

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades
Bachelor of Science in Informatik

Automatische Segmentierung von Micro-CT Bildern zur Untersuchung zahnmedizinischen Strukturen

erstellt von Lukas Konietzka

Lukas Konietzka

Sebastian-Kneipp-Gasse 6A
86152 Augsburg
T +49 172-2728-376
lukas.konietzka@tha.de

Matrikelnummer:
2122553

**Technische Hochschule
Augsburg**

An der Hochschule 1
D-86161 Augsburg
T +49 821 5586-0
F +49 821 5586-3222
www.tha.de
info@tha.de

Erstprüfer	Prof. Dr. Peter Rösch
Zweitprüfer	Prof. Dr. Gundolf Kiefer
Eingereicht am	November 14, 2024
Verteidigung am	März 20, 2025
Geheimhaltungsvereinbarung	Nein

Kurzfassung

bla

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
1.1. Ziel der Arbeit	2
1.2. Relevanz der Arbeit	3
1.3. Fokus der Arbeit	4
1.4. Aufbau der Arbeit	4
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1. Domänenspezifisch	5
2.2. Technologisch	7
2.2.1. Computertomografie	7
2.2.2. Datensätze	8
2.2.3. Filter	10
2.2.4. Segmentierung	10
2.3. Verwandte Arbeit	10
2.4. 3D Slicer	10
2.4.1. Extention Manager	10
2.4.2. Python Umgebung	10
2.4.3. MRML Datenstruktur	10
2.4.4. Qt-Designer	10
2.5. Architektonisch	10
3. Fragestellung	11
4. Methodik	12
5. Ergebnisse	13
6. Diskussion	14
7. Schlussfolgerung und Ausblick	15
A. Anhang	20
Literaturverzeichnis	21

1. Einleitung

Die Computertomografie (CT) hat die Medizintechnik revolutioniert und ist bis heute eines der wichtigsten Methoden für die Bildanalyse. Sie ist eine der führenden Erweiterungen der klassischen Röntgentechnik. Für die Entwicklung dieser Technologie wurden Godfrey Newbold Hounsfield und Allan McLeod Cormack im Jahre 1979 mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet (Handels 2000, Seite12).

Die Computertomografie wird in den verschiedensten Bereichen und im wahrsten Sinne des Wortes von Kopf bis Fuß eingesetzt. So kommt es, dass auch im Dentalbereich CT aufnahmen von größter Wichtigkeit sind. Abbildung 1.1 zeigt eine solche CT-Aufnahme. Eine konkrete Anwendung in diesem Kontext ist die Zahnkaries Forschung der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie des LMU- Klinikums München.



Abbildung 1.1.: CT-Aufnahme eines Zahns
Quelle (Poliklinik 2024)

Die vorliegende Arbeit soll genau diese Forschung unterstützen. In welchem Umfang und zu welchem Grund ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

1.1. Ziel der Arbeit

Diese Arbeit beschreibt eine Technik, mit der dreidimensionale Micro-CT Bilder zur Untersuchung zahnmedizinischen Strukturen automatisch mittels der Software *3D Slicer* segmentiert und analysiert werden können. Die algorithmische Formulierung einer konkreten Segmentierung ist bereits vorhanden und prototypisch implementiert. Dieser Algorithmus muss jedoch umständlich über ein Kommando im Terminal ausgeführt werden, was die Benutzerfreundlichkeit deutlich beeinträchtigt. Ziel dieser Arbeit ist es nun das bereits implementiert Verfahren automatisiert über ein interaktives User

Interface (UI) zur Verfügung zu stellen. Dabei soll auf etablierte und vertraute Lösungen zurückgegriffen werden.

Es stellt sich nun die Frage, zu welchem Zweck eine automatische und interaktive Segmentierung überhaupt notwendig ist. Für die Zahnklinik an der LMU in München gibt es hierfür viele Gründe. Über den wichtigsten gibt das nächste Kapitel Aufschluss.

1.2. Relevanz der Arbeit

Der wohl relevanteste Punkt dieser Arbeit ist, dass Ärzte reine Anwender und keine Entwickler von Software sind. Darüber hinaus verfolgt die Parodontologie der LMU in München einen sehr interessanten Forschungsansatz, welche eine Segmentbetrachtung der CTs unumgänglich macht.

Über viele Jahre hinweg wurden in der Zahnklinik sehr viel Bilddaten von Zähnen gesammelt, die aufgrund von Zahnkaries entfernt wurden. Hierbei wurden Aufnahmen der unterschiedlichsten Arten gemacht. Darunter fallen zum Beispiel einfache Bilddateien, Infrarotbilder und die für diese Arbeit so relevanten dreidimensionalen Micro-CT Aufnahmen. Dieser große Schatz an Bildmaterial soll verwendet werden, um in ferner Zukunft ein neuronales Netzwerk zu trainieren, welches statistische Aussagen über das Verhalten von Karies treffen kann. Jedoch gibt es hier ein Problem, bei dem das Ergebnis dieser Arbeit Unterstützen kann.

Karies auf CT-Bildern zu lokalisieren ist nicht trivial. Er ist ohne weitere Bearbeitung des Bildes nur sehr schwer auf eine Stelle einzugrenzen. So kommt es vor, dass drei verschiedene Ärzte auf dem selben Micro-CT Bild drei unterschiedliche Stellen mit Karies identifizieren. Eine Segmentierung des dreidimensionalen CTs kann hier Wunder wirken lassen. Durch die Aufteilung des Micro-CTs in seine drei Zahnhartsubstanzen kann in das innere der Zähne geblickt werden, was die Lokalisierung kariöser Stellen deutlich vereinfacht.

Mit dieser klaren und eindeutigen Identifizierung von Karies, sind die Ergebnisse, die ein neuronales Netzwerk generieren würde viel genauer und brauchbarer. Konkret wird mit einer automatischen Segmentierung ein *Ground Truth* gewonnen, der eine eindeutige Basiswahrheit liefert.

Hierbei sei gesagt, dass diese Anwendung nur ein von vielen Möglichkeiten ist. Konkrete Daten über die Ausbreitung einer Krankheit im menschlichen Körper zu besitzen kann in den verschiedensten Fällen und Institutionen von größtem Nutzen sein. So zeigen es auch Crespigny u. a. (2008) in ihrem Paper. Dieses Argument stand dehnung auch für diese

Arbeit bereits zu Beginn im Mittelpunkt und bildet somit den Fokus der Untersuchung, welcher im Nachfolgenden Kapitel näher beleuchtet werden soll.

1.3. Fokus der Arbeit

Für eine automatische Segmentierung von Micro-CT Bildern gibt es einige Softwarelösungen am Markt, die alle eine gute Option sind. Dieser Arbeit setzt den Fokus auf die Open Source Plattform *3D Slicer*. Durch die Modul und Plugin Infrastruktur dieser Plattform kann die Software auch anderen Institutionen bereitgestellt werden. Hierzu muss diese einfach als *3D Slicer Extension* bereitgestellt werden. *3DSlicer* bietet einen Extension Manager, der ähnlich wie ein App Store betrachtet werden kann. So bleibt die vorerst konkret entwickelte Software nicht nur einer Einrichtung vorbehalten.

Diese Arbeit setzt so den Fokus auf die Extension von *3D Slicer* um so eine automatische und interaktive Schnittstelle zu gewähren. Die Optimierung des bereits bestehenden Verfahrens wird nicht thematisiert.

Mit diesem Umfang, der Motivation und dem gesetzten Fokus, ergibt sich für diese Arbeit eine konkrete Struktur die nun kurz erläutert werden soll.

1.4. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. Nach der Einführung in Kapitel 1, in der die Relevanz und der Fokus beschrieben werden, werden in Kapitel 2 die theoretischen und technischen Grundlagen behandelt, welche zum Verstehen der Ergebnisse essenziell sind. Als Ergebnis der theoretischen Grundlagen bildet das Kapitel 3 eine konkrete Forschungsfrage. Während sich Kapitel 4 darum kümmert mit welchen Methodiken und Lösungsansätzen an die Forschungsfrage herangegangen wird, erläutert das Kapitel 5 was die konkreten Ergebnisse der Arbeit sind. In Kapitel 6 erfolgt eine kritische Diskussion der Resultate einschließlich möglicher Limitationen. Das abschließende Kapitel 7 fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.

Die theoretischen Grundlagen die wie beschrieben nach der Einleitung folgen, sind zentral für das Verstehen der Fragestellung und der methodischen Ausarbeitung.

2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel führt in die theoretischen Grundlagen ein, die in dieser Arbeit benötigt werden. Den ersten Teil bilden die domänenspezifischen Grundlagen 2.1, welche genauer darauf eingehen, welchen Inhalt die zu bearbeitenden Bilder bieten und wie dieser zu verstehen ist. Abschnitt 2.2 geht hierbei auf verschiedenen Technologien ein, die eine wichtige Rolle spielen. Der Abschnitt 2.3 geht auf die Arbeit von Hoffmann (2020) ein und legte damit den Grundstein dieser Arbeit. Die Abschnitte 2.4 und 2.5 führen in Softwareentwicklungsthemen ein, die zum Erstellen einer *3D Slicer Extension* wichtig sind.

2.1. Domänenspezifisch

Wie bereits aus dem Kapitel 1 Einleitung klar wurde, handelt es sich bei den Micro-CT Bilder um Zahnbilder, die aufgrund von Zahnkaries entfernt wurden. Um zu verstehen, wie eine CT-Aufnahme eines Zahns aufgeteilt werden soll, ist es hilfreich zu verstehen, wie ein Zahn aufgebaut ist.

Die Abbildung 2.1 zeigt den groben Aufbau eines Zahnes nach K. M. Lehmann u. a. (2012, Seite 17). Zu sehen ist, dass das Dentin oder auch Zahnbein genannt, den Großteil eines Zahnes einnimmt. Im Bereich der Zahnkrone wird das Dentin von Zahnschmelz überzogen. Der Zahnschmelz ragt in die Mundhöhle und ist nach K. M. Lehmann u. a. 2012, Seite 41 das härteste Material im menschlichen Körper. In der Mitte des Zahnes befindet sich Weichgewebe, welches als Pulpa bezeichnet wird vgl. (K. M. Lehmann u. a. 2012, Seite).

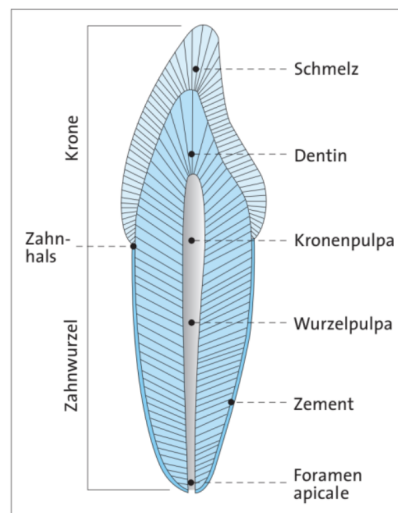


Abbildung 2.1.: Aufbau eines Zahnes nach K. M. Lehmann u. a. (2012)

Für die Bearbeitung von Micro-CT Aufnahmen sind die Bereiche Schmelz, Dentin und Pulpa von besonderer Bedeutung. Betrachtet man eine CT wie es zu Beginn in der Abbildung 1.1 gezeigt wurde, so bilden diese 3 Gewebearten die unterschiedlichen Grauwerte in einem CT-Bild.

Pulpa: Die Pulpa unterscheidet sich hierbei nur wenig vom Hintergrund, da sie als einzige der drei Hauptteile eines Zahnes ein Weichgewebe ist und bei einer Röntgenaufnahme nicht absorbiert. Geht man weiter von innen nach außen, so ist der nächste Zahnteil auf einem CT das Zahnbein.

Dentin: Das Dentin ist laut K. M. Lehmann u. a. (2012, Seite 41) eine Hartsubstanz, die dem Kieferknochen sehr nah steht. So kommt es, dass dieser Teil schon deutlich besser auf einem CT zu erkennen ist. Den äußersten Teil in der Mundhöhle bildet das Zahnschmelz.

Schmelz: Der Schmelz ist wie bereits erwähnt, der härteste Teil im menschlichen Körper und aus diesem Grund auch am hellsten auf dem CT zu erkennen. Die folgende Abbildung 2.2 soll durch Gegenüberstellung den Zusammenhang zwischen einem CT-Bild und einer Zahnzeichnung verdeutlichen.

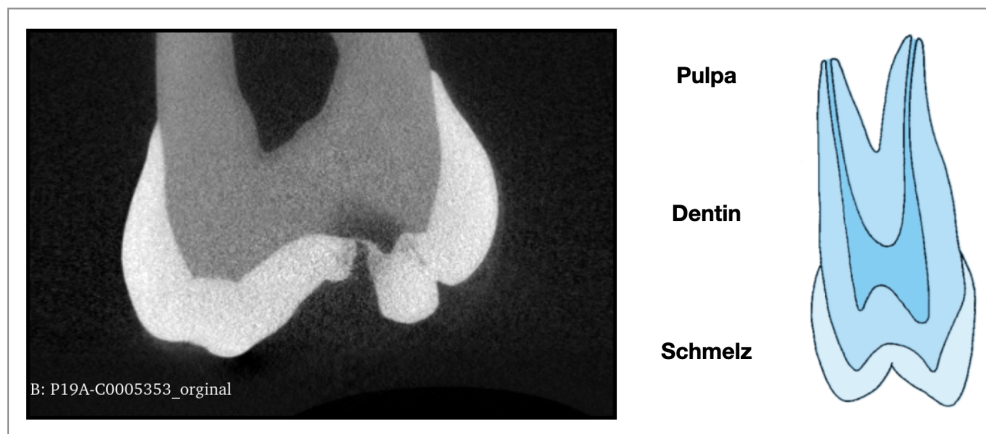


Abbildung 2.2.: Darstellung von Pulpa, Dentin und Schmelz auf einer CT-Aufnahme (links) und einer Zeichnung (rechts) nach K. M. Lehmann u. a. (2012, Seite 29).

Mit diesem Domänenwissen kann ein Schritt weiter gegangen werden, sodass der Fokus nun auf die CT-Bilder gesetzt wird. Das Kapitel 2.2 Technologien führt die Technologie der Computertomografie tiefer ein. Mit diesem Domänenwissen kann ein Schritt weiter gegangen werden, sodass der Fokus nun auf die CT-Bilder gesetzt wird. Das Kapitel 2.2 Technologien führt die Technologie der Computertomografie tiefer ein.

2.2. Technologisch

Dieser Abschnitt erläutert federführend die Technologie der Micro-CT Bilder und deren weitere Bearbeitung. Hierbei soll mit der Computertomografie selbst begonnen werden. Für die Einführung in die Bearbeitung der Micro-CT Bilder bietet das Pipeline-Modell von Handels (2000, Seite 50) eine gute Richtlinie. Er beschreibt mit dieser Visualisierungs-Pipeline Schritte, die bei der Bearbeitung und dreidimensionalen Darstellung von CT-Aufnahmen notwendig sind (vgl. (Handels 2000, Seite 50)).

2.2.1. Computertomografie

Die Erfindung der Computertomografie (CT) war ein Quantensprung in der Geschichte der Medizin. Sie ist aus heutigen Diagnosen nicht mehr wegzudenken. Ein Micro-CT Bild ist laut Baird und Taylor (2017, Abstract) ein Menge hochauflösender Bilder, die wie ein Stapel zusammengelegt werden. Der Aspekt Micro deutet dabei darauf hin, dass es eine miniaturisierte Ausführung eines üblichen Kegelstrahl-CTs ist so Buzug (2011, Seite 340). Eine andere Definition erläutert T. Lehmann u. a. (2013). Er beschreibt die Computertomografie als Projektionen einzelner Ebenen im Untersuchungsobjekt. Die Technologie, mit der diese Bilderstapel aufgenommen werden, ist unter der Röntgentechnik oder auch X-Ray bekannt. Die Röntgenstrahlung ist eine Form der elektromagnetischen Strahlung, ähnlich wie das sichtbare Licht so das National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB) (2024). Anders als das Licht haben die Röntgenstrahlen eine viel höhere Energie. Das führt dazu, dass man mit dieser elektromagnetischen Strahlung viele Objekte durchdringen kann. So auch Gewebeteile eines Zahnes vgl. (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB) 2024). Die Abbildung 2.3 zeigt dieses elektromagnetische Spektrum.

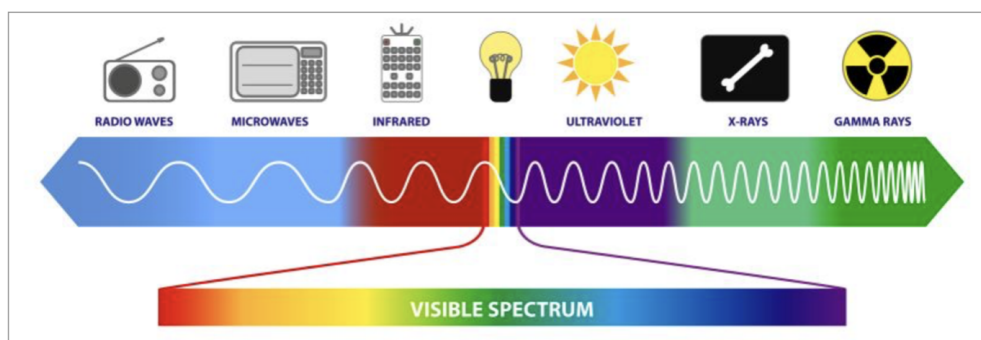


Abbildung 2.3.: Einordnung der Röntgenstrahlung nach dem National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB) (2024)

Durchdringt ein solcher Röntgenstrahl ein Untersuchungsobjekt, werden die Details aufgrund der Wechselwirkung mit Materie auf einer CT-Probe sichtbar. Die bekannteste Wechselwirkung ist die Absorption. Mit der Steigerung der Atomzahl in einem Material nimmt auch die Absorption eines Materials zu, sodass es leicht ist verschiedenen Materialien in einer CT-Aufnahme zu unterscheiden (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB) 2024).

Für eine Micro-CT Aufnahme bedarf es spezieller Technik. Es gibt unterschiedliche Firmen, welche die unterschiedlichsten Modelle anbieten. Im Falle der Zahnklinik an der LMU in München handelt es sich um ein Micro-CT 40 der Firma SCANCO Medical AG (2024). Dieses Gerät erstellt Aufnahmen mittels Röntgenstrahlung und generiert mithilfe der Computertomografie ein dreidimensionales Bild, welches im Format .ISQ abgelegt wird. Wie das Nächste Kapitel beschreiben wird ist der Speicherumfang den solch ein Bild benötigt, deutlich zu groß. Es bedarf einer Technik, mit der die Aufnahmen auf eine handhabbare Größe schrumpfen.

2.2.2. Datensätze

Die rohen Datensätze, welche direkt aus dem Micro-CT Gerät kommen, haben nach SCANCO Medical AG (2024) das Format .ISQ. Dieses Format fällt speziell auf die Geräte der Firma SCANCO zurück. Wie das vorherige Kapitel 2.2.1 bereits eingeführt hat, ist dieser Dateityp für eine weitere Bearbeitung nicht geeignet. Unter anderem wegen ihrer Größe. Rösch und Kunzelmann (2018) haben hierfür ein Paket entwickelt. Dieses konvertiert ein .ISQ Format in ein .mhd Format. Bei einer .mhd Datei handelt es sich um ein Metafile, dass auf die eigentliche Datei verweist. Folgender Ausschnitt zeigt die Verwendung des Pakets.

```
python3 isq_to_mhd.py <quelle> <ziel>
```

Diese Meta-Datei kann genutzt werden, um interessante Informationen über das Bild zu erlangen. Wird dieses Kommando ausgeführt, so erstellt das Skript `isq_to_mhd` ein Metafile, das detailliert Daten über die Datei enthält. Ein Ausschnitt dieses Metafiles liefert das Listing 2.1

```
1 ObjectType = Image
2 NDims = 3
3 CenterOfRotation = 0 0 0
4 ElementSpacing = 0.02 0.02 0.02
5 DimSize = 1024 1024 517
6 ElementType = MET_SHORT
7 ElementDataFile = P01A-C0005278.ISQ
```

2.1.Listing.: Ausschnitt des Inhaltes einer MHD-Datei

In der Datei sind Informationen über die Ausprägung, Art und Größe der Datei zu finden. Besonders interessant sind die Punkte `DimSize` und `ElementType`. Über diese Parameter lässt sich die Größe eines Bildes berechnen. Burger und Burge (2009, Seite 10-11) erklärt, dass ein Bild in Zellen aufgeteilt ist, welche Informationen enthalten. Diese Zellen sind im zweidimensionalen Raum als Pixel bekannt. Betrachtet man jedoch ein, wie im Falle der Zahnklinik an der LMU dreidimensionales Bild, so spricht man nicht mehr von einem Pixeln, sondern von einem Voxel. Ein Voxel ist demnach das dreidimensionale Äquivalent zu einem Pixel. Burger und Burge (2009, Seite 10-11) beschreibt weiter dass jeder diese Zellen ein binäres Wort der Länge 2^k ist. Die Basis 2 ergibt sich durch das binäre Wort, wo hingegen für k gilt: $k \in \mathbb{N}$. Um für den konkreten Fall aus Listing 2.1 das entsprechenden k zu ermitteln, muss der `ElementType` näher betrachtet werden. `MET_SHORT` steht hierbei für Signed short, was eine Größe von 16 Bit entspricht. Damit ergibt sich für die Länge k ein Wert von 4. So können nach Burger und Burge (2009, Seite 10-11) folgende Gleichungen festgehalten werden.

$$\begin{aligned}
 1024 \cdot 1024 \cdot 517 &= 542,113,792 \text{ Voxel} \\
 542,113,792 \text{ Voxel} \cdot 2 \text{ Byte/Voxel} &= 1,084,227,584 \text{ Byte} \\
 1,084,227,584 / 1,000,000,000 &= 1.0842 \text{ GB}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Die erste Gleichung bestimmt die Gesamtzahl aller Voxel in einem Bild. Gleichung 2 ermittelt die Größe des Bildes in der Einheit Byte. Die letzte Zeile nimmt eine Umrechnung von Byte nach Gigabyte (GB) vor.

Durch die Gleichungen in 2.1 wird klar, dass eine CT-Aufnahme des Typs `.ISQ` direkt nach seiner Aufnahme über einen GB groß ist. Laut Poliklinik (2024) ist dies ein zu großes Format. Es stellt sich also die spannende Frage, wie solch eine Datei komprimiert werden kann, ohne dass es Verluste in der Qualität gibt. Dr. Elisa Walter hat hierfür eine Lösung entwickelt. QUELLE Betrachtet man den `ElementType` genauer, so fällt auf, dass es noch weitere Typen gibt, die durch eine geringere Länge k deutlich weniger Speicher benötigen. Durch Anwendung simpler Statistik lässt sich herauslesen, dass die 2^4 Byte je Element nicht ausgenutzt werden. Als Werkzeug für die Betrachtung einer solchen Statistik kann das Histogramm eines Bildes genutzt werden. Dieses zeigt grafisch die unterschiedlichen Grauwerte (X-Achse) zu ihren Häufigkeiten im Bild (Y-Achse). Werden einige der Argumente nicht verwendet, so kann der `ElementType` verkleinert werden.

2.2.3. Filter

2.2.4. Segmentierung

2.3. Verwandte Arbeit

2.4. 3D Slicer

2.4.1. Extention Manager

2.4.2. Python Umgebung

2.4.3. MRML Datenstruktur

2.4.4. Qt-Designer

2.5. Architektonisch

3. Fragestellung

4. Methodik

test

5. Ergebnisse

test

6. Diskussion

test

7. Schlussfolgerung und Ausblick

test

Erklärung zur Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, die eingereichte Abschlussarbeit selbständig verfasst und keine andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Wörtlich oder inhaltlich verwendete Quellen wurden entsprechend den anerkannten Regeln wissenschaftlichen Arbeitens zitiert. Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht anderweitig als Abschlussarbeit eingereicht wurde. Das Merkblatt zum Täuschungsverbot im Prüfungsverfahren der Hochschule Augsburg habe ich gelesen und zur Kenntnis genommen. Ich versichere, dass die von mir abgegebene Arbeit keinerlei Plagiate, Texte oder Bilder umfasst, die durch von mir beauftragte Dritte erstellt wurden.

Augsburg, den 23. November 2024

Lukas Konietzka

Abbildungsverzeichnis

1.1. CT-Aufnahme eines Zahns Quelle (Poliklinik 2024)	2
2.1. Aufbau eines Zahnes nach K. M. Lehmann u. a. (2012)	5
2.2. Darstellung von Pulpa, Dentin und Schmelz auf einer CT-Aufnahme (link) und einer Zeichnung (rechts) nach K. M. Lehmann u. a. (2012, Seite 29).	6
2.3. Einordnung der Röntgenstrahlung nach dem National Institute of Biome- dical Imaging and Bioengineering (NIBIB) (2024)	7

Tabellenverzeichnis

Listings

2.1. Ausschnitt des Inhaltes einer MHD-Datei	8
--	---

A. Anhang

test

Literaturverzeichnis

Baird, Emily und Gavin Taylor (2017). „X-ray micro computed-tomography“. In: *Current Biology* 27.8, R289–R291 (siehe S. 7).

Burger, Wilhelm und Mark James Burge (2009). *Digitale Bildverarbeitung: Eine Algorithmische Einführung Mit Java*. Springer-Verlag (siehe S. 9).

Buzug, Thorsten M (2011). „Computed tomography“. In: *Springer handbook of medical technology*. Springer, S. 311–342 (siehe S. 7).

Crespigny, Alex de, Hani Bou-Reslan, Merry C Nishimura, Heidi Phillips, Richard AD Carano und Helen E D’Arceuil (2008). „3D micro-CT imaging of the postmortem brain“. In: *Journal of neuroscience methods* 171.2, S. 207–213 (siehe S. 3).

Handels, Heinz (2000). *Medizinische Bildverarbeitung*. Springer (siehe S. 2, 7).

Hoffmann, Simon (Jan. 2020). „Unterstützung der Karies-Klassifizierung in Mikro-CT-Aufnahmen durch 3D-Bildverarbeitung“. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Augsburg (siehe S. 5).

Lehmann, Klaus M, Elmar Hellwig und Hans-Jürgen Wenz (2012). *Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde; mit 32 Tabellen*. Deutscher Ärzteverlag (siehe S. 5, 6, 17).

Lehmann, Thomas, Walter Oberschelp, Erich Pelikan und Rudolf Repges (2013). *Bildverarbeitung für die Medizin: Grundlagen, Modelle, Methoden, Anwendungen*. Springer-Verlag (siehe S. 7).

National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB) (2024). *X-Rays - Science Topic*. Zugriff am: 2024-11-15. URL: <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/x-rays> (siehe S. 7, 8, 17).

Poliklinik (2024). *Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie des LMU-Klinikums München*. <https://www.klinikum.uni-muenchen.de/Poliklinik-fuer-Zahnerhaltung-und-Parodontologie/>. Zugriff am 22. November 2024 (siehe S. 2, 9, 17).

Rösch, Peter und Karl-Heinz Kunzelmann (2018). „Efficient 3D Rigid Registration of Large Micro CT Images“. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*; Bd. 13. June 2018, issue 1 (supplement), S. 118–119. doi: 10.1007/s11548-018-1766-y (siehe S. 8).

SCANCO Medical AG (2024). *Brochures and Documentation*. Zugriff am: 22. November 2024 (siehe S. 8).