

**Diplomarbeit**

**Digitale Vermessung von Wurzelkanälen von Prämolaren  
Revaskularisierung bei extraoralen Wurzelresektionen im Rahmen  
von Zahntransplantationen.**

eingereicht von

**Pierre Maximilian Eckhard**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Zahnheilkunde**

**(Dr. med. dent.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Klinischen Abteilung für Orale Chirurgie und Kieferorthopädie**

unter der Anleitung von

Univ. ZÄ Dr.<sup>in</sup> med.univ. Dr.<sup>in</sup> med.dent. Sarah Sommer

Univ.-Prof. Dr.med.univ. Dr.med.dent Norbert Jakse

Graz, am 31.07.2023

## *Eidesstattliche Erklärung*

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Graz, am 31.07.2023*

*Pierre Maximilian Eckhard eh.*

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich tatkräftig bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt und mich im Laufe meines Studiums motiviert haben.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. Norbert Jakse für die Unterstützung und Hilfestellung.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Frau Dr.<sup>in</sup> Dr.<sup>in</sup> Sarah Sommer für die großartige Betreuung im Rahmen der Erstellung meiner Diplomarbeit. Bei Fragen und Anmerkungen konnte ich mich jederzeit an sie wenden.

Außerdem möchte ich mich gern beim biomedizinischen Forschungsteam für die komplikationslose Bereitstellung der Micro-CT Scans bedanken. Ein großer Dank gilt auch Herrn Gerald Ritter für die gründliche Softwareeinschulung.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinen Freunden und Freundinnen für die unvergesslichen Momente bedanken. Nicht nur an der Zahnklinik, sondern auch privat haben wir viel erlebt. Bei jedem Problem konnte ich, und auch in Zukunft werde ich immer auf euch zählen können. Dafür bin ich euch von ganzem Herzen dankbar.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Ohne Eure Hilfe und Unterstützung wäre die wunderbare Studienzeit nicht möglich gewesen. Auch in schwierigen Zeiten stand meine Familie immer hinter mir und motivierte mich. Ein großes Dankeschön geht auch an meine Freundin Caro, die ebenfalls immer und während aller Hochs und Tiefs an meiner Seite stand und mich stets motivierte.

## Zusammenfassung

*Hintergrund:* Der Durchmesser des apikalen Foramen ist in der Autotransplantation von Zähnen ein bedeutender Faktor und hängt direkt mit der Erfolgsquote einer Revascularisierung zusammen. Mit einer gezielten extraoralen Wurzelresektion lässt sich potenziell das Ergebnis bei Prämolaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum verbessern.

*Ziel:* Das Ziel dieser Studie war es, den Wurzelkanaldurchmesser von Prämolaren an unterschiedlichen Positionen digital zu vermessen.

*Material und Methode:* In der folgenden in vitro Studie konnten 50 einwurzelige und zweiwurzelige Prämolare übernommen und mittels Micro-Computertomographie, auf der Abteilung für Biomedizinische Forschung am Universitätsklinikum Graz im Februar 2023, gescannt werden. Im Anschluss wurden die Prämolaren mithilfe von speziellen Softwares analysiert und der Wurzelkanaldurchmesser konnte bei jeder Wurzel einzeln ausgewertet werden.

*Resultate:* In der in vitro Studie konnten nach Abschluss der Micro-CT Scans 41 von den 50 Zähnen für weitere Analysen verwendet werden. Die restlichen 9 Zähne wurden aufgrund einer beschädigten Wurzel nicht einbezogen. Von den 41 Zähnen weisen 9 eine zweite Wurzel auf. Unter den insgesamt 50 Wurzeln befanden sich noch 8 Wurzeln mit einem offenen Apex, die ebenfalls für die statistische Auswertung vermessen wurden.

Als Ausgangsposition wurde die Wurzelspitze herangezogen. Der Durchmesser der 50 Wurzeln konnte an den untersuchten Positionen 0-5 mm gemessen und dargestellt werden. Der Mittelwert der geschlossenen Apices betrug an den Positionen: 0 mm 0,33 mm; 1 mm 0,40 mm; 2 mm 0,51 mm; 3 mm 0,6 mm; 4 mm 0,69 mm; 5 mm 0,78 mm.

Der Mittelwert der offenen Apices betrug an den Positionen: 0 mm 2,25 mm; 1 mm 1,82 mm; 2 mm 1,71 mm; 3 mm 1,56 mm; 4 mm 1,59 mm; 5 mm 1,64 mm.

Des Weiteren wurde untersucht, an welcher Stelle die Wurzelkanäle einen Durchmesser von 1 mm erreichen. Bei den 42 Wurzeln mit abgeschlossenem Wurzelwachstum wurde dieser Durchmesser im Durchschnitt nach 7 mm erreicht, während bei den Wurzeln mit offenem Apex der Durchmesser durchschnittlich bei 0 mm lag.

*Konklusion:* Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Studie zeigt auf, dass extraorale Wurzelspitzenresektionen im Rahmen von Zahntransplantationen bei ausgewachsenen Prämolaren, den Eintritt des Foramen apicale erweitern und dadurch die Wahrscheinlichkeit für eine Revaskularisation erhöht sein kann. Diese Ergebnisse werden auch in der Literatur wiedergespiegelt. Um eine Aussage über die klinische Effizienz der extraoralen Wurzelspitzenresektion im Rahmen der Autotransplantation von ausgewachsenen Prämolaren treffen zu können, bedarf es weitere Studien mit prospektivem Design.

## Abstract

**Background:** The diameter of the apical foramen is a significant factor in tooth auto-transplantation and directly correlates with the success rate of revascularization. A targeted extraoral root resection potentially improves outcomes in premolars with completed root development.

**Objective:** The aim of this study was to digitally measure the root canal diameter of premolars at different positions.

**Materials and Methods:** In this in vitro study, 50 single-rooted and two-rooted premolars were obtained and scanned using micro-computed tomography at the Department of Biomedical Research, University Hospital Graz, in February 2023. Subsequently, the premolars were analyzed using specific software, and the root canal diameter was evaluated for each root individually.

**Results:** In the in vitro study, after completing the micro-CT scans, 41 out of the 50 teeth were available for further analysis. The remaining 9 teeth were excluded due to damaged roots. Among the 41 teeth, 9 had a second root. Among a total of 50 roots, 8 roots had an open apex and were also measured for statistical evaluation. As the starting point, the root apex was used. The diameter of the 50 roots was measured and represented at positions 0-5 mm. The mean diameter of closed apices at positions: 0 mm was 0.33 mm; 1 mm was 0.40 mm; 2 mm was 0.51 mm; 3 mm was 0.6 mm; 4 mm was 0.69 mm; 5 mm was 0.78 mm.

The mean diameter of open apices at positions: 0 mm was 2.25 mm; 1 mm was 1.82 mm; 2 mm was 1.71 mm; 3 mm was 1.56 mm; 4 mm was 1.59 mm; 5 mm was 1.64 mm.

Furthermore, the study investigated the point at which the root canals reached a diameter of 1 mm. Among the 42 roots with completed root development, this diameter was, on average, reached after 7 mm, while for roots with open apices, the average diameter was 0 mm.

**Conclusion:** The study conducted in this work suggests that extraoral root apex resections in tooth transplantation involving mature premolars can enlarge the apical foramen and thereby increase the likelihood of revascularization. These findings are consistent with the literature. To draw a conclusion on the clinical efficiency of extraoral root apex resection in the context of autotransplantation of mature premolars, further studies with a prospective design are needed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IX</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 MORPHOLOGIE DER BLEIBENDEN ZÄHNE .....	2
1.2 SCHNEIDEZÄHNE .....	2
1.3 ECKZÄHNE.....	2
1.4 PRÄMOLAREN.....	2
1.5 MOLAREN.....	3
1.6 MORPHOLOGIE DES FORAMEN APICALE.....	4
1.7 WURZELKANALKONFIGURATIONEN.....	4
1.8 ALTERSBEDINGTE VERÄNDERUNG DES WURZELKANALS .....	5
1.9 AUFBAU DER PULPA UND WURZEL.....	5
<b>2 ZAHNTRANSPLANTATION</b> .....	<b>6</b>
2.1 DEFINITION .....	7
2.2 INDIKATIONEN UND VORAUSSETZUNGEN FÜR EINE ERFOLGREICHE ZAHNTRANSPLANTATION .....	7
2.3 PLANUNG DER ZAHNTRANSPLANTATION.....	8
2.4 OPERATIVE VORGEHENSWEISE .....	8
2.4.1 Zahntransplantation unter Verwendung eines „Dummy“.....	10
2.4.2 Extraorale Resektion .....	10
2.5 POSTOPERATIVE NACHSORGE .....	11
2.6 PARODONTALE HEILUNG.....	11
2.7 PULPAREGENERATION .....	12
2.8 ERFOLGSKRITERIEN EINER ZAHNTRANSPLANTATION .....	13
<b>3 MATERIAL UND METHODIK</b> .....	<b>14</b>
3.1 STUDIENDESIGN .....	14
3.1.1 Hypothesen .....	14

3.1.1	<i>Einschlusskriterien</i> .....	14
3.1.2	<i>Ausschlusskriterien</i> .....	14
3.2	DATENERHEBUNG.....	14
3.2.1	<i>Vorbereitung der Prämolaren</i> .....	14
3.2.2	<i>Allgemein technische Aspekte zum Micro CT</i> .....	15
3.2.3	<i>Vorbereitung für die Micro CTs</i> .....	16
3.2.4	<i>Micro CT Einstellungen</i> .....	17
3.2.5	<i>Auswertung der 3D-Aufnahmen</i> .....	17
3.2.6	<i>Datenverwaltung</i> .....	22
3.2.7	<i>Datenauswertung</i> .....	22
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE</b> .....	<b>23</b>
4.1	ANZAHL DER GEWERTETEN PRÄMOLAREN.....	23
4.2	STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	24
4.2.1	<i>Durchmesserberechnung beginnend von der Wurzelspitze</i> .....	24
4.2.2	<i>Positionsberechnung mit 1mm Durchmesser</i> .....	30
4.3	REPRÄSENTATIVE WURZELBEISPIELE.....	32
4.3.1	<i>Prämolar mit offenem Apex</i> .....	32
4.3.2	<i>Prämolar mit apikalen Ramifikationen</i> .....	33
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	<b>34</b>
5.1	GEGENÜBERSTELLUNG DES WURZELKANALDURCHMESSERS OFFENER UND GESCHLOSSENER APICES.....	34
5.2	LIMITATIONEN.....	35
5.3	VERGLEICH MIT ANDEREN STUDIEN.....	35
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG</b> .....	<b>38</b>
6.1	BLICK IN DIE ZUKUNFT.....	38
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>39</b>

## Abkürzungsverzeichnis

NCPs	noncollagenous proteins
GAGs	Glykosaminoglykane
PGs	Proteoglykanen
kV	Kilovolt
uA	Mikroampere
ms	Millisekunden

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile des Zahns (3) .....	1
Abbildung 2: Zahnmerkmale (3) .....	3
Abbildung 3: Morphologie des Foramen Apicale (4) .....	4
Abbildung 4: Wurzelkanalkonfiguration nach Weine (6).....	5
Abbildung 5: Transplantatbettauflbereitung regio 35 .....	9
Abbildung 6: Zahnreplikat aus Wachs .....	10
Abbildung 7: Extraorale Wurzelspitzenresektion am Zahn 25.....	11
Abbildung 8: Postoperative Schienung des transplantierten Zahnes.....	12
Abbildung 9: Bruker Skyscan 1276 .....	15
Abbildung 10: Carbonbett mit Prämolaren .....	16
Abbildung 11: Fixiertes Carbonbett im Micro CT.....	16
Abbildung 12: Übersichtsscan coronal (links), sagittal (rechts).....	18
Abbildung 13: Dataviewer-Software .....	19
Abbildung 14: Anfang und Endbestimmung des Datensatzes in Ctan.....	20
Abbildung 15: Festlegung des Region of interest.....	21
Abbildung 16: Tasklist .....	21
Abbildung 17: Auswertung in Excel.....	22
Abbildung 18: Boxplot der Wurzeln mit geschlossenem Apex .....	26
Abbildung 19: Boxplot der Wurzeln mit offenem Apex .....	27
Abbildung 20: Mittelwert des Durchmessers bei geschlossenem Apex .....	28
Abbildung 21: Mittelwert des Durchmessers bei offenem Apex .....	29
Abbildung 22: Boxplot Positionsberechnung 1 mm Durchmesser .....	31
Abbildung 23: Durchmesser Zahn Nr. 37 .....	32
Abbildung 24: 3D Visualisierung des Zahnes Nr. 37.....	32
Abbildung 25: Durchmesser Zahn Nr. 109 .....	33
Abbildung 26: 3D Visualisierung Zahn Nr. 109 .....	33

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arten von Transplantationen (13).....	7
Tabelle 2: Zahnnummerierung .....	23
Tabelle 3: Auswertung der geschlossenen Apices.....	24
Tabelle 4: Auswertung der offenen Apices.....	25
Tabelle 5: Positionen bei 1 mm Wurzelkanaldurchmesser .....	30
Tabelle 6: Zusammenfassung der Werte .....	30
Tabelle 7: Werte Zahn Nr. 37 .....	32
Tabelle 8: Werte Zahn Nr. 109 .....	33
Tabelle 9: Mittelwertvergleich von Kerekes and Tronstad, (1977) .....	36
Tabelle 10: Mittelwertvergleich von Grande et al., (2008).....	37

# 1 Einleitung

Jeder Zahn besteht aus den grundlegenden anatomischen Strukturen:

- Zahnkrone (Corona dentis)
- Zahnhals (Cervix dentis)
- Zahnwurzel (Radix dentis)
- Wurzelspitze (Apex dentis)
- Zahnhöhle (Cavitas dentis)
- Zahnpulpa (Pulpa dentis)

Bei einem Menschen mit gesunden Zähnen ragt die Krone mit Schmelz überzogen in die Mundhöhle. Darunter im Oberkiefer- oder Unterkieferknochen ist die Wurzel in der Alveole verankert. Die Zahnwurzel ist mit Zement überzogen und stoßt zervikal am Collum dentis an den Schmelz und bildet dort die Schmelz–Zement-Grenze. Unter dem Schmelz und Zement befindet sich das Dentin, das auch die Pulpa umgibt. Die Pulpa erstreckt sich über den Wurzelkanal bis hin zur Wurzelspitze, wo der Zahn über das Foramen apicale seine arterielle und venöse Versorgung sowie Innervation bekommt. (1,2)

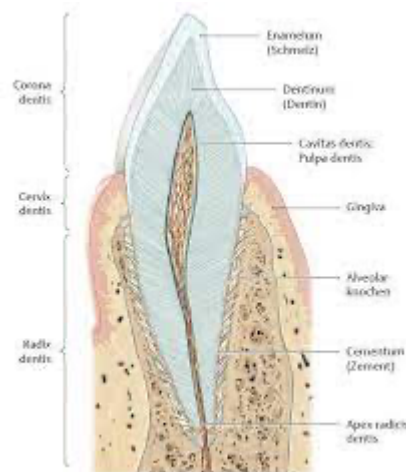


Abbildung 1: Bestandteile des Zahns (3)

## 1.1 Morphologie der bleibenden Zähne

Jeder Zahn im menschlichen Gebiss zeichnet sich durch unterschiedliche anatomische Formen der Krone sowie der Wurzel aus.

## 1.2 Schneidezähne

Die Schneidezähne kennzeichnen sich mit einer scharfkantigen Krone. Die Wurzel zeigt sich im Wurzelquerschnitt rundlich bis oval. Der mittlere Schneidezahn hat grundsätzlich eine gerade Wurzel, während der seitliche Schneidezahn eine Krümmung nach distal oder palatinal aufweist. (2,3)

## 1.3 Eckzähne

Ein Merkmal des Eckzahnes ist seine geteilte Schneidekante, die gemeinsam eine Spitze bildet. Die Wurzel ist lang und im Querschnitt zumeist oval. Am apikalen Ende weist die Wurzel oftmals ein nach distal gerichtetes Häkchen auf. Mit seiner Länge meist über 30 mm kann der Eckzahn für manch endodontischen Misserfolg sorgen. (2,3)

## 1.4 Prämolaren

Mit ihrer zweihöckrigen Kaufläche in bukkal-oraler Richtung zeichnen sich die Prämolaren als Übergangszähne von Schneide- zu Mahlzähnen aus. Bei der Wurzelform differenzieren sich die Prämolaren stark. Der erste im Oberkiefer kann zu einer 60 % Chance zweiwurzellig sein. Die Anordnung jener wäre in bukkal-oraler Richtung und die Kanäle wären brillenförmig. Die Wurzeln sind gekrümmt und die bukkale hat eine konkave Form. In 40 % der Fälle liegt eine Wurzel vor, die oft einen geteilten Kanal aufweist, der sich apikal wieder vereint und das Foramen apicale bildet. Der zweite Prämolare im Oberkiefer besitzt zu 90 % nur eine Wurzel. Die Zahnwurzel zeigt in 30 % der Fälle eine variable Konfiguration mit zwei Kanälen. Die unteren Prämolaren haben in der Regel nur eine Wurzel. (2,3)

## 1.5 Molaren

Sie sind die größten Zähne im menschlichen Gebiss und verfügen in der Regel über drei Wurzeln im Oberkiefer und zwei Wurzeln im Unterkiefer. Bei den Molaren im Oberkiefer befinden sich überwiegend drei Kanäle: ein mesiobuccaler, ein distobuccaler und ein palatinaler Kanal. Die mesiobuccale Wurzel weist eine abgeflachte Form auf, während die anderen beiden eine runde bis ovale Form haben. Bei 40 bis 90 % der ersten oberen Molaren befindet sich ein weiterer mesiobuccaler Kanal, der als Mesiobuccale 2 bezeichnet wird. Der zweite obere Molar unterscheidet sich im Wesentlichen nicht vom ersten. Die erhöhte Wahrscheinlichkeit eines zusätzlichen Kanals in der mesiobuccalen Wurzel ist die einzige Abweichung. Eine Sonderform der Wurzelkonfiguration ist das Taurodont. Dabei handelt es sich um eine Vereinigung der Wurzeln und Kanäle zu einer großen Wurzel und einem zentralen Kanal. Die Prävalenz für einen sogenannten Pfahlzahn liegt im deutschsprachigen Raum bei 2 %. Die unteren Molaren sind in der Regel immer mit zwei Wurzeln bestückt, einer mesialen und einer distalen. Die mesiale Wurzel ist nach distal geneigt, während die distale Wurzel meist gerade verläuft. In der mesialen Wurzel befinden sich zwei Kanäle, die sehr häufig eine Vereinigung aufweisen. In der distalen Wurzel kommt grundsätzlich nur ein Kanal vor. Wie auch bei Oberkiefermolaren, können auch bei Unterkiefermolaren Pfahlwurzeln auftreten.(2,3)

Unterkieferzahn	Zahl der Höcker	Zahl der Wurzeln	Zahl der Wurzelkanäle	Unterkieferzahn	Zahl der Höcker	Zahl der Wurzeln	Zahl der Wurzelkanäle
I1 (31/41)	Schneidekante	1	1 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %) 3 (selten)	I1 (31/41)	Schneidekante	1	1 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %) 3 (selten)
I2 (32/42)	Schneidekante	1	1 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %)	I2 (32/42)	Schneidekante	1	1 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %)
C (33/43)	Kauspitze		1 (ca. 80 %) 2 (ca. 20 %)	C (33/43)	Kauspitze		1 (ca. 80 %) 2 (ca. 20 %)
P1 (34/44)	2 (75 %) 3 (25 %)	1	1 (ca. 75 %) 2 (ca. 25 %) 3 (selten)	P1 (34/44)	2 (75 %) 3 (25 %)	1	1 (ca. 75 %) 2 (ca. 25 %) 3 (selten)
P2 (35/45)	3 (lingualer Höcker meist zweigeteilt)	1	1 (ca. 95 %) 2 (ca. 5 %) 3 (selten)	P2 (35/45)	3 (lingualer Höcker meist zweigeteilt)	1	1 (ca. 95 %) 2 (ca. 5 %) 3 (selten)
M1 (36/46)	5	2	3 (ca. 75 %) 2 (ca. 25 %) 4 (selten)	M1 (36/46)	5	2	3 (ca. 75 %) 2 (ca. 25 %) 4 (selten)
M2 (37/47)	4	2	3 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %) 4 (selten)	M2 (37/47)	4	2	3 (ca. 70 %) 2 (ca. 30 %) 4 (selten)
M3 (38/48)	meist 4 (sehr variabel)	meist 2 (sehr variabel)	unregelmäßig	M3 (38/48)	meist 4 (sehr variabel)	meist 2 (sehr variabel)	unregelmäßig

Abbildung 2: Zahnmerkmale (3)

## 1.6 Morphologie des Foramen Apicale

Das Foramen apicale ist ein Zugang zur Zahnpulpa eines Zahnes, in den der Gefäß-Nervenstrang zieht. Oftmals kommt es vor, dass nicht nur ein Foramen vorliegt, sondern eine sogenannte apikale Ramifikation auftreten kann. Dabei handelt es sich um zahlreiche akzessorische Kanäle, von denen jeder ein eigenes Foramen besitzt. Weiterhin wird der physiologische Apex, der anatomische Apex und der radiologische Apex unterschieden.

Der physiologische Apex ist die engste Stelle des Wurzelkanals mit einem Durchmesser von 0,15-0,25 Millimetern. Morphologisch befindet sich dort die Zement-Dentin-Grenze.

Als anatomischen Apex bezeichnet man die Wurzelspitze. Die Wurzelspitze, die sich im Röntgenbild darstellt, wird als radiologischer Apex bezeichnet. Der Abstand vom physiologischen Apex zum anatomischen Apex beträgt 0,5-1 Millimeter.(2)

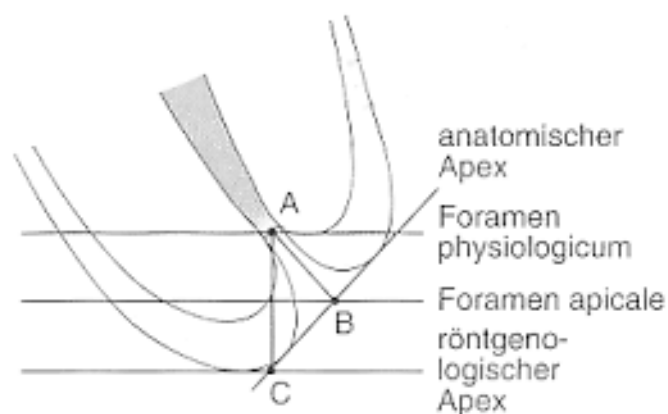


Abbildung 3: Morphologie des Foramen Apicale (4)

## 1.7 Wurzelkanalkonfigurationen

Die Wurzelkanalmorphologie eines Zahnes kann in Bezug auf Lage und Form sehr spezifisch sein. Es gibt viele Kombinationsmöglichkeiten und Klassifizierungen. Die am häufigsten verwendeten Klassifikationen sind diejenigen nach Weine und Vertucci. (2,5)

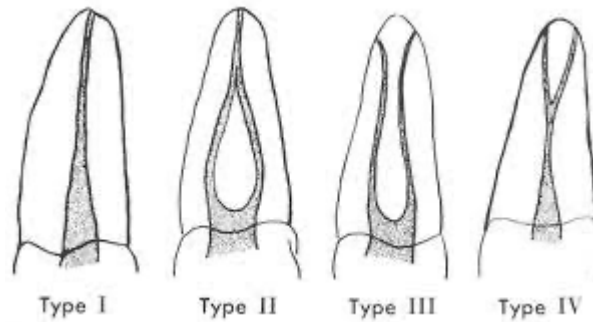


Abbildung 4: Wurzelkanalkonfiguration nach Weine (6)

## 1.8 Altersbedingte Veränderung des Wurzelkanals

Während des Alterungsprozesses kommt es zur Verkleinerung des Wurzelkanals sowie der Pulpakammer. Zur Obliteration kommt es durch Odontoblasten, welche eine andauernde Bildung von Sekundärdentin hervorrufen. (2,7)

## 1.9 Aufbau der Pulpa und Wurzel

Die Pulpa ist ein faserreich, gut vaskularisiertes und innerviertes Weichgewebe des Endodonts. Sie wird auch als das Weichgewebe im Zahninneren bezeichnet und verfügt über eine Blutversorgung, welche über das Foramen apicale bis hin zur subodontoblastischen Zone vordringt und sich dann in Kapillaren aufspaltet. Das Nervensystem des Zahnes, bestehend aus myelinisierten A-Fasern und nichtmyelinisierten C-Fasern, tritt ebenfalls über das Foramen apicale ein und bildet in der Weil'schen Zone einen Nervenplexus aus. Zu den Funktionen der Nerven gehören die Weiterleitung von Schmerz, die vasomotorische Kontrolle und die Anregung von Dentinogenese sowie Odontoblastenaktivität. Die Schnittstelle zwischen Dentin und Pulpa bilden die Odontoblasten mit ihrer Odontoblastenschicht. Die primären Odontoblasten haben die Aufgabe, lebenslang Sekundärdentin oder Tertiärdentin auszubilden. Wenn ein Odontoblast zugrunde geht, entsteht aus einer mesenchymalen Vorläuferzelle ein neuer, gleichartiger Odontoblast. Fibroblasten sorgen für die Grundsubstanz in der Pulpa. Sie produzieren Kollagenfasern und sind somit der am häufigsten vorkommende Zelltyp in der Pulpa. Ein weiterer Zelltyp, der vereinzelt in der Pulpa anzutreffen ist, ist die Immunzelle. Im fortgeschrittenen Alter kommt es zu einer Veränderung der Pulpa, das Volumen nimmt stark ab und es kommt zu einer sogenannten Obliteration. Grund dafür ist die vermehrte Ablagerung von Sekundärdentin sowie die Verringerung der Zellzahl. (8)

Die Zahnwurzel ist jener Teil, der sich unterhalb des Zahnhalses befindet und sich bis zur Wurzelspitze erstreckt. Der Hauptbestandteil der Wurzel besteht aus Dentin. Darüber befindet sich der Zement, eine Schicht mineralisierte Hartsubstanz. Dieser dient nicht nur zum Schutz des Dentins, sondern ist auch ein Hauptbestandteil des Zahnhalteapparats.

Das reife Dentin besteht aus einem Geflecht aus Kollagenfasern (Typ1), in dem das Kalziumhydroxylapatit eingelagert ist. Die Kollagenfasern machen einen Anteil von 20 %, des gesamten Dentins aus, Kalziumhydroxylapatit einen Anteil von 70 %. Die restlichen 10 % sind Wasser.

Das Wurzel dentin ist von einer Schicht Zement bedeckt. Die Schichtdicke beträgt 100-500 Mikrometer und nimmt von zervikal nach apikal zu. Der Zement besteht aus einem zellulären Anteil und einer mineralisierten extrazellulären Matrix. Der kleine zelluläre Anteil setzt sich aus Zementoblasten zusammen. Der größere Anteil bildet die extrazelluläre Matrix, bestehend aus Wasser, Kollagen und NCPs. Die Kollagene, hauptsächlich Typ 1 und Typ 3, machen 80-90 % der extrazellulären Matrix aus. Das Kollagen zusammen mit den NCPs bildet eine organische Einheit, in der sich anorganische Minerale einlagern. (9,10)

## 2 Zahntransplantation

Die Praxis der Zahntransplantation in der Zahnheilkunde ist seit Jahrhunderten bekannt. Aus ethischen und medizinischen Gründen werden nur noch autologe Transplantationen durchgeführt. Am häufigsten werden dritte Molaren als Spenderzähne verwendet, um Zähne zu ersetzen, die früh im Bereich der Molaren verloren gegangen sind. Zum ersten Mal wurde die Heilung von transplantierten Zähnen 1930 untersucht. Bei vollständigem Desmodont und physiologischen Gegebenheiten ist eine vollständige Einheilung des Zahnes in das Transplantationsbett möglich. Durch Einhaltung der Indikationen und sorgfältige Operation können Begleitschäden, die zum Versagen des Zahntransplantats führen, vermieden werden. Basierend auf Langzeitstudien können Autografts als gute Alternative zu Brücken und implantatgetragenen Restaurationen angesehen werden. Heutzutage ist die Zahntransplantation aus der Zahnheilkunde nicht mehr wegzudenken. (11–13)

## 2.1 Definition

Abgeleitet vom Lateinischen „transplantare“, was „umpflanzen“ bedeutet, bezeichnet die Transplantation die Übertragung von Zellen, Geweben oder Organen auf eine andere Person oder einen anderen Körperteil derselben Person zu therapeutischen Zwecken. Als Zahntransplantation wird die Verpflanzung eines Zahnes oder Zahnkeimes in ein geschaffenes Zahnbett im Alveolarfortsatz oder in eine Alveole eines zuvor entfernten Zahnes bezeichnet. Die Wurzelform wie auch das Transplantatbett müssen von der Form korrelieren. Unterschieden werden mehrere Arten von Transplantationen basierend auf Spender und Empfänger, wobei heutzutage nur noch die autogene Transplantation in der Zahnmedizin Einzug hält. (12,13)

<b>Autogene Transplantation</b>	Transplantation zwischen einem Individuum
<b>Allogene Transplantation</b>	Transplantation auf ein genetisch unterschiedliches Individuum derselben Art
<b>Isogene Transplantation</b>	Transplantation bei genetisch identischen Individuen
<b>Xenogene Transplantation</b>	Artfremde Transplantation, wobei Spender wie auch Empfänger aus verschiedenen Spezies stammen.

Tabelle 1: Arten von Transplantationen (13)

## 2.2 Indikationen und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Zahntransplantation

Die Indikationsstellung für eine Zahntransplantation ist breit gefächert. Aus kieferorthopädischer, kariologischer, traumatologischer, parodontologischer und endodontologischer Sicht können Diagnosen gestellt werden, die eine Zahntransplantation benötigt. Entscheidend hierfür sind das Alter der Patient\*innen sowie die Entwicklung des zu transplantierenden Zahnes. Idealerweise liegt ein unvollendetes Wurzelwachstum von 50-70 % vor. Das Vorhandensein eines offenen Apex erhöht die Chance einer erfolgreichen Revaskularisierung.

Somit kann die günstigste und prognostisch beste Situation für den Zahn geschaffen werden. Es wird außerdem empfohlen, stark verlagerte oder impaktierte Zähne nicht

zu transplantieren, da dies das Risiko einer Ankylose erhöht und die Entfernung erschwert.(11,12)

Heutzutage werden am häufigsten Weisheitszähne transplantiert. Die klassische Indikation ist ein nicht erhaltungswürdiger erster Molar oder eine Nichtanlage durch einen persistierenden Milchzahn. Verloren gegangene Schneidezähne lassen sich durch Prämolaren ersetzen. (12)

Für eine erfolgreiche Zahntransplantation ist wie vor jedem chirurgischen Eingriff eine sorgfältige Voruntersuchung der Patient\*innen notwendig. Beginnend mit der Anamnese, bei der allgemeinmedizinische Daten wie Vorerkrankungen, mögliche Allergien und verschrieben Medikamente erhoben werden. Besonderes Augenmerk sollte auf Allergien gelegt werden, die sich auf das Lokalanästhetikum oder postoperative Medikamente auswirken könnten, sowie auf Vorerkrankungen oder Medikamente, die die Blutungsneigung der Patient\*innen erhöhen könnten. Vorhandene Entzündungen oder Infektionen sollten im Vorfeld behandelt werden, und es wird eine gute Mundhygiene und Kooperation seitens der Patient\*innen erwartet. Sollte einer dieser Punkte nicht erfüllt sein, sollte auf eine Zahntransplantation verzichtet werden. (12)

### 2.3 Planung der Zahntransplantation

Für eine erfolgreiche Zahntransplantation ist die präoperative Planung mittels Radiologischer Untersuchung und Medikamentöser Einstellung essenziell. Eine dreidimensionale Röntgenaufnahme, um das Zahntransplantat und das Transplantatlager zu bemessen, ist für einen guten Erfolg unerlässlich. Ist ein zu geringes Platzangebot vorhanden, besteht die Möglichkeit, Nachbarzähne durch proximale Schmelzreduktion auf maximal 0,5 mm abzuschleifen oder die Situation mit einer präoperativen kieferorthopädischen Therapie zu korrigieren. (12,14)

### 2.4 Operative Vorgehensweise

Zur Gewinnung des Transplantats werden bei Zahnkeimen oder retinierten Zähnen unter Schonung Knochen coronal entfernt und ohne Verletzung der Wurzeloberfläche das Transplantat langsam aus dem Knochenbett gelockert und gezogen. Wenn

der zu transplantierte Zahn bereits durchgebrochen ist, wird vor der Extraktion das zervikale Parodont mittels eines Skalpells scharf durchtrennt. Extraoral ist zu beachten, dass jegliche Berührungen mit dem Desmodont vermieden werden sollten, um der Gefahr einer Ankylose oder Zerstörung der Wurzeloberfläche zu entgegen. Übergangsweise kann der zu transplantierte Zahn in ein Nährmedium eingelegt werden. Dafür eignen sich physiologische Kochsalzlösung oder eine Zahnrettungsbox (Dentosafe®). Zusätzlich wird dem Nährmedium ein Antibiotika-Steroid-Gemisch hinzugefügt, um die antiresorptiven und regenerationsfördernden Komponenten zu unterstützen. Die Einwirkzeit auf die Wurzeloberfläche beträgt 10 Minuten, dadurch erhöht sich die parodontale Heilung des Zahnes und reduziert die Gefahr einer Ankylose. (11,12)

Befindet sich noch ein Zahn an der Empfängerposition, sollte dieser vor der Gewinnung des Transplantats entfernt werden. Ebenso werden die zirkulären Fasern mithilfe eines Skalpells scharf abgetrennt, um einen dichten gingivalen Verschluss, zwischen Transplantat und Transplantatbett zu erlangen. Das Standardverfahren zur Transplantatbettaufrbereitung ist es den Knochen so zu gestalten, dass eine perfekte Passung für das Transplantat gegeben ist. Bei der Einprobe des Transplantats ist es von Bedeutung, so wenig Druck wie möglich auszuüben, um Schäden an der Wurzeloberfläche oder der Hertwig-Epithelscheide zu vermeiden. Ein lockerer Kontakt zwischen Knochen und Zahn wird angestrebt, bei zu strengem Kontakt wird mit einem wurzelkonformen Bohrer und guter Kühlung der Knochen korrigiert. Nachdem die korrekte Position gefunden wurde, ist es entscheidend, eine gute Schienung für das Transplantat zu gewährleisten. Dies wird sowohl durch die Naht als auch durch eine Draht-Komposit-Schiene erreicht. (12,15)

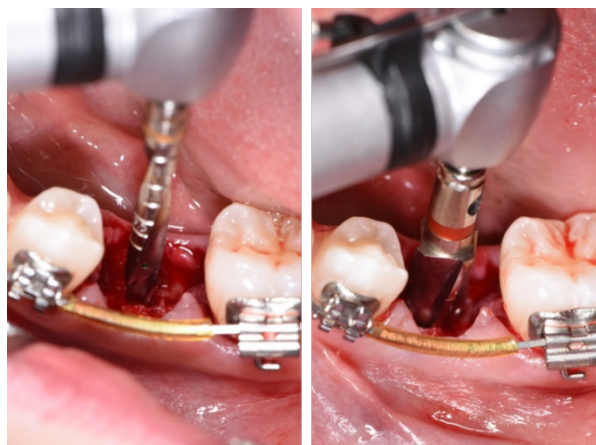


Abbildung 5: Transplantatbettaufrbereitung regio 35 (Foto Prof. Jakse)

### 2.4.1 Zahntransplantation unter Verwendung eines „Dummy“

Bei der Autotransplantation ist es entscheidend, die extraalveoläre Zeit so kurz wie möglich zu halten. Unter der Verwendung einer chirurgischen Schablone kann die Transplantatbettaufrbereitung bereits vor der Extraktion des Zahntransplantats vollbracht werden. Die Chance einer Pulpanekrose und die Gefahr einer parodontalen Schädigung kann somit weiter minimiert werden. Präoperativ wird aus DVT-Daten ein Dummy mittels einer Software konstruiert und anschließend 3D gedruckt. Das Kunststoffmodell wird schließlich in Kobalt-Chrom gegossen. Bei einem noch nicht abgeschlossenen Wurzelwachstum wird der Prototyp apikal um 1,5 Millimeter verlängert, um die Wurzelentwicklung in der Zeit zwischen dem DVT und der Operation auszugleichen. (16,17)

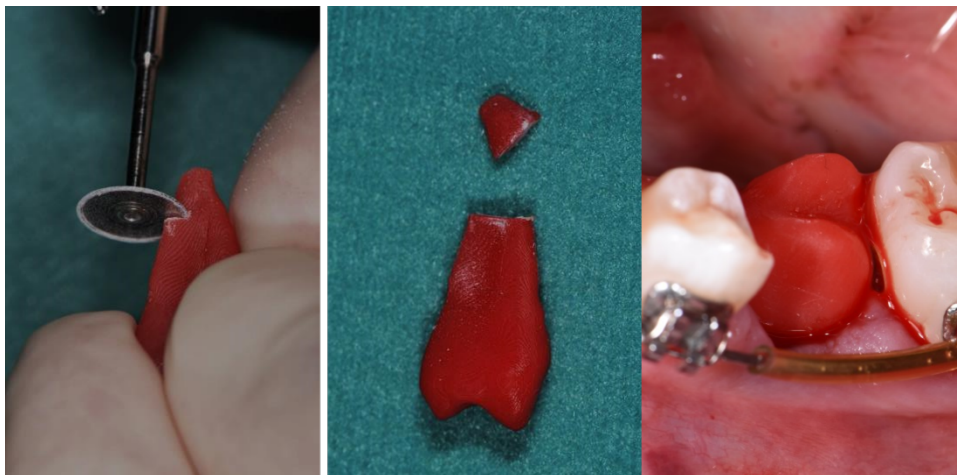


Abbildung 6: Zahnreplikat aus Wachs (Foto Prof. Jakse)

### 2.4.2 Extraorale Resektion

Bei der extraoralen Resektion handelt es sich um einen operativen Zwischenschritt in der Zahntransplantation, der potenziell zu einer besseren Revaskularisierung des zu transplantierenden Zahnes führen kann, wenn das Wurzelwachstum abgeschlossen ist. Nach der schonenden Extraktion des Zahnes wird mit einer Diamantscheibe unter Wasserkühlung die Wurzelspitze gekürzt und in das vorbereitete Transplantatbett eingesetzt. Während dieses Vorgangs wird der Zahn dauerhaft mit der Extraktionszange gehalten. Die extraalveoläre Zeit kann signifikant verkürzt werden, indem vorab ein Zahnreplikat erstellt wird. (18)

Besonderes Augenmerk sollte auf die genaue Bestimmung der zu resezierenden Wurzellänge gelegt werden. In der Literatur wird beschrieben, dass bei einem Wurzelkanaldurchmesser von 1 mm oder größer eine Revaskularisierung möglich ist. Bei einem Durchmesser von weniger als 1 mm ist nicht mit einer Revaskularisierung zu rechnen. (19)

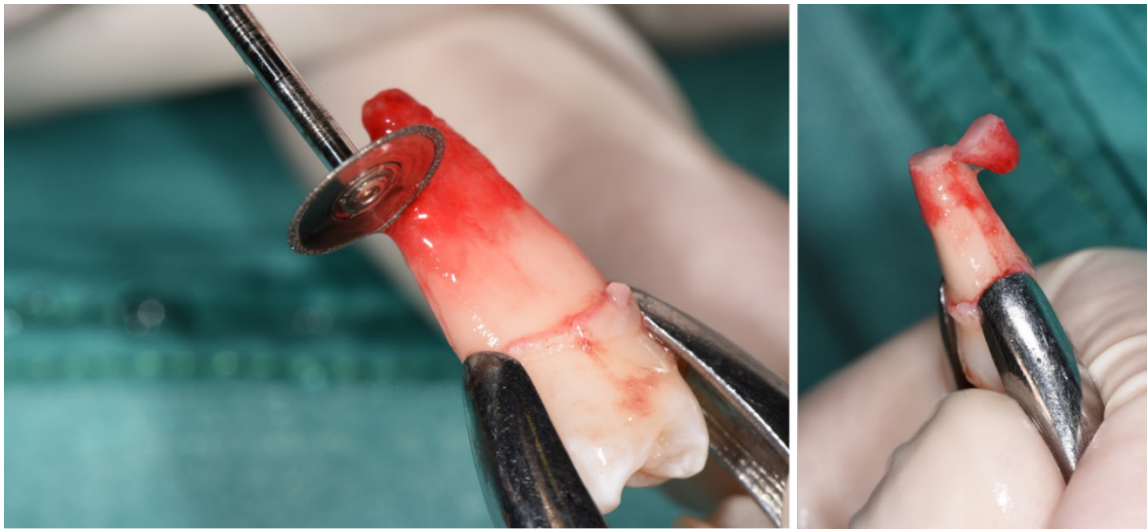


Abbildung 7: Extraorale Wurzelspitzenresektion am Zahn 25 (Foto Prof. Jakse)

## 2.5 Postoperative Nachsorge

Bedingt durch den Verlauf der Operation, Alter, Vorerkrankungen und Blutungseigenschaften der Patient\*innen ist nach der Transplantation eine medikamentöse Therapie indiziert. Zur Schwellungsprophylaxe werden Kryotherapie und Schmerzmittel empfohlen. Ob eine systemische Antibiose benötigt wird, hängt vom operativen Verlauf ab. Nach einer Woche wird die Naht entfernt und nach 2-4 Wochen wird die Entfernung der Schiene situationsbedingt entschieden. Um einen Verlust des Transplantats zu vermeiden werden engmaschige Kontrollen im vierteljährlichen Abstand durchgeführt, bei denen die Sensibilität, Mobilität und Sondierungstiefe gemessen werden. Zusätzlich wird regelmäßig eine radiologische Kleinbildaufnahme angefertigt. (12)

## 2.6 Parodontale Heilung

Das Parodontium besteht aus Alveolarknochen, Desmodont, Wurzelzement und Gingiva, welche gemeinsam eine funktionale Einheit bilden. Die Hauptaufgabe des

Parodonts besteht darin, den Zahn in der Alveole zu verankern, Kaukräfte abzufangen und den Parodontalspalt vom Mundmilieu zu trennen. (2)

Im Zuge der Zahntransplantation wird das parodontale Ligament vollständig durchtrennt. Die Zwischenlagerung in einem zellphysiologischen Lagerungsmedium während der extraoralen Aufbewahrung ist der erste wichtige Schritt in Richtung parodontaler Heilung. Somit kommt es zu keiner Blockade des Stoffwechsels der Zementblasten und Parodontalfibroblasten. Die Grundlage für das sogenannte Reattachment des Parodontiums sind vitale Desmodontalzellen an der Wurzeloberfläche. Nur so kann sich der desmodontale Faserapparat zwischen Alveolarknochen und Wurzeloberfläche reorganisieren. Nach erfolgter Transplantation wird der Zahn temporär geschient, um unerwünschte Kippungen zu verhindern und die parodontale Heilung positiv zu beeinflussen. (2,13)

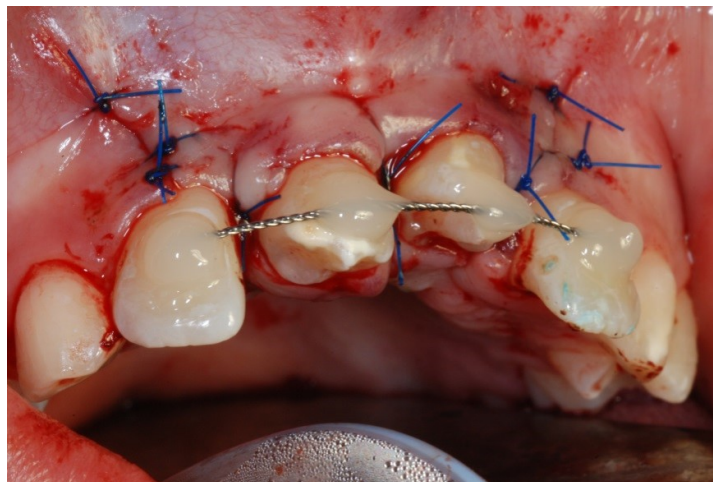


Abbildung 8: Postoperative Schienung des transplantierten Zahnes (Foto Prof. Jakse)

## 2.7 Pulparegeneration

Für eine erfolgreiche Regeneration sind grundsätzlich drei Faktoren wichtig: Zellen, Wachstumsfaktoren und eine Matrix, in der die Zellen einwachsen können. Unter der Revaskularisierung versteht man die Wiederherstellung der Funktion und Form des Pulpa-Dentin-Komplexes. Ein erstes positives Anzeichen einer Regeneration der Pulpa ist der radiologische Nachweis einer Pulpaobliteration. Im Röntgen ist eine Verengung des Wurzelkanals sichtbar. Zu Beginn entwickelt sich eine fibrotische histologische Struktur mit diffusen Mineralisationsbereichen und Pulpasteinen,

die in wesentlichen Punkten von der ursprünglichen abweicht. Während der Regeneration von verletztem Gewebe treten drei aufeinanderfolgende Phasen auf. Die erste ist eine anfängliche leichte Entzündung, die mit der Zellanhaftung verbunden ist. Die zweite Phase ist die Proliferationsphase, die es ermöglicht, den Defekt mit der erforderlichen Zellmasse zu füllen. Die dritte und letzte Phase beschreibt die Differenzierung der Zellen in einen festgelegten Phänotyp. Diese Schritte beinhalten eine Reihe von Ereignissen, einschließlich Chemotaxis, Phagozytose und beschleunigte Kollagenbildung. Weiters kommt es zur Produktion von GAGs und PGs und Synthese anderer extrazellulärer Matrixproteine, von denen angenommen wird, dass sie für geschädigte Gewebe spezifisch sind.(20–22)

## 2.8 Erfolgskriterien einer Zahntransplantation

Wesentliche Einflussfaktoren für den Erfolg einer Zahntransplantation sind abhängig von der Mitarbeit der Patient\*innen, der Erfahrung der Chirurg\*innen, der Auswahl des Transplantats, dem Zeitpunkt der Transplantation, den Platzverhältnissen für das Transplantat, dem Weichteilangebot und der Kieferrelation. (13,23)

Die Erfolgskriterien einer Zahntransplantation umfassen:

- Ein Lockerungsgrad von 0 bis 1
- Eine geringe Taschentiefe nicht größer als 3 mm
- Die Anzeichen eines Parodontalspalts im Röntgenbild deuten auf eine erfolgreiche Integration des transplantierten Zahns hin.
- Erreichen der Okklusionsebene
- Keine apikale Osteolyse
- Fortgeschrittenes Wurzelwachstum für bessere Langzeitstabilität
- Keine Resorptionserscheinung

Es ist auch wichtig zu berücksichtigen, ob das Wurzelwachstum vor der Transplantation bereits abgeschlossen war oder nicht, da dies die Prognose und den Behandlungsverlauf beeinflussen kann. (13)

## 3 Material und Methodik

### 3.1 Studiendesgin

Bei dieser Studie handelt es sich um eine in vitro Studie. Die bereits für eine abgeschlossene Diplomarbeit, mit der EK-Nummer 34-415 ex 21/22 gesammelten Prämolaren, wurden für diese wissenschaftliche Arbeit verwendet.

#### 3.1.1 Hypothesen

Die Hypothese dieser wissenschaftlichen Arbeit befasst sich mit der erhöhten Erfolgsquote einer Revaskularisierung bei autotransplantierten Prämolaren, die extraoral auf eine bestimmte Länge reseziert werden. Das Ziel besteht darin, zu untersuchen, ab welchem Abstand zum Apex der Eintritt des Foramen apicale 1 mm beträgt. Wenn dies der Fall ist, dann ist laut Andreasen et al., (1990) eine Revaskularisierung möglich.

#### 3.1.1 Einschlusskriterien

In diese Studie wurden fünfzig extrahierte Prämolaren aus dem Oberkiefer sowie dem Unterkiefer eingeschlossen. Eine vollständige und unbeschädigte Wurzel zählt zu den Teilnahmekriterien.

#### 3.1.2 Ausschlusskriterien

Jene Prämolaren, die eine endodontische Behandlung oder eine Wurzelspitzenresektion erhalten hatten, wurden von der Studie ausgeschlossen. Darüber hinaus wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass die Zähne so wenig Defekte wie möglich aufwiesen.

### 3.2 Datenerhebung

#### 3.2.1 Vorbereitung der Prämolaren

Die übernommenen Zähne erfüllen die Einschlusskriterien. Die Prämolaren wurden von der Wurzelspitze bis zur Schmelz-Zement-Grenze mit einem Acrylkunststoff (Forestacryl®) eingebettet. Die Röntgenopazität des Acrylkunststoffs ist sehr gering und sollte keine Beeinträchtigungen bei den CT-Scans verursachen.

### 3.2.2 Allgemein technische Aspekte zum Micro CT

Die Röntgen-Mikro-Computertomographie ( $\mu$ CT) ist eine der modernsten und fortschrittlichsten Methoden, um 3D-Aufnahmen von Materialien in jeder Form und Größe zu erhalten. Für die Scans der Zähne wurde der Bruker Skyscan 1276 (Bruker Corporation, Kontich, Belgien) verwendet. Das Bildfeld von bis zu 75 mm Breite und 310 mm Länge und mit einer räumlichen Auflösung bis zu 2,8  $\mu$ m Pixelgröße. Dies ermöglicht das Scannen des gesamten Körpers von Mäusen oder Ratten. Durch die variable Röntgenenergie in Kombination mit einer Reihe von Filtern wird eine optimale Bildqualität für verschiedene Forschungsanwendungen gewährleistet. (24)

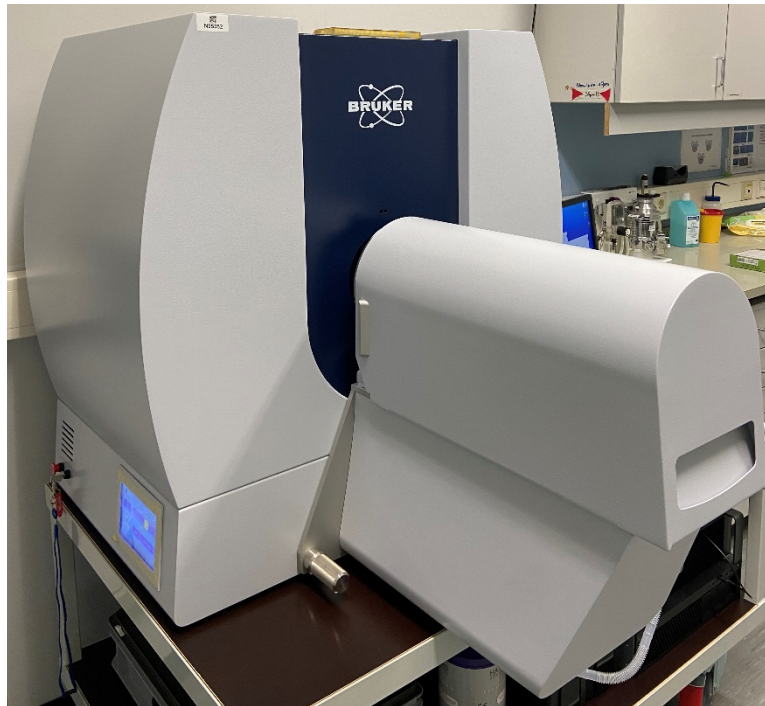


Abbildung 9: Bruker Skyscan 1276

### 3.2.3 Vorbereitung für die Micro CTs

Die 50 gesammelten Zähne wurden in 5 Scangruppen mit jeweils 10 Zähnen aufgeteilt. Die Zähne jeder Gruppe wurden auf einer Kunststoffplattform mit Plastilin befestigt, die sich auf einem Carbonbett befand

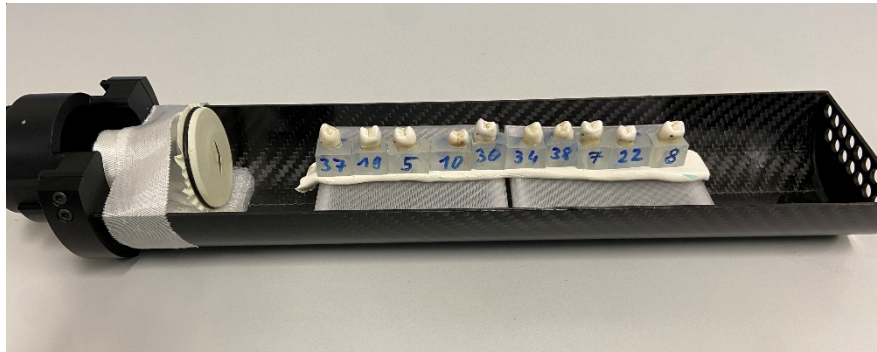


Abbildung 10: Carbonbett mit Prämolaren

Anschließend wurde das Carbonbett mit den Zähnen in das Micro CT eingebracht und die 3D-Aufnahmen konnten gestartet werden.



Abbildung 11: Fixiertes Carbonbett im Micro CT

### 3.2.4 Micro CT Einstellungen

- Source Voltage (kV)= 100
- Source Current (uA)= 200
- Image Pixel Size (um)=10.000074
- Exposure (ms)=886
- Rotation Step (deg)=0.300
- Use 360 Rotation=YES
- Frame Averaging=OFF (2)
- Filter=Al+Cu
- Study Date and Time=22 Jan 2023 17h:21m:10s
- Scan duration=0h:17m:46s
- Postalignment=0.00
- Smoothing=0
- Ring Artifact Correction=3
- Beam Hardening Correction (%) = 45
- Minimum for CS to Image Conversion=0.000000
- Maximum for CS to Image Conversion=0.060000

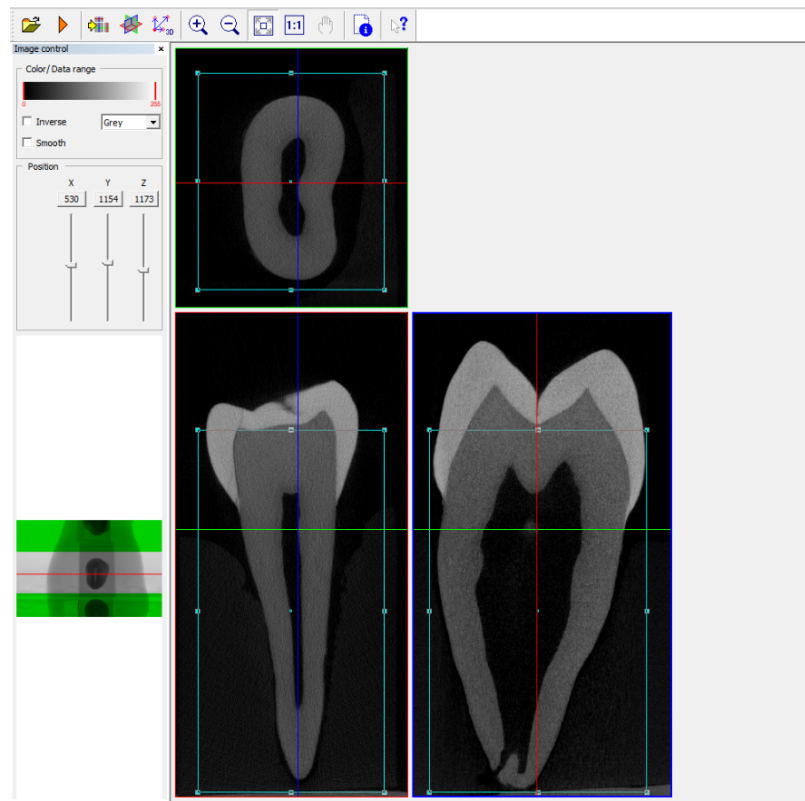
### 3.2.5 Auswertung der 3D-Aufnahmen

Pro Gruppe dauerte es 3 Stunden, um die Scans mit dem Mikro-CT durchzuführen. Zunächst wurden Übersichtsscans, sogenannte Patch-and-Scout-Scans, erstellt. Basierend auf diesen Scans konnten die einzelnen Zähne identifiziert und separat von den anderen Zähnen der Gruppe gescannt werden. Danach wurden die Zähne nummeriert und im BMP 8-Bit-Format gespeichert.



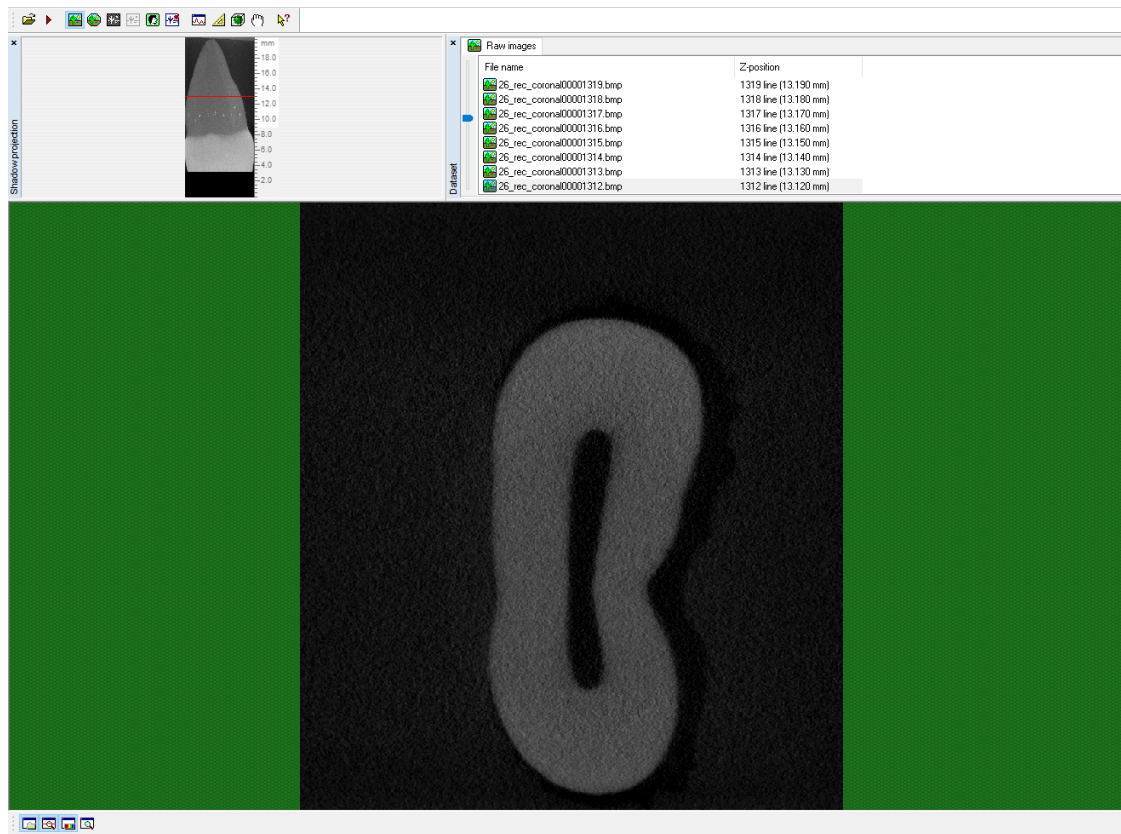
**Abbildung 12: Übersichtsscan coronal (links), sagittal (rechts)**

Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Bilder mithilfe der Nrecon-Software zu einer Rekonstruktionsübersicht zusammengefügt. Die Software konvertiert 2D-Projektionsbilder in 3D-Volumendaten. Typische CT-Artefakte wie Strahlenverhärtung und Ausrichtungsfehler wurden leicht korrigiert. Um die gewünschte 3D-Aufnahme zu erhalten und den Gesamtdatensatz zu reduzieren, wurden die Scans begrenzt und mit einem ROI-Filter versehen. Durch den sogenannten Region-of-Interest-Filter konnte der gewünschte Datensatz von den unerwünschten herausgefiltert werden. Nach diesem Schritt entstand die fertige Rekonstruktion aus der Rekonstruktionsübersicht. Diese wurde anschließend in die Dataviewer-Software übertragen. Der Dataviewer ermöglicht die Inspektion der Rekonstruktion durch orthogonale Schnitte in beliebiger Richtung. Die Objekte können gedreht, neu positioniert und in ihrer neuen Ausrichtung visualisiert und gespeichert werden. Für die spätere Auswertung der Prämolaren war es wichtig, den Wurzelkanal in der Dataviewer-Software coronal auszurichten. Bei den zweiwurzigen Zähnen wurden die einzelnen Wurzeln separat visualisiert, zwischengespeichert und bewertet.



**Abbildung 13: Dataviewer-Software**

Die coronal abgespeicherten Datensätze jedes einzelnen Zahns wurden zur Vermessung in die Ctan-Software geladen. Ctan bietet eine umfangreiche 3D-Analyse, indem es die 2D Schnittbilder der coronal ausgerichteten Zähne zusammenfügt. Der Anfang der Auswahl wurde bei der Schmelz-Zement-Grenze festgelegt und das Ende der Auswahl wurde beim ersten Schnittbild, bei dem ein geschlossener Wurzelkanal sichtbar war.



**Abbildung 14: Anfang und Endbestimmung des Datensatzes in Ctan**

Nach der Auswahl haben die restlichen Bilder, die nicht in der sogenannten "Volume of Interest" involviert sind, keinen weiteren Einfluss auf die Auswertung. Um die Fläche des Wurzelkanals vom restlichen Bild unterscheiden zu können, wurde eine weitere "Region of Interest" am Anfang und Ende verwendet und alle dazwischen liegenden Bilder interpoliert. Bei stark gekrümmten Wurzelkanälen mussten mehrere "ROI" verwendet werden.

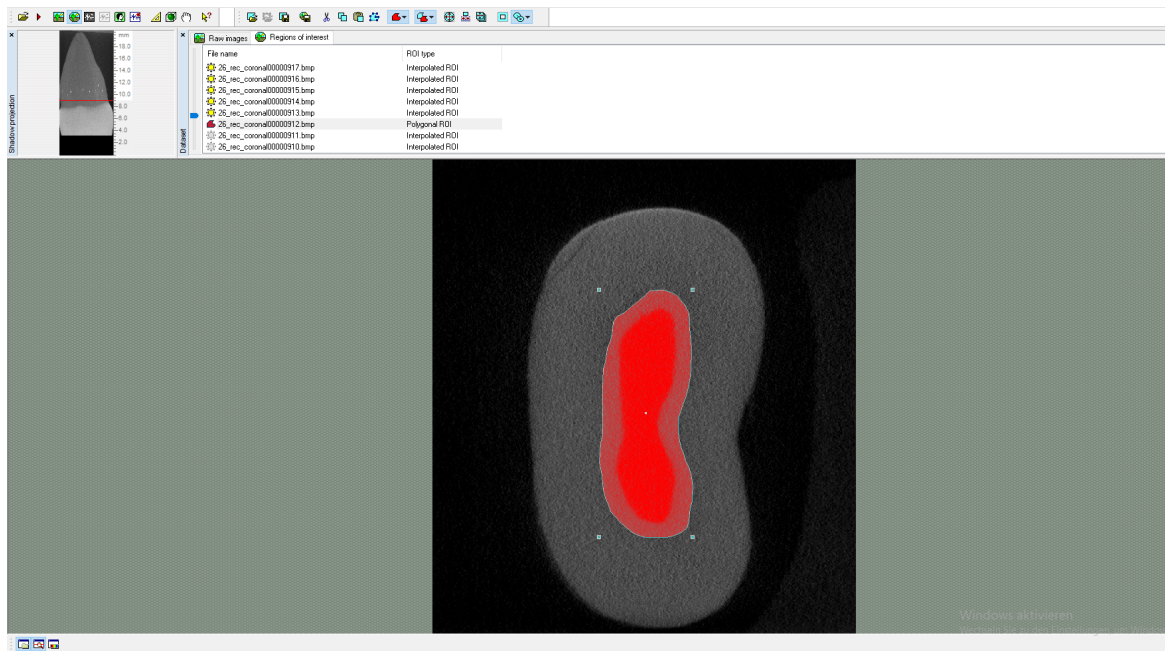


Abbildung 15: Festlegung des Region of interest

Nach einer gründlichen Kontrolle, ob jede Fläche im gewünschten ROI liegt, konnte der nächste Schritt durchgeführt werden. Es musste ein geeigneter Graustufenindex für die Software ausgewählt werden, um den Wurzelkanal vom Dentin unterscheiden zu können. Anschließend konnte die Messung gestartet werden. Um die Qualität der Auswertungen zu verbessern, wurde eine Tasklist mit einem bestimmten Algorithmus angefertigt.

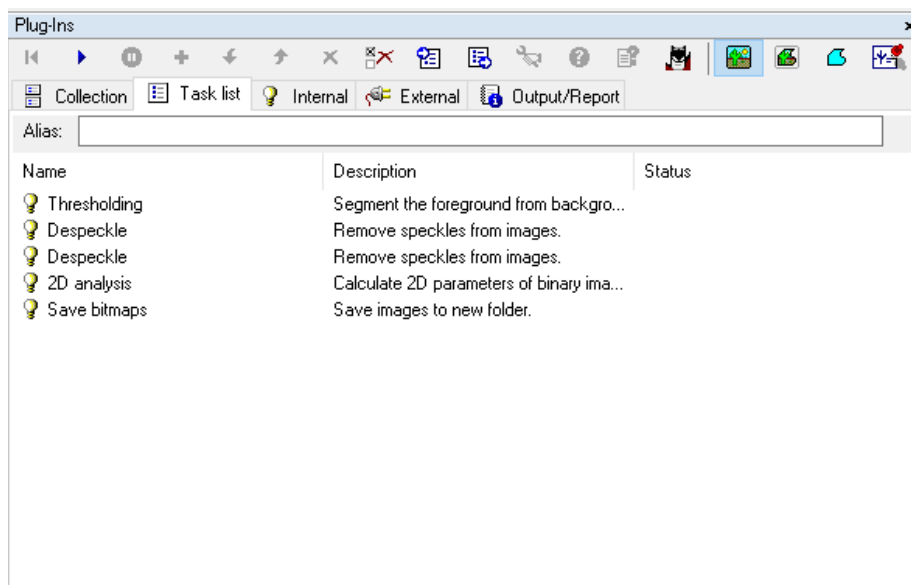


Abbildung 16: Tasklist

Die analysierten Daten wurden anschließend in einer CSV-Datei gespeichert. Jede einzelne Wurzel musste gemäß diesem Wurzelkanal-Analyse-Protokoll ausgewertet werden.

### 3.2.6 Datenverwaltung

Nach der Analyse des Datensatzes wurden die CSV-Dateien in Excel-Dateien umformatiert. Mit diesem Datensatz konnte abschließend die Berechnung des Wurzelkanaldurchmessers durchgeführt werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
85						Pi			
86						3,1415926			
87									
88	File name	Z position	Number of o	Total ROI area	Object area	Durchmesser	Percent object area	Total ROI perimeter	Object perimeter
89		Pos.Z	Obj.N	T.Ar	Obj.Ar		Obj.Ar/T.Ar	T.Pm	Obj.Pm
90		mm		mm^2	mm^2	mm	%	mm	mm
91	13_rec_cor	0,01	10	1,30319	0,16659	0,460552906	12,78333	6,85435	3,70722
92	13_rec_cor	0,02	14	1,30319	0,16803	0,462539127	12,89363	6,85435	3,93935
93	13_rec_cor	0,03	14	1,30319	0,16744	0,461726362	12,84855	6,85435	4,19148
94	13_rec_cor	0,04	8	1,30319	0,1677	0,462084706	12,86869	6,85435	4,19592
95	13_rec_cor	0,05	9	1,30356	0,17315	0,469533205	13,28309	6,84607	3,78621
96	13_rec_cor	0,06	11	1,30356	0,17613	0,473556422	13,51131	6,84607	4,0042
97	13_rec_cor	0,07	4	1,30456	0,1791	0,477532414	13,729	6,84607	3,90621
98	13_rec_cor	0,08	9	1,30456	0,17849	0,476718502	13,68205	6,84607	3,46236
99	13_rec_cor	0,09	6	1,30564	0,17749	0,475381206	13,59419	6,83778	3,44922
100	13_rec_cor	0,1	5	1,30564	0,17979	0,478451399	13,77036	6,83778	3,58378
101	13_rec_cor	0,11	6	1,30706	0,17937	0,477892227	13,72283	6,84607	3,70864
102	13_rec_cor	0,12	13	1,30871	0,17737	0,475220477	13,5527	6,8295	3,98663
103	13_rec_cor	0,13	9	1,30871	0,17755	0,475461549	13,56703	6,8295	3,80278
104	13_rec_cor	0,14	9	1,31105	0,17948	0,47803874	13,68967	6,83193	4,01107
105	13_rec_cor	0,15	12	1,31105	0,18223	0,481687083	13,89943	6,83193	4,2422

Abbildung 17: Auswertung in Excel

### 3.2.7 Datenauswertung

Da die Morphologie des Wurzelkanals im Querschnitt keine kreisrunde Form annimmt ist es nicht aussagekräftig, den Durchmesser digital mit einem Maßstab zu bestimmen. Stattdessen wurde die Fläche des Wurzelkanals mithilfe der Flächenformel für einen Kreis berechnet, um den Radius zu erhalten. Die Zahl Pi wurde dafür mit 7 Kommastellen verwendet.

$$A = \pi * r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Nach Erhalt des Radius wurde die Zahl anschließend verdoppelt, um den gewünschten Durchmesser zu erhalten.

$$d = 2 * r$$

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Anzahl der gewerteten Prämolaren

Auf der Abteilung für Biomedizinische Forschung am Universitätsklinikum Graz wurden die Zähne am 01.02.2023 gescannt. Von den ursprünglich 50 Zähnen konnten 41 für die weitere Analyse verwendet werden. Die verbleibenden 9 Prämolaren erfüllten nicht den Einschlusskriterien und wurden daher nicht zur weiteren Messung herangezogen.

Insgesamt wurden 50 Wurzeln vermessen, da 9 Prämolaren eine zweite Wurzel aufweisen. Unter diesen waren 8 Wurzeln mit einem offenen Apex, die für eine Gegenüberstellung ebenfalls vermessen wurden.

Die Nummerierung der Zähne variiert von 1 bis 40 und 101 bis 109. Die zweiwurzigen Zähne wurden mit "O" für oral und "B" für buccal gekennzeichnet.

Nummerierung der 42 Wurzeln		
2	20	35O
3	22B	35B
4	22O	36
5B	24B	38
5O	24O	102O
7O	25	102B
7B	26	103B
8B	27O	103O
8O	27B	104
10	28	105
13	30	106
14	32	107
17	33	108
18	34	109

Tabelle 2: Zahnnummerierung

## 4.2 Statistische Auswertung

Im Vordergrund stehen zwei essenzielle statistische Fragen.

- Wie groß ist der Wurzelkanaldurchmesser alle 0,5 mm bis maximal 5 mm von der Wurzelspitze beginnend?
- An welcher Position wird der 1 mm Wurzelkanaldurchmesser erreicht?

### 4.2.1 Durchmesserberechnung beginnend von der Wurzelspitze

Normale Wurzel (n=42) Einheit: Millimeter

Z-Position	Minimum	Maximum	Median	Mittelwert	Std.-Abweichung
0	0,02	1,17	0,30	0,33	0,21
0,5	0,12	1,22	0,32	0,37	0,24
1,0	0,12	1,22	0,34	0,40	0,24
1,5	0,12	1,22	0,39	0,46	0,25
2,0	0,14	1,23	0,45	0,51	0,26
2,5	0,15	1,30	0,50	0,56	0,28
3,0	0,16	1,42	0,55	0,60	0,30
3,5	0,18	1,52	0,59	0,65	0,30
4,0	0,19	1,62	0,65	0,69	0,31
4,5	0,21	1,74	0,71	0,74	0,32
5,0	0,25	1,84	0,72	0,78	0,33

Tabelle 3: Auswertung der geschlossenen Apices

In der oben angeführten Tabelle sind die analysierten Werte der 42 Wurzeln zusammengefasst. Die Z-Position definiert die genaue Stelle am Zahn, an der die Messung durchgeführt wurde. Die Z-Position 0 mm entspricht der Wurzelspitze.

Der Minimumwert gibt den kleinsten gemessenen Durchmesser an der jeweiligen Z-Position wieder, während der Maximumwert den größten gemessenen Durchmesser darstellt.

Der Median teilt den Datensatz genau in zwei Hälften, während der Mittelwert das arithmetische Mittel der Daten widerspiegelt. Je mehr Ausreißer der Datensatz enthält, desto größer ist der Unterschied zwischen Median und Mittelwert.

Die Standardabweichung gibt die durchschnittliche Streuung der gemessenen Werte um den Mittelwert an.

Offener Apex (n=8)		Einheit: Millimeter			
Z-Position	Minimum	Maximum	Median	Mittelwert	Std.-Abweichung
0	0,95	3,29	2,53	2,25	0,91
0,5	1,01	2,91	2,23	2,00	0,77
1,0	0,98	2,55	2,02	1,82	0,64
1,5	0,94	2,34	1,90	1,71	0,56
2,0	0,93	2,29	1,84	1,65	0,51
2,5	0,94	2,29	1,77	1,59	0,51
3,0	0,93	2,15	1,71	1,56	0,47
3,5	0,91	2,09	1,68	1,57	0,45
4,0	0,88	2,08	1,70	1,59	0,45
4,5	0,84	2,10	1,73	1,61	0,48
5,0	0,82	2,16	1,78	1,64	0,50

**Tabelle 4: Auswertung der offenen Apices**

Die vorliegende Tabelle zeigt die Messungen des Durchmessers von Wurzeln mit offenem Apex in verschiedenen Z-Positionen, wobei die Einheit in Millimetern angegeben ist. Es wurden insgesamt 8 Wurzeln mit offenem Apex untersucht.

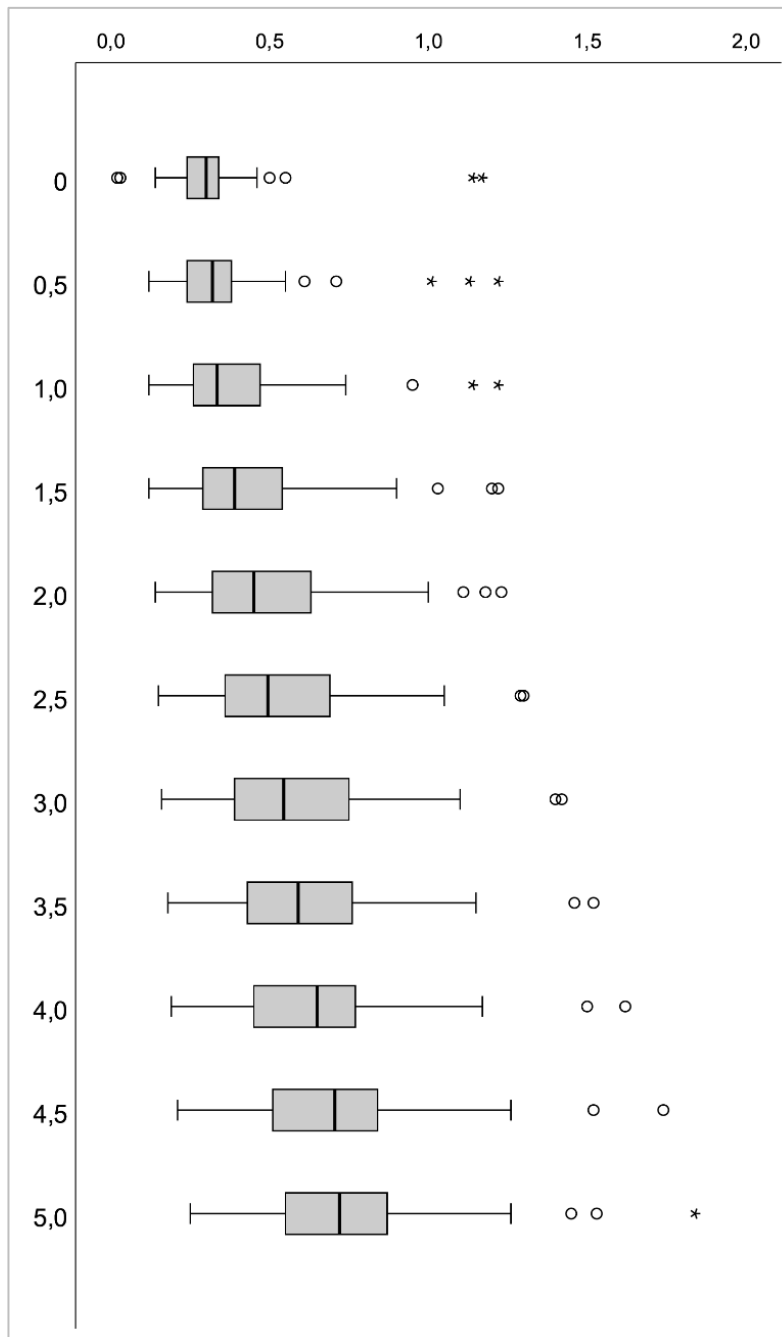


Abbildung 18: Boxplot der Wurzeln mit geschlossenem Apex

Die Streuung zeigt beim angeführten Boxplot die Verteilung der Daten um den Median herum an. Die Streuung wird durch die Länge der Whisker dargestellt. Je länger die Whisker, desto größer ist die Streuung der Daten. Der zentrale Wert im Boxplot ist der Median, weiters sind auch Ausreißer gekennzeichnet. Die X-Achse gibt den Wurzelkanaldurchmesser an und die Y-Achse spiegelt die Z-Position wider.

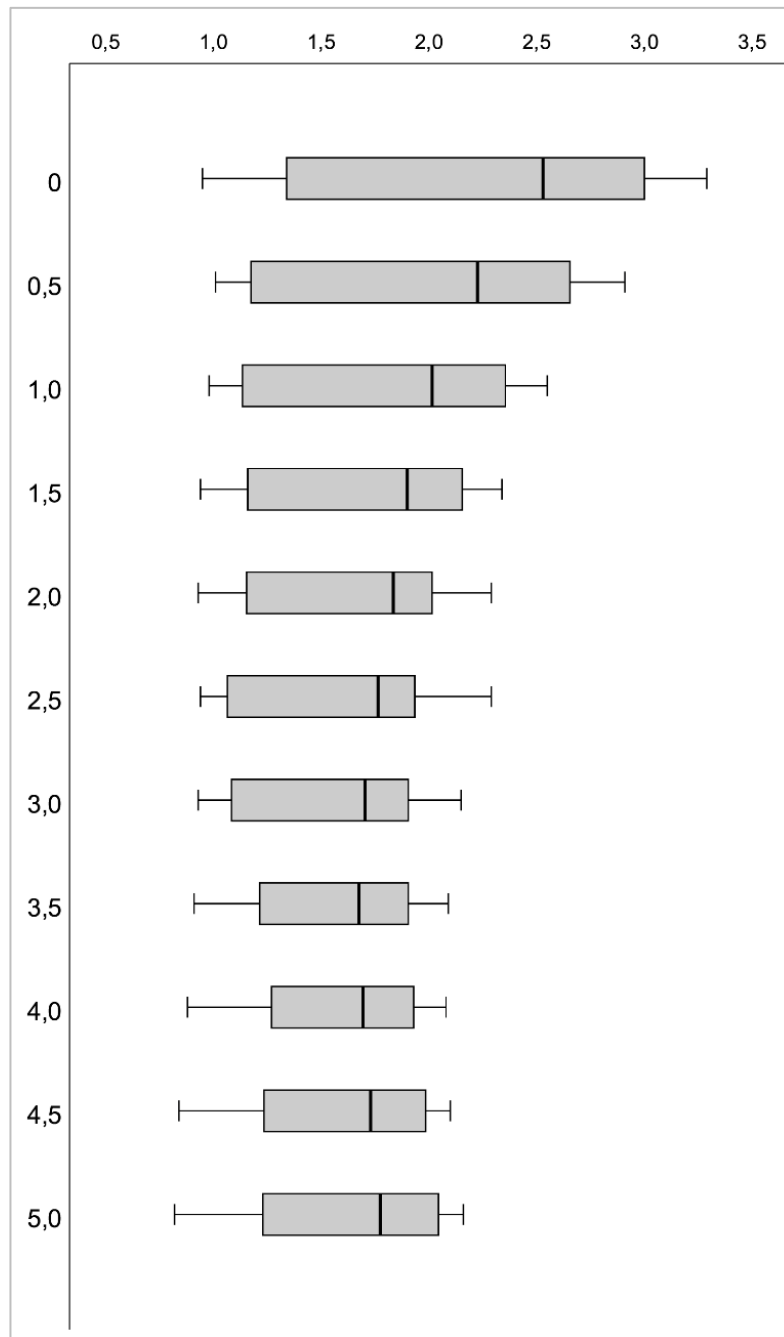
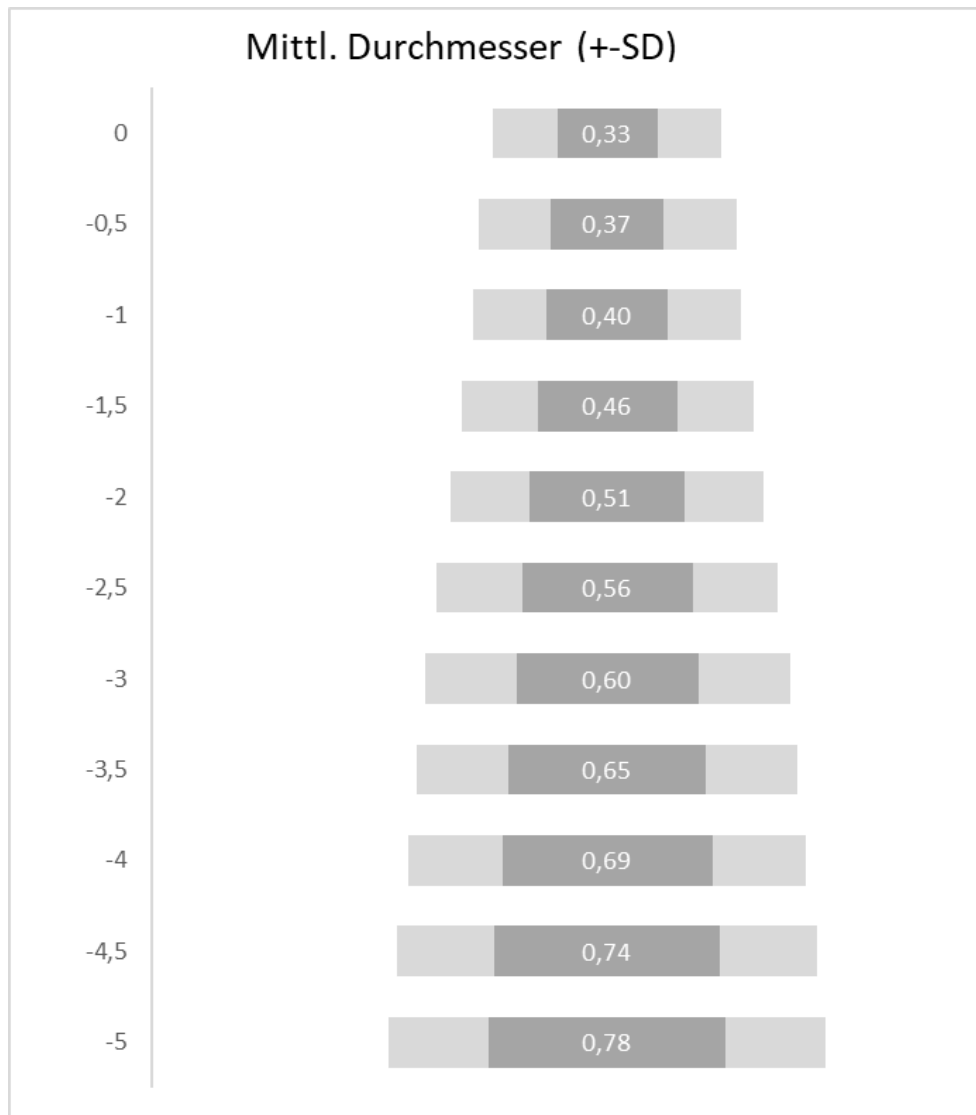


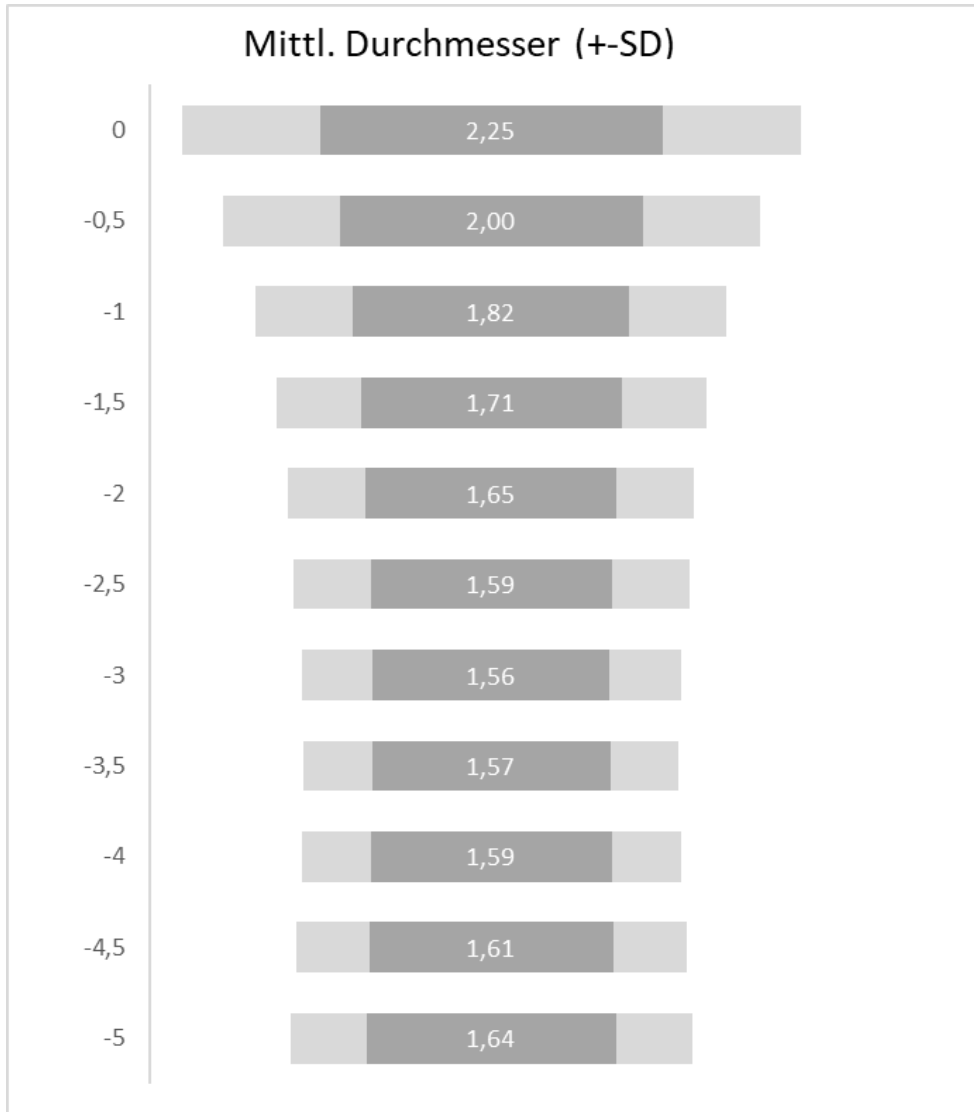
Abbildung 19: Boxplot der Wurzeln mit offenem Apex

Der Boxplot spiegelt in Abhängigkeit vom Median die großen Unterschiede zwischen dem minimalen und maximalen Wert wider. Gegenüber den Prämolaren mit geschlossenem Apex ist die Standardabweichung bei den Zähnen mit offenem Apex bei 1 mm am höchsten und nimmt dann gleichmäßig ab.



**Abbildung 20: Mittelwert des Durchmessers bei geschlossenem Apex**

Im Balkendiagramm wird der Mittelwert mit der Standardabweichung angegeben. Werden die zwei Grafiken, Boxplot und Balkendiagramm, gegenübergestellt, ist die Verteilung des Datensatzes im Boxplot besser ersichtlich, hingegen im Balkendiagramm ist der durchschnittliche Wurzeldurchmesser besser erkennbar.



**Abbildung 21: Mittelwert des Durchmessers bei offenem Apex**

#### 4.2.2 Positionsberechnung mit 1mm Durchmesser

Nr.	Z-Position	Nr.	Z-Position	Nr.	Z-Position
2	6,33	20	6,68	35O	7,38
3	3,54	22B	kleiner	35B	8,27
4	6,85	22O	kleiner	36	7,24
5B	9,16	24B	8,05	38	6,37
5O	8,97	24O	8,28	102O	8,43
7O	7,62	25	8,06	102B	8,78
7B	8,26	26	3,95	103B	8,54
8L	8,68	27O	8,85	103O	8,58
8O	7,57	27B	8,04	104	7,71
10	6,97	28	2,29	105	6,13
13	2,86	30	1,98	106	7,71
14	6,38	32	6,67	107	kleiner
17	4,59	33	8,23	108	kleiner
18	6,44	34	größer	109	8,47

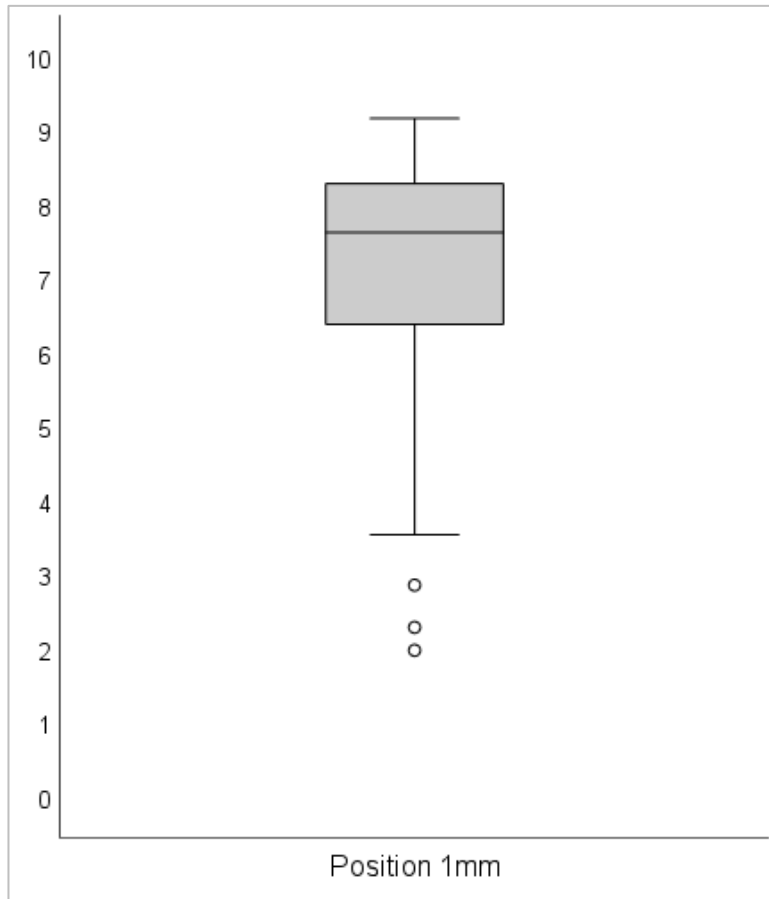
Tabelle 5: Positionen bei 1 mm Wurzelkanaldurchmesser

Die Tabelle zeigt die jeweilige Position des Zahnes an, wo der Durchschnittsdurchmesser von 1 mm erreicht wird. Bei den Zähnen 22B, 22O, 107 und 108 wird der 1 mm Wurzelkanaldurchmesser schon zu Beginn erreicht. Bei dem Zahn 34 wird der gewünschte Durchmesser aus dem errechneten Datensatz nie erreicht.

Min	Max	Median	Mittelwert	Standardabweichung
1,98	9,16	7,62	7,00	1,92

Tabelle 6: Zusammenfassung der Werte

In der Zusammenfassung der Werte wurden die Zähne 22B, 22O, 34, 107 und 108 nicht berücksichtigt. Der durchschnittliche Prämolare hat ab einer Länge von 7 mm, gemessen von der Wurzelspitze, einen Wurzelkanaldurchmesser von 1 mm.



**Abbildung 22: Boxplot Positionsberechnung 1 mm Durchmesser**

## 4.3 Repräsentative Wurzelbeispiele

### 4.3.1 Prämolare mit offenem Apex

Für dieses Exempel wurde der Zahn mit der Nummer 37 herangezogen.

Z-Position	Durchmesser
0 mm	3,04 mm
0,5 mm	3,01 mm
1 mm	2,97 mm
1,5 mm	2,94 mm
2 mm	2,91 mm
2,5 mm	2,87 mm
3 mm	2,83 mm
3,5 mm	2,79 mm
4 mm	2,76 mm
4,5 mm	2,70 mm
5 mm	2,66 mm

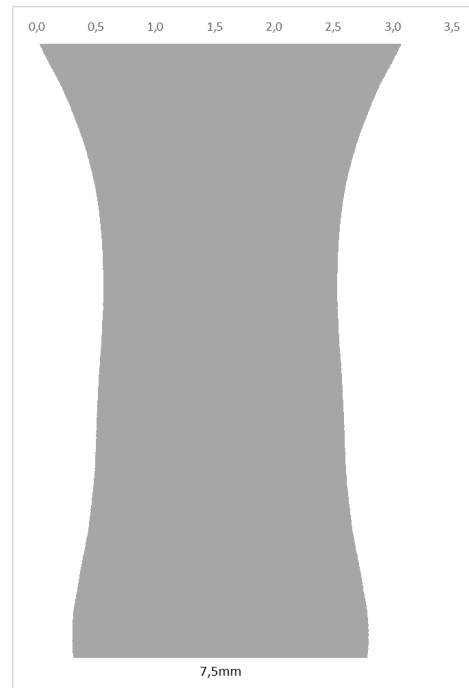


Tabelle 7: Werte Zahn Nr. 37

Abbildung 23: Durchmesser Zahn Nr. 37

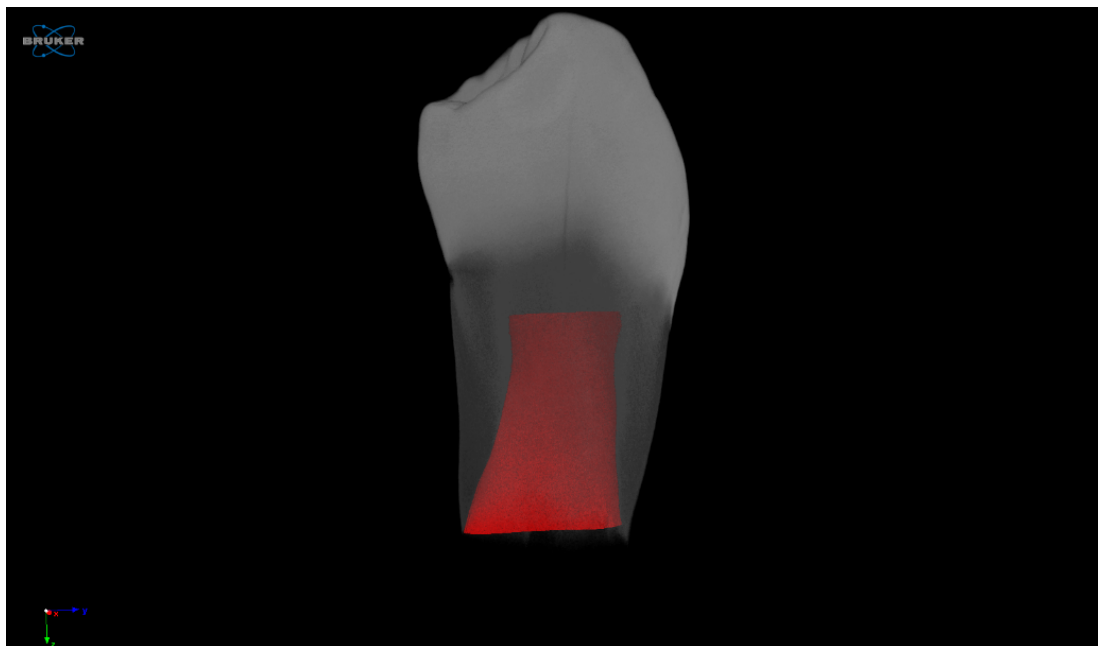


Abbildung 24: 3D Visualisierung des Zahnes Nr. 37

### 4.3.2 Prämolare mit apikalen Ramifikationen

Für dieses Beispiel wurde der Zahn mit der Nummer 109 herangezogen.

Z-Position	Durchmesser
0 mm	0,17 mm
0,5 mm	0,36 mm
1 mm	0,45 mm
1,5 mm	0,55 mm
2 mm	0,66 mm
2,5 mm	0,76 mm
3 mm	0,75 mm
3,5 mm	0,76 mm
4 mm	0,77 mm
4,5 mm	0,78 mm
5 mm	0,73 mm

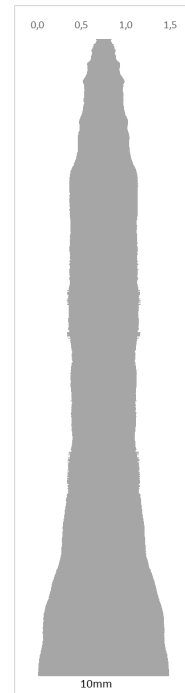


Tabelle 8: Werte Zahn Nr. 109

Abbildung 25: Durchmesser Zahn Nr. 109

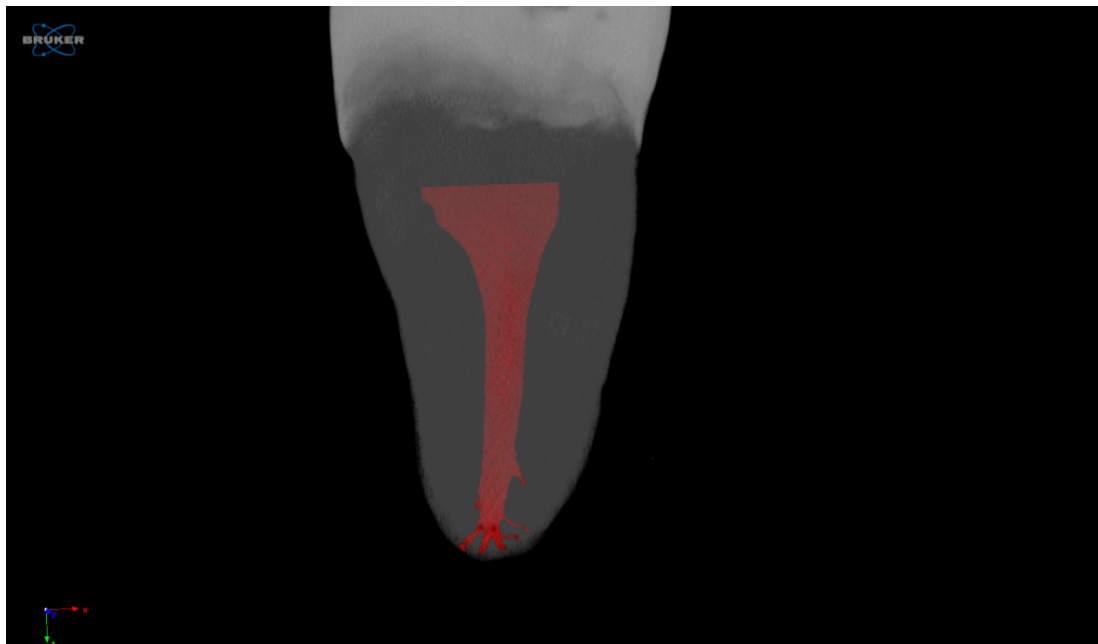


Abbildung 26: 3D Visualisierung Zahn Nr. 109

## 5 Diskussion

In der vorliegenden in vitro Studie zur digitalen Vermessung der Wurzelkanäle bei Prämolaren konnten von den ursprünglich 50 Zähnen 41 Zähne für die weitere Auswertung verwendet werden. Die untersuchten 41 Zähne entsprachen insgesamt 50 Wurzeln, wobei jede einzelne Wurzel separat analysiert und bewertet wurde. Innerhalb dieser 50 Wurzeln befanden sich auch 8 Wurzeln mit einem offenen Apex, die zusätzlich für den Vergleich vermessen wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der der Wurzelkanaldurchmesser bei Prämolaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum an jeder gemessenen Stelle zunimmt. Durch die Vergrößerung der apikalen Öffnung kann eine vermehrte Durchblutung und Einwanderung neuer Gefäße stattfinden. Daraus lässt schließen, dass nicht nur die herkömmliche Transplantation von unreifen Zähnen, sondern auch die Transplantation von reifen Zähnen mit einer extraoralen Wurzelspitzenresektion als routinemäßiger Eingriff angesehen werden kann. Studien von Rugani et al. (2022); Fang et al. (2018) belegen, dass eine erfolgreichen Revaskularisierung bei Zahntransplantation mit extraoraler Wurzelspitzenresektion möglich ist. Die Studien von Fang et al. (2018) zeigen die höchsten Erfolgsraten bei Zähnen mit einem Wurzelkanaldurchmesser von 0,5-1 mm. Zusätzlich sind Faktoren wie Mitarbeit der Patient\*innen, die Erfahrung der Chirurg\*innen, die Auswahl des Transplantats, der Zeitpunkt der Transplantation, die Platzverhältnisse für das Transplantat, sowie das Weichteilangebot und die Kieferrelation entscheidend für den Erfolg der Revaskularisierung der Pulpa. (25,26)

### 5.1 Gegenüberstellung des Wurzelkanaldurchmessers offener und geschlossener Apices

Bei einem Vergleich der einzelnen Auswertungen der Zähne ist deutlich erkennbar, dass die untersuchte Gruppe mit offenem Apex in jeder Z-Position einen deutlich größeren Mittelwert aufweist als die Gruppe mit geschlossenem Apex. Auffällig ist, dass die Prämolaren mit geschlossenem Apex eine kontinuierliche Steigerung des Mittelwertes sowie Median zeigen. Im Gegensatz dazu ist bei den Zähnen mit offenem Apex zunächst ein Abfall des Mittelwertes und Medians zu beobachten. Ab einer Länge von 3,5 mm ist dann wieder ein Anstieg der Werte zu verzeichnen.

Es ist wichtig zu beachten, dass die vorliegende Auswertung auf eine begrenzten Stichprobengröße von 8 Wurzeln mit offenem Apex basiert. Weitere Untersuchungen mit einer größeren Stichprobengröße wären erforderlich, um diese Ergebnisse zu verifizieren.

## 5.2 Limitationen

In dieser Diplomarbeit wurde eine genauere und modernere Versuchs- und Auswertungsmethode eingesetzt. Aufgrund dieser Unterschiede gestaltet sich der direkte Vergleich mit anderen Studien als schwierig. Dennoch wurde eine Gegenüberstellung mit drei ausgewählten Studien durchgeführt, die in gewissen Punkten mit dieser Arbeit übereinstimmt.

## 5.3 Vergleich mit anderen Studien

In einer Studie von Liu et al., (2019) wurden 324 extrahierte erste Oberkieferprämolaren zur Untersuchung der Wurzelanatomie und des Wurzeldurchmessers mittels Micro-CT gescannt. Die Zähne wurden in Gruppen mit einem Kanal, zwei Kanälen und zwei Wurzeln mit zwei Kanälen eingeteilt. Weiters teilten sie die Zähne in ein coronales, mittleres, apicales Drittel und apicales Foramen ein. Der Wurzelkanaldurchmesser wurde mithilfe einer digitalen Messlehre in bucco-orale und mesio-distale Richtung im vermessen. Die Werte des apikalen Drittels und apikalen Foramens wurden für den Vergleich verwendet. (27)

In der Studie von Liu et al., (2019) betrug der Mittelwert des Wurzelkanaldurchmessers aller Wurzeln am apikalen Foramen 0,3 mm und im apikalen Drittel 0,53 mm. Da in dieser Arbeit die Zähne nicht in Drittel eingeteilt wurden, ist der zweite Wert nur grob vergleichbar. Der erste Wert hingegen stimmt mit dem gemessenen Wert in dieser Arbeit überein, mit einer geringen Abweichung von 0,03 mm. Um den zweiten Wert gegenüberstellen zu können, wurde ein Vergleich mit dem Wert von der Z-Position 2,5 mm durchgeführt. Mit einem Wurzelkanaldurchmesser von 0,56 mm beträgt auch in diesem Vergleich die Abweichung nur 0,03 mm. (27)

Kerekes and Tronstad, (1977) verwendeten in ihrer Studie 80 Prämolaren, davon 20 erste Oberkiefer-Prämolaren, 20 zweite Oberkiefer-Prämolaren, 20 erste Unter-

kiefer-Prämolaren und 20 zweite Unterkiefer-Prämolaren. Um den Wurzelkanaldurchmesser zu messen, wurde ein Querschnitt von der Wurzelspitze im Abstand von 1-5 mm durchgeführt. Es wurde keine Messung bei einem Abstand von 4 mm zum Apex durchgeführt. Die Querschnitte wurden auf Objektträgern befestigt und unter dem Lichtmikroskop wurde der Wurzelkanaldurchmesser mit einem Messokular gemessen. Der größte gemessene Durchmesser wurde dokumentiert. Um die Ergebnisse von Kerekes and Tronstad, (1977) vergleichen zu können, wurde der Mittelwert berechnet und mit den Auswertungen aus dieser Arbeit gegenübergestellt. (28)

Distanz vom Apex	Mittelwert Fremd-studie	Mittelwert eigene Studie
1 mm	0,45 mm	0,4 mm
2 mm	0,68 mm	0,51 mm
3 mm	1,02 mm	0,6 mm
5 mm	2,19 mm	0,78 mm

**Tabelle 9: Mittelwertvergleich von Kerekes and Tronstad, (1977) (28)**

Auffallend ist, dass in der Studie von Kerekes and Tronstad, (1977) die Durchmesserwerte stark ansteigen. Im Bereich von 5 mm beträgt der Mittelwert mehr als das Doppelte im Vergleich zu den Werten dieser Arbeit. Der Grund dafür könnte sein, dass in der Studie von Kerekes and Tronstad, (1977) nur der größte gemessene Wurzelkanaldurchmesser berücksichtigt wurde. (28)

In der Studie von Grande et al., (2008) wurden 30 einwurzelige Prämolaren auf ihre Wurzelanatomie und Wurzelkanaldurchmesser mittels Micro-CT untersucht. Die Wurzelspitze wurde als Ausgangspunkt gewählt und Messungen wurden bei 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 und 13 mm durchgeführt. (29)

Distanz vom Apex	Mittelwert Fremd- studie	Mittelwert eigene Studie
1 mm	0,38 mm	0,4 mm
2 mm	0,46 mm	0,51 mm
3 mm	0,55 mm	0,6 mm
4 mm	0,65 mm	0,69 mm
5 mm	0,75 mm	0,78 mm

**Tabelle 10: Mittelwertvergleich von Grande et al., (2008) (29)**

In der Studie von Grande et al., (2008) wurde zur Analyse der Zähne das gleiche Micro-CT sowie Auswertungsverfahren verwendet. Daher zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit eine nahezu identische Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Studie von Grande et al., (2008). (29)

## 6 Schlussfolgerung

Die autogene Zahntransplantation bietet eine hervorragende Möglichkeit für Zahnersatz bei verloren gegangenen oder nicht angelegten Zähnen. Die heutzutage etablierte autologe Zahntransplantation von Zähnen mit offenem Apex weist eine hohe Erfolgsrate hinsichtlich einer Revaskularisierung auf. Die Transplantation von reifen bleibenden Zähnen ohne extraorale Wurzelspitzenresektion würde hingegen zu einer Pulpanekrose führen. In dieser in vitro Studie wurde gezeigt, dass es bei Prämolaren zu einer Erweiterung des Eintrittes des neuen Foramen apicale kommt, wenn die Wurzelspitze gekappt würde. Daher könnte die Transplantation von reifen Prämolaren mit extraoraler Wurzelspitzenresektion eine machbare Therapieoption werden. Des Weiteren sind die Erfolgskriterien bei einer Zahntransplantation zu beachten, da sie wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Es gibt jedoch eine begrenzte Anzahl an prospektiven Forschungsstudien zur Untersuchung der Revaskularisierung nach der Autotransplantation von ausgewachsenen Zähnen unter Anwendung der extraoralen Wurzelspitzenresektion.

### 6.1 Blick in die Zukunft

In naher Zukunft besteht die Möglichkeit einer 3D-Software, die präoperativ die benötigte Fläche für eine Revaskularisierung des zu transplantierenden Zahnes berechnet und eine genaue Position zur Kappung der Wurzel wiedergibt.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Anderhuber Friedrich, Pera Franz, Streicher Johannes. Waldeyer - Anatomie des Menschen. 19. Auflage. Waldeyer A, Anderhuber F, Pera F, Streicher J, editors. DE GRUYTER; 2012.
2. Hellwig E, Schäfer E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 7th ed. Köln : Deutscher Zahnärzte Verlag; 2018.
3. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. PROMETHEUS Kopf, Hals und Neuroanatomie. 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2018.
4. Galler K. Vier elektronische Wurzelkanallängenmessgeräte im klinischen Vergleich mit Röntgenmesstechnik und tatsächlicher Länge. 2002;
5. Ahmed HMA, Versiani MA, De-Deus G, Dummer PMH. A new system for classifying root and root canal morphology. *Int Endod J*. 2017 Aug 1;50(8):761–70.
6. Direktor G, Lotzmann U, Jablonski BK. AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND-UND KIEFERHEILKUNDE. 2008;
7. Jung M. Endodontologie beim älteren Patienten-Möglichkeiten und Grenzen. 2018 [cited 2023 Jan 3];12(4):315–30. Available from: [www.thieme.de/eref-registrierung](http://www.thieme.de/eref-registrierung)
8. Hülsmann M. Endodontie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008.
9. Lüllmann-Rauch Renate, Asan Esther. Taschenlehrbuch Histologie. 5th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2015.
10. Gängler P, Hoffmann T, Willershausen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M, Arnold WH, et al. Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie. 2010 Jun 17;
11. Kreutzer Johannes Volker. Autogene Zahntransplantation als Einzelzahnersatz – Eine retrospektive Studie zur klinischen und röntgenologischen Erfolgsrate | Enhanced Reader. 2013.
12. Gutwald R, Gellrich NC, Schmelzeisen R. Zahnärztliche Chirurgie und Implantologie 3. A. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2018.
13. Filippi Andreas, Lang Björn, Pohl yango. Transplantation von Zähnen. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*. 2003;1179–92.

14. Filippi Andreas, Bauss Thomas, Hiedl Gabriel, Krastl Thomas Lambrecht, Yango Pohl Giulio, Spagnoli Hubertus van Waes, et al. Zahntransplantation Biologischer Zahnersatz für Kinder, Jugendliche und manche Erwachsene. 2009;
15. Meinzer S, Nolte D, Huth K. Die autogene Zahntransplantation als therapeutisches Konzept. researchgate.net. 2022;
16. Cross D, El-Angbawi A, McLaughlin P, Keightley A, Brocklebank L, Whitters J, et al. Developments in autotransplantation of teeth. *The Surgeon*. 2013 Feb;11(1):49–55.
17. Sokolowski A, Kammerhofer J, Sokolowski A, Payer M, Jakse N, Wegscheider W. Accuracy assessment of 3D-printed tooth replicas. *Clin Oral Implants Res*. 2018 Oct;29:250–250.
18. Jakse N, Ruckenstuhl M, Rugani P, Kirnbauer B, Sokolowski A, Ebeleseder K. Influence of Extraoral Apicoectomy on Revascularization of an Autotransplanted Tooth: A Case Report. *J Endod*. 2018 Aug;44(8):1298–302.
19. Andreasen JO, Paulsen HU, Yu Z, Bayer T, Schwartz O. A long-term study of 370 autotransplanted premolars. Part II. Tooth survival and pulp healing subsequent to transplantation. *The European Journal of Orthodontics*. 1990 Feb 1;12(1):14–24.
20. Koch FP. Pulparegeneration und die zukünftigen Herausforderungen. *Der Freie Zahnarzt* 2016 60:10. 2016 Sep 30;60(10):60–60.
21. Araújo PR de S, Silva LB, Neto AP dos S, Arruda JAA de, Álvares PR, Sobral APV, et al. Pulp Revascularization: A Literature Review. *Open Dent J*. 2017 Feb 10;10(1):48.
22. Martin M, Gutachter P, Bernimoulin JP, Jentsch H, Mengel R. Parodontale Heilung nach Transplantation von Knochenersatzmaterial und Gesteuerter Gewebe-Regeneration (GTR) bei apicomarginalen Defekten nach Wurzelspitzenresektion: Ergebnisse nach 6 Monaten. 2007 Feb 12;
23. Wolff KD. Die autogene Zahntransplantation : ein Evidenz basierter systematischer Review. 2005;
24. In Vivo MicroCT | High Resolution | Desktop | Bruker [Internet]. [cited 2023 Feb 28]. Available from: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/preclinical-imaging/micro-ct/skyscan-1276.html>

25. Fang Y, Wang X, Zhu J, Su C, Yang Y, Meng L. Influence of Apical Diameter on the Outcome of Regenerative Endodontic Treatment in Teeth with Pulp Necrosis: A Review. *J Endod* [Internet]. 2018 Mar 1 [cited 2023 Jul 7];44(3):414–31. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29273495/>
26. Rugani P, Kirnbauer B, Mischak I, Ebeleseder K, Jakse N. Extraoral Root-End Resection May Promote Pulpal Revascularization in Autotransplanted Mature Teeth—A Retrospective Study. *J Clin Med* [Internet]. 2022 Dec 1 [cited 2023 Jul 7];11(23):7199. Available from: </pmc/articles/PMC9736469/>
27. Liu X, Gao M, Ruan J, Lu Q. Root Canal Anatomy of Maxillary First Premolar by Microscopic Computed Tomography in a Chinese Adolescent Subpopulation. *Biomed Res Int*. 2019;2019.
28. Kerekes K, Tronstad L. Morphometric observations on root canals of human premolars. *J Endod*. 1977 Feb;3(2):74–9.
29. Grande NM, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Pameijer CH, Somma F. Micro-computerized tomographic analysis of radicular and canal morphology of premolars with long oval canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2008 Sep;106(3):e70–6.