

7 Diskussion

Es wurde ein System zur Messung der orts aufgelösten individuellen Kaukraft entwickelt. Die beschriebene Messmethode liefert reproduzierbare Messergebnisse. Feuchtigkeitseinflüsse auf die Druckmessfolie konnten durch eine eigens entwickelte Beschichtung verhindert werden.

Die Überprüfung der Scannereigenschaften zeigte, dass die Dimensionstreuung nur mit der Einführung eines Korrekturfaktors ($f=1,0021$) gewährleistet werden kann. Die in horizontaler gegenüber vertikaler Richtung erhöhte Abweichung entspricht den in der Literatur gewonnenen Erkenntnissen [10]. Generell kann die Abweichung von 0,2 % bei der Flächenbestimmung als gering angesehen werden. Wird ein anderer Scanner als der untersuchte verwendet, sollte dieser auf die Dimensionsgenauigkeit hin überprüft werden. Allgemein wird eine Kalibrierung jedes Scanners empfohlen [9]. Der in dieser Arbeit benutzte Scanner ließ sich nicht kalibrieren, deshalb wurde der ermittelte Korrekturfaktor bei der Berechnung der Flächen stets beachtet. Ein Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse mit anderen Arbeiten ist leider nicht möglich, da in den vorliegenden Veröffentlichungen anderer Autoren nicht auf diese Problematik eingegangen wurde. Lediglich FUKUDA war gezwungen eine Eichung durchzuführen, da er eine an ein Mikroskop angeschlossene Videokamera benutzte [27]. Es muss also davon ausgegangen werden, dass in allen anderen vorliegenden Arbeiten dem Umstand der Kalibrierung nicht Rechnung getragen wurde. Damit dürften alle Aussagen zu ermittelten Flächen und Drücken mit einem systematischen Fehler unbekannter Größe behaftet sein.

Das maximale Auflösungsvermögen des untersuchten Scanners wurde bei einer eingestellten Auflösung von 1200 dpi ermittelt. Alle eingestellten Auflösungen konnten durch Prüfung mit dem eingesetzten Testmuster bestätigt werden. In den Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass erst eine Auflösung von 800 dpi konstante Ergebnisse auch bei mehrmaligem Scannen ergaben. Ursächlich für die Notwendigkeit einer hohen Auflösung ist die Mikrostruktur der Folienoberfläche. Es wird davon ausgegangen, dass der kleinste durch das Zerplatzen der Mikrokapseln entstandene Farbpunkt mindestens den Durchmesser der zerplatzten Mikrokapsel annimmt. Dieser beträgt im Mittel 35 μm . Wird weiterhin

von einem allseitigen Verlaufen der Farbbildner ausgegangen, übersteigt der Durchmesser des Farbabdrucks den der zerplatzten Mikrokapsel.

Bei einer Auflösung von 800 dpi besitzt die kleinste noch erfassbare quadratische Fläche (Pixel) 32 µm Kantenlänge. Somit können bei dieser Auflösung Farbpunkte, die nur durch das Zerplatzen einer einzigen Mikrokapsel entstanden sind, wahrgenommen werden.

Untersuchungen zur optimalen Auflösung wurden in der Vergangenheit nicht durchgeführt. Die in dieser Arbeit gewählte Auflösung von 800 dpi liegt weit über der für das von Fuji entwickelten Occluzer-Systems angegebenen Auflösung von 100 dpi [69, 70] aber unter der von NG und YEONG benutzten Auflösung von 1200 dpi [80].

Ottl et al. [86] nahmen ähnlich wie FUKUDA [27] die Färbung der Druckmessfolie mit einer Videokamera auf. Diese lieferte 512x512 Bildpunkte. Bei einer angenommenen Bildgröße von 50x50 mm erreichten sie eine Auflösung von rund 260 dpi.

Die genannten Auflösungen von 100 und 260 dpi müssen unter Kenntnis der Eigenschaften der Druckmessfolie und der Größe der kleinstmöglichen Flächen als zu gering erachtet werden. Ein Einlesen der Folien mit 1200 dpi Auflösung scheint aufgrund der extrem langen Scandauer nicht sinnvoll. Außerdem steigen die ohnehin recht hohen Datenmengen stark an und verlangsamen die Bildauswertung unnötig. So führt die Steigerung der Auflösung von 800 auf 1200 dpi zu mehr als doppelt so großen Bildinformationen.

Das in Zusammenarbeit mit FEIKS entwickelte Programm zur Auswertung der gefärbten Bereiche erwies sich als sehr zuverlässig und einfach in der Handhabung. Die Auswertung der einzelnen Pixel erfolgte hinsichtlich ihrer Intensität in 256 Stufen mit Werten von 0 -1. Der Auswertalgorithmus orientierte sich dabei am FDP 704 Bildauswertesystem (Fa. Fuji) [69, 70] sowie am Algorithmus von Ottl [86] und Ng und Yeong [80], die ebenfalls 256 Farb- bzw. Grauwertstufen zur Bestimmung der Farbintensität benutzten. Die Einteilung der Farbintensitäten in acht Stufen wie sie Fukuda [27] vorschlug erschien für die Charakterisierung eines Bildpunktes zu ungenau und wurde auch von anderen Autoren nicht weiter angewandt.

Die Bestimmung der Flächenpunktanzahl erfolgte in Analogie zu allen anderen Autoren durch Auszählung der gefärbten Pixel.

Der im entwickelten Programm enthaltene stufenlos einstellbare Rauschfilter (Schwellwert) zeigte bei einer Einstellung von 30 % ein Optimum. Die

Gewichtsaufzeichnung war bei dieser Einstellung maximal, während der Einfluss von Artefakten und der rötlichen Grundfärbung der Folie völlig eliminiert werden konnten. OTTL ET AL. [86] wiesen auf die Beeinträchtigung durch Artefakte, die durch Knittern der Folie im Schlussbiss entstanden, hin und lösten das Problem durch zwei Gummipplatten zwischen denen sich die Druckmessfolie befand. Die Druckverteilung durch diese Platten führte zu größeren und dabei schwächer gefärbten Folienbereichen. Leider erhöhte sich die Dicke der Messapparatur auf 2,2 mm. Über eine Entfernung der Artefakte bei der Auswertung mit dem FDP 704 – Bildauswertesystem wurden keine Angaben gemacht.

Der Vergleich der unterschiedlich beschichteten Druckmessfolien ergab, dass die Beschichtungsmethoden (gerakelt, gespritzt, PVAC, Latex) der Filme nach einer Lagerzeit von 7 Tagen keine Veränderungen bezüglich ihres Färbeverhaltens zeigen. Die auftretenden Streuungen sind nach dieser Zeit für alle Beschichtungsmethoden aufgrund der geringen relativen Standardabweichungen von 0,8 - 2,0 % als gering einzustufen. Die zum Teil starken Abweichungen im Färbeverhalten binnen 48 h nach Herstellung der Folien sind wahrscheinlich, auf ein Verbleiben der Lösungsmittel Äthanol (PVAC) und Wasser (Latex) zurückzuführen. Durch eine initiale Hautbildung der aufgetragenen Kunststofflösung innerhalb der ersten Sekunden nach Auftragen kommt es zu einer Verzögerung des Trocknungsprozesses. Das Lösungsmittel kann nur noch durch Diffusion an die Schutzfilmoberfläche gelangen, um zu verdunsten. Die Konzentration an Lösungsmittel ist dabei in der dem Druckmessfilm zugewandten Schicht des Kunststofffilmes besonders hoch. Je mehr Lösungsmittel verdunstet, desto dicker wird die äußere, lösungsmittelarme Haut und um so langsamer schreitet der weitere Trocknungsprozess voran [100]. Offensichtlich ist dieser Prozess erst nach 7 Tagen soweit abgeschlossen, dass die verbliebenen Lösungsmittelreste keinen Einfluss mehr auf die Färbereaktion der Folie haben.

Die mit Cellophanfolie beschichteten Druckmessfilme zeigten bei den Tests mit gleich bleibender Belastung eine minimale Streuung der ermittelten Färbungswerte (relative Standardabweichung 0,7 % bzw. 0,9 %). Mit einem mittleren Wert (Gewicht/Fläche) von 0,443 [Pixel^{-1}] nach 4 Stunden und 0,423 [Pixel^{-1}] nach 4 Monaten zeigten sie mit Abstand die höchsten Färbungswerte pro Bildpunkt.

Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Empfindlichkeit gegenüber allen andersartig beschichteten Folien erhöht ist. Diese erhöhte Empfindlichkeit ist für die Messung von niedrigen Kräften sinnvoll, kann allerdings bei hohen Kräften zu einem frühzeitigen Verlassen des Messbereiches führen. Für die praktische Anwendung erwies sich das lockere Aufliegen der Schutzfolie als nachteilig, da sich die Folie gegen den Druckmessfilm verschieben konnte. Durch die plastische Deformation der Schutzfolie sowie die hieraus entstehenden Hohlräume zwischen Film und Folie wurde die Auswertung der gefärbten Bereiche erschwert. Zuverlässige Ergebnisse konnten nur durch die Entfernung der Schutzfolie vor dem Einscannen erreicht werden. Leider war es nicht möglich die Folie so auf dem Druckmessfilm zu fixieren, dass sie einerseits für den Belastungsvorgang fest mit der Oberfläche verbunden und andererseits zur Auswertung leicht zu entfernen war. Angaben über die genannten Probleme oder die prinzipielle Befestigung einer Schutzfolie auf dem Druckmessfilm konnten der Literatur nicht entnommen werden. Die Angaben der zumeist japanischen Autoren zu einer von Fuji-Film angebotenen und von ihnen angewendeten speziellen Druckmessfolie (Typ R) die mit Polyethylenfolie geschützt war, beschränken sich auf Aussagen zur Dicke der Folie. Diese Gesamtfoliendicke liegt bei 97 - 98 μm [39, 45, 57, 76]. Leider war es nicht möglich diesen Folientyp von Fuji zu erhalten oder zu untersuchen.

Grundsätzlich sollte es allerdings möglich sein, eine Cellophan-ähnliche Cellulose-Schicht auf die Druckmessfolie über eine filmbildende Celluloseschicht aufzubringen, aus der die Cellulose anschließend ausgefällt wird. Entsprechende Grundlagen der Cellulosechemie und -verarbeitung sind z.B. in [49] zu finden.

Die im weiteren getesteten, mittels Latex und PVAC beschichteten Filme hatten im Vergleich zur Cellophanfolie den Vorteil, dass sie eine feste Verbindung mit der Druckmessfolie eingingen. Sie waren nicht ohne Zerstörung von der Folie zu trennen. Auch die bei der locker aufgelegten Cellophanfolie beobachteten plastischen Verformungen blieben aus. Das Auslesen der Bildinformationen mit dem Scanner konnte problemlos erfolgen.

Im Gebrauch der beschichteten Folien zeigte sich eine erhöhte Resistenz gegenüber ungewollten Verfärbungen. Die Neigung zur Farbentwicklung bei leichter Berührung mit spitzen Gegenständen (Fingernagel) oder beim Knicken der Folie ist deutlich geringer, als bei einer unbeschichteten Folie. Zurückzuführen ist dies auf den Schutz

der Mikrokapselschicht durch den aufgetragenen Kunststoff. Der Kunststoff verringert wahrscheinlich die Scherbelastung bzw. Reibung auf die Mikrokapseln und überträgt nur Kräfte, die senkrecht auf die Folie einwirken. (Vergleichbar ist dies mit einer gefüllten Eierpackung. Fährt man mit einem harten Gegenstand unter Reibung über die Packungsoberfläche, nehmen die Eier keinen Schaden. Wird die Packung aber geöffnet und der gleiche Vorgang wiederholt, kann es sein, dass einige Eier beschädigt werden.)

Bezüglich der senkrecht einwirkenden Kräfte konnten keine oder nur geringe Unterschiede zwischen den mit Latex und PVAC beschichteten Druckmessfolien festgestellt werden.

Unabhängig von den Beschichtungsmethoden zeigten die beiden zur Beschichtung genutzten Lösungen ein ähnliches Verhalten. Bei gleichen Eigenschaften sollte aber einer PVAC Beschichtung aufgrund der besseren Biokompatibilität der Vorzug gegeben werden. Latex, das zwar bei Haut- oder Schleimhautkontakt unbedenklich ist und im medizinischen Bereich häufig Anwendung findet, ist als Auslöser allergischer Reaktionen bekannt. In 1-9 % der Bevölkerung besteht eine Sensibilisierung oder Allergie gegenüber Latex [97].

PVAC kann als völlig inerte und ungefährlicher Stoff angesehen werden. Dabei wird PVAC insbesondere in der Pharmazie zur Kapselung von Wirkstoffen für die orale Aufnahme in controlled release-Systemen benutzt [33]. Weiterhin zeigten die Untersuchungen von GONZALES NOVOA ET AL., dass PVAC im direkten Zellkontakt die zweithöchste Biokompatibilität unter allen getesteten Kunststoffen erreichte [33].

In den weiteren Untersuchungen wurde die Druckmessfolie mithilfe des Rakelverfahrens beschichtet, da dieses Verfahren Vorteile gegenüber dem Spritzverfahren aufwies. So bildete sich beim Rakelverfahren immer ein gleichmäßig dicker Schutzfilm, der eine glatte Oberfläche aufwies. Der Spritzvorgang hingegen hinterließ eine raue Oberfläche, was auf die Bildung von Tröpfchen im Aerosol zurückzuführen war. Da der Spritzvorgang von Hand durchgeführt wurde, gab es selbst bei gewissenhafter Beschichtung Zweifel, ob die Kunststoffdicke an allen Punkten gleich groß war.

Die weiteren Versuche, bei denen die nach dem Rakelverfahren mit PVAC beschichteten Druckmessfilme untersucht wurden, sollten den Einfluss der Zeitspanne zwischen Belastung und Scannvorgang klären.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verringerung der gemessenen Gewichtswerte innerhalb der ersten 60 Minuten, während die Fläche nur leicht stieg. In den darauf folgenden Stunden steigen Gewicht und Fläche an. Die mittlere Färbung eines Bildpunktes sank.

Das Abfallen des Gewichtswerts in den ersten Minuten lässt sich mit einem homogenen Verlaufen der Entwicklerflüssigkeit erklären. Dabei verläuft oder diffundiert Flüssigkeit von stark zu schwach gefärbten Bereichen. Hierdurch verringert sich die Farbintensität in zuvor stark gefärbten Zonen. Da die in die Umgebung abgewanderte rote Flüssigkeit zum Teil nicht zum Überschreiten des Schwellwertes genügt, kommt es zu der beobachteten Reduzierung des Gewichtswertes.

Innerhalb der ersten 60 Minuten trocknet die Flüssigkeit ab und es kommt in der Folge zu einem langsamen Fortschreiten der chemischen Entwicklerreaktion. Diese schwächt sich immer mehr ab.

Aus den gewonnen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass eine Auswertung in der ersten Stunde nach Belastung zu Fehlern führen kann. MATSUI erkannte diesen Umstand und lagerte die Folien „zur Stabilisierung“ für 3 Stunden ehe er sie auswertete [70].

Die hier gefundenen Ergebnisse zeigen allerdings, dass die Folie auch nach 3 Stunden nicht „stabil“ ist. Deshalb sollte die Folie nach Belastung sofort mit einer Referenzkraft belastet werden, um den Fehler rechnerisch über einen Eichmesswert zu minimieren.

Die Ergebnisse zum belastungsabhängigen Verhalten sollten der Erstellung einer Kalibrierkurve dienen, mit der später aus dem Färbungsverhalten der Druckmessfolie auf die ausgeübten Kräfte geschlossen werden konnte.

Die Untersuchungen ergaben, dass die Intensität der Färbung nicht nur von der auf die Folie einwirkenden Kräfte abhängt, sondern auch von der Geometrie des Probekörpers.

Nach einem anfänglich linearem Zusammenhang zwischen Kraft und Gewicht nimmt der Anstieg der Kurve ab. Die Erklärung hierfür ist, dass die Bildpunkte starker Intensität bei hoher Kraft weniger stark zunehmen (Abbildung 33).

Es zeigte sich, dass der lineare Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Kraft und gemessenem Gewichtswert vom Durchmesser der kugelförmigen Probekörper abhing. Bei zunehmendem Durchmesser erhöhte sich der lineare Bereich.

Die Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen anderer Autoren, die auch einen linearen bzw. schwach sigmoidalen Zusammenhang fanden überein [80, 86]. FUKUDA und OTTL ET AL. beschrieben eine Kraft-Intensitätskurve, die im niedrigen Kraftbereich einen zunehmenden Anstieg zeigt. Dieser Anstieg blieb dann bis zum Abfallen bei hohen Kraftwerten linear. Sie werteten die von ihnen erhaltene Kurve als „nahezu linear“. OTTL ET AL. benutzten für ihre Eichmessungen ein hydraulisches System, deren Probekörper vermutlich eine plane Oberfläche hatte. Plane Prüfkörper können geometrisch als Kugelkörper mit unendlich großem Durchmesser angesehen werden. Ein solcher Probekörper hätte bei Beachtung der in dieser Arbeit ermittelten Kraft-Gewicht-Kurven (Abbildungen 30 und 31) einen gegen unendlich gehenden linearen Bereich und würde sich mit den Aussagen von OTTL ET AL. decken [86].

Aufgrund der konvexen Zahnoberflächen ähneln Okklusionskontakte im Schlussbiss eher den Kontakten der Kugeloberflächen die in dieser Arbeit untersucht wurden. Die Linearität ist also begrenzt. Wie aus Abbildungen 31 und 33 erkennbar ist, endet die Linearität, wenn der Quotient Gewicht/Fläche einen Wert von ca. $0,46 \text{ Pixel}^{-1}$ überschreitet. Für gefärbte Bereiche, die diesen Quotienten überschreiten, gilt die Berechnung mithilfe einer linearen Eichkurve nur noch bedingt. Die errechnete Kraft liegt dann unter der realen Kraft. Es zeigte sich aber, dass dieser Quotient bei allen Messungen (Artikulator und Probanden) nicht überschritten wurde.

Die Testreihen am Artikulator zeigten eine hohe Zuverlässigkeit der beschriebenen Messmethode. So betragen die Abweichungen zwischen errechneter Kraft und durch die Testmaschine applizierter Kraft maximal 12,8 %. Die mittlere Abweichung lag bei 3,6 %. Messungen von OTTL ET AL. zeigten je nach Folientyp (LW und LLW) Abweichungen von 7,1 % und 19,6 %. Dabei lagen die Messwerte immer unter den erwarteten. OTTL ET AL. begründeten dies damit, dass die zum Schutz aufgelegten

Gummiplatten nur eine senkrechte Kraftkomponente auf die Druckmessfolien weiterleiteten [86].

Untersuchungen von SUZUKI ET AL. zeigten beim Test der Druckmessfolien an Kiefermodellen im Bereich von 70 N bis 350 N eine Abweichung von $6,3 \pm 10,6$ N zwischen Soll- und Istwert. Das entsprach einer Abweichung von 1,8 % bis 9 % [111].

HIDAKA ET AL. bestätigten den linearen Zusammenhang zwischen applizierter Kraft und errechneter Kraft. Sie verwendeten Kiefermodelle aus Superhartgips und belasteten diese mit Kräften zwischen 63 N und 1465 N. Die ermittelten Werte lagen bei der Überprüfung mithilfe eines Pearson-Korrelationstests in 0,3 % bis 3,4 % der Fälle außerhalb der Signifikanzgrenze. Wie weit diese Werte um den Mittelwert streuten wurde nicht angegeben. Das in ihrer Veröffentlichung dargestellte Diagramm zeigt aber bei einfacher graphischer Auswertung Abweichungen der errechneten Kraftwerte von bis zu 10 % [39].

Wie aus den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen (Diagramme 15 und 16) ersichtlich wird, konnte der auftretende Fehler erheblich durch die Verwendung einer Referenzmessung minimiert werden. Nur in der Arbeit von OTTL ET AL. wurde ebenfalls eine Eichung der Folien vorgenommen. Diese Eichung ist nötig, da das Verhalten der Folie nicht nur zeitabhängig, sondern auch temperaturabhängig ist [26].

Vergleiche mit den bisher von anderen Autoren beschriebenen Messmethoden zeigen, dass insbesondere die Dehnungsmessstreifen geringere Streuungen als die untersuchten Druckmessfolien aufwiesen. LUNDGREN und LAURELL fanden bei ihren Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit einer DMS-Messdose Abweichungen von unter 1 % [63]. FERRARIO ET AL. sprachen von 2 % Ungenauigkeit [22]. Bei Versuchen an einer Bissgabel mit DMS ermittelte FONTIJN-TEKAMP einen Fehler von 4,7 % [25]. MORNEBURG ET AL. gaben den Fehler bei ihren Messungen mit 4 % an [77]. Nachteilig bei Messungen mit Dehnungsmessstreifen ist aber, wie in Abschnitt 2 dargelegt, dass eine erhebliche Bissperrung in Kauf genommen werden muss. Systeme auf DMS-Basis ohne Bissperrung, z.B. Messungen in Inlays oder Implantatabutments erwiesen sich als nicht praktikabel und kompliziert.

Wie aus den Ergebnissen der Versuche mit den Kiefermodellen ersichtlich ist, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der applizierten Kraft und der Größe der gemessenen Flächen. Diese Tatsache ist mit der kraftabhängigen Eindringtiefe der Probekörper (Zahnhöcker) in die Druckmessfolie erklärbar. Da die Geometrie der in die Folie eindringenden Körper nicht zylindrisch, sondern kugelförmig war, vergrößerte sich die Anzahl der durch die Kraftereinwirkung zerplatzten Mikrokapeln. Die für die Farbbildung wirksame Grundfläche der gedachten Kugelkappe vergrößert sich, während die Grundfläche eines Zylinders konstant bleibt.

Es bleibt also festzuhalten, dass die gemessene Fläche nicht mit der realen Kontaktfläche gleichgesetzt werden kann. Der Grund hierfür liegt in der eben beschriebenen Kraftabhängigkeit der gemessenen Flächen. Diese Kraftabhängigkeit tritt für die Okklusionskontaktflächen in Schlussbisslage ohne Folie nicht auf. Die Kontaktflächen haben eine konstante Größe.

Es bleibt zu konstatieren: Eine genaue Messung der in Schlussbiss aufeinander liegenden Flächen kann nicht vorgenommen werden.

Damit sind die Angaben zu den errechneten Drücken auch nur relativ, da sie sich aus den gemessenen Flächen errechnen.

Die Drücke stiegen zwar tendenziell mit der auf die Druckmessfolie einwirkenden Kraft. Ein linearer Zusammenhang konnte, wie schon beschrieben, nicht gefunden werden.

Bei der Projektion der gefärbten Flächen der Druckmessfolie auf ein Bild des entsprechenden Zahnbogens wurde ein hoher Grad an Übereinstimmung im posterioren Teil des Zahnbogens gefunden. Hier lagen die rot gefärbten Bereiche exakt über den durch herkömmliche Okklusionsfolie erzeugten schwarzen Punkten.

Im anterioren Zahnbogen, insbesondere im Bereich der Eck- und Schneidezähne projizierten sich die Kontaktpunkte der Druckmessfolie nach anterior bzw. lateral der eigentlichen Okklusionskontakte. Bei Beobachtung der Vorgänge am Artikulator fiel ein starkes Knicken der Folie bei Belastung auf. Offensichtlich kommt es zu einer Auffaltung der wenig dehnbaren Druckmessfolie im anterioren Bereich. Die Ausprägung des Auffaltens ist dabei von der Stärke vertikalen Überbisses abhängig. Bei Probanden mit Bissanomalien bezüglich des vertikalen Überbisses, z.B. tiefer

Biss und Deckbiss, kommt es dann zu einer größeren Diskrepanz zwischen den gefärbten Bereichen der Druckmessfolie und denen des Zahnbogens.

In diversen Arbeiten (MATSUI ET AL. [69, 70], SHINOGAYA ET AL. [108, 109], HIDAHA ET AL. [39]) wurden ebenfalls die aufgezeichneten Kontaktpunkte mit digitalen Bildern der Zahnbogenmodelle verglichen. Die o.g. Autoren beschrieben aber keine Probleme hinsichtlich einer Abweichung der roten Farbabdrücke im anterioren Bereich. Die Zuordnung zu den einzelnen Zähnen brachte sie zu Aussagen zum theoretischen Kraftmittelpunkt, der innerhalb des Zahnbogens lag. Je nach untersuchter Patientengruppe (z.B. Zustand nach Umstellungsosteotomien und anderen orthodontischer Behandlung) fanden sie, dass das Zentrum der Kaukraft zum Teil erheblich zu einer Seite des Kiefers abwich [70].

Der Test der beschichteten Druckmessfolien an den zwei Probanden (28 und 51 Jahre) sollte der Überprüfung der entwickelten Methode dienen. Die gemessenen Werte sollten dabei zeigen, ob die vorgestellte Methode, verglichen mit den in der einschlägigen Literatur angegebenen Daten, realistische Werte lieferte.

Die errechneten Kaukraftwerte lagen im Bereich von 559,7 N bis 1927,0 N. Dabei zeigten die Kraftwerte der drei Messungen des 28jährigen Probanden nur geringe Abweichungen untereinander (Standardabweichung 40,4 N bzw. 15,7 N). Die Werte des älteren Patienten streuten wesentlich stärker, was die Standardabweichungen von 157,2 N und 153,3 N dokumentieren.

MORITA ET AL. fanden bei der Untersuchung von 142 männlich und weiblichen Patienten im Alter von 20 bis über 70 Jahren eine mittlere Kaukraft von 1467,9 N mit einer Standardabweichung von 857,0 N [76].

MIYAURA ET AL. werteten die Ergebnisse von Messungen an 687 Probanden aus. Das Alter der Patienten (männlich und weiblich) lag zwischen 15 und 70 Jahren. Die aufgezeichneten Kräfte betragen (geschätzt aus dem vorliegenden Diagramm) 250 – 550 N bei einer Standardabweichung von maximal 100 N [74]. In einer weiteren Arbeit betragen die Kräfte $490,8 \pm 277,0$ N (vollbezahnt) bis $54,7 \pm 41,4$ N (Totalprothesenträger) [75].

SUZUKI ET AL. untersuchten 100 Patienten mit adjustierten und nicht-adjustierten Prothesen und gaben Kraftwerte von 147,2 N bzw. 276,6 N mit Standardabweichungen von 99,9 N und 143,0 N an [111].

Durchschnittliche Maximalwerte von gesunden Probanden von bis zu $1650,8 \pm 365,8$ N ermittelten SHINOGAYA ET AL. [108].

Weitere Werte von anderen Autoren sind Tabelle 1 in der Literaturübersicht zu entnehmen.

Der Vergleich mit diesen Werten zeigt, dass die in dieser Arbeit ermittelten Werte im Bereich der bisher durch andere Autoren bestimmten maximalen Kaukräfte liegen. Die Kaukräfte für den 28jährigen Probanden erreichen dabei aber die obere Grenze der bisher aufgezeichneten Kaukräfte.

Mit 443 kg, also 4245,8 N wurde die Kaukraft von GIBBS ET AL. an einem 37jährigen Patienten gemessen. Mithilfe eines Gnathodynamometers mit Dehnungsmesstreifen konnte die o.g. Kraftereinwirkung für zwei Sekunden durch den Patienten gehalten werden. Dies ist wohl die höchste je aufgezeichnete Kaukraft und war unter anderem auf die extrem hypertrophierte Kaumuskulatur des Probanden zurückzuführen. Diese Hypertrophie sowie die starke Abrasion der Zähne wurde mit einer extremen Form des Bruxismus erklärt [32].

Die Verteilung der ermittelten Kräfte auf die einzelnen Zähne und Zahnguppen ergab ein Bild, bei dem die höchste Kaukraft bei beiden Probanden im posterioren Bereich gefunden wurde. Hohe Kräfte zeigten insbesondere die zweiten Molaren, deren aufgenommenen Kräfte weit über denen der Frontzähne lagen.

Auswertungen der Kaukraft bezüglich des Ortes der Kraftereinwirkung von KARIBE ET AL. [45], KUMAGAI ET AL. [56] und FERRARIO ET AL. [22] bestätigen die gefundenen Ergebnisse. Sie fanden die größten Kaukräfte an den ersten und zweiten Molaren. HIDAHA ET AL. [39] zeigten, dass die Kaukraft an den zweiten Molaren wesentlich größer ist, als an den ersten Molaren, ähnlich wurde die Kraftverteilung auch von KARIBE ET AL. für das Milchgebiss beschrieben [45].

Grundsätzlich nimmt die Kaukraft von posterior nach anterior ab. Das Kaukraftzentrum liegt dabei zwischen zweiten und dritten Molaren [39, 110]. Als Ursache hierfür werden die Hebelverhältnisse des Unterkiefers gesehen. Je kürzer der Lastarm, also die Entfernung zum Drehpunkt (Kiefergelenk), desto größer die

wirkende Kraft. Da die Molaren am nächsten zum Drehpunkt liegen, muss ihre Kraft auch am höchsten sein.

Ein weiterer Grund könnte in der Dicke der Messfolien (110 µm) liegen. Durch die Rotation des Kiefers nahe der Schlussbisslage kommt es zu einem Erstkontakt zwischen den Molaren und der Druckmessfolie. Zu diesem Zeitpunkt haben die weiter anterior liegenden Zähne keinen Kontakt zum Film.

Bei Belastung kommt es dann zum einen zu einer Intrusion der Seitenzähne und zum anderen zu einer teilweise elastische und teilweise plastischen Deformation der Druckmessfolie, so dass die anterior befindlichen Zähne Kontakt zur Folie bekommen. Die maximale Intrusion beträgt dabei 25 µm, die Deformation der Folie ca. 60 µm.

Die ermittelten kraftaufnehmenden Zahnflächen lagen zwischen 9,6 mm² und 30,0 mm². Ähnlich wie bei den Kräften zeigte sich eine höhere Streuung beim älteren Probanden (2,4 - 2,5 mm² gegenüber 0,4 mm²). Die gemessene durchschnittliche Fläche der 28jährigen Versuchsperson (29,6/30,4 mm²) war mehr als doppelt so hoch wie die der 51jährigen Person (12,2/13,4 mm²).

Bisher durch andere Autoren mit den Druckmessfolien ermittelte Kontaktflächen für vollbezahnte gesunde Patienten lagen zwischen 16,3 mm² und 48,7 mm² mit Standardabweichungen von 5,7 mm² bis 32,4 mm² [39, 75, 76, 83, 108]. Somit scheinen die erhaltenen Messwerte für den 28jährigen Probanden im Mittelfeld zu liegen. Die Werte des 51jährigen Probanden liegen am unteren Rand des Messwertspektrums, was mit dem Vorhandensein von jeweils einer Brücke pro Quadrant zu erklären ist.

MIYAURA ET AL. ermittelten für eine Patientengruppe mit feststehendem Zahnersatz durchschnittliche Werte von $12,6 \pm 7,7$ mm² und bestätigen damit den vermuteten Zusammenhang [74].

Ebenso wie bei der Betrachtung der Kraftverteilung über den Zahnbogen entspricht die Verteilung der Kontaktflächen den Werten von HIDAOKA ET AL. [39]. Auch sie fanden die größten gemessenen Flächen an den zweiten Molaren. Die Beobachtung von nach anterior abnehmenden Flächen konnte auch bestätigt werden.

Zur Bestimmung der Kaulast wurde der Druck durch Division von Kraft und Fläche bestimmt. Dieser Druck konnte für jeden Zahn ermittelt werden und schwankte zwischen 44,8 MPa bis 68,2 MPa. Der Gesamtdruck schwankte zwischen 56,0 MPa und 63,6 MPa mit einer maximalen Standardabweichung von 1,2 MPa. Die höchsten Drücke wurden im posterioren Bereich des Zahnbogens ermittelt. Entgegen den Erwartungen lagen die gemessenen Gesamtdruckwerte des 28jährigen Probanden nur um maximal 10 % über denen des 51jährigen Probanden.

Eine Erklärung dafür ist, dass die Drücke an den einzelnen Zahnkontakten beim 51jährigen Probanden geringer von einander abweichen, also gleichmäßig verteilt sind. Der Druckbereich lag zwischen 47,0 MPa und 64,2 MPa während sich die gemessenen Drücke des 27jährigen Probanden zwischen 44,8 MPa und 68,2 MPa bewegen.

Die in der Literatur gefundenen Angaben zu den auftretenden Drücken sind sehr einheitlich. Die Werte überschreiten dabei selten einen Wert von 45 MPa.