

6 Ergebnisse

6.1 Ergebnisse aus den Vorversuchen

Folgende Ergebnisse aus den Vorversuchen wurden bei den weiteren Untersuchungen berücksichtigt:

a) Scannereinstellungen

Es stellte sich heraus, dass das Scannen im Auflichtverfahren die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegenüber dem Durchlichtverfahren verbesserte.

Weiterhin ergaben sich beim Scannen der Druckmessfolien Reflexionen durch die glatte Oberfläche der Trägerfolie, die sich als regenbogenfarbene Streifen bemerkbar machten. Für alle Messungen wurde deshalb immer die matte Seite (unbeschichtete bzw. selbst beschichtete Seite) der Folie gescannt.

Die Parameter des Vistascan-Programms Entraisterung und Filterung wurden wegen starker Verschlechterung der Bildqualität deaktiviert.

Einstellungen der Auflösung unter 800 dpi ergaben keine gleich bleibenden Messwerte. Deshalb wurde mit 800 dpi gescannt. Größere Auflösungen verlangsamten den Scannvorgang erheblich.

b) Auswertungsprogramm

In Vorversuchen wurde eine passende Einstellung des Schwellwertes, also der Rauschgrenze, gesucht. Der Schwellwert wurde soweit heraufgesetzt bis die Werte für Fläche und Gewicht an einem roten Fleck konstant blieben. Die Größe des Markierungsfelds um diesen Fleck sollte keinen Einfluss haben. Der gefundene Schwellwert betrug 30%.

c) Auswahl des Folientyps

In Eigenversuchen zeigte sich, dass die Prescale Folie vom Typ LW bei subjektiv mäßiger und starker Belastung gleich starke Verfärbungen aufwies. Neben der zu hohen Empfindlichkeit fiel eine gegenüber dem anderen Folientyp erhöhte Bissperrung auf. Diese war auf die annähernd doppelte Dicke (200 gegenüber 110 µm) der Folie

zurückzuführen. Von der weiteren systematischen Untersuchung dieser Folie wurde aus diesem Grund abgesehen.

6.2 Scannergenauigkeit

a) Dimensionstreue

Die gemessenen gemittelten Streckenwerte sowie die dazugehörigen Standardabweichungen für die horizontale und vertikale Messung sind in Tabelle 4 ersichtlich. Die Tabelle zeigt den Mittelwert \bar{x} der gemessenen Strecken, die Standardabweichung $s_{\bar{x}}$, die Varianz $s_{\bar{x}}^2$ sowie den Korrekturfaktor.

Tabelle 4

| Aufl. [dpi] | Strecke \bar{x} [mm] | | $s_{\bar{x}}$ [mm] | | $s_{\bar{x}}^2$ [mm ²] | | Korrekturfaktor f | |
|-----------------|------------------------|--------------|--------------------|-------------|------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|
| | horizontal | vertikal | Horizontal | vertikal | horizontal | vertikal | horizontal | Vertikal |
| 100 | 70,36 | 69,85 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0051 | -0,0021 |
| 200 | 70,41 | 69,79 | 0,07 | 0,09 | 0,0043 | 0,0081 | 0,0058 | -0,0031 |
| 300 | 70,33 | 69,77 | 0,06 | 0,06 | 0,0033 | 0,0039 | 0,0047 | -0,0032 |
| 400 | 70,37 | 69,84 | 0,03 | 0,09 | 0,0007 | 0,0088 | 0,0053 | -0,0023 |
| 500 | 70,33 | 69,87 | 0,03 | 0,06 | 0,0007 | 0,0035 | 0,0047 | -0,0019 |
| 600 | 70,33 | 69,78 | 0,07 | 0,05 | 0,0045 | 0,0025 | 0,0047 | -0,0031 |
| 700 | 70,38 | 69,83 | 0,08 | 0,08 | 0,0059 | 0,0062 | 0,0054 | -0,0024 |
| 800 | 70,41 | 69,77 | 0,03 | 0,06 | 0,0007 | 0,0034 | 0,0058 | -0,0033 |
| 900 | 70,31 | 69,76 | 0,09 | 0,05 | 0,0076 | 0,0020 | 0,0044 | -0,0034 |
| 1000 | 70,38 | 69,75 | 0,05 | 0,08 | 0,0026 | 0,0061 | 0,0054 | -0,0036 |
| 1100 | 70,30 | 69,76 | 0,05 | 0,05 | 0,0024 | 0,0022 | 0,0043 | -0,0035 |
| 1200 | 70,34 | 69,78 | 0,06 | 0,07 | 0,0036 | 0,0045 | 0,0049 | -0,0031 |
| 100-1200 | 70,36 | 69,80 | 0,06 | 0,07 | 0,0039 | 0,0054 | 0,0050 | -0,0029 |

Der relative Fehler f bei der Streckenmessung berechnet sich nach:

$$f = \frac{(\bar{x} - l)}{l} \quad [38]$$

Dabei ist l die wahre Strecke (Sollmaß) von 70 mm die mit dem Objektmikrometer abgebildet wurde und \bar{x} die mittlere gemessene Strecke (Istmaß).

Um nun später aus den gemessenen Werten x auf die wahre Strecke zu schließen, gilt

$$l_{\text{horizontal}} = \frac{x_{\text{horizontal}}}{(1 + f_{\text{horizontal}})} \text{ und}$$

$$l_{\text{vertikal}} = \frac{x_{\text{vertikal}}}{(1 + f_{\text{vertikal}})}$$

und mit der Fläche A (Istmaß)

$$A = l_{\text{horizontal}} \times l_{\text{vertikal}}$$

ergibt sich

$$A = \frac{x_{\text{horizontal}} x_{\text{vertikal}}}{(1 + f_{\text{horizontal}})(1 + f_{\text{vertikal}})}$$

Der relative, systematische Flächenfehler ist also:

$$f_{\text{Fläche}} = (1 + f_{\text{horizontal}})(1 + f_{\text{vertikal}})$$

Aufgrund der Unabhängigkeit zwischen eingestellter Auflösung und relativem, systematischem Fehler (Abbildung 26) wurde für die Berechnung des Flächenfehlers der Mittelwert aller Messungen herangezogen.

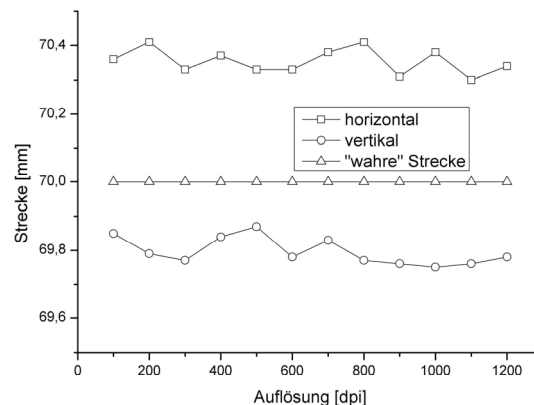


Abbildung 26: gemessene Streckenlängen bei verschiedenen Auflösungen

So ergibt sich für den relativen, systematischen Flächenfehler:

$$f_{\text{Fläche}} = (1 + 0,0050)(1 - 0,0029)$$

$$f_{\text{Fläche}} = 1,0021$$

Die errechneten Flächen müssen nun stets durch diese Fehlerkonstante dividiert werden.

b) maximales Auflösungsvermögen

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung der Auflösung auf der Grundlage des Testobjektes (Abbildung 23). Offensichtlich stimmen die eingestellten Auflösungen weitestgehend mit den gemessenen überein. Größenabweichungen der Auflösung gab es nur dort (500, 700, 900, 1100 dpi), wo keine entsprechende Anzahl von Linienpaaren auf dem Testobjekt vorhanden waren.

Tabelle 5: Versuchsergebnisse bei verschiedenen Auflösungseinstellungen

| Eingestellte Auflösung [dpi] | Gemessene Auflösung [lp/mm] | Errechnete Auflösung [dpi] |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 100 | <5 | <254 |
| 200 | <5 | <254 |
| 300 | 6 | 304,8 |
| 400 | 8 | 406,4 |
| 500 | 8 | 406,4 |
| 600 | 13 | 660,4 |
| 700 | 13 | 660,4 |
| 800 | 16 | 812,4 |
| 900 | 16 | 812,4 |
| 1000 | 20 | 1016 |
| 1100 | 20 | 1016 |
| 1200 | 25 | 1270 |

Die geringste korrekt messbare Auflösung lag bei 300 dpi, da die minimale Auflösung des Testobjektes 5 lp/mm (254 dpi) betrug.

6.3 Folienuntersuchungen

6.3.1 Lagerzeitabhängigkeit und Reproduzierbarkeit

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Lagerzeit der Folien bis zur Exposition untersucht. Die Ergebnisse der systematischen Untersuchungen zur

Lagerzeitabhängigkeit und Reproduzierbarkeit sind in Tabelle 6 und den Abbildungen 27–29 dargestellt.

Die Lagerzeit der untersuchten Folien ist die Zeitspanne, die zwischen dem Auftragen der Schutzschicht auf den Fuji Film und der ersten Druckexposition liegt. Da durch dauerhaftes Auflegen der Cellophanfolie nicht von einer Beeinflussung des Färbeverhaltens des Fuji Films ausgegangen wurde, ist für diese Folien keine Lagerzeit angegeben.

Die Alterung des unbeschichteten Fuji Films für die untersuchten Lagerzeiten wurde vernachlässigt, da die Filme ein Mindestalter von 6 Monaten hatten.

Alle Druckmessfolien wurden außer während der Belastung durch die Prüfmaschine sowie dem Scannen lichtgeschützt bei 18-24 °C aufbewahrt.

Während der Auswertung der Messwerte zeigte sich, dass die eingelesenen Scannbilder der mit Cellophan beschichteten Folie nur nach Entfernung dieser zu verwenden waren. Aufgrund der unebenen Oberfläche der Cellophanfolie wurden die erhaltenen Bilder unscharf und zeigten regenbogenfarbene Artefakte.

Aus der statistischen Auswertung (Tabelle 5) und den graphischen Darstellungen (Abbildungen 27-29) der Versuchsreihen ist zu ersehen, dass es bei den Folien mit PVAC- und Latexbeschichtung in den ersten 168 Stunden nach Beschichtung zu gewissen Veränderungen des gemessenen Flächengewichtes kommt, wobei auch Unterschiede zwischen den unterschiedliche beschichteten Folien auftreten. Mit Ausnahme der latexbeschichteten Folie blieb für Lagerzeiten größer als 168 Stunden bei allen Folien der Messwert der Färbung im Rahmen der Messwertgenauigkeit konstant.

Tabelle 6

| Probe | Beschichtungsmaterial | Verfahren | Lagerdauer [h] | Gewicht/Fläche [Pixel ⁻¹] | | Standardabweichung | | relative Standardabweichung [%] | |
|-------|-----------------------|-----------|----------------|---------------------------------------|-------|--------------------|-------|---------------------------------|-------|
| | | | | 4 h | 4 mon | 4 h | 4 mon | 4 h | 4 mon |
| 1 | Keines | Ohne | 0 | 0,426 | 0,399 | 0,005 | 0,003 | 1,2 | 0,8 |
| 2 | Cellophan | Ohne | 0 | 0,443 | 0,423 | 0,003 | 0,004 | 0,7 | 0,9 |
| 3 | PVAC | Spritzen | 4 | 0,423 | 0,403 | 0,004 | 0,004 | 1,0 | 1,0 |
| 4 | PVAC | Rakeln | 4 | 0,426 | 0,413 | 0,011 | 0,004 | 2,5 | 1,0 |
| 5 | Latex | Rakeln | 4 | 0,420 | 0,429 | 0,013 | 0,004 | 3,1 | 0,9 |
| 6 | PVAC | Spritzen | 24 | 0,416 | 0,397 | 0,004 | 0,004 | 1,0 | 1,0 |
| 7 | PVAC | Rakeln | 24 | 0,426 | 0,412 | 0,011 | 0,004 | 2,6 | 1,0 |
| 8 | Latex | Rakeln | 24 | 0,425 | 0,401 | 0,011 | 0,018 | 2,7 | 4,5 |
| 9 | PVAC | Spritzen | 48 | 0,415 | 0,395 | 0,005 | 0,003 | 1,1 | 0,8 |
| 10 | PVAC | Rakeln | 48 | 0,434 | 0,413 | 0,004 | 0,006 | 0,9 | 1,5 |
| 11 | Latex | Rakeln | 48 | 0,424 | 0,409 | 0,005 | 0,004 | 1,1 | 1,0 |
| 12 | PVAC | Spritzen | 168 | 0,416 | 0,399 | 0,007 | 0,005 | 1,6 | 1,3 |
| 13 | PVAC | Rakeln | 168 | 0,423 | 0,405 | 0,005 | 0,005 | 1,1 | 1,2 |
| 14 | Latex | Rakeln | 168 | 0,428 | 0,405 | 0,007 | 0,007 | 1,7 | 1,7 |
| 15 | PVAC | Spritzen | 336 | 0,414 | 0,394 | 0,003 | 0,005 | 0,8 | 1,3 |
| 16 | PVAC | Rakeln | 336 | 0,422 | 0,406 | 0,005 | 0,007 | 1,1 | 1,7 |
| 17 | Latex | Rakeln | 336 | 0,419 | 0,406 | 0,007 | 0,006 | 1,7 | 1,5 |
| 18 | PVAC | Spritzen | 504 | 0,407 | 0,394 | 0,004 | 0,003 | 0,9 | 0,8 |
| 19 | PVAC | Rakeln | 504 | 0,421 | 0,402 | 0,005 | 0,005 | 1,2 | 1,2 |
| 20 | Latex | Rakeln | 504 | 0,418 | 0,406 | 0,007 | 0,008 | 1,7 | 2,0 |

Die latexbeschichtete Folie zeigte nach Belastung und dem ersten Einscannen nach 4 Stunden einen Anstieg der Färbung mit einem Maximum bei 168 Stunden Lagerzeit. Bei erneutem Einscannen nach 4 Monaten ergab sich ein starkes Abfallen nach 4 Stunden Lagerzeit mit einem Minimum bei 24 Stunden, um danach wieder anzusteigen und ab 48 Stunden konstant zu bleiben.

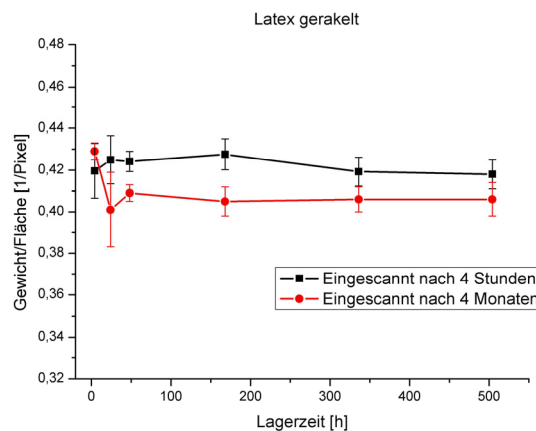
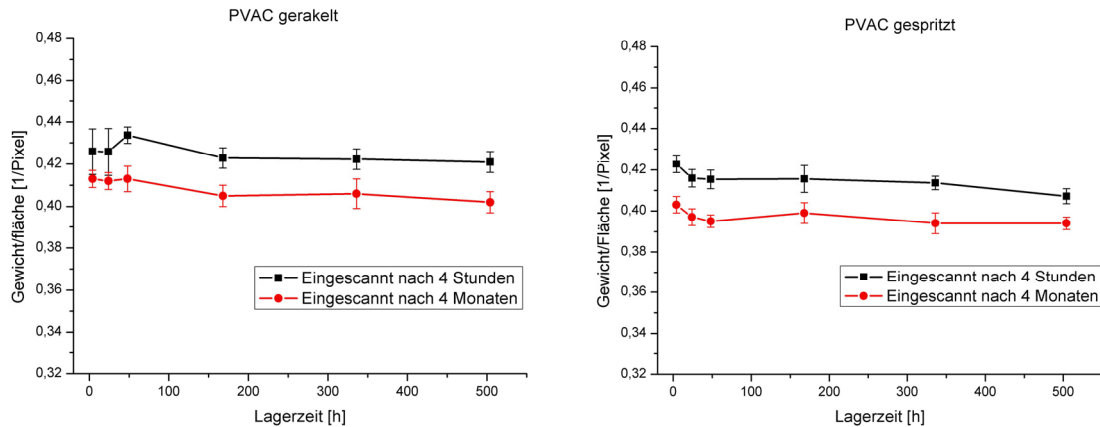


Abbildung 27: Lagerzeitabhängigkeit von latexbeschichteten Druckmessfolien

Außerdem zeigte sich eine hohe Streuung der Werte ($s_{\bar{x}} = 0,013$ bzw. $0,011$) bei 4 und 24 Stunden (Tabelle 6). Während die mit PVAC per Rakeln beschichtete Folie erst im Bereich zwischen 48 und 168 Stunden in der Intensität abfällt, geschieht dies bei der gespritzten Folie schon zwischen 4 und 48 Stunden.



Abbildungen 28 u. 29: Lagerzeitabhängigkeit von PVAC beschichteten Druckmessfolien

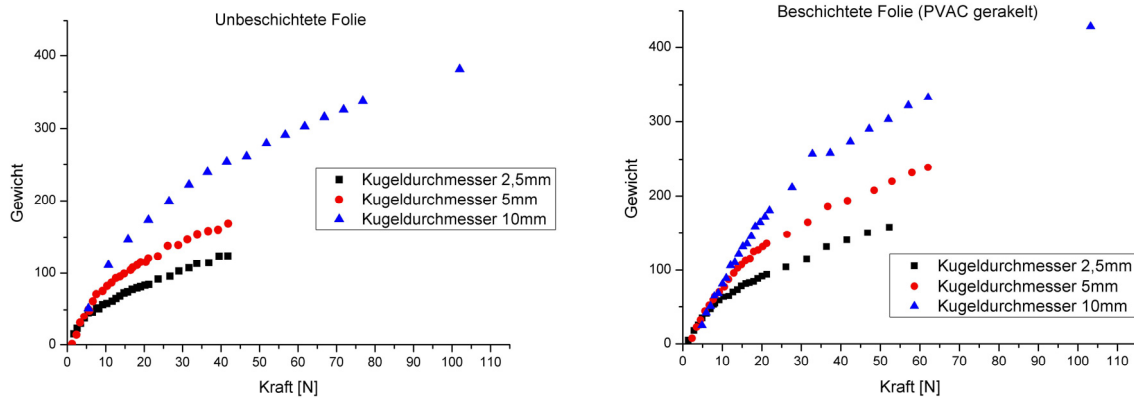
Bei gleicher Beschichtungstechnik zeigen die PVAC beschichteten Folien, unabhängig vom Zeitpunkt des Einscannens, einen identischen Kurvenverlauf, der lediglich in der y-Achse verschoben ist. Die Intensität für die nach 4 Monaten gescannte Folie ist im Mittel 4,1 % ($s_{\bar{x}} = 0,67$ %) geringer als die der nach 4 Stunden gescannten Folie.

Kontrollprobe 1 und Probe 2 verloren nach dem zweiten Einscannen 6,3 bzw. 4,6 % an Intensität.

6.3.2 Belastungsabhängiges Verhalten

An unbeschichteten und beschichteten (PVAC gerakelt) Folien wurde der Zusammenhang zwischen Druckkraft und Farbeffekt (Flächengewicht) im Bereich bis etwa 100 N ermittelt. Zusätzlich wurde der Durchmesser der eingesetzten Kugeln zur Kraftübertragung variiert. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 30 und 31 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Durchmesser des zur Prüfung eingesetzten Probekörpers (Kugel) einen entscheidenden Einfluss auf den Kurvenverlauf hat.

Alle Kurven zeigen ein anfänglich lineares Verhalten. Der ermittelte Anstieg für den linearen Teil der Kurve ist für alle getesteten Prüfkörperdurchmesser bei gleicher Folie (beschichtet oder unbeschichtet) identisch. Die Linearität wird von einer Verringerung des Anstiegs beendet. Dieser Punkt befindet sich bei der beschichteten Folie bei 20,8 N für 10 mm, 10,5 N für 5 mm und 8,1 N für 2,5 mm Durchmesser.



Abbildungen 30 u. 31: Kraftabhängigkeit der Gewichtswerte bei unbeschichteten und beschichteten (PVAC) Folien bei verschiedenen Probendurchmessern

Oberhalb der genannten Kräfte wird der Anstieg des Graphen zunehmend geringer, wobei sich bei höheren Kräften wiederum ein in erster Näherung linearer Verlauf anschließt. Die Verschiebung der Kurven infolge der veränderten Kugeldurchmesser spiegelt den veränderten effektiven Druck wieder, der sich aus der unterschiedlichen Kontaktfläche der unterschiedlich großen Kugeln ergibt.

Beim Vergleich der Messwertkurven mit identischem Probendurchmesser zeigten sich Unterschiede zwischen beschichteten und unbeschichteten Folien. Bei grundsätzlich ähnlichem Kurvenverlauf erscheint der erste lineare Bereich der Kurven der beschichteten Folien gestreckt.

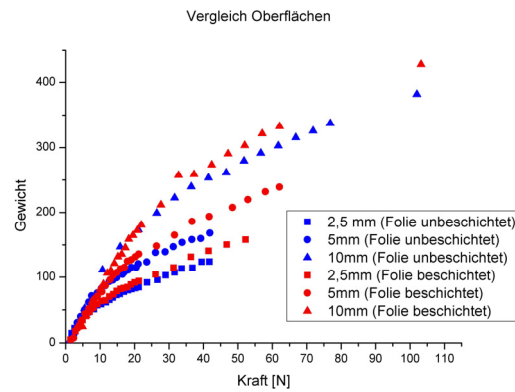


Abbildung 32: zeigt Unterschiede zwischen unbeschichteten und beschichteten (PVAC) Folien

Speziell im oberen Kurvenabschnitt ist erkennbar, dass die gemessenen Gewichtswerte für die beschichteten Folien immer über denen der unbeschichteten Folien lagen.

Auch die graphische Auswertung des Zusammenhanges zwischen den ausgeübten Kräften und dem Quotient der gemessenen Gewichts- und Flächenwerte ergab einen linearen Bereich im ersten Teil der Kurve. Abbildung 33 gibt diesen Zusammenhang exemplarisch für den Kugeldurchmesser von 10 mm wieder.

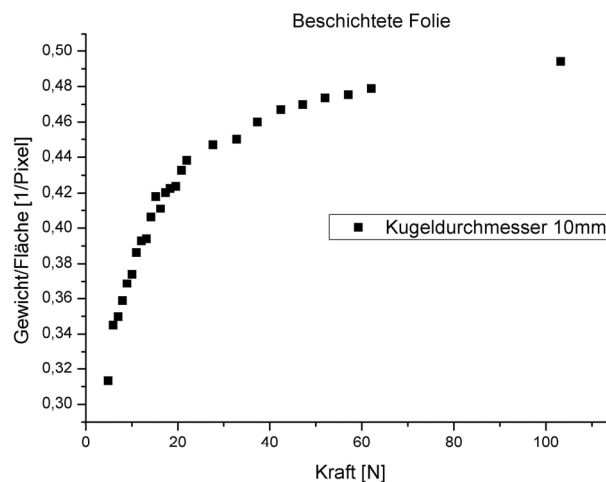


Abbildung 33: Durchschnittliches Gewicht pro Bildpunkt in Abhängigkeit zur Kraft

Deutlich ist die Linearität bis ca. 20 N erkennbar. Ab 20 N verringert sich der Anstieg der Kurve zunehmend.

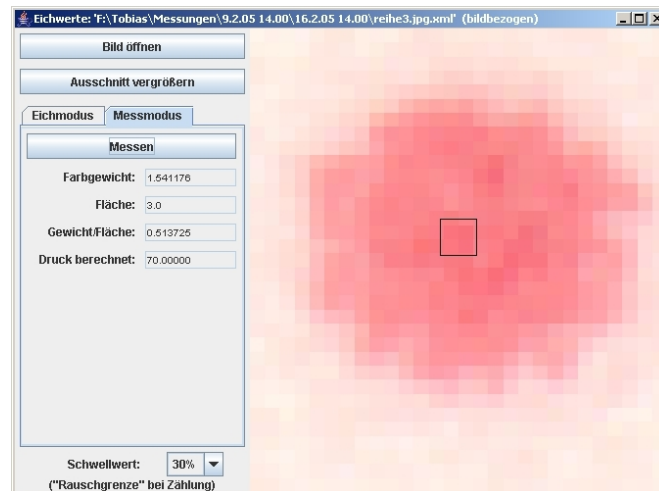


Abbildung 34: Bildpunkte im Inneren des gefärbten Areal mit schwacher Rotfärbung bei etwa 20 N Belastung, Kugeldurchmesser 10 mm

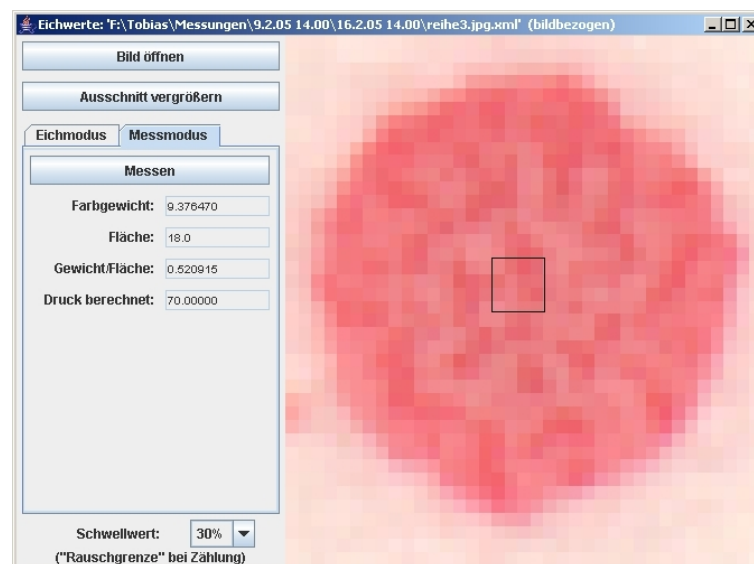


Abbildung 35: Bildpunkte im Inneren des gefärbten Areal mit starker Rotfärbung bei etwa 90 N Belastung, Kugeldurchmesser 10 mm

Bei der Analyse der Verteilung der einzelnen Farbwerte innerhalb einer gefärbten Kreisfläche (Abbildung 34 und 35) fiel auf, dass die Verteilung der Pixel mit gleichen Farbwerten (Gewicht) belastungsabhängig war. Auf diesen Effekt wird im folgenden näher eingegangen.

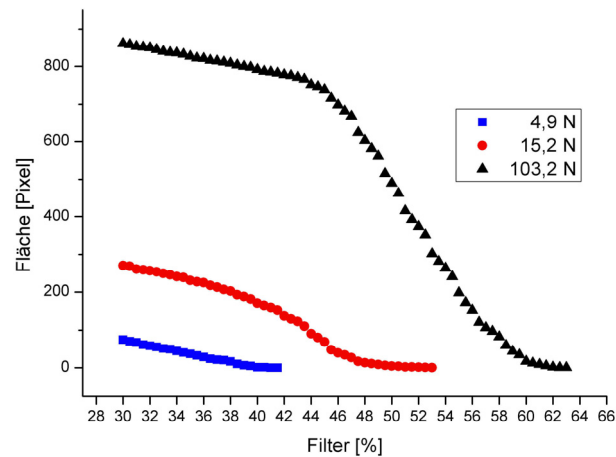


Abbildung 36: Gewichtsverteilung in Abhängigkeit von der Kraft bei einem Probendurchmesser von 10 mm

Abbildung 36 zeigt für drei verschiedene Belastungen bei 10 mm Kugeldurchmesser die Anzahl der Bildpunkte (Fläche), die bei einer bestimmten Filtereinstellung messbar waren. Bei einem Filter von beispielsweise 40 % werden alle Pixel, deren Farbwert 0,4 übersteigt, gezählt. Es ist zu erkennen, dass bei geringen Kräften (4,8 N) die Anzahl der Pixel für jede Filterstufe linear abnimmt. Bei hohen Kräften (103,2 N) nehmen die Flächen ab einer bestimmten Filterstufe von ca. 44 % stärker ab. Erst kurz vor Erreichen der maximalen Färbung wird die Verringerung der Fläche etwas gebremst.

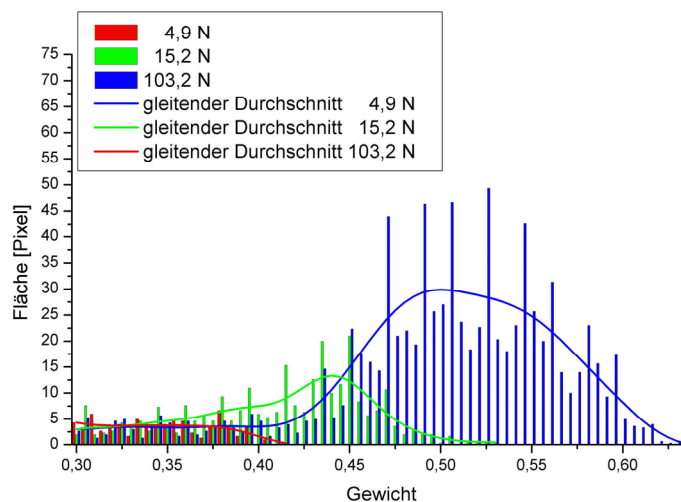


Abbildung 37: Anzahl der Pixel (Fläche) für Gewichtswertintervalle (0,005) bei Kugeldurchmesser 10 mm sowie gleitender Durchschnitt (FFT-Methode)

Abbildung 37 zeigt die Verteilung der Menge der Bildpunkte im gleichen Gewichtswertintervall. Die Intervallbreite betrug 0,005. Zur Glättung der Kurven wurde die FFT-Methode (gleitender Durchschnitt) benutzt.

Die Anzahl (Fläche) der gefärbten Bildpunkte blieb bis zu einem Gewicht von 0,35 für alle drei Kurven konstant.

Die Kurven der Messpunkte aus 15,2 N und 103,2 N Belastung erreichten ein Maximum im Gewichtswertintervall von 0,440 - 0,445 bzw. 0,500 - 0,505. Die Flächen für die einzelnen Gewichtswertintervalle sind bei einer Belastung von 4,9 N gleich im ersten Intervall von 0,300 - 0,305 am größten.

Die Flächenwerte gehen bei dieser Belastung nach konstantem Abfall im Intervall von 0,415 - 0,420 auf Null zurück. Die maximale Färbung liegt bei den anderen beiden Kurven zwischen 0,530 - 0,535 (15,2 N) und 0,630 - 0,635 (103,2 N).

6.3.3 Zeitabhängiges Verhalten

In diesem Abschnitt wurde untersucht, welchen Einfluss die Alterung der exponierten Folie bis zum Einscannen nimmt. Hierbei wird von in der Praxis realistischen Werten bis zu 48 Stunden ausgegangen.

Die Messergebnisse zur untersuchten Folie (PVAC durch Rakeln beschichtet) sind in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7

| Zeit [min] | Gewicht | Fläche [Pixel] | Gewicht/Fläche [Pixel ⁻¹] |
|---------------|---------|-------------------|--|
| 5 | 611,98 | 1449 | 0,422 |
| 10 | 605,61 | 1456 | 0,416 |
| 20 | 597,13 | 1447 | 0,413 |
| 30 | 597,11 | 1454 | 0,411 |
| 40 | 594,62 | 1455 | 0,409 |
| 50 | 595,07 | 1460 | 0,408 |
| 60 | 596,0 | 1466 | 0,407 |
| 2880 | 617,0 | 1564 | 0,395 |

Die angegebene Zeit ist diejenige, die zwischen Belastung (70 N, 3 s Dauer) und Scannvorgang liegt. Gewicht, Fläche, Gewicht/Fläche sind die vom Programm ausgegebenen Werte.

Abbildungen 38-41 zeigen die Abhängigkeiten zwischen Zeit und Farbewicht, Zeit und Fläche sowie Zeit und Gewicht/Fläche.

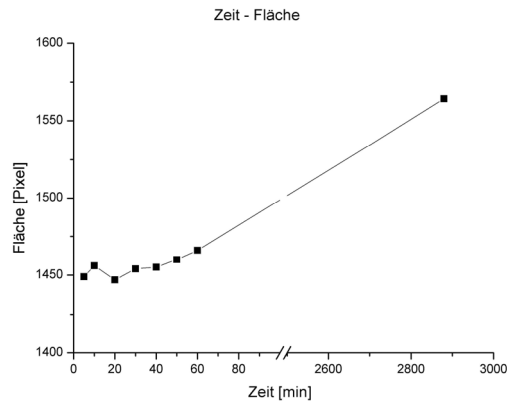


Abbildung 38: Fläche in Abhängigkeit zur Zeitspanne zwischen Belastung und Scannvorgang (mit Achsenunterbrechung)

Die gemessene Fläche variiert in den ersten 60 Minuten zwischen 1449 und 1466 Pixel, um nach 2880 Minuten (48h) einen Wert von 1564 Pixel zu erreichen. Bei Betrachtung der Messwerte ist von einem Flächenwachstum mit zunehmender Zeit auszugehen. Dabei wächst die Fläche nicht linear mit der Zeit.

Deutlich wird dies, wenn die Kurvenabschnitte von 5 bis 60 und 60 bis 2880 Minuten linearisiert werden. Abbildung 39 zeigt die linearisierten Abschnitte (blauer und roter Graph) und den als Exponentialfunktion ($Fläche = a - bc^{Zeit}$) angenommenen Zusammenhang zwischen Zeit und Fläche (schwarzer Graph).

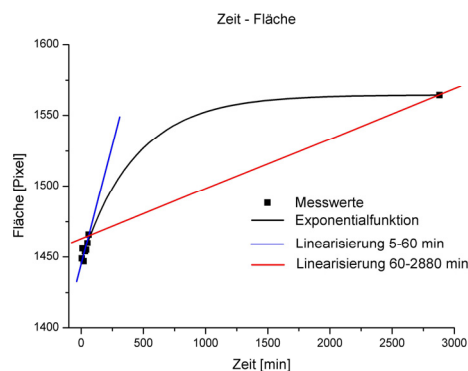


Abbildung 39: Fläche in Abhängigkeit zur Zeitspanne zwischen Belastung und Scannvorgang (ohne Achsenunterbrechung)

In den ersten 60 Minuten nach Belastung vergrößert sich die Fläche um 1,2 %, also etwa 0,021 % pro Minute. Hier stimmen linearer und exponentieller Zusammenhang zwischen Zeit und Fläche überein. Im Zeitraum von 60 Minuten bis 48 Stunden steigt die Pixelanzahl um 6,7 %. Dies entspricht einer mittleren Steigerungsrate der Fläche von 0,0024 % pro Minute. Wie aus Abbildung 39 zu ersehen ist, kann die Exponentialfunktion in diesem Kurvenabschnitt nicht mehr mit der linearen Funktion approximiert werden.

Die ermittelten Gewichtswerte zeigen gegenüber den Flächen in der graphischen Darstellung ein anderes Verhalten (Abbildung 40). Der erste Kurvenabschnitt bis 60 Minuten zeigt eine Verringerung der Gewichtswerte von 611,98 auf 596,0. Anschließend ist ein Ansteigen des Gewichtswertes zu erkennen. Nach einer Zeit von 48 Stunden wird der ursprüngliche Anfangswert bei 5 min (611,98) überschritten (617,0). Der Minimum der Kurve liegt bei 40 min .

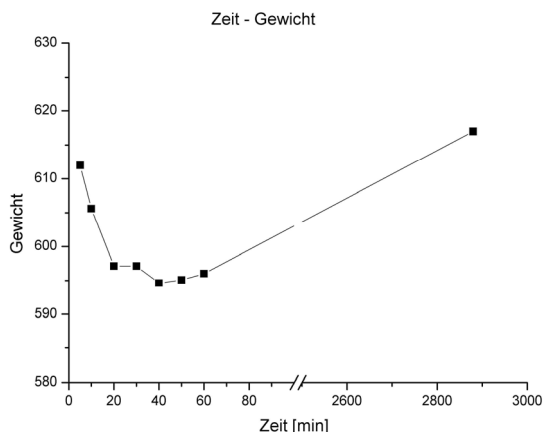


Abbildung 40: Gewicht in Abhängigkeit zur Zeitspanne zwischen Belastung und Scannvorgang (mit Achsenunterbrechung)

Die Abhängigkeit zwischen der Zeit und dem Quotienten aus Gewicht und Fläche ist in Abbildung 41 dargestellt. Nach einem Abfall der Kurve bis auf einen Wert von $0,407 \text{ Pixel}^{-1}$ (bei 60 Minuten) sinkt der Quotient weiter auf $0,395 \text{ Pixel}^{-1}$ nach 48 Stunden.

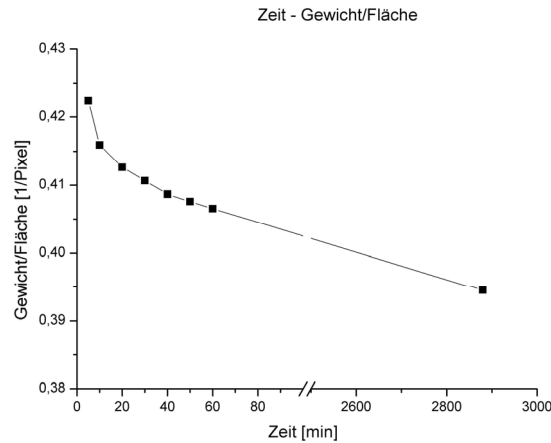


Abbildung 41: Quotient Gewicht/Fläche in Abhängigkeit zur Zeitspanne zwischen Belastung und Scannvorgang (mit Achsenunterbrechung)

Der Quotient aus dem Farbgewicht und der exponierten Fläche weist einen abfallenden Verlauf mit der Zeit auf, wobei ein exponentieller Zusammenhang wahrscheinlich ist.

Im vorderen Kurvenverlauf wirkt sich dabei insbesondere das abfallende Gewicht (Abbildung 40) aus, während der asymptotische Abfall bei höheren Werten offensichtlich vor allem auf der Zunahme der exponierten Fläche (Abbildung 38) beruht.

6.3.4 Versuche am Artikulator

Tabelle 8 zeigt die Messwerte für die durchgeführten Versuche. Die erste Spalte zeigt die vom Programm ausgegebenen Gewichtswerte. Die daraus errechnete Kraft ($Kraft_{errechnet}$) ist in der vierten Spalte aufgeführt. Diese Kraft wurde folgendermaßen, unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen applizierter Kraft und Farbgewicht unter Einbeziehung des Eichwertes ($Kraft_{Eichpunkt}$, $Gewicht_{Eichpunkt}$) wie folgt berechnet:

$$Kraft_{errechnet} = \frac{Gewicht_{Abdruck}}{Gewicht_{Eichpunkt}} * Kraft_{Eichpunkt}$$

Um eine Vorstellung von der Messgenauigkeit zu erhalten, wurde die Abweichung zwischen applizierter Kraft (durch die Testmaschine aufgezeichnet) und errechneter Kraft wie folgt bestimmt:

$$Abweichung = \frac{(Kraft_{errechnet} - Kraft_{appliziert}) * 100}{Kraft_{appliziert}}$$

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, weicht die berechnete Kraft nur unwesentlich von der durch die Testmaschine aufgezeichneten ab. Lediglich der vierte Versuch zeigt eine erhöhte Diskrepanz zwischen wahrem und kalkulierte Wert. Die Abweichung beträgt hier 12,8 % und ist damit erheblich höher, als die mittlere (3,6 %) bzw. maximale Abweichung (6,5 %) der anderen Werte.

Tabelle 8

| Gewicht Abdruck | Gewicht Eichpunkt | Kraft Eichpunkt [N] | Kraft errechnet [N] | Kraft appliziert [N] | Abweichung [%] |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| 511,8 | 117,7 | 14,13 | 61,4 | 57,7 | 6,4 |
| 672 | 92,3 | 14,46 | 105,3 | 106,3 | -1,0 |
| 1120,2 | 95,5 | 14,37 | 168,5 | 158,3 | 6,5 |
| 1642 | 101,0 | 14,43 | 234,6 | 207,9 | 12,8 |
| 1815,8 | 94,3 | 14,51 | 279,4 | 262,6 | 6,4 |
| 1932,7 | 86,7 | 14,15 | 315,2 | 313,7 | 0,6 |
| 2122 | 81,8 | 14,2 | 368,5 | 366,0 | 0,7 |
| 2555 | 94,3 | 14,57 | 396,0 | 413,1 | -4,1 |

Die errechneten Werte liegen bis auf Reihe 2 u. 8 immer über den durch die Testmaschine aufgezeichneten Werten.

Die zur Eichung aufgebrachte Kraft schwankt im Bereich von 14,13 – 14,57 N und zeigt eine maximale Abweichung vom Mittelwert (14,35 N) von ± 1,5 % und eine Standardabweichung von 0,17 N.

Weiterhin fällt eine große Abweichung zwischen den Gewichtswerten der verschiedenen Eichpunkte auf. So schwanken diese zwischen 81,8 und 117,7. Diese Schwankungen zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang mit den unterschiedlich hohen Eichkräften (Abbildung 42).

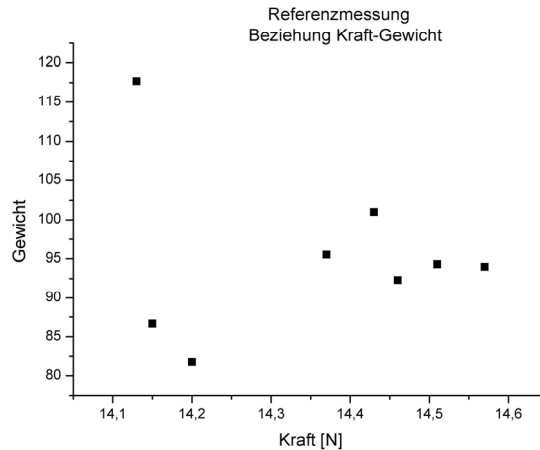
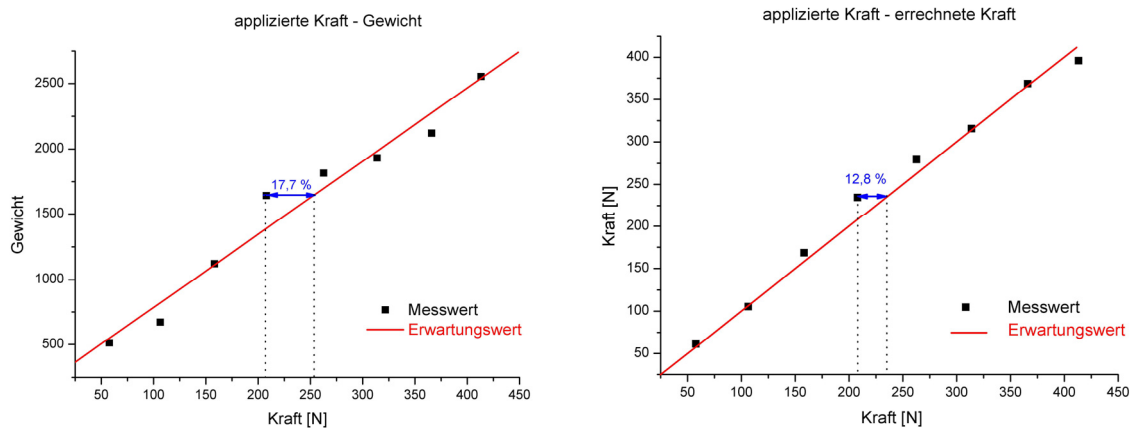


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Eichkraft und Gewicht

Auch die Gewichtswerte für den Abdruck des Zahnbogens weisen eine breite Streuung auf. Die Gewichtswerte nehmen dabei in guter Näherung linear mit der Kraft (Abbildung 43) zu.



Abbildungen 43 u. 44: Gegenüberstellung der Messwertgenauigkeit ohne (Kraft – Gewicht) und mit Einbeziehung einer Referenzmessung (applizierte Kraft – errechnete Kraft)

Die Streuung um eine angelegte Gerade, wie in den Abbildungen 43 und 44 dargestellt, zeigt, dass der Zusammenhang von applizierter Kraft und dem gemessenen Gewicht eine höhere Streuung (Standardabweichung gegenüber Erwartungswert 24,1) aufweist als die des Zusammenhanges zwischen applizierter und errechneter Kraft (Standardabweichung gegenüber Erwartungswert 13,0).

Die farbigen Felder der durch den Artikulator belasteten Folien wurden außerdem hinsichtlich der Fläche ausgewertet. Tabelle 9 zeigt die Messwerte für jeden Versuch.

Die Fläche in [Pixel] (A_{Pixel}) kann nach folgender Formel in Fläche in [mm²] (A_{mm} bzw. $A_{korrigiert}$) umgerechnet werden:

$$A_{mm}[mm] = \left(\frac{25,4}{800}\right)^2 \times A_{Pixel}[Pixel]$$

Mit dem relativen, systematischen Fehler für die Flächenbestimmung aus 6.2 a ergibt sich:

$$A_{korrigiert}[mm] = \frac{\left(\frac{25,4}{800}\right)^2 \times A_{Pixel}[Pixel]}{1,0021}$$

Für die Berechnung der Drücke wurden folgende Formeln verwendet:

$$Druck_{appliziert} = \frac{Kraft_{appliziert}}{A_{korrigiert}} \quad (Gl.1)$$

sowie

$$Druck_{errechnet} = \frac{Kraft_{errechnet}}{A_{korrigiert}}$$

Tabelle 9

| Kraft appliziert [N] | Kraft errechnet [N] | A_{Pixel} [Pixel] | $A_{korrigiert}$ [mm ²] | Druck _{appliziert} [MPa] | Druck _{errechnet} [MPa] |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 57,7 | 61,4 | 1498 | 1,51 | 38,3 | 40,8 |
| 106,3 | 105,3 | 1964 | 1,98 | 53,8 | 53,3 |
| 158,3 | 168,5 | 3253 | 3,27 | 48,4 | 51,5 |
| 207,9 | 234,6 | 4584 | 4,61 | 45,1 | 50,9 |
| 262,6 | 279,4 | 5319 | 5,35 | 49,1 | 52,2 |
| 313,7 | 315,2 | 5507 | 5,54 | 56,6 | 57,0 |
| 366,0 | 368,5 | 5881 | 5,92 | 61,9 | 61,9 |
| 413,1 | 396,0 | 6959 | 7,00 | 59,0 | 59,0 |

Wie Tabelle 9 und Abbildung 45 zeigen, steigt $A_{korrigiert}$ mit zunehmenden applizierten Kräften an.

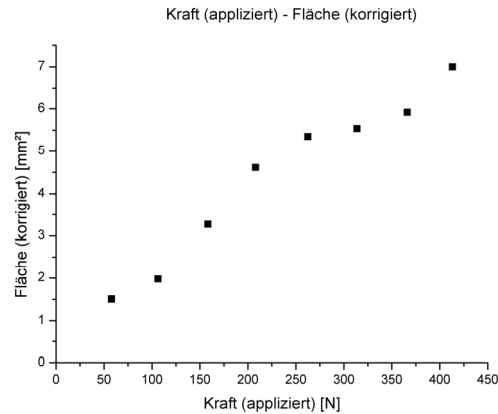


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen applizierter Kraft und gemessener Fläche (korrigiert durch Flächenfaktor 1,0021)

Die Flächenwerte bewegen sich dabei zwischen 1,51 mm² und 7,00 mm² (57,7 N bzw. 413,1 N applizierte Kraft).

Zwischen applizierter Kraft und Fläche ist ein proportionaler Zusammenhang erkennbar.

Der Zusammenhang zwischen applizierter Kraft und errechnetem Druck nach Gleichung 1 ist in Abbildung 46 ersichtlich. Nur in einer groben Näherung kann von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden.

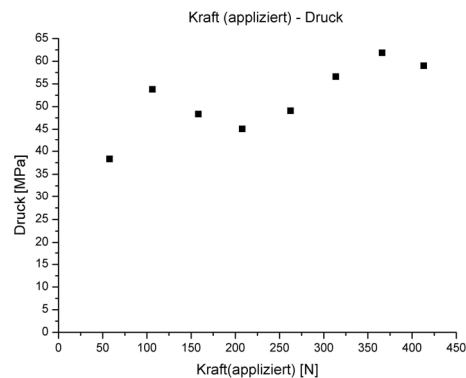


Abbildung 46: Zusammenhang applizierte Kraft und berechneter Druck

Bei der Überlagerung der Bilder von Oberkiefermodell und Folienabdrücken ist erkennbar (Abbildung 47), dass die roten Färbungsgebiete im Bereich der Molaren und Prämolaren in beiden Kieferhälften zu schätzungsweise 80 % mit den schwarzen Okklusionsmarkierungen übereinstimmen. Die geschwärzten Flächen haben an allen Zähnen etwa eine konstante Größe.

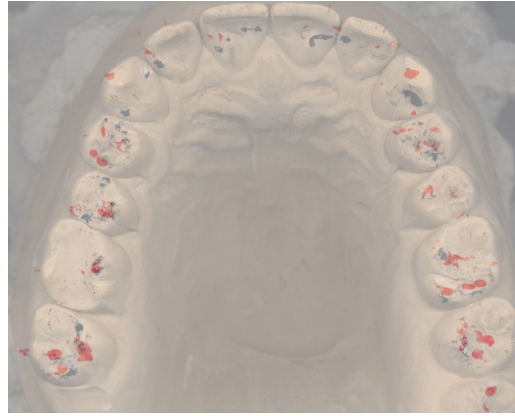


Abbildung 47: Zahnkranz überlagert mit Druckmessfolie, schwarze Punkte stammen von Okklusionsfolie, rote Bereiche von der Druckmessfolie

Im Frontzahnggebiet gibt es praktisch keine Übereinstimmung von schwarzen und roten Flächen. Die roten Färbungsbereiche liegen immer labial der als korrespondierend vermuteten schwarzen Areale. Besonders große Distanzen sind zwischen den Folien- und Okklusionspunkten der beiden Eckzähne zu beobachten. Die durch die Druckmessfolie projizierten Kontakte liegen auf der Höckerspitze, während sich die schwarz markierten Okklusionskontakte auf der distalen Randleiste der Canini befinden.

Von mesial nach distal nimmt die Größe der roten Areale deutlich zu. Da die Zuordnung der Folienpunkte zu den entsprechenden Zähnen (Abbildung 48) aufgrund der Form möglich ist, wurde der Farbabdruck auf der Folie in Zahnabschnitte geteilt.

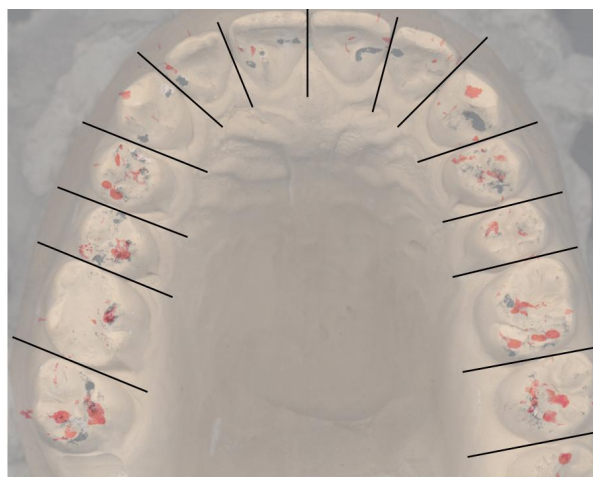


Abbildung 48: Segmentierung des Zahnkranzes

In Tabelle 10 und 11 sind die einzelnen berechneten Belastungen, Flächen und Drücke für die Zahnbogenabschnitte aufgeführt. Die Berechnung erfolgte analog Tabelle 9.

Tabelle 10 zeigt die errechneten Kräfte für die Zähne des I. und II. Quadranten, bildlich dargestellt in den Abbildungen 49 und 50. Auffällig ist, dass die Messungen an Zahn 14 äußerst hohe Kraftwerte ergaben. So lag die errechnete Kraft (Belastungen des Zahnkranzes 313,7 N, 366,0 N und 413,1 N) zwischen 108 N und 115 N, während die maximale errechnete Kraft bei allen anderen Zähnen höchstens 57 N betrug (Zahn 27 bei 413,1 N Belastung).

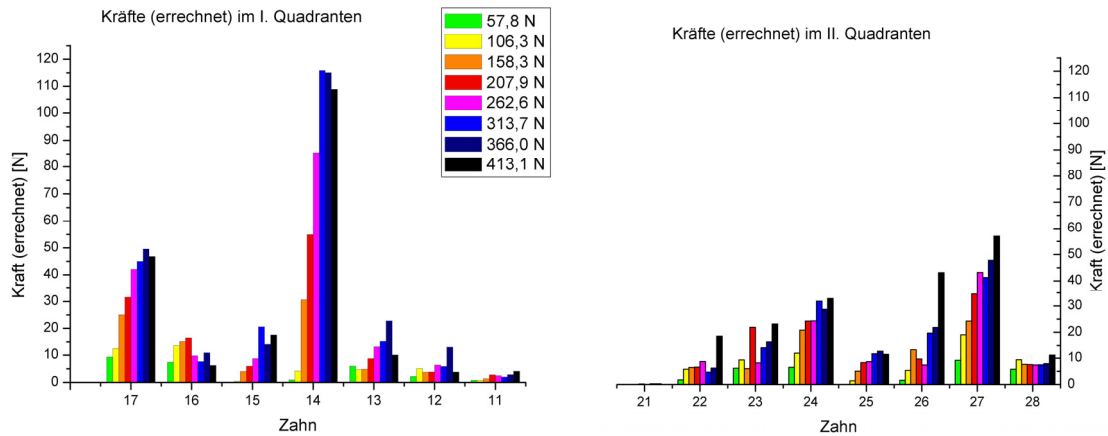
Tabelle 10: Kräfte in N der einzelnen Zahngruppen

| Zahn | applizierte Gesamtkraft [N] | | | | | | | |
|------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 57,7 | 106,3 | 158,3 | 207,9 | 262,6 | 313,7 | 366,0 | 413,1 |
| 17 | 9,34 | 12,43 | 25,09 | 31,55 | 42,04 | 44,99 | 49,58 | 46,78 |
| 16 | 7,45 | 13,52 | 15,19 | 16,49 | 9,77 | 7,67 | 10,88 | 6,23 |
| 15 | 0,04 | 0,49 | 4,03 | 5,92 | 8,71 | 20,56 | 14,13 | 17,59 |
| 14 | 0,99 | 4,20 | 30,65 | 54,94 | 85,50 | 115,86 | 115,01 | 108,90 |
| 13 | 5,97 | 4,72 | 4,89 | 8,76 | 13,07 | 15,24 | 22,78 | 10,06 |
| 12 | 2,18 | 5,10 | 3,73 | 3,83 | 6,40 | 5,87 | 12,93 | 3,80 |
| 11 | 0,81 | 0,82 | 1,39 | 2,81 | 2,54 | 1,97 | 2,89 | 4,15 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0,23 | 0 | 0,32 | 0,32 | 0 |
| 22 | 1,76 | 5,77 | 6,45 | 6,62 | 8,72 | 4,70 | 6,28 | 18,57 |
| 23 | 6,14 | 9,34 | 6,04 | 21,88 | 8,25 | 14,22 | 16,41 | 23,18 |
| 24 | 6,54 | 11,88 | 20,84 | 24,25 | 24,36 | 31,82 | 28,72 | 32,85 |
| 25 | 0,07 | 1,38 | 5,09 | 8,28 | 8,66 | 11,63 | 12,61 | 11,46 |
| 26 | 1,63 | 5,37 | 13,20 | 9,71 | 7,44 | 19,71 | 21,86 | 43,12 |
| 27 | 9,18 | 19,05 | 24,27 | 34,59 | 43,23 | 41,33 | 47,83 | 57,00 |
| 28 | 5,83 | 9,42 | 7,61 | 7,55 | 7,39 | 7,46 | 7,90 | 11,17 |

Zahn 21 zeigte keine oder nur sehr geringe Verfärbung, die offensichtlich auch nicht mit der Höhe der auf den Zahnbogen einwirkenden Kraft zusammenhängen.

Die errechneten Werte für die zweiten Molaren differieren kaum. Sie zeigen die höchsten Werte nach Zahn 14.

Zahn 28 zeigte unabhängig von der aufgewendeten Gesamtkraft eine nahezu konstante Belastung.



Abbildungen 49 u. 50: Darstellung der Kräfte in den einzelnen Zahngebieten für die unterschiedlichen applizierten Gesamtkräfte

Weiterhin wurden die den einzelnen Zähnen zugeordneten Färbungsbereiche hinsichtlich ihrer Fläche und des errechneten Druckes ausgewertet. Tabelle 11 zeigt die gemessenen bzw. errechneten Werte für jedes Zahngebiet für die unterschiedlichen durch die Testmaschine aufgebraachten Kräfte.

Tabelle 11 Fläche und Druck für jeden Zahn bei verschiedenen Kräften

| Zahn | applizierte Gesamtkraft [N] | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | 57,7 | | 106,3 | | 158,3 | | 207,9 | | 262,6 | | 313,7 | | 366,0 | | 413,1 | |
| | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] | A [mm ²] | P [MPa] |
| 17 | 0,24 | 39,5 | 0,24 | 52,6 | 0,51 | 49,7 | 0,65 | 48,3 | 0,79 | 53,2 | 0,80 | 55,9 | 0,82 | 60,7 | 0,87 | 54,1 |
| 16 | 0,18 | 42,3 | 0,24 | 55,8 | 0,29 | 52,1 | 0,33 | 50,0 | 0,19 | 50,8 | 0,14 | 54,4 | 0,19 | 57,5 | 0,12 | 51,2 |
| 15 | 0,00 | 37,0 | 0,01 | 48,6 | 0,08 | 47,7 | 0,13 | 46,3 | 0,17 | 51,3 | 0,29 | 71,0 | 0,24 | 59,0 | 0,30 | 57,9 |
| 14 | 0,03 | 37,8 | 0,08 | 53,5 | 0,55 | 55,3 | 0,95 | 58,1 | 1,37 | 62,5 | 1,57 | 74,0 | 1,65 | 69,8 | 1,97 | 55,2 |
| 13 | 0,14 | 41,2 | 0,09 | 51,0 | 0,10 | 47,6 | 0,19 | 47,0 | 0,25 | 52,0 | 0,28 | 54,7 | 0,38 | 59,3 | 0,20 | 50,3 |
| 12 | 0,05 | 40,2 | 0,10 | 51,2 | 0,08 | 48,8 | 0,08 | 45,9 | 0,13 | 50,5 | 0,11 | 54,5 | 0,21 | 61,5 | 0,08 | 49,0 |
| 11 | 0,01 | 57,4 | 0,02 | 51,0 | 0,03 | 51,2 | 0,06 | 50,8 | 0,05 | 51,4 | 0,04 | 54,4 | 0,05 | 59,8 | 0,08 | 52,9 |
| 21 | 0 | -- | 0 | -- | 0 | -- | 0,01 | 45,4 | 0 | -- | 0,01 | 52,5 | 0,01 | 53,8 | 0 | -- |
| 22 | 0,04 | 40,6 | 0,11 | 50,8 | 0,13 | 49,7 | 0,14 | 46,4 | 0,17 | 50,4 | 0,09 | 53,1 | 0,11 | 55,2 | 0,35 | 52,9 |
| 23 | 0,15 | 39,7 | 0,18 | 52,4 | 0,12 | 50,9 | 0,44 | 49,8 | 0,15 | 56,5 | 0,23 | 61,2 | 0,27 | 61,6 | 0,42 | 55,5 |
| 24 | 0,17 | 39,4 | 0,22 | 53,0 | 0,41 | 50,4 | 0,50 | 48,7 | 0,47 | 52,2 | 0,57 | 56,0 | 0,49 | 58,3 | 0,62 | 53,2 |
| 25 | 0,00 | 37,0 | 0,03 | 50,6 | 0,10 | 49,6 | 0,17 | 49,0 | 0,17 | 51,8 | 0,21 | 56,7 | 0,21 | 59,1 | 0,22 | 53,2 |
| 26 | 0,04 | 38,5 | 0,10 | 53,3 | 0,26 | 51,7 | 0,20 | 47,8 | 0,14 | 52,1 | 0,36 | 54,9 | 0,38 | 57,3 | 0,79 | 54,6 |
| 27 | 0,22 | 41,1 | 0,36 | 53,7 | 0,47 | 51,7 | 0,67 | 51,5 | 0,82 | 52,7 | 0,73 | 56,3 | 0,80 | 60,1 | 1,03 | 55,5 |
| 28 | 0,14 | 41,7 | 0,17 | 56,7 | 0,15 | 51,5 | 0,16 | 48,1 | 0,14 | 51,4 | 0,13 | 57,0 | 0,13 | 59,9 | 0,21 | 54,4 |

Entsprechend bildliche Darstellungen der Ergebnisse zeigen die Abbildungen 51 und 52.

Die größte Fläche von 1,97 mm² wurde bei der Gesamtkraft von 413,1 N an Zahn 14 registriert. Zahn 11 und 21 zeigten die geringsten Flächenwerte.

Beim Vergleich der Werte für ein Zahngebiet ist erkennbar, dass eine klare Abhängigkeit zwischen applizierter Gesamtkraft und gemessener Fläche nicht besteht. So vergrößert sich beispielsweise die Fläche der Zähne 17, 14 und 25 mit zunehmender Kraft, während die Flächenwerte bei den anderen Zahngruppen scheinbar unabhängig von der Kraft schwanken (16, 15, 13, 12, 11, 21, 22, 23, 24, 26, 27) oder einen konstanten Wert annehmen (28).

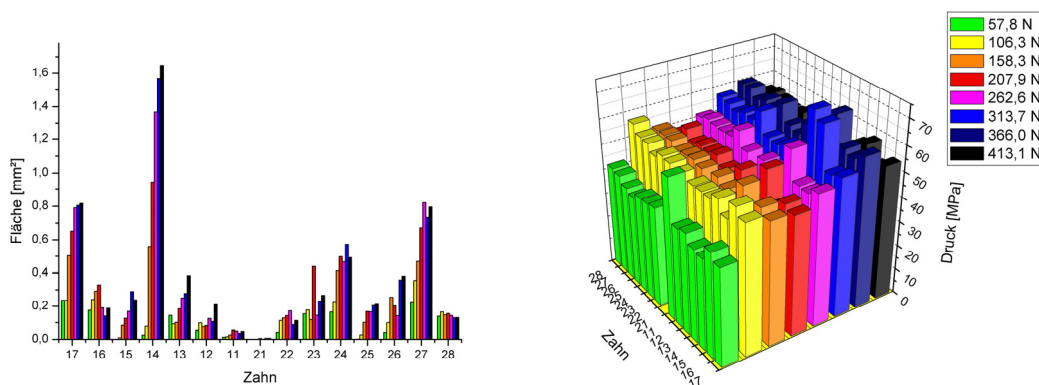


Abbildung 51 u. 52: Darstellung der Fläche und des Druckes in den einzelnen Zahngebieten für die verschiedenen Kräfte

Die Summen der gemessenen Flächen zeigen allerdings in erster Näherung ein zur applizierten Kraft proportionales Verhalten (Abbildung 53).

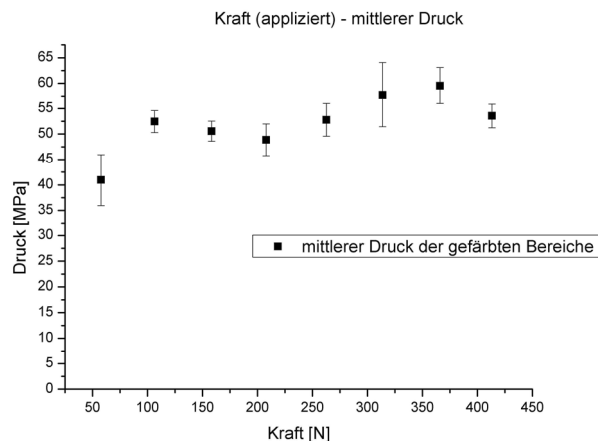


Abbildung 53: Mittlere Drücke und Standardabweichung bei verschiedenen Kräften

Abbildung 53 zeigt die mittleren Drücke aller Zahngebiete für eine applizierte Kraft. Diese Werte sind nur geringfügig kleiner, als jene aus Abbildung 46. Grund hierfür ist, dass bei der Auswertung mit Hilfe des entwickelten Programms und den vorgenommenen Segmentierungen zur Bestimmung der Kontaktposition, zum Teil rot gefärbte Bereiche überdeckt wurden und somit nicht in die Berechnung mit eingingen.

6.3.5 Versuche an Probanden

Nachdem die beiden Probanden nacheinander jeweils drei mit PVAC beschichtete Druckmessfolien belastet hatten, mussten die Folien für 30 Minuten zur Trocknung gelagert werden.

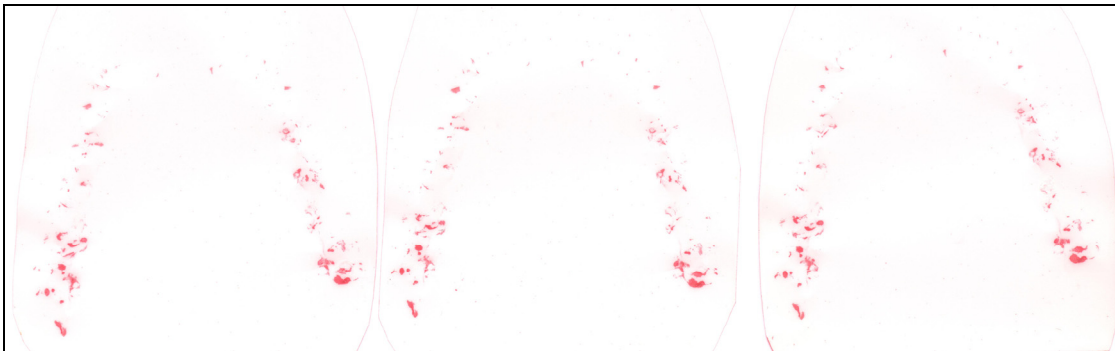


Abbildung 54: Scannbilder der Druckmessfolien des 28-jährigen Probanden, Proben 1-3 von links nach rechts

Nach Abtrocknung der auf den Folien verbliebenen Speichelreste wurden die Folien eingescannt. Abbildungen 54 und 55 zeigen die eingescannten Druckmessfolien der zwei Probanden.

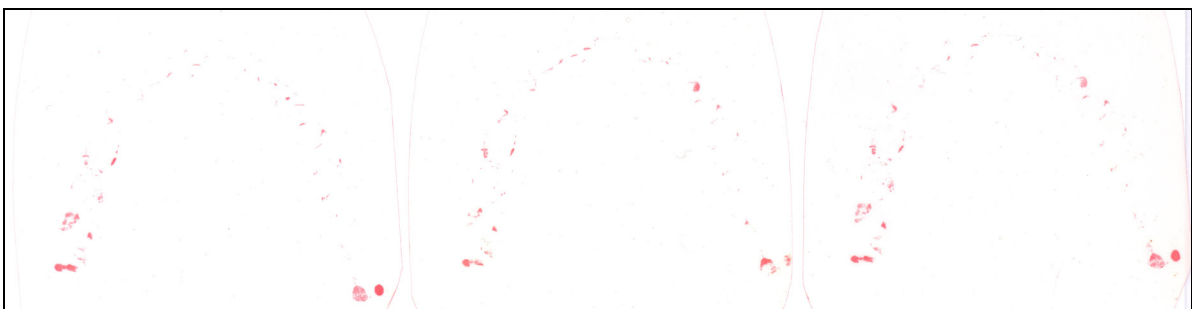


Abbildung 55: Scannbilder der Druckmessfolien des 51-jährigen Probanden, Proben 4-6 von links nach rechts

Tabelle 12 zeigt die Messwerte für die nach 1 Stunde ausgewerteten Folien. Tabelle 13 die nach 24 Stunden ausgewerteten Folien.

Tabelle 12: Messwerte nach 1 h

| Probe Nr. | Proband 1 (28 Jahre) | | | Proband 2 (51 Jahre) | | |
|--|----------------------|---------|---------|----------------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Gewicht _{Abdruck} | 13069,4 | 13231,3 | 13624,9 | 5575,5 | 3957,0 | 6086,4 |
| Gewicht _{Eichpunkt} | 76,3 | 76,3 | 76,3 | 76,3 | 76,3 | 76,3 |
| Fläche _{Abdruck} [Pixel] | 29535 | 28961 | 29780 | 12943 | 9496 | 14069 |
| Kraft _{errechnet} [N] | 1848,5 | 1871,4 | 1927,0 | 788,6 | 559,7 | 860,8 |
| Fläche _{errechnet} [mm ²] | 29,7 | 29,1 | 30,0 | 13,0 | 9,6 | 14,2 |
| Druck _{errechnet} [MPa] | 62,21 | 64,23 | 64,32 | 60,56 | 58,58 | 60,82 |

Zur Auswertung wurde im Programm immer der gesamte Zahnbogen markiert und die Werte für diesen bestimmt. Die Kraft, mit der die Eichpunkte erzeugt wurden, betrug im Mittel 10,8 N. Es wurde für alle Proben mit den Gleichungen aus Kapitel 6.3.4 Kraft_{errechnet}, Fläche_{errechnet} und Druck_{errechnet} bestimmt. Für Gewicht_{Eichpunkt} wurde der Mittelwert aus fünf einzelnen Messungen eingesetzt (76,3, Standardabweichung 10,59 bzw. 80,1 Standardabweichung 9,73). Die Gewichts- und Flächenwerte des 28 jährigen Probanden differierten innerhalb der drei Proben (1-3) weitaus geringer als die der 51 jährigen Versuchsperson (4-6).

Tabelle 13: Messwerte nach 24 h

| Probe Nr. | Proband 1 (28 Jahre) | | | Proband 2 (51 Jahre) | | |
|--|----------------------|---------|---------|----------------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Gewicht _{Abdruck} | 13393,0 | 13454,6 | 13618,3 | 6049,7 | 4301,7 | 6437,6 |
| Gewicht _{Eichpunkt} | 80,1 | 80,1 | 80,1 | 80,1 | 80,1 | 80,1 |
| Fläche _{Abdruck} [Pixel] | 30674 | 29816 | 30188 | 14324 | 10421 | 15097 |
| Kraft _{errechnet} [N] | 1804,8 | 1813,1 | 1835,1 | 815,2 | 579,7 | 867,5 |
| Fläche _{errechnet} [mm ²] | 30,9 | 30,0 | 30,4 | 14,4 | 10,5 | 15,2 |
| Druck _{errechnet} [MPa] | 58,16 | 60,11 | 60,09 | 56,26 | 54,99 | 56,80 |

Deutlich wird dies insbesondere bei Betrachtung der Standardabweichungen der Mittelwerte für das Gewicht, die Fläche, sowie die errechneten Größen (Tabelle 14). Dabei liegt die höchste relative Standardabweichungen aller Werte für den 28 jährigen Probanden unter 2,2 %, während diese für den 51jährigen Probanden zum Teil über 20 % liegt. Die Werte für die ältere Versuchsperson zeigen eine als hoch einzustufende Streuung.

Der Vergleich der einzelnen Proben für die unterschiedlichen Zeitspannen bis zum Scannen (1/24 h) bestätigt die bereits ermittelten Ergebnisse von 6.3.3. Die Gewichtswerte und Flächenwerte vergrößern sich dabei um durchschnittlich 4,5 bzw. 6,0 % in 24 Stunden.

Tabelle 14: Mittelwerte und Standardabweichungen sowie relative Standardabweichung

| | Zeit | Proband 1 (28 Jahre) | | | Proband 2 (51 Jahre) | | |
|---|------|----------------------|---------------|--|----------------------|---------------|--|
| | | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | $\frac{s_{\bar{x}} \times 100}{\bar{x}}$ [%] | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | $\frac{s_{\bar{x}} \times 100}{\bar{x}}$ [%] |
| Kraft _{errechnet} [N] | 1 | 1882,3 | 40,4 | 2,1 | 736,3 | 157,2 | 21,3 |
| | 24 | 1817,7 | 15,7 | 0,9 | 754,1 | 153,3 | 20,3 |
| Fläche _{errechnet} [mm ²] | 1 | 29,6 | 0,4 | 1,4 | 12,2 | 2,4 | 19,7 |
| | 24 | 30,4 | 0,4 | 1,3 | 13,4 | 2,5 | 18,7 |
| Druck _{errechnet} [MPa] | 1 | 63,6 | 1,2 | 1,9 | 60,0 | 1,2 | 2 |
| | 24 | 59,5 | 1,1 | 1,8 | 56,0 | 0,9 | 1,6 |

Weiterhin ist erkennbar, dass die Standardabweichungen bei späterem Einscannen (24 h) bei allen gemessenen und errechneten Werten geringer sind.

Die Mittelwerte zeigen zwischen den beiden Probanden große Unterschiede, so sind die ermittelten Kraft- und Flächenwerte des 28 Jährigen 2,4 bis 2,5mal größer als die des 51 Jährigen. Geringere Abweichungen zeigen die Druckwerte, die nur um den Faktor 1,1 größer sind.

Analog Abschnitt 6.3.4 wurden die Gewichts- und Flächenwerte für die einzelnen Zahnabschnitte ermittelt (Tabelle 15). Auffällig sind die hohen Werte für Proband 1 an Zahn 17. Es traten mittlere Kräfte von 618 N auf.

Tabelle 15: Messwerte Zahnbogenabschnitte

| Zahn | Proband 1 (28 Jahre) | | | | | | Proband 2 (51 Jahre) | | | | | |
|------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|-------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|-------------|---------------|
| | Kraft [N] | | Fläche [mm ²] | | Druck [MPa] | | Kraft [N] | | Fläche [mm ²] | | Druck [MPa] | |
| | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $s_{\bar{x}}$ |
| 17 | 618,0 | 57,4 | 9,05 | 0,70 | 68,2 | 1,6 | 293,3 | 91,0 | 4,56 | 1,39 | 64,2 | 0,5 |
| 16 | 36,9 | 4,5 | 0,65 | 0,08 | 57,0 | 1,9 | 3,8 | 4,1 | 0,07 | 0,07 | 49,4 | 4,0 |
| 15 | 124,0 | 3,2 | 2,08 | 0,11 | 59,6 | 1,5 | 2,2 | 1,9 | 0,05 | 0,04 | 47,0 | 2,2 |
| 14 | 60,3 | 9,7 | 1,09 | 0,18 | 55,4 | 1,5 | 3,1 | 2,2 | 0,06 | 0,04 | 48,6 | 5,9 |
| 13 | 19,6 | 7,3 | 0,37 | 0,14 | 52,3 | 1,4 | 44,1 | 28,2 | 0,82 | 0,49 | 53,4 | 3,9 |
| 12 | 1,0 | 0,4 | 0,02 | 0,01 | 45,2 | 1,6 | 7,6 | 8,8 | 0,14 | 0,15 | 50,6 | 6,1 |
| 11 | 6,5 | 1,8 | 0,13 | 0,03 | 48,2 | 1,8 | 2,4 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 48,0 | 2,1 |
| 21 | 0,7 | 0,9 | 0,02 | 0,02 | 44,8 | 3,2 | 12,8 | 3,8 | 0,25 | 0,08 | 51,1 | 1,0 |
| 22 | 6,3 | 1,3 | 0,12 | 0,02 | 51,7 | 2,3 | 4,9 | 2,7 | 0,10 | 0,06 | 49,7 | 5,0 |
| 23 | 41,3 | 20,1 | 0,76 | 0,34 | 54,1 | 2,5 | 14,0 | 3,6 | 0,27 | 0,06 | 52,6 | 2,3 |
| 24 | 57,2 | 12,4 | 1,09 | 0,24 | 52,4 | 0,5 | 56,8 | 8,1 | 1,01 | 0,19 | 56,5 | 3,1 |
| 25 | 33,8 | 6,8 | 0,61 | 0,12 | 55,8 | 0,6 | 9,5 | 7,1 | 0,20 | 0,14 | 48,0 | 0,9 |
| 26 | 267,2 | 21,9 | 4,14 | 0,28 | 64,5 | 1,8 | 81,6 | 27,7 | 1,49 | 0,57 | 55,5 | 2,8 |
| 27 | 382,3 | 23,6 | 5,79 | 0,49 | 66,1 | 1,7 | 198,0 | 61,2 | 3,12 | 0,84 | 63,0 | 3,5 |
| 28 | 152,1 | 13,9 | 2,28 | 0,19 | 66,8 | 2,8 | - | - | - | - | - | - |

In den Abbildungen 56 und 57 sind die einzelnen Kräfte und Kontaktflächen für jedes Zahngebiet graphisch dargestellt.

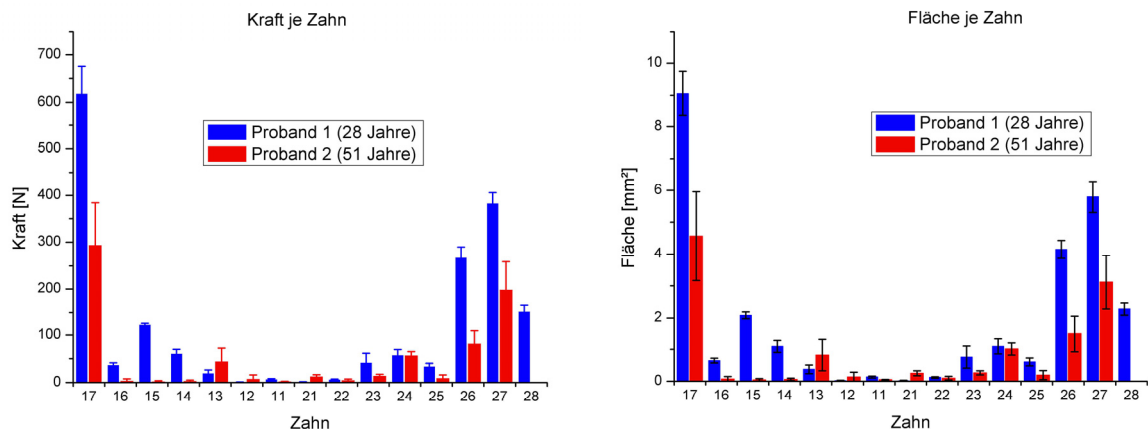


Diagramme 56 u. 57: zeigen die auf einen Zahn wirkenden Kräfte sowie die entsprechenden Kontaktflächen

Gut erkennbar ist, dass die höchsten Kräfte und die größten Flächen bei beiden Versuchspersonen den Zähnen 17 und 27 zuzuordnen sind.

Zahn 26 ist in beiden Fällen der Zahn mit der drittgrößten Belastung und Kontaktfläche.

Der Zahn 16 zeigte unterdurchschnittlich niedrige Kräfte sowohl bei Proband 1 (36,9 N) als auch bei Proband 2 (3,8 N), ebenso gering stellten sich auch die Kontaktareale dar (0,65 u. 0,07 mm²).

Proband 1 wies die drittgrößte Okklusalkraft an Zahn 28 auf. Proband 2 hatte keinen dritten Molaren.

Wiederum bei beiden Probanden trugen die Prämolaren und Frontzähne nur gering zur Gesamtkraft (1807,2 N und 734,1 N) bei. Mit 350,7 N (Proband 1) und 157,4 N (Proband 2) hatten die dort einwirkenden Kräfte nur eine Höhe von 19 % bzw. 21 % der Summe aller Kräfte. Die höchste Belastung in diesem Kieferabschnitt wurde bei Zahn 15 (Proband 1) sowie Zahn 24 (Proband 2) mit 124,0 N und 56,8 N gemessen. An den Schneidezähnen traten nur geringe Kräfte auf (0,5 N bis 8,8 N).

Die gemessenen Flächen verhalten sich in allen Kieferabschnitten ähnlich den ermittelten Kräften.

In Abbildung 58 ist ersichtlich, dass sich die für jeden Zahn separat ausgewiesenen Drücke nicht extrem voneinander unterscheiden. So reicht die Spanne der errechneten Werte von 44,8 bis 68,2 MPa.

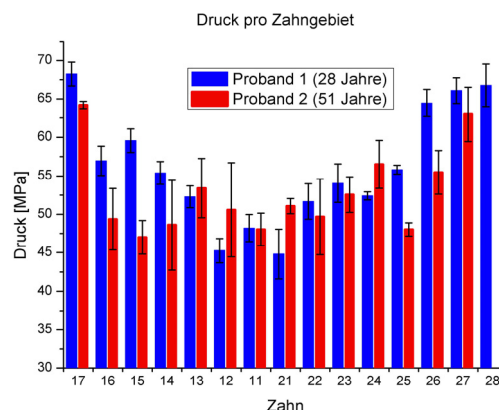


Abbildung 58: Druckverteilung über den Zahnbogen

Interessant ist, dass der jüngere Proband die größte Spanne an Werten aufweist. Bei ihm konnten höchster und niedrigster Druckwert gemessen werden.

Insgesamt nimmt der gemessene Druck bei Proband eins, von den letzten Molaren bis zu den mittleren Incisiven, kontinuierlich ab. Proband zwei zeigt zwar auch hohe Werte an den zweiten Molaren, der geringste Druck war aber an den Zähnen 16,15,14 und 25 messbar.