

Diplomarbeit

**Belastungstestung standardisierter Einzelhaken für
extraorale kieferorthopädische Gerätschaften
– eine in-vitro-Studie**

eingereicht von

Marina Badzic

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor(in) der Zahnmedizin

(Dr.⁽ⁱⁿ⁾ med. dent.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit

Klinische Abteilung für Orale Chirurgie und Kieferorthopädie

unter der Anleitung von

Ass.-Prof.⁽ⁱⁿ⁾ Dr.⁽ⁱⁿ⁾ med. univ. et med. dent. Margit Pichelmayer

und

Prof.⁽ⁱⁿ⁾-Univ.-ZÄ Priv.-Doz.⁽ⁱⁿ⁾ Dr.⁽ⁱⁿ⁾ Brigitte Wendl

Graz, 22.05.2025

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.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Graz, 22.05.2025

Marina Badzic eh.

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt meiner Betreuerin Frau Ass.-Prof.⁽ⁱⁿ⁾ Dr.⁽ⁱⁿ⁾ med. univ. et med. dent. Margit Pichelmayer, die jederzeit eine große Stütze für mich war, stets erreichbar, mich herzlich und bewandert betreut hat. Die Dankbarkeit gilt der Bereitstellung des bedeutsamen und informativen Themas sowie die Umsetzung dieser Diplomarbeit, ebenso unterstützend durch Herrn Erich Häupl, Herrn Philipp Tepesch und Frau Dipl.-Ing.⁽ⁱⁿ⁾ Irene Mischak für deren Mithilfe ich zutiefst dankbar bin.

Zusätzlich möchte ich mich bei meiner Familie und Freunde, in der Heimat und die die ich inmitten des Studiums kennenlernen durfte, mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben, stets ein offenes Ohr und gute Ratschläge hatten, bedanken.

Mein großer Dank gilt meinen Eltern, die mich in jeder Lebensphase immer unterstützt haben und mir die Möglichkeit gaben mich weiterzubilden, um mir meinen Traum erfüllen zu können.

Zusammenfassung

Einleitung

Diese Arbeit ist Teil eines CAMed-Projektes. Dieses beschäftigt sich unter anderem mit der Entwicklung von extraoralen funktionskieferorthopädischen Geräten und mit der Erstellung individueller Abstützungsteile, um den Patientinnen und Patienten einen besseren Comfort zu gewährleisten.

Die Änderungen bestanden vor allem im Einbringen von Edelstahlhaken in 3D-gedruckte Basisplatten, welche auf Belastbarkeit geprüft wurden.

Ziel war es, herauszufinden, bei welchen Bedingungen und unter welcher Kraft die Testproben brachen bzw. stabil bleiben.

Material und Methode

Für diese Diplomarbeit wurden zwei unterschiedliche Varianten der Basisplatten (A & C) ausgewählt und mittels hauseigenem, an der Zahnklinik Graz bereitgestelltem, 3D-Drucker „Asiga Freeform Pro2™“ gedruckt. Für die Basisplatten wurde Polymethylmethacrylat als Kunststoff ausgewählt, da dieses Material aufgrund seiner Eigenschaften in zahlreichen Bereichen der Zahnmedizin Verwendung findet.

Anschließend wurden die Stahldrähte, welche in zwei unterschiedlichen Positionen einpolymerisiert waren, sowohl im nicht sandgestrahlten als auch im sandgestrahlten Zustand getestet.

Daraus ergaben sich für die Testung:

- 20 Basisplatten der Position A mit sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position A mit nicht sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position C mit sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position C mit nicht sandgestrahltem Stahldraht

Dafür wurden die, in den Basisplatten einpolymerisierten Einzelhaken, in einer ebenso hauseigenen Universalprüfmaschine auf Zugbelastung getestet. Bei der Belastungstestung wurde eine zunehmende Kraft auf den Einzelhaken ausgeübt, bis dieser unter der Zugbelastung brach.

Ergebnisse

Anschließend wurden die einzelnen Bruchwerte, aus den verschiedenen Aufbauten, ausgewertet und verglichen. Zusätzlich wurde der Ort des Bruches in die Beurteilung einbezogen.

Im Test zeigte sich, dass sich alle 4 Typen mehr oder weniger signifikant voneinander unterschieden. Besonders groß war der Unterschied zwischen Typ C-Sandgestrahl und Typ A-Nicht-Sandgestrahl.

Conclusio

Im Ausgang der Studie zeigte sich, dass die Position A – sandgestrahl durch die positiven Ergebnisse der Testung für die Belastung von kieferorthopädischen Gerätschaften, durch die hohe Belastbarkeit bei Patienten/Patientinnen mit Fehlbildungen, gut geeignet wäre.

Abstract

Introduction

This work is part of a CAMed project. Which deals with the development of extraoral functional orthodontic appliances and with the creation of individual support parts to ensure better comfort for the patients. The changes consisted mainly of inserting stainless steel hooks into 3D-printed base plates, which were tested for load-bearing capacity.

The aim was to find out under what conditions and under what force the test specimens broke or remained stable.

Materials and Method

For this diploma thesis, two different variants of the base plates (A & C) were selected and printed using the in-house 3D printer “Asiga Freeform Pro2™“ provided by the Graz Dental Clinic. Polymethyl methacrylate was selected as the plastic for the base plates, as this material is used in numerous areas of dentistry due to its properties.

The steel wires, which were polymerized in two different positions, were then tested in both the non-sandblasted and sandblasted state.

This resulted in the following for testing:

- 20 base plates of position A with sandblasted steel wire
- 20 base plates of position A with non-sandblasted steel wire
- 20 base plates of position C with sandblasted steel wire
- 20 base plates of position C with non-sandblasted steel wire

For this purpose, the individual hooks polymerized into the base plates were tested for tensile load in an in-house universal testing machine. During the load test, increasing force was applied to the individual hooks until they broke under the tensile load.

Results

The individual fracture values from the different superstructures were then evaluated and compared. The location of the fracture was also included in the assessment. The location of the fracture was also included in the assessment. The test showed that all 4 types differed significantly from each other. The difference between type C-sandblasted and type A-non-sandblasted was particularly large.

Conclusion

The results of the study showed that position A – sandblasted would be well suited for loading orthodontic appliances due to its high load-bearing capacity in patients with malformations.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	4
ABSTRACT	6
ABKÜRZUNGEN UND DEREN ERKLÄRUNG.....	10
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	11
TABELLENVERZEICHNIS	12
1. EINLEITUNG	13
1.1. Einführung	13
1.1.1. Malokklusion.....	13
1.1.2. Klasse III Malokklusion	13
1.1.3. Offener Biss.....	15
1.1.4. Behandlungsmethoden	17
1.2. VORSTUDIE	21
1.3. KUNSTSTOFF IM ALLGEMEINEN	22
1.3.1. Eigenschaften von Kunststoffe:.....	22
1.4. METALL IM ALLGEMEINEN.....	24
1.4.1. Eigenschaften von Metallen:	24
2. MATERIAL UND METHODE.....	26
2.1. MATERIAL.....	26
2.1.1. PMMA	26
2.1.2. Edelstahl.....	29
2.2. DESIGNENTWICKLUNG.....	31
2.2.1. Designideen.....	31
2.3. GERÄTSCHAFTEN	33
2.3.1. 3D-Druckermaschine „Asiga Freeform PRO2™“	33
2.3.2. Blitzlichtgerät „Otoflash G171“	34
2.3.3. Universalprüfmaschine „Shimadzu AGS-X“.....	35
2.4. HERSTELLUNGSVERFAHREN.....	36
2.4.1. 3D-Druck der Designvarianten.....	36
2.4.2. Bearbeitung der Basisplatten.....	37
2.4.3. Einpolymerisieren der Einzelhaken	38
2.4.4. Belastungstestung	39
3. DATENSAMMLUNG.....	41
3.1. DATENERFASSUNG.....	41

3.2.	DATENANALYSE.....	42
3.3.	MESSWERTE.....	43
3.3.1.	<i>Einzelhaken Position A – nicht sandgestrahlt</i>	43
3.3.2.	<i>Einzelhaken Position C – nicht sandgestrahlt</i>	44
3.3.3.	<i>Einzelhaken Position A – sandgestrahlt</i>	45
3.3.4.	<i>Einzelhaken Position C – sandgestrahlt</i>	46
4.	ERGEBNISSE	47
4.1.	ERGEBNISSE DER EINZELHAKEN POSITION A – NICHT SANDGESTRAHLT	49
4.2.	ERGEBNISSE DER EINZELHAKEN POSITION C – NICHT SANDGESTRAHLT.....	50
4.3.	ERGEBNISSE DER EINZELHAKEN POSITION A – SANDGESTRAHLT	51
4.4.	ERGEBNISSE DER EINZELHAKEN POSITION C – SANDGESTRAHLT	52
4.5.	BRUCHSTELLEN DER EINZELHAKEN IN DER BASISPLATTE	53
5.	DISKUSSION	54
6.	FAZIT	57
	LITERATURVERZEICHNIS	58

Abkürzungen und deren Erklärung

3D	dreidimensional
DLP	digital light processing
g	Gramm
kN	Kilonewton
mm	Millimeter
mm/Min	Millimeter pro Minute
N	Newton
Nm	Newtonmeter
PMMA	Polymethylmethacrylat
MMA	Methylmethacrylat
%	Prozent
max.	maximal
&	und
ca.	circa
<	unter
x	mal
cN	Centinewton
z.B.	zum Beispiel
u.v.m.	und vieles mehr
UV	Ultraviolett
KKK	Kopf-Kinn-Kappe
STL	Stereolithografie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Beispiel für ein Klasse III Syndrom – PseudoProgenie	14
Abbildung 2 - enorales Beispiel – Progenie.....	14
Abbildung 3 - enorales Beispiel - offener Biss.....	16
Abbildung 4 - Combiquick Kopf-Kappe	20
Abbildung 5 - Gelochte Kinn-Kappe mit Außenarmen.....	20
Abbildung 6 - Helix Sicherheitsmodul	20
Abbildung 7 - Klassifizierung der Kunststoffe	22
Abbildung 8 - Klassifizierung der Werkstoffe.....	24
Abbildung 9 - chemische Verbindung MMA und PMMA	27
Abbildung 10 - Opti Print 385-Kunststoff.....	28
Abbildung 11 - standardisierter Einzelhaken.....	30
Abbildung 12 - Probesamples der Basisplatten	31
Abbildung 13 - Varianten der einpolymerisierten Einzelhaken.....	32
Abbildung 14 - "Asiga Freeform PRO2TM".....	33
Abbildung 15 - „OTOFLASH G171“.....	34
Abbildung 16 - "Shimadzu AGS-X"	35
Abbildung 17 – virtuelle Darstellung	36
Abbildung 18 - Ultraschallbad und Isopropanol.....	37
Abbildung 19 - einpolymerisierte Einzelhaken.....	38
Abbildung 20 - Standardfixierung.....	39
Abbildung 21 - Beispiel der Biegung und des Bruchs.....	41
Abbildung 22 - Werteverlauf der Einzelhaken Position A – nicht sandgestrahlt	43
Abbildung 23 - Werteverlauf der Einzelhaken Position C – nicht sandgestrahlt.....	44
Abbildung 24 - Werteverlauf der Einzelhaken Position A – sandgestrahlt	45
Abbildung 25 - Werteverlauf der Einzelhaken Position C –sandgestrahlt	46
Abbildung 26 - Darstellung aller Positionen in einem Boxplot	47
Abbildung 27 - Ergebnisse der Paare.....	48
Abbildung 28 - Vergleich nicht sandgestrahlt mit sandgestrahlt	48
Abbildung 29 - Vergleich Position A mit Position C.....	48
Abbildung 30 - Darstellung aller Werte im Boxplot.....	49
Abbildung 31 - Darstellung aller Werte im Boxplot.....	50
Abbildung 32 - Darstellung aller Werte im Boxplot.....	51
Abbildung 33 - Darstellung aller Werte im Boxplot.....	52
Abbildung 34 - Darstellung der Verformten Einzelhaken	53
Abbildung 35 - Darstellung der gebrochenen Basisplatten	53
Abbildung 36 - Darstellung der verformten Einzelhaken und gebrochenen Basisplatten	53

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 – offener Biss</i>	15
<i>Tabelle 2 – extraorale Gerätschaften</i>	17
<i>Tabelle 3 – klassische und vertikale „KKK“</i>	19
<i>Tabelle 4 – vertikale „KKK“</i>	20
<i>Tabelle 5 – Kunststoffe im Detail</i>	23
<i>Tabelle 6 – Metalle im Detail</i>	25
<i>Tabelle 7 - Deskriptive Statistik mit Kennzahlen der Testung</i>	42

1. Einleitung

1.1. Einführung

1.1.1. Malokklusion

Malokklusionen beschreiben Zahn- und Kieferfehlstellungen. Diese können, je nach Kompensationsvermögen zu Beschwerden führen, wie zum Beispiel Schmerzen und funktionelle Einschränkungen beim Kauen und Sprechen. Die Kieferorthopädie ist eine der Möglichkeiten Malokklusionen zu beheben (Lee W. Graber, 2022).

1.1.2. Klasse III Malokklusion

Eine in Mitteleuropa selten vorkommende Malokklusion ist die Progenie. Sie ist charakterisiert durch einen verkehrten frontalen Überbiss und in der Regel durch eine Klasse III-Verzahnung im Seitenzahnbereich.

Dabei wird zwischen einer skelettalen und dentalen Klasse III unterschieden.

Wobei erstere wiederum in eine „echte“ und „unechte“ Progenie unterteilt wird:

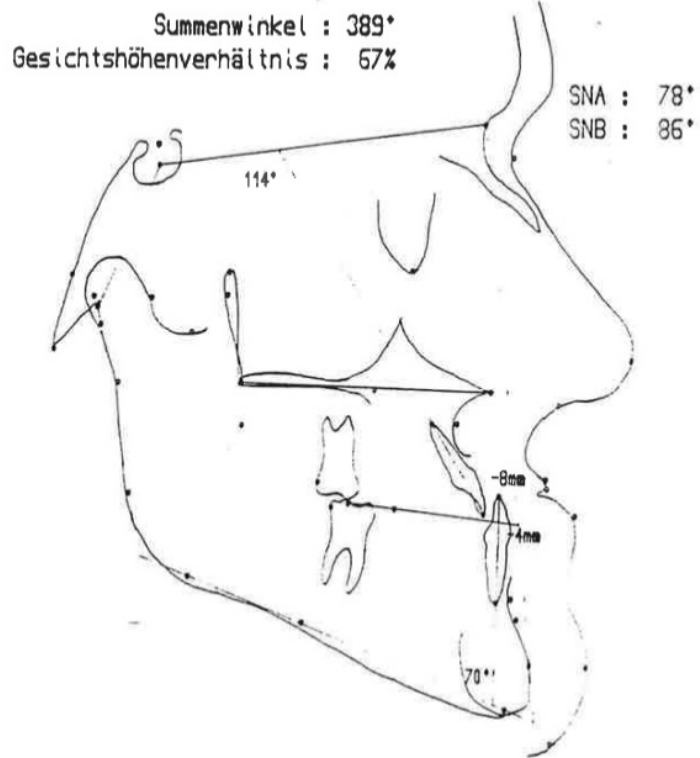
-echte Progenie = mandibuläre Prognathie

-unechte Progenie = „Pseudoprogenie“ = maxilläre Retrognathie

Die Ursachen einer echten und unechten Progenie sind meist vielfältig. Eine genetische Komponente spielt dabei häufig eine Rolle. Seltener träten sie als Sekundärfolge von anderen Grunderkrankungen auf.

Die skelettale Klasse III Malokklusion ist gekennzeichnet durch ein abnormales Kieferwachstum. Oft geht zusätzlich eine falsche Zungenposition damit einher. Diese erklärt sich in der Regel durch die abnormen Raumverhältnisse bei kleinem Oberkiefer und großem Unterkiefer (Gerald D. Hart, 1971; William R. Proffit Henry W. Fields Jr. Brent Larson David M. Sarver, 2018).

Die dentale Klasse III Malokklusion ist gekennzeichnet durch die unterschiedliche Achsenneigung der Frontzähne. Die Klasse III-Verzahnung im Seitenzahnbereich kann durch Extraktionen oder Nichtanlagen entstehen (Andrea Wichelhaus, 2012).



**ABBILDUNG 1 - BEISPIEL FÜR EIN KLASSE III
 SYNDROM – PSEUDOPROGENIE (DROSCHL, 1990)**



**ABBILDUNG 2 - ENORALES BEISPIEL – PROGENIE
 (UNIVERSITÄTSKLINIK FÜR ZAHNMEDIZIN UND
 MUNDGESUNDHEIT, N.D.)**

1.1.3. Offener Biss

Dieser Fehlbiss wird durch eine Abweichung in der Vertikalen charakterisiert. Durch das vertikale Defizit fehlt ein okklusaler Zahnkontakt. Dieser fehlende Kontakt kann zwischen den Frontzähnen gefunden werden, aber auch in seltenen Fällen im Seitenzahnbereich, weshalb zwischen einem frontal offenen und einem seitlich offenen Biss unterschieden werden kann (Andrea Wichelhaus, 2012).

In der Tabelle befindet sich eine detaillierte Auflistung der Ursachen der beiden möglichen offenen Bissituationen.

	Frontal offener Biss Der frontal offene Biss bezeichnet den fehlenden Kontakt zwischen den Inzisiven des Ober- und Unterkiefers.	Seitlich offener Biss Beim seitlich offenen Biss fehlt der Kontakt zwischen zwei oder mehreren Seitenzähnen. Dieser Fehlkontakt kann uni- oder bilateral vorkommen.
<u>Ursachen:</u>		
<u>habituell</u>	Daumenlutschen, Zungenpressen, Schnullergebrauch	
<u>iatrogen</u>	kieferorthopädische Apparaturen	
<u>rachitisch</u>	skelettal offener Biss folglich einer Rachitis oder Vitamin D-Mangel. Führt zu Deformationen des Ober- und Unterkiefers	
<u>strukturell</u>	skelettal offener Biss durch strukturelle Veränderungen der Schädelform	
<u>lokal</u>	Infraokklusion im Frontbereich, Frontzahntrauma, Ankylosen, Durchbruchstörungen	

TABELLE 1 – OFFENER BISS (BÄRBEL KAHL-NIEKE, 2009; PETER SCHOPF, 2008)

1.1.3.1. Zungenproblematik

Sowohl beim frontal offenen Biss wie auch beim seitlichen offenen Biss kommt es zu einer sekundären Zungenfehlstellung, die dadurch bedingt ist, dass sich die Zunge in den „Hohlraum“ der offenen Bissituation einlagert.

Ohne Behandlung bleibt dadurch das Problem der Non-Okklusion bestehen – mitunter kann es zu einer Verschlechterung kommen. Aus diesem Grund ist es unbedingt notwendig, diese Malokklusion frühzeitig kieferorthopädisch zu behandeln (Andrea Wichelhaus, 2012).



ABBILDUNG 3 - ENORALES BEISPIEL - OFFENER BISS (UNIVERSITÄTSKLINIK FÜR ZAHNMEDIZIN UND MUNDGESUNDHEIT, N.D.)

1.1.3.2. Therapie

Die Therapieform ist abhängig von der Ursache.

Bei der habituellen Form wird eine logopädische Therapie empfohlen und das Absetzen der Habits. Gegen die Zungenproblematik kann ein Zungengitter oder Spurs zum Einsatz kommen. Bei rachitischen Erkrankungen empfiehlt sich die Vitamin-D-Gabe (Andrea Wichelhaus, 2012).

Je mehr die umgebenden anatomischen Strukturen mitbetroffen sind, desto eher läuft die Therapie auf eine operative Korrektur hinaus.

1.1.4. Behandlungsmethoden

1.1.4.1. Extraorale Gerätschaften

	bei Klasse III Malokklusion – klassische „KKK“	beim offenen Biss – vertikale „KKK“
<u>Zeitpunkt</u>	Die <u>skeletalen Klasse III</u> sollte idealerweise im Milchgebiss und im Alter von 5 bis 6 Jahren erfolgen, da nur in diesem frühen Alter eine orthopädische Korrektur möglich ist, während die <u>dentale Klasse III</u> auch zu einem späteren Zeitpunkt korrigiert werden kann.	Die Behandlung sollte im Milchgebiss bis frühen Wechselgebiss, also während des Wachstums erfolgen.
<u>Ziel</u>	Das primäre Ziel der Behandlung besteht darin, das Wachstum des Ober- und Unterkiefers zu beeinflussen, um eine Disharmonie zwischen der Maxilla und Mandibula zu beheben.	Durch die sagittale Wirkung auf den Unterkiefer und die vertikale Entwicklung führt die Therapie zu einem Schluss des offenen Bisses.
<u>extraorale Gerätschaften</u>	Dies kann entweder durch die Förderung des Oberkieferwachstums mithilfe einer Delaire-Maske oder durch die Hemmung des Unterkieferwachstums mit einer klassischen Kopf-Kinn-Kappe erreicht werden.	Die Behandlung eines offenen Bisses erfolgt durch die Verwendung einer vertikalen Kopf-Kinn-Kappe.

TABELLE 2 – EXTRAORALE GERÄTSCHAFTEN

(WICHELHAUS, 2012; DROSSL, 1990; ANDREA WICHELHAUS, 2012; PETER SCHOPF, 2008)

1.1.4.1.1. Bestandteile der klassischen und vertikalen Kopf-Kinn-Kappe

	<p style="text-align: center;">Klassische „KKK“</p> 	<p style="text-align: center;">Vertikale „KKK“</p> 
<p><u>1x Gurt</u></p>	<p>Für die klassische „KKK“ kommt der „High-Pull“ zum Einsatz, das bedeutet, dass der Gurt über die parietale Schädelregion geführt wird.</p>	<p>Diese Gerätschaft besteht aus zwei Teilen, die sich am Vorder- und Hinterkopf verbinden. Der obere Teil verläuft über den Scheitel und der untere Teil über die Stirn - wie ein Stirnband - oberhalb der Augen.</p>
<p><u>1x Kinnschale</u></p>	<p>Im Kinnbereich ist eine optimale Anpassung der Kinnschale besonders wichtig, um Druckstellen zu vermeiden. Je individueller die Schale angefertigt werden kann, desto geringer sind diese. Die Schale wird mit den Sicherheitsmodulen durch Drahtteile verbunden. Sie dienen dazu die Kinnschale zu halten und die Kraft individuell einzustellen.</p> 	<p>Auch bei der Verwendung der vertikalen „KKK“ ist der Bestandteil der Kinnschale gleich nur sind hierbei die Drahtteile der Schale, die zum Einhängen der Module dienen, länger.</p> 

<p><u>2xSicherheits-</u> <u>module</u></p>	<p>Die sogenannten Sicherheitsmodule = Helix-Module bestehen aus einem bruchsauren Metall namens Sicherheitsclip und jeweils aus einem Lochband. Das letztere weist ovale Löcher auf an denen die Kinn-Kappe eingehängt wird. Durch die Wahl der unterschiedlichen Löcher kann die Kraftgröße individuell eingestellt werden.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<p><u>Kraft</u> <u>und</u> <u>Tragedauer</u></p>	<p>Die Kappe wird mit einer Kraft von mindestens 600-800g eingesetzt und sollte 1-2 Stunden vor dem Schlafengehen sowie über Nacht getragen werden, was eine Tragedauer von 10-12 Stunden entspricht.</p>

TABELLE 3 – KLASSISCHE UND VERTIKALE „KKK“ (DROSCHL, 1990)

Sowohl bei der Klasse III-Malokklusion wie auch beim offenen Biss, kommen intraorale und extraorale Gerätschaften zum Einsatz.

Da sich die vorliegende Arbeit mit letzterem beschäftigt, soll diese näher beschrieben werden.

1.1.4.1.2. Die vertikale „KKK“ im Detail

Die Zugrichtung bei diesem Gerät ist steiler als bei der „klassischen“ Kopf-Kinn-Kappe, welche einen Schrägzug besitzt. Der Vertikalzug wirkt sagittal auf den Unterkiefer und verhindert durch den Druck von unten die weitere vertikale Gesichtsentwicklung. Hingegen besitzt der Schrägzug der klassischen „KKK“ neben der vertikalen Komponente einen horizontalen Kraftanteil, der zu einer sagittalen Bremsung des Unterkiefers beiträgt.

Die vertikale Kopf-Kinn-Kappe von der Dentalfirma Tiger Dental GmbH, die den Produktnamen „Vertix“ trägt, besteht aus:

- 1 Kopfkappe
- 2 Außenarme
- 1 konfektionierte Kinnschale
- 2 Sicherheitsmodule




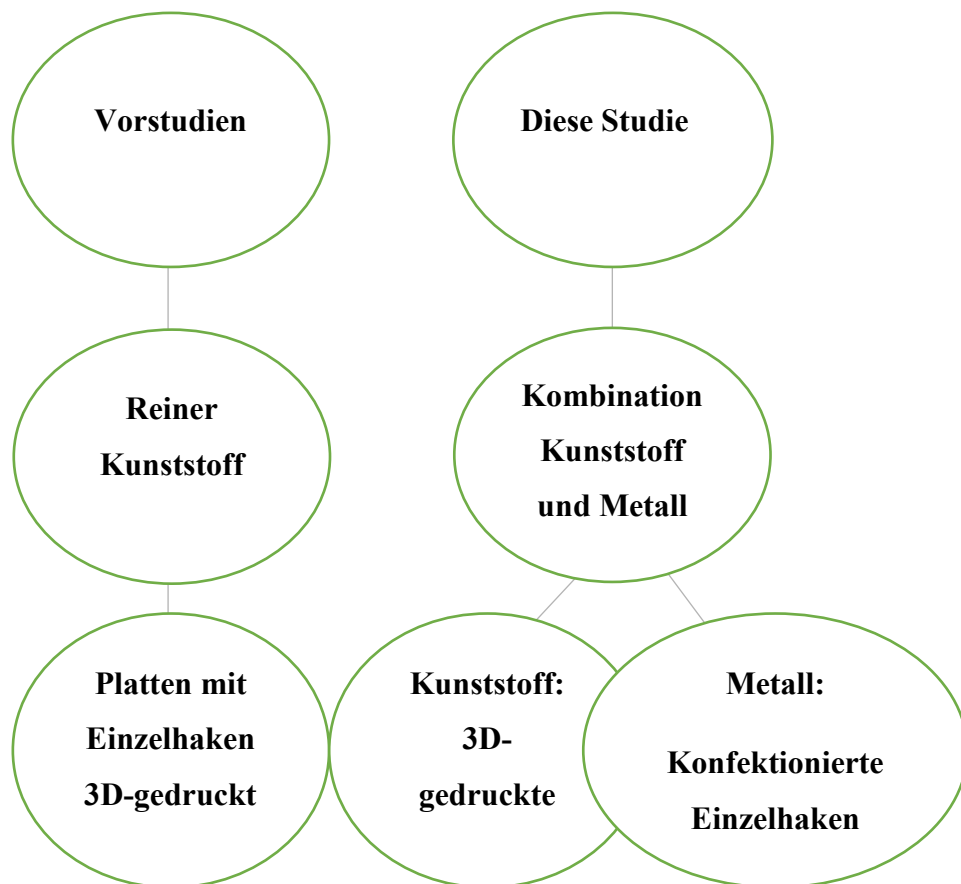
 <p>ABBILDUNG 4 - COMBIQUICK KOPF-KAPPE</p>	<p><u>Die Combiquick Kopfkappe</u></p> <p>Diese besteht aus waschbaren Gurten. Um eine exakte Anpassung an den Schädel gewährleisten zu können, befinden sich auf diesen Gurten Klettverschlüsse zum Zweck unterschiedlicher Längen Anpassung.</p>
 <p>ABBILDUNG 5 - GELOCHTE KINN-KAPPE MIT AUßENARMEN</p>	<p><u>Gelochte Kinnkappe mit Außenarmen</u></p> <p>Diese ist am Kinn des Patienten positioniert. Sie ist laut Angabe des Herstellers druckoptimiert und extra belüftet. Sie besteht aus Kunststoff und ist unisex/one-size gearbeitet.</p>
 <p>ABBILDUNG 6 - HELIX SICHERHEITSMODUL</p>	<p><u>Helix Sicherheitsmodul</u></p> <p>Die Sicherheitsmodule sind gleich wie bei der klassischen Kinnkappe -> ihre Beschreibung befindet sich auf Seite 19.</p>

TABELLE 4 – VERTIKALE „KKK“ (TIGER DENTAL GMBH, 2024)

1.2. Vorstudie

Diese Arbeit orientiert sich an den schon abgeschlossenen Vorarbeiten und sollte weiterführend, als Folgestudie eines CAMed-Projekts, Verbesserungen anhand neuer Designs und Probensamples überprüfen. In den Vorstudien wurden 3D-gedruckte Platten mit Einzelhaken auf Belastung getestet.

Für beide Vorstudien wurde reiner Kunststoff „PMMA“ (Polymethylmethacrylat) verwendet, für diese Studie jedoch eine Kombination von Kunststoff und Metall.



1.3. Kunststoff im Allgemeinen

1.3.1. Eigenschaften von Kunststoffen:

- Formbarkeit
- Variabilität
- Korrosionsbeständigkeit
- geringes Gewicht
- Isolierfähigkeit

(R. J. Crawford, 1998)

Klassifizierung der Kunststoffe:

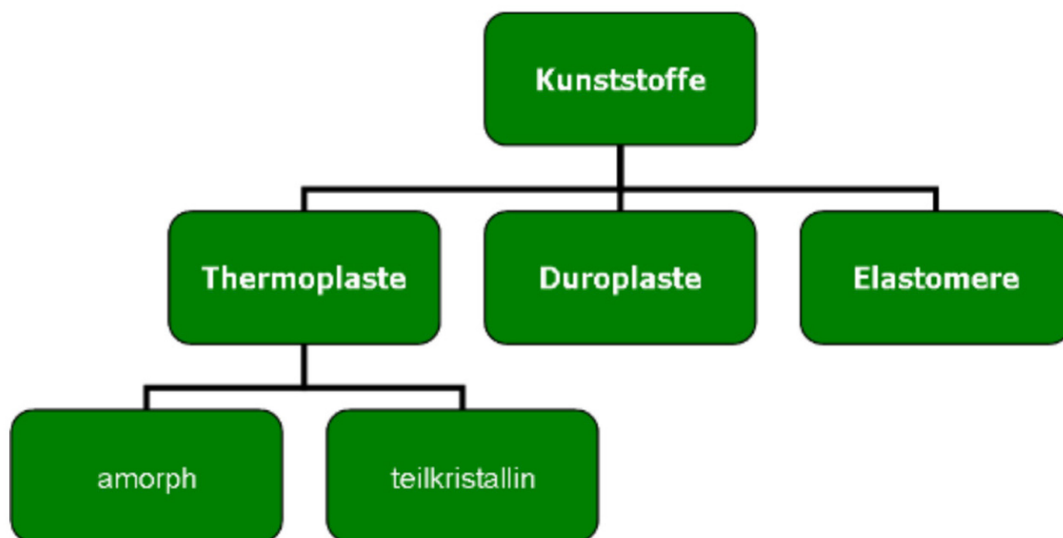


ABBILDUNG 7 - KLASSIFIZIERUNG DER KUNSTSTOFFE

(Domininghaus, 2012; *Fachverband Der Kunststoffrohr-Industrie*, n.d.; Franz Günter Sander, 2011)

- Thermoplasten: kettenförmige, eindimensional aufgebaute Makromoleküle
- Duroplasten: engmaschig vernetzte, dreidimensional aufgebaute Makromoleküle
- Elastomere: weitmaschig vernetzte, dreidimensional aufgebaute Makromoleküle


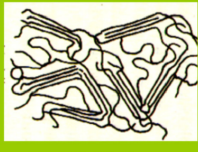
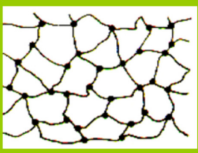
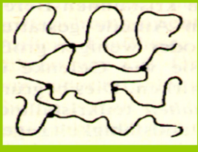
<p><u>Thermoplaste</u></p>	<p>-<u>amorphe</u>: glasklarer, verknäuelter Zustand verhindert regelmäßige Anordnung der Molekülketten durch den chemischen Aufbau der Kettenmoleküle</p> <div data-bbox="518 347 758 533" style="text-align: center;">  <p>amorph</p> </div> <p><u>Beispiele</u>: Polycarbonat, Polyvinylchlorid</p> <p>-<u>teilkristalline</u>: weißlicher, parallelbündeliger Zustand ermöglicht einzelnen Kettenmolekülen den kristallinen und amorphen Bereich durchzulaufen</p> <div data-bbox="518 667 758 853" style="text-align: center;">  <p>teilkristallin</p> </div> <p><u>Beispiele</u>: Polyethylen, Polypropylen</p> <p>-<u>allgemein</u>: sie sind bei Erhitzung verformbar und können wieder umgeformt werden</p>
<p><u>Duroplaste</u></p>	<p>Engmaschig vernetzte Raumnetzwerk-moleküle führen zu der Härte und Sprödigkeit des Kunststoffes. Prinzipiell behalten sie ihre Form, können jedoch durch die Zugabe von Füll- und Verstärkungsstoffen variiert werden.</p> <div data-bbox="518 1122 758 1308" style="text-align: center;">  <p>engmaschig vernetzt</p> </div> <p><u>Beispiele</u>: glasfaserverstärkte Kunststoffe, Epoxidharze</p>
<p><u>Elastomere</u></p>	<p>Weitmaschig vernetzte Raumnetzwerk-moleküle sind gummielastisch. Lassen sich durch äußere Krafteinwirkungen strecken und nehmen nach der Entlastung dieser Kraft ihren alten Ausgangszustand wieder ein.</p> <div data-bbox="518 1547 758 1733" style="text-align: center;">  <p>weitmaschig vernetzt</p> </div> <p><u>Beispiele</u>: Silikone</p>

TABELLE 5 – KUNSTSTOFFE IM DETAIL (ANSHUMAN SHRIVASTAVA, 2018; FACHVERBAND DER KUNSTSTOFFROHR-INDUSTRIE, N.D.)

Der in dieser Diplomarbeit verwendete „PMMA“ Kunststoff gehört zu den amorphen Thermoplasten

1.4. Metall im Allgemeinen

1.4.1. Eigenschaften von Metallen:

- elektrische und thermische Leitfähigkeit
- Festigkeit und Verformbarkeit
- Härte und Glanz
- hoher Schmelz- und Siedepunkt

(Joseph R. Davis, 1998)

Klassifizierung der Werkstoffe:

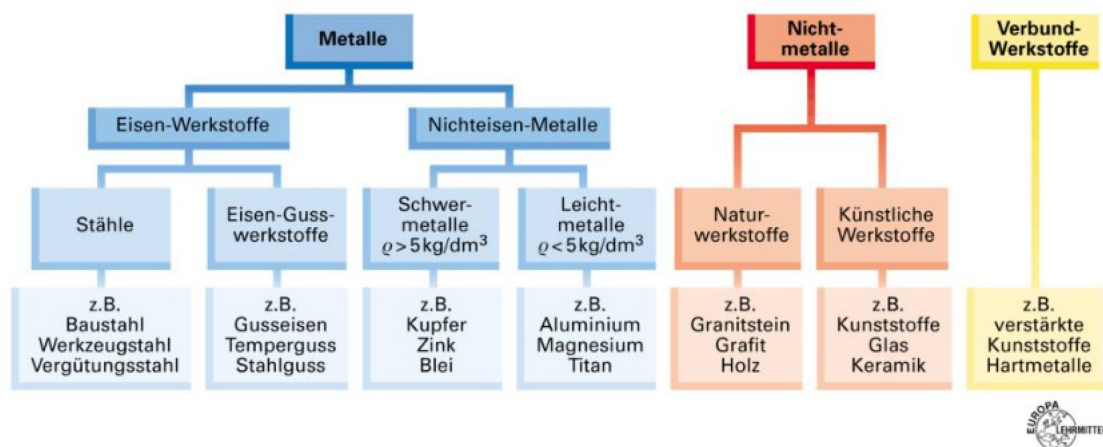


ABBILDUNG 8 - KLASSIFIZIERUNG DER WERKSTOFFE

(J. Evers, 2010; William D. Callister Jr., 2013)

- Eisenmetalle: bestehen hauptsächlich oder komplett aus Eisen
- Nichteisenmetalle: Metalle und Legierungen mit einem Reineisenanteil von <50%
- Edelmetalle: kommen in der Natur in reiner und ungebundener Form vor

<p><u>Eisenmetalle</u></p>	<p>Mit dem Hauptbestandteil Eisen weisen sie eine ausgezeichnete mechanische Eigenschaft auf.</p> <p>Die detaillierten Eigenschaften des Edelstahl werden unter dem Kapitel „Edelstahl“ näher beschrieben.</p>  <p><u>Beispiele:</u> Eisen bzw. Stahl</p>
<p><u>Nichteisenmetalle</u></p>	<p>Sie enthalten kein Eisen als Hauptbestandteil und weisen unter anderem eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf.</p>  <p><u>Die Untergruppen der NE-Metalle:</u> Buntmetalle z.B. Cobalt u.v.m. Leichtmetalle z.B. Aluminium u.v.m. Edelmetalle z.B. Gold u.v.m.</p>
<p><u>Edelmetalle</u></p>	<p>Sie sind besonders korrosionsbeständig und im natürlichen Lebensraum chemisch stabil. Aufgrund ihrer Schönheit und Seltenheit sind sie von ökologischer Bedeutung.</p>  <p><u>Beispiele:</u> Silber, Gold, Quecksilber, Rhenium, Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium</p>

TABELLE 6 – METALLE IM DETAIL

(EISEN- UND NICHEISENMETALLE, N.D.; HANDBOOK OF NON-FERROUS METAL POWDERS, 2019; NICHEISENMETALLE, N.D.; ÖGUSSA – DIE WELT DER EDELMETALLE, N.D.; WICHTIGER INDUSTRIEWERKSTOFF: EISENMETALLE IM FOKUS, N.D.; K.KÖRBER, 1982; MATTHEW HART, 2014; WILLIAM D. CALLISTER JR., 2013)

Die Haken der vorliegenden Studie gehören in die erste der drei beschriebenen Gruppen.

2. Material und Methode

2.1. Material

2.1.1. PMMA

Das Polymethylmethacrylat ist ein transparenter thermoplastischer Kunststoff und entsteht durch eine radikalische Polymerisation. Ausgangsstoff für diese Polymerisation ist Methylmethacrylat „MMA“. Dabei handelt es sich um eine farblose, fruchtig riechende Flüssigkeit, die aus Acetoncyanhydrin – Aceton und Cyanwasserstoff - hergestellt wird (Rauch Puntigam, 1967; Amsler & Frey AG, 2022; Vanessa Goodship, n.d.).

Folgende Eigenschaften kennzeichnen die Polymethylmethacrylate:

- gute Be- und Verarbeitbarkeit
- Formteile sind warmformbar
- gute mechanische Verarbeitung
- vielfältig bearbeit- und behandelbare Oberfläche
- elastisch und schlagfest
- mögliche Verbindung durch Kleben
- alterungs- und witterungsbeständig
- beständig gegen Öl, Benzin, Laugen und Säuren mittlerer Konzentration
- kratzunempfindlich
- schlagfest und elastisch
- 3D-Druck geeignet

(Amsler & Frey AG, 2022)

Synthesereaktion:

Unter der Polymerisationsreaktion versteht man die chemische Reaktion, bei der sich aus Monomeren Polymere bilden. Für die Polymerisation sind Startradikale erforderlich. Das Startradikal ist ein Molekül, das sich entweder spaltet (Typ 1) oder Wasserstoff von einem Donor-Molekül (= eine Substanz die bei der Anwesenheit eines Akzeptors Atome, Ionen, Elektronen oder Protonen abgibt) abstrahiert (Typ 2) und bei Bestrahlung mit dem jeweiligen UV-Licht gut absorbiert.

Das benötigte UV-Licht lässt sich in UV-A (Wellenlänge von 315-400nm), UV-B (280-315) und UV-C (200-280nm) unterteilen und liegt außerhalb des für den Menschen sichtbaren Lichtspektrums. Durch den Einsatz des UV-Lichts ändert das Polymer seine Eigenschaft. Diese Änderungen der Struktur entsteht durch die Vernetzung und zeigt sich als photochemische Härtung.

Das entstandene Photopolymer ist daher ein vernetztes Duroplast und besteht aus einer Mischung von Restmonomeren (= Epoxid, Ehtylen, Acrylamid), Oligomeren (= Polyether, Polyester), Polymeren, Photoinitiatoren und Additiven (= Stabilisatoren, Farbstoffe, Photoabsorber u.v.m.)(A. Ravve, n.d.; Elsa Reichmanis, 2014; Jean Pierre Fouassier, n.d.; *MMA Und PMMA*, n.d.; Rauch Puntigam, 1967; Roger Phillips, 1984).

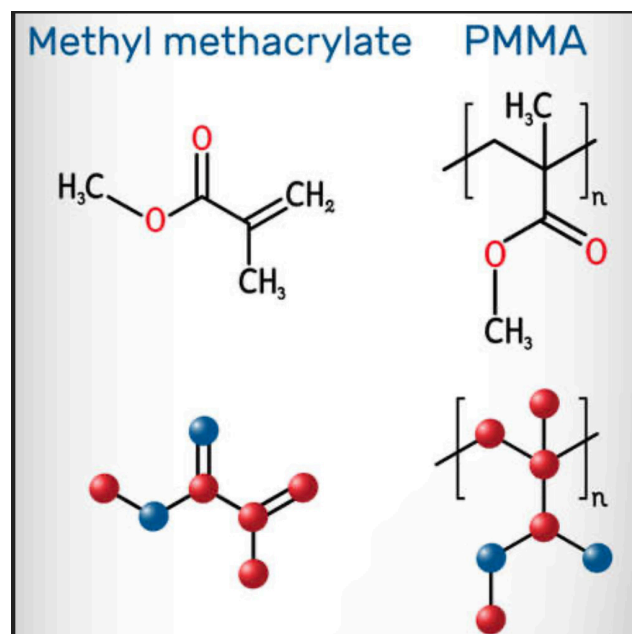


Abbildung 9 - chemische Verbindung MMA und PMMA (*MMA Und PMMA*, n.d.)

Problem: Kunststoffallergie

Trotz der vollständigen Aushärtung kann es trotzdem zur Haut- und Schleimhautreaktionen kommen. Im Zweifelsfalle sollte in jedem Fall eine Allergietestung durchgeführt werden.

2.1.1.1. Das für diese Studie verwendete PMMA

Aufgrund dieser ausgezeichneten Eigenschaften und gestützt auf die entsprechenden Vorstudien, verblieben wir bei der Verwendung von „PMMA“ für diese Diplomarbeit. Zur Anwendung kam das Produkt „optiprint 385“ von der Firma dentona AG, was im Folgendem näher beschrieben werden soll.

2.1.1.1.1. Opti Print 385-Kunststoff

Der additive 3D-Druckkunststoff „optiprint 385“ der Firma dentona AG besteht gemäß den Herstellerangaben aus einer Mischung von Acrylat- und Methacrylatharzen, Photoinitiatoren wie Phosphinoxid sowie verschiedenen Additiven und Farbstoffen. Dieser Kunststoff eignet sich zur Herstellung unterschiedlichster zahnmedizinischer Teile. Laut Produktdatenblatt ist deren lichthärtender Kunststoff beispielsweise für die Fertigung von Bohrschablonen, individuellen Abformlöffeln und Dentalmodellen geeignet. Bei Vorliegen von Allergien gegen die aus „optiprint 385“ hergestellten Produkte, dürfen diese nur in vollständig polymerisierten Zustand weiterverarbeitet werden. Anschließend ist eine Endhärtung im Lichthärtegerät „Otoflash G171“, ebenfalls von der Firma dentona AG, erforderlich (dentona AG, 2023).



ABBILDUNG 10 - OPTI PRINT 385-KUNSTSTOFF

(Dentona AG, 2021)(Dentona AG, 2021)

2.1.2. Edelstahl

Allgemein:

Der Edelstahl ist eine Legierung, die hauptsächlich aus Kobalt, Chrom und Nickel besteht. Weitere Legierungsbestandteile wie Chrom und Molybdän sorgen für eine natürliche Korrosionsbeständigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaft werden sie auch als „rostfrei“ bezeichnet. Zusätzlich weist die Kobaltchromlegierung eine hohe Elastizitätsgrenze auf, weshalb die Bruchgrenze bei ca. 4% liegt. Die Anteile des Nickels und Titans geben der Kobaltbasislegierung die erforderliche Verformbarkeit ohne die Gefahr eines Bruchs. Aus diesem Grund und auch wegen ihrer Verfügbarkeit, finden die Edelstähle in der Zahnmedizin Verwendung vor allem im kieferorthopädischen Bereich. Der Stahl (= SS=Stainless Steel) wird dabei sowohl intra- als auch extraoral verwendet (Lee W. Graber, 2022).

Folgende Eigenschaften kennzeichnen die Edelstähle:

- erhöhte Beständigkeit gegen Korrosion und Säuren
- weitgehend unmagnetisch
- höhere Korrosionsfestigkeit
- hohe Zähigkeit = niedrige Zerspanbarkeit
- geringere Wärmeleitfähigkeit
- rostfrei

(Ulrich Heubner, 2014)

Problem: Nickelallergie

Ein großes Problem des Stahls – egal ob innerhalb oder außerhalb des Mundes verwendet – ist sein Nickelgehalt. Im Falle einer bestätigten Nickelallergie /-unverträglichkeit kann im Rahmen einer metallischen Versorgung, Titan verwendet werden. Titan zählt zu den für das Gewebe und Organismus verträglichsten Metallen. Sie lassen sich sowohl konfektioniert über die Kaltverformung als auch über die Warmverformung anfertigen. Titan findet hauptsächlich Anwendung im subgingivalen, knöchernen Bereich und hier in erster Linie als Implantat (Jakob Wirz, 1993).

Im supragingivalen Bereich wird Titan als Beimischung in Nickel/Titandrähten verwendet, die jedoch gleich wie der Stahldraht Nickel enthalten.

2.1.1.2. Die für diese Studie verwendeten Edelstahlteile

2.1.1.2.1. standardisierte Einzelhaken

Aufgrund seiner ausgezeichneten mechanischen Eigenschaft und vielseitigen Verwendung im medizinischen Bereich wurde für diese Studie Edelstahl verwendet. Zum Einsatz kam ein konfektionierter Stainless-Steel von der Firma Prym.

Informationen dieser Einzelhaken:

- Material: rostfreier Eisen
- hautverträglich
- Hakenmaße: 12mm x 15mm
- Gewicht: 9,07 g
- Farbe: Silber



ABBILDUNG 11 - STANDARDISIERTER EINZELHAKEN

(Prym.Com, n.d.)

Unsere für diese Studie verwendeten Einzelhaken wurden im Design so angepasst, dass sie bei einer späteren klinischen Applikation des Gerätes weder mit der Haut noch Schleimhaut Kontakt hätten - daher spielt die oben erwähnte Allergie bei unserer Geräteapplikation keine Rolle.

2.2. Designentwicklung

2.2.1. Designideen

Weiterführend wurde versucht Änderungen an den Einhängeteilen zu finden, um Krafteinwirkungen länger widerstehen zu können. Zu diesem Zweck wurde die Idee entwickelt, die Position der Stahldrähte zu ändern und das Einbringen derselben in die Kunststoffplatten. Ziel war es, herauszufinden, bei welchen Bedingungen und unter welcher Kraft die Testproben brechen bzw. stabil bleiben.

2.2.1.1. Varianten der Kunststoff-Basisplatten

Bei der Überlegung, welche Position der Stahldrähte in den Basisplatten für die Tests und die damit verbundene Datenerhebung von Bedeutung sein könnte, entstand die Grundidee von vier unterschiedlichen Positionen. Da Position B und D nur geringfügige Unterschiede im Vergleich zu Position A und C aufwiesen, zusätzlich Position B eine zu kurze und Position D eine zu lange Einpolymerisationsstrecke hätten, entschieden wir uns aus dem Grund, die beiden am weitesten voneinander liegenden Positionen und realistische Einpolymerisationsstrecken zu wählen. Letztendlich fiel unsere Wahl auf die Position A und C für die Durchführung der Tests.



ABBILDUNG 12 - PROBESAMPLES DER BASISPLATTEN

2.2.1.2. Varianten der einpolymerisierten Einzelhaken

Anschließend entschieden wir uns, die Stahldrähte sowohl im nicht sandgestrahlten als auch im sandgestrahlten Zustand zu testen.

Daraus ergaben sich für die Testung:

- 20 Basisplatten der Position A mit sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position A mit nicht sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position C mit sandgestrahltem Stahldraht
- 20 Basisplatten der Position C mit nicht sandgestrahltem Stahldraht

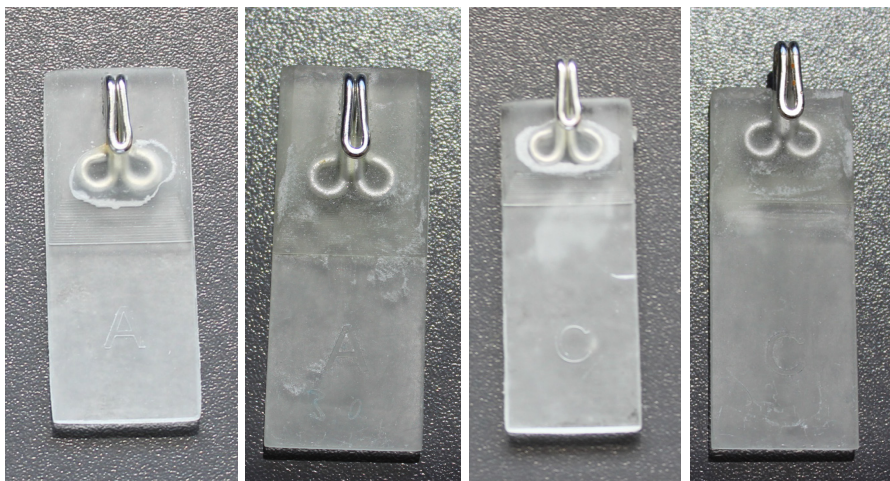


ABBILDUNG 13 - VARIANTEN DER EINPOLYMERISIERTEN EINZELHAKEN

2.3. Gerätschaften

2.3.1. 3D-Druckermaschine „Asiga Freeform PRO2™“

An der Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheits in Graz erfolgte der 3D-Druck an der hauseigenen 3D-Druckermaschine „Asiga Freeform PRO2™“, die nach dem Digital Light Processing (DLP)-Verfahren arbeitet (*Dentona AG*, 2021).

Der Drucker besitzt eine computergesteuerte Bauplattform, die in einen darunterliegenden Behälter (Tray) mit Kunststoff eintaucht, um eine Materialschicht aufzutragen. In Übereinstimmung mit dem zu druckenden 3D-Objekt werden schichtweise Lagen aufgebracht und durch einen DLP-Projektor verfestigt (*Shimadzu Deutschland GmbH*, n.d.).



ABBILDUNG 14 - "ASIGA FREEFORM PRO2™"

2.3.2. Blitzlichtgerät „Otoflash G171“

Das Blitzlichtgerät verfügt über einen Schutzgasanschluss, der dazu dient, eine Sauerstoff-Inhibitionsschicht zu verhindern und somit eine klebrige Oberfläche der Werkstücke zu vermeiden. Durch die Frequenz von 10 Blitzlichtschlägen pro Sekunde gewährleistet dieses Gerät eine ausreichende Härtung aller Schichten von Werkstücken und führt zu entsprechend hohen physikalischen Werten (*Dentona AG, 2021*).



ABBILDUNG 15 - „OTOFFLASH G171“ (*DENTONA AG, 2021*)

2.3.3. Universalprüfmaschine „Shimadzu AGS-X“

Die „Shimadzu AGS-X“, von der Firma Shimadzu Deutschland GmbH, ist eine Universalprüfmaschine, bei welcher eine Vielzahl von Materialparametern einstellbar ist. Damit sind individuelle Tests gewährleistet. Sie ermöglicht Zug- und Drucktestungen mit einer Belastung von 1 N bis 10 kN. Außerdem lässt sich die Testgeschwindigkeit stufenlos im Bereich von 0,001 bis 1.000 mm/min einstellen (*Shimadzu Deutschland GmbH, n.d.*).

Für die Bedienung und die Durchführung von Werkstoffprüfungen ist die entsprechende Software „Trapezium X-V“ notwendig. Mit dieser Software lassen sich Daten verarbeiten und können nicht nur alle Funktionen der Maschine konfiguriert, sondern auch die Ergebnisse der Testungen verarbeitet werden (*Shimadzu Deutschland GmbH, n.d.*).

Neben einer vertikal schließbaren Sicherheitstür, die zum eigenen Schutz dient, wurde an der Rückseite der Prüfmaschine eine zusätzliche Scheibe angebracht, die als Schutzvorkehrung dient, da nicht vorhersehbar ist, in welche Richtung der Bruch des Werkstücks erfolgen könnte. Weiters sorgt die Interlock-Funktion dafür, dass ein Versuch nicht durchgeführt werden kann, solange die Sicherheitstür geöffnet ist. Im Notfall kann die Maschine auch über einen seitlich angebrachten Schalter, der als Not-Aus gekennzeichnet ist, gestoppt werden (*Shimadzu Deutschland GmbH, n.d.*).



ABBILDUNG 16 - "SHIMADZU AGS-X"

2.4. Herstellungsverfahren

2.4.1. 3D-Druck der Designvarianten

Vor der Testung erfolgte der 3D-Druck der Basisplatten mit dem Kunststoff „optiprint guide 385“ auf Basis eines STL-Datensatzes. Anschließend wurde die am Laborcomputer installierte Software „Asiga Composer“ verwendet, die für den Druckvorgang erforderlich ist, um die übertragenen Designs auf einer virtuellen Druckplattform zu platzieren. Beim Benutzen der Software hat man die Möglichkeit zu bestimmen, in welchem Winkel die Designs auf der Plattform positioniert werden. Diese Neigung beeinflusst die Druckrichtung des Materials. Aufgrund der senkrechten Ausrichtung in der Vorstudie wurden in diesem Fall die Basisplatten für den 3D-Druck mit horizontaler Ausrichtung angeordnet. Dieser Anordnungstyp wird als „Boxing“ bezeichnet.

Anschließend erfolgte nach der computertechnischen Überprüfung der Druckdauer und der Bestätigung durch den Drucker der Druckvorgang, der etwa 10 Minuten für 8 Basisplatten betrug.

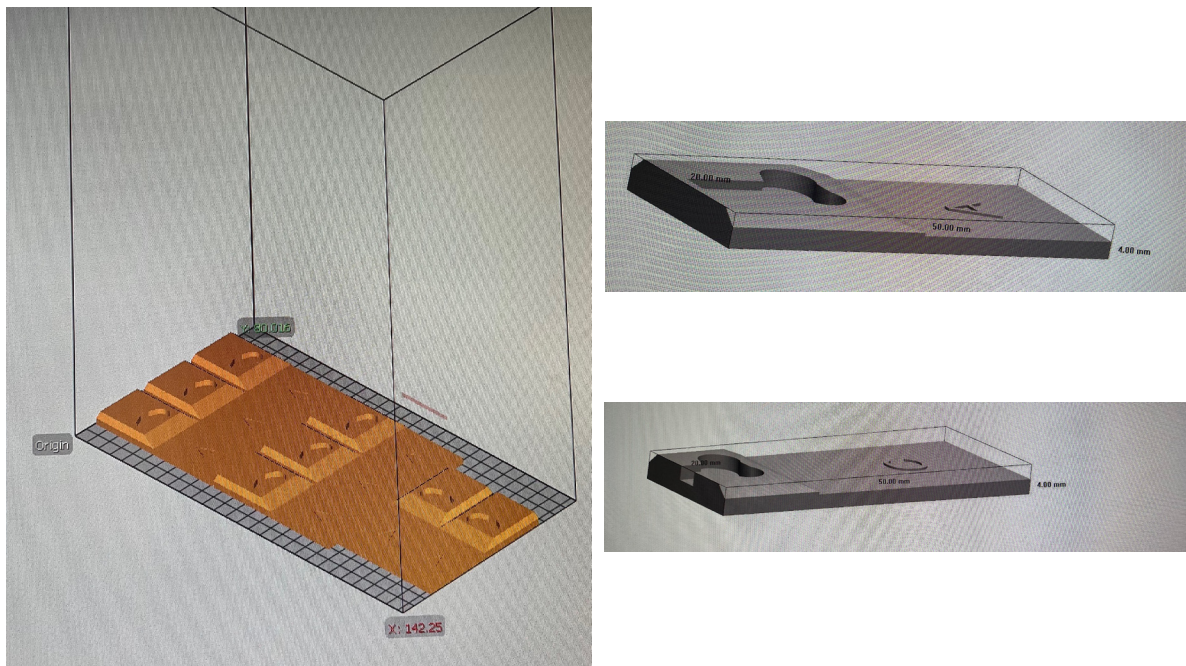


ABBILDUNG 17 – VIRTUELLE DARSTELLUNG

2.4.2. Bearbeitung der Basisplatten

Nach dem Abschluss des 3D-Drucks wurden die einzelnen Werkstücke sorgfältig mit einem Holzspatel von der Druckplattform gelöst. Anschließend wurden die 3D-gedruckten Basisplatten in eine Box mit 99% Isopropanol gelegt, die wiederum in ein Ultraschallbad in der hauseigenen Zahntechnik für etwa 10 Minuten positioniert wurde.

Diese Nachbearbeitung dient dazu, die überschüssige Druckerflüssigkeit, die an den ausgedruckten Werkstücken haften geblieben ist, zu entfernen.

Nach dem Ultraschallbad erfolgte die Trocknung der Werkstücke und die Endhärtung durch eine kontrollierte Polymerisation im Blitzlichtgerät „Otoflash G171“ (von der Firma dentona AG). Dieses Polymerisationsgerät verfügt über einen Schutzgasanschluss, der dazu dient, eine Sauerstoff-Inhibitionsschicht zu verhindern und somit eine klebrige Oberfläche der Werkstücke zu vermeiden. Die Basisplatten wurden in diesem Gerät mit einer Frequenz von 10 Blitzlichtschlägen pro Sekunde ausgehärtet. Der Durchhärtungsprozess fand im Wellenlängenbereich von 280 bis 580 nm statt. Diese Nachbearbeitung gewährleistet eine ausreichende Härtung aller Schichten der 3D-gedruckten Werkstücke und führt zu entsprechend hohen physikalischen Werten (dentona AG, 2023).

Entsprechend den Empfehlungen des Herstellers, wurden beim Lichthärtungsprozess zwei Durchgänge mit jeweils 2000 Lichtblitzen durchgeführt und nach dem ersten Durchgang wurden die Basisplatten einmal umgedreht.

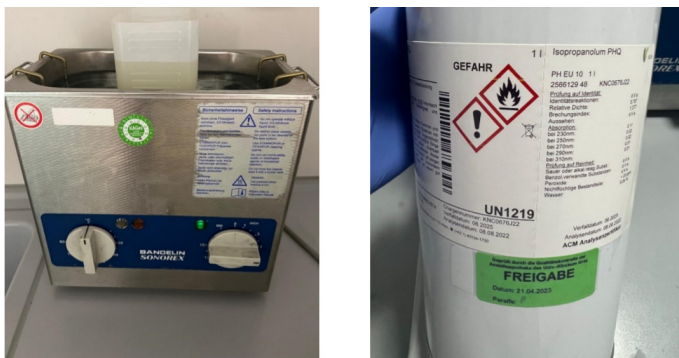


ABBILDUNG 18 - ULTRASCHALLBAD UND ISOPROPANOL

2.4.3. Einpolymerisieren der Einzelhaken

Vor dem Einpolymerisieren der Einzelhaken, erfolgte die Sandstrahlung der insgesamt 40 Einzelhaken für die zwei Gruppen A und C. Anschließend erfolgte das manuelle Einpolymerisieren der insgesamt 80 hautverträglichen Einzelhaken mit dem selbst angerührten „PMMA“ – flüssige und feste Komponente im Verhältnis 1:1. Dieser stammt aus der gleichen Substanzklasse wie der Kunststoff „optiprint 385“ nur bestehend aus anderen Monomeren. Abschließend wurden die 80 Varianten im Druckluftbehälter für 10 Minuten gebadet und daraufhin getrocknet.



ABBILDUNG 19 - EINPOLYMERISIERTE EINZELHAKEN

2.4.4. Belastungstestung

Standardfixierung

Als Kraftüberträger zwischen der Maschine und den Testwerkstücken, wurden universelle Stahlbügel verwendet und im oberen Abschnitt, der von der Maschine in Zug versetzt wird, eingespannt und anschließend mit der Software kalibriert. Hierbei war darauf zu achten, dass sich der obere Abschnitt, daher die Halterung der Stahlbügel und der untere Abschnitt der Maschine für das Fixieren der Basisplatten, in einer Achse befanden, um eine streng vertikale Zugbelastung zu gewährleisten. Diese Testung konnte nur einzeln erfolgen und dauerte ca. eine Minute lang.



ABBILDUNG 20 - STANDARDFIXIERUNG

Universalprüfmaschine „Shimadzu AGS-X“

Für den Testversuch musste zuerst die Schutzkappe geschlossen werden, damit die Prüfmaschine verwendet werden konnte. Diese übte anschließend eine Zugkraft von 1 mm/Min., die bereits im Vorfeld in der Software festgelegt wurde, gleichmäßig aus, bis es zu einem Bruch der Werkstücke kam. Daraufhin wurde dieser Bruch von der Software wahrgenommen, anschließend der Versuch gestoppt und der Messvorgang automatisch beendet. Danach konnte die Schutzkappe wieder geöffnet werden, um einen neuen Einzelhaken mit Basisplatte einspannen zu können. Dieser Testvorgang erfolgte an allen 80 Samples.

Für den Versuch wurden die nachstehenden Parameter in der „Trapezium“ Software festgelegt:

- Testgeschwindigkeit: 1mm/Min.
- Max. Kraftgröße: 1000 cN

Kraftübertragung

Für die Belastungstestung wurden die Werkstücke unter Verwendung der Standardfixierung der Universalprüfmaschine „Shimadzu AGS-X“ mit einer Krafteinwirkung von bis zu 1000g getestet. Sollte aber bis dorthin kein Bruch erfolgt sein, wurde die Zugbelastung weiter erhöht, bis ein Bruch der Werkstücke erfolgte.

3. Datensammlung

3.1. Datenerfassung

Die Testung der einpolymerisierten Einzelhaken wurde beendet, sobald der Einzelhaken so gebogen war, dass der aus der Halterung in der Maschine abrutschte oder die Basisplatte abriss. Die Ergebnisse der Belastungstestung wurden automatisch in der dazugehörigen „Trapezium-Software“ erfasst. Das Hauptziel dieser Studie war die max. Kraft, während die Streckgrenze bei Zugbelastung als Nebenzielgröße betrachtet wurde. Während des Versuchs wurden diese beiden Parameter (max. Kraft in Newton und max. Strecke in Millimeter) dokumentiert. Nachdem jeweils pro Gruppe 20 Einzelhaken, insgesamt 80 Einzelhaken, gemessen wurden, berechnete die Software zudem den Durchschnitt und die Standardabweichung dieser beiden Werte.

Durch die konsequente Anwendung des identischen Testverfahrens wurde bei jedem Durchlauf eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet. Das bedeutet, dass unabhängig von Zeit und Ort stets die vergleichbaren Bedingungen herrschten, was erlaubte, die Messungen gleichbleibend zu wiederholen.

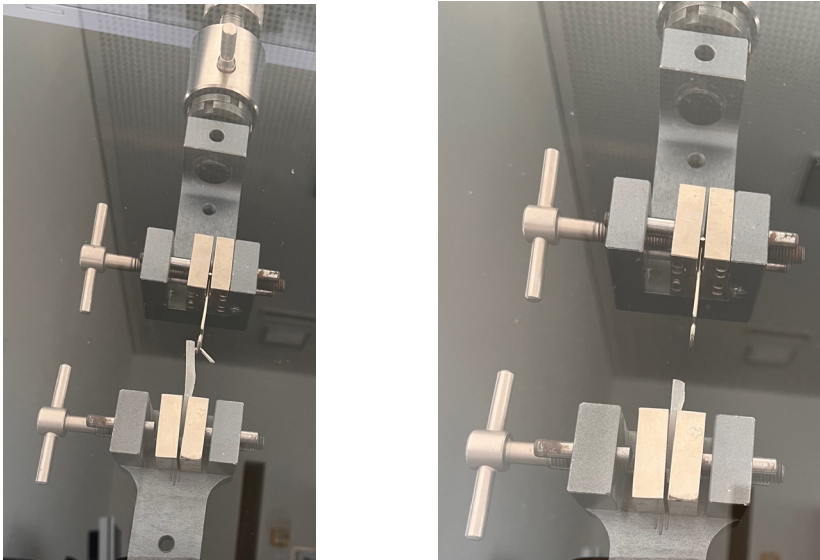


ABBILDUNG 21 - BEISPIEL DER BIEGUNG UND DES BRUCHS

3.2. Datenanalyse

Nach Beendigung der Messungen von insgesamt 80 Einzelhaken standen 176 Datensätze zur Analyse bereit. Zur Vereinfachung der statistischen Analyse wurden die ermittelten Daten von der „Trapezium-Software“ in eine Excel-Tabelle übertragen.

Die Analyse wurde gemäß dem Verfahren der Deskriptiven Statistik durchgeführt, die es ermöglicht, Datensätze zu beschreiben und zu analysieren. Diese Informationen werden durch Diagramme und Tabellen sowie durch die Berechnung unterschiedlicher Kennzahlen wie Mittelwert und Standardabweichung veranschaulicht (*Definition Deskriptive Statistik, n.d.*).

Deskriptive Statistik:					
	N	Min	Max	Mittelwert	Stabw.
Position A nicht sandgestrahlt	20	242,9	370,1	326,1	30,8
Position C nicht sandgestrahlt	20	280,5	352,3	310,7	18,3
Position A sandgestrahlt	20	179,1	397,1	322,7	63,3
Position C sandgestrahlt	20	142,6	313,6	273,0	44,3

Tabelle 7 - Deskriptive Statistik mit Kennzahlen der Testung

Die Datenanalyse und der Vergleich der vier Gruppen erfolgte mithilfe einer Einfaktoriellen Varianzanalyse. Die Testung erzielte mit einem p-Wert unter 0,05 einen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Designtypen.

3.3. Messwerte

3.3.1. Einzelhaken Position A – nicht sandgestrahlt

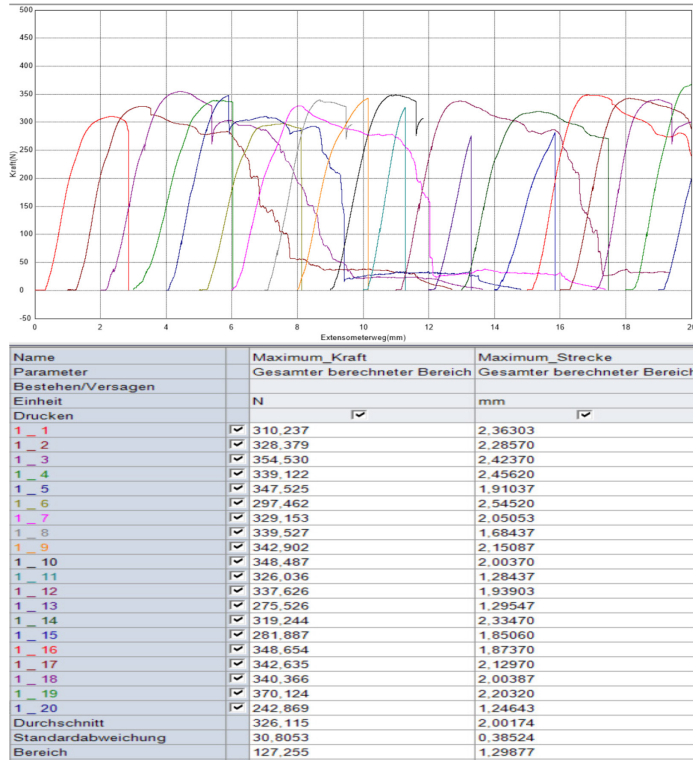


ABBILDUNG 22 - WERTEVERLAUF DER EINZELHAKEN POSITION A – NICHT SANDGESTRAHLT

Auf der linken Seite befindet sich die Nummerierung der Basisplatten A mit nicht sandgestrahlten, einpolymerisierten Einzelhaken von 1-20.

Weiters wird die Kraft in N und die Streckengrenze in mm angezeigt.

Bei der maximalen Kraft ergibt sich bei den 20 nicht sandgestrahlten Einzelhaken ein Mittelwert von 326,115 N. Im Vergleich zu den anderen Designs weist Modell A – nicht sandgestrahlt den höchsten Wert auf. Die Standardabweichung liegt bei 30,8053 N und lässt sich von den anderen drei Modellen unterscheiden. Generell lässt sich sagen, dass sie sich bei allen vier Modellen unterscheidet. Auch die Spannweite der Messergebnisse unterscheidet sich bei allen vier Modellen und beträgt bei diesem Modell 127,255 N.

Der Mittelwert der Streckengrenze beträgt 2,00174 mm, während die Standardabweichung 0,38524 mm beträgt und somit geringer ist als bei den anderen drei Modellen. Die 20 festgestellten Streckengrenzen bewegen sich innerhalb eines Bereichs von 1,29877 mm.

Im Verlauf der Werte lässt sich erkennen, dass die Messergebnisse konstant geblieben sind, was darauf hinweist, dass äußere Einflüsse die Messung nicht beeinflusst haben. Daher war der Versuchsaufbau erfolgreich.

3.3.2. Einzelhaken Position C – nicht sandgestrahlt

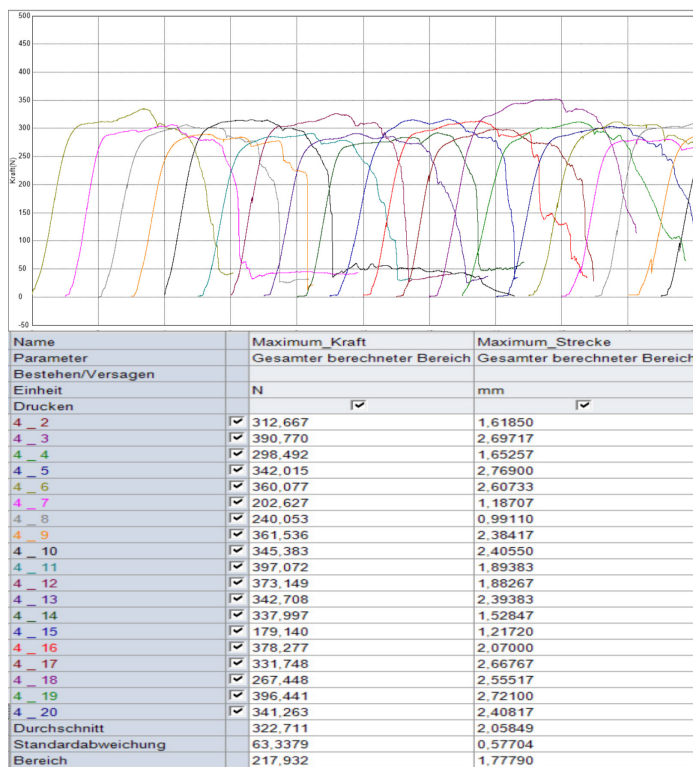


ABBILDUNG 23 - WERTEVERLAUF DER EINZELHAKEN POSITION C – NICHT SANDGESTRAHLT

Auf der linken Seite befindet sich die Nummerierung der Basisplatten C mit nicht sandgestrahlten, einpolymerisierten Einzelhaken von 1-20.

Weiters wird die Kraft in N und die Streckengrenze in mm angezeigt.

Der Mittelwert der maximalen Kraft ergibt sich bei den 20 nicht sandgestrahlten Einzelhaken ein Mittelwert von 310,709 N und eine Standardabweichung von 18,3058 N. Die Spannweite der Messergebnisse beträgt 71,8150 N.

Bei der gegebenen Streckengrenze beträgt der Mittelwert 3,22842 mm und die Standardabweichung 0,51180 mm.

Diese Werte befinden sich in einem Bereich von 1,94500 mm.

Der Werteverlauf zeigt bei allen 20 Messungen konstante Messergebnisse.

3.3.3. Einzelhaken Position A – sandgestrahlt

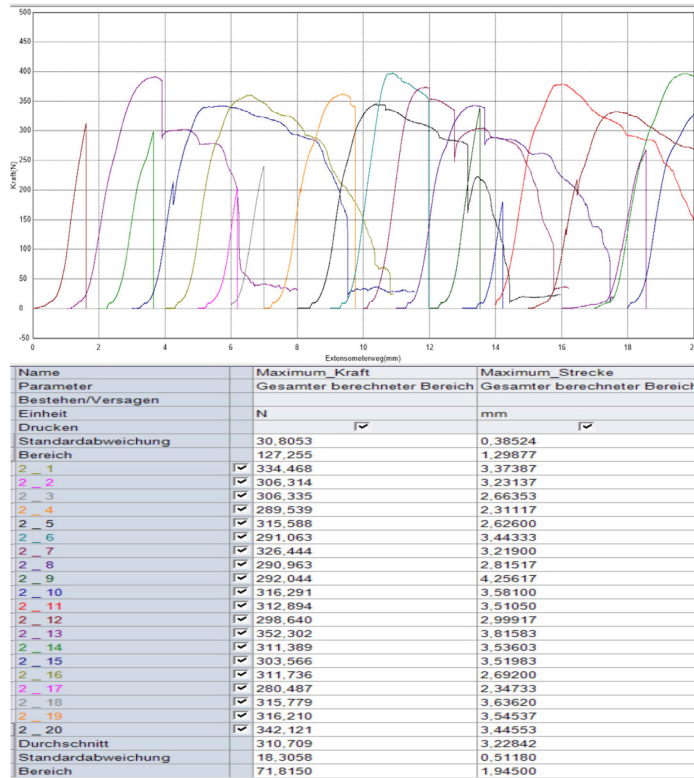


ABBILDUNG 24 - WERTEVERLAUF DER EINZELHAKEN POSITION A – SANDGESTRAHLT

Auf der linken Seite befindet sich die Nummerierung der Basisplatten A mit sandgestrahlten, einpolymerisierten Einzelhaken von 1-20.

Weiters wird die Kraft in N und die Streckengrenze in mm angezeigt.

Der Mittelwert der maximalen Kraft beim Modell A – sandgestrahlt liegt bei 322,711 N und zeigt eine Standardabweichung von 63,3379 N. Die Messwerte liegen im Bereich von 217,932 N.

Die Streckgrenze weist einen Wert von 2,05849 mm auf und die Standardabweichung beträgt 0,57704 mm. Diese Messwerte weisen eine Spannweite von 1,77790 mm auf.

Wie auch bei den anderen drei Modellen, zeigt der Werteverlauf konstante Messergebnisse.

3.3.4. Einzelhaken Position C – sandgestrahlt

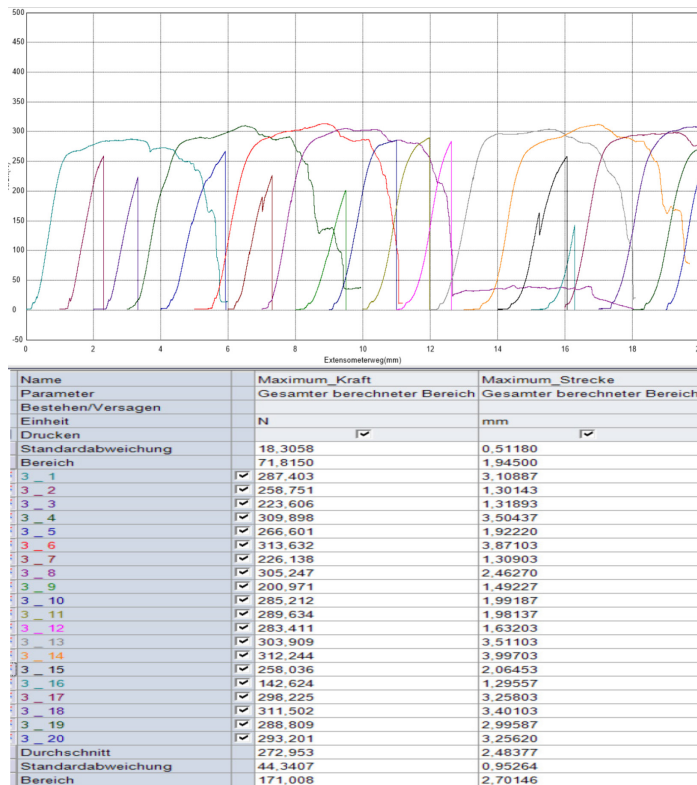


ABBILDUNG 25 - WERTEVERLAUF DER EINZELHAKEN POSITION C – SANDGESTRAHLT

Auf der linken Seite befindet sich die Nummerierung der Basisplatten C mit sandgestrahlten, einpolymerisierten Einzelhaken von 1-20.

Weiters wird die Kraft in N und die Streckengrenze in mm angezeigt.

Beim Modell C – sandgestrahlt beträgt der Mittelwert der maximalen Kraft 272,953 N und erzielt im Vergleich zu den anderen drei Modellen den geringsten Wert. Jedoch die Standardabweichung mit 44,3407 N weist einen höheren Wert auf, annähernd zum Modell A – sandgestrahlt. Die Messwerte befinden sich im Bereich von 171,008 N.

Die erreichte Streckengrenze beträgt 2,48377 mm und die Standardabweichung 0,95264 mm.

Die Werte der 20 festgestellten Streckengrenzen befinden sich in einem Bereich von 2,70146 mm.

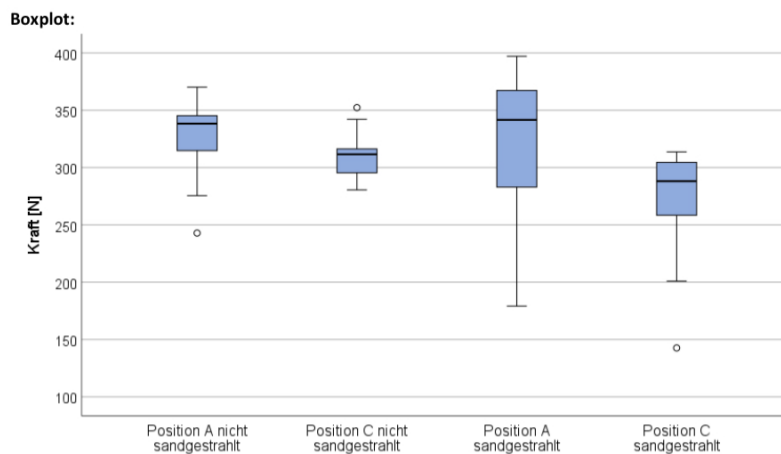
Auch hier zeigt der Werteverlauf bei allen 20 Messungen konstante Messergebnisse.

4. Ergebnisse

Das Boxplot-Diagramm illustriert die Testergebnisse der vier verschiedenen Designs der Einzelhaken.

Auf der X-Achse sind die folgenden Einzelhaken dargestellt:

- Position A – nicht sandgestrahlt
- Position C – nicht sandgestrahlt
- Position A – sandgestrahlt
- Position C – sandgestrahlt



Man erkennt im Boxplot bereits, dass die Position C immer etwas niedriger ist.

ABBILDUNG 26 - DARSTELLUNG ALLER POSITIONEN IN EINEM BOXPLOT

Statischer Vergleich, aller 4 Typen miteinander

Zur Gegenüberstellung der 4 Typen wurde eine *Einfaktorielle Varianzanalyse* durchgeführt. Der Test ergab, dass sich alle 4 Gruppen mehr oder weniger signifikant voneinander unterscheiden:

	Position C nicht sandgestrahlt	Position A sandgestrahlt	Position C sandgestrahlt
Position A nicht sandgestrahlt	p = 0,664	p = 0,994	p < 0,001
Position C nicht sandgestrahlt		p = 0,810	p = 0,032
Position A sandgestrahlt			p = 0,002

ABBILDUNG 27 - ERGEBNISSE DER PAARE

In der Tabelle sind die signifikanten Ergebnisse eines paarweisen Vergleichs angeführt. Je kleiner der p-Wert ist, desto größer ist der Unterschied zwischen den Gruppen. Liegt der p-Wert unter 5% ($< 0,005$), spricht man von einem signifikanten Unterschied.

Statischer Vergleich, paarweise

Es ist auch möglich, die Positionen „sandgestrahlt“ und „nicht sandgestrahlt“ untereinander zu vergleichen. Ebenso können die Positionen innerhalb der Sandbestrahlung verglichen werden. Dazu wird jeweils ein *t-Test für unabhängige Stichproben* gerechnet:

	nicht sandgestrahlt vs. sandgestrahlt
Position A	p = 0,830
Position C	p = 0,001

ABBILDUNG 28 - VERGLEICH NICHT SANDGESTRAHLT MIT SANDGESTRAHLT

Bei *Position C* hat „sandgestrahlt“ einen signifikant niedrigeren Wert als „nicht sandgestrahlt“.

	Position A vs. Position C
nicht sandgestrahlt	p = 0,062
sandgestrahlt	p = 0,007

ABBILDUNG 29 - VERGLEICH POSITION A MIT POSITION C

Bei *Position C* hat „sandgestrahlt“ einen signifikant niedrigeren Wert als *Position A*.

4.1. Ergebnisse der Einzelhaken Position A – nicht sandgestrahlt

Alle Werte liegen im Bereich 242,9 N bis 370,1 N. Der Mittelwert liegt bei 326,1 N. Das lässt darauf schließen, dass die Leistung nicht so außergewöhnlich ist wie bei Position A – sandgestrahlt, jedoch ähnlich wie bei Position C – sandgestrahlt und in jedem Fall besser als bei Position C – nicht sandgestrahlt.

Die Standardabweichung liegt bei 30,8 N und lässt sich von den anderen drei Modellen unterscheiden. Die Verteilung der Werte weist Ungleichmäßigkeiten auf, da der Median im oberen Bereich der Box befindet. Weiters wurden Ausreißer unterhalb des kleinsten Wertes, an der unteren Ausreißergrenze, festgestellt.

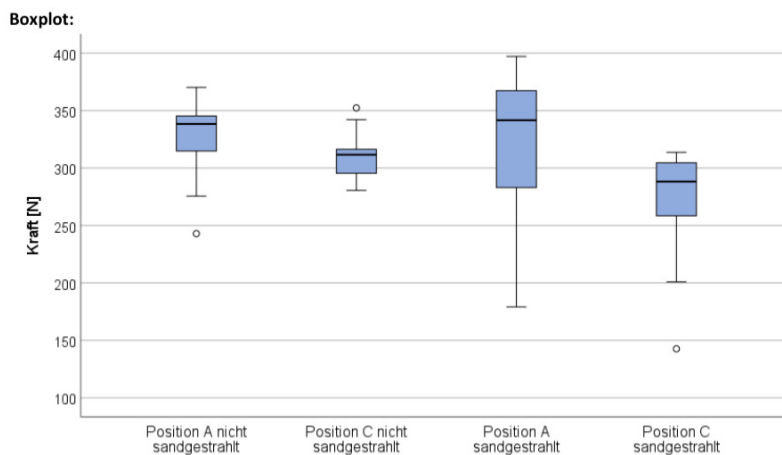


ABBILDUNG 30 - DARSTELLUNG ALLER WERTE IM BOXPLOT

4.2. Ergebnisse der Einzelhaken Position C – nicht sandgestrahlt

Bei der Position C – nicht sandgestrahlt liegen alle Werte im Bereich 280,5 N bis 352,3 N. Der Mittelwert liegt bei 310,7 N und die Standardabweichung bei 18,3 N. Die Leistung ist hierbei am geringsten, sowie sind die Werte auch hier ungleichmäßig verteilt, da sich der Median in der oberen Hälfte der Box befindet, ähnlich der Position A – nicht sandgestrahlt. Hierbei sind keine Ausreißer feststellbar.

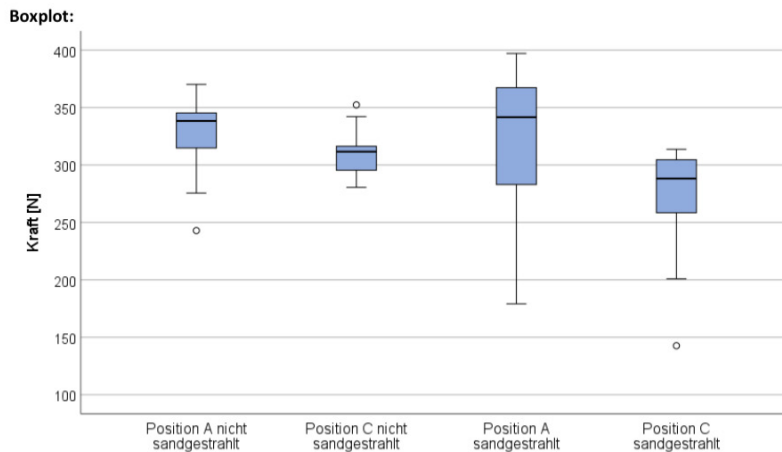


ABBILDUNG 31 - DARSTELLUNG ALLER WERTE IM BOXPLOT

4.3. Ergebnisse der Einzelhaken Position A – sandgestrahlt

Bei der letzten Position liegen alle Werte im Bereich 179,1 N bis 397,1 N. Hierbei liegt der Mittelwert bei 322,7 N und die Standardabweichung bei 63,3 N. Die Leistung liegt zwischen der Position A – nicht sandgestrahlt und Position A – sandgestrahlt, wobei auch hier der Median etwas weiter unten in der Box liegt als bei Position A – nicht sandgestrahlt und sich der Position A – sandgestrahlt annähert.

Außerdem sind die Werte, wie auch bei den anderen drei Positionen, ungleichmäßig verteilt und genauso sind Ausreißer, wie bei Position A – nicht sandgestrahlt an der unteren Ausreißergrenze, feststellbar.

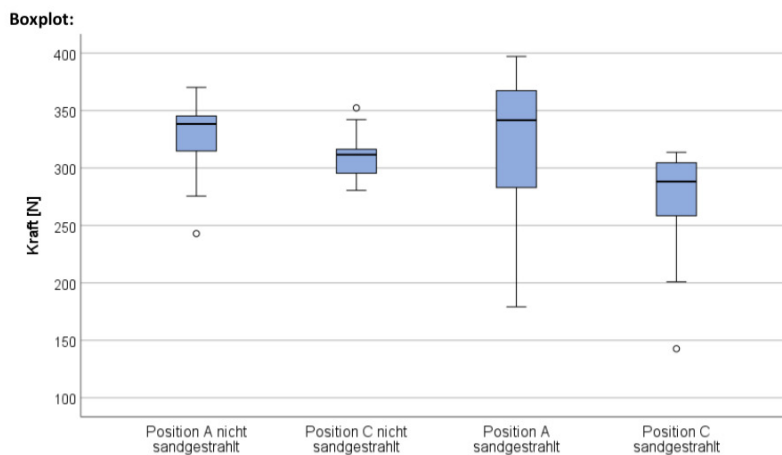


ABBILDUNG 32 - DARSTELLUNG ALLER WERTE IM BOXPLOT

4.4. Ergebnisse der Einzelhaken Position C – sandgestrahlt

Bei dieser Position liegen alle Werte im Bereich 142,6 N bis 313,6 N. Der Mittelwert liegt bei 273,0 N und erzielt im Vergleich zu den anderen drei Modellen den geringsten Wert. Die Standardabweichung liegt bei 44,3 N. Hierbei ist die Leistung, im Vergleich zu den drei anderen Positionen, herausragend, wobei sich auch hier der Median relativ oberhalb der Box befindet und genauso wie bei allen anderen eine unsymmetrische Verteilung der Werte ersichtlich ist. Auch hier wurden Ausreißer festgestellt, jedoch unterhalb des kleinsten Wertes an der unteren Ausreißergrenze.

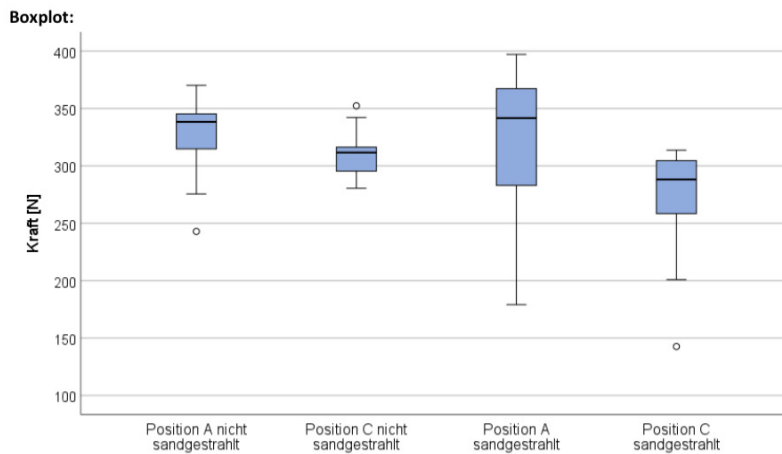


ABBILDUNG 33 - DARSTELLUNG ALLER WERTE IM BOXPLOT

4.5. Bruchstellen der Einzelhaken in der Basisplatte

Bei den Testversuchen traten Verformungen an den Einzelhaken und Bruchstellen an den Basisplatten auf.

In allen vier Gruppen zeigten sich vergleichbare Verformungen, sowohl bei den sandgestrahlten als auch bei den nicht sandgestrahlten Proben der Gruppen A und C.

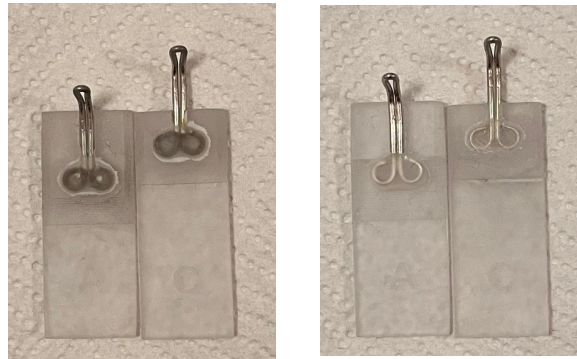


ABBILDUNG 34 - DARSTELLUNG DER VERFORMTEN EINZELHAKEN

Die Bruchstellen aller vier Samples zeigten ebenfalls ähnliche Merkmale. Der Bruch trat an ähnlichen Stellen am Übergang zwischen der Vertiefung der einpolymerisierten Einzelhakenkörper und der Basisplatte auf.

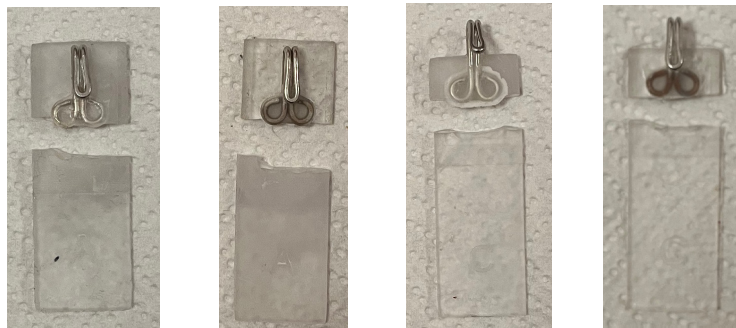


ABBILDUNG 35 - DARSTELLUNG DER GEBROCHENEN BASISPLATTEN

In einzelnen Fällen trat eine Verformung und ein Bruch oberhalb der Einpolymerisierung auf.

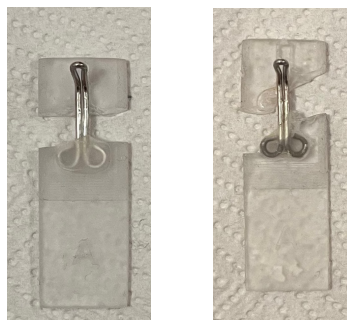


ABBILDUNG 36 - DARSTELLUNG DER VERFORMTEN EINZELHAKEN UND GEBROCHENEN BASISPLATTEN

5. Diskussion

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigte sich mit der Belastbarkeit von vier unterschiedlichen 3D-gedruckten Einzelhaken-Designs:

- Position A – nicht sandgestrahlt
- Position C – nicht sandgestrahlt
- Position A – sandgestrahlt
- Position C – sandgestrahlt

gegenüber einer max. Belastung von 1000g (14,71 N).

Es ist wichtig zu betonen, dass die gewählte Kraftgröße von 1000g deutlich über der klinisch angewendeten Höchstkraft liegt. Die Ergebnisse bieten wertvolle Einblicke in die Leistungsfähigkeit dieser Designs.

Die In-vitro-Studie zeigt, dass alle vier Designvarianten in der Lage sind, der Zugbelastung von 1000g standzuhalten, sodass unsere Erwartungen erfüllt wurden.

Da die Ergebnisse nach den einzelnen Designvarianten strukturiert sind, bietet es sich an, die Diskussion ebenfalls entsprechend diesen Varianten zu gliedern.

Einzelhaken der Position A + C – nicht sandgestrahlt

Beide Positionen zeigen mit ihren Ergebnissen im Vergleich zu den Positionen A + C – sandgestrahlt eine reduzierte Belastbarkeit.

Diese Divergenz weist darauf hin, dass die beiden Positionen A + C – nicht sandgestrahlt zwar eine überdurchschnittliche Leistung besitzen, jedoch nicht so stabile Ergebnisse aufweisen wie die beiden Positionen der sandgestrahlten Einzelhaken. Ersichtlich an den Standardabweichungen, bei der Position A mit 30,8 N und bei der Position C mit 18,3 N.

Zusätzlich wurden bei beiden Designs Ausreißer festgestellt.

Die Position A – nicht sandgestrahlt weist eine höhere Belastbarkeit auf als die der Position C – nicht sandgestrahlt. Die Werte weisen Ungleichmäßigkeiten auf, dies ist über den Median ersichtlich, welcher sich im oberen Bereich der Box befindet. Weiters wurden Ausreißer unterhalb des kleinsten Wertes, an der unteren Ausreißergrenze, festgestellt.

Dieses Design deutet zwar nicht auf so eine gute Leistung hin wie das Design der Position A – sandgestrahlt, jedoch ermöglicht es eine Einfachheit der Vorbereitungsmaßnahmen von den Einzelhaken, da es nicht sandgestrahlt werden muss. Somit wäre im Verhältnis von Leistung und Vorbereitung dieses Design eine gute Alternative.

Von den 20 Samples zeigen sich insgesamt 12 Brüche an den Basisplatten, davon 4 oberhalb und 8 unterhalb der Einkerbung für die einpolymerisierten Einzelhaken und 8 verformte Einzelhaken.

Das Design der Position C – nicht sandgestrahlt weist die niedrigste Belastbarkeit aller Samples auf. Zusätzlich zeigten sich Ausreißer oberhalb des Maximums sowie einen naheliegenden Median. Diese Information lässt allgemein darauf zurückschließen, dass das Design C nicht so eine gute Leistung aufzeigt wie das Design A.

Bei diesem Modell verformten sich 19 Einzelhaken und es tritt nur ein Bruch unterhalb der einpolymerisierten Position an der Basisplatte auf.

Einzelhaken der Position A – sandgestrahlt

Das Design der sandgestrahlten Einzelhaken an der Position A weist die höchste Belastbarkeit im Vergleich zu allen anderen Designs auf. Weiters zeigt es keine Ausreißer, was auf eine kontinuierliche Leistung hinweist.

Bei diesem Testversuch treten insgesamt 14 Brüche an der Platte auf, davon 4 oberhalb und 10 unterhalb des einpolymerisierten Bereichs, jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Brüche nur unter enormen Belastungen eintreffen könnten. In Bezug auf die Verformung zeigen sich 6 gebogen Einzelhaken, die auf die höchste Belastbarkeit von allen Modellen hinweist, ersichtlich an der Standardabweichung 63,3 N.

Diese Information weist auf eine verlässliche Leistungsstärke hin. Zudem deuten die Daten an, dass dieses Design besonders gut geeignet ist, Belastungen von kieferorthopädischen Gerätschaften zu bewältigen.

Einzelhaken Position C – sandgestrahlt

Der Einzelhaken der Position C – sandgestrahlt zeigt zwar eine niedrige Widerstandsfähigkeit auf jedoch eine etwas robustere Leistung als bei der Position C – nicht sandgestrahlt. Der Median liegt etwas über den mittleren 50% der Box und zusätzlich zeigen sich Ausreißer unterhalb der Ausreißergrenze, ähnlich wie bei dem Modell A – nicht sandgestrahlt.

Hierbei zeigen sich 11 Samples mit Brüchen an der Basisplatte, davon 1 Bruch oberhalb und 10 unterhalb der einpolymerisierten Stelle sowie 9 Verformungen an den Einzelhaken.

Generell unterstreichen diese zusätzlichen Erkenntnisse die Komplexität der Auswahl und Vorbereitung von kieferorthopädischen Einzelhaken. Es ist wichtig, neben der Belastbarkeit auch die Schwachstellenanalyse und Handling zu berücksichtigen. Diese Studie liefert Informationen für die Auswahl und Vorbereitungsmaßnahmen von kieferorthopädischen Einzelhaken und Basisplatten, um daraus Vorschläge zur Verbesserung des Designs herzuleiten.

Für hohe Belastungen und damit verbundenen Leistung wäre das Design **Einzelhaken der Position A – sandgestrahlt** zu bevorzugen. Wenn die Einfachheit der Vorbereitungsmaßnahmen von den Einzelhaken im Vordergrund steht wäre das Design **Einzelhaken der Position A – nicht sandgestrahlt** zu bevorzugen.

6. Fazit

Die Designvarianten der Positionen A und C, sowohl sandgestrahlt als auch nicht sandgestrahlt, haben der verlangten Kraft von 1000g standgehalten.

Das Einzelhakendesign der Position A – sandgestrahlt wies die höchste Belastbarkeit auf und gewährleistete eine starke Leistung, aufgrund von sehr wenigen verformten Einzelhaken und keinen Ausreißen. Durch die positiven Ergebnisse der Testung wäre dieses Design für die Belastung von kieferorthopädischen Gerätschaften bei Patienten/Patientinnen mit Fehlbildungen gut geeignet.

Das Einzelhakendesign der Position C – nicht sandgestrahlt wies die niedrigste Belastbarkeit gegenüber der Zugbelastungseinwirkung auf. Hierbei traten 19 Verbiegungen der Einzelhaken und nur 1 Bruchstelle an der Basisplatte auf.

Aufgrund der vertikalen Zugbelastung bei der Belastungstestung in der Diplomarbeit sowie in den Vorstudien, wäre es von Interesse für zukünftige Studien die Position der eingespannten Basisplatten in der Universalprüfmaschine „Shimadzu AGS-X“ mit entsprechend angepasster Achse des Kraftüberträgers, zu ändern.

Weiters wäre es sinnvoll, in Folgestudien die Basisplatten in unterschiedlichen Druckrichtungen herzustellen, da diese Einfluss auf das Verhalten im Rahmen von Zugbelastungen haben.

Literaturverzeichnis

- A. Ravve. (n.d.). *Light-Associated Reactions of Synthetic Polymers*.
- Amsler & Frey AG. (2022). PMMA GS. Acrylglas, gegossen. *Technisches Datenblatt*.
- Andrea Wichelhaus. (2012). *Kieferorthopädie - Therapie Band 1: Grundlegende Behandlungskonzepte*.
- Anshuman Shrivastava. (2018). *Introduction to Plastics Engineering*.
- Bärbel Kahl-Nieke. (2009). *Einführung in die Kieferorthopädie: Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie*.
- Definition Deskriptive Statistik*. (n.d.).
- dentona AG. (2021). [https://dentona.de/media/pdf/17/0d/3e/2021-09_8-Seiter-3D-](https://dentona.de/media/pdf/17/0d/3e/2021-09_8-Seiter-3D-dentona)
- dentona AG. (2023). *Gebrauchsanweisung optiprint 385*.
https://dentona.de/media/12/66/38/1710518923/2023-03_IFU_optiprint_3D-resins-I_nMD-DE-EN-FR-NL-ES-IT_625x297.pdf
- Domininghaus, H. (2012). *Kunststoffe* (P. Elsner, P. Eyerer, & T. Hirth, Eds.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16173-5>
- Droschl. (1990). *Skriptum Kieferorthopädie*.
- Eisen- und Nichteisenmetalle*. (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://haertha.de/glossar/eisen-und-nichteisenmetalle/>
- Elsa Reichmanis, J. C. (2014). *Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies*.
- Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie*. (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://www.krv.de/wissen/klassifizierung-der-kunststoffe-nach-ihrer-makromolekulstruktur-und-ordnungszustand>
- Franz Günter Sander, N. S. M. E. M. O. A. H.-P. B. (2011). *Kieferorthopädie*.
- Gerald D. Hart. (1971). The Habsburg jaw. *Canadian Medical Association Journal*, 601–603.

- Handbook of Non-Ferrous Metal Powders.* (2019). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/C2014-0-03938-X>
- J. Evers. (2010, April). *Stoffwandlungssysteme 5. Nichteisenmetalle Schwer- und Leichtmetalle.*
<https://www.slideserve.com/kalani/vorlesung-stoffwandlungssysteme-5-nichteisenmetalle-schwer-und-leichtmetalle>
- Jakob Wirz. (1993). *Klinische Material- und Werkstoffkunde.*
- Jean Pierre Fouassier. (n.d.). *Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity and Efficiency.*
- Joseph R. Davis. (1998). *Metals Handbook.*
- K.Körper, K. L. (1982). *Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie.*
- Lee W. Graber, K. W. L. V. G. J. H. P. S. F. (2022). *Orthodontics: Current Principles and Techniques.*
- Matthew Hart. (2014). *Gold: The Race for the World's Most Seductive Metal .*
- MMA und PMMA.* (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from https://de.123rf.com/photo_151023647_methylmethacrylat-mma-und-poly-methylmethacrylat-pmma-molekül-methylmethacrylat-ist-ein-monomer.html
- Nichteisenmetalle.* (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://evек.de/svetnie-metali.html>
- ÖGUSSA – Die Welt der Edelmetalle.* (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://www.oegussa.at/de/unternehmen/die-welt-der-edelmetalle>
- Peter Schopf. (2008). *Curriculum Kieferorthopädie: Band 2: Werkstoffe. Festsitzende Apparaturen. Kieferorthopädische Therapie. Interdisziplinäre Aspekte. Anhang: Kieferorthopädische Abrechnung.*
- prym.com.* (n.d.).
- R. J. Crawford. (1998). *Plastics Engineering .*
- Rauch Puntigam, T. V. (1967). *Acryl- und Methacrylverbindungen.*

- Roger Phillips. (1984). *Photopolymerization*. [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(84\)85016-9](https://doi.org/10.1016/0047-2670(84)85016-9)
- Shimadzu Deutschland GmbH. (n.d.). Retrieved December 25, 2024, from <https://www.shimadzu.de/products/materials-testing/unittm/autograph-ags-x-series/index.html>
- Tiger Dental GmbH. (2024). <https://tigerdental.com/shop/>
- Ulrich Heubner, W. (2014). *Merkblatt 821 Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften*.
- Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit. (n.d.). Retrieved February 19, 2025, from <https://www.uniklinikumgraz.at/zahnmedizin>
- Vannessa Goodship. (n.d.). *Polymethylmethacrylate Handbook: Technology, Manufacturing and Applications*.
- Wichelhaus, A. (Ed.). (2012). Frühbehandlung der Klasse III. In *Kieferorthopädie – Therapie Band 1*. Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-0034-18406>
- Wichtiger Industriewerkstoff: Eisenmetalle im Fokus. (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from <https://www.alba.info/geschaeftsfelder/rohstoffhandel/eisenmetalle/>
- William D. Callister Jr., D. G. R. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction*.
- William R. Proffit Henry W. Fields Jr. Brent Larson David M. Sarver. (2018). *Contemporary Orthodontics*.