

Aus dem Zentrum für Zahnmedizin  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Kaukraft- und Kaudruckmessung am Patienten**  
**Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit einer modifizierten Prescale® Folie**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von  
Marcus Gütte

aus Berlin

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. rer. nat. W.-D. Müller  
2. Prof. Dr. med. dent. K. Böning  
3. Prof. Dr. med. dent. R. Biffar

Datum der Promotion: 19.11.2010

Meinen Eltern und meiner Verlobten gewidmet.

Sofern in dieser Dissertation überwiegend die männliche Schreibweise verwendet wird, geschieht dies ausdrücklich aus Gründen der sprachlichen Vereinfachung und schließt weibliche Personen selbstverständlich mit ein.

## **Inhaltsverzeichnis**

Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	X
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Gegenstand der Arbeit</i> .....	1
1.2 <i>Ziel der Untersuchung</i> .....	2
<b>2 Ausgangssituation/ Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Begriffsdefinitionen</i> .....	4
2.2 <i>Physiologie des Kauens</i> .....	8
2.2.1 Ossäre Strukturen.....	9
2.2.2 Artikuläre Strukturen.....	11
2.2.3 Muskuläre Strukturen.....	13
2.2.4 Nervale Strukturen für die orofaziale Motorik und Sensomotorik.....	15
2.2.5 Neuromuskuläre Physiologie und wichtige Rezeptorsysteme des Kausystems.....	17
2.3 <i>Status quo (ante) der Kaukraftmessung via Prescale® Film (System)</i> .....	21
<b>3 Material und Methode .....</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Genereller Überblick</i> .....	23
3.1.1 Fuji™Prescale®Film.....	23
3.1.2 Folienherstellung .....	24
3.1.3 Referenzgerät.....	28
3.1.4 Farbwert-/ Bilderfassung der Prescale® Folie und deren Weiterverarbeitung.....	31
3.1.5 Zahni© Software.....	33
3.2 <i>Versuchsaufbau/ Versuchsdurchführung der in vitro Vorstudie(n)</i> .....	35
3.2.1 Versuche zum Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie .....	36
3.2.2 Versuche zum lagerungsspezifischen Druck- & Färbungsverhalten der Prescale® Folie	38
3.3 <i>Versuchsaufbau/ Versuchsdurchführung der in vivo Hauptstudie(n)</i> .....	40

4	Ergebnisse .....	42
4.1	<i>Ergebnisse der in vitro Vorstudie(n)</i> .....	42
4.1.1	Ergebnisse zum Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie .....	42
4.1.2	Ergebnisse zum lagerungsspez. Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie.....	45
4.2	<i>Ergebnisse der in vivo Hauptstudie</i> .....	54
5	Diskussion.....	71
6	Zusammenfassung.....	79
7	Literaturverzeichnis .....	81
8	Anhang.....	87
8.1	<i>Anhang I – Kaumuskulatur tabellarisch</i> .....	87
8.2	<i>Anhang II - Nervus trigeminus tabellarisch</i> .....	88
8.3	<i>Anhang III – Poster Publikation IADR 12/09/2009</i> .....	89
9	Danksagung.....	90
10	Lebenslauf .....	91
	Eidesstattliche Erklärung .....	XI

## **Abkürzungsverzeichnis**

bmp- Format	bitmap- Format
CAD	computer aided design
CAM	computer aided manufacturing
CCD	charge coupled device
dpi	dots per inch
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EO	Ethylenoxid
FEM	Finite Element Methode
FDI	Fédération Dentaire Internationale
FDP- System	flat detector panel- System
FF- Muskulatur	fast (twitch) fatiguable- Muskulatur
FR- Muskulatur	fast (twitch fatiguable) resistant- Muskulatur
jpeg- Format	joint photographic expert group-Format
lat.	lateral(is)
Lig.	Ligamentum
M.	Musculus
med.	medial(is)
Mm.	Musculi
[MPa]	Megapascal
MTL	Medizinisch Technische Labore
[N]	Newton
N.	Nervus
Nc.	Nucleus
Nn.	Nervi
png- Format	portable network graphics- Format
PVAC	Polyvinylacetat
PVC	Polyvinylchlorid
SA- Rezeptor	slow(ly) adapting- Rezeptor
SE	standard error
SD	standard deviation
RA- Rezeptor	rapid(ly) adapting- Rezeptor

## **Abbildungsverzeichnis**

<i>Abb. 1 Bezeichnung der Zahnflächen Oberkiefer .....</i>	<i>6</i>
<i>Abb. 2 Internationales Zahnschema (FDI System) .....</i>	<i>6</i>
<i>Abb. 3 Rücklaufbahnen und zentrische Stopps der Zähne.....</i>	<i>7</i>
<i>Abb. 4 Höcker-Fossa-Kontakte bei max. Interkuspidation .....</i>	<i>7</i>
<i>Abb. 5 Anatomischer Schädelaufbau .....</i>	<i>9</i>
<i>Abb. 6 Verstärkungspfeiler mit Kaudruckableitungsrichtungen des Schädels .....</i>	<i>10</i>
<i>Abb. 7 Grenzbewegungsbahnen des Unterkiefers .....</i>	<i>11</i>
<i>Abb. 8 Ansicht des Kiefergelenksaufbaus .....</i>	<i>12</i>
<i>Abb. 9 Wirkungsrichtungen der Kaumuskulatur.....</i>	<i>14</i>
<i>Abb. 10 Teildarstellung zum Verlauf des Nervus trigeminus (N. V).....</i>	<i>15</i>
<i>Abb. 11 Überblick neuronale Verschaltungen der Muskelspindel mit Reflexbogen..</i>	<i>18</i>
<i>Abb. 12 Input-/ Output- Beziehung des sensomotorischen orofazialen Systems ....</i>	<i>20</i>
<i>Abb. 13 Aufbau des Prescale® Film (Mono-sheet type) schematisch.....</i>	<i>23</i>
<i>Abb. 14 Vergleich Prescale® Testfolie Typ MS und Prescale®50H Film Typ R.....</i>	<i>25</i>
<i>Abb. 15 Aufsicht auf die Druckmessfolie zu Beginn des Beschichtungsvorganges..</i>	<i>25</i>
<i>Abb. 16 Aufsicht auf die Druckmessfolie zum Ende des Beschichtungsvorganges..</i>	<i>26</i>
<i>Abb. 17 Darstellung der Übertragung der Matrizenkontur auf die Prescale® Folie ..</i>	<i>27</i>
<i>Abb. 18 Darstellung der unterschiedlichen Prescale® Testfoliengrößen.....</i>	<i>27</i>
<i>Abb. 19 Darstellung der Druck-/ Zugmaschine Zwick Instron Z010.....</i>	<i>29</i>
<i>Abb. 20 Referenzgerätaufbau mit Darstellung wichtiger Elemente.....</i>	<i>30</i>
<i>Abb. 21 Ausschnittvergrößerung des Referenzgerätaufbaus .....</i>	<i>31</i>
<i>Abb. 22 Referenzpunktdarstellung und Vergleich nach der Formatkonvertierung....</i>	<i>32</i>
<i>Abb. 23 Darstellung der Softwareoberfläche im Modus: Patientendaten.....</i>	<i>33</i>
<i>Abb. 24 Darstellung der Softwareoberfläche im Modus: Datenexport .....</i>	<i>34</i>
<i>Abb. 25 Schematische Versuchsanordnung Instron Z010 mit Eichpunkterstellung..</i>	<i>36</i>
<i>Abb. 26 Teildarstellung der Eichwertdatenbank im Modus: Kalibrierungsdaten .....</i>	<i>37</i>
<i>Abb. 27 Erstellung der Kalibrierungsdatenbank auf der Prescale® Folie .....</i>	<i>37</i>
<i>Abb. 28 Darstellung der Prescale® Testfolien I, II, III und IV am ersten Tag.....</i>	<i>38</i>
<i>Abb. 29 Darstellung der Prescale® Testfolien I, II, III und IV am zehnten Tag.....</i>	<i>39</i>
<i>Abb. 30 schematische Darstellung der Auswerteroutine der Farbgewichte.....</i>	<i>39</i>
<i>Abb. 31 Schematische Darstellung des Versuchsablaufs am Probanden .....</i>	<i>40</i>

<i>Abb. 32 Herstellerangabe zum Performance Bereich der Fuji™ Prescale® Folie ....</i>	<i>43</i>
<i>Abb. 33 Darstellung der 4mm Eichwertkurve nach der Extrapolation.....</i>	<i>44</i>
<i>Abb. 34 Darstellung der 5mm Eichwertkurve nach der Extrapolation.....</i>	<i>44</i>
<i>Abb. 35 Temperatur-/ Zeitverlaufsdarstellung der Referenzfarbgewichte.....</i>	<i>45</i>
<i>Abb. 36 Temperatur-/ Zeitverlaufsdarstellung der Referenzkräfte .....</i>	<i>47</i>
<i>Abb. 37 Boxplots zu den berechneten Einzelreferenzkräften .....</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 38 Boxplots zu den berechneten Einzelreferenzkräften (mit Fehlerbereich) ....</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 39 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzkräften .....</i>	<i>51</i>
<i>Abb. 40 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzflächen.....</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 41 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzdrücken .....</i>	<i>53</i>
<i>Abb. 42 Grafische Ergebnisdarstellung der weiblichen Probanden .....</i>	<i>56</i>
<i>Abb. 43 Grafische Ergebnisdarstellung der männlichen Probanden .....</i>	<i>57</i>
<i>Abb. 44 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden .....</i>	<i>59</i>
<i>Abb. 45 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 03-08 Jahren</i>	<i>60</i>
<i>Abb. 46 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 09-12 Jahren</i>	<i>61</i>
<i>Abb. 47 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 13-19 Jahren</i>	<i>62</i>
<i>Abb. 48 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 20-29 Jahren</i>	<i>63</i>
<i>Abb. 49 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 30-39 Jahren</i>	<i>64</i>
<i>Abb. 50 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 40-59 Jahren</i>	<i>65</i>
<i>Abb. 51 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 60-94 Jahren</i>	<i>66</i>
<i>Abb. 52 Grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 03-94 Jahren</i>	<i>67</i>
<i>Abb. 53 Statistikdarstellung aller Probanden im Alter von 03-94 Jahren.....</i>	<i>68</i>
<i>Abb. 54 Grafische Ergebnisdarstellung in Abhängigkeit vom Körpergewicht .....</i>	<i>69</i>
<i>Abb. 55 Boxplotdarstellung der Gesamtergebnisse der Einzelgruppen (A-G).....</i>	<i>70</i>
<i>Abb. 56 Statistikdarstellung der Einzelgruppen (A-G) und der Gesamtgruppe (H)...</i>	<i>70</i>
<i>Abb. 57 Gesamtübersicht der statistischen Versuchsergebnisse aller Probanden...</i>	<i>78</i>
<i>Abb. 58 Poster- Publikation 12.09.2009 in München IADR .....</i>	<i>89</i>

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tab. 1 Autorenübersicht &amp; ermittelte Kaukräfte via Prescale®Folie von 2000-09 ....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2 Übersicht der aktuellen Prescale® Film-Produktpalette Stand: Jan. 2010 ....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3 Statistikprotokoll der berechneten Farbgewichte bei - 18°C (Folie I).....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 4 Statistikprotokoll der berechneten Farbgewichte bei + 8°C (Folie II).....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5 Statistikprotokoll der berechneten Farbgewichte bei +20°C (Folie III).....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6 Statistikprotokoll der berechneten Farbgewichte bei +37°C (Folie IV).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7 Statistikprotokoll der berechneten Kräfte bei - 18°C (Folie I).....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8 Statistikprotokoll der berechneten Kräfte bei + 8°C (Folie II).....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9 Statistikprotokoll der berechneten Kräfte bei +20°C (Folie III).....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 10 Statistikprotokoll der berechneten Kräfte bei +37°C (Folie IV).....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 11 Statistisch berechnete Einzel- bzw. Gesamtreferenzkräfte .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 12 Statistisch berechnete Einzel- bzw. Gesamtreferenzfläche.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 13 Statistisch berechnete Einzel- bzw. Gesamtreferenzdrücke.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 14 Probandenzusammensetzung und maximal ermittelter Gesamtkaukraft....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 15 Statistische Ergebnisdarstellung der weiblichen Probanden .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 16 Statistische Ergebnisdarstellung der männlichen Probanden.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 17 Statistische Ergebnisdarstellung aller Probanden .....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 18,19 Anhang I: Kaumuskeln und akzessorische Kaumuskeln .....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 20 Anhang II: Nervus trigeminus (N. V).....</i>	<i>88</i>

# 1 Einleitung

## 1.1 Gegenstand der Arbeit

Immer wieder führt die Einführung und Verbreitung von neuen dentalen Werkstoffen, wie beispielsweise Kompositen, Keramiken oder Legierungen gleichzeitig zu dem Problem der individuellen, patientenfall-orientierten Anwendung dieser Materialien. In vielen wissenschaftlichen Arbeiten wurden zwar spezifische Eigenschaften, wie Druck-, Zug- und Biegefestigkeit sowie Duktilität oder Härte von Materialien untersucht, jedoch ist und bleibt eine konsequente Übertragbarkeit der Ergebnisse und somit der Indikationsbereich dieser Stoffe bei der Planung und Herstellung von zahn-technischen Konstruktionen durch den Zahnarzt bzw. den Zahntechniker häufig fraglich. Nur allzu oft kommt es nach erfolgter Eingliederung beispielsweise doch zu Rissbildungen, Abplatzungen und Frakturen im Bereich von prothetischen Arbeiten oder der Zähne selbst. Gegebenenfalls treten sogar Folgeschäden im stomatognathen System auf, welche unter Umständen nicht nur auf diesen Bereich begrenzt bleiben. Maßgeblich entscheidend für einen dauerhaften Behandlungserfolg am Patienten ist also somit die Ausschaltung möglicher Ursachen oder besser gesagt eine Reduzierung möglicher Fehlerquellen, da es unmöglich erscheint, alle auslösenden Faktoren, die zu einem Defekt bis hin zu einem totalen Versagen einer Konstruktion führen können, zu analysieren. Dementsprechend ist es ratsam, eine Therapie immer mit einem Arzt-Patientengespräch und somit einer eingehenden Anamnese zu beginnen. Erst danach sollte die eigentliche Untersuchung erfolgen, denn nur so lässt sich eine vernünftige Diagnose stellen und ein für beide Seiten befriedigendes Behandlungskonzept erarbeiten, welches aber immer von der persönlichen Einschätzung und subjektiven Bewertung der Situation durch den Zahnarzt abhängt. Genau dieser Ermessensspielraum und die individuellen Erfahrungen sind es jedoch, die den Zahnarzt oder Zahntechniker immer wieder mit der Herausforderung konfrontieren, ob genau jenes Therapiekonzept sinnvoll ist und die eingesetzten Werkstoffe bzw. Konstruktionen den Belastungsverhältnissen im jeweiligen Patientenmund auf Dauer gerecht werden. Die Möglichkeit, die Kraft an beliebigen Stellen des Mundes messen zu können sowie den vom Patienten maximal entwickelten Kaudruck bestimmen zu können, würde eine Erleichterung und einen entscheidenden Beitrag bei der Auswahl der Werkstoffe, Materialdicken und- formen leisten.

Auch wäre eine substanzschonendere Präparation der Zähne möglich, da somit die geforderte Mindeststärke einer Konstruktion für den Patienten individuell bestimmt werden könnte. Die Bestimmung von patientenbezogenen Kaukräften ist aber nicht nur bei der Versorgung mit Zahnersatz sinnvoll, sondern liefert auch eine entscheidende Hilfestellung bei der Beurteilung von Lastverteilungen nach der Eingliederung des Zahnersatzes (beispielsweise bei implantatgetragenen Konstruktionen), denn eine Überprüfung und zukünftige Nachsorge sind ebenfalls wichtige Aspekte, die für die Langlebigkeit eines Zahnersatzes maßgebend sind. Ferner sind eine Überprüfung anderer therapeutischer Fragestellungen möglich, wenn es zum Beispiel um die Ausschaltung von Stör- bzw. Fehlkontakten zwischen einzelnen Zähnen auch im restaurationsfreien Gebiss geht. Gegenstand dieser Dissertation soll dementsprechend die Messung und Auswertung von individuell erzeugten, absoluten Kaukräften bzw. Kaudrücken an verschiedenen Probanden für etwaige weiterführende Untersuchungen sein. [9]

### **1.2 Ziel der Untersuchung**

Aufbauend auf den Forschungsarbeiten von FINK [9] und MÜLLER et al. [53] soll in dieser vorliegenden experimentellen- und klinischen Arbeit untersucht werden, inwieweit es auf der Basis des im Jahr 2004 von FINK und MÜLLER weiterentwickelten, patentierten Verfahrens zur Kaukraftmessung möglich ist, die Beißkraft- und Beißdruckmessungen am Patienten praktisch durchzuführen. Die Frage dieser Studie, die insbesondere geklärt werden soll, lautet, welche maximalen Gesamtkaukräfte bzw. -drücke in der habituellen Okklusion (Schlussbisslage) durch die zufällig ausgewählten Probanden auf dem gesamten Zahnbogen entwickelt werden können. Außerdem soll dabei überprüft werden, welche Unterschiede sich in Abhängigkeit von dem Alter, dem Geschlecht und dem Körpergewicht unabhängig vom Zahnstatus der Testpersonen ergeben. Es soll diesbezüglich außerdem geklärt werden, ob eine Ermittlung von patientenbezogenen Kaukräften überhaupt notwendig ist, um so die Möglichkeit der anschließenden Weiterverwendung der gewonnenen Datensätze für die Berechnung, Herstellung und Kontrolle von individuell gefertigten prothetischen Konstruktionen zu rechtfertigen. In Anlehnung an die Empfehlungen von FINK [9] wird diesbezüglich der Prototyp eines gänzlich neuen Referenzgerätes konstruiert

und getestet werden. Für die Auswertung der anfallenden Daten wird in Kooperation mit KLEIBER [34] ein komplett überarbeitetes Computerprogramm Zahni© zum Einsatz kommen. Die Software wird hierbei zusätzlich auf mögliche Schwachstellen hin getestet und deren Gebrauchsfähigkeit nach PRÜMPER [60] in Hinblick auf eine möglichst selbsterklärende Softwareoberfläche, gute Benutzerfreundlichkeit sowie die schlichte Funktionalität weiter optimiert. Als zusätzliches Hilfsmittel soll dieses Programm bzw. das Verfahren insgesamt eine neue Alternative bei der Bestimmung von individuell erzeugten Kaulasten/ Kaulastverteilungen liefern, um zukünftig möglicherweise als zusätzliche Schnittstelle für FEM Analysen und CAD/ CAM Fertigungsverfahren zu fungieren, wenn es zum Beispiel darum geht, individuelle Konstruktionen zu planen, zu konstruieren und deren physiologische Integration in das Kausystem unter Beachtung der Anatomie der Okklusion zu garantieren, d.h. in Anlehnung an die von MOTSCH [52] beschriebenen Grundregeln einer idealen-/ harmonischen Okklusion.

## 2 Ausgangssituation/ Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die notwendigen Grundlagen dargestellt werden. Diese Grundkenntnisse sind sowohl für die Zahnmedizin wie auch für andere Disziplinen gleichermaßen wichtig und zum besseren Verständnis unerlässlich. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sie nur grob abgehandelt werden und für die weitere Klärung detaillierterer Fragestellungen an die jeweilige Fachliteratur bzw. Fachbereiche verwiesen wird. Zusätzliche Abbildungen, Tabellen und Grafiken sollen dabei helfen, die theoretischen Inhalte dieses und der folgenden Kapitel zu veranschaulichen und verständlicher zu machen.

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Häufig wird vorausgesetzt, dass sämtliche Fachausdrücke richtig interpretiert und angewendet werden, doch schon bei der Verwendung von Stichwörtern wie beispielsweise der Kraft oder der Okklusion kommt es häufig zu recht unterschiedlichen Auslegungen und dementsprechend zu Missverständnissen. Deshalb sollen auch in diesem Abschnitt weitere, von mir als wichtig erachtete Fachtermini genannt, definiert und/ oder in Form von Formeln sowie zusätzlichen Abbildungen veranschaulicht werden, welche aber zum Teil aus Gründen der Übersichtlichkeit erst an das Kapitelende gesetzt wurden. So beginnend leitet sich unter anderem „ der Begriff der Kraft (...) von der Spannung in unseren Muskeln ab, die wir beim Ziehen oder Heben einer Last empfinden“ [19], aber „Kräfte treten „(auch)“ als Ursachen von Beschleunigungen und Verformungen in Erscheinung und sind für den inneren Zusammenhalt der Materie verantwortlich. Der Begriff Kraft gehört „(deshalb)“ wie der Begriff Energie zu den zentralen Begriffen der Physik, „(denn)“ alle physikalischen Vorgänge sind mit dem Wirken von Kräften verbunden“ [23]. Diesbezüglich ist auch die Kaukraft, die gewissermaßen der Gewichtskraft ( $\vec{F}$ ) entspricht, ein Resultat von physikalischen und chemischen Prozessen in den Kaumuskeln. Durch dabei unter anderem ausgelöste Kontraktionen verrichtet die Muskulatur eine Arbeit ( $W$ ) und in einer bestimmten Zeit ( $dt$ ) entspricht das der Leistung ( $P$ ). Dies führt „ zu a) einer Bewegungsänderung

des Unterkiefers relativ zum Oberkiefer, b) zu einer (meist elastischen) Deformation der orofazialen Gewebe oder c) zur elastischen/ plastischen Deformation bzw. zum Bruch von Gegenständen, z. B. „(der)“ Nahrung“. (...) „Da die verschiedenen Muskeln nicht an ein und demselben Punkt angreifen und auch unterschiedliche Beträge und Richtungen haben „(welches man auch einem Drehmoment ( $\vec{M}$ ) gleichsetzen könnte“, gilt: die resultierende Kraft für einen beliebigen Punkt eines starren Körpers berechnet sich aus der Summe der einzelnen Kraftvektoren ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots \vec{F}_n$ )“ [19]. Die dabei resultierende Gesamt(kau)kraft ( $\vec{F}_G$ ) und die so erzielte Kraftübertragung über die Kiefer auf die Zahnbögen und die darin befindlichen Zähne führt zur Entwicklung des (Kau)drucks ( $p$ ) und „(...) wird in der Zahnmedizin fast ausschließlich in [MPa] angegeben. Dabei entspricht 1 MPa der Wirkung von 1 N auf eine Fläche von 1 mm<sup>2</sup>“ [19]. Hierbei wird als Fläche ( $A$ ) die physiologische Kaufläche zwischen den okkludierenden Zähnen angesehen und die Gesamt(kau)fläche ( $A_G$ ) entspricht somit der Summe aller an der Okklusion beteiligten einzelnen Kauflächen, denn als Okklusion wird „(...) jeder Berührungskontakt der Zahnreihe des Oberkiefers mit denjenigen des Unterkiefers (...) bezeichnet“ [39]. Analog verhält es sich bei der Berechnung bzw. Bestimmung des Kaudrucks. Hierbei ist mit der Angabe des Gesamt(kau)drucks ( $p_G$ ) die Summe aller erzeugten Teildrücke zwischen den Okklusionsflächen gemeint und der Maximal(kau)druck entspricht dem durch den jeweiligen Probanden generierten größten Verhältnisbetrag von (Kau)kraft und (Kau)fläche. Die unbezahnten Kiefer(abschnitte) haben sicherlich auch eine bestimmte Fläche und können somit einen (Kau)druck entwickeln, da es sich aber per Definitionen um keine Okklusionskontakte handelt, werden sie in dieser Abhandlung nicht berücksichtigt. Eine weitere Darstellung dieser physikalischen Sachverhalte und Erläuterung zu den funktionellen Zahnstrukturen mit den dazugehörigen Okklusionskontakten sowie die allgemeinen-/ speziellen Richtungsbezeichnungen im Gebiss mit den entsprechenden Kennzeichnungen der Zähne erfolgt, wie bereits erwähnt, im Anschluss. Mit Hilfe von sowohl geeigneten mathematischen Ausdrücken als auch in Form von (schematischen) Abbildungen und Stichpunkten soll dies teilweise selbsterklärend, kurz und prägnant erfolgen.

$$\vec{F}(\text{Gewichtskraft})[N] = m(\text{Masse})[kg] \times \vec{a}(\text{Beschleunigung})[ms^{-2}]$$

$$\vec{M}(\text{Drehmoment})[Nm] = \vec{F}(\text{Kraft})[N] \times \vec{r}(\text{Radius})[m]$$

$$W(\text{Arbeit})[J] = \vec{F}(\text{Kraft})[N] \times \vec{s}(\text{Weg})[m]$$

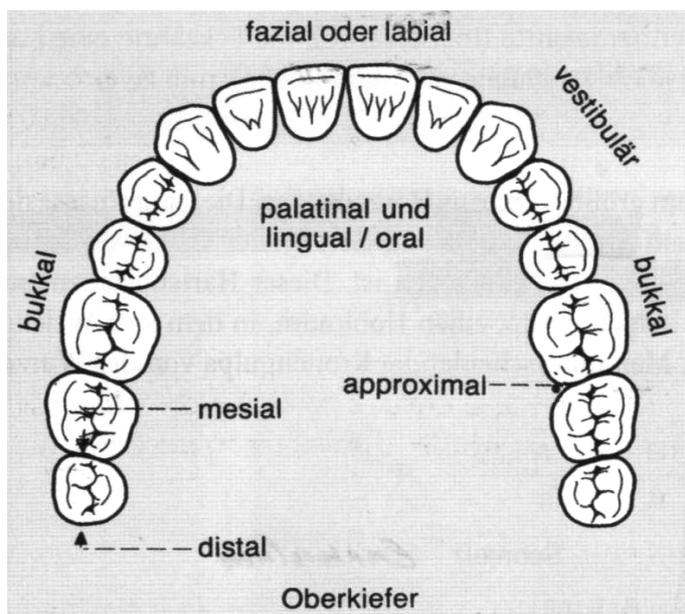
$$\vec{F}_G(\text{Gesamt(kau)kraft})[N] = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$p_G(\text{Gesamt(kau)druck})[MPa] = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$A_G(\text{Gesamt(kau)fläche})[mm^2] = \sum_{i=1}^n A_i$$

$$P(\text{Leistung})[W] = \frac{dW(\text{Arbeit})[J]}{dt(\text{Zeit}) [s]}$$

$$p(\text{Druck})[MPa] = \frac{\vec{F}(\text{Kraft}) [N]}{A(\text{Fläche})[mm^2]}$$



- vestibulär - vorhofwärts
- lingual - zungenwärts
- labial - lippenwärts
- bukkal - wangenwärts
- palatinal - gaumenwärts
- oral - mundhöhlenwärts
- mesial - nach vorne gelegen
- distal - nach hinten gelegen
- approximal - dazwischen gelegen
- okklusal - kauflächenwärts
- koronal - (zahn)kronenwärts
- inzisal - schneidekantenwärts
- zervikal - (zahn)halswärts
- apikal - (wurzel)spitzenwärts

Abb. 1 Bezeichnung der Zahnflächen Oberkiefer (verändert) aus [3]

Permanente Zähne																	
oben rechts								oben links									
18	17	16	15	14	13	12	11	21	22	23	24	25	26	27	28		
48	47	46	45	44	43	42	41	31	32	33	34	35	36	37	38		
unten rechts								unten links									
Milchzähne																	
				55	54	53	52	51	61	62	63	64	65				
				85	84	83	82	81	71	72	73	74	75				

Abb. 2 aus [69] Internationales Zahnschema Nummerierung (FDI System) oben: bleibende Zähne unten: Milchzähne

- Laterotrusion – Seitenbewegung des Unterkiefers von der Median-Sagittal-Ebene weg
- Mediotrusion – Seitenbewegung des Unterkiefers zur Median-Sagittal-Ebene hin
- Protrusion – Vorziehen des Unterkiefers
- Retrusion – Zurückziehen des Unterkiefers

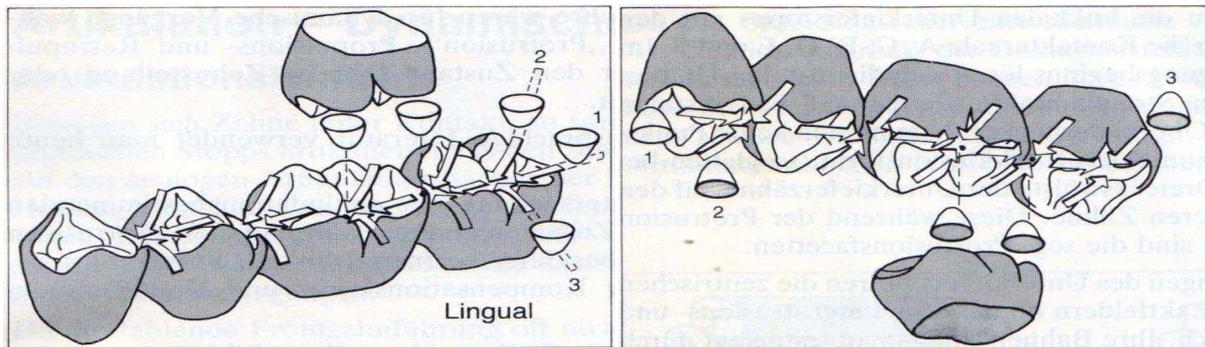


Abb. 3 aus [35] Rücklaufbahnen (links) palatinale- & (rechts) linguale zentrische Stopps 1 Pro- 2 Medio- 3- Laterotrusion

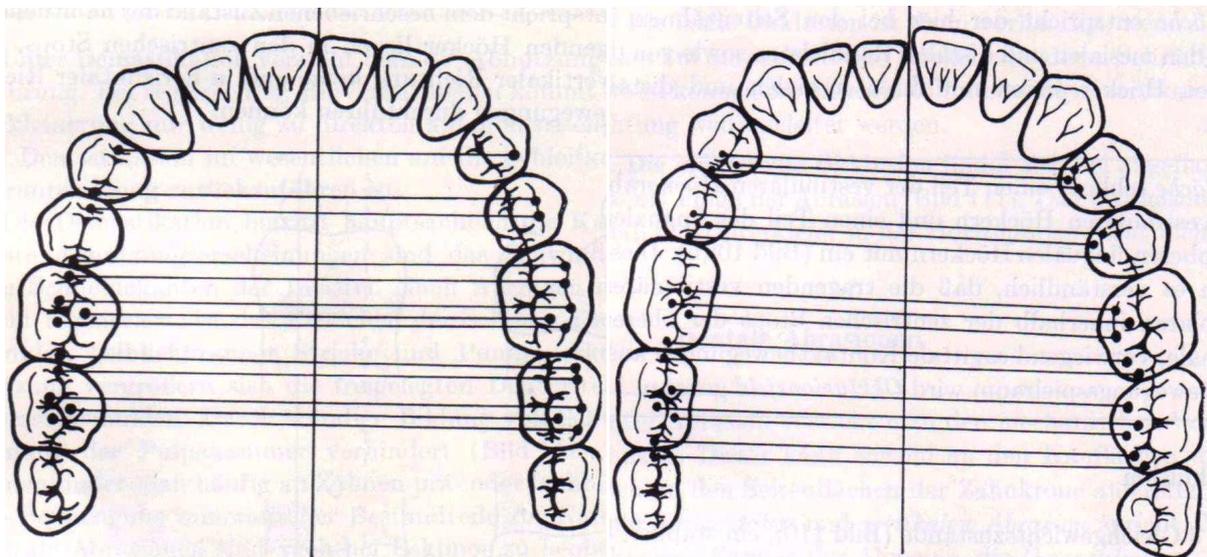


Abb. 4 aus [69] Höcker-Fossa-Kontakte bei maximaler Interkuspitation (n. E. V. Payne 1961)

## 2.2 Physiologie des Kauens

Alle lebenden Organismen brauchen für die Aufrechterhaltung von physiologischen Vorgängen (Homöostase) neue Substrate, meist in Form von energiereichen Phosphatverbindungen, welche im Metabolismus durch komplizierte biochemische Vorgänge bereitgestellt werden. Vereinfacht gesehen, stellen sie ein physikalisch-offenes System dar, welches mit einem ständigen Verlust von Energie behaftet ist. Die Nahrungszufuhr ist deshalb ein wesentlicher Bestandteil des Lebens, um diesem Prozess entgegenzuwirken. Die Nahrung selbst liefert die lebensnotwendigen Nährstoffe und sorgt so postprandial (unter normalen Bedingungen) für eine Energieumsetzungszunahme. Bei vielen Lebewesen entwickelten sich deshalb im Rahmen der Evolution, für die Nahrungsaufnahme und -vorbehandlung geeignete Kauwerkzeuge bzw. Kauapparate. Bei den meisten Vertebraten und so auch beim Homo sapiens sapiens, spricht man vom sogenannten Gebiss. In diesem Zusammenhang werden die Nutzung des Kausystems insgesamt und der gesteuerte Ablauf der Tätigkeit zusammenfassend als Kaufunktion bezeichnet. Der primär willkürliche Kauvorgang, der als solcher für eine erleichterte Digestion wichtig ist, bereitet die Nahrung für den Schluckakt vor. Dabei wird der Bissen mit Hilfe der normalerweise im Ober- und Unterkiefer befindlichen Zähne zerkleinert. Die Frontzähne zerschneiden bzw. zerreißen dabei die Nahrung. Durch ein kompliziertes, zumeist unwillkürliches Zusammenspiel von nervalen, skelettalen, ligamentären und muskulären Strukturen, auf welche im Folgenden noch genauer eingegangen wird, erfolgt nun die Weiterbeförderung der Kost zu den Seitenzähnen, wo sie durch die Prämolaren und Molaren auf nur wenige Quadratmillimeter zermahlen wird. Unter kontinuierlicher Einspeichelung durch die großen und kleinen Speicheldrüsen entsteht ein Speisebrei, welcher gleichzeitig mit Enzymen versetzt ist. Hierbei erfährt die Nahrung schon in der Mundhöhle eine gewisse fermentative Aufspaltung. Ab einer bestimmten Konsistenz erfolgen nun, unter Mithilfe der Zunge und durch Mechanotransduktion [42], d.h. beispielsweise am Gaumen ausgelöste Berührungsreize, der eigentliche Schluckakt des Bolus und der weitere aborale Transport [64].

## 2.2.1 Ossäre Strukturen

Der skelettale Anteil des craniomandibulären Systems setzt sich aus dem Oberkiefer (Maxilla), dem Unterkiefer (Mandibula) und dem Schädel (Cranium) zusammen. Der Schädel selbst besteht aus 18 Schädelknochen (Ossa cranii) und gliedert sich in den Hirnschädel (Neurocranium) und den Gesichtsschädel (Viscerocranium). Das Neurocranium lässt sich hierbei weiterhin, gemäß der Abbildung 5, in das Os frontale (Stirnbein), das Os sphenoidale (Keilbein), das Os temporale (Schläfenbein), Os parietale (Scheitelbein), Os occipitale (Hinterhauptbein) sowie das Os ethmoidale (Siebbein) unterteilen. Eine weitere Aufschlüsselung des Viscerocraniums ist ebenfalls möglich. In Anbetracht der ausufernden Komplexität wird jedoch weitestgehend darauf verzichtet und es werden lediglich, die für den Kauvorgang wichtigsten ossären Strukturen des Gesichtsschädels, wie das Os maxillare (Oberkiefer), das Os mandibulare (Unterkiefer), das Os hyoideum (Zungenbein), das Os zygomaticum (Jochbein) sowie das Os palatinum (Gaumenbein) genannt und genauer dargestellt.

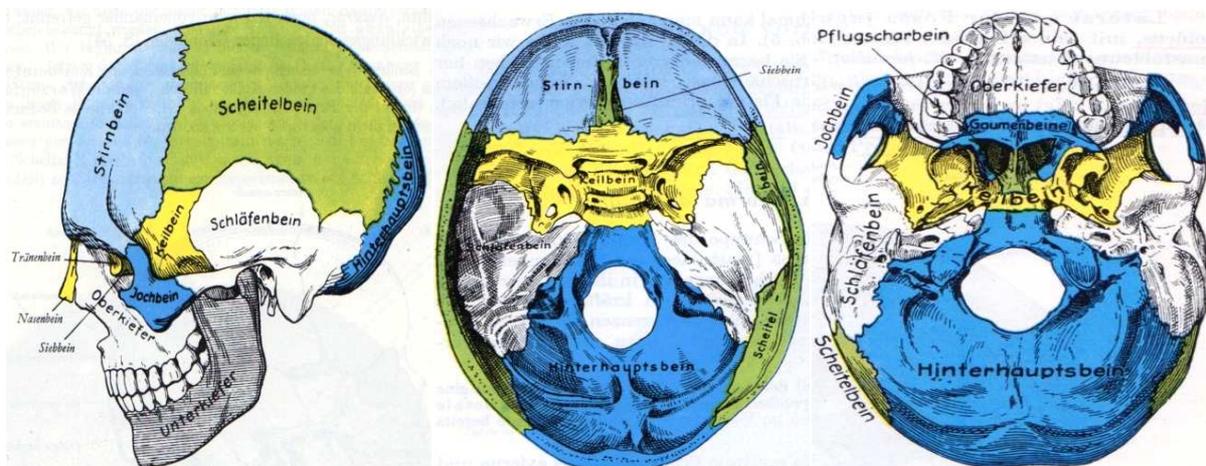
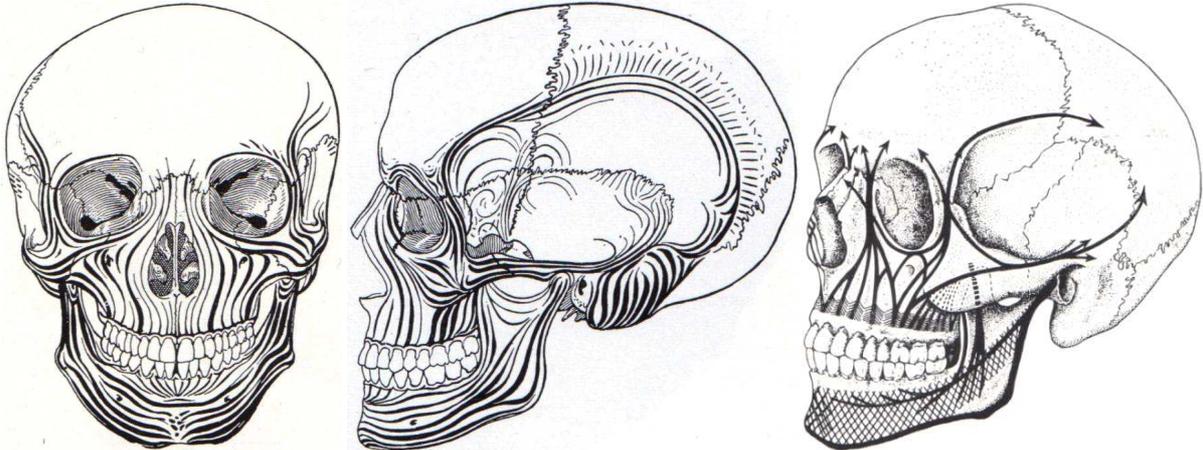


Abb. 5 aus [86] Schädelaufbau (verschiedene Farben) Seitenansicht sowie Aufsicht auf die innere-/ äußere Schädelbasis

Der Oberkiefer und auch der Unterkiefer sind Träger des Zahnsystems, bestehend aus den Zähnen und dem Parodontium, mit deren Hilfe eine Verbindung zum Skelettsystem hergestellt wird. Durch kollagene Fasern (Desmodontalfasern siehe Kap. 2.1.2) erfolgt eine bewegliche Aufhängung der Zähne in den Alveolen. Die Maxilla als Träger der Oberkieferzahnreihe ist fest mit dem Hirnschädel verbunden und mit einer nur dünnen Kompakta ausgestattet. Durch trajektorielle Bauweise, d. h. den Hauptbelastungslinien entsprechender Anordnung der Spongiosa und Verstreungen im

Bereich des Gesichtsschädels, durch den Stirnnasenpfeiler, senkrechte- und horizontale Jochpfeiler sowie die Flügelfortsatzpfeiler erfolgt jedoch, entsprechend der Abbildung 6, eine effektive Ableitung des Kaudrucks entlang der Kaudruckableitungsrichtungen.

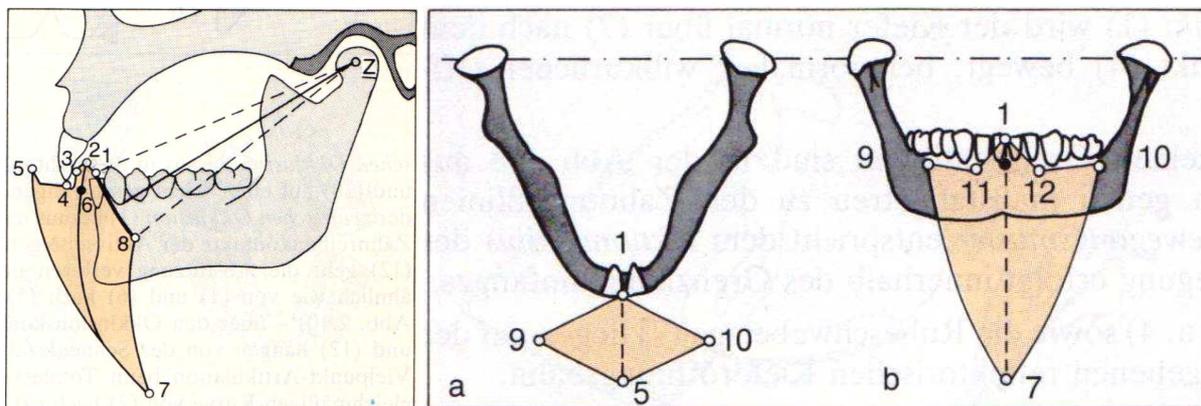


**Abb. 6 aus [86] Verstärkungspfeiler des Schädels (frontale-/ seitliche Ansicht) mit Kaudruckableitungsrichtungen (Pfeile)**

Durch zusätzliche Längs- und Querverspannungen im Bereich der Schädelbasis erfolgt eine Zentrierung der einwirkenden Kräfte und trotz des unelastischen Verhaltens des Os maxillare ist seine Druckfestigkeit relativ hoch [65]. Die Mandibula dient analog zum Oberkiefer als Trägerlager der Unterkieferzahnreihe. „Das Kiefergelenk stellt bei fehlendem Zahnkontakt bzw. geöffneten Mund „(eine jedoch)“ (...) bewegliche Verbindung des Unterkiefers zum Schädel her und dient somit auch der Kraftübertragung. Die einwirkenden Kräfte werden zum Mandibularrand divergierend und nicht wie im Oberkiefer zur Schädelbasis hin zentriert“ [10]. Die artikuläre Verbindung des Caput mandibulae mit dem Os temporale wird hierbei durch entsprechende Bänder und Muskeln gesichert, worauf aber erst detaillierter im Kapitel 2.1.2 eingegangen wird. Obwohl die Maxilla im Gegensatz zum Os mandibulare mit einer sehr kräftigen Kompakta versehen ist, weist sie trotz alledem eine äußerst hohe Flexibilität auf. Eine gewisse Sonderrolle nimmt aber das Zungenbein aufgrund seiner anatomischen Lage ein, denn durch seine kaudale Position in Bezug auf den Unterkiefer und mit Hilfe der infrahyalen Muskulatur ist es von entscheidender Bedeutung bei der Unterkieferabduktion. Das letztlich unpaare Os hyoideum dient wie das Jochbein, das Gaumenbein wie alle anderen Knochen des Skeletts auch als Ansatz (Insertio) oder als Ursprung (Origo) für eine Vielzahl von Muskeln und Bändern.

## 2.2.2 Artikuläre Strukturen

Vernachlässigt man jegliche Synarthrosen am Schädel, d.h. zum Beispiel die bandhafte Befestigung der Zähne in den Alveolen, den knorpelhaften Zusammenschluss der Mandibularsymphyse und sämtliche knochenhaften Verbindungen, die in der allgemeinen Gelenklehre auch als Gomphose (Sonderform der Syndesmose), Synchronrose bzw. als Synostose bezeichnet werden, lässt sich bei genauerer Betrachtung feststellen, dass die paarig angelegten Kiefergelenke als "echte" Gelenke (Diarthrosen) die wichtigsten artikulären Strukturen bei allen durchführbaren Unterkieferbewegungen sind. Sowohl beim Sprechen, Schlucken als auch beim Kauen spielen sie die entscheidende Rolle für den Bewegungsablauf. Betrachtet man zusätzlich alle möglichen Grenzbewegungen des Unterkiefers, welche erstmalig 1961 in allen drei Dimensionen durch POSSELT [59] beschrieben wurden, kann man konstatieren, dass alle Exkursionsbewegungen normalerweise begrenzt sind und charakteristische, reproduzierbare Bahnen entsprechend der Abbildung 7 aufwerfen.



**Abb. 7** Grenzbewegungsbahnen n. U. Posselt aus [59] in der Saggital-, Horizontal- (a) und Frontalebene (b) mit 1 Retroposition 2 max. Interkuspidation 3 Schneidezahnführungskontakt 4 Abbißposition 5 max. Protrusion 6 Ruheschwebelage 7 max. Öffnung 8 kaudaler Scharnierpunkt 9/10 laterale Grenzposition(en) 11/12 Knickpunkte bei Schneidezahn-/ Eckzahnführung

Die dabei entstehende Limitation der Unterkieferbewegungen erfolgt erstens durch die sogenannte Knochen-, Muskel-, Band- und Weichteilhemmung, d. h. durch den anatomischen Aufbau des Gelenks sowie den funktionell dazugehörigen Muskeln (siehe Kapitel 2.1.3) und ligamentären Strukturen. Durch die zweitens okklusale Führung der Zähne (siehe Abb. 3), drittens neuronale Regelkreise mit gewissen Schutzmechanismen (siehe Kapitel 2.1.4 und 2.1.5), durch die Form der Gelenkbahn selbst

erfolgen viertens ebenso typische Bewegungsmuster bzw. Bewegungseinschränkungen, welche für jedes Individuum eine gewisse Ähnlichkeit erkennen lassen. Das Kiefergelenk lateinisch auch *Articulatio temporomandibularis* ist zudem eine kombinierte Konstruktion, welche die *Mandibula* mit dem *Os temporale* beweglich verbindet. In ihm artikulieren mit der jeweiligen Gelenkfläche (*Facies articularis*) das *Caput mandibulae* mit der *Fossa mandibularis* sowie dem *Tuberculum articulare*. Als sogenanntes Doppelgelenk [39] wird es durch den *Discus articularis* in einen oberen und unteren Gelenkabschnitt geteilt. Die obere diskotemporale Kammer ist im Gegensatz zur unteren diskomandibulären Kammer relativ geräumig und beweglich. Im oberen Abschnitt, d. h. zwischen dem Diskus und der Gelenkgrube erfolgen zudem vorwiegend langgestreckte Gleitbewegungen (*Translationen*). Der untere Raum zwischen Kondylus und Diskus erlaubt aufgrund seiner eher straffen und engen Gestalt vornehmlich Rotationsbewegungen. Der intrakapsuläre Raum wird zusätzlich durch eine äußere Bindegewebshülle umschlossen. Diese Gelenkkapsel (*Capsula articularis*) bildet ein in sich geschlossenes Gehäuse und mit Hilfe eines zusätzlichen Bandapparats, der hauptsächlich aus dem *Ligamentum laterale*, dem *Ligamentum stylomandibulare* und dem *Ligamentum sphenomandibulare* besteht, erfolgt eine straffe Fixierung des Unterkiefers an der Schädelbasis (siehe Abb. 8).

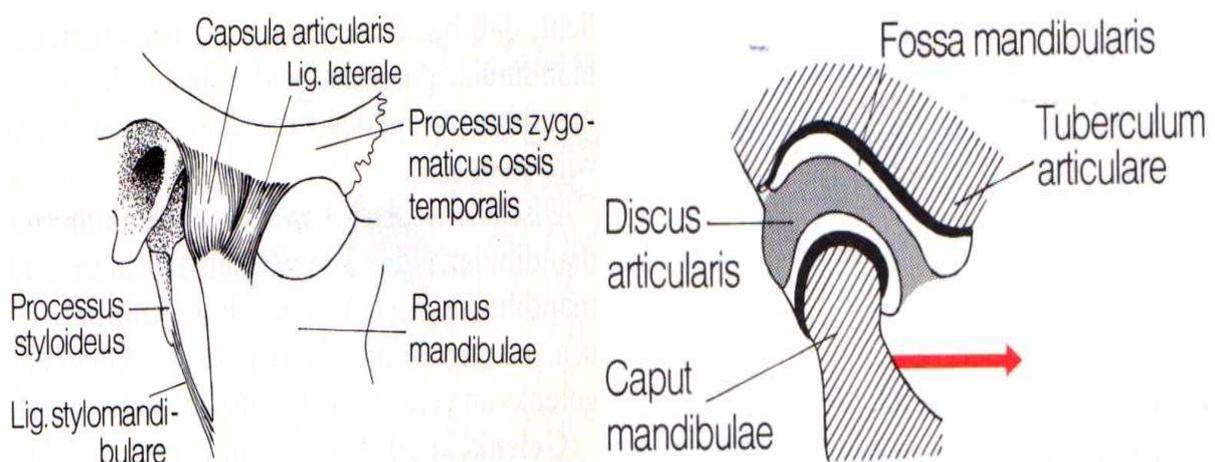


Abb. 8 aus [65] Ansicht rechtes Kiefergelenk mit groben Aufbau des Kapsel- und Bandapparates

### 2.2.3 Muskuläre Strukturen

Die Kaumuskulatur stellt eine Gesamtheit von Muskeln dar und ist dementsprechend definiert. Die gemeinsame Interaktion der Muskeln ebnet dem Kauprozess den Weg. Als Teil des Bewegungsapparates übernimmt die Kaumuskulatur den aktiven Teil im Kausystem und ermöglicht eine normalerweise geordnete, dreidimensionale Bewegungsführung des Unterkiefers zum Oberkiefer. Sie besteht aus quergestreifter Skelettmuskulatur, deren Grundelement die Myofibrille ist (siehe Kap. 2.1.5). Man unterscheidet zusätzlich drei anatomisch Muskelfaserarten, nämlich die S-Faser Muskulatur (langsamer Typ), die FF-Muskulatur (schneller Typ) sowie einen Intermediärtyp, die sogenannte FR-Muskulatur. Betrachtet man zusätzlich die Verkürzung der Muskulatur (Kontraktion), welche durch Nervenimpulse (Aktionspotentiale) der innervierenden Motoneurone und der chemo-/elektromechanischer Kopplung an der motorischen Endplatte ausgelöst wird, lassen sich zudem 5 Kontraktionsformen unterscheiden. Erstens die isometrische Kontraktion in der Schlussbisslage (durch Spannungserhöhung der Kaumuskulatur ohne Längenverkürzung), zweitens die isotonische Kontraktion (eine Muskellängenverkürzung ohne Spannungserhöhung) zum Beispiel beim Sprechen, drittens eine auxotone Muskelkontraktion, d. h. eine Spannungserhöhung mit Verkürzung der Muskelfasern wie z. B. bei Abbeißenbewegungen. Ferner eine Anschlags- und Unterstützungszuckung, welche zusammengesetzte Kontraktionsformen darstellen und beim Zerbeißen sowie bei der schutzreflektorischen Bisshemmung auftreten [5]. Die Innervation der Kaumuskulatur erfolgt fast ausschließlich über den dritten Ast des Nervus trigeminus (den N. V/3 siehe Kap. 2.1.4). Eine Ausnahme bildet jedoch teilweise die nervale Versorgung der suprahyoidale Muskulatur (siehe Anhang Tab. 19). Als funktionelle Einheit lässt sich die Kaumuskulatur, je nach Verlauf und Funktion, in die eigentlichen Kaumuskeln (Musculi masticatorii) und die akzessorischen Kaumuskeln gliedern. Die Hauptaufgabe der akzessorischen Muskulatur besteht in der Unterstützung der Kaumuskulatur. Besonders hervorzuheben sind dabei die sogenannten oberen Zungenbeinmuskeln (Musculi suprahyoidei). Durch sie kann, bei gleichzeitiger Lagefixierung des Zungenbeins mittels der infrahyale Muskulatur, eine Bewegung des Unterkiefers gegen das Os hyoideum und konsekutiv eine effektive Mundöffnung durchgeführt werden. Abgesehen von der reinen Mund- bzw. Kieferöffnung (Synonym Depression, Abduktion oder Senkung) sind die Hauptwirkungsrichtungen, d. h. die durch die Topographie

der Muskulatur vorgegebenen Bewegungsrichtungen analog der Abbildung 9 eher in einer Adduktion (Kieferschluss/ -hebung, Elevation), Retrusion (Rückführung bzw. Rückschub des Unterkiefers) oder Protrusion (Vorführung bzw. Vorschub des Unterkiefers) zu suchen.

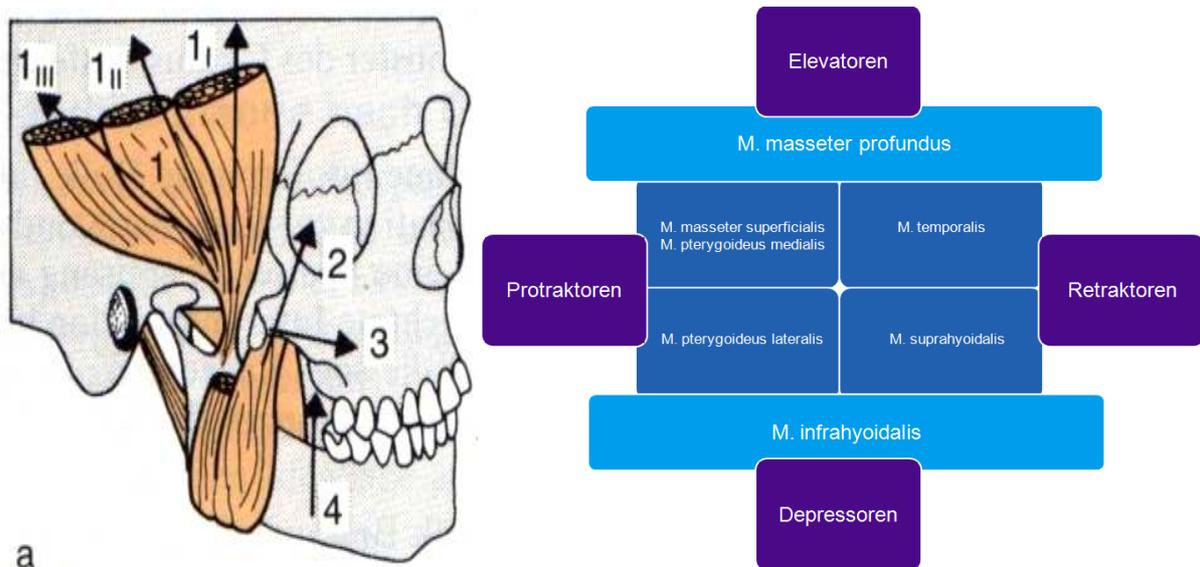


Abb. 9 aus [10] n. [35] Wirkungsrichtung der Kaumuskeln 1. M. temporalis 2. M. masseter 3./4. M. pterygoideus lat./med.

Der zusätzlich mögliche Seitenschub des Unterkiefers (Laterotrusion) stellt dabei eine Kombination von Bewegungen dar. „Die Elevatoren, die eigentlichen Kaumuskeln, Mm. masseter, Mm. pterygoidei mediales, sind „(dabei)“ die kräftigsten Muskeln und bilden im Bereich des Angulus mandibulae die sogenannte Masseterschlinge. Den Mm. temporales kommt dabei die Führungsfunktion zu, den Unterkiefer in die zentrische Okklusion zu steuern“ [10]. Als spindelreichste Kaumuskeln wird ihnen nach KAWAMURA [30-32] die wesentliche Rolle für die Tastfunktion und Lagekontrolle des Unterkiefers zugeschrieben. Alle anderen Kaumuskeln übernehmen dabei gewissermaßen eine Lagesicherungsaufgabe bei Annäherung des Unterkiefers an den Oberkiefer. Eine genauere Beschreibung über die Funktion, den anatomischen Ansatz und Ursprung sowie deren Innervation kann bei Bedarf im Anhang den Tabellen I bis III entnommen werden.

## 2.2.4 Nervale Strukturen für die orofaziale Motorik und Sensomotorik

Die neuronale Versorgung des Gesichts- und Kieferbereichs erfolgt vornehmlich durch vier Hirnnerven, d. h. genauer gesagt, durch den Nervus trigeminus (N. V), den Nervus facialis (N. VII), den Nervus glossopharyngeus (N. IX) sowie den Nervus hypoglossus (N. XII). Die für die orofaziale Motorik und Sensomotorik wichtigen Motoneurone bzw. primärsensorischen Neurone werden überwiegend dem Nervus trigeminus zugerechnet und diesbezüglich erfährt alleinig dieser fünfte Hirnnerv in diesem Abschnitt eine etwas umfassendere Darstellung. Die Neurone des sogenannten Drillingsnervens finden ihren Ursprung innerhalb der motorischen Trigemuskern. Und zwar in zwei Kerngebieten des Rautenhirns als auch im oberen Teil des Zervikalmarks. Die sensiblen Anteile des N. V bilden in der mittleren der drei Schädelgruben das sogenannte Ganglion trigeminale (Ganglion gasseri), welches die Aufteilungsstelle in die drei Hauptäste, nämlich den N. ophthalmicus (N. V<sub>1</sub>), den N. maxillaris (N. V<sub>2</sub>) und den N. mandibularis (N. V<sub>3</sub>) markiert (siehe Abb. 10).

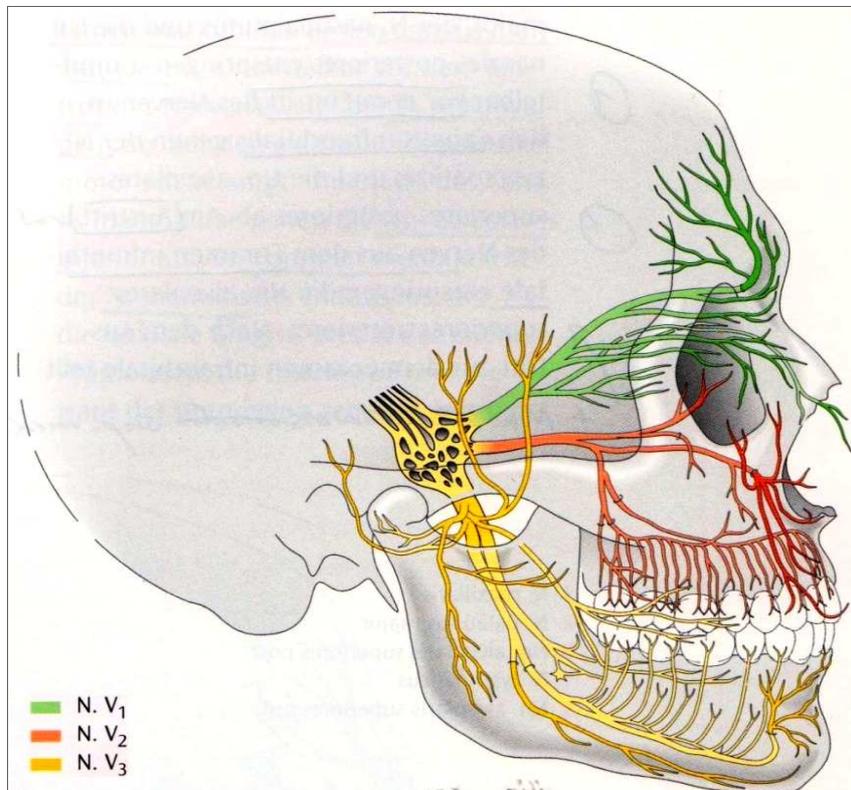


Abb. 10 aus [62] Teildarstellung zum Verlauf des Nervus trigeminus (N. V)

Die drei Nervenäste ziehen dann durch voneinander getrennte Öffnungen im Bereich der Schädelbasis, um dann weiter zu ihren Innervationsgebieten zu gelangen. Der Nervus ophthalmicus, der wie der Nervus maxillaris, rein somatosensorisch ist, erreicht über die Fissura orbitalis superior die Augenhöhle, wo er sich dann in seine Endäste (den N. nasociliaris, den N. frontalis und den N. lacrimalis) aufteilt und die Versorgung der Stirnregion, der Orbita sowie den Bereich des Nasenrückens übernimmt. Der Nervus maxillaris verlässt als zweiter Hauptast (N. V<sub>2</sub>) und unter vorheriger Abgabe des sensiblen Ramus meningeus den Schädel durch das Foramen rotundum und gelangt so in die Flügelgaumengrube (Fossa pterygopalatina). Dort gehen aus ihm seine drei Äste hervor, d. h. die Rr. ganglionares, der N. zygomaticus sowie der N. infraorbitales. Die Rami ganglionares bilden zudem nach deren Eintritt in das Ganglion pterygopalatinum dessen sensible Wurzel, um sich später unter anderem zu den Nn. palatini (N. palatinus major, Nn. palatini minores), dem N. nasopalatinus sowie den Rr. nasales zu formieren. Nach dem Verlassen der Flügelgaumengrube übernehmen sie die Versorgung der Schleimhäute bzw. Drüsen des Gaumens, der Nasenhöhle sowie die Innervation der Oberkieferfrontzähne mit dem dazugehörigen Zahnfleisch. Der Nervus zygomaticus und der N. infraorbitalis versorgen die Kopf- bzw. Gesichtshaut in der Schläfengegend und den Bereich der Wange, das entspricht der Region zwischen Unterlid und Oberlippe. Zusätzlich entspringen aus dem N. infraorbitalis die Nn. alveolares superiores. Durch sie findet unter Bildung des sogenannten Plexus dentalis superior, mittels der Rr. alveolares, die Reizweiterleitung der restlichen Oberkieferzähne und ihrer Gingiva statt. Der N. infraorbitalis erreicht wie der N. zygomaticus auch die Orbita durch die Fissura orbitalis inferior. Diese beiden Nerven verlassen die Augenhöhle nach deren Durchquerung durch gleichnamige Foramina, wobei der N. zygomaticus intraorbital noch eine Zweiteilung in den N. zygomaticofacialis sowie den N. zygomaticotemporalis erfährt und zudem eine Abgabe von vorher aufgenommenen parasympathischen Fasern zur Tränendrüse erfolgt. Der Nervus mandibularis hingegen, als dritter und letzter Abkömmling des N. trigeminus, ist ein gemischter Nerv und hat neben seiner rein somatoafferenten Funktion auch die Aufgabe mit seiner Radix motoria sämtliche Kaumuskeln zu innervieren. Diese auch als Portio minor bezeichneten somatoafferenten Anteile des N. V. erreichen dann mit ihren homonymischen Nervenästen die Mm. masseter, die Mm. temporales, die Mm. pterygoidei laterales und –mediales und ebenso als N. mylohyoideus die gleichlautende Muskulatur des Mundbodens sowie die vorderen

Bäuche der Mm. digastrici. Als kräftigster Vagusstamm findet er seinen Weg aus der Fossa cranii media durch das Foramen ovale, durch welches er die Fossa infratemporalis erreicht. Dort liefert er die Radix sensoria für das Ganglion oticum und gibt darüber hinaus seinen Ramus meningeus zur sensiblen Versorgung der Hirnhaut ab. Im weiteren Verlauf teilt sich der sensible Anteil des Nervus mandibularis in seine vier wichtigen Endäste und zwar den N. buccalis, den N. auriculotemporalis, N. lingualis und N. alveolaris inferior. Die beiden erstgenannten Nerven übernehmen dabei die Innervation von Anteilen der Wangenschleimhaut, der bukkalen Gingiva sowie von Hautbezirken der Schläfengegend und der Ohrmuschel. Der N. lingualis versorgt den vorderen Lingualbereich sensibel und es treten zudem aus der Chorda tympani Geschmacksfasern auf ihn über, wodurch er ebenfalls die gustatorische Vermittlung der vorderen zwei Drittel der Zunge übernimmt. Der N. alveolaris inferior versorgt letztendlich alle Zähne mit dem umgebenden Zahnfleisch der jeweiligen Unterkieferhälfte und nach seinem Verlauf durch den Unterkieferkanal (Canalis mandibulae) verlässt er diesen durch das Foramen mentale als nun sogenannter Nervus mentalis. Mit seinen, die Kinnregion und die Unterlippe erreichenden Endaufzweigungen, schafft er die Voraussetzung einer haptischen Wahrnehmung in dieser Region [62, 65, 83].

### **2.2.5 Neuromuskuläre Physiologie und wichtige Rezeptorsysteme des Kau-systems**

Untersucht man die Entstehung von Kaukräften und die damit verbundene Entwicklung von Kaudrücken zwischen den Zahnreihen noch vor ihrer eigentlichen Messung, dann wird man feststellen, dass zu ihrer Erzeugung die vorherige Auslösung und Regulation von Kontraktionen der Kaumuskeln notwendig ist, um beispielsweise einen Kieferschluss und somit eine Okklusion zwischen den Zähnen zu ermöglichen. Durch die Aktivierung von Motoneuronen durch übergeordnete, höhere motorische- und sensorische Hirnstrukturen erfolgt eine Rekrutierung von motorischen Einheiten, d. h. die nach SHERRINGTON [70] Reizung von immer mehr motorischen Neuronen und die jeweils von ihnen innervierten Muskelfasern. Die damit assoziierte stetige Summation von Einzelkontraktionen führt schließlich zu einer Zunahme der Muskelkraft,

aber auch zum Anstieg der möglicherweise notwendigen Kontraktionsgeschwindigkeit. Zusätzliche Untersuchungen diesbezüglich haben gezeigt, dass erstens von einem Neuron dabei einige wenige bis zu 1000 Muskelfasern erregt werden können und zweitens die Größe der motorischen Einheit indirekt proportional zur Abstufung der Kraftregulation ist, d. h. je weniger Muskelfasern von einem einzelnen Neuron angesteuert werden desto akkurater kann ein Muskel insgesamt arbeiten. Der Muskel selbst, der sich in Bündel, Fasern, Muskelzellen bis hin zu Myofibrillen (kontraktile Proteine aus Myosin und Aktin) weiter gliedern lässt, wird bei dieser Feinabstimmung durch spezifische Rezeptoren kontrolliert. Diese sogenannten Muskelspindeln (siehe Abbildung 11) sind speziell für diesen Vorgang abgewandelte Muskelfasern, welche parallel zu den durch  $\alpha$ -Motoneurone innervierten Fasern der Arbeitsmuskulatur (extrafusale Fasern) verlaufen [65, 66.]

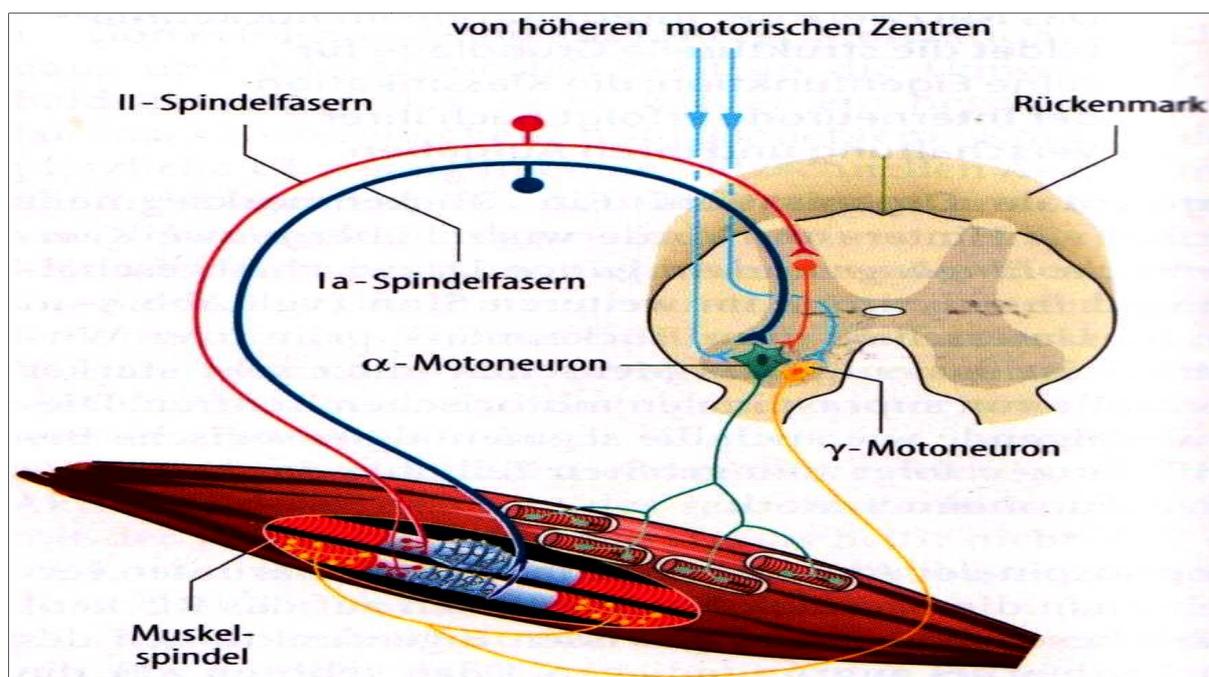


Abb. 11 aus [66] Überblick neuronale Verschaltungen der Muskelspindel mit Reflexbogen

Durch zusätzliche, in den Spindeln befindliche, intrafusale Muskelfasern sowie einen nervösen Teil, welcher durch Ia- Spindelfasern monosynaptisch bzw. Typ II- Spindelfasern polysynaptisch zu einem Reflexbogen verschaltet ist, erfolgt die Dehnungsmessung und Lagestabilisierung des Muskels, wobei  $\gamma$ - Motoneurone die Innervation der intrafusalen Fasern sowie eine zentrale Empfindlichkeitssteuerung der Muskelspindel übernehmen. Die restlichen Bestandteile des Kausystems unterliegen eben-

falls einer rezeptorvermittelten Überwachung. Erst so ist ein exakt koordiniertes Zusammenspiel aller Elemente möglich, wie etwa die reflektorische Bewegungs- und Kaukraftsteuerung, die Übermittlung der Lagestellung des Kiefers, die Speichelregulation sowie die Auslösung von Schutzreflexen, wie dem beispielsweise von SHERINGTON [71] entdeckten und nach ihm benannten Reflex. Für die Wahrnehmung (Tiefensensibilität) und Steuerung dieser Funktionen besitzt das Kausystem, neben den bereits erwähnten Muskelspindeln, auch eine Vielzahl anderer Sensoren, welche unter anderem im Bereich der Sehnen, des Desmodonts, der Schleimhaut und der Pulpa lokalisiert sind [5]. Dabei findet die Dehnungs- und Spannungsmessung im Bereich der Sehnen durch die nach GOLGI [7, 16, 17] sogenannten Golgi-Sehnenorgane statt. Diese in der Gelenkkapsel, dem Diskus und den Bändern zahlreich vorkommenden, bindegewebig umhüllten, primärsensorischen Nervenendigungen von Ib- Nervenfasern registrieren die aktiv vom Muskel, d. h. den extrafusalen Fasern entwickelte Spannung, welche durch den Zug an der Sehne während Kontraktion der Muskulatur entsteht. Hierbei sei jedoch noch darauf hingewiesen, dass die Gelenkkapsel zusätzlich weitere Rezeptoren in Form von freien Nervenendigungen, Ruffini-Endigungen sowie Vater-Pacinischen Körperchen besitzt, welche außer der Messung von Spannungs- und Zugkräften eine Detektion von Vibrations-, Kälte- und Hitzereizen möglich machen [54]. Das Desmodont als Bestandteil des Parodonts verfügt ebenfalls über Mechanosensoren, deren Rezeptordichten sich aber in der Zirkumferenz der Zahnwurzel erheblich unterscheiden. Mit Hilfe von SA2- Rezeptoren (primärsensorischen Fasern), welche man zu den Ruffini- Endigungen zählt und RA1- Rezeptoren (kleine, ovoid, gekapselte Körperchen) als auch freien Nervenendigungen wird zum Beispiel die Wahrnehmung von okklusalen Hindernissen, das Erkennen von Fremdkörpern in der Nahrung und die Lagekontrolle des Speisebolus während des Kauprozesses gewährleistet. Durch die Einbindung in polysynaptische Öffnungs- und monosynaptische Kieferschließreflexe wird das Desmodont zu einem integrativen, räumlichen Fühlersystem und stellt nicht nur die bloße Verbindung (Syndesmose) zwischen dem Wurzelzement und dem Alveolarknochen dar [35, 63, 68]. Die bandhafte Aufhängung der Zähne ermöglicht es zudem, dass neben der so erzielten, natürlich stark begrenzten Bewegungsfreiheit auch deren Kraftapplikation und somit indirekt eine Regulation der Kaukraftentwicklung durch die Wurzelhaut überwacht werden kann. SCHRÖDER [67] konnte so diesbezüglich zeigen, dass es durch alleinige Lokalanästhesie des peridontalen Ligaments zu einem unkontrollier-

ten Anstieg der Kaukraft kommt. Durch die Erhöhung der Empfindlichkeitsschwelle für die Auslösung von Schutzreflexen kann es demzufolge zu Überbelastungen bis hin zu Verletzungen des Kauapparats kommen. Einen gewissen Schutz vor möglichen Schädigungen stellt die zusätzliche algetische Sensibilität nicht nur des Desmodonts, sondern auch der Pulpa und der Mucosa dar. Durch geeignete polymodale Nociceptoren meist in Form freier Nervenendigungen, die entweder myelinisierte A $\delta$ -Fasern oder unmyelinisierte C-Fasern darstellen, wird vor einer akuten oder drohenden Gewebetraumatisierung durch thermische-, mechanische- oder chemische Noxen gewarnt. Dabei vermitteln die A $\delta$ -Fasern den meist als scharf, stechend und gut lokalisierbar empfundenen Schmerz und die sogenannten C-Fasern das eher dumpfe, brennende, wenig eruierbare und zudem unangenehme Gefühlserlebnis. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Realisierbarkeit aller mastikatorischen Funktionen reflektorisch über sensomotorische Rezeptorsysteme erfolgt, wobei eine entsprechende Modifikation durch kognitive Leistungen des Großhirns intentional erfolgt [5]. Einen groben Überblick über diese Verschaltungs- und Steuerungsmöglichkeit des sensomotorischen, orofazialen Systems soll diesbezüglich die Abbildung 12 vermitteln.

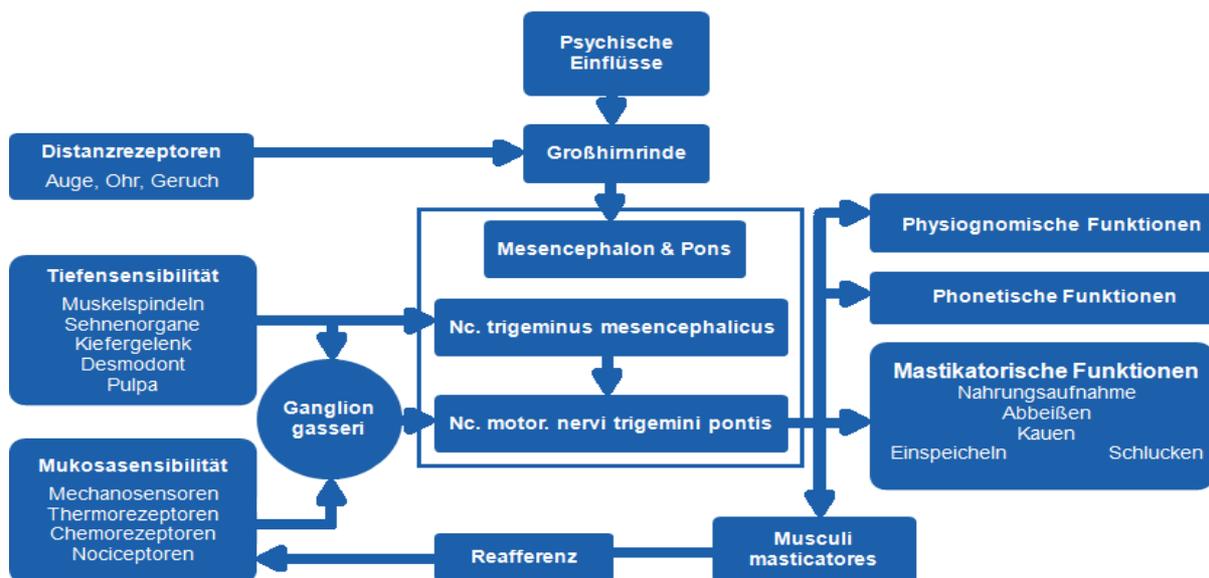


Abb. 12 n. [5] schematischer Überblick über die Input/ Output- Beziehung des sensomotorischen orofazialen Systems

### 2.3 Status quo (ante) der Kaukraftmessung via Prescale® Film (System)

Der von Fuji™ 1974 entworfene und patentierte Prescale® Film wurde erstmalig von HIRASAWA [27] im Bereich der Zahnmedizin eingesetzt und diente auch hier schon bereits 1978 der Kaukraftbestimmung. Die Folie sollte zusätzlich bei der Klärung von Balanceunterschieden während des bi- und unilateralen Kauvorgangs helfen. Bis zur Einführung des Dental Prescale Systems, das Fuji mit speziellen Folien und einem Scanner mit Computer (Occluzer FPD-703) anbot, beschränkten sich die Untersuchungen von FUKUDA, LIGGINS und OTTL [13, 40, 58] zum großen Teil auf die Reproduzierbarkeit der Folie. Erst ab 1994 wurde die Folie für systematische Untersuchungen genutzt [21, 22, 25, 26, 29, 37, 38, 47, 48, 49, 50, 56, 57, 73, 74, 75, 77, 79, 80, 82, 87]. Dabei sind für den Nachweis der Reproduzierbarkeit des Fuji Dental Prescale Systems vor allem die Arbeiten von FUKUDA [13] und SUZUKI [78] zu nennen. Kernstück der Folie sind mit Entwicklerflüssigkeit gefüllte Kapseln, die bei einer auftreffenden Kraft „(beispielsweise beim Zusammenbeißen)“ zerplatzen und den entsprechenden Folienbereich rot anfärben. Während FUKUDA die Intensität und Fläche der gefärbten Bereiche noch mit einem Mikroskop und einer TV-Kamera aufnahm und diese dann im Computer weiterverarbeitete, benutzte SUZUKI schon das aus Scanner und PC bestehende Occluzer FPD-703-System“ [9]. Mit der Einführung des Occluzer FDP-707-Systems (Fuji™ Film Corp., Tokio, Japan) im Jahre 2004 wird anstelle des Scanners eine CCD Kamera bei der Auswertung des Fuji™ Prescale® Films benutzt, wobei Fuji™ in diesem Fall einen speziellen Dental Prescale® 50H Typ R Film benutzt (siehe Abb. 14), welcher laut ANDO [3] im Bereich von 5 bis 120 MPa eine konstante Korrelation zwischen dem applizierten Druck und der Intensität der Rotfärbung ermöglicht. Wie auch schon in der Arbeit von FINK [9] festgestellt, war es bis heute „(...) nicht möglich Herstellerinformationen von Fuji-Film „(weder)“ zu dem Occluzer Dental Prescale-System „(703 noch zum System 707)“ zu erhalten „(und)“ (...) leider war es „(ebenfalls)“ nicht möglich, diesen „(Dental Prescale® 50 H Typ R)“ Folientyp von Fuji zu erhalten oder zu untersuchen“[9]. Zeitgleich mit dem Abschluss der Arbeiten von FINK 2007 [9], welche die Basis dieser Dissertationsschrift darstellt, wurde in Japan bis Ende des Jahres 2009 noch in einer Reihe von Studien durch ANDO et al. [4] untersucht, inwieweit die Verwendung von silikonhaltigen Abformmaterialien und der Einsatz eines zusätzlich entwickelten lichtdurchlässigen Gerätes einen Vorteil bei der Auswertung der okklusalen Kontaktflä-

chen liefert. Zusammengefasst bleibt zu konstatieren, dass kontinuierlich seit 1978 bis 2009 durch MOTEGI et al. [51] immer wieder Versuche unternommen wurden, Kaukräfte mit Hilfe der Fuji™ Prescale® Folie zu bestimmen, wobei die Vielzahl der ermittelten Werte häufig die einzelner Altersgruppen waren und es sich meistens um Fall- Kontroll Studien handelte. Es gibt aber bei der Durchsicht der Literatur kaum wissenschaftliche Querschnittsstudien, die zur Ermittlung von „Normalwerten“ geeignet sind. Einen Überblick über die bisherigen Ergebnisse, d.h. die ab dem Jahr 2000 bis heute veröffentlichten Daten soll in Anlehnung an FINK [9] die Tabelle 1 geben.

Autor	Jahr	N	♂	♀	Alter	Methode	Besonderheit	Fmax[N]
Motegi	2009	46	22	24	66,9±4,2	Prescale	≥ 20 Zähne	942,9±440,1
Motegi	2009	52	28	24	84,3±3,2	Prescale	≤ 20 Zähne	890,3±273,3
Alkan	2008	10	7	3	20,5	Prescale	Kontrollgruppe	773,2±194,4
Alkan	2006	10	7	3	18	Prescale	Kontrollgruppe	773±184
Alkan	2006	15	5	10	16	Prescale	vor Distraktions OP	579±377
Tanaka	2004	15	8	7	74,9	Prescale	Prothesenträger	166,5 ± 46,3
Harada	2003	24	13	11	23,2	Prescale	Prognathie-OP	400 ± 180,0
Hattori	2003	5	5	0	27	Prescale		ca. 1200
Karibe	2003	20	11	9	4,5	Prescale	Kinder	405,4 ± 64,9
Morita	2003	142	67	75	44	Prescale		1467,9 ± 857,0
Okiyama	2003	20	20	0	28,3	Prescale		727 ± 270
Sondang	2003	64	0	64	21,9	Prescale		806,2 ± 324,84
Shinogaya	2002	8	8	0	28,8	Prescale	unter Zahnärzten	1257,5 ± 330,0
Miura	2001	373	156	217	65-74	Prescale		408 ± 258,5
Ohkura	2001	57	26	31	23,7	Prescale	Prognathie-OP	599,1 ± 202,8
Shinogaya	2001	46			21-55,5	Prescale		1650,8 ± 365,8
Harada	2000	25	10	15	24,4	Prescale	Prognathie-OP	301,5 ± 181,5
Harada	2000	20	10	10	28,8	Prescale		625,9 ± 387,9
Kurita	2000	6	0	6	35,3	Prescale	Schienen	163,4 ± 114,6
Miyaura	2000	590	293	297	45,4/49,7	Prescale		490,8 ± 277
Yamada	2000	45	0	45	18,8±1,5	Prescale	TMD-Patienten	438,1 ± 173,1
Yamada	2000	45	0	45	18,8±1,6	Prescale	Gesund	660,8 ± 390,8

Tab. 1 n. [9] Übersicht bisher bestimmter Kaukräfte mittels der Prescale®Folie einzelner Autoren von 2000-2009

### 3 Material und Methode

#### 3.1 Genereller Überblick

##### 3.1.1 Fuji™Prescale®Film

Für die systematischen Vor- und Hauptuntersuchungen kam wie von FINK [9] vorgeschlagen der von Fujifilm entwickelte Prescale® Film Typ MS zum Einsatz und wurde vor dessen Einsatz durch das von MÜLLER et al. [53] im Jahr 2004 neu entwickelte Oberflächenbeschichtungsverfahren (siehe Kapitel 3.1.2) modifiziert. Betrachtet man den Grundaufbau dieses ca.  $100 \pm 10 \mu\text{m}$  dicken Films mikroskopisch lässt sich ein Schichtenaufbau (siehe Abbildung 13) erkennen.

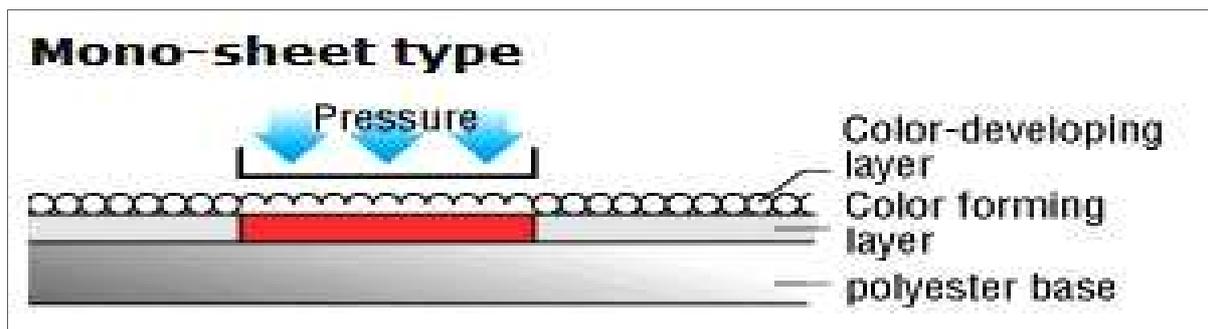


Abb. 13 aus [FUJI Internet] Prescale® Film (Mono-sheet type) schematischer Aufbau nach Druckbelastung (polyester base = Polyesterträgerfolie, color-developing layer = Adsorptionsschicht, color-forming layer = Mikrokapselschicht)

Der benutzte Film „(...) besteht aus einer Polyester-Trägerfolie. Diese Folie aus Polyester ist mit einer Lage Mikrokapseln beschichtet. Die Mikrokapseln sind mit einer speziellen reaktiven Flüssigkeit, sog. Farbbildnern, gefüllt. Werden die Mikrokapseln belastet, zerplatzen sie und geben die Farbbildner frei. Diese auslaufende Flüssigkeit reagiert mit einer Adsorptionsmittelschicht, die sich an dieser Stelle rot färbt. Je größer die Menge der zerplatzten Kapseln und damit der freigesetzten Farbbildner, desto intensiver die Rotfärbung „(wodurch in Abhängigkeit von der Rotfärbung und Größe der Fläche eine Bestimmung der applizierten Kraft bzw. des erzeugten Drucks möglich ist)“. Bei erhöhten Wandstärken der Kapseln vergrößert sich auch die nötige Kraft, um diese zu zerstören. Diese Eigenschaft wird dazu genutzt, Folien mit unter-

schiedlicher Empfindlichkeit herzustellen“ [9]. Lag der im Jahr 2007 mit Hilfe der Folie mögliche bestimmbare Druck noch etwa im Bereich von 0,2 bis 130 MPa, so sind heute laut des Herstellers Fuji <sup>TM</sup> [11] Bereiche von 0,05 bis 300 MPa durch die mittlerweile erhältlichen 8 unterschiedlichen Prescale® Filme gemäß der Tabelle 2 messbar.

Product	Pressure range (MPa)	Product size	Type
Extrem Low Pressure (LLLLW) *	0.05 - 0.2	310 mm x 3 m	Two-sheet type
Ultra Super Low Pressure (LLLW)	0.2 - 0.6	270 mm x 5 m	Two-sheet type
Super Low Pressure (LLW)	0.5 - 2.5	270 mm x 6 m	Two-sheet type
Low Pressure (LW)	2.5 - 10	270 mm x 12 m	Two-sheet type
Medium Pressure (MW)	10 - 50	270 mm x 12 m	Two-sheet type
Medium Pressure (MS)	10 - 50	270 mm x 12 m	Mono-sheet type
High Pressure (HS)	50 - 130	270 mm x 12 m	Mono-sheet type
Super High Pressure (HHS)	130 - 300	270 mm x 12 m	Mono-sheet type

Tab. 2 aus [11]: Übersicht der aktuellen Prescale® Film-Produktpalette Stand Januar 2010

### 3.1.2 Folienherstellung

Die für die Untersuchung am Probanden zuvor notwendige Modifikation der Prescale® Folie vom Typ MS erfolgte nach dem von MÜLLER et al. [53] 2004 patentierten und von FINK [9] 2007 beschriebenen Beschichtungsverfahren. Eine Verwendung der in den meisten japanischen Publikationen benutzen Prescale®50H Typ R Folie war, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, nicht möglich. Daher musste die im Handel erhältliche Prescale® Folie vom Typ MS vor deren Einsatz am Probanden einer Oberflächenvergütung unterzogen werden, weil die „(...) stark feuchtigkeitsempfindliche Folie vom Typ MS (...) für den Einsatz in der Mundhöhle ohne weitere Maßnahmen ungeeignet „(ist)“, da die Mikrokapsel-/ Adsorptionsschicht vor Wasserzutritt völlig ungeschützt ist“ [9].



Abb. 14 unbelastete Prescale® Testfolie Typ MS (links) sowie der aus [3] unbelastete Prescale®50H Film Typ R (rechts)

Die Prescale®50H Typ R Folie ist im Unterschied zum Typ MS an der Oberfläche durch eine zusätzliche Polyethylenfolie geschützt und die „(...) erste Aufgabe bestand daher darin, eine geeignete feuchtigkeitshemmende Schutzbeschichtung auf die Folie aufzubringen“ [9]. Hierbei wurde wie von FINK [9] vorgeschlagen, eine Polyvinylacetatlösung im Rakelverfahren (siehe Abb. 15) aufgetragen, d. h. auf jeweils ca. 27cm x 50cm (Breite mal Länge) verkürzte Prescale® Filmbahnen, da die Basisfolie von Fuji™ auf entsprechenden Rollen von je 0,27m x 10m erhältlich ist.

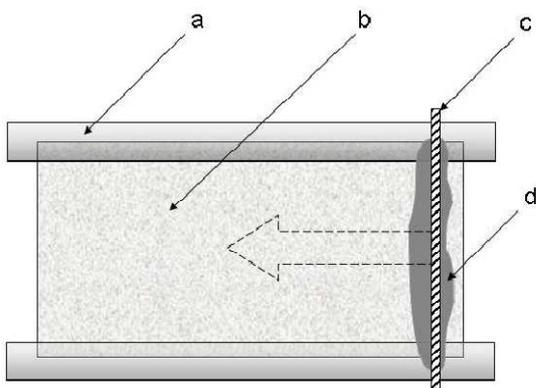
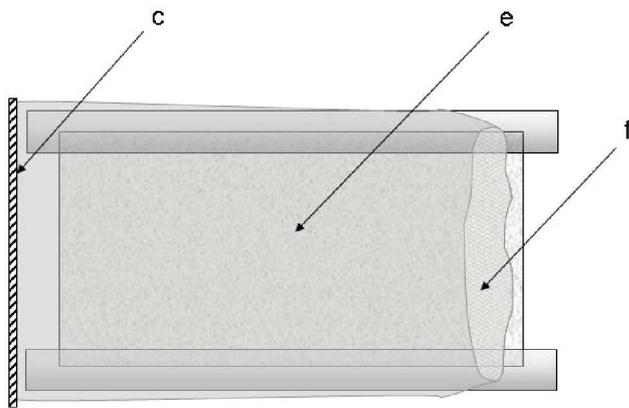


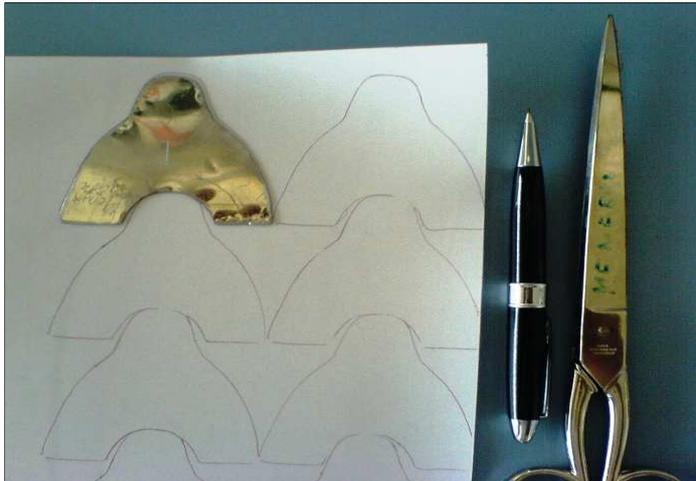
Abb. 15 aus [9]: Schematische Aufsicht auf die Druckmessfolie zu Beginn des Beschichtungsvorganges (a – Tesafilm®, b– Druckmessfolie, c – Rakel, d - Beschichtungslösung )

Wie von FINK [9] beschrieben, zeigte sich dadurch auch hier eine zusätzliche „(...) erhöhte Resistenz gegenüber ungewollten Verfärbungen. Die Neigung zur Farbentwicklung bei leichter Berührung mit spitzen Gegenständen (Fingernagel) oder beim Knicken der Folie (...) „(war)“ deutlich geringer, als bei einer unbeschichteten Folie „(begründet durch)“(...) den Schutz der Mikrokapselschicht“ [9]. Auch hier „(...) musste der jeweilige Rand der Folie, an dem die zu raketnde Flüssigkeit aufgebracht wurde wegen anzunehmender Inhomogenitäten von den Messungen ausgespart werden“ [9]. Eine schematische Aufsicht der beschichteten Folie liefert hierzu in Anlehnung an FINK [9] die Abbildung 16.



**Abb. 16 aus [9]: Schematische Aufsicht auf die Druckmessfolie nach dem Beschichtungsvorgang (c – Rakel, e – Druckmessfolie mit Beschichtung, f – inhomogener Bereich)**

Nach mehrstündiger Trocknungszeit der Folienschutzschicht konnte dann im Anschluss mit der manuellen Herstellung der eigentlichen Testfolien (Abb. 14) für die Probandenstudie begonnen werden. Mit Hilfe von vorher angefertigten Stahlmatrizen wurde der Umriss der späteren Folienform/ -größe auf den Prescale® Film übertragen. Anfänglich diente hierzu ein handelsüblicher Bleistift, aber aufgrund der Grafitrückstände und einer möglichen Verunreinigung der Oberfläche wurde dieser später durch ein Le-Cron Wachs Modellierinstrument ersetzt. Nach der Vervielfältigung der Matrizenkontur auf dem Prescale® Film, wie es in Abbildung mit der Nummer 17 zu erkennen ist, wurden die Testfolien mit einer Schere ausgeschnitten und anschließend in einer Sicherheitsbox bis zu deren späteren Verwendung aufbewahrt.



**Abb. 17 Übertragung der Matrizenkontur auf die Prescale® Folie**

Bei der Entwicklungsplanung der Matrizen dienten konfektionierte Alginatabformlöffel als Größenvorgabe und so wurden dementsprechend 4 unterschiedliche Matrizen bzw. mundgerechte Testfolien der Größen 0, I, II und III (analog Abb. 18) entworfen.



**Abb. 18 Darstellung der unterschiedlichen Prescale® Testfoliengrößen**

Wie FINK [9] bereits empfahl, wurden dann die Testfolien frühestens eine Woche nach deren Beschichtung für die weiteren experimentellen Voruntersuchungen im Labor und die anschließende, klinische Hauptstudie an den Testprobanden benutzt.

### 3.1.3 Referenzgerät

Wie bereits im Jahr 2007 von FINK [9] publiziert wurde, zeigt „(...) sich auch nach vollständiger Trocknung der Folienschutzschicht „(siehe hierzu Kapitel 3.1.2)“ eine gewisse Veränderung der gefärbten Bereiche hinsichtlich gemessener Intensität und Fläche innerhalb eines Zeitraumes von 24 Stunden nach erfolgter Druckbelastung. Um hieraus resultierende Verfälschungen der Messwerte auszuschließen, wurde eine Eichung durch eine Referenzmessung erforderlich“ [9]. Anhand der veröffentlichten Ergebnisse war weiterhin ersichtlich, dass „(...) der auftretende Fehler erheblich durch die Verwendung einer Referenzmessung minimiert werden „(konnte und eine Eichung notwendig ist)“, da das Verhalten der Folie nicht nur zeitabhängig, sondern auch temperaturabhängig ist [12]“ [9]. Den Aussagen gegenüber kritisch Stellung nehmend, wurde schon vor Beginn der eigentlichen in vivo Hauptstudie der Ruf nach einer schnellen, einfachen und zudem sicheren Methode zur Referenzpunktsetzung und -auswertung bei der Nutzung der Prescale® Folie am Probanden laut, da in den Laborversuchen von FINK [9] hierzu eine zwar genaue, aber schwerbedienbare Druck-/ Zugmaschine Instron Z010 der Firma Roell AG Zwick GmbH & Co KG (Abb. 19) benutzt wurde, die zudem eine nur ortsgebundene Referenzpunkterstellung zuließ.

Diesem Leitgedanken folgend wurde in Zusammenarbeit mit den MTL [46] der Prototyp eines mobilen Referenzgerätes gefertigt, welcher dieses Problem lösen sollte. Hierzu sei noch erwähnt, dass das Konzept der Referenzpunktsetzung auf der Prescale® Folie selbst von MÜLLER [53] entwickelt wurde, die Entwurfsidee des Referenzgerätes von mir stammt und die Konstruktionsplanung und -fertigung besonders durch die Ingenieure DANNENBERG und HEINZE der MTL [46] erfolgten.



Abb. 19 Darstellung der Druck-/ Zugmaschine Zwick Instron Z010

Die Grundfunktion dieses Gerätes (siehe Abbildung 20 und 21) besteht darin, dass mit Hilfe einer 4 mm großen Referenzkugel ein immer gleich großer Referenzpunkt der Fläche ( $A$ ) mit einer gleichbleibenden Kraft ( $\vec{F}$ ) in der Prescale® Folie erzeugt wird. Der dadurch ebenfalls immer konstant auf die Folie applizierte (Referenz)druck ( $p$ ) soll dann später mithilfe des so generierten Referenzpunktes auf der Folie ermöglichen, dass über die Größe und Intensität der Rotfärbung der (Referenz)fläche ( $A$ ) ein Abgleich mit den später zusätzlich durch den Probanden auf der Folie erzeugten Kau(ab)drücken möglich ist, d. h. unabhängig vom Zeitpunkt der Auswertung bzw. der Lagerungstemperatur der Folie. Der Grundgedanke dabei war und ist, dass sich das Färbungsverhalten der Referenzpunkte im gleichen Maße verändert, wie die eigentlichen Farbwerte der zusätzlich durch die Probanden bei der habituellen Interkuspidation geschaffenen Kontaktflächen auf der Folie. Die Referenzpunkte werden dabei durch das Zuklappen des am Verschlussoberteil befindlichen Verschlussgriffes bis zum Schließstopper (auf dem Verschlussunterteil) mithilfe der Referenzkugel auf die auf der Blattfeder befindliche Prescale® Folie gesetzt. Dabei wird dann gewährleistet, dass bei vollständigem Verschluss des Oberteils bis zum Schließstopper nun durch die Blattfeder eine stetige Gegenkraft zur jetzt konstanten

Verschlusskraft erzeugt wird, wenn das Gerät geschlossen gehalten wird, da der Schließstopper eine weitere Auslenkung der Blattfeder verhindert, d.h. auch bei weiterer Erhöhung der Verschlusskraft ist der Federweg der Blattfeder somit limitiert. Die somit geschaffenen Impressionen in der Folie sollen nun, durch den ebenfalls konstant wirkenden Referenzdruck ( $p$ ) der Referenzkugel, auf der Folie immer identische sowie reproduzierbare Referenzflächen ( $A$ ) gleicher Größe und Färbung erzeugen. Durch eine vorher zusätzlich generierte Kalibrierkurve (siehe Kapitel 3.2) ist dann via Software (siehe Kapitel 3.1.4) unter anderem, wie bereits von FINK [9] detailliert beschrieben wurde, die Bestimmung der ortsspezifisch applizierten Kraft ( $\vec{F}$ ) über das Färbungsverhalten der Fläche ( $A$ ) und somit auch des vorherrschenden Drucks ( $p$ ) auf der Prescale® Folie möglich, wobei Berechnungsfehler durch eine zusätzliche Referenzpunktgleichung erheblich reduziert werden. Jedoch waren zahlreiche in vivo Voruntersuchungen zum Verhalten des Gerätes und der erzeugten Referenzpunkte (siehe Kapitel 3.2) notwendig, um die Reliabilität und Objektivität dieser Methode zu überprüfen.

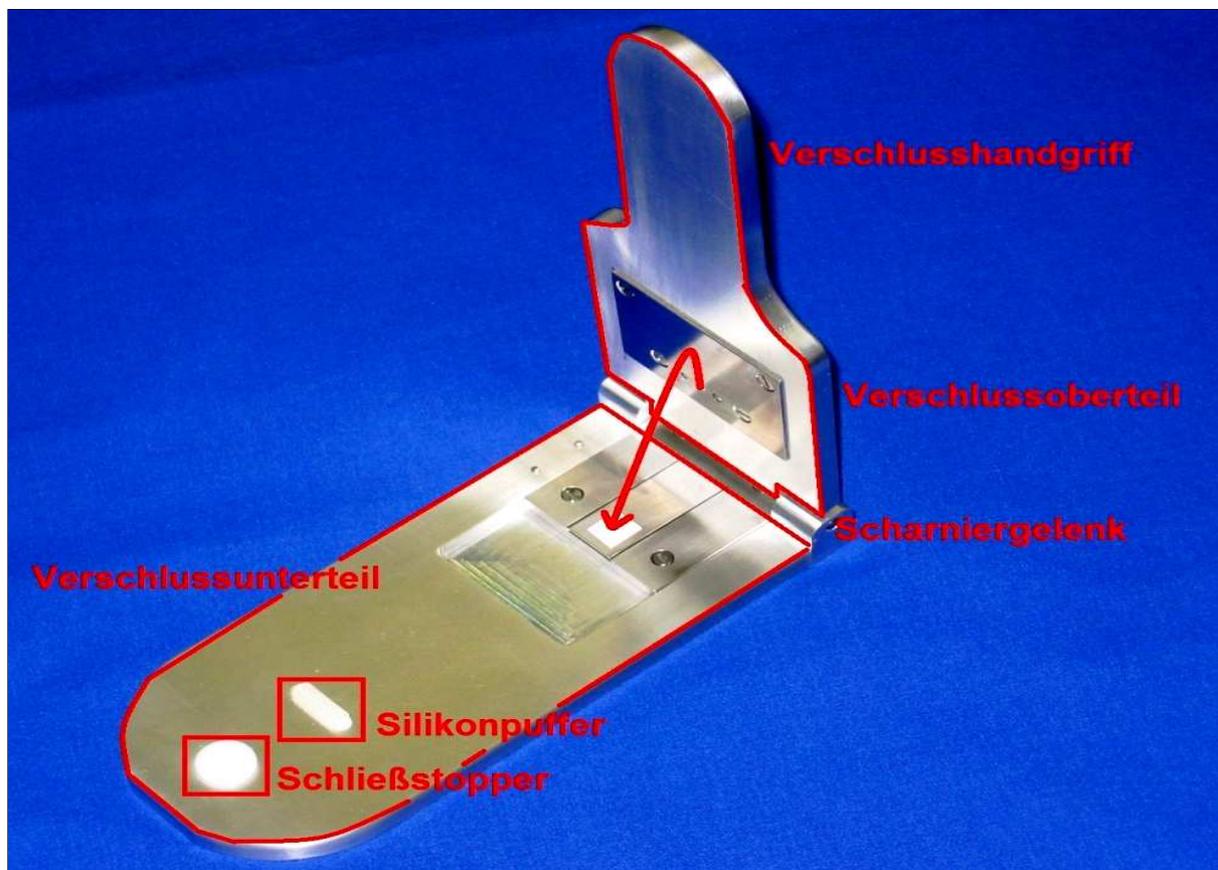


Abb. 20 Übersicht des Referenzgerätaufbaus mit Beschriftung wichtiger Elemente

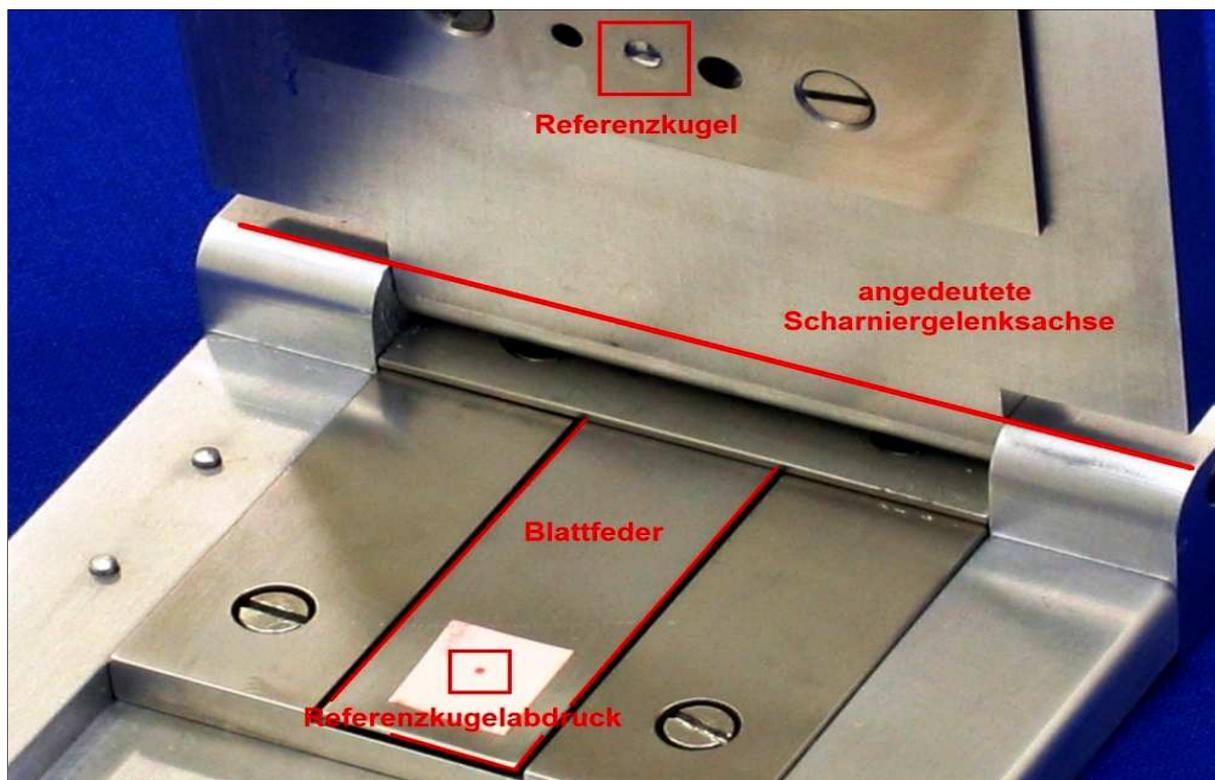


Abb. 21 Ausschnittvergrößerung des Referenzgerätaufbaus mit Beschriftung

### 3.1.4 Farbwert-/ Bilderfassung der Prescale® Folie und deren Weiterverarbeitung

Zur Erfassung sämtlicher Folienbereiche und deren Farbgewichte (Pixel/mm<sup>2</sup>), d.h. besonders jener Areale des Prescale® Films, die nach erfolgter Druckbelastung eine Farb(wert)veränderung erfahren (mehr dazu in den Kapiteln 3.2.1 ff), diente ein Scanner von Canon™ Typ CanoScan Lide70 (2400 x 4800 dpi). Dieser besitzt die von FINK [9] ermittelte Mindestauflösung bei weitem und erfüllte die Voraussetzungen beim Einscannen der Folien, da „(...) erst eine Auflösung von 800 dpi konstante Ergebnisse auch bei mehrmaligem Scannen ergaben (...) „(und)“ (...) bei dieser Auflösung Farbpunkte, die nur durch das Zerplatzen einer einzigen Mikrokapsel „(siehe Kapitel 3.1.1)“ entstanden sind, wahrgenommen werden [9]. Die Folien wurden hierbei immer 24 Stunden nach erfolgter Druckbelastung mit 800 dpi gescannt und die generierten Bilder zuerst im Bitmap- Format (\*.bmp) gespeichert. Danach erfolgte die Umwandlung der Bildinformationen in das Portable Network Graphics- Format (\*.png),

da bei dem zuvor von FINK [9] benutzten Joint Photographic Experts Group- Format (\*.jpeg) aufgrund dieses Datenkompressionsverfahrens ein Verlust von wichtigen Bildinformationen nicht verhindert werden kann, was die Abbildung 22 verdeutlichen soll. Das neuere PNG- Format garantiert jedoch komprimierte Rastergrafiken mit verlustfreier Bildinformation, da eine Datenkomprimierung aufgrund der Größe der zuerst erstellten Bitmap- Dateien nach wie vor unumgänglich ist und somit deren Speicherung bzw. Weiterverarbeitung erheblich erleichtert wird. Nach erfolgter PNG-Konvertierung wurden durch den Scann miterfasste, unwichtige Bildinformationen (beispielsweise Randbereiche des Bildes) herausgeschnitten, aber ohne dabei irgendwelche Farbwerte zu löschen bzw. zu verändern. Anschließend konnten nun die vorbereiteten Bilder und deren Farbgewichte in dem Programm Zahni© (siehe Kapitel 3.1.5) aufgerufen und weiterverwendet werden.

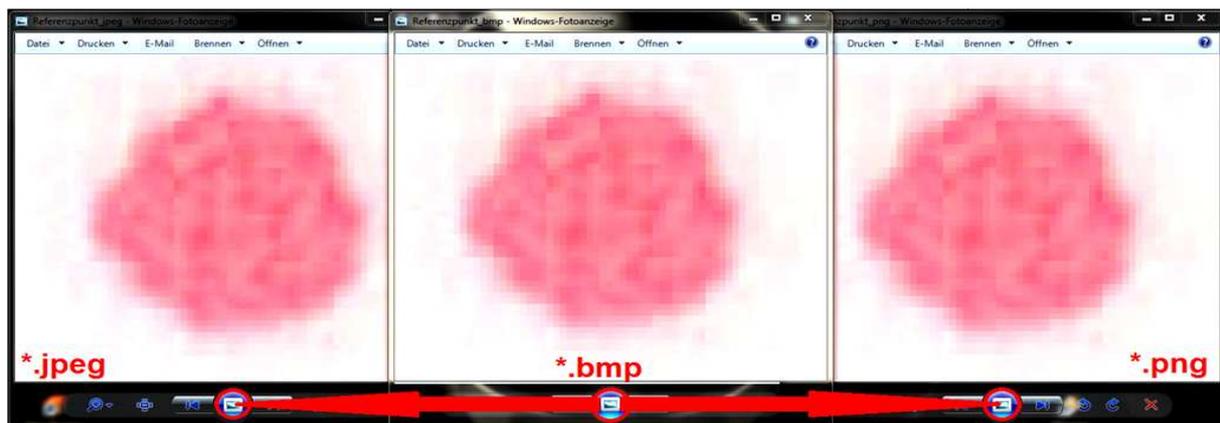


Abb. 22 Vergleich der Referenzpunktdarstellung (40-fach vergrößert) nach Konvertierung vom \*.bmp ins \*.jpeg-/ \*.png-Format

### 3.1.5 Zahni© Software

In Zusammenarbeit mit M. Sc. Michael Kleiber [34] wurde zur Erfassung und Auswertung der durch die Prescale® Folie anfallenden Daten, d. h. der entsprechenden Farbwerte und Größe der erzeugten Kontaktflächen (siehe Kapitel 4.1 ff.) eine Software (Zahni©) entwickelt, deren Ursprung der von FINK [9] durch Dipl. Inf. F. Feiks benutzte Programmquellcode darstellt. In dieser nunmehr vollständig überarbeiteten Software ist aber nicht nur allein die Erfassung und Aufzeichnung der Farbgewichte und somit die Druckberechnung möglich, sondern es handelt sich um eine komplette EDV-Software die es ermöglicht, dass sämtliche zahnmedizinisch relevanten Probandendaten entsprechend der Abbildung 23 erfasst, untersucht und individuell ausgewertet werden können. Voraussetzung ist dabei das Betriebssystem Windows™ ab Version Windows™XP bis Windows™7. Außerdem kann ein zusätzlicher Datenexport gemäß der Abbildung 24 in andere Programme erfolgen, d. h. in die zum Beispiel dieser Arbeit vorherrschend genutzte Software Microsoft® Exel 2007 und OriginPro7.5©. Somit können später ggf. weitergehende (statistische) Untersuchungen leichter vorgenommen werden.

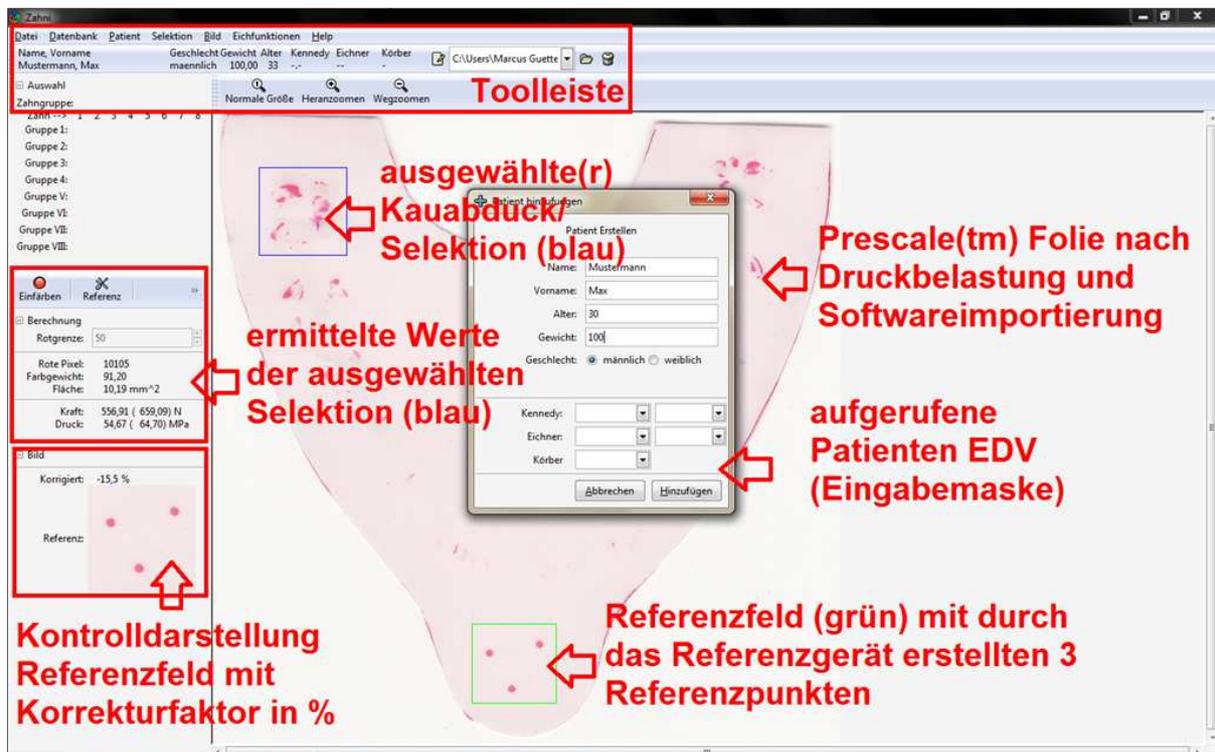
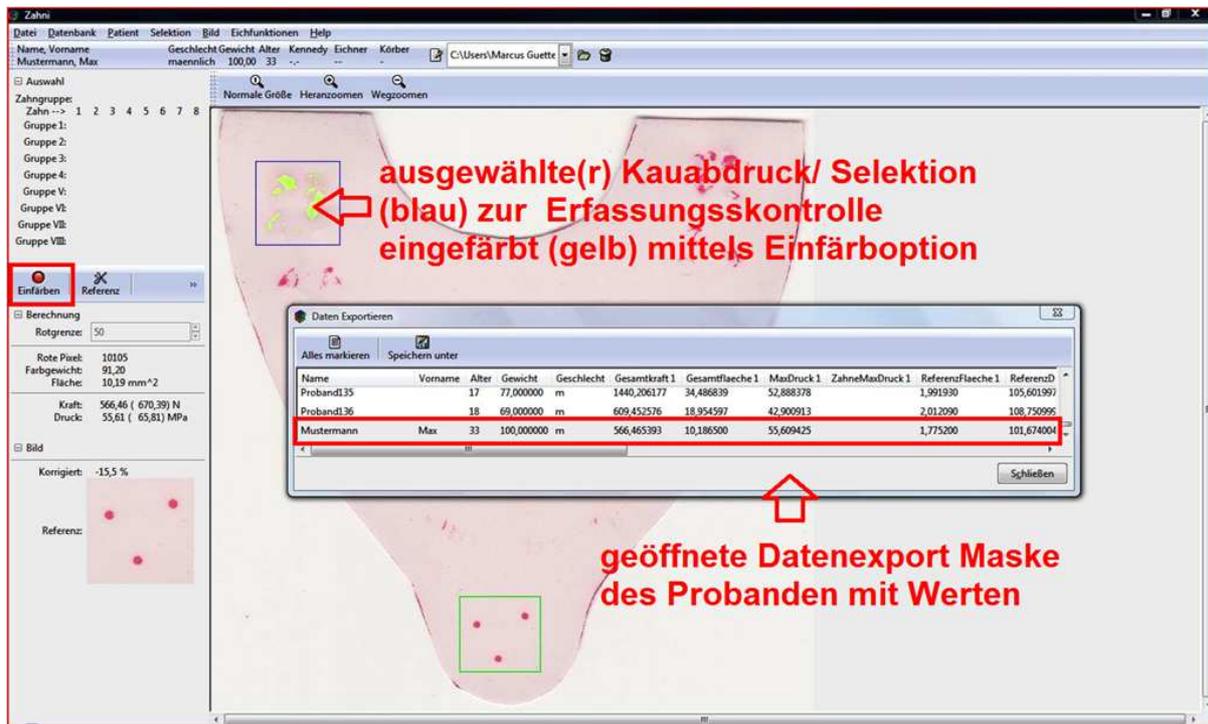


Abb. 23 Darstellung Softwareoberfläche mit wichtigen Bedienfeldern sowie geöffnete(s) Fenster (Maske) Patientendaten



**Abb. 24** Darstellung Softwareoberfläche mit wichtigen Bedienelementen sowie geöffnete(s) Fenster (Maske) Datenexport

Wie in dem bereits durch FINK [9] „(...) in Zusammenarbeit mit Feiks entwickelten Programm zur Auswertung der gefärbten Bereiche „(erfolgte auch in dieser Version nach Import der Folienscans in die Software)“(...) die Auswertung der einzelnen Pixel (...) hinsichtlich ihrer Intensität in 256 Stufen mit Werten von 0 -1. Der Auswertalgorithmus orientierte sich dabei „(auch)“ am FDP 704 Bildauswertesystem (Fa. Fuji) [44, 45] sowie am Algorithmus von OTTL [58], NG und YEONG [55] „(und auch die)“(...) Bestimmung der Flächenpunktanzahl erfolgte „(wie zuvor)“ in Analogie zu allen anderen Autoren durch Auszählung der gefärbten Pixel“ [9]. Diesbezüglich waren auch vor der Nutzung dieses neuen Programms, wie auch in der Arbeit von FINK [9] bereits beschrieben, eine Vielzahl von technischen Laborvoruntersuchungen [siehe Kapitel 3.2] nicht nur zum zeit- und belastungsabhängigen Verhalten der Folie notwendig, sondern es wurde auch die Temperaturstabilität der vom Referenzgerät erzeugten Referenzpunkte kontrolliert. Die in der Hauptstudie immer erzeugten 3 Referenzpunkte (grün markiertes Feld in der Abbildung 24) werden dann von der Zahni© Software nicht gesondert betrachtet, sondern als ein Gesamtwert erfasst, welcher dann mit der Kalibrierungsdatenbank (siehe Abb. 26 im Kapitel 3.2.1) abge-

glichen wird. Danach wird der Gesamterferenzwert entsprechend der Abbildung 23 mit den anderen Selektionen bzw. Kauabdrücken (hier blaues Feld) synchronisiert und der prozentuale Korrekturfaktor und die ggf. entsprechend korrigierten Druck- und Kraftwerte der Einzelselektionen angezeigt und später exportiert. Die gewonnenen Ergebnisse dienen aber auch hier „(...) der Erstellung einer Kalibrierkurve (...), mit der später aus dem Färbungsverhalten der Druckmessfolie auf die ausgeübten Kräfte geschlossen werden konnte“ [9] und eine anschließende der Auswertung der eigentlichen Probandendaten erst möglich wurde. Kapitel abschließend sei noch erwähnt, dass aufgrund des Softwareumfangs nicht jedes Programmtool bzw. jeder einzelne Bedienungsschritt im Detail erklärt werden kann. Der Großteil der Funktionen und der Softwareoberfläche ist aber überwiegend selbsterklärend und es wird zudem zzt. noch an einer programminternen Hilfe- (engl. Help) Funktion gearbeitet.

### **3.2 Versuchsaufbau/ Versuchsdurchführung der in vitro Vorstudie(n)**

Zur Kalibrierung und Nutzung der Software Zahni© (Kapitel 3.2.1) sowie zur Überprüfung der Funktionalität des Referenzgerätes und der somit erzeugten Referenzpunkte waren auch in dieser Studie, wie zum Teil bereits von FINK [9] durchgeführt und beschrieben wurde, einige Vorversuche zum Verhalten der Prescale® Folie notwendig, um die eigentliche in vivo Hauptstudie (siehe Kapitel 3.3) durchführen zu können. Diesbezüglich finden in Anlehnung an die Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 von FINK [9] wiederholte in vitro Untersuchungen zum druckabhängigen Färbungsverhalten „(...) der durch Druck entstandenen rot gefärbten Areale auf den Folien (...)“ [9] durch erneute maschinelle Kraftapplikation und Farberfassung statt. Zusätzlich wird das zeit- und temperaturabhängigen Verhalten der auf der oberflächenmodifizierten Prescale® Folie (siehe Kapitel 3.1.2) erzeugten Referenzflächenfärbungen untersucht, um ggf. lagerungsbedingte Veränderungen mit erfassen zu können. In toto dienen auch hier die gewonnenen Ergebnisse der Erstellung von geeigneten Eichkurven/ -werten, mittels derer später unter Verwendung des Referenzgerätes (siehe Kapitel 3.1.3) und der Software Zahni© (siehe Kapitel 3.1.5) Berechnungen zu den ausgeübten Kaukräften bzw. -drücken durch die Probanden in der Hauptstudie angestellt werden können und eine Fehlerkorrektur der Messdaten erfolgen kann.

### 3.2.1 Versuche zum Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie

Für die in vitro Vorversuche wurde auch wie in der Arbeit von FINK [9] für die Druckbelastungsversuche eine Druck- und Zugmaschine Instron Z010 der Firma Zwick/Roell AG Zwick GmbH & Co KG (siehe Abb. 19 im Kapitel 3.1.3) benutzt. Mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung (siehe Abb. 25 links) und Referenzkugeln mit den Durchmessern 3, 4, 5, 6, 8 und 10 mm wurden dann auf verschiedenen Prescale® Testfolien Referenzpunkte mit einer definierten Kraft (siehe Abb. 25 rechts) erzeugt.

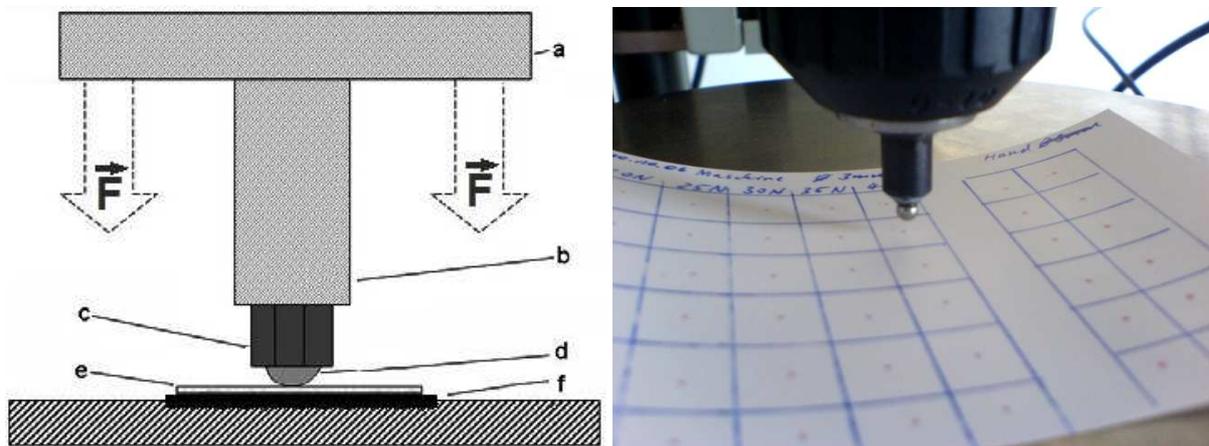


Abb. 25 schematische Versuchsanordnung Zwick Instron Z010 (links) n. [9] und erstellten Eichpunkten (rechts) auf der Prescale® Folie mit a- Traverse Instron Z010, b- Stempel, c-Kugelhalter, d-Referenzkugel, e- Prescale® Film, f- Grundplatte

Hierbei erfolgte bei annähernden +20°C eine Applizierung von Kräften zwischen 1 bis 500 N auf die Druckmessfolien. Die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit der Traverse betrug  $5 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$  und die Endposition wurde wie bei FINK [9] kraft geregelt und wie von Fuji™ [11] empfohlen konstant für 3 Sekunden gehalten. Etwa zeitgleich wurden dann mit dem Referenzgerät (siehe Kapitel 3.1.3) auf derselben Druckmessfolie zusätzliche Referenzpunkte platziert. Das Referenzgerät wurde hierzu für 3 Sekunden vollständig geschlossen gehalten und somit in dessen Endposition konstant fixiert. Nach 24 Stunden erfolgte dann der Scan (siehe Kapitel 3.1.4) der Folien mit einer Auflösung von 800 dpi. Die erstellten Bilddaten wurden anschließend zur weiteren Informationsauswertung in die Zahni© Software (siehe Kapitel 3.1.5) importiert und dienten der Erstellung einer Eichwertdatenbank (siehe Abbildung 26) sowie der Kalibrierung des Referenzgerätes selbst für die spätere Hauptstudie (Kapitel 4 ff).

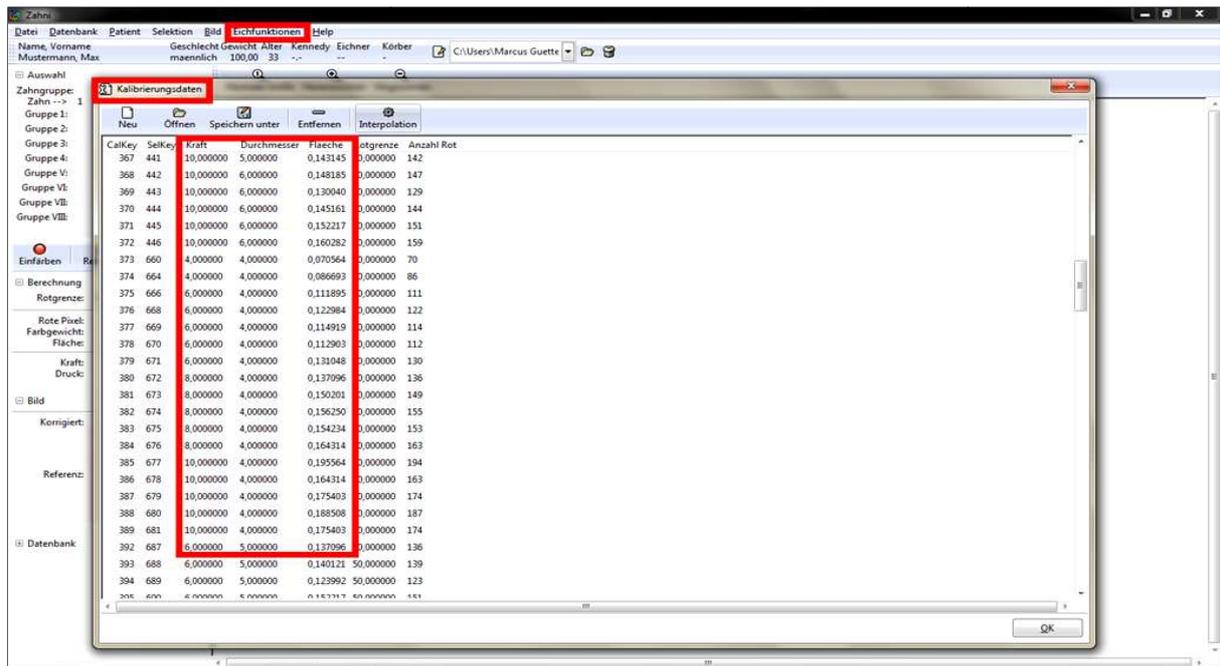


Abb. 26 Ausschnittdarstellung der erstellten Eichwertdatenbank sowie geöffnete(s) Fenster (Maske) Kalibrierungsdaten

Die Erstellung dieser Datenbank erfolgt(e) durch Auswahl des Menüs Eichfunktionen in der Toolleiste (siehe Abb. Kapitel 3.1.5). Mit Hilfe des so in Abb. 27 im Feld 1 blau markierten Referenzpunktes, welcher hierzu im Feld 2 als Eichwert mit Referenzdurchmesser 4 mm und der Kraft von 2 N definiert wurde, konnte dann im Feld 3 die durch die Software Zahni© errechnete Kraft (hier 1,99 N) abgelesen werden, wobei die Berechnung der Kraft durch einen Vergleich aller bisherigen Kalibrierungsdaten erfolgt(e), d. h. nach Extrapolation aller Eichwerte (siehe Abb. 33 und 34 Kap. 4.1.1).

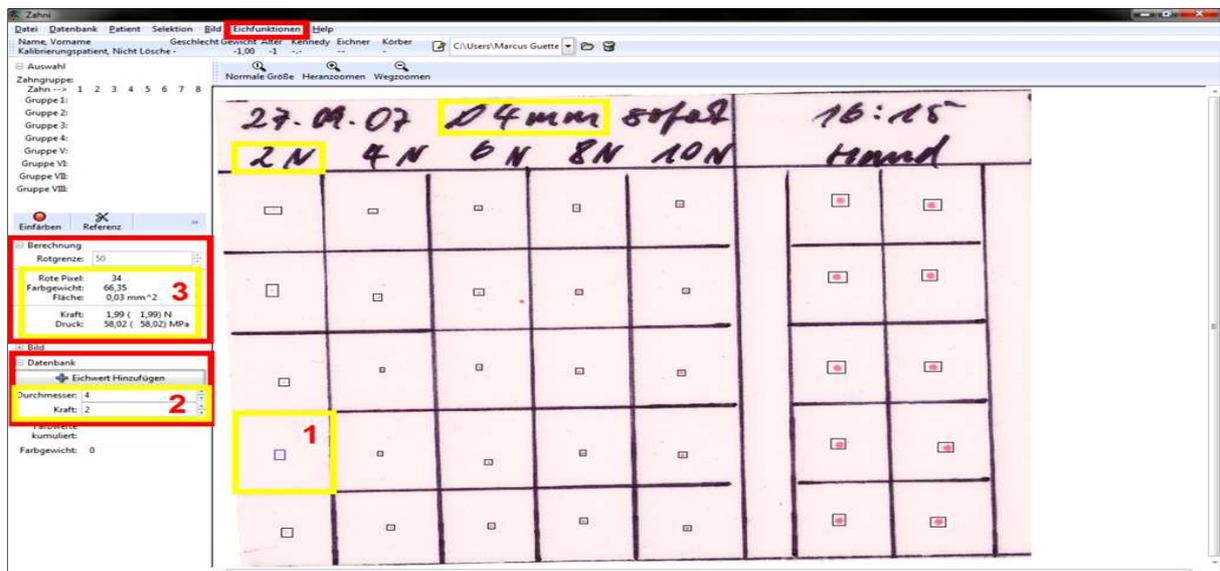


Abb. 27 Erstellung der Kalibrierungsdatenbank mittels definierter Referenzpunkte/ Eichwerte auf der Prescale® Folie

### 3.2.2 Versuche zum lagerungsspezifischen Druck- und Färbungsverhalten der Prescale® Folie

Für die Untersuchung zum lagerungsspezifischen Druck- und Färbungsverhalten der Prescale® Folie, insbesondere vielmehr zum zeit- und temperaturabhängigen Reaktionsverhalten wurden 4 Testfolien I, II, III und IV (siehe Abbildung 28) nach deren fortwährender 3-sekündiger Druckbelastung mit dem Referenzgerät (siehe Kapitel 3.1.3) bei den vier unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gelagert. Hierzu wurden zunächst im unteren Bereich der vier Folien jeweils 3 Referenzpunkte gesetzt.

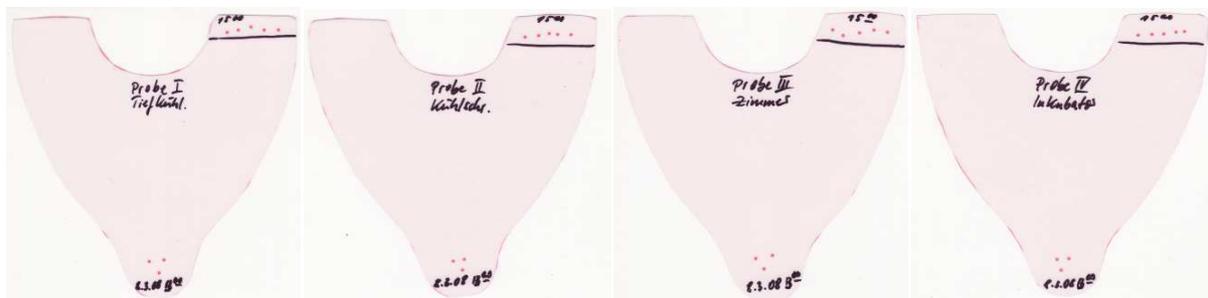


Abb. 28 Darstellung der 4 verschiedenen Prescale® Testfolien I, II, III und IV ( von links nach rechts) am ersten Tag

Anschließend wurde die Prescale® Testfolie I immer bei  $-18^{\circ}\text{C}$  im Tiefkühlfach, die Folie II bei  $+8^{\circ}\text{C}$  im Kühlschrank, die Folie III bei  $+20^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur und die Folie IV bei  $+37^{\circ}\text{C}$  in einem Ratiolab® Thermocult Kleinbrutschrank (Inkubator) gelagert. Im Abstand von 24 Stunden wurden nun jeweils 5 neue Referenzpunkte mit dem Referenzgerät über einen Zeitraum von 10 Tagen (siehe Abb. 29) erzeugt, wobei in den ersten 12 Stunden des ersten Tages ein kürzeres, zweistündiges Intervall gewählt wurde. Ziel war es herauszufinden, ob sich temperaturabhängige, lagerungsbedingte Abweichungen bei der Verwendung der Prescale® Folie aufzeigen. Es galt zusätzlich zu ermitteln, ob sich hierbei Unterschiede ergeben, wenn die eigentlichen 3 Referenzpunkte zeitnah oder schon Tage vor dem Einsatz am Probanden (simuliert durch die 5 neuen Referenzpunkte) auf der Folie generiert wurden.

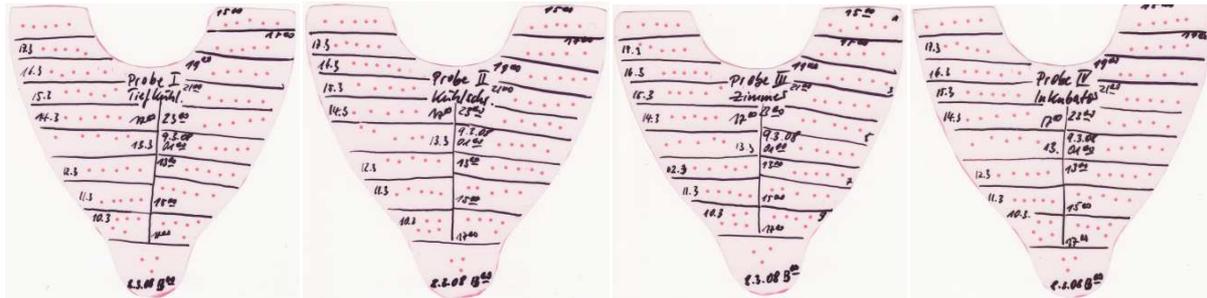


Abb. 29 Darstellung der 4 verschiedenen Prescale® Testfolien I, II, III und IV ( von links nach rechts) am zehnten Tag

Alle so generierten Referenzpunkte wurden stets 24 Stunden nach deren Erzeugung bei 800 dpi gescannt (siehe Kapitel 3.1.4), die Information der Farben(flächen)werte mittels der Zahni© Software (Kapitel 3.1.5) berechnet sowie sämtliche Daten zur statistischen Auswertung in die Programme Microsoft® Exel 2007 und OriginPro7.5© importiert. Hierzu wurden die Folien entsprechend der Abb. 30 jeweils in einen Referenzbereich (Ref) und einen simulierten Probanden-/ Feldbereich (f1) aufgeteilt. Die erzeugten Referenzpunkte wurden dann der Reihenfolge nach den römischen Zahlenwerten entsprechend ausgewertet. Hierzu wurde der jeweils 24 Stunden alte und somit neue Feldbereich (f1) ausgelesen und berechnet. Damit wanderte er sozusagen den Pfeilen entsprechend weiter. Die drei Punkte im Referenzfeld (Ref) und somit deren Farbgewichte wurden jedoch jeden Tag erneut erfasst und ausgewertet.

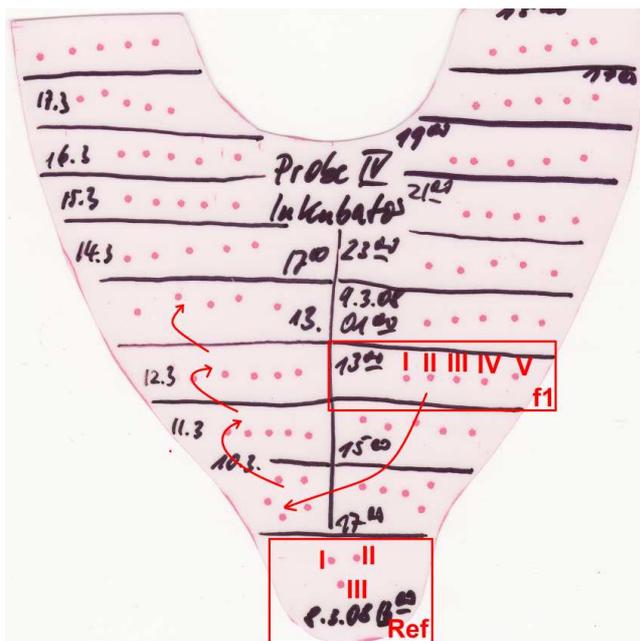


Abb. 30 schematische Darstellung der Auswerterroutine der Farbgewichte

### 3.3 Versuchsaufbau/ Versuchsdurchführung der in vivo Hauptstudie(n)

Für die Durchführung der Hauptstudie wurden zufällig ausgewählte Probanden gebeten, in jeweils 3 nacheinander in den Mund eingebrachte Prescale® Testfolien (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2) so fest wie möglich in ihrer habitueller Interkuspitation zu beißen und diese Position für 3 Sekunden zu halten bzw. den Mund erst nach Aufforderung wieder zu öffnen, wenn es sich um Kinder handelte. Hierdurch wurde die von Fuji™ [12] empfohlene Druckbelastungszeit von 3 Sekunden eingehalten. Zusätzlich wurden von den Testpersonen das Alter, das Geschlecht und das aktuelle Körpergewicht notiert. Bei den Kleinkindern erfolgte die Gewichtsbestimmung durch eine Korona Personenwaage vom Typ Leo [36]. Anschließend wurden unmittelbar nach deren Druckbelastung durch die Testpersonen im vorderen Bereich jeder Folie drei zusätzliche Referenzpunkte mit dem entsprechenden Referenzgerät aus dem Kapitel 3.1.3 gesetzt, welches hierzu für 3 Sekunden vollständig geschlossen gehalten wurde. Die so druckbelasteten Testfolien wurden dann der Reihenfolge nach und für jede Testperson gesondert in wieder verschließbaren PVC Probebeuteln bei etwa 20°C Raumtemperatur archiviert. Nach 24 Stunden erfolgten dann entsprechend den Kapiteln 3.1.4 und 3.1.5 der Scan der Druckfolien mit einer Auflösung von 800 dpi sowie die Weiterverarbeitung der Daten durch die Zahni© Software. Hierbei wurden sowohl der in Abbildung 31 als rot umrahmtes Feld 1 markierte Kauabdruckbereich als auch das rot eingeschlossene Referenzfeld 2 mit den entsprechenden 3 Referenzpunkten erfasst. Dabei ist stets darauf geachtet worden, dass keiner der 3 Referenzpunkte innerhalb des Kauabdruckbereiches gesetzt wurde. Somit kam es auch zu keinen Überlagerungen von Farbwerten zwischen den Flächenbereichen 1 und 2.

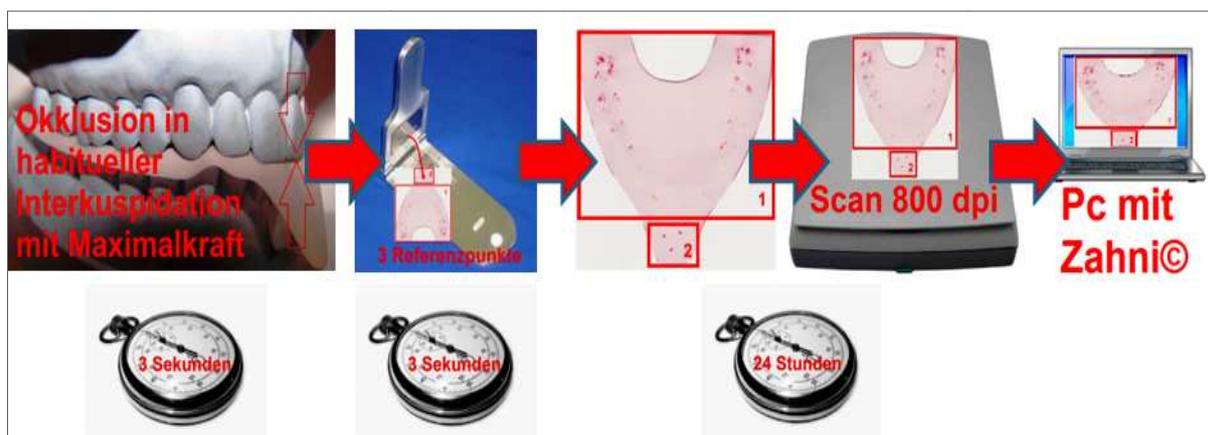


Abb. 31 schematische Darstellung des Versuchsablaufs am Probanden (von links nach rechts) mit der Prescale® Testfolie

Die gesammelten Daten wurden dann zur weiteren statistischen Auswertung in die Programme Microsoft® Excel 2007 und OriginPro7.5© importiert. Hiermit wurden dann die durch die Zahni© Software berechneten Gesamt(kau)flächen in [mm<sup>2</sup>], die Gesamt(kau)kräfte in [N] und Gesamt(kau)drücke in [MPa] sowie die bestimmten Maximal(kau)drücke in [MPa] der Testpersonen untersucht. Im Gegensatz zum Gesamt(kau)druck gibt hierbei der Maximal(kau)druck den größtmöglichen, an einer Einzelkontaktposition ableitbaren Okklusionsdruck auf der Prescale® Folie an und nicht wie der Gesamt(kau)druck den Quotient aus Gesamt(kau)Kraft und Gesamt(kau)fläche im gesamten Zahnbogen. Die gesammelten Messdaten wurden dann auf alters-, körperrgewichts- und geschlechtsspezifische Merkmale hingehend analysiert. Zusätzlich erfolgte die Berechnung der Gesamt(kau)kraftdifferenzen in [N] und Gesamt(kau)flächendifferenzen in [mm<sup>2</sup>] durch Subtraktion der entsprechenden Minimalwerte von den Maxima des Probanden. Hierdurch war es möglich, zu kontrollieren wie groß dabei die individuellen Abweichungen der einzelnen Probanden bei den drei Beißversuchen auf den Prescale™ Folien waren. Außerdem wurde durch einfache Häufigkeitsberechnung bestimmt, auf welcher der jeweiligen Prescale® Testfolien 1 bis 3 die Maxima der Gesamt(kau)kräfte in [N] und die der Maximal(kau)drücke in [MPa] zu finden waren. Dies sollte weiterhin helfen herauszufinden, ob der Einsatz von 3 Testfolien pro Proband notwendig war, um eine valide, reliabele Eruierung von Probandendaten mittels der modifizierten Fuji™ Prescale® Typ MS Druckfolie zu erzielen, oder ob nicht auch weniger Beißversuche dies ermöglichen.

## 4 Ergebnisse

Für die Berechnung sämtlicher Messwerte und die Darstellung der Ergebnisse wurden die Programme Zahni© (siehe Kapitel 3.1.5), Microsoft® Excel 2007 und die Software OriginPro7.5© von der Firma OriginLab genutzt, wobei zur statischen Auswertung der Daten hauptsächlich OriginPro7.5© mittels Einwege Anova benutzt wurde. Dafür wurde ein Großteil der Ausgangsdaten in tabellarischer Form durch einen Datentransfer aus der Zahni© Software in die entsprechenden anderen Anwendungen überführt. Es sind jedoch auch stellenweise Teilergebnisse via Snapshot Funktion direkt aus der Zahni© Software entnommen worden, d. h. es wurde hierfür sozusagen eine Kopie der Monitorabbildung erzeugt und direkt als Bilddatei gespeichert.

### 4.1 Ergebnisse der in vitro Vorstudie(n)

#### 4.1.1 Ergebnisse zum Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie

Wie auch schon in der Arbeit von FINK [9] lassen diese Ergebnisse zum druckabhängigen Färbungsverhalten der Prescale® Folie erkennen, dass „(...) der lineare Zusammenhang zwischen aufgebrachter Kraft und gemessenen Gewichtswert vom Durchmesser der kugelförmigen Probekörper abhing“ [9]. Durch die zuvor erstellte Eichwertdatenbank (siehe Kapitel 3.2.1) und die so durch die Software Zahni© (siehe Kapitel 3.1.5) berechneten Eichwert-/ Kalibrierungskurven konnte auch hier gezeigt werden, dass die Ergebnisse „(...) mit den Erkenntnissen anderer Autoren NG et al, OTTL „(übereinstimmen)“, die auch einen linearen bzw. schwach sigmoidalen Zusammenhang fanden“ [9]. Nach anfänglicher linearer Proportionalität zwischen Kraft und Farbgewicht nimmt der Anstieg der Eichkurven im weiteren Verlauf zunehmend ab. „Die Erklärung hierfür ist, dass die Bildpunkte starker Intensität bei hoher Kraft weniger stark zunehmen“ [9]. Diese Tatsache und die entsprechende Wandstärkeempfindlichkeit der Farbkapseln (siehe Kapitel 3.1.1) sind auch die Faktoren, welche den erfassbaren Druckbereich für die entsprechende(n) Prescale® Folie(n) begrenzen. Jedoch gelang es, aufgrund der zusätzlichen Oberflächenmodifizierung (siehe

Kapitel 3.1.2) und der genaueren Pixelerfassung bzw. Farbwertauswertung (siehe Kapitel 3.1.4) den auswertbaren Empfindlichkeitsbereich der Prescale® Folie Typ MS laut Hersteller Fuji™ [11] von 10 bis 50 MPa (siehe auch Tabelle 2 im Kapitel 3.1.1) auf einen Bereich von 2 bis 120 MPa zu erweitern. Damit erfasst die modifizierte Prescale® Folie Typ MS nun etwa den gleichen Druckbereich, wie die Prescale®50H Typ R Folie (siehe Kapitel 2.3 und 3.1.2), die laut ANDO [3] eine konstante Korrelation zwischen der Farbintensität und dem belastungsabhängigen Druck in einem Bereich von 5 bis 120 MPa ermöglicht. Auch hier zeigte sich eine hohe Zuverlässigkeit des von FINK und MÜLLER [9, 53] patentierten Verfahrens, jedoch waren auch hier Abweichungen von etwa 10% bei der Benutzung sowie der Lagerung der Prescale® Folie bei etwa 20°C zwischen der applizierten Kraft und den berechneten Kraftwerten vorhanden. Diese Ergebnisse sind im folgenden Kapitel 4.1.2 in der Abbildung mit der Nummer 38 ersichtlich und decken sich mit den Erkenntnissen anderer Autoren, denn so gab HIDAKA [26] einen Fehler von ca. 10 Prozent an und FINK [9] ermittelte in seiner Untersuchung Abweichungen von bis zu 12,8 Prozent. Diese Abweichungen sind identisch mit dem von Fuji™ [11] angegebenen Genauigkeitsbereich der Prescale® Folie (entsprechend der Spalte Accuracy in der Abb. 32).

	Two-sheet type	Mono-sheet type
Accuracy	±10% or less (when measured with densitometer at 23°C/73.4°F, 65% RH)	
Recommended temperature	20°C ~ 35°C (68°F ~ 95°F)	
Recommended humidity	35%RH ~ 80%RH	

**Abb. 32 aus [11] Herstellerangaben zum Performance Bereich der Fuji™ Prescale® Folien**

Dieser Fehler entstand sowohl bei den Druckversuchsergebnissen mittels der Druck-/Zugmaschine Instron Z010 als auch später bei dem Abgleich des Referenzgerätes (siehe Kapitel 3.1.3 und 3.2.1), da dessen Kalibrierung durch erzeugte Messwerte mittels der Instron Z010 erfolgte und den limitierenden Faktor die Prescale® Folie selbst darstellte. Zur Verifizierung der von FINK [9] und den anderen Autoren OTTL [58] sowie NG et al. [55] bereits hinreichend dargestellten Ergebnisse wurde jedoch aufgrund der enormen Datenmenge, bis auf die auszugsweise Snapshot Darstellung von zwei Kalibrierungskurven, welche in den Abbildungen 33 und 34 zu sehen sind und die Resultate der 4 und 5 Millimeter Referenzkugelversuche (siehe Kapitel 3.2.1) darstellen, von einer detaillierten tabellarischen Auflistung sämtlicher Messwerte ab-

gesehen. Einige ermittelte und in die Zahn© Software (Kapitel 3.1.5) aufgenommene Eich- bzw. Messwerte sind jedoch der Abbildung 26 im Kapitel 3.2.1 entnehmbar.

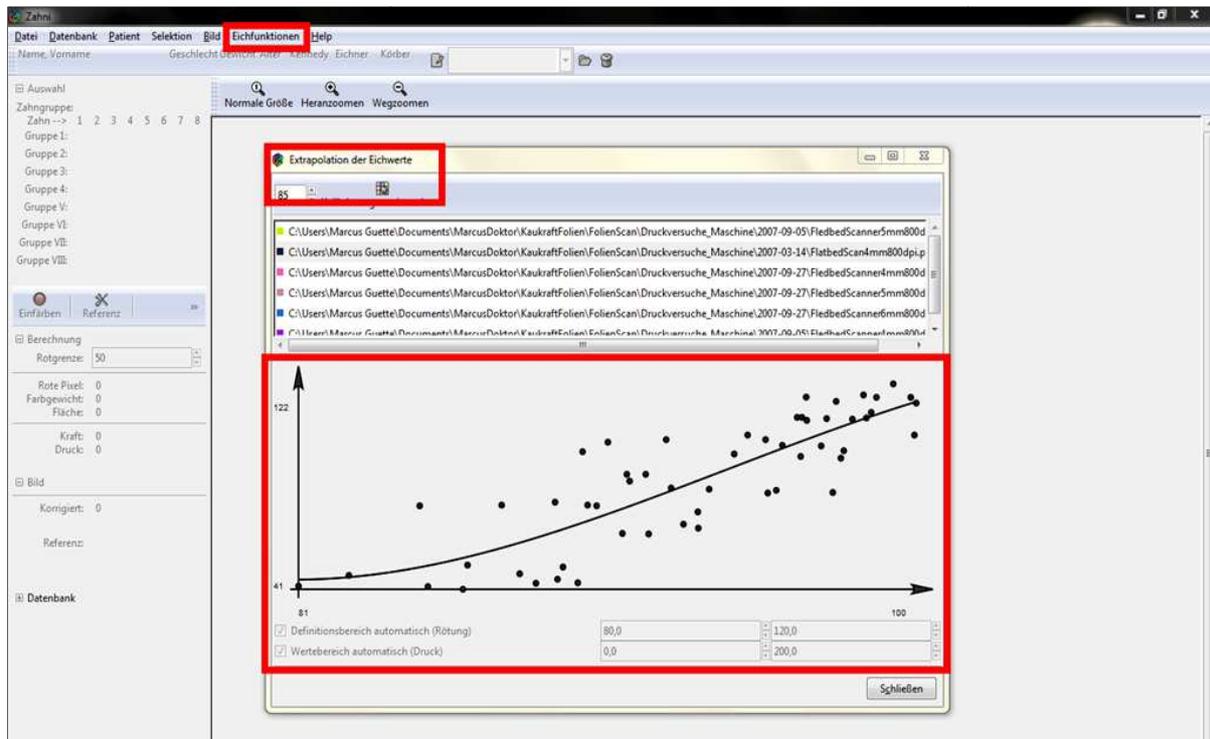


Abb. 33 Darstellung der extrapolierten 4 mm Eichwertkurve & geöffnete(s) Fenster (Maske) Extrapolation der Eichwerte

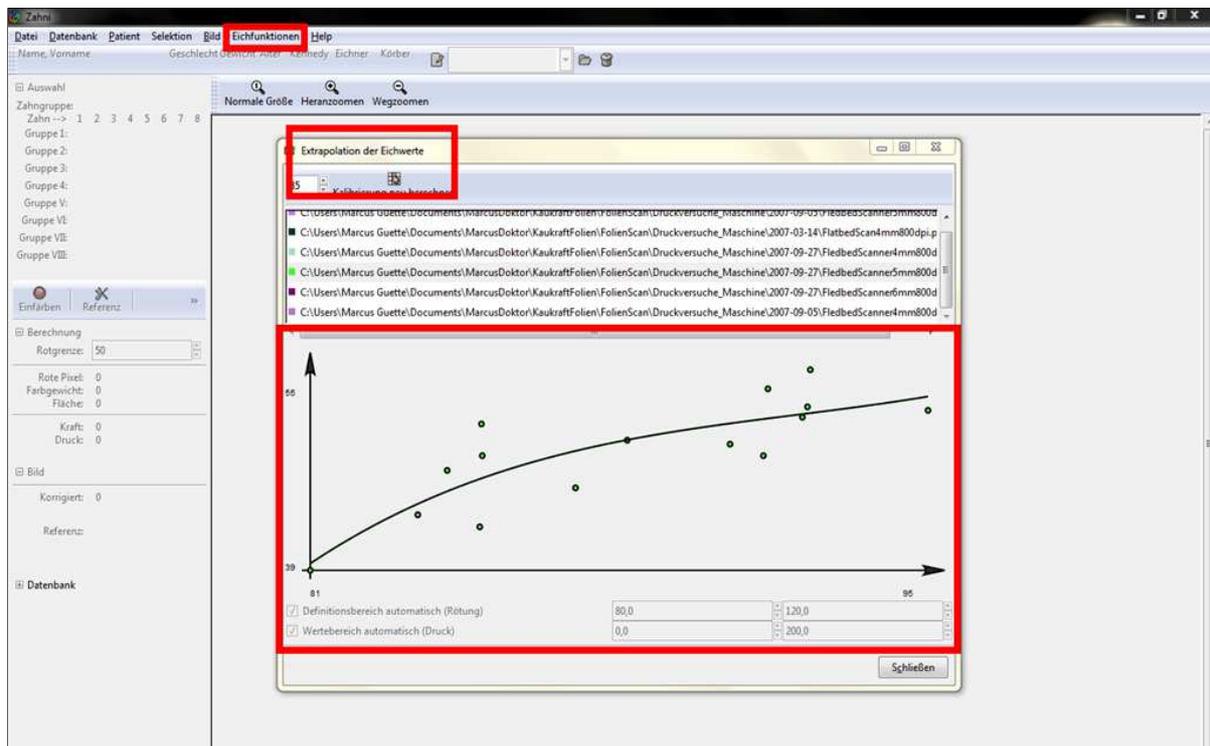
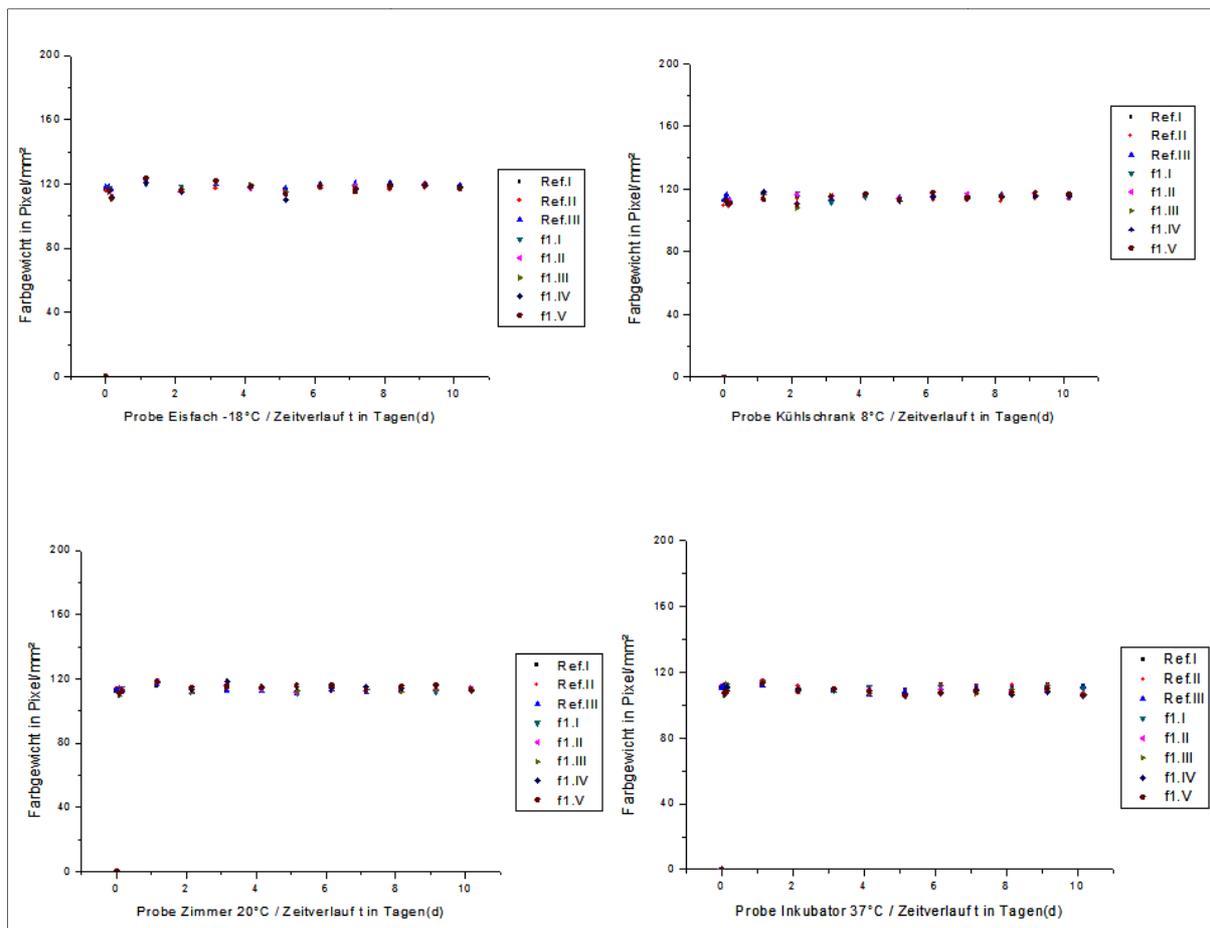


Abb. 34 Darstellung der extrapolierten 5 mm Eichwertkurve & geöffnete(s) Fenster (Maske) Extrapolation der Eichwerte

### 4.1.2 Ergebnisse zum lagerungsspez. Druck-/ Färbungsverhalten der Prescale® Folie

Die Auswertung sämtlicher Bildinformationen auf den 4 verschiedenen Folien, d. h. dem Kapitel 3.1.2 folgend der einzelnen Referenzpunkte im Referenzfeld (Ref) und des jeweils neuen Feldbereichs (f1) ergab, dass bei allen Temperaturen die ermittelten Farbgewichte (siehe Abb. 35) nahezu gleich waren und relativ konstant blieben.



**Abb. 35** Zeitverlaufsdarstellung der berechneten Referenzfarbgewichte zu den entsprechenden Referenzpunkten (Ref.I-Ref.III) sowie den 5 neuen Referenzpunkten (f1.I-f1.V) in Abhängigkeit von den verschiedenen Lagerungstemperaturen

Diesbezüglich wurden für die einzelnen Referenzpunkte, wie es in den anschließenden Auszügen der entsprechenden Statistikprotokolltabellen zu sehen ist, folgende Farbgewichtsmittelwerte in [Pixel/mm²] mit ihren entsprechenden Standardabweichungen (SD) sowie Standardfehlern (SE) ermittelt:

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	117,33	1,39344	0,38647
Data1_Ref.II	13	116,61385	1,01987	0,28286
Data1_Ref.III	13	118,98615	1,4127	0,39181

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	117,88417	2,68025	0,77372
Data1_f1.II	12	117,51083	3,06202	0,88393
Data1_f1.III	12	117,62833	3,13558	0,90516
Data1_f1.IV	12	117,38417	3,61174	1,04262
Data1_f1.U	12	117,45417	3,414	0,98554

Tab. 3 Statistikprotokoll berechnete Farbgewichte in [Pixel/mm<sup>2</sup>] Folie I (Probe Eisfach) bei - 18°C

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	114,95385	1,61418	0,44769
Data1_Ref.II	13	112,33462	1,65638	0,4594
Data1_Ref.III	13	115,41385	1,35028	0,3745

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	114,68	2,18233	0,62998
Data1_f1.II	12	115,46583	2,03956	0,58877
Data1_f1.III	12	114,10917	2,73076	0,7883
Data1_f1.IV	12	114,3	2,44673	0,70631
Data1_f1.U	12	114,4725	2,59746	0,74982

Tab. 4 Statistikprotokoll berechnete Farbgewichte in [Pixel/mm<sup>2</sup>] Folie II (Probe Kühlschrank) bei +8°

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	112,50615	1,14475	0,3175
Data1_Ref.II	13	113,67538	1,46263	0,40566
Data1_Ref.III	13	113,1	1,36272	0,37795

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	113,88667	2,00695	0,57936
Data1_f1.II	12	113,7175	1,9457	0,56167
Data1_f1.III	12	113,85667	2,57272	0,74268
Data1_f1.IV	12	114,6025	2,10085	0,60646
Data1_f1.U	12	114,60167	2,1239	0,61312

Tab. 5 Statistikprotokoll berechnete Farbgewichte in [Pixel/mm<sup>2</sup>] Folie III (Probe Zimmer) bei +20°C

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	111,11154	1,61097	0,4468
Data1_Ref.II	13	111,22923	1,53871	0,42676
Data1_Ref.III	13	109,94077	1,44675	0,40126

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	109,59583	2,28592	0,65989
Data1_f1.II	12	109,23917	2,16973	0,62635
Data1_f1.III	12	108,73417	2,65122	0,76534
Data1_f1.IV	12	108,62167	2,09867	0,60584
Data1_f1.V	12	108,31917	2,01576	0,5819

Tab. 6 Statistikprotokoll berechnete Farbgewichte in [Pixel/mm<sup>2</sup>] Folie IV (Probe Inkubator) bei +37°C

Nach der anschließenden Auswertung der einzelnen Farbgewichte, d.h. vielmehr der durch das Referenzgerät (siehe Kapitel 3.1.3) erzeugten Referenzpunkte konnte festgestellt werden, dass auch die Berechnung der zugehörigen Referenzkräfte auf den verschiedenen Prescale® Testfolien I, II, III und IV temperaturabhängig zwar leicht unterschiedlich ausfiel, aber in dem jeweiligen Temperaturbereich (siehe Abb. Nr. 36) nur geringfügig schwankende, annähernd gleiche Kraftwerte ermittelt wurden.

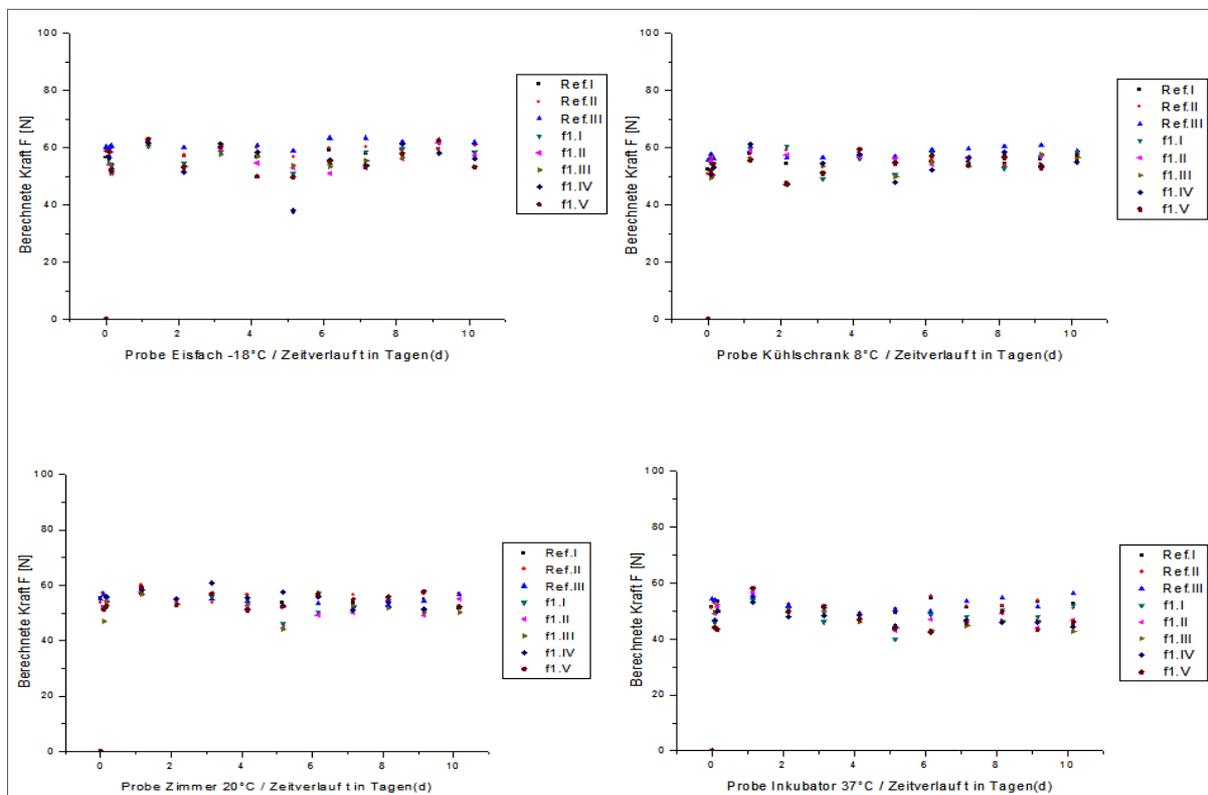


Abb. 36 Zeitverlaufsdarstellung der berechneten Referenzkräfte zu den entsprechenden Referenzpunkten (Ref.I-Ref.III) sowie den 5 neuen Referenzpunkten (f1.I-f1.V) in Abhängigkeit von den verschiedenen Lage-  
 rungstemperaturen

Durch die Auszählung der einzelnen Pixel pro Quadratmillimeter (Farbgewichte) auf den jeweiligen Fuji™ Prescale® Testfolien I bis IV durch die Zahni© Software (siehe Kapitel 3.1.5) und den Abgleich mit der programminternen Eichwertdatenbank (siehe Kapitel 3.2.1) wurden zu den Referenzpunkten nach deren Berechnung und statistischer Auswertung (entsprechend den Tabellen 7 bis 10) folgende Kraftmittelwerte in [N] mit ihren Standardabweichungen (SD) sowie Standardfehlern (SE) ermittelt:

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	57,89615	1,89006	0,52421
Data1_Ref.II	13	59,41308	1,53245	0,42503
Data1_Ref.III	13	61,22769	1,38725	0,38475

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_F1.I	12	56,93667	3,19489	0,92229
Data1_F1.II	12	55,41667	3,90807	1,12816
Data1_F1.III	12	55,3575	2,68966	0,77644
Data1_F1.IV	12	55,37667	6,52783	1,88442
Data1_F1.U	12	55,66333	4,59257	1,32576

Tab. 7 Statistikprotokoll berechnete Kräfte in [N] Folie I (Probe Eisfach) bei -18°C

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	54,83154	1,56669	0,43452
Data1_Ref.II	13	55,09923	2,59805	0,72057
Data1_Ref.III	13	58,20692	1,79693	0,49838

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_F1.I	12	55,40667	3,55099	1,02508
Data1_F1.II	12	56,0075	1,51679	0,43786
Data1_F1.III	12	54,0475	3,6067	1,04116
Data1_F1.IV	12	53,995	4,14616	1,19689
Data1_F1.U	12	54,28083	3,22646	0,9314

Tab. 8 Statistikprotokoll berechnete Kräfte in [N] Folie II (Probe Kühlschrank) bei +8°C

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	53,99769	1,58188	0,43874
Data1_Ref.II	13	55,74077	2,10629	0,58418
Data1_Ref.III	13	54,66231	1,89513	0,52561

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	52,92417	3,07243	0,88694
Data1_f1.II	12	52,615	3,69791	1,0675
Data1_f1.III	12	52,53417	4,53594	1,30941
Data1_f1.IV	12	54,89083	2,99015	0,86318
Data1_f1.V	12	54,43917	2,75644	0,79571

Tab. 9 Statistikprotokoll berechnete Kräfte in [N] Folie III (Probe Zimmer) bei +20°C

Statistik Zusammenfassung

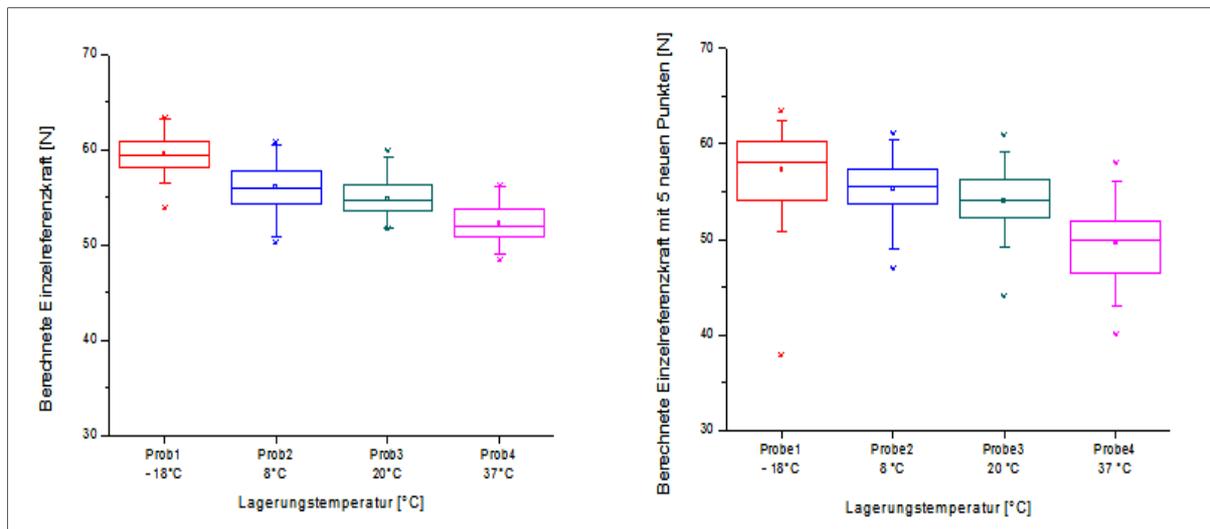
Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_Ref.I	13	51,98462	1,81404	0,50312
Data1_Ref.II	13	52,34077	1,87198	0,51919
Data1_Ref.III	13	52,52308	2,33392	0,64731

Statistik Zusammenfassung

Datensatz	N	Mittelwert	SD	SE
Data1_f1.I	12	48,75833	3,64921	1,05344
Data1_f1.II	12	48,54917	3,61521	1,04362
Data1_f1.III	12	47,60083	4,31185	1,24472
Data1_f1.IV	12	47,105	2,89139	0,83467
Data1_f1.V	12	47,055	4,56911	1,31899

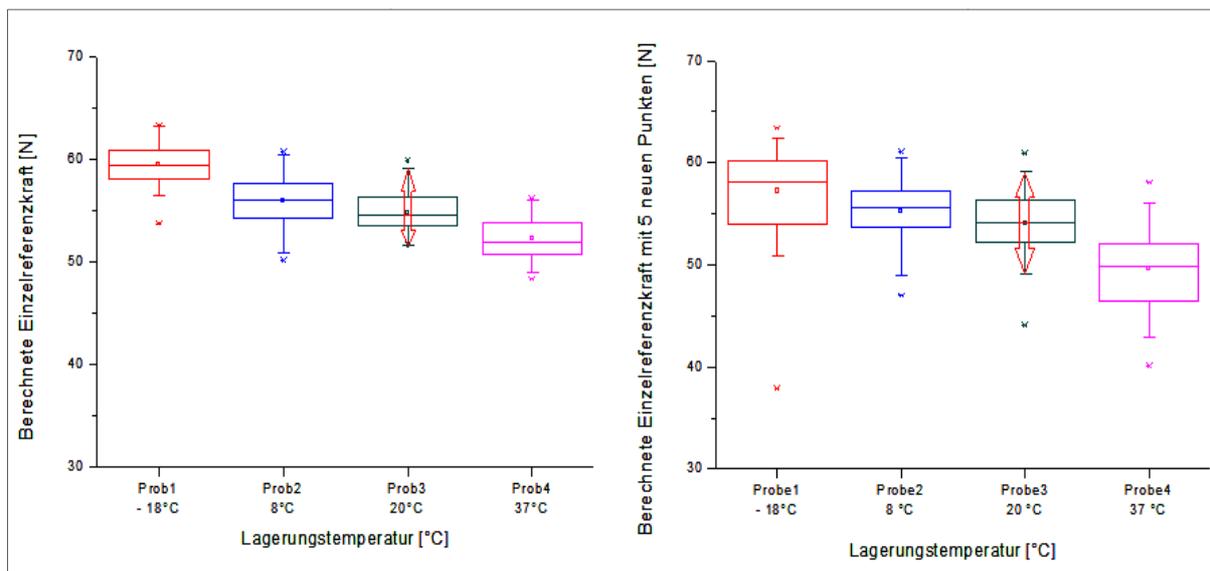
Tab. 10 Statistikprotokoll berechnete Kräfte in [N] Folie IV (Probe Inkubator) bei +37°C

Somit kann konstatiert werden, dass das Referenzgerät reproduzierbare und verlässliche Referenzpunkte mit einer definierten Kraft und Fläche ähnlich der Instron Z010 (siehe Kapitel 3.1.3) erzeugte, auch wenn diese auf der Prescale® Folie temperaturabhängige Schwankungen aufwies. Die statistische Berechnung der Einzelreferenzkräfte bei +20°C für die Referenzpunkte Ref.I bis Ref.III im Vergleich betrachtet zu f1.I bis f1.V (siehe Boxplots Abb. 37 links) zeigte aber mit 54,8 SD ± 1,9 Newton die geringsten Schwankungen. Die 5 zusätzlich neu geschaffenen, zeitversetzten Referenzpunkte (siehe Boxplots Abb. 37 rechts) hatten aber insgesamt betrachtet mit 54,0 SD ± 3,0 Newton die kleinste Streubreite gegenüber allen anderen Versuchstemperaturen (-18°C, +8°C und +37°C) und entsprachen annähernd den zuerst generierten Referenzpunkten Ref.I bis Ref.III bei +20°C.



**Abb. 37** Boxplots zu den berechneten Einzelreferenzkräften (li.) im Vergleich zu den Einzelreferenzkräften mit den 5 zusätzlich erzeugten Referenzpunkten (re.) in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

Wie die Abbildung Nummer 38 mit den entsprechenden roten Pfeilspitzen verdeutlicht, ist dabei die obere und untere Whiskerlänge und somit der gesamte Whiskerbereich bei +20°C mit  $\leq 10\%$  signifikant kleiner als vergleichsweise mit  $\leq 12,5\%$  bei -18°C, +8 °C und +37°C, wenn man die statistischen Ausreißer vernachlässigt. Dies entspricht dem von Fuji™ [11] angegebenen Genauigkeitsbereich der Prescale® Folie bei etwa +23°Celsius (analog Kapitel 4.1.1 Abbildung 32).



**Abb. 38** Boxplots zu den berechneten Einzelreferenzkräften (li.) im Vergleich zu den Einzelreferenzkräften mit den 5 zusätzlich erzeugten Referenzpunkten (re.) in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur und ange deuteten Whiskerbereich bei 20°C (rote Pfeile)

Die zudem der Vollständigkeit halber durchgeführten statistischen Auswertungen zu den Referenzpunkten Ref.I bis Ref.III, welche später als markierte Selektion immer als grün umrahmtes Referenzfeld (siehe Abb. 23 und 24) durch die Zahni© Software als ein Gesamtwert bzw. Farbgewicht betrachtet werden (siehe Kapitel 3.1.5) ergaben für die Einzel- ( $F_E$ ) bzw. Gesamtreferenzkräfte ( $F_G$ ) für die jeweilige Temperaturen (T in [°C]) entsprechend der Abbildung 39 und Tabelle 11 folgende(n) Median(e) ( $y_{med}$ ) und Mittelwert(e) ( $y_{arithm}$ ) mit Standardabweichung(en) (SD) in Newton [N]:

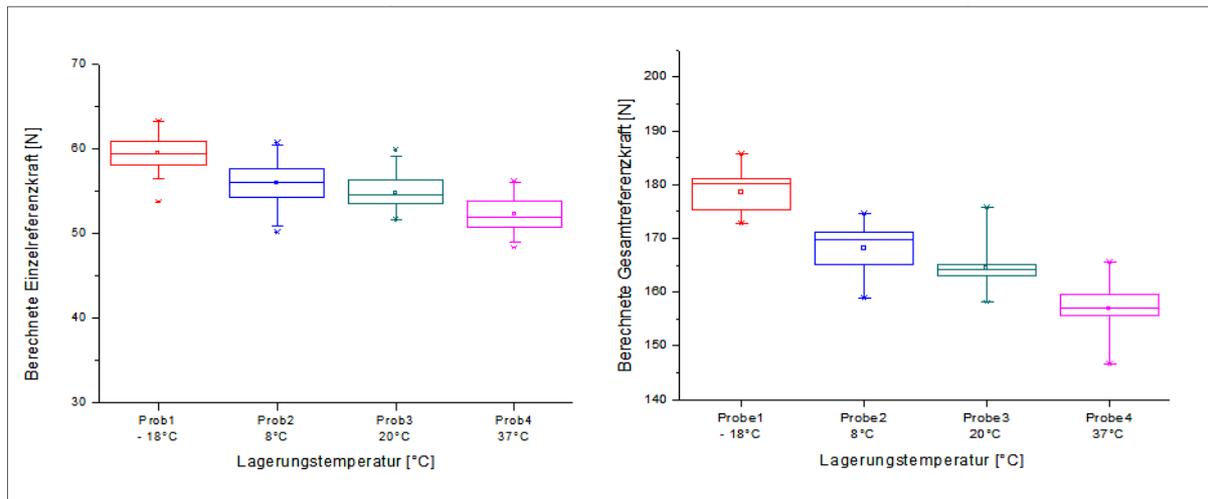


Abb. 39 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzkräften in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

T [°C]	$F_E$ $y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$F_G$ $y_{med}$	$y_{arithm}$	SD
-18	59,4	59,5	± 2,0	180,2	178,5	± 4,0
+8	56,0	56,0	± 2,5	169,7	168,1	± 5,0
+20	54,6	54,8	± 1,9	164,2	164,4	± 4,0
+37	51,9	52,2	± 2,0	156,8	157,1	± 4,7

Tab. 11 statistisch berechnete Einzel- ( $F_E$ ) bzw. Gesamtreferenzkraft ( $F_G$ ) mit entsprechenden Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur (T in [°C])

Analog wurden folgende Daten entsprechend der Abbildung 40 und der Tabelle 12 für die Einzel- ( $A_E$ ) bzw. Gesamtreferenzflächen ( $A_G$ ) in Quadratmillimeter [mm<sup>2</sup>] nach deren statistischer Auswertung durch die entsprechenden Programme ermittelt:

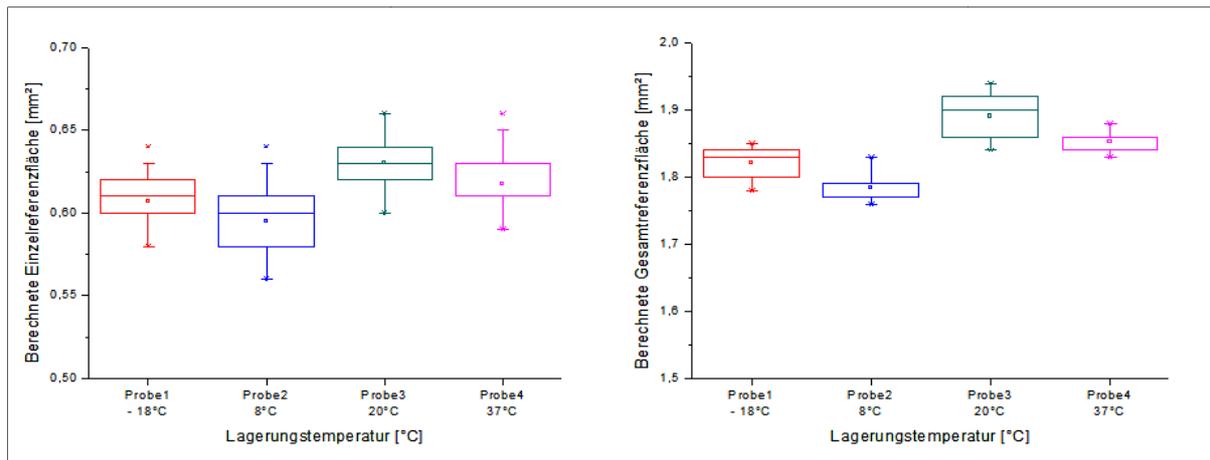


Abb. 40 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzflächen in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

T [°C]	$A_E$	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$A_G$	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD
-18	0,61	0,60	± 0,02		1,83	1,82	± 0,02	
+8	0,60	0,59	± 0,02		1,79	1,78	± 0,02	
+20	0,63	0,63	± 0,01		1,90	1,89	± 0,03	
+37	0,61	0,62	± 0,02		1,86	1,85	± 0,02	

Tab. 12 statistisch berechnete Einzel- ( $A_E$ ) bzw. Gesamtreferenzfläche ( $A_G$ ) jeweils in [mm²] mit entsprechenden Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur (T in [°C])

Es wurde somit festgestellt, dass bei ca. +20°C mit einer berechneten Einzelkraft von etwa 55 Newton eine Einzelreferenzfläche von etwa 0,6 mm² in der Prescale® Folie erzeugt wurde. Der Flächenabdruck entsprach der im Durchmesser 4 mm großen Referenzkugel mit der vordefinierten Kraft des Referenzgerätes (Kap. 3.1.3) entspricht. Die Abbildung 41 sowie die Tab. 13 geben letztendlich einen Überblick darüber, wie sich lagerungsabhängig bei den vier verschiedenen Temperaturen (T in [°C]) das Referenzdruckverhalten der Referenzpunkte Ref.I bis Ref.III auf den Prescale® Folien änderte. Dementsprechend konnten nach deren Bilderfassung und anschließender Auswertung durch die Zahni© Software sowie der weiteren Statistikanalyse für die Einzel- ( $P_E$ ) bzw. Gesamtreferenzdrücke ( $P_G$ ) in Analogie zu den vorherigen Darstellungen folgende Referenzdruckwerte in Megapascal [MPa] berechnet werden:

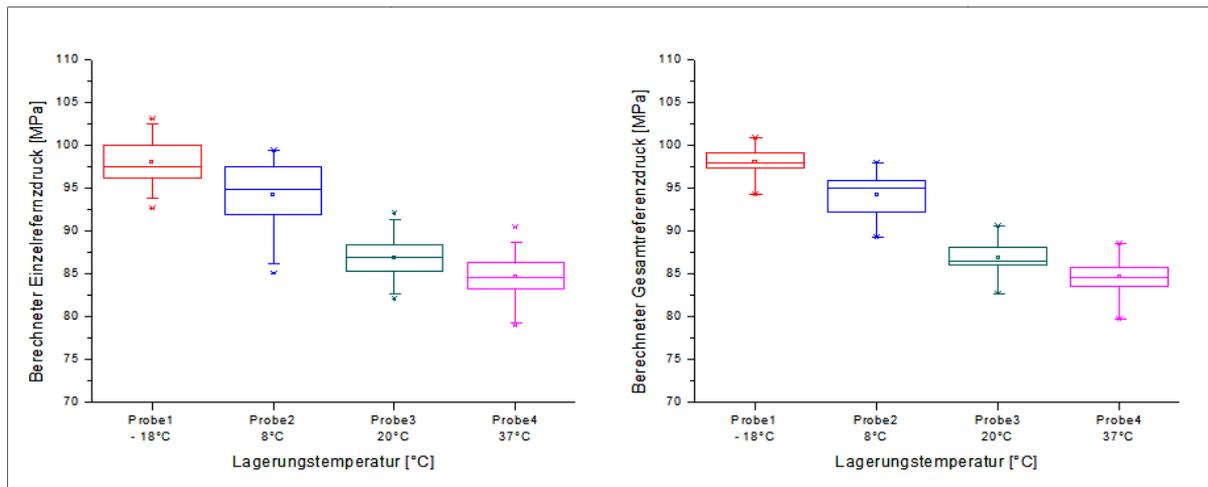


Abb. 41 Boxplots zu den berechneten Einzel- bzw. Gesamtreferenzdrücken in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

T [°C]	$P_E$	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$P_G$	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD
-18	97,48	98,05	± 2,54	97,94	98,05	± 1,77		
+8	94,83	94,24	± 3,68	95,10	94,21	± 2,66		
+20	86,98	86,95	± 2,20	86,52	86,95	± 2,04		
+37	84,55	84,64	± 2,43	84,57	84,63	± 2,17		

Tab. 13 statistisch berechnete Einzel- ( $P_E$ ) bzw. Gesamtreferenzdrücke ( $P_G$ ) jeweils in [MPa] mit entsprechenden Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur (T in [°C])

Auch hier ist erkennbar, dass die Fuji™ Prescale® Druckmessmethode bei etwa +20°C die insgesamt kleinsten Standardabweichungen aufzeigt, auch wenn die Abweichung bei der berechneten Gesamtreferenzfläche mit SD ± 0,03 bei +20°C im Gegensatz zu SD ± 0,02 bei allen anderen Temperaturen unwesentlich größer ist. Jedoch ist dies gewissermaßen ein Beleg für bessere Druckempfindlichkeit und chemische Reaktionslage der Folie bei +20 Grad Celsius, denn die von den Farbge- wichten abgeleiteten Druck- bzw. Kraftwerte zeigen deutlich, dass die Prescale® Fo- lie Typ MS in diesem Temperaturbereich genauere Messergebnisse liefert. Deshalb erfolgten alle Versuche mit den Prescale® Folien Typ MS an den Probanden bei ei- ner Temperatur von nahezu +20°C und es wurden sämtliche Folien vor und nach ihrer Verwendung bei dieser Temperatur gelagert, um mögliche Fehler bei der Erue- rung der Hauptstudie (siehe Kapitel 4.2 ff.) so gering wie möglich zu halten.

## 4.2 Ergebnisse der in vivo Hauptstudie

Die in vivo Hauptstudie wurde mittels der manuell modifizierten Prescale® Testfolien Typ MS (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2) an insgesamt 178 zufällig ausgewählten Probanden unterschiedlichen Alters und Geschlechts durchgeführt. Hierbei soll die Tabelle Nr. 14 einen Gesamtüberblick über die Zusammensetzung der Kohorten geben, d. h. genauer gesagt über deren geschlechtsspezifische Anzahl (N) in den entsprechenden Altersintervallen. Zusätzlich und diesem Kapitel gewissermaßen vorwegnehmend ist dabei ebenfalls die in den jeweiligen Altersgruppen im Schlussbiss maximal ermittelte Gesamtkaukraft (Fmax in Newton) der Testpersonen angegeben.

N	N ♂	N ♀	Alter	Methode	Besonderheit	Fmax[N]
(178)						
24	12	12	3-8	Prescale	keine	1471
22	11	11	9-12	Prescale	keine	1363
28	14	14	13-19	Prescale	keine	2300
38	19	19	20-29	Prescale	keine	2390
22	11	11	30-39	Prescale	keine	2280
20	10	10	40-59	Prescale	keine	2961
24	12	12	60-94	Prescale	keine	1654

Tab. 14 Gesamtübersicht über Probandenzusammensetzung und ermittelte maximale Gesamtkaukraft (Fmax) in Newton

Hierbei sind nicht nur die gemessenen Gesamtkaukraftwerte in der Tabelle 14, sondern sämtliche Daten der Hauptstudie entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen der Vorstudien (siehe Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) sowie den Herstellerangaben von Fuji™ [11] folgend bei einer Umgebungstemperatur von etwa +20°C erhoben worden.

Mit Bezug darauf konnten nach den Untersuchungen aller weiblichen Testpersonen zu den untersuchten Parametern, d. h. 1. der maximalen Gesamt(kau)fläche (max.  $A_G$  in [mm<sup>2</sup>]), 2. der maximalen Gesamt(kau)kraft (max.  $F_G$  in [N]) und 3. der maximalen Gesamt(kau)fläche (max.  $P_G$  in [MPa]) sowie 4. des Maximaldrucks ( $P_{max}$  in [MPa]) entsprechend der Tabelle 15 folgende Messwerte mit Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) sowie die Minimal- und Maximalwerte ( $y_{min} / y_{max}$ ) nach deren statistischer Berechnung ermittelt werden:

Parameter	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$y_{min}$	$y_{max}$
max. $A_G$	16,7	19,4	± 12,0	1,1	51,8
max. $F_G$	810,1	885,3	± 515,0	55,9	2032,5
max. $P_G$	49,0	51,1	± 12,8	26,2	78,3
$P_{max}$	67,2	69,2	± 16,9	33,5	101,9

**Tab. 15** Ergebnisdarstellung der statistisch ermittelten maximalen Gesamt(kau)fläche (max.  $A_G$  [mm<sup>2</sup>]), -drucks (max.  $P_G$  [MPa]) und -kraft (max.  $F_G$  [N]) sowie dem Maximaldruck ( $P_{max}$  [MPa]) mit Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) sowie den Minimal- und Maximalwerten ( $y_{min} / y_{max}$ ) der weiblichen Probanden

Die zusätzliche Anpassung der weiblichen Probandendaten gemäß einer Cauchy-Lorentz-Verteilung zeigt nach dem nichtlinearen Fitting gemäß der Abbildung Nr. 42 eine platykurtische Verteilung der maximalen Gesamt(kau)flächenwerte mit einem Gipfel der Kurve bei etwa 25 mm<sup>2</sup> im Alter von ca. 30 Jahren sowie eine linksschiefe, eher supergaußförmige Kurtosis der maximalen Gesamt(kau)kräfte mit einem Gipfel des Graphen der Funktion bei annähernd 1125 Newton im Bereich um das zweite Lebensjahrzehnt. Die weiteren grafischen Darstellungen der berechneten maximalen Gesamt(kau)drücken (max.  $P_G$ ) bzw. Maximaldrücken ( $P_{max}$ ) zeigen jedoch eine deutliche Streuung aller Messwerte und lassen somit auch keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit zum Alter der Probandinnen erkennen. Vielmehr verteilen sie sich gleichmäßig ober- und unterhalb einer gedachten Geraden der Funktionen: 1.)  $f(x)=50$  ( $x \in \mathbb{N}$ ) für max.  $P_G$  in [MPa] und 2.)  $f(x)=70$  ( $x \in \mathbb{N}$ ) für  $P_{max}$  in [MPa].

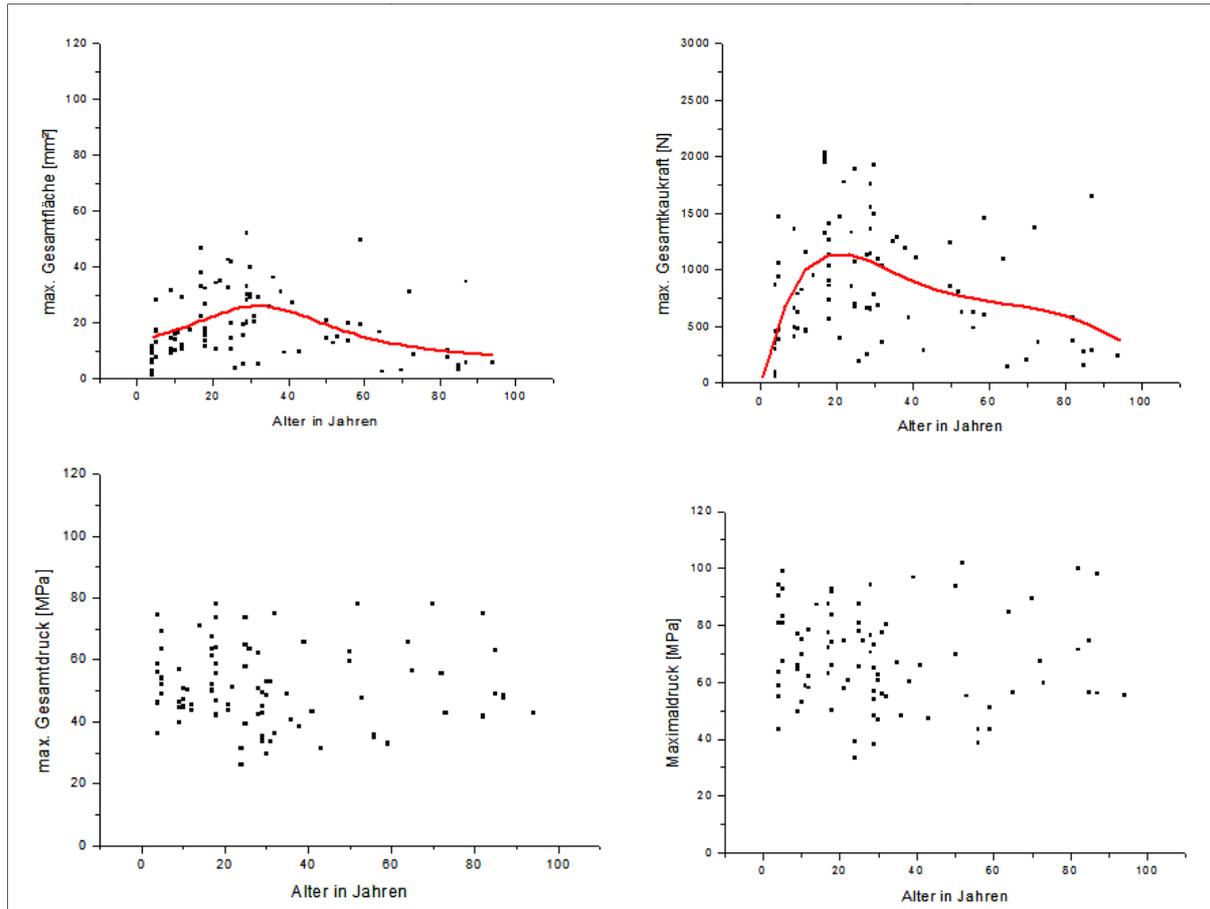


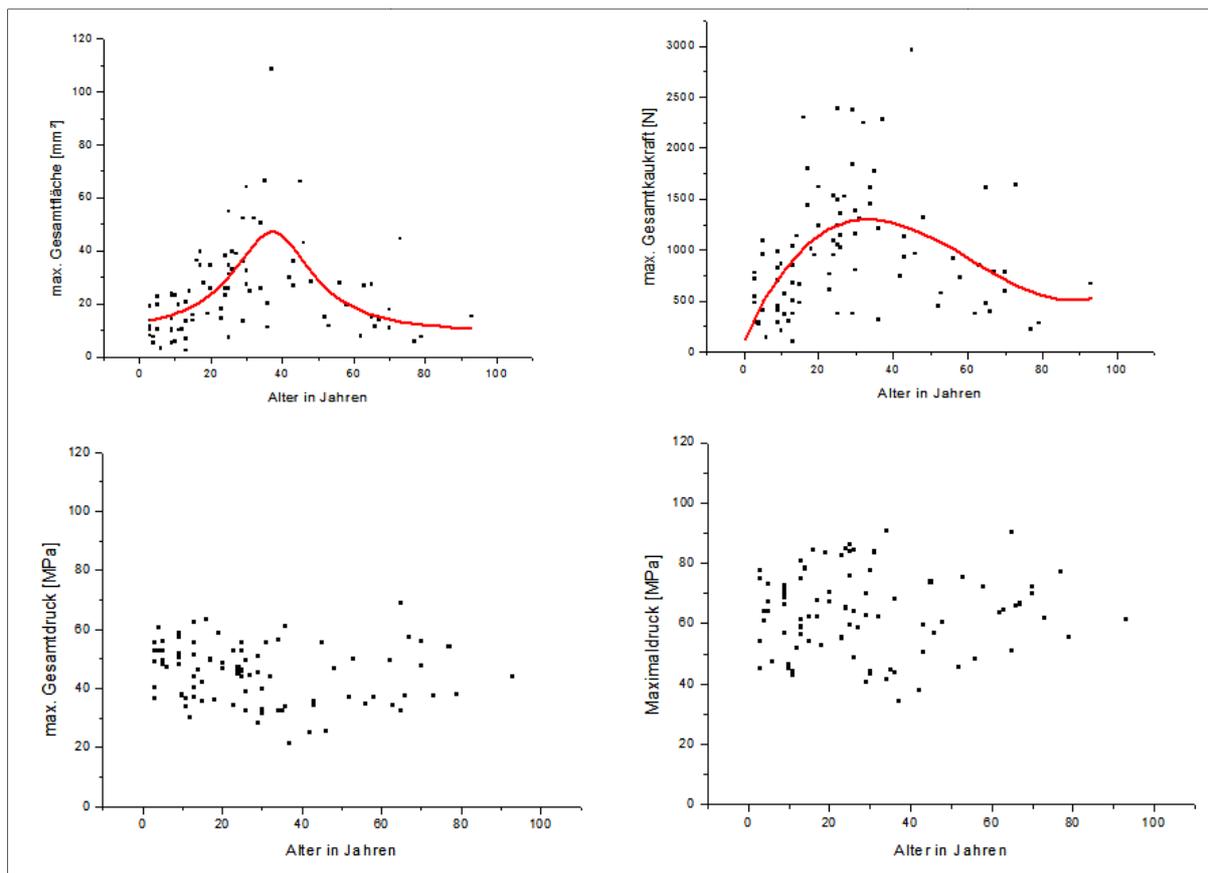
Abb. 42 grafische Ergebnisdarstellung (nur Maximalwerte) der ermittelten Gesamt(kau)flächen, -drücke und -kräfte sowie den berechneten Maximaldrücken der weiblichen Probanden in Abhängigkeit von deren Alter

Gemäß der Ergebnisdarstellung der weiblichen Probanden gibt die Tab. 16 die statistische Komplettauswertung der männlichen Versuchsergebnisse wie folgt wieder:

Parameter	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$y_{min}$	$y_{max}$
max. $A_G$	20,5	24,3	± 17,1	2,4	108,7
max. $F_G$	854,7	956,0	± 590,1	95,5	2961,4
max. $P_G$	46,1	44,9	± 9,9	21,5	68,9
$P_{max}$	64,0	63,5	± 13,4	34,4	90,7

Tab. 16 Ergebnisdarstellung der statistisch ermittelten maximalen Gesamt(kau)fläche (max.  $A_G$  [mm<sup>2</sup>]), -drucks (max.  $P_G$ [MPa]) und -kraft (max.  $F_G$  [N]) sowie dem Maximaldruck ( $P_{max}$  [MPa]) mit Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) sowie den Minimal- und Maximalwerten ( $y_{min}$  /  $y_{max}$ ) der männlichen Probanden

Die zusätzlichen grafischen Darstellungen der männlichen Gesamtergebnisse in der Abbildung 43 lassen erkennen, dass die gefittete Kurve zu den berechneten maximalen Gesamt(kau)flächen die Form einer Normalverteilung besitzt. Der Kurvengipfel liegt hier mit ca. 48 mm<sup>2</sup> bei einem Alter von rund 40 Jahren und die theoretische Halbwertsbreite der Funktion zwischen dem 20sten und 50sten Lebensjahr. Auch die maximal ermittelten Gesamtkaukräfte belegen nach der gefitteten Präsentation eine annähernd mesokurtische Verteilung, wobei der Wendepunkt der eher flachgipfligen Kurve bei etwa 35 Jahren und einer Kraft von circa 1250 Newton liegt. Zusätzlich zeigen auch hier die grafischen Darstellungen der ermittelten Kaudrücke der männlichen Testpersonen keine altersabhängigen Unterschiede auf. In diesem Fall streuen die Daten um einen mittleren Wert von rund 45 SD ± 10 MPa für die berechneten Gesamt(kau)drücke und rund 64 SD ± 13 MPa für die eruierten Maximal(kau)drücke.



**Abb. 43** grafische Ergebnisdarstellung (nur Maximalwerte) der ermittelten Gesamt(kau)flächen, -drücke und -kräfte sowie den berechneten Maximaldrücken der männlichen Probanden in Abhängigkeit von deren Alter

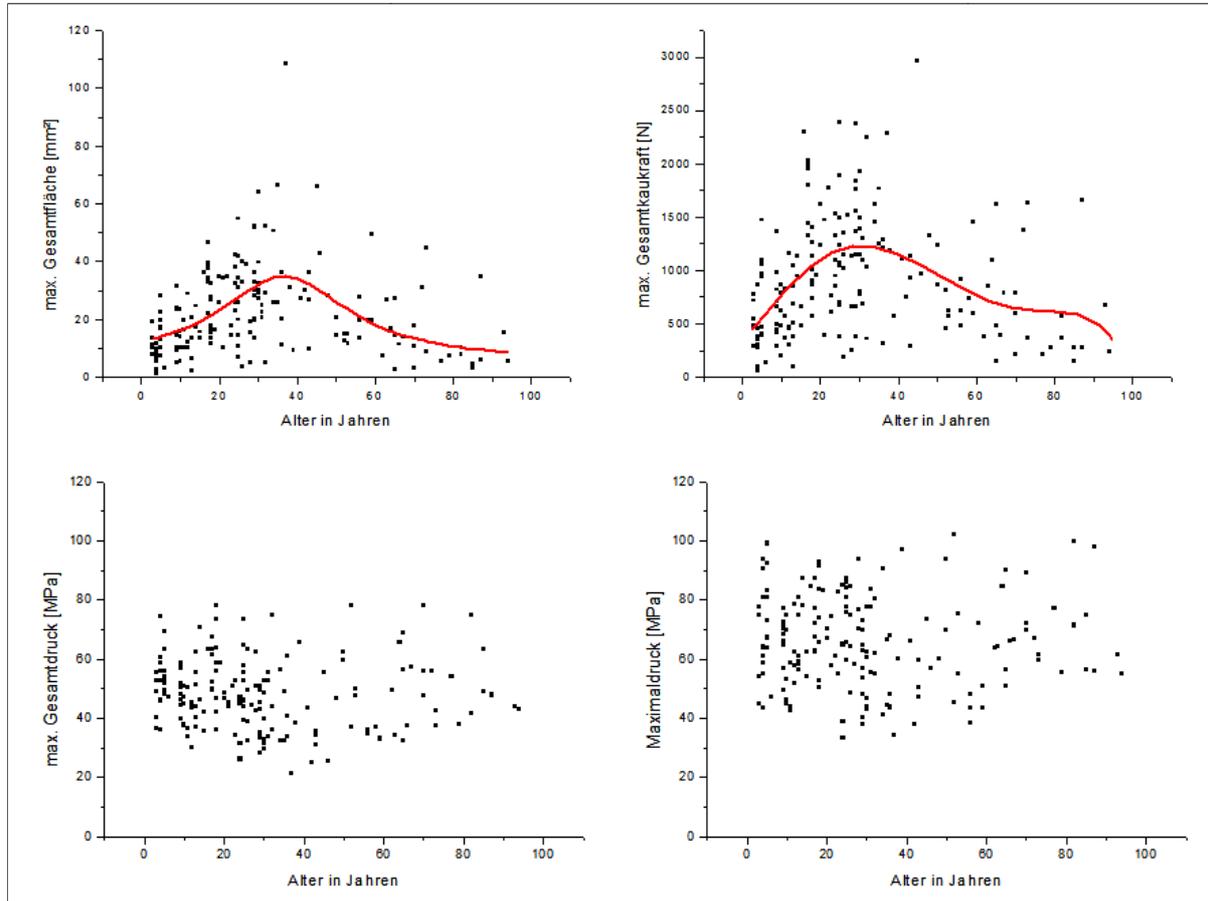
Die Tabelle 17 veranschaulicht wiederum die Ergebnisse aller Probanden und so wurden folgende Gesamtstatistikwerte gemäß den Tabellen 15 und 16 ermittelt:

Parameter	$y_{med}$	$y_{arithm}$	SD	$y_{min}$	$y_{max}$
max. $A_G$	19,2	21,9	± 15,0	1,1	108,7
max. $F_G$	836,9	920,6	± 553,4	55,9	2961,4
max. $P_G$	47,5	48,0	± 11,8	21,5	78,3
$P_{max}$	65,4	66,3	± 15,5	33,5	101,9

**Tab. 17 Ergebnisdarstellung der statistisch ermittelten maximalen Gesamt(kau)fläche (max.  $A_G$  [mm<sup>2</sup>]), -drucks (max.  $P_G$  [MPa]) und -kraft (max.  $F_G$  [N]) sowie dem Maximaldruck ( $P_{max}$  [MPa]) mit Median ( $y_{med}$ ), Mittelwert ( $y_{arithm}$ ) und Standardabweichung (SD) sowie den Minimal- und Maximalwerten ( $y_{min}$  /  $y_{max}$ ) aller Probanden**

Die Abbildung 44 demonstriert überdies hinaus die sozusagen grafische Überblendung der weiblichen und männlichen Gesamtdaten. Die daraus resultierenden gefitteten Kurven der Datensammlung zeigen, dass geschlechtsunspezifisch etwa in der Mitte des 30sten Lebensjahres mit der höchsten Gesamtkaukraft sowie der größten Gesamtkaufläche zu rechnen ist, denn die Kurvenmaxima sind in diesem Lebensabschnitt mit einer Kraft von etwa 1100 Newton bzw. einer Fläche von ca. 35 mm<sup>2</sup> zu finden. Die beide Mal anfangs steigenden und später langsam abfallenden Kurven verdeutlichen, dass es mit dem Älterwerden der Probanden zwar kontinuierlich zu einer Zunahme der Kauflächen und der Kaukräfte sowie später zu deren Abnahme kommt, dies jedoch grob betrachtet kaum Auswirkungen auf die Gesamtkaudrücke bzw. Maximalkaudrücke hat, denn die gerundeten Mittelwerte streuten gleichmäßig um Werte von 48 SD ± 12 MPa bzw. 66 SD ± 16 MPa. Dies bedeutet gewissermaßen aber auch, dass es trotz der ständigen Gebissveränderungen, sei es während des Zahnwechsels oder den Abnutzungsperioden zu keiner signifikanten Veränderung der Kaudrücke kommt. Man kann vielmehr daraus ableiten, dass das Kausystem durch Anpassungsvorgänge relativ stabile Kaudrücke ermöglicht. Ein Dreijähriger kann dadurch im Vergleich zum Erwachsenen den annähernd gleichen Gesamt- bzw. Maximalkaudruck erzeugen, da durch die entsprechende Zahnanatomie und die

kleinere Gesamtkaufläche im Milchgebiss die insgesamt kleinere Gesamtkaukraft praktisch ausgeglichen wird.



**Abb. 44** grafische Ergebnisdarstellung (nur Maximalwerte) der berechneten Gesamt(kau)flächen, -drücke und -kräfte sowie den berechneten Maximaldrücken aller Probanden in Abhängigkeit von deren Alter

Die folgenden Abbildungen 45 bis 52 zeigen zusätzlich die jeweils in Altersgruppen gesplitteten Ergebnisse der drei Einzelbeißversuche der Testpersonen bzw. die ermittelten Messwerte auf den zugehörigen Prescale® Testfolien 1 bis 3 entsprechend der beschriebenen Versuchsdurchführung der Hauptstudie (siehe Kapitel 3.3). Diesbezüglich erfolgte vielmehr zur besseren Veranschaulichung eine Unterteilung der Testpersonen und der zugehörigen (statistischen) Daten gemäß den Altersintervallen der Tabelle 14 in die Einzelgruppen A bis G. Letztendlich wurde die Gesamtgruppe H gebildet, welche zusammenfassend die Ergebnisse aller Probanden repräsentiert, aber nur die für wichtig gehaltenen Gesamtdaten grafisch widerspiegelt.

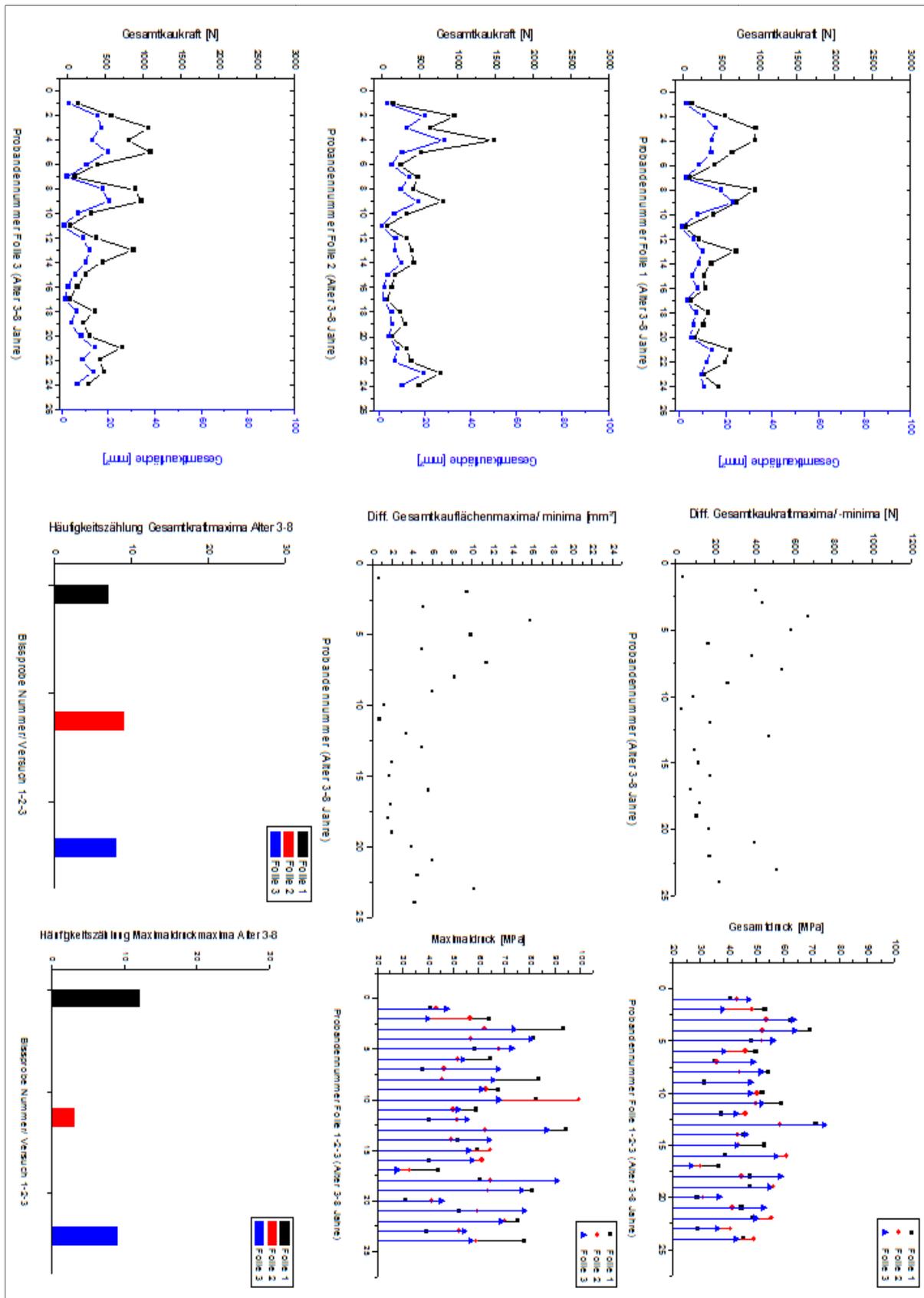


Abb. 45 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 3-8 Jahren (Gruppe A) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräfte mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

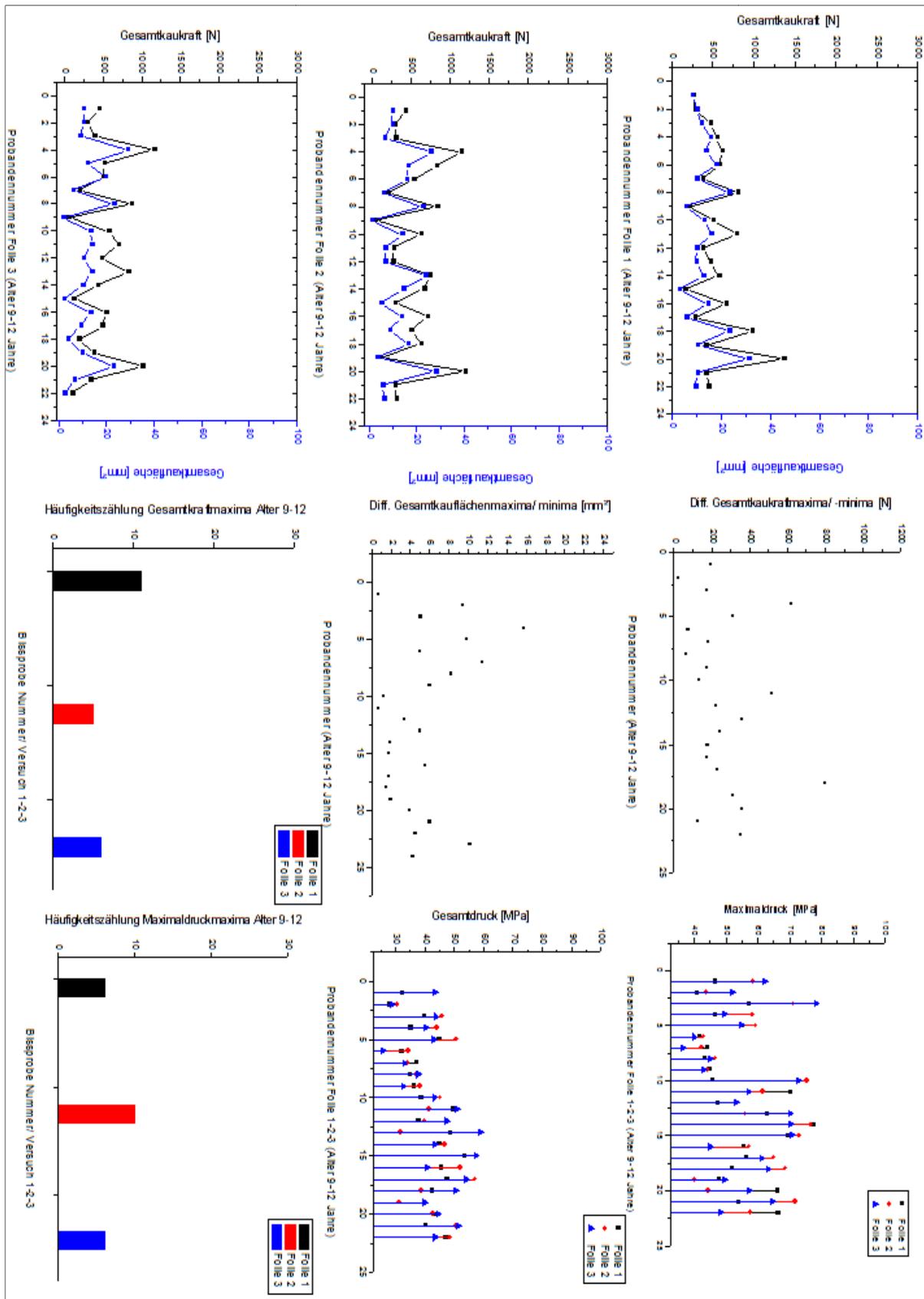


Abb. 46 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 9-12 Jahren (Gruppe B) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräften mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

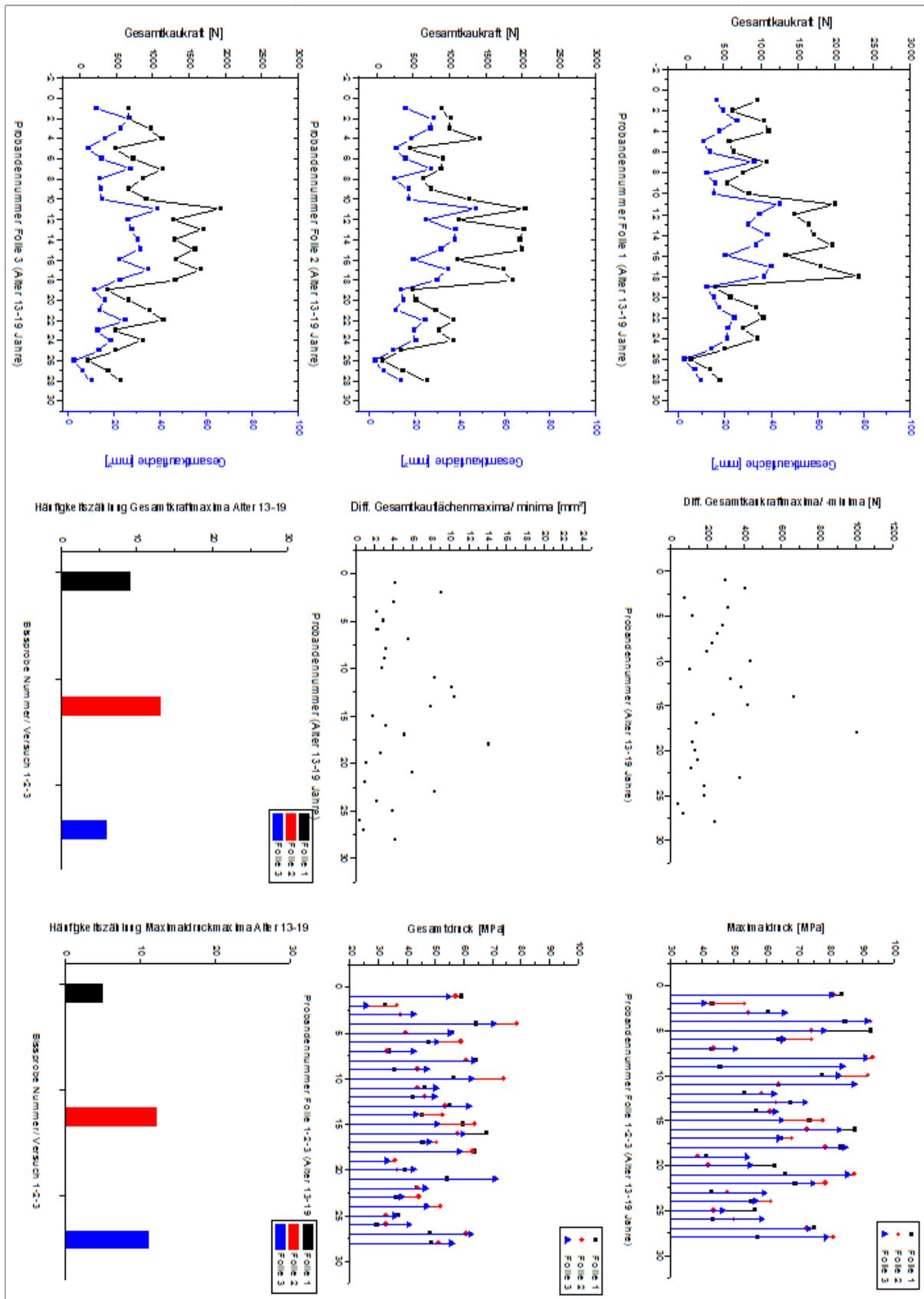


Abb. 47 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 13-19 Jahren (Gruppe C) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräfte mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

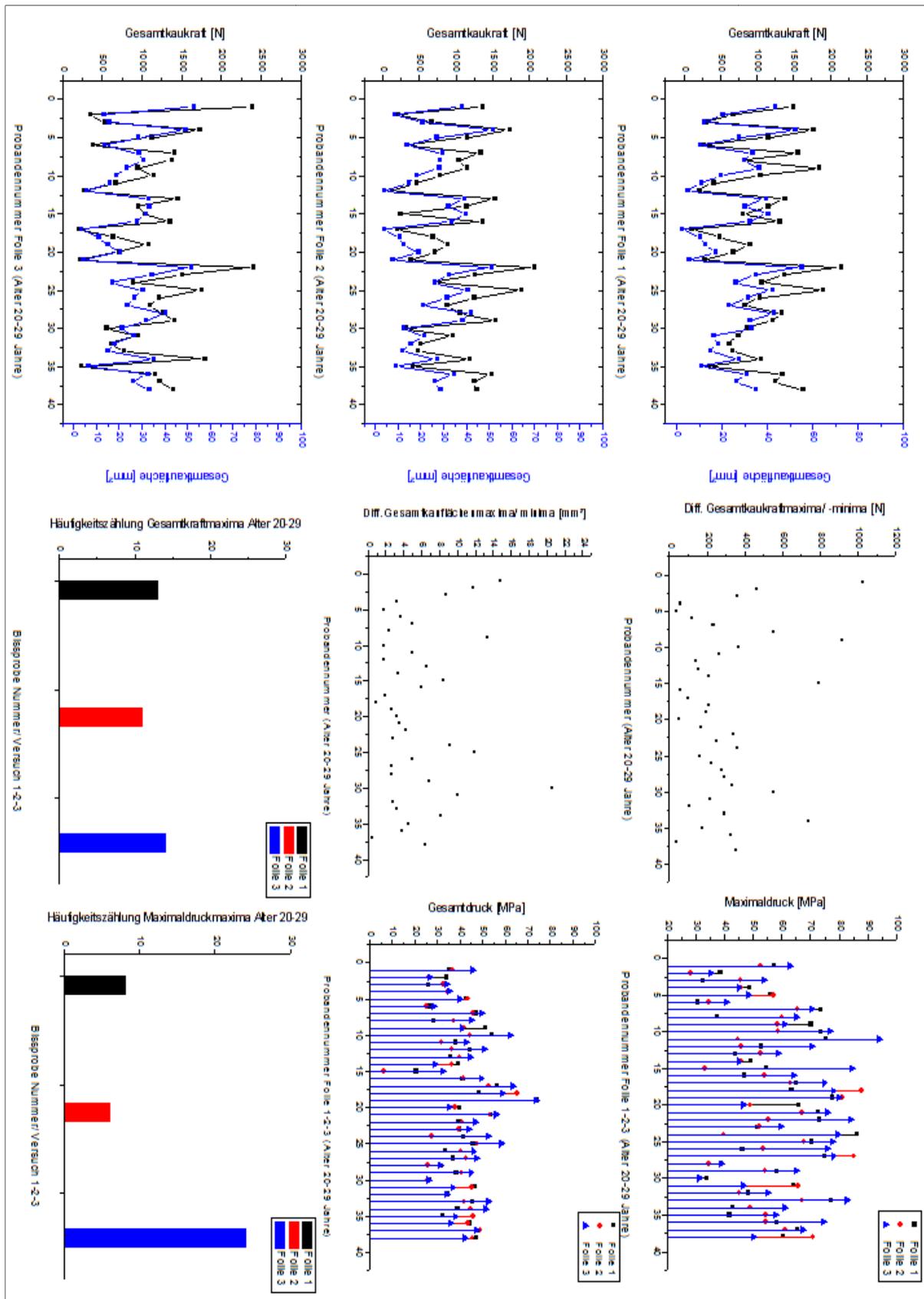


Abb. 48 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 20-29 Jahren (Gruppe D) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräfte mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

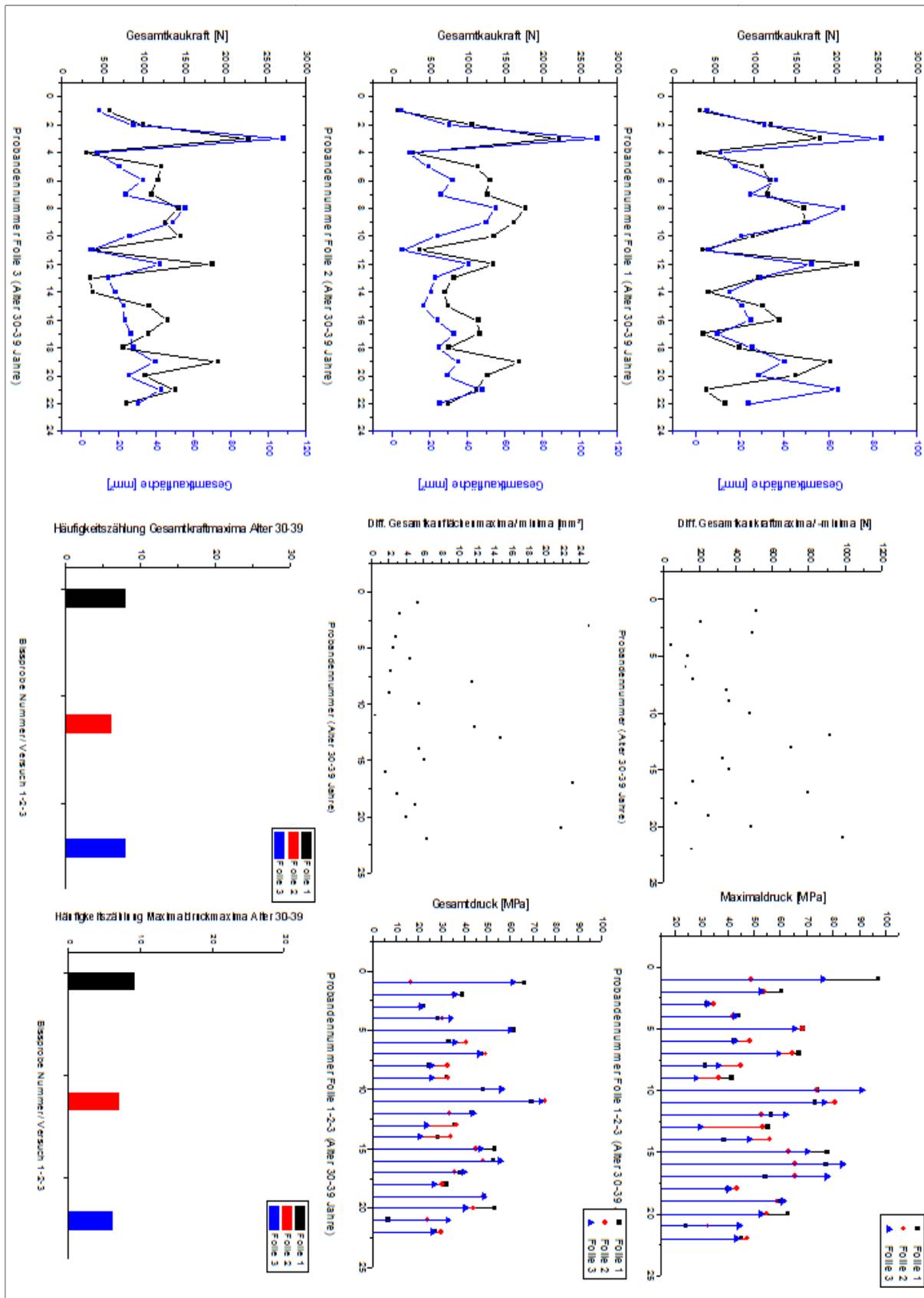


Abb. 49 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 30-39 Jahren (Gruppe E) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräfte mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

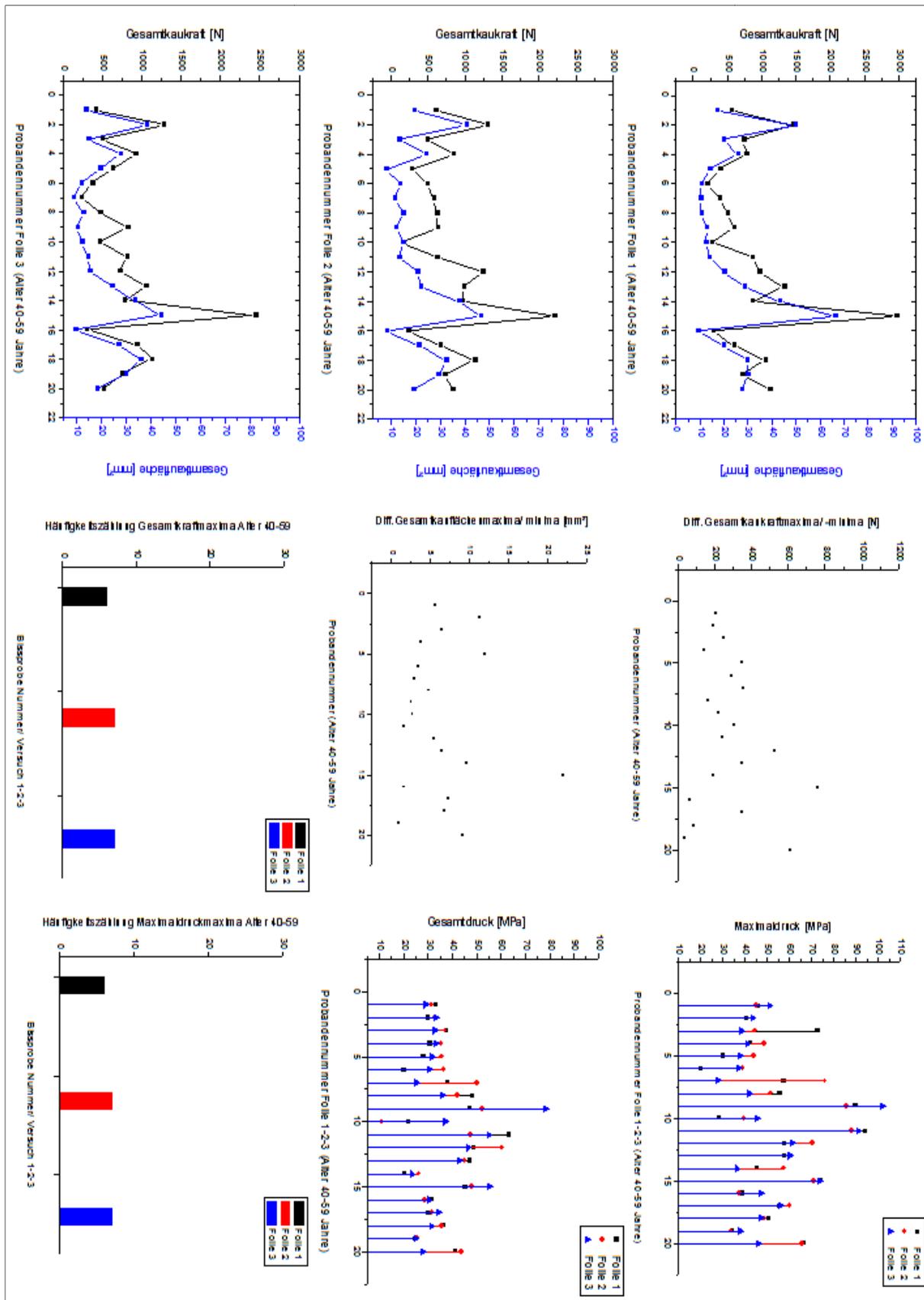


Abb. 50 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 40-59 Jahren (**Gruppe F**) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräften mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

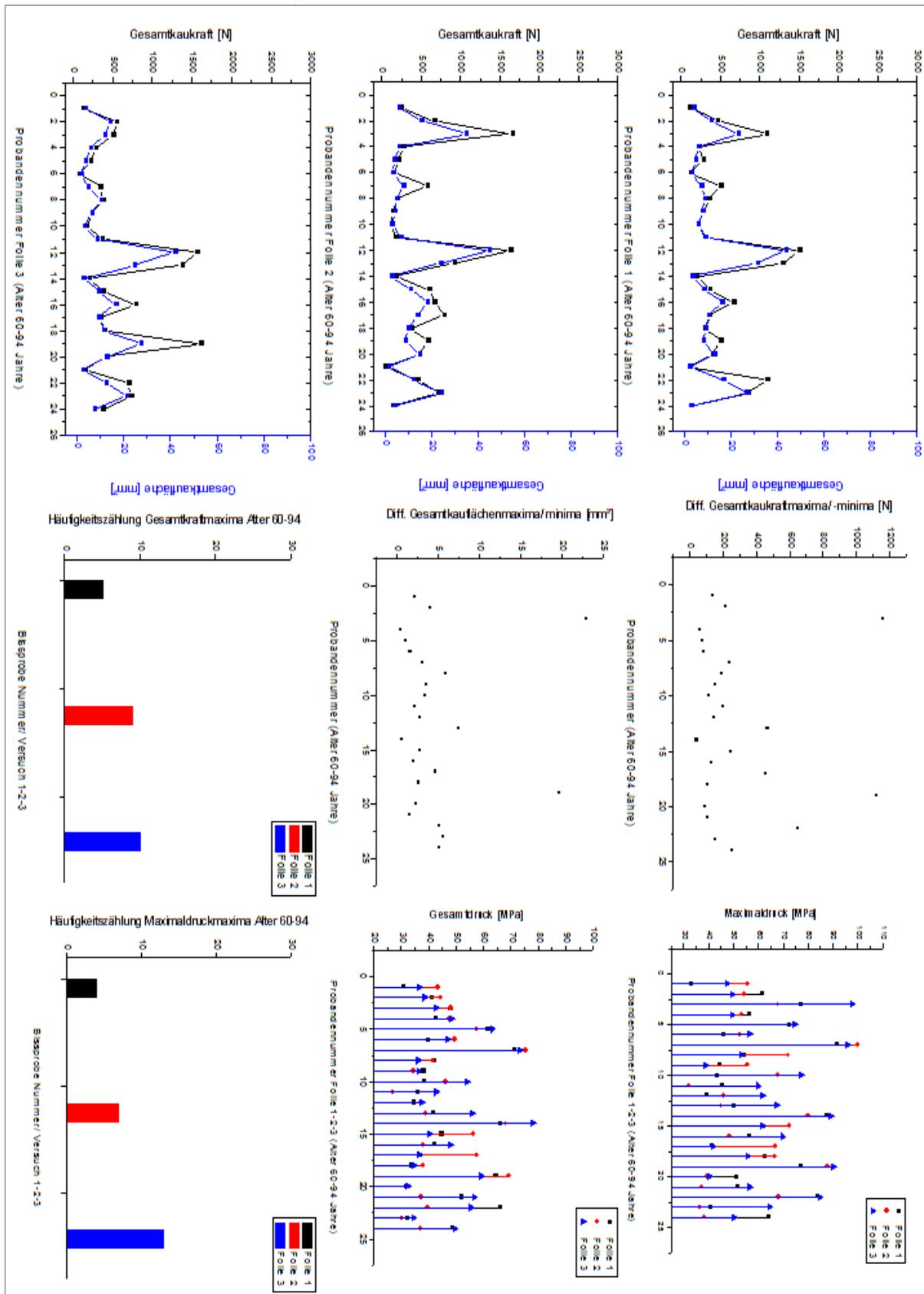
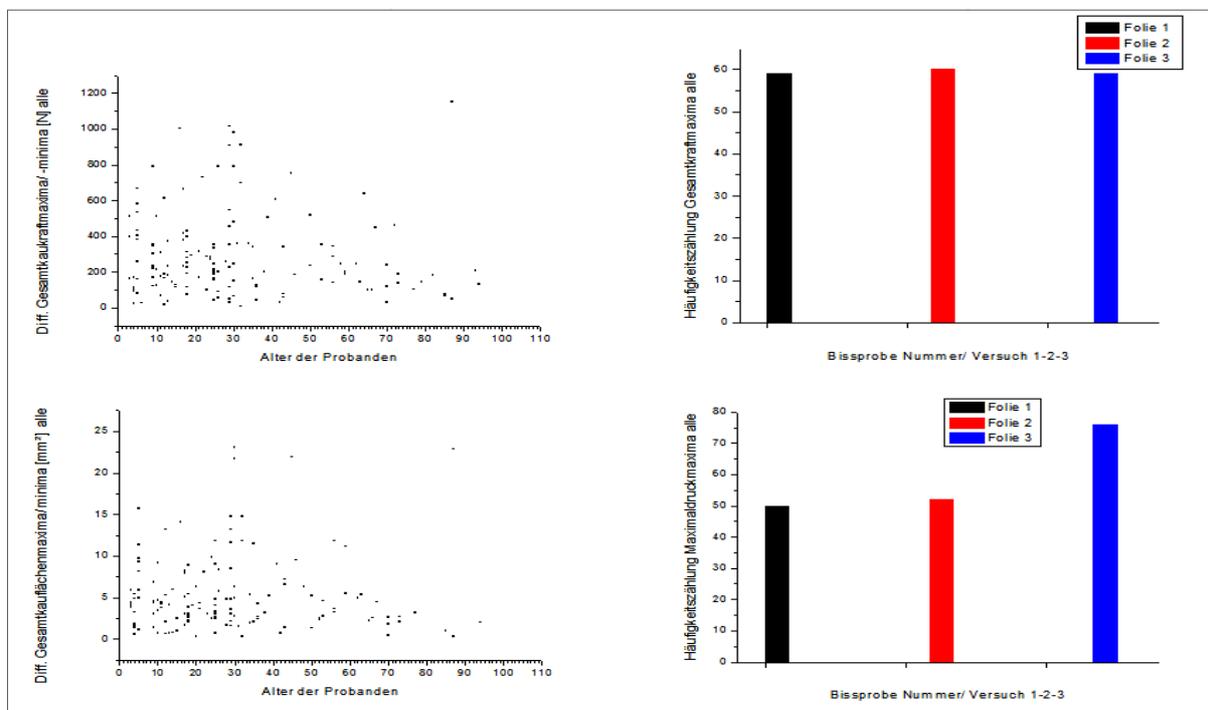


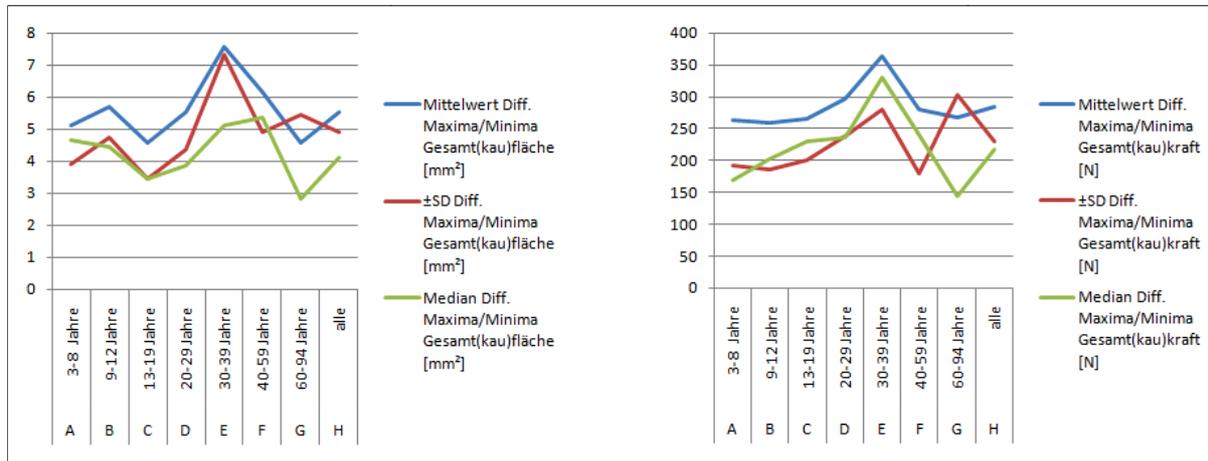
Abb. 51 grafische Ergebnisdarstellung aller Probanden im Alter von 60-94 Jahren (**Gruppe G**) mit den ermittelten Maximaldrücken, Gesamt(kau)drücken, Gesamt(kau)kräften und Gesamt(kau)flächen sowie den Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräfte mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3

Für die Gruppe H fast noch einmal die Abbildung 52 alle berechneten Differenzen aus den 1. Gesamtkaukraftmaxima und -minima bzw. 2. den Gesamtkauflächenmaxima und -minima zusammen und betont zudem durch die Darstellung der Auszählung der Maxima deren Häufigkeitsverteilung auf den nacheinander benutzten Prescale® Testfolien 1 bis 3. In diesem Kontext zeigte sich nach der Gesamtauswertung der jeweils durchgeführten drei Beißversuche, dass die größte Gesamtkaukraftabweichung bei einem Probanden bei rund 1152 N lag sowie die höchste Gesamtkauflächenabweichung annähernd 25 mm<sup>2</sup> betrug. Hingegen beliefen sich die kleinsten Abweichungen auf rund 7 N und etwa 0,3 mm<sup>2</sup>. Die beiden zusätzlichen Balkendiagramme für die Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima in Abbildung 52 verdeutlichen zudem, dass die Maxima mit rund 33,3 Prozent bei jedem der drei Beißversuche bzw. auf jeder der drei Testfolien zu finden waren. Somit liegt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieses Ereignisses bei rund 1:3. Es ist somit ebenfalls denkbar, dass eine Testperson theoretisch in jedem der drei Versuche die maximale Gesamtkaukraft entwickeln könnte, obwohl es innerhalb der Einzelgruppen A bis G zum Teil Schwankungen gab. Mit einer aber prozentualen Verteilung von rund 28:29:43 zeigte sich jedoch die Tendenz, dass der Maximalkaudruck der Versuchspersonen erst beim dritten Beißversuch erzeugt wurde.



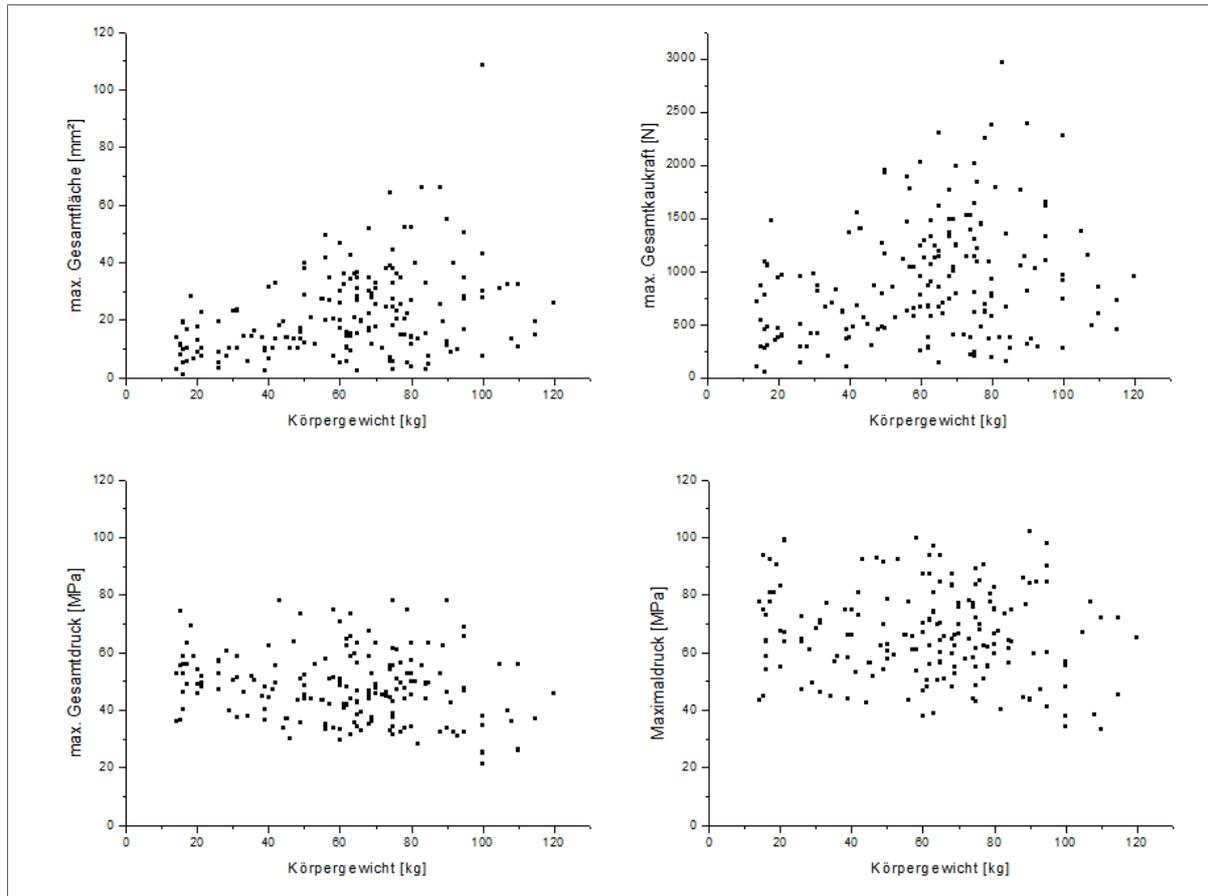
**Abb. 52** grafische Ergebnisdarstellung der ermittelten Differenzen (Diff.) aus den Maxima und Minima der Gesamt(kau)flächen und Gesamt(kau)kräften mit Häufigkeitszählung der Gesamt(kau)kraftmaxima und Maximaldruckmaxima auf den entsprechenden Prescale® Testfolien 1,2,3 bei den einzelnen Beißversuchen 1-2-3 aller Probanden im Alter von 3-94 Jahren (Gruppe H)

Die Abbildung 53 zeigt in diesem Zusammenhang grafisch die Statistikwerte zu den berechneten Differenzen für die Einzelgruppen A - G sowie die der Gesamtgruppe H.



**Abb. 53 grafische Statistikdarstellung mit den berechneten Mittelwerten, Standardabweichungen (SD) und Medianen zu den ermittelten Differenzen (Diff.) aus Maxima und Minima der entsprechenden Gesamt(kau)flächen und -kräfte zu den Einzelgruppen (A-G) sowie aller Probanden im Alter von 3-94 Jahren (Gruppe H)**

Bei den Auswertungen der Probandenergebnisse in Bezug auf deren Körpergewicht konnten jedoch keine geschlechtsabhängigen signifikanten Unterschiede für die maximal ermittelten Gesamt(kau)flächen Gesamt(kau)kräfte, Gesamt(kau)drücke und Maximaldrücke gefunden werden, weshalb auf eine Einzelübersicht beider Geschlechter verzichtet wurde und in der Abbildung 54 nur eine Gesamtdarstellung erfolgte. Es hat zwar gewissermaßen den Anschein, dass etwa im Bereich von 15 bis 40 kg Körpergewicht kleinere Kauflächen und Kaukräfte ermittelt worden sind, jedoch ist dies eher darauf zurückzuführen, dass es sich hierbei um die noch in der Milchgebiss- bzw. Wechselgebissphase befindlichen Probanden im Alter von etwa drei bis zehn Jahren handelt. Somit kann in diesem Fall kein direkter Zusammenhang zum Körpergewicht der Testpersonen hergestellt werden, sondern es bestätigt sich lediglich die altersabhängige Wechselwirkung. Das annähernd proportionale Verhalten von Gesamt(kau)fläche und Gesamt(kau)kraft führt wiederum dazu, dass sich die Gesamt(kau)drücke sowie die Maximaldrücke der Testpersonen nivellieren, da sich diese, wie bereits erwähnt, aus dem Quotient von Kraft und Fläche errechnen.



**Abb. 54 grafische Ergebnisdarstellung der berechneten Gesamt(kau)flächen, -drücke und -kräfte aller Probanden gemäß der Gruppe H in Abhängigkeit von deren Körpergewicht**

Dieses Kapitel abschließend, sollen geschlechtsunspezifisch die grafischen Abbildungen 55 und 56 nochmals die wichtigsten Gesamtergebnisse der Hauptstudie für die Einzelgruppen A bis G bzw. die Gesamtgruppe H unterstreichen. Die Boxplots- und Liniendiagramme verdeutlichen, dass in der Altersgruppe von 30 bis 39 Jahren (Gruppe E) mit ca. 35 mm<sup>2</sup> und etwa 1250 N die größten Mittelwerte für die Gesamtkaufläche bzw. die Gesamtkaukraft ermittelt wurden, aber mit rund 23 mm<sup>2</sup> sowie 590 N auch die größten Standardabweichungen. Die zusätzlich abgeleiteten Gesamt- und Maximaldruckdarstellungen bestätigten zudem insgesamt das relative Konstanzverhalten des Kaudrucks der Probanden über die Lebensjahre, denn die Druckmittelwerte wichen hierbei gleichmäßig mit maximal 12 MPa für die berechneten Gesamtkaudrücke und mit höchstens 19 MPa bei dem die Maximalkaudrücke von den gerundeten Absolutbeträgen von annähernd 48 bzw. 66 MPa ab.

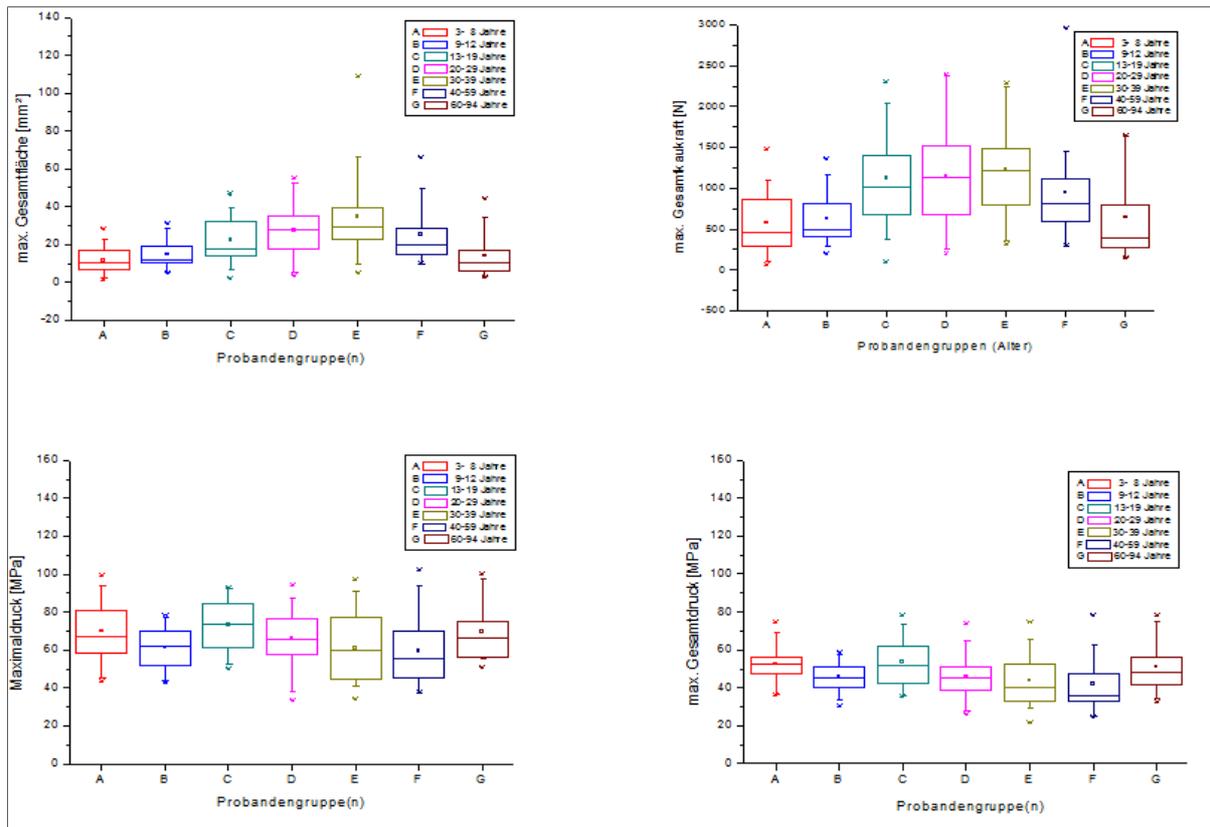


Abb. 55 Boxplotdarstellung der Gesamtergebnisse mit den berechneten maximalen Gesamt(kau)flächen, maximalen Gesamt(kau)kräften und den maximalen Gesamt(kau)drücken sowie den Maximaldrücken der Einzelgruppen A bis G

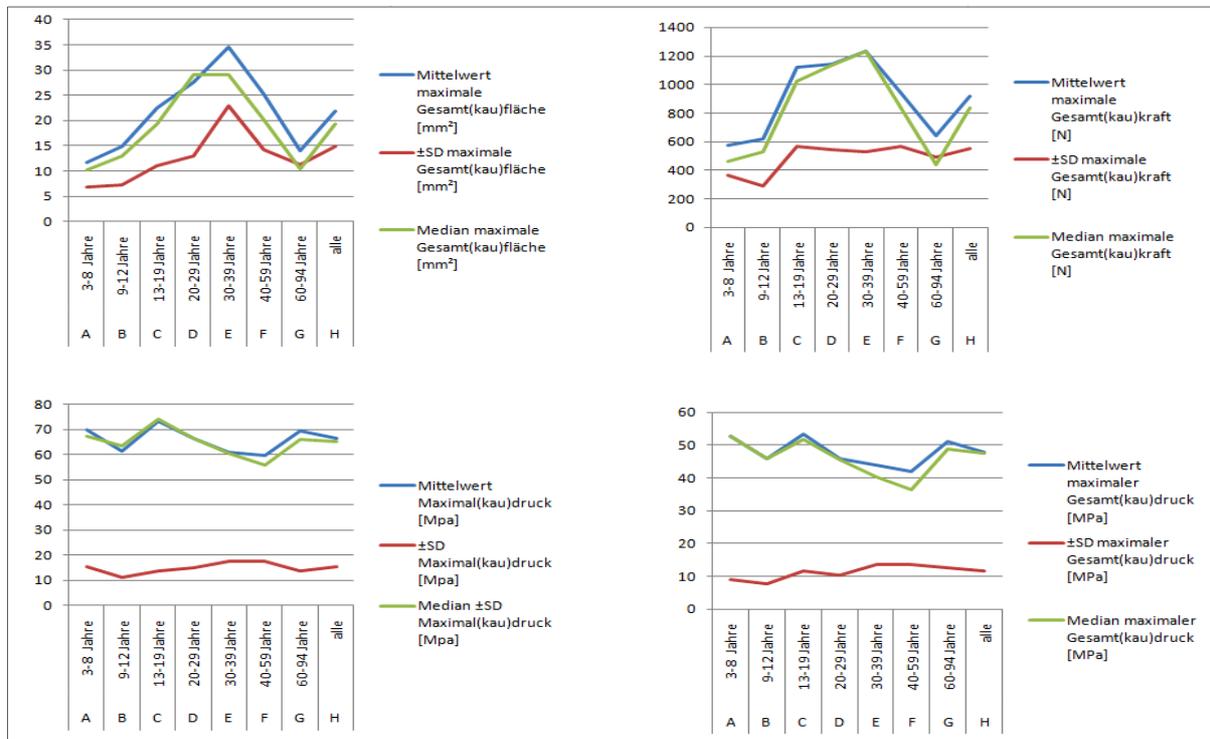


Abb. 56 grafische Statistikdarstellung mit den berechneten Mittelwerten, Standardabweichungen (SD) und Medianen zu den ermittelten Gesamt(kau)flächen, -kräften und -drücken sowie den Maximaldrücken der Einzelgruppen (A-G) und aller Probanden im Alter von 3-94 (Gruppe H)

## 5 Diskussion

Das von FINK [9] entwickelte System zur ortsgenauen Kaukraftmessung bestätigte nicht nur in den erneuten Laborvorversuchen, sondern auch bei seiner Anwendung in der Hauptstudie am Probanden ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Simplität. Jedoch erwies sich die manuelle Modifikation der Prescale® Typ MS Folie zwar als durchaus praktikabel, nur stellte die zusätzliche Beschichtung und Einzelstückherstellung der Testfolien zweifelsfrei einen zeitlichen Mehraufwand dar. Durch das zurzeit noch manuelle Rakelverfahren und den Zuschnitt der Testfolien per Hand ergab sich so ein gewisses Maß der Unwirtschaftlichkeit durch den limitierenden Faktor Zeit, aber auch durch den anfallenden Verschnitt von Folienmaterial gerade bei der Serienproduktion von großen Stückzahlen. Die in Zusammenarbeit mit KLEIBER [34] entwickelte Software Zahni© bewies nach dem Abschluss aller Entwicklungs- und Testphasen ein hohes Maß an Genauigkeit sowie deren Zuverlässigkeit bei der Verarbeitung und der Vorauswertung der anfallenden Versuchsdaten. Im Vergleich zu dem noch von FINK [9] benutzten Programm von FEIKS, dessen Quellcode aber die Basis dieser Software darstellt, waren beim Gebrauch der Zahni© Software zweifelsohne sehr schnell die Vorzüge in puncto Anwendbarkeit und Funktionalität erkennbar. Weiterhin konnte das zunächst noch gedankliche Konzept eines mobilen Referenzgerätes unter Mitbeteiligung der MTL [46] der Charité verwirklicht werden. Nach dessen Fertigstellung und Kalibrierung zeigte sich der hohe Grad an Validität und Reliabilität bei der Erstellung der benötigten Referenzpunkte auf den Prescale® Folien und somit dessen Präzision. Wie die Ergebnisse der Vorversuche entsprechend dem Kapitel 4.1.2 belegen, konnten auf diese Weise bei einer Temperatur von etwa +20°C fortwährend Referenzpunkte mit einem berechneten Referenzdruck von 54,8 SD  $\pm$  1,9 N und einer Referenzfläche von 0,63 SD  $\pm$  0,01 mm<sup>2</sup> erzeugt werden. Ferner zeigte es sich, dass dabei die natürlichen Gegebenheiten im Patientenmund während der habituellen Interkuspitation und Entwicklung der maximalen Gesamtkaukraft recht gut simuliert werden konnten. Durch die entsprechende Arcon-Gelenkkonstruktion, den zusätzlichen Einbau einer Blattfeder und die Oberflächenform der Referenzkugel wurden hierbei durch das Referenzgerät 1. die Phase des Kieferschlusses, 2. die initiale Dehnung des Parodonts mit der Auslenkung der Hartgewebe sowie 3. die Kontaktflächen der Zähne selbst während der Okklusion nachempfunden. Nach komplettem Verschluss des Referenzgerätes (entsprechend den

Erklärungen des Kapitels 3.1.3) konnten bzw. können dann sowohl extraoral durch die Apparatur als auch intraoral durch den Probanden in gleicher Weise Druckpunkte auf den Druckmessfolien erstellt werden. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigten außerdem, dass eine zeitversetzte und durch die Vorversuche entsprechend simulierte frühere Referenzpunkterstellung auf den Fuji™ Prescale® Folien Typ MS durchaus möglich ist, wenn diese bei etwa +20°C erstellt werden und die Folien zusätzlich vor und nach ihrer Verwendung bei dieser Temperatur aufbewahrt werden. Die ermittelten Messwerte waren in diesem Bereich mit 54,0 N annähernd identisch und die berechnete Standardabweichung mit  $\pm 3,0$  N bei nahezu +20 Grad Celsius wesentlich kleiner im Vergleich zu allen anderen Temperaturbereichen, auch wenn diesbezüglich nur Aussagen über einen Zeitraum von 10 Tagen gemacht werden können. Somit kann geschlossen werden, dass der Einsatz von schon vorher mit Referenzpunkten versehenen Prescale® Testfolien und die erst spätere Verwendung am Probanden möglich ist. Dennoch erscheint eine unmittelbare Referenzpunkterstellung nach dem Gebrauch der Folien sowie das Scannen mit einer Auflösung von 800 dpi nach 24 Stunden, wie von FINK [9] bereits vorgeschlagen, nach wie vor sinnvoll, da mögliche lagerungsbedingte Schädigungen und Veränderungen der Prescale® Folien auch im Bereich der Referenzpunkte nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Jedoch könnten entsprechende Fehler durch das Foliensystem selbst und somit bei den anschließenden Berechnungen mittels der Zahni© Software noch weiter reduziert werden, wenn eine zusätzliche Archivierung der gegebenenfalls früher erstellten Referenzpunkte in der Software erfolgen würde. Nach einer dann späteren, sekundären Kaudruckbelastung durch den Probanden könnte ein zusätzlicher Vergleich derselben Referenzpunkte durch die Software die Ergebnisse noch weiter optimieren. Dies wäre jedoch nur dann nötig, wenn die Testfolien zeitgleich und in alio loco genutzt werden würden, da zurzeit kein weiteres mobiles Referenzgerät (siehe Kap. 3.1.3) dieser Art existiert und somit eine unmittelbare Referenzpunkterstellung nach dem Foliengebrauch nur unilokal erfolgen kann. Eine Auswertung der Kauflächengröße ist jedoch auch ohne eine Eichung der Folien möglich, d.h. sofern die Installation der Zahni© Software auf einem handelsüblichen Computer bereits erfolgte und der notwendige Scanvorgang der Folie mit der geforderten Auflösung von 800 dpi stattfand.

Der Gebrauch der veränderten Prescale® Folien Typ MS am Probanden bestätigte zudem, die von GONZALES NOVOA [18] belegte gute Biokompatibilität sowie das unbedenkliche Allergiepotezial der PVAC Beschichtung. Somit kam es, wie gewünscht, während der ganzen Versuchszeit zu keiner Sensibilisierung oder allergischen Reaktionen der Testpersonen nach deren Einsatz. Es zeigte sich jedoch, dass eine Lufttrocknung der Folien bei übermäßiger Speichelbenetzung allein nicht ausreichend war. Anfänglich kam es so stellenweise zu Strukturveränderungen an der PVAC- Oberfläche, wenn nach der Nutzung der Folien die Trocknung nicht durch eine zusätzliche Zellstoffauflage beschleunigt wurde. Deshalb wird bei stark salivierenden Probanden die zusätzliche Nutzung von Löschpapier o. ä. während des Abtrocknungsprozesses empfohlen. Die entstehende Kontamination der Folienoberfläche stellt keine größere Bedenklichkeit dar, wenn dementsprechend obligat während des Gebrauchs der Folien Handschuhe getragen werden und die Glasfläche des Scanners desinfiziert wird. Jedoch ist auch eine Desinfektion der Prescale® Folien durch eine Begasung mit Ethylenoxid (EO) möglich. LIGGINS [40] konnte bereits 1994 zeigen, dass es bei der Begasung zwar zu messbaren Veränderung auf den Prescale® Folien kommt, aber diese durch entsprechende Kalibrierung des Druckfärbungsverhaltens ausgeglichen werden können. Das in dieser Studie angewendete Verfahren dürfte durchaus auch hierfür geeignet sein, wenn die Nutzung von EO erforderlich werden sollte. Eine gewisse Ungenauigkeit bei der Auswertung der Folien und der Messwerte ergibt sich aber nach wie vor, denn nicht nur der Genauigkeitsbereich der Folien selbst und der somit resultierende Fehler, d. h. den laut Hersteller Fuji™ [11] angegebenen  $\pm 10$  Prozent bei +23 Grad Celsius, sondern auch die Erfahrungen und die Subjektivität des Nutzers bei der Auswertung der Folien stellen zusätzliche Unsicherheitsfaktoren dar, da die Auswahl der Druckfärbungsbereiche in der Zahni© Software manuell erfolgt. Der Einsatz des diesbezüglich von Fuji™ 2004 entwickelten Occluzer FDP 707 Systems, welches die Druckfärbungsbereiche ohne einen Scanner mit einer CCD Kamera erfasst sowie eine vollautomatisierte Auswertung der Folien ermöglicht, soll laut HATTORI und SHIGA et al. [24, 25, 72] diese Schwachstelle beseitigen. Jedoch erscheint auch hier eine manuelle Nach- bzw. Endkontrolle der maschinell erfassten Druckfärbungsbereiche nötig zu sein. Ohne eine erneute Überprüfung der druckbelasteten Bereiche kann auch hier nicht ausgeschlossen werden, dass ggf. miterfasste Artefakte auf den Druckfolien mit ausgewertet werden. Dadurch besteht die Problematik indirekt nach wie vor. Es kann somit

auch ohne die Nutzung eines Scanners und manueller Zuweisung der zum Teil unsicheren Druckfärbungsbereiche (Selektionen siehe Kap. 3.1.5) zu Auswertungsfehlern kommen. Dieser stellenweise Engpass konnte bei der Nutzung der Zahni© Software durch die Zoomfunktion des Programms und einen optischen Vergleich der 3 Folien untereinander umgangen werden, wodurch sogar die Reproduktion von Verzahnungsmustern möglich ist. Die eigentliche Schwierigkeit stellte jedoch nicht die Identifikation der Kauabdrücke an sich dar, sondern die den jeweiligen Druckfärbungsbereichen zurzeit noch nicht exakte Zuordbarkeit der entsprechend in Okklusion stehenden Zähne. Die Zahni© Software ermöglicht dennoch eine grobe Orientierung innerhalb des Zahnbogens durch die Möglichkeit der Aufprojektion eines adaptierbaren und transparenten Zahnkranzes über die Kompressionsfärbungen der Prescale® Folien. ANDO et al. [3] versuchen derzeit diesen Nachteil durch die zusätzliche Applikation eines silikonhaltigen, lichtdurchlässigen Materials und eines speziellen optischen Gerätes auszugleichen. Ein weiteres Defizit bei der Kaukraft- und Kaudruckmessung mittels der modifizierten Prescale® Folie am Patienten bestand darin, dass die möglicherweise durch den Probanden durchgebissene Folienbereiche oder Knickungen besonders im Frontzahnbereich nicht präzise analysiert werden konnten. OTTL et al. [58] sowie FINK [9] wiesen bereits in ihren Arbeiten auf dieses Phänomen hin, jedoch trat es bei dieser Studie nur sehr selten auf. „OTTL et al. (...) 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 „(hierbei aber auch)“die Dicke der Messapparatur auf 2,2 mm“ [9]. Die Erhöhung führt somit zu einer zusätzlichen Bissperrung. Die hierbei resultierende Verstärkung einer möglichen Fehldetektion von Kauflächen in der Frontzahnregion sowie die Überbewertung von gemessenen Kaukräften bzw. -drücken im posterioren Zahnbogen beschrieben bereits YOSHINORI, SHUICHI, CHIAKI, MASAHIRO et al. [8, 42, 76, 88] bei ihren Untersuchungen mit der Prescale®50 H Typ R Folie. Die Diskrepanz zwischen den tatsächlichen Werten und den gemessenen Beträgen verstärkt sich dann umso mehr, je größer dabei die Bissperrung wird und desto mehr man sich der Kiefergelenksachse nähert, bedingt durch die zusätzliche Veränderung der wirkenden Drehmomente im Bereich der Kiefer [85]. Diese Tatsache sowie die zusätzliche Kraftabhängigkeit der gemessenen Kauflächen tritt zwar, wie FINK [9] bereits feststellen konnte, auch mit dem nur rund 100 µm dicken Prescale® Film auf, kann aber in dieser Hauptstudie

durch die vom Probanden geforderte Einnahme der habituellen Interkuspidation bei Erzeugung seiner maximalen Beißkraft und dem somit nahezu vollständigen Kieferchluss theoretisch vernachlässigt werden. Sicherlich tritt dieser Umstand „(...) für die Okklusionskontaktflächen in Schlussbisslage ohne Folie nicht auf (...) und es lässt sich nach wie vor konstatieren: Eine genaue Messung der in Schlussbiss aufeinander liegenden Flächen kann nicht „(exakt)“ vorgenommen werden“ [9]. Es gilt jedoch die Frage zu klären, ob nicht nur die Kauflächen an sich, sondern auch die Kaukräfte überhaupt mit 100prozentiger Genauigkeit messbar sind oder zukünftig messbar sein werden, d. h. unabhängig von dem dabei benutzten Verfahren. Die mittels dieser Messmethode durch FINK [9] hierzu durchgeführten Testreihen am Artikulator ergaben jedenfalls bei Bestimmung der Kräfte einen durch die Messkette verursachten, relativen mittleren Fehler von 3,6 %. Es zeigte sich dabei aber gleichzeitig auch, dass dieses System allen bisher auf Folienbasis beruhenden Messmethoden überlegen ist und der Einsatz dieses Verfahrens reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die so an den Testpersonen mittels der modifizierten Prescale<sup>®</sup> Folie gewonnenen Gesamtergebnisse wiesen nach, dass Männer im Vergleich zu Frauen geringfügig stärker zubeißen. Die hierbei ermittelten Gesamtkaukräfte betragen im Mittel für die männlichen Testpersonen 956,0 SD ± 590,1 N und für die Versuchskandidatinnen im Mittel 885,3 SD ± 515,0 N. Der Vergleich dieser Ergebnisse deckt sich in etwa mit den bisherigen Aussagen anderer Autoren. So fanden beispielsweise entsprechend der Tabelle 1 aus dem Kapitel 2.3 MORITA et al. [50] „(...) bei der Untersuchung von 142 männlichen 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. MIYAURA et al. [47, 48, 49] werteten die Ergebnisse von Messungen an 687 Probanden aus. Die aufgezeichneten Kräfte betragen (geschätzt aus dem vorliegenden Diagramm) 250 – 550 N bei einer Standardabweichung von maximal 100 N“ [9]. Es konnte außerdem bei den Frauen die größte Gesamtkaukraft von 2032 N und bei den Männern von 2961 N gemessen werden. Bei genauerer Betrachtung zeigte sich aber, dass die hierbei größte gemessene Gesamtkaukraft von näherungsweise 3000 N durch einen vollbezahnten Probanden mit generalisierten Schliiffacetten/Abrasionen erzeugt wurde. Diese Erkenntnis bestätigt die Untersuchungen von GIBBS et al. [15], die an einem 37jährigen Patienten eine Gesamtkaukraft von 4245,8 N gemessen hatten, welches laut FINK [9] mit einer extremen Form des Bruxismus und starken Abrasionen erklärt wurde. Zudem war und ist dies beim Stu-

dium der Literatur zurzeit immer noch „(...) die höchste je aufgezeichnete Kaukraft und war unter anderem auf die extrem hypertrophierte Kaumuskelatur des Probanden zurückzuführen“ [9]. Bei der Auswertung der Gesamtkauflächen zeigten die männlichen Testpersonen mit  $24,3 \text{ SD} \pm 17,1 \text{ mm}^2$  eine Tendenz zu größeren Gesamtkauflächen, denn bei den Frauen konnte eine Gesamtkaufläche von im Mittel  $19,4 \text{ SD} \pm 12,0 \text{ mm}^2$  bestimmt werden. „Bisher durch andere Autoren [39, 75, 76, 83, 108] mit den Druckmessfolien ermittelte Kontaktflächen für vollbezahnte, gesunde Patienten lagen zwischen  $16,3 \text{ mm}^2$  und  $48,7 \text{ mm}^2$  mit Standardabweichungen von  $5,7 \text{ mm}^2$  bis  $32,4 \text{ mm}^2$ “ [9]. Die Auswertung bezüglich der Abweichungen aller Gesamt(kau)flächen im Schlussbiss, d. h. genauer gesagt der Differenzen aus den Kauflächenmaxima und den -minima zeigen zumindest, dass die durch die Probanden im Schlussbiss erstellten Gesamtkauflächen auf den Prescale® Folien bei den durchgeführten 3 Druckbelastungsversuchen im Mittel nur mit  $5,5 \text{ SD} \pm 4,9 \text{ mm}^2$  schwankten. Eine überdurchschnittlich hohe Gesamtkaufläche von rund  $68 \text{ mm}^2$  (entsprechend der Probandennummer 15 in der Abbildung 50) konnte zudem bei der Testperson gefunden werden, welche die bereits erwähnte höchste Gesamtkaukraft von ca. 3 kN erzielte. Die Darstellung zeigt aber auch, dass sich hierbei, trotz der größten Kaukraft und -fläche, der ermittelte maximale Gesamtkaudruck sowie der Maximalkaudruck der Versuchsperson sich nicht gravierend von denen der anderen männlichen Kandidaten unterscheidet. Aufgrund dessen, dass sich der Druck eben aus dem Quotienten von Kraft und Fläche errechnet, wurden auch hier Werte von rund 55 MPa bzw. 70 MPa berechnet. Desweiteren konnte durch die zusätzliche Auswertung des geschlechtsspezifischen Kaudruckverhaltens gezeigt werden, dass die weiblichen Probanden im Mittel höhere Gesamt(kau)drücke ( $P_G$ ) und Maximalkaudrücke ( $P_{max}$ ) erzeugten und so wurde bei den Probandinnen ein  $P_G$  von  $51,1 \text{ SD} \pm 12,8 \text{ MPa}$  und ein  $P_{max}$  von  $69,2 \text{ SD} \pm 16,9 \text{ MPa}$  bestimmt. Bei den männlichen Testpersonen lag hingegen der Mittelwert sowohl von  $P_G$  mit  $44,9 \text{ SD} \pm 9,9 \text{ MPa}$  als auch der von  $P_{max}$  mit  $63,5 \text{ SD} \pm 13,4 \text{ MPa}$  mit rund 6 Megapascal signifikant unter dem der weiblichen Versuchspersonen. FINK [9] ermittelte in seiner Arbeit an zwei Versuchspersonen Einzelzahnindrücke im Bereich zwischen  $44,8 \text{ MPa}$  und  $68,2 \text{ MPa}$ , welches in dieser Arbeit dem bestimmten Maximal(kau)druck entspricht. Weiterhin gab er an, dass der Gesamt(kau)druck um Werte zwischen  $56,0$  und  $63,6 \text{ MPa}$  schwankte und in der Literatur bisher Gesamtkaudrücke in einer Größenordnung von etwa  $45 \text{ MPa}$  ermittelt wurden. Somit entsprechen die erzielten Resultate dieser Arbeit den bishe-

gen klassischen Erkenntnissen und untermauern so deren Gültigkeit. Gleichwohl belegen die individuellen, zugleich charakteristischen Unterschiede der Probandendaten (gemäß den Abbildungen 45 bis 51) aber auch die Notwendigkeit weiterhin Kaukräfte und Kauflächen zu messen, um somit ggf. mögliche Fehlfunktionen und Störfaktoren im gesamten stomatognathen System frühzeitig zu erkennen und nicht nur dann, wenn es exempli causa um die Gestaltung und Kontrolle von Zahnersatz geht. Der Einsatz der modifizierten Prescale® Folie ist daher sehr wohl gerechtfertigt, denn er leistet hierbei eine deutliche Hilfestellung und zudem erwies sich diese Art der Messmethodik als sehr praktikabel, sicher und zuverlässig. Außerdem ist diese Verfahrensweise sehr kostengünstig und kann mit Hilfe von handelsüblicher Hardware bewerkstelligt werden. Somit ist eine Anschaffung von teuren nur für diesen Zweck entwickelten Geräten nicht notwendig. Inwieweit aber der Einsatz von weniger als 3 Kaudruckfolien pro Proband bei der Prescale® Messmethode möglich ist, kann zurzeit nicht mit absoluter Sicherheit geklärt werden und es bedarf weiterer wissenschaftlicher Nachforschungen. Es gibt in der Literatur zurzeit keine Angaben darüber, wie viele Beißversuche bzw. Kaudruckmessungen theoretisch notwendig sind, um die tatsächliche maximale Kaukraft bestimmen zu können und ob sich hierbei nicht auch ein gewisser Gewöhnungs-, Trainings- und Ermüdungseffekt einstellt. KILIARDIS et al. [33] konnten hierzu an 25 Testpersonen zeigen, dass es nach vierwöchigem Kaukrafttraining mit Hilfe eines extraharten Kaugummis zwar zu einer Leistungsfähigkeitssteigerung im Bereich der Kaumuskulatur kam, aber sich kein signifikanter Unterschied der Gesamtkaukraftgröße zur untrainierten Kontrollgruppe fand. Es konnte lediglich ein gewisser Zuwachs an Gesamtkaukraft besonders bei den Testpersonen registriert werden, welche zu Beginn der Studie die kleinsten Kaukräfte entwickelten. In welchem Umfang sich diese mögliche Folgeerscheinung schon bei nahezu simultaner Verwendung der 3 Prescale® Folien in dieser Studie einstellen konnte, kann nicht belegt werden. Es konnte aber gezeigt werden, dass es eine Tendenz dahingehend gibt, den Maximalkaudruck erst beim dritten/ letzten Versuch zu entwickeln. Die Auswertung der Gesamtkaukräfte der Einzeldruckversuche konnte aber insgesamt keine signifikanten Tendenzunterschiede aufzeigen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich nach mehrmaligen Beißversuchen auf die Folien gewissermaßen ein koordinatischer Trainingseffekt einstellt. Dem Probanden dürfte es theoretisch nach einer gewissen Eingewöhnungsphase an die Messapparatur somit eher möglich sein, seine individuelle maximale Gesamtkaukraft

zu entwickeln. Es erscheint aber durchaus sinnvoll, wiederholte Kaudruckversuche durchzuführen. Dabei könnte sich die Mehrfachverwendung einer Art Prescale® Foliendummies aus dem anfallenden Folienschnitt als hilfreich erweisen. Damit könnte verhindert werden, dass während der Übungsphase Mehrkosten entstehen. Die Verwendung von entsprechenden Übungsfolien könnte sogar dabei helfen, die Versuchskosten von weniger als 5 Euro pro Test weiter zu reduzieren, sofern man nachweisen könnte, dass der Einsatz von weniger als 3 Prescale® Testfolien im Anschluss an die hypothetische Vorübung ähnliche Kaukraftergebnisse liefert. Letztlich konnte festgestellt werden, dass die Verwendung der modifizierten Prescale® Folien am Patienten (sei es zur Kaukraft- oder Kaudruckbestimmung) auch ohne große Vorübungen problemlos durchführbar war und das Messsystem dabei reproduzierbare Versuchsergebnisse erzielte. Die Abb. 57 fasst die Messergebnisse nochmals zusammen.

- Anzahl der Probanden : 178
- Altersverteilung : 3-94 Jahre [ $29,6 \pm 22,6$ ]
- Geschlechtsverteilung : 1 : 1
- Max. Gesamtfläche :  $21,8 \pm 14,9$  [mm<sup>2</sup>]
- Max. Gesamtkaukraft :  $920,6 \pm 553,4$  [N]
- Max. Druck :  $66,3 \pm 15,4$  [MPa]
- Max. Gesamtdruck :  $47,9 \pm 11,7$  [MPa]

**Abb. 57 Gesamtübersicht der statistischen Versuchsergebnisse aller Probanden sowie deren Zusammensetzung**

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Promotionsarbeit befasste sich mit der Thematik der Kaukraft- und Kaudruckmessung am Patienten mittels des von MÜLLER et al. [53] patentierten Verfahrens, auf welches in Deutschland ein Schutzrecht (DE 10317245) erteilt wurde. Die hauptsächliche Aufgabe war es hierbei, alters- und geschlechtsspezifische Kauflächen-, Kaukraft- sowie die resultierenden Kaulastwerte zu ermitteln. Zusätzlich galt es herauszufinden, inwieweit hierbei die von FINK [9] beschriebene Methode zur Kaukraftmessung mittels modifizierter Fuji™ Prescale® Folien Typ MS am Probanden praktisch anwendbar ist. Hierzu wurde zuerst mit der Unterstützung der MTL [46] ein mobiles Referenzgerät konstruiert, mit dessen Hilfe es problemlos gelang, die Prescale® Testfolien notwendigerweise nach deren Gebrauch am Patienten zu kalibrieren. Mithilfe einer zuvor eigens dazu erstellten Eichwertdatenbank wurden durch einen Referenzabgleich mögliche lagerungsbedingte Veränderungen der Folien und somit resultierende Messfehler kalkulierbar. Der hierzu von FUKUDA [13], OTTL et al. [58] sowie FINK [9] beschriebene lineare bis schwach sigmoidale Zusammenhang zwischen applizierter Kraft und berechnetem Farbgewicht wurde auch hier bestätigt. Hierfür war eine Vielzahl von labortechnischen Vorversuchen notwendig und es konnte nachgewiesen werden, dass der resultierende Fehler der gesamten Messkette bei etwa bei +20°C mit  $\leq 10\%$  signifikant kleiner war als vergleichsweise mit  $\leq 12,5\%$  bei -18°C, +8 °C und +37°C, weshalb die Lagerung bzw. Verwendung des modifizierten FUJI™ Prescale® Systems bei annähernd +20°C empfohlen wird. In Vorversuchen konnte außerdem gezeigt werden, dass das Referenzgerät bei ca. +20°C valide, reproduzierbare Einzelreferenzpunkte mit den kleinsten Standardabweichungen erzeugt. Diese wurden mit einem kontinuierlichen Referenzendruck von 86,9 SD  $\pm$  2,2 MPa, einer berechneten konstanten Kraft von 54,0 SD  $\pm$  3,0 N sowie einer beständigen Referenzfläche von 0,63 SD  $\pm$  0,01 mm<sup>2</sup> auf den Prescale® Folien generiert. Zusätzlich wurde herausgefunden, dass die Druckeichung der Folien auch schon bis zu 10 Tage vor deren eigentlicher Benutzung am Probanden durchgeführt werden kann, wodurch der Einsatz von ggf. vorkalibrierten Testfolien denkbar ist. Ferner wurde in Zusammenarbeit mit KLEIBER [34], für die Auswertung der gesammelten Messdaten, das Programm Zahni © entwickelt, dessen Basisquellcode von FEIKS bereits in der Arbeit von FINK [9] zum Einsatz kam. Durch die Komplettüber-

arbeitung der Ursprungsversion war es möglich, eine schnelle, anwenderfreundliche und vor allem anwendungsgerechte Software zu realisieren. Darüber hinaus gelang es, durch weitere Programmoptimierung und Modifikation der Bildauswertungsroutine die Darstellungsreichweite der Prescale® Folie Typ MS auf einen Druckmessbereich von 2 – 120 MPa zu erweitern. Die Bilderfassung wurde hierzu entsprechend den Empfehlungen von FINK [9] jeweils nach 24 Stunden und mit Hilfe eines Scanners bei einer Auflösung von 800 dpi ausgeführt. Die Speicherung der Bildinformationen erfolgte im PNG- Format. Nach der Gesamtauswertung sämtlicher Daten der 178 Probanden im Alter von 3 bis 94 Jahren konnten erstens eine mittlere maximale Gesamtkaufläche von  $21,8 \text{ SD} \pm 14,9 \text{ mm}^2$ , zweitens eine maximale Gesamtkaukraft von im Mittel  $920,6 \text{ SD} \pm 553,4 \text{ N}$  sowie drittens ein mittlerer maximaler Gesamtkaudruck von  $47,9 \text{ SD} \pm 11,7 \text{ MPa}$  bestimmt werden. Die weitherhin erfolgte statistische Berechnung der Maximalkaudrücke aller Probanden lieferte letztlich einen Druckmittelwert von  $66,3 \text{ SD} \pm 15,4 \text{ MPa}$ . Schließlich erwiesen sich die von FINK [9] angeführten Vorzüge der neuen Prescale® Messmethode als richtig. Nach Abschluss der Hauptstudie bestätigten sich so die Vorteile der einfachen, kostengünstigen Versuchsdurchführung sowie die Möglichkeit der Ermittlung und reproduzierbaren Bestimmung von Kaukräften und - drücken an Probanden. Die zudem geringe Sensordicke der Prescale® Folien von maximal  $110 \mu\text{m}$  ermöglichte es zudem, ohne eine größere Bissperrung, hochauflösend, valide und ortsgenau Kontaktpunkte bzw. - flächen zu ermitteln. Inwieweit dies gegebenenfalls inzwischen auch mit Hilfe des neuen T-Scan® III Verfahrens [84] der Firma Tekscan™ und der vierten Generation von Drucksensoren bewerkstelligt werden kann, muss die Zukunft klären. Ungeachtet dessen, kann zusammengefasst werden: Das Verfahren mittels der modifizierten Fuji™ Prescale® Folien Typ MS am Patienten ist eine gute und praktische Möglichkeit zur Erfassung und Bestimmung von individuell erzeugten Kaulastparametern und liefert(e) valide sowie reproduzierbare Daten, wenn z.T. auch ggf. teilobjektiv durch die zzt. noch manuelle Vorauswertung der Kaudruckfolien mit der Zahni© Software.

## 7 Literaturverzeichnis

1. **Adrian, E. D. & Bronk, D. W. 1929.** The Discharge of Impulses in Motor Nerve Fibers. *J. Physiol.* 67, 1929, S. 119-51.
2. **Alkan, A., et al. 2008.** Evaluation of Treatments in Patients with Nocturnal Bruxism on Bite Force and Occlusal Contact Area. *Eur J Dent.* 2, 2008, S. 276-82.
3. **Ando, K., et al. 2007.** A study on measuring occlusal contact area using silicone impression material an application of this method to the bite force measurement system using the pressure-sensitive sheet. *Dental Material Journal.* 26, 2007, 6, S. 898-905.
4. **Ando, K., Fuwa, Y.,Kuroswa, M., et al. 2009.** Bite force measurement system using pressure-sensitive sheet and silicone impression material. *Dental Materials Journal.* 28, 2009, 2, S. 212-8.
5. **Bartsch, P. 2001.** *Physiologieskript des orofazielen Systems (Auszüge)*. Deutschland : Universitätsklinikum Charité der HU zu Berlin, 2001. S. 48-102.
6. **Bendel, U. 2001.** *Physiologieskript des orofazialen Systems (Auszüge)*. Deutschland : Universitätsklinikum Charité der HU zu Berlin, 2001. S. 103-34.
7. **Bentivoglio, M. ,Mazzarello, P. Aug. 1998.** One hundred years of the Golgi apparatus - history of a disputed cell organelle. *The Italian Journal of Neurological Science.* 19, Aug. 1998, 4, S. 241-7.
8. **Chiaki, S. 1997.** A study of bite force distribution on the dental arch in normal subjects. *J Jpn ProsthodontSoc.* 41, 1997, S. 634-44.
9. **Fink, T. 2007.** Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Kaukraftmessung. *Zahnmed. Diss.* 2007, S. 6-7.
- **2007.** Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Kaukraftmessung. *Zahnmed. Diss.* 2007, S. 12,27,28.
- **2007.** Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Kaukraftmessung. *Zahnmed. Diss.* 2007, S. 36.
10. **Freesymeyer, W. B. 1995.** *Klinische Prothetik*. Deutschland : Hüthig Verlag Heidelberg, 1995. S. 2. Bd. 1.
11. **FujiFilm Europe - FujiFilm Recording Media GmbH. 2010.** [Online] 14. Jan. 2010. <http://www.fujifilm-prescale.eu>.
12. **Fujifilm. 2003.** Fuji(TM) Prescale(R)Film: Instruction manual. 2003.

- 13. Fukuda, M. 1981.** A new system for measuring occlusal force. New Prescale and its measuring device (author's transl). *Nippon Shishubyo Gakkai Kaishi*. 23, 1981, 3, S. 397-414.
- 14. Gibbs, C. H., et al., 1986.** Limits of human bite strength. *J Prosthet Dent*. 56, 1986, 2, S. 226-9.
- 15. Gibbs, C. H., et al. 2002.** Maximum clenching force of patients with moderate loss of posterior tooth support: a pilot study. *J Prosthet Dent*. 88, 2002, 5, S. 498-502.
- 16. Golgi, C. 1898.** *Arch. Ital. de Biol.* 30, 1898.
- 17. Golgi, C. 1898.** Intomo alla struttura delle cellule nervose. *Bollettino della Società Medico-Chirurgica di Pavia*. 13, 1898, 1, S. 3-16.
- 18. Gonzalez Novoa, G.A. et al. 2005.** Physical solid-state properties and dissolution of sustained-release matrices of polyvinylacetate. *Eur J Pharm Biopharm*. 59, 2005, 2, S. 343-50.
- 19. Haas, U. 1988.** *Physik für Pharmazeuten und Mediziner 5. Auflage*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 1988. S. 54-70.
- 20. Hannover, Universität.** [www.ubicampus.mh-hannover.de](http://www.ubicampus.mh-hannover.de). [Online] 01.Jan.2010. <http://www.ubicampus.mhhannover.de/~physik/vorlesung/kap17/kap17.html>
- 21. Harada, K., et al. 2003.** Changes in bite force and dentoskeletal morphology in prognathic patients after orthognathic surgery. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 95, 2003, 6, S. 649-54.
- 22. Harada, K., et al. 2000.** Measure of bite force and occlusal contact area before and after bilateral sagittal split ramus osteotomy of the mandible using a new pressure-sensitive device: a preliminary report. *J Oral Maxillofac Surg*. 58, 2000, 4, S. 373-4.
- 23. Harms, V. 2004.** *Physik für Mediziner und Pharmazeuten 16. Auflage*. Deutschland: Harms Verlag Lindhöft, 2004. S. 23-31.
- 24. Hattori, Y., et al. 2003.** Occlusal and TMJ loads in subjects with experimentally shortened dental arches. *J Dent Res*. 82, 2003, 7, S. 532-6.
- 25. Hattori, Y., Okugawa, H., Watanabe, M. 1994.** Occlusal force measurement using dental prescale. *J Jpn Prosthodont Soc*. 38, 1994, S. 835-41.
- 26. Hidaka, O., et al. 1999.** Influence of clenching intensity on bite force balance, occlusal contact area, and average bite pressure. *J Dent Res*. 78, 1999, 7, S. 1336-44.
- 27. Hirasawa, T., et al., 1978.** Dental application of pressure measuring sheet (author's transl.). *Shika Rikogaku Zasshi*. 19, 1978, 48, S. 298-300.

- 28. Jacobs, R. 1998.** *Osseoperception*. [Hrsg.] Catholic University Leuven. Belgien : Department of Peridontology, 1998.
- 29. Karibe, H., et al. 2003.** Relation between clenching strength and occlusal force distribution in primary dentition. *J Oral Rehabil.* 30, 2003, 3, S. 307-11.
- 30. Kawamura, Y., Kator, I., Takata, M. 1967.** Jawclosing muscle activities with the mandible in rest position. *J. dent. Res.* 1967, 46, S. 1356.
- 31. Kawamura, Y., Nishijama, T. 1966.** Projection of dental afferent impulses to the trigeminal nuclei of the cat. *Jap. J. Physiol.* 1966, Bd. 16, S. 584.
- 32. Kawamura, Y., Tsukamoto, S., Miyoshi, K. 1961.** Experimental studies on neuronal mechanism of bruxism. *J. dent. Res.* 1961, 40, S. 217.
- 33. Kiliaridis S., Tzakis M., Carlsson G. 1995.** Effects of fatigue and chewing training on maximal bite force and endurance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 107, 1995, 4, S. 372-8.
- 34. Kleiber, M. 2007-2009.** *M.Sc.* Deutschland: s.n., 2007-2009.
- 35. Körber, Karlheinz. 1985.** *Zahnärztliche Prothetik 3. Auflage.* Stuttgart, New York : Georg Thieme Verlag, 1985. S. 26-64.
- 36. Korona Deutschland. 2010.** <http://www.korona-waagen.de>. [Online] 14. Jan. 2010. <http://www.korona-waagen.de/web/de/produkte/personenwaagen/Leo.php>.
- 37. Kumagai, H., et al. 1999.** Occlusal force distribution on the dental arch during various levels of clenching. *J Oral Rehabil.* 26, 1999, 12, S. 932-5.
- 38. Kurita, H., Ikeda, K. & Kurashina, K. 2000.** Evaluation of the effect of a stabilization splint on occlusal force in patients with masticatory muscle disorders. *J Oral Rehabil.* 27, 2000, 1, S. 79-82.
- 39. Lehmann, M. & Hellwig E. 2002.** *Zahnärztliche Propädeutik 9. Aufl.* Deutschland : Urban & Fischer Verlag München, 2002. S. 50-9.
- 40. Liggins, A. B., Hardie, W. R. et al. 1994.** Sterilization of Fuji pressure-sensitive film. *Med Eng Phys.* 16, 1994, 6, S. 496-500.
- 41. Löffler, G. & Petrides, P.E. 1998.** *Biochemie und Pathologie 6. Auflage.* Berlin, Heidelberg, Nex York : Springer Verlag, 1998. S. 88,714.
- 42. Mao, JJ. 2002.** Mechanobiology of craniofacial sutures. *J Dent Res* . 2002, Bd. 81, S. 810-6.
- 43. Masahiro, K., et al. 2002.** Development of methods for correcting measured values using the bite force measuring system. Part II. An examination with the experimental model which has no early contact. *Aichi-Gakuin Journal of Dent Sci.* 40, 2002, S. 191-7.

- 44. Matsui, Y., et al. 1996.** A computerized method for evaluating balance of occlusal load. *J Oral Rehabil.* 23, 1996, 8, S. 530-5.
- 45. Matsui, Y., et al. 1996.** A computerized method for evaluating distribution of occlusal load on implant-supported fixed cantilever prostheses. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 11, 1996, 1, S. 67-72.
- 46. Medizinisch Techn. Labore (MTL) Charité Campus Virchow - Ing. Dannenberg, Ing. Heinz. 2007.** Konstruktion einer Messvorrichtung für die Referenzmessung/ Referenzpunktsetzung auf der PVAC-Folie (für die Kaukraftmessung am Patienten). Deutschland: s.n., 2007. Aufg.-Nr. 06344 Projektleiter Müller, W.-D.
- 47. Miura, H., et al. 2001.** Comparison of maximum bite force and dentate status between healthy and frail elderly persons. *J Oral Rehabil.* 28, 2001, 6, S. 592-5.
- 48. Miyaura, K., et al. 1999.** Comparison of biting forces in different age and sex groups: a study of biting efficiency with mobile and non-mobile teeth. *J Oral Rehabil.* 26, 1999, 3, S. 223-7.
- 49. Miyaura, K., et al. 2000.** Rehabilitation of biting abilities in patients with different types of dental prostheses. *J Oral Rehabil.* 27, 2000, 12, S. 1073-6.
- 50. Morita, M., et al. 2003.** Correlation between periodontal status and biting ability in Chinese adult population. *J Oral Rehabil.* 30, 2003, 3, S. 260-4.
- 51. Motegi, E., Nomura, M., et al. 2009.** Occlusal force in people in their sixties attending college for elderly. *Bull Tokyo Dent Coll.* 50, 2009, 3, S. 135-40.
- 52. Motsch, A. 1978.** *Funktionsorientierte Einschleiftechnik für das natürliche Gebiss.* München, Wien : Hanser, 1978.
- 53. Müller, W.-D., Fink, T., Feiks F. 2004.** *Messungs-Set für die Okklusions-, Kaukraft- und Kaudruckbestimmung und Messverfahren.* DE 10317245 Deutschland, 2004.
- 54. Munger, B.L., Ide C. 1988.** The structure and function of cutaneous sensory receptors. *Arch. Histol. Cytol.* 51, 1988, 1, S. 1-34.
- 55. Ng, T.W. and W.K. Yeong. 2005.** Inexpensive color evaluation of dye-based pressure-sensitive films for plantar studies. *J Biomech.* 38, 2005, 10, S. 2130-3.
- 56. Ohkura, K., et al. 2001.** Changes in bite force and occlusal contact area after orthognathic surgery for correction of mandibular prognathism. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 91, 2001, 2, S. 141-5.
- 57. Okiyama, S., Ikebe K. & Nokubi, T. 2003.** Association between masticatory performance and maximal occlusal force in young men. *J Oral Rehabil.* 30, 2003, 3, S. 278-82.

- 58. Ottl, P., et al. 1992.** Messung der Kaukraft durch Druckmeßfolie und digitale Bildverarbeitung. *Dtsch zahnärztl Z.* 47, 1992, 4, S. 266-8.
- 59. Posselt, U. 1952.** Studies in the mobility of the human mandible. *Acta odont. scand.* . 1952, 10.
- 60. Prümper, J. 1997.** Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität. In R. Liskowski, B.M. Velichkovsky & W.Wünschmann (Hrsg.), *Software-Ergonomie '97 - Usability Engineering: Integration von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwic.* 1997, S. 253-62.
- 61. Putz, R. & Pabst, R. 1993.** *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen 20.Aufl.* Deutschland : Urban & Schwarzenberg Verlag München, 1993. S. 66-67. Bd. 1.
- 62. Rahn, R. 2003.** *Zahnärztliche Lokalanästhesie.* [Hrsg.] Forum med dent. Deutschland : Sonafi-Aventis Gruppe, 2003. S. 15-7.
- 63. Rateitschak, K.H. , Wolf, H.F. 2004.** *Color Atlas of Dental Medicin I - Periodontology.* [Hrsg.] Thieme. 2004, 3, S. 12-20.
- 64. Rose, E. C. 2003.** Der Einfluss der Konsistenz der Nahrung auf die dentofaziale Entwicklung . *ZM.* 2003, 22, S. 60.
- 65. Schiebler, T.H., Schmidt, W. & Zilles, K. 1999.** *Anatomie 8.Auflage.* Deutschland : Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1999. S. 406-46.
- 66. Schmidt, R.F. & Thews, G. 1997.** *Physiologie des Menschen 27. Aufl.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997. S. 76-124.
- **1997.** *Physiologie des Menschen 27. Aufl.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997. S. 792-3.
- 67. Schröder, H. 1928.** *Lehrbuch der technischen Zahnheilkunde.* 1928.
- 68. Schroeder, H.E. 1982.** *Orale Strukturbiologie 2. Aufl.* Stuttgart, New York : Thieme, 1982. S. 188-282.
- 69. Schumacher, G.-H. 1983.** *Odontographie - Eine Oberflächenanatomie der Zähne 4. Aufl.* s.l.: J.A.Barth Verlag Leipzig, 1983.
- 70. Sherrington, C. S. & Lidell, E. G. T. 1924.** Reflexes in Response to Stretch. *Proc. Roy. Soc.* 1924, S. 212-42.
- 71. Sherrington, C. S. 1898.** Decerebrate Rigidity, and Reflex Coordination of Movements. *J. Physiol.* 22, 1898, 4, S. 319-32.
- 72. Shiga, H. , et al. 2003.** Reliability of the occlusal force displayed on the dental prescale system. *J Jpn Soc Stomatognath Funct.* 9, 2003, S. 191-5.
- 73. Shinogaya, T., et al. 2002.** A new approach to evaluating occlusal support by analyzing the center of the bite force. *Clin Oral Investig.* 6, 2002, 4, S. 249-56.

- 74. Shinogaya, T., et al. 2000.** Bite force and occlusal load in healthy young subjects - a methodological study. *European J Prosthodont Restor Dent.* 8, 2000, 1, S. 11-5.
- 75. Shinogaya, T., et al. 2001.** Effects of ethnicity, gender and age on clenching force and load distribution. *Clin Oral Investig.* 5, 2001, 1, S. 63-8.
- 76. Shuichi, N., et al. 1997.** Experimental study on the anteriorposterior distribution of bite force as measured by dental prescale - Investigation from contact force distribution on an experimental model. *J Jpn Prosthodont Soc.* 41, 1997, S. 710-8.
- 77. Sondang, P., et al. 2003.** Correlation between maximum bite force and craniofacial morphology of young adults in Indonesia. *J Oral Rehabil.* 30, 2003, 11, S. 1109-17.
- 78. Suzuki, T., et al. 1994.** Clinical evaluation of measuring system of occlusal force. *Kokubyo Gakkai Zasshi.* 61, 1994, 3, S. 437-45.
- 79. Suzuki, T., et al. 1997.** Evaluation of complete denture occlusal contacts using pressure-sensitive sheets. *Int J Prosthodont.* 10, 1997, 4, S. 386-91.
- 80. Suzuki, T., et al. 1999.** Occlusal contacts of edentulous patients with mandibular hybrid dentures opposing maxillary complete dentures. *Int J Oral Maxillofacial Implants.* 14, 1999, 4, S. 504-9.
- 81. Szentagothai, J. 1949.** Functional representation in the motor trigeminal nucleus. *J. comp. Neurol.* 1949, 90, S. 111.
- 82. Tanaka, M., et al. 2004.** Denture wearing and strong bite force reduce pressure pain threshold of edentulous oral mucosa. *J Oral Rehabil.* 31, 2004, 9, S. 873-8.
- 83. Trepel, M. 2004.** *Neuroanatomie Struktur und Funktion 3.Aufl.* [Hrsg.] Elsevier GmbH. Deutschland: Urban & Fischer Verlag, 2004. S. 61.
- 84. T-Scan® III: Dental Occlusal Analysis System 2010.** [www.tekscan.com](http://www.tekscan.com). [Online] 14. Apr. 2010. <http://www.tekscan.com/dental/specs.html>
- 85. Universität Hannover. 2010.** [www.ubicampus.mh-hannover.de](http://www.ubicampus.mh-hannover.de). [Online] 01. Jan. 2010. <http://www.ubicampus.mh-hannover.de/~physik/vorlesung/kap17/kap17.html>.
- 86. Waldeyer, A. & Waldeyer, U. 1975.** *Anatomie des Menschen.* Deutschland: Walter de Gruyter Verlag Berlin, New York, 1975. S. 8-85. Bd. 2.
- 87. Yamada, K., et al. 2000.** The relationship between frontal facial morphology and occlusal force in orthodontic patients with temporomandibular disorder. *J Oral Rehabil.* 27, 2000, 5, S. 413-21.
- 88. Yoshinori, H., Chiaki, S., Makoto, W. 1996.** Bite force distribution on dental arch during clenching. *J Jpn Soc Stomatognath Funct.* 2, 1996, S. 111-7.

## 8 Anhang

## 8.1 Anhang I – Kaumuskulatur tabellarisch

Name <i>Innervation</i>	Ursprung	Ansatz	Funktion
<b>M. masseter</b> Pars superficialis Pars profunda <i>N. massetricus</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Arcus zygomaticus</b> ; oberflächliche Partie : vom unteren Rand tiefere Partie: vom hinteren Teil des unteren Randes	<b>Tuberositas masseterica</b> laterale Fläche des Ramus mandibulae von der Incisura bis zum Angulus mandibulae	<b>Elevation/ Adduktion, Protrusion</b> (Pars superficialis) <b>Laterotrusion</b> (einseitige Kontraktion Pars superficialis)
<b>M. temporalis</b> Pars anterior Pars posterior <i>Nn. temporales profundi</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Os temporale</b> , Pars squamosa, Facies temporalis und tiefes Blatt der Fascia temporalis	<b>Proc. coronoideus mandibulae</b>	<b>Elevation/ Adduktion</b> (Pars anterior) <b>Retrusion</b> (Pars posterior)
<b>M. pterygoideus lat.</b> <i>N. pterygoideus lateralis</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Proc. Pterygoideus</b> , (Lamina lateralis), Tuber maxillare, Facies temporalis	<b>Fovea pterygoidea</b> (Proc. condylaris mandibulae), Discus und Capsula articularis (Articulatio temporomandibularis)	<b>Elevation/ Adduktion</b> <b>Protrusion</b> bei beidseitiger Kontraktion <b>Laterotrusion</b> bei einseitiger Kontraktion
<b>M. pterygoideus med.</b> <i>N. pterygoideus medialis</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Fossa pterygoidea</b> , Proc. pyramidalis (Os palatinum) Lamina lateralis (Proc. pterygoideus)	<b>Tuberositas pterygoidea</b> mediale Fläche des Angulus mandibulae, bildet mit M. masseter sog. Masseterschlinge	<b>Abduktion/ Depression</b> bei Kontraktion lateraler Anteile

Name <i>Innervation</i>	Ursprung	Ansatz	Funktion
<b>M. digastricus</b> Venter anterior <i>N. mylohyoideus</i> Venter posterior <i>R. digastricus</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Incisura mastoidea</b> (Os temporale), Venter posterior Zwischensehne am Cornu minus des Os hyoideum (Corpus)	<b>Fossa digastrica</b> (Mandibula) Venter anterior	<b>Abduktion/ Depression</b> Hebung bzw. Fixierung des Zungenbeins, Unterstützung des M. mylohyoideus
<b>M. stylohyoideus</b> <i>R. stylohyoideus</i> ( <i>N. facialis</i> , VII)	<b>Proc. Styloideus</b> (Os temporale)	<b>Cornu minus</b> (Os hyoideum)	<b>Abduktion/ Depression</b> Fixierung des Zungenbeins, zieht dieses beim Schluckakt dorso-kranial
<b>M. mylohyoideus</b> <i>N. mylohyoideus</i> ( <i>N. mandibularis</i> , V/3)	<b>Linea mylohyoidea</b> (Mandibula) beide Muskeln bilden Teil des Mundbodens	<b>Raphe mylohyoidea</b> (Os hyoideum)	<b>Abduktion/ Depression</b> Hebung des Mundbodens, der Zunge und des Zungenbeins
<b>M. geniohyoideus</b> ( <i>N. hypoglossus</i> , XII)	<b>Spina mentalis</b> (Mandibula) beide Muskeln bilden Teil des Mundbodens	<b>Os hyoideum (Corpus)</b>	<b>Abduktion/ Depression</b> Fixierung und Hebung des Zungenbeins, Unterstützung des M. mylohyoideus bei der Hebung der Zunge

Tab. 18,19 (akzessorische) Kaumuskeln mit Innervation, Ansatz und Ursprung sowie Funktion(en) n. [65, 83]

## 8.2 Anhang II - Nervus trigeminus tabellarisch

Innervation	motorisch	sensibel
<b><i>N. ophthalmicus (V1)</i></b>		
- N. nasociliaris	---	Bulbus oculi mit Hornhaut Nasentrücken und Schleimhäute der Siebbeinzellen, Keilbeinhöhle und Nasenscheidewand
- N. frontalis	---	medialer Augenwinkel/ - Oberlid Stirnhaut
- N. lacrimalis	viszeromotorisch Tränendrüse über Fasern N.VII	lateralen Augenwinkel/ - Oberlid
<b><i>N. maxillaris (V2)</i></b>		
- Rr. ganglionares	---	Schleimhaut der Nasenmuscheln, Siebbeinzellen, Gaumens, Tonsillen sowie Frontzähne mit Gingiva
- N. zygomaticus	viszeromotorisch Tränendrüse über Fasern N.VII	Haut der Schläfengegend und der Region über dem Jochbein
- N. infraorbitalis	---	Haut zwischen Unterlid und Oberlippe sowie Großteil der Oberkieferzähne mit Gingiva
<b><i>N. mandibularis (V3)</i></b>		
- N. auriculotemporalis	viszeromotorisch Gl. Parotidea	Haut im Schläfenbereich
- N. alveolaris inferior	---	Haut im Kinnbereich nach lateral bis zum Angulus mandibulae sowie Unterkieferzähne mit zgh. Gingiva
- N. lingualis	Viszeromotorisch Glandulae. submandibularis et sublingualis	Vordere 2/3 der Zunge sowie speziell- viscerosensibel via Geschmacksfasern aus N.VII
- N. buccalis	---	Wangenschleimhaut mit Gingiva.
- Radix motoria	M. masseter M. temporalis Mm. pterygoideilat. et. med.  M. digastricus (Venter anterior) M. mylohyoideus  M. tensor tympani M. tensor veli palatini	---

Tab. 19 Nervus trigeminus (N. V) mit seinen wichtigsten Endästen und Innervationsgebieten n. [65, 83]

### 8.3 Anhang III – Poster Publikation IADR 12/09/2009

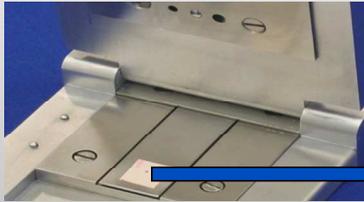


## How big is the variation of the individual bite force?

M. Gütte, T. Fink, W.-D. Müller Dental Medical Faculty Charité CC3, Assmannshauerstr. 4-6, 14197 Berlin, Germany

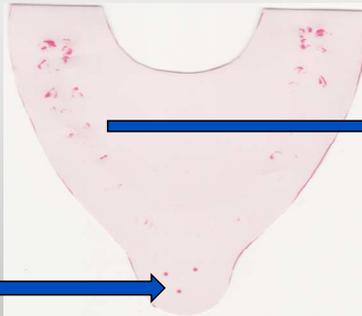
#### INTRODUCTION:

CAD CAM techniques for the manufacturing of dental devices are the key for reliable devices because of the precision of the dimensions. Once is missing for a predictable lifetime of the devices namely the individual bite force. Especially in case of the application of ceramic materials the knowledge of the maximum bite force helps to adapt the dimensions on the real situation in the mouth of the patient.



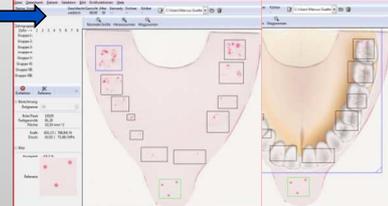
#### AIM:

Based on the investigation by Dr. med. dent. T. Fink (IADR abstract 0279 Sept. 29th, 2007 Thessaloniki, Greece) objective of the presented work is to estimate the distribution of the bite force/ bite pressure depending on the age and sex of different test persons.

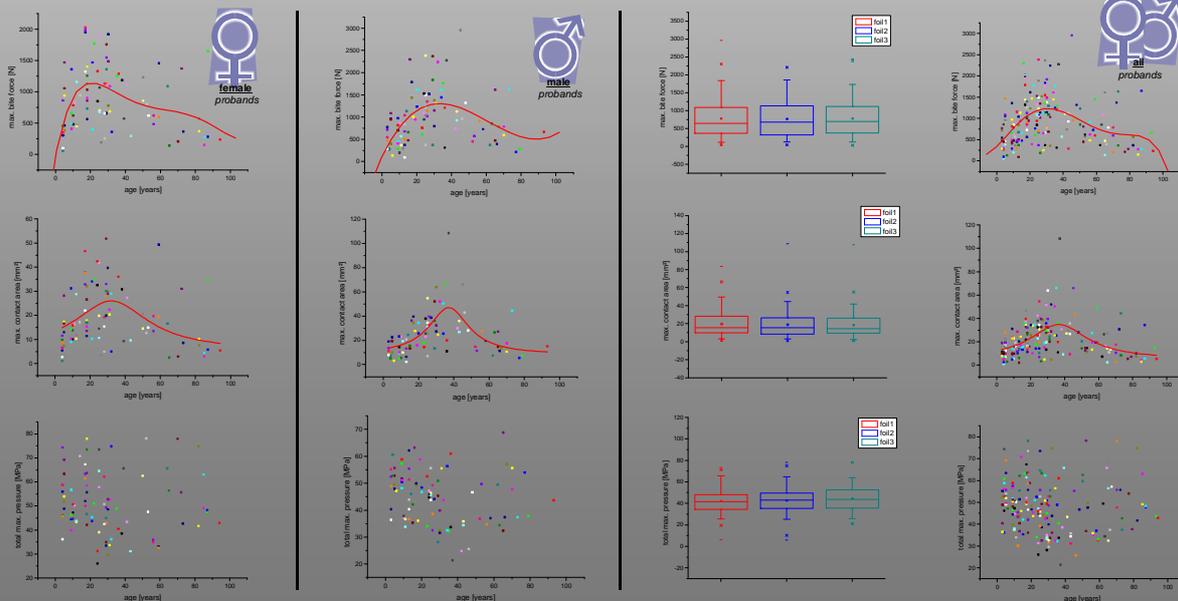


#### MATERIAL & METHODS:

Against humidity resistant polymer covered pressure Fuji-Prescale™ foil was applied on 120 patients of different age, between 3-94 years, and sex. Three bites/ foils per patient were necessary to get real maximum bite force/ bite pressure; the highest values were used for assessment. All data were collect by newly developed software and were assessed by Origin® v7.5. For statistical analysis Anova® was used.



**RESULTS:** 2961 N was measured as maximum and 155N as minimum bite force. The maximum range of bite force between 1500N and 2000N was obtained in the groups between 20 and 40 years. No statistically significant differences depend on the sex of the patients could be observed. In the different groups of age the variation of the estimated bite forces was up to a factor 10.



**CONCLUSION:** The big variation of bite force between the patients is a good reason for application of the foil concerning the decision of choice of material and kind of construction of a dental device. The chosen concept to measure and to assess the maximum bite force gets reliable values.

Abb. 58 Poster Publication (44th Meeting of the Continental European Division in Munich) abstractnr:0349

## 9 Danksagung

Ich danke ganz besonders Herrn Prof. (UH) PD. Dr. W.-D. Müller, der nicht nur die Bereitstellung des Themas ermöglichte sowie den Ideenanstoß zu dieser Arbeit gab, sondern auch durch seinen freundlichen und unermüdlichen Beistand entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Hierbei sei auch Fr. C. Schöpf und Fr. G. Bölling für die Hilfestellung bei der Klärung und Durchführung technischer Fragen gedankt.

Mein spezieller Dank gilt auch M. Sc. M. Kleiber durch dessen stetiges und zeitintensives Engagement die Software Zahni© für die Auswertung der Daten realisiert werden konnte. In diesem Zusammenhang danke ich auch Dr. T. Fink und Dipl. Inf. F. Feiks für die Bereitstellung des Quellcodes der ursprünglichen Version sowie für die Genehmigung zur Anwendung des modifizierten Prescale® Druckmessverfahrens.

Weiterhin danke ich den Ingenieuren Dannenberg und Heinz (MTL der Charité) für die Unterstützung und die praktische Ausführung bei der Referenzgeräteherstellung.

Mein Dank gilt auch der Zahnarztpraxis C. Loewe, der Kinderzahnarztpraxis Dr. F. Hausding sowie Priv.-Doz. Dr. I. Peroz für die zusätzliche Hilfe bei der Vermittlung und Erfassung von Testpersonen. In diesem Zusammenhang danke ich auch dem Berliner Kita-Verbund Spatzentrio, dem Seniorenheim in der Hohensteiner Straße in Berlin sowie allen teilnehmenden Probanden in der Hauptstudie, die sich freundlicherweise freiwillig für den Versuch und die Datenerhebung zu Verfügung gestellt haben und somit ausschlaggebend für die Aufklärung des Hauptanliegens dieser Studie waren.

## **10 Lebenslauf**

Aus datenrechtlichen Gründen wird mein Lebenslauf in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich Marcus Gütte erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Kaukraft- und Kaudruckmessung am Patienten - Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit einer modifizierten Prescale® Folie“ selbst, d.h. ohne die Hilfe Dritter verfasst habe. Die Arbeit stellt auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten dar und es wurden ausschließlich die angegebenen Quellen/ Hilfsmittel benutzt

Berlin, 20. April 2010

\_\_\_\_\_  
Unterschrift