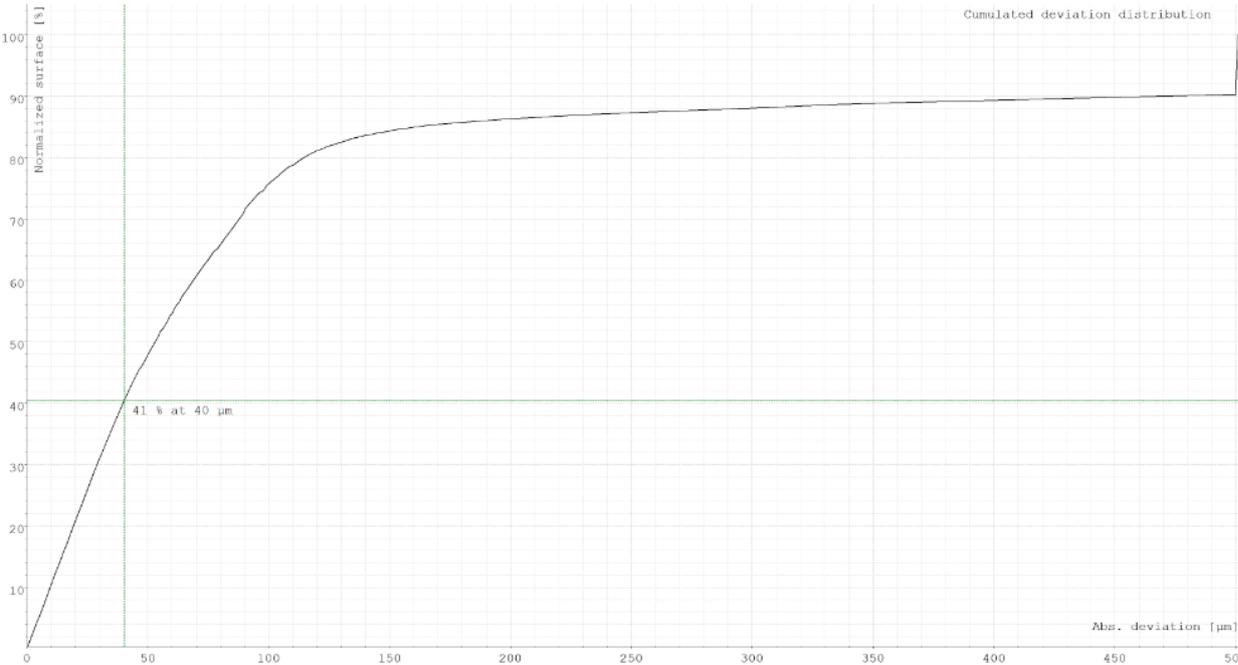
### 8. Kumulative Histogramme: Oberflächenvergleiche des Legomannoberteils



Kumulatives Histogramm: 2x2\_8 pF Legomannoberteil mit Ultimaker 3



Kumulatives Histogramm: 2x2\_8 pF Legomannoberteil mit Formlabs Form 2

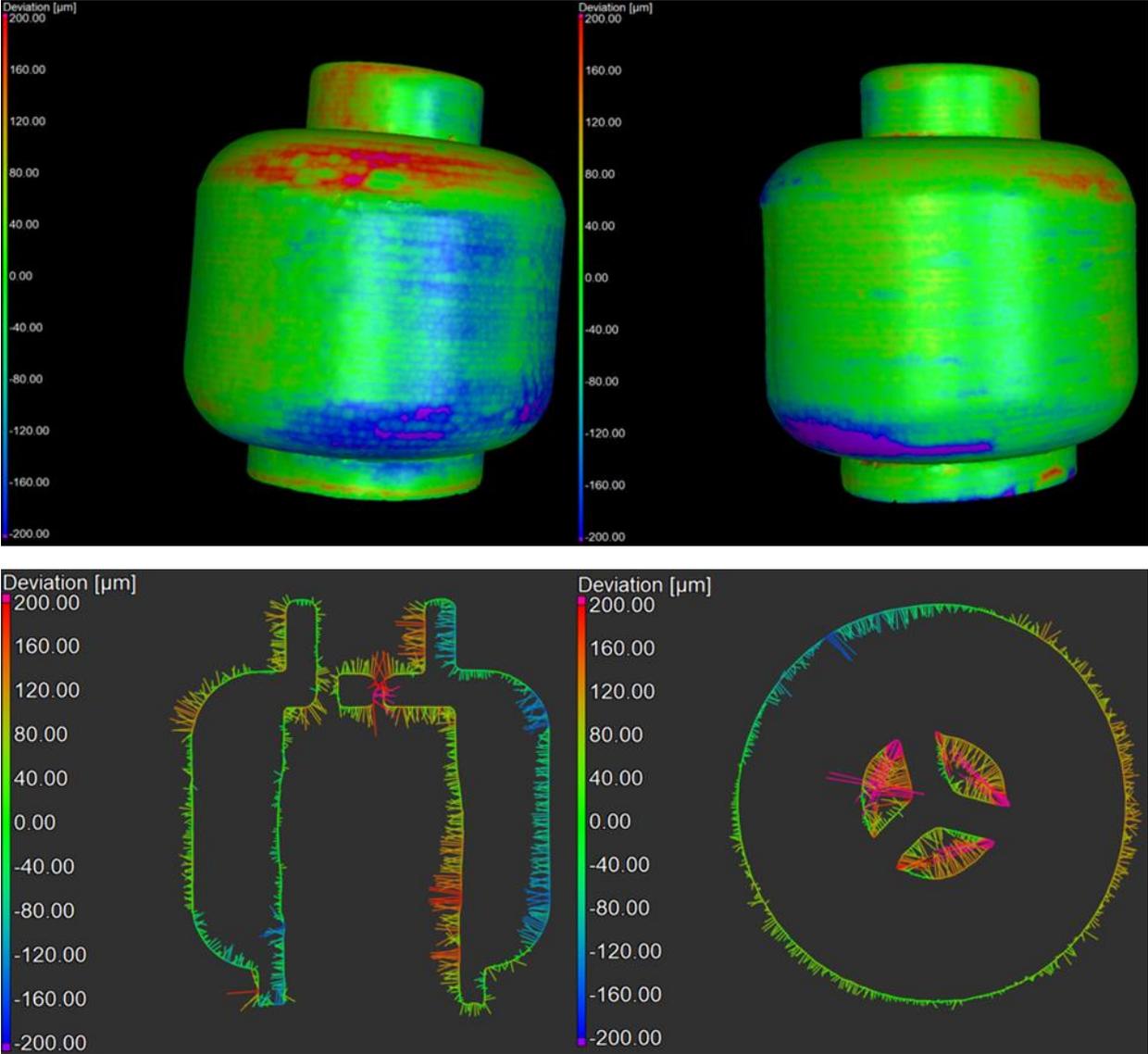


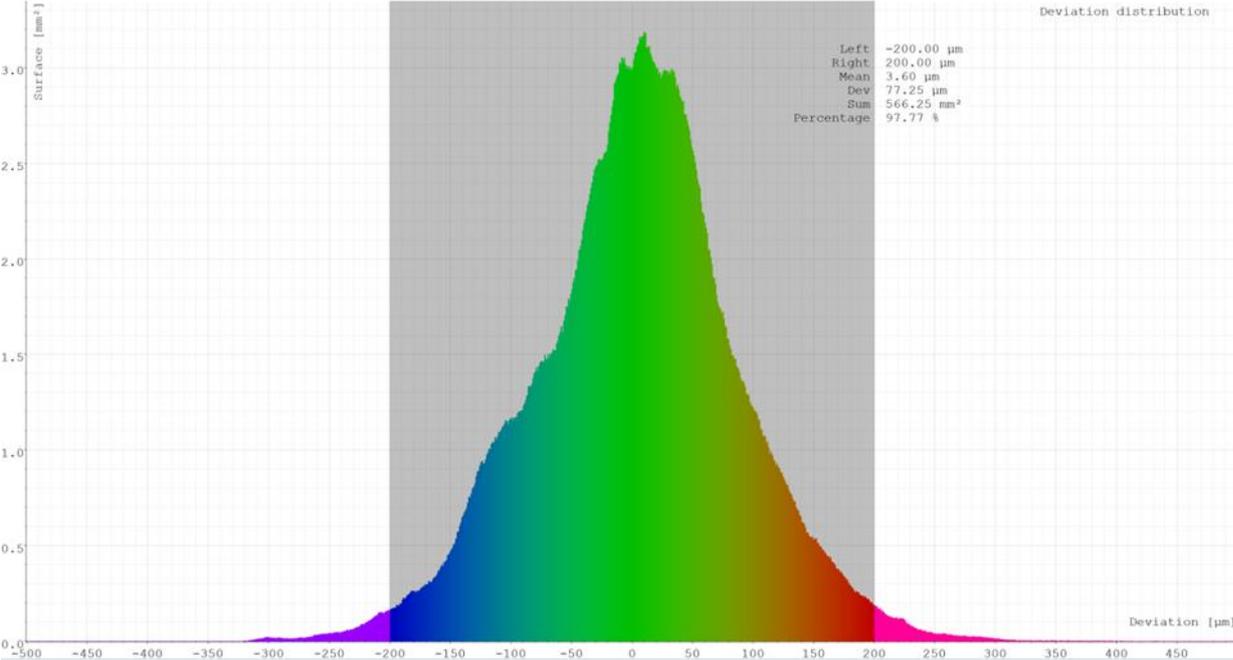
Kumulatives Histogramm: 1x1\_4 pF Legomannoberteil mit Ultimaker 3



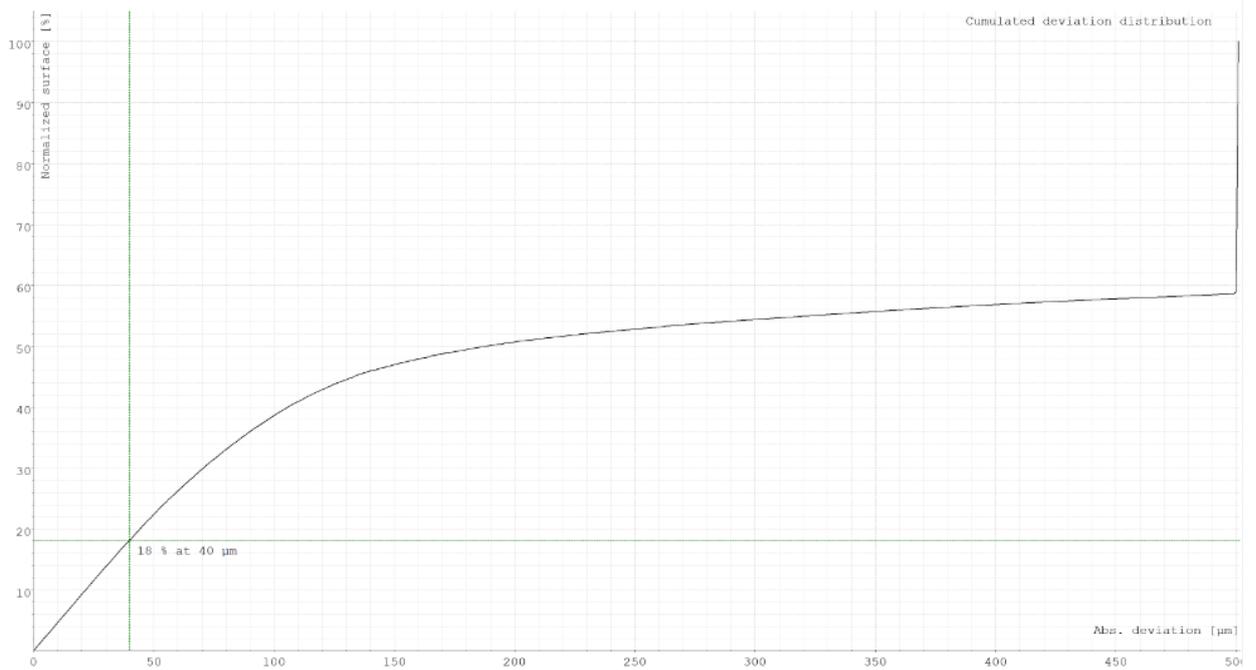
Kumulatives Histogramm: 1x1\_4 pF Legomannoberteil mit Ultimaker 2:1

9. Oberflächenvergleich Kopf

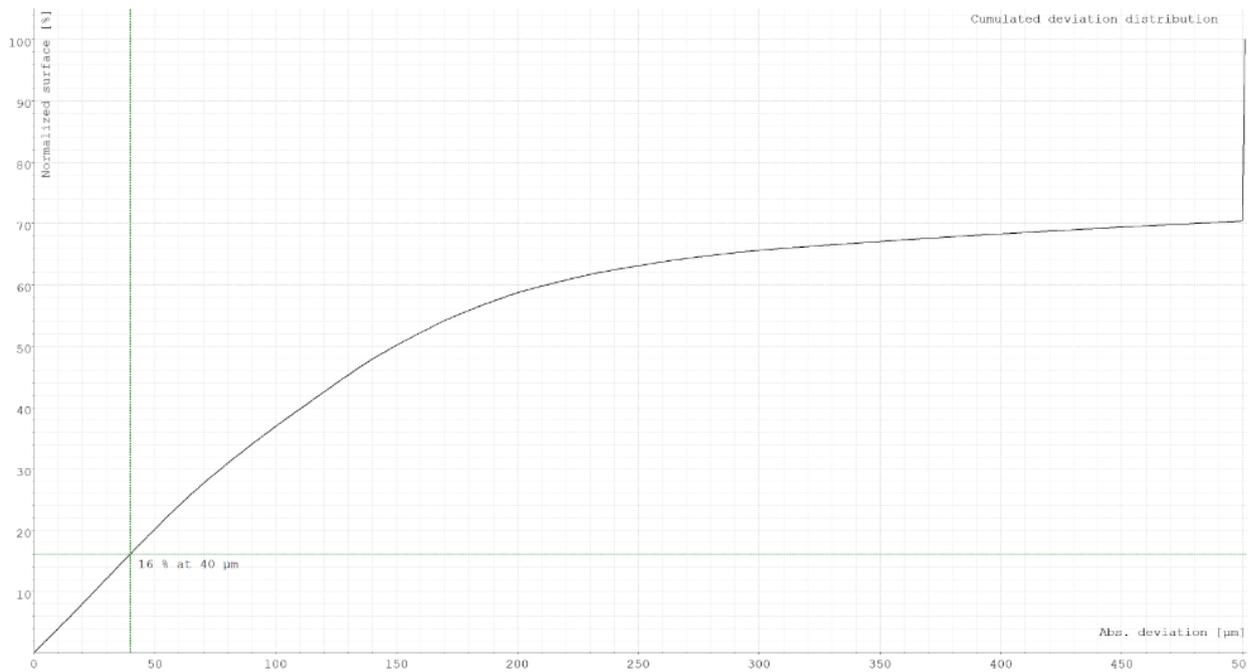




### 10. Kumulative Histogramme: Oberflächenvergleich des Füllhalters



Kumulatives Histogramm Füllhalter mit Ultimaker 3



Kumulatives Histogramm Füllhalter mit Formlabs Form 2

### 11. Oberflächenvergleich Füllhalter UV-gehärtet

