

**Biomechanische Eigenschaften des Parodonts bei
erfolgreich behandelten, stabilen Parodontitis
Patient*Innen**

**klinische und experimentelle
Untersuchungen**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Isabelle Johanna Susanne Diedenhofen

aus Mainz

2025

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachterin: PD Dr. Pia-Merete Jervøe-Storm
2. Gutachter: Prof. Dr. Helmut Stark

Tag der Mündlichen Prüfung: 24.03.2025

Aus der Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde des
Zentrums für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	9
1. Einleitung	10
1.1 Parodontale Anatomie	10
1.2 Aufgaben des Parodonts	15
1.3 Parodontale Erkrankungen	16
1.3.1 Ätiologie und Pathogenese parodontaler Erkrankungen	16
1.3.2 Klassifikationen der Parodontitis	18
1.3.2.1 Staging und Grading	19
1.4 Therapie parodontaler Erkrankungen	24
1.4.1 Therapiestufen der Parodontitis Therapie Stadium I-III	26
1.5 Biomechanik der Zähne	28
1.6 Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI)	31
1.7 Fragestellung und Zielsetzung der Studie	32
2. Material und Methoden	33
2.1 Studien Design	33
2.1.1 Aufnahme der Patient*Innen	34
2.1.2 Aufnahme der biomechanischen Eigenschaften	37
2.2 Kollektiv der Proband*Innen	37
2.3 Klinische Untersuchung	38
2.3.1 Messungen der parodontalen Parameter	38

2.3.2	Parodontologische Diagnose	39
2.3.3	Röntgenologische Analyse	40
2.4	Messprotokolle	41
2.5	Messung der biomechanische Parameter	42
2.6	Herstellung der Modelle und der individuellen Testschienen	43
2.7	Intraorales Belastungsgerät	49
2.7.1	Aufbau und Funktion der Belastungseinheit	50
2.7.2	Aufbau und Funktion der Steuereinheit	51
2.8	Statistische Analysen	55
3.	Ergebnisse	56
3.1	Patient*Innen Klientel	56
3.1.1	Allgemeine Beschreibung	56
3.1.2	Parodontologischen Daten	57
3.2	In-vivo Messungen	58
3.2.1	Messzeit 0,5 Sekunden	59
3.2.1.1	Alle, Messzeit 0,5 Sekunden	60
3.2.1.2	Weibliche Probandinnen, Messzeit 0,5 Sekunden	61
3.2.1.3	Männliche Probanden, Messzeit 0,5 Sekunden	62
3.2.2	Messzeit 1 Sekunde	64
3.2.2.1	Alle, Messzeit 1 Sekunde	64
3.2.2.2	Weibliche Probandinnen, Messzeit 1 Sekunde	66

3.2.2.3	Männliche Probanden, Messzeit 1 Sekunde	67
3.2.3	Messzeit 10 Sekunden	68
3.2.3.1	Alle, Messzeit 10 Sekunden	68
3.2.3.2	Weibliche Probandinnen, Messzeit 10 Sekunden	69
3.2.3.3	Männliche Probanden, Messzeit 10 Sekunden	70
3.2.4	Beschreibung besondere Fälle	71
3.2.4.1	Messung 0,5 Sekunden	71
3.2.4.2	Messung 1 Sekunde	72
3.2.4.3	Messung 10 Sekunden	72
3.2.5	Vergleich der Mittelwerte	72
3.2.6	Prüfung der Nullhypothesen	73
3.3	Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI)	74
4.	Diskussion	83
4.1	Hauptergebnisse	83
4.2	Vergleiche mit der Literatur	84
4.2.1	Biomechanische Aspekte	84
4.2.2	Parodontale Aspekte	85
4.2.3	Elastizitätsmodul des Parodontalen Ligaments (PDL) mit Hinblick auf u.a. Zeit, Alter, Geschlecht und Zahnanatomie	86
4.3	Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI)	90
4.4	Methodische Kritiken der Studie oder Diskussion des Studiendesigns	93
4.4.1	Untersuchungsmethode	93

4.4.2	Proband*Innenauswahl	94
4.4.3	Befunderhebung	95
4.5	Vertrauen in die Ergebnisse	95
4.6	Ausblick	96
5.	Zusammenfassung	97
6.	Abbildungsverzeichnis	99
7.	Tabellenverzeichnis	101
8.	Literaturverzeichnis	102
9.	Danksagung	110

Abkürzungsverzeichnis

PDL	Parodontales Ligament
CAL	clinical attachment loss, klinischer Attachmentverlust
AAP	American Academy of Periodontology
EFP	European Federation of Periodontology
TST	Taschensondierungstiefen
RBL	radiographic bone loss, röntgenologischer Knochenverlust
HbA1c	Glykiertes Hämoglobin
UPT	Unterstützende Parodontitistherapie
BOP	Bleeding on Probing, Blutung auf Sondierung
PMPR	Professional mechanical plaque removal, Professionelle mechanische Plaqueentfernung
SPC	Supportive periodontal care
GOHAI	Geriatric/General oral health assessment Index
ADD-GOHAI	Additiver GOHAI
SC-GOHAI	Einfacher Zählwert GOHAI
PETG	Polyethylenterephthalat
TPU	Thermoplastische Polyurethane
IOBG	Intraorales Belastungsgerät
MW	Mittelwert
SD	Standardabweichung
Fmax	Maximalkraft
Inv.	Invertiert
PII	Plaqueindex nach O'Leary
Fmax	Maximal benötigte Kraft für die maximale Auslenkung des Zahnes

1. Einleitung

1.1 Parodontale Anatomie

Das Wort „Parodont“ kommt aus dem griechischen und setzt sich aus den Teilen „Para“ (um herum, bei, neben, entlang) und „odus“ (Zahn) zusammen.

Es beschreibt den Teil, der den Zahn umgibt, das sogenannte Zahnbett, welches ein funktionelles System darstellt. Es besteht aus den beiden Weichgeweben, der Gingiva und dem Desmodont (auch Parodontales Ligament, PDL), und den Hartgeweben, dem Wurzelzement und dem Alveolarknochen (Hellwig et al., 2013) (Müller, 2012).

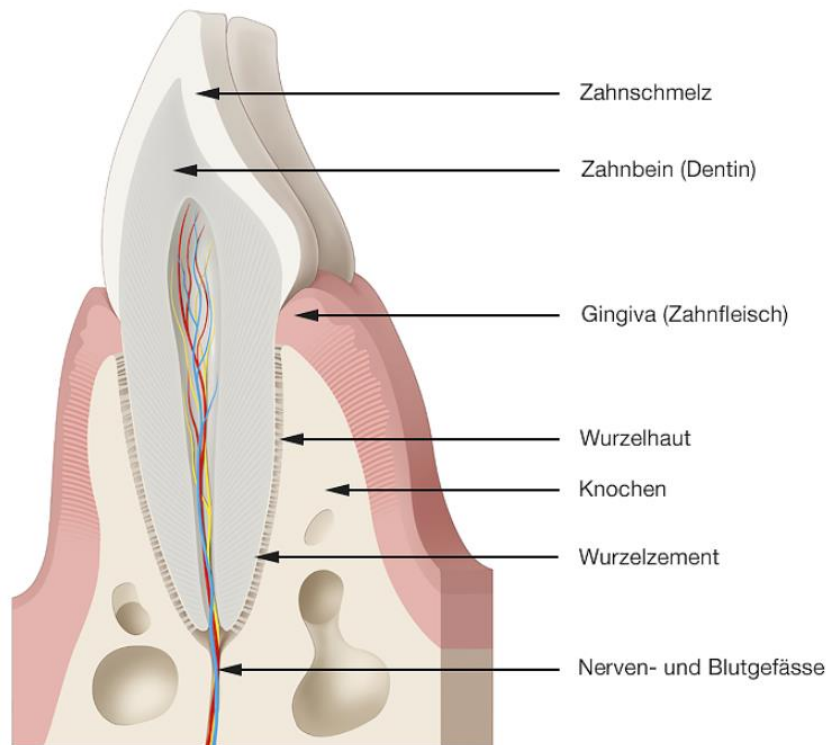


Abb. 1: Schematische Darstellung des anatomischen Aufbaus von Zahn und Parodont. Gliederung des Parodonts in Gingiva, Alveolarknochen, Wurzelzement und Wurzelhaut (parodontales Ligament), welche den Zahn über den Wurzelzement mit dem Alveolarknochen beweglich verankert (Quelle: Mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Gesellschaft für Parodontologie e.V. <https://dgparo.de/gesund-im-mund/parodontitis/>)

Abbildung 1 zeigt schematisch die anatomischen und parodontalen Strukturen des Zahnes. Die Gingiva, welche neben der Schleimhaut des harten Gaumens zu der keratinisierten mastikatorischen Mukosa gehört, umgibt die Zähne und den Alveolarknochen und reicht bis zur mukogingivalen Grenze. Die gesunde Gingiva ist blassrosa, korallen oder malvenfarben (Ausnahme bilden eine dunklere Verfärbung der Gingiva aufgrund Melanozyten bei südeuropäischen, afrikanischen und asiatischen Populationen) und zeigt eine typische Girlandenform, welche interdental zur Ausbildung von Papillen führt. Typisch ist zudem eine Stippelung, die durch zapfenartig einstrahlende Bindegewebsfortsätze der Lamina propia im Bereich der befestigten Gingiva entsteht. Die freie Gingiva überlappt die Schmelz-Zement-Grenze normalerweise um ca. 1 - 2 mm. Neben dem Epithel besteht die Gingiva aus derb fibrösem Bindegewebe (Hellwig et al., 2013) (Müller, 2012).

Das Saumepithel sorgt für die Befestigung des Epithels an der Oberfläche der Zahnhartsubstanz (Schmelz, Zement oder Dentin) und hat eine Schutzfunktion gegenüber dem darunter liegenden parodontalen Ligament (PDL, Desmodont). Eines der ersten Ereignisse bei entzündlichen Zahnfleisch- und Parodontalerkrankungen ist die Zerstörung der normalen Beziehungen zwischen den Komponenten des Zahnhalteapparates. Es besteht eine enge Verbindung zwischen dem parodontalen Ligament und der epithelialen Befestigung an der Zahnoberfläche. Diese beiden Strukturen sind dynamisch in Bezug auf Veränderungen der Attachmentposition und -qualität mit Veränderungen des Alters, des Gesundheitszustands und des lokalen Umfelds (Hassell, 1993).

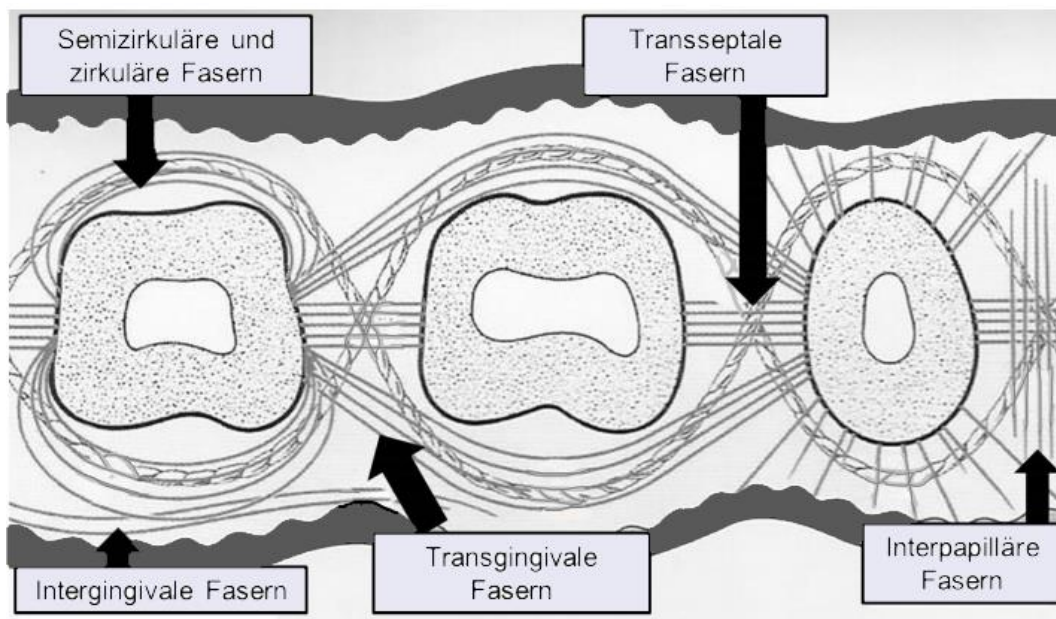


Abb. 2: Schematische Darstellung der verschiedenen Faserbündel und ihres Verlaufes (horizontaler Schnitt). Sie befinden sich zwischen den Zähnen (transseptal), innerhalb der Gingiva (intergingival) und zirkulär um die Zähne herum (modifiziert nach (Hassell, 1993)).

In Abbildung 2 sind die verschiedenen Fasern des supraalveolären Faserapparats der Gingiva dargestellt. Es werden die gingivalen Fasern sowie die parodontalen Fasern entsprechend ihrer Verlaufsrichtung unterschieden. Sie verlaufen z.B. zwischen den Zähnen (transseptale und transgingivale Fasern), um die Zähne herum (semizirkuläre und zirkuläre Fasern) und unabhängig von den Zähnen innerhalb der Gingiva (intergingivale und interpapilläre Fasern) (Hassell, 1993).

Das Desmodont, oder auch parodontales Ligament (PDL), ist ein zell- und faserreiches derbes, kollagenes Bindegewebe, welches gut vaskularisiert und innerviert ist, zwischen der Wurzeloberfläche und dem Alveolarknochen liegt und über den Wurzelzement und den Alveolarknochen den Zahn in seinem Zahnfach verankert.

Es füllt den ungefähr 0,25 mm großen Spalt zwischen der Wurzeloberfläche und dem Alveolarknochen aus und ist koronal und apikal etwas breiter als im mittleren Bereich. Das bedingt eine sanduhrähnliche Form dieses Raumes (Hellwig et al., 2013).

Das PDL ist ein hochspezialisiertes Bindegewebe und das am stärksten verformbare Gewebe im Zahnhalteapparat, das Zahnbewegungen unter funktioneller Belastung ermöglicht. Es besteht aus Zellen und einem extrazellulären Kompartiment, bestehend aus der Grundsubstanz und Fasern. Die Grundsubstanz ist der Hauptbestandteil des PDL und die

Fasern sind darin eingebettet. Die Grundsubstanz besteht zu etwa 70 % aus Wasser. Dadurch wird die Belastbarkeit eines Zahnes durch hydrostatische Wirkung deutlich erhöht. Neben dem in der Grundsubstanz gebundenen Wasser, Blut Serum und Lymphe sind weitere Bestandteile des PDL flüssige Phase. Sie befinden sich in den Gefäßen und im interstitiellen Raum (Natali et al., 2004).

Zahlreiche kollagene Fasern vereinigen sich zu kollagenen Faserbündeln, die einerseits im Alveolarknochen, andererseits im Wurzelzement inserieren. Die so geschlossene Verbindung stellt eine gelenkige, syndesmotische Verbindung dar (Hellwig et al., 2013). Die Bindegewebsfasern werden in primäre und sekundäre Fasern unterteilt. Die primären Fasern, welche hauptsächlich Kollagenfasern sind, verlaufen suprakrestal, horizontal, schräg, interrädikulär und apikal (vgl. Abbildung 3). Die sekundären Fasern liegen unbündelt in zufälliger Ausrichtung und enthalten neben kollagenen Fasern auch elastische Fasern. Der im Wurzelzement befindliche Anteil der primären Fasern wird als Sharpey'sche Fasern bezeichnet. Der größte Teil der schräg vom Knochen zum Zement verlaufenden Fasern fängt okklusale Kräfte auf, alle anderen Fasern sichern den Zahn hauptsächlich gegen Zugkräfte und vereint agieren sie gegen kippende und rotierende Kräfte (Hassell, 1993) (Rateitschak, 1989).

Es werden sensorische und autonome Nervenfasern gefunden, die für die Schmerzperzeption und über Mechanorezeptionen für die Wahrnehmung propriozeptiver Reize verantwortlich sind. Somit ist die Druckempfindung außerordentlich verfeinert (Müller, 2012).

Die gesamte Zahnwurzel wird von verschiedenen strukturierten Wurzelzementen bedeckt welche sich präeruptiv während der Wurzelbildung und zeitlebens nach Abschluss des Wurzelwachstums bilden. Anatomisch gelten sie als Teile des Zahnes, funktionell gehören sie zum Parodont, da in ihn die Sharpeyschen Fasern inserieren. Neben der Verankerung des Zahnes dienen sie der Adaptation und der Reparation. Kleine Lakunen im Wurzelzement (bis zu 80 Mikrometer Tiefe) können Bakterien Unterschlupf bieten (Rateitschak, 1989).

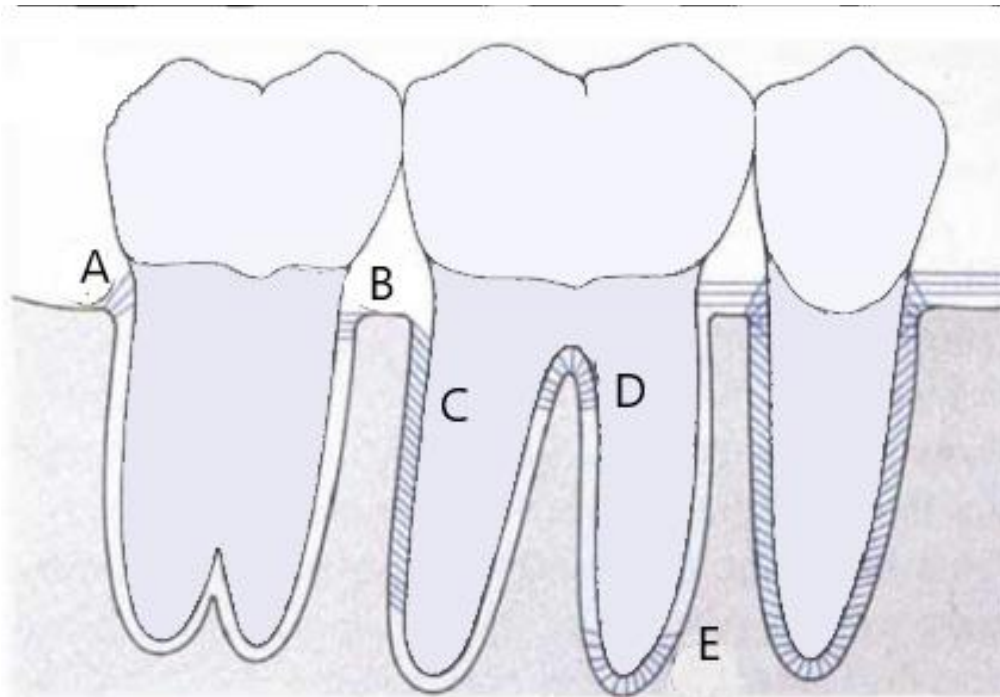


Abb. 3: Schematische Darstellung zweier Unterkiefer Molaren und eines Prämolaren und der wichtigsten Kollagenfasergruppen des parodontalen Ligaments (modifiziert nach (Hassell, 1993)): A: Suprakrestale Fasern; B: Horizontale Fasern; C: Schräge Fasergruppe; D: Interradikuläre Fasern; E: Apikale Fasern

Die schematische Darstellung eines Sagittalschnitts durch zwei Unterkiefermolaren und einen Prämolaren in Abbildung 3 zeigt, dass die Verankerung der Zähne im Alveolarknochen über dentoalveoläre Fasern im parodontalen Ligamentraum erfolgt. Alle primären Fasern haben ihren Ursprung im Wurzelzement, durchqueren den Raum des parodontalen Ligaments (0,2 - 0,4 mm) und dringen als Sharpey-Fasern in die Wand der Alveole ein. Die schräge Fasergruppe (C) ist die am weitesten verbreitete und löst axial einwirkende Kräfte auf. Die suprakrestalen Fasern (A), horizontale Fasern (B), interrädikuläre Fasern (D) und apikale (E) dienen dazu, Kipp- und Rotationskräfte sowie Kräfte, die den Zahn aus seiner Alveole lösen könnten, zu absorbieren und aufzufangen (Hassell, 1993). Da das parodontale Ligament maßgeblich für die biomechanischen Eigenschaften der Zähne verantwortlich ist, wird in dem Kapitel Biomechanik der Zähne (Kapitel 1.5) näher auf diesen für diese Studie relevanten Aspekt eingegangen.

Der Alveolarknochen bildet den letzten Teil des Parodonta und lässt sich unterteilen in den eigentlichen Alveolarknochen, die Spongiosa und die äußere Kompakta. Beide Alveolarfortsätze sind zahnabhängige Strukturen ektomesenchymalen Ursprunges, die sich

mit der Bildung und des Durchbruchs der Zähne entwickeln, einer ständigen Funktionsanpassung im Sinne einer Remodellation durch Osteoklasten, Osteoblasten und Osteozyten unterliegen und nach Zahnverlust atrophieren (Rateitschak, 1989). Im Querschnitt durch den knöchernen Stützapparat zeigt sich die den Alveolarfortsatz bedeckende äußere Kompakta, die crestal in den eigentlichen Alveolarknochen, die Lamina cribiformis, eine dünne, durchlöchernte Alveoleninnenkortikalis, übergeht. Diese zeigt sich radiologisch in der Lamina dura als eine verdichtete Linie, dessen Verlauf bzw. Kontinuität wichtig für die röntgenologische Analyse hinsichtlich einer Parodontitis ist. Die Spongiosa liegt zwischen dem Alveolarknochen und der Kompakta und enthält Knochenmark. Im Oberkiefer ist bis auf die Molarenregion der Knochen oral dicker als faszial und die Spongiosa ist unterschiedlich dicht (Rateitschak, 1989). Der Unterkiefer ist in orofaszialer Breite deutlich schmaler ausgeprägt. Der Knochen endet physiologisch 1-2 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze und weist interdental im Frontzahnbereich pyramidenförmige und im Seitenzahnbereich abgeflachte Septen auf. Bei prominent im Kiefer stehenden Zähnen kann der Alveolarknochen vestibulär fehlen. Bei Erhalt des marginalen Knochens spricht man von Fenestrationen (Knochenfenster), bei Verlust des marginalen Knochens von Dehiscenzen (Knocheneinziehungen) (Müller, 2012), (Hellwig et al., 2013).

1.2 Aufgaben des Parodonts

Neben der Verankerung des Zahnes im Alveolarknochen und der Dämpfung auftretender Kaukräfte, erfüllt das Parodont eine Reihe weiterer wichtiger Aufgaben. So erfüllt es eine sensorische Funktion, da es Schmerz-, Druck- und Tastempfinden ermöglicht. Die Zähne sind durch das Parodont innerhalb eines Kiefers als Zahnreihe zusammenfasst und dennoch ermöglicht es Zahnstellungsänderungen und eine Anpassung an funktionelle und topographische Veränderungen. Es sichert die Kontinuität der Oberflächenauskleidung der Mundhöhle, da es das Mundhöhlenmilieu von der Zahnwurzel trennt. Auswirkungen traumatischer Insulte können repariert werden und periphere Abwehrmechanismen gegen drohende Infektionen bereitgestellt werden (Hellwig et al., 2013) (Müller, 2012).

1.3 Parodontale Erkrankungen

Parodontitis ist eine durch Bakterien verursachte entzündlich bedingte Erkrankung des Zahnhalteapparats, die mit fortschreitendem Attachment- und Knochenverlust (CAL clini-
al attachment loss; klinischer Attachmentverlust) einhergeht. Charakteristisch ist die Bildung von Zahnfleischtaschen und/oder Rezessionen der Gingiva (Lindhe, 1999). Unbehandelt kann sie zu einer Zerstörung zahntragender Strukturen und im weiteren Verlauf zu Zahnverlust führen (Offenbacher, 1996). In ihrer schweren Form kann Parodontitis nicht nur zu Zahnverlust führen, sondern kann auch die systemische Gesundheit beeinflussen und das Risiko erhöhen für Atherosklerose, ungünstige Schwangerschaftsverläufe, rheumatoide Arthritis, Aspirationspneumonie und Krebs (Hajishengallis, 2015). Ergebnisse einer aktuelleren Studie zeigten außerdem, dass Menschen mit Parodontitis, die an COVID-19 erkranken, ein signifikant höheres Risiko für schwere Komplikationen (Einweisung auf Intensivstationen, Beatmung und Tod) im Verlauf der Infektion haben als Menschen ohne Parodontitis (Marouf et al., 2021; Dannewitz et al., 2021).

1.3.1 Ätiologie und Pathogenese parodontaler Erkrankungen

Es gibt eine ausgeprägte, vorherrschende bakterielle Flora in der gesunden Mundhöhle, die sehr vielfältig und orts- und subjektspezifisch ist (Aas et al., 2005). Es sind etwa 700 Bakterienarten nachgewiesen, die in der Lage sind, die menschliche Mundhöhle zu besiedeln (Dannewitz et al., 2021).

Bakterien alleine sind nicht in der Lage eine Parodontitis auszulösen. Die Abwehrlage des Wirtes, die Anwesenheit von Pathogenen und die Abwesenheit nützlicher Mikroorganismen und letztlich eine förderliche Ökologie in der parodontalen Tasche sind Faktoren, von denen das Vorliegen einer parodontalen Infektion abhängt (Müller, 2012). Unter gesunden parodontalen Bedingungen sind die Abwehrmechanismen in der Regel ausreichend, um die ständige mikrobiologische Herausforderung durch ein normal funktionierendes Saumeptithel und die konzentrierte starke Masse an Entzündungszellen, Immunzellen und Makromolekülen, die durch dieses Epithel wandern, zu kontrollieren (Bosshardt, 2018). Es besteht eine Symbiose zwischen dem mit parodontaler Gesundheit assoziierten Biofilm und einer angemessenen immun-inflammatorischen Antwort des Wirtes. Eine Symbiose beschreibt hierbei ein gegenseitig benefizielles Verhältnis zwischen den Mitgliedern einer mikrobiellen Gemeinschaft und dem Wirt (Lamont et al., 2018). Eine Parodontitis

entsteht aufgrund einer mikrobiellen Dysbiose (Hajishengallis, 2015) in anfälligen Individuen, die mit einer Dysregulation der immunitätsvermittelten Antwort einhergeht. Eine Dysbiose beschreibt hierbei eine Veränderung innerhalb der mit Gesundheit assoziierten mikrobiellen Gemeinschaft, die zu einem Zusammenbruch der benefiziellen Beziehung mit dem Wirt führt. Die Folge dieser Veränderung ist ein Abbau von Bindegewebe und Alveolarknochen, welcher wirtsvermittelt geschieht (Lamont et al., 2018).

Als primärer Risikofaktor zur Entstehung einer entzündlichen Parodontopathie gilt also der dentale Biofilm (Haffajee und Socransky, 1994), da eine dauerhafte Akkumulation von Belägen zu einem Überwiegen von Bakterien führt, die mit einer Erkrankung assoziiert sind (Marsh und Zaura, 2017).

Diese so folgende Zerstörung der strukturellen Integrität des Saumepithels, die eine Unterbrechung der Zell-Zell-Kontakte und eine Ablösung von der Zahnoberfläche einschließt und folglich zur Taschenbildung führt, bringt dieses empfindliche Abwehrsystem aus dem Gleichgewicht (Bosshardt, 2018).

Dennoch zeigen nicht alle Menschen eine gleiche Reaktion auf bakterielle Angriffe. So geht man heute davon aus, dass das Eintreten entzündlicher Veränderungen auf ein gestörtes Verhältnis potentiell pathogener Mikroorganismen und lokaler Abwehrmechanismen darstellt. Bei den Risikofaktoren, die zum Ausbruch einer Parodontopathie führt, unterscheidet man zwischen beeinflussbaren und unveränderlichen Risikofaktoren (Cichon und Klar, 2021). Durch Studien an Familienmitgliedern, Zwillingen und Geschwisterpaaren konnte eine starke genetische Komponente bei der Entstehung parodontaler Entzündungen nachgewiesen werden, welches zu den unveränderlichen Risikofaktoren gehört. Zu den beeinflussbaren Faktoren, die die Entstehung und Progression einer Parodontitis beeinflussen, gehören vor allem Diabetes mellitus und das Rauchen (Cichon und Klar, 2021). Dies spiegelt sich in der neuen Klassifikation ab, da der Grad der Parodontitis mit Hilfe der Modifikatoren (Risikofaktoren wie das Rauchen und Diabetes mellitus) weitergehend beurteilt werden kann (Papapanou et al., 2018).

Diabetes mellitus ist eine heterogene Gruppe von Erkrankungen, die alle eine eingeschränkte Glucosetoleranz und einen beeinträchtigten Fett- und Kohlenhydratstoffwechsel bedingen. Vor allem ein unzureichend kontrollierter oder gar nicht diagnostizierter Di-

abetes mellitus hat Auswirkungen auf die parodontale Gesundheit der Patient*Innen. Zwischen beiden Erkrankungen besteht ein bidirektionaler Zusammenhang (Deschner et al., 2011).

Tabakkonsum nimmt als verhaltensbedingter Risikofaktor eine primäre Stellung ein. Prävalenz, Ausmaß und Schwere der Parodontitis sowie Zahnverlust und Zahnlosigkeit werden durch den Tabakkonsum dosisabhängig beeinflusst (Chaffee et al., 2016).

1.3.2 Klassifikationen der Parodontitis

Die Einteilung von Erkrankungen in Klassifikationen ist notwendig, um Krankheiten richtig diagnostizieren zu können und die Patient*Innen dementsprechend richtig und umfangreich behandeln zu können. Es ermöglicht weiterhin Wissenschaftler*Innen, epidemiologische Studien zur Krankheitsprävalenz und Ätiopathogenese von Erkrankungen zu erarbeiten, sowie deren Prognose, Verlauf und Therapie zu studieren (Jepsen, 2018).

Seit der letzten Klassifikation aus dem Jahr 1999 (Armitage, 1999) gab es allerdings einen enormen, stetig wachsenden Wissenszuwachs, der eine weitere Aktualisierung der Klassifikation parodontaler Erkrankungen und Zustände erforderlich machte. Das Verlangen nach einer individualisierten, personalisierten und präzisen Einteilung, die anhand von Falldefinitionen praxisnah und bei neuen Erkenntnissen aktualisierbar ist, wurde größer. Zudem wurde deutlich, dass ein Klassifikationssystem die Komplexität und die Risikofaktoren sowie die Schwere der Erkrankung beinhalten muss (Jepsen, 2018). Eine neue Klassifikation bzw. ein „Parodontitis-Falldefinitionssystem“ sollte drei Komponenten umfassen:

- (a) die Identifizierung eines Patienten als „Parodontitis-Fall“,
- (b) die Identifizierung der spezifischen Art der Parodontitis und
- (c) die Beschreibung des klinischen Erscheinungsbildes und anderer Elemente, die sich auf das klinische Management, die Prognose und potenziell breitere Einflüsse auf die orale und systemische Gesundheit auswirken (Papapanou et al., 2018), (Tonetti et al., 2018).

Erstmalig wurde ein Workshop gemeinsam von der American Academy of Periodontology (AAP) und der European Federation of Periodontology (EFP) gebildet und umfasste Expert*Innen aus der ganzen Welt.

Die parodontale Gesundheit wurde beschrieben und Schwellenwerte festgelegt, die einen Fall von Gingivitis im Unterschied zu vereinzelt Messstellen mit gingivaler Entzündung definieren. Eine Definition von parodontaler Gesundheit ist entscheidend für die Festlegung idealer und akzeptabler therapeutischer Endpunkte für die parodontale Therapie, um die biologische Belastung durch parodontale Entzündungen systematisch bewerten zu können, die Prävalenz von gingivaler und parodontaler Erkrankungen in der Bevölkerung zu kategorisieren und das individuelle Risiko für zukünftige Krankheitsentwicklung zu bewerten (Chapple et al., 2018).

In Übereinstimmung mit dem aktuellen Wissensstand zur Pathophysiologie und dem klinischen Krankheitsbild werden drei Formen der Parodontitis unterschieden. Es handelt sich um nekrotisierende Parodontitis (Herrera et al., 2018), Parodontitis als Manifestation systemischer Erkrankungen (Albandar et al., 2018) und diejenigen Formen der Erkrankung, die bisher in „chronisch“ oder „aggressiv“ eingeteilt wurden. Letztere werden jetzt in einer einzigen Kategorie „Parodontitis“ vereint. (Papapanou et al., 2018) (Tonetti et al., 2018).

Ein „Parodontitis-Fall“ wird durch den Verlust der parodontalen Gewebeunterstützung definiert, der üblicherweise durch röntgenologischen Knochenverlust oder interproximalen Verlust des klinischen Attachments, gemessen durch Sondieren, beurteilt wird. Weitere aussagekräftige Beschreibungen der Parodontitis sind die Anzahl und der Anteil der Zähne mit Taschensondierungstiefen (TST) über bestimmten Schwellenwerten (üblicherweise $TST > 4$ mm bei einem positiven BOP oder $TST \geq 5$ mm), die Anzahl der durch Parodontitis verlorenen Zähne, die Anzahl der Zähne mit intraossären Läsionen und die Anzahl der Zähne mit Attachmentverlust im Furkationsbereich (Sanz et al., 2020a).

1.3.2.1 Staging und Grading

Eine Einteilung in ein multi-dimensionales System aus vier Stadien und drei Graden, das sogenannte „Staging“ (Stadium) und „Grading“ (Grad), ermöglicht es, die verschiedenen Erscheinungsformen der Parodontitis im individuellen Krankheitsfall weiter zu beschreiben (Papapanou et al., 2018).

So setzt sich das Staging (siehe Abbildung 4) zusammen aus der Schwere der Erkrankung bei Erstaufnahme des/der Patient*In und der Komplexität des Krankheitsmanagements. Dabei fokussiert man sich hierbei auf zwei wesentliche Dimensionen der Erkrankung, die Schwere und die Komplexität.

Die Schwere wird anhand einer klinischen Messung des klinischen Attachmentverlusts (CAL) interdental an der Stelle des größten Verlustes mit einer Sonde gemessen und in Sondierungstiefen von 1 - 2 mm, 3 - 4 mm und ≥ 5 mm eingeteilt. Zusätzlich wird röntgenologisch der Knochenabbau beurteilt. Dabei ist der marginale Knochenabbau von zentraler Bedeutung und wird unterschieden in Knochenabbau von bis zu 15 %, zwischen 15 und 33 % und in Werte über 33 %. Zusätzlich ist zur Beurteilung des Schwere - Wertes zu berücksichtigen, wie viele Zähne aufgrund der parodontalen Zerstörung bereits verloren gegangen sind.

Die Bestimmung der Komplexität ist sekundär, aber bedeutsam, da sie auf den langfristigen Umgang mit der Erkrankung im Sinne von Ästhetik und Funktion zielt. Faktoren wie die ausgedehnte Sondierungstiefen, vertikale Knochendefekte, Furkationsbefall mehrwurzeliger Zähne Grad II oder III, Zahnhypermobilität ab Grad II, Wanderungen bzw. Aufächerungen von Zähnen, Zahnverlust, Alveolarkamm-Defekte und Verlust der Kaufunktion und Bisshöhe werden berücksichtigt, da dies eine komplexe, interdisziplinäre Rehabilitation notwendig machen könnte.

Auf Grundlage von klinischen und röntgenologischen Befunden kennzeichnet das Stadium I eine leichte, beginnende Parodontitis, das Stadium II eine moderate Form, das Stadium III entspricht einer fortgeschrittenen Parodontitis und das Stadium IV betrifft stark fortgeschrittene Destruktionen (Cichon und Klar, 2021) .

Das Grading befasst sich mit Informationen bezüglich biologischer Merkmale der Erkrankung, der Rate der Progression und der Risikobestimmung (siehe Abbildung 5). Damit geht es um die Abschätzung des zukünftigen Risikos für ein Voranschreiten der Parodontitis und des voraussichtlichen Ansprechens auf die Therapie (Papapanou et al., 2018).

Abb. 4: Parodontitis: Staging (Papapanou et al., 2018). Quelle: Deutsche Gesellschaft für Parodontologie e.V. (<https://dgpardo.de/wp-content/uploads/2022/02/dg-paro-tabelle-staging-und-grading-parodontitis-2021.pdf>)

Parodontitis-Stadium STAGING		Stadium I	Stadium II	Stadium III	Stadium IV
Schweregrad	interdentaler CAL an Stellen mit höchstem Verlust	1 - 2 mm	3 - 4 mm	≥ 5 mm	≥ 5 mm
	KA	< 15 %	15 - 33 %	> 33 %	
	Zahnverlust aufgrund von Parodontitis	kein Zahnverlust		≤ 4 Zähne	≥ 5 Zähne
Komplexität	lokal	· ST ≤ 4 mm · vorwiegend horizontaler KA	· ST 5 mm · vorwiegend horizontaler KA	zusätzlich zu Stadium II: · ST ≥ 6 mm · vertik. KA ≥ 3 mm · FB Grad II oder III	zusätzlich zu Stadium III: komplexe Rehabilitation erforderlich aufgrund von: · mastikatorischer Dysfunktion · sekundärem okklusalen Trauma (Zahnbeweglichkeit ≥ Grad 2) · Zahnwanderung · ausgeprägtem Kammdefekt · Bisshöhenverlust · < 20 Restzähnen (10 okkludierende Paare)
Ausmaß und Verteilung	wird zur genaueren Beschreibung des Staging verwendet	für jedes Stadium Ausmaß als lokalisiert (< 30 % der Zähne betroffen), generalisiert oder Molaren-Inzisivi-Muster beschreiben			

Parodontitis: Grading

Parodontitis GRADING			GRAD A: langsame Progressionsrate	GRAD B: moderate Progressionsrate	GRAD C: rasche Progressionsrate
Primäre Kriterien	direkte Evidenz für Progression	longitudinale Daten für KA oder CAL	kein Verlust	< 2 mm über 5 Jahre	≥ 2 mm über 5 Jahre
	indirekte Evidenz für Progression	KA (%) / Alter	< 0,25	0,25 - 1,0	> 1,0
		Phänotyp	· erheblicher Biofilm mit geringer parodontaler Destruktion	· Zerstörung propor- tional zum Biofilm	· Zerstörung unproportional zum Biofilm · Episoden rapider Zerstörung · früher Erkrankungsbeginn (z. B. Molaren-Inzisivi-Muster oder behandlungsresistente Erkrankung)
Modifikatoren	Risikofaktoren	Rauchen	Nichtraucher	Raucher < 10 Zig./Tag	Raucher ≥ 10 Zig./Tag
		Diabetes	kein Diabetiker, normoglykämisch	HbA1c < 7,0 % bei Patienten mit Diabetes	HbA1c ≥ 7,0 % bei Patienten mit Diabetes

Das Grading sollte als Indikator für die Geschwindigkeit der Parodontitis-Progression verwendet werden. Die primären Kriterien sind entweder direkte oder indirekte Evidenz für Progression. Sofern vorhanden, wird direkte Evidenz verwendet. Wenn diese nicht vorliegt, kann indirekt über die Relation des KA zum Lebensalter des Patienten bei dem am stärksten betroffenen Zahn auf die vergan-

gene Progression geschlossen werden. Zunächst sollte allen Patienten ein Grad B zugeordnet werden. Danach soll nach Evidenz gesucht werden, die eine Einstufung in Grad A oder C rechtfertigen würde. Ähnlich dem Staging kann nach Bestimmung des Gratings eine Modifikation auf der Basis von Risikofaktoren erfolgen.

CAL = klinischer Attachmentverlust / FB = Furkationsbeteiligung / HbA1c = glykiertes Hämoglobin / KA = röntgenologischer Knochenabbau / ST = Sondierungstiefe / Zig. = Zigaretten

Unterteilt wird das Grading in primäre Kriterien und Modifikatoren.

Die primären Kriterien sind entweder direkte oder indirekte Hinweise auf eine Progression. Wann immer verfügbar, werden direkte Beweise verwendet. In Ermangelung dieser Methode wird eine indirekte Schätzung unter Verwendung des Knochenverlusts in Abhängigkeit vom Alter des am stärksten betroffenen Zahns oder der Fallpräsentation vorgenommen (röntgenlogischer Knochenverlust, ausgedrückt als Prozentsatz der Wurzellänge geteilt durch das Alter des Probanden, RBL / Alter) (Papapanou et al., 2018).

Die indirekte Evidenz basiert auf der Messung des Knochenabbaus des am stärksten betroffenen Zahns im Gebiss des/der Patient*In als Funktion des Alters. Zusätzlich wird der Phänotyp des/der Patient*In beurteilt und geprüft, ob der Grad der parodontalen Zerstörung proportional zum Biofilm ist oder nicht (Papapanou et al., 2018) (Tonetti et al., 2018). Es lassen sich drei Grade (A, B, C) bezüglich der Progressionsrate benennen.

1. Grad A als langsame Progressionsrate (mit keinem Verlust des Knochens oder des CAL und Vorhandensein einer erheblichen Menge an Biofilm)
2. Grad B als moderate Progressionsrate (mit < 2 mm Verlust über 5 Jahre und eine parodontale Zerstörung, die proportional zur Menge des Biofilms ist) und
3. Grad C als rasche Progressionsrate (mit ≥ 2 mm Verlust über 5 Jahre und ein klinisches Bild mit Phasen rapider Zerstörung und/oder einer früh beginnenden Erkrankung (beispielsweise ein Molaren-Inzisiven Muster oder behandlungs-resistente Erkrankung).)

Der Grad der Parodontitis kann mit Hilfe der Modifikatoren weitergehend beurteilt werden, da hierbei vor allem auf Risikofaktoren wie das Rauchen und Diabetes mellitus eingegangen wird (Papapanou et al., 2018) (Tonetti et al., 2018).

1. Grad A bedeutet hierbei einen/eine normoglykämische /n Nichtraucher*In,
2. Grad B einen Zigarettenkonsum < 10 Zigaretten pro Tag und/oder einen/eine Diabetiker*In mit einem $HbA1c < 7\%$
3. Grad C einen Zigarettenkonsum ≥ 10 Zigaretten und/oder einem Diabetiker mit einem $HbA1c > 7\%$ (Papapanou et al., 2018; Tonetti et al., 2018).

Hinsichtlich des Risikos für eine fortschreitende Erkrankung charakterisiert Grad A eine Parodontitis mit einem niedrigen Risiko, Grad B mit einem mittleren Risiko und Grad C mit einem hohen Risiko für weitere Destruktionen (Cichon und Klar, 2021) .

1.4 Therapie parodontaler Erkrankungen

Aufbauend auf der neuen Klassifikation bietet die neue Leitlinie zur Behandlung von Parodontitis im Stadium I-III erstmals ein umfassendes Behandlungskonzept für die gesamte Therapiestrecke der Parodontitis (Sanz et al., 2020a).

Die Behandlung der Stadien I-III erfolgt nach einem stufenweise ablaufenden, aufeinander aufbauenden Therapiekonzept (siehe Abbildung 6). Das Stadium IV, welches durch umfangreiche Zahnverluste, mastikatorische Dysfunktion und/oder pathologische Zahnwanderungen gekennzeichnet ist, bedarf in der Regel einer komplexen multidisziplinären Therapie und wurde in einem weiteren Workshop thematisiert und hier nicht näher erläutert (Sanz et al., 2020a). Die Therapiestufen sind abhängig vom Schweregrad der Erkrankung und beinhalten je nach Stadium unterschiedlicher Interventionen (Sanz et al., 2020a). Primär geht es um eine Reduktion des mikrobiellen Biofilms mit dem Ziel, durch die Entfernung des dysbiotischen Biofilms eine Verschiebung in Richtung Symbiose zu erzielen und damit den entzündlichen Abbau des parodontalen Hart- und Weichgewebes aufzuhalten (Cichon und Klar, 2021). Die Stufen I (Kontrolle des supragingivalen Biofilms und der Risikofaktoren) und II (subgingivale Instrumentierung) werden grundsätzlich von jede*r Parodontitis-Patient*In durchlaufen. Stufe III, die chirurgische Therapie, wird nur dann durchgeführt, wenn nach der Reevaluation noch residuale pathologische Taschen, beispielsweise mit Vertikal- und Furkationsdefekten vorliegen (Sanz et al., 2020a). Die vierte Stufe, die unterstützende Parodontitistherapie (UPT), ist dann erreicht, wenn keine parodontale Resttaschen mit einer Sondierungstiefe von mehr als 4mm bzw. keine Taschen mit einer Sondierungstiefe von 4 mm und Blutung auf Sondierung (BOP) mehr vorliegen (Sanz et al., 2020a).

Die nicht-chirurgische Parodontitistherapie wurde als ideale Erstbehandlung für Patient*Innen mit Parodontitis bereits schon zuvor in der Literatur vorgeschlagen (Lindhe et al., 1982).

Die Stufen der Parodontitistherapie in der S3-Leitlinie

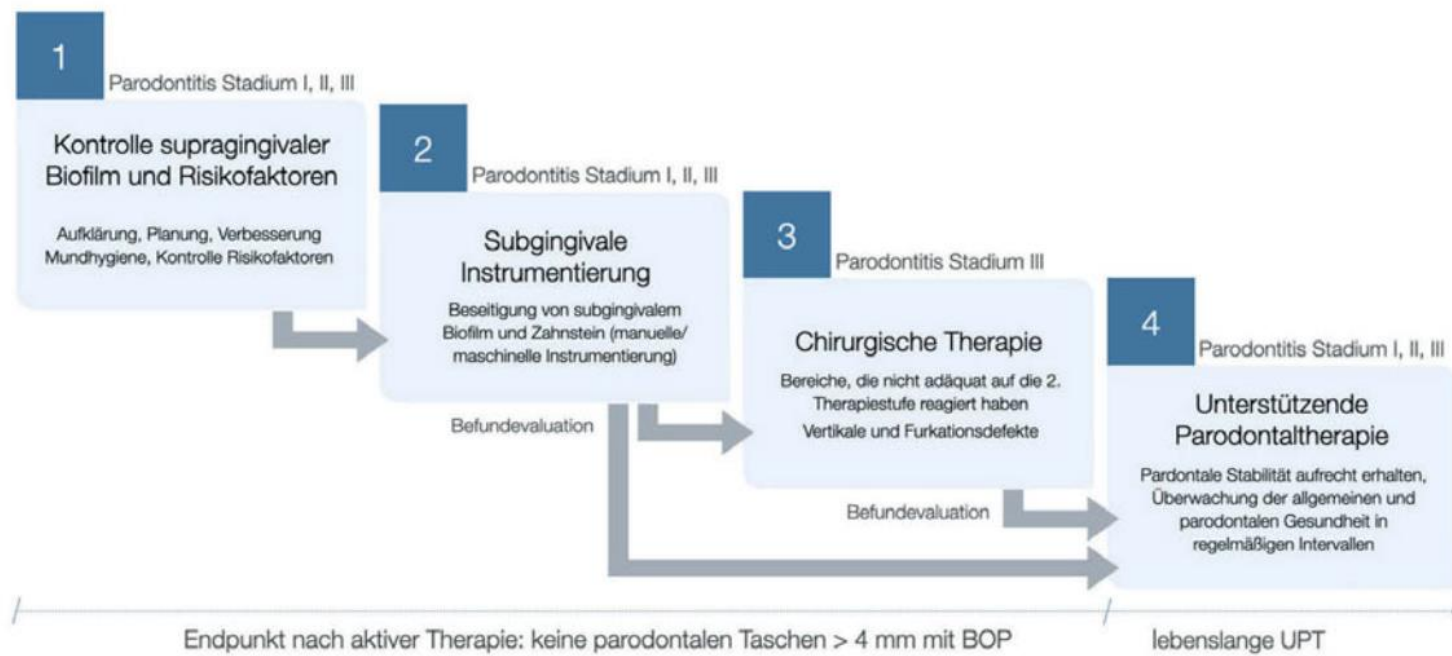


Abb. 6: Therapiestufen der Parodontistherapie modifiziert nach (Sanz et al., 2020b) aus der Deutsche Gesellschaft für Parodontologie e.V. (Quelle: <https://dgpardo.de/gesund-im-mund/parodontitis/>)

1.4.1 Therapiestufen der Parodontitis Therapie Stadium I-III

Das wichtigste Ziel der ersten Stufe besteht darin, das häusliche supragingivale Biofilmmanagement der Patient*Innen zu optimieren. Es trägt maßgeblich zum Erfolg der Therapie bei und soll durch kontinuierliche Mundhygieneunterweisungen gewährleistet werden. Zusätzlich steht die professionelle mechanische Plaqueentfernung (PMPR) und die Reduktion retentiver Faktoren im Fokus. Ebenso soll eine Kontrolle von Risikofaktoren Teil der ersten Therapiestufe sein (Abbildung 6). Hierzu gehören Interventionen zur Raucherentwöhnung und zur Diabeteskontrolle. Unklar ist jedoch, ob eine gesteigerte körperliche Aktivität, eine Ernährungsberatung und generelle Interventionen zur Gewichtsreduktion des/der Patient*In positive Effekte auf die Therapie einer Parodontitis haben (Sanz et al., 2020a).

Die zweite Stufe der Therapie ist eine ursachenbezogene Therapie, die auf die Beseitigung (Reduktion) von subgingivalem Biofilm und Zahnstein zielt (Abbildung 6). Ziel dieser mechanischen subgingivalen Instrumentierung der Zahnhartsubstanzen ist eine Entfernung des mikrobiellen Biofilms und Hartablagerungen, durch welche inflammatorische Prozesse und eine Progression der Erkrankung aufgehalten werden sollen (Sanz et al., 2020a).

Ist es durch die supra- und subgingivale Instrumentierung nicht möglich, den parodontalen Zustand des/der Patient*In zu verbessern und liegen nach Abschluss von Therapiestufe I und II-Taschensondierungstiefen (TST) von mehr als 6 mm vor, kann eine chirurgische Intervention indiziert sein (Sanz et al., 2020a). Der dritte Therapieschritt zielt also auf die Behandlung derjenigen Stellen, die auf die zweite Therapiestufe nicht ausreichend ansprechen. Die Maßnahmen umfassen entweder wiederholte subgingivale Instrumentierung mit oder ohne begleitende Therapien, Parodontalchirurgie mit Zugangslappen, resektive oder regenerative Parodontalchirurgie (Sanz et al., 2020a).

Nach 12 Wochen wird das Behandlungsergebnis im Rahmen einer Reevaluation überprüft und der oder die Patient*In kann bei erfolgreicher abgeschlossener Behandlung in die unterstützende Parodontitistherapie (UPT) aufgenommen werden (Sanz et al., 2020a).

Erfolgreich behandelt, bedeutet eine deutliche Reduzierung der Aktivität der Erkrankung, einer Reduzierung der Sondierungstiefen und der Blutung auf Sondierung (BOP) und eine Stabilisierung bzw. Gewinn von klinischem Attachment (Cichon und Klar, 2021). Klinisch

betrachtet bedeuten dies niedrige Werte für den Plaqueindex und den BOP, kein Austritt von Pus, Taschen von maximal 4 mm und keine progressive Zahnbeweglichkeit (Loos und Needleman, 2020).

Nach Abschluss einer aktiven Parodontaltherapie lassen sich erfolgreich behandelte Parodontitis Patient*Innen in eine von zwei diagnostischen Kategorien einordnen:

- Parodontitis-Patient*Innen mit einem reduzierten, aber gesunden Parodontium
- Parodontitis-Patient*Innen mit gingivaler Entzündung (Caton et al., 2018; Chapple et al., 2018)

Für diese Personen bleibt ein hohes Risiko für das Wiederauftreten bzw. Fortschreiten der Parodontitis. Daher wird eine speziell entwickelte unterstützende Parodontalbehandlung (UPT oder supportive periodontal care, SPC) benötigt, die aus einer Kombination von präventiven und therapeutischen Maßnahmen besteht, die in unterschiedlichen Intervallen durchgeführt werden und Folgendes umfassen sollten:

- Beurteilung und Überwachung der systemischen und parodontalen Gesundheit
- Verstärkung der Mundhygieneinstruktionen (individuelle Beratung hinsichtlich einer für den oder die Patient*In geeigneten Zahnbüste und – pasta, Aufklärung sowie Demonstration der richtigen Interdentalraumpflege)
- Motivation des oder der Patient*In zur kontinuierlichen Kontrolle der Risikofaktoren
- professionelle mechanische Plaqueentfernung (PMPR) und
- lokalisierte subgingivale Instrumentierung bei verbleibenden Taschen. (Sanz et al., 2020a)

Auch nach Abschluss der aktiven Parodontistherapie mit den optimalsten Ergebnissen wird eine lebenslange unterstützende Pflege empfohlen, um das Wiederauftreten einer Parodontitis zu verhindern (Manresa et al., 2018). Da es sich bei einer Parodontitis um eine chronische Erkrankung handelt, beinhaltet die vierte Stufe individuelle, risikoadaptierte Recallintervalle (UPT) zwischen 3 bis 12 Monaten.

Wichtig ist, dass eine lebenslange Nachsorge erfolgt. Dies bedeutet eine kontinuierliche Kontrolle der Risikofaktoren (lokal und systemisch) und eine professionelle mechanische Plaqueentfernung (PMPR), bei Bedarf auch subgingival (Sanz et al., 2020a).

1.5 Biomechanik der Zähne

Der Begriff Biomechanik wurde zum Ende des 19. Jahrhunderts vom Wiener Anatomen und Neurologen Benedikt geprägt (Benedikt, 1910) und kann als Wechselwirkung mechanischer Größen mit biologischen Systemen charakterisiert werden (Bourauel et al., 2014). Das PDL ist ein gut vaskularisiertes, zell- und faserreiches Bindegewebe, das den etwa 200 µm breiten Spalt zwischen dem Wurzelzement und der Innenseite des Alveolarknochens füllt (Schünke et al., 2015). Das PDL dient zum einen der Befestigung des Zahnes in seiner Alveole, zum anderen bewirkt es eine Abfederung und Verteilung der auf den Zahn auftreffenden Belastungen auf den umgebenden Knochen (Berkovitz, 1990). Daher spielt das PDL eine zentrale Rolle im Anpassungsmechanismus der Zähne an Belastungen. Es zeigt eine sofortige Reaktion auf abrupt hohe Kaukräfte und erleichtert die langsame Anpassung an allmähliche morphologische Veränderungen. Um diese einzigartige Funktion zu erfüllen, muss die dreidimensionale Struktur des PDL sowohl stark als auch flexibel sein. Im Gegensatz zu anderen Bändern, die hauptsächlich in Spannung arbeiten, erträgt das PDL eine mehrachsige Belastung und ist so programmiert, dass es unter Druck, Spannung, Scherung und Torsion funktioniert (Connizzo et al., 2021). Intraorale Kräfte reichen dabei von ungefähr 1 N bei kieferorthopädischer Belastung bis weit über 100 N beim Kautvorgang oder Aufeinanderpressen der Zähne (Drolshagen et al., 2011). Der Faserapparat zeigt vor allem ein Kraft-/ Auslenkungsverhalten, das nicht von der Belastungsgeschwindigkeit abhängt (Bourauel et al., 2014). Durch den unterschiedlichen Verlauf von primären und sekundären Fasern entsteht aber eine Inhomogenität des PDL, welche bewirkt, dass sich seine mechanischen Eigenschaften bei Belastung richtungsabhängig unterscheiden. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Anisotropie (Provatidis, 2000) (Bourauel et al., 2014). Da der Hauptanteil der Parodontalligament schräg durch den Parodontalspalt nach apikal verläuft (Abbildung 3, Faser „C“), wird der Kaudruck nicht als Druck, sondern als Zug auf den Alveolarknochen übertragen. Zugbelastung stellt, anders als die Druckbelastung, in physiologischen Bereichen einen positiven Reiz für den umliegenden Knochen dar. Außerdem kann vermehrte Belastung eines Zahnes zur Vermehrung der parodontalen Fasern führen. Mit zunehmender Kraft werden die Zahnauslenkung und die Verformung des PDL deutlich geringer, bis die Zahnbewegung vollständig sistiert. Bei weiterer Belastung über die physiologische Grenze hinaus gibt das PDL zunächst erneut nach, bis es schließlich zum Faserabriss kommt (Lehmann et al., 2015).

Der Faserapparat hat eine wellige Struktur, woraus eine gewisse Nichtlinearität entsteht. Die Flüssigkeitsphase trägt zu einer Dämpfung bei, die dem Verhalten eines Stoßdämpfers ähnlich ist, und einem zeitabhängigen Fließen, wenn die Kraft über längere Zeit auf den Zahn einwirkt. Durch dieses zeitabhängige Verhalten können zum einen Stöße beim Kauen oder anderen schnellen, traumatischen Belastungen abgefedert werden, zum anderen kommt es bei langanhaltender Zahnbelastung zu Flüssigkeitsströmungen in der Alveole oder in benachbarte Knochenhöhlräume, wodurch der Widerstand gegen eine Zahnauslenkung extrem absinkt (Bourauel et al., 2014). Je schneller die Belastung also verläuft, desto weniger Zeit hat die Flüssigkeit in die umliegenden Knochenmarksräume verschoben zu werden. Dadurch verhält sich das PDL steif und die Auslenkung des Zahnes ist bei gleicher Kraft geringer, als bei einer langsameren Belastungsgeschwindigkeit (Dorow et al., 2002). Dabei kommt es eher zu Flüssigkeitsverschiebungen von Blut und Gewebeflüssigkeiten. Zusätzlich werden die gewellt vorliegenden Fasern initial gestreckt. Aufgrund der deutlich höheren Elastizität und Deformierbarkeit, verglichen mit dem Zahn selbst und dem Alveolarknochen, bestimmt das PDL die Charakteristik und das Ausmaß der Initialbewegung entscheidend (Pope et al., 2002). Die initiale Zahnbeweglichkeit ist eine rein physiologische, mechanische und reversible Zahnbewegung, die eine Eigenbeweglichkeit der Zähne als direkte Reaktion auf eine Kraft beschreibt, die beispielsweise beim Kauvorgang an der Zahnkrone auftritt (Drolshagen et al., 2011) und bei der keine histologischen Umbauvorgänge im Zahnhalteapparat stattfinden. Die Zahnbeweglichkeit ist abhängig von der Breite des Parodontalspalts, von der Wurzelgeometrie und –anzahl, der Verteilung der Sharpeyschen Fasern und der elastischen Eigenschaften des PDLs (Nägerl et al., 1991). Wurzellänge und Parodontalspaltbreite bestimmen den Rotationswinkel bei Auslenkung des Zahnes ohne Deformation des umliegenden Knochens. Form, Querschnitt und Oberfläche der Wurzel bestimmen den Widerstand, der dem Kraftangriff an der Zahnkrone entgegengesetzt wird (Nägerl et al., 1991).

Eine in-vivo-Studie untersuchte 2002 das mechanische Verhalten der parodontalen Gewebe bei einer Zahnauslenkung unter Belastung (Dorow et al., 2002). Mit Hilfe einer Materialprüfmaschine, die eine linear anwachsende Kraft mit langsamem und kontrollierbarem Kraftanstieg auf die Zahnkrone ausübte, wurden die initialen Zahnbewegungen von Oberkieferschneidezähnen zweier Proband*Innen gemessen. Die Kraft wurde über eine Kraftmessdose und die Zahnauslenkung berührungslos über einen Wirbelstromsensor

gemessen. Bei Belastung des Zahnes bis zur Endauslenkung und anschließender Entfernung der Krafteinwirkung näherte sich die Auslenkung innerhalb von 30 Sekunden, also einer kurzen Relaxationszeit, exponentiell der Ruhelage (Dorow et al., 2002). Dieses Phänomen wird als Rückstellung bezeichnet (Dorow et al., 2002) und geschieht durch die Rückstellkräfte des umgebenden Knochen- und Weichgewebes sowie die Rekapillarisation von Blutgefäßen und Interstitialflüssigkeit (Wills et al., 1976) (Papadopoulou et al., 2014).

Die Kraft-Auslenkungs-Kurven bei Belastung und Entlastung unterschieden sich deutlich voneinander und stellten sich in Form einer Hysterese dar (siehe Abbildung 7), welche durch Energieverlust aufgrund innerer Reibung bzw. gewissen Strömungsprozessen im PDL zustande kam (Dorow et al., 2002). Bei mehrfacher Wiederholung des Belastungsvorgangs kam es zu einer Änderung der Messkurven bis zum Erreichen eines Grenzwertes. Diese Studie zeigte, dass die Auslenkung des Zahnes bei Anwendung derselben Endkraft im Laufe der Präkonditionierung zunahm, welches auf eine verringerte Steifigkeit des Zahnes zurückzuführen ist. (Dorow et al., 2002). Diese biomechanischen Eigenschaften und insbesondere das zeitabhängige Verhalten des PDL, verändern sich durch eine parodontale Erkrankung (Keilig et al., 2016).

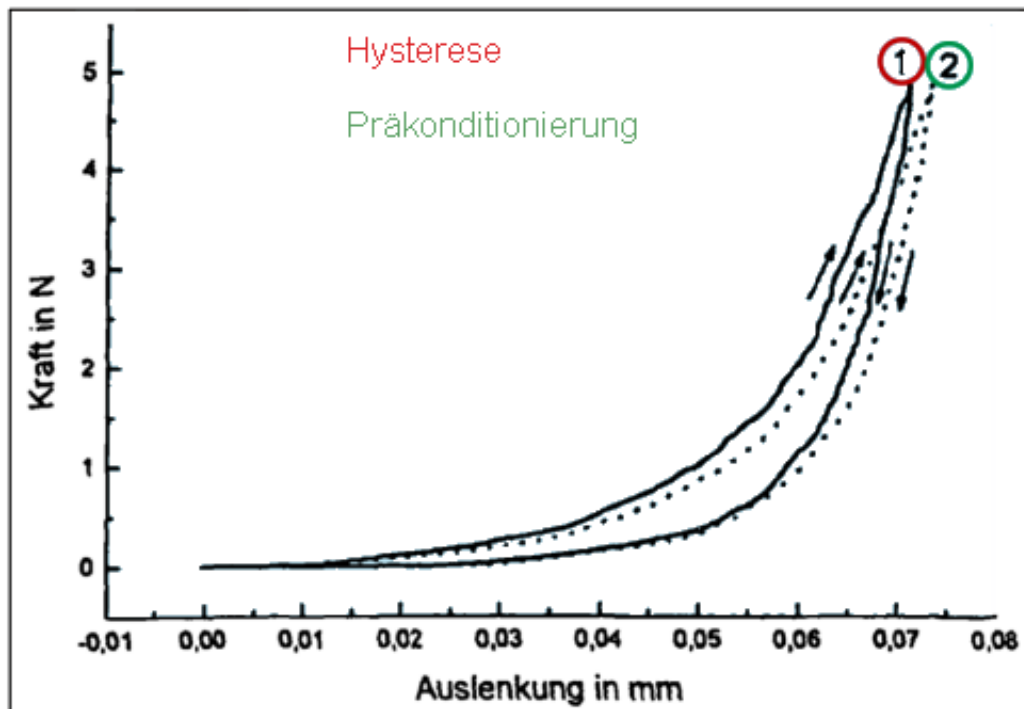


Abb. 7: Darstellung einer Kraft-Auslenkungskurve mit Hysterese und Präkonditionierung eines Schneidezahnes einer Versuchsperson. Die Kraft-Auslenkungskurven von Belastung und Entlastung unterscheiden sich durch verlorene Energie. Sichtbar wird die Präkonditionierung. Die Auslenkung des Zahnes bei gleichbleibender Endkraft ist bei Versuch 2 größer als bei Versuch 1 (modifiziert nach (Dorow et al., 2002))

1.6 Geriatric/General oral health assessment Index

Zusätzlich wurde in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich der GOHAI Fragebogen (Geriatric/General oral health assessment Index) benutzt (Hassel et al., 2008). Die Auswertung des INDEX GOHAI Fragebogens bringt zum Ausdruck, wie viele der Proband*Innen sich aufgrund ihrer Erkrankung mit Parodontitis eingeschränkt fühlen. Der GOHAI wurde in erster Linie für die Verwendung bei älteren Menschen entwickelt, hat sich aber auch bei anderen Erwachsenen als nützlich erwiesen (Hägglin et al., 2005). Die mit einer Parodontitis einhergehenden Symptome wie z.B. länger erscheinende Zähne, Zahnfleischrückgang und - Entzündung können bei dem Patienten*Innen zu Unannehmlichkeiten führen, die für eine Erstellung eines umfassenden Bildes der Patient*Innensituation relevant sein können (Hassel et al., 2008; Atchison und Dolan, 1990). Der GOHAI Fragebogen besteht aus 12 Fragen, die drei hypothetische Dimensionen bewerten (Atchison und Dolan, 1990), (Hassel et al., 2008)

1. körperliche Funktion
2. psychosoziale Funktion
3. Schmerz und Unbehagen

1.7 Fragestellung und Zielsetzung der Studie

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den biomechanischen Eigenschaften des Zahnhalteapparates erfolgreich behandelter, stabiler Parodontitispatient*Innen, die sich in der unterstützenden Parodontistherapie (UPT) befinden.

Die Frage ist, wie sich die biomechanischen Eigenschaften des PDL bei Patient*Innen in einer langfristigen unterstützenden Parodontistherapie verhalten. Diese Fragestellung wurde bisher noch nicht mit dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten intraoralen Belastungsgeräts oder gleichartigen untersucht. Zusätzlich zum Attachmentverlust könnte durch eine Parodontitis die Steifigkeit des PDL erhöht oder auch reduziert werden, welches man anhand der Kraft-Auslenkungskurven bei verschiedenen Belastungszeiten darstellen kann. Erhöhte Zahnbeweglichkeiten könnten demnach nicht nur durch den Attachmentverlust selbst, sondern zusätzlich noch durch eine reduzierte Steifigkeit entstehen. Wenn es gelingt, eine Veränderung der biomechanischen Eigenschaften nachzuweisen, dann könnte dies evtl. bei der frühzeitigen Diagnose einer Parodontitis, bei der Verlaufprognose und der Therapie helfen.

Die Nullhypothesen lauteten:

1. Es gibt keinen Unterschied zwischen Männern und Frauen für F_{max}
2. Das Alter hat keinen Einfluss auf F_{max}
3. Der parodontologische Zustand des Testzahnes hat keinen Einfluss auf F_{max}

2. Material und Methoden

Die Studie beschäftigt sich mit Patient*Innen, die eine behandelte Parodontitis aufweisen und sich bereits über ein Jahr in der unterstützenden Parodontistherapie (UPT) befinden. Die Studie wurde nach ethischen Prinzipien durchgeführt. Die Ethikkommission an der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn hatte keine Bedenken zu der Studie geäußert (Antragsnummer 15-249).

Die Untersuchung erfolgte nur mit Einverständnis und unterschriebener Einwilligungserklärung der Patient*Innen. Die Proband*Innen konnte jederzeit die Studie abbrechen.

2.1 Studien Design

In der Gruppe der behandelten Patient*Innen mit Parodontitis ergab sich folgender zeitlicher Ablauf der Untersuchungen (siehe Abbildung 8):



Abb. 8: Zeitlicher Ablauf der Studie

2.1.1 Aufnahme der Patient*Innen

Die Patient*Innen wurden mündlich über den Inhalt und den Vorgang der Studie aufgeklärt und unterzeichneten eine Einverständniserklärung. Rückfragen wurden stets ausführlich beantwortet. Nachdem die Ein- und Ausschlusskriterien erfüllt waren, wurden personenbezogene Parameter wie das Alter, das Geschlecht, die Größe und das Gewicht der Patient*Innen erhoben. Von Interesse war ebenfalls, ob die Patient*Innen täglich rauchen. Als Grenzzahl wurden 10 Zigaretten pro Tag gesetzt (Kinane und Radvar, 1997). Die Patient*Innen sollten zu Beginn ihrer Therapie erhöhte Sondierungstiefen und klinischen Attachmentverlust in der Front gehabt haben. Zusätzlich eine geschlossene Dentition in der Oberkieferfront. Wichtig war zudem, dass die Frontzähne der Oberkiefer frei beweglich waren, d.h. sich weder in einer prothetischen Schienung im Sinne einer Brücke befinden, noch stark verschachtelt in engem Kontakt zu ihren jeweiligen Nachbarzähnen standen. Eine genaue Untersuchung der Mundhygiene wurde durchgeführt. Dies beinhaltete die Erstellung des Plaqueindex nach O'Leary (O'Leary et al., 1972)) und der Blutung bei Sondierung (BOP) nach (Axelsson und Lindhe, 1981) anhand einer sechs-punkt Messung. Anhand eines aktuellen Röntgenbildes und des Attachmentstatus wurde der Schweregrad der Parodontitis ermittelt. Dafür durfte das Röntgenbild nicht älter als ein Jahr alt sein. Für die Auswahl des Testzahnes gab es einige Anforderungen. Der Frontzahn musste sich im Oberkiefer befinden und mindestens 25 Prozent Knochenabbau aufweisen. Der Zahn wurde nach den Kriterien ausgewählt und klinische Fotos erstellt. Nach Sicherstellung der Ein- und Ausschlusskriterien wurde eine Abformung im Oberkiefer zur Herstellung einer individuellen Schiene genommen, welche für die biomechanische Messung des Testzahnes benötigt wurde.

Zuletzt erhielten die Patient*Innen einen GOHAI Fragebogen (Abbildung 9) zur persönlichen Einschätzung der Folgen der Parodontitis auf ihr persönliches Wohlbefinden. Bei jeder der 12 Fragen sollten die Teilnehmer*Innen eine Antwort geben und sich dabei auf die persönlichen Erfahrungen in den letzten 3 Monaten beziehen. Die Kreuzchen wurden dabei nach spontanem und individuellem Gefühl gesetzt. Der Fragebogen wurde in der Regel bei der Aufnahme des/der Patient*In in der Screening Examination erstellt und Rückfragen bzw. Verständnisfragen geklärt. Die Antworten können auf einer Likert-Skala gesetzt und Punkte von 1 - 5 vergeben werden (1 = immer; 2 = oft; 3 = manchmal; 4 = selten; 5 = nie). Es können zwei verschiedene Scores des GOHAI berechnet werden. Für

die Berechnung der Scores müssen einige Antworten invertiert werden (Fragen 3, 5 und 7), da diese Fragen gegenteilig formuliert, aber auf derselben Skala gemessen werden (Hassel et al., 2008). Der additive Wert (ADD-GOHA) ist ein Summenwert, der von 12 bis 60 reicht (hohe Punktzahlen bedeuten wenige Probleme bzw. Einschränkungen). Der einfache Zählwert (SC-GOHA) ist eine Zählung der Punkte mit den Antworten 'manchmal', 'oft' und 'immer' und reicht von 0 bis 12 (12 bedeutet schlechte Mundgesundheit) (Hassel et al., 2008).

Probanden wurden befragt, wie oft sie aufgrund Ihrer Mundsituation Art und Menge der Nahrung beschränken, Probleme beim Beißen oder Kauen härterer Speisen haben, der Schluckvorgang ohne Einschränkung durchführbar ist, ihre Zähne Probleme beim klaren Sprechen verursachten und wie oft sie in der Lage waren, ohne Unbehagen zu essen. Es ist von Interesse, wie oft die Patient*Innen Kontakte zu Menschen aufgrund des Zustandes ihrer Zähne eingeschränkt haben, wie oft sie zufrieden mit dem Aussehen ihrer Zähne und des Zahnfleisches waren, wie oft Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich eingenommen wurden und wie oft ein Besorgnis bezüglich ihrer Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch vorlag. Zuletzt wurde noch in Erfahrung gebracht, wie oft sich die Patient*Innen unsicher oder gehemmt aufgrund der Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch fühlen, wie oft sie Unbehagen fühlen vor anderen Menschen zu essen und wie oft Überempfindlichkeiten auf heiß, kalt oder süß auftreten.

Vor den Messungen an den Proband*Innen wurde eine Kalibrierung der Untersucherin durchgeführt. Dafür wurden Messungen der Sondierungstiefen an Übungsmodellen unter Aufsicht durchgeführt, die alle von einer unabhängigen Untersucherin überprüft wurden. Insgesamt musste man alle Sondierungstiefen dreimal aufnehmen und kontrollieren lassen. Gemessen wurde mit einer Parodontalsonde UNC15 (Hu Friedy), die eine Skalierung in 1-Millimeterschritten bis 15 mm aufweist. Alle Testzähne in der vorliegenden Untersuchung wurden von derselben Untersucherin gemessen.

Evaluation Mundgesundheit

INDEX GOHAI



Durch eine Parodontitis und den damit verbundenen Symptomen (länger erscheinende Zähne, Zahnfleischrückgang, Zahnlockerungen, Zahnfleischentzündung, Blutung, etc.) treten bei vielen Patienten Unannehmlichkeiten auf. Der subjektive Zustand schwankt wohlmöglich im Verlauf der Therapie. Wir bitten Sie, den nachfolgenden Fragebogen sorgfältig auszufüllen damit wir ein besseres Bild von Ihrem Befinden erhalten, und so ggf. auf individuelle Bedürfnisse besser eingehen können.

Patient No		☐ vor antiinfektöser Therapie	☐ nach antiinfektöser Therapie
------------	----------------------	--	---

Alter:

Kardiovaskuläre Erkrankung ☐ Diabetes typ 2 ☐

Rheumatoide Arthritis ☐

Chronic Nierenerkrankung ☐ Übergewicht ☐

chronisch obstructive pulmonäre Erkrankung ☐

Bitte setzen Sie ein Kreuzchen pro Zeile.

	immer	oft	manchmal	selten	nie
1) Wie oft beschränken Sie Art und Menge der Nahrung, die Sie essen aufgrund Ihrer Zähne?	☐	☐	☐	☐	☐
2) Wie oft hatten Sie Probleme beim Beißen oder Kauen von z.B. Fleisch oder Äpfeln?	☐	☐	☐	☐	☐
3) Wie oft konnten Sie ohne Probleme schlucken?	☐	☐	☐	☐	☐
4) Wie oft haben Ihre Zähne Probleme beim klaren Sprechen verursacht?	☐	☐	☐	☐	☐
5) Wie oft konnten Sie essen ohne Unbehagen?	☐	☐	☐	☐	☐
6) Wie oft haben Sie Kontakte zu Menschen eingeschränkt aufgrund des Zustands Ihrer Zähne?	☐	☐	☐	☐	☐
7) Wie oft waren Sie zufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und Ihres Zahnfleisches?	☐	☐	☐	☐	☐
8) Wie oft haben Sie Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich eingenommen?	☐	☐	☐	☐	☐
9) Wie oft waren Sie besorgt über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch?	☐	☐	☐	☐	☐
10) Wie oft fühlten Sie sich unsicher oder gehemmt wegen der Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch?	☐	☐	☐	☐	☐
11) Wie oft fühlten Sie Unbehagen, vor anderen Menschen zu essen?	☐	☐	☐	☐	☐
12) Wie oft traten Überempfindlichkeiten auf heiß, kalt oder süß auf?	☐	☐	☐	☐	☐

Abb. 9: Geriatric/General oral health assessment Index Fragebogen mit 12 Fragen

2.1.2 Aufnahme der biomechanischen Eigenschaften

Im Anschluss an die Aufnahme der Patient*Innen wurde die erste Datenerfassung durchgeführt, die im Rahmen der bereits behandelten Patient*Innen innerhalb von 4-5 Wochen nach dem parodontalen Recall erfolgte. Nach erneuter Überprüfung der Bereitschaft des oder der Patient*In, an der Studie teilzunehmen, wurde die Anamnese mit allen Medikamenten erneut abgefragt. Danach erfolgte einer weiteren kurzen dentalen Befundaufnahme, der Überprüfung der Compliance und der Mundhygiene mit Hilfe des Plaqueindex (PII) (O'Leary et al. 1972). Parodontale Parameter, wie das Vorhandensein von Plaque, der klinische Attachmentverlust (CAL), die Taschensondierungstiefen (TST), der BOP, das Vorhandensein von Pus, die Breite der keratinisierten Gingiva in mm wurden an jeweils sechs Messstellen / Zahn aufgenommen (mesio-bukkal, bukkal, disto-bukkal, mesio-palatinal, palatinal, disto-palatinal). Anschließend erfolgte die erste biomechanische Messung der Beweglichkeit des Testzahnes. Der genaue Ablauf der Messung ist weiter unten in Abschnitt 2.7.2 beschrieben.

2.2 Kollektiv der Proband*Innen

Die Patient*Innen sollten das Mindestalter von 18 Jahren erreicht haben, sich psychisch für eine Teilnahme an einer klinischen Studie eignen und über eine gute allgemeine Gesundheit verfügen.

Einschlusskriterien

- eine abgeschlossene aktive Phase der Parodontitistherapie, mindestens mit subgingivaler Instrumentierung
- Teilnahme an einer unterstützenden Parodontitistherapie (UPT)
- ein nicht-verblockter zentraler oder lateraler Inzisivus des Oberkiefers mit mindestens 25 Prozent parodontal bedingtem Knochenabbau

Ausschlusskriterien

- unkontrollierter Diabetes mellitus oder andere unkontrollierte systemische Erkrankungen

- Krankheiten oder Behandlungen, die die Therapie der Parodontitis beeinflussen
- Einnahme von Antibiotika
- Mundschleimhauterkrankungen
- Knochenstoffwechselerkrankungen
- orale maligne Erkrankungen
- Behandlung mit Steroiden
- Radiatio im Kopf-Hals-Bereich
- immunsuppressive Therapie
- vorliegende Schwangerschaft bzw. Stillzeit
- Konsum von 10 oder mehr Zigaretten pro Tag

2.3 Klinische Untersuchung

Im Rahmen der Studie wurden jeweils sowohl vor, als auch nach der Therapie einige klinische Untersuchungen bei den einzelnen Proband*Innen durchgeführt, die im Folgenden erklärt werden.

2.3.1 Messungen der parodontalen Parameter

Zum Zeitpunkt der Screening Examination, an der meist auch die unterstützende Parodontitistherapie stattfand, wurde ein parodontaler Attachmentstatus erhoben (siehe Abbildung 10). Gemessen wurde an sechs Messstellen mit einer Parodontalsonde UNC15 (Hu Friedy, Frankfurt am Main, Deutschland), die eine Skalierung in 1-Millimeterschritten bis 15mm aufweist. Nach der Sondierung der Zahnfleischtaschen in mm, wurden Blutung bei Sondierung (BOP) und Austritt von Pus dichotom beurteilt (als vorhanden oder nicht vorhanden). Der BOP war positiv, wenn sie innerhalb von 15 Sekunden nach der parodontalen Sondierung auftrat. Es folgt die Eintragung des genauen Gingivaverlaufes, der ebenfalls an denselben sechs Messstellen mit der Parodontalsonde in mm gemessen wurde. Relevante weitere Daten waren die Eintragung des Lockerungsgrades, der konventionell nach Miller (1938) beurteilt wurde und die Angabe des Furkationsbefalls nach Hamp et al. 1975 (Hamp et al., 1975), die jeweils in römischen Ziffern von I - III angegeben wurden.

Der Plaqueindex (PII) nach O'Leary (O'Leary et al., 1972) und der BOP nach Axelsson (Axelsson und Lindhe, 1981) wurden prozentual angegeben und auf die gleiche Weise erfasst. Der Plaqueindex hat, neben der Bestimmung des durchschnittlichen Plaquebefalls, die Aufgabe, das Plaque- bzw. Reinigungsmuster des oder der Patient*In zu erfassen. Nach Anfärbung der Zähne mit einer geeigneten Färbelösung (z.B. Mira-2-ton® von miradent, Duisburg, Deutschland) wurden die von Plaque befallenen Stellen in ein Befundblatt eingetragen. Untersucht wurden jeweils sechs Stellen pro Zahn. Der Plaqueindex ergab sich aus der Differenz der mit Plaque befallenen Stellen und der Anzahl aller Messstellen multipliziert mit 100.

Der Blutungsindex wird erhoben, indem sechs Messstellen pro Zahn auf die An- oder Abwesenheit von Blutung nach Sondieren bei der Bestimmung der parodontalen Sondierungstiefe untersucht werden. Dabei ist es wichtig, dass möglichst mit standardisiertem Sondierungsdruck vorgegangen wird. Es wurde mit einer leichten Sondierungskraft von 0,25 N gemessen, um Blutungen durch Traumata zu vermeiden (Mayfield et al., 1996; Lang et al., 1991; Karayiannis et al., 1992). Ähnlich wie beim Plaqueindex wurde dabei ohne Graduierung an sechs Messstellen pro Zahn erfasst, ob Blutung bei Sondieren vorhanden war oder nicht. Der Blutungsgrad wurde ebenfalls in Prozent angegeben. Sowohl der Plaqueindex, als auch der BOP eignen sich sehr gut zur Kontrolle der individuellen Mundhygiene im Rahmen der unterstützenden Parodontitistherapie und zeigt dabei auch da Mitwirken des/der Patient*In (Compliance).

2.3.2 Parodontologische Diagnose

Anhand der vorhandenen klinischen und röntgenologischen Unterlagen wurden die Diagnosen nach der neuen Nomenklatur festgestellt (siehe 1.3.2; (Papapanou et al., 2018)).

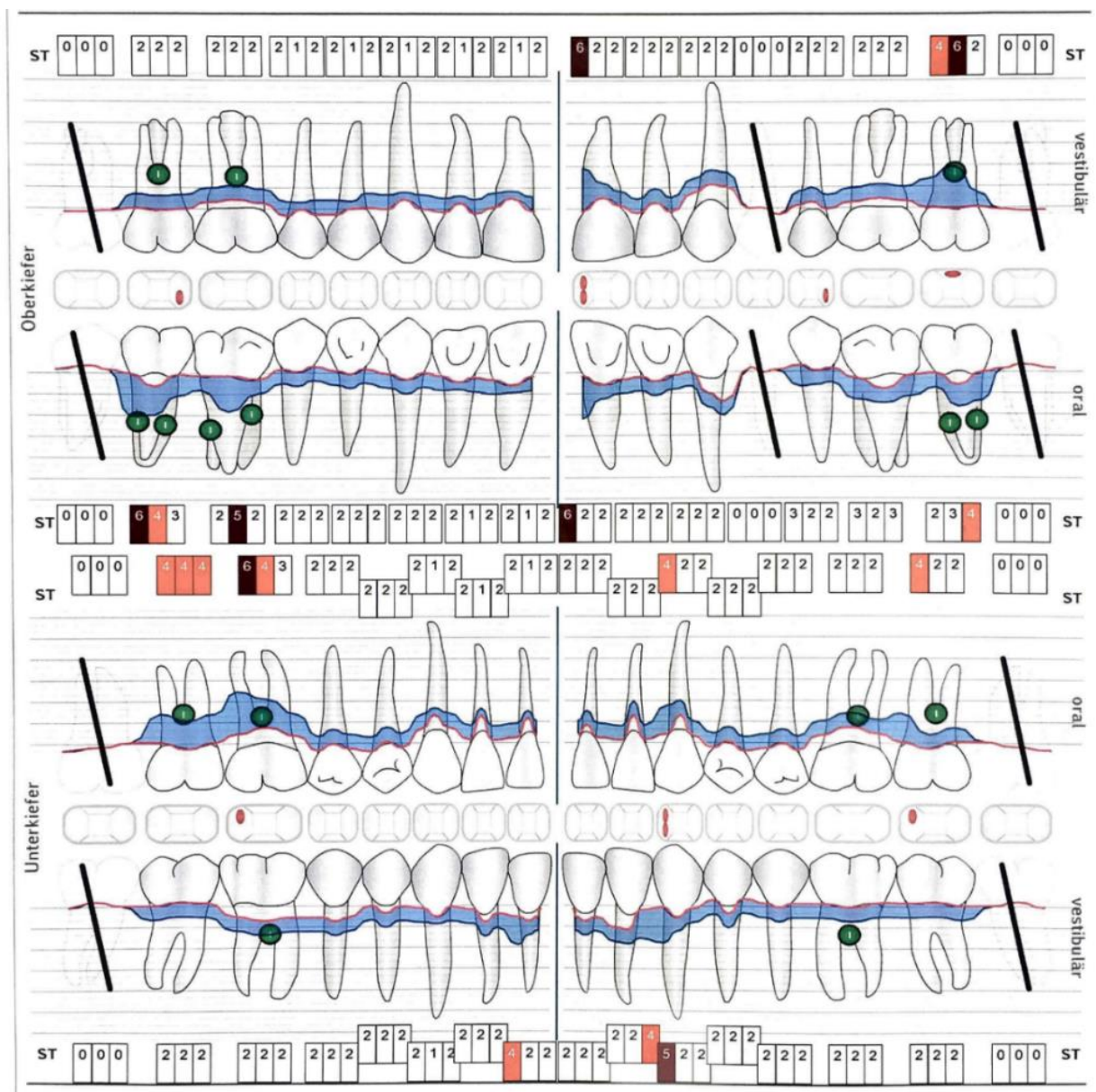


Abb. 10: Beispielhafter parodontaler Attachmentstatus eines Patienten dieser Studie (Pa-roStatus.de, Berlin, Deutschland)

2.3.3 Röntgenologische Analyse

Es wurden keine Röntgenaufnahmen im Rahmen der Studie angefertigt. Es wurden nur die aufgenommen, die für die sonstige Therapie wichtig waren. Vorhandene aktuelle Röntgenaufnahmen wurden zur Sicherstellung des Attachmentverlusts benutzt. Die Länge der Schmelz-Zementgrenze bis zum radiologischen Apex und die Länge von der Schmelz-

Zementgrenze bis zum Limbus alveolaris wurde in Millimetern gemessen (siehe Abbildung 11). Aus diesen Angaben konnte der Knochenabbau in Prozent errechnet werden.

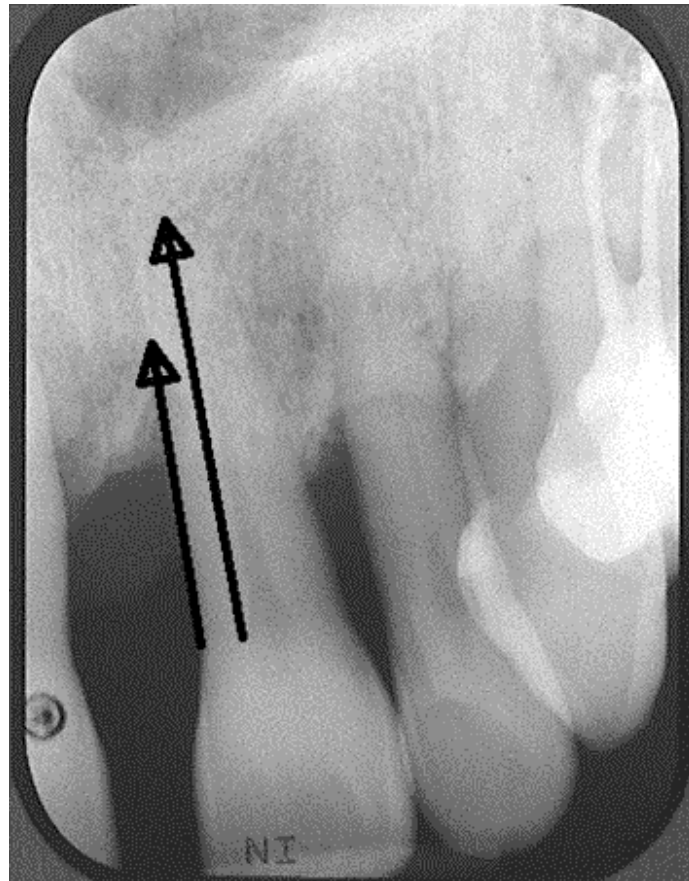


Abb. 11: Beispielhafte Messung des röntgenologischen Knochenabbaus, Linker Pfeil zeigt Distanz von der Schmelz-Zementgrenze bis zum Limbus alveolaris, Rechter Pfeil zeigt Distanz der Schmelz-Zementgrenze bis zur Wurzelspitze (eigenes Foto eines Röntgenbilds)

2.4 Messprotokolle

Um möglichst genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, musste bei jedem/jeder Proband*In ein Messprotokoll (Tabelle 1) eingehalten werden.

Jede/r Proband*In, der/die Teil dieser Studie ist war bereits in der UPT (unterstützenden Parodontitis Therapie). Im Anschluss an einen dieser UPT Termine wurde in einem Zeitabstand von bis zu fünf Wochen ein Messtermin durchgeführt, der insgesamt drei Messungen beinhaltete. Diese unterschieden sich in den Parametern der Belastung - und

Entlastungszeit (0,5 Sekunden, 1 Sekunde und 10 Sekunden), in der Anzahl der Messschritte (20, 40, 40) und in der Dauer pro Messschritt (50 ms, 50 ms und 500 ms) (Tabelle 1).

Tab. 1: Messprotokoll für die klinischen Messungen dieser Studie

Belastungszeit	Entlastungszeit	Gesamtzeit	Auslenkung	Anzahl pro Messschritt	Dauer pro Messschritt
0,5s	0,5s	1s	0,2mm	20	50ms
1s	1s	2s	0,2mm	40	50ms
10s	10s	20s	0,2mm	40	500ms

2.5 Messung der biomechanische Parameter

Zu Beginn jeder klinischen Messung musste zunächst der Aufbau und die Funktion des intraoralen Belastungsgerätes überprüft werden. Dafür wurden der Steuerrechner und die Steuereinheit verbunden und die individuell angefertigte Testschiene mit ihrem Gewinde mit der Belastungseinheit verschraubt. Zu diesem Zeitpunkt sollte der Druckstempel frei liegen und keine Kraft aufgezeichnet werden. Dementsprechend sollte die Kraftanzeige des Steuerrechners 0 N anzeigen.

Der Messvorgang sollte gewährleisten, dass die Messungen immer gleich ablaufen. Dafür wurde der/die Patient*In im Sitzen platziert und genaue Anweisungen zum Ablauf der Testung gegeben. Die Arme sollten angewinkelt und die Ellenbogen auf einer festen Unterlage abgestützt werden. Der Rücken war möglichst gerade und die Beine parallel mit einem sicheren Kontakt zum Boden. Nach der Anprobe der Schiene und einer Kontrolle der Passgenauigkeit, konnte die Messung beginnen. Die Herstellung der Schiene und die Beschreibung der Messeinheit werden in den folgenden Abschnitten 2.6 bis Abschnitt 2.7.2 beschrieben. Der/die Patient*In nahm die oben genannte Position ein und die Aufbiss-schiene mit dem verschraubten Druckstempel wurde im Mund des/der Patient*In eingesetzt (siehe Abbildung 23).

2.6 Herstellung der Modelle und der individuellen Testschienen

Um die Belastungseinheit des intraoralen Belastungsgeräts während des Testvorgangs stabil intraoral fixieren zu können, wurden im Oberkiefer der Patient*Innen individuelle Schienen hergestellt. Dafür wurden mit Alginat (Pluradent, Offenbach am Rhein, Deutschland) Abformungen der Oberkiefer genommen und innerhalb von 30 Minuten nach Abdrucknahme mit Superhartgips (Pluradent, Offenbach am Rhein, Deutschland) ausgegossen. Die zeitliche Nähe war wichtig, um die Dimensionsstabilität der Abformung nicht zu gefährden. Abbildung 12 zeigt ein fertiges Modell.



Abb. 12: Modell eines Oberkiefers aus Superhartgips (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Als Tiefziehschiene wurde die Erkoloc-pro der Firma Erkodent (Erkodent Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler, Deutschland) verwendet (siehe Abbildung 13).

Diese hat einen Durchmesser von 120 mm, eine Dicke von 3mm, eine Tiefziehtemperatur von 165 Grad Celsius und eine Heizzeit von 160 Sekunden. Die Schiene ist zweigeteilt in

eine harte und eine weiche Schicht. Die weiche Schicht, die den Zähnen bzw. dem Gaumen zugewandt ist, soll den Tragekomfort erhöhen. Die harte äußere Schicht dagegen soll die Stabilität in Form einer ausreichenden Härte garantieren. Die harte Seite besteht aus einem Copolyester (PETG), die weiche Seite aus Polyurethan (TPU).



Abb. 13: Linke Seite: Verpackung der verwendeten Schiene der Firma Erkodent, Rechte Seite: Schiene vor dem Einlegen in das Tiefziehgerät (Fotos zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Das entstandene Modell aus Superhartgips wurde beschliffen und in Form getrimmt. Nach der vom Hersteller vorgegebenen Heizzeit von 160 Sekunden, wurde die Schiene mit Hilfe eines Tiefziehgerätes der Firma Erkodent (Abbildung 14) unter Bildung eines Vakuums passgenau auf die Zahnreihe und den Gaumen gezogen (Abbildung 15, linkes Bild) und war so individuell auf den oder die Patient*In angepasst.



Abb. 14: Tiefziehgerät der Firma Erkodent. Durch Bildung eines Vakuums wird die dentale warmgeformte Tiefziehfolie über das Gipsmodell des Patienten gezogen (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Nach der vorsichtigen Abnahme der Schiene von dem Gipsmodell und Entfernung der Isolation- und Platzhalterfolie (siehe Abbildung 15, rechtes Bild), wurde der zu messende Oberkiefer Frontzahn unter Mitnahme der Hälfte der Fläche des Nachbarzahnes freigelegt (siehe Abbildung 16). Dies gewährleistete eine störungsfreie Beweglichkeit des Testzahnes und vermied eine Vorbelastung des Testzahnes durch die Schiene. Vestibulär wurde die Schiene so eingekürzt, dass der Rand in Höhe des Zahnäquators lag. Dies sorgte für einen guten Halt ohne zu klemmen.

Dorsal wurde die Schiene so weit reduziert, dass einerseits die Stabilität vorhanden blieb, aber andererseits kein Würgereiz ausgelöst wurde. Die Schiene ermöglichte es, den

Druckstempel des intraoralen Belastungsgeräts ohne direkten Kontakt zum Testzahn im Mund des/der Patient*In möglichst stabil zu befestigen, ohne die Beweglichkeit des Testzahnes einzuschränken. Dies gelang durch eine gute okklusale Auflage der Schiene und eine ausreichende Ausdehnung der Schiene auf den Gaumen des/der Patient*In.

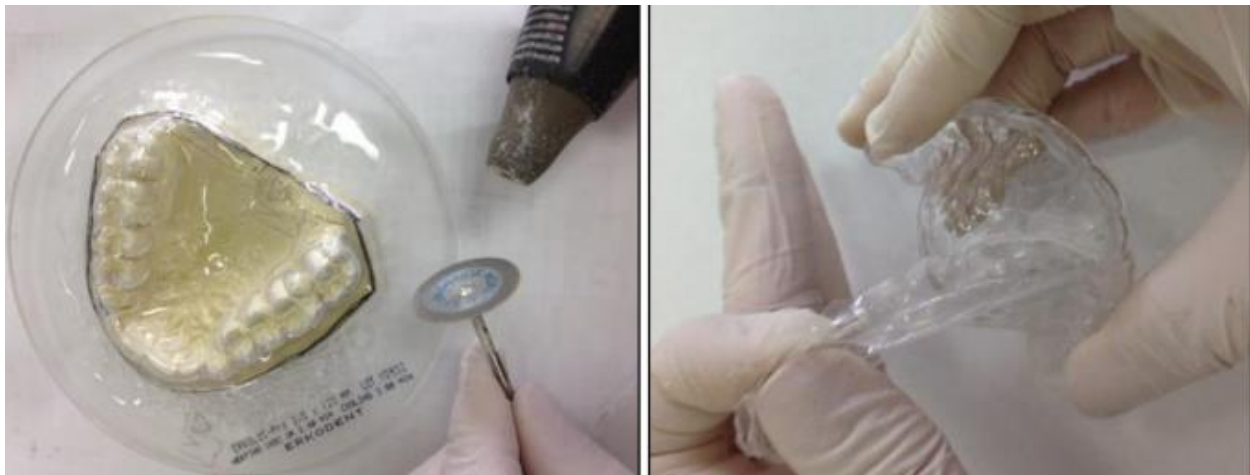


Abb. 15: Links: Modell mit tiefgezogener Aufbissschiene, Rechts: Schiene nach Ablösung vom Modell, Entfernung der Platzhalterfolie (Fotos zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)



Abb. 16: Bearbeitete individuelle Schiene mit Aussparung für den Testzahn und reduzierter Gaumenlänge (Fotos zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

In einer speziellen Gussform wurden Kunststoffblöckchen aus dem Prothesenkunststoff (Methylmethacrylat) PalaXpress der Firma Heraeus (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) hergestellt (siehe Abbildungen 17 und 18).

Die Kunststoffblöckchen bestanden aus zwei Teilen (Abbildung 17), von dem der eine Teil ein Gewinde aufwies. Dieses wurde mit Hilfe einer Schraube in der Gussform hergestellt, um die der Kunststoff gegossen wurde. Das Gewinde war notwendig, um die Belastungseinheit des intraoralen Belastungsgerätes mit der Testschiene fest zu verschrauben (siehe Abbildung 20). Dazu musste beim Anbringen der Klötzchen an die Schienen darauf geachtet werden, dass der Schraubkanal möglichst senkrecht zur Zahnachse und zentral auf der vestibulären Fläche des Zahnes steht. Vor allem bei leicht gekippt stehenden Testzähnen konnte das sehr unterschiedlich aussehen, da der Druckstempel möglichst flächig auf der Zahnkrone aufkommen sollte. Der letzte Schritt bestand in einer Säuberung und leichten Politur, danach war die Schiene einsatzbereit (siehe Abbildung 19). Es wurden nur Oberkieferzähne als Testzähne ausgewählt, um eine gewissen Standardisierung zu gelangen.



Abb. 17: Links: Gussform für Kunststoffverankerungseinheiten, Rechts: PalaXpress Prothesenkunststoff der Firma Heraeus Kulzer (Fotos zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)



Abb. 18: Nach der Polymerisation des Kunststoffes können die Klötzchen entnommen und die Schrauben entfernt werden (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)



Abb. 19: Aufbissschiene nach Politur, links okklusale Ansicht, Mitte labial-vestibuläre Ansicht, Rechts: bukkal-vestibuläre Ansicht (Fotos zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

2.7 Intraorales Belastungsgerät

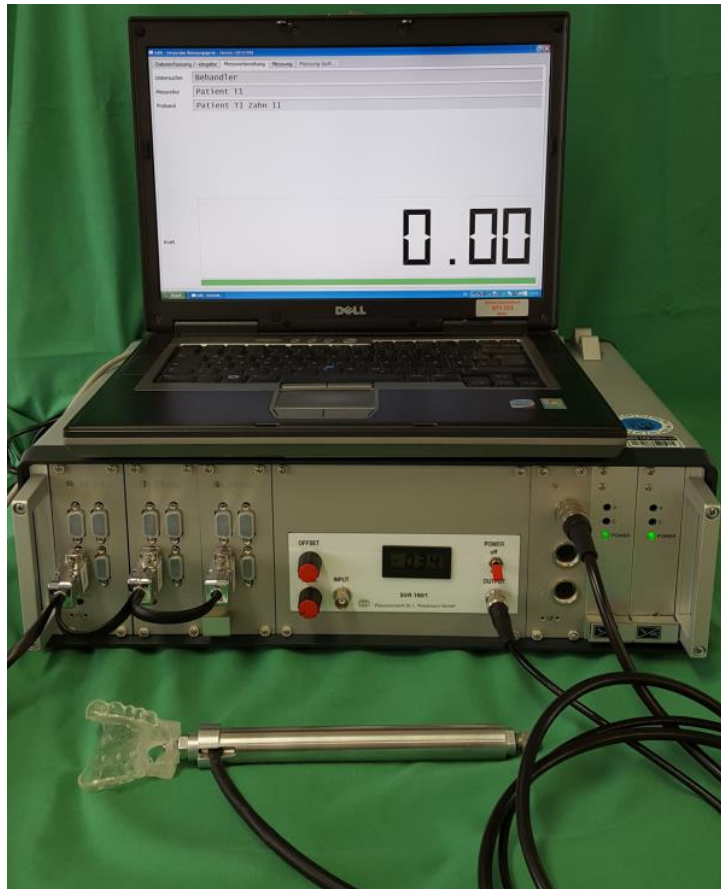


Abb. 20: Intraorales Belastungsgerät nach (Keilig et al., 2016) mit einer individuellen Schiene, die an der Belastungseinheit verschraubt ist (Bild zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Die Messung der Zahnbeweglichkeit wurde mit einem intraoralen Belastungsgerät (IOBG) durchgeführt, das in Abbildung 20 dargestellt ist und im Rahmen einer Studie von (Keilig et al., 2016) vorgestellt wurde. Es besteht aus den drei Baueinheiten Belastungseinheit, Messeinheit und Steuereinheit.

Die Messeinrichtung wurde im Rahmen einer naturwissenschaftlichen Dissertation von Drolshagen entwickelt (Drolshagen, 2012) und dient der Erfassung des Kraft-Auslenkungsverhaltens von Zähnen unter kontrollierter physiologischer Belastung zu unterschiedlichen Belastungszeiten und -geschwindigkeiten. So können die biomechanischen Eigenschaften des parodontalen Ligaments untersucht werden.

Dabei wird der Testzahn unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten bewegt, wobei die physiologische Zahnbeweglichkeit von 0,20 mm bzw. 200 μm nicht überschritten wird

(Keilig et al., 2020), und die dazu benötigte Kraft ($F_{\max}$) ermittelt. Die durch die Krafteinwirkung resultierende Auslenkung des Zahnes kann so gemessen werden (Drolshagen et al., 2011) .

2.7.1 Aufbau und Funktion der Belastungseinheit



Abb. 21: Schematischer Aufbau der Belastungseinheit (aus Druckstempel, Druckkraftsensor und piezoelektrischem Aktuator) integriert in ein Aluminiumführungsrohr mit Stellschraube zur Feinjustierung der beweglichen Komponenten (Bild zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Der Messaufbau und seine Funktionsweise sind ausführlich in Drolshagen et al., 2011 (Drolshagen et al., 2011) beschrieben. Hier werden im Folgenden die verschiedenen Komponenten nur so weit beschrieben, wie sie zum Verständnis der im Rahmen der aktuellen Arbeit durchgeführten Messungen notwendig sind.

Die verwendete Belastungseinheit dient der Erzeugung und Übertragung von Druckkräften und besteht aus drei Untereinheiten, einem Druckstempel, einem Kraftsensor und einem piezoelektrischen Aktuator (Abbildung 21). Letzterer ist in einem Führungsrohr aus Aluminium mit einer beweglichen Stellschraube integriert (Abbildung 21).

Der piezoelektrische Aktuator mit einer maximalen Auslenkung von $210\ \mu\text{m}$ wird verwendet, um Auslenkungen und damit Kräfte auf die Zahnkrone zu übertragen. Die Größe der Aktivierung wird linear durch die Eingangsspannung des piezoelektrischen Aktuators ge-

steuert. Gleichzeitig werden die resultierenden Kräfte mit einem Ultra-Miniatur-Kraftsensor (Messbereich: 200 N) aufgenommen (Drolshagen et al., 2011). Der Testzahn wird durch die Belastungseinheit aktiviert, indem eine Druckkraft auf den Zahn übertragen wird. Vor dem Drucksensor ist ein zylinderförmiger Druckstempel mit einem Durchmesser von 4 mm positioniert, über welchen die Kraftübertragung der Belastungseinheit auf den Testzahn erfolgt. Die flache Form des Druckstempels gewährleistet einen möglichst punktuellen Kraftangriffspunkt auf die vestibuläre Fläche der Zahnkrone ohne seitliche Kräfte oder Drehmomente auf den Testzahn zu übertragen. Aufgrund seiner Materialeigenschaften, wie zum Beispiel der hohen Beständigkeit gegen Feuchtigkeit, eignet sich dieser Druckstempel aus rostfreiem Stahl besonders zur intraoralen Anwendung, da während der Messung ein Kontakt mit Speichel nicht auszuschließen ist (Drolshagen et al., 2011), (Keilig et al., 2020).

Ein Führungsrohr aus Aluminium gewährleistet eine axiale Kraftübertragung von dem piezoelektrischen Aktuator auf den Druckkraftsensor und den Druckstempel. Die Baukörper sind hierbei hintereinandergeschaltet integriert. Eine Stellschraube am Ende des Führungsrohres ermöglicht eine Justierung der beweglichen Komponenten. So kann der am Anfang des Führungsrohres sitzende Druckstempel langsam und exakt an die vestibuläre Fläche der Zahnkrone angenähert werden (Drolshagen et al., 2011).

2.7.2 Aufbau und Funktion der Steuereinheit

Abbildung 22 zeigt das gesamte intraorale Belastungsgerät, bestehen aus einem Laptop, der Ansteuerelektronik und dem bereits oben beschriebenen Handstück mit der Belastungseinheit. Auf dem Laptop läuft die Steuersoftware für die Elektronik und das Handstück. Dort werden die notwendigen Patientendaten (Patienten-Identifikator, Messreihenbezeichnung sowie optional zusätzliche Freitextkommentare) erfasst, die Belastungsparameter (Größe der Auslenkung, Dauer der Belastung, Anzahl der Messschritte bei der Belastung) eingestellt und die von der Elektronik ausgegebenen Messdaten erfasst. Diese Daten werden dann anschließend nach jeder Messung zusammen mit dem Messdatum und –uhrzeit in einer automatisch erstellten Messdatei gespeichert.



Abb. 22: Steuerrechner (Laptop) angeschlossen an die Steuereinheit (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

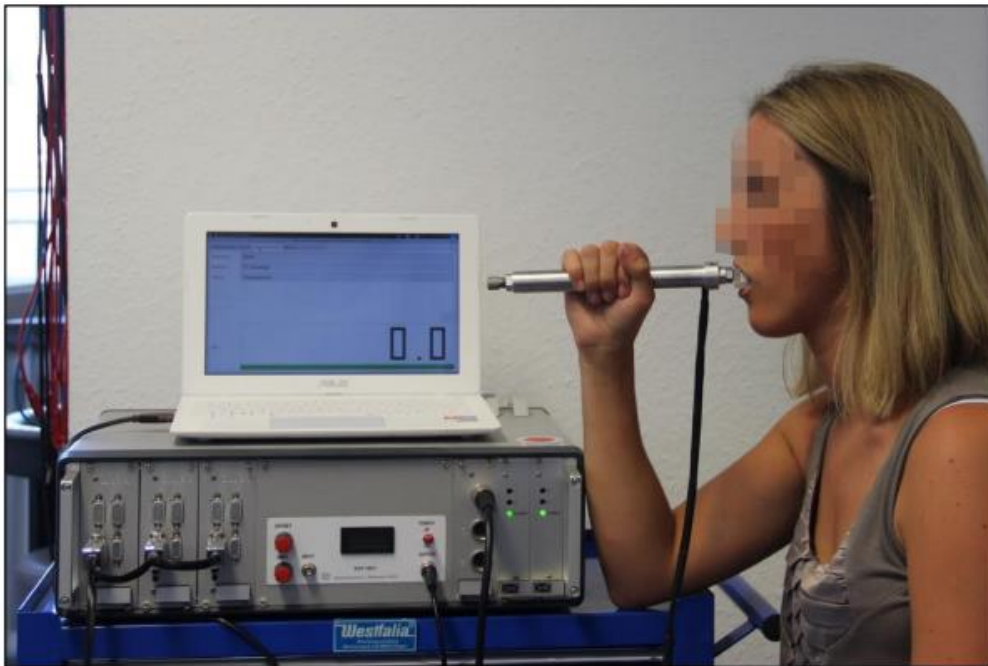


Abb. 23: Positionierung des/der „Proband*In“ zur Durchführung einer störungsfreien, reproduzierbaren Messung. Steuerrechner verzeichnet keine Krafteinwirkung (0,0 N) (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Der Druckstempel war zunächst mit Hilfe der Justierschraube soweit zurückgefahren worden, dass keinerlei Kontakt zum Testzahn des/der Patient*In vorhanden war und somit eine Vorbelastung ausgeschlossen werden konnte.

Nun umfasste der/die Patient*In das Führungsrohr der Belastungseinheit mit einer Hand oder beiden Händen und stützte den angewinkelten Ellenbogen wie beschrieben auf die Oberfläche des Tisches (Abbildung 23). Da der/die Patient*In den gesamten Vorgang der Messung in dieser Position verharren musste, war es wichtig, eine für den/die Patient*In angenehme Position einzunehmen, in welcher er/sie möglichst ruhig verweilen konnte.

Um den Tragekomfort der Testschiene die Stabilität zu erhöhen, wurden Watterollen beidseitig im Mund platziert, auf denen der oder die Patient*In zubeißen konnte. War die Position des oder der Patient*In gefunden und die Schiene im Mund sicher angebracht, konnte mit der Messung begonnen werden. Dafür wurde mit Hilfe der Justierschraube der Druckstempel vorsichtig an die vestibuläre Fläche des Testzahnes des/der Patient*In geschraubt, bis am Display des Steuerrechners ein Kraftanstieg zu verzeichnen war (siehe Abbildung 24).



Abb. 24: Steuerrechner mit digitaler Anzeige des Kraftanstieges bei Kontakt des Druckstempels mit der Zahnoberfläche des Patienten (Foto zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Keilig; Oralmedizinische Technologie, ZZMK, Bonn)

Nun wurde der Druckstempel langsam so weit zurückgefahren, dass die Kraftanzeige auf dem Steuerrechner wieder 0 N anzeigt (vgl. Abbildung 23), der Stempel allerdings noch Kontakt zur Zahnfläche aufwies, welches visuell überprüft werden musste. Im nächsten Schritt konnte die Messung über den Steuerrechner gestartet werden. Die Reihenfolge der Messungen war immer gleich. Die erste Messung war die kürzeste Messung mit einer Belastungszeit von 0,5 s. Es folgen zwei weitere Messungen, eine mit einer Belastungszeit von 1 s und eine weitere mit einer Belastungszeit von 10 s. Zwischen den Messungen wurden mindestens 5 Minuten Pause als Erholungsphase eingehalten, um eine ausreichende Relaxation des Parodontalligamentes zu gewährleisten. Die Einhaltung dieser Pause wurde innerhalb der Steuersoftware mit einem Timer kontrolliert. In dieser Zeit wurden die Schiene und die Watterollen aus dem Mund entfernt und das parodontale Gewebe konnte sich zurückstellen und die Flüssigkeitsphase sich normalisieren. Erst dann konnte mit der nächst längeren Belastungszeit begonnen werden. Der Steuerrechner zeigte für

alle Messungen Graphen an, die die Belastungs- und Entlastungsphase zeigten, sowie der maximal benötigte Kraft für die maximale erlaubte Auslenkung des Zahnes ($200\mu\text{m}$) (F_{max}), die Phase der Datenübertragung und den Endzeitpunkt der Messung.

2.8 Statistische Analysen

Die Nullhypothesen lauteten:

4. Es gibt keinen Unterschied zwischen Männern und Frauen für F_{max}
5. Das Alter hat keinen Einfluss auf F_{max}
6. Der parodontologische Zustand des Testzahnes hat keinen Einfluss auf F_{max}

Deskriptive Statistiken wurden als Mittelwerte und Standardabweichungen sowie die Spannweiten zusammengefasst. Die Mittelwerte für männliche und weibliche Proband*Innen wurden zusätzlich separat in Tabellen und Grafiken dargestellt. Um Unterschiede zwischen Männer und Frauen zu untersuchen wurden nicht-parametrischen Tests (Wilcoxon Test; Mann-Whitney Test) benutzt. Zusätzlich wurden mögliche Korrelationen zwischen klinischen und biomechanischen Messungen mit dem Spearmann-Rho Korrelationskoeffizient mit der Hilfe von IBM SPSS 27.0 Software (IBM, Armonk, NY, USA) überprüft. Das Signifikanzniveau für die Tests wurde auf 0,05 festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1 Patient*Innen Klientel

3.1.1 Allgemeine Beschreibung

In der vorliegenden Studie wurden 30 Patient*Innen untersucht, sie umfasste 17 weibliche und 13 männliche Teilnehmer*Innen zwischen 29 und 75 Jahren. Alle Patient*Innen schlossen die Studie ab. Der Altersdurchschnitt lag bei 59 Jahren. Die genaue Beschreibung der Patient*Innen kann anhand Tabelle 2 entnommen werden.

Tab. 2: Beschreibung der Patient*Innen

	Alle	Männer	Frauen
Alter (Jahre), MW $\pm$ SD Spannweite	58,8 $\pm$ 11,64 29 – 75 Jahre	58,2 $\pm$ 12,40 29 – 75 Jahre	59,3 $\pm$ 11,40 31 – 74 Jahre
Raucherstatus (n)			
Raucher	7	5	2
Nichtraucher	23	8	15
Allgemeinanamnese (ohne Befund)	26	13	13
BOP (%) MW $\pm$ SD (Spannweite)	13,6 $\pm$ 10,18	16,7 $\pm$ 12,83	11,9 $\pm$ 7,63
PII (%) MW $\pm$ SD (Spannweite)	31,8 $\pm$ 13,15	34,1 $\pm$ 11,58	30,0 $\pm$ 14,32
Stadium (n) (I / II / III / IV) n; Patient*Innen (Papapanou et al., 2018)	1 / 11 / 15 / 3	0 / 7 / 4 / 2	1 / 4 / 11 / 1
Grad (n) (A / B / C) n; Patient*Innen (Papapanou et al., 2018)	4 / 18 / 8	2 / 6 / 5	2 / 12 / 3

Die allgemeine Anamnese der Patient*Innen war überwiegend unauffällig, nur vier Patient*Innen hatten Erkrankungen, die für eine Erkrankung an Parodontitis relevant sein können z.B. Diabetes Mellitus (siehe Tabelle 2). Sieben von 30 Patient*Innen rauchten, aber weniger als 10 Zigaretten / Tag, davon fünf Männer und zwei Frauen. Beides hatte jedoch keine Bedeutung für die vorliegende Untersuchung.

3.1.2 Parodontologischen Daten

Bei allen Patient*Innen lag eine klinisch und röntgenologisch dokumentierte und bestätigte Diagnose vor. Die wichtigsten parodontologischen Daten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tab. 3: Parodontologische Daten der Testzähne. Klinischer Attachmentniveau (CAL) wird für die Stelle mit dem höchsten Knochenabbau angegeben, Taschensondierungstiefen (TST) und Breite der keratinisierten Gingiva korrespondieren mit der Stelle.

	Alle	Männer	Frauen
Max. ST (mm) (korrespondierende Taschensondierungstiefe (TST) zur max. CAL) MW ± SD	3,7 ± 1,21	3,8 ± 0,83	3,6 ± 1,46
Max. CAL (mm) (Clinical attachment loss) MW ± SD	4,7 ± 2,20	4,9 ± 2,47	4,5 ± 2,03
Knochenabbau (%) MW±SD	33,7 ± 13,17	34,1 ± 13,48	33,4 ± 13,33
Breite der keratinisierten Gingiva (mm) MW ± SD	4,1 ± 1,54	4,4 ± 2,02	3,9 ± 1,05
Lockerungsgrad (n) (0 / 1 / 2 / 3) (n; Zähne) (Miller 1983)	20 / 8 / 2 / 0	8 / 4 / 1 / 0	12 / 4 / 1 / 0

Die Diagnose erfolgte anhand von klinischen und röntgenologischen Unterlagen entsprechend der neuen Klassifikation (Papapanou et al., 2018). Die Patient*Innen befanden sich alle in der unterstützenden Parodontaltherapie (UPT). Es wurden ausschließlich die zentralen Inzisivi der Oberkiefer in die Untersuchung eingeschlossen. Der Knochenabbau sollte mindestens bei 25 % liegen, es verteilte sich mit 16 Patient*Innen mit 25 % bis 33 % Knochenabbau, 13 der Patient*Innen hatten zwischen 33 % und 66 % Knochenabbau und ein/e Patient*In zeigte mehr als 66 % Knochenabbau.

3.2 *In-vivo* Messungen

In-vivo Messungen der Zahnbeweglichkeit mit Hilfe des intraoralen Belastungsgerätes ergaben interindividuelle Unterschiede für die drei unterschiedlichen untersuchten Belastungszeiten (0,5 Sekunden, 1 Sekunde, 10 Sekunden) (Konermann et al., 2017; Jepsen et al., 2023). Die Belastungszeiten stellen die aktive Phase des Druckstempels dar. Jede aufgezeichnete Kurve in den im Folgenden dargestellten Diagrammen repräsentiert Messwerte für eine Proband*In. Im weiteren Text werden die Teilnehmer als Proband*Innen und nicht als Patient*Innen bezeichnet. Alle Proband*Innen konnten entsprechend den Vorgaben untersucht werden und zeigen prinzipiell das gleiche Muster einer aufsteigenden Kurve der Belastung, einer flachen Plateauphase und einer abfallenden Erholungsphase. Es unterscheidet sich nur darin, dass einige Zähne einige Zähne mehr bzw. weniger Kraft für ihre Auslenkung benötigen. Alle Proband*Innen konnten entsprechend den Vorgaben untersucht werden.

Abbildung 25 zeigt das Muster einer Kraft-Auslenkungskurve. Diese besteht aus einer Belastungsphase (rot), einer Plateauphase (grün) und einer Erholungsphase (weiß). In der Belastungsphase wird der Testzahn aktiv durch den Druckstempel bis 200 μm innerhalb der vordefinierten Belastungszeit ausgelenkt. Die Kurve und somit die Kraft (N) steigen mit zunehmender Auslenkung an. Die anschließende Plateauphase ist flach und leicht abnehmend, da die Kraft ihr Maximum (F_{max}) dann bereits erreicht hat und nun noch über eine gewisse Zeit messbar bleibt. Zuletzt kommt es zu einer Erholungszeit, in der die Kurve des Diagramms und damit auch die Kraft wieder abfallen.

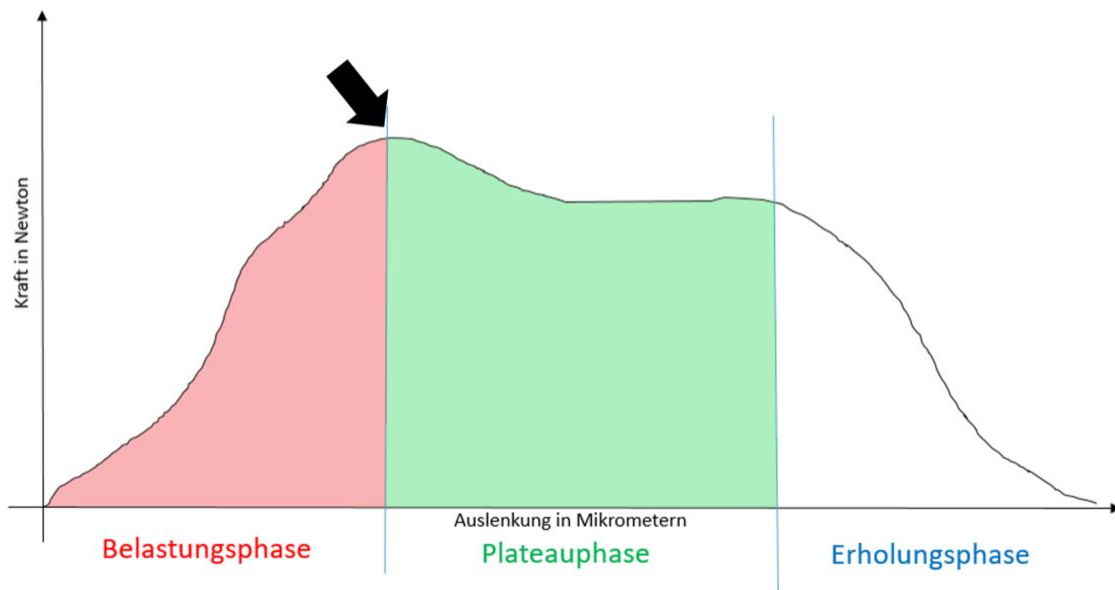


Abb. 25: Vereinfachte Darstellung einer Kraft-Auslenkungskurve mit einer Phase der Belastung (rot), einer anschließenden Plateauphase (grün) und der Erholungsphase (weiß); schwarzer Pfeil zeigt den Punkt der Maximalen Kraft (F_{max}) (eigene Grafik)

3.2.1 Messzeit 0,5 Sekunden

Die auf Abbildung 26 dargestellten Kurven zeigen die Messwerte aller dreißig Proband*Innen (m/w) bei einer Belastungsdauer von 0,5 Sekunden. Es handelt sich um ein Kraft-Auslenkungsdiagramm, wobei die X-Achse die Auslenkung in Mikrometern (μm) und die Y-Achse die Kraft in Newton (N) darstellen.

Zur Analyse wurde aus den vollständigen Kurven pro Messung und Proband*In jeweils die Maximalkraft (F_{max}) extrahiert. Die Spannbreite der gemessenen Maximalkräfte liegen bei $F_{max} = 1,53\text{N}$ bis $24,55\text{N}$ und die meisten Maximalkräfte wurden vor Erreichen der maximalen Auslenkung des Druckstempels von $200\text{ }\mu\text{m}$ gemessen. Der Mittelwert liegt bei $F_{max} = 13,2\text{ N} \pm 4,92\text{ N}$ (Tabelle 4). Zwei Proband*Innen # 202 (Brauner Pfeil) als niedrigster Wert und # 206 (Gelber Pfeil) als höchster Wert (siehe Abbildung 26) liegen außerhalb des Kraftbereichs, in dem die meisten Proband*Innen liegen und können als Ausreißer gewertet werden.

Tab. 4: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden

	Belastungsgeschwindigkeit 0,5 Sekunden Mittelwert $\pm$ Standardabweichung; (Spannweite)		
	Maximalkraft (N)	Auslenkung (μm)	Schritt
Alle	13,2 $\pm$ 4,92 (1,53 – 24,55)	177,3 $\pm$ 15,52 (120 – 200)	9,5 $\pm$ 1,28 (9 – 14)
Weiblich	13,1 $\pm$ 5,07 (1,53 – 21,46)	177,6 $\pm$ 15,62 (120 – 200)	9,5 $\pm$ 1,28 (9 – 14)
Männlich	13,4 $\pm$ 4,92 (7,10 – 24,55)	176,9 $\pm$ 16,01 (140 – 200)	9,5 $\pm$ 1,33 (8 – 13)

3.2.1.1 Alle, Messzeit 0,5 Sekunden

Eigentlich folgen alle individuellen Kurven demselben Muster einer ansteigenden Kurve der Belastung, einer Plateauphase mit einem „Knick“ nach Erreichen der F_{max} und einer abfallenden Kurve. Dies wird generalisiert in der dick gedruckten roten Kurve deutlich (siehe rotes Textfeld und roten Pfeil), die die Mittelwerte der Messwerte aller Proband*Innen bei der genannten Belastungszeit darstellt. Bei allen weiteren Grafiken sind ebenfalls Mittelwerte mit einer roten Kurve hervorgehoben, aber nicht mehr mit einem Pfeil markiert. Bei einer Messung von 0,5 Sekunden laufen die Messungen in 20-Schritten ab. Ein „Knick“ der Kurve tritt am häufigsten im Anschluss an die maximale Auslenkung bei 200 μm auf (grauer Pfeil). Die Kräfte brechen ab diesem Punkt schlagartig ein und haben ihren Tiefpunkt bei einer Auslenkung von 180 μm , wenn der Druckstempel sich bereits zurückgezogen hat. Anschließend steigen die Kräfte über den nächsten Schritt wieder an bei einer Auslenkung von 160 μm . Allerdings werden nicht mehr die gleichen Kräfte wie zu Beginn des Knicks erreicht. Eine kurze leicht abfallende Plateauphase hält noch ein bis zwei Schritte an, bevor die Erholungsphase beginnt und die Kräfte abfallen.

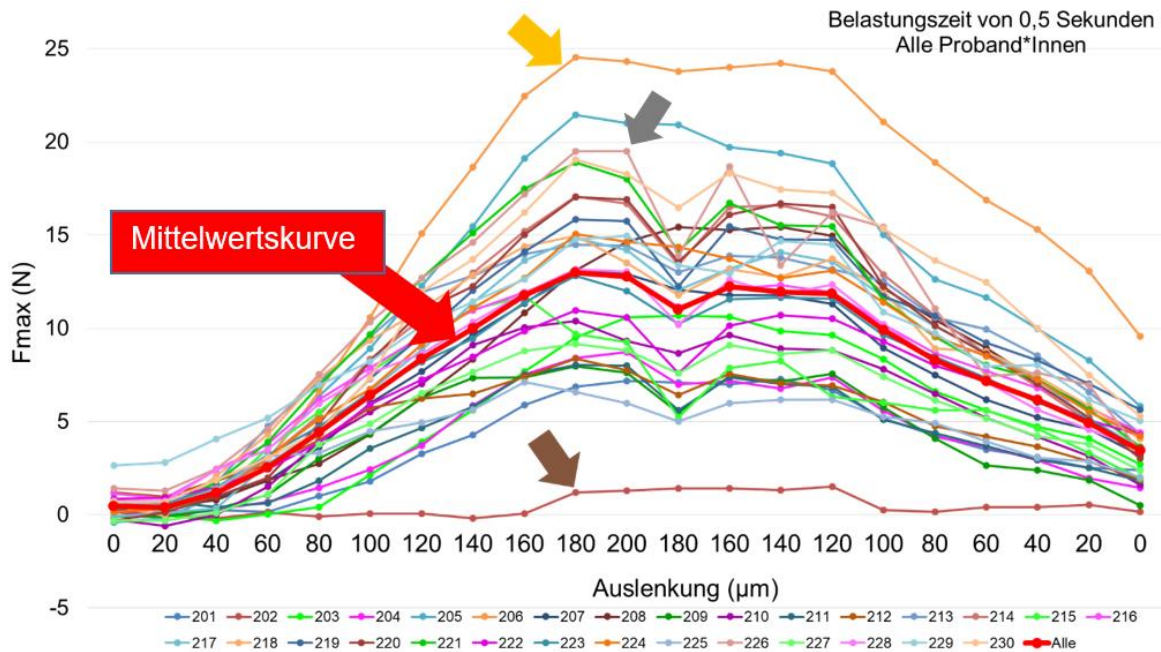


Abb. 26: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal für alle Proband*Innen (Belastungsdauer 0,5 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Proband*Innen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt die Kurve der niedrigsten Kraft an, der gelbe Pfeil die Kurve der größten Kraft. Der graue Pfeil zeigt den Punkt der maximalen Kraft einer Kurve an, nach der ein „Knick“ auftritt.

3.2.1.2 Weibliche Probandinnen, Messzeit 0,5 Sekunden

Bei den Probandinnen liegen die Maximalkräfte bei $F_{\max} = 1,53 \text{ N}$ bis $21,46 \text{ N}$, wobei fast alle Maximalkräfte ($F_{\max}$) vor Erreichen der maximalen Auslenkung (200 µm) bei 180 µm auftreten (siehe Abbildung 27). Der Mittelwert von $F_{\max}$ liegt bei $13,1 \text{ N} \pm 5,07 \text{ N}$ (Tabelle 4). Zwei Probandinnen (# 202 und # 205) liegen außerhalb des Kraftbereichs, in dem die meisten Proband*Innen liegen und können als Ausreißer unter den Probandinnen gewertet werden. Diese folgen dem oben genannten Muster des Kurvenverlaufs nicht.

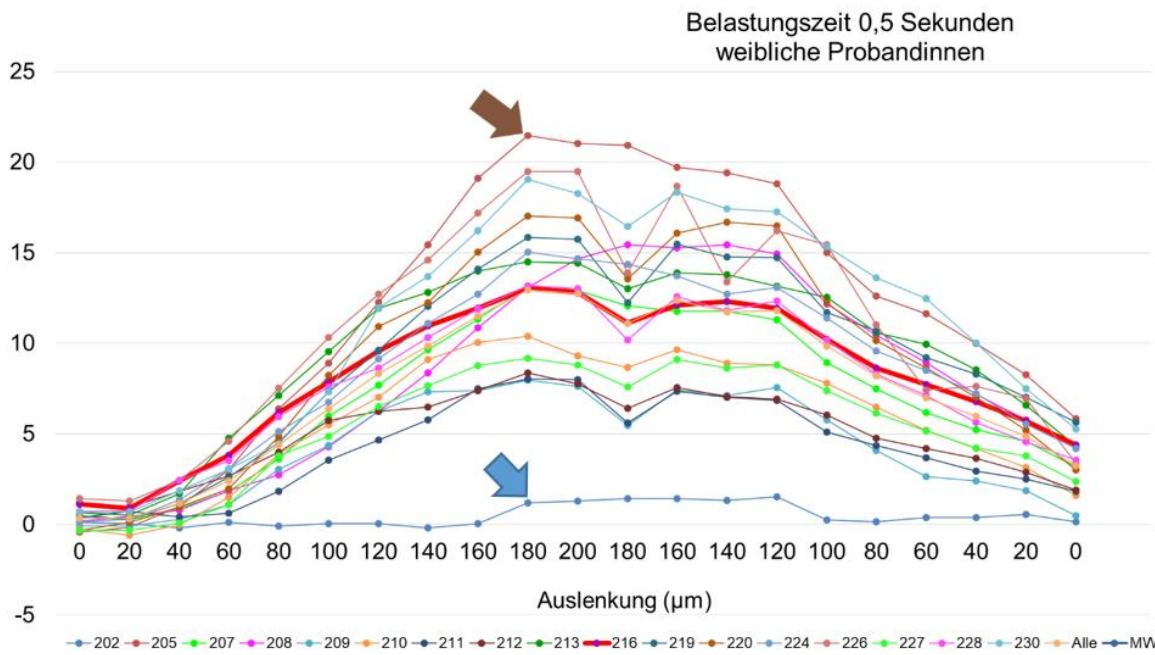


Abb. 27: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der weiblichen Probandinnen (Belastungsdauer 0,5 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probandinnen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt die Kurve mit der höchsten Kraft an, der blaue Pfeil die Kurve mit der geringsten Kraft.

Die Kurve mit den höchsten Werten (# 205; brauner Pfeil), zeigt auch den beschriebenen Krafteinbruch bzw. „Knick“ nicht. Die andere mit den niedrigen Werten (# 202; blauer Pfeil) zeigt überhaupt kaum Auslenkung. Es kann spekuliert werden, ob es möglicherweise an dem Knochenabbau liegt. Bei Ausfiltrieren der Ergebnisse der beiden Proband*Innen ändert sich allerdings nichts an dem Verlauf der Kurve der Mittelwerte. Somit spielen diese beiden Ereignisse wahrscheinlich keine größere Rolle für das Gesamt-Ergebnis.

3.2.1.3 Männliche Probanden, Messzeit 0,5 Sekunden

Bei den männlichen Probanden waren die Ergebnisse gleichartig wie bei den Frauen (Abbildung 28). Die F_{max} liegt bei einer Spannbreite von $F_{max} = 7,11 \text{ N}$ bis $24,55 \text{ N}$.

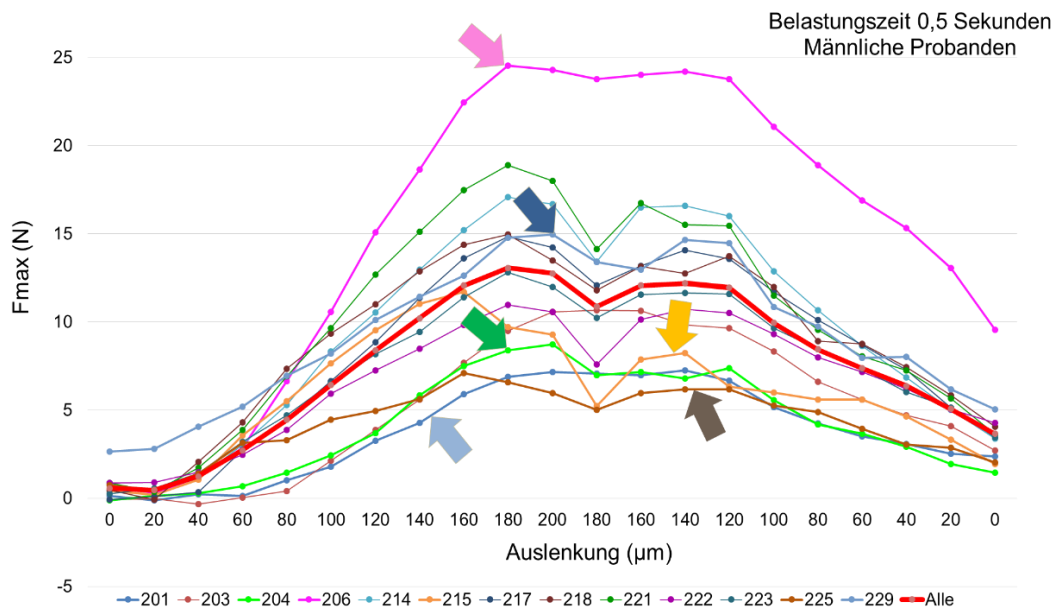


Abb. 28: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der männlichen Probanden (Belastungsdauer 0,5 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probanden. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der hellblaue, grüne und dunkelblaue Pfeil zeigt die Kurven an, deren Maximal kraft (Fmax) genau bei einer Auslenkung von 200 µm lag. Der orangene und braune Pfeil zeigt die Kurven, die ihre Maximalkraft (Fmax) bei 160 µm hatten. Der hellrosa Pfeil zeigt die Kurve mit der größten Kraft an.

Der Mittelwert liegt bei $F_{max} = 13,4N \pm 4,92N$ (Tabelle 4), welches annähernd den gleichen Wert wie bei den weiblichen Probandinnen darstellt. Die größte Kraft ergab sich bei Proband # 206 (oberste Kurve, hellrosa Kurve und Pfeil), der röntgenologisch relativ wenig Knochenabbau (23%) aufwies. Ausreißer sind in dieser Messung, außer der genannten deutlich höheren Kraftentwicklung bei Proband # 206 im Vergleich zu den anderen männlichen Probanden, keine ersichtlich. Es gibt es drei Kurven, deren Fmax genau bei der maximalen Auslenkung von 200 µm lag (# 201 (hellblauer Pfeil und Kurve), # 204 (grüner Pfeil und Kurve), # 229 (dunkelblauer Pfeil und Kurve)). Die Mehrheit hatte die größte Kraftentwicklung bei einer Auslenkung von 180 µm. Zwei lagen mit der Fmax vor der maximalen Auslenkung bei 160 µm (# 215 (oranger Pfeil und Kurve) und # 225 (brauner Pfeil und Kurve)).

3.2.2 Messzeit 1 Sekunde

Tab. 5: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde

	Belastungsgeschwindigkeit 1 Sekunde		
	Mittelwert $\pm$ Standardabweichung; (Spannweite)		
	Maximalkraft (N)	Auslenkung (μm)	Schritt
Alle	13,9 $\pm$ 5,16 (5,26 – 26,16)	174,3 $\pm$ 13,82 (150 – 200)	17,8 $\pm$ 1,97 (15 – 24)
Weiblich	13,5 $\pm$ 4,68 (7,43 – 23,17)	175,9 $\pm$ 12,28 (160 – 200)	17,8 $\pm$ 1,63 (16 – 21)
Männlich	14,5 $\pm$ 5,88 (5,26 – 26,16)	172,3 $\pm$ 15,89 (150 – 200)	17,8 $\pm$ 2,41 (15 – 24)

3.2.2.1 Alle, Messzeit 1 Sekunde

In den Kraft-Auslenkungsdiagrammen, die bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde entstanden sind, „verlieren“ die Kurven den „Knick“ in der Plateauphase, der ansonsten bei den Messungen bei der Belastungszeit von 0,5 Sekunden beobachtet wurde (Abbildung 29).

Bei den Messungen bei den Belastungszeiten von 1 Sekunde und 10 Sekunden gab es doppelt so viele Messschritte wie bei den Messungen von 0,5 Sekunden. Ansonsten sieht man hier den vorher beschriebenen dreiteiligen Verlauf der Kurven mit seiner Einteilung mit den drei Phasen wie zu Beginn des Kapitels erklärt wurde. Die meisten Proband*Innen erreichen die F_{max} bei einer Auslenkung von 160 und 170 μm . Die maximale Kraft lag bei $F_{\text{max}} = 5,26 \text{ N}$ bis $26,16 \text{ N}$. Der Mittelwert liegt bei $F_{\text{max}} = 13,9 \text{ N} \pm 5,16 \text{ N}$ (Tabelle 5).

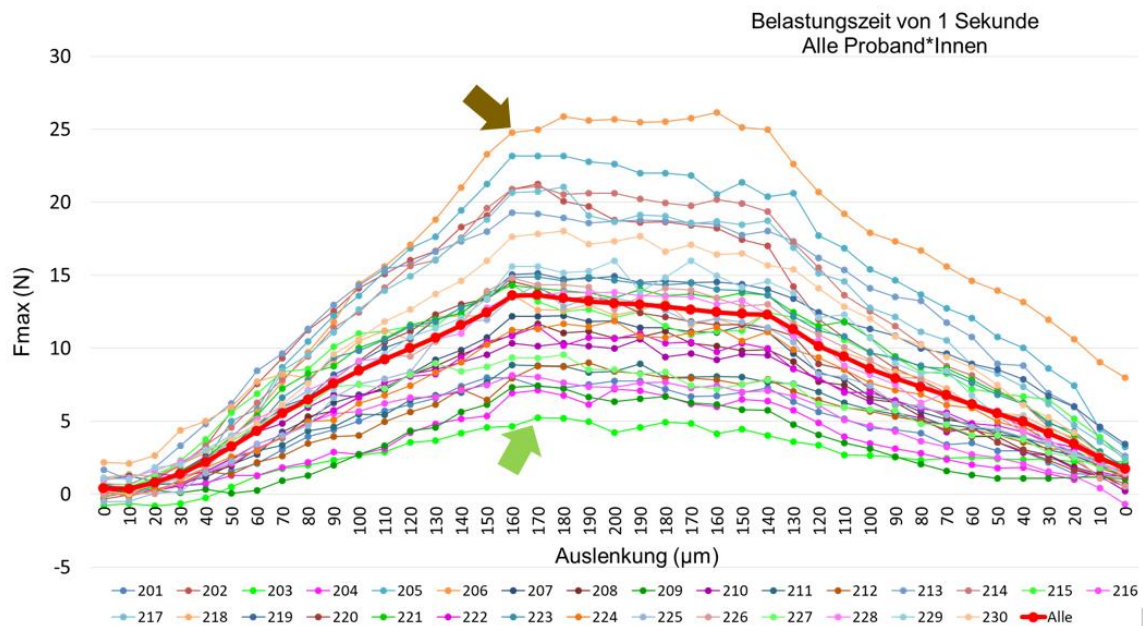


Abb. 29: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal aller Proband*Innen (Belastungsdauer 1 Sekunde). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Proband*Innen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt die Kurve mit der größten Kraft an, der grüne Pfeil die mit der geringsten Kraft.

Die Plateauphase bleibt konstant ohne den kurzzeitigen Krafteinbruch, der, wie bereits beschrieben, bisher bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden aufgetreten ist.

Ausreißer sind nicht mehr so ausgeprägt wie bei einer kürzeren Belastungsdauer. Bei dem höchsten Wert handelt es sich wieder um Proband #206 (brauner Pfeil), aber jetzt treten die geringsten Kräfte bei einer anderen Proband*In auf (# 203, grüner Pfeil und Kurve, anstelle von # 202).

3.2.2.2 Weibliche Probandinnen, Messzeit 1 Sekunde

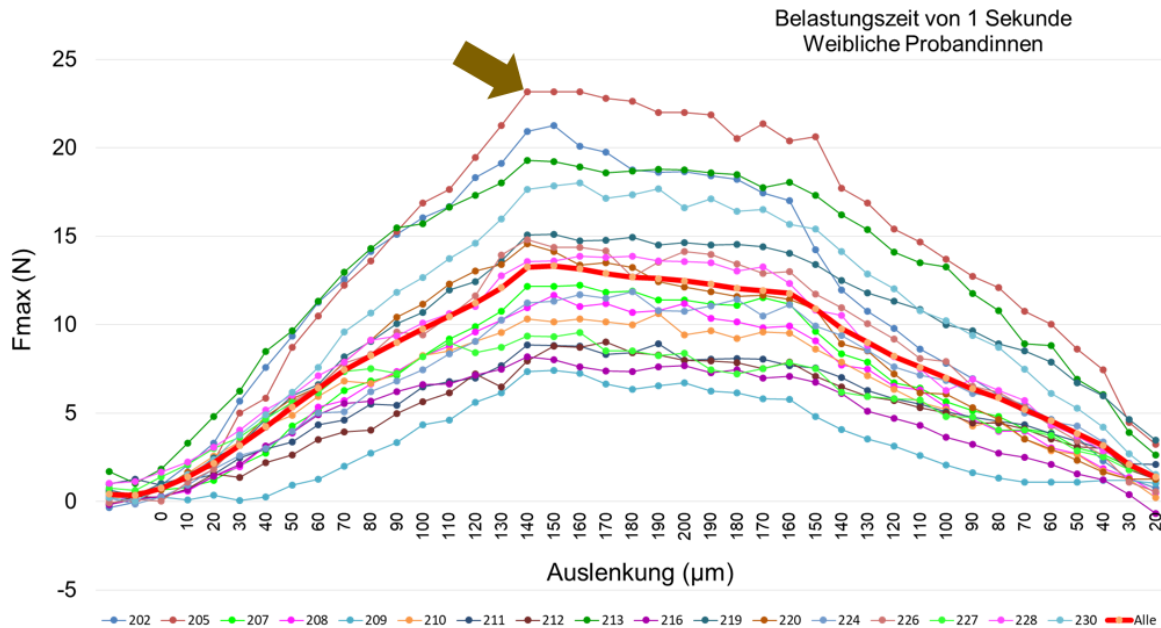


Abb. 30: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der weiblichen Probandinnen (Belastungsdauer 1 Sekunde). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probandinnen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt die Kurve mit der größten Kraft an.

Bei den Probandinnen erreichen die meisten die Fmax bei einer Belastungszeit von einer Sekunde vor der größten Auslenkung von 200 µm (Abbildung 30). Der Zahn hat dem Druckstempel auf dem Weg dahin bereits seine größte Kraft entgegen gebracht (MW-Kurve: 140 µm). Die Mehrheit der Fmax liegt bei 160 bis 180 µm Auslenkung und es werden Kräfte zwischen $F_{max} = 7,42 \text{ N}$ bis $23,17 \text{ N}$ erreicht. Der Mittelwert liegt dabei bei $F_{max} = 13,5 \text{ N} \pm 4,68 \text{ N}$ (Tabelle 5). Die Kurven flachen, wie auch bei den Gesamtergebnissen, ab. # 205 zeigt immer noch die größte Kraftentwicklung (brauner Pfeil), aber, wie zuvor, ohne „Knick“.

3.2.2.3 Männliche Probanden, Messzeit 1 Sekunde

Bei den Probanden ist bei einer Belastungszeit von einer Sekunde wieder Proband # 206 (hellrosa Pfeil und Kurve) deutlich hervorzuheben mit einer $F_{\max} = 26,16 \text{ N}$ (Abbildung 31).

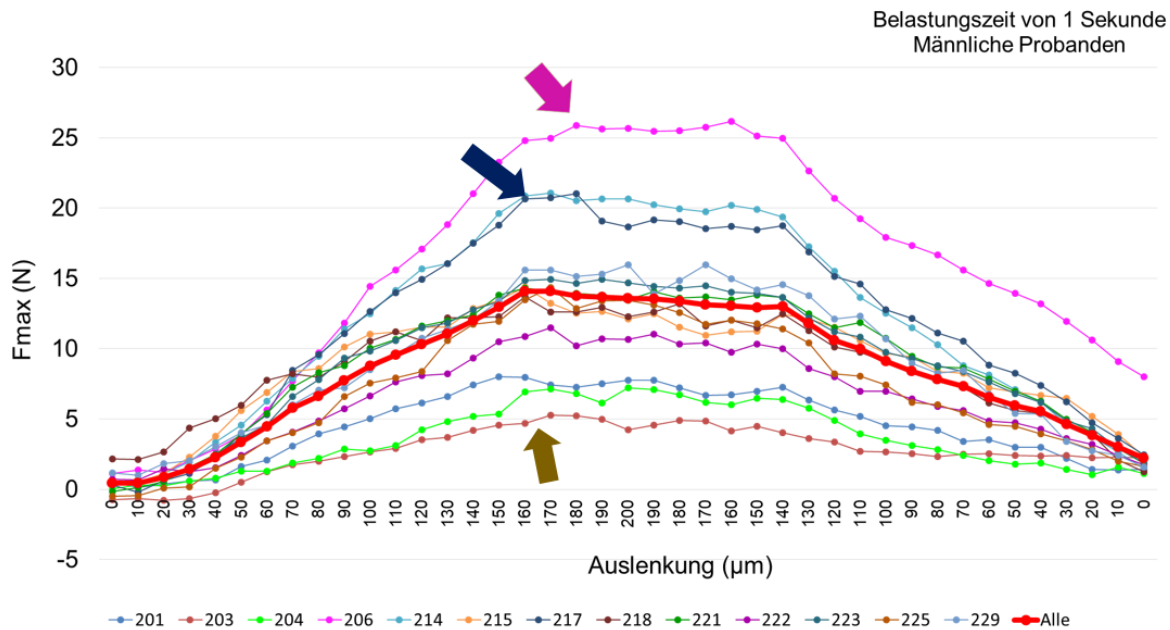


Abb. 31: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 μm nach palatinal der männlichen Probanden (Belastungsdauer 1 Sekunde). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probanden. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt die Kurve mit der geringsten Kraft an, die hellrosa Pfeil die Kurve mit der größten Kraft. Der dunkelbaue Pfeil zeigt auf die Kurve mit der zweitgrößten Kraft.

Die Bandbreite der Kräfte liegt ansonsten zwischen $F_{\max} = 5,25 \text{ N}$ bei Proband*In # 203 (brauner Pfeil) und $F_{\max} = 21,04 \text{ N}$ bei Proband*In # 217 (dunkelblauer Pfeil und Kurve). Der Mittelwert liegt bei $14,5 \text{ N} \pm 5,88 \text{ N}$ (Tabelle 5). Dieser Wert ist leicht höher als bei den Frauen.

Die Maximalkräfte treten hier, wie bei den Probandinnen, vor allem vor der maximalen Auslenkung von 200 μm auf bei einer Auslenkung von 150 bis 170 μm . Bei der Belastungszeit von 0,5 Sekunden lagen die Maximalkräfte der Probanden hauptsächlich bei einer Auslenkung von 180 bis 200 μm , also etwas später. Auch hier erfolgt die Messung in 10er Abständen. Die Kurve zeigt ebenfalls eine flache Plateauphase. Proband # 206 ist

wieder deutlich hervorzuheben, da er die Kurve mit der höchsten Kraftentwicklung darstellt (hellrosa Kurve und Pfeil).

3.2.3 Messzeit 10 Sekunden

Tab. 6: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden

	Belastungsgeschwindigkeit 10 Sekunden Mittelwert $\pm$ Standardabweichung; (Spannweite)		
	Maximalkraft (N)	Auslenkung (μm)	Schritt
Alle	10,3 $\pm$ 3,69 (3,60 – 19,96)	171,3 $\pm$ 14,08 (140 – 200)	17,9 $\pm$ 2,49 (15 – 26)
Weiblich	10,3 $\pm$ 2,80 (4,91 – 14,86)	171,2 $\pm$ 14,95 (140 – 200)	17,8 $\pm$ 2,46 (16 – 26)
Männlich	10,3 $\pm$ 4,74 (3,6 – 17,22)	171,5 $\pm$ 13,45 (150 – 200)	18,1 $\pm$ 2,56 (15 – 23)

3.2.3.1 Alle, Messzeit 10 Sekunden

Bei einer längeren Belastungszeit (10 Sekunden) werden die individuellen Unterschiede ausgeprägter (Abbildung 32).

Der Verlauf mancher einzelner Kurven ist viel unterschiedlicher als in den Abbildungen 27 (Belastungszeit 0,5 Sekunden) und 30 (Belastungszeit 1 Sekunde). Die Streuung wird insgesamt größer und liegt jetzt bei einer Spannbreite von $F_{\text{max}} = 3,60 \text{ N}$ bis $19,96 \text{ N}$. Der Mittelwert liegt trotzdem bei $F_{\text{max}} = 10,3 \text{ N} \pm 3,69 \text{ N}$ (Tabelle 6) bei einer Auslenkung von $160 \mu\text{m}$. Außerdem folgen die Kurven weiterhin dem Muster der exemplarischen Kurve ohne Krafteinbruch, der auch nicht bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde zu beobachten war. Auffällig ist, dass bei den Messungen über 10 Sekunden im Vergleich zu den anderen Messungen der Verlauf der Kurven bei einigen Testzähnen „unruhiger“ verläuft, in etwa wie in „zickzack“.

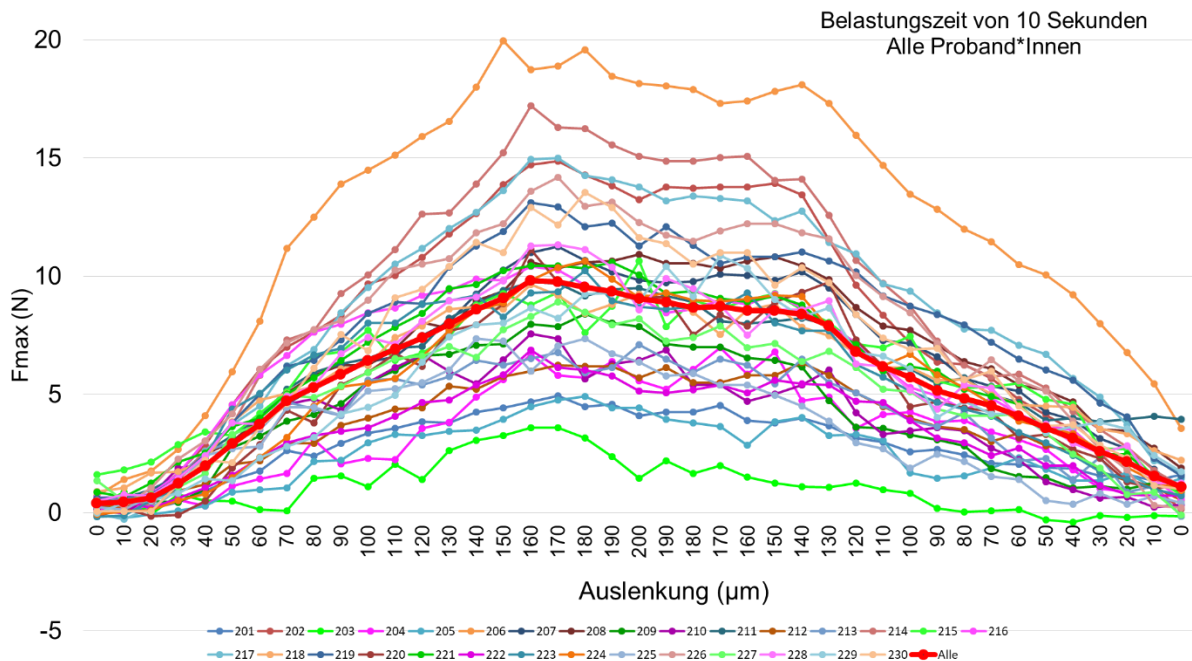


Abb. 32: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal für alle Proband*Innen (Belastungsdauer 10 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Proband*Innen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt.

3.2.3.2 Weibliche Probandinnen, Messzeit 10 Sekunden

Bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden liegen die Probandinnen bei einer Kraftentwicklung von $F_{\max} = 4,91 \text{ N}$ bis $14,86 \text{ N}$ (Abbildung 33). Die mittig verlaufende, rote Kurve zeigt den Mittelwert und verdeutlicht, dass der Mittelwert von $F_{\max}$ bei $10,3 \text{ N} \pm 2,80 \text{ N}$ (Tabelle 6) bei einer Auslenkung von 160 µm liegt. Die Kurven liegen insgesamt aber recht nah aneinander.

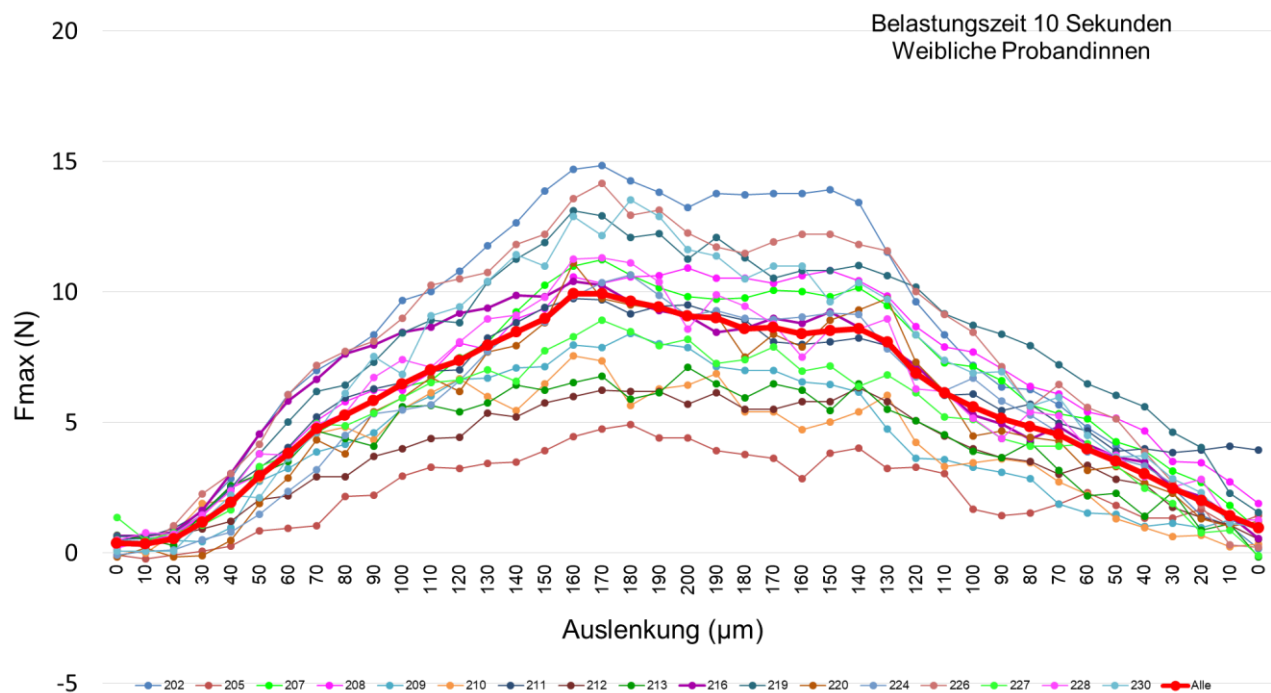


Abb. 33: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal weiblicher Probandinnen (Belastungsdauer 10 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probandinnen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt.

3.2.3.3 Männliche Probanden, Messzeit 10 Sekunden

Bei den Probanden liegt die Kraftentwicklung von $F_{\max} = 3,6 \text{ N}$ bis $19,96 \text{ N}$, also gibt es eine breitere Streuung als bei den weiblichen Probandinnen (Abbildung 34). Trotzdem bleibt der Mittelwert bei $F_{\max} = 10,3 \text{ N} \pm 4,74 \text{ N}$ (Tabelle 6). Proband # 206 ist wieder mit der größten Kraftentwicklung hervorzuheben (hellrosa Pfeil und Kurve). Bei Proband # 203 ist die Kraft am geringsten (brauner Pfeil), der Kurvenverlauf aber auch nicht eindeutig. Es lässt sich spekulieren, ob es sich um eine fehlgeschlagene Messung handelt oder ob es am Knochenabbau liegt.

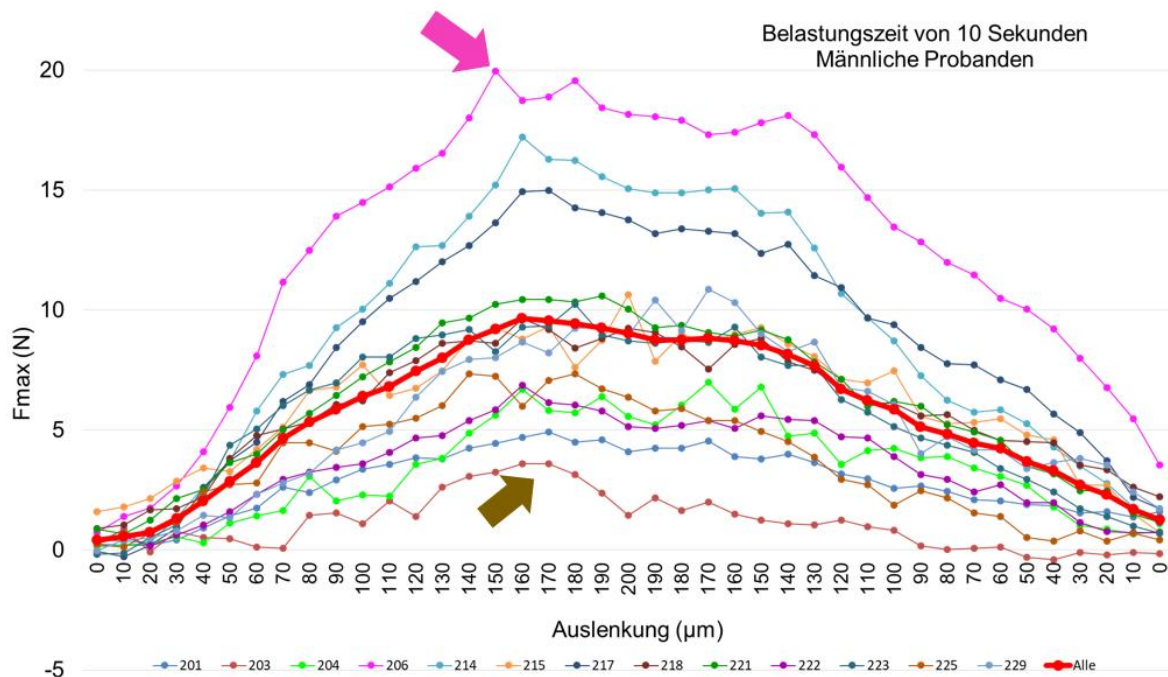


Abb. 34: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der Probanden (Belastungsdauer 10 Sekunden). Dünne Linien zeigen die einzelnen Ergebnisse der Probandinnen. Die kräftigere Linie (rote) zeigt der Mittelwert aller Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt. Der braune Pfeil zeigt auf die Kurve mit der geringsten Kraft, der hellrosa Pfeil auf die Kurve mit der größten Kraft.

3.2.4 Beschreibung besondere Fälle

Als einzelne Fälle werden die Proband*Innen nun beschrieben, die dem „zu erwartende Muster“ nahe am Mittelwert nicht nachkommen und daher in der vorliegenden Arbeit als „Ausreißer“ bezeichnet werden. Die klinischen Daten sind alle gleich und unabhängig der Messzeiten, sie wurden bereits in Tabelle 3 beschrieben. Bei der Beschreibung einzelne Fälle werden auf die individuellen Daten nochmals eingegangen.

3.2.4.1 Messung 0,5 Sekunden

Bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden gibt es drei Probandinnen, die den Krafteinbruch bzw. den „Knick“ des Graphen des Kraft-Auslenkungs-Diagramms nicht zeigen (Abbildungen 26 bis 28). Dabei handelt es sich um die Nummern # 202, # 205 und # 224. Festzustellen ist, dass es sich hierbei nur um weibliche Teilnehmerinnen handelt. Weiterhin gibt es einen männlichen Probanden (# 206), der unabhängig der Belastungszeit eine hohe Kurve aufweist.

3.2.4.2 Messung 1 Sekunde

Bei einer Belastungszeit von einer Sekunde gibt es keine größeren „Ausreisser“ (Abbildungen 29 bis 31). Die Kraftentwicklung reicht bei einer Auslenkung von 160 μm bei $F_{\text{max}} = 4,671 \text{ N}$ bis $24,794 \text{ N}$. Der Mittelwert liegt bei $F_{\text{max}} = 13,617 \text{ N}$. Man sieht, dass der tiefste Wert etwa 34 % vom Mittelwert erreicht und der höchste Wert ist etwa 55 % vom Mittelwert. Die Kurven der Teilnehmer*Innen unter der roten Kurve liegen deutlich enger bei einander, also mit einer geringeren Streuung, als die der darüber liegenden Kurven.

3.2.4.3 Messung 10 Sekunden

Wie bereits beschrieben, ist die Streuung der Kurven des Kraft - Auslenkungsdiagramms bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden deutlich größer als bei den beiden kürzeren Belastungszeiten (Abbildungen 32 bis 34). Die Werte für F_{max} reichen von $F_{\text{max}} = 3,697 \text{ N}$ bei 160 μm bis $F_{\text{max}} = 19,96 \text{ N}$ bei 150 μm .

3.2.5 Vergleich der Mittelwerte

Ein direkter Vergleich der Kurven für alle Proband*Innen bei Belastungszeiten von 0,5, 1 und 10 Sekunden zeigt, dass es Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den jeweiligen Verläufen der Kurven gibt (Abbildung 35).

Die beiden Kurven bei den Belastungszeiten von 1 und 10 Sekunden sind nahezu gleichartig vom Verlauf ohne „Knick“. Jedoch ist festzustellen, dass eine höhere Kraft notwendig ist, um die maximale Auslenkung bei 1 Sekunde (rot) als bei 10 Sekunden Belastungszeit (grün) zu erreichen. Die F_{max} bei 1 Sekunde liegt bei einer Auslenkung von 160 μm bei $F_{\text{max}} = 13,62 \text{ N}$, während sie bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden bei $F_{\text{max}} = 9,82 \text{ N}$ liegt. Beide Kurven erreichen also bei 160 μm die F_{max} . Es folgt bei beiden Belastungszeiten eine Art Plateauphase bis 150 μm Auslenkung in der Rückbewegung. Obwohl der Stempel bis zu einer Auslenkung von 200 μm weiter Druck ausübt, wird kein höherer Widerstand vom Parodont generiert. Ab einer Auslenkung von 140 μm fallen beide Kurven stärker ab und es zeigt sich ein gleichartiger Verlauf.

Das Kraft-Auslenkungsdiagramm bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden (blau) stellt sich etwas anders dar, obwohl einiges dennoch gleichartig im Vergleich mit den beiden

anderen Kurven ist. Die F_{max} von 13 N wird erst bei einer Auslenkung von 180 μm erreicht und die Plateauphase zeigt einen Krafteinbruch zwischen 200 μm und 160 μm bei der Rückbewegung des Stempels.

Die F_{max} bei 0,5 und 1 Sekunde sind auf Abbildung 38 ähnlich hoch, nur ist ein „Knick“ in der Plateauphase bei der Kurve von 0,5 Sekunden zu sehen. Beide Kurven (0,5 Sekunden und 1 Sekunde) sind aber deutlich höher als die F_{max} bei 10 Sekunden. Dabei ist der Verlauf, wie vorher beschrieben, nahezu parallel für 1 und 10 Sekunden.

Die Graphen zeigen daher womöglich, dass der Zahn und sein Parodont dieselbe Kraft besser ausgleichen kann, wenn die Belastung langsamer erfolgt. Der Krafteinbruch bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden könnte verdeutlichen, dass der Zahn in diesem Zeitraum keinen Kontakt mehr mit dem Druckstempel hat. Die große und kurze Krafteinwirkung könnte den Zahn einfach weggedrückt haben und die Messung der Kraft geht erst nach Rückkehr des Zahnes an den Druckstempel weiter.

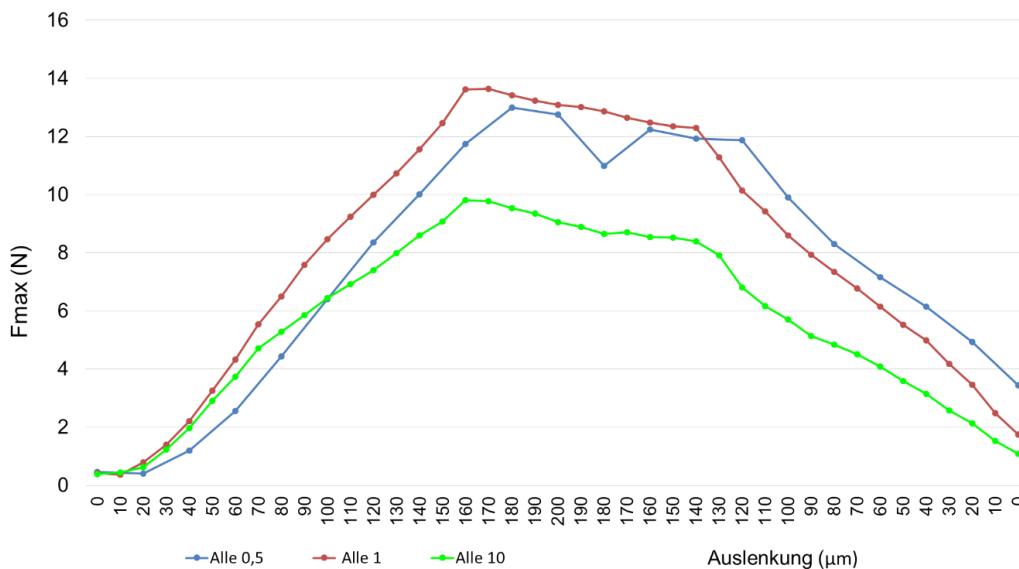


Abb. 35: Kraft-Auslenkungsdiagramme der Mittelwerte von allen drei Belastungszeiten. Die blaue Kurve zeigt die Mittelwerte bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden, die rote Kurve bei 1 Sekunde und die grüne Kurve bei 10 Sekunden Belastungszeit an.

3.2.6 Prüfung der Nullhypothesen

Die Nullhypothese 1 „Es gibt keinen Unterschied zwischen Männer und Frauen für F_{max} “ konnte bestätigt werden. Es gab keine Unterschiede zwischen Männer und Frauen, weder

für Alter ($p = 0,883$, Mann-Whitney), Rauchen ($p = 0,092$, Mann-Whitney), parodontale ($p > 0,385$; Wilcoxon) noch für biomechanische Parameter ($p > 0,592$; Wilcoxon). Die Korrelationskoeffizienten waren für die Belastungsdauer 0,5 Sekunde $-0,43$ ($p = 0,823$); für 1 Sekunde $0,058$ ($p = 0,760$) und für 10 Sekunden $-0,105$ ($p = 0,581$) (Spearman Korrelationskoeffizient).

Die Nullhypothese 2 „Das Alter hat keinen Einfluss auf $F_{\max}$ “ konnte nicht widerlegt werden. Die Korrelationskoeffizienten waren für die Belastungsdauer von 0,5 Sekunden $-0,43$ ($p = 0,823$); für 1 Sekunde $0,058$ ($p = 0,760$) und für 10 Sekunden $-0,105$ ($p = 0,581$) (Spearman Korrelationskoeffizient).

Nullhypothese 3 „Der parodontologischen Zustand des Testzahnes hat keinen Einfluss auf $F_{\max}$ “ konnte ebenfalls bestätigt werden. Weder für das Stadium der Erkrankung ($p > 0,370$), noch den Grad des Progressionsrisikos ($p > 0,109$), BOP ($p > 0,106$), TST ($p > 0,284$), CAL ($p > 0,601$) oder den Knochenabbau auf das vorhandene aktuelle Röntgenbild gemessen ($p > 0,597$) (Spearman Korrelationskoeffizient) konnten signifikante Zusammenhänge gefunden werden.

Zwischen den $F_{\max}$ Werten der verschiedenen Belastungszeiten konnten allerdings signifikante Korrelationen gefunden werden. Zwischen $F_{\max}$ 0,5 Sekunde und $F_{\max}$ 1 Sekunde konnte eine Korrelationskoeffizient von $0,592$ ($p = 0,001$), zwischen $F_{\max}$ 0,5 Sekunde und $F_{\max}$ 10 Sekunden eine Korrelationskoeffizient von $0,509$ ($p = 0,004$) und zwischen $F_{\max}$ 1 Sekunde und $F_{\max}$ 10 Sekunden eine Korrelationskoeffizient von $0,604$ ($p = 0,000$) gefunden werden (alle Spearman Korrelationskoeffizient).

3.3 Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI)

Die Auswertung des Geriatric/General oral health assessment Index Fragebogens (vgl. Kapitel 1.6) ist in Tabelle 7 zusammengefasst. Abbildung 37 ist eine graphische Darstellung dieser Auswertung.

Tab. 7: Auswertung des Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI) Fragebogens in Prozent (%). Die fettgedruckten Zahlen zeigen die höchsten Werte an. Die Fragen 3,5,7 sind invertiert (Inv.), um die Ergebnisse vergleichbarer zu machen. Detaillierte Erklärungen dazu sind in den nachfolgenden Kapiteln zu finden

GOHAI Fragen	1 (Immer)	2 (sehr oft)	3 (manchmal)	4 (selten)	5 (nie)
Frage 1: Wie oft beschränken Sie Art und Menge der Nahrung, die Sie essen aufgrund Ihrer Zähne?	0.0	3.3	13.3	16.7	66.7
Frage 2: Wie oft hatten Sie Probleme beim Beißen oder Kauen von z.B. Fleisch oder Äpfeln?	3.3	3.3	26.7	16.7	50.0
Frage 3: Wie oft hatten Sie Probleme beim Schlucken? (Inv.)	6.7	3.3	0.0	10.0	80.0
Frage 4: Wie oft haben Ihre Zähne Probleme beim klaren Sprechen verursacht?	0.0	10.0	6.7	6.7	76.7
Frage 5: Wie oft hatten Sie Unbehagen beim Essen? (Inv.)	6.7	10.0	6.7	3.3	73.3
Frage 6: Wie oft haben Sie Kontakte zu Menschen eingeschränkt aufgrund des Zustands Ihrer Zähne?	3.3	3.3	6.7	3.3	83.3
Frage 7: Wie oft waren Sie unzufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und Ihres Zahnfleisches? (Inv.)	6.7	3.3	20.0	23.3	46.7
Frage 8: Wie oft haben Sie Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich eingenommen?	0.0	3.3	6.7	13.3	76.7

Frage 9: Wie oft waren Sie besorgt über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch?	16.7	10.0	30.0	10.0	33.3
Frage 10: Wie oft fühlten Sie sich unsicher oder gehemmt wegen Problemen mit Zähnen und Zahnfleisch?	6.7	0.0	10.0	20.0	63.3
Frage 11: Wie oft fühlten Sie Unbehagen vor anderen Menschen zu essen?	3.3	3.3	3.3	3.3	86.7
Frage 12: Wie oft traten Überempfindlichkeiten auf heiß, kalt oder süß auf?	10.0	13.3	36.7	6.7	33.3

3.3.1 Frage 1: Wie oft beschränken Sie Art und Menge der Nahrung, die Sie essen aufgrund Ihrer Zähne?

Das Ergebnis auf Frage 1 ist, dass keine/r der Proband*Innen „immer“ (0 %) die Art und Menge der Nahrung beschränkt aufgrund der Zähne. 3,3 % gaben „sehr oft“, 13,3 % „manchmal“, 16,7 % „selten“ und ganze 66,7 % „nie“ an. Erfreulich ist dabei, dass trotz der langjährigen chronischen Erkrankung mit teilweise fortgeschrittenem Attachmentverlust, die Proband*Innen in dieser Untersuchung teilgenommen haben, keine ausgeprägten Einschränkungen der Lebensqualität hinsichtlich der Nahrungsaufnahme fühlen.

Der männliche Proband # 217, der oft die Art und Menge der Nahrung, die er isst, aufgrund seiner Zähne beschränkt, hat neben dem Attachmentverlust durch Parodontitis eine Freiendsituation im Oberkiefer im ersten Quadranten, die ebenfalls als Grund der Einschränkung gesehen werden kann. Ansonsten liegt die Fmax mit einem Wert von 21,04 N bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde und 180 µm Auslenkung im Bereich deutlich über der Kurve der Mittelwerte und siedelt sich bei der Gruppe der fünf höchsten Werte an.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,967$, Wilcoxon).

3.3.2 Frage 2: Wie oft hatten Sie Probleme beim Beißen oder Kauen von z.B. Fleisch oder Äpfeln?

Ähnlich zu Frage 1 haben hier 3,3 % „immer“, 3,3 % „sehr oft“, 26,7 % „manchmal“, 16,7 % „selten“ und 50 % „nie“ angegeben, die Art und Menge der Nahrung, die sie essen, aufgrund ihrer Zähne einzuschränken. Wieder erfreulich ist, dass trotz der langjährigen chronischen Erkrankung mit teilweise fortgeschrittenem Attachmentverlust, die Proband*Innen in dieser Untersuchung teilgenommen haben, sich keine größeren Gedanken über Abbeißen machen müssen. Jedoch ist das Ergebnis etwas schlechter als bei Frage 1. Möglicherweise spielt auch bei der Beantwortung dieser Frage die Situation der Zähne neben der parodontalen Schädigung des Gebisses eine Rolle. Freundsituationen und/o-der Schatlücken, insuffizienter Zahnersatz oder ähnliches könnten ebenfalls zu Funktionseinschränkungen beim Beißen oder Kauen führen.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,680$, Wilcoxon).

3.3.3 Frage 3: Wie oft hatten Sie Probleme beim Schlucken? (invertiert)

Die Frage wurde invertiert, um einen besseren Vergleich mit den anderen Fragen zu ermöglichen (Original: Wie oft konnten Sie ohne Probleme Schlucken?). Bei Frage 3 gaben 6,7 % der Patient*Innen „immer“ an, 3,3 % „sehr oft“, keiner (0 %) „manchmal“, 10 % „selten“ und 80 % „nie“ an, Probleme beim Schlucken zu haben. Auch wenn die 80% der Proband*Innen angegeben haben, nie Einschränkungen beim Schlucken zu haben, sind die 6,7 %, die immer Einschränkungen verspüren besorgniserregend. Es kann spekuliert werden, ob andere somatische Hintergründe vielleicht eine Rolle spielen könnten.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,650$, Wilcoxon).

3.3.4 Frage 4: Wie oft haben Ihre Zähne Probleme beim klaren Sprechen verursacht?

Keiner gab an, immer Probleme beim klaren Sprechen aufgrund der Zähne zu haben, 10 % „sehr oft“, 6,7 % „manchmal“, 6,7 % „selten“ und 76,7 % „nie“. Die hohe Zahl an Proband*Innen, die keine Probleme hinsichtlich der klaren Artikulation feststellen konnten, ist positiv zu bewerten. Die dennoch recht große Zahl an Proband*Innen, die „sehr oft“

angegeben haben (10 %), ist allerdings negativ und zeigt, welchen großen Einfluss die Erkrankung an einer Parodontitis auf die Lebensqualität und die soziale Interaktion haben kann.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,065$, Wilcoxon).

3.3.5 Frage 5: Wie oft hatten Sie Unbehagen beim Essen?

Frage 5 wurde invertiert (Original Frage: Wie oft konnten Sie essen ohne Unbehagen?). 6,7 % gaben „immer“ an, 10 % „sehr oft“, 6,7 % „manchmal“, 3,3 % „selten“ und 73,3 % „nie“ an, Unbehagen beim Essen zu haben. Auch bei dieser Frage geht es in erster Linie um orale funktionelle und psychosoziale Auswirkungen der Parodontitis. Gleichwohl die Mehrheit der Befragten angab, meistens ohne Unbehagen essen zu können, steigt die Zahl der Proband*Innen, die „sehr oft“ mit Unwohlsein essen müssen auf 10 %. Dies verdeutlicht erneut, welchen großen Einfluss die Zahn- und Mundgesundheit auf die Menschen hat und die Lebensqualität.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 1,000$, Wilcoxon).

3.3.6 Frage 6: Wie oft haben Sie Kontakte zu Menschen eingeschränkt aufgrund des Zustands Ihrer Zähne?

3,3 % der Proband*Innen gaben „immer“ an, 3,3 % „sehr oft“, 6,7 % „manchmal“, 3,3 % „selten“ und 83,3 % gaben erfreulicherweise „nie“ an, ihre Kontakte zu Menschen aufgrund des Zustands ihrer Zähne eingeschränkt zu haben. Diese Frage zeigt auf, dass auch wenn die Krankheit Parodontitis viele Einschränkungen mit sich bringen kann, diese vermutlich in erster Linie für den Probanden/die Probandin selbst eine Einschränkung bedeutet. Man kann darüber diskutieren, ab wann die Parodontitis so weitreichende Einschnitte nimmt, dass Menschen ihre sozialen Kontakte einschränken.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,773$, Wilcoxon).

3.3.7 Frage 7: Wie oft waren Sie unzufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und Ihres Zahnfleisches?

Frage 7 wurde invertiert (die Originalfrage lautet: Wie oft waren Sie zufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und Ihres Zahnfleisches?).

„Immer“ gaben 6,7 % an, „sehr oft“ 3,3 %, 20 % „manchmal“, 23,3 % „selten“ und 46,7 % „nie“ an, unzufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und Ihres Zahnfleisches zu sein.

Erneut gab die Mehrheit zwar an, die meiste Zeit zufrieden zu sein bzw. oft nicht durch Ihre Erkrankung eingeschränkt zu sein. Dennoch merkt man an den 20 %, die manchmal zufrieden mit dem Aussehen ihrer Zähne und ihres Zahnfleisches sind, dass die Proband*Innen nicht alle sorgenfrei auf den Zustand ihrer Zähne und ihres Zahnfleisches schauen. Der Attachmentverlust bringt Einschränkungen in Funktion sowie Ästhetik. Dies sieht man auch an den leider recht hohen 6,7 %, die nie zufrieden mit dem Aussehen Ihrer Zähne und ihres Zahnfleisches sind. Gerade in der heutigen Zeit von Social Media, ist das Aussehen des Gesichts wichtiger denn je.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,934$, Wilcoxon).

3.3.8 Frage 8: Wie oft haben Sie Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich eingenommen?

Auf diese Frage hat keiner der Patient*Innen mit „immer“ geantwortet, „sehr oft“ gaben 3,3 % an, 6,7 % gaben manchmal, 13,3 % gaben „selten“ an und ganze 76,7 % gaben „nie“ an, Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich einzunehmen. Das ist zwar erfreulich und sichtbar wird, dass Schmerzen nicht die häufigste Einschränkung der Parodontitis sind. Deutlich wird aber auch, dass die Erkrankung mit Parodontitis durchaus Schmerzen beinhalten kann, die dann laut diesen Werten zumindest in 13,3 % der Fälle, auch mitunter medikamentös behandelt werden müssen. Selten, aber leider doch zu oft, müssen häufiger Analgetika eingesetzt werden. Andererseits beinhaltet das Ergebnis auch das große Problem der Behandler*Innen, die Ihre Patient*Innen richtig behandeln möchten. Die Häufigkeit eines asymptomatischen, beschwerdefreien Verlaufs zeigt nämlich, wie schwer es ist, eine nicht schmerzhaft Erkrankung in das Bewusstsein der Patient*Innen als behandlungsbedürftig zu bekommen. Sehr häufig wird beobachtet, dass Patient*Innen erst mit Beschwerden zu Ihren Zahnärzt*Innen gehen. Dann ist die

Parodontitis aber möglicherweise bereits weit fortgeschritten und man hätte zu einem früheren Zeitpunkt deutlich mehr tun können.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,742$, Wilcoxon).

3.3.9 Frage 9: Wie oft waren Sie besorgt über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch?

Diese Frage wurde von 16,7 % der Proband*Innen mit „immer“ beantwortet, 10 % gaben „sehr oft“ an, 30 % gaben „manchmal“ an, 10 % gaben selten und nur 33,3 % gaben „nie“ an, oft besorgt über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch zu sein.

Dies ist das erste Mal, dass die Verteilung der Antworten recht gleich verteilt ist. Es besteht keine klare Antwort in Richtung „nie“ und damit hin zu einem guten Ergebnis. Zwar geben auch hier die meisten (33,3 %) an, sich nie Gedanken über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch zu machen, allerdings sind das deutlich weniger Menschen ohne Einschränkung als bei den vorherigen Fragen. Die Proband*Innen, die „immer“ besorgt sind, zeigen damit mit 16,7 %, wie oft die Erkrankung an Parodontitis Unsicherheiten und Sorgen bei den Patient*Innen auslöst.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,385$, Wilcoxon).

3.3.10 Frage 10: Wie oft fühlten Sie sich unsicher oder gehemmt wegen Problemen mit Zähnen und Zahnfleisch?

Diese Frage beantworteten 6,7 % der Proband*Innen mit „immer“, keiner gab „sehr oft“ an, 10% beantworteten die Frage mit „manchmal“, 20 % mit „selten“ und ganze 63,3 % mit „nie“. Dies ist wiederum erfreulich, da die deutliche Mehrheit keine Unsicherheiten aufgrund von Problemen mit Zähnen und Zahnfleisch aufweisen. Dennoch sieht man auch, dass 10 % der Befragten durchaus manchmal Hemmungen und Unsicherheiten verspüren und 6,7 % sogar immer. Die Einschnitte, die eine Veränderung der Zähne und des Zahnfleischs mit sich bringen können, sind also mitunter weitreichend für die Betroffenen und können zu Unsicherheiten und Hemmungen führen.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,592$, Wilcoxon).

3.3.11 Frage 11: Wie oft fühlten Sie Unbehagen vor anderen Menschen zu essen?

Die Antworten auf Frage 11 liegen deutlicher im positiven Bereich als alle zuvor gestellten Fragen. Die Antworten von „immer“ bis „selten“ wurden alle jeweils mit 3,3 % beantwortet. Die Mehrheit der Antworten liegt bei „nie“ und zwar mit 86,7 %. Knapp 90 % verspüren also kein Unbehagen vor anderen Menschen zu essen. Dies bedeutet, dass die Kaufunktion durch die Erkrankung an Parodontitis nicht oder nicht mehr eingeschränkt ist. Dies beinhaltet auch Lockerungsgrade, die das Essen erschweren können. Erfreulicherweise scheint es also, dass die meisten Proband*Innen wenig bis keine Einschränkungen verspüren vor anderen Menschen zu essen.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 0,213$, Wilcoxon).

3.3.12 Frage 12: Wie oft traten Überempfindlichkeiten auf heiß, kalt oder süß auf?

Die letzte Frage stellt eine Besonderheit dar. Die Verteilung der Antworten lag bei 10%, die „immer“ angegeben haben, 13,3 % gaben „sehr oft“ an, 36,7 % gaben „manchmal“ an und ist damit die am häufigsten angekreuzte Antwort, 6,7 % gaben „selten“ an und 33,3 % „nie“.

Entgegen aller vorherigen Fragen, ist die Anzahl der Proband*Innen, die „nie“ Probleme haben (hier mit Überempfindlichkeiten) deutlich geringer. Ganze 36,7% gaben an, „manchmal“ Probleme mit Überempfindlichkeiten zu haben und 10 % sogar „immer“. Dies zeigt deutlich, welche Folgen der krankheitsbedingte Attachmentverlust auch langfristig auf die Proband*Innen haben kann. Nicht nur ästhetisch, auch funktionell bedeutet dieser Verlust an Gewebe eine Einschränkung für das Leben.

Zwischen Männern und Frauen war kein signifikanter Unterschied vorhanden ($p = 1,000$, Wilcoxon).

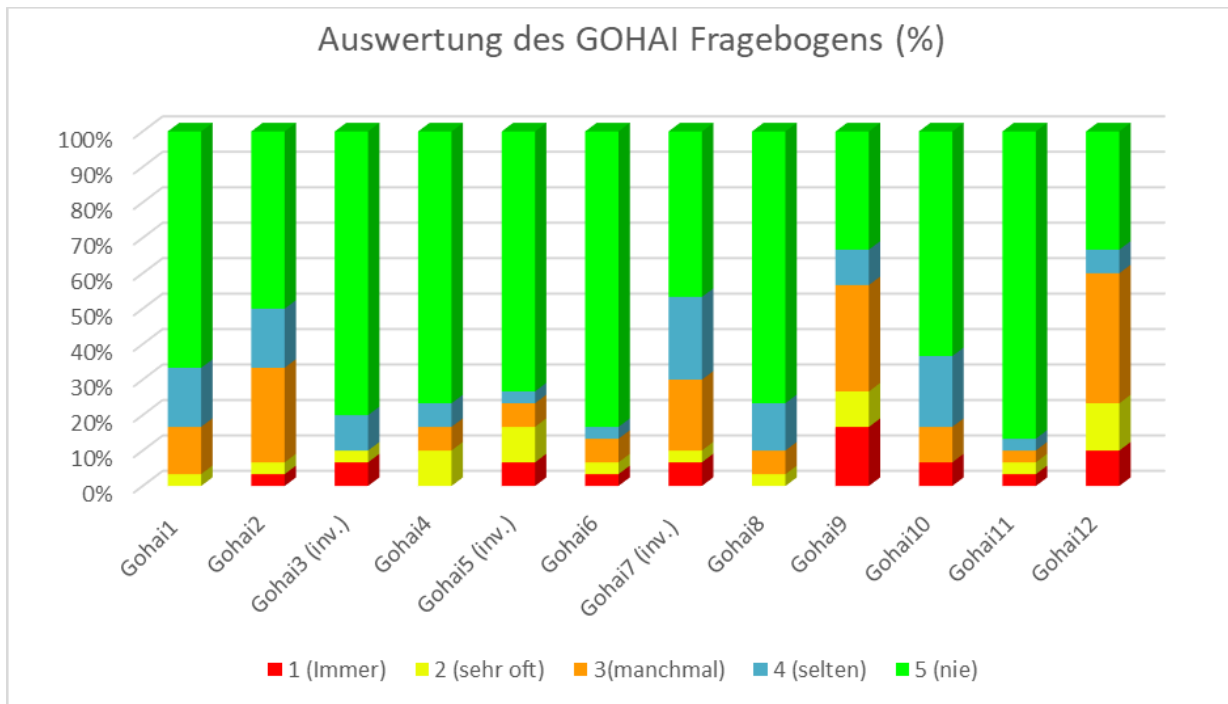


Abb. 36: Zusammenfassung der Auswertung der Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI) Fragebögen nach Häufigkeiten der Antworten in % (1: immer; 2: sehr oft; 3: manchmal; 4: selten; 5: nie). Die Farben geben die Bewertungen wieder (rot: immer Einschränkung; gelb: sehr oft Einschränkung; orange: manchmal Einschränkung; blau: selten Einschränkung; grün: nie Einschränkung).

Außer für Frage 6 und Frage 9, konnten keine Korrelationen zwischen den Fmax-Werten und die Ergebnisse der GOHAI-Umfrage gefunden werden. Nur bei der Belastungszeit 0,5 Sekunde war eine Korrelation mit Frage 6 (Spearman Korrelationskoeffizient 0,497, $p = 0,005$) beziehungsweise Frage 9 (Spearman Korrelationskoeffizient 0,372, $p = 0,043$) vorhanden.

4. Diskussion

4.1 Hauptergebnisse

Im Rahmen dieser *in-vivo* Studie wurde die Zahnbeweglichkeit bei insgesamt 30 Patient*Innen (17 Frauen, 13 Männer; Durchschnittsalter 59 ± 12 Jahre) durch Verschiebung des oberen ersten Schneidezahns um $200 \mu\text{m}$ nach palatinal für Belastungszeiten von 0,5, 1 und 10 Sekunden untersucht. Diese Fragestellung ist neu und wurde bisher noch nicht mit dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten intraoralen Belastungsgeräts oder gleichartigen untersucht. Bei den Proband*Innen handelte es sich um bereits behandelte und stabile Parodontitispatient*Innen, die sich in der unterstützenden Parodontistherapie (UPT) befinden. Die Bewegung der Testzähne konnte bei genauer Einstellung der Belastungszeiten und unter Einhaltung einer konstanten Auslenkung von maximal $200 \mu\text{m}$ kontrolliert und reproduzierbar durchgeführt werden. Bei den Messungen wurde festgestellt, dass ein Unterschied in den Kraftniveaus zwischen den verschiedenen Belastungszeiten von 0,5, 1 und 10 Sekunden vorhanden ist.

Bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden lagen die Mittelwerte (MW) der $F_{\text{max}} \pm \text{Standardabweichung (SD)}$ bei

- allen Proband*Innen $F_{\text{max}} = 13,2 \pm 4,92 \text{ N}$,
- den weiblichen Probandinnen $F_{\text{max}} = 13,1 \pm 5,07 \text{ N}$
- den männlichen Probanden bei $F_{\text{max}} = 13,4 \pm 4,92 \text{ N}$.

Bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde lagen die MW der $F_{\text{max}} \pm \text{SD}$ bei

- allen Proband*Innen $F_{\text{max}} = 13,9 \pm 5,16 \text{ N}$
- den weiblichen Probandinnen $F_{\text{max}} = 13,5 \pm 4,68 \text{ N}$
- den männlichen Probanden $F_{\text{max}} = 14,5 \pm 5,88 \text{ N}$

Bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden lagen die MW der $F_{\text{max}} \pm \text{SD}$ bei

- allen Proband*Innen $F_{\text{max}} = 10,3 \pm 3,69 \text{ N}$
- den weiblichen Probandinnen $F_{\text{max}} = 10,3 \pm 2,80 \text{ N}$
- den männlichen Probanden $10,3 \pm 4,74 \text{ N}$

4.2 Vergleiche mit der Literatur

4.2.1 Biomechanische Aspekte

Die maximale Kraft (F_{max}), die bei längeren Belastungszeiten (10 Sekunden) erzeugt wurde, schien in dieser Studie niedriger zu sein als bei kurzen Belastungszeiten (0,5 und 1 Sekunde). Dies steht im Einklang mit früheren Studien, die jedoch alle an parodontal Gesunden durchgeführt wurden (Keilig et al., 2016; Keilig et al., 2020). Bei längeren Belastungszeiten bewegt sich der Druckstempel des intraoralen Belastungsgeräts über dieselbe Distanz wie bei den kürzeren Belastungszeiten, jedoch langsamer. Dies gibt dem Zahn und dem PDL mehr Zeit zur Bewegung und zur Reaktion auf die Kraft, die auf den Zahn einwirkt und verringert damit den Widerstand, den der Zahn dem Druckstempel entgegen setzt (Bourauel et al., 2014). Die Flüssigkeitsphase des parodontalen Ligaments trägt zu einer Dämpfung bei, die dem Verhalten eines Stoßdämpfers ähnlich ist. Die Unterschiede der Ergebnisse in den verschiedenen Gruppen werden wahrscheinlich durch die mehrphasige Zusammensetzung des parodontalen Ligaments (PDL) verursacht. Die in der PDL enthaltenen Flüssigkeiten wirken als Stoßdämpfer, was zu einem steiferen Verhalten (höhere Kräfte) bei schneller Belastung und weicherem Verhalten (geringere Kräfte) bei langsamer Belastung führt (Jepsen et al., 2023). Dies zeigen die in Abbildung 35 dargestellten Kraft-Auslenkungsdiagramme der drei verschiedenen Belastungszeiten im direkten Vergleich. Prinzipiell weisen die Zähne aller Menschen dieses gleiche Muster bei Belastung aufgrund der physiologischen Eigenschaften des parodontalen Ligaments auf. Was sich unterscheidet ist, dass dabei einige Zähne mehr bzw. weniger Kraft für ihre Auslenkung benötigen und dass die maximale Kraft unterschiedlich schnell erreicht wird. Wirkt die Kraft über eine längere Zeit auf den Zahn ein, kommt es zu einem zeitabhängigen Fließen (Bourauel et al., 2014). So kommt es bei langanhaltender Zahnbelastung zu Flüssigkeitsströmungen in der Alveole oder in benachbarte Knochenhohlräume, wodurch der Zahn deutlich beweglicher wird. Dies lässt sich auch an den sinkenden Kräften graphisch ablesen (siehe Abbildung 35).

Die Kurven bei den 10 Sekunden Messungen zeigen bei einigen Testzähnen, im Vergleich zu den anderen Messungen, einen unruhigeren, „zickzack“-artigen Verlauf (Abbildungen 32 – 34). Dies hat womöglich damit zu tun, dass die Krafteinwirkung bei den 10 Sekunden Messungen über 10-Mal länger eingesetzt wurde als bei den Messungen, die 1 Sekunde dauerten. Dies gibt den Proband*Innen für eine längere Zeit die Möglichkeit sich während

des Messvorgangs zu bewegen, welches sich dann möglicherweise graphisch ablesen lässt. Eine andere Möglichkeit könnte sein, dass einzelne Testzähne sich zwischen den Belastungen erholen konnten und daher sich die Kurve im „zickzack“-Verlauf darstellt. Dies spiegelt sich aber nicht in den Kurven der MW ab.

4.2.2 Parodontale Aspekte

Das optimale Ziel der Parodontitistherapie wäre die komplette Wiederherstellung der Form und Funktion der parodontalen Gewebe, die durch Parodontitis verlorengegangen sind (Regeneration) (Melcher, 1976). Klinische und tierexperimentelle Studien zeigen, dass eine Regeneration zwar möglich ist, das Ausmaß der erreichten Regeneration jedoch begrenzt und unvorhersehbar ist (Stavropoulos und Wikesjö, 2012; Sone und McCulloch, 2023). Generell wird bei der parodontalen Wundheilung zwischen einer Wiederanheftung (reattachment), einer Regeneration (newattachment) und einer reparativen Heilung (repair) unterschieden (Melcher, 1976). Die Reparation stellt dabei das wahrscheinlichste Behandlungsergebnis dar und beschreibt den reparativen Ersatz zerstörter Gewebeanteile unter Ausnutzung verschiedener Möglichkeiten. Dabei kommt es zu Heilungs-, Substitutions- und Regenerationsprozessen. Es führt nicht zu einer parodontal-desmodontalen Regeneration, auch wenn das Gewebe klinisch entzündungsfrei ist und verringerte Sondierungstiefen aufgrund narbiger, epithelialer oder resorptiver bzw. ankylotischer Prozesse aufweist (Hoffmann, 2012) (Hellwig et al., 2013). Dieses narbige Gewebe könnte die Steifigkeit des parodontalen Ligaments je nach Ausmaß der vorherigen Entzündung beeinflussen. Die Tendenz der Messungen zeigt sich im Muster ist gleichartig, vermutlich weil die Parodontaltherapie, die alle in dieser Studie befindenden Proband*Innen durchlaufen haben, erfolgreich abgeschlossen war. Dies bedeutet, dass keine weiteren aktiven Behandlungsmaßnahmen außer den Langzeitkontrollen notwendig sind (Loos und Needleman, 2020). Sollte ein Rezidiv auftreten, würde eine neue Therapie begonnen werden.

Frühere Forschungen zur Zahnbeweglichkeit unter Verwendung von Druckluft als Kraftquelle von Persson und Svensson 1980 konnten zeigen, dass die Zahnbeweglichkeit bei Proband*Innen mit gesunden parodontalen Verhältnissen geringer waren als die Beweglichkeit der Zähne bei Proband*Innen mit Parodontitis (Persson und Svensson, 1980).

Diese Ergebnisse wurden von Schulte 1992 (Schulte et al., 1992) bestätigt, die einen starken Zusammenhang mit dem röntgenologischen Knochenverlust mittels Periotest-Messungen® fanden, während eine andere Studie keine Korrelation mit klinischen Messungen eines Blutungsindex (BOP) oder der Taschensondierungstiefe (TST) fanden (Jepsen et al., 2023).

4.2.3 Elastizitätsmodul des Parodontalen Ligaments (PDL) mit Hinblick auf u.a. Zeit, Alter, Geschlecht und Zahnanatomie

In früheren Studien wurden verschiedene experimentelle *in-vivo* und *in-vitro* Ansätze verfolgt, um das biomechanische Verhalten des PDL bei unterschiedlichen Belastungsraten und Kraftniveaus durch Überwachung der Zahnbeweglichkeit zu charakterisieren (Nägerl et al., 1991) (Dorow et al., 2002) (Natali et al., 2004), (Tohill et al., 2009), (Mühlemann und Zander, 1954).

Die meisten Messversuche waren jedoch begrenzt durch ihre ausschließliche *In-vitro*-Anwendung. Hier stößt man schnell auf Hindernisse, denn auch Laboruntersuchungen mit Standardgeräten sind zumeist nicht in der Lage, die komplexe klinische Situation hinreichend genau zu reproduzieren (Bourauel et al., 2014).

Frühere Arbeiten für *in-vivo*-Messungen ließen entweder nur quasi-statische Kräfte zu (Yoshida et al., 2001) oder haben die resultierenden Zahnbewegungen nicht bestimmt (Tohill et al., 2009). Für *in-vitro*-Experimente wurden Standard-Materialprüfgeräte verwendet, z.B. bei einer Studie von (Qian et al., 2009), die zwar die dynamische Belastung des untersuchten Zahnes erlaubten, aber nicht die daraus resultierende Durchbiegung messen konnten (Drolshagen et al., 2011).

Das verwendete intraorale Belastungsgerät wurde zuvor im Rahmen einer naturwissenschaftlichen Dissertation von Drolshagen (Drolshagen, 2012) in der Oralmedizinischen Technologie am Universitätsklinikum Bonn. So sind einige Studien veröffentlicht worden, in denen die Beweglichkeit von Zähnen nach kieferorthopädischer Therapie getestet wurde (Konermann et al., 2017) (Keilig et al., 2020). Parodontal geschädigte Zähne wurden bisher selten in ihrer Mobilität in *in-vivo* getestet und so gibt es bisher nur eine Studie (Jepsen et al., 2023), die Zähne von unbehandelten parodontal Erkrankten mit parodontal Gesunden mit Hilfe des in der vorliegende Untersuchung benutzten intraoralen Belastungsgerätes vergleicht.

In der Veröffentlichung von Bourauel von 2014 (Bourauel et al., 2014) wurde beschrieben, dass das PDL durch eine Parodontitis eine Veränderung erfährt. Es handelt sich um eine Reduktion der Steifigkeit des PDL bzw. des Elastizitäts-Moduls (E-Modul) des PDL, welches bei Parodontitispatient*Innen kleiner wird im Vergleich zu gesunden Menschen. Die Änderung der Steifigkeit des PDLs beeinflusst auch die Beweglichkeit der Testzähne. Das Parodont der bereits behandelten und stabilen Parodontitispatient*Innen weist demnach möglicherweise eine höhere Verformbarkeit auf bzw. lässt mehr Beweglichkeit zu als bei Menschen mit einem gesunden Parodont.

Eine Verringerung des E-Modul würde generell bedeuten, dass geringere Kräfte generiert werden müssen, um die gleiche Zahnauslenkung zu erreichen. Vergleicht man die in der vorliegenden Studie gemessenen Kräfte, mit den Werten aus der Studie von Konermann et al. von 2017 (Konermann et al., 2017), bestätigt sich diese Theorie. In der Studie von Konermann et al. wurde mit Hilfe desselben intraoralen Belastungsgerätes wie in der vorliegenden Untersuchung die Beweglichkeit mittlerer Inzisivi nach kieferorthopädischer Therapie zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen. Diese waren direkt, 2 Tage, 7 Tage, 14 Tage und 3 und 6 Monate nach Debonding (Entfernung der kieferorthopädischen Apparaturen). Die Werte aus der vorliegenden Studie können am besten mit den Werten 6 Monate nach Debonding verglichen werden. Der Grund liegt darin, dass sich die Zähne nach der aktiven kieferorthopädischen Therapie vermutlich erholen müssen. Analog zu der vorliegenden Untersuchung wurden in der Studie von Konermann aus dem Jahr 2017 (Konermann et al., 2017) Messungen an mittleren Inzisivi während der Belastungsphase über einen Zeitraum von 0,2 s, 0,5 s, 1 s, 2 s, 5 s und 10 s mit linearer Zahnverschiebung von Null bis maximal 200 µm durchgeführt. Die Fmax wurden in der Studie von Konermann et al. (Konermann et al., 2017) mit 19,8 N ($\pm 6,9$) (0,5 s), 19,6 N ($\pm 7,2$) (1 s) 16,0 N ($\pm 6,4$) (10,0 s) gemessen.

Der Unterschied zu dem Proband*Innenkollektiv dieser Untersuchung bestand erstens darin, dass die Patient*Innen in der Studie von Konermann et al. mit einem Durchschnittsalter von $16,1 \pm 3,1$ Jahre deutlich jünger waren als die Proband*Innen in dieser Studie, die ein Durchschnittsalter von 59 ± 12 Jahren aufwiesen. Zweitens waren die jugendlichen Zähne aus der anderen Studie nicht parodontal erkrankt. Direkt nach Debonding waren die getesteten Zähne noch deutlich beweglicher und dementsprechend sind die aufgezeichneten Kräfte noch geringer.

In einer 2018 veröffentlichten in-vitro Studie zum mechanischen Verhalten des PDL durchgeführt durch Wu et al. (Wu et al., 2018) wurde gezeigt, dass die Elastizitätsmodule der zentralen Schneidezähne größer waren als bei den geprüften kleineren lateralen Schneidezähnen. Dies zeigt, dass die zentralen Schneidezähne größere Kräfte aufnehmen können als der gleiche Bereich der seitlichen Schneidezähne (Wu et al., 2018). Weitere Studien von Poppe et al., 2002 (Poppe et al., 2002) und Göllner et al., 2010 (Göllner et al., 2010) haben herausgefunden, dass Wurzeln mit einem größeren Volumen höhere Rückstellkräfte und eine geringere Mobilität erzeugen. Für die vorliegende Studie macht das deutlich, dass die Wurzelmorphologie einen Einfluss auf die Beweglichkeit von Zähnen hat und dass die Auswahl des ersten mittleren Schneidezahnes als alleiniger Testzahn bei allen 30 Patient*Innen die vorliegende Studie vergleichbar macht.

Auch die Länge der Zahnkronen im Vergleich zu der Länge der Wurzel bzw. der Knochenabbau dürften eine wesentliche Rolle bei der Kraftentwicklung der getesteten Zähne spielen.

Abbildung 37 zeigt eine/n Proband*In mit einer klinisch eher kürzeren Zahnkrone und 23% Knochenabbau. In allen Messungen konnte er/sie die höchsten Kräfte erzielen, zeigt dabei also größeren Widerstand auf die Belastung durch den Druckstempel. Dies korreliert mit einer geringen Beweglichkeit. Die Wurzeln sind länger im Vergleich zu der Zahnkrone (siehe Röntgenbild Abbildung 37), die Zahnkronen zeigen Attritionsfacetten.



Abb. 37: Klinisches Bild der Frontzähne (linkes Bild) und der dazu gehörende Zahnfilm eine/r Proband*In (rechtes Bild) mit einer kürzeren klinischen Krone im Vergleich zu Abbildung 38

Abbildung 38 zeigt die Frontzähne eine/r Proband*In mit einer deutlich längeren klinischen Krone. Auch dieser Zahn hat 23 % Knochenabbau, allerdings sind die Inzisivi im Oberkiefer überkront und ohne sichtbare Attritionsfacetten. In diesen Messungen wurden geringere Kräfte erzielt, der Testzahn zeigt also einen geringeren Widerstand auf die Belastung durch den Druckstempel, welches dagegen eine höhere Beweglichkeit impliziert. Die Zahnkrone ist länger als die Wurzel (Abbildung 38, Röntgenbild).



Abb. 38: Klinisches Bild der Frontzähne (linkes Bild) und der dazu gehörende Zahnfilm eine/r Proband*In (rechtes Bild) mit einer längeren klinischen Krone als in Abbildung 37

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass bei den erfolgreich behandelten und stabilen Parodontitispatient*Innen kein Unterschied zwischen Männern und Frauen festzustellen war. Die erreichten Maximalkräfte zeigten annähernd identische Werte. Einzige Ausnahme stellt die Messung bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde dar, jedoch nicht signifikant. Die Werte der Probandinnen lagen bei einer durchschnittlichen F_{max} von $13,5 \text{ N} \pm 4,68 \text{ N}$ (Spannweite $F_{max} = 7,43 \text{ N} - 23,17 \text{ N}$) unter der durchschnittlich erreichten F_{max} der Probanden, die bei $F_{max} = 14,5 \text{ N} \pm 5,88 \text{ N}$ (Spannweite $5,26 \text{ N} - 26,16 \text{ N}$) lag. Dies steht in Kontrast zu den Ergebnissen von Jepsen et al. 2023. In der Studie wurden allerdings Patient*Innen in der aktiven Behandlungsphase mit gesunden Proband*Innen verglichen. Die Untersuchungen von (Konermann et al., 2017) ergaben, dass Männer bei allen Belastungszeiten deutlich höhere Kräfte für alle Belastungsdauern aufwiesen. Ein weiteres Ergebnis ist, dass das Alter keinen Einfluss auf die Maximalkraft (F_{max}) hat. Dies ist bemerkenswert, da das Alter also kein Grund für per se beweglichere Zähne darstellt. Ebenso hatte der parodontologische Zustand der Zähne auch keinen Einfluss auf

die Fmax. Dies ist überraschend, da man davon ausgehen könnte, dass ein reduziertes Parodontium prinzipiell instabiler sein müsste. Es ist aber davon auszugehen, dass durch die lange Behandlungsdauer der Patient*Innen, die sich in der UPT befinden, sich ein fibröses, narbiges Gewebe gebildet hat, dass den Zahn stabilisiert und nahezu mit einem gesunden Parodontium vergleichbar macht.

4.3 Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI)

Zusätzlich zu den klinischen Testungen wurde der bereits beschriebene Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI) Fragebogen von allen dreißig Patient*Innen ausgefüllt. Dieser zeichnet ein Bild über körperliche und psychosoziale Auswirkungen einer Erkrankung mit Parodontitis und Unbehagen, die damit einhergehen können. Eine Befragung dieser Art ist insofern wichtig, als mittlerweile großer Wert auf Patient*Innen orientierte Befragung gelegt wird. Einer der Gründe dafür ist, dass ein Behandlungserfolg nicht nur aus klinisch messbaren Parametern bestehen sollte, sondern auch die Wünsche und das Befinden der Patient*Innen beinhalten sollte. Nur wenn auch die Patient*Innen selbst die Besserung ihrer Gesundheit priorisieren, kann man langfristig den Erfolg der Therapie einer Erkrankung mit Parodontitis stabil halten. Der GOHAI-Fragebogen wurde ebenfalls statistisch untersucht und es gab zu keinem Zeitpunkt in den Antworten einen Unterschied zwischen Männern und Frauen.

Es scheint, dass die Sorgen über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch auch nach Abschluss der aktiven Parodontitistherapie weiterhin während der unterstützenden Parodontitistherapie bestehen bleiben. Überempfindlichkeiten auf heiß, kalt oder süß sind mit einem Ergebnis von 36,7 % der Patient*Innen manchmal vorhanden, was die Lebensqualität des Patientin bzw. der Patient erheblich beeinträchtigen kann (Vgl. Ergebnis GOHAI Frage 12 (Tabelle 7)). Erklärbar ist dies möglicherweise durch den Attachmentverlust, der auch nach Erreichen eines stabilen Ergebnisses je nach Ausmaß der Erkrankung stark ausgeprägt sein kann. Dies führt zu freiliegenden Zahnhälsen mit exponiertem Dentin. Überempfindlichkeiten sind allerdings meistens keine Schmerzen, die mit Hilfe von Analgetika behandelt werden müssen. Frage 8 des GOHAI zielt auf genau diesen Aspekt. Knapp 77 % der Patient*Innen gaben an, nie Schmerzmittel gegen Unbehagen oder Schmerzen im Mundbereich einnehmen zu müssen. 13,3 % gaben an, selten auf die Hilfe

Schmerzmitteln angewiesen zu sein (Tabelle 7). Das Ergebnis ist gut und schlecht gleichermaßen. Einerseits ist es erfreulich, dass die Patient*Innen meist keine Schmerzen erleiden müssen aufgrund der Parodontitis. Andererseits beinhaltet es das Risiko, dass Patient*Innen aufgrund der ausbleibenden Schmerzsymptomatik leider nicht oder zu spät eine/n Zahnärzt*In aufsuchen. Dies könnte zur Folge haben, dass die Patient*Innen bei ihrem Zahnarztbesuch bereits stärkere krankheitsbedingte Defizite wie z.B. erhöhten CAL (clinical attachment loss) aufweisen, als in der vermeintlich symptomfreien Anfangszeit. Die Frage nach den Sorgen über Probleme mit Zähnen und Zahnfleisch war ebenfalls eine Frage, die von mehreren Patient*Innen als Einschränkung empfunden wurde (vgl. GOHAI Frage 9, Tabelle 7). Anzumerken ist dabei, dass gerade Frage 9 etwas zu wenig spezifisch sein könnte. Frage 9 ist eine von zwei Fragen (vgl. Ergebnisse Frage 9 und 12), die bei den Patient*Innen vermehrt als problematisch angesehen wurde. Dabei geht es vermutlich um die Angst vor den möglichen Folgen der Erkrankung mit Parodontitis, z. B. die Angst vor Zahnverlust, Kauverlust oder Schmerzen. Auch Frage 3 nach dem problemfreien Schlucken kann ungenau sein, weil eingeschränktes Schlucken nicht nur zahnbedingter Natur sein kann. Gesundheitliche Einschränkungen wie z.B. Halsschmerzen oder andere Einschränkungen, wie beispielsweise Operationen, die das Schlucken erschweren könnten, werden nicht bei der Frage ausreichend berücksichtigt. Verbindet man jedoch einzelne Fragen, erhält man ein stimmiges Bild der Einschränkungen, die eine Erkrankung mit Parodontitis für die Patient*Innen hat bzw. haben kann. Vergleicht man beispielsweise Frage 5 und 11 (beide über „Essen ohne Unbehagen“, Tabelle 7) miteinander, geht es dort in erster Linie um das Unbehagen der Patient*Innen. Frage 5 zielt dabei nach innen, also auf das eigene Gefühl, welches beim Essen mit allen Einschränkungen, die Attachmentverlust haben kann, entstehen kann. Frage 11 dagegen eher auf das Außen und damit eher auf den sozialen Aspekt. Im Vergleich ist die Problematik im Inneren schwerwiegender als im Außen (vgl. Ergebnis Frage 5 und Frage 11). Auch bei Frage 6 und 7 (beides über „Aussehen Zähne / Zahnfleisch, Tabelle 7) sieht es ähnlich aus. Frage 6 beschäftigt sich mit dem Einschränken von sozialen Kontakten aufgrund von Unsicherheiten ausgelöst durch die Erkrankung mit Parodontitis. Hierbei geht es also auch wieder eher um die Wirkungen im Außen. Frage 7 dagegen zielt auf die eigene Zufriedenheit mit dem Aussehen der Zähne und des Zahnfleisches auch nach der Erkrankung bzw. mit der Erkrankung. Auch hier gaben im Vergleich mehr Proband*Innen

an, seltener die sozialen Kontakte aufgrund ihrer Zähne einzuschränken, als dass sie zufrieden mit dem Aussehen ihrer Zähne und des Zahnfleisches sind. Auch hier ist eher die Einschränkung im Innen problematischer, als die im Außen. Vergleicht man dann die Fragen 6 und 11, die beide ins Außen gerichtet sind, stellt man fest, dass die Verteilung annähernd gleich ist.

Einige Proband*Innen fallen mit negativ bewerteten Antworten auf die Fragen des GOHAI auf. So gibt es in der Kategorie als „sehr einschränkend“ empfundenen Themen drei Probandinnen, die diese Kategorie am häufigsten angegeben haben. Es handelt sich um weibliche Patientinnen, die zwischen 23 % und 52 % Knochenabbau aufweisen. Eine Patientin zeigt einen auffällig reduzierten Restzahnbestand. Es ist daher möglich, dass ihr die fehlenden Zähne mehr einschränken, als dass es die Erkrankung der Parodontitis an den vorhandenen Restzähnen verursacht. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass einige Zähne aufgrund der Parodontitis verloren gegangen sind und daher ihre Sorgen tatsächlich hauptsächlich auf die Parodontitis zurückzuführen sind. Ähnlich sieht es bei einer anderen Patientin mit einem konservierenden und prothetisch insuffizient versorgtes Gebiss. Es sind einige kariöse Stellen vorhanden und einer ihrer Frontzähne ist endodontisch versorgt und deutlich verfärbt. Außerdem zeigt die ganze Front deutliche Attritionen.

Ihre Allgemeinanamnese ist auffällig im Sinne von Diabetes mellitus Typ I und Morbus Basedow. Somit wird klar, dass gesundheitliche Einschränkungen sowie die eigene Unzufriedenheit und/oder psychische Probleme Faktoren sind, die bei der Beantwortung des GOHAI Fragebogens berücksichtigt werden sollten.

Der GOHAI-Fragebogen macht jedenfalls deutlich, dass man mit den Patient*Innen durch einen Fragebogen besser ins Gespräch kommen kann und herausfinden kann, wo hauptsächlich die Einschränkungen zu finden sind, die durch die Erkrankung mit Parodontitis verursacht werden. Außerdem kann man auf diese Weise leichter erfahren wie man den Patient*Innen helfen kann bzw. ob man eine Überweisung zu Spezialist*Innen in Erwägung gezogen werden sollte. Um die spontane Beantwortung des GOHAI-Fragebogens sicherzustellen wurde kein Einfluss auf die Proband*Innen während der Beantwortung genommen.

4.4 Methodische Kritiken der Studie oder Diskussion des Studiendesigns

4.4.1 Untersuchungsmethode

Die in-vivo Messungen aller dreißig Proband*Innen fanden im Universitätsklinikum Bonn in der Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde statt. Das intraorale Belastungsgerät befand sich an einem gesicherten Ort, der nicht für andere Tätigkeiten verwendet wurde und ermöglichte, dass das Gerät seinen Platz nicht verlassen musste. Die Proband*Innen hatten den Ablauf der Messungen schnell verstanden und auch die sichere Positionierung der Teilnehmer*Innen konnte überwiegend ohne Schwierigkeiten umgesetzt werden. Das intraorale Belastungsgerät für den *in-vivo*-Einsatz ist recht einfach zu bedienen, obwohl die Messleistung von der Untersucher*In eine hohe Präzision bei der Anpassung der Schiene und der Überwachung der Patient*In erforderte. Unerwünschte Bewegungen sollten vermieden werden, da sie die Messergebnisse beeinträchtigen könnten. Es war im Prinzip sehr wichtig, dass die Proband*Innen die Messeinheit und damit den Druckstempel während der Messung möglichst ruhig halten.

Alle 30 Patient*Innen hatten bereits die aktive Phase der Parodontitistherapie abgeschlossen und befanden sich in regelmäßigen Abständen in parodontalen Recalls, als UPT (unterstützende Parodontitistherapie) bezeichnet. Sie gelten als erfolgreich behandelte und stabile Patient*Innen. Ergebnisse aus der 2023 veröffentlichten Studie von (Jepsen et al., 2023) konnten zum ersten Mal bestätigen, dass es tatsächlich signifikante Unterschiede in gemessenen Kräften und der damit verbundenen Beweglichkeit der getesteten Inzisivi von Patient*Innen mit parodontaler Gesundheit und Erkrankung gab. In der vorliegenden Studie gab es keine Kontrollgruppe, aber da die gesunden Proband*Innen aus der Studie von (Jepsen et al., 2023) mit demselben Gerät, unter dieselben Konditionen und in selben Raum gemessen wurden, können die Ergebnisse aus der Studie als eine Art Kontrollgruppe benutzt werden.

Die vorliegende Studie ist allerdings eine Querschnittsuntersuchung, es wäre sehr interessant gewesen, wenn solche Messungen von früheren Zeitpunkten des Verlaufs der Krankheit zur Verfügung gestanden hätten. Vielleicht ist dies ein neuer Ausgangspunkt für weiterführende Longitudinalstudien.

Anhand des GOHAI Fragebogens wird deutlich, dass Fragen trotz Erklärung und Hilfestellung der Untersucher*Innen von den Proband*Innen nicht richtig verstanden werden.

Diese Problematik kann bei allen Fragen auftreten. Insbesondere sind die Fragen 3,5 und 7 hervorzuheben, da diese gegenteilig formuliert sind und ggf. zu Verwirrung bei den Proband*Innen geführt haben könnten.

4.4.2 Proband*Innenauswahl

Die dreißig Proband*Innen waren alle nach Abschluss der aktiven Parodontitistherapie als stabil in die unterstützende Parodontitistherapie der Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde der Universität Bonn aufgenommen worden. Es handelte sich um 17 weibliche und 13 männliche Teilnehmer*Innen, also eine relativ gleiche Verteilung der Geschlechter. Die Patient*Innen befanden sich bereits längere Zeit in der UPT. Bei manchen wurde vor der Teilnahme der UPT, um Resttaschen zu eliminieren, eine chirurgische Intervention durchgeführt. Diese jedoch wurde mindestens ein Jahr zuvor abgeschlossen. Die wichtigsten Umbauvorgänge nach einen parodontalchirurgischen Eingriff passieren in dem ersten Jahr nach dem Eingriff, danach sind die Unterschiede nicht mehr signifikant (Susin et al., 2015).

Die Liste der Ausschlusskriterien war recht lang, was eine Auswahl geeigneter Proband*Innen recht aufwendig machte. So wurden nur Proband*Innen in die Studie einbezogen, die weniger als 10 Zigaretten pro Tag rauchten (Kinane und Radvar, 1997).

Die Patient*Innen mussten mindestens 18 Jahre alt und psychisch in der Lage sein, an der Studie teilzunehmen. Dies implizierte das selbstständige Lesen der Einverständniserklärung, die selbstständige Beantwortung des GOHAI-Fragebogens und die Fähigkeit, den Druckstempel des intraoralen Belastungsgerätes möglichst ruhig halten zu können. Da die meisten Patient*Innen mit einer Parodontitis über 18 Jahre alt sind, war das Alter kein einschränkendes Ausschlusskriterium. Das höhere Alter einiger Patient*Innen allerdings konnte gegebenenfalls mit einem Tremor zusammenhängen und war daher möglicherweise problematisch. Dieses Problem kam jedoch nicht in der vorliegenden Untersuchung vor und war deshalb nicht relevant. Weiterhin mussten die Patient*Innen in der Lage sein, für die Messungen und den Recall (UPT) in die Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde der Universität Bonn zu kommen. Zuletzt ist auch die Compliance/Adhärenz der Patient*Innen entscheidend, da man auf die Teilnehmer*Innen einer Studie angewiesen ist.

4.4.3 Befunderhebung

Die parodontalen Befunde wurden im Rahmen der UPT in der Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde der Universität Bonn aufgenommen. Die Sondierungstiefen und parodontologischen Daten der Testzähne wurden mit der Sonde UNC 15 (Hu-Friedy, Chicago, USA) gemessen, indem die Sonde parallel zur Längsachse des Zahns eingeführt wurde, um den tiefsten Punkt der Tasche zu erfassen. Diese Sonde ist in 1 mm skaliert und ermöglicht somit möglichst genaue Messungen. Der Abstand zwischen dem Zahnfleischrand und dem Taschenboden wurde erfasst. Die UNC 15-Sonde wurde ebenfalls verwendet, um die CAL aus dem Abstand zwischen dem Zementschmelzübergang und dem apikalen Ende der Sonde zu messen. Für jede/n Proband*In wurde die größte CAL verzeichnet. Der BOP wurde durch ein sanftes Einführen der parodontalen Sondenspitze in den Sulkus aufgezeichnet, gefolgt von einem sanften Streep von der proximalen Oberfläche zur proximalen Oberfläche. Jede Blutung, die 30 s nach dem Entfernen der Sondenspitze beobachtet wurde, wurde aufgezeichnet. Der BOP basierend auf dem Prozentsatz der Lokalisationen für alle Zähne eines Probanden mit Ausnahme von Zähnen ohne klinische Kronen wurde gemessen (Gufran et al., 2023). Eine Studie von (Fitzgerald et al., 2022) hat gezeigt, dass eine manuelle Parodontalsonde, die visuell auf den ganzen Millimeter genau abgelesen wird, hochgradig reproduzierbare Sondierungstiefen und Attachmentverlust-Messungen an mittelschwer bis tief entzündeten parodontale Taschen liefern kann, wenn sie von einem/r geschulten und kalibrierten Parodontolog*In verwendet wird.

4.5 Vertrauen in die Ergebnisse

Die vorliegende Studie zeichnet aus, dass immer dieselbe Untersucherin die parodontalen und klinischen Werte erhoben hat und auch die Messungen durchgeführt hat. Weiterhin wurde eine Kalibrierung der Untersucherin erhoben, um die Untersuchungsmethoden vertrauenswürdig und reproduzierbar zu gestalten. Alle Patient*Innen erfüllten die vorgegebenen Einschlusskriterien, welches die Auswahl des Kollektivs recht gleichartig macht. Die richtige Anwendung des intraoralen Belastungsgerätes, der Messeinheit und der Erhebung der Daten wurde im Vorfeld genau erklärt von Professor Christoph Bourauel und Dr. Ludger Keilig (Oralmedizinische Technologie, Universitätsklinik Bonn) und von der Untersucherin geübt.

4.6 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse verbessern unser Verständnis für parodontal geschädigtes Gewebe bei Patient*Innen, die sich in der Langzeitbetreuung befinden. Ein wichtiger Punkt dieser Untersuchung ist, dass parodontal geschädigte Zähne nach einer Einheilzeit von mindestens einem Jahr sehr stabil gegen Belastungen sein können.

Dabei geht es u. a. darum wie die vermutliche Belastbarkeit von Zähnen mit einem reduzierten, aber nicht entzündeten Zahnhalteapparat zusammenhängt. Auch das Vertrauen in der Belastbarkeit parodontalgeschädigter Zähne in der Erhaltungstherapie kann besser eingeschätzt werden.

Die vorliegenden Daten dienen auch dazu, das intraorale Belastungsgerät in Zukunft weiterzuentwickeln. Das Messsystem kann die vollständige Kraft-/Auslenkungsscharakteristik über einen weiten Bereich von Verschiebungsgeschwindigkeiten aufzeichnen, von quasistatischen Belastungen bis hin zu kurzzeitigen Impulsen von bis zu 0,1 s. Somit ist das Gerät in der Lage, Zahnverschiebungen nichtinvasiv mit hoher Auflösung aufzuzeichnen und das zeitabhängige biomechanische Verhalten des PDL zu überwachen (Koner-mann et al., 2017). Derzeit wird die Durchbiegung des Zahnes an der Kontaktstelle der Schubdüse gemessen. Eine vollständige dreidimensionale Rekonstruktion des Uhrwerks mit in das intraorale Belastungsgerät integrierten Hallsensoren und Magneten ist geplant, aber noch nicht kalibriert und installiert. So konnte eine 3D-Bewegungsrekonstruktion nur durch nachfolgende Finite-Elemente-Simulationen mit patientenindividualisierten Modellen realisiert werden.

Intraorale Belastungsgeräte können die Überwachung der Zahnmobilität verbessern, da die zeitabhängig gemessenen Werte qualitative (Entzündungsstatus, interpretiert durch BOP) und quantitative Parameter (interpretiert als Umfang des CAL-Verlusts) der Parodontalerkrankung widerspiegeln (Jepsen et al., 2023).

In Zukunft könnte das Gerät verwendet werden, um den Krankheitsverlauf objektiver zu überwachen und könnte helfen, genauere Modelle für das Überleben der Zähne bei Patient*Innen zu entwickeln, die wegen Parodontitis behandelt werden, um die Behandlung vorhersehbarer zu machen. Nicht zuletzt können Zähnen mit einem reduzierten Parodontium durchaus, mit entsprechender Langzeitbetreuung, mehr Vertrauen gegeben werden.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die biomechanischen Eigenschaften des Parodontalen Ligaments nach Abschluss der aktiven Parodontitistherapie untersucht.

Das parodontale Ligament (PDL) dient zum einen der Befestigung des Zahnes in seiner Alveole, zum anderen bewirkt es eine Abfederung und Verteilung der auf den Zahn auftreffenden Belastungen auf den umgebenden Knochen.

Die Folge der Parodontitis, trotz Therapie, ist ein mehr oder weniger reduziertes Parodont. Nach Abschluss der aktiven Parodontitistherapie erfährt das PDL eine Reduktion der Steifigkeit bzw. des Elastizitäts-Moduls (E-Modul), welches bei Parodontitispatient*Innen kleiner wird im Vergleich zu gesunden Menschen. Die Änderung der Steifigkeit des PDLs beeinflusst auch die Beweglichkeit der Testzähne.

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass bei den erfolgreich behandelten und stabilen Parodontitispatient*Innen kein Unterschied zwischen Männern und Frauen, unabhängig von den gemessenen Parametern, festzustellen war (Nullhypothese 1). Auch bezüglich der Alter der Proband*Innen (Nullhypothese 2) beziehungsweise zwischen den biomechanischen und parodontologischen Ergebnissen konnten keine Korrelationen gefunden werden (Nullhypothese 3). Somit konnte keine der Nullhypothesen verworfen werden.

Zwischen den Fmax Werten der verschiedenen Belastungszeiten konnten allerdings signifikante Korrelationen gefunden werden. Zwischen Fmax 0,5 Sekunde und Fmax 1 Sekunde konnte ein Korrelationskoeffizient von 0,592 ($p = 0,001$), zwischen Fmax 0,5 Sekunde und Fmax 10 Sekunden ein Korrelationskoeffizient von 0,509 ($p = 0,004$) und zwischen Fmax 1 Sekunde und Fmax 10 Sekunden ein Korrelationskoeffizient von 0,604 ($p = 0,000$) gefunden werden (alle Spearman Korrelationskoeffizient).

Bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden lagen die Mittelwerte (MW) der Fmax $\pm$ Standardabweichung (SD) bei

- allen Proband*Innen Fmax = $13,2 \pm 4,92$ N,
- den weiblichen Probandinnen Fmax = $13,1 \pm 5,07$ N
- den männlichen Probanden bei Fmax = $13,4 \pm 4,92$ N.

Bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde lagen die MW der Fmax $\pm$ SD bei

- allen Proband*Innen Fmax = $13,9 \pm 5,16$ N

- den weiblichen Probandinnen $F_{\max} = 13,5 \pm 4,68 \text{ N}$
- den männlichen Probanden $F_{\max} = 14,5 \pm 5,88 \text{ N}$

Bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden lagen die MW der $F_{\max} \pm \text{SD}$ bei

- allen Proband*Innen $F_{\max} = 10,3 \pm 3,69 \text{ N}$
- den weiblichen Probandinnen $F_{\max} = 10,3 \pm 2,80 \text{ N}$
- den männlichen Probanden $10,3 \pm 4,74 \text{ N}$

Bei längeren Belastungszeiten bewegt sich der Druckstempel des hier verwendeten intraoralen Belastungsgeräts über dieselbe Distanz wie bei den kürzeren Belastungszeiten, jedoch langsamer. Dies gibt dem Zahn und dem PDL mehr Zeit zur Bewegung und zur Reaktion auf die Kraft, die auf den Zahn einwirkt und verringert damit den Widerstand, den der Zahn dem Druckstempel entgegen setzt.

Als Ergänzung zu den biomechanischen Messungen wurden die Empfindungen der Patient*Innen anhand eines GOHAI Fragebogens mit 12 Fragen zu körperlichen Funktionen, psychosozialen Funktionen, Schmerzen und Unbehagen getestet. Dieser ist standardisiert und auf die Patient*Innen bezogen. Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass die meisten Patient*Innen meist keine Schmerzen erleiden und nur manchmal Schmerzmittel einnehmen müssen. Die Sorge über die Gesundheit von Zähnen und Zahnfleisch und deren Aussehen sind in Zeiten von Social Media besonders hoch und stellen ein großes emotionales Problem dar, mit denen die Patient*Innen zu kämpfen haben. Da nach einer erfolgreichen Behandlung meist Gewebe abgebaut wird, kommt es vermehrt zu Empfindlichkeiten auf heiß, kalt und süß.

Die vorliegenden Ergebnisse verbessern unser Verständnis für parodontal geschädigtes Gewebe bei Patient*Innen, die sich in der Langzeitbetreuung (UPT) befinden. Dabei geht es unter anderem darum, wie die vermutliche Belastbarkeit von Zähnen nach Abschluss der aktiven Parodontitistherapie mit einem reduzierten, aber nicht entzündeten Attachment zusammenhängt. Auch das Vertrauen in der Belastbarkeit parodontalgeschädigter Zähne in der Erhaltungstherapie kann besser eingeschätzt werden.

6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung des anatomischen Aufbaus von Zahn und Parodont.	10
Abb. 2: Schematische Darstellung der verschiedenen Faserbündel und ihres Verlaufes	12
Abb. 3: Schematische Darstellung zweier Unterkiefer Molaren und eines Prämolaren und der wichtigsten Kollagenfasergruppen des parodontalen Ligaments	14
Abb. 4: Entscheidungskriterien für die Staging der Parodontitis	21
Abb. 5: Entscheidungskriterien für die Grading der Parodontitis	22
Abb. 6: Therapiestufen der Parodontitistherapie	25
Abb. 7: Darstellung einer Kraft-Auslenkungskurve mit Hysterese und Präkonditionierung eines Schneidezahnes einer Versuchsperson	31
Abb. 8: Zeitlicher Ablauf der Studie	33
Abb. 9: GOHAI Fragebogen mit 12 Fragen	36
Abb. 10: Beispielhafter parodontaler Attachmentstatus eines Patienten dieser Studie	40
Abb. 11: Beispielhafte Messung des röntgenologischen Knochenabbaus	41
Abb. 12: Modell eines Oberkiefers aus Superhartgips (Foto Ohm, 2018)	43
Abb. 13: Linke Seite: Verpackung der verwendeten Schiene der Firma Erkodent, Rechte Seite: Schiene vor dem Einlegen in das Tiefziehgerät	44
Abb. 14: Tiefziehgerät der Firma Erkodent	45
Abb. 15: Links: Modell mit tiefgezogener Aufbissschiene, Rechts: Schiene nach Ablösung vom Modell, Entfernung der Platzhalterfolie	46
Abb. 16: Bearbeitete individuelle Schiene mit Aussparung für den Testzahn und reduzierter Gaumenlänge	46
Abb. 17: Links: Gussform für Kunststoffverankerungseinheiten, Rechts: PalaXpress Prothesenkunststoff der Firma Heraeus Kulzer	47
Abb. 18: Nach der Polymerisation des Kunststoffes	48
Abb. 19: Aufbissschiene nach Politur	48
Abb. 20: Intraorales Belastungsgerät nach (Keilig et al., 2016) mit einer individuellen Schiene	49

Abb. 21: Schematischer Aufbau der Belastungseinheit	50
Abb. 22: Steuerrechner (Laptop) angeschlossen an die Steuereinheit	52
Abb. 23: Positionierung des/der „Proband*In“ zur Durchführung einer störungsfreien, reproduzierbaren Messung	52
Abb. 24: Steuerrechner mit digitaler Anzeige des Kraftanstieges bei Kontakt des Druckstempels mit der Zahnoberfläche des Patienten	54
Abb. 25: Vereinfachte Darstellung einer Kraft-Auslenkungskurve mit einer Phase der Belastung (rot), einer anschließenden Plateauphase (grün) und der Erholungsphase (weiß)	59
Abb. 26: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal für alle Proband*Innen (Belastungsdauer 0,5 Sekunden)	61
Abb. 27: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der weibliche Probandinnen (Belastungsdauer 0,5 Sekunden)	62
Abb. 28: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der männlichen Probanden (Belastungsdauer 0,5 Sekunden)	63
Abb. 29: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal aller Probanden (Belastungsdauer 1 Sekunde)	65
Abb. 30: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der weiblichen Probandinnen (Belastungsdauer 1 Sekunde)	66
Abb. 31: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der männlichen Probanden (Belastungsdauer 1 Sekunde)	67
Abb. 32: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal für alle Proband*Innen (Belastungsdauer 10 Sekunden).	69
Abb. 33: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal weiblicher Probandinnen (Belastungsdauer 10 Sekunden)	70
Abb. 34: Kraft-Auslenkungskurve bis zu einem Maximum von 200 µm nach palatinal der Probanden (Belastungsdauer 10 Sekunden)	71
Abb. 35: Kraft-Auslenkungsdiagramme der Mittelwerte von allen drei Belastungszeiten.	73
Abb. 36: Zusammenfassung der Auswertung der GOHAI Fragebögen nach Häufigkeiten der Antworten in %	82

Abb. 37: Klinisches Bild der Frontzähne (linkes Bild) und der dazu gehörende Zahnfilm eine/r Proband*In (rechtes Bild) mit einer kürzeren klinischen Krone im Vergleich zu Abbildung 38 88

Abb. 38: Klinisches Bild der Frontzähne (linkes Bild) und der dazu gehörende Zahnfilm eine/r Proband*In (rechtes Bild) mit einer längeren klinischen Krone als in Abbildung 37 89

7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Messprotokoll für die klinischen Messungen dieser Studie	42
Tab. 2: Beschreibung der Patient*Innen	56
Tab. 3: Parodontologische Daten der Testzähne.....	57
Tab. 4: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 0,5 Sekunden	60
Tab. 5: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 1 Sekunde	64
Tab. 6: Ergebnisse der Messungen bei einer Belastungszeit von 10 Sekunden	68
Tab. 7: Auswertung des Geriatric/General oral health assessment Index (GOHAI) Fragebogens in Prozent.....	75

8. Literaturverzeichnis

Aas JA, Paster BJ, Stokes LN, Olsen I, Dewhirst FE. Defining the normal bacterial flora of the oral cavity. *J Clin Microbiol* 2005; 43: 5721–5732

Albandar JM, Susin C, Hughes FJ. Manifestations of systemic diseases and conditions that affect the periodontal attachment apparatus: Case definitions and diagnostic considerations. *J Clin Periodontol* 2018; 45 Suppl 20: S171-S189

Armitage GC. Development of a classification system for periodontal diseases and conditions. *Ann Periodontol* 1999; 4: 1–6

Atchison KA, Dolan TA. Development of the Geriatric Oral Health Assessment Index. *J Dent Educ* 1990; 54: 680–687

Axelsson P, Lindhe J. The significance of maintenance care in the treatment of periodontal disease. *J Clin Periodontol* 1981; 8: 281–294

Benedikt M. Biomechanische Grundfragen. *Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen* 1910; 31: 164–174

Berkovitz BK. The structure of the periodontal ligament: an update. *Eur J Orthod* 1990; 12: 51–76

Bosshardt DD. The periodontal pocket: pathogenesis, histopathology and consequences. *Periodontol 2000* 2018; 76: 43–50

Bourauel C, Reimann S, Hasan I, Keilig L. Biomechanik in der Zahnheilkunde. *Zahnmedizin up2date* 2014; 8: 87–107

Caton JG, Armitage G, Berglundh T, Chapple ILC, Jepsen S, Kornman KS, Mealey BL, Papapanou PN, Sanz M, Tonetti MS. A new classification scheme for periodontal and peri-implant diseases and conditions - Introduction and key changes from the 1999 classification. *J Clin Periodontol* 2018; 45 Suppl 20: S1-S8

Chaffee BW, Couch ET, Ryder MI. The tobacco-using periodontal patient: role of the dental practitioner in tobacco cessation and periodontal disease management. *Periodontol 2000* 2016; 71: 52–64

Chapple ILC, Mealey BL, van Dyke TE, Bartold PM, Dommisch H, Eickholz P, Geisinger ML, Genco RJ, Glogauer M, Goldstein M, Griffin TJ, Holmstrup P, Johnson GK, Kapila Y, Lang NP, Meyle J, Murakami S, Plemons J, Romito GA, Shapira L, Tatakis DN, Teughels W, Trombelli L, Walter C, Wimmer G, Xenoudi P, Yoshie H. Periodontal health and gingival diseases and conditions on an intact and a reduced periodontium: Consensus report of workgroup 1 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Clin Periodontol* 2018; 45 Suppl 20: S68-S77

Cichon P, Klar S. Aktuelle Konzepte der nicht chirurgischen Parodontitistherapie. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt* 2021; 130: 32–46

Connizzo BK, Sun L, Lacin N, Gendelman A, Solomonov I, Sagi I, Grodzinsky AJ, Naveh GRS. Nonuniformity in Periodontal Ligament: Mechanics and Matrix Composition. *J Dent Res* 2021; 100: 179–186

Dannewitz B, Holtfreter B, Eickholz P. Parodontitis – Therapie einer Volkskrankheit. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 2021; 64: 931–940

Deschner J, Haak T, Jepsen S, Kocher T, Mehnert H, Meyle J, Schumm-Draeger P-M, Tschöpe D. Diabetes mellitus und Parodontitis. Wechselbeziehung und klinische Implikationen. Ein Konsensuspapier. *Internist* 2011; 52: 466–477

Dorow C, Krstin N, Sander FG. Experimentelle Untersuchung der Zahnbeweglichkeit am Menschen "in vivo". *Biomed Tech (Berl)* 2002; 47: 20–25

Drolshagen M. Konstruktion und Erprobung eines intraoralen Belastungssystems zur Bestimmung von Kraft-Auslenkungszusammenhängen von Zähnen im menschlichen Gebiss. Bonn (<https://d-nb.info/1033872032>)

Drolshagen M, Keilig L, Hasan I, Reimann S, Deschner J, Brinkmann KT, Krause R, Favino M, Bourauel C. Development of a novel intraoral measurement device to determine

the biomechanical characteristics of the human periodontal ligament. *J Biomech* 2011; 44: 2136–2143

Fitzgerald BP, Hawley CE, Harrold CQ, Garrett JS, Polson AM, Rams TE. Reproducibility of Manual Periodontal Probing Following a Comprehensive Standardization and Calibration Training Program. *J Oral Biol (Northborough)* 2022; 8

Göllner M, Holst A, Berthold C, Schmitt J, Wichmann M, Holst S. Noncontact intraoral measurement of force-related tooth mobility. *Clin Oral Investig* 2010; 14: 551–557

Gufran K, Khan MS, Alqahtani AS, Alnufaiy B. Pain Assessment and Need for Analgesics after Scaling and Root Planing in Patients with Stage II and Stage III Periodontitis. *Medicina (Kaunas, Lithuania)* 2023; 59

Haffajee AD, Socransky SS. Microbial etiological agents of destructive periodontal diseases. *Periodontol 2000* 1994; 5: 78–111

Hajishengallis G. Periodontitis: from microbial immune subversion to systemic inflammation. *Nature reviews. Immunology* 2015; 15: 30–44

Hamp SE, Nyman S, Lindhe J. Periodontal treatment of multirooted teeth. Results after 5 years. *J Clin periodontol* 1975; 2: 126–135

Hassel AJ, Rolko C, Koke U, Leisen J, Rammelsberg P. A German version of the GOHAI. *Community Dent Oral Epidemiol* 2008; 36: 34–42

Hassell TM. Tissues and cells of the periodontium. *Periodontology 2000* 1993; 3: 9–38

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. Köln: Dt. Zahnärzte-Verl. 2013

Herrera D, Retamal-Valdes B, Alonso B, Feres M. Acute periodontal lesions (periodontal abscesses and necrotizing periodontal diseases) and endo-periodontal lesions. *J Periodontol* 2018; 89 Suppl 1: S85-S102

Hoffmann T. Kritische Wertung regenerativer Parodontitistherapie. *DFZ* 2012; 56: 78–87

Jepsen K, Jervøe-Storm P-M, Henrichs I, Lensing I, Müller AL, Cosgarea R, Keilig L, Bourauel C, Jepsen S. Biomechanical properties of periodontal tissues in non-periodontitis and periodontitis patients assessed with an intraoral computerized electronic measurement device. *Clin Oral Invest* 2023; 27: 797–805

Jepsen S. Parodontale und peri-implantäre Erkrankungen. *Zahnarztl Mitt* 2018; 16: 76–82

Karayiannis A, Lang NP, Joss A, Nyman S. Bleeding on probing as it relates to probing pressure and gingival health in patients with a reduced but healthy periodontium. A clinical study. *J Clin periodontol* 1992; 19: 471–475

Keilig L, Drolshagen M, Tran KL, Hasan I, Reimann S, Deschner J, Brinkmann KT, Krause R, Favino M, Bourauel C. In vivo measurements and numerical analysis of the biomechanical characteristics of the human periodontal ligament. *Annals of anatomy = Ann Anat* 2016; 206: 80–88

Keilig L, Goedecke J, Bourauel C, Daratsianos N, Dirk C, Jäger A, Konermann A. Increased tooth mobility after fixed orthodontic appliance treatment can be selectively utilized for case refinement via positioner therapy - a pilot study. *BMC oral health* 2020; 20: 114

Kinane DF, Radvar M. The effect of smoking on mechanical and antimicrobial periodontal therapy. *J Periodontol* 1997; 68: 467–472

Konermann A, Al-Malat R, Skupin J, Keilig L, Dirk C, Karanis R, Bourauel C, Jäger A. In vivo determination of tooth mobility after fixed orthodontic appliance therapy with a novel intraoral measurement device. *Clin Oral investig* 2017; 21: 1283–1289

Lamont RJ, Koo H, Hajishengallis G. The oral microbiota: dynamic communities and host interactions. *Nat Rev Microbiol* 2018; 16: 745–759

Lang NP, Nyman S, Senn C, Joss A. Bleeding on probing as it relates to probing pressure and gingival health. *J Clin periodontol* 1991; 18: 257–261

Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag 2015

Lindhe J, Ranney R, Lamster I, Charles A, Chung C-P, Flemmig T, Kinane D, Listgarten M, L  e H, Schoor R, Seymour G, Somerman M. Consensus report: Chronic Periodontitis. *Ann Periodontol* 1999; 4: 38

Lindhe J, Socransky SS, Nyman S, Haffajee A, Westfelt E. "Critical probing depths" in periodontal therapy. *J Clin Periodontol* 1982; 9: 323–336

Loos BG, Needleman I. Endpoints of active periodontal therapy. *J Clin Periodontol* 2020; 47 Suppl 22: 61–71

Manresa C, Sanz-Miralles EC, Twigg J, Bravo M. Supportive periodontal therapy (SPT) for maintaining the dentition in adults treated for periodontitis. *Cochrane Database Syst Rev* 2018; 1: CD009376

Marouf N, Cai W, Said KN, Daas H, Diab H, Chinta VR, Hssain AA, Nicolau B, Sanz M, Tamimi F. Association between periodontitis and severity of COVID-19 infection: A case-control study. *J Clin Periodontol* 2021; 48: 483–491

Marsh PD, Zaura E. Dental biofilm: ecological interactions in health and disease. *J Clin Periodontol* 2017; 44 Suppl 18: S12-S22

Mayfield L, Bratthall G, Attstr  m R. Periodontal probe precision using 4 different periodontal probes. *J Clin Periodontol* 1996; 23: 76–82

Melcher AH. On the repair potential of periodontal tissues. *J Periodontol* 1976; 47: 256–260

M  hleman HR, Zander HA. Tooth Mobility (III): The Mechanism of Tooth Mobility. *Journal of periodontology* 1954; 25: 128-137, 153

Müller H-P. Checklisten der Zahnmedizin Parodontologie. s.l.: Georg Thieme Verlag KG 2012

Nägerl H, Burstone CJ, Becker B, Kubein-Messenburg D. Centers of rotation with transverse forces: An experimental study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991; 99: 337–345

Natali AN, Pavan PG, Scarpa C. Numerical analysis of tooth mobility: formulation of a non-linear constitutive law for the periodontal ligament. *Dent Mater* 2004; 20: 623–629

Offenbacher S. Periodontal diseases: pathogenesis. *Ann Periodontol* 1996; 1: 821–878

O'Leary TJ, Drake RB, Naylor JE. The plaque control record. *J Periodontol* 1972; 43: 38

Papadopoulou K, Keilig L, Eliades T, Krause R, Jäger A, Bourauel C. The time-dependent biomechanical behaviour of the periodontal ligament--an in vitro experimental study in minipig mandibular two-rooted premolars. *Eu J orthod* 2014; 36: 9–15

Papapanou PN, Sanz M, Buduneli N, Dietrich T, Feres M, Fine DH, Flemmig TF, Garcia R, Giannobile WV, Graziani F, Greenwell H, Herrera D, Kao RT, Kebschull M, Kinane DF, Kirkwood KL, Kocher T, Kornman KS, Kumar PS, Loos BG, Machtei E, Meng H, Mombelli A, Needleman I, Offenbacher S, Seymour GJ, Teles R, Tonetti MS. Periodontitis: Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Periodontol* 2018; 89 Suppl 1: S173-S182

Persson R, Svensson A. Assessment of tooth mobility using small loads. I. Technical devices and calculations of tooth mobility in periodontal health and disease. *J Clin Periodontol* 1980; 7: 259–275

Poppe M, Bourauel C, Jäger A. Determination of the elasticity parameters of the human periodontal ligament and the location of the center of resistance of single-rooted teeth a study of autopsy specimens and their conversion into finite element models. *J Orophac Orthop* 2002; 63: 358–370

Provatidis CG. A comparative FEM-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament. *Finite Element Method. Med Eng Phys* 2000; 22: 359–370

Qian L, Todo M, Morita Y, Matsushita Y, Koyano K. Deformation analysis of the periodontium considering the viscoelasticity of the periodontal ligament. *Dent Mater* 2009; 25: 1285–1292

Rateitschak KH. *Parodontologie*. Stuttgart: Thieme 1989

Sanz M, Herrera D, Kebschull M, Chapple I, Jepsen S, Beglundh T, Sculean A, Tonetti MS. Treatment of stage I-III periodontitis-The EFP S3 level clinical practice guideline. J Clin Periodontol 2020a; 47 Suppl 22: 4–60

Sanz M, Herrera D, Kebschull M, Chapple I, Jepsen S, Beglundh T, Sculean A, Tonetti MS. Treatment of stage I-III periodontitis-The EFP S3 level clinical practice guideline. J Clin Periodontol 2020b; 47 Suppl 22: 4–60

Schulte W, d'Hoedt B, Lukas D, Maunz M, Steppeler M. Periotest for measuring periodontal characteristics--correlation with periodontal bone loss. J Periodontal Res 1992; 27: 184–190

Prometheus LernAtlas der Anatomie - Kopf, Hals und Neuroanatomie. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Reg. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag 2015

Sone ED, McCulloch CA. Periodontal regeneration: Lessons from the periodontal ligament-cementum junction in diverse animal models. Front Dent Med 2023; 4: 41

Stavropoulos A, Wikesjö UME. Growth and differentiation factors for periodontal regeneration: a review on factors with clinical testing. J Periodontal Res 2012; 47: 545–553

Susin C, Fiorini T, Lee J, Stefano JA de, Dickinson DP, Wikesjö UME. Wound healing following surgical and regenerative periodontal therapy. Periodontol 2000 2015; 68: 83–98

Tohill R, Hien M, McGuinness N, Chung L, Reuben RL. Measurement of the short-term viscoelastic properties of the periodontal ligament using stress relaxation. In: Magjarevic R, Nagel JH, Vander Sloten J, Verdonck P, Nyssen M, Haueisen J, Hrsg. 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 1467–1470

Tonetti MS, Greenwell H, Kornman KS. Staging and grading of periodontitis: Framework and proposal of a new classification and case definition. J Clin Periodontol 2018; 45 Suppl 20: S149-S161

Wills DJ, Picton DCA, Davies WIR. A study of the fluid systems of the periodontium in macaque monkeys. *Arch Oral Biol* 1976; 21: 175–185

Wu B, Fu Y, Shi H, Yan B, Lu R, Ma S, Markert B. Tensile testing of the mechanical behavior of the human periodontal ligament. *Biomed Eng Online* 2018; 17: 172

Yoshida N, Koga Y, Peng CL, Tanaka E, Kobayashi K. In vivo measurement of the elastic modulus of the human periodontal ligament. *Med Eng Phys* 2001; 23: 567–572

9. Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Priv.-Doz. Dr. med. dent. Pia-Merete Jervøe-Storm für die freundliche Überlassung des Themas und ihre tatkräftige Unterstützung bei der Abfassung der Arbeit. Fachlich wie auch emotional war Sie immer für mich da und ich konnte ich immer auf sie verlassen.

Bei Herrn Dr. Ludger Keilig und Herrn Prof. Dr. Christoph Peter Bourauel möchte ich mich für die wertvollen Anregungen, Korrekturvorschläge und die Unterstützung bei der Durchführung der Studie und der Verschriftlichung der Ergebnisse bedanken.

Meinen Freundinnen Ina Lensing und Isabel Henrichs gilt ein ganz besonderer Dank, da ich ohne sie nicht Teil dieser Studie hätte werden können.

Ohne meine Familie und meine Freunde und Freundinnen und ihren stetigen Support hätte ich nicht das Durchhaltevermögen gehabt auf meinen Traum hinzuarbeiten und daher möchte ich mich auch an dieser Stelle von ganzem Herzen für die wundervolle Unterstützung bedanken.

Schließlich möchte ich mich bei Valentin Hermann bedanken für das stetige Motivieren, für die hilfreichen Tipps mit Word und die unfassbare emotionale Unterstützung.

DANKE!