

Aus dem Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
des Klinikums der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

Poliklinik für Kieferorthopädie
(Direktor: Prof. Dr. P. Schopf)

Vergleichende Kraft-Dehnungs- und Dauerlastversuche
mit kieferorthopädischen Gummizügen
und pseudoelastischen Ni-Ti-Federn

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
des Fachbereiches Humanmedizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von

Stefan Buch

aus Hofheim am Taunus

FRANKFURT AM MAIN, 1999

Dekan: Prof. Dr. med. G. von Jagow

Referent: Prof. Dr. med. dent. P. Schopf

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Hohmann

Tag der mündlichen Prüfung: 12.08.99

1	EINLEITUNG	2
2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1	Federn	3
2.1.1	Federkennlinie.....	3
2.1.2	Arbeitsaufnahmefähigkeit einer Feder	3
2.2	Kennzeichnung schwingender Beanspruchung.....	4
2.2.1	Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung.....	4
2.3	Formgedächtnislegierungen	5
2.3.1	Metallkundliche Grundlagen.....	6
2.3.2	Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen.....	8
2.4	Kunststoffe.....	11
2.4.1	Elastomere	11
3	LITERATURÜBERSICHT	18
4	MATERIAL UND METHODE	22
4.1	Untersuchungsmaterial.....	22
4.1.1	Gummizüge.....	22
4.1.2	Pseudoelastische Federn.....	23
4.2	Untersuchungsmethoden.....	25
4.2.1	Experimente mit Gummizügen.....	25
4.2.2	Experimente mit pseudoelastischen Federn	29
5	ERGEBNISSE.....	30
5.1	Gummizüge	30
5.1.1	Kennlinien der Gummizüge in den verschiedenen Größen und Stärken	30
5.1.2	Kennlinien der Gummizüge im Wechsellastversuch.....	41
5.1.3	Kraftabfall der Gummizüge bei isometrischer Dehnung	47
5.1.4	Kennlinien der Gummizüge im Alterungsversuch	50
5.1.5	Ergebnisse des Temperaturvergleichs.....	51
5.1.6	Ergebnisse des Versuchs mit gedrehten Gummizügen	52
5.2	Pseudoelastische Federn	53
5.2.1	Kennlinien der pseudoelastischen Federn	53
5.2.2	Ergebnisse des Wechsellastversuchs	58
5.2.3	Kennlinien der Federn im Temperaturvergleich	61
6	DISKUSSION.....	62
6.1	Vergleich der Resultate der Versuche mit Gummizügen mit denen anderer Autoren.....	62
6.2	Vergleich der Resultate der Versuche mit Ni-Ti-Federn mit denen anderer Autoren.....	64
6.3	Zusammenfassender Vergleich von Gummizügen und pseudoelastischen Ni-Ti-Federn	66
7	ZUSAMMENFASSUNG	69
8	LITERATUR.....	71

1 Einleitung

Im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung mit festsitzenden Apparaturen werden für Zahnverschiebungen in mesio-distaler Richtung und zur dentoalveolären Kompensation einer mesialen bzw. distalen Okklusion mit langer klinischer Erfahrung intra- und intermaxilläre Gummizüge aus dem Naturprodukt Latex verwendet.

Diese Gummizüge oder Elastiks gehören zu der Gruppe der elastomeren Werkstoffe. Sie verformen sich unter Kraftereinwirkung und kehren anschließend in ihre ursprüngliche Form zurück. Bei konstanter Dehnung nimmt jedoch die von den Gummizügen entwickelte Kraft nach einem bestimmten Zeitraum ab und verhindert eine gleichmäßige Kraftübertragung auf das Gebiß. Außerdem treten bei starker Beanspruchung Kraftspitzen auf, und der Werkstoff zeigt jenseits der Elastizitätsgrenze plastische Verformung.

Um den Kraftabfall zu kompensieren, sollen nach bisheriger Ansicht die Elastiks in regelmäßigen Abständen vom Patienten gewechselt werden.

Von seiten der Hersteller der untersuchten Elastiks wird in der Regel keine Anwendungsempfehlung für die Gummizüge gegeben. Die meisten Behandler empfehlen jedoch, die Gummizüge mindestens einmal täglich zu wechseln. Dies ist aufgrund der geringen Kosten der Gummizüge zwar leicht möglich, jedoch in erheblichem Maße von der Mitarbeit der Patienten abhängig.

Mit der Einführung des synthetisch hergestellten Materials Polyurethan steht ein weiterer Werkstoff für kieferorthopädische Kraftmodule zur Verfügung. Die hieraus hergestellten Elastiks zeichnen sich durch eine große Vielfalt in Farbe und Form aus. So werden von elastischen Ketten über Separierringe bis zu den Halteligaturen für Brackets viele Varianten angeboten. Zur Zahnverschiebung und Okklusionserstellung werden jedoch in der Regel weiterhin Gummizüge aus Latex eingesetzt.

Eine Alternative zu den Gummizügen sind die seit 1993 angebotenen intermaxillären Zugfedern aus dem Sentalloy-Programm der New Yorker Firma GAC Int. Inc.. 1988 stellte *Miura* [52, 53] diese Federn vor, die aus einer von ihm 1986 entwickelten Nickel-Titan-Legierung bestehen. Die Legierung zeigt unter anderem den Effekt der Pseudoelastizität, der durch eine spannungsinduzierte martensitische Transformation der Gitterstruktur des Metalls hervorgerufen wird. Bei Mundtemperatur entwickelt eine solche Feder über einen weiten Bereich der Dehnung eine nahezu gleichbleibende Kraft und ermöglicht so - im Gegensatz zu den Elastiks - eine konstante Kraftübertragung auf das dentoalveoläre System. Außerdem unterliegen die Federn keiner Kraftreduktion und können über mehrere Tage bis Wochen getragen werden, was sie von der Patientencompliance unabhängiger macht.

Diesen Vorteilen stehen relativ hohe Kosten der Federn entgegen. Zudem kam es in ersten Erfahrungen bei der Behandlung mit intermaxillären Federn immer wieder zum Bruch der Federn nach kurzer Zeit, was vom Hersteller durch falsches Einhängen der Federn durch den Behandler erklärt wird.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die materialtechnischen Parameter von gebräuchlichen Elastiks zu bestimmen und mit denen von superelastischen Federn zu vergleichen. Dem Behandler soll hierbei ein Überblick über die werkstoffkundlichen Eigenschaften der superelastischen Federn und der Gummizüge sowie über die Vor- und Nachteile bei der klinischen Anwendung gegeben werden.

2 Technische Grundlagen

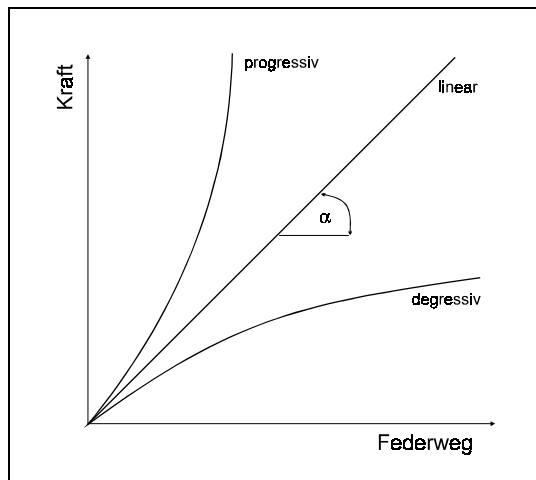
2.1 Federn

2.1.1 Federkennlinie

Die Federkennlinie stellt die Abhängigkeit der Federkraft F vom Federweg s dar. Dabei wird die Steigung der Kennlinie nach DIN 2089 Federrate R genannt [26, 27]. Es gilt:

$$R = \frac{dF}{ds} = \tan \alpha$$

Bei Federn aus linear elastischen Werkstoffen gilt das Hookesche Gesetz. Bei Reibungsfreiheit ergeben sich geradlinige Kennlinien. Je steiler die Gerade, desto härter ist die Feder.



Chaconas [23] hat 1984 die linearen Kennlinien von kieferorthopädischen Druckfedern in Abhängigkeit von Federdurchmesser und Drahtquerschnitt aufgezeichnet.

Von einer progressiven Federkennlinie spricht man, wenn die Federrate einer Feder mit zunehmender Dehnung steigt. Eine Feder mit sinkender Federrate hat eine degressive Federkennlinie. Abb. 1 zeigt den Verlauf einer progressiven, einer degressiven und einer linearen Kennlinie im Vergleich. Degressive Kennlinien sind typisch für viskoelastische Werkstoffe.

Abb. 1: Federkennlinien [34]

2.1.2 Arbeitsaufnahmefähigkeit einer Feder

Beim Spannen einer Feder wird in der Feder potentielle Energie gespeichert [48].

Es gilt:

$$W = \int_0^s F ds$$

Dabei entspricht die in der Feder gespeicherte Energie der Fläche unter der Federkennlinie. *Sander* [64] und *Newseley* [55] bezeichnen diese Energie als Resilienz. Bei linearer Kennlinie beträgt diese:

$$W = \frac{1}{2} F_{\max} \cdot s_{\max}$$

2.2 Kennzeichnung schwingender Beanspruchung

Der zeitliche Ablauf schwingender Beanspruchung wird gemäß Abb. 2 gekennzeichnet durch einen Mittelwert σ_m oder ε_m und den Schwingungsausschlag (Amplitude) σ_a bzw. ε_a . Der Höchstwert der Spannung wird als Oberspannung σ_o , der kleinste Wert als Unterspannung σ_u bezeichnet. Die Differenz zwischen Größt- und Kleinstwert ist der Spannungsausschlag. Eine volle Schwingung mit der Periodendauer T ist ein Schwingenspiel, deren Anzahl die Schwingungszahl N . Die Schwingungsfrequenz f ist der Reziprokwert der Periodendauer:

$$f = \frac{1}{T}$$

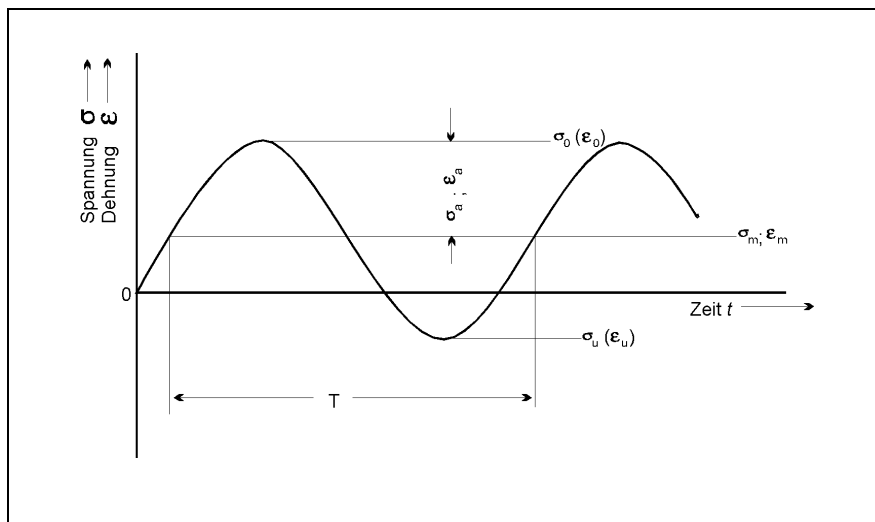


Abb. 2: Größen zur Kennzeichnung schwingender Beanspruchung [6]

2.2.1 Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung

Zum Beschreiben der Vorgänge in metallischen Werkstoffen bei schwingender Beanspruchung werden die Begriffe der Dauerfestigkeit benötigt.

2.2.1.1 Verfestigung, Entfestigung

Die Effekte der Verfestigung oder Entfestigung erfolgen insbesondere zu Beginn der Schwingungsbeanspruchungen. Bei einer Wechselverfestigung zeigt sich eine Abnahme der Spannungs- als auch der Dehnungsamplitude sowie eine Verkleinerung der von der Spannungs-Dehnungs-Kurve umschlossenen Fläche (Hysterese). Bei der Entfestigung werden sowohl die Fläche der Hystereseschleife als auch die Spannungs- und Dehnungsamplituden größer.

2.2.1.2 Gefügeveränderungen

Innerhalb der Gitterstruktur der Metalle treten während Wechselbelastungen in Mikrobereichen plastische Versetzungsbewegungen auf. Diese sind mit einer Energiezufuhr verbunden und können somit Gefügeveränderungen aktivieren, insbesondere die Auflösung oder Bildung von Ausscheidungen.

Die an der Oberfläche austretenden Versetzungen führen durch die damit verbundene Stufenbildung zu den für Dauerschwingbeanspruchung charakteristischen Gleitbändern. Diese bestehen aus Extrusionen und Intrusionen, deren Entstehungsmechanismus durch Abb. 3 erläutert wird. Die Intrusionen bilden Rißkeime, weshalb Daueranrisse fast ausschließlich von der Oberfläche ausgehen.

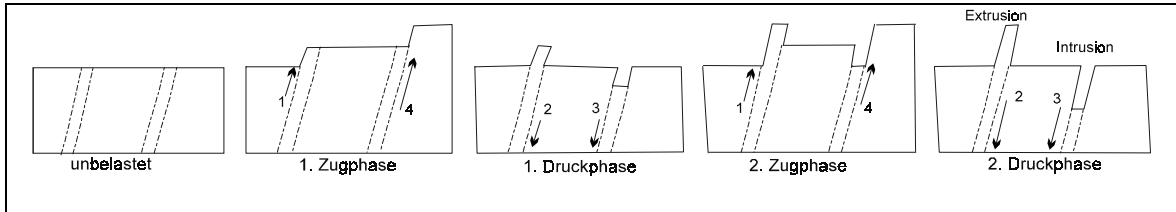


Abb. 3: Entstehung von Extrusionen und Intrusionen (1 - 4: aktive Gleitebenen) [6]

2.2.1.3 Rißbildung, Rißfortschritt

Die Schädigung eines Werkstoffs durch Dauerwechselbeanspruchung wird in die Phasen der Rißbildung und des Rißfortschritts unterteilt. Der Anteil dieser beiden Phasen an der Lebensdauer eines Werkstoffes ist sehr unterschiedlich. Für zähe Werkstoffe wird für die Rißbildung etwa 10% und für die Ausbreitung des Risses etwa 90% der Lebensdauer benötigt, während bei spröden Werkstoffen die Verhältnisse umgekehrt sein können.

Des Weiteren werden noch andere Formen der Rißbildung beobachtet. Diese entstehen an Korngrenzen oder an nichtmetallischen Einschlüssen. Häufig können auf der durch Rißfortschritt entstandenen Bruchfläche mikroskopisch feine, charakteristische Schwingungsstreifen nachgewiesen werden.

2.3 Formgedächtnislegierungen

Über die erste Beobachtung der Transformation einer Formgedächtnislegierung, die im angelsächsischen Sprachraum shape memory alloys genannt werden, wurde 1932 von *Chang* und *Read* [22] berichtet. Die Wissenschaftler beschrieben, daß ein gerader Stab aus der kubischen Phase (AuCd) eine bleibende Biegung erhalten kann, wenn er im eingespannten Zustand über den Umwandlungsbereich hinweg abgekühlt wird. Die Biegung verschwindet, und der Stab wird wieder gerade, wenn die Probe durch Erwärmen in die kubische Phase zurückverwandelt wird.

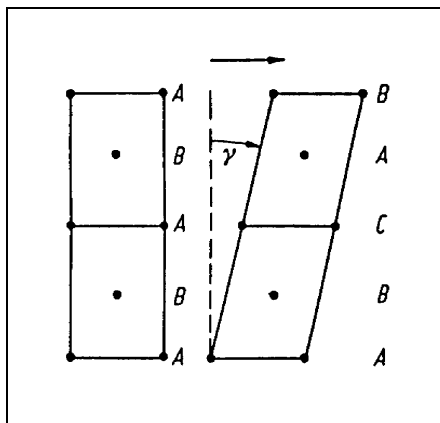
1938 wurde die Transformation in Messing (CuZn) beobachtet. Jedoch wurde erst 1962 von *Buehler* und Mitarbeitern [18] dieser Effekt in einer Ni-Ti-Legierung mit 50 Atom-% bzw. 55 Gewicht-% Nickel entdeckt. Sie gaben ihr den Namen Nitinol (NiTi Naval Ordnance Laboratory).

Zur Anwendung in der Mundhöhle wurden bis jetzt vor allem Ni-Ti-Legierungen in der Drahtbogentechnik oder als Federelemente beschrieben [1, 4, 14, 15, 20, 21, 36].

2.3.1 Metallkundliche Grundlagen

Vorraussetzung der thermoelastischen martensitischen Transformation ist eine diffusionslose Phasenumwandlung. Einzelne Atome des Gitters ändern ihre Position um einen Betrag, der kleiner ist als der Abstand zwischen zwei Atomen. Dabei wird die Kristallstruktur der Hochtemperaturphase β Austenit genannt, die bei einer niedrigeren Temperatur zu α Martensit umgewandelt wird. Methoden einer Analyse dieser Umwandlung wurden von *Donner* [29] vorgestellt. Diese Umwandlung von β in α kann durch einfache (gittervariante) Scherung erfolgen.

Abb. 4 zeigt den Fall der Umwandlung einer Formgedächtnislegierung auf Eisenbasis, bei



der die Hochtemperaturphase ein kubisch flächenzentriertes Gitter mit der Stapelfolge ABC hat und sich durch einfache Scherung in die hexagonal dichteste Kugelpackung des α Martensit mit der Stapelfolge ABAB umwandelt. Die Umwandlung ist bestimmt durch einen Scherwinkel $\gamma_{\alpha\beta}$, der in diesem Fall etwa 20° beträgt.

Abb. 4: Eine Scherung γ führt zur Änderung der Stapelfolge und damit zur Änderung der Kristallstruktur. Beispiel FeMn-Legierungen: ABABAB... \rightarrow ABCABC..., hdp \rightarrow kfz [40, 41].

Der Verlauf der martensitischen Umwandlung von Ni-Ti-Legierungen wurde 1987 von *Lohmann* [44] untersucht. Abb. 5 zeigt weitere Aspekte der martensitischen Umwandlung. Um die hohen Spannungen, die bei dieser Gitterumwandlung entstehen, zu verringern, bildet sich nicht nur ein Martensitkristall, sondern auch mehrere Orientierungsvarianten. Jeder dieser Kristalle zeigt eine innere plastische (gitterinvariante) Verformung der umwandelnden Kristallphase durch Zwillingsbildung oder Gleiten [42].

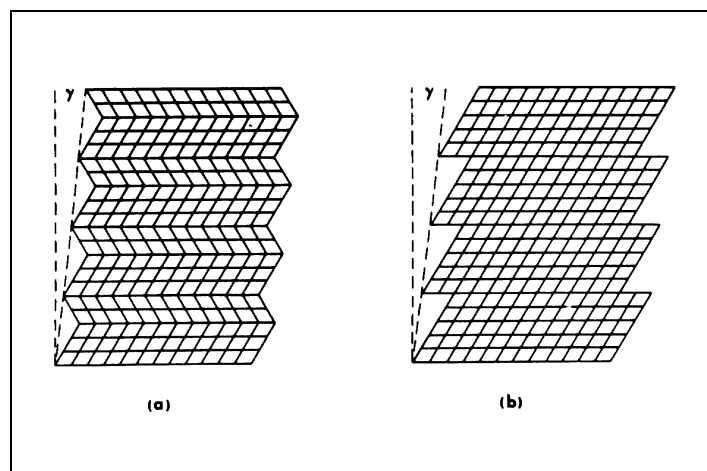


Abb. 5: Innere plastische Verformung im Martensit.
a) Zwillinge, b) Gleiten [42]

Die Umwandlung Austenit zu Martensit und die Rückumwandlung Martensit zu Austenit finden bei unterschiedlichen Temperaturen statt, d. h. es wird eine Hysterese durchlaufen. In

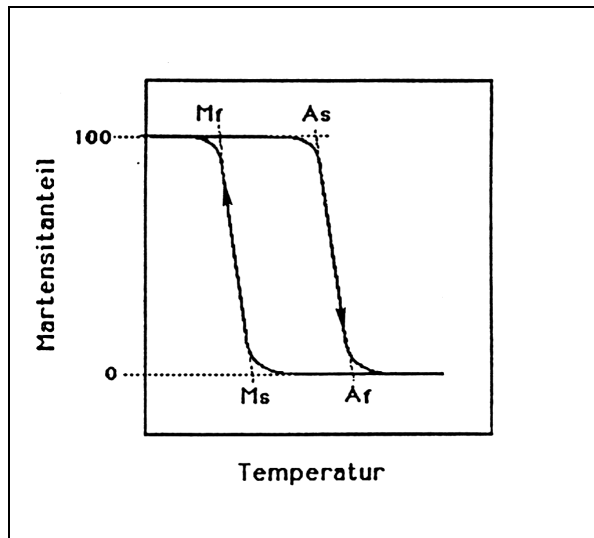


Abb. 6 ist der Anteil an Martensit in einer Probe als Funktion der Temperatur schematisch aufgetragen. Die die Umwandlung kennzeichnenden Temperaturen sind Austenit-Start (A_s) und Austenit-Finish (A_f) sowie Martensit-Start (M_s) und Martensit-Finish (M_f). Dabei hängen die Umwandlungstemperaturen stark von der Zusammensetzung der verwendeten Legierung ab. Bei einer Ni-Ti-Legierung führen schon kleinste Änderungen in der Zusammensetzung zu großen Schwankungen [9, 19, 73].

Abb. 6: Temperaturabhängigkeit des Martensitanteiles in Formgedächtnislegierungen [66]

Grundlage für den Shape-Memory-Effekt ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung, bei der die beteiligten Phasen, Hochtemperaturphase (Austenit) und Nieder-temperaturphase (Martensit), geordnete Gitterstrukturen aufweisen [71]. Der Mechanismus des Memory-Effektes ist vereinfacht in Abb. 7 dargestellt.

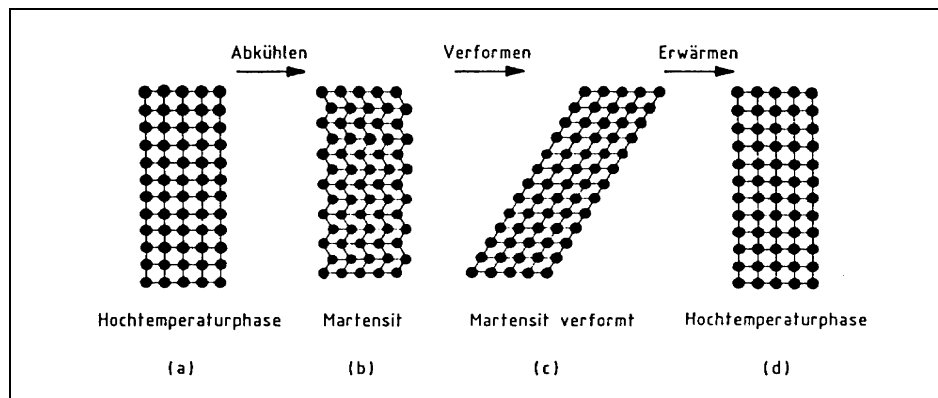


Abb. 7: Schematische Darstellung des Memory-Effektes [68]

Abb. 8 zeigt die charakteristischen Unterschiede im Festigkeitsverhalten der beiden Phasen. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits gleicht oberhalb einer kritischen Temperatur M_d , die höher ist als A_f , dem konventioneller Legierungen. Nach Erreichen der Dehngrenze findet die plastische Verformung unter Bildung und Bewegung von Versetzungen durch Gleiten statt. Das Verfestigungsverhalten des Martensits ist dagegen recht ungewöhnlich. Es ist gekennzeichnet durch das sogenannte Martensitplateau, einen Bereich mit sehr geringer Verfestigung. In diesem Bereich erfolgt die Verformung durch die Verschiebung hochbeweglicher Grenzflächen durch Entzwillingen.

Die für das Verschieben der Zwillingsgrenzen notwendige Spannung ist wesentlich niedriger als die für die Bildung und Bewegung von Versetzungen erforderliche Spannung. Durch Entzwillingen kann die martensitische Probe ca. 10% verformt werden. Wenn diese Verformungsmöglichkeit erschöpft ist, müssen andere Verformungsarten aktiviert werden. An das Martensitplateau schließt sich somit ein zweiter elastischer Bereich an. Bei Erreichen der Dehngrenze $R_{p0,2}$ erfolgt die Verformung konventionell durch Versetzungsbewegung. Die Verformung im Bereich des Martensitplateaus kann durch Erwärmung rückgängig gemacht werden.

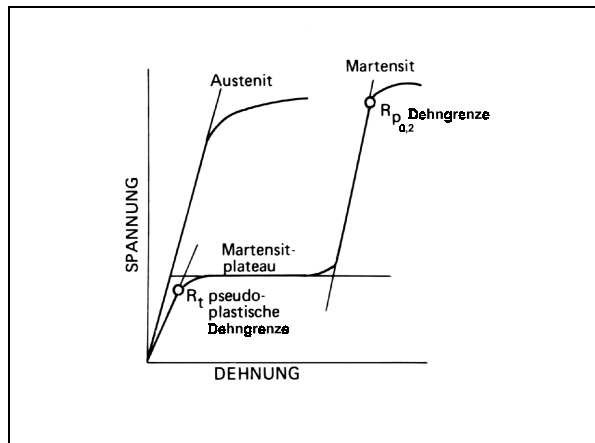


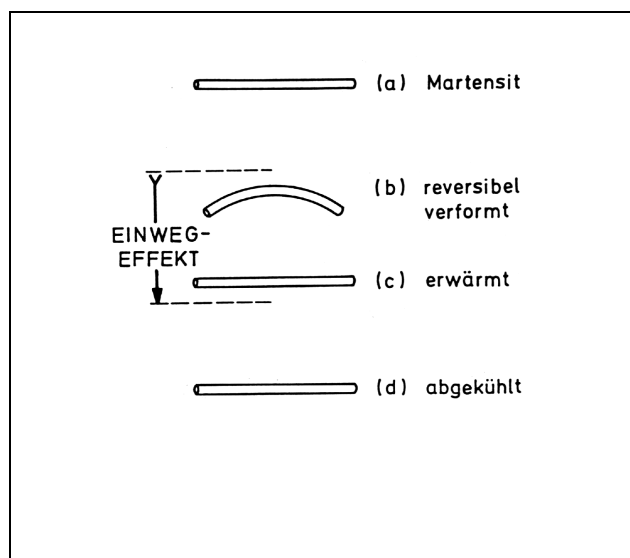
Abb. 8: Spannungsdehnungsdiagramm des Austenits und des Martensits [35,60]

2.3.2 Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen

2.3.2.1 Einwegeffekt

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so findet lediglich eine reversible Martensitverformung statt, z. B. durch Verschieben von Zwillingsgrenzen. Beim Erwärmen erfolgt eine Umwandlung in die Hochtemperaturphase, mit der die Einstellung der ursprünglichen Probenform einhergeht. Da eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt, spricht man hier vom sogenannten Einwegeffekt [68]. Der Mechanismus des Einwegeffektes ist in Abb. 9 vereinfacht dargestellt.

Wird eine im martensitischen Zustand verformte Probe daran gehindert, bei Erwärmung



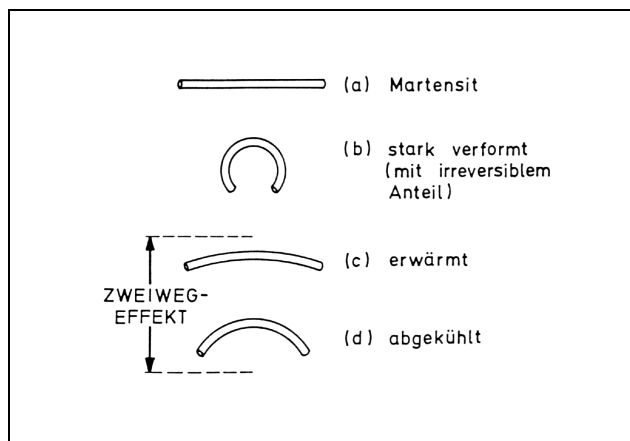
über A_s in ihre ursprüngliche Gestalt zurückzukehren, spricht man von unterdrücktem Formgedächtnis. Diesen Effekt wollten *Andreasen* und *Brady* [2] zur Kraftentwicklung in der Multibandtechnik benutzen. Die hierbei entstehenden Kräfte liegen jedoch im Bereich zwischen 7 und 24 N bei einem Querschnitt der verwendeten Drahtbögen von 0,02 inch (0,51 mm) und sind somit zu hoch für eine kieferorthopädische Anwendung.

Abb. 9: Schematische Darstellung des Einwegeffektes [68,70]

2.3.2.2 Zweiwegeeffekt

Shape-Memory-Legierungen können auch einen Zweiwegeeffekt aufweisen, d.h. sie können sich an zwei Formen erinnern. Zur Einstellung des Zweiwegeeffektes wird die Probe im martensitischen Zustand über die Dehngrenze $R_{p0,2}$ hinaus gedehnt (siehe Abb. 8) und damit plastisch verformt.

Bei Erwärmung wird zunächst der reversible Anteil der Martensitverformung rückgängig gemacht. Die Ausgangsform wird hierbei jedoch nicht völlig wiederhergestellt. Dafür entstehen nun beim Abkühlen unter dem Einfluß des Spannungsfeldes der Versetzungen bevorzugte Martensitvarianten, die wiederum eine bestimmte Niedertemperaturform bewirken. Der



Zweiwegeeffekt ist damit ein reversibler Vorgang, bei dem keine Rückstellkraft erforderlich ist. Abb. 10 zeigt eine schematische Darstellung dieses Effektes.

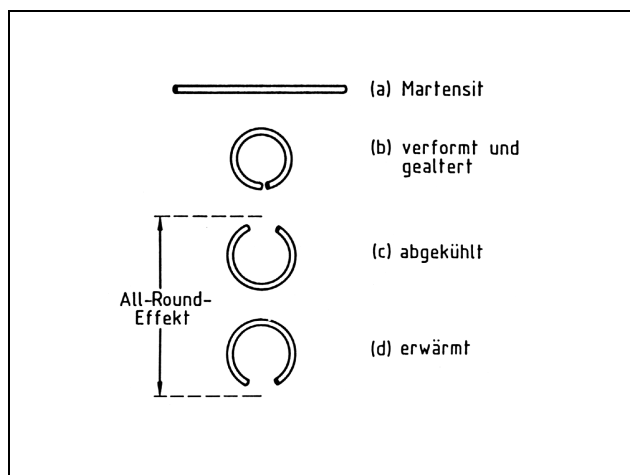
Zur Einstellung eines solchen Zweiwegverhaltens hat *Escher* [32] mehrere Möglichkeiten kombinierter thermischer und mechanischer Vorbehandlungen beschrieben.

Abb. 10: Schematische Darstellung des Zweiwegeeffektes [68]

2.3.2.3 All-Round-Effekt

Der All-Round-Effekt (Abb. 11) ist eine besonders ausgeprägte Form des Zweiwegeeffektes. Dieser sehr starke Effekt wurde bislang nur bei Ni-reichen Ni-Ti-Legierungen mit einem Nickel-Gehalt über 50,5 Atom-% gefunden.

Wird die gerade martensitische Probe (a) in die Form (b) gebogen und bei einer Temperatur unterhalb 600°C im festgespannten Zustand einer Alterung unterworfen, dann entstehen linsenförmige Ti_3Ni_4 -Ausscheidungen, die in den Zug- bzw. Druckbereichen der Biegeprobe jeweils bestimmte Vorzugsorientierungen aufweisen. Die beim Abkühlen der Probe entstehenden Spannungsfelder im Bereich der



Ausscheidungen begünstigen die Entstehung bestimmter Martensitvarianten, die zur Entstehung einer bestimmten Niedertemperaturform führen. Damit „erinnert“ sich die Probe sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Niedertemperaturform. Die Durchführung von Temperaturzyklen bewirkt jeweils eine völlige Formumkehr.

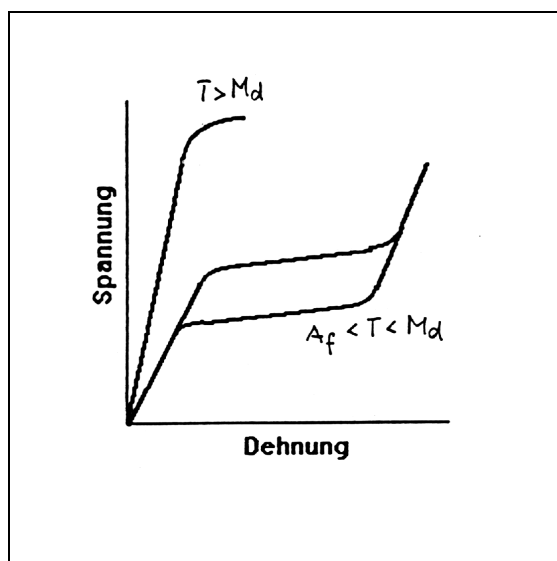
Abb. 11: Schematische Darstellung des Allround-Effektes [68]

2.3.2.4 Pseudoelastizität

Im Temperaturbereich zwischen A_f und M_d (vergl. Abb. 6) kann bei mechanischer Beanspruchung spannungsinduzierter Martensit gebildet werden, was ein unkonventionelles quasi-elastisches Verhalten zur Folge hat. M_d ist die kritische Temperatur, die höher ist als A_f . Oberhalb dieser Temperatur gleicht das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits dem konventioneller Legierungen. Abb. 12 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven einer konventionellen elastischen und pseudoelastischen Verformung.

Die Legierung liegt bei einer Temperatur über A_f vollständig als Austenit vor. Nach einer linear-elastischen Verformung der Hochtemperaturphase folgt ein Übergang in einen scheinbar elastischen Bereich mit niedrigem Elastizitätsmodul, der auf eine spannungsinduzierte Martensitbildung zurückzuführen ist. Dieses Verhalten wird als Superelastizität oder besser Pseudoelastizität bezeichnet. Dabei zeigt die Legierung eine Formveränderung ohne nennenswerte Steigerung der Kraft ähnlich dem Verhalten elastomerer Werkstoffe.

Beim Entlasten der Legierung geht die Formveränderung weitgehend zurück. Nach einer bestimmten Verformung, die je nach Legierungstyp Werte von bis zu 8% betragen kann, ist dieses reversible Verformungsverhalten erschöpft, so daß ein Spannungsanstieg erfolgt, wobei eine irreversible plastische Verformung eintritt, wie sie von herkömmlichen Legierungen bekannt ist. Mit zunehmender Temperatur steigt die Kraft, die zur Martensitbildung erforderlich ist. Nach Überschreiten der sogenannten M_d -Temperatur kann schließlich kein spannungsinduzierter Martensit mehr erzeugt werden, vielmehr erfolgt nach einer linear-



elastischen Verformung eine irreversible plastische Verformung durch Versetzungsbewegung [69]. Die Kraft-Dehnungskurve der pseudoelastischen Legierung ist durch eine Hysterese gekennzeichnet. Die von der Hystereseschleife eingeschlossene Fläche entspricht dem mit der Martensitbildung und -Rückbildung verbundenen Energieverlust [25, 45].

Abb. 12: Spannungs-Dehnungs-Kurven des Austenits bei $T > M_d$ (konventionelle elastische Verformung) und bei $A_f < T < M_d$ (pseudoelastische Verformung) [66]

Aufgrund dieser besonderen Eigenschaften der Legierung ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Anwendung in der Zahnmedizin, besonders im Bereich der Orthodontie.

1988 entwickelten *Miura* und dessen Mitarbeiter [51] die DERHT-Methode (direkt electric resistance heat treatment), um superelastische Drahtbögen für eine Anwendung in der Kieferorthopädie nutzen zu können. Desweiteren werden pseudoelastische Zug- und Druckfedern zur Zahnverschiebung und Okklusionserstellung eingesetzt [46]. Im Bereich der Endodontie werden Wurzelkanalinstrumente aus Ni-Ti verwendet, um besonders stark gekrümmte Wurzelkanäle aufbereiten zu können.

2.4 Kunststoffe

Als organische Werkstoffe gelten im Sinne des Begriffs „Werkstoff“ diejenigen Kunststoffe, die unmittelbar zur Herstellung von Bauteilen oder Gebrauchsgegenständen dienen. Sie werden nach verschiedenen chemischen Verfahren hergestellt und dementsprechend eingeteilt. Bedeutsamer für den Anwender ist jedoch eine Einordnung nach ihrer Formgebungsmöglichkeit und Verhaltensweise in Duromere, Plastomere und Elastomere [6]. Dabei gehören die Gummizüge zur Gruppe der Elastomere.

2.4.1 Elastomere

Typische Elastomere sind gering vernetzte Duromere, die sich bis zur Zersetzungstemperatur stark gummielastisch verformen lassen und diese Fähigkeit auch bei sehr tiefen Temperaturen beibehalten.

Das typische Verhalten der Elastomere wird durch weitmaschig verknüpfte Makromoleküle (siehe Abb. 13) bedingt. Die große elastische Dehnbarkeit dieser Stoffe hat ihre Ursache darin, daß die nur stellenweise verknüpften Makromoleküle bei äußerer Krafteinwirkung aus ihrer verknäulten Lage gestreckt werden können, soweit es die Verknüpfungsstellen erlauben. Nach Beendigung der Krafteinwirkung gehen sie wieder in ihre ursprüngliche Lage zurück.

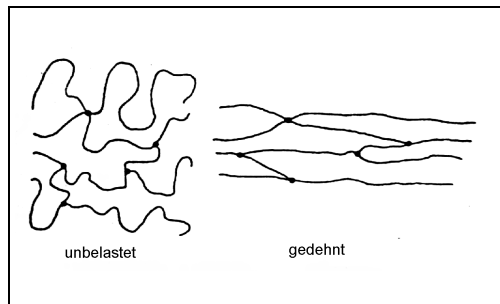


Abb. 13: Weitmaschige Verknüpfung (Elastomer)

2.4.1.1 Gummielastischer Zustand

Die Glasatemperatur (T_g) eines makromolekularen Stoffes bezeichnet einen Temperaturbereich, unterhalb dessen die Schwingbewegungen der Makromoleküle zum Stillstand kommen. Die zwischenmolekularen Anziehungskräfte werden voll wirksam und verleihen dem Material seine Festigkeit und Härte [6]. Oberhalb von T_g weisen auch größere Segmente der Makromoleküle in amorphen Polymeren oder in den amorphen Bereichen von teilkristallinen Polymeren einen hohen Grad an Beweglichkeit auf. Im Unterschied zur Schmelze eines Thermoplasten beschränkt die Vernetzung die Verschiebbarkeit der Molekülsegmente. Eine chemische Vernetzung erfolgt über drei oder höherbindige Atome bzw. Moleküle (Monomere) [33]. Die Einteilung in Plastomere und Elastomere ist mittlerweile nur noch eingeschränkt gültig, da Plastomere durch Weichmacher so eingestellt werden können, daß sie sich oberhalb der Glasatemperatur auch gummielastisch verhalten.

2.4.1.1.1 Thermodynamische Betrachtung [33]

Eine kleine Änderung dF der freien Energie F eines Polymeren setzt sich gemäß der thermodynamischen Beziehung

$$dF = dU - TdS - SdT$$

lediglich aus einer Änderung der inneren Energie U und einer Änderung der Entropie S zusammen. Zur vereinfachten Betrachtungsweise wird vorausgesetzt, daß die Temperatur T sich nicht ändert ($dT = 0$) und das Volumen V des Polymeren bei der Dehnung als konstant angenommen wird. Ansonsten hätte eine Vergrößerung des Volumens eine Abkühlung zur Folge, eine Verkleinerung des Volumens eine Erwärmung. Die Reibung der einzelnen Molekülketten untereinander erzeugt eine Erhöhung der inneren Energie.

Für die rücktreibende Kraft f im Polymeren ergibt sich damit bei einer isothermen Änderung seiner Länge L :

$$f = (\delta F / \delta L)_{T,V} = (\delta U / \delta L)_{T,V} - T (\delta S / \delta L)_{T,V}$$

die Kraft umfaßt also einen energieelastischen Anteil

$$f_u = (\delta U / \delta L)_{T,V}$$

und einen entropieelastischen Anteil

$$f_s = - T (\delta S / \delta L)_{T,V}$$

Im Fall des idealen gummielastischen Körpers erfolgt die Dehnung ohne Änderung der inneren Energie ($f_u = 0$). Die Kraft wird hiermit nur durch die Änderung der Entropie bestimmt und verhält sich proportional zur absoluten Temperatur.

Für die Polymere im gummielastischen Zustand ist typisch, daß der entropieelastische Beitrag zur Kraft den energieelastischen deutlich überwiegt. Es verbleibt jedoch in der Regel ein energieelastischer Anteil von 10 bis 20 %.

2.4.1.2 Mechanisches Verhalten

Die Unterschiede im mechanischen Verhalten der Elastomere im Vergleich zu dem der Metalle und Thermoplaste beruhen auf einem anderen Mechanismus der Energiespeicherung. Die Elastizität der beiden letzten Stoffklassen hat ihre Ursache in der Änderung der inneren Energie bei einer Deformation und zwar durch Änderung der Atomabstände und Valenzwinkel der Moleküle. Infolgedessen kühlen sich Metalle beim Dehnen ab, und die Spannung des gedehnten Materials nimmt beim Erhitzen ab.

Der als Polymerknäuel mit Verhakungen und Verschlaufungen vorliegende Kautschuk bzw. das zusätzlich durch Haupt- und/oder Nebervalenz-Bindungen vernetzte Elastomer wird beim Dehnen unter Abnahme der Entropie in eine höhergeordnete Konformation gebracht. Hierbei entsteht Wärme durch Reibung der Polymermoleküle untereinander. Bei Entlastung gehen die Polymermoleküle infolge ihrer thermischen Bewegung wieder in ihre Ausgangslage – unter Entropiezunahme – zurück.

Deshalb erwärmen sich Elastomere beim Dehnen und die Spannung des gedehnten Materials steigt beim Erhitzen an.

Für dieses kautschukelastische Verhalten eines Polymers sind folgende Voraussetzungen erforderlich [28]:

- Die Polymermoleküle dürfen bei Belastung nicht völlig voneinander abgleiten und damit ein viskoses Fließen des Materials hervorrufen. Bei kurzzeitigen Belastungen und ausreichend hoher relativer Molekülmasse des Kautschuks genügt bereits das Verhakungsnetzwerk, um dies zu verhindern. Bei länger andauernden Dehnungen tritt infolge zunehmender Entschlafung zähes Fließen auf. Dies kann durch eine reversible oder irreversible Vernetzung verhindert werden. Je kleiner die relative Molekülmasse bzw. je schwächer die Vernetzung ist, um so geringer wird die elastische Rückstellkraft nach längerer Belastungszeit.
- Entropie-Elastizität ist nur möglich, wenn größere Kettensegmente eine hohe Beweglichkeit aufweisen und somit nach Entlastung wieder schnell in eine statistisch wahrscheinlichere Konformation zurückgehen können. Unterhalb der Glastemperatur T_g sind die Kautschuke hart und wenig dehnbar, oberhalb T_g sinken Härte und Relaxationsmodul und erreichen bei Temperaturen von ca. 50°C über T_g einen für die Elastomer-Eigenschaften typischen Wert.
- Kristallisation vermindert ebenfalls die Kettenbeweglichkeit und damit das elastische Verhalten. Bei der jeweiligen Gebrauchstemperatur muß deshalb der Kautschuk weitgehend im Glaszustand vorliegen.

2.4.1.2.1 Elastomer-Netzwerke

In Elastomer-Netzwerken sind die Vernetzungspunkte und die Länge der Netzbögen statistisch verteilt. Ein ideales Elastomer-Netzwerk besitzt keine Defekte wie freie Kettenenden, Kettenverschlaufungen und Verhakungen. Praktisch haben alle Polymerketten nur eine endliche Größe und enthalten neben Grundbausteinen mit Vernetzungsbindungen auch solche, bei denen ein Teil der Funktionalität auf Verzweigungsbindungen entfällt. Die Verminderung der effektiven Netzwerkdichte durch freie Kettenenden wirkt sich um so stärker aus, je kürzer die Primärmoleküle sind. Andererseits nimmt die Wahrscheinlichkeit für Kettenverschlaufungen und Verhakungen der Ketten mit zunehmender relativer Molekülmasse der Primärketten zu.

Vernetzungsstellen können über kovalente Bindungen entstehen, welche zu weitgehend irreversiblen Verknüpfungen der Primärmoleküle führen. Im Gegensatz dazu ist eine Vernetzung über Wasserstoff-Brückenbildung oder Ionen-Assoziationen reversibel und kann thermisch gespalten werden. Bei höheren Temperaturen verhalten sich solche Kautschuke dementsprechend wie Thermoplaste, bei tieferen Temperaturen jedoch wie Elastomere.

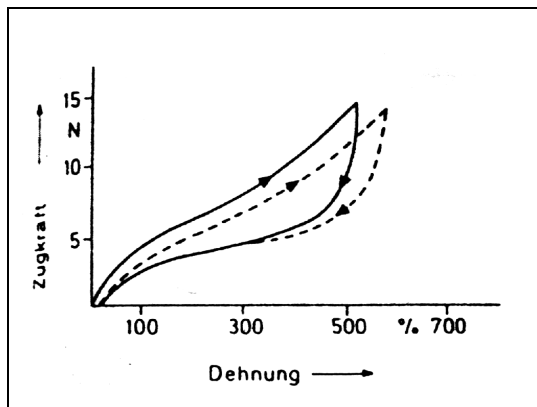
2.4.1.2.2 Hauptvalenz-Netzwerke

Tab. 1 gibt die Bindungsenergien der typischen Vernetzungsbrücken wieder. Demzufolge müßten Vulkanisate mit C-C Vernetzungsstellen wesentlich höhere Zugfestigkeiten aufweisen als Vulkanisate mit S-S und C-S Bindungen. Tatsächlich zeigen aber Vulkanisate mit S_x - (beschleunigte Schwefel-Vulkanisation) und S_1 -Brücken (TMTD-Vulkanisation) höhere

Zugfestigkeiten als Vulkanisate mit C-C Vernetzungsbrücken. Dieses Verhalten erklärt sich damit, daß bei mechanischer Beanspruchung lokal auftretende Spannungen beim Schwefel-Vulkanisat nicht zur Spaltung von C-C Bindungen der Hauptkette, sondern zur Spaltung von S-S bzw. C-S Bindungen führen, die zum Unterschied zu gespaltenen C-C Bindungen an anderer Stelle wieder neu gebildet werden können.

Bindung	Bindungsenergie (kJ * mol ⁻¹)	Vulkanisationsmethode
C-C	350	Peroxid, energiereiche Strahlung, Chinone usw.
S-S	266	Schwefel
C-S	272	Schwefel
C-N	292	Diamine und Diisocyanate
C=N		Diamine und Diisocyanate
C-O	350	Diisocyanate

Tab. 1: Bindungsenergien typischer Vernetzungsbrücken [28]



Der irreversible Energieverlust durch plastisches Fließen wird durch die Fläche zwischen Belastungs- und Entlastungskurve dargestellt. Wiederholungen der Belastungs- und Entlastungszyklen führen zu kleineren Hysteresisflächen wie in der gestrichelten Kurve aus Abb. 14 zu erkennen ist. Die Wärmeentwicklung beim plastischen Fließen verursacht eine Aufwärmung des Materials (vergl. S. 12). Wegen des plastischen Fließens bei Belastung geht die Verformung bei Entlastung nicht auf den Ursprungswert zurück.

Abb. 14: Schematische Darstellung der Hysteresis [28]

2.4.1.3 Kautschuk und Gummi

Unter der Bezeichnung Kautschuk (von caa-o-cho = tränender Baum) wurde zunächst nur der elastische Stoff verstanden, der hauptsächlich aus dem tropischen Baum *Hevea brasiliensis*, Gattung *Euphorbia*, gewonnen wird. Beim Anritzen der Stämme sondern diese eine milchartige Flüssigkeit, das Latex ab, in der ca. 30-35% Naturkautschuk in Form kleinster Tröpfchen emulgiert ist. Diese Emulsion wird durch Zugabe von Essigsäure gebrochen, wobei der Naturkautschuk koaguliert und abgetrennt werden kann. Naturkautschuk ist als cis-1,4-Polyisopren zu definieren, besteht also aus stark ungesättigten Kettenmolekülen mit seitenständigen Methylgruppen, wobei die kettenbildenden C-Atome an den Doppelbindungen cis-ständig sind. Abb. 15 zeigt die Strukturformel des Polyisoprens [74].

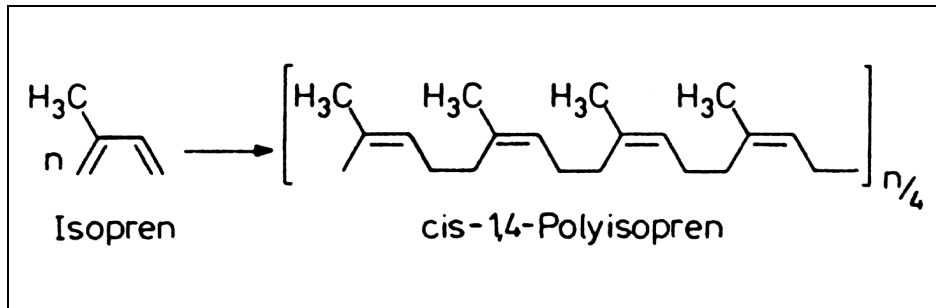


Abb. 15: Strukturformel des cis-1,4-Polyisoprens [74]

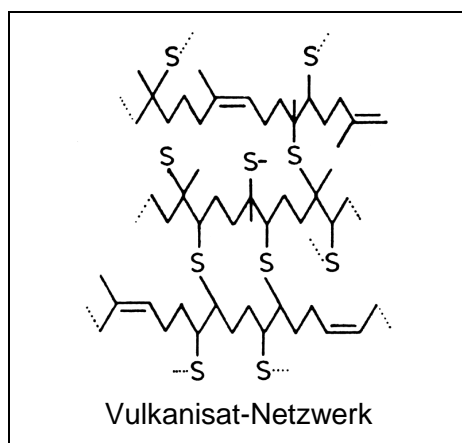
Naturkautschuk kommt überwiegend als gelblich-weißes, halbdurchscheinendes, geruchloses, gummiartiges und zähelastisches Material in den Handel. Es weist eine typische Eigenklebrigkeit auf und beginnt, sich ab ca 120° C zu zersetzen. Naturkautschuk verbrennt mit stark rußender Flamme, ist unlöslich in Wasser, Alkoholen, Estern, Säuren und Laugen; löslich ist er in chlorierten und aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie in Schwefelkohlenstoff.

Er diente zur wasserdichten Imprägnierung von Textilien, Gummischuhen und chirurgischen Schläuchen. Die Einsatzmöglichkeiten dieses Naturkautschuks sind jedoch infolge der niedrigen mechanischen Festigkeiten und der hohen Thermoplastizität äußerst begrenzt. Erst durch die Umwandlung des Kautschuks in ein weitmaschiges Netzwerk-Gummi oder Elastomer erlangt das Produkt wertvolle Eigenschaften innerhalb eines weiten Belastungs- und Temperaturbereichs und wird damit zum Werkstoff.

Die Vernetzungsreaktion wurde 1844 von *Goodyear* und *Hancock* gefunden und wird als Heißvulkanisation bezeichnet.

2.4.1.3.1 Vulkanisation

Hierunter versteht man die Verbrückung der Kettenmoleküle des Naturkautschuks über Schwefelatome, welche sich an die Doppelbindungen anlagern. Die Vulkanisation wird erreicht, indem Schwefel homogen mit dem Naturkautschuk verknetet und diese Mischung dann auf ca. 180° C erhitzt wird. Durch die Kettenverknüpfung wird ein räumliches Netzwerk geschaffen, das ein Struktursegment (wie in Abb. 16 dargestellt) aufweisen kann.



Die beschleunigte Vulkanisation unterscheidet sich von der unbeschleunigten durch die Reaktionsgeschwindigkeit und durch die Art des Netzwerks. So werden bei der unbeschleunigten Vulkanisation 40 bis 55 Schwefel-Atome pro Vernetzungsstelle verbraucht - im Vergleich zu 3 bis 6 Schwefel-Atomen pro Vernetzungsstelle bei der beschleunigten Vulkanisation.

Abb. 16: Vulkanisations Netzwerk des Naturkautschuks [74]

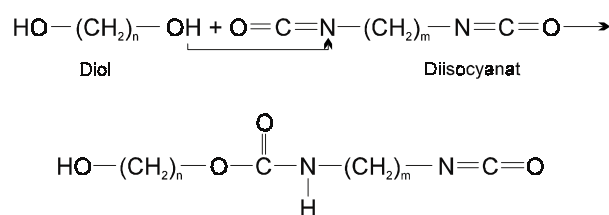
2.4.1.4 Synthesekautschuke

In den vergangenen 60 Jahren wurden eine Reihe Polymere hergestellt, die bei geeigneter Vernetzung ein ähnliches Eigenschaftsbild wie der vulkanisierte Naturkautschuk zeigen (Synthesekautschuke). Dadurch haben sich die Begriffe Kautschuk sowie Gummi und Elastomer erweitert auf eine Klasse von Polymeren mit einer bestimmten Kombination von Eigenschaften.

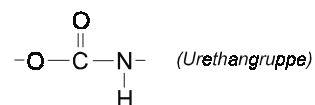
2.4.1.4.1 Polyurethan-Elastomere (U)

Unter dem Begriff Polyurethan-Elastomere wird eine Gruppe von Polymeren zusammengefaßt, die weniger durch ein gemeinsames Eigenschaftsbild als durch ein bestimmtes Aufbauprinzip charakterisiert sind. Sie entstehen durch Additionsreaktionen von Isocyanaten mit anderen Kohlenstoffverbindungen. Isocyanate haben die Endgruppen $-N=C=O$, in denen N die Fähigkeit besitzt, Wasserstoffatome aus benachbarten Molekülen an sich anzulagern und durch die frei werdenden Valenzen einen Zusammenschluß zu Polymeren zu bewirken. Sind die Ausgangsstoffe bifunktionell, ergeben sich lineare Polyurethane.

Die hierfür meist verwendeten Ausgangskomponenten sind Dialkohole (Diole) und Diisocyanate [6]:



Deren Endgruppen bilden in weiteren Additionsreaktionen Polymerketten mit dem für Polyurethane charakteristischen Brückenglied:



Als Vorprodukte für vernetzte Polyurethane werden an den Verarbeiter Reaktionsharze (Isocyanatharze) und Reaktionsmittel geliefert, die die Vernetzung bewirken.

Durch die Vielzahl geeigneter Ausgangsprodukte und möglicher Vernetzungsreaktionen können somit hergestellt werden:

- Polyurethan-Formstoffe vom gummielastisch weichen bis zum harten Zustand
- Spezialkleber mit besonderer Haftfestigkeit auf Metall und Glas
- besonders wärmefeste Lacke
- Polyurethan Schaumstoffe

Den Polyurethan-Polymeren mit typischen gummielastischen Eigenschaften liegt ein gemeinsames Aufbauprinzip aus flexiblen Ketten-Segmenten (Weichsegmente) und stark

polaren, starren Urethan-Segmenten (Hartsegmente) zugrunde. Die flexiblen Kettenabschnitte bestehen im allgemeinen aus Polyestern, während die Hartsegmente aus aromatischen Diurethanen bestehen, die beispielsweise bei der Reaktion zwischen den Hydroxy-Endgruppen der Polyester- oder Polyether-Moleküle und aromatischen Diisocyanaten entstehen.

Bei Zugbeanspruchung können sich Hartsegmente gegenüber Nachbarsegmenten gleitend verschieben, wobei Wasserstoff-Brücken gelöst und anschließend energetisch oder entropisch günstiger neu gebildet werden [28].

3 Literaturübersicht

Bereits im Jahre 1931 untersuchte *Bertram* [11] die Kraftabgabe von Gummiringen. Dabei stellte er fest, daß diese je nach Größe und Stärke zwischen 60 g und 300 g bei einer Dehnung zwischen 20 und 40 mm variiert. Außerdem ergab seine Untersuchung einen Kraftabfall von mehr als 30% durch Mundöffnungsbewegungen innerhalb eines Tages. Infolgedessen empfahl er das tägliche Wechseln der Gummizüge.

Paulich [57] befaßte sich 1939 mit der Kraftabgabe verschiedener Elastiks im trockenen bzw. im Mundmilieu. In einer Messung über den Zeitraum von 24 Stunden konnte er einen Kraftverlust von 13 bzw. 23% nachweisen, wobei die Gummizüge während der Messung auf das zweifache ihrer Originalgröße gedehnt wurden. Er erkannte einen Unterschied von ca. 4% zwischen im Wasser und in Luft gedehnten Gummizügen in ihrer Kennlinie.

1977 befaßte sich *Bales* [5] mit der Kraftentfaltung der Gummizüge. Er beschreibt den von den führenden Herstellern der Gummizüge festgelegten Standardindex als ungenau. Dieser besagt, daß bei einer Dehnung auf das dreifache des auf der Packung angegebenen inneren Durchmessers die angegebene Kraftgröße entsteht. Er stellte fest, daß die angegebene Kraft schon bei der Dehnung auf doppelte Größe erreicht wird. Außerdem ergaben seine Messungen keinen Unterschied bezüglich der Kraftabgabe für Gummizüge, die in trockenem oder in feuchtem Milieu gedehnt wurden.

Die in der Literatur angegebenen Werte über den Kraftverlust gummielastischer Materialien bei isometrischer Dehnung in einem bestimmten Zeitraum (Relaxationsverhalten genannt) sind sehr unterschiedlich und zum Teil widersprüchlich.

Andreasen und *Bishara* [12] testeten 1971 die Eignung von Alastik-Ketten und Elastiks hinsichtlich des Lückenschlusses. Dabei stellten sie innerhalb der ersten 24 Stunden bei gleichbleibender Dehnung einen Kraftabfall von 54,7% für Alastik-Ketten sowie von 17,2% für Elastiks fest. Nach einem weiteren Kraftverlust innerhalb von wenigen Tagen blieb die Kraftabgabe jedoch über drei Wochen nahezu konstant. Bei Dehnung der Kraftmodule in der gleichen Größe und Stärke zeigten den Messungen zufolge Alastiks größere Abweichungen in der Kraftentwicklung als Elastiks.

Das Relaxationsverhalten wurde durch die Messungen von *Wong* [75] bestätigt, der Latex Elastiks, Ormco Power Chain und Unitek Alastik C in trockener Umgebung auf 17 mm dehnte und deren Rückstellkraft aufzeichnete. Er stellte einen Kraftverlust der Latex Elastiks von 17% und ca. 25-73% der Alastiks nach einem Tag fest.

1977 testeten *Messner* und Mitarbeiter [49] Latex Elastiks verschiedener Firmen. Sie stellten einen durchschnittlichen Kraftverlust von 9% nach 1 Stunde, 12% nach 2 Stunden und 22% nach 24 Stunden fest. Daraufhin unterwiesen sie ihre Patienten, die Gummizüge zwei- bis dreimal täglich zu wechseln.

Die o.a. Werte stehen in starkem Widerspruch zu der von *Bertl* und *Droschl* [10] 1985 durchgeführten Testreihe. Auch sie untersuchten die Unterschiede im Kraftabfall zwischen den synthetisch hergestellten Alastiks und den Gummizügen aus dem Naturprodukt Latex. Bei ihren Versuchen waren Alastiks mit einem Kraftabfall bei gleichbleibender Dehnung von nur etwa 20% in etwa 8 Stunden den Elastiks überlegen. Diese gaben in den ersten 8 Stunden bis zu 50% ihrer Rückstellkraft ab.

1981 untersuchten *Hofmann* und *Miethke* [39] das Relaxationsverhalten elastischer Ligaturen (Alastiks) und beschrieben einen Kraftverlust von 11% nach einer Stunde und ermittelten rechnerisch einen Kraftverlust von 22% nach vier Wochen. Sie konnten zeigen, daß vorgedehnte Ligaturen einen geringeren Kraftabfall aufweisen als nicht vorgedehnte.

1987 führte *Miethke* [50] eine weitere Studie an synthetisch hergestellten elastischen Zügen durch. Er stellte eine grundsätzliche Abhängigkeit des Kraftabfalls von der Anfangskraft und von der Temperatur fest. Der Kraftabfall elastischer Züge bei 37° C im Wasserbad betrug nach 24 Stunden ca. 63%, nach 72 Stunden ca. 66%.

Diese in der Literatur sehr unterschiedlichen Werte über die Kraftabgabe sowohl der Elastiks, als auch der Alastiks erwecken den Verdacht, daß sich die Produkte im Laufe der Zeit verändern, so daß es notwendig erscheint, aktuelle Aussagen zu erstellen.

1986 beschrieb *Miura* [52] die superelastische Nickel-Titan-Legierung Sentalloy aus der Gruppe der Formgedächtnislegierungen, die von Furukawa Electric Co. (Japan) entwickelt wurde. *Miura* und Mitarbeiter [53] stellten 1988 Sentalloy Zug- und Druckfedern her und untersuchten ihre kieferorthopädische Anwendbarkeit im Vergleich zu herkömmlichen Stahzugfedern. Sie stellten fest, daß es mit diesen Federn möglich ist, konstante Kräfte auf das dentoalveoläre System zu übertragen. Nach einer Verformung zeigten diese Federn eine nahezu gleichbleibende Rückstellkraft und unterlagen nicht wie die Stahzugfedern dem Hookeschen Gesetz. Dadurch kommt es zu keinen Kraftspitzen. Ursache für das pseudoelastische Verhalten der Legierung ist die spannungsinduzierte martensitische Transformation [56, 65, 69].

1991 untersuchte *Gross* [37] Zug- und Druckfedern von GAC Int. Inc. (New York) im Zugversuch. Er stellte die für superelastische Kraftelemente typische konstante Kraftabgabe über einen weiten Bereich der Dehnung fest. Weiterhin konnte er zeigen, daß die Federn sowohl nach Sterilisation als auch nach vierwöchiger Aktivierungszeit keine signifikante Abweichung in der Kraftabgabe erkennen lassen und sich somit zur Wiederverwendbarkeit eignen.

R. Reichle [59] zeichnete 1993 Kennlinien der verschiedenen von GAC angebotenen Zug- und Druckfedern auf. Er zeigte, daß Höhe und Länge des Bereichs konstanter Kraftabgabe auf den Entlastungskennlinien der Federn vom Grad der vorangegangenen Aktivierung und der Umgebungstemperatur abhängt.

C. Manhartberger [46] beschrieb 1993 Abweichungen in der Kraftabgabe der Sentalloy Druck- und Zugfedern sowie der Nickel-Titan-Drahtbögen nach einer vierwöchigen Aktivierungsphase. Er revidierte die von den Herstellern angegebene Aktivierungsbreite der einzelnen Federn.

Eine bislang noch wenig untersuchte Materialeigenschaft orthodontischer Ni-Ti-Materialien ist ihre Dauerfestigkeit gegenüber den in der Mundhöhle auftretenden Kräften.

Beim klinischen Einsatz der Ni-Ti-Drahtfabrikate treten gelegentlich spontane Brüche auf, deren Ursache vermutlich auf Materialermüdung zurückzuführen ist. Häufig sind diese Brüche im Bereich von Extraktionslücken oder in Approximalräumen zweier einligierter Zähne

zu finden. Der Bruch ist wegen des nötigen Bogenwechsels, des Verlusts an Behandlungszeit und der Verletzungsgefahr des Patienten eine unangenehme Komplikation. Bei der Verwendung pseudoelastischer Federn kommt es zu den gleichen Problemen. Schon nach kurzer Tragedauer ist bei einigen Patienten trotz sachgerechter Eingliederung ein Bruch der Federn aufgetreten.

Eine Arbeit zur Untersuchung der Dauerfestigkeit wurde von *Drescher, Bourauel, Sonneborn* und *Schmuth* [30] 1994 vorgestellt. Die Autoren stellten eine Meßanordnung zusammen, in der die Dauerfestigkeit der handelsüblichen Ni-Ti-Drähte der Querschnitte 0.016 (rund) und 0.016 x 0.022 (rechteckig) geprüft wurde. Zum Vergleich wurden Stahl- und Titan-Molybdän-Drähte in die Untersuchung einbezogen. Dabei zeigten die Ni-Ti-Drähte eine 2- bis 5fach höhere Auslenkung ohne daß es zu irreversiblen Verformungen kam und nur $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{4}$ der Biegekräfte von Stahl. Die Ni-Ti-Runddrähte brachen im Dauerprüfverfahren nach 10^5 Belastungszyklen bei Kräften zwischen 1,2 und 3,1 N, Stahl und Titan-Molybdän erst bei 4,4 bzw. 3,7 N. Bei den rechteckigen Drähten lagen die Werte etwa doppelt so hoch.

Die NiTi-Drähte wurden aufgrund der Ergebnisse in zwei Gruppen eingeteilt, die im wesentlichen der Einteilung von *Miura* 1986 [52] und *Drescher* 1990 [31] entspricht.

Bei der ersten Gruppe, den pseudoelastischen Drähten, bewirkte die Wechselbelastung der Legierung eine Änderung der pseudoelastischen Hystereseschleife und eine Aufhärtung der Drahtproben um bis zu 70%. Dabei wurde die von der Hystereseschleife eingeschlossene Fläche kleiner, die Steigungen in den pseudoelastischen Plateaus größer und die bei maximaler Deformation gemessene Kraft erhöhte sich. In der zweiten Gruppe der aufgehärteten martensitischen Drahtfabrikate wurden diese Effekte nicht nachgewiesen.

Abb. 17 zeigt die REM-Aufnahme der Bruchfläche der Probe „Titanol Superelastic“. *Drescher* wies auf die rauh erscheinende Bruchfläche im Vergleich zur Außenfläche hin. Er stellte fest, daß der Bruch wahrscheinlich relativ rasch eingetreten ist, da keine glatten Anteile der Bruchfläche, wie sie bei Dauerbrüchen typisch sind, nachweisbar waren.

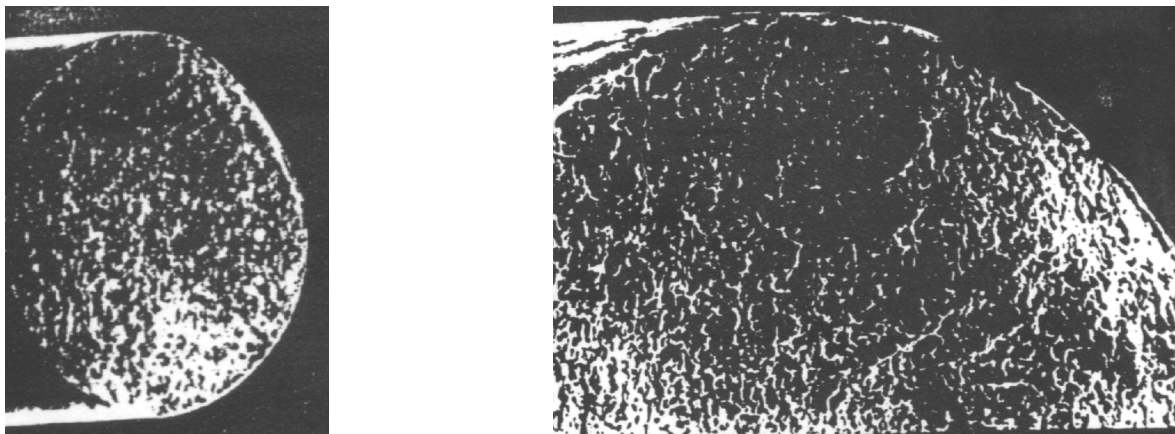


Abb. 17: REM-Bilder einer Bruchfläche (Drahtfabrikat: Titanol Superelastic)

P. Tauzenberger [67] beschreibt die Veränderung pseudoelastischer Legierungen unter zyklischen Belastungen. Er stellte die Abhängigkeit dieser Veränderung von der mechanischen und thermischen Werkstoffbehandlung, von der Größe der Dehnung sowie von der Höhe des Spannungsausschlags bzw. der Temperatur dar. Danach führt eine größere Dehnung bzw. eine höhere Temperatur zu einer stärkeren Veränderung des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes. Weiterhin stellte *Tauzenberger* fest, daß die Kurvenform nach zyklischer Beanspruchung durch eine Abnahme der Spannung zur Martensitinduzierung sowie durch eine Verminderung der Hysterese gekennzeichnet ist. Darüber hinaus beobachtete er eine bleibende Formänderung und wies auf eine Stabilisierung der Kurvenform nach etwa 50 bis 100 Verformungszyklen hin.

4 Material und Methode

4.1 Untersuchungsmaterial

4.1.1 Gummizüge

Bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Gummizügen handelt es sich um Gummiringe von Ormco Corporation (Glendora / Kalifornien). Aufgrund der großen Vielfalt der angebotenen Gummizüge beschränkt sich die Untersuchung auf drei häufig gebrauchte Größen, 5/16, 1/4 und 3/16 inch in je drei verschiedenen Stärken, die in der Gewichtseinheit Unze (oz) angegeben werden. Die verschiedenen Gummizüge sind in Abb. 18 dargestellt. Die auf jeder Packung angegebene Bezeichnung inch bezieht sich auf den inneren Durchmesser des Gummiringes; die Bezeichnung oz gibt die Kraftentwicklung des Gummiringes bei der Dehnung auf ein 3faches des inneren Durchmessers an (vgl. Seite 18 [5]).

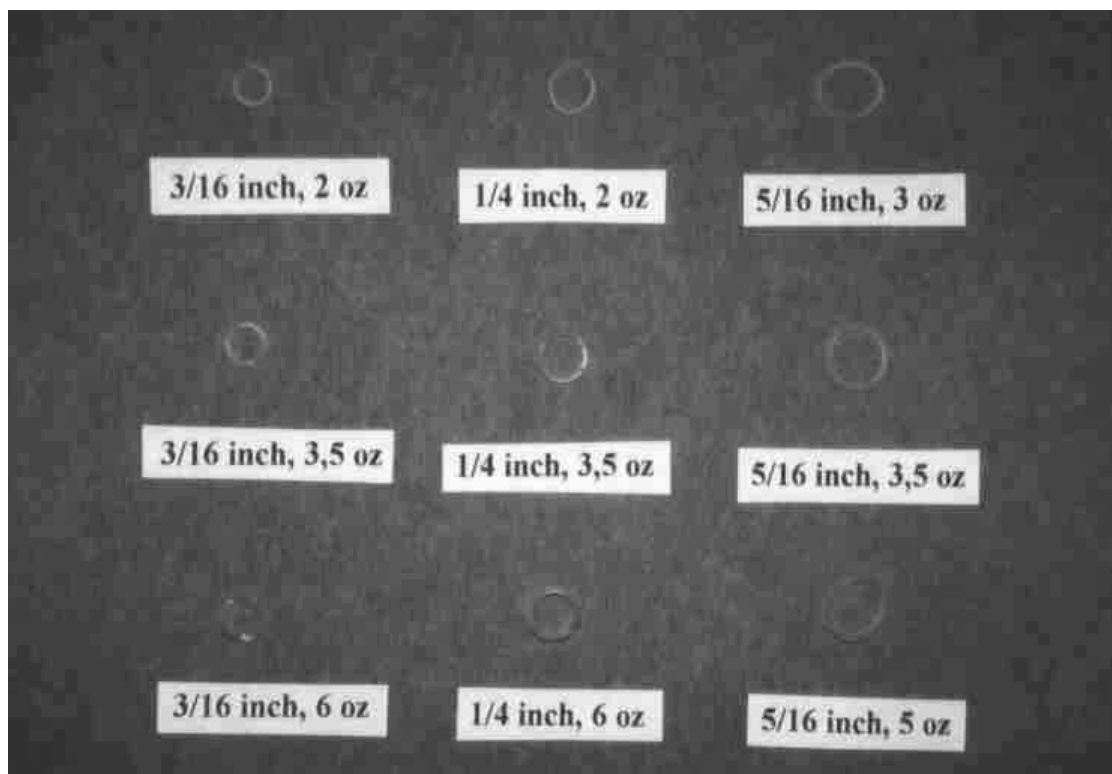


Abb. 18: Intermaxilläre Gummizüge in den verschiedenen Größen und Stärken

In der vorliegenden Untersuchung werden die Gummizüge in ihrer originalen Bezeichnung in Inches und Unzen benannt, die Graphen und Versuchsauswertungen in den vertrauteren Einheiten Millimeter und Newton angegeben.

Umrechnung in SI Einheiten:

$$1 \text{ inch} = 25,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ ounce (oz)} = 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Kraft = Masse • Beschleunigung

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ oz} = 28,4 \text{ g} \hat{=} 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 0,278604 \text{ Newton}$$

Tab. 2 stellt die Umrechnung für die untersuchten Gummizüge von der Gewichtseinheit oz in die Krafteinheit Newton dar.

Größe	Stärke		
	light	medium	heavy
3/16 inch = 4,76 mm	2 oz = 56,8 g $\hat{=}$ 0,56 N	3,5 oz = 99,4 g $\hat{=}$ 0,98 N	6 oz = 170,4 g $\hat{=}$ 1,67 N
1/4 inch = 6,35 mm	2 oz = 56,8 g $\hat{=}$ 0,56 N	3,5 oz = 99,4 g $\hat{=}$ 0,98 N	6 oz = 170,4 g $\hat{=}$ 1,67 N
5/16 inch = 7,94 mm	3 oz = 85,2 g $\hat{=}$ 0,84 N	3,5 oz = 99,4 g $\hat{=}$ 0,98 N	5 oz = 142 g $\hat{=}$ 1,39 N

Tab. 2: Darstellung der Kraftwerte der Gummizüge in Newton

4.1.2 Pseudoelastische Federn

Die intermaxillären Zugfedern aus der Nickel-Titan-Legierung Sentalloy (55 Gew.-% Nickel, 45 Gew.-% Titan) werden von GAC Int. Inc. (New York) in den Längen 18 mm, 23 mm und 28 mm angeboten. Es handelt sich um schraubenförmig gewundene Zylinderfedern, die an den Seiten mit konfektionierten Ösen versehen sind, so daß nach DIN 2097 seitlich hochgestellte Ösen entstehen. Damit sich während Öffnungs- und Schließbewegungen des Patienten die Schleimhaut nicht in die Federwindungen einklemmen kann, sind die Federn außerdem mit einem Silikonschlauch überzogen.

Abb. 19 zeigt die intermaxillären Zugfedern in allen drei Größen. Die technischen Daten der Federn sind in Tab. 3 dargestellt.

Ösenabstand der Feder	18 mm	23 mm	28 mm
Gesamtlänge der Feder mit Ösen	20 mm	25 mm	30 mm
Windungszahl	36	56	78
Länge über die wirksamen Windungen	8,4 mm	13,3 mm	18,3 mm
Federdurchmesser	1,4 mm	1,4 mm	1,4 mm
Drahtdurchmesser	0,45 mm	0,45 mm	0,45 mm

Tab. 3: Technische Daten der intermaxillären Nickel-Titan-Zugfedern

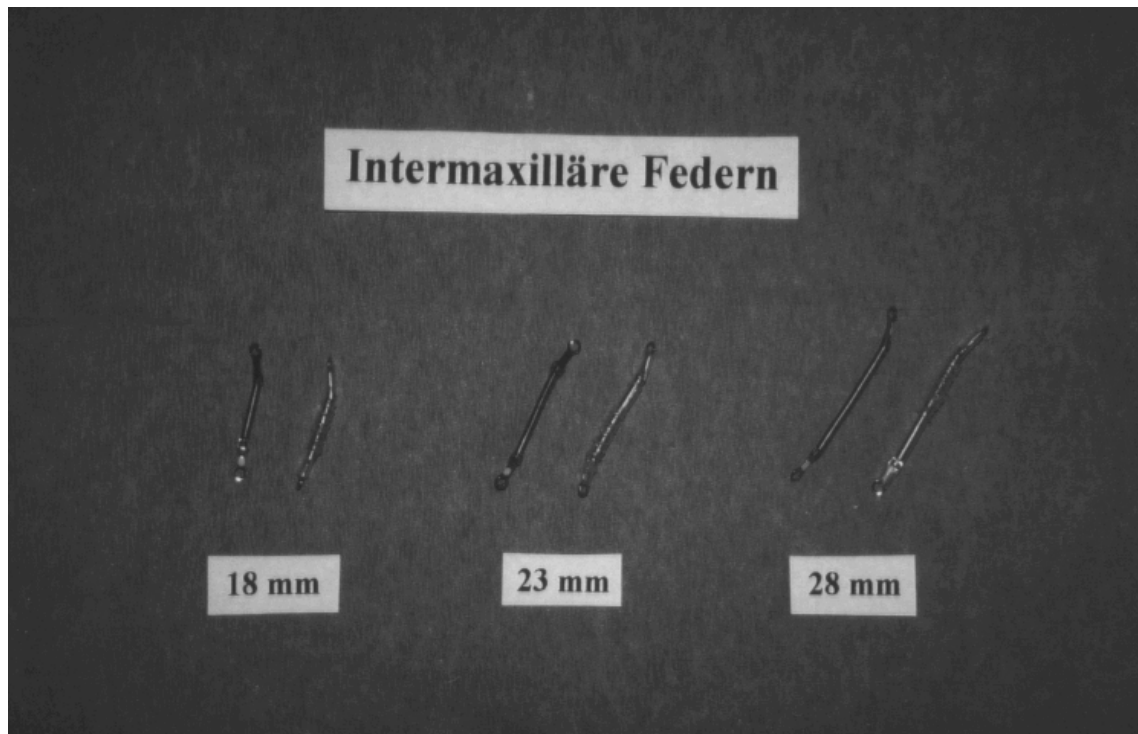


Abb. 19: Intermaxilläre Zugfedern in den Größen 18 mm, 23 mm, 28 mm

4.2 Untersuchungsmethoden

4.2.1 Experimente mit Gummizügen

4.2.1.1 Aufnahme der Kennlinien

Zur Erstellung der Kraft-Weg-Diagramme der Gummizüge wurde die Zugprüfmaschine Zwick 1421 benutzt, in der die Gummizüge kontinuierlich gedehnt und entlastet werden konnten.

Die Kraftänderung wurde mit der Wägezelle Typ U 2A von Hottinger Baldwin in eine Spannungsänderung im mV-Bereich umgewandelt. Über den Verstärker, Typ KWS 3072 Hottinger Baldwin, konnte die Meßeinheit mit genormten Gewichten auf 100 mV/N \pm 0,2 mV geeicht werden. Zur Aufzeichnung der Meßdaten wurde das Multimeter Voltcraft 3850 von Conrad Electronics benutzt. In Verbindung zu einem Computer und der dazugehörigen Software konnten die Meßwerte digital gespeichert und weiterverarbeitet werden.

Abb. 20 zeigt den Aufbau der Meßanordnung.

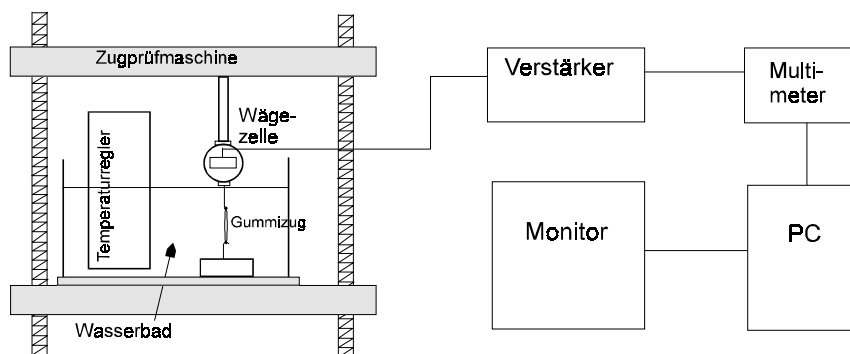
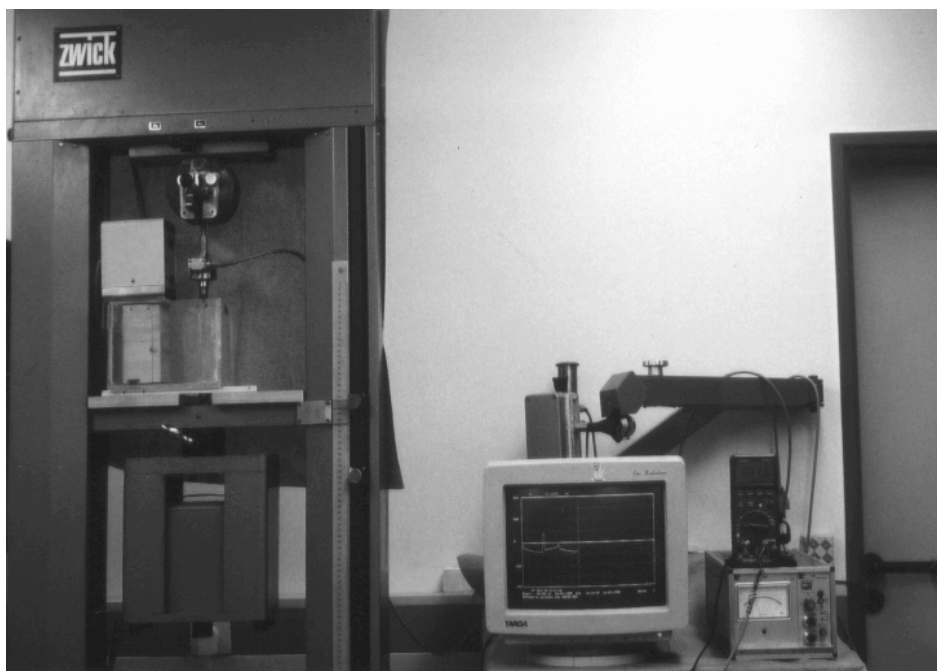


Abb. 20: Meßanordnung zur Ermittlung der Kennlinien der Gummizüge

In dieser Meßanordnung wurde zunächst von allen untersuchten Gummizügen die Kennlinie aufgezeichnet, um das Kraft-Weg-Verhalten der Gummizüge darzustellen. Außerdem sollten die Kennlinien gespeichert werden, damit diese mit den Kennlinien derselben Gummizüge, die nach dem Wechsellastversuch und dem Alterungsversuch aufgenommen wurden, verglichen werden konnten.

In den Größen 3/16 inch, 1/4 inch und 5/16 inch wurden in allen drei untersuchten Stärken die Kennlinien von je 10 Gummizügen aufgezeichnet (insgesamt 90).

Die Gummizüge wurden so in die Meßvorrichtung eingehängt, daß sie gerade noch nicht vorgedehnt wurden. Zur Simulation des Mundmilieus fanden die Messungen im Wasserbad bei 37° C statt. Die Gummizüge wurden in der Zugprüfmaschine über eine Strecke von 40 mm mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 24 mm/min. gedehnt und entlastet.

Die gespeicherten Meßwerte wurden mit dem Programm Excel 5.0 umgerechnet und in Kraft-Weg-Diagrammen dargestellt.

Dabei ergab sich die Kraft durch die Eichung $1 \text{ mV} = 0,01 \text{ N}$ und die Längenänderung ΔL_0 von der Ausgangslänge L_0 über die zeitliche Komponente der Messung in Sekunden der Aufzeichnung $\bullet 0,4 = \text{Längenänderung in mm}$.

4.2.1.2 Wechsellastversuch

Zur Simulation der dynamischen Belastungen im Mund wurde ein Versuchsaufbau erstellt, der es ermöglichte, Gummizüge mit einer großen Schwingspielzahl zu dehnen und zu entlasten. Dazu wurde mit Hilfe eines 12-V-Schrittmotors, an dessen Drehachse ein Exzenter befestigt war, ein Hebelarm auf und ab bewegt. Diese Bewegung ist mathematisch durch die Form $y = \frac{1}{2} l + \sin(\omega t \bullet \frac{1}{2} l)$ beschreibbar. Die Amplitude l der Bewegung konnte über den Hebelarm eingestellt werden. Abb. 21 zeigt den Versuchsaufbau zum Wechsellastversuch.

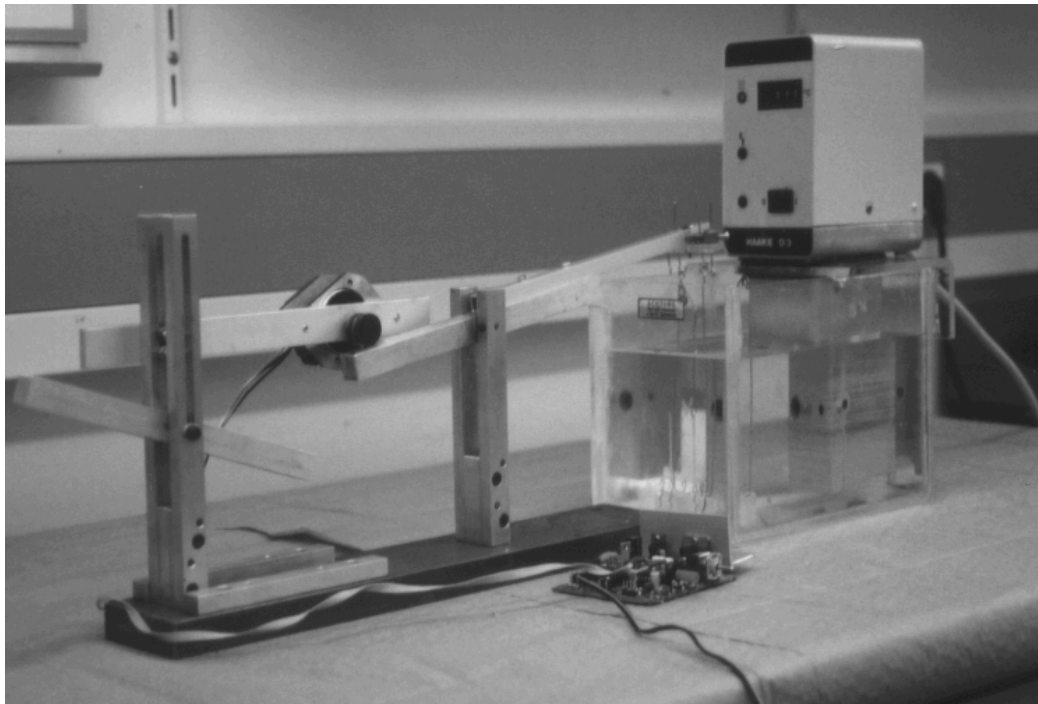


Abb. 21: Versuchsaufbau zum Wechsellastversuch der Gummizüge

Die Gummizüge wurden in einem Wasserbad bei 37° C in kleine Häkchen eingesetzt und durch eine Haltevorrichtung mit dem Hebelarm verbunden. Diese ermöglichte es vier Gummizüge gleichzeitig zu dehnen und zu entlasten. Für jeden der Gummizüge konnte eine definierte Vordehnung eingestellt werden.

Intermaxilläre Gummizüge zur Behandlung von Patienten mit Vor- oder Rücklage des Unterkiefers lassen sich zwischen Häkchen oder Knöpfchen der Brackets sowie an eingebogenen Schlaufen im Bogen, am Bogenende oder an aufschraubbaren Häkchen einhängen. Dabei werden sie zur Behandlung einer Klasse II-Anomalie vestibulär diagonal von regio 12 zu regio 46 bzw. von regio 22 zu regio 36 eingehängt und zur Behandlung einer Klasse III-Anomalie von regio 42 zu regio 16 bzw. von regio 32 zu regio 26.

Der Abstand dieser Punkte wurde an einigen Modellen gemessen und betrug im Mittel 22 mm. Dies entspricht einer Vordehnung der Gummizüge im Mund. Darüber hinaus werden die Gummizüge bei Mundöffnungsbewegungen auf ca. 40 mm gedehnt.

Die Gummizüge wurden mit 22 mm Vordehnung in den Versuchsaufbau eingespannt und danach sinusförmig mit einer Amplitude von 18 mm belastet. Die Prüffrequenz betrug 1,42 Hz.

Von jeder Größe und Stärke der Gummizüge wurden jeweils zwei getestet. Die Kennlinien der Gummizüge wurden nach 10.000, 20.000 und 30.000 Lastwechseln aufgezeichnet und danach mit der Ausgangskennlinie verglichen.

4.2.1.3 Versuch zum Kraftabfall bei isometrischer Dehnung

Mit dieser Meßanordnung wurde die Größenordnung des Kraftabfalls der Gummizüge bei isometrischer Dehnung bestimmt, um diese mit den in der Literatur angegebenen Werten vergleichen zu können.

In die Meßanordnung zur Erstellung der Kraft-Dehnungs-Diagramme (Abb. 20) wurden jeweils 4 Gummizüge einer Größe und Stärke im Wasserbad bei 37° C eingehängt. Diese wurden um 22 mm gedehnt. Für die Dauer von 24 Stunden wurde die Rückstellkraft alle 2,5 Minuten mit dem Multimeter Voltcraft 3850 von Conrad Electronics aufgezeichnet.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurden die erhaltenen Meßwerte durch 4 geteilt und so der Mittelwert des Kraftabfalls aus 4 Gummizügen bestimmt.

4.2.1.4 Alterungsversuch

In diesem Versuch wurde der Einfluß thermischer Alterung auf die Gummizüge untersucht, um den Einfluß von Temperaturschwankungen, die in der Mundhöhle vorkommen können, zu simulieren. Zu diesem Zweck wurde eine Wechselbadanlage benutzt, die aus zwei getrennten Wasserbecken mit Temperaturen von 5 °C bzw. 55 °C bestand. Die Gummizüge wurden mit Hilfe eines automatisch gesteuerten Schwenkarms, an welchem ein Drahtkorb befestigt war, abwechselnd in beide Becken getaucht. Dabei wurden die Gummizüge insgesamt 2000 Temperaturwechseln unterzogen. Nach 500, 1.000, 1.500 und 2.000 Temperaturwechseln wurde jeweils die Kennlinie der Gummizüge erneut aufgenommen und mit der Ausgangskennlinie verglichen.

Die Anlage lief mit einer Frequenz von ca. 0,033 Hz. Die 2000 Temperaturwechsel wurden in ca. 8 h und 20 min erreicht.

4.2.1.5 Temperaturvergleich

Um die Auswirkung verschiedener Umgebungstemperaturen auf die Kraft-Dehnungs-Kurve intermaxillärer Gummizüge darzustellen, wurden die Kennlinien von Gummizügen der Größe 5/16 inch in der Stärke 3,5 oz und der Größe 1/4 inch in der Stärke 3,5 oz bei einer Temperatur von 20° C und 40° C aufgenommen. Dazu wurde das Wasserbad, in dem die Dehnung durchgeführt wurde, mittels eines Thermostates auf die entsprechende Temperatur eingestellt.

4.2.1.6 Aufnahme der Kennlinie mit verdrehten Gummizügen

In dieser Versuchsanordnung sollte ermittelt werden, ob ein Verdrillen der Gummizüge einen Einfluß auf ihre Kraftentwicklung bei Dehnung zeigt. Zu diesem Zweck wurde von jeder Größe und Stärke jeweils ein Gummizug einmal um seine Längsachse verdreht in den Versuchsaufbau wie unter Punkt 4.2.1.1 eingehängt und die Kennlinie aufgezeichnet. Danach wurde der Vorgang mit den gleichen Gummizügen im zweifach verdrehten Zustand wiederholt und die Kennlinien mit der entsprechenden Ausgangskennlinie der Gummizüge verglichen.

4.2.2 Experimente mit pseudoelastischen Federn

4.2.2.1 Aufnahme der Kennlinien

Entsprechend der unter Punkt 4.2.1.1 beschriebenen Versuchsanordnung wurden die Kennlinien von jeweils 20 Federn in allen drei Längen aufgezeichnet. Die Federn wurden dabei um das Doppelte ihrer Ausgangslänge gedehnt.

4.2.2.2 Wechsellastversuch

Zur Feststellung der Bruchfestigkeit der superelastischen Federn wurden in dem unter Punkt 4.2.1.2 beschriebenen Versuchsaufbau Federn gedehnt und entlastet. Der Hersteller der Federn empfiehlt, die Federn so auszuwählen, daß sie bei maximaler Mundöffnung gerade auf die doppelte Länge gedehnt werden.

Die Versuchsvorrichtung wurde nun so eingestellt, daß die kurzen Federn mit einer Amplitude von 18 mm, die mittleren mit 23 mm und die langen Federn mit einer Amplitude von 28 mm belastet wurden. Auch diese Versuche wurden alle bei 37° C im Wasserbad durchgeführt. Es konnten jeweils zwei Federn im Wechsellastversuch getestet werden.

Die Federn wurden insgesamt mit einer Schwingenzahl von 360000 belastet. Da anzunehmen war, daß während des Versuchs einige der Federn brechen würden, wurde eine elektrische Uhr am Versuchsaufbau angebracht, um den Zeitpunkt des Federbruches zu bestimmen. Dazu wurde der Stromkreis für die Uhr über die zu prüfende Feder geschlossen. Bei einem Bruch der Feder blieb die Uhr stehen. Die Dauerlastversuche wurden mit jeweils 10 Federn der drei verschiedenen Größen durchgeführt. Nach jeweils 120000, 240000, 360000 und 480000 Dehnzyklen wurden die Kennlinien der Federn erneut aufgezeichnet.

4.2.2.3 Temperaturvergleich

Um den Einfluß der Temperatur auf die Kennlinie der pseudoelastischen Federn darstellen zu können, wurde das Kraft-Dehnungs-Diagramm von pseudoelastischen intermaxillären Zugfedern bei 20° C, 30° C und 40° C aufgenommen.

5 Ergebnisse

5.1 Gummizüge

5.1.1 Kennlinien der Gummizüge in den verschiedenen Größen und Stärken

5.1.1.1 Kennlinien der Gummizüge in der Größe 3/16 inch

In Abb. 22 ist die Kennlinie des Gummizugs der Größe 3/16 inch, in der Stärke 6 oz dargestellt. Das Kraft-Weg-Diagramm des Gummizugs ist gekennzeichnet durch einen initial proportionalen Anstieg der Kraft. Die Steigung der Kennlinie nimmt jedoch mit zunehmender Belastung ab.

Dieses visko-elastische Verhalten führt zu einer Hystereseform der Kennlinie, wobei der irreversible Energieverlust durch die Fläche zwischen Belastungs- und Entlastungskurve dargestellt wird. Wegen des plastischen Fließens bei Belastung geht die Verformung bei Entlastung theoretisch nicht vollständig auf den Ursprungswert zurück. Bei den hier untersuchten Gummizügen war diese Abweichung so gering, daß sie sich nicht nachweisen ließ.

Die angegebene Kraft von 6 oz (etwa 1,67 N) wurde nach einer Längenänderung von ca. 13 mm erreicht. Das entspricht ungefähr dem 2,7fachen des inneren Durchmessers.

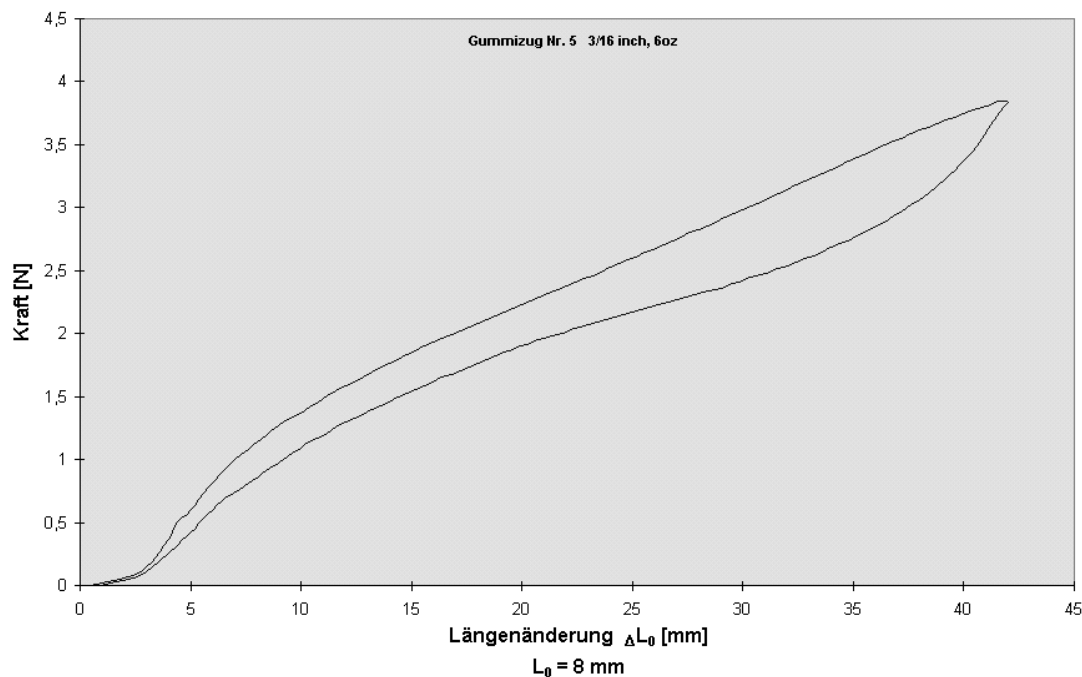


Abb. 22: Kennlinie eines Gummizugs der Größe 3/16 inch, in der Stärke 6 oz

Die Dehnversuche haben gezeigt, daß herstellungsbedingt die Stärken der Gummizüge nicht exakt einzuhalten sind. Aus diesem Grund wurden von den 10 untersuchten Gummizügen einer Größe und Stärke Maximum, Minimum und Mittelwert der gefundenen Kraftwerte graphisch dargestellt. Die genauen Kraftwerte bei einer Längenänderung um 10 mm, 20 mm, 30 mm und 40 mm werden tabellarisch zusammen mit der Standardabweichung aufgeführt. In Abb. 23 ist der Mittelwert, Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 3/16 inch der Stärke 6 oz dargestellt.

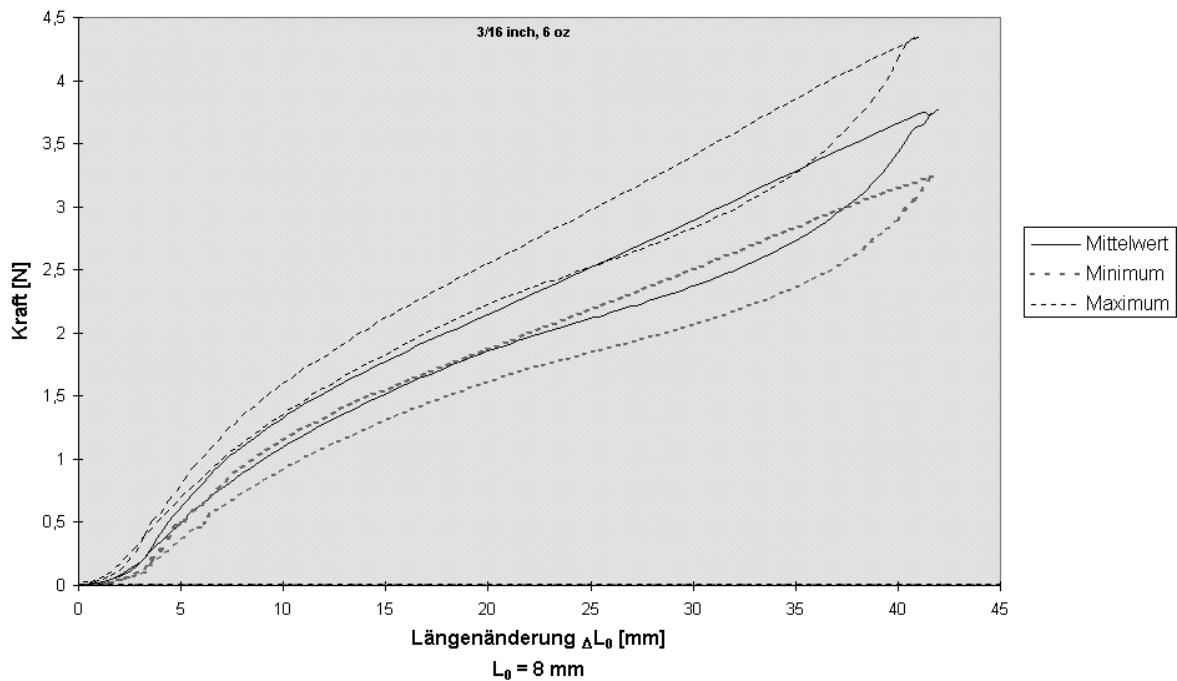


Abb. 23: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 6 oz

Tab. 4 zeigt die genauen Kraftwerte bei einer Längenänderung der Gummizüge um 10 mm, 20 mm, 30 mm und 40 mm. Die Streubreite der Kraftwerte lag bei einer Längenänderung um 30 mm bei etwa 0,9 N.

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	1,33	1,15	1,60	0,12
20	2,15	1,86	2,55	0,19
30	2,89	2,50	3,40	0,25
40	3,66	3,15	4,27	0,31
Entlastung				
40	3,44	2,90	4,18	0,33
30	2,37	2,07	2,83	0,21
20	1,86	1,62	2,22	0,17
10	1,10	0,92	1,36	0,11

Tab. 4: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 6 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 24 zeigt den Mittelwert, Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 3/16 inch der Stärke 3,5 oz.

Die auf der Packung angegebene Kraft von 3,5 oz (ca. 0,98 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 10,5 mm erreicht. Dies entspricht etwa dem 2,2fachen des inneren Durchmessers.

Aus Tab. 5 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Unterschiede in der Kraftentwicklung gleicher Gummizüge waren sehr viel geringer als bei den Gummizügen der Stärke 6 oz und lagen bei einer Längenänderung von 30 mm bei 0,27 N.

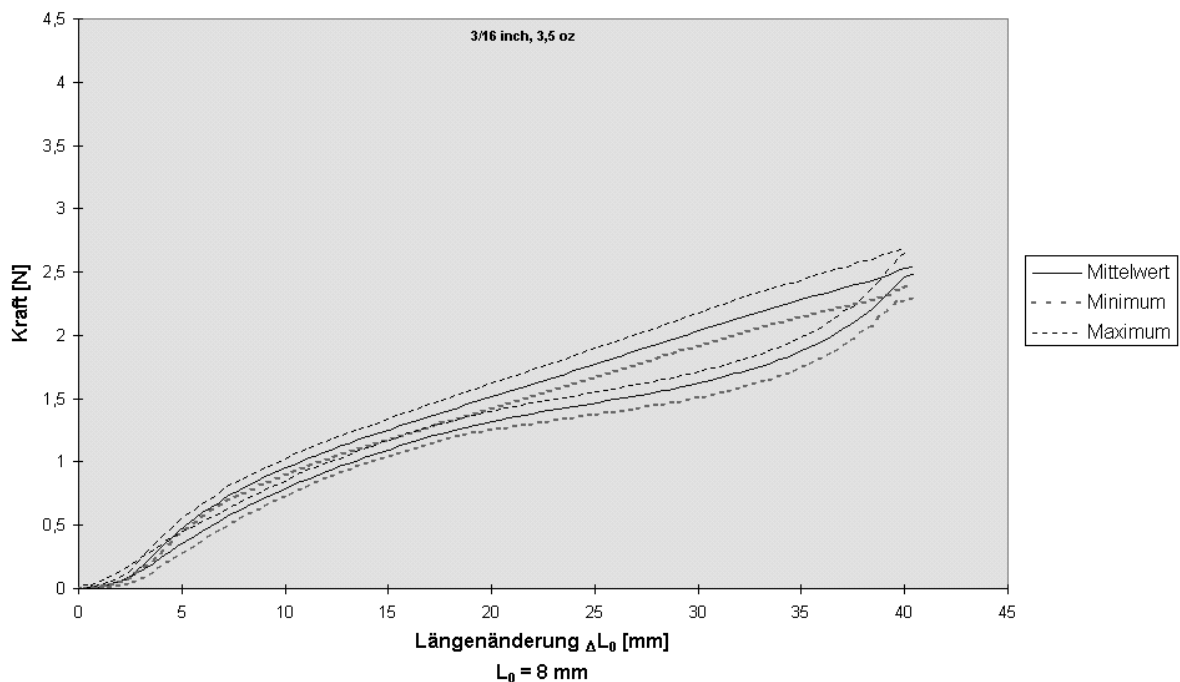


Abb. 24: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 3,5 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	0,95	0,89	1,03	0,04
20	1,51	1,42	1,62	0,06
30	2,03	1,91	2,18	0,08
40	2,53	2,37	2,69	0,09
Entlastung				
40	2,02	1,90	2,15	0,08
30	1,52	1,41	1,60	0,05
20	1,19	1,13	1,27	0,04
10	0,53	0,46	0,59	0,05

Tab. 5: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 3,5 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 25 zeigt den Mittelwert, Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 3/16 inch der Stärke 2 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 2 oz (ca. 0,56 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 11,2 mm erreicht. Dies ist das 2,3fache des inneren Durchmessers. Aus Tab. 6 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,46 N.

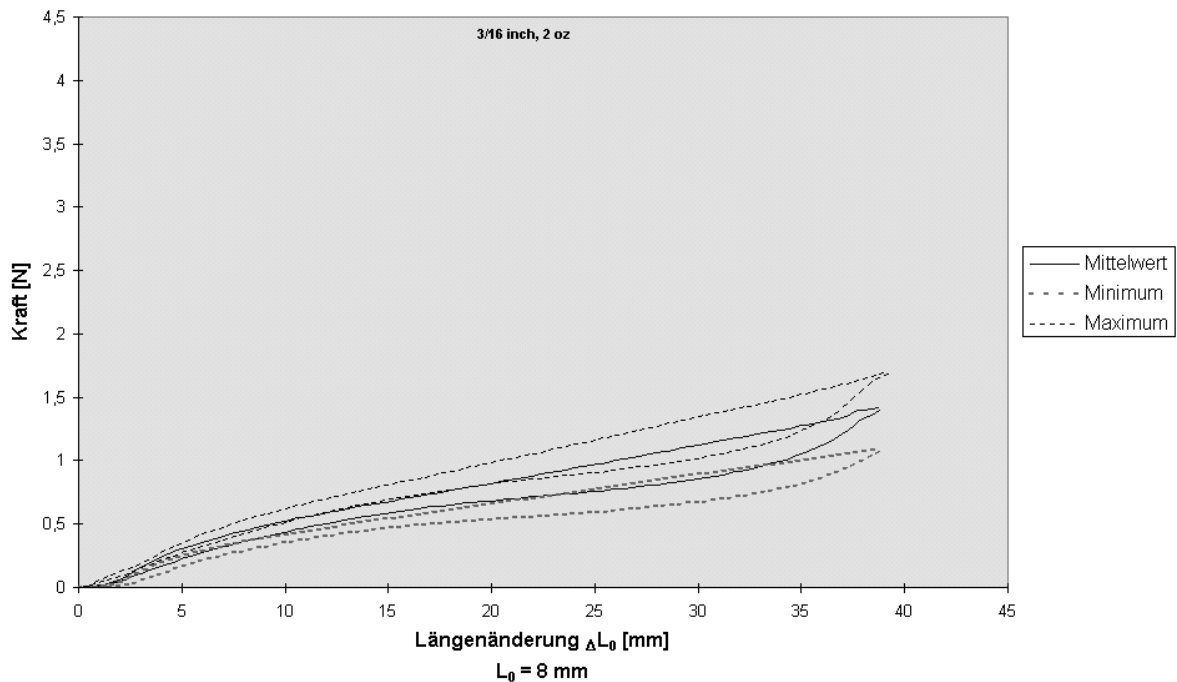


Abb. 25: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 2 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	0,52	0,42	0,62	0,07
20	0,82	0,66	0,99	0,12
30	1,12	0,89	1,35	0,16
38	1,40	1,07	1,64	0,20
Entlastung				
38	1,33	1,00	1,56	0,19
30	0,75	0,58	0,90	0,12
20	0,57	0,46	0,67	0,08
10	0,19	0,13	0,24	0,03

Tab. 6: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 2 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

5.1.1.2 Kennlinien der Gummizüge in der Stärke 1/4 inch

Abb. 26 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 1/4 inch der Stärke 6 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 6 oz (ca. 1,67 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 14,8 mm erreicht. Dies ist ca. das 2,3fache des inneren Durchmessers. Aus Tab. 7 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag mit ungefähr 1 N sehr hoch.

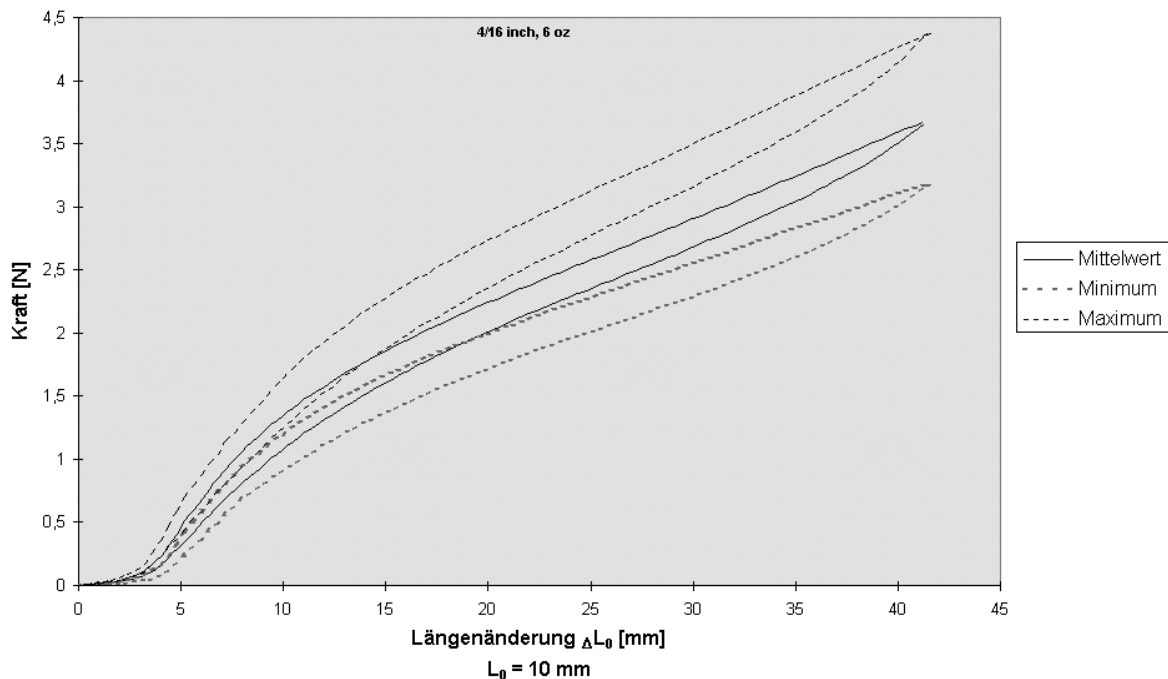


Abb. 26: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 6 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	1,35	1,20	1,65	0,15
20	2,24	1,99	2,74	0,23
30	2,91	2,55	3,50	0,28
40	3,59	3,10	4,26	0,33
Entlastung				
40	3,50	3,00	4,15	0,32
30	2,68	2,29	3,16	0,24
20	2,01	1,72	2,35	0,18
10	1,08	0,91	1,25	0,10

Tab. 7: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 6 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 27 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 1/4 inch der Stärke 3,5 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 3,5 oz (ca. 0,98 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 13 mm erreicht. Dies ist etwa das Doppelte des inneren Durchmessers. Aus Tab. 8 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,28 N.

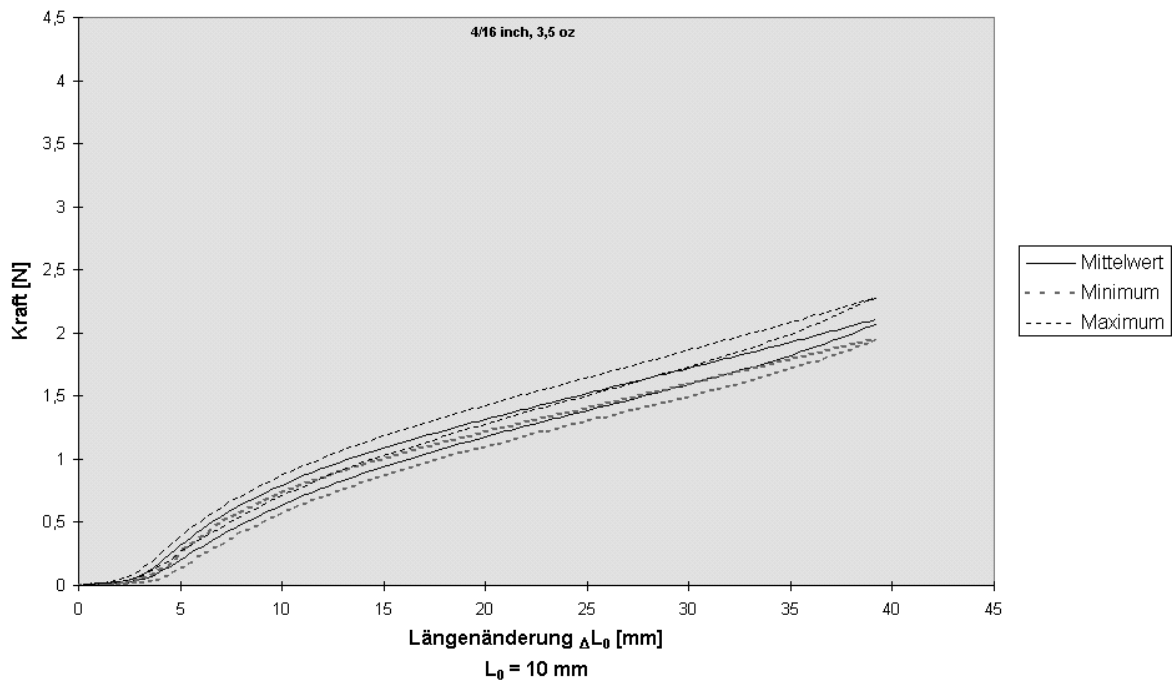


Abb. 27: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 3,5 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	0,80	0,73	0,88	0,05
20	1,32	1,22	1,42	0,06
30	1,72	1,59	1,87	0,08
38	2,06	1,91	2,23	0,10
Entlastung				
38	1,99	1,87	2,20	0,10
30	1,56	1,47	1,70	0,07
20	1,14	1,07	1,24	0,05
10	0,58	0,51	0,65	0,04

Tab. 8: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 3,5 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 28 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 1/4 inch der Stärke 2 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 3,5 oz (ca. 0,98 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 17,2 mm erreicht. Dies ist etwa das 2,7fache des inneren Durchmessers. Aus Tab. 9 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,22 N.

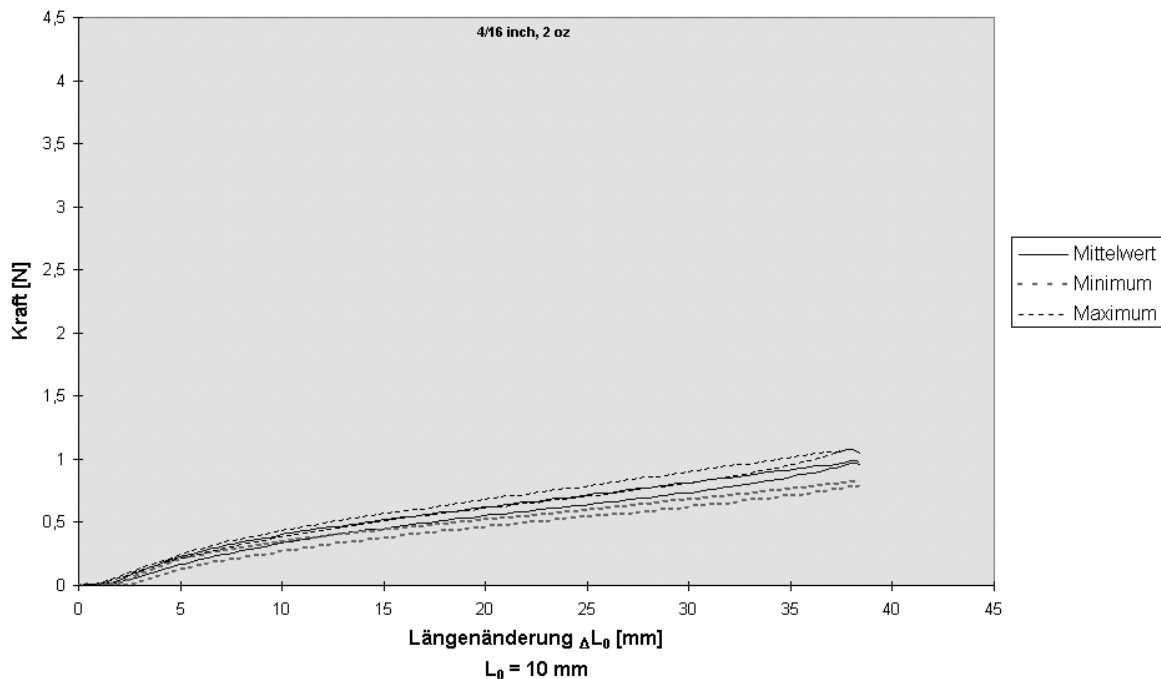


Abb. 28: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 2 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	0,40	0,34	0,44	0,03
20	0,62	0,52	0,68	0,05
30	0,82	0,68	0,90	0,06
36	0,94	0,78	1,04	0,07
Entlastung				
36	0,89	0,73	0,99	0,07
30	0,69	0,58	0,76	0,05
20	0,51	0,43	0,57	0,04
10	0,26	0,21	0,31	0,03

Tab. 9: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 4/16 inch in der Stärke 2 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

5.1.1.3 Kennlinien der Gummizüge in der Stärke 5/16 inch

Abb. 29 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 5/16 inch der Stärke 5 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 5 oz (ca. 1,39 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 15,6 mm erreicht. Dies entspricht ungefähr dem Doppelten des inneren Durchmessers von 7,94 mm. Aus Tab. 10 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,32 N.

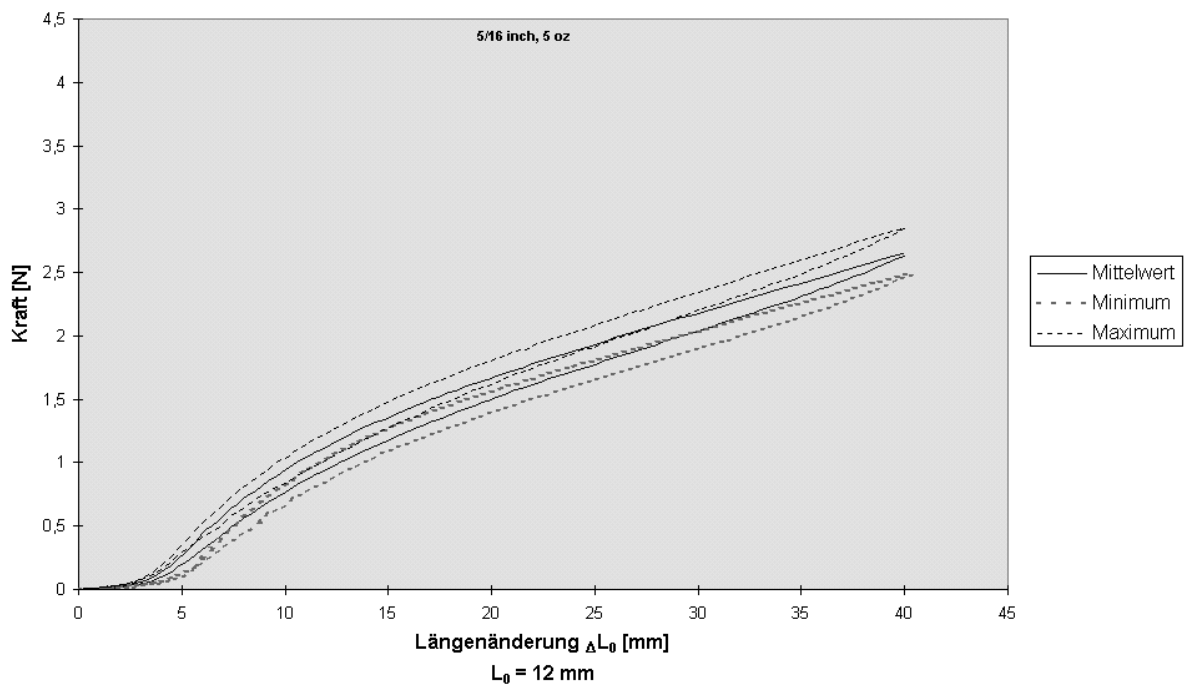


Abb. 29: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 5 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung [N]
10	0,94	0,82	1,04	0,06
20	1,67	1,56	1,80	0,07
30	2,18	2,03	2,35	0,09
40	2,65	2,48	2,85	0,11
Entlastung				
40	2,52	2,35	2,72	0,11
30	1,96	1,82	2,11	0,08
20	1,40	1,30	1,52	0,07
10	0,60	0,47	0,69	0,07

Tab. 10: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 5 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 30 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 5/16 inch der Stärke 3,5 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 3,5 oz (ca. 0,98 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 17,2 mm erreicht. Dies entspricht ca. dem 2,2fachen des inneren Durchmessers von 7,94 mm. Aus Tab. 11 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,24 N.

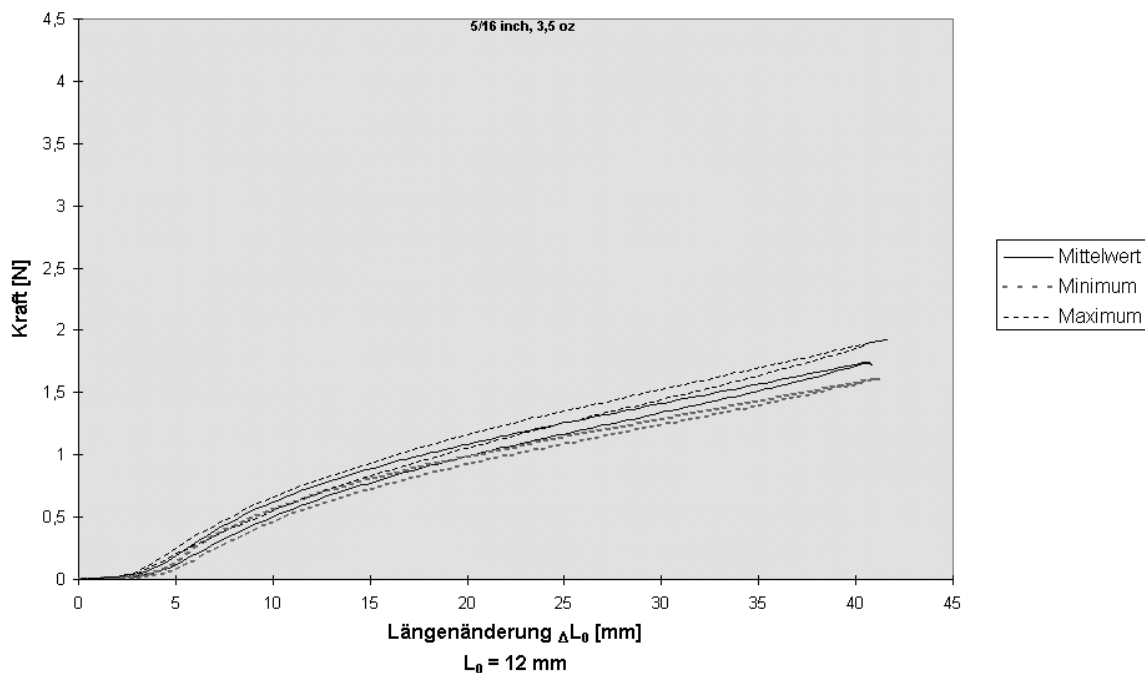


Abb. 30: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 3,5 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung [N]
10	0,62	0,56	0,66	0,03
20	1,08	0,98	1,16	0,05
30	1,41	1,29	1,53	0,06
40	1,73	1,58	1,88	0,08
Entlastung				
40	1,68	1,54	1,82	0,07
30	1,31	1,22	1,41	0,05
20	0,96	0,89	1,02	0,04
10	0,45	0,41	0,49	0,03

Tab. 11: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 3,5 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Abb. 31 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten Gummizüge in der Größe 5/16 inch der Stärke 3 oz. Die auf der Packung angegebene Kraft von 3 oz (ca. 0,84 N) wurde bei einer Längenänderung von ca. 18 mm erreicht. Dies entspricht ca. dem 2,3fachen des inneren Durchmessers von 7,94 mm. Aus Tab. 12 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 30 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,2 N.

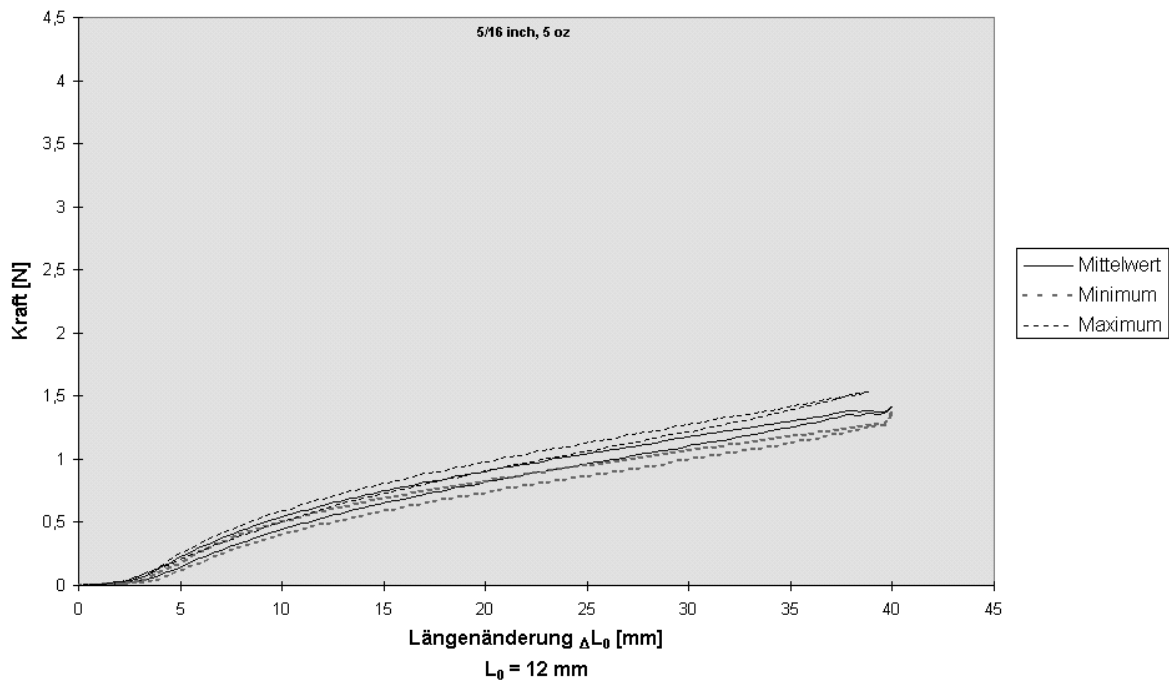


Abb. 31: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 3 oz

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	0,54	0,50	0,59	0,03
20	0,90	0,83	0,98	0,05
30	1,17	1,07	1,27	0,07
38	1,38	1,25	1,51	0,08
Entlastung				
38	1,36	1,22	1,51	0,09
30	1,01	0,91	1,12	0,07
20	0,71	0,65	0,79	0,05
10	0,27	0,24	0,32	0,03

Tab. 12: Kraftwerte der Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 3 oz auf der Dehn- und Entlastungskurve

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Kennlinien der untersuchten Gummizüge dem Verhalten elastischer Werkstoffe entsprachen. Auf einen initial proportionalen Anstieg der Kraft im Verhältnis zur Dehnung folgte eine Abnahme der Steigung der Kennlinie bei zunehmender Belastung.

Die Hystereseseform der Kennlinie war bei stärkeren Gummizügen ausgeprägter als bei schwächeren. Plastisches Fließen fand in nur äußerst geringem Ausmaß statt, so daß die Verformung der Gummizüge nahezu auf den Ausgangswert zurückging.

Der auf der Packung angegebene Wert in Unzen für die Stärke der Gummizüge wurde bei einer Längenänderung um das 2- bis 2,7fache des inneren Durchmessers erreicht.

Bei der Dehnung von Gummizügen einer Größe und Stärke zeigte sich eine starke Streubreite der entwickelten Kraftwerte. Die Kraftangaben auf der Packung sind Näherungswerte und durch den Hersteller offenbar nicht genauer zu beeinflussen. Stärkere Gummizüge wichen dabei weiter von der angegebenen Kraft ab. Bei diesen Gummizügen beträgt die Streubreite der gefundenen Kraftwerte bis zu 1 N, bei einer Längenänderung von 30 mm, während sie bei den schwächeren Gummizügen bei einer Längenänderung von 30 mm nur 0,2 - 0,46 N betrug. Die Standardabweichung lag zwischen 0,06 und 0,28.

5.1.2 Kennlinien der Gummizüge im Wechsellastversuch

Abb. 32 zeigt die Kennlinien zweier Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 6 oz und 2 oz nach einer Wechselbelastung von 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskennlinie. Es ist eine deutliche Abnahme der Rückstellkraft zu erkennen. Von den 6 untersuchten Gummizügen in dieser Größe betrug der Mittelwert der Abnahme der Rückstellkraft 23,9%.

Außerdem wurde die Hystereseform der Kennlinie der Gummizüge schmaler.

Der Gummizug der Größe 3/16 inch in der Stärke 6 oz erfuhr nach 10.000 Dehnzyklen bei einer Längenänderung um 30 mm einen Kraftverlust von 3,13 N auf 2,83 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizugs bei einer Längenänderung von 30 mm mit 2,68 N ca. 14,1% unter seiner Ursprungskraft.

Die Kraftentwicklung des Gummizugs der Größe 3/16 inch in der Stärke 2 oz verringerte sich nach 10.000 Dehnzyklen bei einer Längenänderung von 30 mm von 1,35 N auf 1,15 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizugs bei einer Längenänderung von 30 mm mit 0,78 N ca. 42,2 % unter seiner Ursprungskraft.

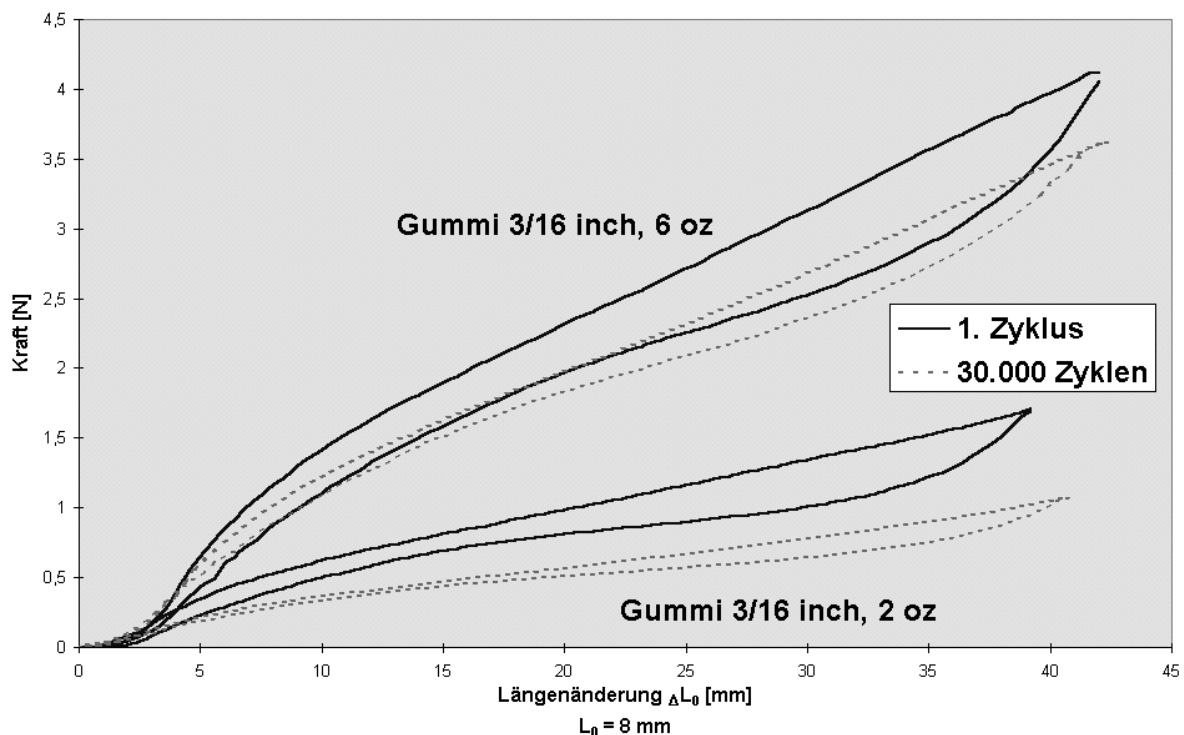


Abb. 32: Kennlinie zweier Gummizüge der Größe 3/16 inch in der Stärke 6 oz und 2 oz beim 1. und 30.000. Dehnzyklus

In Tab. 13 sind die Kraftwerte für alle 6 getesteten Gummizüge der Größe 3/16 inch nach 10.000, 20.000 und 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskraft der Gummizüge dargestellt. Zum Vergleich wurden die Kraftwerte bei einer Längenänderung der Gummizüge um 30 mm benutzt. Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung der Messung sind in Tab. 14 aufgeführt.

Gummizüge der Größe 3/16 inch		1. Zyklus	10.000 Zyklen	20.000 Zyklen	30.000 Zyklen	Abnahme der Rückstellkraft	
		[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	%
3/16 inch 2 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	1,35	1,15	1,14	0,78	0,57	42,2
	Entlastung 30 mm	1	0,94	0,93	0,64	0,36	36
3/16 inch 2 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	0,93	0,82	0,8	0,7	0,23	25
	Entlastung 30 mm	0,68	0,64	0,63	0,63	0,05	7,4
3/16 inch 3,5 oz Nr. 1	Längenänderung 30 mm	1,91	1,67	1,64	1,36	0,55	28,8
	Entlastung 30 mm	1,55	1,4	1,39	1,34	0,21	13,5
3/16 inch 3,5 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	1,97	1,74	1,72	1,67	0,3	15,2
	Entlastung 30 mm	1,54	1,41	1,4	1,4	0,14	9,1
3/16 inch 6 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	3,13	2,83	2,78	2,68	0,45	14,4
	Entlastung 30 mm	2,52	2,41	2,21	2,2	0,32	12,7
3/16 inch 6 oz Nr. 2	Längenänderung 30 mm	2,61	2,27	2,16	2,15	0,46	17,6
	Entlastung 30 mm	2,11	2,02	1,94	1,96	0,15	7,1

Tab. 13: Kraftabnahme der Gummizüge der Größe 3/16 inch durch Wechselbelastung

Gummizüge der Größe 3/16 inch	n	Maximum der Kraftabnahme %	Minimum der Kraftabnahme %	Mittelwert %	Standardabweichung
Längenänderung 30 mm	6	42,2	14,4	23,9	9,7
Entlastung 30 mm	6	36	7,1	14,3	10

Tab. 14: Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung der Kraftabnahme

Abb. 33 zeigt die Kennlinien zweier Gummizüge der Größe 1/4 inch in der Stärke 6 oz und 2 oz nach einer Wechselbelastung von 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskennlinie. Von den 6 untersuchten Gummizügen in dieser Größe betrug der Mittelwert der Abnahme der Rückstellkraft 14,6%.

Der Gummizug in der Größe 1/4 inch, der Stärke 6 oz zeigte nach 10.000 Dehnzyklen bei einer Längenänderung von 30 mm einen Kraftverlust von 3,03 N auf 2,89 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizugs bei einer Längenänderung um 30 mm mit 2,58 N ca. 14,9% unter seiner Ursprungskraft.

Die Kraftentwicklung des Gummizugs der Größe 1/4 inch in der Stärke 2 oz verringerte sich nach 10.000 Dehnzyklen von 0,81 N auf 0,72 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizuges bei einer Längenänderung von 30 mm mit 0,69 N ca. 14,8% unter seiner Ursprungskraft.

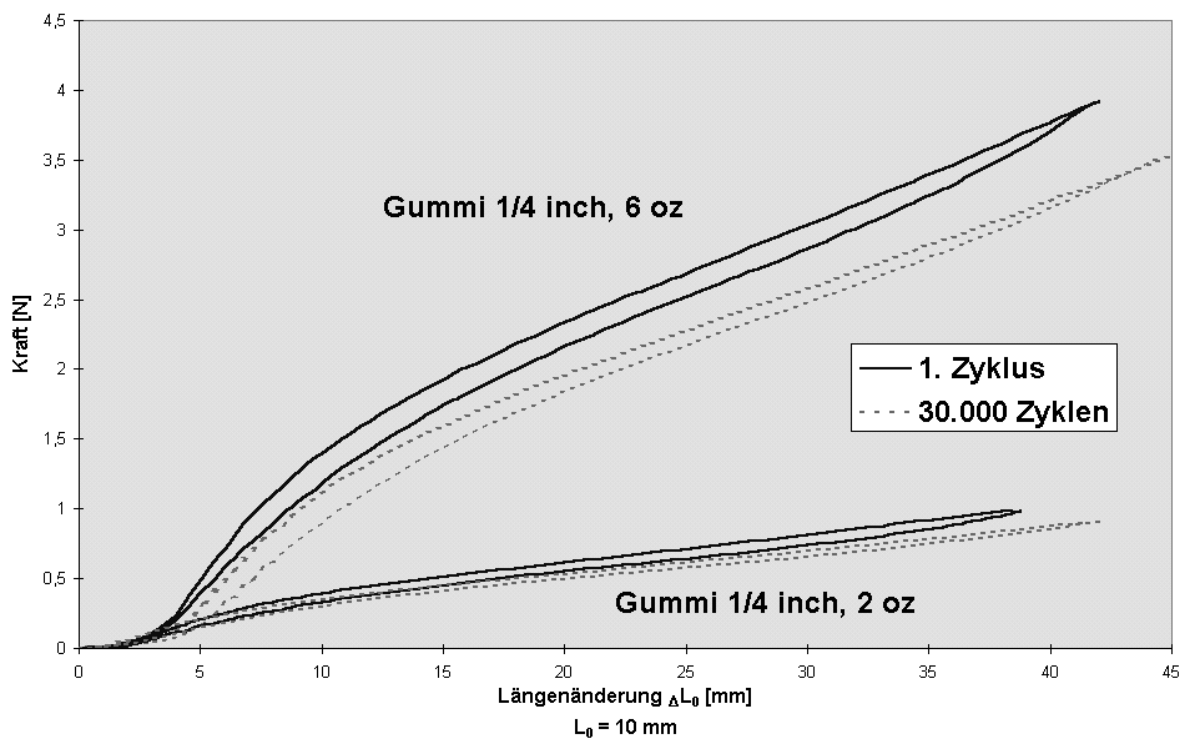


Abb. 33: Kennlinie zweier Gummizüge der Größe 1/4 inch in der Stärke 6 oz und 2 oz beim 1. und 30.000. Dehnzyklus

In Tab. 15 sind die Kraftwerte für alle 6 getesteten Gummizüge der Größe 1/4 inch nach 10.000, 20.000 und 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskraft der Gummizüge dargestellt. Zum Vergleich wurden die Kraftwerte bei einer Längenänderung der Gummizüge um 30 mm benutzt. Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung der Messung sind in Tab. 16 aufgeführt.

Gummizüge der Größe 4/16 inch		1. Zyklus	10.000 Zyklen	20.000 Zyklen	30.000 Zyklen	Abnahme der Rückstellkraft	
		[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	%
4/16 inch 2 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	0,81	0,72	0,69	0,69	0,12	14,8
	Entlastung 30 mm	0,75	0,67	0,66	0,66	0,09	12
4/16 inch 2 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	0,9	0,77	0,77	0,75	0,15	16,7
	Entlastung 30 mm	0,81	0,72	0,72	0,69	0,12	14,8
4/16 inch 3,5 oz Nr. 1	Längenänderung 30 mm	1,72	1,49	1,48	1,47	0,25	14,5
	Entlastung 30 mm	1,58	1,43	1,40	1,40	0,18	11,4
4/16 inch 3,5 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	1,71	1,51	1,50	1,49	0,22	12,9
	Entlastung 30 mm	1,57	1,44	1,43	1,43	0,14	8,9
4/16 inch 6 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	3,03	2,89	2,80	2,58	0,45	14,9
	Entlastung 30 mm	2,86	2,78	2,69	2,48	0,38	13,3
4/16 inch 6 oz Nr. 2	Längenänderung 30 mm	2,72	2,41	2,34	2,34	0,38	14
	Entlastung 30 mm	2,59	2,3	2,29	2,25	0,34	13,1

Tab. 15: Kraftabnahme der Gummizüge der Größe 4/16 inch durch Wechselbelastung

Gummizüge der Größe 4/16 inch	n	Maximum der Kraftabnahme %	Minimum der Kraftabnahme %	Mittelwert %	Standardabweichung
Längenänderung 30 mm	6	16,7	12,9	14,6	1,14
Entlastung 30 mm	6	14,8	8,9	12,9	1,84

Tab. 16: Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung der Kraftabnahme

Abb. 34 zeigt die Kennlinien zweier Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 5 oz und 3 oz nach einer Wechselbelastung von 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskennlinie. Von den 6 untersuchten Gummizügen in dieser Größe betrug der Mittelwert der Abnahme der Rückstellkraft 12,9%.

Der Gummizug in der Größe 5/16 inch, der Stärke 5 oz zeigte nach 10.000 Dehnzyklen bei einer Längenänderung von 30 mm einen Kraftverlust von 2,3 N auf 2,0 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizugs bei einer Längenänderung von 30 mm mit 1,96 N ca. 14% unter seiner Ursprungskraft.

Die Kraftentwicklung des Gummizugs der Größe 5/16 inch in der Stärke 3 oz verringerte sich nach 10.000 Dehnzyklen von 1,1 N auf 1,05 N. Nach 30.000 Dehnzyklen lag die Kraftentwicklung des Gummizugs bei einer Längenänderung von 30 mm mit 0,96 N ca. 12,7% unter seiner Ursprungskraft.

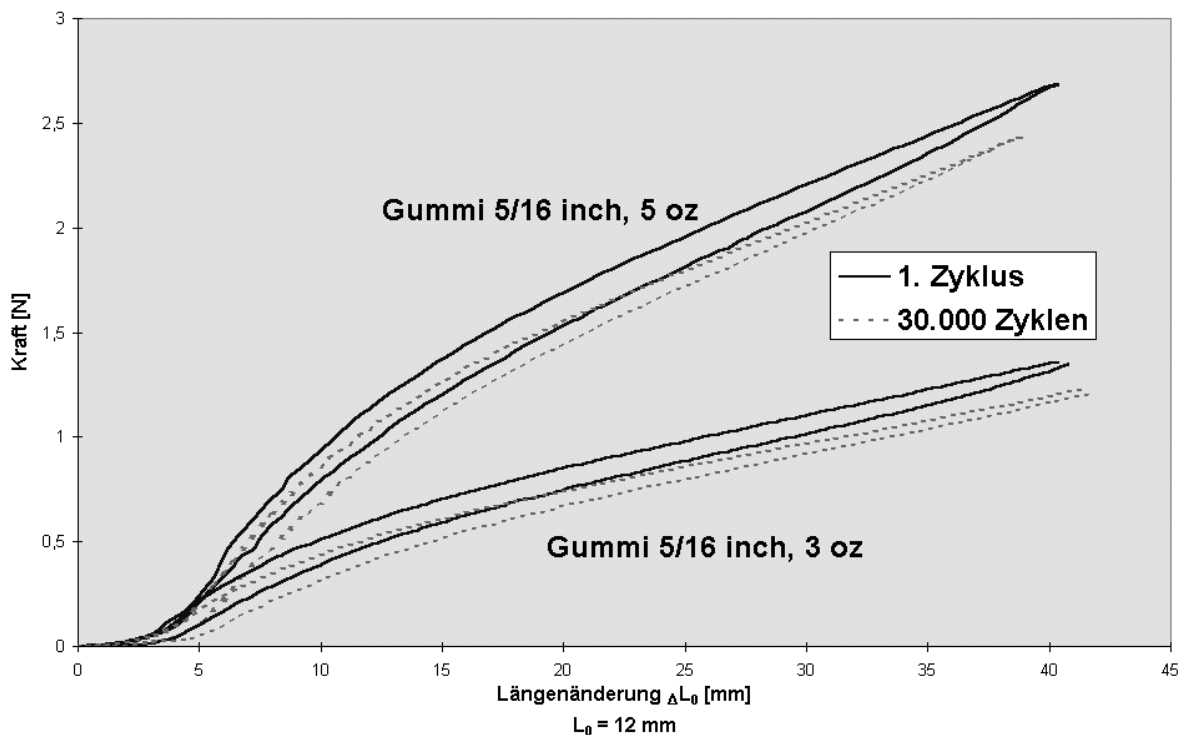


Abb. 34: Kennlinie zweier Gummizüge der Größe 5/16 inch in der Stärke 5 oz und 3 oz beim 1. und 30.000. Dehnzyklus

In Tab. 17 sind die Kraftwerte für alle 6 getesteten Gummizüge der Größe 5/16 inch nach 10.000, 20.000 und 30.000 Dehnzyklen im Vergleich zur Ausgangskraft der Gummizüge dargestellt. Zum Vergleich wurden die Kraftwerte bei einer Längenänderung der Gummizüge um 30 mm benutzt. Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung der Messung sind in Tab. 18 aufgeführt.

Gummizüge der Größe 5/16 inch		1. Zyklus	10.000 Zyklen	20.000 Zyklen	30.000 Zyklen	Abnahme der Rückstellkraft	
		[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	%
5/16 inch 3 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	1,1	1,05	0,99	0,96	0,14	12,7
	Entlastung 30 mm	1,03	1,01	0,94	0,93	0,1	9,7
5/16 inch 3 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	1,23	1,15	1,11	1,08	0,15	12,2
	Entlastung 30 mm	1,15	1,13	1,05	1,04	0,11	9,6
5/16 inch 3,5 oz Nr. 1	Längenänderung 30 mm	1,33	1,30	1,29	1,22	0,11	8,3
	Entlastung 30 mm	1,3	1,29	1,27	1,19	0,11	8,5
5/16 inch 3,5 oz Nr.2	Längenänderung 30 mm	1,44	1,36	1,32	1,21	0,23	16
	Entlastung 30 mm	1,37	1,33	1,3	1,18	0,19	13,9
5/16 inch 5 oz Nr.1	Längenänderung 30 mm	2,28	1,98	1,96	1,96	0,32	14
	Entlastung 30 mm	2,18	1,94	1,93	1,89	0,29	13,3
5/16 inch 5 oz Nr. 2	Längenänderung 30 mm	2,26	1,98	1,97	1,94	0,32	14,2
	Entlastung 30 mm	2,13	1,91	1,9	1,85	0,28	13,1

Tab. 17: Kraftabnahme der Gummizüge der Größe 5/16 inch durch Wechselbelastung

Gummizüge der Größe 5/16 inch	n	Maximum der Kraftabnahme %	Minimum der Kraftabnahme %	Mittelwert %	Standardabweichung
Längenänderung 30 mm	6	16	8,3	12,9	2,3
Entlastung 30 mm	6	13,9	8,5	11,35	2,1

Tab. 18: Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung der Kraftabnahme

5.1.3 Kraftabfall der Gummizüge bei isometrischer Dehnung

Um die Genauigkeit der Meßanordnung zu überprüfen, wurde ein Gewicht von 5 N in die Haltevorrichtung für die Gummizüge eingehängt und die Gewichtskraft alle 2,5 Minuten über einen Zeitraum von 24 Stunden aufgezeichnet. Dabei ergab sich ein Meßfehler von $\pm 0,03$ Newton.

Die unten abgebildeten Graphen einer Gummigröße und -stärke geben den mittleren Kraftverlust von 4 Gummizügen an, da jeweils 4 Gummizüge gleichzeitig gedehnt wurden und die gemessenen Kraftwerte anschließend durch 4 geteilt wurden.

In Abb. 35 ist das Relaxationsverhalten von Gummizügen der Größe 5/16 inch in 3 verschiedenen Stärken dargestellt. Bei dieser isometrischen Anspannung der Gummizüge fällt die entwickelte Kraft initial stärker ab und bleibt danach weitestgehend konstant. Insgesamt verloren die Gummizüge der Stärke 5 oz nach 24 Stunden 14,6% der Ursprungskraft. Die Gummizüge der Stärke 3,5 oz verloren etwa 8,5% der Ausgangskraft und die leichten Gummizüge der Stärke 3 oz verringerten ihre Kraftentfaltung nach 24 Stunden um ca. 10,5%.

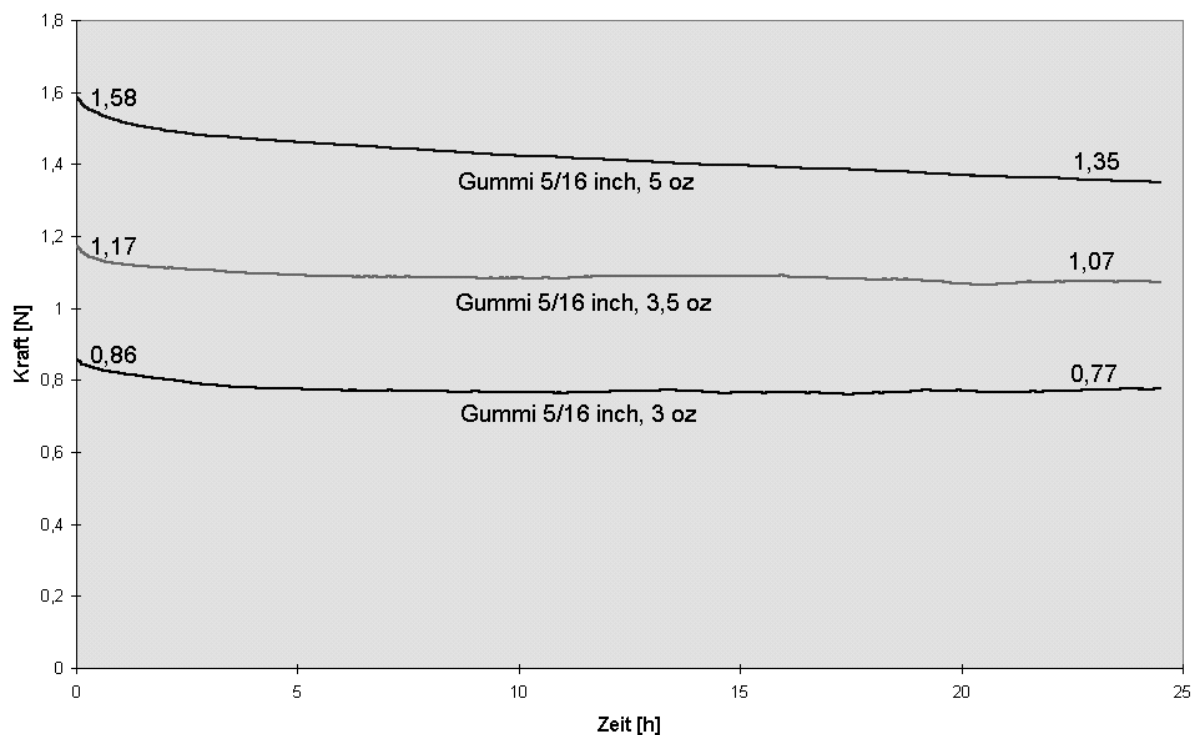


Abb. 35: Relaxationsverhalten der Gummizüge in der Größe 5/16 inch

Der Kraftabfall bei isometrischer Dehnung der Gummizüge in der Größe 1/4 inch ist in Abb. 36 dargestellt. Auch bei diesen Gummizügen fällt die Kraft initial etwas ab, um danach nahezu konstant zu bleiben.

Insgesamt verloren die Gummizüge der Stärke 6 oz nach 24 Stunden 8,7% der Ursprungskraft. Die Gummizüge der Stärke 3,5 oz verloren etwa 10,1% der Ausgangskraft; die leichten Gummizüge der Stärke 2 oz verringerten ihre Kraftentfaltung nach 24 Stunden um ca. 9,1%.

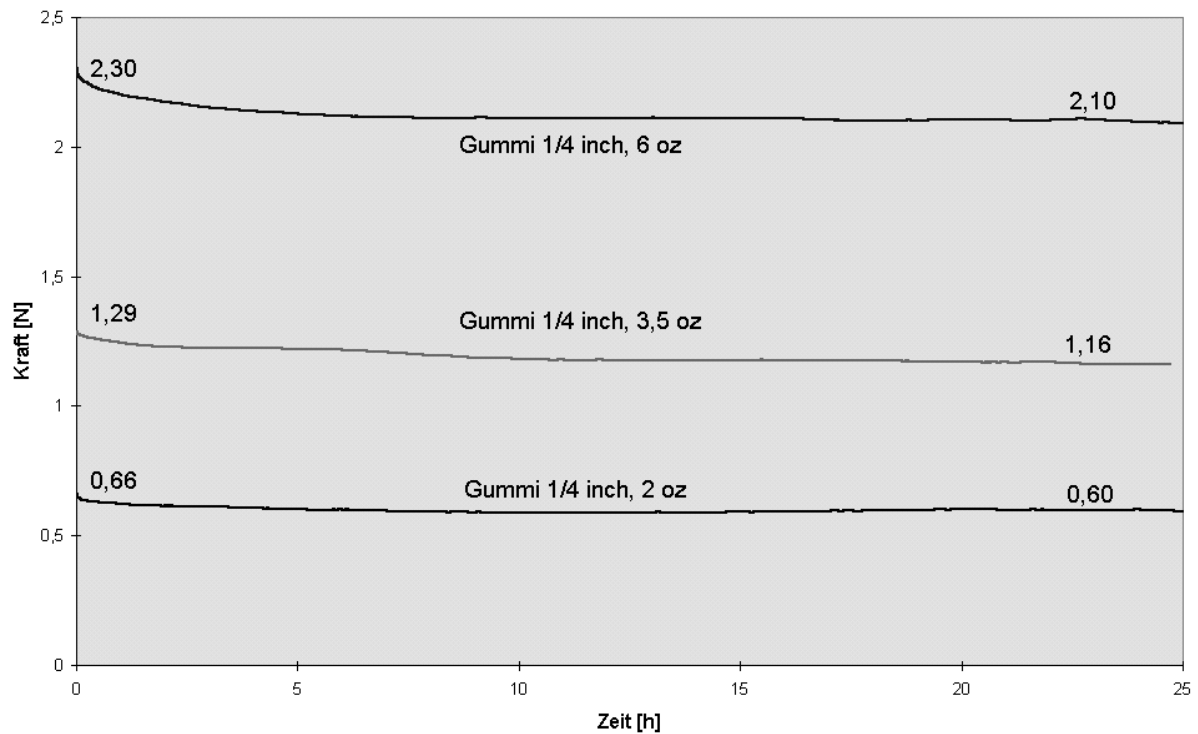


Abb. 36: Relaxationsverhalten der Gummizüge in der Größe 1/4 inch

Der Kraftabfall bei isometrischer Dehnung der Gummizüge in der Größe 3/16 inch ist in Abb. 37 dargestellt. Die Gummizüge der Stärke 6 oz verloren nach 24 Stunden 11,1% der Ursprungskraft. Die Gummizüge der Stärke 3,5 oz verloren etwa 8,1% der Ausgangskraft und die leichten Gummizüge der Stärke 2 oz verringerten ihre Kraftentfaltung nach 24 Stunden um ca. 8%.

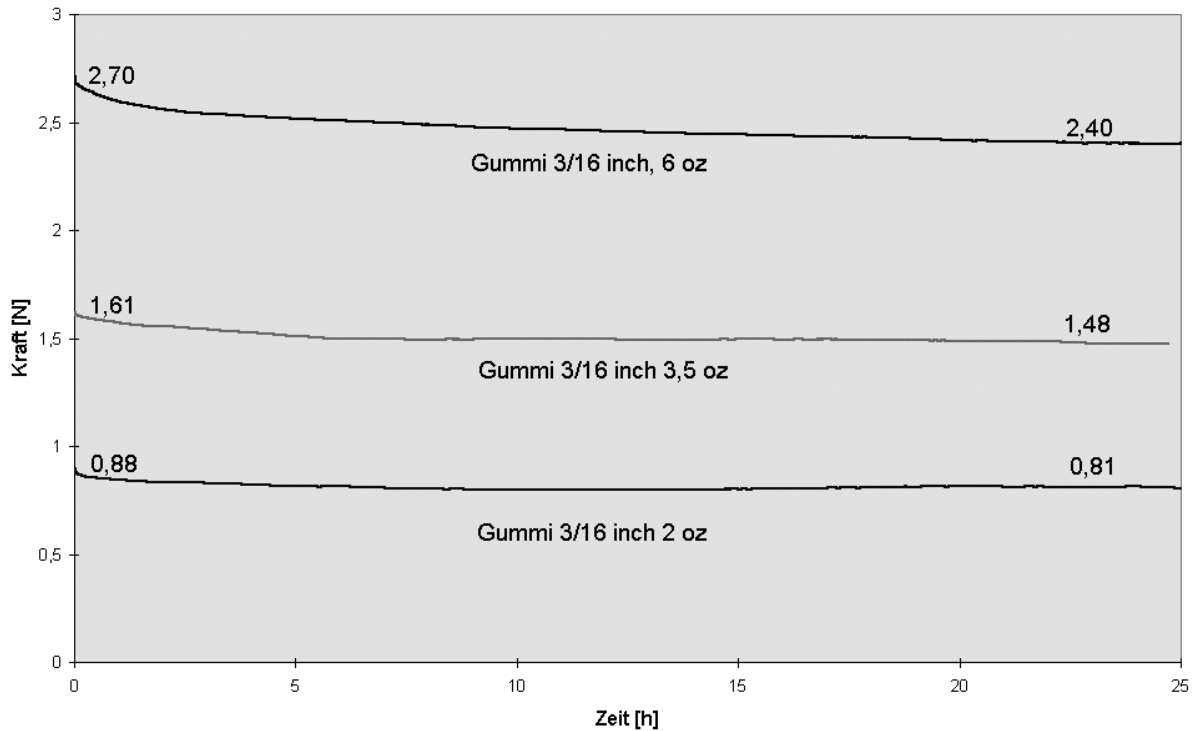


Abb. 37: Relaxationsverhalten der Gummizüge in der Größe 3/16 inch

Der Kraftverlust der Gummizüge bei isometrischer Dehnung in den drei verschiedenen Größen ist zusammenfassend in Tab. 19 dargestellt. Es ergibt sich ein mittlerer Kraftabfall von $9,9\% \pm 2$ nach 24 Stunden. Der größte Teil des Kraftabfalls findet in den ersten beiden Stunden statt. Danach bleibt die Rückstellkraft der Gummizüge weitestgehend konstant.

Größe der Gummizüge	Stärke der Gummizüge	Rückstellkraft zu Beginn [N]	Rückstellkraft nach 24 Stunden [N]	Kraftverlust [N]	Kraftverlust [%]
5/16 inch	5 oz	1,58	1,35	0,23	14,6
5/16 inch	3,5 oz	1,17	1,07	0,1	8,5
5/16 inch	3 oz	0,86	0,77	0,09	10,5
1/4 inch	6 oz	2,3	2,1	0,2	8,7
1/4 inch	3,5 oz	1,29	1,16	0,13	10,1
1/4 inch	2 oz	0,66	0,6	0,06	9,1
3/16 inch	6 oz	2,7	2,4	0,3	11,1
3/16 inch	3,5 oz	1,61	1,48	0,13	8,1
3/16 inch	2 oz	0,88	0,81	0,07	8
Mittelwert des Kraftverlusts in %	9,86				
Standardabweichung	1,97				

Tab. 19: Kraftverlust der Gummizüge bei isometrischer Dehnung

5.1.4 Kennlinien der Gummizüge im Alterungsversuch

In Abb. 38 ist beispielhaft die Kennlinie von drei Gummizügen der Größe 3/16 inch vor und nach 1.000 Wechselbädern dargestellt. Beim Vergleich der Kennlinie nach 1.000 Wechselbädern mit der entsprechenden Kennlinie, die vor den Temperaturwechseln aufgenommen wurde, konnte bei keinem der getesteten Gummizüge ein signifikanter Einfluß auf die Kraftentfaltung festgestellt werden. Die gemessenen Unterschiede lagen unter dem durch die Meßanordnung gegebenen Meßfehler und sind nicht statistisch auswertbar.

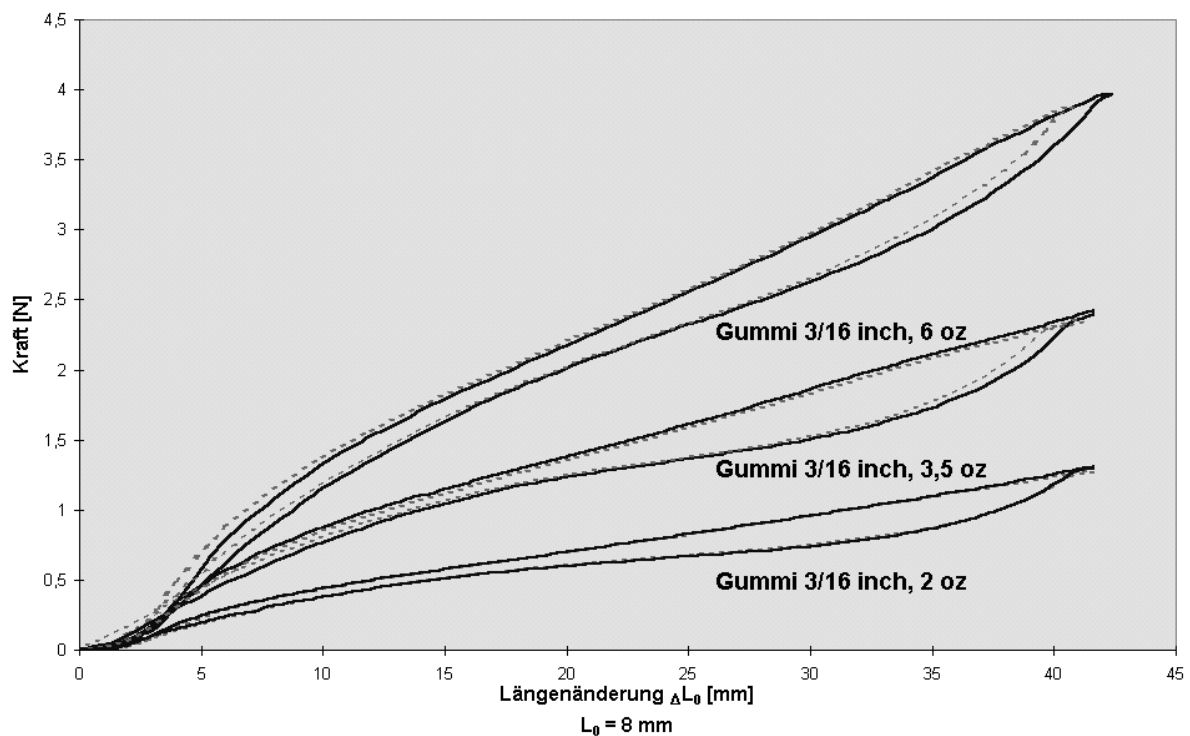


Abb. 38: Kennlinie von drei Gummizügen vor und nach 1.000 Wechselbädern

5.1.5 Ergebnisse des Temperaturvergleichs

Bei dem Temperaturvergleich wird das Kraft-Dehnungs-Verhalten des Werkstoffs bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt.

Abb. 39 zeigt stellvertretend die Kennlinie eines Gummizugs der Größe 1/4 inch in der Stärke 3,5 oz bei einer Umgebungstemperatur von 20° C und von 40° C. Es konnte keine signifikante Änderung in der Kraftentfaltung des Gummizugs festgestellt werden. Allerdings verschmälerte sich die Hysteresekurve bei einer Längenänderung um 20mm erheblich.

Auch bei den übrigen getesteten Gummizügen konnte keine Änderung in der Kraftentfaltung festgestellt werden.

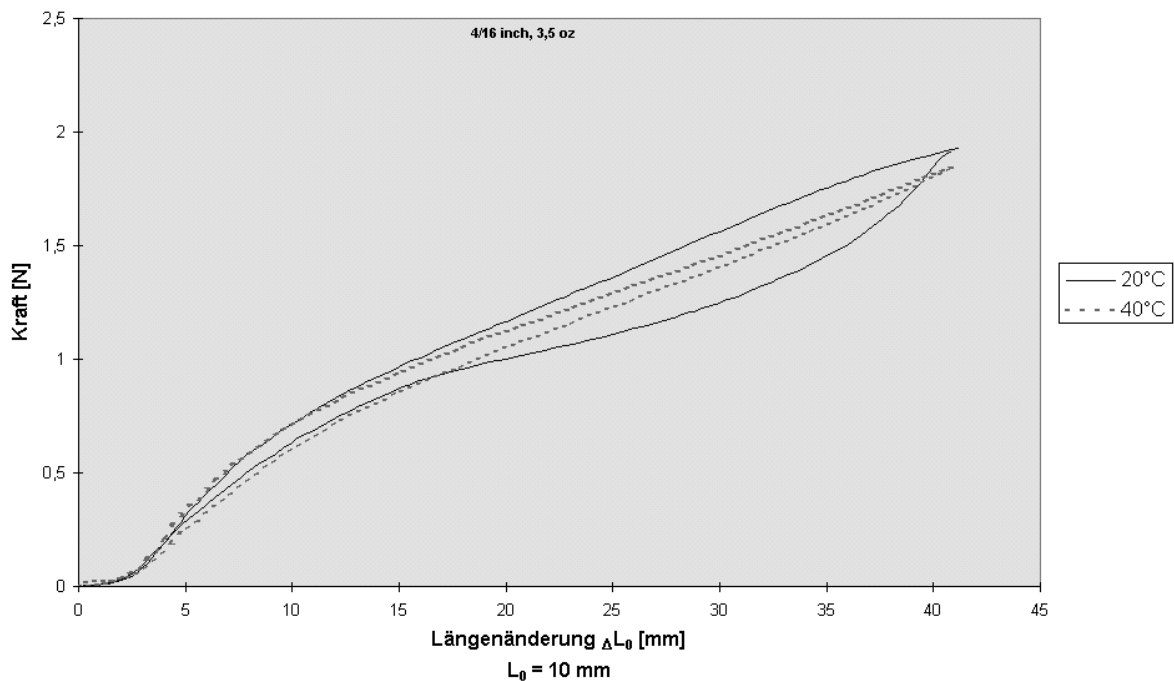


Abb. 39: Kennlinie eines Gummizugs der Größe 1/4 inch in der Stärke 3,5 oz bei 20° C und 40° C

5.1.6 Ergebnisse des Versuchs mit gedrehten Gummizügen

Abb. 40 zeigt die Kennlinie eines Gummizugs der Größe 5 inch in der Stärke 5 oz, der zusätzlich erst einfach, dann doppelt verdrillt wurde. Die Verdrillung des Gummizugs führte nicht zu einer Steigerung der Kraftentfaltung. Bei den übrigen getesteten Gummizügen konnte keine signifikante Änderung der Kennlinie durch Verdrillen festgestellt werden.

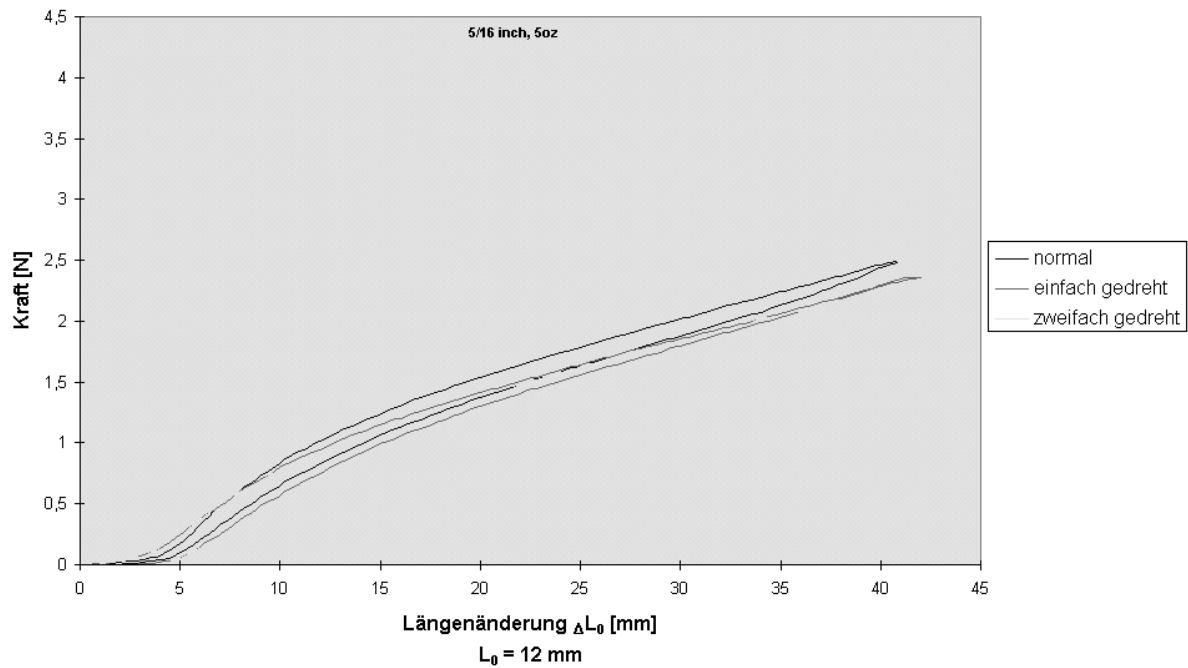


Abb. 40: Kennlinie eines ungedrehten, eines einfach und eines zweifach gedrehten Gummizugs

5.2 Pseudoelastische Federn

5.2.1 Kennlinien der pseudoelastischen Federn

Die in Abb. 41 dargestellte Kennlinie einer intermaxillären Feder zeigt die für das superelastische Verhalten einer Memorylegierung typische Transformationshysterese.

Ein linearer Zusammenhang zwischen Federlänge und Federrate wie bei zylindrischen Schraubenzugfedern besteht nicht.

Die Entlastungskennlinie zeigte ein Plateau bei einer Kraft von 1,4 N. Im Bereich des letzten Millimeters bei der Entlastung fand ein linearer Kraftabfall statt.

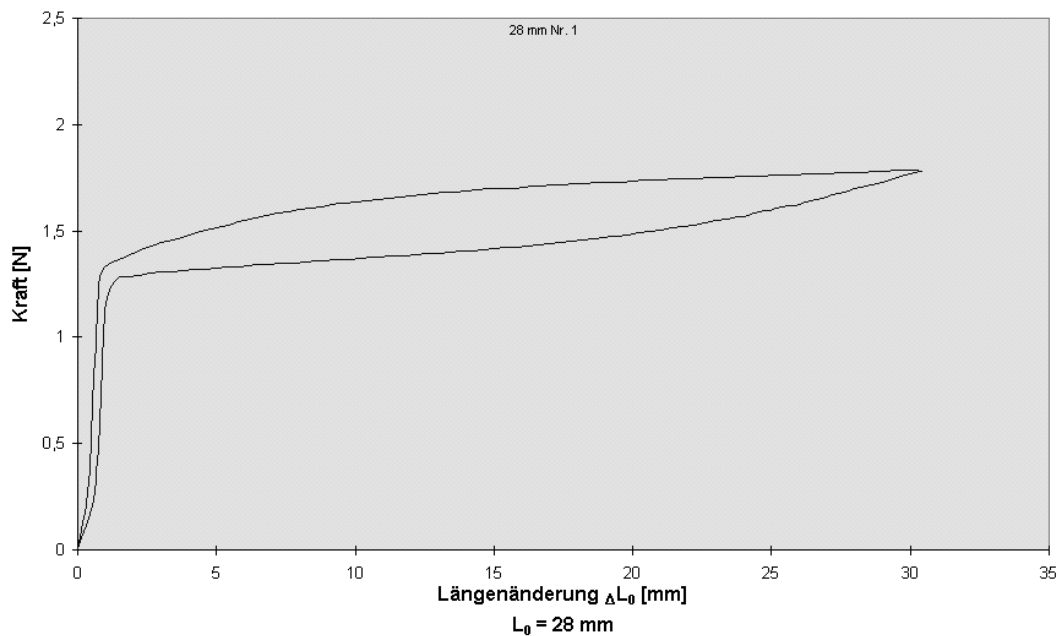


Abb. 41: Kennlinie einer pseudoelastischen intermaxillären Feder

5.2.1.1 Kennlinien der Federn mit 28 mm Länge

Abb. 42 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten pseudoelastischen intermaxillären Federn in der Länge 28 mm aus dem Sentalloy Programm von GAC. Die Plateaus aller 10 Kennlinien liegen sehr nahe zusammen und bestätigen die vom Hersteller angegebenen 1,5 N als mittleren Arbeitsbereich.

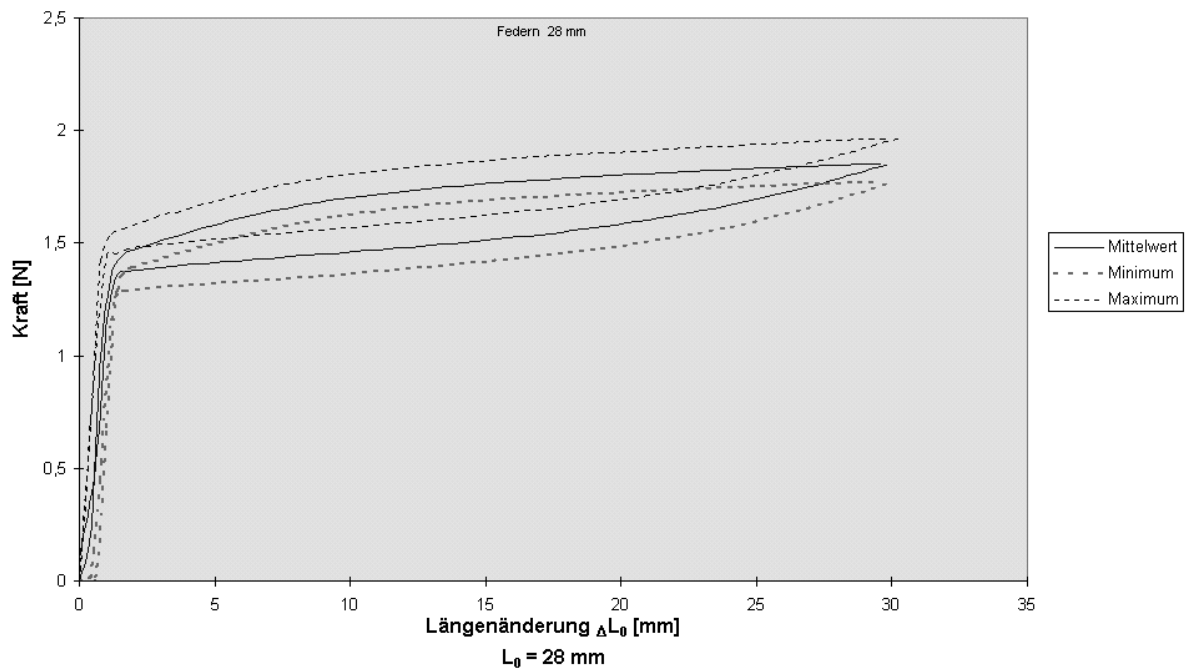


Abb. 42: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Federn in der Länge 28 mm bei 37° C

Aus Tab. 20 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 25 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,19 N. Die Kraftzunahme auf dem Plateau der Mittelwertkurve bei einer Längenänderung zwischen 10 mm und 25 mm von der Ausgangslänge betrug 0,13 N und zeigte die konstante Kraftabgabe der Feder über einen weiten Bereich der Dehnung.

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
10	1,7	1,62	1,8	0,057
20	1,8	1,73	1,91	0,058
25	1,83	1,75	1,94	0,06
Entlastung				
25	1,7	1,6	1,8	0,063
20	1,59	1,49	1,7	0,066
10	1,46	1,36	1,57	0,067

Tab. 20: Kraftwerte der Federn in der Länge 28 mm auf der Dehn- und Entlastungskurve

5.2.1.2 Kennlinien der Federn mit 23 mm Länge

Abb. 43 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten pseudoelastischen intermaxillären Federn in der Länge 23 mm aus dem Sentalloy Programm von GAC.

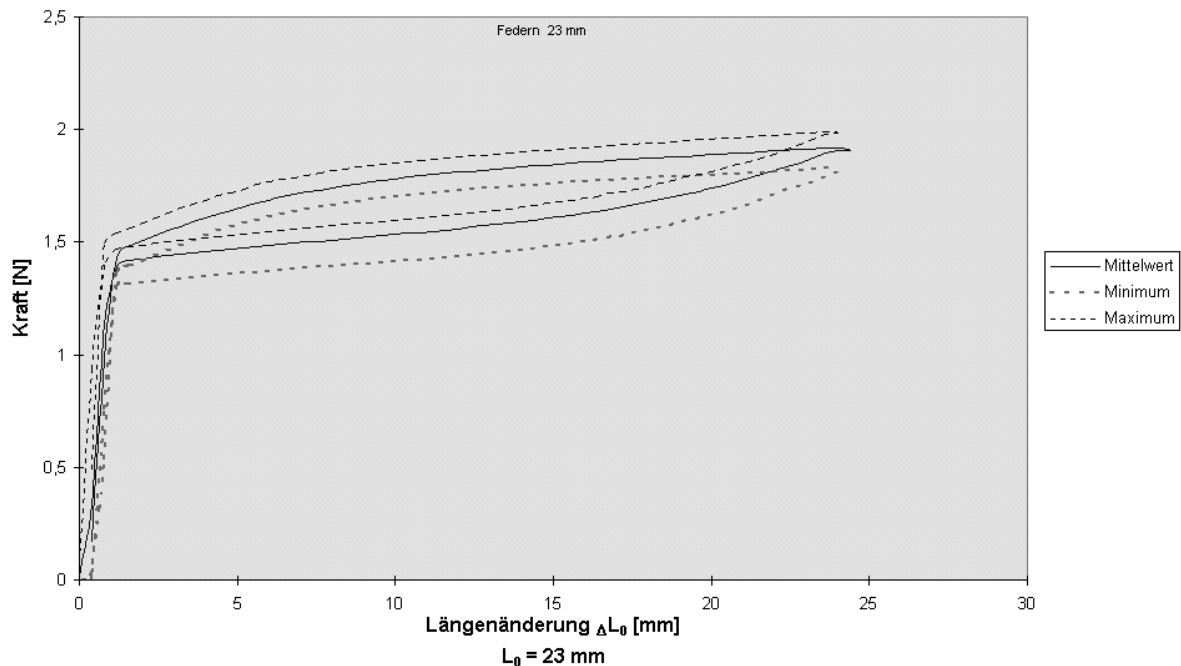


Abb. 43: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Federn in der Länge 23 mm bei 37° C

Aus Tab. 21 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 20 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,16 N. Damit zeigten die Kennlinien der Federn in der Länge 23 mm kaum Kraftunterschiede und bestätigen die vom Hersteller angegebenen 1,5 N als mittleren Arbeitsbereich. Die Kraftzunahme auf dem Plateau der Mittelwertkurve bei einer Längenänderung zwischen 5 mm und 20 mm von der Ausgangslänge betrug 0,23 N.

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
5	1,66	1,58	1,74	0,046
15	1,85	1,77	1,92	0,046
20	1,89	1,8	1,96	0,049
Entlastung				
20	1,74	1,62	1,81	0,053
15	1,61	1,49	1,68	0,054
5	1,48	1,36	1,54	0,049

Tab. 21: Kraftwerte der Federn in der Länge 23 mm auf der Dehn- und Entlastungskurve

5.2.1.3 Kennlinien der Federn mit 18 mm Länge

Abb. 44 zeigt den Mittelwert sowie Maximum und Minimum der Kennlinien der 10 untersuchten pseudoelastischen intermaxillären Federn in der Länge 23 mm aus dem Sentalloy Programm von GAC.

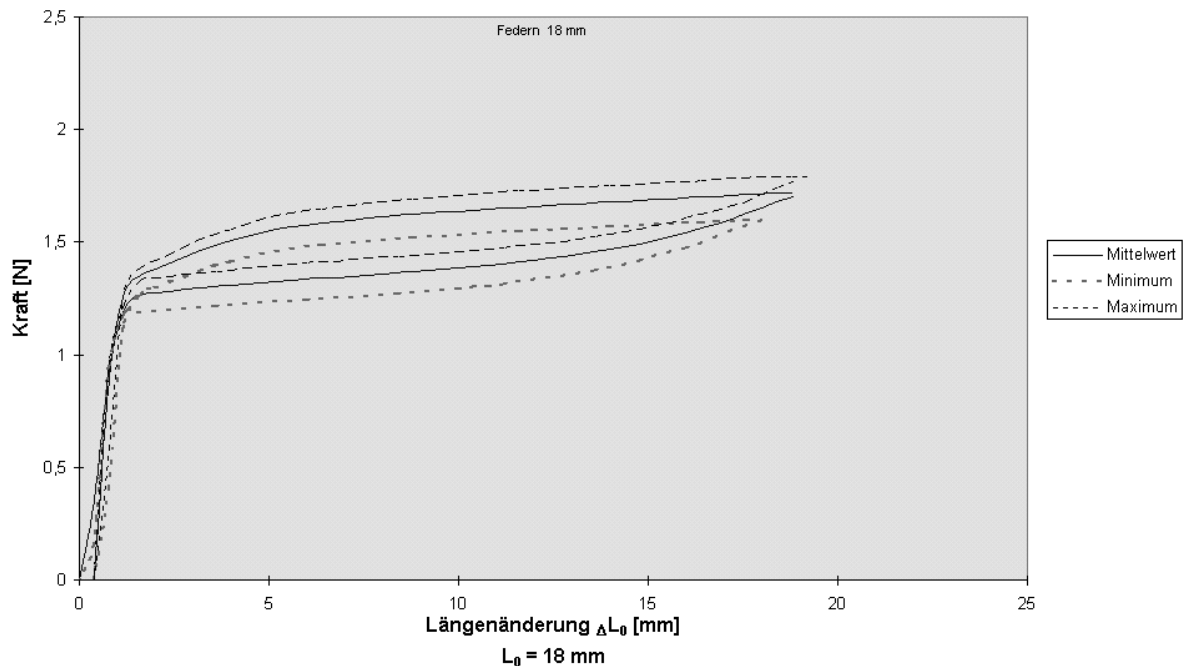


Abb. 44: Mittelwert, Minimum und Maximum der Kennlinien der Federn in der Länge 18 mm bei 37° C

Aus Tab. 22 gehen die genauen Kraftwerte für Mittelwert, Minimum und Maximum bei unterschiedlichem Grad der Dehnung hervor. Die Streubreite der bei einer Längenänderung von 15 mm erzielten Kraftwerte lag bei ca. 0,19 N. Der angegebene mittlere Arbeitsbereich von 1,5 N konnte auch bei diesen Federn bestätigt werden.

Die Kraftzunahme auf der Mittelwertkurve bei einer Längenänderung zwischen 5 mm und 15 mm von der Ausgangslänge betrug 0,14 N und zeigte die konstante Kraftabgabe der Feder über einen weiten Bereich der Dehnung.

Längenänderung [mm]	Mittelwert [N]	Minimum [N]	Maximum [N]	Standardabweichung
5	1,54	1,45	1,62	0,057
10	1,63	1,53	1,70	0,059
15	1,68	1,57	1,76	0,061
Entlastung				
15	1,51	1,42	1,59	0,054
10	1,38	1,29	1,46	0,057
5	1,32	1,23	1,4	0,054

Tab. 22: Kraftwerte der Federn in der Länge 18 mm auf der Dehn- und Entlastungskurve

Die Kennlinien der intermaxillären Zugfedern zeigten die für das pseudoelastische Verhalten einer Memorylegierung typische Transformationshysterese.

Auf der Entlastungskennlinie wiesen die Federn ein Plateau bei 1,4 N auf. Im Bereich des letzten Millimeters fand bei der Entlastung ein linearer Kraftabfall statt.

Die Dehnversuche mit den Federn zeigten, daß der von den Herstellern angegebene mittlere Arbeitsbereich von 1,5 N bei allen 3 Längen der Federn eingehalten wurde. Dabei konnten die Federn bis zu 100% ihrer Ausgangslänge gedehnt werden.

Die Kraftentfaltung der Federn war unabhängig von ihrer Länge, denn schon nach einer Längenänderung um einen Millimeter wurde das Plateau der Kennlinie erreicht. Dabei lag die Streubreite der Kraftwerte bei einer mittleren Dehnung unter 0,2 N.

Die Kraftänderung im Bereich des Plateaus zwischen 10% und 90% Dehnung im Verhältnis zur Ausgangslänge der Federn betrug weniger als 0,3 N.

5.2.2 Ergebnisse des Wechsellastversuchs

Untersucht wurden je 10 Federn der Größe 18 mm, 23 mm und 28 mm auf ihre Bruchfestigkeit bei Wechselbelastung. Die Anzahl der intakten Federn innerhalb der ersten 120.000 Dehnzyklen ist in Abb. 45 dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit eines Federbruchs war bei kurzen Federn bereits zu Beginn des Dauerversuches wesentlich höher als bei den langen Federn. Nach 120.000 Dehnzyklen waren noch 9 der langen Federn intakt, während von den mittleren Federn noch 4 und von den kurzen Federn nur noch 2 intakt waren.

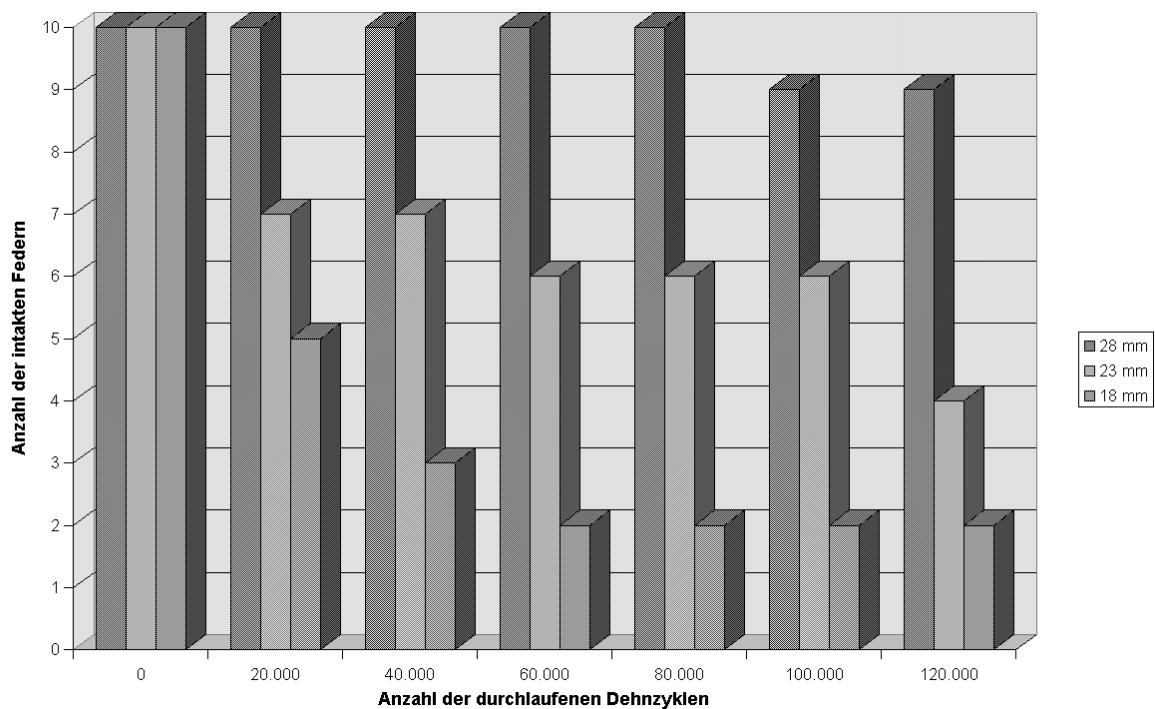


Abb. 45: Anzahl der intakten Federn zwischen 0 und 120.000 Dehnzyklen

Abb. 46 zeigt die Anzahl der intakten Federn vom ersten bis zum 480.000. Lastwechsel. Am Ende des Versuchs waren noch die Hälfte der langen Federn und 2 mittlere Federn intakt, während die letzte der kurzen Federn nach 360.000 Dehnzyklen gebrochen war.

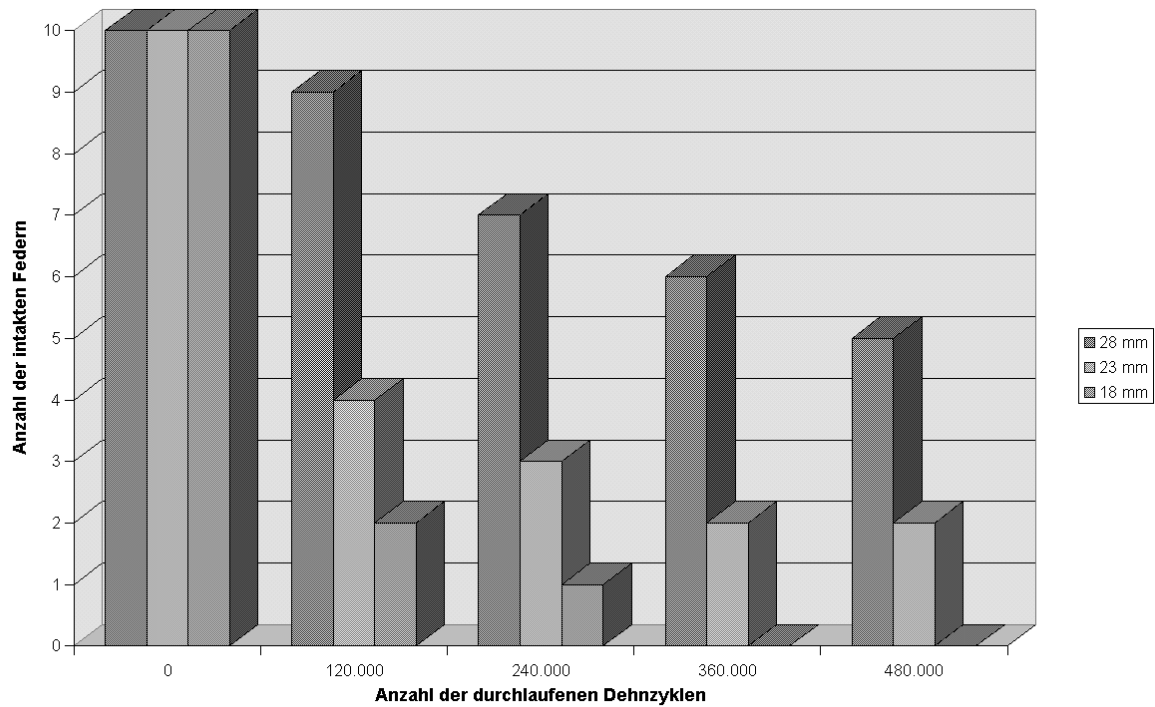


Abb. 46: Anzahl der intakten Federn zwischen 0 und 480.000 Dehnzyklen

Einige der im Versuch gebrochenen Federn wurden rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Die Untersuchung der Bruchfläche ergab ein der Bruchfläche der pseudoelastischen Drähte (Abb. 17, Seite 20) sehr ähnliches Bild. Abb. 47 zeigt die Bruchfläche einer während des Versuchs gebrochenen Feder.

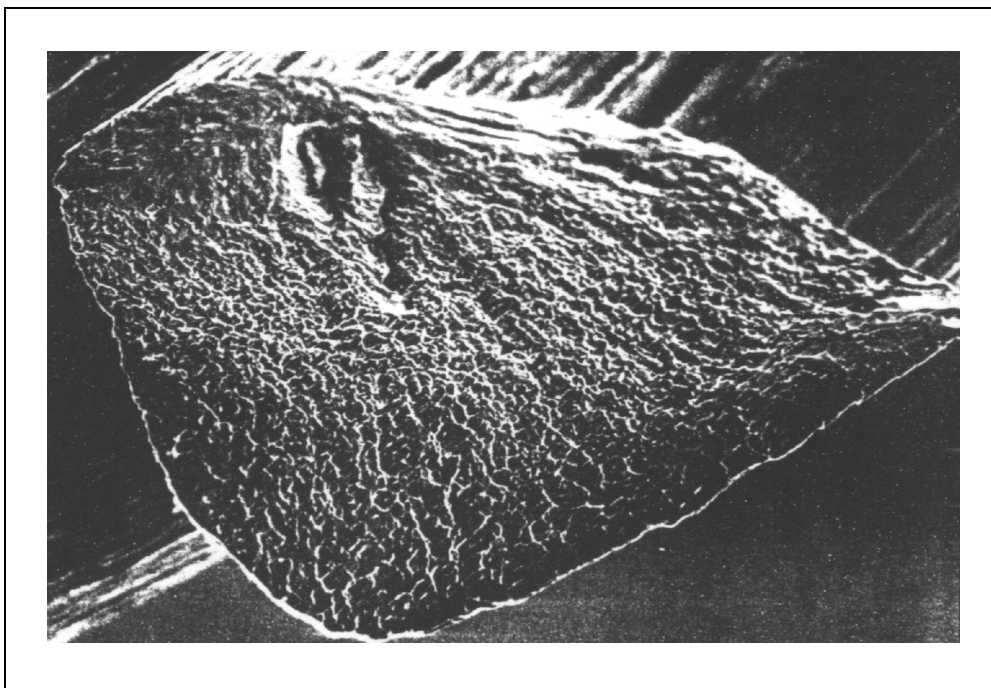


Abb. 47: Bruchfläche einer intermaxillären Sentalloy Zugfeder

In Abb. 48 ist die Kennlinie einer langen Feder vor und nach dem Wechsellastversuch dargestellt. Die Hystereseschleife wurde deutlich schmaler, und die Kennlinie war zu niedrigeren Kraftwerten hin verschoben.

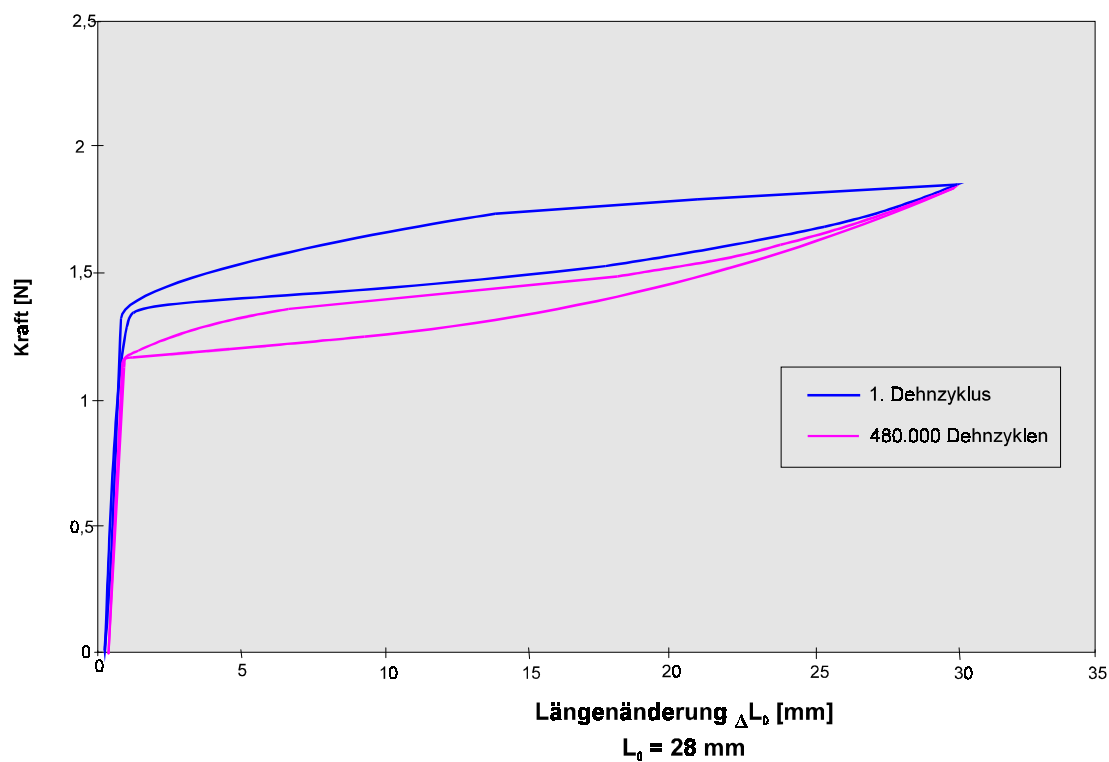


Abb. 48: Kennlinie einer langen Feder vor und nach dem Wechsellastversuch

5.2.3 Kennlinien der Federn im Temperaturvergleich

Pseudoelastische intermaxilläre Zugfedern zeigen eine grundsätzliche Abhängigkeit der Federkraft von der Umgebungstemperatur.

Bei den getesteten Federn stieg die Höhe des Plateaubereichs der Kennlinie um ca. 25%, wenn die Umgebungstemperatur von 20° C auf 40° C erhöht wurde. Außerdem wurde die Hystereseschleife schmaler.

In Abb. 49 ist die Kennlinie einer 28 mm langen intermaxillären Zugfeder bei 20° C und 40° C zu sehen.

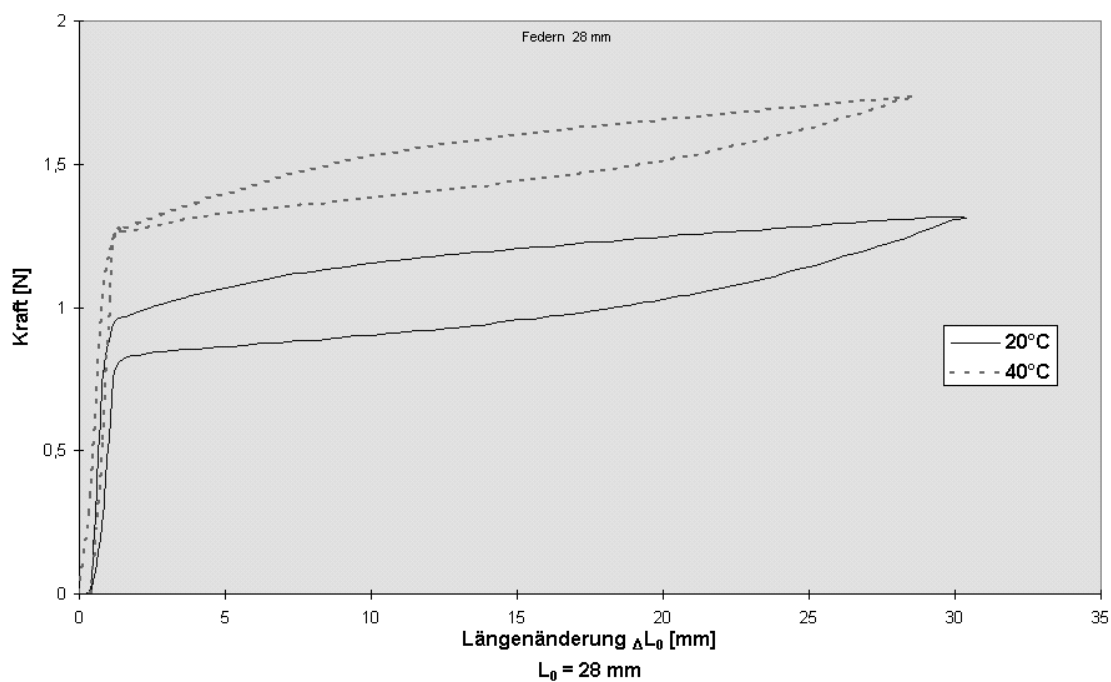


Abb. 49: Kennlinie einer Feder der Länge 28 mm bei 20° C und 40° C

6 Diskussion

6.1 Vergleich der Resultate der Versuche mit Gummizügen mit denen anderer Autoren

Obwohl Gummizüge schon sehr lange klinisch eingesetzt werden, ist es nur schwer möglich, Informationen über deren chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften zu erhalten. Dies liegt zum einen daran, daß die Herstellerfirmen die chemische Zusammensetzung geschützt halten und sowohl über Latex Elastiks als auch über die synthetisch hergestellten Alastiks keine genauen Produktinformationen und Anwendungsempfehlungen geben.

Voraussetzung für eine erfolgreiche kieferorthopädische Therapie mit Kraftmodulen ist, die Kraftübertragung auf das dentoalveoläre System so konstant wie möglich zu gewährleisten. Üblicherweise werden die Gummizüge täglich vom Patienten selbst gewechselt. Dies geschieht zum einen aus Gründen der Hygiene, zum anderen aber auch, um den entstehenden Kraftverlust der Gummizüge nach einer gewissen Zeit zu kompensieren. Zugleich erfordert das Wechseln eine gute Compliance des Patienten, was bei fehlender Motivation, manueller Ungeschicklichkeit, Behinderung o.ä. einen erheblichen Nachteil bei der Verwendung von Gummizügen darstellt.

Die Eigenschaften der Gummizüge wurden von vielen Autoren in den vergangenen Jahren untersucht und beschrieben, jedoch mit zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Meist wurde die Relaxation – also der Kraftabfall in einem bestimmten Zeitraum bei gleichbleibender Dehnung – in den Vordergrund gestellt [10, 12, 39, 50]. Die von den Autoren gewonnenen Ergebnisse über den Betrag des Kraftverlustes durch Relaxation bei Gummizügen aus Latex sind sehr widersprüchlich; die Angaben variieren zwischen 17% und mehr als 50%. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, daß mehrere Effekte das Kraft-Dehnungs-Verhalten der Gummizüge beeinflussen und die Relaxation dabei eine wichtige Komponente ist. Die Größenordnung des Kraftverlustes durch Relaxation liegt jedoch weit unter dem von *Bertl* [10] angegebenen Wert von 30% bis zu 50% innerhalb der ersten 8 Stunden. In seinen Messungen verwendete *Bertl* Meßbretter, auf denen die Gummizüge und Alastik-Ketten aufgespannt wurden; anschließend konnte mit einem Übertragungszirkel und einer Federwaage die Kraftabgabe nach bestimmten Zeitabständen gemessen werden. Ein Grund für die sehr hohe Kraftabnahme der Gummizüge in den Messungen von *Bertl* besteht darin, daß die Gummizüge einer relativ starken Aktivierung zwischen 21 mm und 35 mm ausgesetzt wurden. Die Kraftreduktion war umso höher, je größer die Dehnung der Gummizüge war. Nichtsdestotrotz sind die Werte, die bei einer Aktivierung um 21 mm gemessen wurden, zwischen 30% und 41% sehr hoch und lassen auf einen Fehler bei der Übertragung vom Meßblock auf die Federwaage schließen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Kraftwerte direkt alle 2,5 Minuten über den Zeitraum von 24 Stunden aufgezeichnet. Somit war kein Umsetzen der Gummizüge auf eine Meßvorrichtung notwendig. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen einen Abfall der Rückstellkraft zwischen 8% und 15% nach 24 Stunden bei einer Längenänderung um 22 mm von der Ausgangslänge und liegen damit den von *Bishara* und *Andreasen* [12] angegebenen 17,2% nach 24 Stunden wesentlich näher.

Der Kraftabfall der Gummizüge findet vor allem initial, d.h. innerhalb der ersten zwei bis drei Stunden, statt (vgl. 5.1.3) und bleibt danach weitestgehend konstant. Ähnliche Werte für den Kraftabfall durch Relaxation werden auch von *Bell* [8] sowie von *Messner* [49] angegeben. Diese liegen zwischen 9% und 20%.

Bishara und *Andreasen* [12] konstatierten außerdem, daß es keinen Unterschied macht, ob die Gummizüge in Wasser oder in künstlichem Speichel getestet werden. Dennoch fand sich ein deutlicher Unterschied in der Kraftabgabe von synthetischen Kraftmodulen, die von *Ash* und *Nikolai* [3] in Wasser und in vivo über drei Wochen hinweg getestet wurden. Die von ihnen festgestellten Unterschiede in der Kraftreduktion zwischen in vivo und in vitro getesteten Alastiks wurden erst nach einem Zeitraum von einer Woche signifikant. Sie mutmaßten einen Einfluß durch Temperaturwechsel, die in der Mundhöhle stattfinden.

Aus diesem Grund erstellten *De Genova* und Mitarbeiter [24] eine Versuchsanordnung, die den Einfluß thermischer Alterung bestimmen sollte. Zu ihrer Überraschung kamen sie zu dem Ergebnis, daß die Kraftreduktion von synthetisch hergestellten elastischen Kraftmodulen (Alastiks) unter den Bedingungen der thermischen Alterung geringer ist als bei den im Wasserbad mit konstanter Temperatur von 37° C getesteten Modulen.

Die in der vorliegenden Untersuchung getesteten Latex-Gummizüge wiesen nach einer thermischen Alterung keine Veränderung der Kennlinie auf, wurden durch diese also nicht in ihrem Kraft-Weg-Verhalten beeinflusst. Die Umgebungstemperatur hatte nur einen geringen Einfluß auf die Kennlinie. Im Vergleich des Kraft-Weg-Verhaltens der Gummizüge bei einer Temperatur im Wasserbad bei 20° C und bei 40° C wurde die Hystereseffläche der Kennlinie schmaler, die entwickelte Kraft blieb jedoch annähernd gleich. Dies läßt darauf schließen, daß sowohl Alastiks als auch Elastiks von Temperaturschwankungen in der Mundhöhle weiter nicht beeinträchtigt werden.

Es stellt sich nun die Frage, wo die Unterschiede zwischen einer Belastung im Mund und in den Versuchsaufbauten zu suchen sind und woher die Abweichung der Werte für die Kraftreduktion der Elastiks bei in vitro- und in vivo-Versuchen kommen.

Durch die in der Mundhöhle stets vorhandenen dynamischen Belastungen kommt ein weiterer Faktor für die Kraftreduktion hinzu. Besonders deutlich wird die Beanspruchung bei intermaxillären Gummizügen, die immer einer Wechselbelastung beim Öffnen und Schließen des Mundes unterworfen sind. Dieser Effekt überlagert den Kraftverlust, der durch Relaxation auftritt.

Der in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Wechsellastversuch hat gezeigt, daß durch Wechselbelastung der Gummizüge zum einen die Hystereseffläche kleiner wird, zum anderen aber auch eine Verschiebung der Hystereseschleife zu niedrigeren Kraftwerten hin festgestellt werden kann. Nach einer Belastung mit 30.000 Lastwechseln betrug der Kraftverlust der Gummizüge zwischen 10% und 15% der Ursprungskraft. Der Kraftverlust der Gummizüge bei Wechselbelastung war innerhalb der ersten 5000 Lastwechsel am größten und nahm danach kontinuierlich ab.

Bei der Aufzeichnung des Kraft-Weg-Verhaltens der Gummizüge ergaben sich oft erhebliche Abweichungen in der Kraftentwicklung der Gummizüge innerhalb einer Größe und Stärke. Die Streubreite der entwickelten Kraftwerte in einer Gruppe von 10 gleichen Gummizügen lag zwischen 0,2 N und 1 N bei einer Längenänderung um 30 mm von der

Ausgangslänge. Dabei waren die Unterschiede bei stärkeren Gummizügen einer Größe ausgeprägter als bei den schwächeren. Diese Differenzen in der Kraftentwicklung lagen in einer Größenordnung von 26% bis 33% der Ausgangskraft eines Gummizugs.

Hinweise auf Streubreiten gleicher Gummizüge finden sich auch bei *Messner* und *Droschl* [49], die Gummizüge mit einem Gewicht von 1 N dehnten. Sie erkannten allerdings größere Abweichungen bei schwächeren Gummizügen. In Folge der Dehnung mit dem Gewicht von 1 N wurden die schwächeren Gummizüge weiter gedehnt als die stärkeren und zeigten deshalb sehr wahrscheinlich auch eine größere Abweichung.

Ein Verdrillen der Gummizüge beim Einhängen führt nach der vorliegenden Untersuchung nicht zu einer Steigerung der Kraftentfaltung, so daß diese auch leicht gedreht einligiert werden können. *Miethke* [50] kam bei seiner Untersuchung mit synthetisch hergestellten elastischen Ketten und Fäden zu einem anderen Ergebnis. Er stellte eine größere Kraftentfaltung bei verdrillt einligierten elastischen Fäden fest. Offenbar verhalten sich die synthetisch hergestellten Materialien auch in diesem Punkt anders als Latex-Produkte.

6.2 Vergleich der Resultate der Versuche mit Ni-Ti-Federn mit denen anderer Autoren:

Die Kennlinien der Ni-Ti-Federn zeigten den pseudoelastischen Effekt einer Formgedächtnislegierung. Das Kraft-Dehnungs-Diagramm einer solchen intermaxillären Zugfeder zeigte eine Transformationshysterese. Während einer Aktivierung der Federn kam es innerhalb des ersten Millimeters zu einem schnellen linearen Kraftanstieg bis ca. 1,3 N. Danach stieg die entwickelte Kraft einer solchen Feder bis zu einer Dehnung um 100% ihrer Ausgangslänge nur noch um ca. 0,3 – 0,4 N an. Bei der Entlastung einer Feder nahm die Kraft auf den ersten Millimetern stärker ab, blieb jedoch dann über einen weiten Bereich nahezu konstant.

Die Federn aller drei Längen zeigten die gleiche Höhe des Plateaus der Kennlinie und bestätigen die vom Hersteller gemachte Angabe des mittleren Arbeitsbereichs von 1,5 N. Lediglich die Länge des Plateaubereichs ist entsprechend der Federlänge unterschiedlich. Hier empfiehlt der Hersteller, die Federn in einem Arbeitsbereich bis zu 100% ihrer Ausgangslänge zu verwenden.

Die Streubreite der entwickelten Kraftwerte bei Federn gleicher Länge lag mit bis zu 0,23 N sehr niedrig und ermöglicht ein gutes Kräftegleichgewicht bei bilateraler Verwendung der Federn.

Die Änderung der Kraftentfaltung einer 28 mm langen Feder bei Erwärmung von 20° C auf 40° C betrug annähernd 25%, während die Hysterese fläche nur geringfügig schmaler wurde. Da die Temperatur der Mundhöhle annähernd konstant ist, bedeutet dies jedoch keinen Nachteil der Federn. Vielmehr können die Federn aufgrund der Temperaturabhängigkeit vom Hersteller auf genaue Kraftwerte eingestellt werden.

Die Kennlinie der pseudoelastischen Federn hängt in erster Linie von der Umwandlungstemperatur (A_s) der verwendeten Legierung ab. *Miura* [53] hat 1988 den Einfluß von Drahtdurchmesser, Federdurchmesser und A_s -Temperatur auf das Kraft-Weg-Verhalten von Sentalloy Zug- und Druckfedern untersucht.

Die Umwandlungstemperatur (A_s) kann über geringfügige Änderungen im Nickelgehalt der Legierung eingestellt werden. Die Kraftwerte der Federn steigen analog zu Zugfedern aus Stahl durch Erhöhung des Drahtdurchmessers bzw. durch Verkleinerung des Federdurchmessers.

In ersten klinischen Erfahrungen mit den intermaxillären Zugfedern kam es immer wieder zu einem spontanen Bruch der Federn bereits nach kurzer Zeit – meist schon am ersten Tag. Das stellt aufgrund des notwendigen Federwechsels durch den Behandler sowie die Verletzungsgefahr des Patienten eine sehr unangenehme Komplikation dar, die der Hersteller durch falsches Einhängen der Federn und dadurch auftretende Überlastung erklärt.

Der Versuch 4.2.2.2 beweist, daß einige der Federn auch bei axialer und gleichförmiger Belastung im Zugversuch nach kurzer Zeit brechen. Davon sind besonders die kurzen Federn betroffen.

Das Kraft-Dehnungs-Verhalten der intermaxillären Zugfedern ändert sich durch zyklische Belastung, wie sie in der Mundhöhle durch Öffnungs- und Schließbewegung auf die Federn übertragen wird. Dies zeigen die Kennlinien der Federn nach dem Wechsellastversuch; sie wurden durch eine Abnahme der Spannung zur Martensitinduzierung charakterisiert. Die Hystereseschleife wurde deutlich schmaler, und die Kennlinie war zu geringeren Kraftwerten hin verschoben. Diese Veränderungen waren initial am größten, so daß nach einigen Verformungszyklen praktisch keine weiteren Veränderungen mehr auftraten.

Die Ergebnisse stimmen mit den von *Tauzenberger* [67] durchgeführten Untersuchungen überein. Darüber hinaus beobachtete er eine bleibende Formänderung und wies auf eine Stabilisierung der Kurvenform bei Wechselbelastung pseudoelastischer Materialien nach etwa 50 bis 100 Verformungszyklen hin.

Mohlin [54] stellte 1991 bei Ni-Ti-Drähten eine überraschend hohe Bruchrate fest. Im klinischen Einsatz trat seinen Beobachtungen zufolge bei durchschnittlich 16% der Nitinol-Drähte und bei 28,3% der Chinese-Ni-Ti-Drähte ein Bruchversagen auf. Mehr als die Hälfte der Bruchereignisse wurde während des ersten Monats nach Einsetzen der Drähte registriert. Bei seinen experimentellen Untersuchungen ergaben sich jedoch keinerlei Hinweise auf eine höhere Bruchempfindlichkeit der Ni-Ti-Drähte.

Drescher und Mitarbeiter [30] entwickelten 1994 eine Meßmethode, um das bis dahin nur wenig untersuchte Dauerbruchverhalten pseudoelastischer Legierungen an handelsüblichen Ni-Ti-Drähten zu bestimmen (vgl. Seite 20). Im Versuch brachen Ni-Ti-Runddrähte nach 10^5 Belastungszyklen bei Kräften zwischen 1,2 und 3,1 N. Stahldrähte brachen erst bei Kräften um 4,4 N. Die optimaleren Eigenschaften der Legierung in Bezug auf das Kraft-Dehnungs-Verhalten muß ihren Aussagen zufolge durch eine etwa 20% bis 70% verminderte Belastbarkeit gegenüber den in der Mundhöhle immer vorhandenen dynamischen Belastungen in Kauf genommen werden.

Die dynamischen Belastungen der intermaxillären Federn ist gegenüber den fest einligierten Bögen noch um ein vielfaches höher. Dies geht mit einer weiteren Erhöhung der Bruchgefahr einher.

6.3 Zusammenfassender Vergleich von Gummizügen und pseudoelastischen Ni-Ti-Federn:

Bei der Literaturrecherche war keine Publikation zu finden, die einen Vergleich zwischen pseudoelastischen Zugfedern und elastischen Kraftmodulen herstellt. Eine Untersuchung von *Bell* [8] beschäftigt sich mit einem Vergleich zwischen coil springs aus Stahl und Latex-Gummizügen. *Bell* sieht die Vorteile der coil springs vor allem in der Tatsache, daß sie eine konstante Kraft übertragen können und so über eine längere Zeit im Mund belassen werden können, wohingegen die elastischen Züge schnell an Kraft verlieren.

Diese Feststellung ist für einen Vergleich zu den intermaxillären Federn annähernd übertragbar, da die pseudoelastischen Federn genau wie Federn aus Stahl durch das Mundmilieu nicht angegriffen werden und ihre Kraft über eine längere Zeit hinweg konstant bleibt. Der wesentliche Unterschied der pseudoelastischen Federn im Vergleich zu Stahlfedern ist jedoch, daß sie eine den Gummizügen sehr ähnliche Kennlinie aufweisen. Sowohl Latex-Elastiks als auch Ni-Ti-Federn zeigen eine Hystereseform der Kennlinie. Ni-Ti-Federn sind in ihrem Kraft-Weg-Verhalten den Gummizügen aus Latex jedoch überlegen, da sie sich durch eine Transformationshysterese auszeichnen. Diese wird von einem Plateau geprägt, die eine nahezu konstante Kraftabgabe über einen weiten Bereich der Dehnung ermöglicht. Die Kennlinien der Gummizüge sind steiler, wodurch es über eine größere Dehnungsstrecke zu starken Kraftschwankungen bzw. Kraftspitzen kommt.

Deshalb ermöglichen die pseudoelastischen Federn durch einen exakt eingestellten Arbeitsbereich von ca. 1,5 N eine konstante und definierte Kraftübertragung auf das den-toalveoläre System.

Marnhartsberger [46] hat diese Vorteile der Legierung besonders hervorgehoben, jedoch auch eine Kraftreduktion nach einer vierwöchigen Aktivierungszeit von intramaxillären Federn festgestellt.

Die vorliegende Untersuchung zeigte auch eine Kraftreduktion der Ni-Ti-Federn im Wechsellastversuch, die jedoch mit weit unter 20% nach 480.000 Lastwechseln recht gering war. Eine genaue Zahl konnte nicht ermittelt werden, da die meisten Federn im Versuch gebrochen waren. Hingegen verlieren die Gummizüge weit mehr an Kraft, da sich mehrere Effekte, die zur Kraftreduktion führen, überlagern. Es ist anzunehmen, daß die Gummizüge unter Mundbedingungen bis zu 30% ihrer Ursprungskraft durch Relaxation und Wechselbelastung verlieren.

Ein Hauptvorteil der Federn liegt darin, daß sie nahezu unabhängig von der Compliance der Patienten eingesetzt werden können. Das tägliche Wechseln der Gummizüge stellt oft einen erheblichen Nachteil der Gummizüge dar. Dem steht jedoch wiederum entgegen, daß Ni-Ti-Federn selbst bei exakter Handhabung schon nach kurzer Zeit brechen können und ein erneutes Einligieren notwendig machen. Dies erfordert einen erheblich höheren Zeitaufwand am Behandlungsstuhl und stellt zudem eine Kostenfrage dar. Gummizüge dagegen sind einfach vom Patienten zu handhaben und kostengünstig.

Im Gegensatz zu den Gummizügen zeigen pseudoelastische Federn eine starke Temperaturabhängigkeit, die jedoch aufgrund der in der Mundhöhle annähernd konstanten Temperatur von 37° C kein Problem darstellt. Vielmehr kann der Hersteller die Federn so durch Veränderung der Legierungszusammensetzung auf eine definierte Kraftabgabe hin einstellen.

Bei Aufzeichnung der Kennlinien der Federn konnte nur geringe Streubreite in der Kraftentwicklung festgestellt werden, wohingegen die Kraftentfaltung bei Dehnung gleicher Gummizüge eine erhebliche Streubreite zeigte. Diese lag mit 26% – 33% in der Größenordnung des Kraftabfalls der Gummizüge durch Relaxation und Wechselbelastung.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß das tägliche Wechseln der Gummizüge aufgrund der Kraftreduktion nicht unbedingt notwendig erscheint. Mehrere Autoren geben auch eine andere Empfehlung zur Tragedauer der Elastiks als die allgemein praktizierte Vorgehensweise, die Gummizüge täglich zu wechseln.

Andreasen und *Bishara* [12] vertreten die Ansicht, daß man elastische Kraftelemente gerade wegen des starken initialen Kraftverlustes nicht täglich wechseln sollte, sondern von der danach recht gleichmäßigen Kraftübertragung profitiert, wenn man die Kraftmodule längere Zeit im Mund beläßt. Dem widerspricht *Person* [58], da die initiale Kraft für die biologischen Strukturen zu hoch sein könnte und die verbleibende Kraft für eine optimale Zahnbewegung nicht mehr ausreicht. Auch *Booy* [13] empfiehlt intermaxilläre Gummizüge länger zu tragen, da so gute Kräfte zwischen 0,6 N und 0,9 N erreicht werden könnten. *Bell* [8] dagegen empfiehlt trotz eines von ihm gemessenen geringen Kraftverlustes durch Relaxation von 9% – 16% der Elastiks, die Gummizüge mindestens zwei- bis dreimal täglich zu wechseln.

Falls starke Gummizüge mit 5 bzw. 6 Unzen bilateral verwendet werden, ist zu beachten, daß möglicherweise durch die große Streubreite der Kraftwerte gleicher Gummizüge ein erheblicher Kraftunterschied auf beiden Seiten existiert, der bei einer längeren Tragedauer eine seitengleiche Verlagerung des Unterkiefers erschwert. Diese Kraftunterschiede sowie die erschwerte Hygienefähigkeit werden durch ein häufigeres Wechseln vermieden.

Die Hersteller der Gummizüge sollten möglichst genaue Produktinformationen über die Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften der von ihnen vertriebenen elastischen Materialien dem Anwender zur Verfügung stellen. Insbesondere sind Angaben zur Kraftreduktion nach isometrischer Dehnung und Wechselbelastung wünschenswert. Sehr zu empfehlen wäre auch eine definierte Vorbehandlung der Gummizüge im Sinne einer Vordehnung, die die spätere Kraftabnahme stark vermindern würde, wie dies die Arbeiten von *Brantley* [16] und *Brooks* [17] gezeigt haben. Eine spätere Vorbehandlung durch den Anwender ist aufgrund der fehlenden Einrichtung und einer einheitlichen Vorgehensweise weniger sinnvoll.

Im Wechsellastversuch wurde gezeigt, daß lange Federn eine geringere Bruchwahrscheinlichkeit haben als kurze Federn. Da die benötigte Kraft unabhängig von der Federlänge bereits nach einer Aktivierung von weniger als einem Millimeter auftritt, sollten nach Möglichkeit lange Federn verwendet werden, um das Risiko eines Federbruchs so gering wie möglich zu halten. Von Herstellerseite aus wird sicherlich zu prüfen sein, ob durch Änderung der materialtechnischen Parameter der Federlänge, des Windungsdurchmessers sowie des Drahtdurchmessers eine Verbesserung des Dauerbruchverhaltens erreichbar ist.

Die Möglichkeit, Gummizüge aus Latex durch intermaxilläre Ni-Ti-Federn zu ersetzen, erscheint aus den genannten Nachteilen der Federn sehr ungünstig. Der erhöhte Zeitaufwand, der nach einem Federbruch zum Ersatz der Federn nötig ist, kehrt den eigentlichen Vorteil der Federn – den geringeren Zeitaufwand am Behandlungsstuhl und die weitgehende Unabhängigkeit von der Compliance des Patienten – in das Gegenteil um. Darüber hinaus fallen die erheblichen Mehrkosten für die Federn im Vergleich zu den Gummizügen ins

Gewicht. In Fällen einer Latex-Allergie oder einer anderen Krankheit des Patienten, die ihm z.B. ein selbständiges Wechseln der Gummizüge unmöglich macht, stellen intermaxilläre Federn jedoch eine gute Alternative dar.

Im Gegensatz zu den stark variierenden Ergebnissen der Versuche bezüglich der Kraftreduktion bei Alastiks [10, 12, 61, 62,] – hier hängt sehr viel vom einzelnen Produkt und seiner chemischen Zusammensetzung ab – zeigten Gummizüge aus Latex in den Versuchen eine voraussagbare Veränderung des Kraft-Dehnungs-Verhaltens durch Relaxation und zyklische Beanspruchung. Dies ermöglicht dem Kliniker in Fällen, in denen ein längeres Einligieren von Kraftmodulen aus Latex erforderlich ist, die Größenordnung der initialen Kraftreduktion zu bedenken und entsprechend stärkere Gummizüge zu verwenden.

7 Zusammenfassung

Bei einer Behandlung mit festsitzenden Apparaturen stehen für Zahnverschiebungen in mesio-distaler Richtung und zur Okklusionseinstellung seit 1993 als Alternative zu Gummiringen aus Latex Zugfedern aus der Nickel-Titan-Legierung Sentalloy zur Verfügung.

Die vorliegende Untersuchung zeigt die materialtechnischen Besonderheiten der beiden Werkstoffe auf und beschreibt die Vor- und Nachteile in der klinischen Anwendung der Gummizüge und der Federn.

Es wurden Gummizüge aus Latex vonOrmco Dental (Glendora) in den Größen 3/16, 1/4 und 5/16 inch in jeweils drei verschiedenen Stärken sowie pseudoelastische, Ni-Ti-Federn von GAC Int. Inc. (New York) untersucht. Dazu wurden in der Universalprüfmaschine Zwick 1421 die Kennlinien der verschiedenen Kraftelemente aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde der Kraftabfall der Gummizüge durch isometrische Dehnung und durch Wechsellastversuche bestimmt sowie der Einfluß einer thermischen Alterung auf die Gummizüge untersucht. In einem Wechsellastversuch mit pseudoelastischen Federn wurde die Anzahl der Federbrüche innerhalb von 480.000 zyklischen Belastungen registriert.

Die untersuchten Gummizüge zeigten eine für elastische Materialien typische Hystereseform der Kennlinie.

Die Kennlinien pseudoelastischer Zugfedern wiesen eine Transformationshysterese mit einer über mehrere Millimeter annähernd konstanten Kraftabgabe auf.

Bei Dehnung von Gummizügen derselben Größe zeigten stärkere Gummizüge größere Abweichungen in der Kraftentfaltung als schwächere Gummizüge. Insgesamt lagen solche Streubreiten zwischen 26% und 33%.

Bei Dauerbelastung der Gummizüge blieb die Kraftabgabe der Gummizüge nach geringem initialen Abfall annähernd konstant.

Es wurde nachgewiesen, daß die Kraftabgabe der Gummizüge bei isometrischer Dehnung innerhalb von 24 Stunden zwischen 8% und 15% fällt. Bei Wechsellastversuchen mit insgesamt 30.000 Lastwechseln verloren die Gummizüge etwa 10% – 15% ihrer Ursprungskraft.

Thermische Alterung zeigte keinen Einfluß auf die Kraftentfaltung der Gummizüge.

Grundsätzlich wiesen beide Materialien eine Temperaturabhängigkeit der Kennlinie auf. Während sich bei beiden Materialien die Hystereseffläche der Kennlinie bei höheren Temperaturen verschmälert, wird bei pseudoelastischen Federn zudem das Plateau der Kennlinie zu deutlich höheren Kraftwerten hin verschoben.

Im Wechsellastversuch mit pseudoelastischen Federn kam es trotz gleichförmiger, axialer Belastung häufig zum spontanen Bruch der Federn. Die Kennlinie wies nach Wechselbelastung eine schmalere Hystereseffläche und ein zu geringeren Kraftwerten hin verschobenes Plateau der Kennlinie auf.

Aus diesen Resultaten läßt sich für den klinischen Einsatz ableiten, daß es sinnvoll ist, längere Federn zu verwenden, da die Wahrscheinlichkeit eines Federbruchs mit steigender Federlänge sinkt.

Der Behandler kann bei Kenntnis der werkstoffkundlichen Eigenschaften der Gummizüge den Kraftabfall der Gummizüge bestimmen und entsprechend stärkere Gummizüge verwenden, falls diese längere Zeit einligiert werden sollen.

Um die Gummizüge für die Nutzung in den werkstoffkundlichen Eigenschaften zu optimieren, könnten die Hersteller der Gummizüge mit einer Vordehnung des Ausgangsmaterials eine spätere Verminderung der Rückstellkraft in der klinischen Anwendung minimieren.

Bei der Herstellung von intermaxillären Zugfedern würde – da die Brüche hier meist im Bereich der Federenden auftreten – eine Erhöhung des Windungsdurchmessers in diesem Bereich zu einer Spannungsreduzierung führen; die Wahrscheinlichkeit für einen Federbruch würde sinken.

8 Literatur

1. Andreasen, G.F.:
Treatment Advantages Using Nitinol Wire Instead of 18-8 Stainless Wire with the Edgewise Bracket.
Quint Int 12, 43–51, 1980
2. Andreasen, G.F., Brady, P.R.:
A Use Hypothesis for 55 Nitinol Wire for Orthodontics.
Angle Orthod 55, 172–177, 1972
3. Ash, J.L., Nikolai, R.J.:
Relaxation of Orthodontic Elastomeric Chains and Modules In Vitro and In Vivo.
J Dent Res 57, 685–690, 1978
4. Bachmann, J.:
Torque-Eigenschaften von Stahl- und Nitinol-Drähten.
Fortschr Kieferorthop 44, 311–315, 1983
5. Bales, T.R., Chaconas S.J., Caputo A.A.:
Force-extension characteristics of orthodontic elastics.
Am J Orthod 72, 296–302, 1977
6. Bargel, H.J., Schulze, G.:
Werkstoffkunde.
Hermann Schroedel Verlag, Hannover, 2. Auflage, 113–122, 285–352, 1980
7. Baumgart, F., Jorde, J., Reiß, H.G.:
Memory-Legierungen – Eigenschaften, phänomenologische Theorie und Anwendung.
Tech Mitt Krupp 34, 1–16, 1976
8. Bell, W.R.:
A Study of Applied Force as Related to the Use of Elastics and Coil Springs.
Angle Orthod 21, 151–154, 1951
9. Bensmann, G., Baumgart, F., Hartwig, J.:
Untersuchungen der Memory-Legierung Nickel-Titan und Überlegungen zu ihrer Anwendung im Bereich der Medizin.
Tech Mitt Krupp 37, 21–33, 1979
10. Bertl, W., Droschl, H.:
Kraftabgabe gebräuchlicher Alastics und Elastics in Abhängigkeit von Zeit und Ausdehnung.
Z Stomatol 82, 269–278, 1985
11. v. Bertram, C.:
Die Kräfte der orthodontischen Gummiligatur.
Fortschritte der Orthodontik 1, 605–609, 1931
12. Bishara, S.E., Andreasen, G.F.:
A Comparison of Time Related Forces Between Plastic Alastics and Latex Elastics.
Angle Orthod 40, 319–328, 1970
13. Booy, C.:
Begg-Technik. In: Schmuth G. (Hrsg.): Praxis der Zahnheilkunde, Bd 11
(Kieferorthopädie 1) Urban & Schwarzenberg, München, 257–284, 1990

14. Bourauel, C., Drescher, D.:
Retraktion der oberen Schneidezähne mit pseudoelastischen Behandlungselementen.
Fortschr Kieferorthop 55, 36–44, 1994
15. Bourauel, C., Drescher, D., Nolte, L.P.:
Computergestützte Entwicklung kieferorthopädischer Behandlungselemente aus NiTi-Memory-Legierungen am Beispiel einer pseudoelastischen Retraktionsfeder.
Fortschr Kieferorthop 53, 45–56, 1992
16. Brantley, S.A., Salander, S., Myers, C.L., Winders, R.V.:
Effects of Prestretching on Force Degradation Characteristics of Plastic Modules.
Angle Orthod 49, 37–43, 1979
17. Brooks, D.G., Hershey, H.G.:
Effects of Heat and Time on Stretched Plastic Orthodontic Modules.
J Dent Res 55 B, 363, 1976
18. Buehler, W.J., Gilfrich, J.V., Wiley, R.C.:
Effect of lowtemperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition NiTi.
J Appl Phys 34, 1475–1484, 1963
19. Buehler, W.J., Wang, F.E.:
A summary of recent reserch on the Nitinol alloys and their potentiell application in ocean engineering.
Ocean Engng 1, 105–120, 1968
20. Burstone, C.J., Goldberg, A.J.:
Beta titanium: A new orthodontic alloy.
Am J Orthod 77, 121–132, 1980
21. Burstone, C.J., Qin, B., Morton, J.Y.:
Chinese NiTi wire – A new orthodontic alloy.
Am J Orthod 87, 445–452, 1985
22. Chang, L.C., Read, T.A.:
Plastic Deformation and Diffusionless Phast Changes in Metals – The Gold-Cadmium Beta Phase.
AIME 191, 47-52, 1951
23. Chaconas, S.J., Caputo, A.A., Kent, H.:
Orthodontic force characteristics of open coil springs.
Am J Orthod 85, 494–497, 1984
24. De Genova, D.C., Mc Innes-Ledoux, P., Weinberg, R., Shaye, R.:
Force degradation of orthodontic elastomeric chains – A product comparison study.
Am J Orthod 87, 377–384, 1985
25. Delaey, L., Aernoudt, E., Roos, J.:
Das Formerinnerungsvermögen und die hohe Dämpfung in Kupfer-Zink-Alluminium-Legierungen.
Metall 31, 1325–1331, 1977
26. Din 2089: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben, Berechnung und Konstruktion von Zugfedern. In: Deutsches Institut für Normierung e.V. (Hrsg.): Din-Taschenbuch 29 – Federn, 8. Aufl. Beuth Verlag, Berlin und Köln, 55–88, 1996

27. Din 2097: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten, Gütevorschriften für kaltgeformte Zugfedern. In: Deutsches Institut für Normierung e.V. (Hrsg.): Din-Taschenbuch 29 – Federn, 8. Aufl. Beuth Verlag, Berlin und Köln, 165–169, 1996
28. Dinges, K.:
Kautschuk und Gummi. In: Batzer, H. (Hrsg.): Polymere Werkstoffe Bd. 3, Thieme Verlag, Stuttgart, 330–387, 1985
29. Donner, P., Hornbogen, E., Zhang, Y.:
Experimentelle Methoden zur Charakterisierung des Umwandlungsverlaufes in Legierungen mit Formgedächtnis.
Metall 44, 444–449, 1990
30. Drescher, D., Bourauel, C., Sonneborn, W., Schmuth, G.P.F.:
Dauerbruchfestigkeit orthodontischer Nickel-Titan-Drähte.
Schweiz Mschr Zahnmed, Vol. 104 (5), 578–584, 1994
31. Drescher, D., Bourauel, C., Thier, M.:
Materialtechnische Besonderheiten orthodontischer Nickel-Titan-Drähte.
Fortschr Kieferorthop 51, 320–326, 1990
32. Escher, K.:
Zweiweg-Formgedächtnistraining von NiTi-Legierungen.
Metall 44, 23–28, 1990
33. Fischer, M., Kreibich, U.T., Schmid, R.:
Gummielastischer Zustand. In: Batzer, H. (Hrsg.): Polymere Werkstoffe Bd. 1, Thieme Verlag, Stuttgart, 233–248, 1985
34. Freund, H.:
Federn. In: Freund, H. (Hrsg.): Konstruktionselemente Bd. 1, Grundlagen, Verbindungselemente, Federn, Achsen und Wellen. B I Wissenschaftsverlag, Mannheim/ Wien/ Zürich, 189–221, 1991
35. Garretson, C., Stöckel, D.:
Eigenschaften und Anwendung von Shape-Memory-Steckverbindungen.
Metall 41, 22–25, 1987
36. Groß, A.:
Superelastische Drahtlegierungen und ihre Einsatzmöglichkeiten in der Kieferorthopädie.
Kieferorthop Mitt 2, 47–56, 1990
37. Groß, A.:
Zug- und Druckfedern aus superelastischen Legierungen.
Kieferorthop Mitt 3, 27–33, 1991
38. Hodgson, D.E., Biermann, R.J.:
Shape Memory Alloys. In: Davis, J., Penelope, A., Lampman, R., Zorc, T., Henry, S., Daquila, J., Ronke, A., Jackel, J., Stedfeld, R., (Hrsg.): Nonferrous Alloys and Special Purpose, Metals Handbook 2, American Society for Metals, USA, 897–902, 1990
39. Hofmann, T., Miethke, R.R.:
Das Kräfteverhalten elastischer Ligaturen.
Fortschr Kieferorthop 42, 296–304, 1981

40. Hornbogen E.:
Legierungen mit Formgedächtnis.
Pract Met 26, 279–293, 1989
41. Hornbogen, E.:
Legierungen mit Formgedächtnis – Neue Werkstoffe für die Technik der Zukunft? Metall
41, 488–493, 1987
42. Hornbogen E.:
Metallkundliche Grundlagen. In: Stöckel, D., Hornbogen, E., Ritter, F., Tauzenberger, P.
(Hrsg.): Legierungen mit Formgedächtnis, expert-Verl, Ehningen, 1–30, 1988
43. IG Farben AG:
Latex, Herstellung und Verarbeitung, Frankfurt am Main, 1935
44. Lohmann, R.:
Sprungartige Phasenübergänge in Ni-Ti-Legierungen.
Z Metallkde 81, 613–622, 1990
45. Lü, L., Aernoudt, E., Wollants, P., Humbeeck, J.V., Delaey, L.:
Simulation of Transformation Hysteresis.
Z Metallkde 81, 613–622, 1990
46. Manhartsberger, C.:
Modernste Drahtlegierungen in der Kieferorthopädie -material-technische Untersuchung
und klinische Anwendung in der kraft-systembestimmten Kieferorthopädie.
Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Quintessenz Verlag, Berlin,
1994
47. Meissner, J.:
Eigenschaften von Polymeren, Mechanisches Verhalten. In: Batzer, H. (Hrsg.):
Polymere Werkstoffe Bd. 1, Thieme Verlag, Stuttgart, 336–359, 1985
48. Mertens, H.:
Federnde Verbindungen. In: Beitz W., Küttner K.H. (Hrsg.): Taschenbuch für den
Maschinenbau/Dubbel, Springer-Verlag, 18. Aufl. Berlin, 1995, G51–G63
49. Messner, A., Droschl, H.:
Elastizitäts- und Kraftabfall von Elastics.
Zahnärztl Praxis 28: 248–251, 1977
50. Miethke, R.R., Rabe, H., Roß, D., Springer, H., Hinrichsen, G.:
Relaxationsverhalten verschiedener elastischer Züge: determinierende Einflußgrößen
unter praxisnahen Bedingungen.
Fortschr Kieferorthop 48, 464–472, 1987
51. Miura, F., Mogi, M., Ohura, Y.:
Japanese NiTi alloy wire: use of the direct electric resistance heat treatment method.
Eur J Orthod 10, 187–191, 1988
52. Miura, F., Mogi, M., Ohura, Y., Hamanaka, H.:
The super elastic property of the Japanese NiTi alloy wire for use in orthodontics.
Am J Orthod Dentofac Orthop 90, 1–10, 1986
53. Miura, F., Mogi, M., Ohura, Y., Karibe, M.:
The superelastic Japanese NiTi alloy wire for use in orthodontics. III: Studies on the
Japanese NiTi alloy coil springs.
Am J Orthod Dentofac Orthop 94, 89–96, 1988

54. Mohlin, B., Müller, H., Ödmann, J., Thilander, B.:
Examination of Chinese NiTi wire by a combined clinical and laboratory approach.
Eur J Orthod 13, 386–391, 1991
55. Newsely, H.:
Werkstoffe in der Kieferorthopädie. In: Schmuth, G. (Hrsg.): Praxis der Zahnheilkunde,
Bd. 11 (Kieferorthopädie 1) Urban & Schwarzenberg, München, 290-320, 1990
56. Olson, G.B., Cohen, M.:
Principles of Martensitic Transformations. In: Meyers, M., Inal, O. (Hrsg.): Frontiers in
Materials Technologies, Elsevier Science Publishing Company Amsterdam/ Oxford/
New York/ Tokyo, 38–92, 1985
57. Paulich, F.:
Measuring orthodontic forces.
Am J Orthod 25, 817–849, 1939
58. Persson, L., Kiliaridis, S., Lennartsson, B.:
Comparative studies on orthodontic elastic threads.
Eur J Orthod 5, 157–166, 1983
59. Reichle, R.:
Nichtlineares Kraft-Weg-Verhalten von superelastischen Federn und Magneten in der
Kieferorthopädie.
Med Diss, Universität Freiburg, 1993
60. Ritter, F., Stöckel, D.:
Anwendung des Formgedächtniseffektes in der Kontakttechnik. In: Stöckel, D.,
Hornbogen, E., Ritter, F., Tauzenberger, P. (Hrsg.): Legierungen mit Formgedächtnis,
expert-Verlag, Ehningen, 152–174, 1988
61. Rock, W.P., Wilson, H.J., Fisher, S.E.:
Force reduction of orthodontic elastomeric chains after one month in the mouth.
Br J Orthod 13, 147–150, 1986
62. Rock, W.P., Wilson, H.J., Fisher, S.E.:
A Laboratory Investigation of Orthodontic Elastomeric Chains.
Br J Orthod 12, 202–207, 1985
63. Rumpel, G., Sonderhausen, H.D.:
Festigkeitslehre. In: Beitz, W., Küttner, K.H. (Hrsg.): Taschenbuch für den
Maschinenbau/Dubbel, Springer-Verlag, 15. Aufl., Berlin, 179–209, 1983
64. Sander, G.F.:
Festigkeit und Elastizität kieferorthopädischer Drähte unter Berücksichtigung der
superelastischen Materialien.
Kieferorthop Mitt 4, 489–500, 1990
65. Stöckel, D.:
Formgedächtnis und Pseudoelastizität von Nickel-Titan-Legierungen.
Metall 41, 494–500, 1987
66. Stöckel, D.:
Formgedächtnislegierungen. In Stöckel, D., Hornbogen, E., Ritter, F., Tauzenberger, P.
(Hrsg.): Legierungen mit Formgedächtnis, expert-Verlag, Ehningen, 31–63, 1988

67. Tauzenberger, P.:
Anwendung des Superelastizitätseffektes und des Dämpfungsvermögens von Formgedächtnislegierungen. In Stöckel, D., Hornbogen, E., Ritter, F., Tauzenberger, P. (Hrsg.): Legierungen mit Formgedächtnis, expert-Verlag, Ehningen, 175–190, 1988
68. Tauzenberger, P.:
Shape-Memory-Stellelemente. In: Stöckel D., Hornbogen E., Ritter F., Tauzenberger P. (Hrsg.): Legierungen mit Formgedächtnis, expert-Verlag, Ehningen, 64–102, 1988
69. Tauzenberger, P.:
Superelastisches Verhalten von Formgedächtnislegierungen.
Metall 43, 241–245, 1989
70. Tauzenberger, P., Stöckel, D.:
Anwendung von Formgedächtnislegierungen in der Technik.
Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung (ZwF) 81, 703–708, 1986
71. Tauzenberger, P., Stöckel, D.:
Vergleich der Eigenschaften von Thermobimetallen und Memoryelementen.
Metall 41, 26–32, 1987
72. Thayer, T.A.:
X-ray diffraction of NiTi alloy orthodontic archwires.
Am J Orthod Dentofac Orthop 102, 572–573, 1992
73. Thier, M.:
Formgedächtniswerkstoffe für Implantate, Instrumente und externe Applikationen in der Medizin; Anwendungen und Chancen in der Zukunft.
Metall 44, 29–33, 1990
74. Willmes, A.:
Taschenbuch Chemische Substanzen: Elemente-Anorganika-Organika-Naturstoffe-Polymere. Harri Deutsch Verlag, Frankfurt/ Main, 474–476, 1993
75. Wong, A.K.:
Orthodontic elastic materials.
Angle Orthod 46, 196–205, 1976

Dank

Ich danke Herrn Professor Dr. Schopf für die Überlassung des Themas sowie die freundliche Unterstützung und konstruktive Zusammenarbeit.

Ferner danke ich Herrn Professor Dr. Hohmann für die Möglichkeit, die vorliegende Untersuchung in den werkstoffwissenschaftlichen Labors im Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Klinikums der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main durchzuführen.

Besonders möchte ich auch Herrn Dr. Reichle für die Unterstützung bei der Bewerksstellung dieser Untersuchung sowie für die Beratung in kieferorthopädischen Fragen und bei anderen auftretenden Problemen danken. Herrn Dr. Kocjancic danke ich für die Unterstützung zur Erstellung der Versuchsaufbauten und GAC Int. Inc. (New York) für die Bereitstellung der Federn.

Tabellarischer Lebenslauf

Name: Stefan Buch

geboren: 08.06.68 als Sohn von Irmgard Buch, geb. Munz,
und Walter Buch in Hofheim am Taunus

Anschrift: Friedensstr. 31
65719 Hofheim am Taunus

Familienstand: ledig

Besuchte Schulen: Grundschule am Steinberg / Hofheim
1974 - 1984 Elisabethenschule (Realschule) / Hofheim

Berufsausbildung: 3½ jährige Ausbildung zum Zahntechniker im
09.1984 – 01.1988 Dentallabor W. Weiß in Hofheim

Zivildienst: 20 Monate Dienst im Sozialen Therapeutischen
02.1988 – 09.1989 Drehpunkt in Hofheim (mobiler sozialer Hilfsdienst)

Berufstätigkeit: Tätigkeit als Zahntechniker im Dentallabor W.Weiß
10.1989 – 09. 1992 in Hofheim, ab 1991 in Teilzeitarbeit

Weiterführende Schulen: Abendgymnasium Wiesbaden
10.1989 – 06.1992 abgeschlossen am 02.06.1992 mit Abitur

Studium: Studium der Zahnmedizin an der J.W.Goethe-
WS 1992 – SS 1997 Universität in Frankfurt am Main

21.09.93 Naturwissenschaftliche Vorprüfung
28.03.95 Zahnärztliche Vorprüfung
09.12.97 Zahnärztliche Prüfung

Seit 01.01.98 Weiterbildungsassistent im Fach Oralchirurgie in der
Praxis für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie von
Dr. Dr. Aderhold und Dr. Dr. Jung in Frankfurt/Main

Frankfurt am Main, 12. April 1999



Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die dem Fachbereich Humanmedizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel:

Vergleichende Kraft-Dehnungs- und Dauerlastversuche mit kieferorthopädischen Gummizügen und pseudoelastischen Ni-Ti-Federn

in der Poliklinik für Kieferorthopädie im Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Klinikums der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. P. Schopf ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Medizinischen Fakultät bzw. einem Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht noch die vorliegende Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Frankfurt am Main, 12. April 1999

