

**Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf**

Direktor: Universitätsprofessor Dr. D. Drescher

**Der Einfluss orthodontischer Kräfte auf die Zahnsensibilität**

**Dissertation**

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der  
Zahnmedizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

**Lisa Müller**

2005

**Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

**gez.: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Wolfgang H.-M. Raab  
Dekan**

**Referent: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Dieter Drescher**

**Korreferentin: Univ.-Prof. Dr. med. Helga Idel**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Literatur</b>	<b>4</b>
2.1	Initiale Effekte einer orthodontischen Kraft	4
2.2	Innervation von Parodontium und Pulpa	5
2.3	Beitrag peripherer Nerven zur akuten Entzündung	7
2.4	Neuropeptide in Parodontium und Pulpa unter dem Einfluss orthodontischer Kräfte	8
2.5	Weitere pulpale Reaktionen auf orthodontische Kräfte	10
2.6	Schmerzsymptomatik	13
2.7	Nivellierungsbögen und Kraftgrößen	15
2.8	Sensibilitätstest	16
2.8.1	Allgemeines	16
2.8.2	Elektrische Sensibilitätsprüfung mit dem Vitality Scanner	19
2.9	Elektrische Sensibilitätsschwelle orthodontischer Patienten	20
<b>3</b>	<b>Fragestellung</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>24</b>
4.1	Teilnahmekriterien und Patienten	24
4.2	Beschreibung des Vitality Scanner	24
4.3	Elemente der festsitzenden Apparatur	27
4.4	Messmethode	27
4.5	Verarbeitung und statistische Auswertung der Daten	30

<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>32</b>
5.1	Beschreibung der Stichprobe	32
5.2	Zeitlicher Verlauf der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle	33
5.2.1a	Mittlere Oberkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte	33
5.2.1b	Mittlere Oberkieferinzisiven mit passiver Bogenhälfte	35
5.2.2a	Erste Oberkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte	37
5.2.2b	Erste Oberkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte	40
5.2.3a	Mittlere Unterkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte	43
5.2.3b	Mittlere Unterkieferinzisiven mit passiver Bogenhälfte	45
5.2.4a	Erste Unterkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte	47
5.2.4b	Erste Unterkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte	50
5.2.5a	Alle Inzisiven und Prämolaren mit aktiver Bogenhälfte	53
5.2.5b	Alle Inzisiven und Prämolaren mit passiver Bogenhälfte	55
5.3	Vergleich der Sensibilitätsschwelle nach Bogenhälften	57
5.3.1	Halbseitenvergleich bei mittleren Oberkieferinzisiven	57
5.3.2	Halbseitenvergleich bei ersten Oberkieferprämolaren	58
5.3.3	Halbseitenvergleich bei mittleren Unterkieferinzisiven	60
5.3.4	Halbseitenvergleich bei ersten Unterkieferprämolaren	61
5.3.5	Halbseitenvergleich aller Inzisiven und Prämolaren	63
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>65</b>
6.1	Methode	66
6.2	Verhalten der Zahnsensibilität im Verlauf der drei Zeitpunkte	67
6.3	Halbseitenvergleich zwischen aktivem und passivem Bogen	70
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>74</b>

# 1 Einleitung

Die festsitzende kieferorthopädische Apparatur, bestehend aus Brackets, orthodontischen Bändern und Bögen, ist ein Standardgerät für orthodontische Korrekturen. Ihr Prinzip beruht darauf, dass der Bogen beim Einlagern in die Brackettslots bzw. in die Tubes der Molarenbänder elastisch deformiert wird. Der Bogen hat das Bestreben, in den Zustand mit der kleinstmöglichen inneren Energie zurückzukehren. Das heißt, aufgrund seiner elastischen Materialeigenschaften hat der Bogen ein Rückstellvermögen, sodass solange eine Kraft auf den Zahn wirkt, bis der Bogen einen entspannten Zustand erreicht hat.

Bereits seit der Antike ist bekannt, dass Zähne durch kontinuierliches Einwirken einer äußeren Kraft bewegt werden können. Um 400 vor Christus beschreibt der griechische Arzt Hippocrates in seinem als „Corpus Hippocraticum“ bekannten Schriftstück den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Wachstumstyp, der Kieferform und der Disposition zu Zahnfehlstellungen [1]. Hippocrates empfiehlt, Zähne durch ständigen Fingerdruck in die gewünschte Position innerhalb des Zahnbogens zu bewegen [2]. Aulus Cornelius Celsus (25 vor bis 50 nach Christus), römischer Verfasser des Werkes „De re medicina“, und der arabische Arzt Paul Aegineta (625 bis 690 nach Christus) beschreiben die Notwendigkeit der Entfernung überzähliger (Milch-) Zähne zur Behandlung oder Vermeidung einer irregulären Zahnbogenform. Leonardo da Vinci erfasste als erster die Beziehung eines Zahnes zum jeweiligen Nachbarzahn und zum Antagonisten.

Die erste kieferorthopädische Apparatur wurde jedoch erst 1723 von Pierre Fauchard erfunden. Sein „bandolet“ genanntes Gerät gilt als Vorläufer des heutigen Expansionsbogens [1]. Die weitere Entwicklung der festsitzenden Apparatur ging über Bänder mit Attachments (Delabarre, 1815) und Bändern aus verschiedenen Edelmetallen wie Gold, Platin und Silber (Magill, 1866) [3].

Als Erfinder des Multibandsystems und „Vater der modernen Kieferorthopädie“ gilt Edward H. Angle (1855-1930) [3, 4]. Angle war der erste Zahnmediziner, der sich ausschließlich als Kieferorthopäde betätigte. Im Jahr 1899 veröffentlichte er seine Klassifikation der Dysgnathien. 1906 verwendete er einen als „basic E-arch“ bezeichneten Expansionsbogen, und 1913 kamen erstmalig Brackets in seinem „ribbon

arch system“ zum Einsatz. Die noch heute verbreitete „Edgewise-Technik“ entwickelte E. H. Angle 1926. Das Prinzip dieser Technik beruht auf der Anwendung von Brackets mit horizontal verlaufenden Bracketslots in Kombination mit einem Vierkantaußenbogen, in den die Bewegungsinformationen als Biegungen eingearbeitet sind. Der Edgewise-Mechanismus ermöglicht so die körperliche Bewegung von Zähnen entlang des Drahtbogens. Verwendete Angle noch einen einzigen, stark dimensionierten Bogen (0.022 x 0.028 inch), so waren die Ziele späterer Modifikationen u. a. die Reduktion auftretender Kräfte und die Verringerung behandlungsinduzierter Zahnschäden. Zu nennen sind hier Beggs „Light-wire-Technik“ mit elastischen runden Bögen, Jarabaks „Light-wire-edgewise-Technik“, die „bioprogressive Therapie“ nach Ricketts, bei der Teil- und Utilitybögen zum Einsatz kommen, die „Straight-wire-Technik“ (Andrews, Roth, Alexander), bei der die Bewegungsinformation selbst im Bracket enthalten ist und daher gerade Bögen eingesetzt werden, und die „Segmentbogentechnik“ nach Burstone [3]. Nicht zuletzt war es die vermeintlich einfache Handhabung, die der Straightwire-Apparatur zu größter Beliebtheit verhalf. Doch auch ihre Anwendung erfordert Kenntnisse der Kräftesysteme und der Edgewise-Biegungen.

Die Behandlung mit festsitzenden Apparaturen macht heute einen großen Anteil des kieferorthopädischen Praxisalltags aus. Das System aus Brackets, Bändern und Drahtbogen ermöglicht eine große Bandbreite an Bewegungen, wie die körperliche Translation, Rotation, Intrusion und Extrusion eines Zahnes und Bewegungen der Zahnwurzel, genannt Torquebewegungen. Das Risiko iatrogenen Schäden ist aufgrund der Erkenntnisse über die biologischen Grundlagen der Zahnbewegung deutlich zurückgegangen: Waren früher radiologisch nachweisbare apikale Wurzelresorptionen an der Tagesordnung, so treten sie heute seltener und in geringerem Umfang auf.

Bei aller Routine, mit der mittels festsitzender Apparatur Dysgnathien behandelt und die kieferorthopädischen Probleme vieler Patienten gelöst werden, bleibt jedoch das Tragen derselben mit einer Reihe von Unannehmlichkeiten für den Patienten verbunden. Die meist jugendlichen Patienten, deren Compliance ein nicht zu vernachlässigender Faktor für den Behandlungserfolg ist, tragen die Apparaturen etwa ein bis zwei Jahre. In diesem Zeitraum müssen sie sich z. B. mit Problemen bei der Nahrungsaufnahme, Irritationen der Mundschleimhaut und einer durch die Apparatur

zusätzlich eingeschränkten Ästhetik arrangieren. In einer von *Oliver und Knapman* gegen Ende der jeweiligen Behandlung durchgeführten Patientenbefragung wurden der Schmerz und das optische Erscheinungsbild als unangenehmste Aspekte des Tragens einer kieferorthopädischen Apparatur genannt. Immerhin 15% der Befragten hatten zwischenzeitlich das ausgeprägte Bedürfnis, die Behandlung abubrechen [5]. Den Patienten wird außerdem ein erhöhter Aufwand für die Zahnpflege abverlangt.

Insbesondere in der Initialphase der Behandlung können Schmerzen auftreten. Beschwerden beim Kauen veranlassen die Patienten meist, sich auf weichere Nahrungsmittel zu beschränken. Spannungsgefühle an den Zähnen und „empfindliche“ Zähne werden häufig von den Patienten geschildert. Irritationen an den Wangeninnenseiten und Ulzera bereiten den Patienten etwa ab Tag zwei nach Eingliedern einer festsitzenden Apparatur Probleme, erst fünf Tage später klingen diese dann ab [6].

Auf der Suche nach den Ursachen für das Auftreten von Schmerzen und Beschwerden im Bereich der Zähne zu Beginn der Multiband- oder Multibracket-Therapie wurden bislang meist die Reaktionen des Zahnhalteapparats untersucht. Doch auch Veränderungen in der Zahnpulpa infolge einer orthodontischen Krafteinwirkung treten immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses. Die Pulpa entzieht sich der direkten Inspektion im Mund aufgrund ihrer Lokalisation im Inneren des Zahnes. Eine seit langem etablierte Methode zur Pulpadiagnostik ist der Sensibilitätstest. Ziel dieser Studie ist es, die Sensibilität der Zähne unter dem Einfluss der festsitzenden kieferorthopädischen Apparatur zu erfassen und daraus mögliche Rückschlüsse auf Reaktionen der Pulpa zu ziehen.

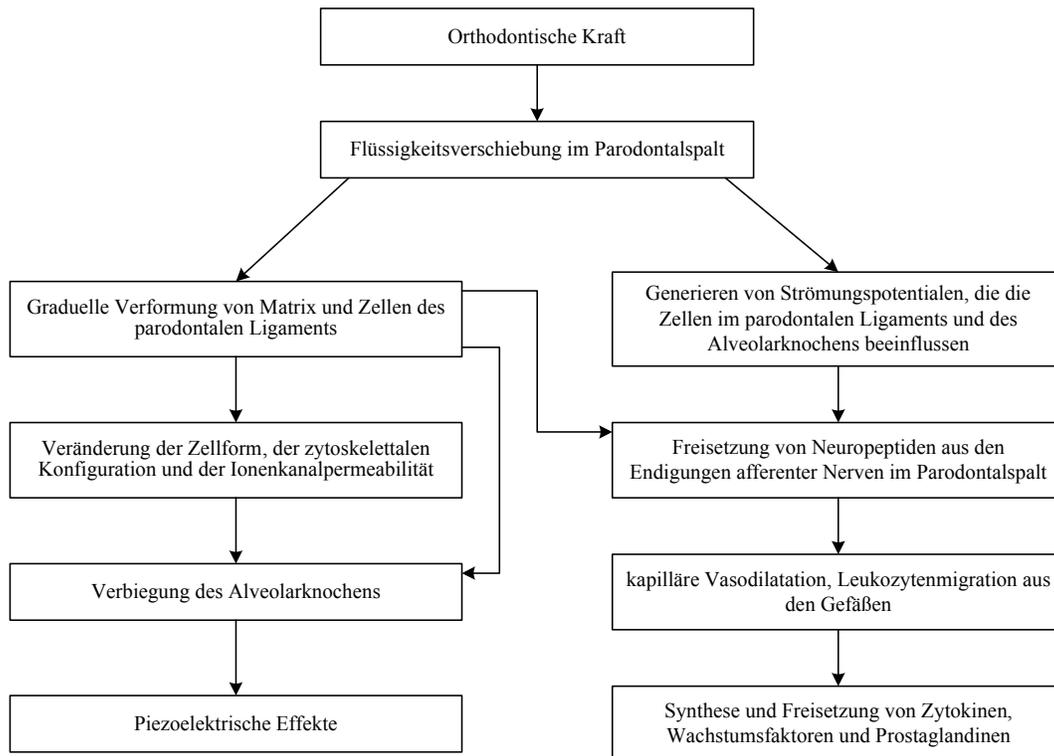
## 2 Literatur

### 2.1 Initiale Effekte einer orthodontischen Kraft

Die biologische Grundlage der Zahnbewegung ist eine durch Krafteinwirkung hervorgerufene sterile Entzündung des Parodonts, die umfangreiche Umbauvorgänge nach sich zieht. *Davidovitch* [7] fasst in einem Schema die initialen Effekte einer orthodontischen Kraft auf die parodontalen Gewebe zusammen (Abb. 1). Die orthodontische Kraft bewegt den Zahn zunächst innerhalb der Alveole, wobei auf der Druckseite Flüssigkeit im Parodontalspalt verdrängt werden muss, das heißt es kommt zu einer initialen Kompression der Blut- und Lymphgefäße. Darüber hinaus wird der Alveolarknochen verbogen, und auch auf zellulärer Ebene kommt es zu Verformungen und Aktivierungen. *Long et al.* [8] beschreiben das Vorkommen von komprimierten und geweiteten Regionen des Parodontalspalts. Diese Veränderungen, entsprechend den Druck- und Zugzonen, konnten sie im Tierversuch nach Einwirken einer Kraft für drei Tage nachweisen. In den Kompressionszonen konnten sie hyalinisierte Bereiche beobachten. Das hyalinisierte Material wirkt als potentes Agens, das die beginnende Entzündung entfacht.

Die Auswirkungen einer orthodontischen Kraft bleiben jedoch nicht nur auf Parodontalspalt und Alveolarknochen beschränkt, sondern auch die Pulpa ist in das entzündliche Geschehen mit einbezogen. *Vandevska-Radunovic et al.* [9] untersuchten in einem Tierexperiment mit Ratten die Blutzirkulation in Parodontalspalt, Pulpa und Alveolarknochen nach Einwirken einer orthodontischen Kraft für einen Tag, drei, sieben, 14 und 21 Tage. Hierbei wurden im Parodontalspalt und in der Pulpa ähnliche Beobachtungen gemacht: Am ersten Tag war die Blutzirkulation reduziert, stieg dann bis zum siebten Tag deutlich an und fiel bis zum 21. Tag wieder ab. Im Alveolarknochen nahm die Blutzirkulation in den ersten sieben Tagen zu, um ebenfalls bis zum 21. Tag wieder abzunehmen. Eine orthodontische Kraft scheint also nach einer initialen Ischämie anschließend eine reaktive Hyperämie zu verursachen. Außerdem treten die Zirkulationsveränderungen nicht nur lokalisiert im Parodontalspalt auf, sondern sind ein mehr generalisiertes Ereignis, das im Zahn und im gesamten Zahnhalteapparat stattfindet.

Nach *Davidovitch* [7] setzen afferente Nerven des Parodontalspalts sogenannte Neuropeptide frei, die gefäßerweiternd wirken und damit die Durchblutung der am Geschehen beteiligten Areale steigern. Die Hyperämie entspricht dem ersten Stadium in der klassischen Entzündungslehre. Später treten Leukozyten aus den Gefäßen aus und modulieren durch von ihnen freigesetzte Entzündungsmediatoren die weiteren Vorgänge, unter anderem werden die phagozytotischen Eigenschaften von Makrophagen aktiviert.



**Abbildung 1: Initiale Effekte einer orthodontischen Kraft auf das Parodontium (nach *Davidovitch*)**

## 2.2 Innervation von Parodontium und Pulpa

Den peripheren Nerven wird in neueren Studien eine Bedeutung in entzündlichen Prozessen zuerkannt, die über die rein sensible bzw. sensorische Funktion hinausgeht. Einige dieser Studien beschäftigen sich mit den Antworten der Nerven von Parodont

und Pulpa auf eine orthodontische Krafteinwirkung. Zum besseren Verständnis der im Folgenden erläuterten Zusammenhänge zwischen Entzündungsvorgängen und der Behandlung mit festsitzenden Apparaturen werden zunächst die anatomisch-physiologischen Grundlagen der parodontalen und pulpalen Innervation dargestellt: Die Afferenzen im parodontalen Ligament sind Nozizeptoren in Form freier Nervendigungen und Propriozeptoren bzw. Mechanorezeptoren [19]. Die sensorischen Nerven des Parodonts stammen zum größten Teil aus dem Ganglion trigeminale und erreichen über den zweiten und dritten Trigeminusast die Parodontien des Ober- und Unterkiefers. Ein kleiner Teil der Afferenzen kommt aus dem mesencephalen Nucleus trigeminale, um über das Ganglion trigeminale und die Trigeminusäste zum Parodontalspalt zu gelangen. Hier konnten *Byers et al.* als Mechanorezeptoren spezialisierte, kapsellose Endigungen nachweisen, ähnlich den Ruffini-Körperchen [20]. Auch die somatosensorischen Nerven der Pulpa haben ihren Ursprung im Ganglion trigeminale und erreichen über den Nervus maxillaris und den Nervus mandibularis via Parodontalspalt und Apex die Pulpa der Zähne von Ober- und Unterkiefer. Die Sympathikusfasern der Pulpa stammen aus dem Ganglion cervicale superius. Sie folgen zum größten Teil der Arteria carotis externa, der Arteria maxillaris und den oberen und unteren Alveolararterien zu den Zähnen. Ein kleiner Teil der sympathischen Nerven nimmt seinen Weg über das Trigeminusganglion, um dann den sensorischen Nervenfasern zu folgen [21].

Der Hauptanteil der insgesamt 1000 bis 2000 Nervfasern der Pulpa, nämlich etwa 70 bis 80 %, ist nicht-myelinisiert. Zu den nicht-myelinisierten Fasern gehören die sympathischen und die sensiblen C-Fasern, die den dumpfen Schmerz bei einer Pulpitis übertragen und auch auf thermische Reize reagieren. Die A-Fasern zählen zu den myelinisierten Fasern und lassen sich aufgrund unterschiedlicher Leitungsgeschwindigkeiten und Kaliber in A $\beta$ - und A $\delta$ -Fasern unterteilen, wobei die letzteren den Hauptanteil aller myelinisierten Fasern der Pulpa ausmachen. A $\delta$ -Fasern reagieren auf thermische, osmotische und taktile Stimuli und verändern nicht ihre Sensibilität bei wiederholter Reizeinwirkung. Sie sind für den spitzen, hellen Schmerz verantwortlich, wie er z. B. beim Exkavieren ohne Lokalanaesthesie auftritt. Die A $\beta$ -Fasern hingegen werden mit Sensationen in Verbindung gebracht, die unterhalb der

Schmerzschwelle liegen. Ihre nicht-nozizeptiven Informationen spielen möglicherweise eine Rolle für den Kauvorgang [22, 23].

### 2.3 Beitrag peripherer Nerven zur akuten Entzündung

Eine besondere Rolle im Entzündungsprozess spielen sogenannte Neuropeptide. Neuropeptide sind Substanzen, die von sensiblen Neuronen der Schmerzbahn im Rückenmark und auch von den peripheren Endigungen kleinkalibriger sensibler (C- und A $\delta$ -) Fasern freigesetzt werden [24, 25]. Am intensivsten wurden bisher die proinflammatorischen und vasoaktiven Wirkungen der beiden Neuropeptide *substance P* (SP) und *calcitonin gene-related peptide* (CGRP) untersucht. Eine verletzungsinduzierte Aktivierung der primären Afferenzen löst die Freisetzung von Neuropeptiden aus. SP ist dabei mit CGRP in den Nerven kolokalisiert [25]. SP wirkt via Mastzellen und auch direkt auf die Gefäße. Die Freisetzung von SP löst bei den Mastzellen die Aminausschüttung aus und bewirkt eine Vasodilatation und Plasmaextravasation. CGRP hingegen wirkt ausschließlich auf die Gefäße und ist ein außerordentlich starkes Vasodilatans [24].

*Pedersen-Bjergaard et al.* verabreichten Probanden intrakutane (Unterarm) und intramuskuläre (M. temporalis) Injektionen von CGRP, SP und *Neurokinin A* (NKA) und Kombinationen von CGRP mit SP oder NKA. SP allein und in Kombination mit CGRP rief als intrakutane Injektion eine signifikante Schmerz sensation hervor, nicht aber CGRP allein. Die Autoren vermuteten, dass nicht SP selbst eine Stimulation der Nozizeptoren verursacht, sondern dass SP die Nervenfasern sensibilisiert und diese dann auf die Produkte eines lokalen Gewebes Schadens reagieren. Intramuskulär traten nach alleiniger CGRP-Injektion ebenfalls keine Schmerzen auf, aber nach Injektion der Kombination von CGRP mit SP oder mit NKA [26].

Neben den Neuropeptiden agieren noch weitere Substanzen in der akut entzündlichen Phase. Eine bekannte Gruppe von Substanzen sind die Prostaglandine. Hier ist insbesondere *Prostaglandin E<sub>2</sub>* (PGE<sub>2</sub>) zu erwähnen. PGE<sub>2</sub> wird wahrscheinlich in den Endigungen postganglionärer sympathischer Nerven synthetisiert und bewirkt die

Plasmaextravasation, das heißt die Ödembildung [25]. Diese von den Substanzen der peripheren Nerven hervorgerufenen Effekte bezeichnet man auch als „neurogene Entzündung“. Weitere Komponenten der neurogenen Entzündung sind die zu den Zytokinen zählenden Interleukine. *Interleukin 1-β* (IL1-β) wird nicht nur mit der Neutrophilen-Akkumulation in Zusammenhang gebracht, sondern sensibilisiert auch die Nozizeptoren. Durch die Induktion des *nerve growth factor* (NGF) fördert IL1-β die Plastizität der Nerven. Neben den Neuropeptiden ist also auch IL1-β für die Hyperalgesie während einer Entzündung verantwortlich [24].

#### **2.4 Neuropeptide in Parodontium und Pulpa unter dem Einfluss orthodontischer Kräfte**

Neuropeptide kommen in vielen Geweben vor, u. a. im Parodontium und in der Pulpa. Auch hier sind sie an entzündlichen Vorgängen, die in der Initialphase der orthodontischen Behandlung stattfinden, maßgeblich beteiligt. *Wakisaka et al.* stellten immunhistochemisch die Herkunft und Verteilung CGRP-enthaltender Nerven in der Katzenpulpa dar. Die meisten dieser Nerven erreichten die Pulpa zusammen mit den Blutgefäßen und zweigten sich dann in der subodontoblastischen Schicht auf. CGRP-enthaltende Nerven konnten sogar in der Odontoblastenschicht nachgewiesen werden, wo sie zwischen den Zellkörpern der Odontoblasten bis in das Prädentin gelangten. Da die SP-enthaltenden Neurone im Versuch eine sehr ähnliche Verteilung aufwiesen, schlossen *Wakisaka et al.*, dass CGRP und SP wahrscheinlich in denselben Neuronen koexistieren [27]. Den sensiblen Nerven der Pulpa wird hinsichtlich ihres Neuropeptidgehalts eine wichtige Funktion in der lokalen Kontrolle der Durchblutung zugeschrieben: Sie bewirken eine Vasodilatation und hemmen die durch den Sympathikus hervorgerufene Vasokonstriktion, die als Antwort auf einen schmerzhaften Reiz auftritt [28].

Verschiedene Autoren wiesen den Einfluss einer orthodontischen Kraft auf das Verhalten von Nerven, die Neuropeptide enthalten, im Tierversuch mit Ratten nach. *Kvinnsland und Kvinnsland* untersuchten das Vorkommen von Nerven, die sich

immunoreaktiv für CGRP verhalten (CGRP-ir-Nerven). Sie brachten eine nach mesial ziehende Feder, eine „coil spring“, an den ersten Molaren an und registrierten nach fünf Tagen einen Anstieg der Zahl von CGRP-ir-Nerven in der koronalen Pulpa und im periapikalen Gewebe. Auch die Interdentalspapille der Druckseite war in diese Veränderung miteinbezogen. *Kvinnslund und Kvinnslund* hielten sowohl eine vermehrte Synthese von CGRP als auch eine Proliferation CGRP-enthaltender Nerven für möglich [29].

Auf eine ähnliche Art wurde das Experiment von *Norevall et al.* durchgeführt. Hier wurde der erste Molar 24 Stunden bzw. drei Tage lang einer orthodontischen Kraft ausgesetzt. Die Immunoreaktivität für CGRP nahm auch hier in Pulpa und parodontalem Ligament zu, außerdem auch in der marginalen Gingiva. Überraschenderweise fanden ähnliche Veränderungen auch im kontralateralen, nicht in das Experiment einbezogenen ersten Molaren statt. Eine vermehrte Immunoreaktivität für CGRP war nach Absetzen der festsitzenden Apparatur auch noch nach 14 und teilweise auch nach 28 Tagen vorhanden. Die Immunoreaktivität der Nerven für SP verhielt sich äquivalent [30].

*Vandevska-Radunovic et al.* führten immunhistochemische Nachweise von CGRP, PGP 9.5 (*protein gene product 9.5*, ein cytoplasmatischer Marker von Neuronen und neuroendokrinen Zellen) und *Laminin* (als Bestandteil der Gefäßwand) durch. Zuvor wurden die ersten Molaren drei, sieben, 14 und 21 Tage lang mittels festsitzender Apparatur nach mesial bewegt. Dabei traten die größten Veränderungen nach sieben Tagen auf: Es fand ein „nerve sprouting“ statt, die Dichte der CGRP- und PGP 9.5-enthaltenden Nerven war im apikalen Parodont und in der Pulpa gestiegen. Die Nerven waren häufig in Resorptionslakunen des Knochens und neben hyalinisierten Gebieten anzutreffen. Die Anzahl der Blutgefäße nahm im parodontalen Ligament ebenfalls zu, nicht jedoch in der Pulpa. Nach 21 Tagen hatte die Dichte der Nerven und Gefäße fast wieder das Kontrollniveau erreicht. In dieser Studie konnte zweifelsfrei mit PGP 9.5 gezeigt werden, dass tatsächlich die Anzahl der Nerven zunimmt, also ein echtes „nerve sprouting“ stattfindet [31].

In der Pulpa konnten neben SP und CGRP auch andere Neuropeptide nachgewiesen werden. Sensible Afferenzen enthalten *Neurokinin A* (NKA), *Neuropeptid Y* (NPY) kommt in den sympathischen Fasern vor, und *vasoaktives intestinales Polypeptid* (VIP)

wird den parasympathischen Fasern zugeordnet [21]. Die Aufgaben der pulpalen Neuropeptide scheinen die Regulierung der Durchblutung und gewisse Funktionen in der Schmerzübertragung zu sein.

Andere Untersuchungen befassen sich mit einem weiteren Neuropeptid, nämlich mit *Methionin-Enkephalin* (ME). *Walker et al.* wiesen als erste ME in der Pulpa menschlicher Zähne nach. Sie bestimmten den ME-Gehalt extrahierter Prämolaren. Man vermutet, dass die endogenen Enkephaline wie ME die Freisetzung von SP inhibieren und damit die Impulsrate der nozizeptiven Fasern senken. Bei einigen Patienten wurde jeweils ein Prämolare aus rechtem und linkem Oberkieferquadranten mit einer „coil spring“ für 20 Minuten bis 2,5 Stunden verbunden. In der experimentellen Gruppe sank der ME-Gehalt der Pulpa. Bei den jeweils zuerst extrahierten Prämolaren, die mit einer „coil spring“ versehen worden waren, bestand eine umgekehrt log-lineare Beziehung zwischen der Größe der ausgeübten Kraft und der ME-Konzentration [32].

In einer Studie von *Parris et al.* wurden ebenfalls bei Patienten, bei denen die ersten bzw. die zweiten Prämolaren in Ober- und Unterkiefer extrahiert werden sollten, 21 bis 78 Minuten vorher jeweils die zu entfernenden Prämolaren des Oberkiefers mit einer aktivierten „coil spring“ verbunden. Die immunhistochemische Untersuchung der Pulpa nach Extraktion ergab, dass bei weiblichen Probanden die ME-Konzentration nach Applikation einer orthodontischen Kraft anstieg, wo hingegen sie bei männlichen Probanden sank. Im Schnitt war die ME-Konzentration bei weiblichen Probanden mehr als doppelt so hoch wie bei männlichen. Zudem bestand eine positive Beziehung zwischen der SP- und der ME-Konzentration und eine negative Beziehung zwischen der Kraftgröße und der ME-Konzentration. Obwohl die Unterkieferprämolaren keiner orthodontischen Kraft ausgesetzt worden waren, war die SP-Konzentration hier höher als im Oberkiefer [33].

## **2.5 Weitere pulmale Reaktionen auf orthodontische Kräfte**

Liegt das Augenmerk vieler Studien noch auf den parodontalen Ereignissen, die den Vorgang „Zahnbewegung“ erklären, so beschäftigt sich eine zunehmende Zahl von

Untersuchungen mit den möglichen Reaktionen der Pulpa auf orthodontische Kräfte. *Anstendig und Kronman* beschrieben in einer histologischen Studie an Hunden pulpale Veränderungen nach Einwirken einer orthodontischen Kraft für 21 Tage: Sie bemerkten eine Zunahme der kollagenen Fasern, eine Abnahme der Zellkonzentration insgesamt und eine Zunahme an runden Entzündungszellen. Die Anzahl an Blutgefäßen nahm ab und vermehrt waren Konstriktionen derselben zu erkennen. Die Odontoblastenschicht wies Unterbrechungen auf [10].

*Mostafa et al.* unternahmen ebenfalls den Versuch, histologische Veränderungen nachzuweisen. Sie extrudierten Prämolaren von Patienten, bei denen die Extraktion derselben indiziert war. Nach einer, zwei und vier Wochen traten Zirkulationsstörungen auf, Odontoblastendegeneration, Vakuolisierungen und ödematöse Veränderungen waren sichtbar [11].

In einer histomorphometrischen Studie an Ratten konnten *Nixon et al.* zeigen, dass eine orthodontische Kraft eine initiale pulpale Hyperämie, sichtbar als gestiegene Anzahl von Kapillaren, verursacht. Die Kapillaranzahl war abhängig von der Kraftgröße und nahm im weiteren Verlauf wieder ab. Zusätzlich wurde die Dicke der Prädentinschicht, die die dentinogene Aktivität der Pulpa widerspiegelt, gemessen: Die Dicke des Prädentins nahm abhängig von der Kraftgröße zwischen dem fünften und zehnten Tag zu, um dann wieder abzunehmen [12].

Auch einige radiorespirometrische Studien untersuchen unter Einsatz des Kohlenstoff-Isotops  $^{14}\text{C}$  den Einfluss orthodontischer Maßnahmen auf den Stoffwechsel der Pulpa: *Hamersky et al.* setzten zur Extraktion vorgesehene Prämolaren einer dreitägigen orthodontischen Kraft aus. Nach Entfernung der Zähne bestimmten sie die jeweilige Respirationsrate und fanden heraus, dass diese durchschnittlich um 27% herabgesetzt war im Vergleich zur Kontrollgruppe. Des Weiteren war die Respirationsrate umso mehr herabgesetzt, je älter die Probanden waren. Deshalb vermuteten *Hamersky et al.* als Ursache eine Einschränkung der Blutzufuhr für die Pulpa, die mit weiter verengtem Foramen apicale stärker ausgeprägt sein musste [13]. Im Tierversuch mit Ratten zeigten *Labart et al.* allerdings eine andere pulpale Reaktion: Hier war die Pulpa-Respirationsrate nach Einwirken einer 72-stündigen orthodontischen Kraft um etwa das 1,2fache erhöht verglichen mit Kontroll-exemplaren. *Labart et al.* schlossen aus ihren Ergebnissen, dass aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Respirationsrate und der

dentinogenen Aktivität der Pulpa eine Veränderung der Respirationsrate langfristige Folgen insbesondere für Zähne mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum haben könnte [14]. Diese Vermutung konnte jedoch in einer von *Popp et al.* durchgeführten radiologischen Untersuchung nicht bestätigt werden. Sie fertigten Zahnfilme der maxillären und mandibulären Inzisiven vor Behandlungsbeginn, am Ende der Retentionsphase und fünf Jahre nach Retention an und verglichen die Wurzelkanalweiten im zeitlichen Verlauf und mit denen einer Kontrollgruppe. Die orthodontische Behandlung schien keinen nennenswerten Einfluss auf die dentinogene Aktivität zu haben [15]. Zu einem ähnlichen Ergebnis wie *Hamersky et al.* kamen *Unterseher et al.*. Sie bestimmten ebenfalls die Respirationsraten menschlicher zur Extraktion bestimmter Prämolaren, nachdem diese einer 72 Stunden dauernden orthodontischen Kraft ausgesetzt waren. Im Vergleich zu den Kontrollwerten war die Respirationsrate im Durchschnitt um 33,21 % niedriger. Selbst nach einer „Rekonvaleszenzphase“ von sieben Tagen war die Respirationsrate immer noch um 33,2 % herabgesetzt [16].

Eine andere Methode zur Untersuchung der pulpalen Reaktionen auf eine orthodontische Kraft zeigen neuere Versuche, bei denen mittels „Laser Doppler flowmetry“ (LDF) der pulpalen Blutstrom in vivo direkt gemessen werden kann. *McDonald und Pitt Ford* beobachteten die Veränderungen des Blutstroms mittels LDF an Eckzähnen, die mit einer herausnehmbaren Apparatur retrahiert werden sollten. Direkt nach Aktivierung der Apparatur kam es zu einer Abnahme des Blutstroms und nach weiteren 32,2 Minuten zu einem Anstieg, der auch noch nach 24 und nach 48 Stunden nachgewiesen wurde, um nach 72 Stunden dann auf das Ausgangsniveau vor Aktivierung der Apparatur zu sinken. *McDonald und Pitt Ford* interpretierten ihre Beobachtung als reaktive Hyperämie, wie sie nach Anlegen eines Stauschlauches am Arm auftritt, um die Minderzirkulation zu kompensieren und Gewebeschäden zu verhindern. Sie schlussfolgerten, dass mit der orthodontischen Behandlung verbundener Schmerz nicht allein durch parodontale, sondern immer durch eine Kombination von parodontalen und pulpalen bzw. pulpitischen Reaktionen hervorgerufen würde [17].

Auch *Kvinnslund et al.* kamen zu einem vergleichbaren Ergebnis im Tierexperiment mit Ratten: Sie setzten die ersten Oberkiefermolaren der einen Kieferhälfte fünf Tage lang einer orthodontischen Kraft aus und untersuchten anschließend Veränderungen der

Durchblutung von Parodontium und Pulpa im Vergleich zur Kontrollseite mittels „Fluorescent Microspheres“. Dabei war eine erhöhte Durchblutung aller experimentellen Bereiche zu verzeichnen [18].

## 2.6 Schmerzsymptomatik

In der Anfangsphase der Behandlung mit einer festsitzenden Apparatur tritt Schmerz als Kardinalsymptom der Entzündung auf. Nach der klinischen Erfahrung setzt er etwa zwei Stunden, nachdem der Patient/die Patientin die Praxis verlassen hat, ein und hält etwa drei Tage an [41]. Meist wird der Schmerz von den Patienten als moderat beschrieben, dennoch gibt es individuelle Schwankungen, was die Schmerzintensität und –dauer betrifft.

*Jones* berichtet, dass Beschwerden nach Einligieren des ersten Bogens einer festsitzenden Apparatur meist in den ersten acht Tagen auftreten und dass ihre Intensität in den ersten drei Tagen am stärksten ist. Die wenigen Patienten, die unter sehr starken Schmerzen und Beschwerden leiden, beschreiben vor allem nächtliche Intensitätsspitzen [34]. Nach Untersuchungen von *Jones und Chan* empfinden 24 Stunden nach Extraktion eines Zahnes nur 28 % der Patienten Schmerz, hingegen verspüren 81 % der Patienten 24 Stunden nach Einligieren des ersten Bogens in Ober- oder Unterkiefer Schmerz. Der Schmerz erreicht bei den meisten am Morgen nach Einligieren des ersten Bogens die höchste Intensität und ist hauptsächlich im Frontzahnbereich lokalisiert, nur gelegentlich im Seitenzahnbereich oder im Bereich der Kiefergelenke. Bei 75 % der Patienten ist die Kaufunktion für mindestens 24 Stunden beeinträchtigt, häufig sind Irritationen der Wangenschleimhaut und eine Art Wundschmerz am Zahnfleisch vorhanden. Zu betonen ist, dass die Lokalisation der Schmerzen und Beschwerden immer mit dem jeweils behandelten Kiefer übereinstimmt [35, 36].

Weitere mögliche Beschwerden können sich als Spannungs- und Druckempfindungen und als gesteigerte Sensitivität der Zähne äußern. Das Kauen und Abbeißen von Nahrung wird in der Initialphase der Behandlung als schmerzhaft empfunden, und die Okklusion der Frontzähne scheint subjektiv verändert zu sein [39, 40]. Einige Behandler

empfehlen den Patienten, etwas Hartes zu kauen, um Schmerzen vorzubeugen oder zu reduzieren. Diese Maßnahme soll einer im Parodontium auftretenden Kompression der Blutgefäße entgegenwirken, verfügt aber nur über eine beschränkte Wirksamkeit [41, 42]. Effektiv in der Schmerzreduktion sind dagegen die beiden nicht-steroidalen Analgetika Ibuprofen und Acetylsalicylsäure, die als Cyclooxygenasehemmstoffe die Prostaglandinsynthese reduzieren und damit nicht nur analgetische sondern auch antiinflammatorische Eigenschaften besitzen [43].

*Sergl et al.* verglichen die Schmerz- und Beschwerdeintensitäten in der initialen Behandlungsphase mit aktiven Platten, funktionskieferorthopädischen (FKO-)Geräten und festsitzenden Apparaturen mit dem Ergebnis, dass bei FKO-Geräten und festsitzenden Apparaturen höhere Intensitäten zu verzeichnen waren als bei den aktiven Platten. Generell gab es einen Trend zur Abnahme der Beschwerden innerhalb von sieben Tagen, die mit einer Adaptation der Patienten an die Beschwerden in den ersten drei bis fünf Tagen verbunden war [39].

Nach *Ngan et al.* verursacht das Separieren von Zähnen, wie in diesem Fall mittels „S-Modules“, ähnliche Symptome wie ein Nivellierungsbogen, wobei die stärksten nach 24 Stunden auftreten und nach sieben Tagen auf das Kontrollniveau abgesunken sind [40]. Innerhalb der Gruppe der festsitzenden Apparaturen scheint das Auftreten von Schmerzen unabhängig von Bogenmaterial und Bogenform zu sein. *Jones und Chan* konnten einen fast identischen Verlauf der Schmerzsymptomatik nach Einligieren eines superelastischen 0.014 „Japanese Niti-Bogens“ und eines eher konventionellen verseilten Stahlbogens („Twistflex“) der Stärke 0.015 nachweisen [36].

Auch das so genannte „crowding“ als dreidimensionales Maß für die Stellungsabweichungen der Zähne innerhalb des Zahnbogens und damit als Maß für die zu erwartenden Kräfte scheint keinen Einfluss auf die Schmerzintensität zu haben. Vermutlich ist die individuelle Schmerzschwelle von weitaus größerer Bedeutung für das Ausmaß der auftretenden Schmerzsymptomatik [37]. *Andreasen und Zwanziger* testeten Beggs „differential force concept“ und verglichen die Wirkungen von Kräften zwischen 100 g und 150 g und Kräften zwischen 400 g und 500 g bei der Eckzahnretraktion. Hierbei bedeuteten zwar in 87,5 % der Fälle größere Kräfte auch mehr Bewegung, aber die Schmerzhäufigkeit war bei den kleineren und den größeren Kräften etwa gleich [44].

Mehrere Studien ergaben widersprüchliche Ergebnisse auf die Frage, ob die auftretenden Beschwerden und Schmerzintensitäten altersabhängig sind. So haben nach *Jones* [34] erwachsene Patienten stärkere Beschwerden als jugendliche. Dieses Ergebnis wurde von *Jones und Richmond* [37] ein Jahr später nochmals bestätigt. Dagegen empfanden in einer Untersuchung von *Brown und Moerenhout* Adoleszente (Altersgruppe 14 bis 17 Jahre) mehr Schmerzen am Morgen nach Einligieren des ersten Bogens als Erwachsene (Altersgruppe über 18 Jahre) und Präadoleszente (Altersgruppe elf bis 13 Jahre), wobei die Erwachsenen und die Elf- bis Dreizehnjährigen etwa gleiche Untersuchungsergebnisse erbrachten. Zudem war bei den Adoleszenten das psychische Wohlbefinden deutlich herabgesetzt [38].

## 2.7 Nivellierungsbögen und Kraftgrößen

Zu Beginn der Behandlung sollen mittels Nivellierungsbögen vor allem vertikale und horizontale Niveaudifferenzen der Zähne bzw. der Bracketslots ausgeglichen werden. Im Allgemeinen sind in der Initialphase leichte Kräfte erwünscht, und deshalb scheinen dünne, verseilte oder geflochtene Stahldrähte, im angelsächsischen Sprachraum als „multistranded stainless steel“ bezeichnet, und dünne Nickeltitandrähte am geeignetsten [45, 46]. *Oltjen et al.* fanden eine 3,5- bis 7fach größere Steifigkeit für verseilte Stahldrähte als für Nickeltitandrähte gleichen Durchmessers, wobei mit steigender Anzahl der Stränge die Steifigkeit der Stahldrähte abnahm [47]. Dennoch erzeugen verseilte Drähte verhältnismäßig kleine Kräfte: Um einen 0.0155 inch starken dreisträngigen Stahldraht, der vollständig am Modell einligiert war, um 0,5 mm auszulenken, benötigten *Rock und Wilson* [48] eine Kraft von 0,6 N. Hierbei entsprachen 1,0 mm Auslenkung einer Kraft von 0,9 N, und 1,5 mm entsprachen 1,8 N. *Schumacher et al.* verzeichneten mit dem „orthodontischen Mess- und Simulationssystem OMSS“ kurzzeitige, hohe Initialkräfte. Bei einer vorgegebenen Infraokklusion eines Zahnes 21 mit einer Slotdifferenz von 1 mm war die Initialkraft kleiner als 1 N für einen 0.015 inch starken verseilten Draht („Twistflex“). War Zahn 21 um 20° anguliert, betrug das auftretende Drehmoment sowohl für den verseilten Draht

als auch für einen 0.016 inch starken, runden Nickeltitandraht („Sentalloy“) 8,5 Nmm [49].

Eine Besonderheit der Stahldrähte besteht darin, dass ihre Elastizität durch Ausglühen beseitigt werden kann. Diese Eigenschaft wird in der Praxis z. B. genutzt, um Drahtenden hinter den Molarentubes leichter umbiegen zu können.

## **2.8 Sensibilitätstest**

### **2.8.1 Allgemeines**

Die Sensibilitätsprüfung ist eine routinemäßige, nicht-invasive Untersuchungsmethode in der Pulpadiagnostik. Häufig wird der Begriff „Vitalitätstest“ synonym verwendet, wobei hiermit im eigentlichen Sinne nur die Abklärung der Frage, ob eine vitale oder nekrotische Pulpa vorliegt, gemeint ist. Zugleich ist die Abklärung der Vitalität eines Zahnes die häufigste Indikation der Sensibilitätsprüfung, doch häufig ist zur Untermauerung der jeweiligen Verdachtsdiagnose noch der Einsatz der Röntgendiagnostik erforderlich. Folgt auf den Sensibilitätstest eines erkrankten Zahnes eine stark verzögerte Reizantwort, wird dies oft als Restvitalität einer ansonsten nekrotischen Pulpa interpretiert. Eine schnellere Reaktion auf den Sensibilitätstest, z. B. im Vergleich zum gesunden, kontralateralen Zahn, weist häufig auf eine Pulpitis hin [50]. Eine verzögerte oder gar negative Reizantwort auf die Sensibilitätsprüfung kann aber auch bei einer Obliteration des Pulpacavum vorliegen, ohne dass es sich um ein nekrotisches Markorgan handelt. Eine übermäßig starke Reizantwort kann an Zähnen mit Dentin-Hypersensitivität, das heißt bei keilförmigen Defekten, freiliegenden Zahnhälsen und nach dem Root Planing auftreten, aber vor allem auch bei kariösen Defekten oder nach konservierender bzw. restaurativer Versorgung derselben als postoperative Hypersensibilität. Dieses Phänomen wird mit der bei pulpitischen Veränderungen auftretenden Hyperalgesie in Zusammenhang gebracht, die durch die Pulpahyperämie und Substanzen wie den bereits in Kapitel 2.4 beschriebenen Neuropeptiden, Prostaglandinen und Interleukinen verursacht wird.

Die gebräuchlichsten Methoden zur Überprüfung der Pulpasensibilität sind die thermischen und die elektrischen Verfahren. Bei den thermischen Tests wird meist CO<sub>2</sub>-Schnee oder auf ein Wattepellet appliziertes Kältespray verwendet, gelegentlich auch heiße Guttapercha.

Für die mit Elektrizität arbeitenden Testverfahren stehen Geräte verschiedener Hersteller zur Verfügung. Unterschieden wird hier zwischen bipolaren und unipolaren Verfahren, bzw. zwischen Geräten, die eine ansteigende Spannung oder eine ansteigende Stromstärke liefern. Gemeinsam ist allen elektrischen Verfahren, dass es durch die Transmission elektrischer Energie zu einer direkten Stimulation der pulpalen Nerven kommt. Dabei verhält sich jeder Zahn wie ein Kondensator, so dass erst dann Strom fließen kann, wenn eine gewisse „Schwellenspannung“ erreicht wird. Außerdem besitzen die Zahnhartsubstanzen Schmelz und Dentin jeweils unterschiedliche elektrische Widerstände, die mit ihrer Dicke nochmals variieren. Das heißt ein Prämolare hat aufgrund des größeren Hartsubstanzdurchmessers vom Pulpacavum bis zur Schmelzoberfläche einen größeren elektrischen Widerstand als ein Inzisivus. Der Widerstand eines mittleren Oberkieferinzisivus liegt z. B. zwischen 1,5 und 3 MΩ [51]. Wegen ihres als elektrolytgefüllte Hohlräume geringeren Widerstandes gegenüber Schmelz und Dentin stellen Schmelzrisse und Dentintubuli wahrscheinlich die Pfade dar, entlang denen elektrischer Strom bevorzugt in Richtung Pulpa fließen kann [52].

Verschiedene Untersuchungen überprüften die Zuverlässigkeit der elektrischen Testverfahren mit unterschiedlichen Ergebnissen: Während *Mayer und Heppe* 1974 mit Geräten der Firmen *Siemens* und *Ritter* in 94 % der Fälle Zähne korrekt als vital oder devital identifizierten [53], erreichte der Sensibilitätstest mit dem „Vitality Scanner“ der Firma *Analytic Technology* in einer Studie von *Petersson et al.* eine Sensitivität von 72 % und eine Spezifität von 93 % [54]. *Dummer et al.* empfehlen bei Verdacht auf eine Erkrankung der Pulpa vor der elektrischen Prüfung des betreffenden Zahnes zunächst das Testen des kontralateralen Zahnes oder der Nachbarzähne. In ihrer Untersuchung zum Zusammenhang von elektrischem Sensibilitätstest und histologisch nachgewiesenem Zustand der Pulpa reagierten 84 % der gesunden Zähne auf den Sensibilitätstest wie die Kontrollgruppe, dagegen nur noch 32 % der Zähne mit einer Pulpitis. Dass aber 38 % der pulpitischen Zähne höhere Werte und 23 % niedrigere

Werte beim elektrischen Test erreichten als die Kontrollgruppe, deutet an, dass solche Messergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren sind [55].

Einen Sonderfall stellen gerade durchgebrochene Zähne dar, weil bei ihnen wahrscheinlich nicht nur das Längenwachstum der Wurzel und die Ausbildung des Apex noch nicht abgeschlossen sind, sondern auch weil ihr Raschkow-Plexus noch nicht vollständig entwickelt ist. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass bei diesen jungen Zähnen der Sensibilitätstest häufig falsch negativ ausfällt.

Aber auch beim Frontzahntrauma ist bekannt, dass die Sensibilitätsprüfung unmittelbar nach dem Ereignis negativ ausfallen kann, ohne dass es zu einem Vitalitätsverlust kommen muss. Häufig kehrt die Zahnsensibilität im weiteren Verlauf von einigen Wochen wieder zurück. Und auch im Tierversuch konnte gezeigt werden, dass nach einem Konkussionstrauma innerhalb eines Zeitintervalls von zehn bis 14 Tagen die positive Antwort auf den elektrischen Vitalitätstest zurückkehrt [56]. *Andreasen* berichtet von einem „Transient Apical Breakdown“, wobei zeitgleich mit einem Sensibilitätsverlust radiologisch eine apikale Aufhellung beobachtet werden kann, die aber im Zeitraum von ein bis mehreren Jahren ausheilt, während die Sensibilität zurückkehrt [57].

Entgegen der früher landläufigen Meinung, dass die adäquate Reaktion auf den Sensibilitätstest nur die Wahrnehmung von Schmerz sein könnte, kennt man heute ein Phänomen, das im englischsprachigen Raum als „pre-pain“ bezeichnet wird. Das bedeutet, dass die erste Wahrnehmung beim Sensibilitätstest eine Empfindung unterhalb der Schmerzschwelle sein kann. Beim elektrischen Sensibilitätstest wird diese „pre-pain“-Wahrnehmung häufig als „Kribbeln“ oder „Klopfen“ beschrieben. Das Zustandekommen dieses „pre-pain“-Phänomens konnte noch nicht eindeutig geklärt werden. Denkbare Erklärungen wären z. B. die Existenz verschiedener Populationen von Nervenfasern ( $A\beta$ - und  $A\delta$ -Fasern), die die unterschiedlichen Wahrnehmungsqualitäten erzeugen, oder aber die Rekrutierung einer größeren Faseranzahl mit steigender Reizintensität. *Brown et al.* gaben elektrische Impulse auf ein oder zwei Zähne und registrierten stabile Schwellenwerte für die Wahrnehmungen „pre-pain“ und „Schmerz“ mit einer Standardabweichung von 10 bis 15 % pro Individuum. In ihren Versuchen resultierte die räumliche Summation von „pre-pain“ meist in der Wahrnehmung „Schmerz“ [58]. *Virtanen et al.* untersuchten den Einfluss

von Stimulusdauer und -frequenz auf die resultierenden Wahrnehmungen. Sie zeigten, dass die mittlere Schwelle von A-Fasern für elektrische Impulse niedriger ist, als die Wahrnehmungsschwelle bei allen Impulslängen. Impulse mit gleicher Stromstärke, die bei einer Frequenz von 1 Hz nicht schmerzhaft waren, wurden bei einer Frequenz von 20 Hz schmerzhaft. *Virtanen et al.* folgerten, dass die Ursache für die unterschiedlichen Wahrnehmungen nicht das Vorhandensein unterschiedlicher Faserpopulationen sein konnte, sondern die zeitliche Summation der Faserimpulse [51].

### **2.8.2 Elektrische Sensibilitätsprüfung mit dem Vitality Scanner**

Bei dem „Vitality Scanner“ der Firma *Analytic Technology* handelt es sich um ein monopolares Gerät für den Vitalitäts- und Sensibilitätstest. Trotz bestehender Unterschiede in der Wahrnehmungs- und Schmerzschwelle von Individuum zu Individuum und zwischen den einzelnen Zahntypen gibt es einige Gemeinsamkeiten im Test mit dem „Vitality Scanner“: Schneidezähne erreichen durchschnittlich eine niedrigere Sensibilitätsschwelle als Eckzähne oder Prämolaren [59, 61]. Bei *Dummer et al.* wurden als Sensationsschwelle für mittlere Unterkieferinzisiven meist Werte zwischen 20 und 30 Einheiten (EPT-Units=Electrical Pulp Test-Units) auf der Skala des „Vitality Scanners“ erreicht; alle anderen getesteten Zähne (Frontzähne und Prämolaren in Ober- und Unterkiefer) reagierten in der Regel bei Werten zwischen 30 und 40 EPT-Units, wobei die Elektrode (Kathode) des Gerätes im mittleren bukkalen Drittel der Zahnkrone in Kontakt zum Zahn gebracht wurde. 89% aller getesteten Zähne erreichten ihre Wahrnehmungsschwelle bis zu einem maximalen Output von 130 V [59]. Die niedrigsten Werte bei Messungen an Frontzähnen können erreicht werden, indem die Messung an der Inzisalkante erfolgt [60]. Der normale Reaktionsbereich, also beim Sensibilitätstest an gesunden Zähnen, soll laut Hersteller durchschnittlich bei 10-40 EPT-Units für Schneidezähne, 20-50 EPT-Units für Prämolaren und bei 30-70 EPT-Units für Molaren liegen. Nach Herstellerangaben ist die Durchführung eines schmerzfreien Sensibilitätstests möglich, was im Versuch bestätigt werden konnte [59, 62]. *Dummer et al.* [62] haben die technischen Eigenschaften des „Vitality Scanner“

überprüft: Demnach liefert die Elektrode so genannte „Bursts“ von jeweils zehn elektrischen Impulsen mit negativer Ladung. Die Impulsdauer beträgt nach Dummer etwa 0,5 ms und der zeitliche Abstand zwischen zwei Impulsen 2,5 ms. Somit würden zehn Impulse entsprechend einem „Burst“ ca. 30 ms benötigen, wobei auf jeden „Burst“ eine Pause von 30 ms folgt. Eine solche Gruppe von zehn Impulsen entspräche dabei einer Einheit auf der digitalen Skala des Gerätes. Pro Einheit nimmt dabei die Spannung an der Elektrode zu, und die Rate, das heißt die Geschwindigkeit des Spannungszuwachses, ist einstellbar auf einer Skala von eins bis zehn. Je niedriger diese Rate gewählt wird, desto größer ist der Zeitabstand zwischen den Impulsen, so dass bei minimaler Rate die Impulsfrequenz 2 Hz beträgt und bei maximaler Rate 17 Hz. Die Fläche der Elektrode beträgt 4,34 mm<sup>2</sup>.

## **2.9 Elektrische Sensibilitätsschwelle orthodontischer Patienten**

Einige Autoren haben sich bereits mit der Fragestellung befasst, ob die Effekte der orthodontischen Zahnbewegung auf die Pulpa möglicherweise in einer veränderten Antwort eines Zahnes auf externe Stimuli resultieren. Dabei kamen die Autoren zu unterschiedlichen Ergebnissen: *Burnside et al.* bestimmten die elektrische Sensibilitätsschwelle von insgesamt 111 Frontzähnen bei 15 Patienten, die sich seit mindestens vier Monaten in orthodontischer Behandlung mit einem 0.022-er Bogen befanden. Als Kontrollgruppe dienten 11 Patienten, bei denen insgesamt 90 Frontzähne vor Behandlungsbeginn getestet wurden. Alle Zähne aus der behandelten Gruppe zeigten höhere Schwellenwerte im Vergleich zur Kontrollgruppe mit Ausnahme der Unterkieferzähne. Signifikante Unterschiede bestanden jedoch nur zwischen den Oberkieferfrontzähnen der beiden Gruppen [63].

In zwei Studien wurden elektrische Sensibilitätstests mit Geräten der Firma *Analytic Technology* durchgeführt: *Hall und Freer* testeten 53 Oberkieferfrontzähne, von denen 12 unbehandelte Zähne die Kontrollgruppe darstellten. Die Sensibilitätstests fanden vor Behandlungsbeginn, unmittelbar nach dem Einsetzen der festsitzenden Apparatur, nach vier und nach acht Wochen statt. Zusätzlich zu den elektrischen Tests wurden Kältetests

mit Kohlendioxid und Hitzetests mit heißer Guttapercha durchgeführt. Die Zähne der Kontrollgruppe reagierten auf alle Tests positiv. Die „experimentellen“ Zähne reagierten auf den Kälte- und Hitzetest zu jedem Zeitpunkt positiv mit Ausnahme von vier Zähnen, die zu jedem Zeitpunkt negativ reagierten. Die „experimentellen“ Zähne reagierten jedoch vier Wochen bzw. acht Wochen nach Einsetzen der Apparatur negativ auf den elektrischen Test [64].

*Cave et al.* applizierten elektrische Reize und Kältereize bei orthodontisch behandelten Oberkieferinzisiven (132 Zähne) und bei einer Kontrollgruppe (60 Zähne). Die Tests fanden zu folgenden Zeitpunkten statt: direkt vor dem Kleben der Brackets (als Ausgangswerte), unmittelbar nach Einligieren des ersten Bogens, nach 28 und 56 $\pm$ 7 Tagen, nach 100, 168 und 252 $\pm$ 14 Tagen. Die elektrischen Tests wurden mit dem „Vitality Scanner“ von *Analytic Technology* durchgeführt. Die durchschnittliche positive Reaktionsrate auf den Kälte- und Hitzetest betrug in der experimentellen Gruppe 99,41 %. Die Sensibilität auf den elektrischen Test wurde bis zum dritten Zeitpunkt (56 $\pm$ 7 Tage) niedriger, um danach etwa wieder auf das Ausgangsniveau zu steigen. *Cave et al.* bringen den Zeitraum von 56 Tagen mit der Zeit in Verbindung, die zur Nivellierung eines Zahn Bogens benötigt wird. Auch die Anzahl der Zähne, die negativ auf den elektrischen Reiz reagierten, nahm bis zum dritten Zeitpunkt zu und anschließend wieder ab. In der experimentellen Gruppe gab es eine negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und den Werten für die Sensibilitätsschwelle [65].

In einer Studie von *Leavitt et al.* wurden Sensibilitäts- und Schmerzschwelle orthodontisch behandelter mittlerer Oberkieferinzisiven und bei einer Kontrollgruppe gemessen. Gemessen wurde sofort nach Kleben der Brackets, eine Stunde nach Einligieren des ersten Bogens, eine Woche und einen Monat später. Parallel zu den Messungen füllten die Probanden einen Fragebogen und eine Visual Analogue Scale (VAS) zur Schmerzwahrnehmung aus. Bei der Sensibilitäts- und Schmerzschwelle ergab sich keine statistisch signifikante Veränderung über die Zeit oder zwischen Experiment- und Kontrollgruppe. Jedoch zeigte sich ein Trend, dass mit größerem behandlungsinduziertem Schmerz die Sensibilitäts- und Schmerzschwelle sank [66].

*Bunner und Johnson* setzten vier erste untere Prämolarenpaare einer orthodontischen Kraft aus und führten vorher und nachher eine Bestimmung der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle durch. Die Dauer der Kraftereinwirkung betrug sieben, zehn, 171

und 255 Tage. Es wurde keine Veränderung der Sensibilität im elektrischen Sensibilitätstest gefunden [67].

### 3 Fragestellung

Die Fragestellung dieser klinischen Studie lautet:

Hat das Einwirken einer initialen orthodontischen Kraft auf einen Zahn einen Einfluss auf seine Sensibilität?

Hierbei soll im Gegensatz zu den meisten Studien, die größere Beobachtungszeiträume einbeziehen, nur die erste Woche nach Einligieren einer festsitzenden kieferorthopädischen Apparatur betrachtet werden. Wenn tatsächlich eine Veränderung der Zahnsensibilität auftreten sollte, könnte dies ein Hinweis auf eine Veränderung des pulpalen Status sein. Nach den bisherigen allgemeinen Erfahrungen in der Pulpadiagnostik könnte eine Steigerung der Zahnsensibilität auf eine pulpitische Veränderung hindeuten. Wäre die Zahnsensibilität verringert oder würde sogar vorübergehend ausfallen, hätte dies Rückschlüsse zur Folge, die eher in Richtung traumatische oder degenerative Veränderung gehen.

Mit diesem Hauptanliegen verknüpft sind weitere bislang ungeklärte Fragen:

- Sind möglicherweise Parallelen zum Verlauf der Schmerzsymptomatik zu erkennen, wie sie bereits in mehreren Studien beschrieben wurde?
- Verhalten sich Zähne, bei denen ein passiver Bogen einligiert wurde, anders als Zähne mit einem üblichen aktiven Nivellierungsbogen?
- Gibt es Unterschiede im Sensibilitätsverhalten von Front- und Seitenzähnen?

## **4 Material und Methode**

### **4.1 Teilnahmekriterien und Patienten**

Die Intention der Studie war die quantitative Überprüfung der Zahnsensibilität im Verlauf der ersten Woche der kieferorthopädischen Behandlung mit festsitzender Apparatur. Bei allen Patienten war aus zahnmedizinischer Sicht eine Behandlung mit einer vollständigen, festsitzenden Straightwire-Apparatur indiziert und noch nicht begonnen worden. Die zu dieser Studie herangezogenen Zähne waren frei von Karies, aktiven parodontalen Läsionen und Restaurationen. Patienten mit extraoralen Apparaturen, Quadhelices, Transpalatinalbögen und aktiven herausnehmbaren Geräten wurden von der Studie ausgeschlossen.

Die aus Jugendlichen und auch Erwachsenen zusammengesetzte Patientengruppe stammte zum Teil aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der Westdeutschen Kieferklinik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und aus einer zahnärztlichen Praxisgemeinschaft in Leverkusen. Insgesamt nahmen 28 Patienten (15 weibliche und 13 männliche) an der Studie teil. Drei Patienten (eine Patientin und zwei Patienten) wurden während der Studie ausgeschlossen, da sie zumindest einen von den jeweils drei erforderlichen Terminen nicht wahrgenommen hatten.

Das Einverständnis aller Patienten bzw. der Eltern der minderjährigen Patienten wurde vor Teilnahme an der Studie mündlich eingeholt. Als häufigstes Argument, das zur Ablehnung der Teilnahme an der Studie durch die Patienten führte, stellte sich die Notwendigkeit heraus, zusätzliche Termine in der Klinik oder Praxis wahrnehmen zu müssen.

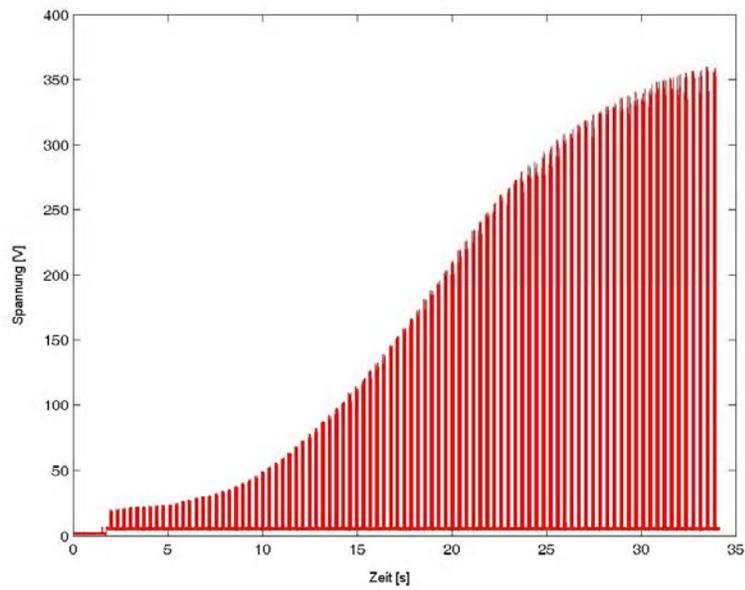
### **4.2 Beschreibung des Vitality Scanner**

Nach einigen Pilottests mit dem "TVM 02/Thermo-Vitalitäts-Messgerät für Zähne" der Firma LWS Mess- und Labortechnik GmbH, das eine Quantifizierung des Kältetests ermöglicht, stellte sich jedoch der Einsatz des bereits oben beschriebenen „Vitality

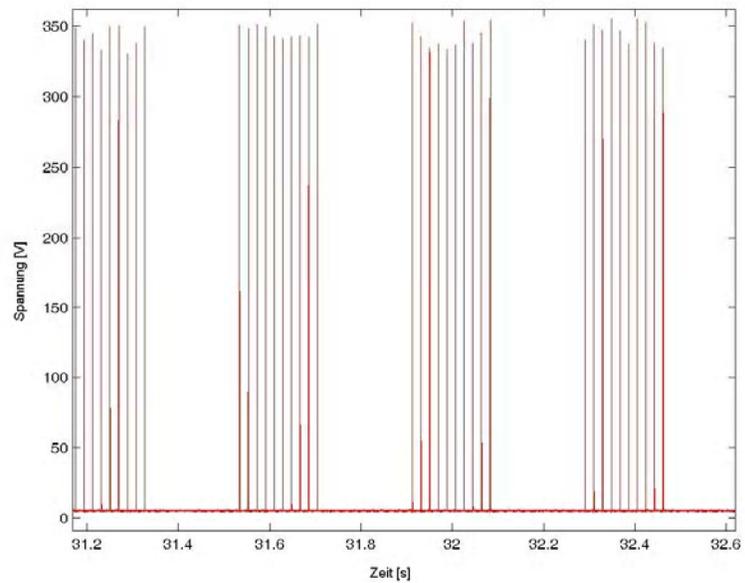
Scanner“ der Firma *Analytic Technology* (Abbildung 2) als für diese Studie aus praktischen Gründen geeigneter heraus. Als Einstellung für die Geschwindigkeit des Spannungsanstiegs an der Elektrode wurde die mittlere Rate „5“ gewählt und für alle Messungen beibehalten. Die tatsächliche Spannung an der Elektrode bei einem angenommenen Widerstand von 2 M $\Omega$  wurde mit Hilfe eines digitalen Speicheroszilloskops aufgezeichnet (Abbildungen 3 und 4). Der s-förmige Kurvenverlauf zeigt die Abfolge von jeweils zehn zu einem „burst“ gruppierten Impulsen, die jeweils einer Einheit auf der digitalen Anzeige des Gerätes entsprechen. Diese Einheiten sollen im Folgenden als EPT Units (Electrical Pulp Test Units) bezeichnet werden. Die maximale Spannung an der Elektrode beträgt demnach annähernd 360 V. Der Maximalwert entspricht dabei 80 EPT Units, die nach etwa 35 Sekunden erreicht werden. Übereinstimmend mit den Herstellerangaben sind zwei Gruppen von jeweils zehn Impulsen durch eine Pause von der Dauer von zehn Impulsen getrennt. Der Messvorgang startet automatisch, sobald der Widerstand an der Kathode, das heißt an der Prüfspitze, unter den Wert von 5 M $\Omega$  fällt (laut Hersteller). Dieser Fall tritt ein, sobald die Kathode einen Zahn als leitendes Medium berührt. Beim Absetzen der Kathode vom Zahn stoppt der Messvorgang, da der Stromkreis unterbrochen wird, und der erreichte Wert bleibt noch zwei Sekunden lang auf dem Display stehen.



**Abbildung 2:** „Vitality Scanner“ von *Analytic Technology*



**Abbildung 3: Aufzeichnung des Spannungsverlaufs, der an der Kathode nach Aufsetzen auf einen Zahn auftritt**



**Abbildung 4: Jeweils zehn Spannungsimpulse gruppieren sich zu einem „burst“ entsprechend einer EPT Unit**

### 4.3 Elemente der festsitzenden Apparatur

Bei den verwendeten Drahtbögen handelt es sich um dreifach verseilte, konfektionierte Stahlbögen in der Stärke 0.0155 inch. Die Wahl fiel auf Stahlbögen, da sich im Gegensatz zu den als Nivellierungsbögen verbreiteten Nitinol-Bögen die elastischen Eigenschaften des Stahldrahtes durch Ausglühen beseitigen lassen. Das ermöglichte den Einsatz jeweils einer ausgeglühten Bogenhälfte pro Kiefer. Als Ligaturen an den Brackets dienten *Alastics*, die sich durch ihre schnelle und einfache Handhabung auszeichnen.

### 4.4 Messmethode

Der Studienaufbau sah drei Sitzungen je Patient vor, an denen jeweils die Zahnsensibilität unter Verwendung des „Vitality Scanner“ registriert werden sollte. Die zeitliche Verteilung der Sitzungen wurde so gewählt, dass in der ersten Sitzung die Ausgangs- bzw. Kontrollwerte aufgenommen werden konnten, die zweite Sitzung in den Zeitraum fiel, in dem erwartungsgemäß die intensivsten Beschwerden bei den Patienten auftreten würden. Bei der dritten Sitzung sollten hingegen die meisten Beschwerden weitestgehend abgeklungen sein. Die erste Sitzung (Zeitpunkt T1) fand also unmittelbar vor dem Kleben der Brackets und dem Einligieren des ersten Bogens, die zweite Sitzung (T2) zwei Tage später und die dritte (T3) genau eine Woche nach der ersten Sitzung statt. Die Sensibilitätstests wurden jeweils an den zentralen Inzisiven und an den ersten Prämolaren von Maxilla und Mandibula durchgeführt.

Alle Messungen wurden von derselben Person, nämlich der Autorin, durchgeführt.

Zunächst wurde den Patienten die Vorgehensweise beim Sensibilitätstest kurz erläutert. Die Patienten wurden aufgefordert, ein deutlich hörbares, mündliches Signal („ja“ oder „stopp“) zu geben, sobald nach Aufsetzen der Elektrode auf den Zahn eine Sensation auftreten sollte. Anschließend wurde der jeweilige Zahn mit Luft getrocknet und mit Hilfe von Watterollen in der Umschlagfalte und bei Zähnen des Unterkiefers auch mit sublingual platzierten Watterollen trocken gehalten.

Eine zum Zubehör des „Vitality Scanner“ gehörende Lippenklemme wurde gegenüber der jeweils getesteten Seite angebracht, um den Stromkreis zu schließen. Alternativ hätte der Stromkreis auch dadurch geschlossen werden können, dass die Hand des Patienten das zylindrische Gehäuse der Prüfspitze umfasst. Das hätte aber möglicherweise zu Unsicherheiten oder Verwackelungen bei der Positionierung der Kathode am Zahn geführt. Die Durchführung der Tests ohne Handschuhe hätte ebenfalls den Stromkreis geschlossen, wurde aber aus hygienischen Gründen abgelehnt. Die Elektrode wurde mit einem Tropfen Elektrodengel benetzt, um den elektrischen Widerstand an der Grenzfläche zwischen Zahn und Elektrode herabzusetzen. Die jeweilige Kontaktfläche am Zahn wurde so gewählt, dass sie einerseits reproduzierbar auffindbar war und dass andererseits der Kontakt zum Parodontium, zu Nachbarzähnen und zum Bracket vermieden wurde. Bei den Inzisiven wurde die Kathode am Cingulum auf der oralen Seite aufgesetzt. Für die Oberkieferprämolaren diente die mesio-distale und okklusal-zervikale Mitte der oralen Oberfläche als Kontaktfläche. Aufgrund der meist geringen Kronenhöhe wurde die Kathode bei den Unterkieferprämolaren auf der mesialen Okklusalfäche positioniert (Abbildung 5 bis 8). Nach dem Aufsetzen der Elektrode auf den Zahn und dem dadurch ausgelösten Start der Messung wurde die Elektrode solange in Position gehalten, bis der Patient die erste Wahrnehmung signalisierte. Die Messung wurde dann durch Absetzen der Elektrode vom Zahn beendet und der auf dem Display des „Vitality Scanner“ stehen gebliebene Wert notiert. Der Messvorgang wurde unmittelbar danach noch zweimal auf die gleiche Art und Weise am gleichen Zahn wiederholt, um dann mit dem nächsten Zahn fortzufahren. Das Elektrodengel wurde sorgfältig mit einer Watterolle vom Zahn entfernt.

Die Bögen wurden vor dem Einligieren halbiert, um pro Bogen eine Hälfte auszuglühen. Die ausgeglühte Hälfte war somit bleitot, das heißt sie übte keine elastischen Kräfte auf den Zahn aus. Die Patienten wurden nicht über die unterschiedliche Beschaffenheit der Bogenhälften unterrichtet.

In der zweiten und dritten Sitzung wurden vor der Messung die Bögen entfernt und am Ende der Sitzung wieder einligiert, um ein mögliches Abfließen des Stromes über andere Zähne und damit ein verfälschtes Messergebnis zu verhindern. Der Ablauf der Messungen war in allen drei Sitzungen gleich. Nach der dritten Sitzung wurde die

orthodontische Behandlung mit dem Einligieren regulärer, vollständiger Nivellierungsbögen fortgesetzt.



**Abbildung 5: Positionierung der Kathode an einem mittleren Oberkieferinzisivus**



**Abbildung 6: Positionierung der Kathode an einem ersten Oberkieferprämolaren**



**Abbildung 7: Positionierung der Kathode an einem mittleren Unterkieferinzisivus**



**Abbildung 8: Positionierung der Kathode an einem ersten Unterkieferprämolaren**

#### 4.5 Verarbeitung und statistische Auswertung der Daten

Die Erfassung der Daten und deren statistische Auswertung erfolgten mit Hilfe der Programme Microsoft Excel 2000<sup>®</sup> und SPSS für Windows 11.0<sup>®</sup>. Für die graphische Darstellung der Daten und Ergebnisse wurden ebenfalls Microsoft Excel 2000<sup>®</sup> und SPSS für Windows 11.0<sup>®</sup> verwendet.

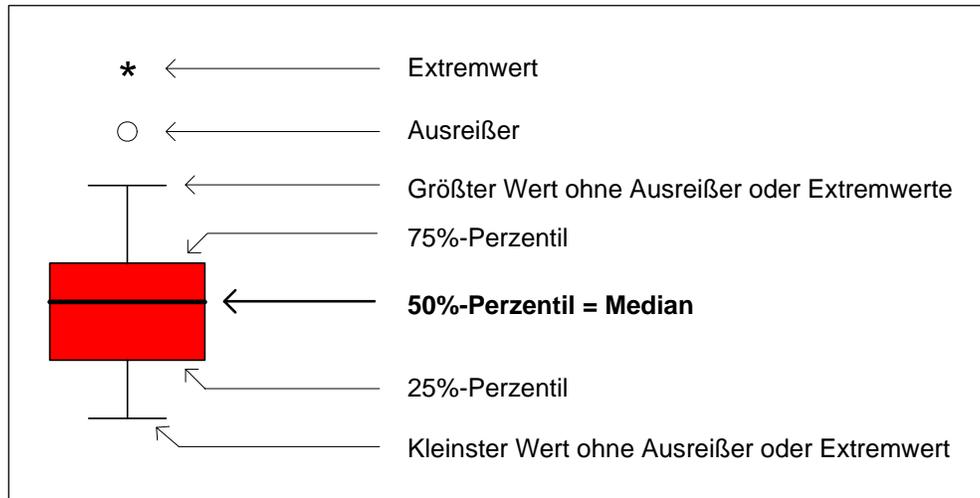
Pro Zahn wurden je drei Messwerte zu den drei Zeitpunkten T1, T2 und T3 bestimmt und für jeden Zeitpunkt gemittelt.

Für die deskriptive Statistik wurden folgende Lage- und Streuungsmaße ermittelt:

- Arithmetisches Mittel (MW)
- Standardabweichung (SD)
- Medianwert (Med)
- Minimum (Min)
- Maximum (Max)

Mittelwerte wurden als Balkendiagramme dargestellt.

Medianwerte wurden als Boxplots dargestellt, die in der folgenden schematischen Zeichnung (Abbildung 9) erläutert werden sollen. Hierbei versteht man unter einem Extremwert einen Wert, dessen Abstand vom 25 %- bzw. 75 %-Perzentil mehr als das dreifache der Boxhöhe beträgt. Bei einem Ausreißer hingegen überschreitet der Abstand mehr als das Eineinhalbfache der Boxhöhe, bleibt aber unterhalb des Dreifachen der Boxhöhe.



**Abbildung 9: Erklärung des Boxplot-Diagramms**

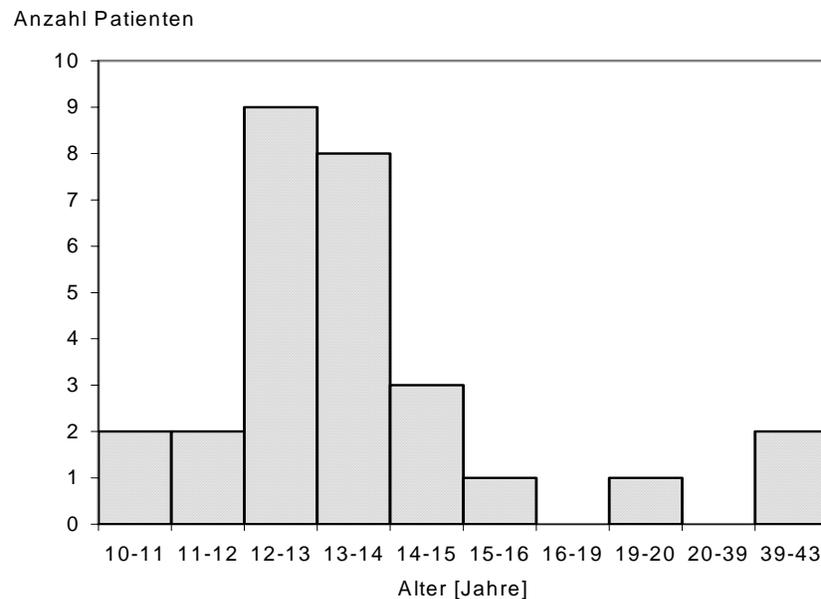
Bei allen statistischen Testverfahren galt eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 0,05$  als signifikant und von  $p \leq 0,01$  als hochsignifikant.

Die gewonnenen Messdaten wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung überprüft, um die Entscheidung, ob ein parametrisches oder ein nicht-parametrisches Testverfahren gewählt werden sollte, treffen zu können. Für die normalverteilten Daten wurden anschließend der t-Test für verbundene Stichproben und der t-Test für unverbundene Stichproben verwendet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Beschreibung der Stichprobe

Die Patienten waren zu Beginn der Behandlung bzw. zu Beginn der Messreihe zwischen 10,5 und 42,4 Jahre alt. Das Durchschnittsalter aller Patienten betrug 15,1 Jahre mit einer Standardabweichung von 7,7 Jahren. Die weiblichen Studienteilnehmer waren im Mittel 17,0 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 9,8 und die männlichen Studienteilnehmer im Mittel 12,8 Jahre mit einer Standardabweichung von 0,9 Jahren. Die Altersstruktur wird in der folgenden Abbildung 10 graphisch dargestellt:



**Abbildung 10: Altersverteilung der Patienten (n=25)**

An insgesamt 111 Zähnen fand eine Bestimmung der elektrometrischen Sensibilität statt, davon waren 56 Zähne mit einer aktiven und 55 Zähne mit einer passiven Bogenhälfte versehen. Von den getesteten Zähnen waren 22 Oberkieferprämolaren, 28 Oberkieferinzisiven, 29 Unterkieferprämolaren und 32 Unterkieferinzisiven.

## 5.2 Zeitlicher Verlauf der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle

### 5.2.1a Mittlere Oberkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte

Bei 14 mittleren Oberkieferinzisiven konnte die Sensibilität zu den drei Zeitpunkten

→ T1, unmittelbar vor Kleben der Brackets und Einligieren des ersten Bogens,

→ T2, zwei Tage nach Einligieren des ersten Bogens und

→ T3, sieben Tage nach Einligieren des ersten Bogens bestimmt werden.

Zum Zeitpunkt T1 wurden Werte von 20,3 bis 49,3 EPT Units mit einem Mittelwert von 35,0 EPT Units und einer Standardabweichung von 8,1 EPT Units registriert. Der Medianwert lag bei 36,2 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ergab keinen signifikanten Wert ( $p=0,974$ ). Daher konnte für die weitere Analyse ein parametrisches Testverfahren gewählt werden.

Zwei Tage nach Einligieren der aktiven Bogenhälfte ergaben sich gemessene Werte zwischen 17,7 und 51,3 EPT Units. Der Durchschnitt lag bei 33,5 EPT Units mit einer Standardabweichung von 8,8 EPT Units. Der Median betrug 30,8 EPT Units. Auch bei T2 war der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant ( $p=0,483$ ), so dass der t-Test für verbundene Stichproben angewandt werden konnte.

Zum dritten Zeitpunkt wurden Sensibilitätswerte von 20,7 EPT Units bis 49,0 EPT Units erfasst. Das Mittel entsprach 33,5 EPT Units und die Standardabweichung 7,9 EPT Units. Der Median wurde mit 34,0 EPT Units bestimmt. Da der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant ( $p=0,991$ ) ausfiel, konnte auf den t-Test zurückgegriffen werden.

Tabelle 1 fasst die deskriptive Statistik für die Messwerte zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3 zusammen:

<b>EPT Units, mittlere Inzisiven, Oberkiefer, aktive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	14	<b>35,0</b>	8,1	20,3	49,3	36,2
<b>T2</b>	14	<b>33,5</b>	8,8	17,7	51,3	30,8
<b>T3</b>	14	<b>33,5</b>	7,9	20,7	49,0	34,0

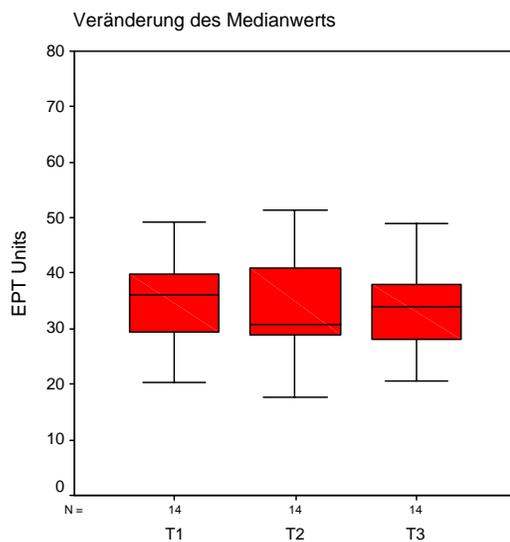
**Tabelle 1: Deskriptive Statistik für mittlere Oberkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte**

Der t-Test für verbundene Stichproben zeigte, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zahnsensibilitäten von T1 und T2 ( $p=0,365$ ) als auch zwischen denen von T2 und T3 ( $p=0,979$ ) und T1 und T3 ( $p=0,280$ ) gab.

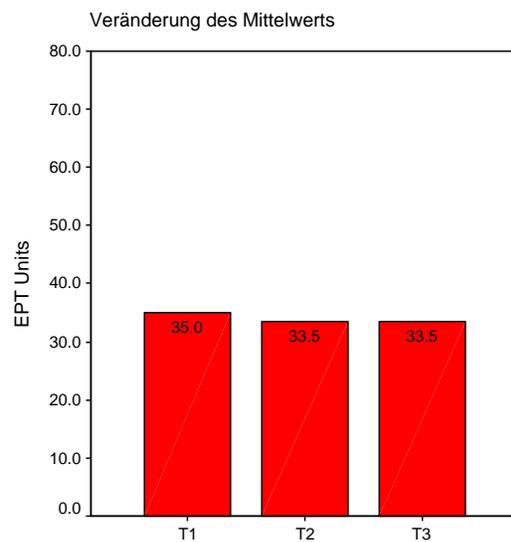
Tabelle 2 fasst die Ergebnisse des t-Tests zusammen:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1-EPT Units T2	0,365	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,979	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,280	<b>n.s.</b>

**Tabelle 2: t-Test für verbundene Stichproben, mittlere Oberkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte**



**Abbildung 11: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, OK-1er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 12: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, OK-1er, aktive Bogenhälfte**

### 5.2.1b Mittlere Oberkieferinzisiven mit passiver Bogenhälfte

Auf der Seite mit der passiven Bogenhälfte wurden die Zahnsensibilitäten von 14 Inzisiven gemessen. Zum Zeitpunkt T1 betragen die ermittelten Werte zwischen 16,7 und 48,3 EPT Units. Die durchschnittliche Sensibilität lag bei 32,6 EPT Units mit einer Standardabweichung von 9,4 EPT Units und der Medianwert bei 32,5 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest fiel nicht signifikant aus ( $p=0,998$ ), weshalb im Folgenden der t-Test für verbundene Stichproben zur Anwendung kam.

Bei T2 ergaben sich ein Minimalwert von 20,0 EPT Units und ein Maximalwert von 44,0 EPT Units. Der Mittelwert betrug 32,6 EPT Units und die dazugehörige Standardabweichung 6,2 EPT Units. Der Medianwert entsprach 31,5 EPT Units. Weil der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest keinen signifikanten Wert ergab ( $p=0,690$ ), waren für die weitere Analyse parametrische Verfahren zulässig.

Für den Zeitpunkt T3 wurden Sensibilitätswerte zwischen 17,7 und 39,7 EPT Units gefunden. Die mittlere Zahnsensibilität wurde als 31,3 EPT Units mit einer Standardabweichung von 6,9 EPT Units berechnet. Der Median lag hier bei 34,1 EPT Units. Die gemessenen Zahnsensibilitäten waren normalverteilt, das heißt der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest hatte ein nicht signifikantes Ergebnis ( $p=0,503$ ). Deswegen durfte nachfolgend der t-Test verwendet werden.

Tabelle 3 können die Daten der deskriptiven Statistik für die drei Zeitpunkte T1, T2 und T3 entnommen werden:

<b>EPT Units, mittlere Inzisiven, Oberkiefer, passive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	14	<b>32,6</b>	9,4	16,7	48,3	32,5
<b>T2</b>	14	<b>32,6</b>	6,2	20	44	31,5
<b>T3</b>	14	<b>31,3</b>	6,9	17,7	39,7	34,1

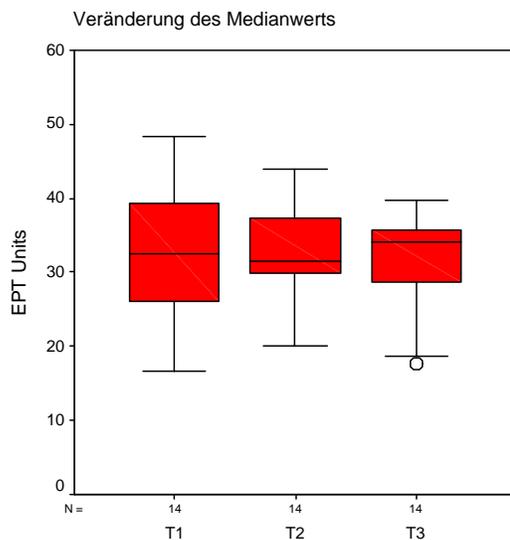
**Tabelle 3: Deskriptive Statistik für mittlere Oberkiefer Inzisiven mit passiver Bogenhälfte**

Im t-Test für verbundene Stichproben wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweils zu den Zeitpunkten T1 und T2 ( $p=0,982$ ), T2 und T3 ( $p=0,461$ ) und T1 und T3 ( $p=0,527$ ) ermittelten Werte festgestellt.

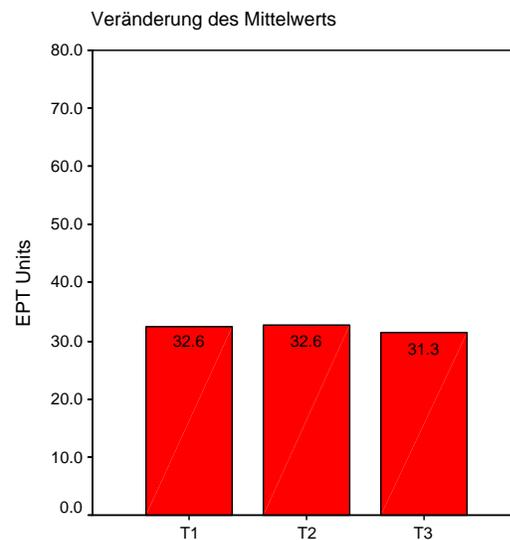
Tabelle 4 stellt die Ergebnisse des t-Tests schematisch dar:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,982	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,461	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,527	<b>n.s.</b>

**Tabelle 4: t-Test für verbundene Stichproben, mittlere Oberkieferinzsiven mit passiver Bogenhälfte**



**Abbildung 13: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, OK-1er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 14: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, OK-1er, passive Bogenhälfte**

### 5.2.2a Erste Oberkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte

Im Oberkiefer wurden insgesamt elf erste Prämolaren, bei denen eine aktive Bogenhälfte einligiert war, getestet. Sieben dieser Zähne reagierten im Messbereich mindestens einmal nicht-sensibel, so dass sie von den statistischen Betrachtungen ausgeschlossen wurden.

Bei T1 lag der kleinste Wert bei 45,7 EPT Units und der größte bei 77,0 EPT Units. Das Mittel entsprach 60,5 EPT Units mit einer Standardabweichung von 15,6 EPT Units. Der Medianwert war 59,7 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ergab, dass es sich bei der Verteilung der gemessenen Werte um eine Normalverteilung handelt ( $p=0,923$ ). Daher wurde im Weiteren ein parametrischer Test gewählt.

Zum Zeitpunkt T2 traten Messwerte zwischen 38,3 EPT Units und 48,7 EPT Units auf. Es wurde ein Mittelwert von 45,4 EPT Units mit einer Standardabweichung von 4,8 EPT Units gefunden. Der Median lag bei 47,3 EPT Units. Nach dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest waren die Werte normalverteilt ( $p=0,796$ ), so dass der t-Test angewendet werden konnte.

Dem dritten Zeitpunkt waren Zahnsensibilitäten zwischen 39,0 EPT Units und 69,3 EPT Units zugehörig. Im Mittel entsprach die elektrometrische Sensibilität 50,4 EPT Units und die Standardabweichung 14,4 EPT Units. Der Median erreichte 46,6 EPT Units. Auch hier fiel der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant aus ( $p=0,914$ ), weswegen nachfolgend der t-Test für verbundene Stichproben verwendet werden durfte. Tabelle 5 fasst die erläuterten Daten nochmals zusammen:

<b>EPT Units, erste Prämolaren, Oberkiefer, aktive Bogenhälfte</b>						
<b>Zeitpunkt</b>	<b>N</b>	<b>MW</b>	<b>SD</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>
<b>T1</b>	4	<b>60,5</b>	15,6	45,7	77,0	59,7
<b>T2</b>	4	<b>45,4</b>	4,8	38,3	48,7	47,3
<b>T3</b>	4	<b>50,4</b>	14,4	39,0	69,3	46,6

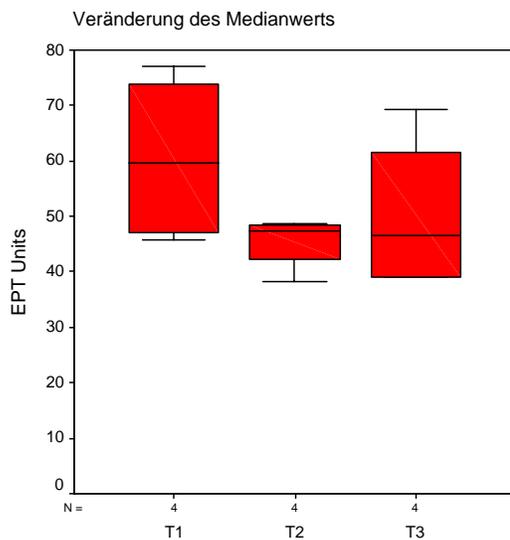
**Tabelle 5: Deskriptive Statistik für erste Oberkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte**

Der t-Test für verbundene Stichproben zeigte, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den gemessenen Werten sowohl von T1 und T2 ( $p=0,109$ ), von T2 und T3 ( $p=0,456$ ), als auch von T1 und T3 ( $p=0,283$ ) gab.

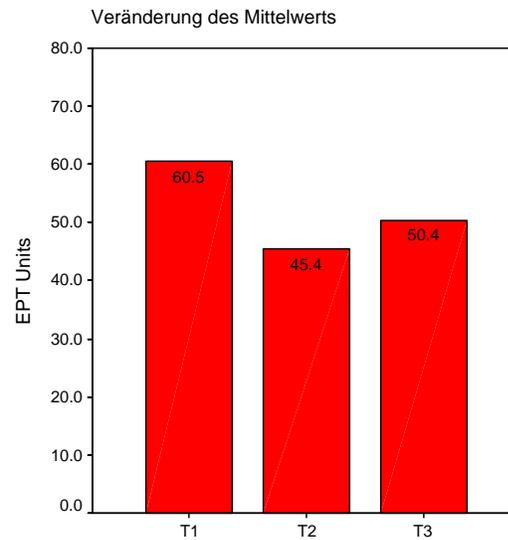
Eine Übersicht über die Ergebnisse des t-Tests zeigt Tabelle 6:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,109	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,456	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,283	<b>n.s.</b>

**Tabelle 6: t-Test für verbundene Stichproben, erste Oberkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte**

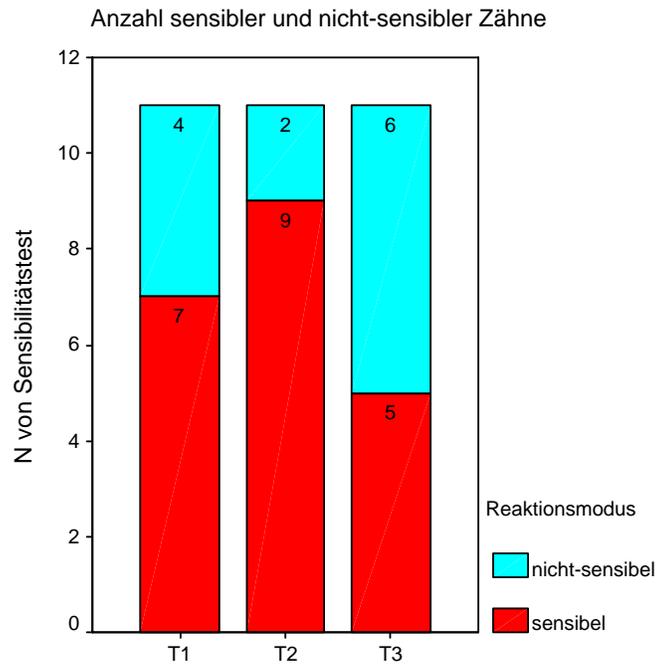


**Abbildung 15: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, OK-4er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 16: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, OK-4er, aktive Bogenhälfte**

Die folgende Abbildung 17 stellt jeweils die Anzahl der Zähne, die sensibel im Messbereich zwischen 1 und 80 EPT Units reagierten, der Anzahl der nicht-sensiblen Zähne im Messbereich für die einzelnen Zeitpunkte gegenüber:



**Abbildung 17: Zahlenverhältnis der sensiblen zu nicht-sensiblen OK-4er, aktive Bogenhälfte**

### 5.2.2b Erste Oberkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte

Von einer Gesamtzahl von elf ersten Oberkieferprämolaren auf der Seite mit passiver Bogenhälfte mussten sechs Exemplare von der statistischen Auswertung ausgeschlossen werden, weil sie an mindestens einem der drei Zeitpunkte nicht-sensibel reagiert hatten. Zum ersten Zeitpunkt waren die Sensibilitätswerte zwischen 43,3 EPT Units und 80,0 EPT Units verteilt. Die mittlere Zahnsensibilität lag bei 61,2 EPT Units mit einer Standardabweichung von 14,5 EPT Units. Der Medianwert betrug 59,0 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest hatte kein signifikantes Ergebnis ( $p=1,000$ ), so dass von einer Normalverteilung der Werte ausgegangen wurde und im Folgenden ein parametrisches Testverfahren gewählt wurde.

Zum Zeitpunkt T2 entsprach das Minimum 46,7 EPT Units und das Maximum 69,3 EPT Units. Der Mittelwert erreichte 63,0 EPT Units mit dazugehöriger Standardabweichung von 9,3 EPT Units. Der Medianwert lag bei 66,7 EPT Units. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest war nicht signifikant ( $p=0,600$ ). Daher wurde für die weitere Analyse der t-Test angewendet.

Bei T3 wurden Werte zwischen 49,7 EPT Units und 79,7 EPT Units ermittelt. Die durchschnittliche Sensibilitätsschwelle betrug 66,6 EPT Units und die Standardabweichung 13,1 EPT Units. Der Medianwert entsprach 64,3 EPT Units. Wegen des nicht signifikanten Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ( $p=0,932$ ) wurde nachfolgend der t-Test herangezogen.

Tabelle 7 stellt die Daten der deskriptiven Statistik schematisch dar:

<b>EPT Units, erste Prämolaren, Oberkiefer, passive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	5	<b>61,2</b>	14,5	43,3	80,0	59,0
<b>T2</b>	5	<b>63,0</b>	9,3	46,7	69,3	66,7
<b>T3</b>	5	<b>66,6</b>	13,1	49,7	79,7	64,3

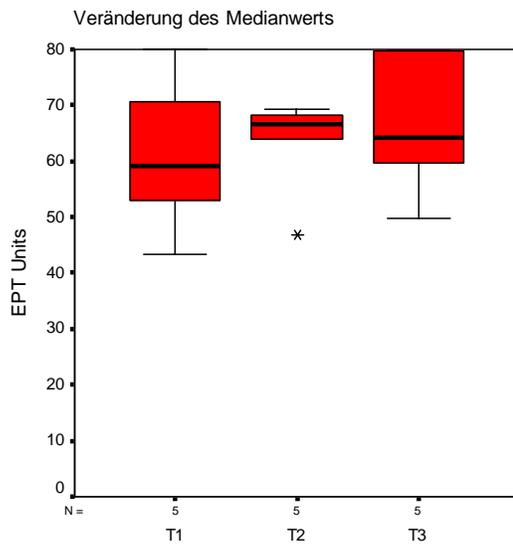
**Tabelle 7: Deskriptive Statistik für erste Oberkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte**

Der t-Test für verbundene Stichproben konnte zeigen, dass sich die Werte von T1 und T2 ( $p=0,842$ ), von T2 und T3 ( $p=0,697$ ) und auch von T1 und T3 ( $p=0,076$ ) nicht signifikant voneinander unterscheiden.

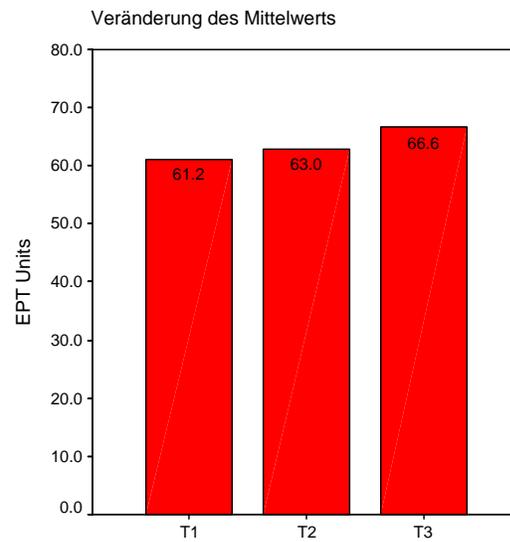
Tabelle 8 ist eine schematische Zusammenstellung der Ergebnisse des t-Tests:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,842	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,697	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,076	<b>n.s.</b>

**Tabelle 8: t-Test für verbundene Stichproben, erste Oberkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte**

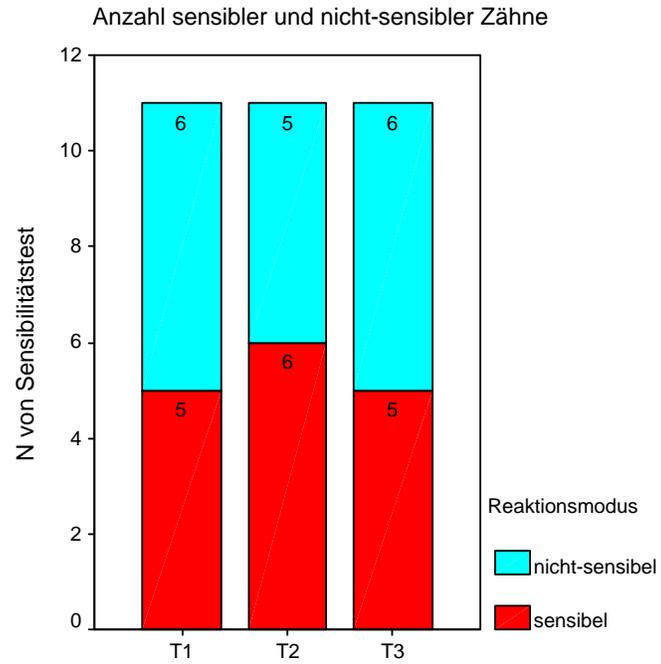


**Abbildung 18: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, OK-4er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 19: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, OK-4er, passive Bogenhälfte**

Die folgende Abbildung 20 stellt die Anzahl der Prämolaren, die im Messbereich sensibel reagierten, der Anzahl der nicht-sensiblen Prämolaren gegenüber:



**Abbildung 20: Zahlenverhältnis der sensiblen zu nicht-sensiblen OK-4er, passive Bogenhälfte**

### 5.2.3a Mittlere Unterkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte

Bei 16 mittleren Unterkieferinzisiven, die eine aktive Bogenhälfte erhalten hatten, wurde die Bestimmung der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle durchgeführt.

Die Sensibilitätswerte verteilten sich zum Zeitpunkt T1 zwischen 12,7 EPT Units und 47,3 EPT Units, wobei die durchschnittliche Sensibilität 31,2 EPT Units mit einer Standardabweichung von 8,9 EPT Units betrug. Der Medianwert erreichte 32,3 EPT Units. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest war nicht signifikant ( $p=0,718$ ). Daher wurde anschließend ein parametrisches Testverfahren herangezogen.

Bei T2 war das Minimum 13,0 EPT Units und das Maximum 60,0 EPT Units. Der Mittelwert lag bei 33,8 EPT Units mit einer Standardabweichung von 10,7 EPT Units. Der Median entsprach 30,8 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest fiel nicht signifikant aus ( $p=0,846$ ), so dass für die weitere Analyse der t-Test zulässig war.

Zum Zeitpunkt T3 ergaben sich Messwerte zwischen 10,7 EPT Units und 53,7 EPT Units. Der Mittelwert erreichte 32,2 EPT Units und die Standardabweichung 10,6 EPT Units. Der Medianwert entsprach 33,7 EPT Units. Laut Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest handelte es sich um normalverteilte Messwerte ( $p=0,939$ ). Deshalb konnte anschließend der t-Test für verbundene Stichproben verwendet werden.

Tabelle 9 veranschaulicht die Daten der beschreibenden Statistik für die einzelnen Zeitpunkte:

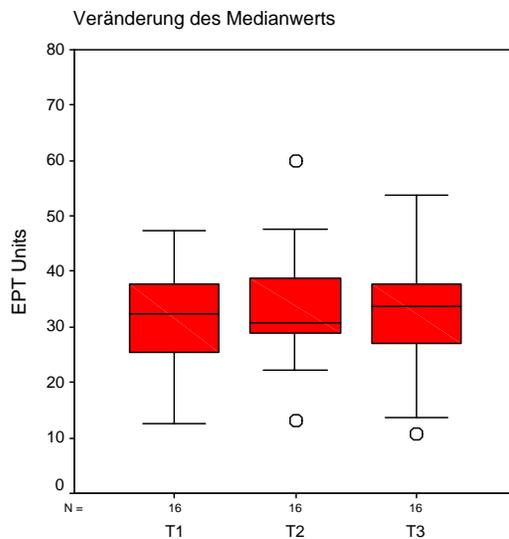
<b>EPT Units, mittlere Inzisiven, Unterkiefer, aktive Bogenhälfte</b>						
<b>Zeitpunkt</b>	<b>N</b>	<b>MW</b>	<b>SD</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>
<b>T1</b>	16	<b>31,2</b>	8,9	12,7	47,3	32,3
<b>T2</b>	16	<b>33,8</b>	10,7	13,0	60,0	30,8
<b>T3</b>	16	<b>32,2</b>	10,6	10,7	53,7	33,7

**Tabelle 9: Deskriptive Statistik für mittlere Unterkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte**

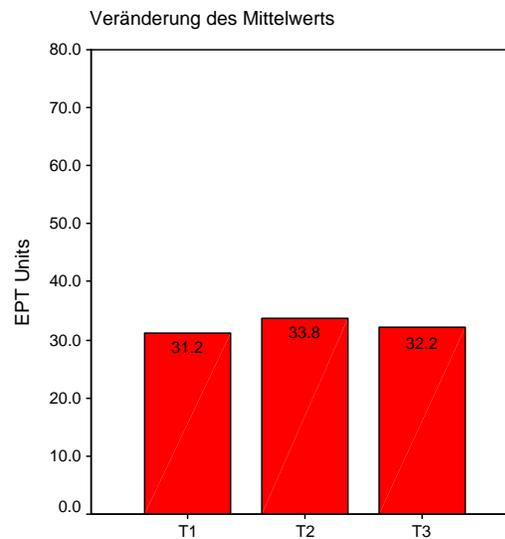
Wie in Tabelle 10 dargestellt, konnte im t-Test für verbundene Stichproben gezeigt werden, dass die Sensibilitätswerte von T1 und T2 ( $p=0,251$ ), von T2 und T3 ( $p=0,314$ ) und von T1 und T3 ( $p=0,486$ ) nicht signifikant voneinander abweichen:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,251	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,314	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,486	<b>n.s.</b>

**Tabelle 10: t-Test für verbundene Stichproben, mittlere Unterkieferinzisiven mit aktiver Bogenhälfte**



**Abbildung 21: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, UK-1er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 22: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, UK-1er, aktive Bogenhälfte**

### 5.2.3b Mittlere Unterkieferinzisiven mit passiver Bogenhälfte

An 16 mittleren Unterkieferinzisiven auf der Seite mit der ausgeglühten Bogenhälfte wurden Sensibilitätstests durchgeführt.

Bei T1 wurden Werte zwischen 15,3 EPT Units und 49,3 EPT Units gemessen. Der Mittelwert wurde zu 32,6 EPT Units ermittelt mit einer Standardabweichung von 9,6 EPT Units. Der Medianwert war 34,7 EPT Units. Wegen des nicht signifikanten Ergebnisses des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests ( $p=0,861$ ) kam nachfolgend der t-Test zur Anwendung.

Zum Zeitpunkt T2 war 8,0 EPT Units der kleinste und 51,7 EPT Units der größte Wert für die Sensibilitätsschwelle. Im Durchschnitt hatten die Inzisiven eine Sensibilitätsschwelle von 34,1 EPT Units mit einer Standardabweichung von 11,3 EPT Units. Der Medianwert betrug 37,8 EPT Units. Weil der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant ausfiel ( $p=0,387$ ), konnte die nachfolgende Analyse mittels t-Test durchgeführt werden.

Beim dritten Zeitpunkt ergaben sich Werte zwischen 17,0 EPT Units und 57,7 EPT Units.

Der Mittelwert wurde zu 33,7 EPT Units mit einer Standardabweichung von 11,0 EPT Units errechnet. Der Median lag bei 34,1 EPT Units. Aufgrund des nicht signifikanten Kolmogorov-Smirnov-Tests ( $p=0,998$ ) wurde im Nachfolgenden der t-Test zur Analyse gewählt.

Nachstehend fasst Tabelle 11 die oben dargestellten Ergebnisse zusammen:

<b>EPT Units, mittlere Inzisiven, Unterkiefer, passive Bogenhälfte</b>						
<b>Zeitpunkt</b>	<b>N</b>	<b>MW</b>	<b>SD</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>
<b>T1</b>	16	<b>32,6</b>	9,6	15,3	49,3	34,7
<b>T2</b>	16	<b>34,1</b>	11,3	8,0	51,7	37,8
<b>T3</b>	16	<b>33,7</b>	11,0	17,0	57,7	34,1

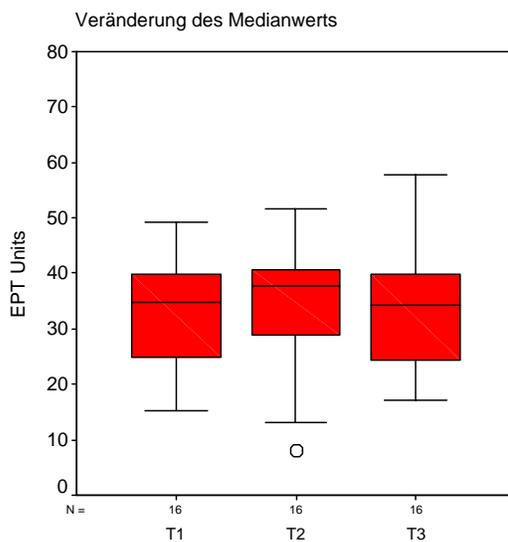
**Tabelle 11: Deskriptive Statistik für mittlere Unterkieferinzisiven mit passiver Bogenhälfte**

Der t-Test für verbundene Stichproben ergab, dass keine signifikante Veränderung der Sensibilitätsschwelle von T1 nach T2 ( $p=0,352$ ), von T2 nach T3 ( $p=0,797$ ) oder von T1 nach T3 ( $p=0,417$ ) stattfand.

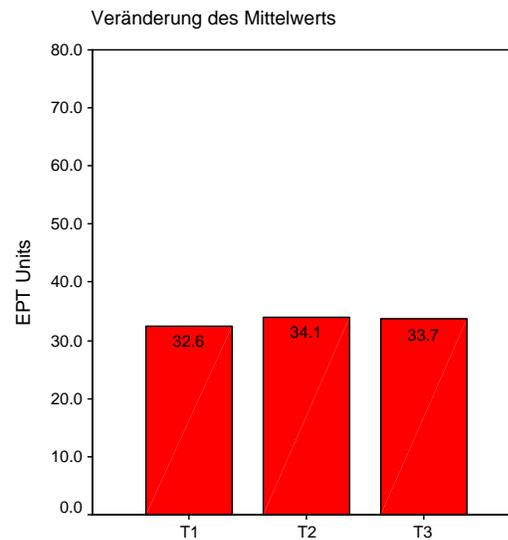
Tabelle 12 zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse des t-Tests:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,352	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,797	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,417	<b>n.s.</b>

**Tabelle 12: t-Test für verbundene Stichproben, UK-1er mit passiver Bogenhälfte**



**Abbildung 5: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, UK-1er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 24: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, UK-1er, passive Bogenhälfte**

### 5.2.4a Erste Unterkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte

Von insgesamt 15 getesteten Prämolaren im Unterkiefer wurden drei von der Auswertung ausgeschlossen, da sie zu mindestens einem Zeitpunkt nicht im Messbereich reagiert hatten.

Die ermittelten Werte verteilten sich bei T1 auf den Bereich zwischen 19,0 EPT Units und 71,3 EPT Units. Der mittlere Sensibilitätswert entsprach 48,7 EPT Units mit einer Standardabweichung von 17,5 EPT Units. Der Medianwert war gleich 47,1 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest zeigte ein nicht signifikantes Ergebnis ( $p=0,987$ ). Daher durfte für die weitere Analyse ein parametrischer Test durchgeführt werden.

Zum Zeitpunkt T2 traten Werte zwischen 14,7 EPT Units und 69,7 EPT Units auf. Der Mittelwert lag bei 46,0 EPT Units und die Standardabweichung bei 14,2 EPT Units. Der Medianwert erreichte 45,5 EPT Units. Da der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest einen nicht signifikanten Wert ergab ( $p=0,998$ ), war für die weiteren Betrachtungen der t-Test zulässig.

Für T3 war das Minimum 13,0 EPT Units und das Maximum 67,0 EPT Units. Das Mittel entsprach 43,2 EPT Units mit einer Standardabweichung von 16,3 EPT Units. Der Medianwert lag bei 49,7 EPT Units. Auch hier fiel der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant aus ( $p=0,628$ ), so dass nachfolgend der t-Test angewendet wurde.

Tabelle 13 zeigt schematisch die Kenndaten der deskriptiven Statistik:

<b>EPT Units, erste Prämolaren, Unterkiefer, aktive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	12	<b>48,7</b>	17,5	19,0	71,3	47,1
<b>T2</b>	12	<b>46,0</b>	14,2	14,7	69,7	45,5
<b>T3</b>	12	<b>43,2</b>	16,3	13,0	67,0	49,7

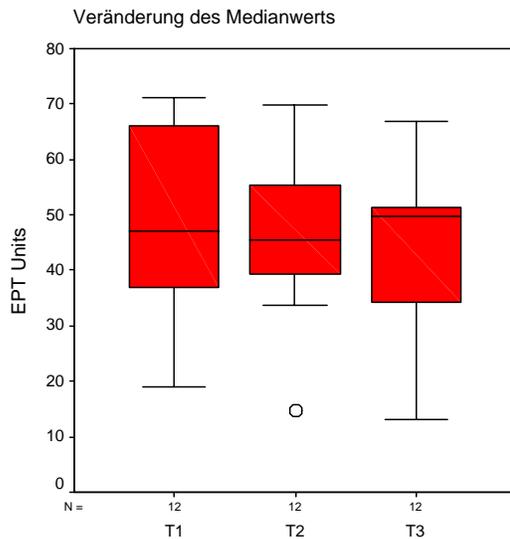
**Tabelle 13: Deskriptive Statistik für erste Unterkieferprämolaren mit aktiver Bogenhälfte**

Im t-Test für verbundene Stichproben unterschieden sich weder die Sensibilitätswerte von T1 und T2 ( $p=0,566$ ), von T2 und T3 ( $p=0,520$ ), noch von T1 und T3 ( $p=0,158$ ) signifikant voneinander.

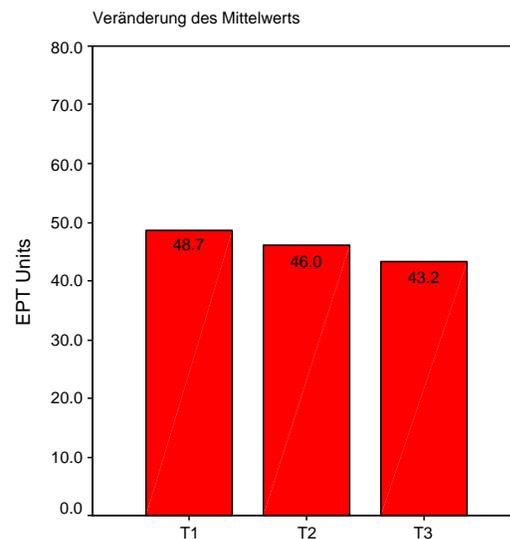
Diese Ergebnisse werden in Tabelle 14 nochmals zusammengefasst:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,566	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,520	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,158	<b>n.s.</b>

**Tabelle 14: t-Test für verbundene Stichproben, UK-4er mit aktiver Bogenhälfte**

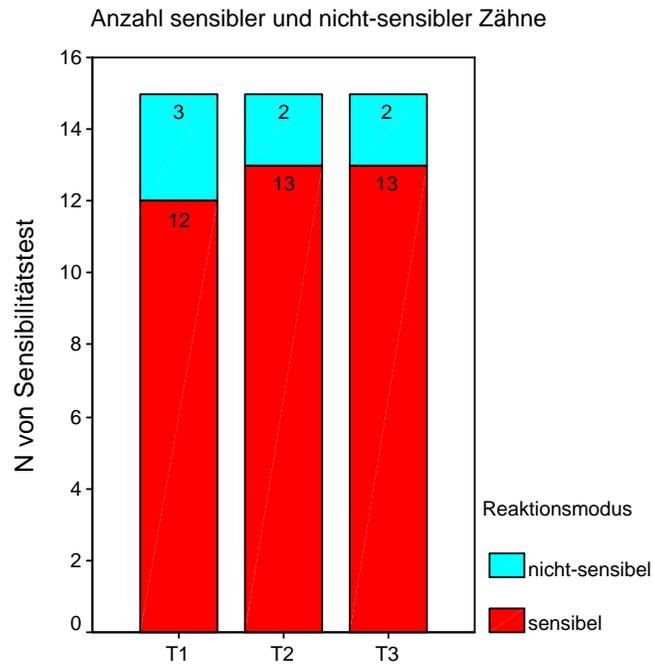


**Abbildung 25: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, UK-4er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 26: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, UK-4er, aktive Bogenhälfte**

In der folgenden Abbildung 27 wird die Anzahl der Unterkieferprämolaren, die im Messbereich nicht sensibel reagierten, der Anzahl der Prämolaren mit Sensibilität im Messbereich für die drei Zeitpunkte gegenübergestellt:



**Abbildung 27: Zahlenverhältnis der sensiblen zu nicht-sensiblen UK-4er, aktive Bogenhälfte**

### 5.2.4b Erste Unterkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte

Insgesamt wurde an 14 Zähnen die Sensibilitätsschwelle bestimmt. Drei Zähne wurden von der Analyse ausgeschlossen, da sie zu mindestens einem der drei Zeitpunkte keine Sensibilität im Messbereich gezeigt hatten.

Zum Zeitpunkt T1 betragen die gemessenen Werte zwischen 14,3 und 60,0 EPT Units. Der Mittelwert lag bei 45,9 EPT Units mit einer Standardabweichung von 13,3 EPT Units. Der Medianwert war 48,0 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest hatte ein nicht signifikantes Ergebnis ( $p=0,775$ ). Daher durfte für die weitere Analyse ein parametrisches Testverfahren verwendet werden.

Bei T2 lagen die Sensibilitätswerte zwischen 13,3 und 65,3 EPT Units. Der Mittelwert wurde zu 48,0 EPT Units errechnet mit einer Standardabweichung von 15,7 EPT Units. Der Median entsprach 49,3 EPT Units. Da der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nicht signifikant ausfiel ( $p=0,765$ ), wurde nachfolgend ein parametrischer Test angewendet.

Die bei T3 ermittelten Sensibilitäten nahmen Werte zwischen 12,7 und 76,7 EPT Units an. Der Mittelwert erreichte 44,8 EPT Units mit einer Standardabweichung von 19,0 EPT Units. Der Median betrug 49,0 EPT Units. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest war nicht signifikant ( $p=0,981$ ). Daher wurde nachfolgend der t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt.

In Tabelle 15 werden die Ergebnisse der deskriptiven Statistik zusammengefasst:

<b>EPT Units, erste Prämolaren, Unterkiefer, passive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	11	<b>45,9</b>	13,3	14,3	60,0	48,0
<b>T2</b>	11	<b>48,0</b>	15,7	13,3	65,3	49,3
<b>T3</b>	11	<b>44,8</b>	19,0	12,7	76,7	49,0

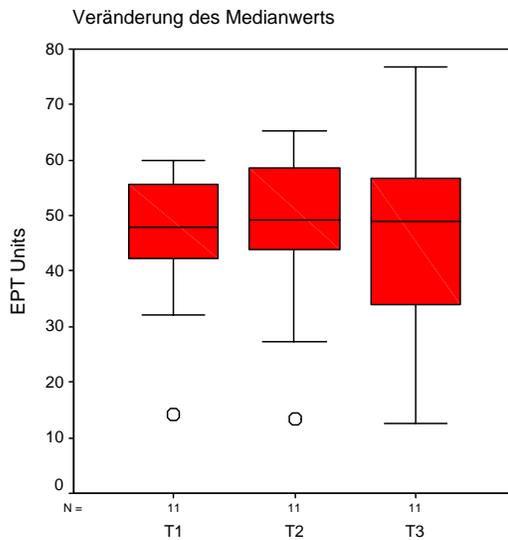
**Tabelle 15: Deskriptive Statistik für erste Unterkieferprämolaren mit passiver Bogenhälfte**

Der t-Test für verbundene Stichproben fiel für den Vergleich von T1 und T2 ( $p=0,558$ ), von T2 und T3 ( $p=0,571$ ) und T1 und T3 ( $p=0,765$ ) nicht signifikant aus.

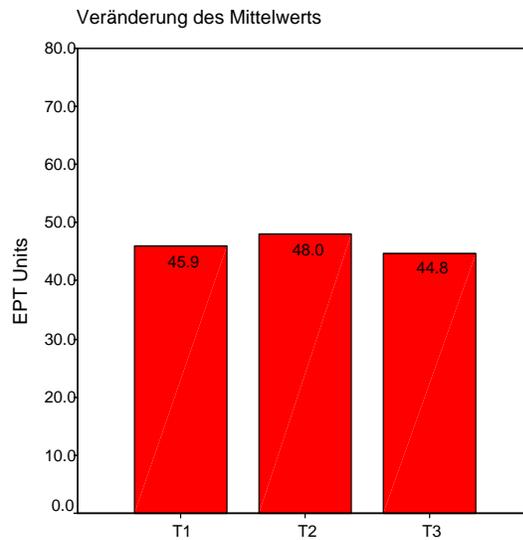
Tabelle 16 stellt die Ergebnisse des t-Tests in einer Übersicht dar:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,558	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,571	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,765	<b>n.s.</b>

**Tabelle 16: t-Test für verbundene Stichproben, UK-4er mit passiver Bogenhälfte**

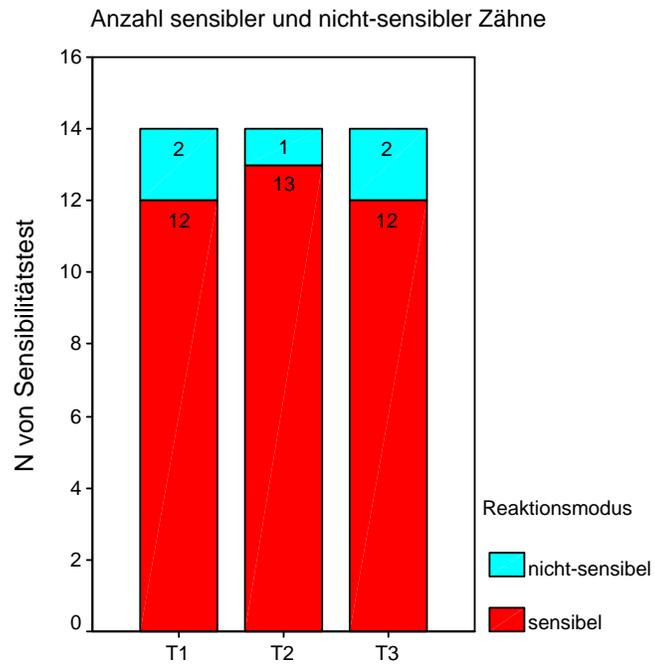


**Abbildung 28: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, UK-4er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 29: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, UK-4er, passive Bogenhälfte**

Abbildung 30 stellt das Zahlenverhältnis zwischen im Messbereich sensiblen und nicht-sensiblen Unterkieferprämolaren auf der passiven Seite dar:



**Abbildung 30: Zahlenverhältnis der sensiblen zu nicht-sensiblen UK-4er, passive Bogenhälfte**

### 5.2.5a Alle Inzisiven und Prämolaren mit aktiver Bogenhälfte

Die Gesamtzahl aller getesteten Zähne des Ober- und Unterkiefers auf der Seite mit einer aktiven Bogenhälfte entsprach 56 Inzisiven und Prämolaren. Hiervon wurden zehn Prämolaren mangels messbarer Sensibilität von der weiteren statistischen Betrachtung ausgeschlossen.

Für den Zeitpunkt T1 wurden Messwerte gefunden, die zwischen 12,7 und 77,0 EPT Units lagen. Die Sensibilitätsschwelle lag im Mittel bei 39,5 EPT Units mit einer Standardabweichung von 15,2 EPT Units. Der Medianwert betrug 37,7 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest hatte ein nicht signifikantes Ergebnis ( $p = 0,502$ ). Daher wurde anschließend ein parametrisches Testverfahren gewählt.

Zum zweiten Zeitpunkt T2 entsprach der kleinste ermittelte Wert 13,0 EPT Units und der größte 69,7 EPT Units. Der Mittelwert war 38,1 EPT Units mit einer Standardabweichung von 12,0 EPT Units. Der Median wurde zu 38,0 EPT Units berechnet. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest war nicht signifikant ( $p = 0,804$ ). Deshalb war für die weitere Analyse der t-Test zulässig.

Bei T3 lagen die Messwerte zwischen 10,7 und 69,3 EPT Units. Der Mittelwert entsprach 37,8 EPT Units mit einer Standardabweichung von 13,2 EPT Units. Der Median war gleich 37,2 EPT Units. Wegen des nicht signifikanten Ergebnisses des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests ( $p = 0,896$ ) wurde nachfolgend der t-Test verwendet.

Tabelle 17 stellt die Ergebnisse der deskriptiven Statistik in einer Übersicht dar:

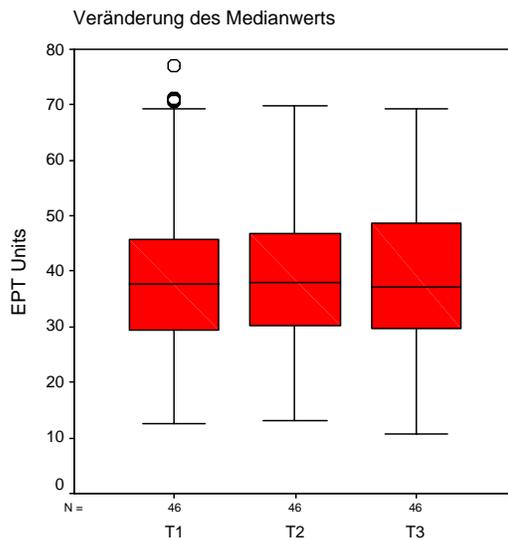
<b>EPT Units, alle Inzisiven und Prämolaren, aktive Bogenhälfte</b>						
<b>Zeitpunkt</b>	<b>N</b>	<b>MW</b>	<b>SD</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>
<b>T1</b>	46	<b>39,5</b>	15,2	12,7	77,0	37,7
<b>T2</b>	46	<b>38,1</b>	12,0	13,0	69,7	38,0
<b>T3</b>	46	<b>37,8</b>	13,2	10,7	69,3	37,2

**Tabelle 17: Deskriptive Statistik für alle mittleren Inzisiven und ersten Prämolaren mit aktiver Bogenhälfte**

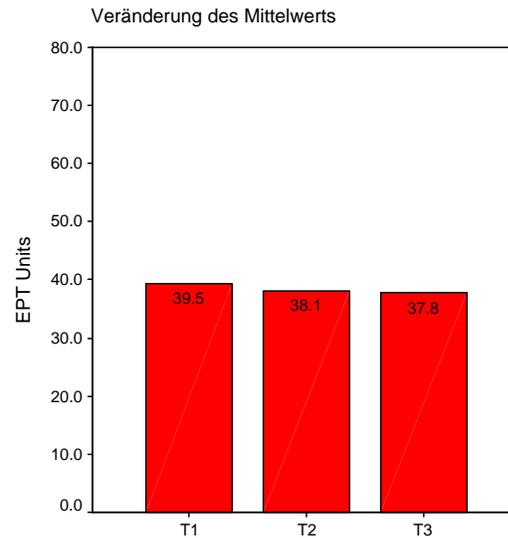
Tabelle 18 gibt die Ergebnisse des t-Tests für verbundene Stichproben als Zusammenfassung wieder. Dabei war das Ergebnis für den Test von T1 und T2 ( $p=0,446$ ), als auch für den Test von T2 und T3 ( $p=0,799$ ) und T1 und T3 ( $p=0,246$ ) nicht signifikant.

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,446	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,799	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,246	<b>n.s.</b>

**Tabelle 18: t-Test für verbundene Stichproben, alle 1er und 4er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 31: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle 1er u. 4er, aktive Bogenhälfte**



**Abbildung 32: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle 1er u. 4er, aktive Bogenhälfte**

### 5.2.5b Alle Inzisiven und Prämolaren mit passiver Bogenhälfte

Insgesamt wurde bei 55 Inzisiven und Prämolaren, an denen eine passive Bogenhälfte einligiert war, eine Messung der Sensibilitätsschwelle durchgeführt. Von dieser Anzahl wurden jedoch neun Prämolaren von der weiteren Analyse ausgeschlossen, weil sie keine messbare Sensibilitätsschwelle besaßen.

Zum Zeitpunkt T1 ergaben sich Messwerte zwischen 14,3 und 80,0 EPT Units. Der Mittelwert lag bei 38,9 EPT Units mit einer Standardabweichung von 14,4 EPT Units. Der Medianwert entsprach 38,8 EPT Units. Da der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ein nicht signifikantes Ergebnis hatte ( $p=0,944$ ), durfte im Folgenden ein parametrischer Test durchgeführt werden.

Bei T2 lag das Minimum der Werte bei 8,0 EPT Units und das Maximum bei 69,3 EPT Units. Der Mittelwert wurde zu 40,1 EPT Units errechnet mit einer Standardabweichung von 14,8 EPT Units. Der Median betrug 39,0 EPT Units. Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest fiel nicht signifikant aus ( $p=0,895$ ). Deswegen wurde anschließend ein parametrischer Test angewendet.

Für T3 wurden Werte zwischen 12,7 und 79,7 EPT Units gemessen. Der Mittelwert entsprach 39,3 EPT Units mit einer Standardabweichung von 16,4 EPT Units. Der Medianwert nahm 35,7 EPT Units an. Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests war nicht signifikant ( $p=0,205$ ). Daher wurde für die weitere Analyse der t-Test für verbundene Stichproben gewählt.

Tabelle 19 ist eine Zusammenstellung der Ergebnisse der deskriptiven Statistik:

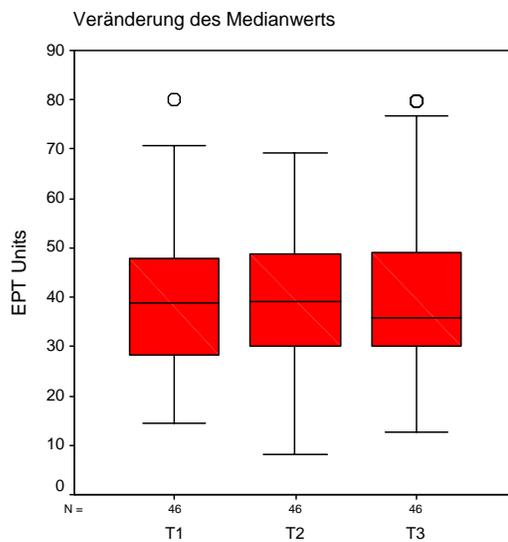
<b>EPT Units, alle Inzisiven und Prämolaren, passive Bogenhälfte</b>						
Zeitpunkt	N	MW	SD	Min	Max	Med
<b>T1</b>	46	<b>38,9</b>	14,4	14,3	80,0	38,8
<b>T2</b>	46	<b>40,1</b>	14,8	8,0	69,3	39,0
<b>T3</b>	46	<b>39,3</b>	16,4	12,7	79,7	35,7

**Tabelle 19: Deskriptive Statistik für alle mittleren Inzisiven und ersten Prämolaren mit passiver Bogenhälfte**

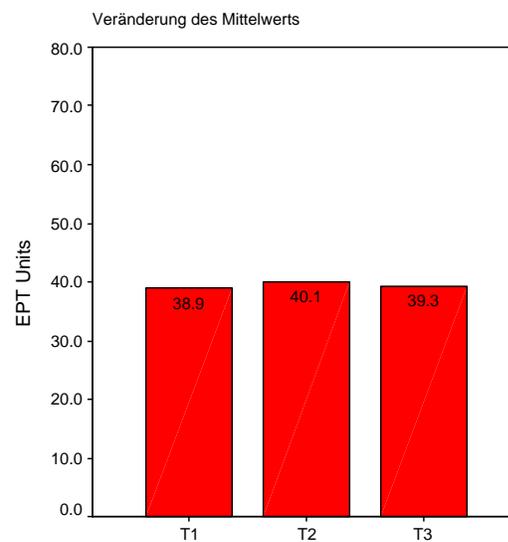
Die Ergebnisse des t-Test für verbundene Stichproben werden in Tabelle 20 wie folgt dargestellt: Für T1 und T2 fiel der t-Test nicht signifikant aus ( $p=0,376$ ), genau wie für T2 und T3 ( $p=0,643$ ) und für T1 und T3 ( $p=0,718$ ).

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>		
	p	
EPT Units T1 - EPT Units T2	0,376	<b>n.s.</b>
EPT Units T2 - EPT Units T3	0,643	<b>n.s.</b>
EPT Units T1 - EPT Units T3	0,718	<b>n.s.</b>

**Tabelle 20: t-Test für verbundene Stichproben, alle 1er und 4er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 33: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle 1er u. 4er, passive Bogenhälfte**



**Abbildung 34: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle 1er u. 4er, passive Bogenhälfte**

### 5.3 Vergleich der Sensibilitätsschwelle nach Bogenhälften

#### 5.3.1 Halbseitenvergleich bei mittleren Oberkieferinzisiven

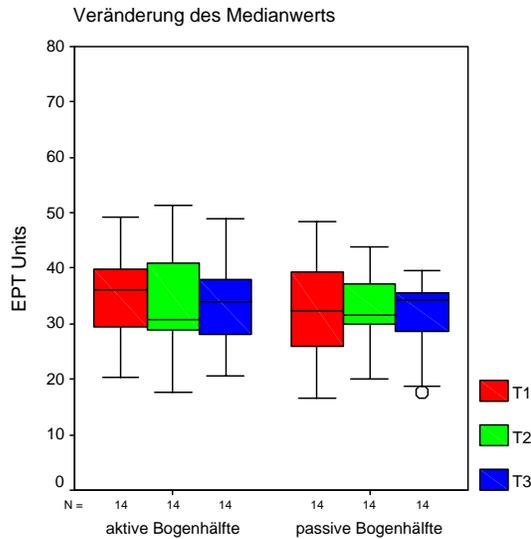
Im Oberkiefer wurde die elektrometrische Sensibilitätsschwelle bei je 14 mittleren Inzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte und 14 mittleren Inzisiven mit einer passiven Bogenhälfte zu den drei Zeitpunkten T1, T2 und T3 bestimmt. Nach Ermittlung der Daten für die deskriptive Statistik wurden die errechneten Mittelwerte mit dem t-Test für unverbundene Stichproben miteinander verglichen. Die Ergebnisse des t-Test zeigen, dass zwischen den gemessenen Sensibilitätswerten auf der aktiven Seite und den Werten auf der passiven Seite weder zum Zeitpunkt T1 ( $p=0,468$ ), noch bei T2 ( $p=0,765$ ) oder bei T3 ( $p=0,438$ ) eine signifikante Abweichung besteht.

Tabelle 21 fasst die Ergebnisse des t-Tests zusammen:

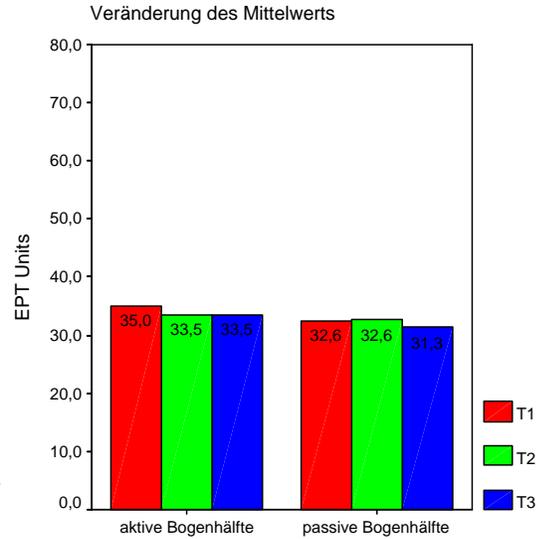
<b>t-Test für unverbundene Stichproben</b>				
	N	MW	p	
EPT Units T1, aktiver Bogen	14	35,0	<b>0,468</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T1, passiver Bogen	14	32,6		
EPT Units T2, aktiver Bogen	14	33,5	<b>0,765</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T2, passiver Bogen	14	32,6		
EPT Units T3, aktiver Bogen	14	33,5	<b>0,438</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T3, passiver Bogen	14	31,3		

**Tabelle 21: t-Test für unverbundene Stichproben, alle mittleren Oberkieferinzisiven, Halbseitenvergleich für die Zeitpunkte T1, T2 und T3: aktive versus passive Bogenhälfte**

Die beiden folgenden Abbildungen 35 und 36 sollen das Verhalten der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle im Verlauf der drei Zeitpunkte T1, T2 und T3 veranschaulichen. Es sind die Median- und Mittelwerte dargestellt, wobei diese jeweils gruppiert für Inzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte und Inzisiven mit einer passiven Bogenhälfte abgebildet sind.



**Abbildung 35: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle OK-1er**



**Abbildung 36: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle OK-1er**

### 5.3.2 Halbseitenvergleich bei ersten Oberkieferprämolaren

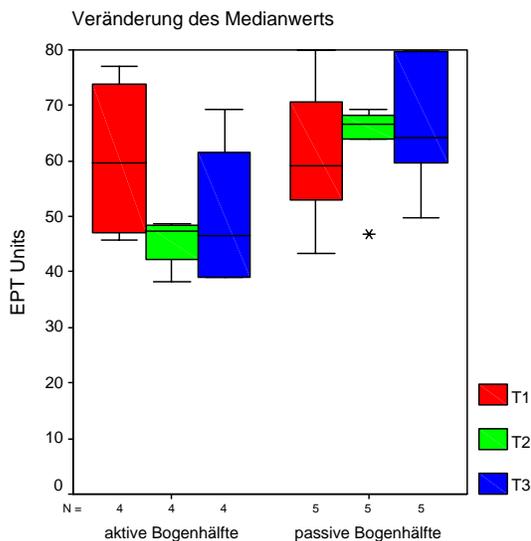
Von elf getesteten ersten Oberkieferprämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte und elf mit einer passiven Bogenhälfte wurden auf der aktiven Seite sieben und auf der passiven Seite sechs Exemplare von der statistischen Auswertung ausgeschlossen. Die für die jeweilige Bogenhälfte zu den einzelnen Zeitpunkten gemessenen Werte für die Sensibilitätsschwelle wurden mit dem t-Test für unverbundene Stichproben miteinander verglichen. Dabei ergab sich für T2 ein hochsignifikantes Ergebnis ( $p=0,010$ ). Das bedeutet, dass die mittlere Sensibilitätsschwelle der Oberkieferprämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte bei T2 signifikant von der mittleren Sensibilitätsschwelle der Oberkieferprämolaren mit einer passiven Bogenhälfte abweicht. Für T1 und T3 fiel der t-Test jedoch nicht signifikant aus.

Tabelle 22 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse des t-Tests:

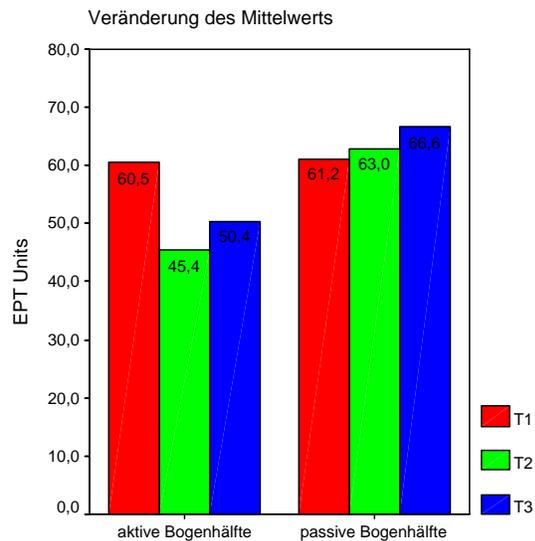
t-Test für unverbundene Stichproben				
	N	MW	p	
EPT Units T1, aktiver Bogen	4	60,5	<b>0,949</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T1, passiver Bogen	5	61,2		
EPT Units T2, aktiver Bogen	4	45,4	<b>0,010</b>	<b>**</b>
EPT Units T2, passiver Bogen	5	63,0		
EPT Units T3, aktiver Bogen	4	50,4	<b>0,129</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T3, passiver Bogen	5	66,6		

**Tabelle 22: t-Test für unverbundene Stichproben, alle ersten Oberkieferprämolaren, Halbseitenvergleich für die Zeitpunkte T1, T2 und T3: aktive versus passive Bogenhälfte**

Die beiden nachfolgenden Abbildungen 37 und 38 stellen die ermittelten Median- und Mittelwerte jeweils gruppiert für Oberkieferprämolaren mit aktiver und mit passiver Bogenhälfte dar.



**Abbildung 37: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, OK-4er**



**Abbildung 38: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, OK-4er**

### 5.3.3 Halbseitenvergleich bei mittleren Unterkieferinzisiven

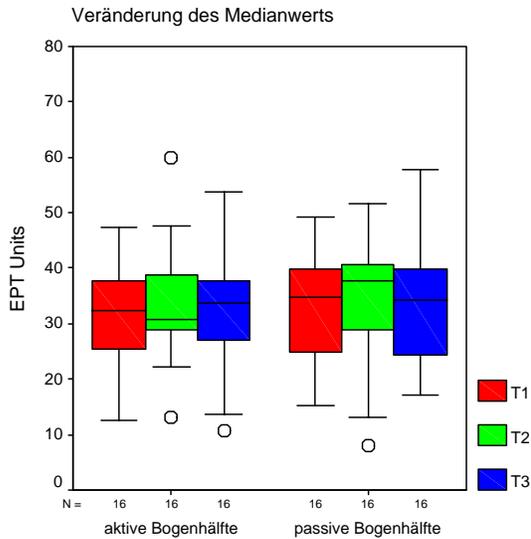
Im Unterkiefer wurde die Sensibilitätsschwelle von 16 mittleren Inzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte und 16 Inzisiven mit einer passiven Bogenhälfte bestimmt. Dabei ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten im Halbseitenvergleich für T1 ( $p=0,681$ ), für T2 ( $p=0,933$ ) und für T3 ( $p=0,688$ ) unter Verwendung des t-Tests für unverbundene Stichproben.

Tabelle 23 bietet eine kurze Übersicht über die Ergebnisse des t-Tests:

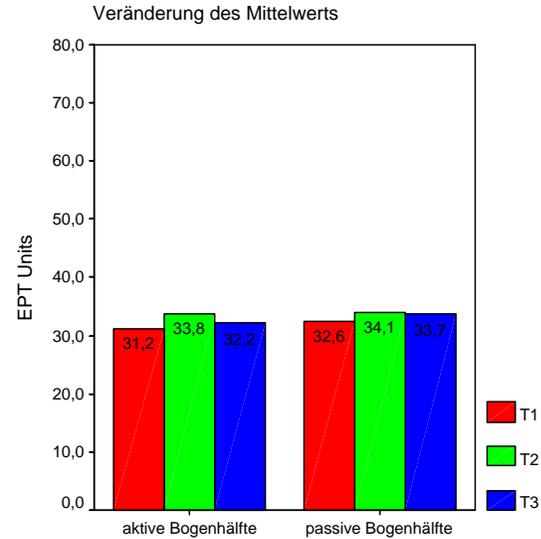
<b>t-Test für unverbundene Stichproben</b>				
	N	MW	p	
EPT Units T1, aktiver Bogen	16	31,2	<b>0,681</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T1, passiver Bogen	16	32,6		
EPT Units T2, aktiver Bogen	16	33,8	<b>0,933</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T2, passiver Bogen	16	34,1		
EPT Units T3, aktiver Bogen	16	32,2	<b>0,688</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T3, passiver Bogen	16	33,7		

**Tabelle 23: t-Test für unverbundene Stichproben, alle mittleren Unterkieferinzisiven, Halbseitenvergleich für die Zeitpunkte T1, T2 und T3: aktive versus passive Bogenhälfte**

Abbildung 39 und Abbildung 40 stellen die Median- und Mittelwerte zu den Zeitpunkten T1, T2 und T3 für Unterkieferinzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte und Prämolaren mit einer passiven Bogenhälfte gegenüber.



**Abbildung 39: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle UK-1er**



**Abbildung 40: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle UK-1er**

### 5.3.4 Halbseitenvergleich bei ersten Unterkieferprämolaren

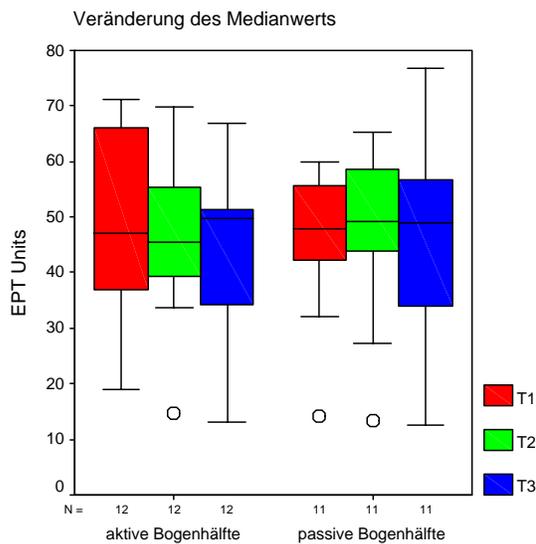
Von den 15 getesteten Prämolaren auf der aktiven Seite und 14 Prämolaren auf der passiven Seite wurden jeweils drei Prämolaren von den statistischen Betrachtungen ausgeschlossen, da sie keine messbare Sensibilität besaßen. Beim t-Test für unverbundene Stichproben zeigte sich, dass die Werte für die Sensibilitätsschwelle der Unterkieferprämolaren mit einer passiven und einer aktiven Bogenhälfte zu keinem der drei Zeitpunkte T1 ( $p=0,676$ ), T2 ( $p=0,749$ ) und T3 ( $p=0,832$ ) signifikant voneinander abwichen.

Tabelle 24 fasst diese Ergebnisse in einer Übersicht zusammen:

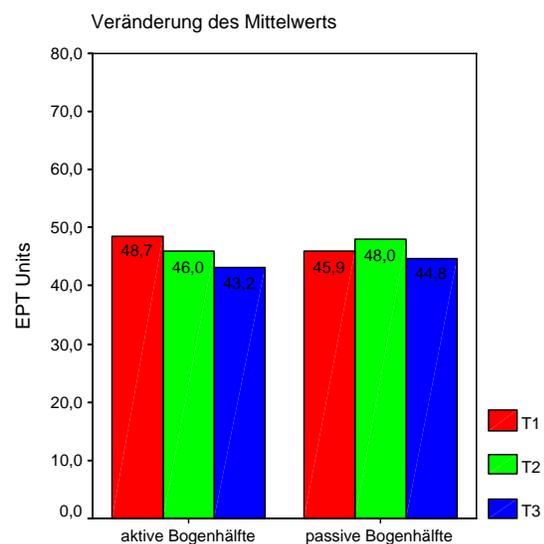
<b>t-Test für unverbundene Stichproben</b>				
	N	MW	p	
EPT Units T1, aktiver Bogen	12	48,7	<b>0,676</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T1, passiver Bogen	11	45,9		
EPT Units T2, aktiver Bogen	12	46,0	<b>0,749</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T2, passiver Bogen	11	48,0		
EPT Units T3, aktiver Bogen	12	43,2	<b>0,832</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T3, passiver Bogen	11	44,8		

**Tabelle 24: t-Test für unverbundene Stichproben, alle ersten Unterkieferprämolaren, Halbsseitenvergleich für die Zeitpunkte T1, T2 und T3: aktive versus passive Bogenhälfte**

In den nachfolgenden Abbildungen 41 und 42 werden die Median- und Mittelwerte gruppiert nach aktiver und passiver Bogenhälfte für die drei Zeitpunkte T1, T2 und T3 dargestellt.



**Abbildung 41: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle UK-4er**



**Abbildung 42: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle UK-4er**

### 5.3.5 Halbseitenvergleich aller Inzisiven und Prämolaren

Insgesamt wurden 46 Inzisiven und Prämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte und 46 Inzisiven und Prämolaren mit einer passiven Bogenhälfte in die statistische Analyse einbezogen.

Der t-Test für unverbundene Stichproben ergab, dass sich die Werte für die Sensibilitätsschwelle von aktiver und passiver Seite weder zum Zeitpunkt T1 ( $p=0,847$ ), noch zu den Zeitpunkten T2 ( $p=0,485$ ) und T3 ( $p=0,619$ ) signifikant voneinander unterscheiden.

Tabelle 25 gibt die gewonnenen Ergebnisse in Kurzfassung wieder:

<b>t-Test für verbundene Stichproben</b>				
	N	MW	p	
EPT Units T1, aktiver Bogen	46	39,5	<b>0,847</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T1, passiver Bogen	46	38,9		
EPT Units T2, aktiver Bogen	46	38,1	<b>0,485</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T2, passiver Bogen	46	40,1		
EPT Units T3, aktiver Bogen	46	37,8	<b>0,619</b>	<b>n.s.</b>
EPT Units T3, passiver Bogen	46	39,3		

**Tabelle 25: t-Test für unverbundene Stichproben, alle Inzisiven und Prämolaren, Halbseitenvergleich für die Zeitpunkte T1, T2 und T3: aktive versus passive Bogenhälfte**

In den Abbildungen 43 und 44 sieht man die Median- und Mittelwerte der verschiedenen Bogenhälften einander gegenübergestellt.

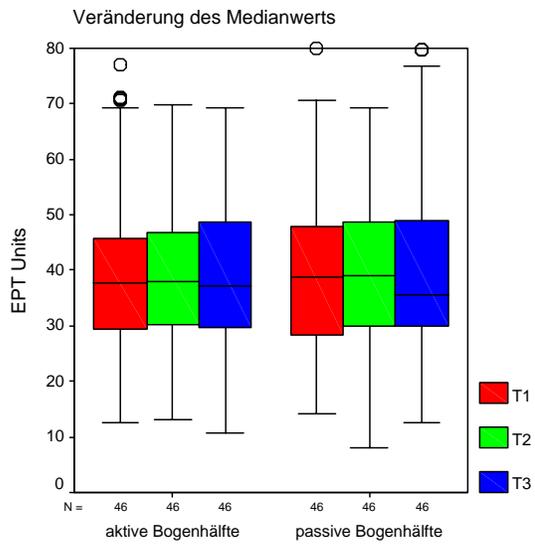


Abbildung 43: Veränderung der Sensibilität, Medianwerte, alle 1er und 4er

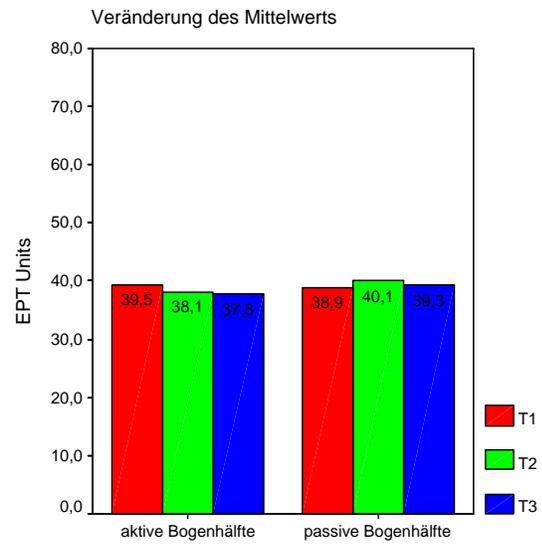


Abbildung 44: Veränderung der Sensibilität, Mittelwerte, alle 1er und 4er

## 6 Diskussion

Die Behandlung der unterschiedlichsten Dysgnathieformen mit Hilfe der festsitzenden kieferorthopädischen bzw. orthodontischen Apparatur ist ein fester Bestandteil im Alltag des Kieferorthopäden. Ihr größter Vorteil gegenüber der herausnehmbaren Apparatur ist, dass alle Modifikationen der festsitzenden Apparatur die Möglichkeit der körperlichen Zahnbewegung bieten. In ihren frühen Jahren barg die festsitzende (Edgewise-)Apparatur ein hohes Risiko für apikale Wurzelresorptionen. Durch die Zunahme der Erkenntnisse über die biologischen Grundlagen der Zahnbewegung und über die Kräftesysteme wurden im Lauf der Jahrzehnte die Risiken für eine iatrogene Schädigung der Zähne weitgehend minimiert. Gerade für die zu Behandlungsbeginn stattfindende Nivellierungsphase wurden Bögen entwickelt, die durch spezielle Materialeigenschaften und einen geringen Durchmesser kleinere und zum Teil auch über einen begrenzten Zeitraum konstante Kräfte abgeben [45, 47, 48, 49, 68, 69, 70, 71].

Viele Studien haben sich bereits mit der Wirkung einer orthodontischen Kraft auf den Zahnhalteapparat oder die Zahnpulpa auseinandergesetzt. Auch die Zahnsensibilität während der kieferorthopädischen oder orthodontischen Behandlung war schon einige Male Mittelpunkt des Interesses, wobei meist nur Frontzähne untersucht wurden. Auch waren die Beobachtungsintervalle meist mehrere Wochen und Monate lang [63, 64, 65, 66, 67].

Die vorliegende Studie untersucht das Verhalten der Zahnsensibilität innerhalb der ersten Woche nach Einligieren des ersten Bogens. Hierbei wurden erstmals gleichzeitig zentrale Inzisiven und erste Prämolaren als Vertreter der Front- und Seitenzähne betrachtet. Des Weiteren wurde zum ersten Mal die Auswirkung unterschiedlicher Bogenqualitäten durch den Einsatz einer aktiven und einer passiven, ausgeglühten Bogenhälfte auf die Zahnsensibilität im Halbseitenvergleich beobachtet.

## 6.1 Methode

Die an der Studie teilnehmenden Patienten waren zum Zeitpunkt des Behandlungsbeginns im Mittel 15,1 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 7,7 Jahren. Dieses augenscheinlich für ein kieferorthopädisches Patientenkollektiv hohe Durchschnittsalter erklärt sich durch die Teilnahme dreier Patienten, die zum Zeitpunkt der Messungen mindestens 19 Jahre alt waren.

Eine mögliche Fehlerquelle beim Messvorgang stellt die Reproduzierbarkeit der Kathodenpositionierung am Zahn dar: Die Prüfspitze des Vitality Scanner wurde anhand markanter anatomischer Strukturen und durch subjektive Beurteilung derselben für den Messvorgang platziert. Die entsprechenden anatomischen Strukturen wurden so gewählt, dass einerseits eine gute Wiederauffindbarkeit gewährleistet war und andererseits der Kontakt der Kathode mit den Schleimhäuten oder den Brackets vermieden wurde, um eine Verfälschung der Messergebnisse zu verhindern. Eine Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit der Messpunkte zu optimieren, hätte das Anfertigen von Splints aus Akrylat oder Silikon dargestellt. Diese Methode wäre aber mit einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand für die Patienten verbunden gewesen. Kritisieren könnte man, dass die Kontaktfläche am Zahn insbesondere im mittleren Kronendrittel der oberen Prämolaren nicht absolut eben ist, so dass die Spitze des Vitality Scanner möglicherweise keinen vollständigen direkten Kontakt zur Zahnoberfläche hatte. Um dieses Problem zu beheben und den Widerstand am Übergang von der Kathode zum Zahn zu verringern, wurde Elektrodengel zur Benetzung verwendet. *Pantera et al.* zeigten, dass sogar bei Verwendung einer zahnärztlichen Sonde oder einer endodontischen Feile zur Überbrückung des Kontaktes zwischen der Kathode des Vitality Scanner und der Zahnoberfläche keine wesentliche Veränderung der gemessenen Sensibilitätswerte gegenüber denen bei direktem Zahnkontakt der Kathode auftritt [72].

Nach *Bender et al.* ist die elektrometrische Zahnsensibilität bei Frontzähnen im Inzisalbereich am größten, das heißt dort werden die kleinsten Messergebnisse gefunden [60]. Das Hauptanliegen dieser Studie war aber nicht, absolute, möglichst geringe Werte für die Zahnsensibilität bei den einzelnen Zahntypen zu ermitteln, sondern die Zahnsensibilität unter den Bedingungen einer orthodontischen Behandlung zu

untersuchen. Die Sensibilität unterliegt zudem großen individuellen Schwankungen, gerade auch bei jugendlichen Zähnen [73].

Die gewählten drei Zeitpunkte für die Messungen erschienen am geeignetsten, um eventuelle Änderungen in der Sensibilität zu erkennen. Der erste Messvorgang erfolgte unmittelbar vor dem Kleben der Brackets und diente zur Erfassung der Ausgangs- bzw. Kontrollwerte. Die zweite Messung fand zwei Tage nach dem Einligieren der Bogenhälften statt und fiel damit in den Zeitraum, in dem die Intensität der auftretenden Beschwerden am höchsten ist, wie in vielen Studien gezeigt werden konnte. Falls es zu Veränderungen der Sensibilität als Zeichen einer Änderung des pulpalen Status kommen sollte, wäre somit Tag zwei ein wahrscheinlicher Zeitpunkt für ihr Auftreten. Der dritte Zeitpunkt der Messungen stimmt nach bisherigen Erfahrungen mit dem Zeitpunkt überein, an dem die allgemeinen durch die Behandlung ausgelösten Beschwerden auf das Ausgangsniveau gesunken oder zumindest stark zurückgegangen sind [36, 39, 40].

Ein mögliches Problem, das einen Einfluss auf die Messergebnisse haben könnte, ist die Tageszeit. Aus praktischen Gründen war es nicht möglich, die Messungen an den Tagen 0, 2 und 7 zu festgelegten Uhrzeiten durchzuführen. Um möglichst viele Patienten für die Studie zu gewinnen, wurde mit den Uhrzeiten für die vereinbarten Messtermine flexibel verfahren.

## **6.2 Verhalten der Zahnsensibilität im Verlauf der drei Zeitpunkte**

Insgesamt wurde die elektrometrische Sensibilität von 111 Inzisiven und Prämolaren bei 25 Patienten im Verlauf der ersten Woche der orthodontischen Behandlung bestimmt. Davon erhielten 56 Inzisiven und Prämolaren eine aktive Bogenhälfte und 55 Inzisiven und Prämolaren eine passive, ausgeglühte Bogenhälfte.

Die Sensibilitätswerte wurden zunächst nach Zahntypen getrennt statistisch analysiert. Hierbei wurden die Sensibilitätswerte, die zu den drei Zeitpunkten T1, T2 und T3 in EPT-Units gemessen wurden, miteinander verglichen. Hierbei ergab sich für die zentralen oberen Inzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte kein statistisch signifikanter

Unterschied zwischen den Sensibilitätswerten von T1 und T2 ( $p=0,365$ ), T2 und T3 ( $p=0,979$ ) und T1 und T3 ( $p=0,280$ ). Auch die Sensibilität der mittleren oberen Inzisiven mit einer passiven Bogenhälfte veränderte sich nicht signifikant von T1 zu T2 ( $p=0,982$ ), von T2 zu T3 ( $p=0,461$ ) und von T1 zu T3 ( $p=0,527$ ). Die Sensibilitätsschwelle der ersten Oberkieferprämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte zeigte ebenfalls keine statistisch signifikante Abweichung zwischen den Werten von T1 und T2 ( $p=0,109$ ), von T2 und T3 ( $p=0,456$ ) und von T1 und T3 ( $p=0,283$ ). Das Gleiche ergab sich für die ersten Oberkieferprämolaren mit einer passiven Bogenhälfte mit  $p=0,842$  für den Vergleich zwischen T1 und T2,  $p=0,697$  für T2 und T3 und  $p=0,076$  für T1 und T3. Auch die getesteten Zähne des Unterkiefers erhielten sich ähnlich, gleichgültig ob auf der Seite der aktiven oder der Seite der passiven Bogenhälfte. Die mittleren Unterkieferinzisiven mit einer aktiven Bogenhälfte zeigten Sensibilitätswerte, die sich weder zu den Zeitpunkten T1 und T2 ( $p=0,251$ ), noch bei T2 und T3 ( $p=0,314$ ) oder bei T1 und T3 ( $p=0,486$ ) signifikant unterschieden. Genauso verhielt es sich mit der Sensibilitätsschwelle der mittleren Unterkieferinzisiven mit einer passiven Bogenhälfte, wobei  $p=0,352$  für den Vergleich zwischen T1 und T2,  $p=0,797$  für T2 und T3 und  $p=0,417$  für T1 und T3 war. Für die ersten Unterkieferprämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte ergab sich im t-Test keine signifikante Abweichung der Messwerte von T1 und T2 ( $p=0,566$ ), T2 und T3 ( $p=0,520$ ) und der Werte von T1 und T3 ( $p=0,158$ ). Bei den ersten unteren Prämolaren mit einer passiven Bogenhälfte ergaben sich im t-Test folgende nicht-signifikante Ergebnisse:  $p=0,558$  für T1 und T2,  $p=0,571$  für T2 und T3 und  $p=0,765$  für T1 und T3.

Auch die gemeinsame Analyse aller getesteten Zähne mit einer aktiven Bogenhälfte im t-Test ergab, dass keine signifikante Veränderung der Sensibilität von T1 zu T2 ( $p=0,446$ ), von T2 zu T3 ( $p=0,799$ ) oder von T1 zu T3 ( $p=0,246$ ) stattgefunden hatte. Ebenso fiel der t-Test für alle getesteten Zähne mit einer passiven Bogenhälfte nicht-signifikant aus für T1 und T2 ( $p=0,376$ ), T2 und T3 ( $p=0,643$ ) und auch für T1 und T3 ( $p=0,718$ ).

Auffällig war bei der vorliegenden Untersuchung die Tatsache, dass es bei den ersten Prämolaren von Maxilla und Mandibula einige Exemplare gab, die zu mindestens einem der drei Zeitpunkte im Messbereich zwischen 0 und 80 EPT-Units nicht-sensibel

reagierten. Diese Zähne verhielten sich konstant sensibel oder nicht-sensibel während der drei aufeinander folgenden Sensibilitätstest zu einem Zeitpunkt und gehörten alle zu jugendlichen Patienten. Im jugendlichen Alter der Patienten, deren Prämolaren im Sensibilitätstest negativ reagierten, ist auch die Begründung für dieses Phänomen zu suchen: Die Entwicklung des für die Zahnsensibilität verantwortlichen Raschkow-Plexus dauert noch nach dem Durchbruch eines Zahnes mit dem Fortschreiten des Wurzelwachstums an. Es ist aus dem klinischen Alltag und aus einigen Studien bekannt, dass Zähne mit nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum zu einem höheren Prozentsatz negativ im elektrischen oder thermischen Sensibilitätstest reagieren als Zähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum [73, 74, 75, 76]. Ein Abschluss des Wurzelwachstums ist für erste Prämolaren im Oberkiefer im Alter zwischen 11,2 und 13,6 Jahren und im Unterkiefer zwischen 11,0 und 13,4 Jahren zu erwarten [77].

Da nicht-sensible Prämolaren von den weiteren statistischen Betrachtungen ausgeschlossen wurden, ergab sich für diese Zahngruppe nur eine kleine Anzahl n: Im Oberkiefer wurden vier von elf Prämolaren (entspricht ca. 36 %) mit einer aktiven Bogenhälfte und fünf von elf Prämolaren (ca. 45 %) mit einer passiven Bogenhälfte in die statistische Auswertung miteinbezogen. Im Unterkiefer waren es zwölf von 15 (=80 %) bzw. elf von 14 Prämolaren (ca. 79 %). Es bleibt zu überlegen, ob die Anwendung eines thermischen Testverfahrens die Anzahl der falsch-negativen Testantworten reduziert hätte. Denn einige Autoren fanden in ihren Untersuchungen heraus, dass der thermische Sensibilitätstest mit CO<sub>2</sub>-Schnee bei Zähnen mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum eine geringere Anzahl negativer Testantworten erzeugt als der elektrische Sensibilitätstest [74, 75, 78]. Ziel der vorliegenden Studie war aber die quantitative Erfassung der Sensibilitätsschwelle. Zum Zeitpunkt der praktischen Durchführung war kein Gerät für einen thermischen Test verfügbar, das vergleichbar einfach in der Handhabung und auch gut transportabel war wie der Vitality Scanner und gleichzeitig ein quantitatives Ergebnis geliefert hätte.

*Cave et al.*, die eine Bestimmung der Sensibilitätsschwelle bei oberen Inzisiven mit dem Vitality Scanner von Analytic Technologies durchführten, kamen zu folgendem Ergebnis: Bei ihren Tests, die vor dem Bonding, direkt nach Einligieren des Bogens und dann erst wieder nach 28 Tagen durchgeführt wurden, kam es unmittelbar zu einem signifikanten Anstieg der Sensibilitätsschwelle. Auch die Anzahl der nicht-sensibel

reagierenden Zähne stieg von 1 % vor dem Bonding auf 7 % nach dem Einligieren des Bogens. Diesen Zähnen ordneten *Cave et al.* den Wert 80 EPT-Units zu und bezogen diese in die Bestimmung der Sensibilitätsschwelle mit ein. Die Frage stellt sich also, ob es auch ohne das Einbringen dieser Zähne in die statistische Auswertung zu einer signifikanten Veränderung der Sensibilitätsschwelle gekommen wäre. Offen bleibt auch die Frage, warum es bei *Cave et al.* im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit zum Auftreten negativer Testantworten bei Schneidezähnen kam. Zum einen liegt das Durchschnittsalter bei *Cave et al.* mit 14,4 Jahren etwas unter dem Durchschnittsalter von 15,1 Jahren in dieser Studie. Somit könnte eine größere Anzahl jüngerer Patienten mit noch nicht vollständig ausgebildetem Raschkow-Plexus eine Erklärung sein. Zum anderen testeten *Cave et al.* nicht nur zentrale sondern auch seitliche Inzisiven, die bekanntlich später als die zentralen durchbrechen und daher in der Entwicklung etwas weiter zurückliegen [65].

Eine Übereinstimmung findet sich zwischen der Studie von *Leavitt et al.* und dieser Studie: Auch *Leavitt et al.* fanden keine signifikante Veränderung der elektrometrischen Sensibilität, wobei die Sensibilitätstests nach dem Kleben der Brackets, eine Stunde nach Einligieren des Nivellierungsbogens, ein Tag danach, eine Woche und einen Monat danach stattfanden. Das galt sowohl für die Sensibilitätsschwelle wie auch für die Schmerzschwelle. Eine weitere Gemeinsamkeit der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung und der von *Leavitt et al.* war die große Variabilität der gemessenen Werte für die Sensibilitätsschwelle. Allerdings standen bei *Leavitt et al.* nur neun orthodontisch behandelte Patienten einer Kontrollgruppe von weiteren neun Patienten gegenüber [66].

### **6.3 Halbseitenvergleich zwischen aktivem und passivem Bogen**

Eine weitere Fragestellung war, ob sich Zähne, bei denen ein passiver Bogen einligiert ist, anders verhalten in Bezug auf ihre elektrometrische Sensibilität als Zähne, auf die Kräfte eines aktiven Bogens einwirken. Auch hier wurden zunächst alle Zähne getrennt nach Zahntypen betrachtet. Im t-Test für unverbundene Stichproben ergab sich, dass sich die Zahnsensibilitäten der oberen, mittleren Inzisiven mit einem aktiven Bogen und

oberen, mittleren Inzisiven mit einem inaktiven Bogen zu keinem der drei Zeitpunkte signifikant unterscheiden mit  $p=0,468$  für T1,  $p=0,765$  für T2 und  $p=0,438$  für T3. Die zwei Gruppen von oberen, ersten Prämolaren hingegen zeigten einen hochsignifikanten Unterschied zum Zeitpunkt T2 mit  $p=0,010$ . Hier hatte die Sensibilitätsschwelle der Prämolaren mit einer aktiven Bogenhälfte einen deutlich niedrigeren Wert angenommen als bei den Prämolaren mit einer passiven Bogenhälfte. Zu den Zeitpunkten T1 ( $p=0,949$ ) und T3 ( $p=0,129$ ) lag jedoch keine signifikante Abweichung der Sensibilitätsschwelle vor. Die Sensibilitätswerte der mittleren Unterkieferinzisiven mit aktiver und passiver Bogenhälfte waren nicht signifikant unterschiedlich, weder bei T1 ( $p=0,681$ ), noch bei T2 ( $p=0,933$ ) oder bei T3 ( $p=0,688$ ). Die ersten Unterkieferprämolaren lassen ebenfalls keine signifikante Abweichung der Sensibilitätswerte auf der aktiven Seite und auf der passiven Seite erkennen mit  $p=0,676$  für T1,  $p=0,749$  für T2 und  $p=0,832$  für T3.

Die Oberkieferprämolaren zeigen hier ein von den übrigen getesteten Zahntypen abweichendes Verhalten. Denkbar wäre, dass dieses abweichende Verhalten Ausdruck einer großen Variabilität der Werte als Folge der geringen Fallzahl ist. Denkbar wäre auch, dass obere, erste Prämolaren sich aufgrund ihrer Mehrwurzeligkeit anders verhalten als einwurzelige Zähne. Oberkieferprämolaren besitzen in über 50 % zwei Wurzeln, haben aber auch als einwurzelige Zähne meist zwei Wurzelkanäle [77].

Dass die zwei unterschiedlichen Bogenhälften auch verschiedene Wirkungen auf die Zähne bzw. auf die Schmerzsymptomatik im Bereich der Zähne haben, zeigten *Drescher und Vorrink*: Sie ließen die Patienten mittels Fragebögen an fünf aufeinander folgenden Tagen Angaben über Schmerzlokalisierung und -intensität machen, nachdem bei ihnen wie in der vorliegenden Studie jeweils eine Kieferhälfte einen aktiven 15er Twistflex und die andere einen bleitoten 15er Twistflex erhalten hatte. Auf der Seite des aktiven Bogens waren die Schmerzintensitäten durchschnittlich doppelt so hoch wie auf der passiven Seite [79].

Wie kommt es also dazu, dass sich diese Halbseitenunterschiede in der vorliegenden Arbeit bei der Bestimmung der elektrischen Sensibilitätsschwelle bei keiner Zahngruppe außer scheinbar bei den Oberkieferprämolaren widerspiegeln? Möglicherweise ist der elektrische Sensibilitätstest kein adäquates Instrument, um den Einfluss orthodontischer Kräfte auf die Pulpa mit anschließender

Sensibilitätsveränderung zu registrieren. Dafür spricht das uneinheitliche Bild bereits existierender Studien, die sich mit der Wirkung orthodontischer Kräfte auf die Zahnsensibilität beschäftigten und zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der elektrometrischen Sensibilität kamen. In Erwägung zu ziehen wäre aber auch die Möglichkeit, dass die weiter oben beschriebenen, durch orthodontische Krafteinwirkung hervorgerufenen histologischen und physiologischen Veränderungen sich in der Pulpa nicht auf die gleiche Art in der Zahnsensibilität widerspiegeln wie es aus dem klinischen Alltag von den Erkrankungen der Pulpa bekannt ist [80]. Denkbar ist aber auch durchaus, dass hier eine zufällige Variabilität zwischen den Halbseiten vorliegt, die durch die kleinen Fallzahlen bedingt ist.

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit dem Einfluss initialer orthodontischer Kraftereinwirkung auf die Zahnsensibilität im elektrischen Sensibilitätstest.

Trotz zahlreicher Studien, die sich bereits mit den physiologischen und histologischen Auswirkungen orthodontischer Kräfte auf die Pulpa auseinandergesetzt haben, ist noch nicht bekannt, welchen Beitrag die Pulpa zur Schmerzsymptomatik während der Initialphase der orthodontischen Behandlung leistet.

Der elektrische Sensibilitätstest ist eine etablierte Methode der Pulpadiagnostik und liefert dem Kliniker indirekt Informationen über Vorgänge in der Pulpa. Eine vom Ausgangszustand abweichende Sensibilität unter orthodontischen Bedingungen könnte einen Hinweis auf Veränderungen in der Pulpa geben, die möglicherweise mit der auftretenden Schmerzsymptomatik korrelieren.

Die Resultate dieser Untersuchung konnten keine signifikanten Veränderungen der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle für mittlere Inzisiven und erste Prämolaren von Maxilla und Mandibula in der ersten Woche der orthodontischen Behandlung aufzeigen. Auch die Qualität der verwendeten Bögen, nämlich aktiv oder durch Ausglühen inaktiviert, hatte keinen nachweisbaren Einfluss auf die Sensibilitätsschwelle. Lediglich am zweiten Tag nach Einligieren der Bogenhälften zeigte sich ein statistisch hochsignifikanter Unterschied bei den ersten Oberkieferprämolaren: diejenigen mit einer aktiven Bogenhälfte hatten einen um durchschnittlich 17,6 EPT-Units niedrigeren Wert für die Sensibilitätsschwelle als die Oberkieferprämolaren mit einer passiven Bogenhälfte. Worauf dieses Ergebnis zurückzuführen ist – ob möglicherweise auf die Mehrwurzeligkeit dieses Zahntyps oder auf die geringe Fallzahl – wurde im Rahmen dieser Studie nicht geklärt. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass ein elektrischer Sensibilitätstest bei Zähnen mit nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum nur eine begrenzte Aussagekraft hat.

## Literaturverzeichnis

- [1] Asbell MB: A brief history of orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 98 (1990), 176-183
- [2] Graber TM: Development of a concept in *Orthodontics, Principles and Practice*, 3<sup>rd</sup> ed., W.B. SaundersCo. Philadelphia 1972, S. 1
- [3] Schopf P: Geschichte festsitzender Geräte in *Curriculum Kieferorthopädie*, 3. Auflage, Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin. 2000, S.473
- [4] Asbell MB: A brief history of orthodontics *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 98 (1990), 206-213
- [5] Oliver RG, Knapman YM: Attitudes to orthodontic treatment. *Br J Orthod* 12 (1985), 179-188
- [6] Scheurer PA, Firestone AR, Bürgin WB: Perception of pain as a result of orthodontic treatment with fixed appliances. *Eur J Orthod* 18 (1996), 349-357
- [7] Davidovitch Z: Tooth movement. *Crit Rev Oral Biol Med* 2 (1991), 411-450
- [8] Long A, Loescher AR, Robinson PP: A histological study on the effect of different periods of orthodontic force on the innervation and dimensions of the cat periodontal ligament. *Arch Oral Biol* 41 (1996), 799-808
- [9] Vandevska-Radunovic V et al.: Changes in blood circulation in teeth and supporting tissues incident to experimental tooth movement. *Eur J Orthod* 16 (1994), 361-369
- [10] Anstendig HS, Kronman JS: A histologic study of pulpal reaction to orthodontic tooth movement in dogs. *Angle Orthod* 42 (1972), 50-55

- [11] Mostafa YA, Iskander KG, Helmy El-Mangoury N: Iatrogenic pulpal reactions to orthodontic extrusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 99 (1991), 30-34
- [12] Nixon CE, Saviano JA, King GJ, Keeling SD: Histomorphometric study of dental pulp during orthodontic tooth movement. *J Endod* 19 (1993),13-16
- [13] Hamersky PA, Weimer AD, Taintor JF: The effect of orthodontic force application on the pulpal tissue respiration rate in the human premolar. *Am J Orthod* 77 (1980), 368-378
- [14] Labart WA, Taintor JF, Dyer JK, Weimer AD: The effect of orthodontic forces on pulp respiration in the rat incisor. *J Endod* 6 (1980),724-7
- [15] Popp TW, Artun J, Linge L: Pulpal response to orthodontic tooth movement in adolescents: a radiographic study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 101 (1992), 228-233
- [16] Unterseher RE, Nieberg LG, Weimer AD, Dyer JK: The response of human pulpal tissue after orthodontic force application. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 92 (1987), 220-224
- [17] McDonald F, Pitt Ford TR: Blood flow changes in permanent maxillary canines during retraction. *Eur J Orthod* 16 (1994), 1-9
- [18] Kvinnsland S, Heyeraas K, Ofjord ES: Experimental tooth movement on periodontal and pulpal blood flow. *Eur J Orthod* 11 (1989), 200-205
- [19] Davidovitch Z, Nicolay OF, Ngan PW, Shanfeld JL: Neurotransmitters, cytokines and the control of alveolar bone remodeling in orthodontics. *Dent Clin North Am* 32 (1988), 411-435

- [20] Byers MR, O'Connor TA, Martin RF, Dong WK: Mesencephalic trigeminal sensory neurons of cat: Axon pathways and structure of mechanoreceptive endings in periodontal ligament. *J Comp Neurol* 250 (1986), 181-191
- [21] Wakisaka S: Neuropeptides in the dental pulp: distribution, origin and correlation. *J Endod* 16 (1990), 67-69
- [22] Närhi M, Jyväsjärvi E, Virtanen A, Huopaniemi T, Ngassapa D, Hirvonen T: Role of intradental A- and C-type nerve fibres in dental pain mechanisms. *Proc Finn Dent Soc* 88 (1992), suppl. I, 507-516
- [23] Pashley DH: Mechanisms of dentin sensitivity. *Dent Clin North Am* 34 (1990), 449-473
- [24] Brain SD: Sensory neuropeptides: their role in inflammation and wound healing. *Immunopharm* 37 (1997), 133-152
- [25] Basbaum AJ, Levine JD: The contribution of the nervous system to inflammation and inflammatory disease. *Can J Physiol Pharm* 69 (1991), 647-651
- [26] Pedersen-Bjergaard U, Nielsen LB, Jensen K, Edvinsson L, Janssen I, Olesen J: Calcitonin gene-related peptid, neurokinin A and substance P: Effects on nociception and neurogenic inflammation in human skin and temporal muscle. *Peptides* 12 (1991), 333-337
- [27] Wakisaka S, Ichikawa H, Nishikawa S, Matsuo S, Takano Y, Akai M: The distribution and origin of calcitonin gene-related peptide-containing nerve fibres in feline dental pulp. Relationship with substance P-containing nerve fibres *Histochem* 86 (1987), 585-589

- [28] Olgart L: Neural control of pulpal blood flow. *Crit Rev Oral Biol Med* 7 (1996), 159-171
- [29] Kvinnsland I, Kvinnsland S: Changes in CGRP-immunoreactive nerve fibres during experimental tooth movement in rats. *Eur J Orthod* 12 (1990), 320-329
- [30] Norevall LJ, Forsgren S, Matsson L: Expression of neuropeptides (CGRP, substance P) during and after orthodontic tooth movement in rats. *Eur J Orthod* 17 (1995), 311-325
- [31] Vandevska-Radunovic V, Kvinnsland S, Kvinnsland IH: Effect of experimental tooth movement on nerve fibres immunoreactive to calcitonin gene-related peptide, protein gene product 9.5, and blood vessel density and distribution in rats. *Eur J Orthod* 19 (1997), 517-529
- [32] Walker JA, Tanzer FS, Harris ET, Wakelyn C, Desiderio DM: The enkephalin response in human tooth pulp to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 92 (1987), 9-16
- [33] Parris WG, Tanzer FS, Fridland GH, Harris EF, Killmar J, Desiderio DM: Effects of orthodontic force on methionine enkephalin and substance P concentrations in human pulpal tissue. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 95 (1989), 479-489
- [34] Jones ML: An investigation into the initial discomfort caused by placement of an archwire. *Eur J Orthod* 6 (1984), 48-54
- [35] Jones ML, Chan C: Pain in the early stages of orthodontic treatment. *JCO* 25 (1992), 311-313
- [36] Jones ML, Chan C: The pain and discomfort experienced during orthodontic treatment: A randomized controlled clinical trial of two initial aligning archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 102 (1992), 373-381

- [37] Jones ML, Richmond S: Initial tooth movement: Force application and pain- a relationship? *Am J Orthod* 88 (1985), 111-116
- [38] Brown DF, Moerenhout RG: The pain experience and psychological adjustment to orthodontic treatment of preadolescents, adolescents and adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 100 (1991), 349-356
- [39] Serogl HG, Klages U, Zentner A: Pain and discomfort during orthodontic treatment: Causative factors and effects on compliance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 114 (1998), 684-691
- [40] Ngan P, Kess B, Wilson S: Perception of discomfort by patients undergoing orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 96 (1989), 47-53
- [41] Furstman L, Bernick S: Clinical considerations of the periodontium. *Am J Orthod* 61 (1972), 138-155
- [42] Hwang J-Y, Tee C-H, Huang AT, Taft L: Effectiveness of Thera-Bite Wafers in reducing pain. *J C O* 28 (1994), 291-292
- [43] Ngan P, Wilson S, Shanfeld J, Amini H: The effect of ibuprofen on the level of discomfort in patients undergoing orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 106 (1994), 88-95
- [44] Andreasen GF, Zwanziger D: A clinical evaluation of the differential force concept as applied to the edgewise bracket. *Am J Orthod* 78 (1980), 25-40
- [45] Kusy RP: A review of contemporary archwires: Their properties and characteristics. *Angle Orthod* 67 (1997), 197-208

- [46] Bantleon HP, Droschl H, Stern G: Die differenzierte Anwendung verschiedener Drahtlegierungen in der festsitzenden Technik. *Inf Orth Kieferorthop*, 21 (1989), 173-183
- [47] Oltjen JM, Duncanson MG, Ghosh J, Nanda RS, Currier GF: Stiffness-deflection behaviour of selected orthodontic wires. *Angle Orthod* 67 (1997), 209-218
- [48] Rock WP, Wilson HJ: Forces exerted by orthodontic aligning archwires. *Br J Orthod* 15 (1988), 255-259
- [49] Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Deaktivierungsverhalten und Effektivität verschiedener orthodontischer Nivellierungsbögen- eine dynamische Analyse der Kraftsysteme. *Fortschr Kieferorthop* 53 (1992), 273-285
- [50] Rowe AHR, Pitt Ford TR: The assessment of pulpal vitality. *Int Endod J* 23 (1990), 77-83
- [51] Virtanen ASJ, Huopaniemi T, Närhi MVO, Pertovaara A, Wallgren K: The effect of temporal parameters on subjective sensations evoked by electrical tooth stimulation. *Pain* 30 (1987), 361-371
- [52] Kleinberg I, Kaufman HW, Wolff M: Measurement of tooth hypersensitivity and oral factors involved in its development. *Arch Oral Biol* 39 (1994), 63S-71S.
- [53] Mayer R, Heppe H: Vergleichende klinische Untersuchungen unterschiedlicher Mittel und Methoden zur Prüfung der Vitalität der Zähne. *ZWR* 15 (1974), 777-781
- [54] Petersson K, Söderström C, Kiani-Anaraki M, Lévy G: Evaluation of the ability of thermal and electrical tests to register pulp vitality. *Endod Dent Traumatol* 15 (1999), 127-131

- [55] Dummer PMH, Hicks R, Huws D: Clinical signs and symptoms in pulp disease. *Int Endod J* 13 (1980), 27-35
- [56] Pileggi R, Dumsha TC, Myslinski NR: The reliability of electrical pulp test after concussion injury. *Endod Dent Traumatol* 12 (1996), 16-19
- [57] Andreasen FM: Transient apical breakdown and its relation to color and sensibility changes after luxation injuries to teeth. *Endod Dent Traumat* 2 (1986), 9-19
- [58] Brown AC, Beeler WJ, Kloka AC, Fields RW: Spatial summation of pre-pain and pain in human teeth. *Pain* 21 (1985), 1-16
- [59] Dummer PMH, Tanner M: The response of caries-free, unfilled teeth to electrical excitation: a comparison of two new pulp testers. *Int Endod J* 19 (1986), 172-177
- [60] Bender IB, Landau MA, Fonseca S, Trowbridge HO: The optimum placement side of the electrode in electric pulp testing of the 12 anterior teeth. *JADA* 118 (1989), 305-310
- [61] Torneck CD, Howley TP: A comparison of pulpal and tactile detection threshold levels in young adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 96 (1989), 302-311
- [62] Dummer PMH, Tanner M, Mc Carthy JP: A laboratory study of four electric pulp testers. *Int Endod J* 19 (1986), 161-171
- [63] Burnside RR, Sorenson FM, Buck DL: Electric vitality testing in orthodontic patients. *Angle Orthod* 44 (1974), 213-217

- [64] Hall CJ, Freer TJ: The effects of early force application on pulp test responses. *Aust Dent J* 43 (1998), 359-361
- [65] Cave SG, Freer TJ, Podlich HM: Pulp-test responses in orthodontic patients. *Aust Orthod J* 18 (2002), 27-34
- [66] Leavitt AH, King GJ, Ramsay DS, Jackson DL: A longitudinal evaluation of pulpal pain during orthodontic tooth movement. *Orthod Craniofacial Res* 5 (2002), 29-37
- [67] Bunner M, Johnson D: Quantitative assessment of intrapulpal axon response to orthodontic movement. *Am J Orthod* 82 (1982), 244-250
- [68] Weiland F: Constant versus dissipating forces in orthodontics: the effect on initial tooth movement and root resorption. *Eur J Orthod* 25 (2003), 335-342
- [69] Wilkinson PD, Dysart PS, Hood JAA, Herbison GP: Load-deflection characteristics of superelastic nickel-titanium orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 121 (2002), 483-495
- [70] Klump JP, Duncanson MG, Nanda RS, Currier GF: Elastic energy/ stiffness ratios for selected orthodontic archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 106 (1994), 588-596
- [71] Filleul MP, Constant S: Torsional properties of Ni-Ti orthodontic archwires. *Materials Science and Engineering* (1999), A273-275
- [72] Pantera EA, Anderson RW, Pantera CT: Use of dental instruments for bridging during electric pulp testing. *J Endod* 18 (1992), 37-38
- [73] Brandt K, Kortegaard U, Poulsen S: Longitudinal study of electrometric sensitivity of young permanent incisors. *Scand J Dent Res* 96 (1988), 334-338

- [74] Billen U, Schwarze CW, van Laere D: Sensibilitätsstörungen der Frontzähne bei Kindern und Jugendlichen. Fortschr Kieferorthop 50 (1989), 440-447
- [75] Fulling HJ, Andreasen JO: Influence of maturation status and tooth type of permanent teeth upon electrometric and thermal pulp testing. Scand J Dent Res 84 (1976), 286-290
- [76] Klein H: Pulp responses to an electric pulp stimulator in the developing anterior dentition. ASDC J Dent Child 45 (1978), 199-202
- [77] Schröder HE: Orale Strukturbiologie. 5. Aufl., Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 2000
- [78] Fuss Z, Trowbridge H, Bender IB, Rickoff B, Sorin S: Assessment of reliability of electrical and thermal pulp test agents. J Endod 12 (1986), 301-305
- [79] Drescher D, Vorrink N: Schmerzentwicklung bei der Behandlung mit festsitzenden Apparaturen im Halbseitenvergleich. Posterdemonstration 14 zur DGKFO 2000
- [80] Raab WH: Diagnostische Aspekte des Zahnschmerzes. Zahnärztliche Mitteilungen 90 (2000), 58-64

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name	Lisa Müller
Geburtsdatum, -ort	31.08.1976, Clausthal-Zellerfeld
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

## Schulausbildung

1983 – 1987	Lottenschule, Monheim am Rhein
1987 – 1996	Otto-Hahn-Gymnasium, Monheim am Rhein (Leistungskurse: Physik und Mathematik, Abschluss: Abitur mit Durchschnitt 1,0)

## Studium

WS 1996 bis SS 2001	Studium der Zahnmedizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf naturwissenschaftliche Vorprüfung mit Note „gut“, zahnärztliche Vorprüfung mit Note „sehr gut“, zahnärztliche Prüfung mit Note „sehr gut“
------------------------	--

## Berufliche Tätigkeit

03/2002 bis 12/2004	Vorbereitungsassistentin in der zahnärztlichen Praxisgemeinschaft Dr. Klaus Künkel und Ulrich Stapelfeldt Uhlandstr. 1 51379 Leverkusen-Opladen
Seit 01/2005	Assistenz Zahnärztin in der Zahnarztpraxis Dr. Roland Schindler Bahnhofstrasse 2 6210 Sursee, Schweiz

## **Abstract**

Die hier vorliegende Dissertation befasst sich mit der Frage, ob initiale orthodontische Kräfte einen Einfluss auf die Zahnsensibilität im elektrometrischen Sensibilitätstest haben. Der Sensibilitätstest ist ein unverzichtbarer Bestandteil in der klinischen Pulpadiagnostik. Mit dieser nicht-invasiven Untersuchungsmethode lassen sich auf indirekte Weise Informationen über den Zustand der Pulpa gewinnen, da bestimmte Veränderungen der Pulpa mit einer veränderten Reaktion auf den Sensibilitätstest einhergehen. Dabei ist der elektrometrische Sensibilitätstest eine der am häufigsten angewendeten Formen des Sensibilitätstests.

Zahlreiche Studien haben bereits die physiologischen und histologischen Veränderungen in der Pulpa unter dem Einfluss orthodontischer Kräfte untersucht. Bis jetzt konnte jedoch nicht vollständig geklärt werden, in welchem Zusammenhang die Pulpa mit der in der Initialphase der orthodontischen Behandlung auftretenden Schmerzsymptomatik steht. Deswegen war das Ziel dieser klinischen Studie, mit Hilfe eines quantitativen Sensibilitätstests die elektrometrische Sensibilitätsschwelle vor Behandlungsbeginn, zwei Tage und sieben Tage nach Beginn der orthodontischen Behandlung zu erfassen. Untersucht wurden hierzu mittlere Schneidezähne und erste Prämolaren im Ober- und im Unterkiefer, wobei pro Kiefer eine aktive und eine passive Bogenhälfte einligiert wurden. Die Resultate dieser Studie zeigten für keine der getesteten Zahngruppen im Ober- und Unterkiefer eine signifikante Veränderung der Sensibilitätsschwelle in der ersten Woche der orthodontischen Behandlung. Auch die Bogenqualität beeinflusste die Ergebnisse des Sensibilitätstests nicht: Sowohl Zähne mit einer aktiven Bogenhälfte als auch Zähne mit einer ausgeglühten, passiven Bogenhälfte zeigten zu keinem der Zeitpunkte eine signifikante Veränderung der elektrometrischen Sensibilitätsschwelle. Lediglich für die ersten Oberkieferprämolaren ergab sich beim Vergleich der Werte von Zähnen mit einer aktiven Bogenhälfte und der Werte von Zähnen mit einer passiven Bogenhälfte ein hoch signifikanter Unterschied. Ob dieser Unterschied auf die Mehrwurzeligkeit dieses Zahntyps, auf ein nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum oder auf die kleine Fallzahl zurückzuführen ist, konnte im Rahmen dieser Studie nicht geklärt werden.