

4 Materialien und Methode

Zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften lasergeschweißter superelastischer orthodontischer Bögen mehrerer Hersteller wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Aus der Vielzahl der von den Herstellern angebotenen und in der kieferorthopädischen Technik für spezifische Anwendungen indizierten Dentallegierungen wurden für diese Studie repräsentative Vertreter ausgesucht. Im Folgenden werden zunächst die ausgewählten orthodontischen Drähte vorgestellt. Anschließend wird der Versuchsaufbau systematisch in der Reihenfolge der durchgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben: Schweißvorrichtung, angewandtes Lasersystem sowie Biegemessplatz zur Ermittlung der Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme.

4.1 Drähte

In die vorliegende Studie wurden 8 orthodontische Bögen von drei verschiedenen Anbietern einbezogen. Von den ausgewählten Materialien wurden jeweils 50 Drähte (fünf Packungen mit je zehn Drahtbögen) untersucht. Jeder Draht wurde in 4 annähernd gerade Drahtsegmente à 2 cm zerteilt, von denen anschließend je zwei lasergeschweißt und danach im Biegeversuch geprüft worden sind (vgl. 4.2.3). Insgesamt wurden somit 800 Proben untersucht. Jeweils 5 Drähte einer Sorte wurden mit gleicher Einstellung geschweißt (= eine Gruppe).

4.1.1 Querschnitte

Die untersuchten Drahtbögen wiesen zwei Dimensionen auf, einen runden Querschnitt mit einem Durchmesser von 0,41 mm (bzw. 0,40 mm) (.016“) sowie einen rechteckigen Querschnitt mit einem Durchmesser von 0,41 mm x 0,56 mm (.016“ x .022“).

Die untersuchten Drähte, deren Querschnitte, Chargennummern und in der Arbeit im Weiteren zur Identifizierung verwendete Kurzbezeichnungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Hersteller	Produktname	Querschnitt	Chargen-Nummer	Kurz-bezeichnung
Dentaurum	Rematitan Lite	0,40 mm / .016"	766-082-00	DRET (16)
		0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	766-090-00	DRET (16x22)
GAC	Sentalloy	0,41 mm / .016"	02-517-122	GACS (16)
GAC	Neo Sentalloy	0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	02-526-122	GACNS (16x22)
Ormco	Copper NiTi Thermo-Active At 27°C	0,41 mm / .016"	205-6402	OC 27 (16)
		0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	210-9203	OC 27 (16x22)
Ormco	Copper NiTi Thermo-Active At 35°C	0,41 mm / .016"	205-6412	OC 35 (16)
		0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	210-9213	OC 35 (16x22)

Tab. 4: Zusammenstellung der untersuchten Drähte

4.1.2 Legierungen

Nachfolgend sind die Bestandteile der vorgenannten Legierungen in Atomprozenten aufgeführt, wie sie von den Herstellern angegeben werden (Tab. 5).

Hersteller	Produktname	Nickel	Titan	Kupfer	weitere Bestandteile
Dentaurum	Rematitan Lite	51,0 %	49,0 %	0,0 %	0,0 %
GAC	Sentalloy	51,0 %	49,0 %	0,0 %	0,0 %
GAC	Neo Sentalloy	50,4 %	49,6 %	0,0 %	0,0 %
Ormco	Copper NiTi Thermo-Active	49,1 %	44,6 %	5,9 %	0,4 %

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Drähte (in Atomprozent)

4.2 Laserschweißen

Im Folgenden werden Versuchsaufbau und -durchführung der Laserschweißungen beschrieben.

Die Absorption der Laserstrahlen beeinflusst die Qualität einer Schweißung erheblich. Um eine unterschiedliche Reflexion der Proben zu minimieren, wurden die Schweißproben horizontal ausgerichtet, so dass der Laserstrahl die Proben rechtwinklig traf. Dazu wurde die im Weiteren beschriebene Probenhalterung verwendet.

4.2.1 Aufbau der Probenhalterung

Die Abbildungen 16a-b und 17 zeigen die verwendete Probenhalterung. Es handelt sich dabei um einen kleinen Schraubstock mit einer starren und einer beweglichen Aufnahme. In deren Backen sind je drei kleine Nuten (Kammern 1-3) zum Einlegen der Drahtprofile eingearbeitet. Mit zwei Klemmplatten können die Drähte in den Nuten festgeschraubt und gehalten werden. In den beiden gegenüberliegenden Drahtaufnahmen befindet sich jeweils seitlich ein Vorsprung, der beim Einlegen der Drähte als Anschlag dient (Abb. 16a-b).

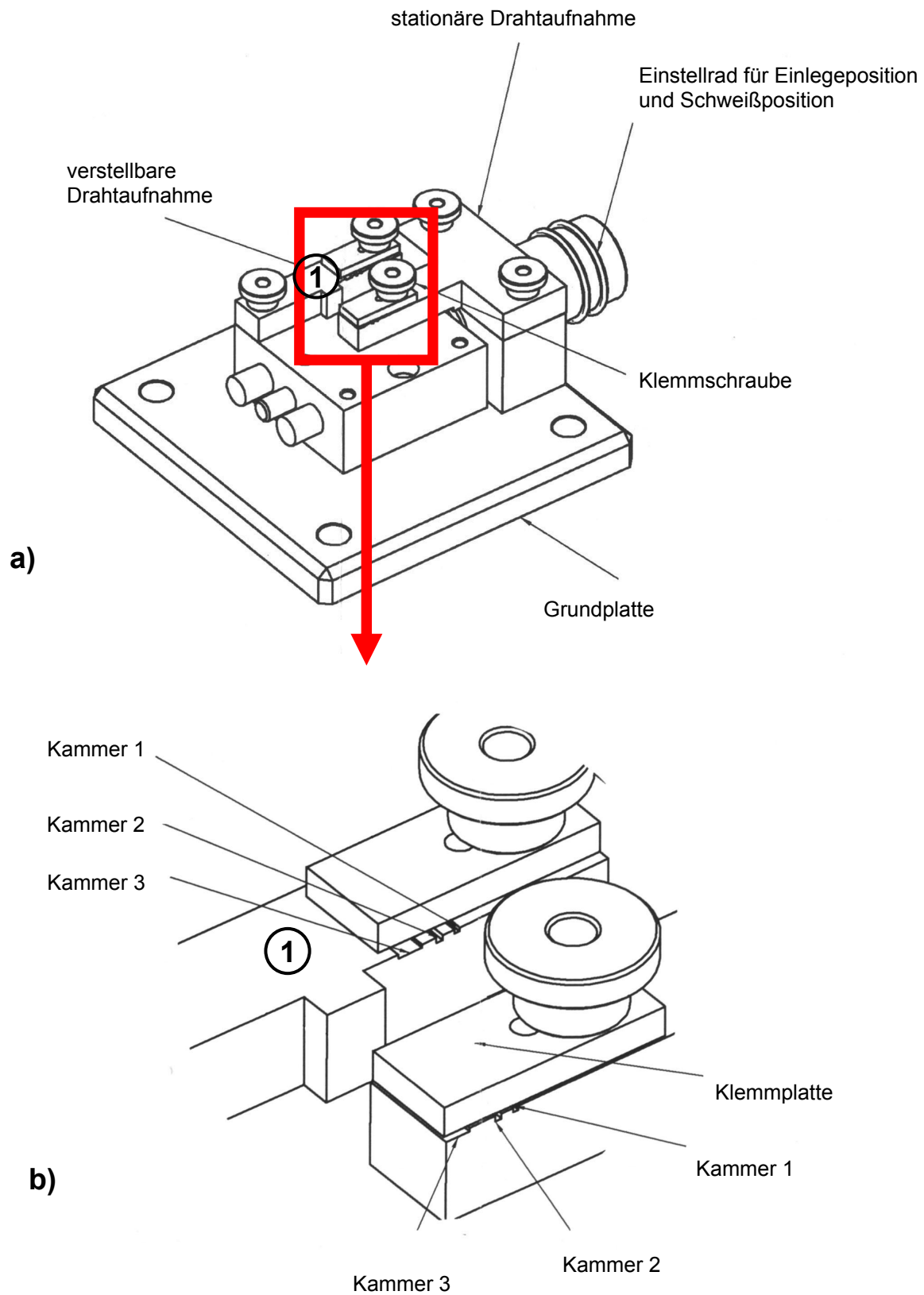


Abb. 16a-b: Schematische Darstellung der Probenhalterung:
a) Gesamtansicht, b) Vergrößerung der Aufnahme

Zu Beginn werden die beiden Drahtaufnahmen so gegeneinander gestellt, dass die Anschläge exakt gegenüber den Nuten zu liegen kommen. Dazu wird durch Drehen am „Einstellrad“ der mit 1 bezeichnete Teil (vgl. Abb. 16a-b) der Apparatur linear verschoben. Dann werden die Drähte in die jeweilige Nut eingelegt und mit den Klemmplatten festgespannt. Anschließend wird so lange mit der Spindel verfahren, bis sich die Drähte spaltfrei berühren. Um die Vorrichtung im Laserschweißgerät ausrichten zu können, ist sie auf einem Modelltisch (Modelltisch, Order-No. 086-340-00, Dentaforum) montiert (Abb. 17).

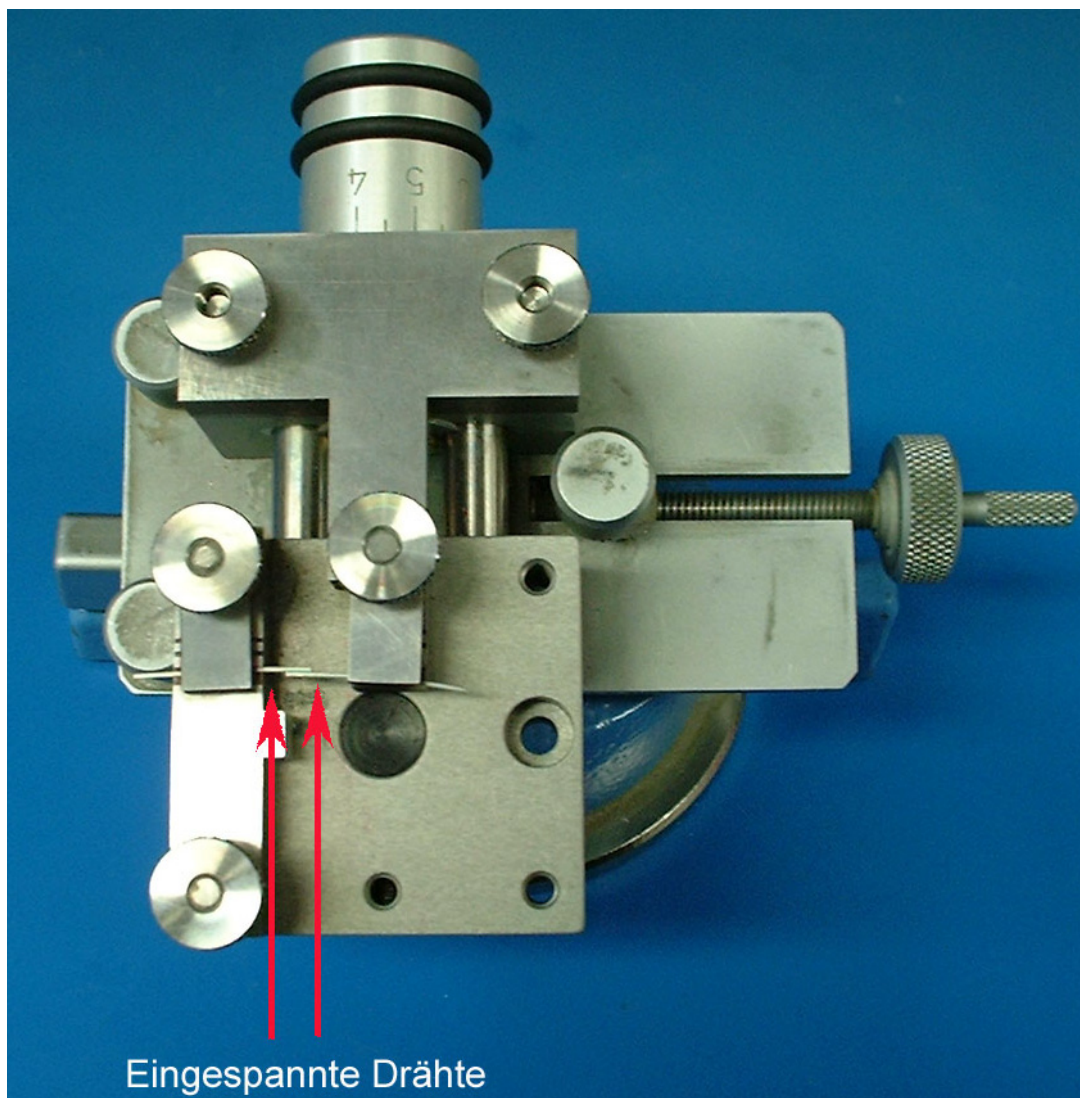


Abb. 17: Probenhalterung montiert auf einem prothetischen Modelltisch

4.2.2 Aufbau des Nd:YAG-Lasers

Zur Durchführung der Laserschweißungen kam ein Nd:YAG (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat)-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm im Impulsbetrieb zum Einsatz. Hierzu stand der gepulste Desktop Laser der Firma Dentaureum zur Verfügung (vgl. Kap. 2.5.3.2.3).

4.2.2.1 Systembeschreibung

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete System ist das Tischgerät DESKTOP der Firma Dentaureum. Die nachfolgende Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der technischen Daten des Lasers.

Regelbereich Schweißspannung	220-390 V
Regelbereich Pulsdauer	0,5-15 ms
Durchschnittsleistung	30 W
max. Pulsenergie	40 Joule
Pulsspitzenleistung	3 kW
max. Leistungsaufnahme	1200 W
Laserkristall	Nd:YAG (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat), gepulst
Wellenlänge	1064 nm (Infrarot)
Fokus-Einstellbereich	0,2-2,5 mm (optional)
Einzel puls/Dauer puls	umschaltbar
Dauer puls-Frequenz	0,5-5 Hz
Parameter-Speicherplätze	10
Integrierter Kühlwasserkreislauf	2 l Kühlwasser
Netzanschluss	240 V / 16 A / 50/60 Hz
Abmessungen/Gewicht	500 mm x 450 mm x 800 mm (B x H x T), 66 kg

Tab. 6: Technische Daten des DESKTOP-Lasers im Überblick

Beim DESKTOP-Laser findet der eigentliche Laserprozess in einem zylinderförmigen Kristall mit polierten Endflächen statt (vgl. Abb. 13, S. 46). Der Laserkristall ist ein Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (abgekürzte Schreibweise: Nd:YAG). Wird dem Kristall intensives Licht (z. B. aus einer Blitzlampe) zugeführt, so kann er daraus zunächst ungerichtetes Licht der Laserwellenlänge λ erzeugen (für Nd:YAG ist $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). Zur optimalen Ausbeute des Lampenlichtes befinden sich der Laserkristall und die Blitzlampe in den beiden „Brennpunkten“ eines verspiegelten Ellipsoids.

Die Pulsdauer ist beim DESKTOP-Laser im Bereich 0,5-15 ms einstellbar. Für eine exakte Positionierung der Teile verfügt das Gerät über ein Stereomikroskop, das mit einem Fadenkreuz ausgerüstet ist. Dieses Fadenkreuz markiert auf dem Werkstoff genau die Position, auf die ein Laserpuls gesetzt werden soll. Um die Höhe richtig einzustellen, d. h. in der Brennebene des fokussierten Laserstrahls, muss die Oberfläche des Werkstoffs im Stereomikroskop scharf zu erkennen sein. Die Qualität der Schweißpunkte lässt sich über die Energie der Laserpulse beeinflussen, die sich mit Hilfe von zwei Drehreglern (Digital-Potentiometern) einstellen lässt. Über einen dieser Drehregler lässt sich die Stärke des Laserpulses (Spannung), über das andere Potentiometer die Pulsdauer einstellen. Die Eigenschaft eines Laserpulses - und damit die Wirkung auf das Material - kann durch die Betriebsgrößen SPANNUNG und PULSDAUER beeinflusst werden. Die Spannung beeinflusst die Amplitude, die Pulsdauer die zeitliche Einwirkung des Laserpulses (siehe Abb. 18). Damit kann für verschiedene Materialien eine geeignete Einstellung gefunden werden.

Beim DESKTOP-Laser wird unter Schutzgas (Argon) geschweißt; hierfür ist das Gerät mit einem eigenen Schutzgasanschluß ausgestattet.

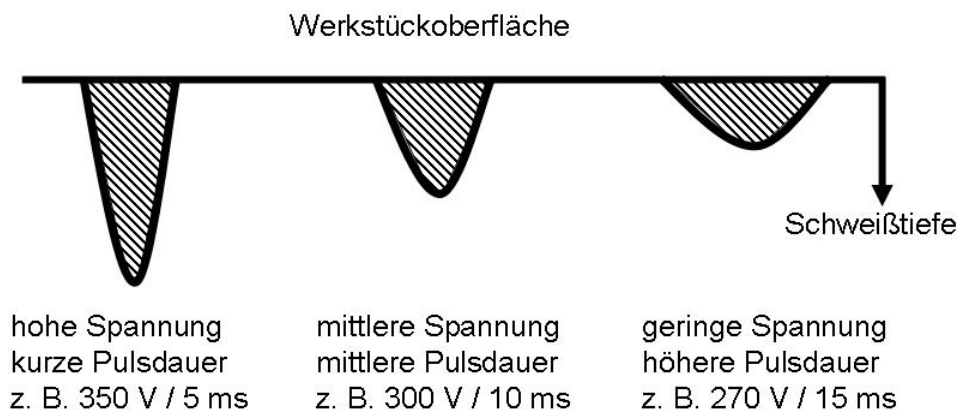


Abb. 18: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen der Spannung und der Pulsdauer bzgl. der resultierenden Schweißtiefe

4.2.3 Versuchsdurchführung

Zur Herstellung der Proben wurden die Drahtbögen in Segmente von 2 cm Länge zerteilt. Von jedem der 10 Drahtbögen einer Packung wurden jeweils 2 Drahtsegmente von jedem Bogenende (also insgesamt 4) abgetrennt. Je zwei Drahtproben wurden parallel in die dem Drahtquerschnitt entsprechenden Rillen der Probenhalterung eingebracht und so eingespannt, dass die Drähte mit rundem Querschnitt linear berührten und jene mit rechteckigem Querschnitt flächig Kontakt hatten. Die parallel lineare/flächige Überlappung der Drahtproben betrug bei allen Proben 3 mm (Abb. 19).

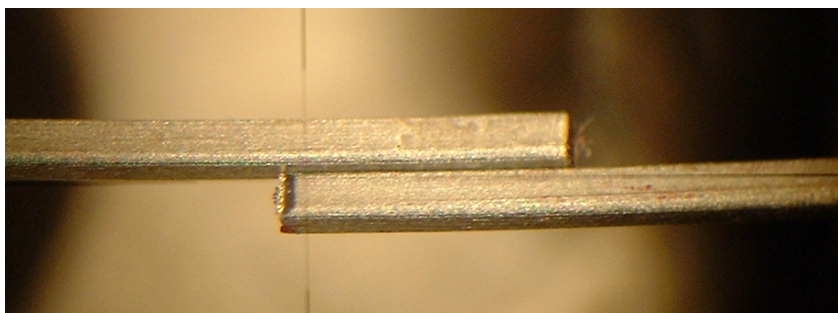


Abb. 19: Parallele flächige Anordnung der rechteckigen Drahtproben

Nach Herstellerangabe sollte ein Werkstück zu etwa 60 % von jeder Seite durchgeschweißt werden. Die Drähte wurden gleichmäßig mit etwa gleich vielen Schweißpunkten und gleicher Schweißenergie von beiden Seiten verschweißt (Abb. 20). Die Gesamtlänge der lasergeschweißten Drahtproben betrug ca. 37 mm.

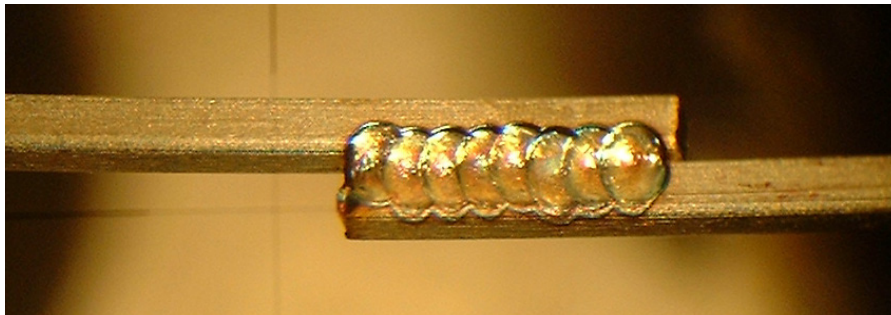


Abb. 20: Lasergeschweißte Drahtproben

4.2.4 Auswahl der Schweißeinstellungen

4.2.4.1 Vorversuch

Da für Nickel-Titan-Legierungen keine Herstellerangaben zu typischen Einstellwerten für Spannung und Pulsdauer vorlagen, wurden in Vorversuchen Kenngrößen ermittelt, bei denen eine Laserschweißverbindung möglich ist, ohne dass es zu Materialauswurf (Spritzen) kommt. Es wurde das so genannte „weiche Schweißen“ angestrebt, das bedeutet, Schweißen mit höherer Pulsdauer und niedriger Spannung. Im Rahmen der Vorversuche wurden, unter Verwendung der vorstehend beschriebenen Probenhalterung, 8 orthodontische Drähte von drei verschiedenen Anbietern einbezogen (vgl. Kap. 4.1). Die Drahtproben wurden bei folgenden Einstellungen geschweißt:

- Spannung 220 V, 225 V, 230 V, 235 V
- Pulsdauer 2,5 ms, 3 ms, 3,5 ms
- Pulsfrequenz 0 Hz
- Fokusslage: Schalterstellung 0

Die Auswahl der Einstellungen richtete sich nach der Herstellerempfehlung, möglichst geringe Laserleistungen zu wählen und die Materialdimension zu beachten. Durch Kombination der einzelnen Kenngrößen wurden pro Draht 12 Schweißungen durchgeführt, die anschließend mit dem Biegemessplatz FLEX [76] ausgewertet wurden. 96 Drähte wurden unter Schutzgasabdeckung (Argon) gleichmäßig von beiden Seiten verschweißt.

4.2.4.1.1 Ergebnisse der Vorversuche

- NiTi-Drähte lassen sich durchaus laserschweißen.
- Der Bereich der getesteten Einstellungen scheint für eine erfolgreiche Schweißung geeignet zu sein. Sie sind einerseits durch Systemvorgaben eingegrenzt (vgl. Tab. 6, S. 59), können aber erweitert (Pulsdauer < 2,5 ms) übernommen werden.
- Bei den meisten Proben scheint die Biegebelastbarkeit verglichen mit den ungeschweißten Proben eingeschränkt zu sein und liegt bei ca. 60° Biegewinkel.

4.2.4.1.2 Bestimmung der SchweißEinstellungen für die Hauptversuche

Auf der Basis der in den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse, konnten die verwendeten SchweißEinstellungen für die Hauptversuche übernommen werden. Zusätzlich wurden Pulsdauern von 1,5 ms und 2 ms eingeführt. Folglich wurden die in Tabelle 7 aufgelisteten Kenngrößen verwendet.

Spannung [V]	Pulsdauer [ms]	Spannung [V]	Pulsdauer [ms]
220	1,5	220	3
225		225	
230		230	
235		235	
220	2	220	3,5
225		225	
230		230	
235		235	
220	2,5		
225			
230			
235			

Tab. 7: Einstellungskombinationen der Parameter Spannung und Pulsdauer während der Hauptversuche

Die Kombination der oben erwähnten Kenngrößen ermöglicht für jede Drahtsorte 20 verschiedene Einstellungsvarianten beim Laserschweißen. Alle Experimente der Hauptversuche wurden 5x wiederholt.

4.2.5 Biegeversuch FLEX

Im Folgenden werden Versuchsaufbau, -durchführung und -auswertung des Biegeversuchs beschrieben. Mit dem Messplatz FLEX [76, 77] wurden die Drahtsegmente in einem Biegeversuch in reiner Biegung zur Ermittlung der Biegemoment-Biegewinkel-Kurven untersucht.

4.2.5.1 Aufbau des Biegemessplatzes FLEX

Der Biegemessplatz FLEX dient der Messung von Biegemoment-Biegewinkel-Beziehungen in „reiner“ Biegung (vgl. Kap. 2.4.2). Den Aufbau des Biegemessplatzes zeigen die Abbildungen 21 und 22a-b.

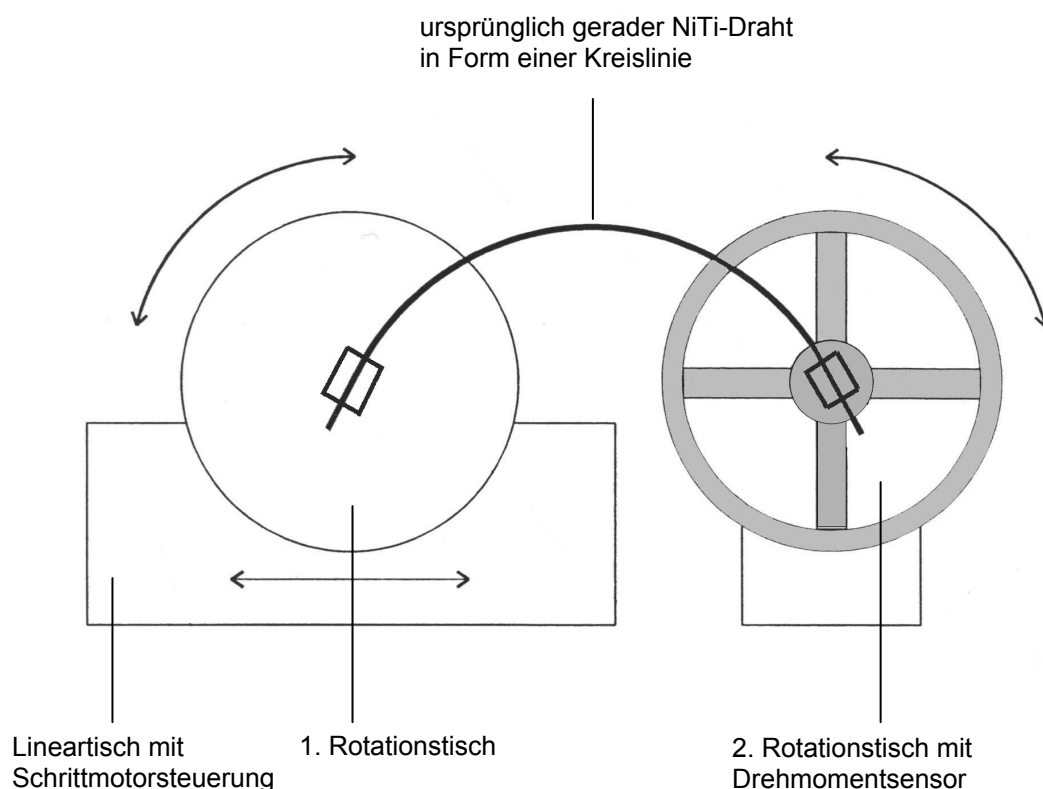


Abb. 21: Schematische Darstellung des mechanischen Teils des Biegemessplatzes FLEX [15]

Er besteht aus einem hochempfindlichen Biegemomentsensor, der auf einem ortsfesten Rotationstisch montiert ist, und einem auf einem Lineartisch befestigten zweiten Rotationstisch. Die Naben der Rotationstische dienen als Einspannpunkte für die Enden der Drahtproben. Um eine kreisbogenförmige Biegelinie zu erhalten, die für die Bestimmung von Elastizitätsparametern von Drähten mit nichtlinearen Materialverhalten erforderlich ist [76], werden die Drahtenden während des

Messvorgangs fixiert und mit Hilfe eines Lineartisches mit Schrittmotorsteuerung einander angenähert. Da die mechanischen Eigenschaften von Nickel-Titan-Drähten temperaturabhängig sind, befindet sich der Messaufbau unter einer Plexiglashaube. Mit Hilfe einer geregelten Heizung ist die Temperatur während der Messungen auf 37°C eingestellt. Die Messungen wurden nach Erreichen der „Messtemperatur“ (37°C) durchgeführt.

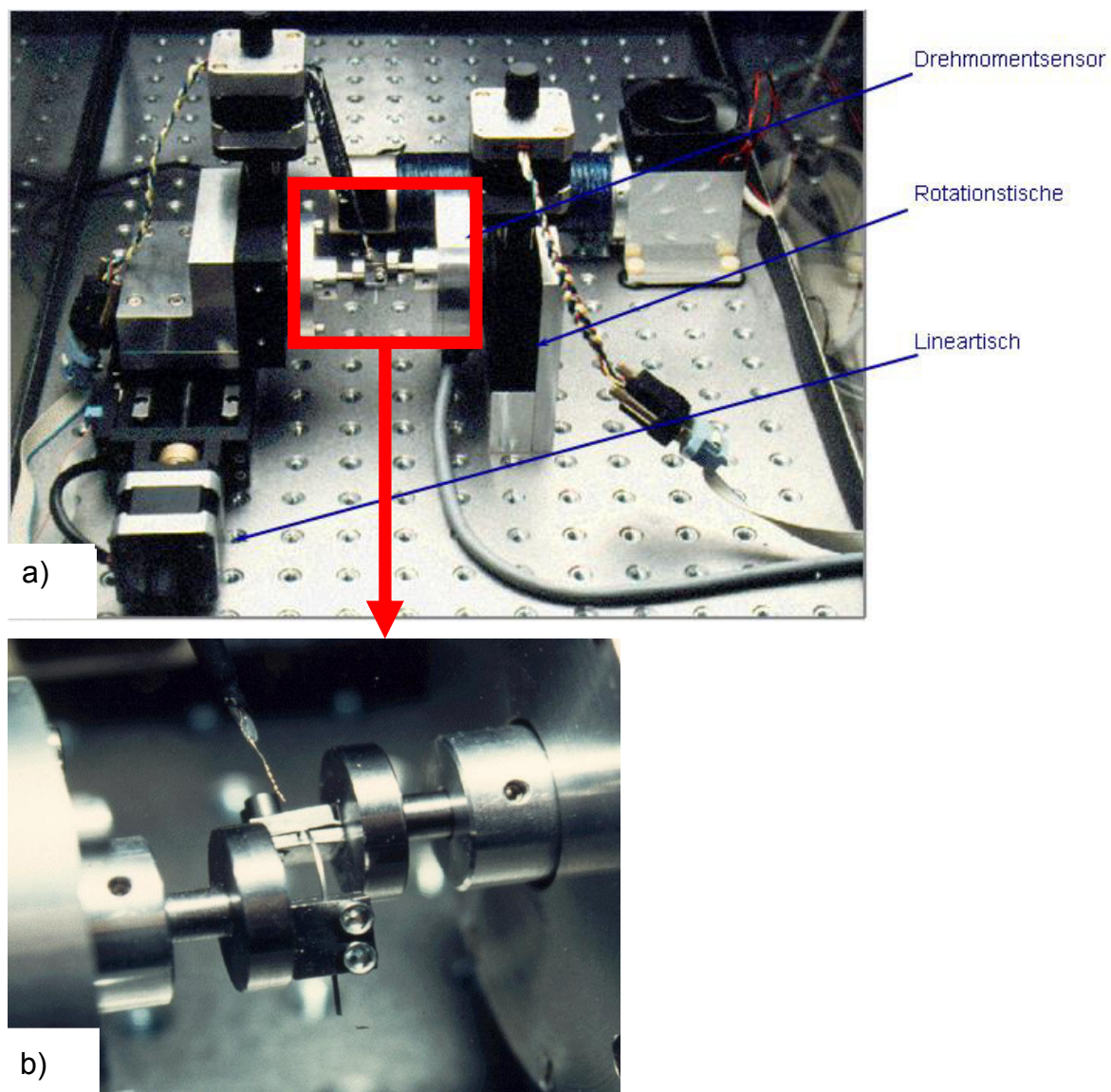


Abb. 22a-b: Der Biegemessplatz in Übersichtsaufnahme (a) und mit eingespannter Drahtprobe im Detail (b) (Bilder freundlicherweise überlassen von Prof. Dr. C. Bourauel)

Über eine A/D-Interfacekarte erfolgt der Datenaustausch zwischen dem Steuerrechner und der Messapparatur. Die Daten werden in Echtzeit übertragen und tabellarisch aufgelistet. Das Programmsystem FLEX ermöglicht die Steuerung der Messapparatur. Das Programm dient zur Erfassung, Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Weiterverarbeitung von Moment-Winkel-Messdaten und ermöglicht die Bestimmung der Elastizitätsparameter.

Der Diplomarbeit von Plietsch [76] können Einzelheiten entnommen werden.

4.2.5.2 Versuchsdurchführung

Die lasergeschweißten Drahtproben (Gesamtlänge ca. 37 mm, vgl. Kap. 4.2.3) wurden zwischen zwei Klemmbacken an den Naben der Drehtische in den Messaufbau eingespannt. Die Schweißstelle wurde dabei stets mittig ausgerichtet. Die eingespannte Drahtlänge betrug bei allen Proben 7 mm.

Der Anfangswinkel der Biegemessung war stets 0° , d. h. der Draht war gerade. Der Endwinkel betrug maximal 80° . Beim Biegen sollten keine bleibenden Verformungen der Drahtproben auftreten. Zuerst wurde eine Messung bei 80° -Biege Winkel durchgeführt. Hat eine Probe diese Biegung überstanden, wurde sie nicht weiter geprüft.

Von den Biegemoment-Biege Winkel-Diagrammen der Drahtproben, die bei der ersten 80° -Biegebelastung gebrochen sind, wurde der maximale Biege Winkel bis zum Bruch abgelesen. Folgende Messung einer neuen Drahtprobe der jeweiligen Gruppe (vgl. Kap. 4.1) wurde bei dem vorher abgelesenen Biege Winkel durchgeführt. Ist die Probe bei der Messung ganz geblieben, wurde der Biege Winkel um 10° erhöht und so weiter, bis maximal 80° (Beispiel: Bricht eine Probe bei der ersten Messung und liegt der Biege Winkel vor dem Bruch bei ca 63° , wird folgende Messung bei 60° durchgeführt. Bleibt die Probe bei der 60° -Messung ganz, erhöht sich die Biegebelastung beim nächsten Versuch um 10° , d.h. es erfolgt eine Messung bei 70° und so weiter).

Da die Winkelausgabe der FLEX-Messapparatur pro Rotationstisch erfolgt, ist der tatsächliche Biegewinkel doppelt so groß. Wie schon erwähnt, wurden die Messungen zur Simulation der Mundtemperatur bei 37°C durchgeführt.

4.2.5.3 Messparameter

Das Programmsystem FLEX (Plietsch, 1993) ermöglicht eine Darstellung von Biegemoment-Biegewinkel-Diagrammen, die in Echtzeit aufgebaut und anschließend gespeichert werden können. Bei ungeschweißten Drähten erlaubt das Programm über eine Auswertungsroutine mit Hilfe eines analytischen Modells der Biegung von Nickel-Titan-Drähten die iterative Bestimmung bestimmter Elastizitätsparameter von pseudoelastischen Drähten. In der vorliegenden Untersuchung wurden spezifische Parameter anhand der Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme bestimmt.

Das Phänomen der Pseudoelastizität und das Verhalten einer pseudoelastischen Legierung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wurde ausführlich im Kapitel 2.2.4 erklärt. Da während der klinischen Anwendung eine Entlastung des Drahtes stattfindet, sind die aus der Entlastungskurve gewonnenen Werte für die Ermittlung der Parameter ausschlaggebend. Auf die Ermittlung der Elastizitätsparameter und Grenzdehnungen wurde verzichtet.

Zur Beschreibung der mechanischen Drahteigenschaften wurden aus den Biegemoment-Biegewinkel-Diagrammen folgende Werte abgelesen (Abb. 23, 24):

- Beginn des Entlastungsplateaus P2: Ein Punkt auf der Entlastungskurve, der unmittelbar nach dem linearen Abfall des Biegemomentes den Anfang des pseudoelastischen Entlastungsplateaus beschreibt. Der Punkt P2 wird durch eine gedachte Tangente gebildet (vgl. Abb. 23). Das Plateau wird als geradlinige Verbindung der Punkte P2 und P1 angenommen (Linearitätsannahme).
- Endpunkt des Entlastungsplateaus P1: Ein Punkt auf der Entlastungskurve, der das Ende des Plateaus markiert und in der Regel einem leichten Spannungsanstieg, vor dem Übergang in den linearen Endabschnitt, vorausgeht.

- Endpunkt des linearen Endabschnitts P0: Ein Punkt am Ende des linearen Spannungsabstiegs nach dem Entlastungsplateau, der das Biegemoment angibt, das nach der Entlastung in dem Draht vorhanden ist.

Anhand der genannten Daten wurden folgende Parameter berechnet:

- Steigung des Entlastungsplateaus: Die Steigung des Entlastungsplateaus errechnet sich aus dem horizontalen Abstand der Punkte P1 und P2 dividiert durch die Höhendifferenz dieser Punkte (Abb. 23).
- Steigung des linearen Endabschnitts (Abb. 24).
- Mittleres Drehmoment: Das mittlere Drehmoment wird in der Mitte der gedachten Verbindungslinie zwischen P1 und P2 abgelesen. Zuerst wird mit der Formel $(P2 - P1)/2 + P1$ der Biegewinkel bestimmt, der die Mitte des Entlastungsplateaus kennzeichnet. Danach wird der dazugehörige Biegemoment an dem ausgerechneten Biegewinkel vom Diagramm abgelesen (Abb. 24).

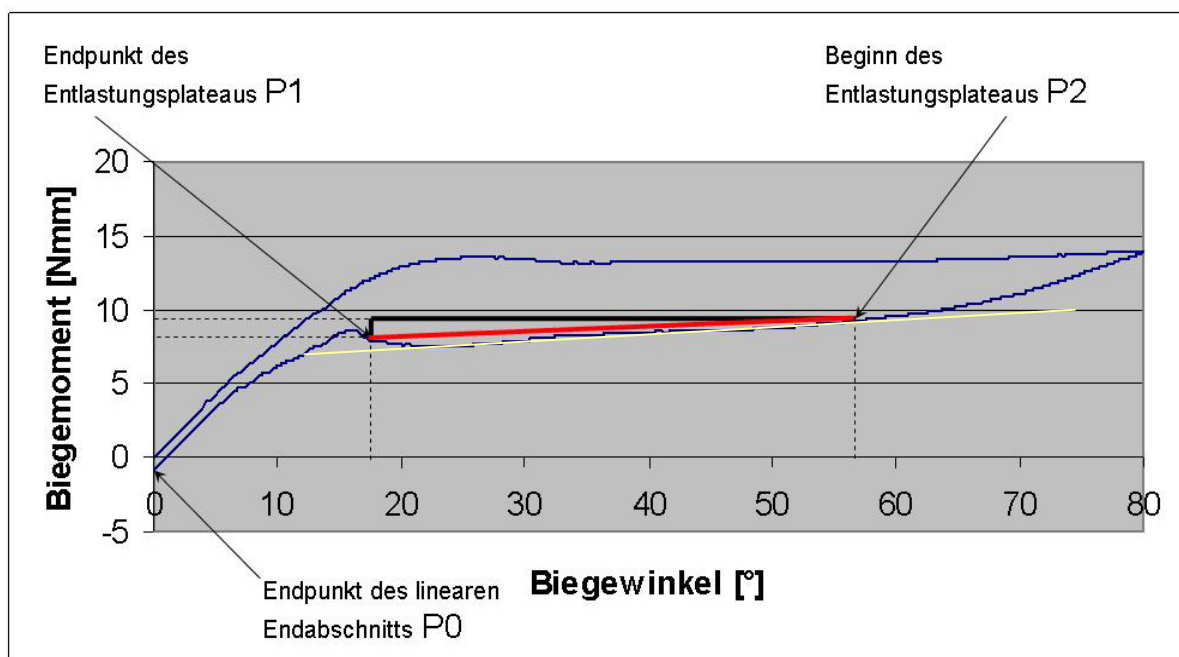


Abb. 23: Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften im Biegeversuch FLEX, Teil 1 (rot: Steigung des Entlastungsplateaus)

Die genannten Parameter wurden ermittelt und die einzelnen Messwerte gruppenweise als Punktwolkendiagramme (scatter plots) graphisch dargestellt. Anschließend wurden die Medianwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen für jene Gruppen berechnet, von denen mindestens 4 der 5 Proben den Biegewinkel von 80° erreicht haben. In den Gruppen mit 4 ganz gebliebenen Proben wurden vier Werte zur Auswertung herangezogen. Die Medianwerte der geschweißten und ungeschweißten Proben wurden als Balkendiagramme dargestellt.

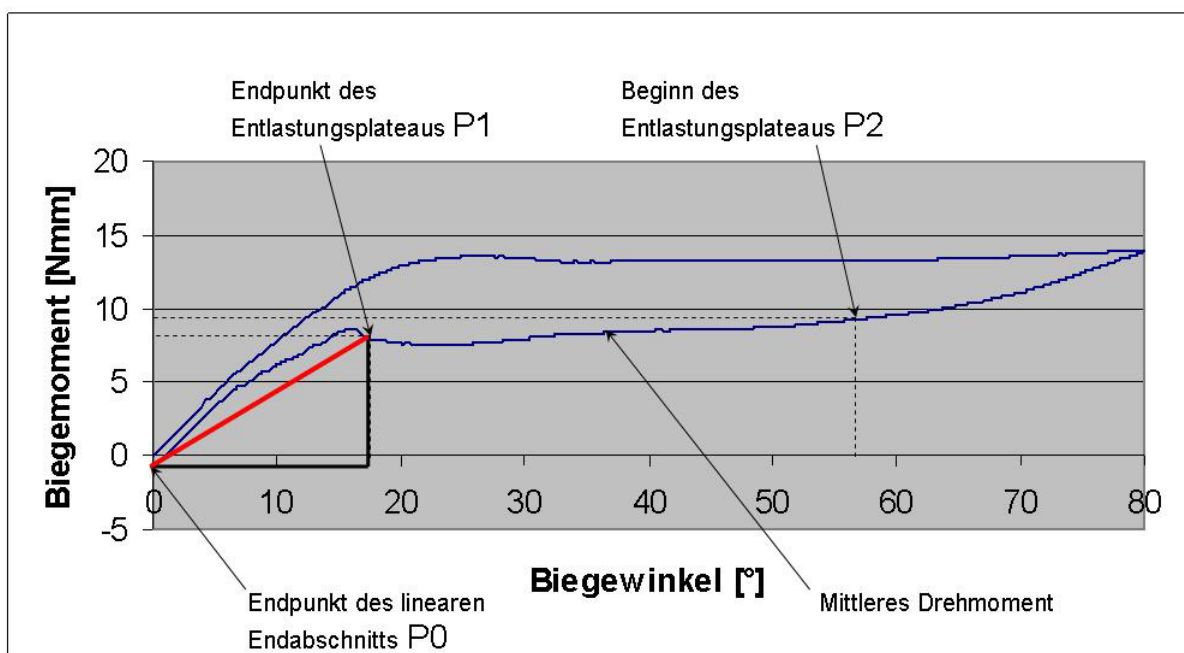


Abb. 24: Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften im Biegeversuch FLEX, Teil 2 (rot: Steigung des linearen Endabschnitts)

4.2.5.4 Einfluss mehrmaliger Messungen auf die Messparameter

Da die Proben unterschiedlich oft gemessen wurden (vgl. Kap. 4.2.5.2), wurden in einer gesonderten Versuchsserie 50 Drähte Rematitan Lite (.016" x .022") mit gleicher Einstellung (Spannung = 235 V, Pulsdauer = 1,5 ms) geschweißt und die Auswirkung wiederholter Messungen auf die Messparameter untersucht. Das folgende Beispiel zeigt das Vorgehen:

- Zuerst wurden 10 Drähte jeweils zunächst bei 40°, dann bei 50°, 60° und schließlich bei 70° Biegung gemessen. Dabei sind 3 Drähte bei 60° und 7 bei 70° gebrochen. Die Bruchgrenze dieser Drähte lag also bei 60°.
- Die nächsten 10 Proben wurden beginnend bei 60° gemessen: Alle Drähte haben die 60° Biegung überstanden. Bei 70° Biegung sind 7 von 10 Drähten gebrochen.
- Weitere 10 Proben wurden beginnend bei 70° gemessen: 4 Drähte haben bei 70° Biegung gehalten, 6 sind gebrochen.
- Die nächsten 10 Proben wurden bei 80° gemessen: Dabei sind alle Drähte gebrochen.

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Durch mehrmalige Messungen, d. h. Biegen desselben Drahtes wird die Bruchgrenze (Biegemaximum) nach unten verschoben: mehrfach vorgebogene Drähte sind teilweise schon bei 60° gebrochen, dagegen haben die nicht zuvor elastisch gebogenen Drähte bei 60° Biegung alle gehalten.
- Proben, die beginnend bei 70° gemessen wurden, hatten eine ähnliche Stabilität wie die Proben, die zuvor einmal mit 60° Biegung gemessen worden waren. Eine einmalige Vorbelastung führt offenbar nicht zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Stabilität der geschweißten Drähte. Drähte, die zuvor *mehrfach* vorbelastet wurden, sind bei 70° Biegung öfters gebrochen. Deshalb kann man annehmen, dass mehrfaches Biegen der geschweißten Drähte ihre Stabilität senkt.
- Die Biegemoment-Biegewinkel-Kurven sowohl der einfach gemessenen Drähte (Abb. 25a) als auch der mehrmals gemessenen Drähte (Abb. 25b) lagen, bis auf einen Ausreißer, auf nahezu gleicher Höhe.

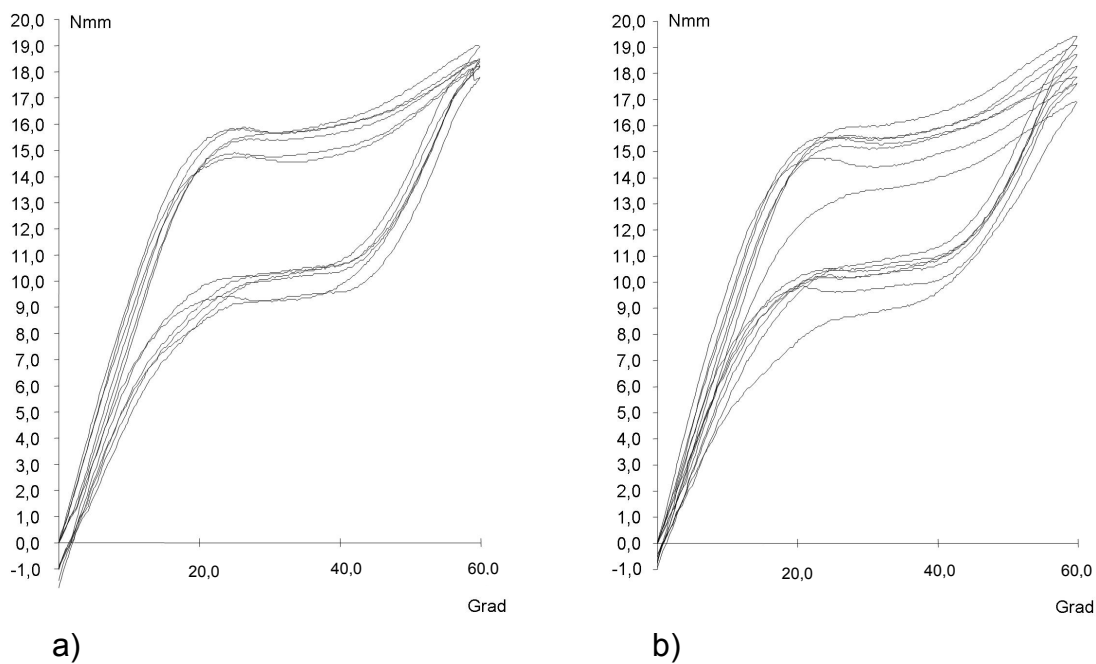


Abb. 25a-b: Biegemoment-Biegewinkel-Kurven der a) geschweißten erstbelasteten und b) der geschweißten zweimal belasteten Proben (Rematitan Lite .016“ x .022“)

- Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mehrfache Belastungen der geschweißten Proben möglichst vermieden. Man kann allerdings annehmen, dass die ermittelten Messparameter der geschweißten Proben nicht wesentlich durch mehrfaches Biegen beeinflusst werden.

4.2.5.5 Methodenfehler

Zur Ermittlung des Methodenfehlers MF wurden die Diagramme von 110 Proben zweimal im Abstand von 60 Tagen ausgewertet (vgl. Kap. 5.3). Folgende Formel wurde hierzu verwendet [26]:

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

Dabei ist d die Differenz zwischen den einzelnen Doppelauswertungen der Punkte P1 und P2 (siehe Kap. 4.2.5.3) und n die Anzahl der Proben ($n=110$). Die Variablen P1 und P2 wurden in einem Abstand von 2 Monaten einer Zweitauswertung unterzogen. Der Fehler MF umfasst die Festlegung der vorher definierten Punkte P1 und P2 für die im Weiteren durchgeführte Auswertung. Der berechnete Wert entspricht in etwa der Standardabweichung, d. h. je kleiner er ist umso genauer ist auch die Messung. Da die Differenzen der Doppelauswertungen quadriert werden, beeinflussen Ausreißer die Größe des Methodenfehlers wesentlich. Der Methodenfehler für den Punkt P0 wurde nicht ermittelt, da bei diesem die Koordinate x stets 0 ist, somit ist ein Fehler beim Ablesen des Wertes der zweiten Koordinate y ausgeschlossen. Der ermittelte Methodenfehler für den Endpunkt des Entlastungsplateaus P1 beträgt 0,477; für den Beginn des Entlastungsplateaus P2 liegt er bei 0,497.