5 Ergebnisse

5.1 Laserschweißbarkeit

Von 800 Schweißungen konnten 794 Proben mittels Laserstrahl verbunden werden, das heißt die in dieser Studie untersuchten NiTi-Legierungen lassen sich miteinander verschweißen.

5.2 Die Biegebelastbarkeit und das Bruchverhalten geschweißter NiTi-Drähte

Im Rahmen dieser Studie wurden 8 verschiedene Drahtsorten untersucht (vgl. Tab. 4), wobei von jeder Drahtsorte 100 geschweißte Proben (20 Untersuchungsgruppen à 5 Proben) angefertigt wurden. Alle geschweißten Proben wurden am Biegemessplatz FLEX gemessen (vgl. Kap 4.2.5). 72 % der untersuchten Drähte sind bei einer Biegebelastung < 80° gebrochen. Die Biegebelastbarkeit (der maximal erreichte Biegewinkel, bei dem ein geschweißter Draht <u>intakt</u> geblieben ist) der einzelnen Drahtsorten verdeutlicht folgende Abbildung 26.



Abb. 26: Biegebelastbarkeit aller 800 geschweißten Drähte: Die Abszisse zeigt den maximal erreichten Biegewinkel, bei dem ein geschweißter Draht zuletzt <u>intakt</u> geblieben ist, während die Ordinate die Probenzahl angibt.

Die Punkte der einzelnen Liniengraphiken zeigen wie viele Proben einer jeweiligen Drahtsorte (pro Drahtsorte: n = 100) bei dem jeweiligen Biegewinkel <u>intakt</u> gebliebenen sind. Die Verbindung der Punkte dient lediglich einer deutlicheren Darstellung.

225 Drähte haben die Biegebelastung von 80° ausgehalten. Die Bruchstelle der Drähte lag meist am Übergang der Schweißnaht zu einem der nicht geschweißten Anteile des Drahtes. Vereinzelt brachen die Proben in der Mitte der Schweißnaht.

Hersteller	Produkt- name	Querschnitt	Kurz- bezeichnung	Anzahl der Gruppen	Anzahl der Proben
Ormco	Copper NiTi Thermo- Active At 27°C	0,41 mm / .016"	OC 27 (16)	8	35
Ormco	Copper NiTi Thermo- Active At 35°C	0,41 mm / .016"	OC 35 (16)	7	30
		0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	OC 35 (16x22)	1	5
GAC	Neo Sentalloy	0,41 mm x 0,56 mm / .016" x .022"	GACNS (16x22)	9	40

Tab. 8: Drahtsorten, bei denen unter einer Biegung von 80° mind. 4 von 5 Proben einer Gruppe nicht gebrochen sind.

Für die weitere Auswertung bezüglich des Bruchverhaltens der Proben und deren Elastizitätseigenschaften wurden lediglich die Gruppen herangezogen, bei denen mindestens vier der fünf untersuchten Proben aus der gleichen Gruppe eine Belastung von 80° ausgehalten hatten (Tab. 8), d. h. es wurden bei 25 Gruppen insgesamt 110 ganz gebliebene Einzelproben ausgewertet.

Tabelle 9 zeigt eine detaillierte Zusammenstellung der Proben, die zur weitergehenden Auswertung herangezogen wurden.

Produktname	Kurz- bezeichnung	Spannung (Volt)	Pulsdauer (ms)	4/5 oder 5/5 nicht gebrochen bei 80°
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	230	2,0	4
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	235	2,0	5
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	220	2,5	4
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	225	2,5	5
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	230	2,5	5
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	235	2,5	4
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	220	3,0	4
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	225	3,0	5
Neo Sentalloy	GACNS (16x22)	230	3,0	4
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	235	1,5	4
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	225	2,0	4
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	220	2,5	5
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	225	2,5	4
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	230	2,5	5
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	235	2,5	4
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	225	3,0	5
Copper NiTi 27°	OC 27 (16)	220	3,5	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	225	1,5	5
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	230	1,5	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	235	1,5	5
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	220	2,0	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	225	2,0	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	230	2,0	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16)	225	2,5	4
Copper NiTi 35°	OC 35 (16x22)	230	2,5	5

Tab. 9: Zusammenstellung der Untersuchungsgruppen, von denen mindestens 80% der Drähte eine 80° Biegung ausgehalten hatten.

5.2.1 Ergebnisse der Biegeversuche ungeschweißter und geschweißter Drähte

Zur Darstellung der charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Sorten von Nickel-Titan-Drähten wird von jeder Untersuchungsgruppe ein exemplarisches Biegemoment-Biegewinkel-Diagramm ausgewählt (bis auf die zwei Diagramme der geschweißten Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drähte (OC 35 (16x22), bei denen

nur eine Untersuchungsgruppe besteht). Eine Untersuchungsgruppe besteht aus 5 Schweißungen (geschweißt bei gleicher Einstellung), von denen mindestens 4 der 5 geschweißten Drahtproben bei 80° Biegung nicht gebrochen sind. Diesen werden nachfolgend die Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme der entsprechenden ungeschweißten Drähte (pro Gruppe ungeschweißter Referenzdraht) ein gegenübergestellt. Alle untersuchten Drähte zeigen Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme mit dem für diese Legierungen charakteristischen superelastischen Verhalten (vgl. Kap. 2.3.3.3).

5.2.1.1 Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme des Copper NiTi Thermo-Active At 27°C-Drahtes (OC 27 (16))



Abb. 27: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramm Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)); ungeschweißt

Abbildung 27 ist repräsentativ für den Copper NiTi Thermo-Active At 27°C-Draht in ungeschweißtem Zustand. Charakteristisch für diesen Draht sind ein ausgeprägtes Belastungsplateau, ein gleichmäßiger Abstieg in ein breites Entlastungsplateau und ein leichter Anstieg des Entlastungsplateaus vorm Übergang in den linearen Endabschnitt (vgl. Kap. 4.2.5.3).



Abb. 28a-h: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)); geschweißt

Abbildungen 28a-h zeigen Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme der Copper NiTi Thermo-Active At 27°C-Drähte nach dem Schweißen. Die variablen Schweißeinstellungen Spannung und Pulsdauer sind jeweils unten rechts im Diagramm zu sehen. Im Vergleich zu der ungeschweißten Probe (Abb. 27) fallen folgende charakteristische Merkmale auf:

- 1. Die Be- und Entlastungsplateaus sind nach oben verschoben.
- Der Endpunkt des Entlastungsplateaus ist nach rechts verschoben. Somit ist das Entlastungsplateau verkürzt und der lineare Endabschnitt wird frühzeitig erreicht. Unter der Annahme, dass der Bereich des Entlastungsplateaus für die kieferorthopädische Anwendung wichtig ist, bedeutet dies einen Qualitätsverlust.
- 3. Das Ende des linear elastischen Abschnittes liegt unterhalb des Ausgangswertes (im negativen Bereich).

Im Vergleich der geschweißten Proben untereinander (Abb. 28a-h) ist bei dem Diagramm 28a das Entlastungsplateau besonders stark ausgeprägt. Das Fehlen eines leichten Anstiegs vorm Übergang in den linearen Endabschnitt bei den Diagrammen 28a und 28b ist untypisch für die Messkurve eines NiTi-Drahtes (vgl. Abb. 27).

5.2.1.2 Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme des Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drahtes (OC 35 (16))





Der Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Draht (Abb. 29) verhält sich in ungeschweißtem Zustand ähnlich wie der Copper NiTi Thermo-Active At 27°C-Draht (Abb. 27).



Abb. 30a-g: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16)); geschweißt

Die geschweißten Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drähte (Abb. 30a-g) zeigen ähnliche Veränderungen der Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme wie die

geschweißten Copper NiTi Thermo-Active At 27°C-Drähte (Abb. 28a-h). Die Entlastungsplateaus sind zu Gunsten der linearen Endabschnitte verkürzt. Auch ist ein höheres Biegemoment zur Biegung dieser Drähte notwendig, d. h. die Belastungsplateaus sind höher (bis auf Abb. 30a und b) als bei der ungeschweißten Probe, was eine Versteifung der Drähte durch das Laserschweißen bedeutet.

5.2.1.3 Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme des Neo Sentalloy-Drahtes (GACNS (16x22))



Abb. 31: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramm Neo Sentalloy (GACNS (16x22)); ungeschweißt

Der ungeschweißte Neo Sentalloy-Draht (Abb. 31) zeigt die typische Messkurve eines superelastischen NiTi-Drahtes. Das Kraftniveau des Belastungsplateaus im ungeschweißten Zustand ist höher als der beiden runden Drähte (vgl. Abb. 27 und 29), dem folgt ein ausgeprägtes Entlastungsplateau und typischerweise ein leichter Anstieg des Entlastungsplateaus vor dem Übergang in den linearen Endabschnitt. Charakteristisch für diesen Draht ist ein kleiner Wert des Endpunktes des Entlastungsplateaus, der eine Ausnutzung des annähernd konstanten Biegemoments während des Entlastungsplateaus auch bei einer relativ geringen Auslenkung ermöglicht.



(GACNS (16x22)); geschweißt



10

-5

20

30

40

Winkel [°]

50

60

70

Spannung: 230 V Pulsdauer: 3 ms

Die Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme der geschweißten Neo Sentalloy-Drähte zeigen höhere Be- und Entlastungsplateaus, d.h. es sind höhere Biegemomente zur Biegung der Drähte notwendig als bei den ungeschweißten Vergleichsproben. Auffällig ist bei den geschweißten Drähten der Anstieg der Kurve nach dem relativ kurzen Verlauf des Belastungsplateaus (Abb. 32a-i). Dieser Anstieg tritt weder bei den runden noch bei den rechteckigen geschweißten Ormco-Drähten nicht auf. Die Länge des Entlastungplateaus ist dagegen nahezu unverändert (vgl. Abb. 31 und 32a-i). Der Übergang zum linearen Endabschnitt ist bei den geschweißten Drähten fließender als bei den ungeschweißten; der leichte Kurvenanstieg des Entlastungsplateaus vorm Übergang in den linearen Endabschnitt ist lediglich in Abbildung 32h zu erkennen. Insgesamt ist also die Steifigkeit der lasergeschweißten Drähte erhöht, die elastischen Rückstelleigenschaften der Neo Sentalloy-Drähte wurden aber durch das Laserschweißen nicht wesentlich beeinträchtigt.

5.2.1.4 Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme des Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drahtes (OC 35 (16x22))



Abb. 33: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramm Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)); ungeschweißt

Ähnlich wie bei dem ungeschweißten Neo Sentalloy (GACNS (16x22))-Draht (Abb. 31) ist auch bei den Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22))-Draht (Abb. 33) das Kraftniveau des Belastungsplateaus bedingt durch den rechteckigen Querschnitt höher als bei den gleichen Drähten runden Querschnitts (vgl. Abb. 33 und 31 mit Abb. 27 und 29). Im Unterschied zu dem Neo Sentalloy-Draht (Abb. 31)

sind bei dem Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Draht (Abb. 33) sowohl der Biegewinkel, der das Ende des Entlastungsplateaus beschreibt, als auch die Steigung des linearen Endabschnitts größer. Die Kurve des Entlastungsplateaus des Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drahtes (OC 35 (16x22)) weist im Bereich des Entlastungsplateaus höhere Biegemomente auf als die des Neo Sentalloy-Drahtes (GACNS (16x22)).



Abb. 34a-b: Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)); geschweißt

Von der Untersuchungsgruppe der Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22) wurden zwei Biegemoment-Biegewinkel-Diagramme ausgewählt. Bei den Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Drähten ist nach dem Laserschweißen (Abb. 34a-b) eine Verkürzung und Verlagerung des Entlastungsplateaus zu erkennen. Trotz gleicher Schweißeinstellung sind die Kurvenverläufe der oben gezeigten Diagramme der geschweißten Drähte auffallend unterschiedlich (vgl. Abb. 34a-b).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Plateauhöhen während der martensitischen Transformation der ungeschweißten und geschweißten Drähte sowohl bei Belastung als auch bei Entlastung zwischen den einzelnen Proben große Unterschiede aufwiesen. Der Beginn des Belastungs- und das Ende des Entlastungsplateaus zeigten deutliche Unterschiede. Da die Phase des linear elastischen Verhaltens vor dem Erreichen der martensitischen Transformation bei den meisten Drähten nur geringe Steigungsunterschiede aufwies, zeigten Drähte mit einer großen Plateauhöhe auch einen späteren Beginn des Belastungsplateaus und ein früheres Ende des Entlastungsplateaus. Auch war die Steigung der Plateauphase bei den ungeschweißten und geschweißten Proben unterschiedlich.

5.3 Vergleichende Auswertung der Biegemoment-Biegewinkel-Kurven geschweißter NiTi-Drähte

Zur Beschreibung der Biegemoment-Biegewinkel-Kurven wurden aus den Diagrammen der gemessenen Drahtbögen folgende Parameter ausgewählt (vgl. Kap. 4.2.5.3):

- mittleres Drehmoment auf dem Entlastungsplateau (mittleres Drehmoment),
- Endpunkt des Entlastungsplateaus,
- Steigung des Entlastungsplateaus und
- Steigung des linearen Endabschnittes.

Es wurden lediglich die Gruppen zur weiteren Auswertung herangezogen, bei denen mindestens vier der fünf untersuchten Proben aus derselben Gruppe eine Belastung von 80° ausgehalten hatten (vgl. Tab. 8), d. h. es wurden 25 Untersuchungsgruppen mit insgesamt 110 ganz gebliebenen Einzelproben weitergehend ausgewertet. Die einzelnen Werte der Messparameter, die das elastische Verhalten NiTi-Drähte beschreiben, wurden in Form von Punktwolken (scatter plots) graphisch dargestellt. Da die Zahl der Messwerte in den Gruppen n = 4/5 variiert (vgl. Kap. 5.2), wurde auf eine statistische Auswertung der Ergebnisse verzichtet.

Tabelle 10 gibt die im Weiteren verwendeten Kurzbezeichnungen wieder.

Kurzbezeichnung	Hersteller	Produktname	Querschnitt
OC 27 (16)	Ormco	Copper NiTi Thermo-	0,41 mm /
		Active At 27°C	.016"
OC 35 (16)	Ormco	Copper NiTi Thermo-	0,41 mm /
	Active At 35°C		.016"
OC 35 (16x22)			0,41 mm x 0,56 mm /
			.016" x .022"
GACNS (16x22)	GAC	Neo Sentalloy	0,41 mm x 0,56 mm /
			.016" x .022"

Tab. 10: Kurzbezeichnungen der Untersuchungsgruppen

5.3.1 Punktwolkendiagramm des mittleren Drehmomentes auf dem Entlastungsplateau

Alle Messwerte beziehen sich auf <u>geschweißte</u> Drähte, von denen mindestens 4 der 5 untersuchten Drähte bei dem Biegeversuch eine Belastung von 80° ausgehalten hatten (vgl. Tab. 9, Kap. 5.2). Die zu den 25 Untersuchungsgruppen gehörenden Werte sind jeweils senkrecht übereinander dargestellt.



Abb. 35: Messwerte aller mittleren Drehmomente [Nmm] der 25 Untersuchungsgruppen auf dem Entlastungsplateau

Mittleres Drehmoment [Nmm]	OC 27 (16)	OC 35 (16)	GACNS (16x22)	OC 35 (16x22)
Maximum	4,508	3,41	5,143	7,282
Minimum	0,751	0	1,792	2,832

Tab. 11: Tabellarische Darstellung der Maxima und Minima der Messwerte (aller Messwerte, unabhängig von der Schweißeinstellung) des mittleren Drehmomentes [Nmm] auf dem Entlastungsplateau

Abbildung 35 zeigt alle Werte des mittleren Drehmoments auf dem Entlastungsplateau als Punktwolken. Der rechteckige Draht Neo Sentalloy (GACNS (16x22)) zeigt am deutlichsten eine Verschiebung der Punktwolke gegenüber den runden Copper NiTi Thermo-Active At 27°C und 35°C (OC 27 (16) und OC 35 (16)) nach oben. Bei dem Copper NiTi Thermo-Active At 35°C-Draht (OC 35 (16x22)) variieren die Messwerte zwischen knapp 3 Nmm und mehr als 7 Nmm. Tabelle 11 gibt die maximalen sowie minimalen Messwerte aller mittleren Drehmomente einer Drahtsorte, unabhängig von der Schweißeinstellung (Spannung und Pulsdauer), an.



5.3.2 Punktwolkendiagramm der Endpunkte des Entlastungsplateaus

Abb. 36: Messwerte der Endpunkte des Entlastungsplateaus [°] der 25 Untersuchungsgruppen

Endpunkte des Entlastungsplateaus [°]	OC 27 (16)	OC 35 (16)	GACNS (16x22)	OC 35 (16x22)
Maximum	47,0	42,0	26,4	38,2
Minimum	13,8	1,0	6,2	30,6

Tab. 12: Tabellarische Darstellung der Maxima und Minima der Messwerte (aller Messwerte, unabhängig von der Schweißeinstellung) der Endpunkte des Entlastungsplateaus [°]

Der Endpunkt des Entlastungsplateaus charakterisiert auf den Biegemoment-Biegewinkel-Kurven den Biegewinkel, an dem das Entlastungsplateau in den linearen Endabschnitt übergeht. Je kleiner dieser Wert ist, desto kürzer ist der lineare Abschnitt und entsprechend länger ist das Entlastungsplateau. Da der Wirkbereich des Entlastungsplateaus bei kieferorthopädischen Behandlungen wichtig ist, zeichnet sich ein qualitativ hochwertiger NiTi-Draht durch einen niedrigen Wert des Endpunktes des Entlastungsplateaus aus.

Die Messwerte für die Endpunkte des Entlastungsplateaus (Abb. 36) zeigen bei den beiden Copper NiTi Thermo-Active 35°C (OC 35 (16) und (16x22)) eine komprimierte Streuung im Bereich zwischen 30° und 40° Biegewinkel. Die Punktwolke des Copper NiTi Thermo-Active 27°C (OC 27 (16)) ist gegenüber OC 35 (16) nach oben verschoben. Dagegen liegen die Messwerte des Neo Sentalloy-Drahtes (GACNS (16x22)) deutlich niedriger als die der Copper NiTi Thermo-Active 27°C und 35°C, nämlich bis etwa 26° Biegewinkel. Tabelle 12 zeigt die maximalen sowie minimalen Werte aller Endpunkte des Entlastungsplateaus der einzelnen Drähte, unabhängig von der Schweißeinstellung.



5.3.3 Punktwolkendiagramm der Steigung des Entlastungsplateaus

Abb. 37: Messwerte der Steigung des Entlastungsplateaus [%] der 25 Untersuchungsgruppen

Steigung des Entlastungsplateaus [%]	OC 27 (16)	OC 35 (16)	GACNS (16x22)	OC 35 (16x22)
Maximum	7,51	6,79	7,38	7,38
Minimum	0,23	2,19	2,52	2,22

Tab. 13: Tabellarische Darstellung der Maxima und Minima der Messwerte (allerMesswerte, unabhängig von der Schweißeinstellung) der Steigung desEntlastungsplateaus [%]

Je geringer die Steigung des Entlastungsplateaus desto flacher ist der Kurvenverlauf. Das spricht für eine kontinuierliche und eher gleichmäßige Kraftabgabe des Drahtes auf die betroffenen Zähne über eine größere Bewegungsstrecke.

Die Werte für die Steigung des Entlastungsplateaus streuen innerhalb der Gruppe der Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) stärker als die der anderen

Drähte (Abb. 37). Die Steigungswerte liegen hier zwischen ca. 0,2 und 7,5 %. Die geringere Variationsspanne der anderen Drähte weist insgesamt auf eine eher konstante Kraftabgabe innerhalb der Entlastungsplateauphase hin und unterstreicht somit den pseudoelastischen Charakter dieser Schweißverbindungen. Tabelle 13 gibt die maximalen sowie minimalen Werte der Steigung des Entlastungsplateaus der einzelnen Drähte, ohne Berücksichtigung der Schweißeinstellung, wieder.



5.3.4 Punktwolkendiagramm der Steigung des linearen Entlastungsplateaus

Abb. 38: Messwerte der Steigung des linearen Endabschnitts [%] der 25 Untersuchungsgruppen

Bei der Steigung des linearen Endplateaus (Abb. 38) kann man eine annähernd gleiche Verteilung der Messwerte zwischen ca. 8 % und 20 % bei den beiden runden Copper NiTi Thermo-Active-Drähten (OC 27 (16) und OC 35 (16)) beobachten. Die Drehmomentabnahmen pro Winkel im Bereich des linearen Endabschnitts des rechteckigen Neo Sentalloy sind dagegen deutlich größer und erstrecken sich zwischen ca. 18 % und 48,5 %. Der Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)) zeigt ebenfalls bei einigen Schweißeinstellungen eine höhere Steigung als

die runden Drähte, jedoch eine relativ geringe Streuung der Messwerte (16 % bis 25 %). Tabelle 14 stellt die Maxima sowie Minima aller Messwerte der Steigung des linearen Endabschnitts der verschiedenen Drähte, unabhängig von der Schweißeinstellung, dar.

Steigung des linearen Endabschnitts [%]	OC 27 (16)	OC 35 (16)	GACNS (16x22)	OC 35 (16x22)
Maximum	19,68	20,23	48,48	24,93
Minimum	8,72	8,39	17,87	15,96

Tab. 14: Tabellarische Darstellung der Maxima und Minima der Messwerte (aller Messwerte, unabhängig von der Schweißeinstellung) der Steigung des linearen Endabschnitts [%]

5.4 Vergleich geschweißter und ungeschweißter Drähte

Das Ziel ist herauszufinden, in wie weit das Laserschweißen die elastischen Eigenschaften der hier untersuchten NiTi-Drähte beeinflusst. Dazu wurde ein Vergleich der Medianwerte der Messparameter geschweißter und ungeschweißter Drähte erstellt, der im Rahmen der vorliegenden Pilotstudie einen Überblick über mögliche Auswirkungen des Laserschweißens auf die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften der NiTi-Drähte liefert.

Zur Beschreibung der elastischen Eigenschaften wurden die Medianwerte der verschiedenen Messgrößen (vgl. 4.2.5.3) bestimmt und als Balkendiagramme (Abb. 39-42) dargestellt.

5.4.1 Medianwerte des mittleren Drehmoments auf dem Entlastungsplateau

Verglichen wurden die Werte für das mittlere Drehmoment der ungeschweißten und der geschweißten Proben (Abb. 39).



Abb. 39: Medianwerte des mittleren Drehmomentes [Nmm] auf dem Entlastungsplateau der ungeschweißten und der geschweißten Drähte

Der Vergleich der Medianwerte des mittleren Drehmomentes zeigt bei allen vier Drahtsorten, dass nach dem Laserschweißen das mittlere Drehmoment auf dem Entlastungsplateau bei den untersuchten Proben ansteigt.

Der Draht Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)) zeigt mit ca. 4,5 Nmm mittlerem Drehmoment im Median den größten Wert eines superelastischen Drahtes in diesem Vergleich. Die Medianwerte für das mittlere Drehmoment der Drähte Neo Sentalloy (GACNS (16x22)), Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16)) und Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) betrugen in absteigender Reihenfolge 3,2 Nmm, 2,5 Nmm und 2,2 Nmm.

Bei dem Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) steigt das mittlere Drehmoment nach dem Schweißen verglichen mit den ungeschweißten Drähten um 0,1 Nmm an, bei dem Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16)) um 0,6 Nmm und bei dem OC 35 (16x22) um 1,3 Nmm. Bei dem Neo Sentalloy (GACNS (16x22)) ist die Zunahme am größten und liegt bei 2,2 Nmm.



5.4.2 Medianwerte der Endpunkte des Entlastungsplateaus

Abb. 40: Medianwerte der Endpunkte des Entlastungsplateaus [°] der ungeschweißten und geschweißten Drähte

Auch bei dem Endpunkt des Entlastungsplateaus lagen die Medianwerte der geschweißten Proben weit über denen der ungeschweißten NiTi-Drähte. Der Draht Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) zeigt mit 40° für den Endwinkel des Entlastungsplateaus in diesem Vergleich den größten Medianwert, gefolgt von dem Draht Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)) mit 36,2° und dem Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16))-Draht mit 32,4° im Median. Der Draht GACNS (16x22) zeigt mit 12,1° den kleinsten medianen Wert eines geschweißten superelastischen Drahtes und die geringste Abweichung zu dem ungeschweißten Neo Sentalloy (7,1°). Die größte Abweichung zu den ungeschweißten Proben wiesen in absteigender Reihenfolge die Drähte OC 35 (16x22) (29,8°), OC 27 (16) (27,8°) und OC 35 (16) (26°) auf. Die höheren Endpunktwerte bedeuten eine Verkürzung der Gesamtstrecke des Entlastungsplateaus.



5.4.3 Medianwerte der Steigung des Entlastungsplateaus

Abb. 41: Medianwerte der Steigung des Entlastungsplateaus [%] der ungeschweißten und geschweißten Drähte

Der Draht Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22)) mit einer medianen Steigung von 5,3 % hat die höchste Steigung unter den geschweißten Drähten. Der Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16))-Draht weist im Median eine Steigung des Entlastungsplateaus von 4,5 % auf. Der Draht Neo Sentalloy (GACNS (16x22)) folgt mit einer medianen Steigung von 4,3 %. Den kleinsten Wert für die Steigung des Entlastungsplateaus wies der Draht Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) mit 3,7 % im Median auf.

Im Vergleich zu den ungeschweißten Drähten hat die mediane Steigung des Entlastungsplateaus nach dem Laserschweißen bei allen Drahtsorten zugenommen. Am meisten nahmen die medianen Steigungswerte des Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) und des Neo Sentalloy (GACNS (16x22)) nach dem Laserschweißen zu.



5.4.4 Medianwerte der Steigung des linearen Endabschnitts

Abb. 42: Medianwerte der Steigung des linearen Endabschnitts [%] der ungeschweißten und geschweißten Drähte

Die Steigung des linearen Endabschnittes lag bei allen geschweißten Drähten unter den Werten der ungeschweißten Proben. Diese Werte decken sich mit der Beobachtung, dass der Endwinkel des Entlastungsplateaus sich bei allen Drähten nach rechts verschoben hat (sich vergrößert hat) und das mittlere Drehmoment nur gering angestiegen ist.

Der größte Wert für die mediane Steigung des linearen Endplateaus war bei dem Draht Neo Sentalloy (GACNS (16x22)) mit 29,6 % abzulesen, gefolgt von dem Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16x22))-Draht mit einer Steigung im Median von 20,1 %. Die beiden runden Drähte Copper NiTi Thermo-Active At 27°C (OC 27 (16)) und Copper NiTi Thermo-Active At 35°C (OC 35 (16)) hatten hier ähnliche Steigungswerte von 11,3 % und 11,2 % im Median.