

Institut für Angewandte Forschung
Abteilung: Werkstoffe und Umwelt

Formgedächtnis-(FG)-Marknagel
zur Knochenverlängerung

Förderkennziffer: 1700598

S c h l u ß b e r i c h t

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel
Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing.(FH) J. Strittmatter
Förderzeitraum: 01.09.1998 bis 30.04.2000

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung/ (Problemstellung, Stand der Technik, Zielsetzung)	Seite 4
1.1 Aufgabenstellung	Seite 4
1.2 Voraussetzungen im Werkstoffprüflabor (Ausstattung, Know-how)	Seite 5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	Seite 6
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	Seite 7
2. Stand der Forschung	Seite 8
2.1 Marknagel	Seite 8
2.1.1 Biologische Grundlagen	Seite 8
2.1.2 Zur Geschichte des Marknagels	Seite 9
2.1.3 Operationstechnik	Seite 10
2.1.4 Marknagel nach Prof. Betz und Baumgart	Seite 12
2.2 Formgedächtnislegierungen	Seite 13
2.1.1 Entdeckung des Effekts	Seite 13
2.1.2 Erläuterung des Effekts	Seite 15
2.1.3 Technische Anwendungen	Seite 21
3. Durchgeführte Arbeiten / Ergebnisse	Seite 26
3.1 Theoretische Vorarbeiten / Patentsituation	Seite 26
3.2 Sperrmechanismus	Seite 27
3.2.1 Gerichtete Polymere (Fellversuche)	Seite 27
3.2.2 Gerollte Bleche (Blechversuche)	Seite 28
3.2.3 Sperre und Rohrsegment	Seite 35
3.3 Versuche zur Auswahl einer geeigneten FGL	Seite 38
3.3.1 Ergebnisse der Messungen am FG-Rohr	Seite 40
3.3.2 Ergebnisse der Messungen am FG-Draht 4	Seite 49
3.3.3 Ergebnisse der Messungen am FG-Draht 5	Seite 53
3.3.4 Ergebnisse der Messungen am FG-Draht 6	Seite 55
3.3.5 Abschlußbetrachtung der Versuchsergebnisse zur FGL-Auswahl	Seite 57
3.4 Funktionsprinzip des FG-Marknagel	Seite 58
3.5 Auslegung der Gegenfeder	Seite 59
3.6 Heizpatrone	Seite 61

3.7 FG-Marknagel (Prototyp)	<i>Seite 62</i>
3.7.1 Einzelteile des Marknagels	<i>Seite 62</i>
3.7.2 Fügen der Teile	<i>Seite 70</i>
3.7.3 Montage des Marknagelprototyps	<i>Seite 72</i>
3.7.4 Funktion des Marknagelprototyps	<i>Seite 73</i>
3.8 Prototyp in der Klimakammer	<i>Seite 74</i>
3.9 Abschlußbemerkung zu den durchgeführten und nicht durchgeführten, mit Ausblick	<i>Seite 81</i>
4 Vorträge, Veröffentlichungen, Veranstaltungen	<i>Seite 83</i>
5 Mittelverwendung	<i>Seite 84</i>
6 Zusammenfassung	<i>Seite 85</i>
7 Literaturverzeichnis	<i>Seite 87</i>

1. Einführung/ (Problemstellung, Stand der Technik, Zielsetzung)

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Linearantriebes mittels Formgedächtnislegierungen (FGL) zur Knochenverlängerung und Defektüberbrückung entsprechend der Methode nach Betz und Baumgart. Der zu entwickelnde Linearantrieb sollte im Idealfall folgende Eigenschaften aufweisen:

- mechanisch einfach aufgebaut
- leicht zu miniaturisieren
- großer Arbeitsweg
- variable Positionierung
- hohe Leistung
- kostengünstig

Zur Entwicklung eines derartigen FG-Marknagels sollten die folgenden Teilprobleme gelöst werden:

- Auswahl einer geeigneten FGL zur Realisierung der benötigten Kräfte innerhalb der möglichen Temperaturdifferenz
- Auswahl der Heizspirale und Messung der Aufheiztemperaturen an der Marknageloberfläche
- Ausarbeiten der konstruktiven Lösung hinsichtlich der ermittelten Werte bezüglich des Verhältnisses Kraft/Weg
- Werkstoffauswahl hinsichtlich der Implantierbarkeit, der Schweißbarkeit mit Laser und der Aufheizung
- Mechanische Sicherung (Arretiermechanismus) bei Belastung der Extremität durch den Patienten und Entwicklung eines Rückstellmechanismus
- Verbindungstechnik der Komponenten
- Erprobung der entwickelten Prototypen in Labortests

1.2 Voraussetzungen im Werkstoffprüflabor (Ausstattung und Know-how)

Durch die bisherigen Arbeiten konnte am Institut für Angewandte Forschung, Schwerpunkt „Werkstoffe und Umwelt“, der FH-Konstanz das folgende Know-how gewonnen werden:

Marknagel:

- Übersicht zum Stand der Technik durch umfassende Literaturrecherchen und den Besuch mehrerer einschlägiger Kongresse, wie z.B. der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Unfallheilkunde in Berlin,
- Kenntnisse zu Biomaterialien: Verfügbarkeit, Eigenschaften, Prüfverfahren, Problembewußtsein zum Einsatz komplexer Technik am Patienten. Durch die Teilnahme bei verschiedenen Operationen konnte z.B. die aufwendige Handhabung der sterilisierten Teile beobachtet werden,
- Detailkenntnisse zur Marknagelung: geometrische Randbedingungen angepaßt an die anatomischen Gegebenheiten, Belastungen, erforderliche OP-Werkzeuge sowie OP-Vorrichtungen, ...

Bezüglich der medizinischen Seite ergab sich das wertvolle Know-how vor allem aufgrund der intensiven Zusammenarbeit mit dem Mittragsteller Prof. Dr. Betz, der zusammen mit Herrn Dr. Baumgart Inaugurator der voll implantierbaren Marknagel-systeme zur Knochenverlängerung und knöchernen Defektüberbrückung ist. Die wissenschaftlichen Arbeiten bauen auf dem klassischen Prinzip nach Ilisarov auf. Seit Ende der 80er Jahre befaßt sich der Mittragsteller schwerpunktmäßig mit diesen Fragestellungen [1].

Ein Teststand zur Belastung von Marknägeln mit bis zu 1.000 N in axialer Richtung sowie zur gezielten Einleitung von Querkräften steht bereits zur Verfügung. Die Meßwerterfassung und -verarbeitung sowie die Ansteuerung des bisherigen Motors erfolgen rechnergestützt. Der Teststand sowie der motorisch betriebene Marknagel mit zentraler Distractionsspindel wurden auf der Hannover-Industriemesse 1997 präsentiert.

Formgedächtnislegierungen (FGL):

Durch die bisherigen Arbeiten konnten am Institut für Angewandte Forschung, Schwerpunkt „Werkstoffe und Umwelt“, der FH-Konstanz innerhalb des Forschungsprojektes „Energieautonome Grundwasserförderung durch Einsatz von FGL“ sehr weitreichendes Know-how bezüglich der Anwendung von FGL gewonnen werden [2].

Neben mehreren Modellen von rotierenden Wärmekraftmaschinen mit FGL als Antrieb, die in den Jahren 1995 bis 1997 auf verschiedensten internationalen Fachmessen vorgestellt wurden, stehen im Werkstoffprüflabor mehrere Prüfstände zur Ermittlung werkstoffspezifischer Kennwerte zur Verfügung. Diese konnten unter Beteiligung der fachhochschuleigenen Werkstätten entsprechend den in diesem Entwicklungsvorhaben erforderlichen Tests mit mäßigem Aufwand umgebaut werden.

Das Werkstoffkundelabor der FH Konstanz ist für die Prüfung korrosionsbeständiger Stähle und anderer metallischer Werkstoffe umfassend eingerichtet. Zur Ausrüstung gehören u.a. ein Mikrohärteprüfgerät, ein Spektrometer, Rasterelektronenmikroskop, ein Dilatometerprüfgerät sowie diverse Korrosionsprüfungseinrichtungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf dieses aFuE-Projektes orientierte sich am Zeitplan des Antrages. Aufgrund der herausgearbeiteten Ergebnissen der Literaturrecherche, mußte diese zwangsläufig verlängert werden, um etwaige patentrechtliche Probleme mit anderen implantierbaren Marknägeln zur Knochenverlängerung bei einem späteren Transfer gleich im Vorfeld zu vermeiden. Die zeitliche Ausdehnung dieser theoretischen Phase verbunden mit der Tatsache, daß die erste Lösungsvariante bzgl. des Sperrmechanismus verworfen werden mußte, hatten dann auch zur Folge, daß es im Ablauf des Vorhabens zu einer Zeitverschiebung des ursprünglichen Arbeitsplanes kam, der trotz massivem Einsatz studentischer Hilfskräfte bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht mehr eingeholt werden konnte.

Dennoch war die Ausweitung der theoretischen Phase sehr wichtig und sinnvoll, wie sich gerade in den laufenden Verhandlungen mit potentiellen Industriepartnern herauskristallisiert. In all diesen Gesprächen ist es für die industriellen Verwerter sehr be-

deutend, daß die Abgrenzung zu konkurrierenden Verfahren patentrechtlich zu keinen Komplikationen führen kann.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Vorhabens wurde vor allem mit Prof. Dr. med. A. Betz des Klinikums Konstanz zusammengearbeitet, der zusammen mit Herrn Prof. Dr. med. R. Baumgart Inaugurator der voll implantierbaren Marknagelsysteme ist.

Außer den im Antrag genannten Mitantragssteller wurde in diesem Projekt mit keiner anderen Stelle konkret zusammengearbeitet, was sich aufgrund der Neuigkeit des Verfahrens und der Neugierde der Konkurrenten von selbst erklärt. Nichtsdestotrotz wurden bei der Lösung der Teilprobleme kurzfristig entsprechende Firmen, Institute und auch andere Fachhochschule und Einzelpersonen mit eingebunden.

2. Stand der Forschung

2.1 Marknagel

2.1.1 Biologische Grundlagen

Jedes Gewebe reagiert auf eine Verletzung unter normalen Bedingungen mit Reparatur oder Heilungsvorgängen durch Zellvermehrung. Wird nach einer künstlich gesetzten Verletzung ein Dehnungsreiz z.B. durch Zug gesetzt, so kann diese Zellvermehrung und damit Gewebsneubildung nahezu beliebig verlängert werden. Hierdurch können auch große Knochenverluste, verursacht durch Frakturen oder angeborene Fehlstellungen wie Beinverkürzungen, sowie Fehlstellungen auf Grund von Infektionen z.B. Kinderlähmung ohne Knochenübertragung ausgeglichen werden.

Durch das Verfahren der Kallusdistraktion wird die Kallusbildung im Knochenspalt mit Hilfe einer Fixatur bzw. eines Marknagels gefördert. Kallus ist das Keimgewebe des Knochens, das sich bei Knochenbrüchen oder Durchtrennung in der Bruchlücke entwickelt. Der zu überbrückende Spalt sollte nicht größer als 1 mm sein.

Der Vorgang beginnt mit der Kallusbildung am Spalt. Das Kallus ist zunächst rein bindegewebsartig. Später verfestigt es sich durch Kalkeinlagerungen und wird zu Knochengewebe umstrukturiert. Drei Wochen nach der Durchtrennung bilden sich Gefäßsysteme.

Für die Regeneration müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Für die Knochenneubildung aktivierbare Zellen im Periost und Endost
- Die anhaltende Fähigkeit zum Umbau seiner Strukturen
- Eine sehr gute Blutversorgung.

Die sehr gute Versorgung mit Blutgefäßen, der hohe Gehalt an anorganischen Salzen und der knochentypische intensive Mineralstoffwechsel machen das Knochengewebe zu einem wichtigen Stoffwechseldepot, auf dessen Calcium- und Phosphorspeicher der Organismus zugreifen kann. Dadurch ist der Knochen außerdem in der Lage, sich verändernden mechanischen Beanspruchungen lebenslang anzupassen.

2.1.2 Zur Geschichte des Marknagels

Schon 1869 wurden diverse Techniken der einseitigen Verlängerung von B. von Langenbeck beschrieben, ebenso um 1878 von A. von Eiselsberg. 1904 wurde ein Verfahren der kontinuierlichen Extension mit Hilfe eines Nagel-Zug-Gipsverbandes von A. Codivilla in Bologna durchgeführt, dabei wurde das Bein in einem Beckengips fixiert und der Nagel im Gips verankert.

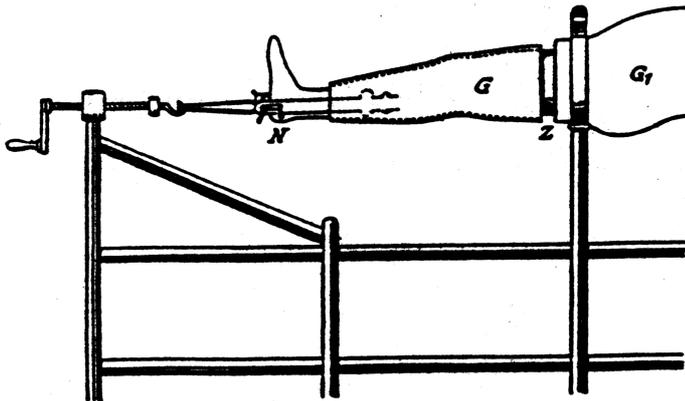


Abb. 2.1.2.1: Fersen-Nagelzug-Gipsverband nach A. Codivilla 1904 [3]

Das Verfahren wurde laufend weiterentwickelt. In den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts waren Verlängerungsapparate mit Spindeln und Drähten im Einsatz, mit denen auch schon die Möglichkeit der Achskorrektur von Frakturen gegeben war.

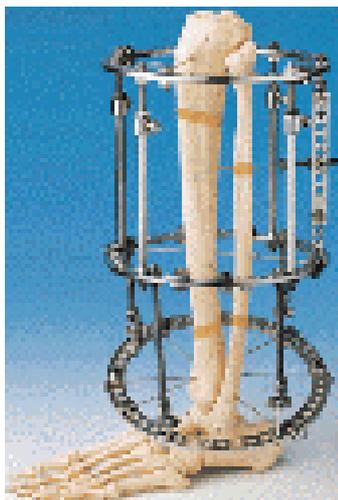


Abb. 2.1.2.2: Ringfixateur nach Ilisarov [4]

Erst die wissenschaftlichen Untersuchungen von Prof. G. A. Ilisarov ab 1954 und die Entwicklung seines Ringfixateurs erlaubten eine breite klinische Anwendung dieses Verfahrens in der Chirurgie und Orthopädie. G. A. Ilisarov fand heraus, daß die optimale Verlängerung bei 1 mm pro Tag liegt und konstruierte einen Ringfixateur, der bis Ende der 90er Jahre das beste Verfahren darstellt.

Parallel arbeiteten auch in Europa Wissenschaftler an der Distractionstechnik. Von R. Wittmoser ist 1944 ein Ringfixateur entwickelt worden, der der Ilisarovschen Fixatur sehr ähnlich ist.

Prof. Ilisarovs Erkenntnisse gelangten Anfang der 80er Jahre durch Kontakte zu den italienischen Kollegen Monticelli und Spinelli aus der Sowjetunion in den Westen. Anlässlich seiner Besuche hielt Prof. Ilisarov 1992 eine Vorlesung in der chirurgischen Universitätsklinik Ulm. Hierbei wurden die bis dahin in der unfallchirurgischen Abteilung mit seiner Technik gemachten Erfahrungen diskutiert und Patienten, die zu diesem Zeitpunkt mit seinem Verfahren behandelt wurden, vorgestellt.

2.1.3 Operationstechnik

Zunächst wird ein Metallring im rechten Winkel zum Knochen mit zwei oder drei Drähten fixiert. Die Drähte haben einen Durchmesser von 1,5 mm bis 1,8 mm. Das Spannen der Drähte erfolgt über spezielle Sechskantschrauben, welche eine Befestigung der Drähte im Schraubenkopf ermöglichen. Die Anzahl der Ringe hängt von der Länge des Knochens und dessen Fehlstellung ab. Es werden mindestens zwei Ringe benötigt. Oft werden vier Ringe montiert, die äußeren Ringe gelenknah, die inneren fraktur-nah. Die Ringe werden mit Teleskopstangen oder Gewindestangen verbunden. Erst wenn alle Drähte im richtigen Winkel gespannt sind kann der Knochen durchtrennt werden.

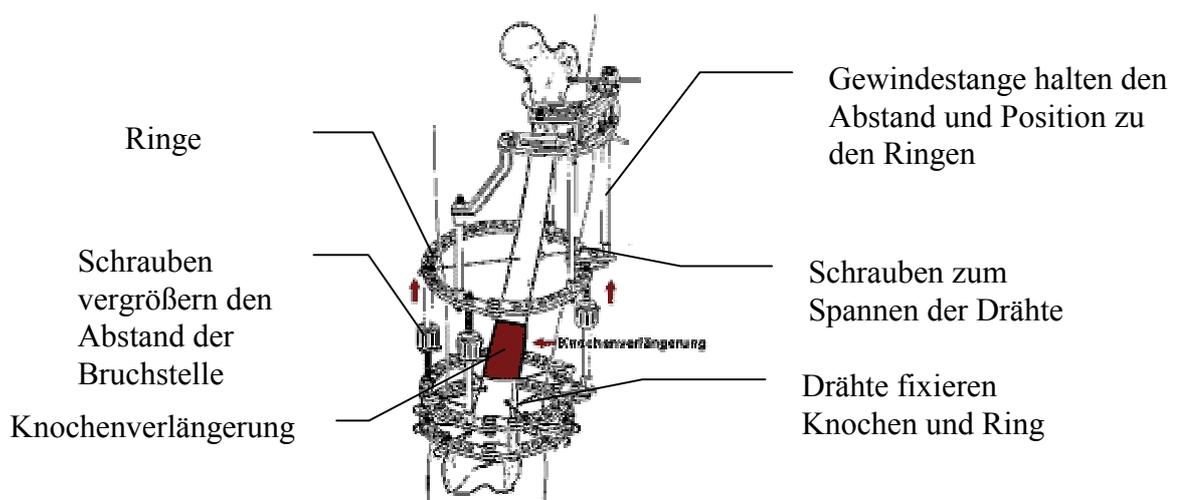


Abb. 2.1.3.1: Montage Fixateur [5]

Die Teleskop- bzw. Gewindestangen ziehen die Bruchenden auseinander. Zur Überprüfung der Montage und Knochenlage erfolgt in der Regel eine Röntgenkontrolle.

Nach einer Latenzzeit von ca. 8 Tagen werden die Enden mit der Geschwindigkeit von 1 mm pro Tag gezogen. Nach Erreichen der gewünschten Länge erfolgt die Ruhephase zur Reifung (Kalzifizierung) des Knochens.

Anwendungsgebiete für die Ilisarov-Technik im Überblick:

- Behandlung von Knochendefekten nach offenen Brüchen
- Verlängerungen, Segmentverschiebung
- Verlängerungen von Armen und Beinen bei angeborenen oder unfallbedingten Fehlstellungen und Verkürzungen
- Wiederherstellung des Knochens nach Entfernung eines Knocheninfektherdes

Es werden auch andere Systeme zur Kallusdistraktion angeboten, z.B. Hybridsysteme wobei der Knochen mit Nägeln fixiert wird.

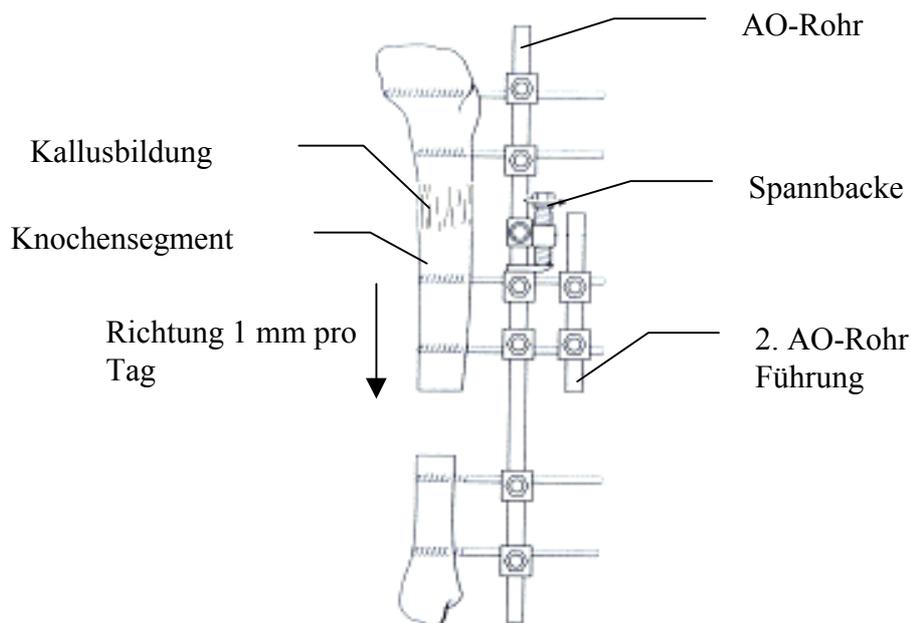


Abb. 2.1.3.2: Segmentverschiebung [3]

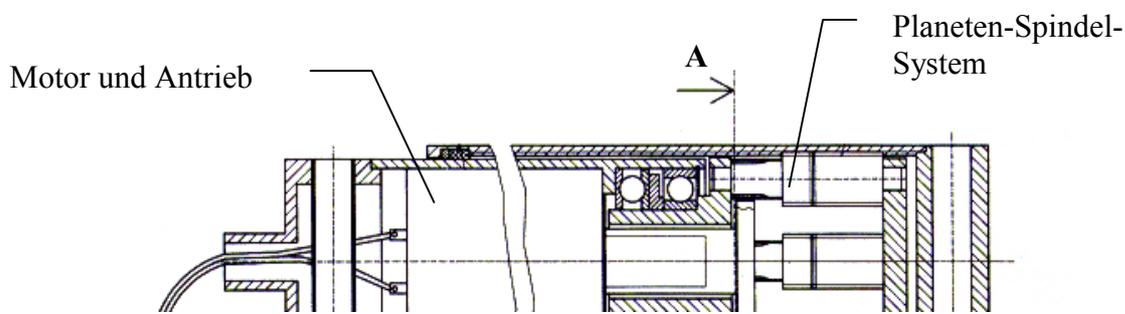
Damit ist auch eine Segmentverschiebung möglich. Ist der Knochen nach einem Unfall soweit zerstört, daß eine Verlängerung nicht möglich ist, kann ein Knochensegment mit Nägeln fixiert auf einer Schiene mit 1 mm pro Tag verschoben werden. Das Grundprinzip ist das selbe wie bei der Ilisarov-Variante. Unter anderem ist auch ein weiteres System auf dem Markt, der sogenannte Marknagel.

2.1.4 Marknagel nach Prof. Betz und Prof. Baumgart

Der wesentliche Unterschied zu dem oben genannten Verfahren liegt darin, daß der Marknagel in die Knochenhöhle implantiert wird. Dadurch wird die Gefahr der Wundinfektion deutlich herabgesetzt. [6]

Das Institut für Angewandte Forschung, Schwerpunkt Werkstoffe und Umwelt, der FH-Konstanz hat in Zusammenarbeit mit dem Klinikum Konstanz einen Teleskopakuator-Marknagel (TAM) entwickelt, der schon mehrfach erfolgreich eingesetzt werden konnte. Bei dieser Methode wird der Knochen, der verlängert werden soll, zunächst getrennt. In die Markhöhle des Röhrenknochens wird dann der Marknagel eingeführt und mit Schrauben an den beiden Knochenstücken fixiert. Die notwendige Energie und die Steuersignale für den Elektromotor werden durch Hochfrequenz-Energieeinkopplung auf einen Empfänger unter der Haut übertragen. Die Haut wird nach der Implantation wieder vollständig geschlossen, so daß das Infektionsrisiko minimal ist. Die Distraction erfolgt schmerzfrei mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 mm pro Tag. Zwischen den sich auseinander bewegenden Knochenstücken wird Knochenmaterial nachgebildet, das später die Festigkeitseigenschaften des ursprünglichen Knochen besitzt. Der TAM besteht aus einem Getriebemotor sowie einer neuartigen Planetenrollenspindel. Letztere besitzt ein Teleskoprohr mit einem Innengewinde. Das Teleskoprohr umschließt das Gehäuse des Getriebemotors und führt die Axialbewegung aus. Der TAM zur medizinischen Knochenverlängerung besteht aus Implantatstahl. Er hat einen Außendurchmesser von 16 mm bei einer Länge von 120 mm. Der maximale Hub beträgt 50 mm, die zulässige Axialbelastung 1000 N. Er besitzt folgende Vorteile:

- Patientenfreundlich
- Minimales Infektionsrisiko
- Schmerzfreie Distraction
- Leistungsfähig
- Hohe Kräfte auf kleinen Bauraum
- Schlupffreiheit und hohe Präzision bei Positionieraufgaben
- Wirtschaftlich
- Hoher Wirkungsgrad
- Selbsthemmung rückwärts



2.2 Formgedächtnislegierungen

2.2.1 Entdeckung des FG -Effekts

Bekannt ist der Formgedächtniseffekt seit 1932, als beim Abkühlen einer Gold-Kadmium-Legierung eine Formveränderung beobachtet wurde. 1951 wurde der Effekt an einer Au-Cd Probe untersucht: Ein zu einem Bogen verformter Stab "erinnerte" sich bei Erwärmung an seine Form. Das Phänomen wurde anschließend intensiv untersucht.

Im Jahre 1962 experimentierte Buehler am U.S. Naval Ordnance Laboratory mit Nickel-Titan-Legierungen, die mit 50 % Anteil Nickel als Standardlegierungen bekannt wurden. Zusätzlich wurden mehrere Legierungen gefunden, die den Formgedächtnis-effekt aufweisen (Tabelle 2.1.1.1).

Ferner wurden noch einige Fe-basierende Elemente gefunden, die zwar hohe Umwandlungstemperaturen aufweisen und preiswert sind, aber wegen der geringen Wegeffekte zur Zeit technisch noch nicht angewendet werden.

NiTi ist für industrielle Zwecke besonders gut geeignet. Die hohe Überhitzbarkeit und die hohe Anzahl der Zyklen, sowie beim Ein- wie auch beim Zweibegeeffekt, sind auch für die Anwendung des Marknagels interessant. Die schlechte Zerspanbarkeit ist ein Nachteil.

Tabelle 2.1.1.1: Die Eigenschaften der wichtigsten Formgedächtnis-Legierungen [7]

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte [g/cm^3]	6,4...6,5	7,8....8,0	7,1....7,2
Zugfestigkeit [N/mm^2]	800...1000	400....700	700....800
Zulässige Spannung σ_{zul} [N/mm^2]	250	75	100
Bruchdehnung [%]	40....50	10...15	5...6
Maximale A_S -Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	120	120	170
Überhitzbarkeit [$^{\circ}\text{C}$]	400	160	300
Einweg max. ϵ_1 [%]	8	4	5
Zweiweg max. ϵ_2 [%]	5	1	1,2
Zahl der Zyklen []	100000	10000	1000
Verminderung der Effektgröße []	kein Abbau	ca. 10 %	ca. 10 %

Der Temperaturbereich kann bei NiTi für die Umwandlung von Martensit zu Austenit zwischen -150°C und 150°C liegen. Der Temperaturbereich läßt sich durch Verrichten von Arbeit (z.B. Heben eines Gewichts) während der Umwandlung verschieben.

Eine FGL kann auf verschiedene Arten erwärmt werden.

- Direkter Anschluß an eine Gleichstromquelle: Dabei sollte der Querschnitt im Vergleich zu seiner Länge sehr klein sein (Draht). Durch den Stromfluß im Draht werden die erforderlichen Temperaturen schnell erreicht, die Umwandlung erfolgt dementsprechend zügig.
- Durch ein Heizelement: Das Aufheizen kann dabei sehr zügig erfolgen, allerdings kann sich das Abkühlen verzögern, da auch das Heizelement abkühlen muß.
- Durch ein Fluid: Dabei wird die Legierung mit Flüssigkeiten oder Gasen umströmt und nimmt die Umgebungstemperatur an.
- Durch Strahlungswärme: Das FG-Element sollte eine dünne Form und eine große Oberfläche haben (Blech).

2.2.2 Erläuterung des Effekts

Verformt man eine FGL bei niedriger Temperatur und erwärmt sie anschließend, biegt sich das Material in die ursprüngliche Form zurück. In der Niedertemperaturphase besteht das Gefüge aus Martensit, angeordnet in einer Zwillingstruktur. Die Gestalt der

Legierung läßt sich durch Verschieben der Zwillingsgrenzen leicht verändern. Diese Form wird unterhalb der Umwandlungstemperatur beibehalten. Erst bei Erwärmung auf Umwandlungstemperatur "erinnert" sich die Legierung an die ursprüngliche Gestalt und nimmt diese Form wieder an. Beim Abkühlen wird die Hochtemperaturphase (Austenit) wieder in verzwilligte Martensitstruktur umgewandelt.

Bei der Umwandlung entstehen im Gegensatz zu Stahl kaum elastische Spannungen. Der Volumenunterschied zwischen Martensit und Austenit führt bei Stahl zu Versetzungen, die eine Rückwandlung verhindern. Deshalb weist Stahl keinen Memory-Effekt auf.

Es gibt mehrere verschiedene Arten des Formgedächtniseffekts:

- der Einwegeffekt
- der Zweiwegeffekt
- der All-Round-Effekt
- die Pseudoelastizität
- die Dämpfung

2.2.2.1 Einwegeffekt

Ein Draht aus FGL wird im kalten Zustand (Martensit) verformt z.B. gezogen. Bei Erwärmung zieht sich der Draht wieder auf seine ursprüngliche Länge zusammen. Diese Länge wird auch im kalten Zustand beibehalten. Der Draht kann dann erneut verformt werden. Durch das Verformen wird Arbeit in den FG-Draht gesteckt, die bei der Erwärmung wieder frei wird. Hängt ein Gewicht am Draht und ist die dadurch entstandene Spannung kleiner als die Zugspannung im Austenit wird das Gewicht bei der Erwärmung angehoben.

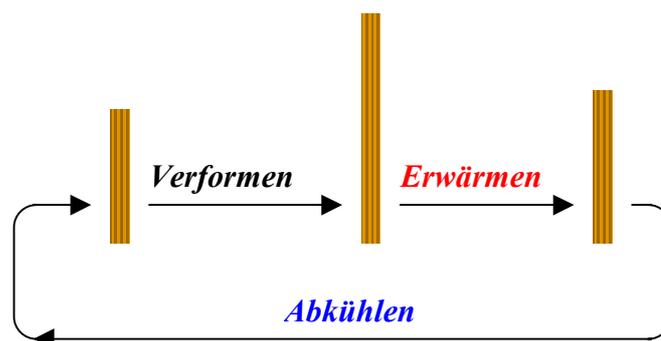


Abb. 2.2.2.1.1: Einwegeffekt

Die FGL wird im martensitischen Zustand innerhalb des Dehnungsbereichs des Martensitplateaus gedehnt. Diese Form wird beibehalten, solange keine Temperaturänderung erfolgt. Beim Erwärmen und Erreichen der Austenit-Start-Temperatur (A_s) beginnt die Rückverformung. Die Umwandlung ist bei Erreichen der Austenit-Finish-Temperatur (A_f), je nach Legierung ca. -100°C bis 150°C , abgeschlossen. Während dieses Vorgangs kann Arbeit verrichtet werden.

Die Martensitbildung beginnt dann bei Abkühlung der FGL auf den Martensit-Start-Punkt (M_s) und ist am Martensit-Finish-Punkt (M_f) abgeschlossen. Wenn die Abkühlung ohne Formänderung erfolgt, wird der Effekt Einwegeffekt genannt. Die Umwandlung von Austenit zu Martensit findet bei einer tieferen Temperatur als die Martensit-Austenit-Umwandlung statt: Es tritt eine Hysterese auf.

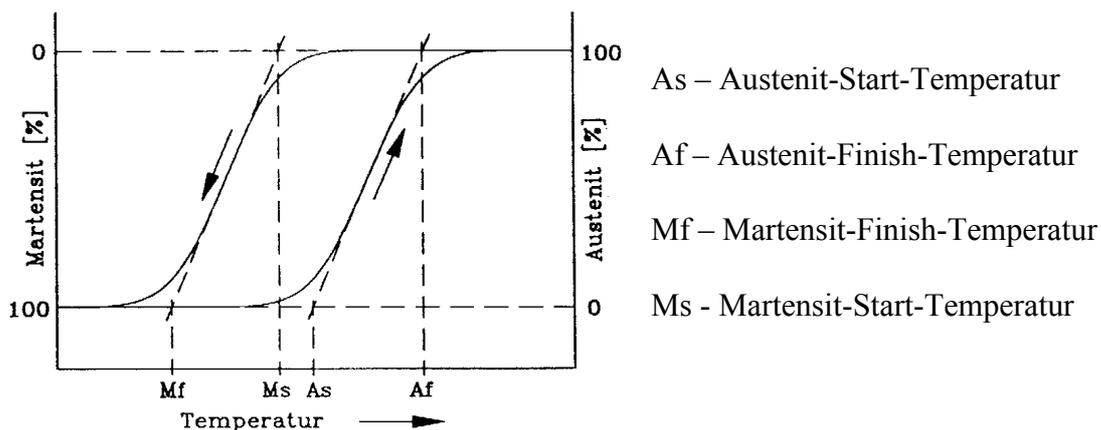
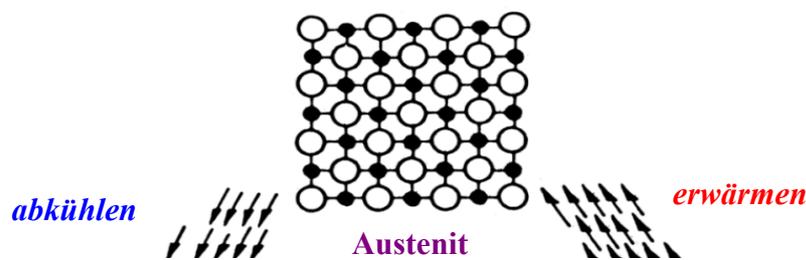


Abb. 2.2.2.1.2 Temperatur/Martensit-Austenit-Zusammensetzung [7]

Die Vorgänge im Gitter

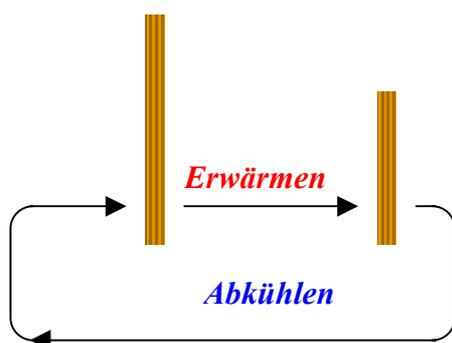
Im kalten Zustand weist die FGL eine geordnete Martensitstruktur auf. Die Orientierung der Martensitplateaus ist von der Temperatur abhängig. Da die Martensitplatten mit sinkender Temperatur wachsen und sich anpassen, entstehen keine bzw. sehr geringe elastische Spannungen. Dieses Martensitplateau ist ein Bereich mit geringer Festigkeit, dessen Grenzflächen (Zwillingsstruktur) sich leicht verschieben lassen (Entzwillingen). In der Hochtemperaturphase (Austenit) läßt sich das Material nicht so leicht verformen. Das Volumen bleibt während der verschiedenen Zustände konstant.



Ist eine verformende Kraft stark genug um die Legierung im martensitischen Zustand zu dehnen, aber zu schwach um eine Verformung im austenitischen Zustand zu bewirken, so spricht man vom Zweiwegverhalten [7].

2.2.2.2 Zweiwegeffekt

Von einem Zweiwegeffekt spricht man, wenn die FGL sich an zwei Formen "erinnern" kann. An eine Form in der Niedertemperaturphase und eine Form in der Hochtemperaturphase. Die Legierung pendelt auf Grund der Temperaturänderung ohne äußere Krafteinwirkung zwischen zwei Zuständen hin und her.



Der Draht wird auf Umwandlungstemperatur erwärmt und zieht sich zusammen. Beim Abkühlen dehnt sich der Draht wieder auf seine ursprüngliche Länge aus. Bei erneuter Erwärmung zieht er sich wieder zusammen, usw.

Die Entstehung des Zweiwegeffekts hat verschiedene Ursachen. Er kann auf mehrere Arten "antrainiert" werden.

- Durch SME-Training (Shape Memory Effect Training)

Die FGL wird wiederholt im martensitischen Zustand verformt und anschließend erwärmt. Die ersten Zyklen laufen wie im Einwegeffekt ab, aber nach einigen Verfahrenszyklen stabilisiert sich eine bevorzugte Kristallausrichtung.

- Durch SIM-Training (Stress Induced Martensite Training)

Im Hochtemperaturzustand wird die Legierung mehrfach verformt. Dabei entsteht spannungsinduzierter Martensit mit bevorzugter Orientierung. Die Form wird im Niedertemperaturbereich ohne äußere Krafteinwirkung eingenommen.

- Durch kombiniertes Training

Die SME- und SIM-Verfahren werden kombiniert. Die Legierung wird in der Hochtemperaturphase verformt und im eingespannten Zustand abgekühlt.

- Auf Grund von Ausscheidungen

Bei Legierungen mit hohem Nickelanteil können bevorzugte Martensitvarianten durch Spannungsfelder in der Umgebung von Ti_3Ni_4 -Ausscheidungsteilchen entstehen. (All-Round-Effekt)

Auch beim Zweibegeffekt tritt zwischen den beiden Umwandlungen Austenit-Martensit und Martensit-Austenit eine Hysterese auf, die in Gegensatz zum Einwegeffekt jedoch in jedem Fall mit einer Gestaltumwandlung verbunden ist. Die Größe der Hysterese ist von der Legierungszusammensetzung abhängig.

Die Differenz zwischen Austenit-Start- und Austenit-Finish-Temperatur liegt je nach Legierungszusammensetzung zwischen 10 Kelvin und 80 Kelvin.

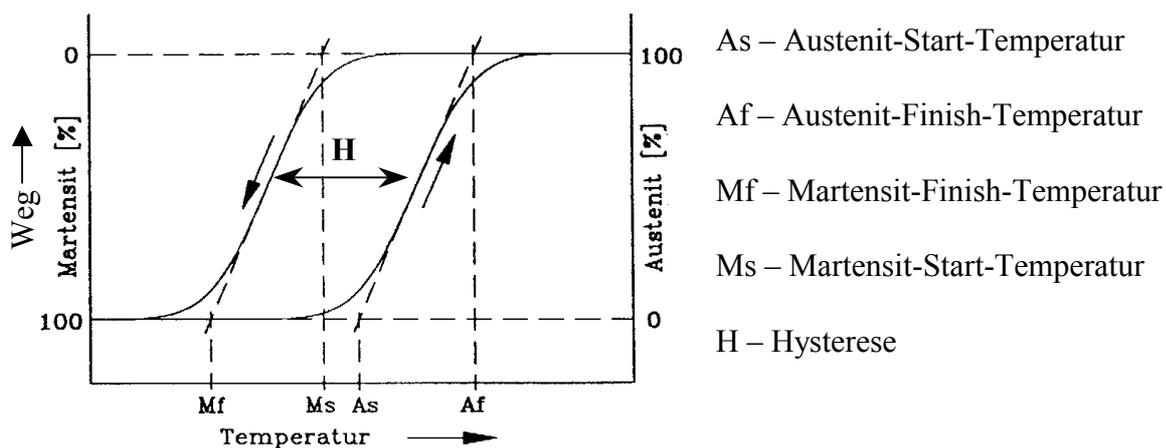


Diagramm 2.2.2.2.2 Hysterese [7]

2.2.2.3 All-Round-Effekt

Der All-Round-Effekt wird durch die Ausscheidung von Ti_3Ni_4 -Teilchen bei Legierungen mit mehr als 50,5 at.% Nickel verursacht und ist im Prinzip ein sehr stark ausgeprägter Zweiwegeeffekt.

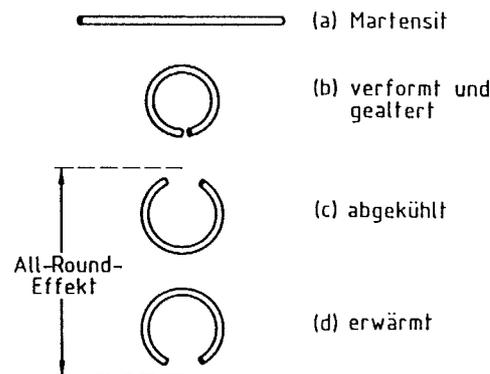


Abb. 2.2.2.3.1 All-Round-Effekt [7]

Abb. 2.2.2.3.1.a Martensit: Legierung im " Rohzustand"

Abb. 2.2.2.3.1.b verformt und gealtert: Das Material wurde gebogen und im eingezogenen Zustand unterhalb von 600° Grad einer Alterung unterzogen. Dabei entsteht die Ausscheidung von Ti_3Ni_4 -Teilchen.

Abb. 2.2.2.3.1.c abgekühlt: Die Ti_3Ni_4 -Ausscheidungen nehmen in den Zug- bzw. Druckbereichen der Biegeform eine bevorzugte Orientierung ein. Außerdem ist die Umwandlung von Austenit zu Martensit nicht einstufig sondern zweistufig. Erst wandelt sich das Austenit in eine vormartensitische Phase (R-Phase) um, die eine rhomboedrische Gitterstruktur aufweist, dann beim weiterem Abkühlen in Martensit.

Austenit \longrightarrow **R-Phase** \longrightarrow **Martensit**

Abb. 2.2.2.3.1.d erwärmt: Die Legierung "erinnert" sich an eine Hoch- und an eine Niedertemperaturform. Das Durchlaufen der Temperaturzyklen führt zur jeweiligen Formumkehr. Die Differenz der Umwandlungs-

temperaturen der R-Phase und der Martensit-Phase sollte mindestens 30 K betragen, sonst wird nur die R-Phase gebildet.

2.2.2.4 Pseudoelastizität

Im Temperaturbereich zwischen A_f und M_d kann bei mechanischer Beanspruchung spannungsinduzierter Martensit gebildet werden, was ein unkonventionelles elastisches Verhalten zur Folge hat. Das elastische Dehnungsverhalten der FGL ist nichtlinear. Das Kennzeichen der Super- oder Pseudoelastizität ist der sich an den normalen elastischen Bereich anschließende Bereich, in dem ohne nennenswerte Zunahme der Spannung Dehnungswerte bis ca. 10 % erreicht werden können. Nach Wegnahme der verformenden Kraft wird diese Dehnung bei zwar niedrigerer, jedoch wiederum bei nahezu konstanter Spannung rückgängig gemacht, bis der Hook'sche Bereich erreicht ist. Erst dann nimmt die Spannung proportional zur Dehnung ab. In Abb. 2.2.2.4.1 ist dieses pseudoelastische Verhalten im Vergleich zum Last-Deformations-Verhalten und Spannungs-Dehnungs-Verhalten dargestellt.

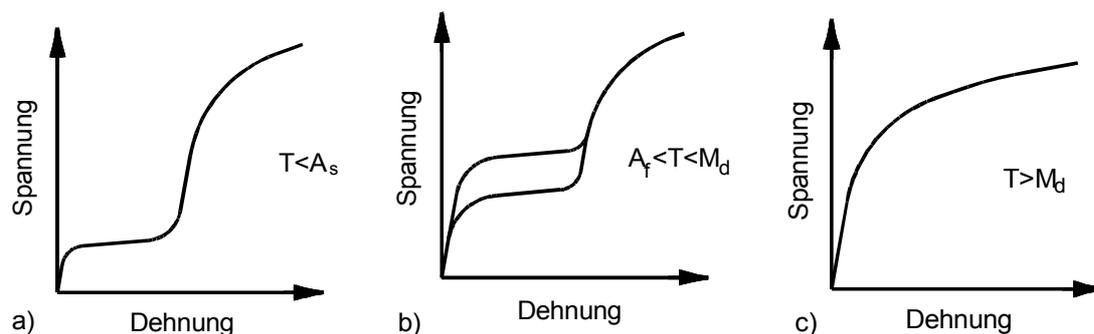


Abb. 2.2.2.4.1: Pseudoelastizität [7]

Abb. 2.2.2.4.1.a Last-Deformation-Verhalten: Anfangs erfolgt die Verformung durch hochbewegliche Zwillingsgrenzen. Es kann eine Verformung bis 10 % erreicht werden. An dieses Martensitplateau schließt sich ein elastischer Bereich an, dessen Spannungs-Dehnungs-Verhältnis einem gewöhnlichen metallischem Werkstoff gleicht.

Abb. 2.2.2.4.1.b Pseudoelastisches Verhalten: Wird eine FGL konstant unterhalb der kritischen Temperatur M_d belastet, erfolgt die elastisch Deformation. Nimmt man die Last zurück, setzt die Umwandlung vom Spannungsinduzierten Martensit zum Austenit ein.

Abb. 2.2.2.4.1.c Spannungs-Dehnungs-Verhalten: Erwärmt man die Legierung über

die kritische Temperatur M_d , verhält sie sich wie eine konventionelle Legierung.

2.2.2.4 Dämpfung

Das Dämpfungsvermögen konventioneller Metalle wird weit übertroffen. Die hochbeweglichen Zwillingsgrenzen erzeugen bei Wechselbelastung Reibung. Diese wiederum steht in Wechselwirkung mit anderen Gitterfehlern, wie Versetzungen, Leerstellen oder Verunreinigungen.

Je höher die Amplitude, desto größer der Dämpfungseffekt. Bei kleinen Amplituden werden nur die Versetzungen bewegt. Bei großen Amplituden werden die Grenzflächen mit bewegt. Das Dämpfungsverhalten wird auch von der Temperatur beeinflusst. Das Dämpfungsmaximum liegt bei Temperaturwerten unterhalb der M_s -Temperatur, weil oberhalb der Werte schon die Umwandlung zu Austenit einsetzt und die Grenzflächen nicht mehr so beweglich sind. Die Dämpfungseigenschaft ist von der Frequenz unabhängig. Durch eine Vorspannung in der Probe läßt sich die Eigenschaft verringern, weil bevorzugte Martensitorientierungen die Grenzflächen verringern.

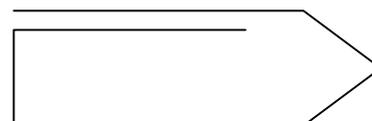
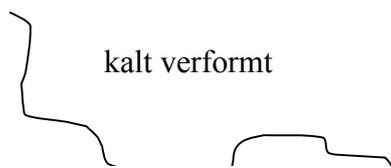
2.2.3 Technische Anwendungen

Aufgrund der drei Parameter Spannung, Dehnung und Temperatur ist die technische Anwendung sehr vielfältig. Die Anwendungen lassen sich im wesentlichen in vier Kategorien unterteilen.

- Freies Formgedächtnis
- Unterdrücktes Formgedächtnis
- Zyklische Bewegung
- Pseudoelastisches Verhalten

2.2.3.1 Freies Formgedächtnis

Die Legierung wird über die A_s -Temperatur erwärmt und nimmt dann die ursprüngliche Gestalt wieder an. Die Nutzung des Einwegeffekts ist auf Anzeigeelemente, Spielzeuge und Demonstrationsobjekte zur Veranschaulichung des Bewegungsablaufes beschränkt.



Ein weiteres Beispiel ist das Thermobile nach F.Wang. Eine Drahtschleife aus FGL wird um eine größere und eine kleinere Rolle gelegt. Taucht man die kleinere Rolle in warmes Wasser wird die kleine Maschine angetrieben. Der Draht verkürzt sich im warmen Wasser, verlängert sich kurz darauf bei der Abkühlung. Da die Ursprungsform des Drahtes gerade war, will sich der Draht strecken. Die aus diesem Streckmoment resultierende Tangentialkraft treibt das Rad an.

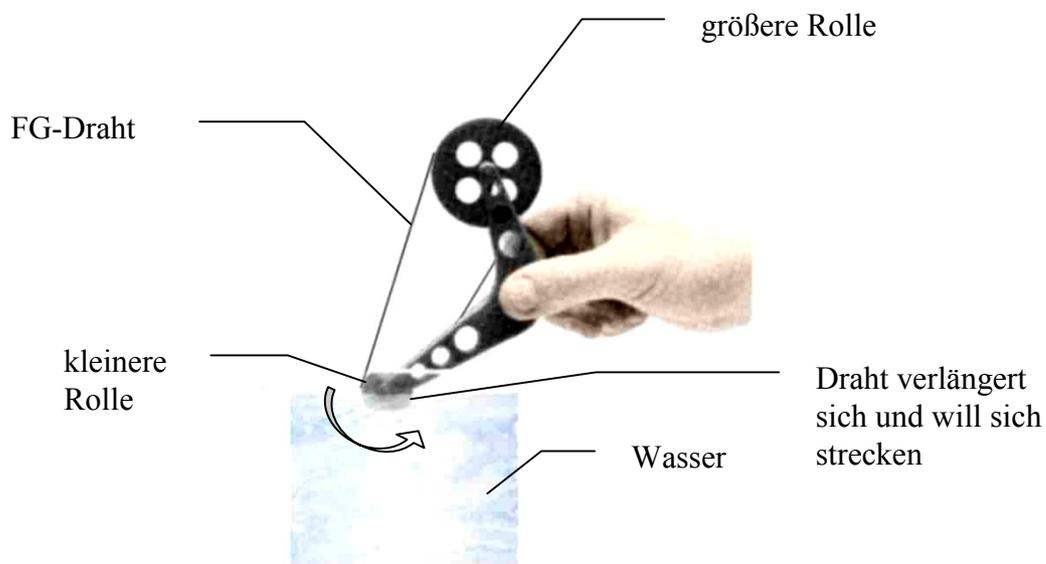


Abb 2.2.3.3.2. D. F. Wang's Thermobile Formgedächtnis

Wird die FGL daran gehindert ihre ursprüngliche Form anzunehmen, kann das Bauteil hohe Kräfte entwickeln. Diese Kräfte werden in der Technik vor allem in Spann- und Verbindungselementen, Rohrverbindungssystemen aus cryogenen Legierungen (Umwandlungstemperaturen unter -100°C), Spreiznieten, Sprinkleranlagen und Schrumpfringen genutzt.

2.2.3.3 Zyklische Bewegung

Um Arbeit verrichten zu können muß ein Weg zurückgelegt werden. Eine häufige Anwendung sind FG-Federn, die mit einem Gewicht belastet, je nach Temperatur-

änderung das Gewicht heben und senken. Bei Erwärmung zieht sich die Feder zusammen und zieht das Gewicht hoch, beim Abkühlen ist die Gewichtskraft ausreichend groß, um es wieder abzusenken und dabei die Feder zu längen.

In der Praxis arbeitet eine FG-Feder gegen eine konventionelle Feder. Die FG-Feder kann durch direkten Stromdurchfluß erhitzt werden. Federn oder Drähte werden als Rückstellelemente in Greifern, Drehgelenken oder Kupplungen verwendet.

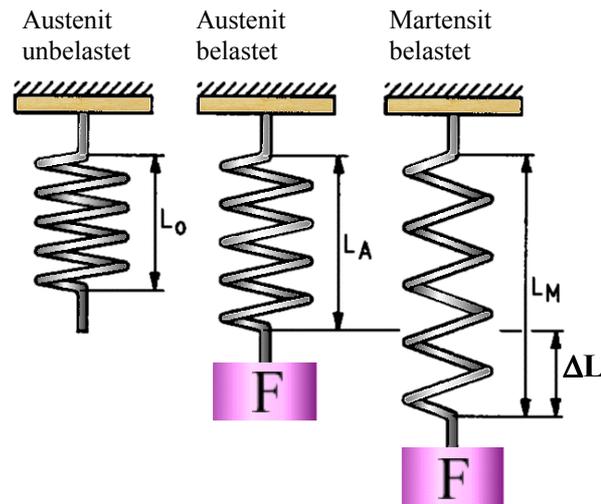


Abb. 2.2.3.3.1: FG-Federn [7]

In Wärmekraftmaschinen können derartige Federn als Ansteuerungen für Kurbelwellen verwendet werden, wie z.B. beim Motor nach W.K.Smith (1978). Das Prinzip ist einfach: Die Federn werden abwechselnd mit warmen und kaltem Fluid umströmt und die daraus entstehende Hin- und Herbewegung wird auf eine Kurbelwelle übertragen. Es ist auch möglich die Wärmeenergie direkt in eine Rotationsbewegung umzusetzen. An der FH-Konstanz wurde eine derartige Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine entwickelt. Zwei Scheiben sind auf einer Welle gelagert, wobei eine der Scheiben geneigt ist. Die Scheiben sind am Umfang mit 30 Bohrungen versehen. Die Bohrungen dienen als Aufnahme für die Halterung der Drähte. Zwischen den Scheiben sind 30 FG-Drähte gespannt, die auf der unteren Seite (Wanne) mit warmem Wasser überströmt und auf der oberen Seite (kalt) mit Luft gekühlt werden. Füllt man die Wanne mit warmem Wasser, ziehen sich die Drähte, die im Wasser liegen auf Grund des FG-Effektes zusammen. Durch die Schrägstellung der einen Scheibe wird die entstehende Zugspannung über die Tangentialkomponente in Rotation umgewandelt. Nach Austritt aus dem Warmwasserbad werden die Drähte auf der Kaltseite wieder verlängert. Zur Erzeugung der Drehkraft wird also die Differenz der Kräfte ausgenutzt, welche die

Drähte bei der Kontraktion auf der Warmseite erzeugen bzw. bei der Dilatation auf der Kaltseite benötigen. Die resultierende Tangentialkraft treibt die Welle an.

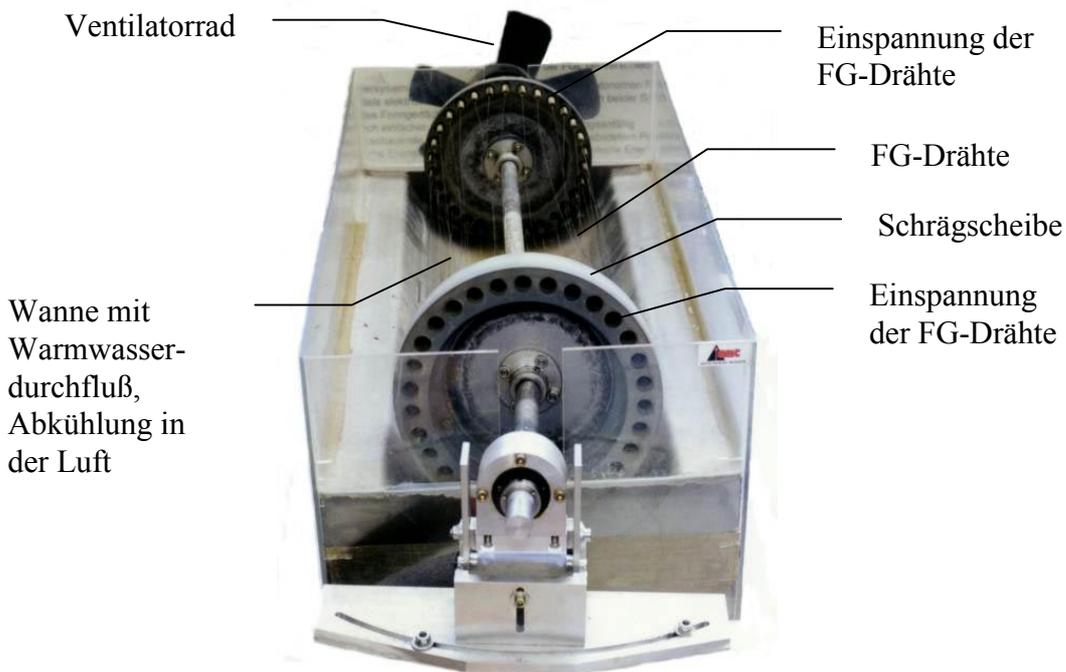


Abb. 2.2.3.3.2 Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine

2.2.3.4 Pseudoelastisches Verhalten

Der wichtigste Einsatz für pseudoelastische Legierungen ist in der Medizintechnik. In der Zahntechnik wird das große Rückstellvermögen für orthodontische Bögen bei der Zahnregulierung genutzt. Andere Anwendungen sind Brillengestelle und Glaseinfassungen.

Eine weitere Anwendung ist die Verwendung superelastischer NiTi-Drähte mit Haken zur Kennzeichnung von Tumoren. Die Haken werden ins Gewebe eingeführt und der Tumor kann auf Grund seiner hohen Biegefähigkeit mit dem Draht umschlungen werden. Das so gekennzeichnete Gewebe ist später auf einem Röntgenbild besser zu erkennen.



Abb. 2.2.3.4.1: NiTi-Draht Haken

3 Durchgeführte Arbeiten / Ergebnisse

Die Haupttätigkeiten erfolgten auf mehreren Teilgebieten teilweise zeitlich aufeinanderfolgend, meist jedoch parallel, und zwar sowohl in theoretischer, als auch praktischer Art und Weise. Die Vorgehensweise sowie die daraus resultierenden Ergebnisse werden in den folgenden Unterpunkten zusammengefaßt

3.1 Theoretische Vorarbeiten / Patentsituation

Der erste Schritt bei der Entwicklung des neuartigen Linearantriebes zur Knochenverlängerung erfolgte in einer Literatur- und Patentrecherche. Dank der hervorragend ausgestatteten FH-Bibliothek (mit Direktzugang auf Fachdatenbanken wie z. B. der medizinischen Fachdatenbank "Medline" oder auch der Fachdatenbank aus dem Maschinenbaubereich "DOMA" und auch auf Patentdatenbanken) und den allgemeinen Möglichkeiten zur Recherche über das Internet konnte diese rein theoretische Arbeit mit sehr geringem finanziellen Aufwand betrieben werden.

Bei dem Studium des Schrifttums zeigte sich bei dem Großteil der angeforderten Literatur, daß unsere Grundidee [8] bisher nicht realisiert wurde. Eine französische Firma meldete im Jahre 1996 allerdings eine Vorrichtung zur Knochenverlängerung an [9], die sowohl mit der konstruktiven Lösung des Antriebes wie auch der des Sperrmechanismus der in diesem Projektantrag vorgeschlagenen Lösung sehr nahe kommt.

Eine weitere Arbeit aus dem amerikanischen Raum [10] stellte im Jahre 1995 ebenfalls ein Konzept eines Marknagels zur Knochenverlängerung mit FGL vor, der aber scheinbar nie realisiert bzw. angewandt wurde.

Um spätere Probleme mit den Patentansprüchen anderer Forscher/Erfinder/Wissenschaftler/Autoren gleich im Vorfeld aus dem Wege zu räumen, erfolgten in den ersten vier Monaten des Projektzeitraumes weitere, umfassende Recherchen sowie zahlreiche Gespräche und Treffen mit Medizinern, Fachleuten und anderen Wissenschaftlern. Sehr hilfreich war diesbezüglich auch die Teilnahme an dem "Forum Medizintechnik" am 9./10. Oktober 1998 in Ulm. Ziel der Veranstaltung war das Zusammenbringen von Fachleuten, die sich in Baden-Württemberg mit dem Thema Medizintechnik befassen. Durch zahlreiche Vorträge und Workshops sowie in unzähligen Gesprächen wurde auf

der einen Seite einen schneller Überblick über die diesbezüglichen Aktivitäten von Fachhochschulen, Firmen und Krankenhäuser ermöglicht. Auf der anderen Seite ergaben sich dabei wertvolle Ideen zur weiteren Projektdurchführung. Schon gleich zu Beginn des Projektzeitraumes konnten sehr wertvolle Kontakte aufgebaut werden.

3.2 Sperrmechanismus

Innerhalb der Projektarbeiten wurden verschiedene Lösungsvarianten bzgl. des Sperrmechanismus theoretisch ausgearbeitet. Vor allem mit Hinblick auf die Ergebnisse der Literaturrecherche entstand der Wunsch, durch einen neuartigen Mechanismus den auch in anderen Systemen angewandten Sägezahn-Sperrmechanismus patentrechtlich zu umgehen.

3.2.1 Gerichtete Polymere (Fellversuche)

Eine der praktisch ausgeführten Lösungsvarianten bestand in der Verwendung von gerichteten Polymeren, wie sie derzeit z.B. bei den Fellen von Tourenskiläufern benutzt werden. Gegeneinander gepaart erhält man in der einen Richtung ein fast kraftloses Gleiten, während in der Gegenrichtung annähernd schlupffrei eine hohe Haltekraft auftritt. Der besondere Vorteil der getesteten Materialien der Firma EDI Koch KG bestand außerdem darin, daß damit die Vorschubbewegung ausschließlich in eine Richtung erfolgte, da an jeder Stelle in der Gegenrichtung die ausgestellten Schuppen sperrten.

Es wurden an insgesamt 3 verschiedenen Materialien in verschiedenen Stärken Versuche durchgeführt, wobei die Fellstückchen jeweils auf Rund- und Vierkantproben aufgeklebt wurden. Die maximalen Angriffsflächen betragen bei der Rundprobe 14,89 cm², bei den Vierkantproben 12,8 cm².

Die Ergebnisse ergaben, daß keines der drei Materialien für den FG-Marknagel geeignet ist: Diese Verbindungsart erfordert zu viel Platz, es zeigten sich schon nach wenigen Versuchen Verschleißspuren und einige der Schuppen fielen aus und außerdem konnte bestenfalls nur eine maximale Haltekraft von 131 N gemessen werden.

3.2.2 Gerollte Bleche (Blechversuche)

Die Idee dieser Konstruktionsvariante ist es, ein Spermmechanismus aus einem Blech zu realisieren. Das Blech soll ausgeschnitten, rund gebogen und die Zacken ausgestellt werden. In der Prüfvorrichtung (wie auch in der geplanten Anwendung im FG-Marknagel) liegt das Blech in einem Zylinder an der Bohrungswand an (Abb. 3.2.2.3). Ein Dorn mit Sägezahnprofil kann in eine Richtung gleiten, wird in der anderen Richtung durch die ausgestellten Zacken gesperrt. Um die Festigkeit der ausgestellten Zacken zu prüfen, wurden Bleche verschiedener Maße gefertigt und in der eigens dafür konstruierten Versuchsvorrichtung mit der Universal-Zugprüfmaschine getestet (Abb. 3.2.2.4).

Zuerst wurden Bleche von der Firma Weihbrecht Lasertechnik mit dem Laser entsprechend der nachfolgenden Abbildung bearbeitet.

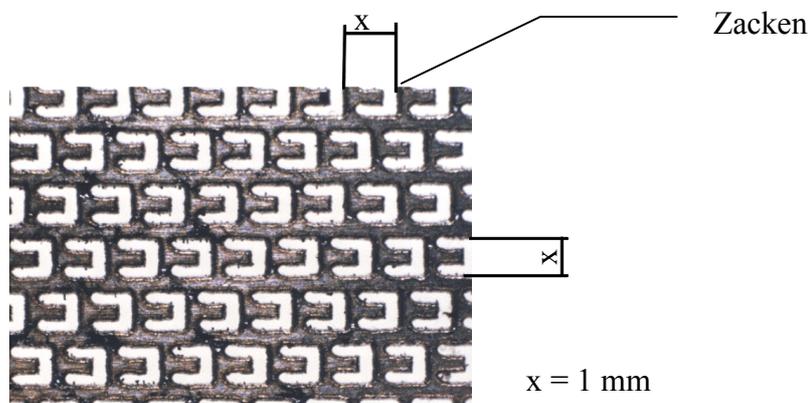
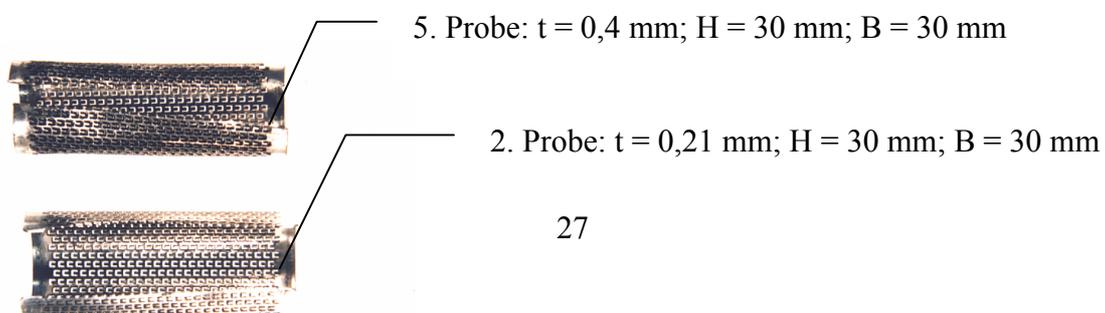


Abb. 3.2.2.1: Bearbeitetes Blech

Es wurden sechs Bleche aus federhartem Stahl 1.4310 vorbereitet:

1. Probe: Dicke 0,21 mm; Höhe 20 mm; Breite 30 mm
2. Probe: Dicke 0,21 mm; Höhe 30 mm; Breite 30 mm
3. Probe: Dicke 0,21 mm; Höhe 50 mm; Breite 30 mm
4. Probe: Dicke 0,4 mm; Höhe 20 mm; Breite 30 mm
5. Probe: Dicke 0,4 mm; Höhe 30 mm; Breite 30 mm
6. Probe: Dicke 0,4 mm; Höhe 50 mm; Breite 30 mm

Die Proben wurden zu Zylindern mit einem Durchmesser von 9,1 mm in einer eigens dafür konstruierten Biegevorrichtung gebogen. Danach wurden die Zacken manuell ausgestellt.



3. Probe: $t = 0,21 \text{ mm}$; $H = 50 \text{ mm}$; $B = 30 \text{ mm}$

Abb. 3.2.2.2: Gebogene Bleche

Bei den Druckversuchen wurde die Probe in den Zylinder geschoben. Nach dem Verschließen beider Deckel wurde die erforderliche Kraft gemessen, um den Dorn in den Zylinder zu schieben. Diese Kraft entspricht der Gleitkraft, die nötig ist damit der Dorn über die ausgestellten Zacken gleitet. Für die Zugversuche sind Probe und Dorn zusammen in den Zylinder geschoben worden, um nach dem Verschließen beider Deckel die zum Ziehen erforderliche Kraft zu messen. Diese Kraft entspricht der Haltekraft, die durch die sperrenden Zacken im Dorn entsteht.

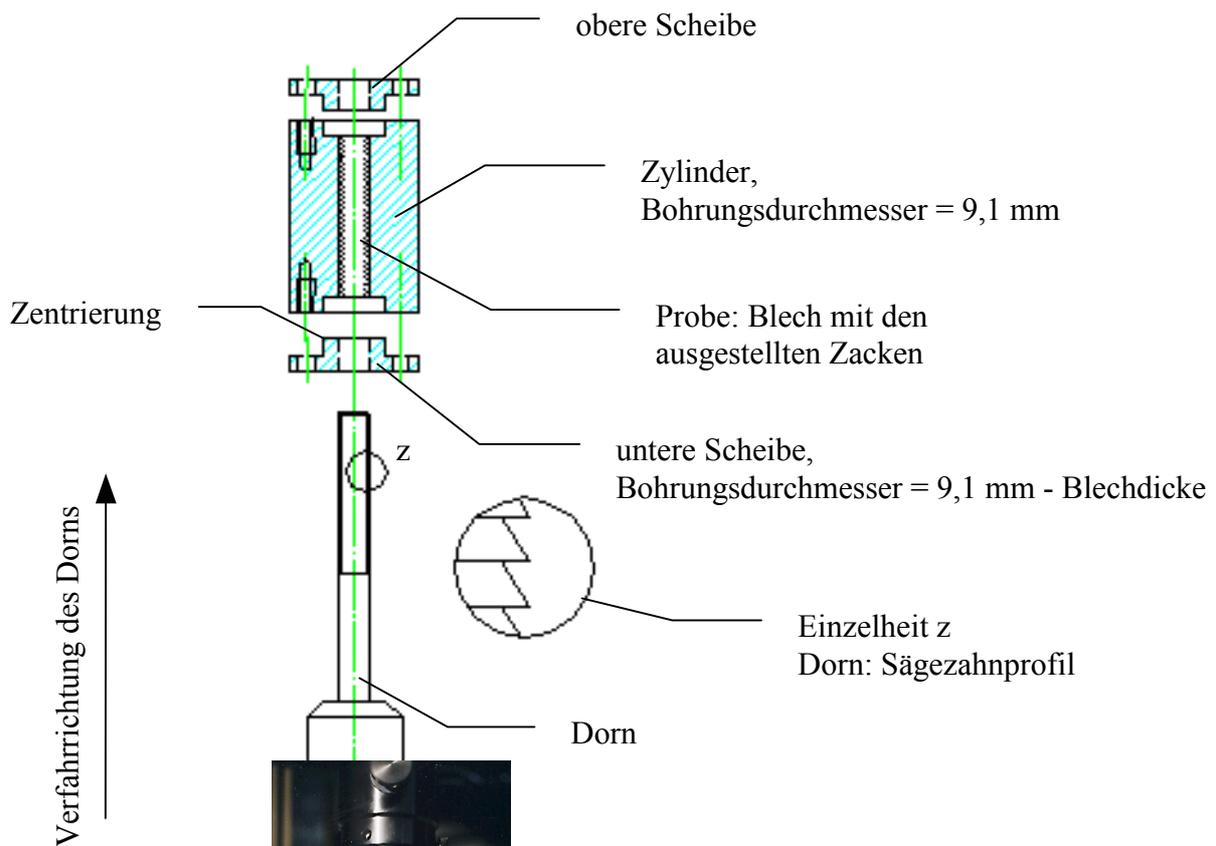


Abb. 3.2.2.

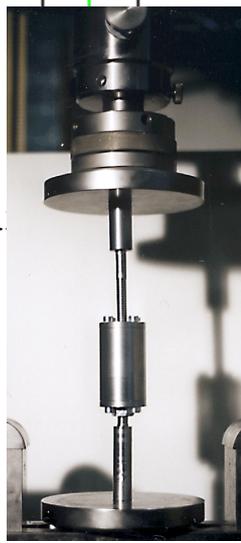
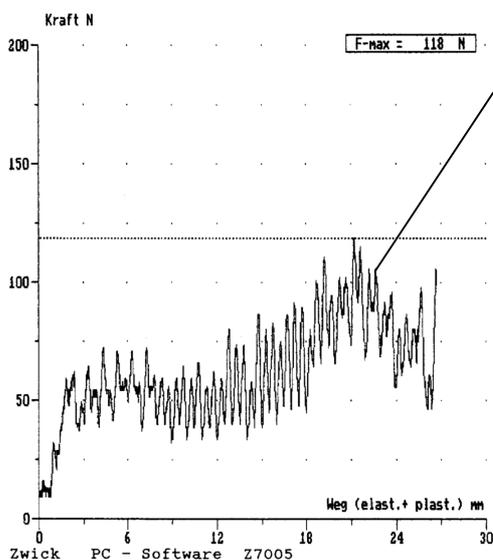


Abb. 3.2.2.4: Probe mit Vorrichtung
während einer Druckprüfung

Die Ergebnisse der Druckversuche ergaben stets folgenden Verlauf des Hineingleitens:



Dorn gleitet an den
Zacken vorbei

Ab einem Verfahrweg von 12 mm steigt die Kurve insgesamt an und erreicht bei 21 mm ihren Peak mit 118 N. Der Abstand zwischen den Spitzen entspricht dem Abstand zwischen den ausgestellten Zacken. Das Hineingleiten verläuft bei allen Proben bei geringen Gleitkräften.

Abb. 3.2.2.5: Druckversuch an Probe 2

Am Diagramm ist erkennbar, wie der Dorn am Vorbeigleiten bei jeder Zacke einen größeren Widerstand überwindet. Die benötigte Kraft geht wieder zurück, sobald dieser Anfangswiderstand überwunden ist. Der Gesamtanstieg der Kurve kommt durch die Vergrößerung der reibenden Flächen zwischen Dorn und Blech zustande.

Wie in Abbildung 3.2.2.6 zu sehen ist, zeigte der Dorn nach den Versuchen an den Zähnen erste Verschleißspuren.

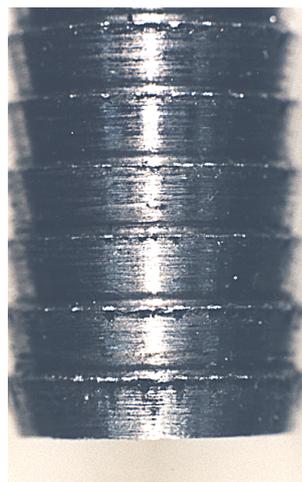


Abb. 3.2.2.6: Dorn

Bei der Durchführung der Zugversuche zur Ermittlung der Haltekraft der Sperren auf dem Dorn wurden ebenfalls mit allen Proben entsprechende Versuche durchgeführt.

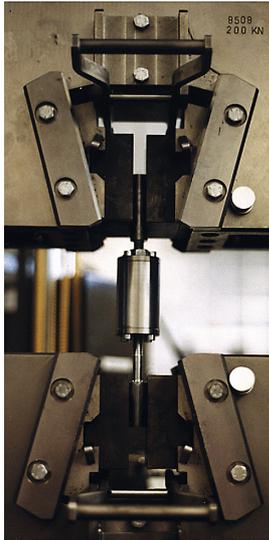


Abb. 3.2.2.7: Probe mit Vorrichtung während einer Zogrührung

Es zeigte sich in allen Versuchen, daß an den Haken ein erhöhter Kraftaufwand auftrat, sie aber aufgrund der vorhergehenden Gleitversuche zu weit flach gebogen waren, um in dem Dorn einzuhaken und einen genügend großen Widerstand aufzubauen.

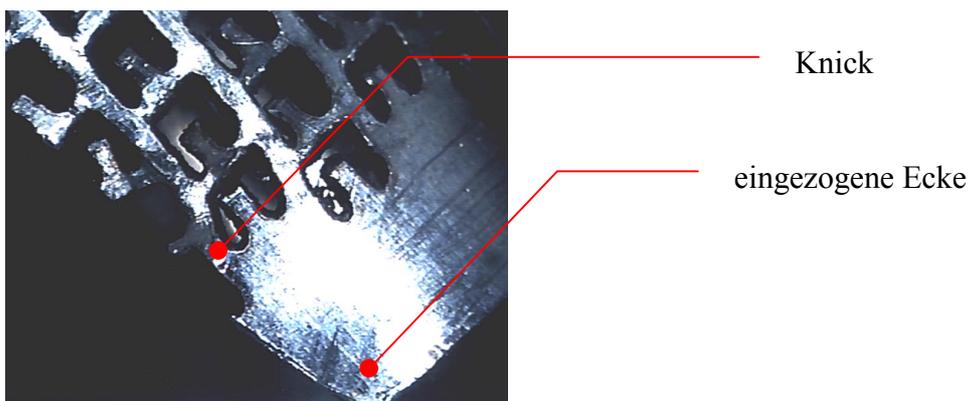


Abb. 3.2.2.8: Probe 2 nach dem Zugversuch

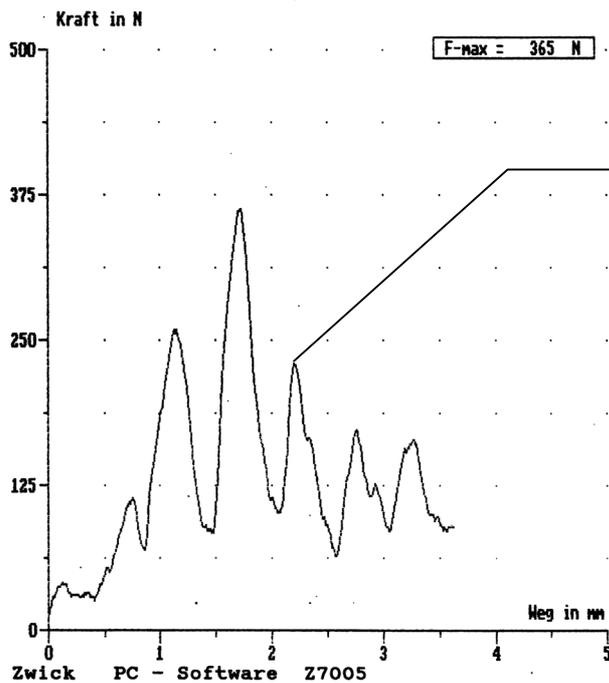


Abb. 3.2.2.9: Zugversuch, Probe 2

Das Kurvenmaximum lag bei 365 N und ist für eine Anwendung im Marknagel viel zu niedrig.

Die Zacken der Probe wurden an die Zylinderwand.. Die Abstände der einzelnen Peaks entspricht den Abständen der Zacken des Sägezahnprofils.

Bei manchen Zugversuchen traten auch höhere Werte auf (Abb. 3.2.2.10), die aber auf Materialaufstauchungen beruhten, die z.B. durch das Durchziehen und Verkannten der Blechprobe durch den kleinen Spalt zwischen der Bohrung und dem Dorn erfolgte.

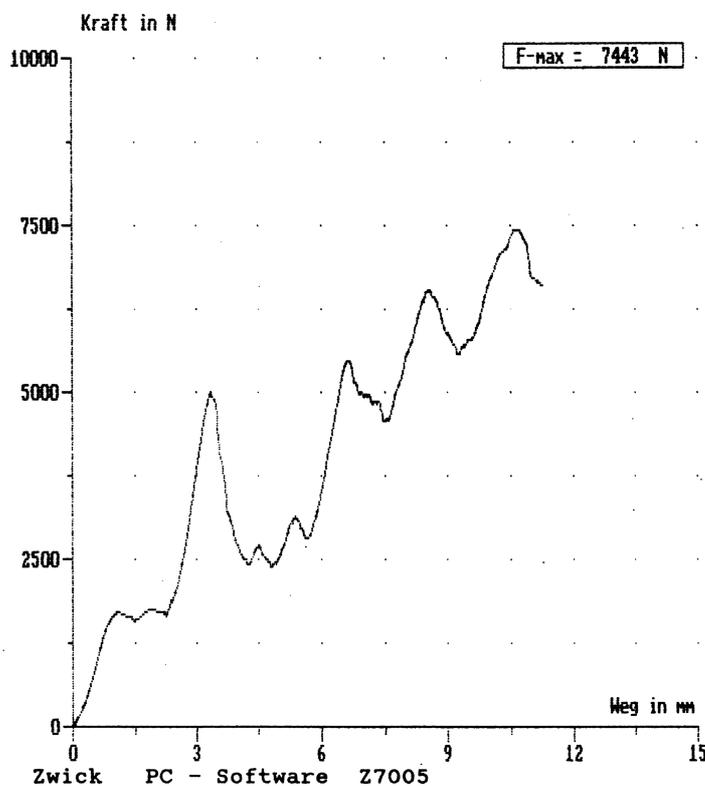
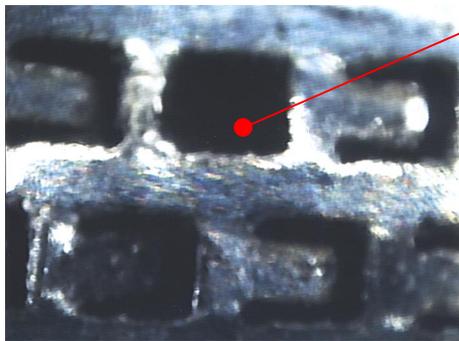


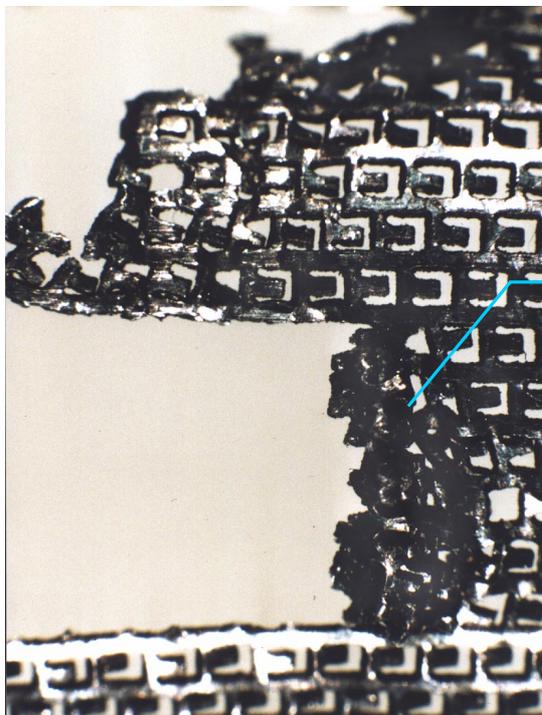
Abb. 3.2.2.10: Zugversuch, Probe 3

Bei einige Proben brachen auch Zacken aus (Abb.3.2.2.11), bei anderen wiederum trat Kaltverschweißung und Materialstauchung in eklatantem Maße auf (Abb. 3.2.2.12).



ausgebrochene Zacken

Abb. 3.2.2.11: Probe 4 nach Zugversuch



Detail der Probe

Materialstauchung

Abb. 3.2.2.12: Probe 3

Zusammenfassend konnte aufgrund der erarbeiteten Ergebnissen festgestellt werden, daß auch diese Lösungsvariante eines Sperrmechanismus über gerollte, laserbearbeitete Bleche in der jetzigen Form nicht für den Einsatz im FG-Marknagel verwendet werden kann. Der größte Nachteil liegt sicherlich in der fehlenden Elastizität des verwendeten Materials. Dadurch stellen sich die Zacken nach dem Gleitvorgang nicht mehr zurück und ein Formschluß mit der zu erwartenden hohen Haltekraft wird verhindert.

Um diese Vermutung zu belegen, ist ein Härte-test nach Vickers durchgeführt worden.

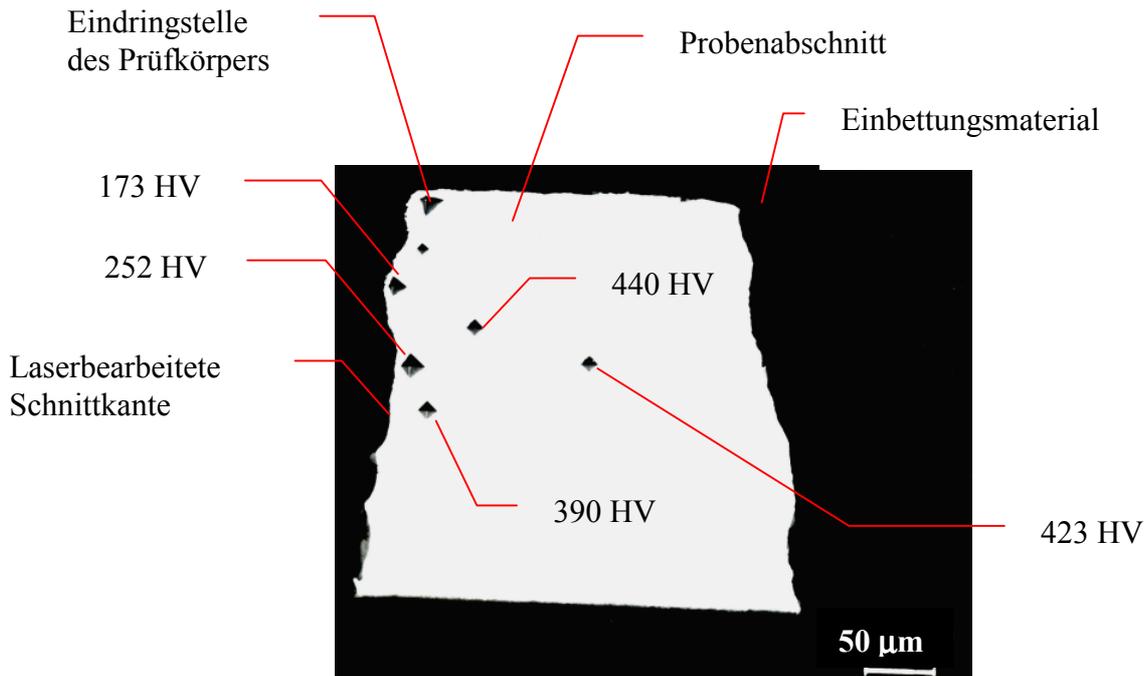


Abb. 3.2.2.13: Micro-Härteprüfung nach Vickers

An den Ergebnissen der Eindringstellen läßt sich ein Härtegradient erkennen, der vom Materialinnern von über 400 HV auf unter 200 HV im Bereich der Schnittkante abfällt. Dies bestätigt die Vermutung der Gefügeänderung im Material durch Laserbearbeitung.

Durch entsprechende Optimierung der Laserbearbeitung und ggf. dem Ausweichen auf andere Materialien ließe sich dieses Festigkeitsproblem in Zusammenhang mit der Wärmebeeinflussung durch den Laserschnitt sicherlich lösen. Dies schien aus unserer Sicht jedoch zu zeitaufwendig, da stets lange Wartezeiten bei der Laserbearbeitung auftraten, die Bearbeitung außerdem ein beträchtlicher Kostenfaktor darstellte und darüber hinaus noch eine zusätzliche Vorrichtung hätte gefertigt werden müssen, um die Ausstellung der Zacken zu automatisieren.

Um keine weiteren Verschiebungen im Zeitplan des Vorhabens zu bewirken wurde eine dritte Lösungsvarinante realisiert.

3.2.3 Sperre und Rohrsegment

Diese Lösungsvariante des Sperrmechanismus besteht aus zwei Sperren, die von einer Feder auseinander gedrückt in ein Sägezahnprofil eines Rohrsegmentes einrasten können.

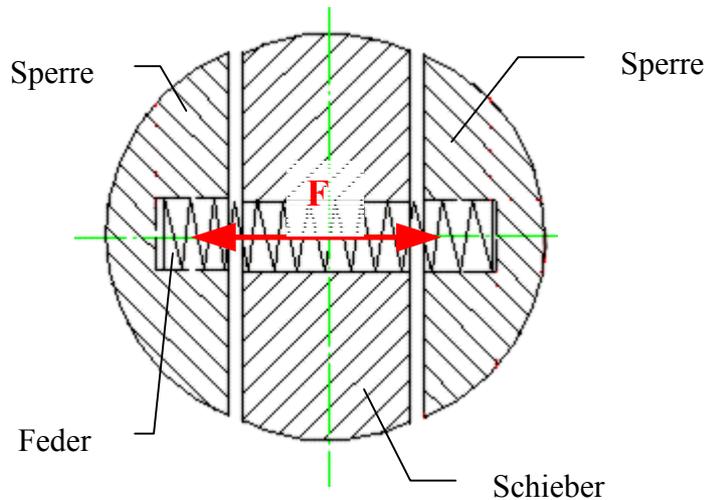


Abb. 3.2.3.1: Sperrmechanismus

Während der Heizphase zieht sich das FG-Element (hier als Rohr dargestellt) zusammen. Dabei halten die ins Sägezahnprofil eingerasteten Sperren den linken Schieber in seiner Position, während der rechte Schieber bei dieser Kontraktion um eine Raste nach links versetzt wird und über das Sägezahnprofil gleitet. Die Beanspruchung der Sperren während dieser Heizphase veranschaulicht nachfolgende Abbildung.

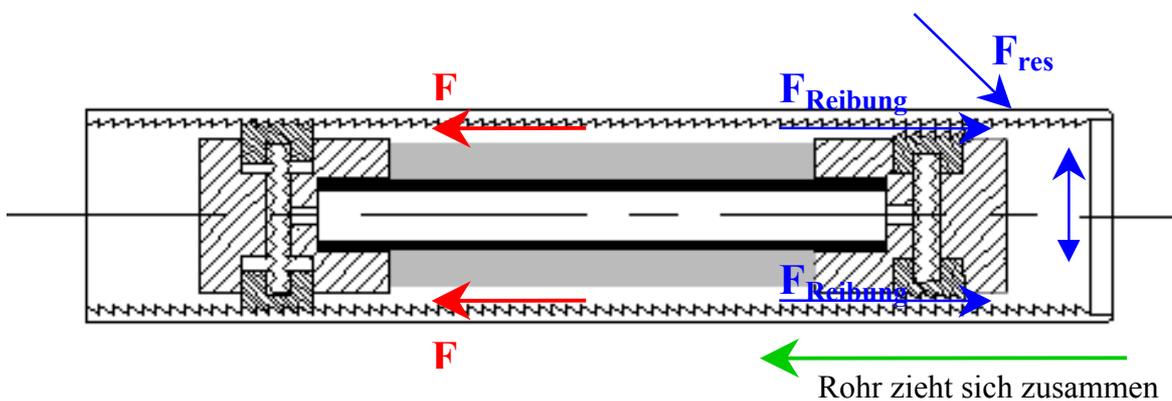


Abb. 3.2.3.2: Belastung während der Heizphase

Um die beim Gleiten erforderliche Kraft zu ermitteln, wurde ein Druckversuch durchgeführt. Außerdem sollte geprüft werden, ob die Haltekraft mindestens 500 N beträgt.

Die Schieber und das Rohr wurden aus körperverträglichem Stahl 1.4435 gefertigt. Beim Rohr bestand zunächst das Problem das Sägezahnprofil in die Bohrung einzudrehen, da bei einer Rohrlänge von 200 mm Vibrationsprobleme auftraten und die Oberflächenqualität unzureichend war. Um keine weiteren Verzögerungen im Zeitplan zu erhalten, wurde das Rohr aus mehreren Rohrsegmenten gefertigt und zusammengeschweißt. Die Teile wurden außerdem gebeizt (um die Oberflächenqualität zu verbessern) sowie kolsterisiert (Oberflächenhärteverfahren der Firma Bodycote, um die Oberflächenhärte zu erhöhen). Das Rohrsegment wurde leicht eingefettet. Ein Schieber mit Sperren und Feder wurde eingesetzt und mit Hilfe des Stößels (Stahl) in der Druckmaschine mit Druck beaufschlagt. Zuerst wurde in Gleitrichtung geprüft (Abb. 3.2.3.3 und Abb. 3.2.3.4), dann in Halteposition (Abb. 3.2.3.5 und Abb. 3.2.3.6).

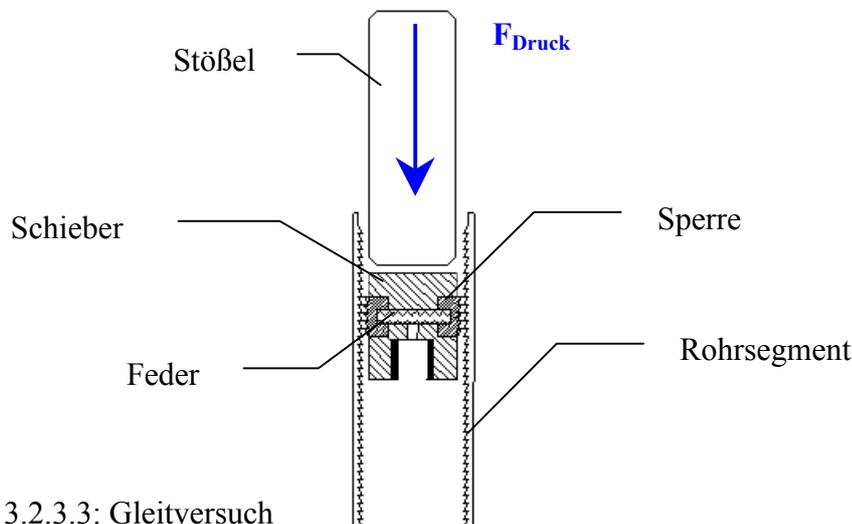
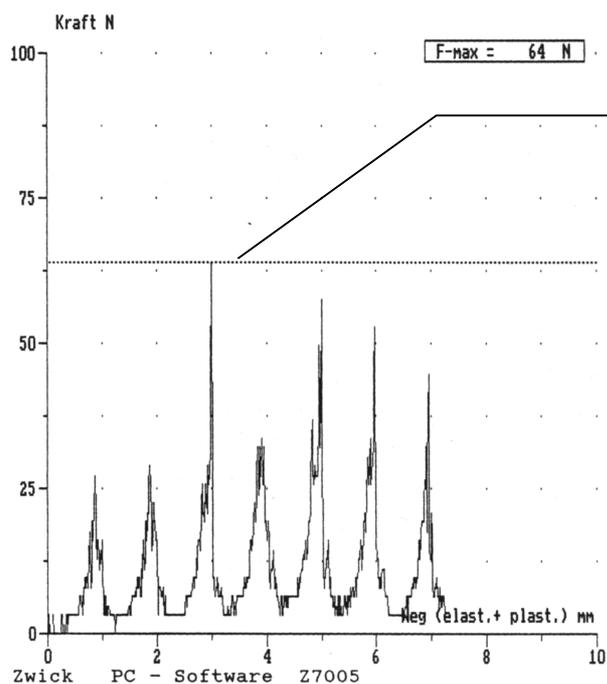


Abb. 3.2.3.3: Gleitversuch



Das Maximum liegt bei 64 N.
Der Abstand der einzelnen Peaks entspricht dem Abstand im Sägezahnprofil des Rohrsegments

Abb. 3.2.3.4: Reibkraft in Gleitrichtung

Für das Hineingleiten ist eine Maximalkraft von 64 N erforderlich. Die Flächenpressung

$$\text{des Sägezahnprofils beträgt } \frac{64 \text{ N}}{68,5 \text{ mm}^2} = 0,934 \text{ N/mm}^2 .$$

Zur Prüfung der Haltekraft wurde das Rohrsegment umgedreht und der Stößel von der anderen Seite eingelegt. Die Druckprüfmaschine war auf eine maximale Kraft von 1000 N begrenzt.

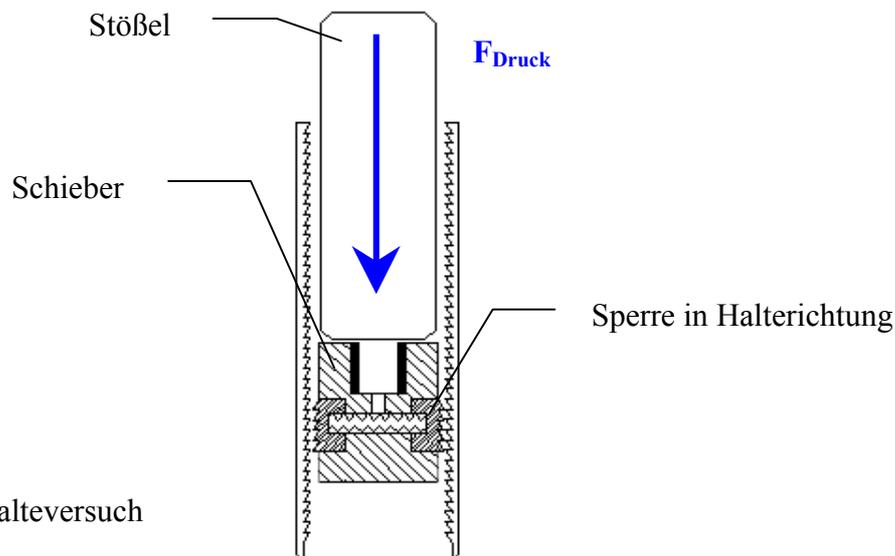


Abb. 3.2.3.5: Halteversuch

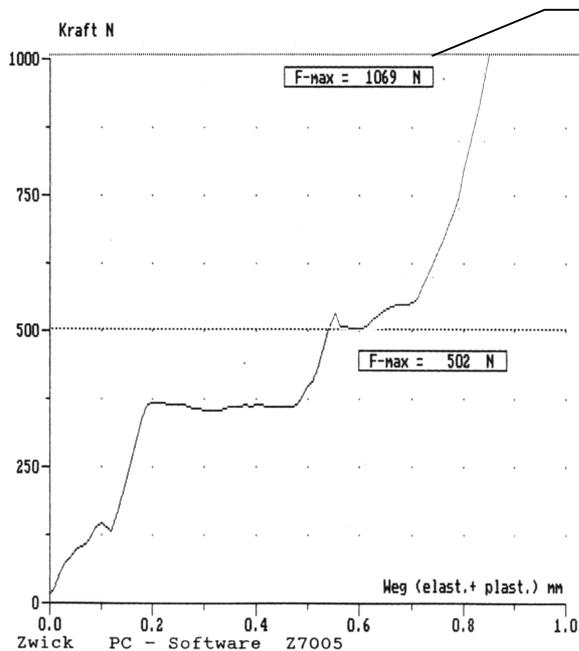


Abb. 3.2.3.6: Haltekraft

Die Konstruktion hielt 1069 N.
Der dabei zurückgelegte Weg
betrug 0,8 mm.

Der Versuch wurde bei 1069 N
abgebrochen. Der Verfahrweg entsteht
durch Spiel in den Teilen.

Die Flächenpressung in Halterichtung

$$\text{beträgt } \frac{1069 \text{ N}}{68,5 \text{ mm}^2} = 15,6 \text{ N/mm}^2 . \text{ Die zulässige Spannung ist } 750 \text{ N/mm}^2 \text{ und die}$$

Sperren würden eine Belastung von 53175 N halten.

Die von den Sperren an die Führungsflächen übertragene Flächenpressung errechnet

sich durch $\frac{1069 \text{ N}}{16,61 \text{ mm}^2} = 64,36 \text{ N/mm}^2$ pro Fläche.

Diese Ergebnisse zeigen, daß diese Lösungsvariante des Sperrmechanismus sehr gut für die Anwendung im FG-Marknagel geeignet ist.

3.3 Versuche zur Auswahl einer geeigneten FGL

Für eine erste Dimensionierung wurden an bereits vorhandenen Drähten (aus dem Projekt "Energieautonome Bewässerung durch Einsatz von FGL", gefördert durch das Ministerium von Wissenschaft, Forschung und Kunst bis einschließlich 31.12.1998) einige Vorversuche durchgeführt, um die benötigte Fläche der Formgedächtniselemente abschätzen zu können. Erarbeitet wurden konstruktive Lösungsskizzen, die den Antrieb entweder mit mehrfach geführten sehr dünnen (0,1 mm bis 0,2 mm) Drähten, mit einem relativ dicken Draht (2 mm bis 3 mm), oder mit Formgedächtniselementen in Hülseform realisieren.

Parallel dazu wurden auch unterschiedliche Verfahren der Erwärmungsart der verschiedenen Formgedächtniselemente untersucht. Die erarbeiteten Lösungsvarianten reichen von direkter induktiver Erwärmung über Erwärmung durch magnetische Strahlungen bis zur thermischen Konvektion über entsprechende Zwischenelemente oder einen definierten Luftspalt. Es wurden viele Gespräche mit Fachleuten aus der Heizleitertechnologie sowie anderen Heizsystemtechnologien geführt und anschließend entsprechende Heizdrähten, Heizpatronen, etc. erworben.

Besonders aufgrund der sehr engen Temperaturgrenzen, welche die Außenoberfläche des FG-Marknagels beim späteren Einsatz im Körper nicht über- bzw. unterschreiten darf, gab es in Verbindung mit den von uns geforderten Werten bezüglich Dehnungsweg, Kraftentfaltung bei Erwärmung, Rückstellkraft zunächst Probleme, überhaupt einen FGL-Hersteller zu finden, der uns das gewünschte Material liefern konnte. In sehr langwierigen Gesprächen mit den Materialherstellern und intensivem Prüfen der vorhandenen Möglichkeiten, konnte dann in der Firma Memory Metalle, die mittlerweile ihren Firmensitz in das räumlich nähere Weil am Rhein verlegt hat, ein geeigneter Lieferant gefunden. Da dieses Material speziell für diese Anwendung hergestellt und

wärmebehandelt werden mußte, sind im Projektfinanzierungsplan an dieser Stelle höhere Ausgaben aufgetreten. Aufgrund der dadurch bedingten langen Lieferzeit ist auch die Verschiebung der ersten Testphase mit den FG-Bauteilen und den Heizelementen zu begründen.

Das später eingesetzte FG-Element soll eine Verschiebung von 1 mm pro Tag bewirken. Um dies in einem Arbeitsschritt zu bewerkstelligen, muß der Wegeffekt etwas größer als 1 mm sein. Außerdem muß beim Expandieren die Kraft groß genug sein, um den Knochen auseinander zu schieben. Dies wurde durch Auflegen verschiedener Gewichte simuliert. In den Versuchen wurden außerdem die benötigte Wärme (elektrische Heizleistung), die Temperatur des FG-Elements, sowie die Aufheiz- und Abkühlzeiten erfaßt.

Folgende FG-Materialien wurden untersucht:

1. "Rohr": FG-Rohr, $\varnothing_A = 5$ mm, $\varnothing_I = 3,5$ mm, NiTi-Legierung mit 54,52 gew.%Ni.
2. "Draht 4": FG-Draht, $\varnothing_A = 1,27$ mm, NiTi-Legierung mit 54,5 gew.%Ni.
3. "Draht 5": FG-Draht, $\varnothing_A = 1,45$ mm, NiTi-Legierung mit 57,7 gew.%Ni.
4. "Draht 6": FG-Draht, $\varnothing_A = 2,13$ mm, NiTi-Legierung mit 54,5 gew.%Ni.

Das Versuchsverfahren war bei den verschiedenen Proben gleich (Abb. 3.3.1). Die Proben wurden mit konstanten Gewichten zwischen 10 kg und 100 kg belastet. Mit jeder Last wurden drei Versuche durchgeführt. Der Weg, der sich aus dem Heben und Senken der Gewichte ergab, wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Ein y-t-Schreiber zeichnete ein Weg-Zeit-Diagramm auf. Die Temperatur an der Probenoberfläche wurde mit einem fest installierten Temperaturfühler gemessen und per Hand an der Kurve notiert. Zusätzlich wurde die Länge der Probe vor und nach jedem Zyklus (Aufheizen und Abkühlen) mit einer Schieblehre gemessen. Das Ergebnis wurde in Prozent im Diagramm "Wegeffekt/Gewicht" dargestellt.

Berechnung der Längenänderung in Prozent:

$$\Delta l \% = 100 \cdot \frac{l_1 - l_2}{l_2}$$

$l_1 =$ Länge bei Erreichen der Endtemperatur (ca. 100°C)
 $l_2 =$ Ausgangslänge

Im Diagramm "Umwandlungstemperaturen" wurden die Mittelwerte der Temperaturen einmal zu Beginn des Versuchs (Austenit-Start-Temperatur), die Temperatur im letzten

Drittel der Umwandlung (damit ist die Temperatur kurz vor Erreichen der Austenit-Finish-Temperatur gemeint) und die Austenit-Finish-Temperatur zusammengefaßt. Für das Diagramm "Längenzuwachs" ist die Länge der Probe in mm nach jedem Zyklus über der Anzahl der Versuche dargestellt. Das Gewicht wurde an die Kurve notiert.

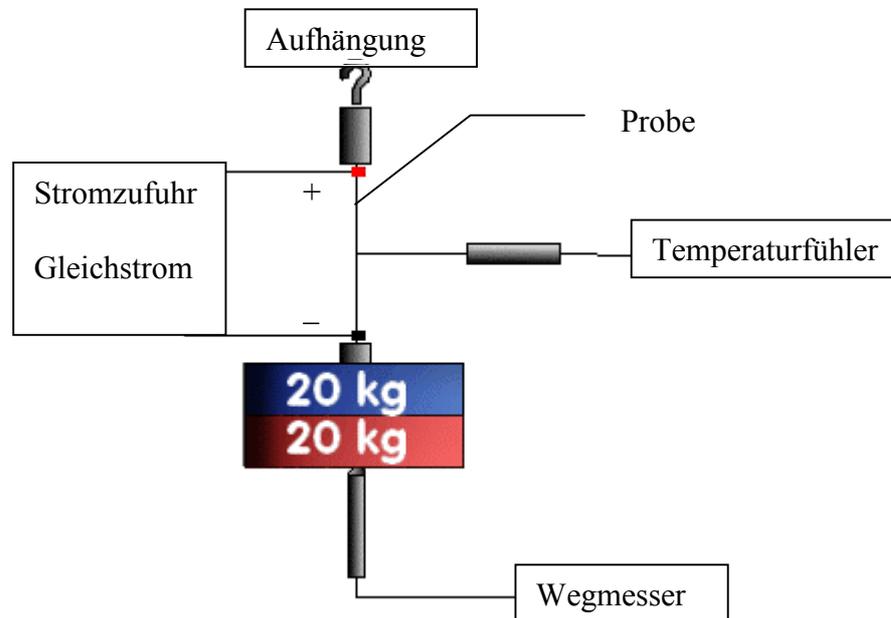


Abb. 3.3.1: Schematischer Versuchsaufbau

3.3.1. Ergebnisse der Messungen am FG-Rohr

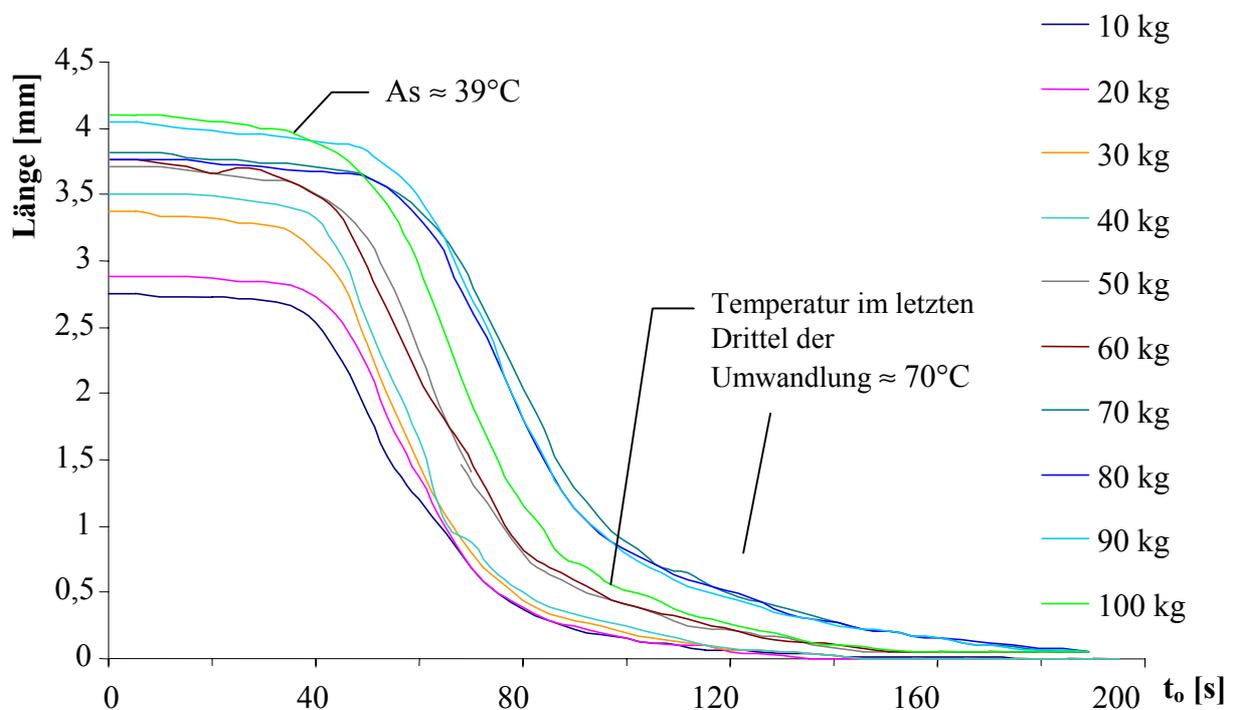
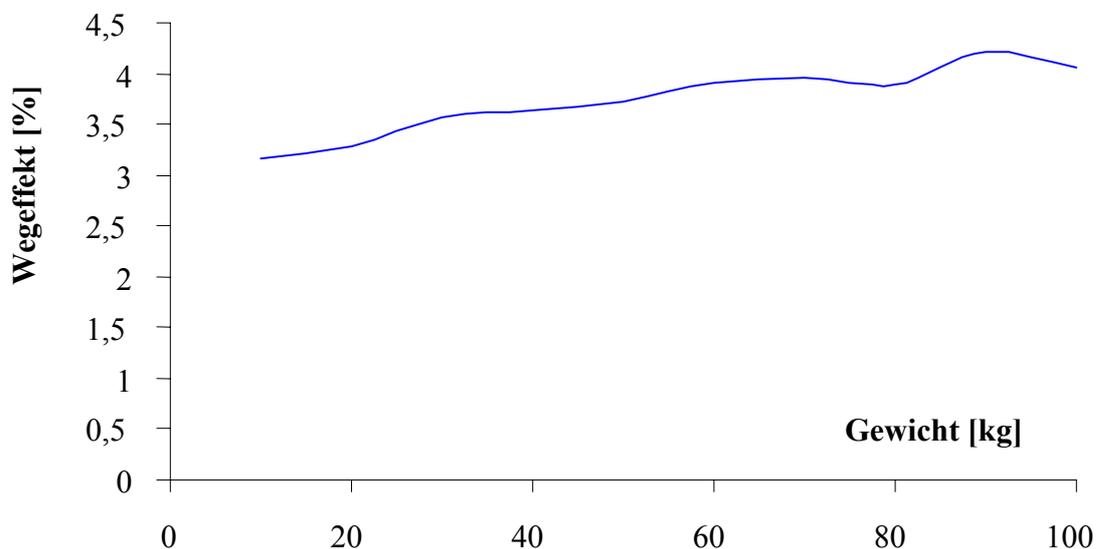
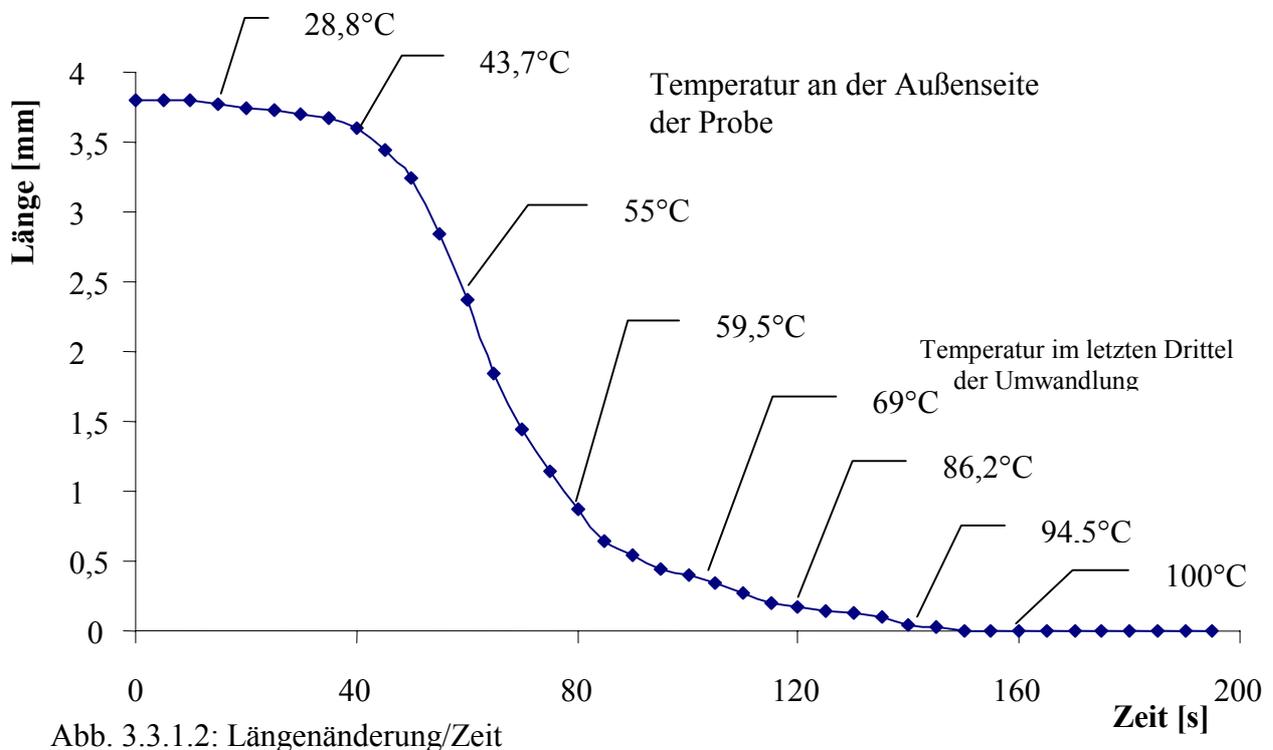


Abb. 3.3.1.1: Längenänderung

Die Umwandlungstemperatur ist hier nur exemplarisch an einer Kurve (100 kg) notiert. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß sich die Umwandlungstemperaturen von Martensit zu Austenit bei steigender Last erhöhen (Abb. 3.3.1.3) und sich damit die

Aufheizzeit verlängert. Die höchste Spannung liegt bei $97,96 \text{ N/mm}^2$, wenn 100 kg angehängt werden. Die vom Hersteller angegebene zulässige Höchstspannung von 250 N/mm^2 wird dabei nicht überschritten.



Im Diagramm 3.3.1.2 ist die Kurve bei einer Belastung von 50 kg einzeln herausgegriffen, weil das Rohr den Anforderungen für den Marknagelantrieb entspricht. Die Umwandlung von Martensit zu Austenit erfolgt zwischen 30°C und 90°C . Die

3.3.1.2. Energiebedarf zur Erwärmung des Rohres

erforderliche Wärmemenge: $c = \text{angenommen } 0,49 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$ [13]

$$m = 0,001 \text{ kg}$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 90 \text{ K} - 40 \text{ K} = 50 \text{ K}$$

$$Q = 0,49 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}} \cdot 1\text{g} \cdot 50 \text{ K} = \mathbf{24,5 \text{ J}}$$

$$\zeta = 6,45 \text{ kg/dm}^3$$

Die erforderliche Energie beträgt 24,5 J pro Gramm Rohr, bei einer Rohrlänge von 88,45 mm und 7,99 g werden **195,68 J** benötigt. Diese Abschätzung ist insofern wichtig, als daß bei der Einspeisung der erforderlichen Energiemenge über das Verfahren der Hochfrequenz-Energieeinkopplung bezüglich der maximal möglichen Ströme sehr kleine Grenzen gelten (derzeit sind ca. 500 mA machbar).

3.3.1.3. Durchmesseränderung des Rohres bei der Umwandlung

Da die Enden des im Prototyp zu verwendenden FG-Materialies mit den Schiebern verklebt oder verlötete werden sollen, mußte für dieses Material geprüft werden, ob sich bei der Phasenumwandlung der Durchmesser verändert. Dünnere Drähte könnten ggf.

auch verschraubt werden, bei einem \varnothing_A von 5 mm jedoch bietet der Einbauraum im Marknagel sicherlich nicht den erforderlichen Platz. Deshalb sollte in diesem Versuch festgestellt werden, ob eine eventuell auftretende Durchmesseränderung innerhalb der Fügetoleranzen für Kleb- bzw. Lötverbindungen liegt.

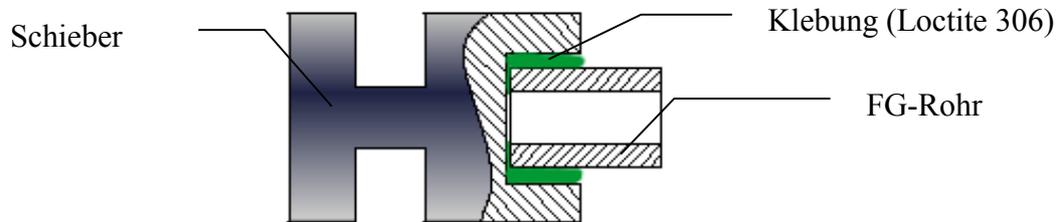


Abb. 3.3.1.3.1: FG-Rohrende Klebung

Die Temperatur der Probe wurde aufgenommen (kalt). Die Probe wurde 1,5 Minuten lang mit einem umwickelten Heizdraht erhitzt, dann wurde der Strom abgestellt und die Temperatur gemessen (warm). Da sich die Temperatur der Probe trotz der Stromabschaltung weiter erhöhte, wurde ein dritter Temperaturwert (Nachheizen) als Maximalwert abgenommen. Die Probe wurde für die nächste Meßreihe mit Preßluft auf unter 30°C abgekühlt. Die Gewichtsbelastung während des Versuches betrug 50 kg.

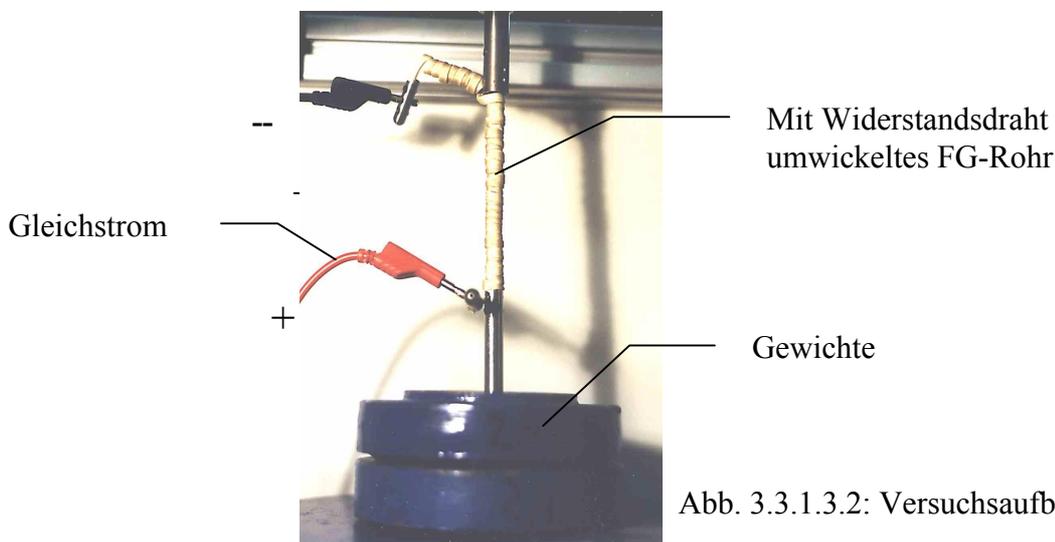


Abb. 3.3.1.3.2: Versuchsaufbau

Ergebnis: Der benötigte Strom sank bei der Umwandlung von 6 A auf 5,5 A. Die Umwandlung setzte nach ca. 45 Sekunden ein. Der Durchmesser des FG-Rohrs vergrößerte sich dabei um 0,1 mm.

Vers.- Nr.	Kalt, Ø[mm]	Temp. [°C] kalt	Warm, Ø [mm]	Temp.[°C] warm	Temp.[°C] Nach- heizen	Delta T [°C]	Zeit(ges) [min]	Delta t ₀ [s]
1	4,86	22,3	4,97	92	108	16	1'95	25
2	4,86	27,4	4,97	91,6	101,3	9,7	2'02	32
3	4,87	25,8	4,97	91,6	110,7	19,1	2'18	48
4	4,87	25,6	4,97	96,6	110	13,4	2'07	37
5	4,86	24,3	4,97	100,7	92	-8,7	2'14	44
6	4,87	23,2	4,96	81	94	13	2'10	40
7	4,85	24,1	4,97	91,3	93	1,7	2'10	40
8	4,86	24,3	4,96	78,7	98	19,3	2'06	36
9	4,85	26	4,96	79	92	13	2'10	40
10	4,85	24,7	4,96	93,2	97,5	4,3	2'04	34
Mittel wert	4,86	24,77	4,966	89,57	99,65	10,08		37,6

Tabelle 3.3.1.3.3 Durchmesseränderung, FG-Rohr

Anschließend wurde mit der gleichen Probe ein weiterer Versuch gefahren, bei dem im Unterschied zum vorhergehenden die Erwärmung des Rohres durch einen isolierten Heizdraht erfolgte, der durch das Rohr geführt wurde. Dieser Versuch erfolgte vor allem vor dem Hintergrund einer Verringerung der Heizströme und der an der Marknageloberfläche auftretenden Temperaturen. Außerdem konnte dadurch mit dem Meßschieber die bei der Umwandlung auftretende Durchmesseränderung genauer gemessen werden.

Ergebnis: Der Durchmesser nahm um 0,09 mm zu. Außerdem konnte festgestellt werden, daß die Zeit der Erwärmung mit den reduzierten Heizströmen auf über 2 Minuten anstieg, nach der Stromabschaltung jedoch die Probe sich nur noch um 1 bis 2°C weiter erhöhte. Die Werte sind in Tabelle 3.3.1.3.4 im Einzelnen aufgelistet:

Vers.-Nr.	Ø Kalt [mm]	Ø Warm [mm]	Zeit [min]	Zeit [s] (nachheiz)	Temp.[°C] Kalt	Temp.[°C] Warm
1	4,87	4,97	2'20	Nicht	23,6	92
2	4,89	4,97	2'20	Erfaßt	23,4	93,1
3	4,87	4,97	2'20		23,4	91,4
4	4,89	4,97	2'20		23,0	95,4

5	4,87	4,97	2'20	21,3	95,2
6	4,91	4,97	2'20	23,4	95
7	4,87	4,97	2'20	21,5	91,4
8	4,88	4,97	2'20	23,3	97,9
Mittelwert	4,88	4,97		22,86	93,93

Tabelle 3.3.1.3.4: Durchmesseränderung mit der gleichen Probe; Innenheizung

Fazit dieser beiden Versuche: Der Durchmesser änderte sich in bei der Gefügeumwandlung um ca. 0,1 mm. Der Wert stellt laut Angaben des Klebemittelherstellers Loctite für die Klebeverbindung kein Problem dar.

Um das Ergebnis mit höherer Genauigkeit zu untersuchen, wurde eine Rohrprobe im Dilatometer im unbelasteten Zustand getestet. Eine Probe des FG-Rohrs von 12 mm Länge wurde senkrecht in die Dilatometeraufnahme gestellt. Der Versuch startete bei 22°C, dann wurde die Temperatur zunächst auf –50°C abgesenkt und anschließend auf 100°C erwärmt.

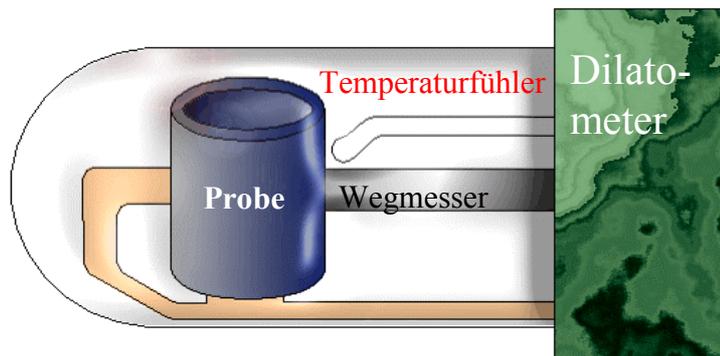


Abb. 3.3.1.3.5 Versuchsaufbau Dilatometer

Die thermisch bedingte Längenänderung während zweier Temperaturzyklen wurde mit einer Schubstange aus dem Ofenraum zu einen Wegaufnehmer übertragen. Die Längenänderung ist eine Differenzmessung.

Ergebnis: Die Durchmesserschwankung von ca. 0,1 mm wurde noch mal bestätigt.

3.3.1.4 Rohrversuche in der Klimakammer

Um herauszufinden, ob die Längenausdehnung auch bei erhöhter Umgebungstemperatur funktioniert, fanden die folgenden Versuche in der Klimakammer (Vötsch Heraeus, HC 4030) statt.

Die Versuchsanordnung mit der Probe wurde in die Klimakammer gestellt. Um die Körpertemperatur zu simulieren wurde die Klimakammer auf 37° Grad aufgeheizt. Das Rohr sollte eine Längendifferenz von 1 mm überwinden. Bei einer Kontraktion von 3 % der Ausgangslänge ergab sich eine Probenlänge von 35 mm. Da in vorherigen Versuchen festgestellt wurde, daß die Umwandlung bei ca. 30° Grad beginnt, fehlt die Umwandlungslänge, die zwischen 30° Grad und 37° Grad stattfindet. Die fehlende Umwandlungslänge wurde mit 12 mm aus der Kurve in Diagramm 3.3.1.2 abgeschätzt. Die freie Weglänge der Probe war somit 47 mm.

Die Probe wurde mit einem konstanten Gewicht von 50 kg belastet. Der Versuch wurde sechs mal durchgeführt. Ein Heizdraht erhitzte die Probe auf ca. 90° Grad. Der benötigte Strom betrug 7,8 Ampere. Ein y – t Schreiber zeichnet Weg/Zeit auf. Die Temperatur an der Oberfläche der Probe wurde mit einem Temperaturfühler gemessen und per Hand an der Kurve notiert.

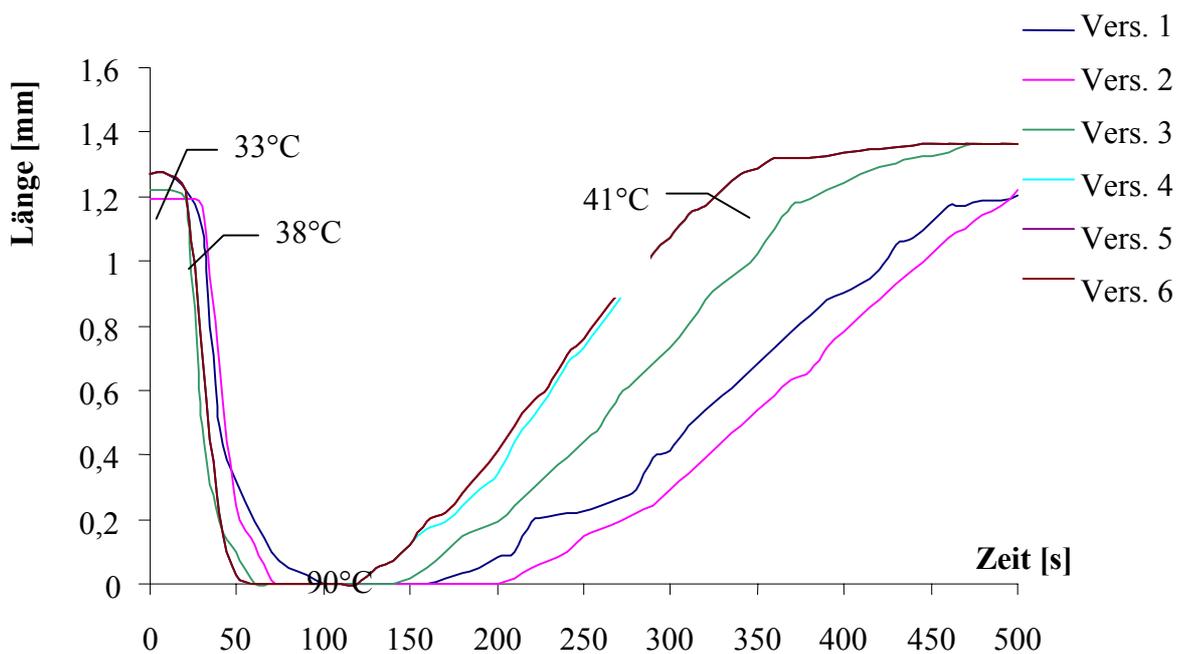


Abb. 3.3.1.4.1: Länge/Zeit

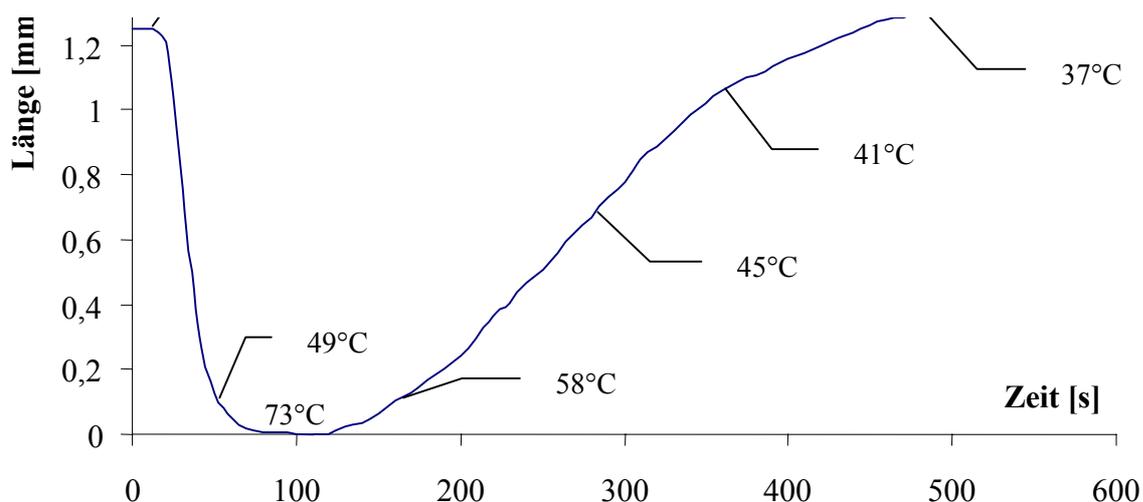


Abb. 3.3.1.4.2: Länge/Zeit

Es wurde eine Längenänderung zwischen 1,2 und 1,4 mm erreicht. Das ist für die Funktion des Vorschubmechanismus des Marknagels ausreichend.

Um zum einen die erforderliche Energie zu verringern und zum andern die Oberflächentemperatur und damit die Gefahr der Gewebeschädigung im späteren Einsatz im Marknagel herabzusetzen wurde in drei weiteren Versuchen die Stromzufuhr früher abgestellt, so daß an der Rohroberfläche die Temperatur von 60°C auf 50°C abgesenkt werden konnte.

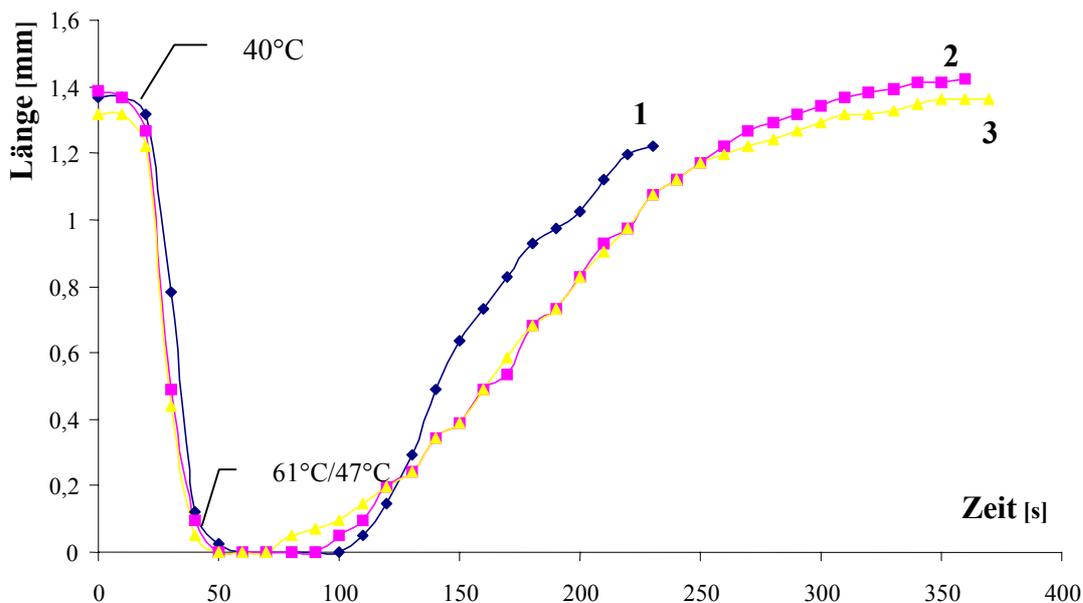


Abb. 3.3.1.4.3: Länge/Zeit

Kurve 1: Die Stromzufuhr wurde bei 60,9°C abgestellt.

Kurve 2: Die Stromzufuhr wurde bei 61°C abgestellt.

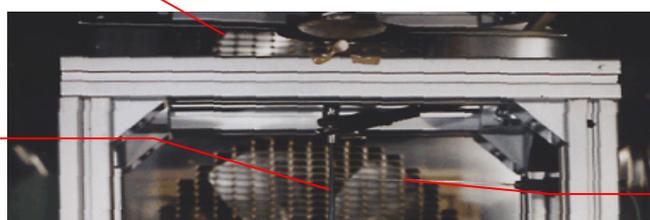
Kurve 3: Die Stromzufuhr wurde bei 47°C abgestellt.

Auch hier sind mehr als 1,2 mm Längenänderung erreicht worden.

Fazit: Es ist ausreichend das Rohr auf 50°C zu erhitzen.

Klimakammer

Draht



Temperatur-

3.3.2. Ergebnisse der Messung an Draht 4

Der Versuchsaufbau ist wie in dem Versuch mit dem Rohr. Die Probe wurde mit konstanten Gewichten belastet. Der Versuch wurde dreimal mit 10 kg bis 60 kg durchgeführt. Beim zweiten Beladen mit 60 kg riß der Probendraht. Die Probe wurde durch Stromdurchfluß mit 4 Ampere erhitzt. Es sind aus drei Versuchen die Mittelwerte berechnet worden.

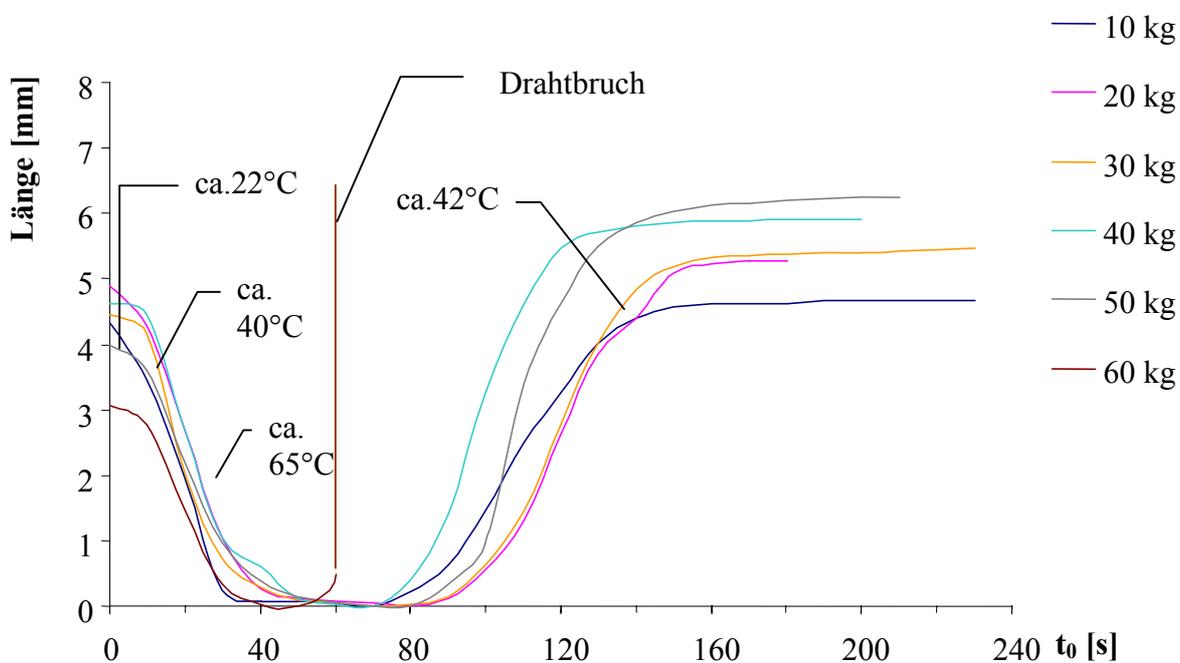


Abb. 3.3.2.1: Länge/Zeit

Für einen einzelnen Versuch bei einer Beladung von 50 kg ergab sich:

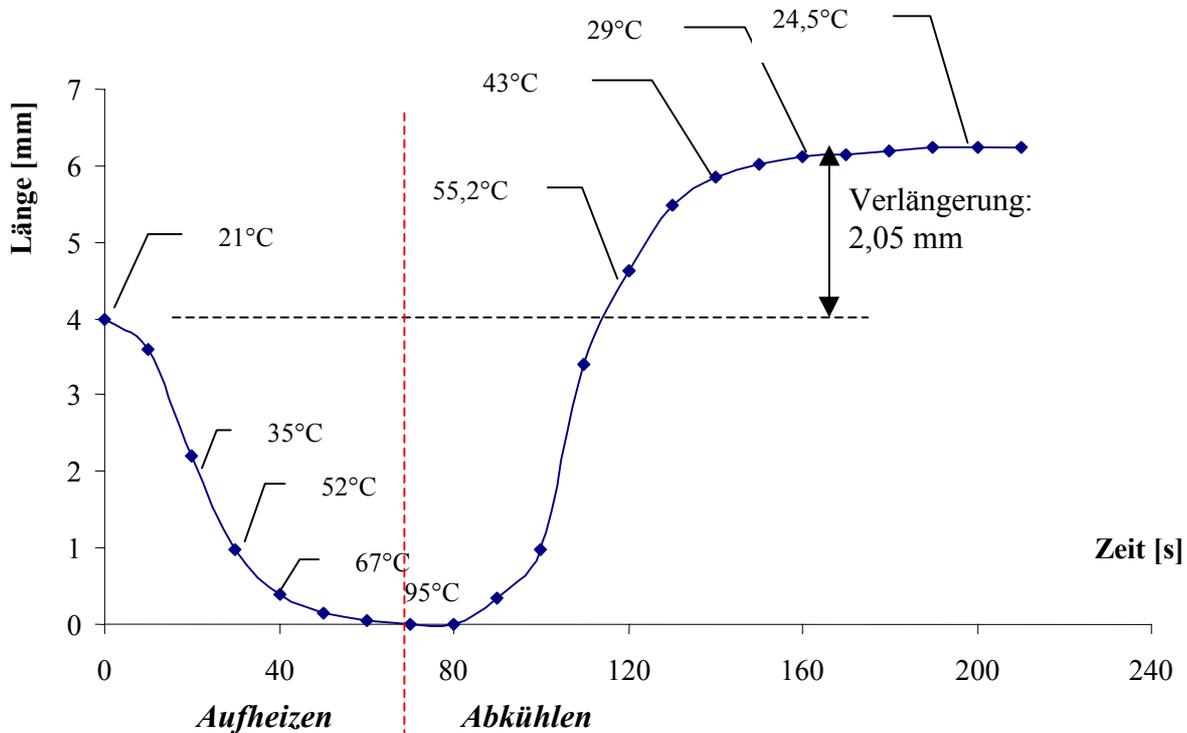


Abb. 3.3.2.2 Länge/Zeit

Der Wegeffekt betrug 4 mm, aber der Draht verlängerte sich um 2,05 mm. Trägt man die Wegeffekte über den verschiedenen Gewichten auf ergibt sich folgendes Diagramm:

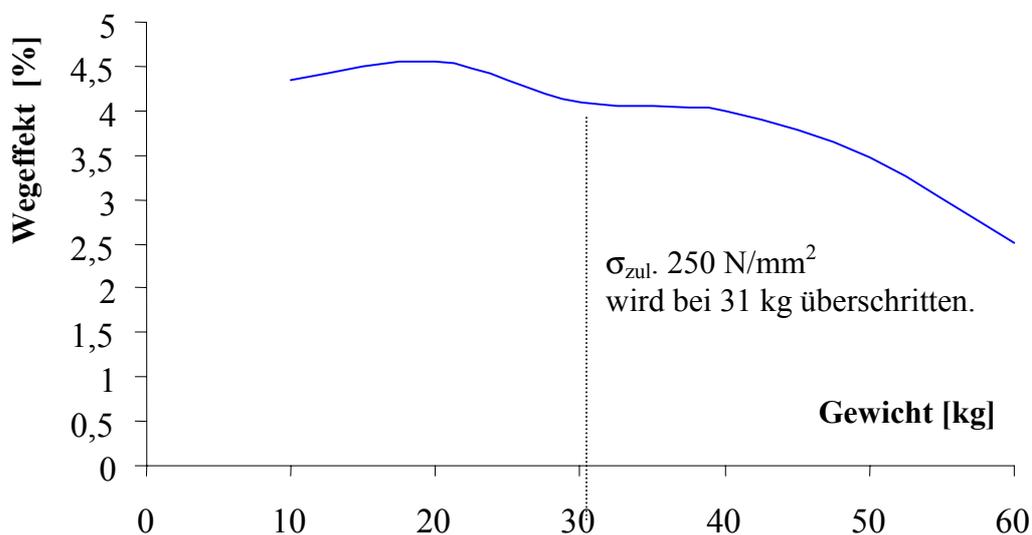


Abb. 3.3.2.3: Wegeffekt/Gewicht

Der Wegeffekt nimmt im Gegensatz zu den Ergebnissen des FG-Rohrs mit der Gewichtszunahme nach anfänglichem Anstieg rapide ab. Der Draht hat sein Optimum bei 20 kg. Danach ist er immer weniger in der Lage, im erwärmten Zustand das angehängte Gewicht hochzuziehen. Dagegen nimmt die Drahtlänge massiv zu, und zwar um insgesamt 24,35 mm, bevor er dann bei einer Last von 60 kg reißt.

Die Spannung im Draht errechnet sich zu:

Gewicht [kg]	10	20	30	40	50	60
Spannung [N/mm²]	78,9	157,89	236,78	315,7	394,633	473,56

Die vom Drahtlieferant vorgeschriebene zulässige Spannung beträgt 250 N/mm² und ist mit Anhängen eines Gewichts von 31,2 kg bereits erreicht. Dies ist auch der Grund, warum im Gegensatz zum Rohr-Versuch hier bei höherer Last der Wegeffekt abnimmt, der Draht geschädigt wird und folglich reißt.

Ab 30 kg verlängert sich die Probe aufgrund der Dehnung im Material, verursacht durch die Gewichtszunahme. Der Verlängerungseffekt der in den ersten 100 Zyklen stattfindet spielt hier wohl eine untergeordnete Rolle, da die zulässige Spannung bereits im zehnten Zyklus überschritten wird.

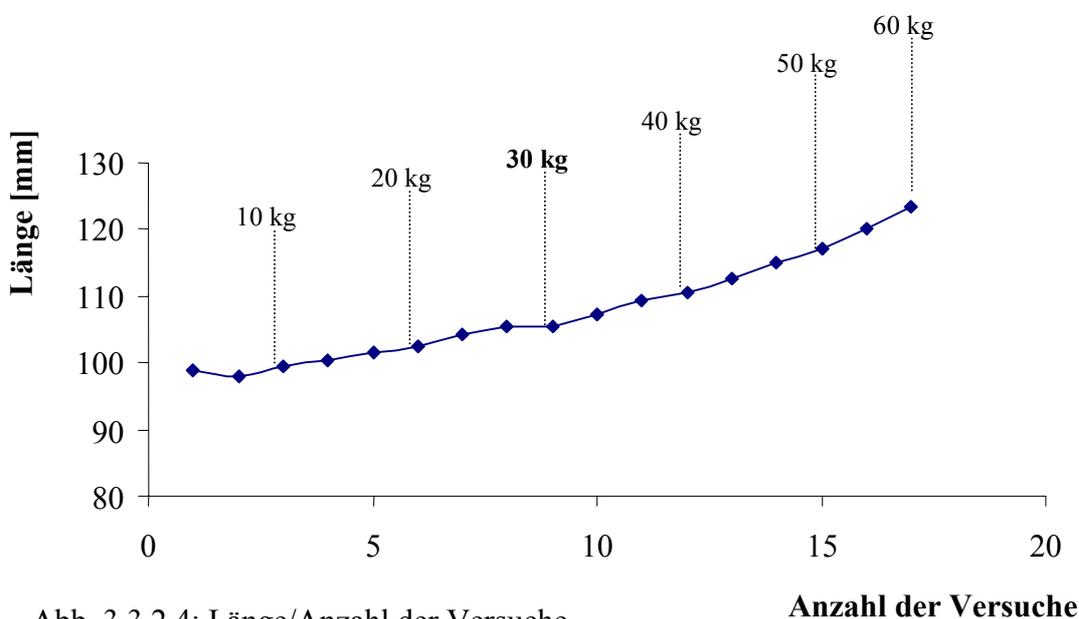


Abb. 3.3.2.4: Länge/Anzahl der Versuche

Die Probe verlängerte sich um 24,35 mm, das entspricht 24,6 %. Das Reißen der Probe kündigt sich durch Absinken der Temperatur am Umwandlungsende an. Auch die Zunahme der Längendifferenz zwischen den einzelnen Zyklen ist ein Hinweis auf Materialermüdung.

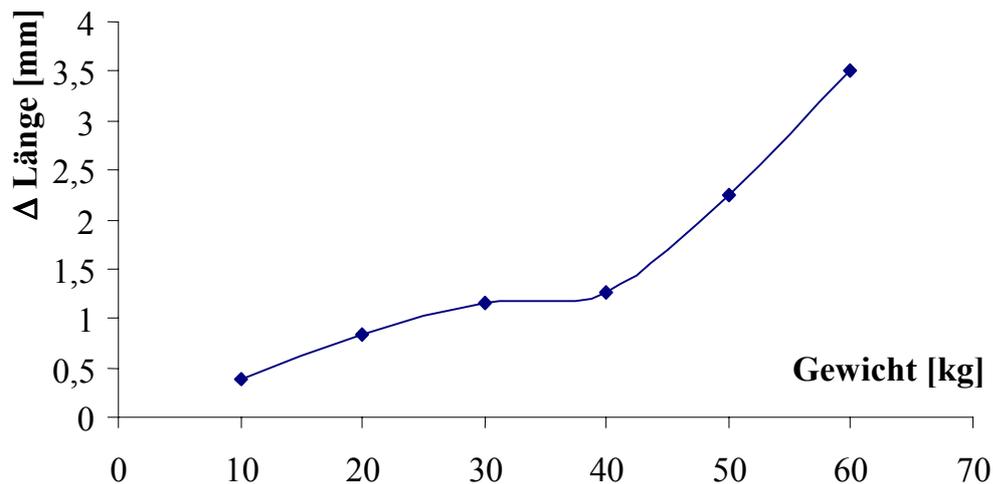


Abb. 3.3.2.5: Längendifferenz /Gewicht

Die Längendifferenz, um die der Draht zwischen den einzelnen Versuchsschritten länger wird, nimmt ab 40 kg stark zu.

Da beim Rohr schon geprüft wurde, daß bei der Phasenumwandlung selbst bei einem Außendurchmesser von 5 mm die auftretende Durchmesseränderung dennoch eine Klebeverbindung zuläßt, wurde bei den dünneren Drähten dieser Versuch nicht mehr wiederholt. Da der Draht 4 außerdem für den Einsatz im Marknagel nicht in Frage kam, fanden auch keine weiteren Versuche in der Klimakammer statt.

3.3.3. Ergebnisse der Messung an Draht 5

Die Probe wurde mit konstanten Gewichten belastet. Wie bei Draht 4 wurde der Versuch je dreimal bei 10 kg bis 70 kg durchgeführt. Die Probe wurde durch Stromdurchfluß von ca. 7 Ampere erhitzt. Es sind aus drei Versuchen die Mittelwerte berechnet worden.



Der Wegeffekt nimmt hier ähnlich wie bei Draht 4 mit der Gewichtszunahme nach anfänglichem Anstieg wieder ab. Insgesamt nimmt die Drahtlänge zu. Der Tiefpunkt bei 30°C läßt sich nur durch einen Meßfehler erklären, obwohl drei Messungen im Schnitt dieselben Werte aufwiesen. Der Strom reduzierte sich an der Stelle von 7 Ampere auf 4 Ampere, stieg dann wieder auf 6 Ampere und fiel im weiteren Versuchsverlauf ab.

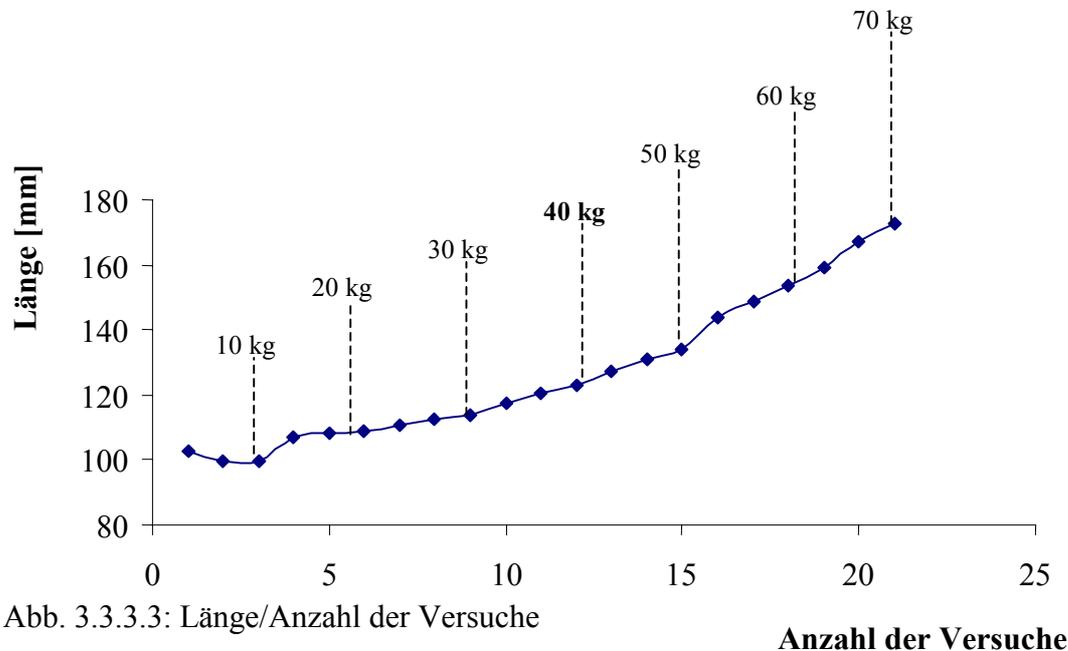


Abb. 3.3.3.3: Länge/Anzahl der Versuche

Die Probe verlängert sich um 70,2 mm, das sind 68,42 % der Ausgangslänge und hielt eine Zugspannung von 442 N/mm² aus.

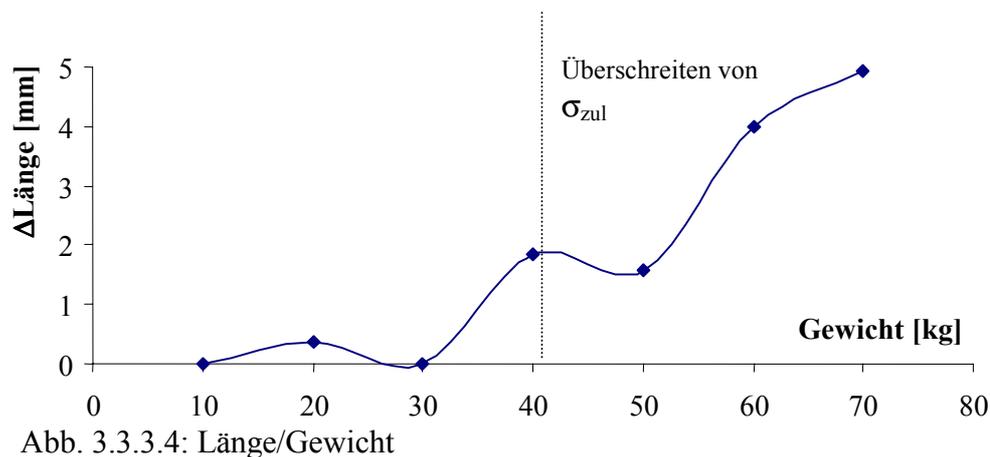


Abb. 3.3.3.4: Länge/Gewicht

Bei 70 kg wurde die Probe 5 mm länger, der Versuch wurde hier abgebrochen, da der Draht wahrscheinlich gerissen wäre und aus dem bisherigen Verhalten des Drahtes geschlossen werden konnte, daß der Draht für die Anwendung Marknagel nicht in Frage kommt. Die zulässige Spannung beträgt 250 N/mm² und ist mit Anhängen eines Gewichts von 41,3 kg erreicht.

3.3.4. Ergebnisse der Messung an Draht 6

Die Probe wurde mit Gewichten belastet. Je drei mal mit 10 kg bis 100 kg. Die Proben wurden durch Stromdurchfluß mit 8,3 Ampere erhitzt und die Zeit gestoppt. Es sind aus drei Versuchen die Mittelwerte berechnet worden.

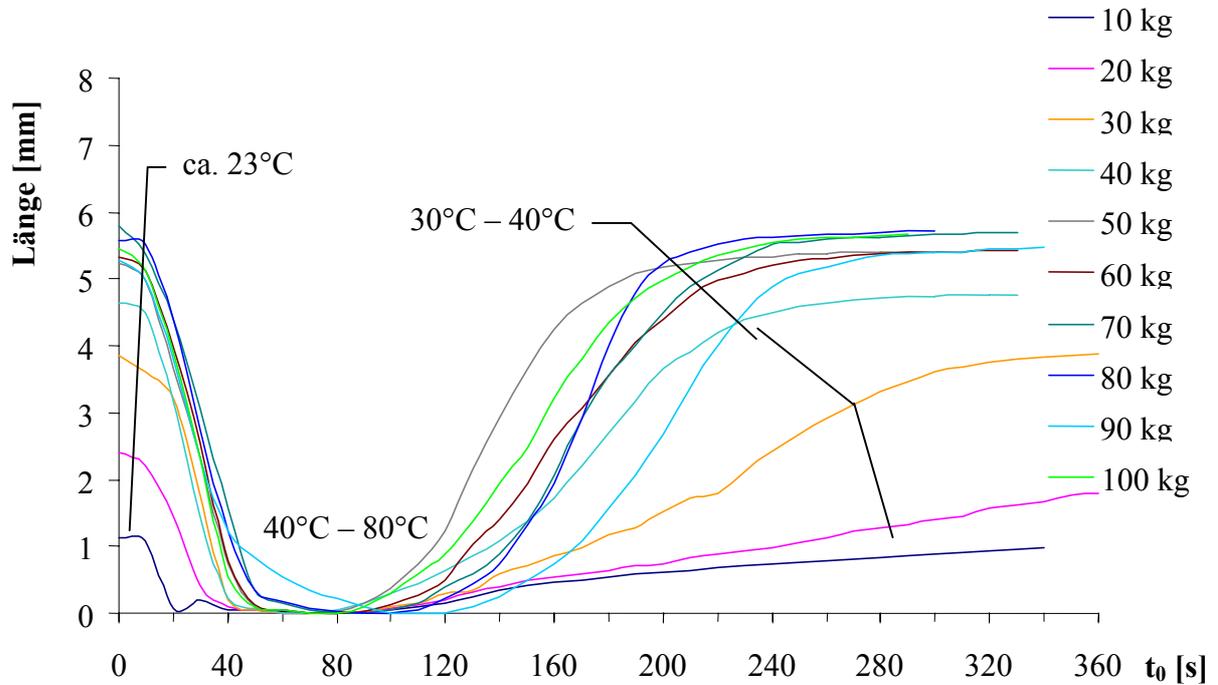


Abb. 3.3.4.1: Länge/Zeit
Für einen einzelnen versuch bei einer belastung von 50 kg ergab sich für Draht 6:

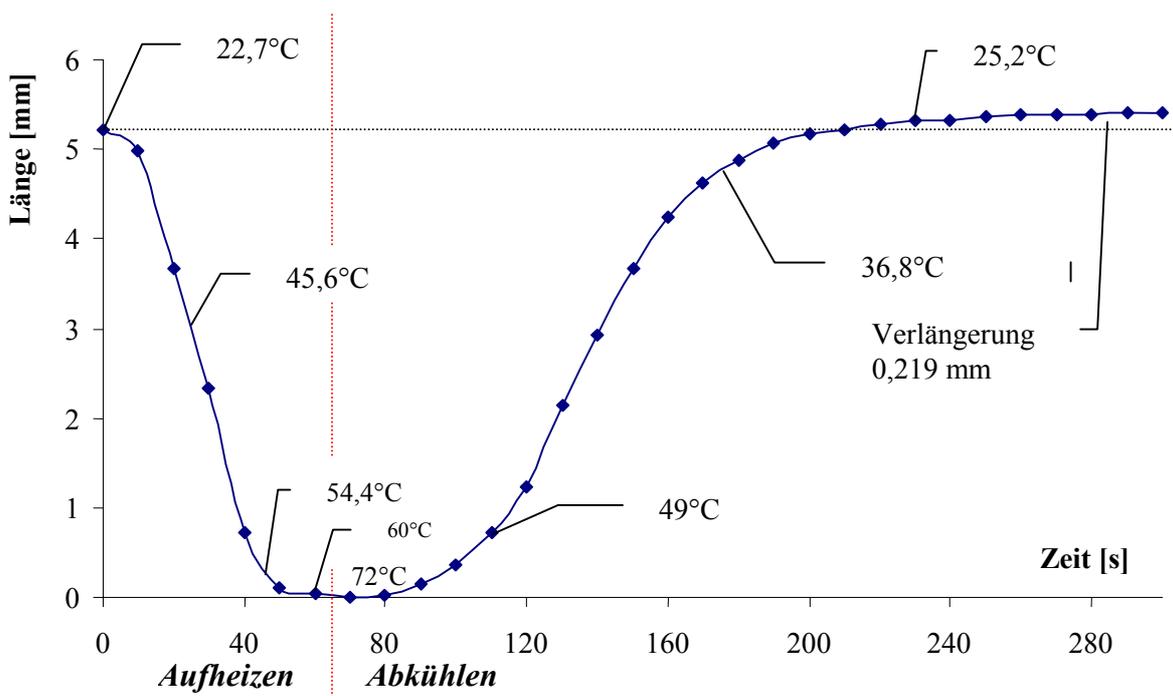


Abb. 3.3.4.2: Längenänderung/Zeit

Im Gegensatz zu Draht 4 und Draht 5 ist der Längenzuwachs gering. Der Wegeffekt beträgt 5,37 mm. Das sind bei einer Ausgangslänge von 103,4 mm 5,19%.

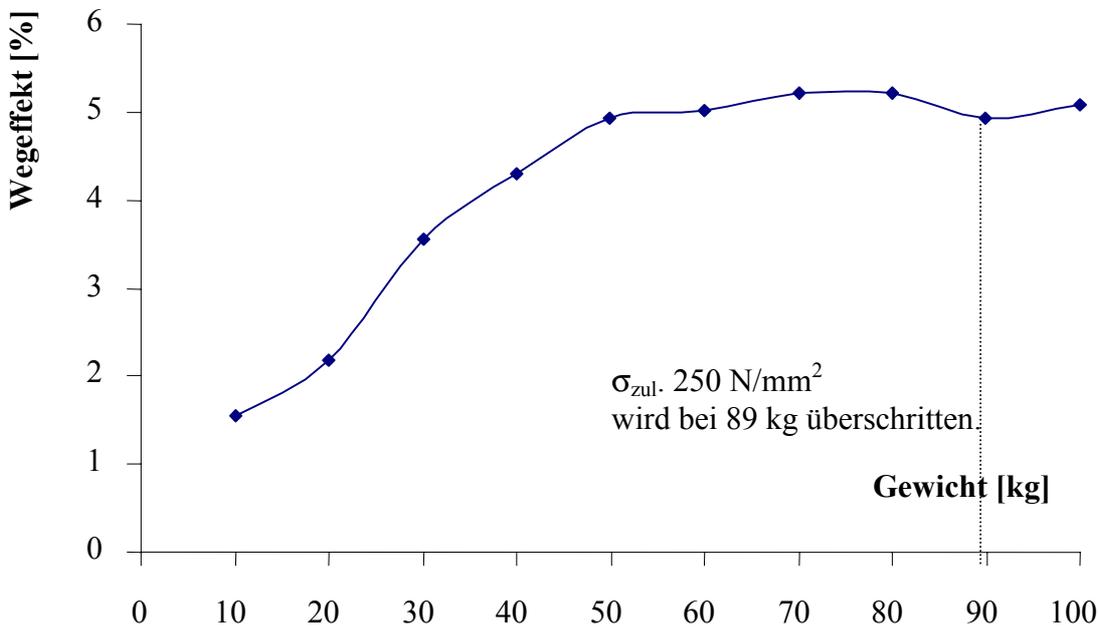


Abb. 3.3.4.3: Wegeffekt/Gewicht

Der Wegeffekt nimmt bis zur Belastung von 50 kg zu, bleibt ab da dann relativ konstant. Das Verhalten ist ähnlich dem des Rohrs. Bei Überschreiten von σ_{zul} sinkt der Wegeffekt etwas ab. Abbildung 3.3.4.3 zeigt außerdem, daß der Draht erst mit mehr als 30 kg den Wegeffekt über 3,5 % nutzt.

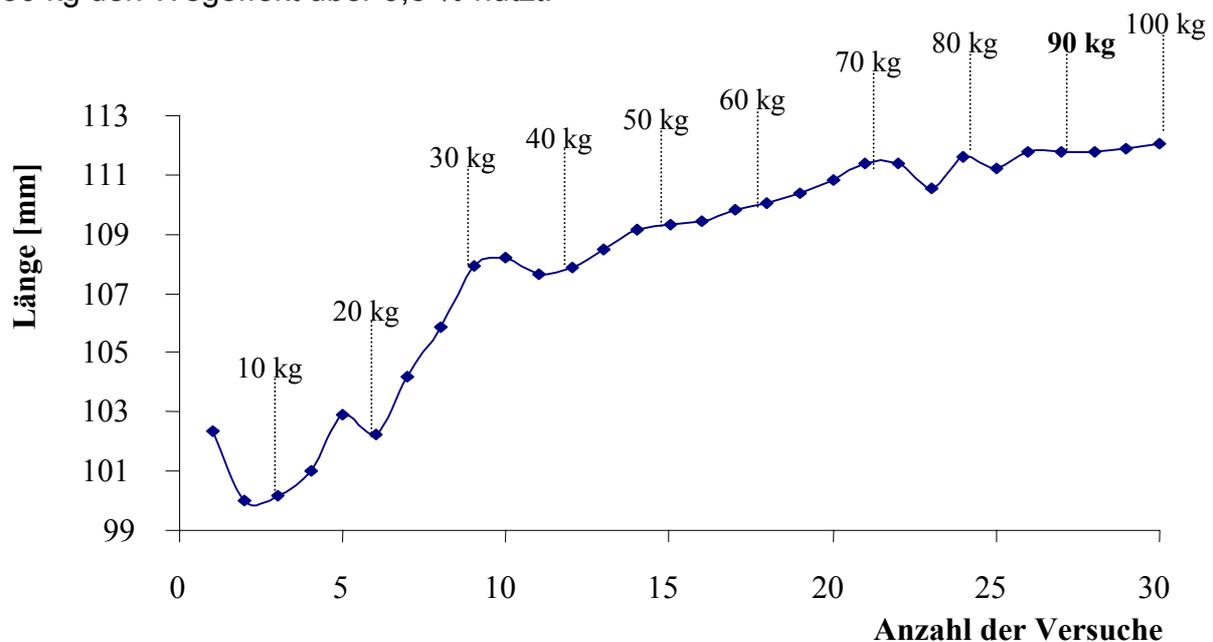


Abb. 3.3.4.4: Länge/Anzahl der Versuche

Die Verlängerung des Drahtes nimmt mit der Anzahl der Versuche ab. Das ist ein Indiz, daß die Verlängerung auf den 100 Zyklen-Effekt zurückzuführen ist, und nicht auf ein

Überschreiten der Dehngrenze wie bei Draht 4 und Draht 5. Der Längenzuwachs der Probe beträgt insgesamt 12,06 mm, das sind 12,06 % der Ausgangslänge. Die zulässige Spannung beträgt 250 N/mm^2 und ist mit Anhängen eines Gewichts von 89,1 kg erreicht.

Im Gegensatz zu Draht 4 und Draht 5 könnte dieser Draht für die Anwendung im Marknagel in Frage kommen.

3.3.5. Abschlußbetrachtung der Versuchsergebnisse zur FGL-Auswahl

Nach Abschluß dieser Versuche konnte festgestellt werden, daß sich die FG-Drähte 4 und 5 nicht für einen späteren Einsatz im Marknagel eignen, da die zulässige Maximalspannung schon bei geringen Lasten überschritten wird. Um sie dennoch einsetzen zu können, wäre eine Konstruktion mit Parallel- oder Schlaufenführung erforderlich, die jedoch für die vorgegebenen Abmessungen des Marknagels nur unter erheblichem Aufwand und hohen Kosten realisierbar wäre.

FG-Draht 6 zeigte bezüglich der Kräfte und der Längenzunahme recht ordentliche Ergebnisse, jedoch liegen seine Umwandlungstemperaturen für die Anwendung im menschlichen Körper zu niedrig. Fast die Hälfte des Wegeffektes zeigte er bei Umwandlungstemperaturen zwischen 20 und 37°C.

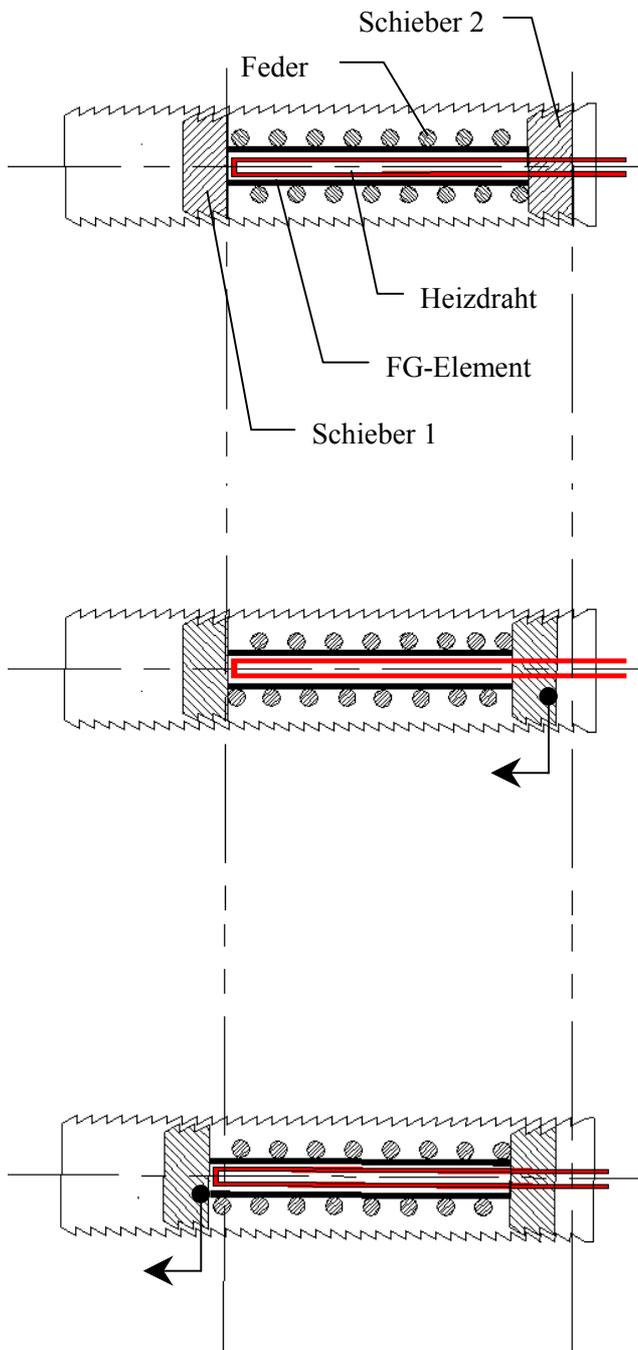
Das FG-Rohr lieferte die besten Ergebnisse, und zwar bezüglich der Kräfte, Umwandlungstemperaturen und Wegeffekte. Die zulässige Maximalspannung würde erst bei Belastungen über 250 kg erreicht werden. Die Längenzunahme bei den Versuchen mit dem FG-Rohr war minimal und ist in dem Effekt der ersten 100 Zyklen begründet. Nach entsprechendem Training ist keine weitere Längenzunahme während des Einsatzes zu erwarten. Bei der Verwendung eines Rohres als Aktuatorelement ist eine Beheizung von innen, also der Achse des Marknagels möglich. Dies hat entscheidende Vorteile bei der Ansteuerung mit geringen Heizströmen und vermeidet durch den Verlauf des Wärmegradienten zu hohe Temperaturen an der Außenoberfläche des Marknagels.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde deshalb ausschließlich das FG-Rohr verwendet. Bevor in einem separaten Unterpunkt (Kap. 3.7) auf die eingesetzten Einzelteile des Marknagel-Prototypen eingegangen wird, wird zunächst das Funktionsprinzip

des FG-Marknagels dargestellt (Kap. 3.4) und über Ergebnisse bzgl. der Auslegung des Federpakets (Kap. 3.5) und den Messungen mit der Heizpatrone (Kap. 3.6) berichtet.

3.4 Funktionsprinzip des FG-Marknagels

Der FG-Effekt soll ausgenutzt werden, um als Aktuator einen Marknagel anzutreiben. Das Grundprinzip besteht darin, ein rohrförmiges FG-Element durch Joule'sche Wärme über die Umwandlungstemperatur zu erwärmen, damit es sich in einem ersten Schritt zusammen zieht und dabei einen Schieber um eine Raste im Sägezahnprofil bewegt. In einem zweiten Schritt wird dieses FG-Element nach unterbrochener Energiezufuhr durch die Körpertemperatur allmählich abkühlt. Nach der Rückumwandlung in den martensitischen Zustand überwiegt die Federkraft und bewirkt damit die Dilatation des FG-Elementes zurück in den Anfangszustand. Aufgrund des Sägezahnprofils wird dadurch



ein zweiter Schieber um eine Raste weiter transportiert. Dies bewirkt eine raupen-förmige Bewegung des Aktuatorantriebes in eine Richtung, während die Bewegung in die andere Richtung gesperrt bleibt. An diesem zweiten Schieber befindet sich dann die Schubstange des FG-Marknagels, der mit dem durchtrennten Knochen verbunden wird und ihn bei jedem Umwandlungszyklus um 1 mm vorwärts treibt.

Das FG-Element wird durch eine innenliegende Beheizung erwärmt und zieht sich bei der Phasenumwandlung in den austenitischen Zustand zusammen.

Dabei wird der Schieber 2 im Sägezahnprofil um eine Raste nach links bewegt. Schieber 1 bewegt sich nicht, weil das Sägezahnprofil eine rückwärtige Bewegung verhindert. Bei der Kontraktion müssen die Reibkräfte, die beim Gleiten des Schiebers 2 am Profil ent-

stehen, und die Federkraft überwunden werden. Äußerlich erfolgt keine Bewegung.

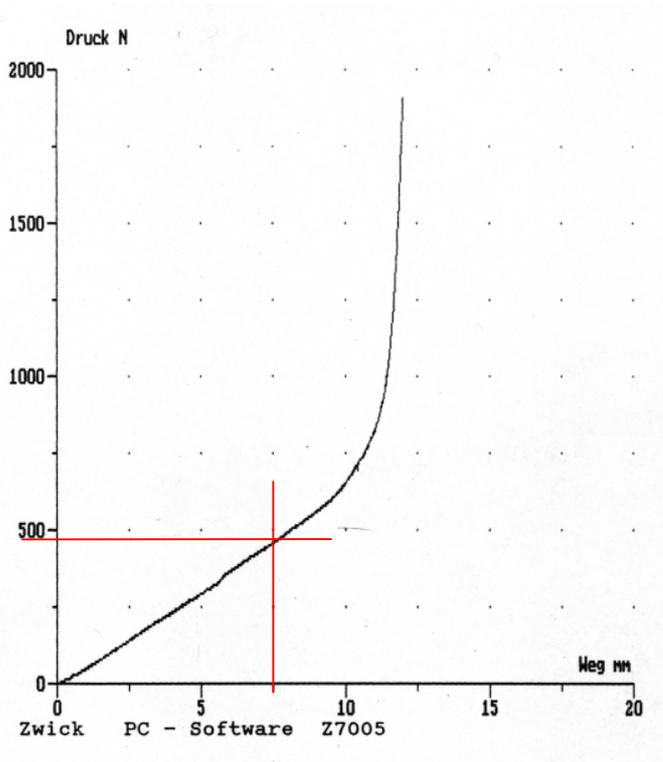
Wenn das FG-Element nach der Abkühlung in den martensitischen Zustand von der nun stärkeren Gegenfeder wieder in den Ausgangszustand zurückgestellt wird sperrt der Schieber 2 in dem Sägezahnprofil und Schieber 1 wird um eine Raste nach links transportiert. Dabei müssen außer den Reib- und Rückstellkräften im Marknagel auch die im entsprechenden Körperteil auftretenden Widerstandskräfte bei der Knochenverlängerung überwunden werden.

s Marknagels

3.5 Auslegung der Gegenfeder

Das FG-Rohr ist mit einem Einwegeffekt trainiert. Dadurch können gegenüber dem Zweiwegeffekt größere Kräfte über einen größeren Stellweg bewirkt werden. Um in der zyklischen Anwendung ein Zweiwegverhalten zu erreichen, bedient man sich dem Feder-Gegenfeder-Prinzip. In unserem Fall bedeutet dies, daß zur Rückstellung des kontrahierten FG-Rohres eine Rückstellfeder erforderlich ist. Da auf engem Raum eine Kraft von ca. 500 N aufgebracht werden muß und keine Feder gefunden werden konnte, die diesen Anforderungen entsprach, wurde das Problem mit Tellerfedern gelöst. Für die Auslegung des Tellerfederpaketes ist die Federkonstante ermittelt worden.

In der Druckprüfmaschine wurde ein Federpaket getestet, das in seinen Abmaßen der freien Weglänge des FG-Rohres entspricht. Das Tellerfederpaket bestand aus Federn mit 10 mm Außendurchmesser, 5,2 mm Innendurchmesser und einer Dicke von 0,4 mm



Um eine Vorspannung von 490 N zu erreichen, müssen 7,5 mm Federpaket zusätzlich eingelegt werden.

Abb. 3.5.1: Federkonstante

Mithilfe dieses Diagramms konnte die Federpaketgröße bestimmt werden:

Weglänge des FG-Rohres 47 mm + 7,5 mm = 54,5 mm Federpaketlänge.

Das Ergebnis wurde noch mal in der Druckprüfmaschine überprüft. Um das Federpaket zu bilden werden 106 Tellerfedern gebraucht.

3.6 Heizpatrone

Nachdem erste Versuche mit selbst gefertigten Heizleiterdrähten recht gut funktionierten, jedoch sehr hohe Heizströme erforderten, konnten über die Firma Türk+Hillinger verschiedene Heizpatronen beschafft werden, die eine effektivere Erwärmung des FG-Rohres bei sehr viel geringeren Stromwerten ermöglichten.

In folgendem Versuch wurde die Heizpatrone mit zwei verschiedenen Versorgungsspannungen (24 Volt und 12 Volt) angesteuert, um bei unterschiedlicher Energieaufnahme die daraus resultierende Temperatur an der Oberfläche des FG-Rohres zu

ermitteln. Die Heizpatronen hatten folgende Daten: 24 Volt, 7 Watt, Länge 50 mm, Durchmesser 3,2 mm.

Das Heizelement wurde in einem FG-Rohr mit einer Gesamtlänge von 57 mm plziert. Die Aufheizversuche fanden in der auf 37°C aufgeheizten Klimakammer statt. Bei Beginn der Versuche hatte das FG-Rohr eine Temperatur von 32,3°C.

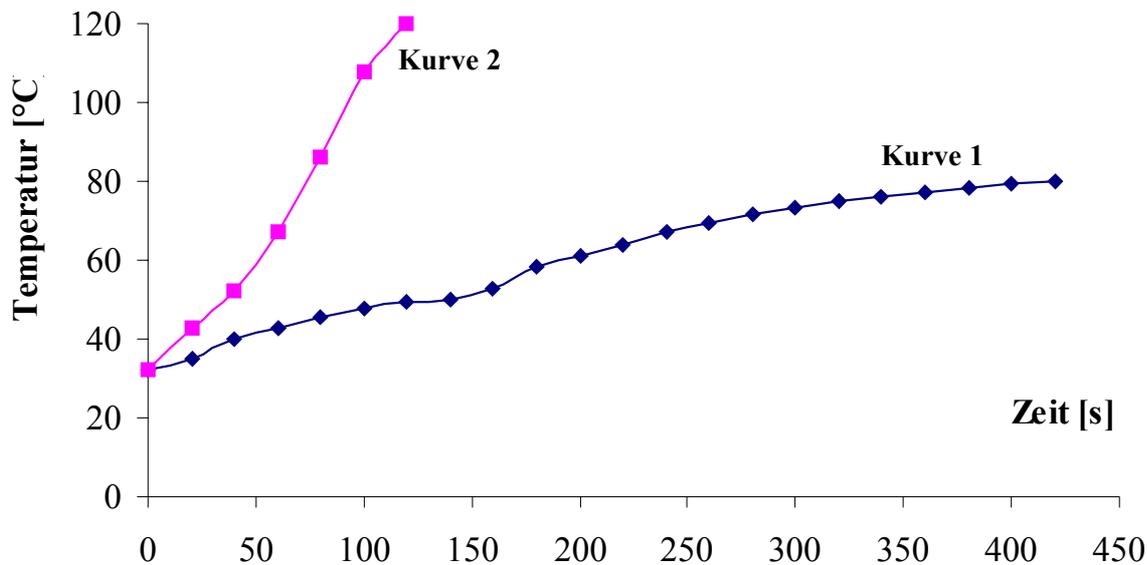


Abb. 3.6.1: Heizkurven 12 V/24 V

Kurve 1:

Einstellung des Trafos: 12 V; 0,16 A (ergibt sich aus der Spannungseinstellung)

Die Heizleistung errechnet sich durch $12 \text{ V} \cdot 0,16 \text{ A} = 1,92 \text{ W}$

Mit diesen Daten erreicht die Patrone eine Temperatur von 80°C in 7 min.

Kurve 2:

Einstellung des Trafos: 24 V; 0,29 A (ergibt sich aus der Spannungseinstellung)

Die Heizleistung errechnet sich durch $24 \text{ V} \cdot 0,29 \text{ A} = 6,96 \text{ W}$

Mit diesen Daten erreicht die Patrone eine Temperatur von 120°C in 2 min.

Dieses Ergebnis zeigt; daß die Heizleistung in beiden Ansteuerungsfällen ausreichend ist, um das FG-Rohr auf Umwandlungstemperatur zu erwärmen. Da die Aufheizzeit von keiner besonderen Relevanz ist, würde auch eine mit 12 Volt angesteuerte Heizpatrone unter sehr geringer Stromaufnahme die Erwärmung des Rohres bewirken.

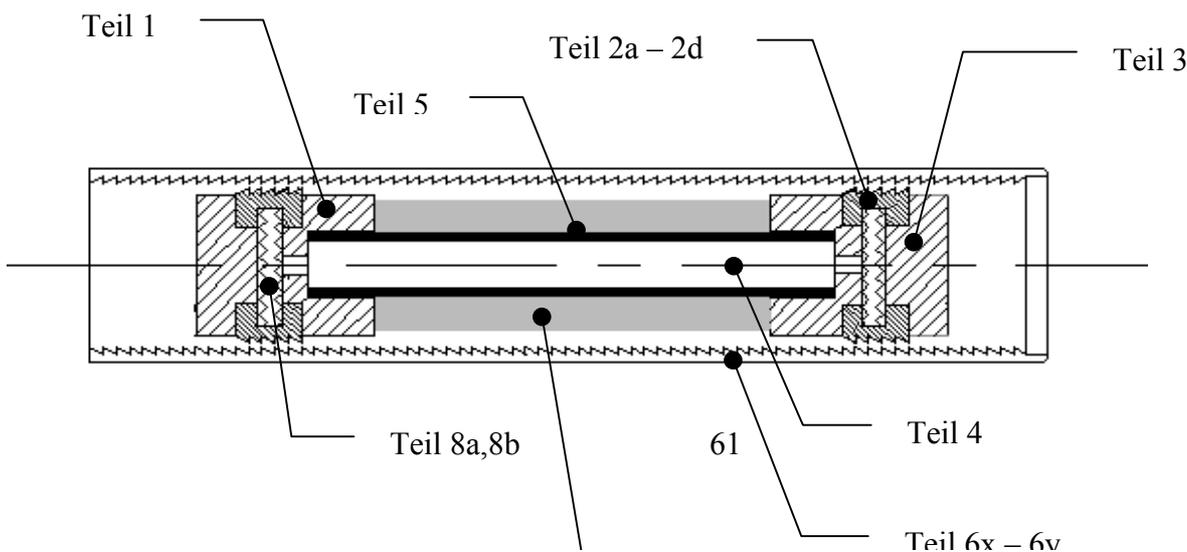
3.7 FG-Marknagels (Prototyp)

Im nächsten Schritt wurde ein Prototyp konstruktiv ausgelegt. Einige Teile konnten als Normteile eingekauft werden, andere wurden extern gefertigt. Nachdem alle Teile vorhanden waren und verschiedenen Fügetechniken ausprobiert wurden, konnte der Prototyp eines FG-Marknagels in der Klimakammer getestet werden.

3.7.1. Einzelteile des FG-Marknagels

Dieser Marknagelprototyp besteht aus folgenden Teilen:

- Je eine Halterung an den Rohrenden mit Bohrungen für den Heizdraht (Teil 1 Schieber oben, Teil 3 Schieber unten)
- In den Schiebern befinden sich jeweils zwei Sperren, die durch eine Feder (Teil 8a, 8b) auseinander gehalten werden und in das Sägezahnprofil des Rohrsegmentes einrasten können (Teil 2a –2d Sperre)
- FG-Rohr (Teil 5). Die Enden des FG-Rohres wurden mit den Halterungen entweder durch eine Klebeverbindung, einen angeschweißten Gewindeaufsatz oder durch eine Madenverschraubung verbunden
- Heizelement (Teil 4)
- Rohrsegmente (Teil 6x – 6y). Das Rohr besteht aus fertigungstechnischen Gründen aus mehreren kurzen Rohrsegmenten. Ein Segment ist 25 mm lang. Es werden 8 Segmente für eine 200 mm lange Strecke gebraucht. Der Außendurchmesser ist 13,8 mm
- Eine Gegenfeder (Teil 7), in dessen Innenbohrung sich das FG-Rohr befindet. Die Gegenfeder besteht aus unterschiedlich starken Tellerfederpaketen, um die erforderliche Federkraft auch bei verschiedenen Längen konstant zu halten. Außerdem erlaubt eine Variation der Stapelfolge des Federpakets die Einstellung verschiedener Vorspannkraften



Schieber oben (Teil 1) und Schieber unten (Teil 3):

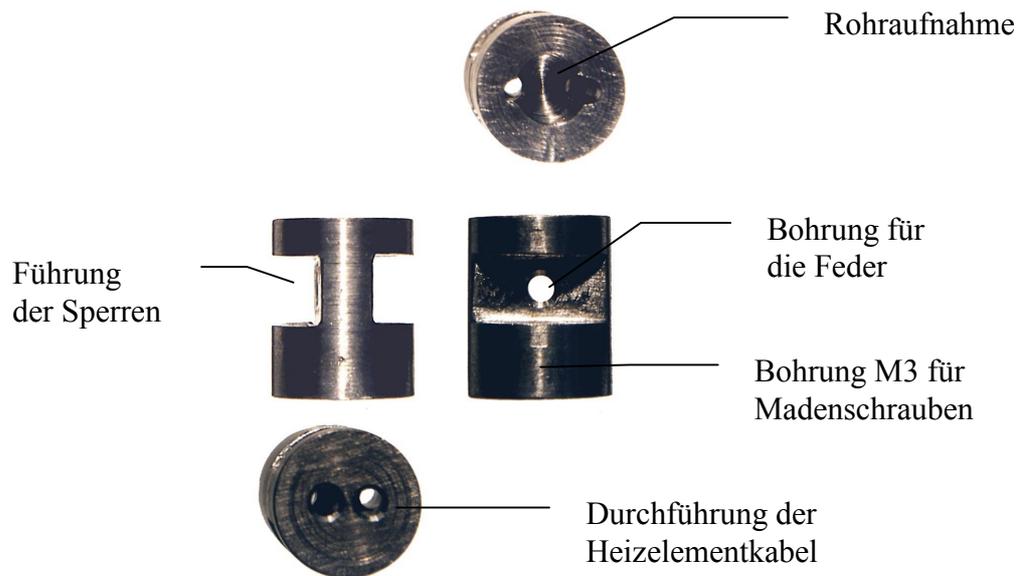


Abb. 3.7.1.2: Schieber

Für die Verbindung des FG-Rohrs mit den Schiebern war ursprünglich eine Klebung vorgesehen. In den ersten Versuchen stellte sich heraus, daß die Klebverbindung trotz der Angaben des Klebstoffherstellers Loctite und der Einhaltung des Klebespaltes nicht hielt. Um innerhalb des Projektzeitraumes mit den Versuche fortfahren zu können, wurden die Rohrenden mit Madenschrauben in den Schiebern fixiert. Die Klemmkraft der Verschraubung war ausreichend, um bei allen Versuchen das FG-Rohr sicher zu fixieren.

Parallel dazu wurde eine andere Befestigungsmöglichkeit erprobt: je ein Gewindeaufsatz wurde an den FG-Rohrenden mit dem NiTiNoI Soldering Kit verlötet und in den Schieber eingedreht. Diese Verbindung hielt in den Vorversuchen sehr gut, konnte im Projektzeitraum jedoch nicht mehr in einem Marknagelprototyp getestet werden.

Sperre (Teil 2):

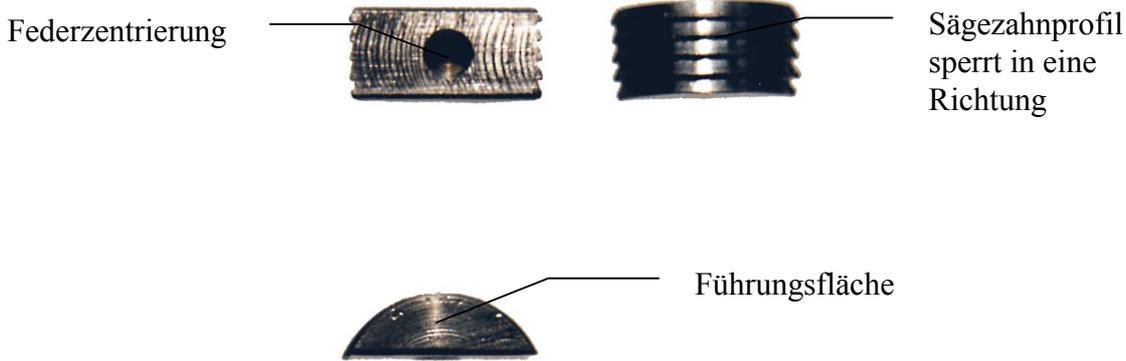
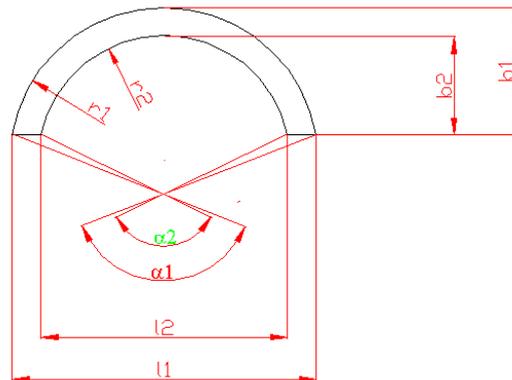


Abb. 3.7.1.3: Sperre

Die Sperren wurden mit Antax 80 E gebeizt, um die Oberflächenqualität zu verbessern, anschließend von der Firma Bodycote durch das spezielle Verfahren des Kolsterisierens behandelt, um die Oberflächenhärte zu erhöhen.

Die Flächenpressung einer einzelnen Sperre errechnet sich durch die Auflagefläche pro Sperre:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{360} - \frac{l \cdot (r-b)}{2}$$



$$A_1 \rightarrow \begin{aligned} d_1 &= 11 \text{ mm} \\ b_1 &= 3,25 \text{ mm} \\ l_{S1} &= 10,037 \text{ mm} \\ \alpha_1 &= 131,704^\circ \end{aligned}$$

$$A_1 = 23,47 \text{ mm}^2$$

$$A_2 \rightarrow \begin{aligned} d_2 &= 10,425 \text{ mm} \\ b_2 &= 2,673 \text{ mm} \\ l_{S2} &= 8,883 \text{ mm} \\ \alpha_2 &= 128,844^\circ \end{aligned}$$

$$A_2 = 16,61 \text{ mm}^2 \quad A_2 \text{ entspricht der Führungsfläche}$$

Bei fünf Auflagen pro Sperre ergibt sich: $A_1 - A_2 = 6,85 \text{ mm}^2 \cdot 5 = 34,25 \text{ mm}^2$ pro Sperre. Da jeweils zwei Sperren in jedem Schieber montiert sind, ergibt sich eine nutzbare Auflagefläche im Sägezahnprofil von $68,5 \text{ mm}^2$.

Der Werkstoff 1.4435 wird bei einer Beanspruchung von 1000 N also lediglich mit $14,6 \text{ N/mm}^2$ beansprucht.

FG-Rohr (Teil 5):



Abb. 3.7.1.5: FG-Rohr

Das Arbeitselement besteht aus einem FG-Rohr mit $\varnothing_A = 5$ mm, $\varnothing_I = 3,5$ mm und hat die Zusammensetzung Ti 54,52 gew.% Ni. Vor dem Einbau sollte das Rohr ca. 100 mal den Erwärmungs- und Abkühlzyklus durchlaufen (Training), weil in den Versuchen festgestellt wurde, daß sich während der ersten 100 Zyklen die Gesamtlänge des Rohres ändert. Danach erfolgt keine weitere Längenänderung mehr.

Wie bereits erwähnt, wurde das FG-Rohr mittels Madenschrauben in den Schiebern fixiert. Um die Kontaktfläche zu vergrößern und die Verklebung zusätzlich zu sichern wurde in die Rohrenden eine kleine Vertiefung von 0,5 mm eingeschliffen.

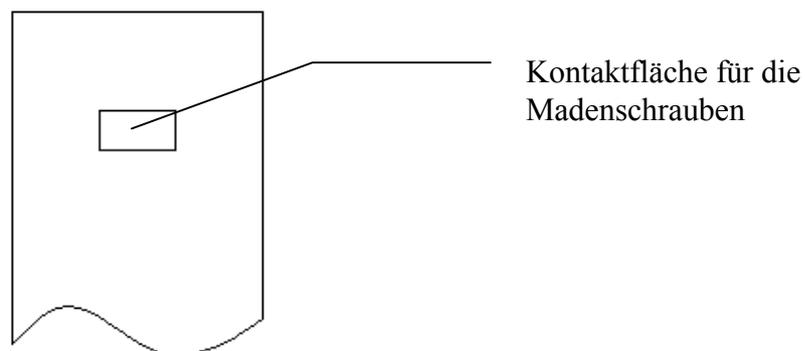
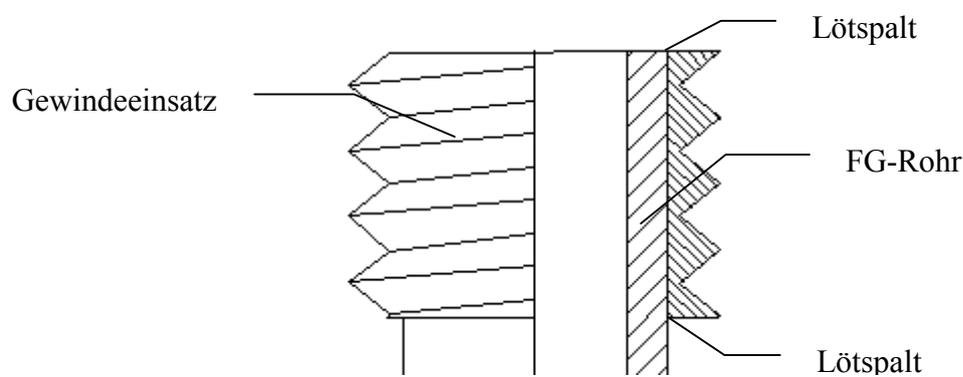


Abb. 3.7.1.5: Angeschliffene Rohrende

Eine andere Fügemöglichkeit wurde ebenfalls erprobt. Abb. 3.7.1.6 zeigt den Gewindeeinsatz, der mit dem FG-Rohr verlötet wurde.



Form des FG-Rohres

Das Rohr hat eine Wandstärke von 0,75 mm. Der Querschnitt ist 10,031 mm². Bei einer Zugbelastung von 500 N beträgt die Spannung 49,93 N/mm². Die zulässig Spannung von 250 N/mm² ist bei weitem noch nicht erreicht. Um Erwärmungs- und Abkühlzeiten zu verkürzen und damit die bei der Erwärmung erforderlichen Heizströme weiter zu verringern, könnte man den Querschnitt durch Abschleifen des Außendurchmessers verkleinern. Bei einer Sicherheit von 1,2 ergibt sich:

$$\frac{500 \text{ N}}{x} = 250 \text{ N/mm}^2 \text{ mit Sicherheit von } 1,2 \rightarrow 208,3 \text{ N/mm}^2 = \frac{500 \text{ N}}{x}$$

$$x = 2,4 \text{ mm}^2$$

Rechnet man nun auf den minimalen Außendurchmesser des Rohres bei gleichem Innendurchmesser

$$\frac{x_0 \cdot \pi}{4} - \frac{3,5^2 \cdot \pi}{4} = 2,4 \text{ folgt daraus, daß ein Außendurchmesser von } 3,9 \text{ mm genügt.}$$

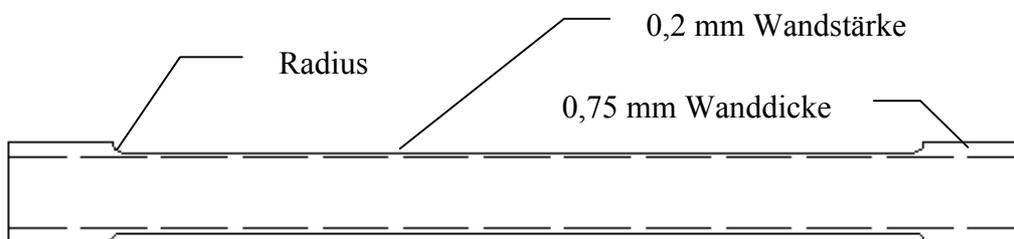


Abb. 3.7.1.7: FG-Rohr Durchmesser auf 3,9 mm geschliffen

Die Rohrenden können je nach Gestaltung der Aufnahme stehengelassen werden.

Auch hierzu wurden entsprechende Versuche mit geschliffenen Proben gemacht; ein Einbau in den Marknagelprototyp erfolgte aus Zeitgründen jedoch nicht mehr im Berichtszeitraum.

Feder für die Sperren im Schieber (Teil 8):

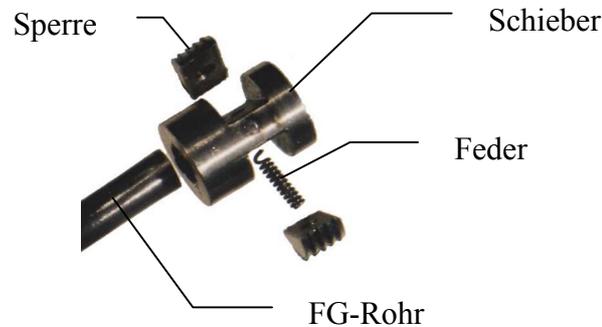


Abb. 3.7.1.8: Feder für die Sperren im Schieber

Die Sperren müssen einerseits im Sägezahnprofil des Rohrsegments einrasten können ("Sperren"), andererseits sollte das Verschieben mit möglichst kleinen Reibkräften verbunden sein ("Gleiten"). Im zusammengepreßten Zustand darf sie nicht länger als 8,5 mm sein, im expandierten Zustand sollte sie mindestens 11 mm lang sein.

Von der Firma Gutekunst war folgende Feder erhältlich (Druckfeder D-063H-05):

Länge	14,6 mm
Federweg	2,0 mm
Kraft	12,83 N

Die Feder wurde auf eine Länge von 5 mm gekürzt und mit Hilfe einer Zange auf 11 mm langgezogen. Die neue Federkraft wurde zwar zahlenmäßig nicht erfaßt, aber sie funktionierte im Marknagelprototyp einwandfrei.

Tellerfederpaket (Teil 7):

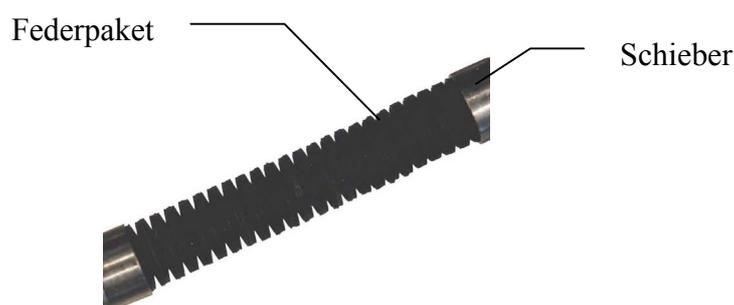


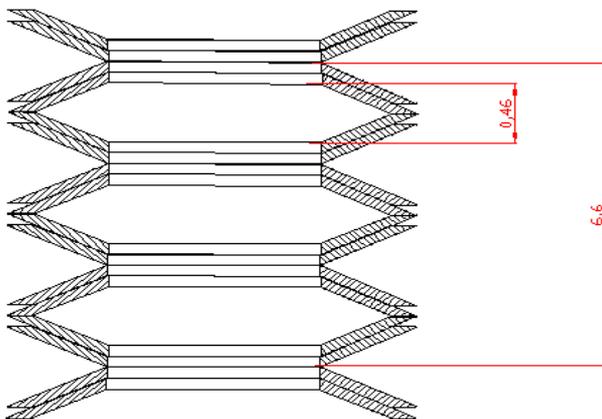
Abb. 3.7.1.9: Tellerfederpaket 66

Mit Hilfe der Druckprüfmaschine konnte ein Diagramm erstellt werden, aus dem sich der Vorspannungsweg ablesen ließ (vgl. Abb. 3.5.1). Die über die Firma Steinel-Normalien beschafften Tellerfedern haben folgende Daten:

Außendurchmesser	D_a	=	10 mm
Innendurchmesser	D_i	=	5,2 mm
Dicke	t	=	0,4 mm
Höhe	l_o	=	0,7 mm
Federweg	h_o	=	0,23 mm
Kraft	F	=	213,0 N

Die erforderliche Federspannung soll zwischen 400 N und 500 N liegen. Um das zu erreichen müssen mehrere Federn übereinander gelegt werden.

$$F_{\text{ges}} = n \cdot F \quad n = \frac{500 \text{ N}}{213 \text{ N}} = 2,35 \quad \text{2 Tellerfedern werden übereinander gelegt.}$$



Die einzelne Tellerfeder hat einen Federweg von 0,23 mm.

Der Gesamtfederweg ergibt sich aus der Stapelung des Federpakets. Um das Federpaket zu bilden werden 106 Tellerfedern eingesetzt.

Abb. 3.7.1.10: Federpaket Detail

Marknagel-Rohr, bestehend aus Rohrsegmenten (Teil 6):



Das Marknagel-Rohr besteht aus körperverträglichem Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4435. In der Innenwand der Rohrsegmente ist das zu den Sperrern passende Sägezahnprofil eingedreht. Nachdem erste Versuch mit einem Zahnwinkel von 45° zu hohe Reibkräfte beim Gleiten ergaben, wurde das schließlich im Prototyp verwendete Sägezahnprofil mit einem Neigungswinkel von 60° gefertigt.

Da bei der Fertigung das Problem bestand, ein Sägezahnprofil auf die Länge von 200 mm innen auszdrehen, mußte das Rohr aus mehreren Segmenten zusammengesetzt werden. Diese wurden für den Marknagelprototypen aneinander geschweißt. Um auch bei den Übergängen zwischen den Rohrsegmenten immer den gleichen Zahnabstand zu haben, wurden die Stücke auf einer speziellen Vorrichtung verschweißt.



Rohrsegment innen:
Unterschiedliche Qualität
bzgl. der Form und Tiefe



Abb. 3.7.1.12: Rohrsegment innen

1 mm

Um das Rohr aus einem Stück in gleicher Qualität zu erhalten, sollte man zukünftig ein Walzwerkzeug herstellen und das Profil einwalzen.

Ebene 90°

0,67 mm

Abb. 3.7.1.13: Profil Schnitt

Formungenaugig
Drehmeißelform
bei der Fertigung

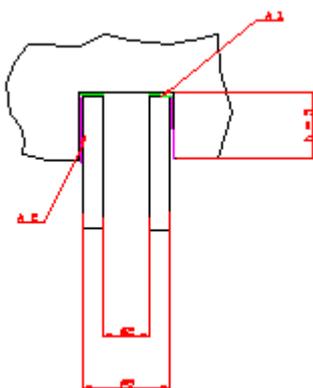
Im Schnitt sind die
der Winkel gut zu

Neigung 60°

3.7.2. Fügen der Teile

Die Schieber sollten mit dem FG-Rohr über eine Klebeverbindung gefügt werden. Gemäß der nachfolgenden Berechnung (unter Verwendung der Angaben in der Loctite Fibel) wurden die Teile und der Fügspalt entsprechend vorbereitet und auch die Durchmesseränderung des FG-Rohres bei der Umwandlung ermittelt (Kap. 3.3.1.3).

Maße: Außendurchmesser = 5 mm, Innendurchmesser = 3,5 mm



$$A_1 = \frac{\pi}{4} (\varnothing_1^2 - \varnothing_2^2) = \frac{\pi}{4} (5^2 - 3,5^2) \text{ mm}^2 = 10,014 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = U \cdot h = \pi \cdot \varnothing_1 \cdot h = \pi \cdot 5 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} = 78,539 \text{ mm}^2$$

Abb. 3.7.2.1: Klebung

Klebstoff-Gruppe 1:

minimale Zugfestigkeit: $F = A_1 \cdot 10 \text{ N} = 164,9 \text{ N}$

maximale Zugfestigkeit: $F = A_2 \cdot 25 \text{ N} = 412 \text{ N}$

minimale Zugscherfestigkeit: $F = A_1 \cdot 9 \text{ N} = 90,12 \text{ N}$

maximale Zugscherfestigkeit: $F = A_2 \cdot 25 \text{ N} = 1963,4 \text{ N}$

Temperaturbeständigkeit: - 50°C bis 120°C

Klebstoff-Gruppe 4:

minimale Zugfestigkeit: $F = A_1 \cdot 12 \text{ N} = 120,7 \text{ N}$

maximale Zugfestigkeit: $F = A_2 \cdot 25 \text{ N} = 412,3 \text{ N}$

minimale Zugscherfestigkeit: $F = A_1 \cdot 20 \text{ N} = 200,28 \text{ N}$

maximale Zugscherfestigkeit: $F = A_2 \cdot 30 \text{ N} = 2356,78 \text{ N}$

Temperaturbeständigkeit: - 50°C bis 80°C

Mit diesen Daten konnte aus der Loctite Fibel der Kleber Loctite 306 ausgewählt werden. Obwohl das Fügen gemäß der Klebevorschrift des Herstellers erfolgte und alle Bedingungen erfüllt waren, zeigten die Versuche, daß der Kleber wahrscheinlich doch zu spröde ist, um die im Versuch festgestellte Durchmesseränderung auszugleichen. Um dennoch innerhalb des Projektzeitraumes einen Prototypen in der Klimakammer testen zu können, wurde das Rohr in den Schiebern mit Madenschrauben gefügt.

3.7.3. Montage des Marknagelprototyps

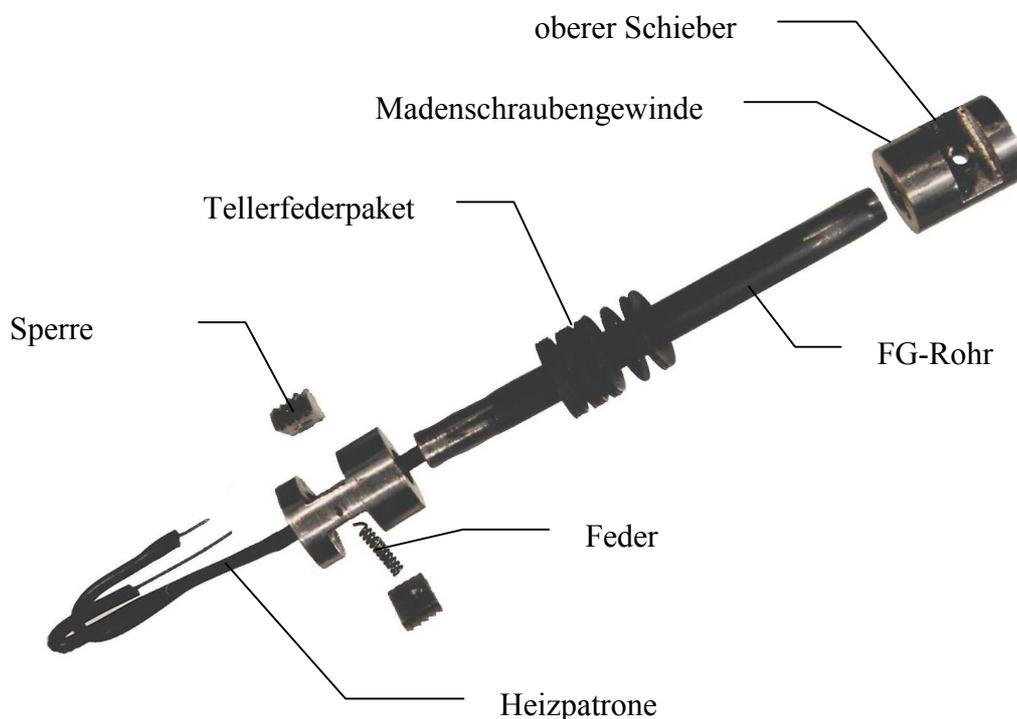


Abb. 3.7.3.1: Einzelteile des Kerns

1. Die Heizpatrone in das FG-Rohr einführen.
2. Die Kabel der Heizpatrone durch die Löcher des unteren Schiebers fädeln. Den unteren Schieber mit Hilfe der Madenschrauben mit dem FG-Rohr verklemmen.

3. Die Tellerfedern auffädeln und in die Fügevorrichtung legen, dann den oberen Schieber nachlegen und mit dem Stößel in den Schraubstock spannen. Den Schraubstock zuziehen bis das Tellerfederpaket auf Maß vorgespannt ist und der obere Schieber auf dem FG-Rohr sitzt. Die Madenschrauben eindrehen.
4. Den Kern in das Rohrsegment schieben.

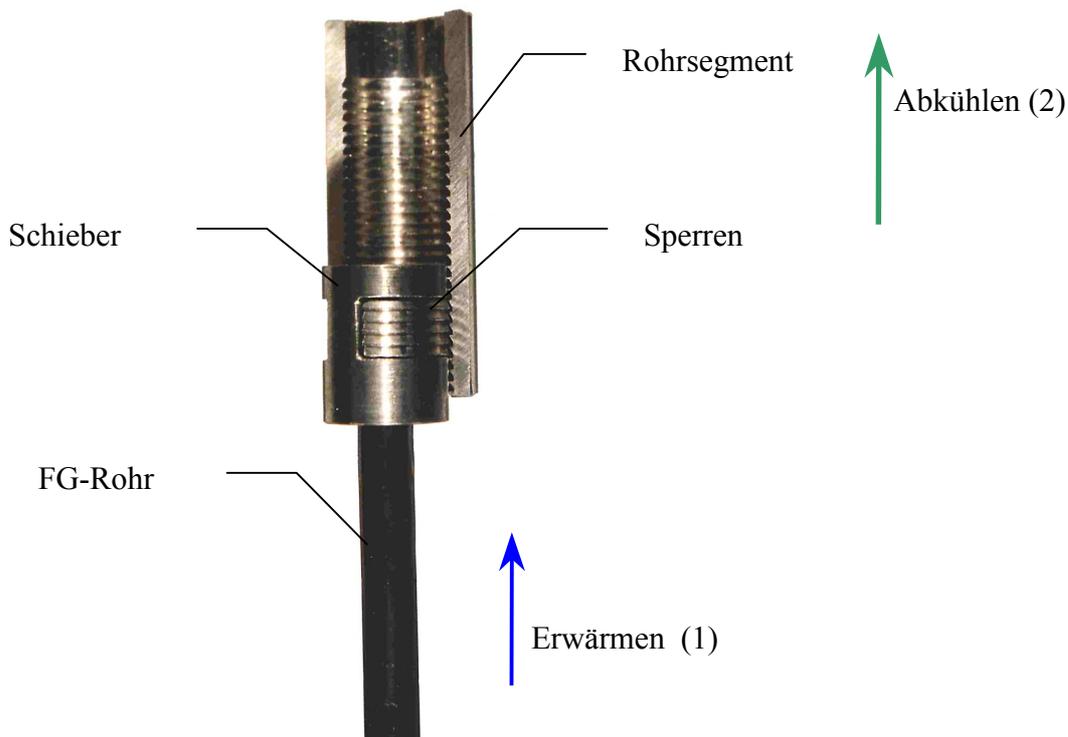


Abb. 3.7.3.1: Schnitt durch Rohrsegment

1. Stromversorgung einschalten: Durch die entstehende Wärme erfolgt im FG-Rohr eine Kontraktion, wobei der eine Schieber um eine Raste im Sägezahnprofil transportiert wird, während der andere Schieber im Sägezahnprofil sperrt. Nach dem Transport werden die Sperren durch die kleine Feder wieder auseinander

gespreizt und der Sperrmechanismus rastet ein. Dabei wird auch die Vorspannung des Federpaketes erhöht.

2. Stromversorgung abschalten: Nach der Abkühlung des Aktuatorelementes in den martensitischen Zustand überwiegt die Spannungskraft im Federpaket und das FG-Rohr wird wieder auf die ursprüngliche Länge gedehnt. Bei dieser Verlängerung um eine Raste von 1 mm wechseln die Aufgaben der Schieber im Vergleich zum ersten Schritt: Nun sperrt der vorher gegleitene Schieber, während bei dem anderen die Sperren gegen die kleine Feder gedrückt werden und ein Gleiten ermöglichen. Nach erfolgter Bewegung sind alle Sperren wieder im Sägezahnprofil eingerastet und verhindern die rückwärtige Bewegung.

(Siehe auch Kap. 3.4: Funktionsprinzip des FG-Marknagels)

3.8 Prototyp in der Klimakammer

In diesem Versuch sollten die Klebverbindung und die Funktion getestet werden. Der Kern wurde zusammen montiert und in das Rohrsegment eingelegt. Der Versuch fand in der Klimakammer bei 37°C statt.

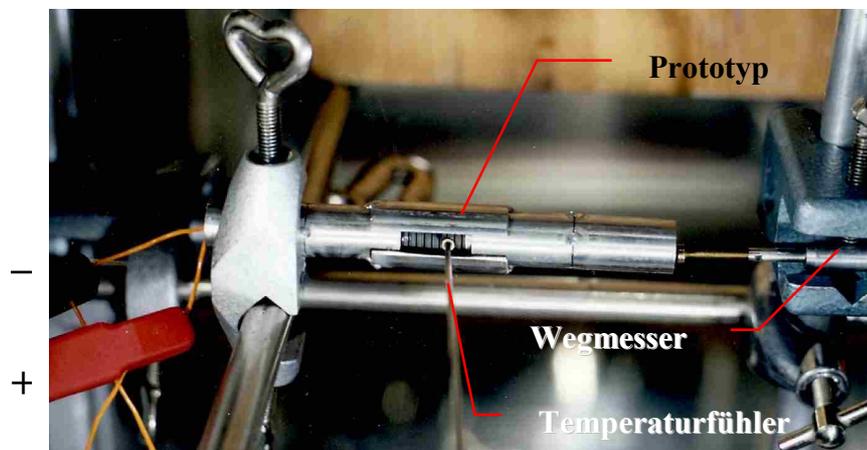


Abb. 3.8.1: Versuchsaufbau

Der Marknagelprototyp wurde eingespannt und der Temperaturfühler außen an dem Teller- Federpaket angebracht. Die Stromzufuhr für die Heizpatrone betrug 24 V/ 0,3 A und heizte den Kern auf eine Temperatur von 80°C an der Außenoberfläche der Tellerfedern auf. Mit Hilfe eines Wegmessers wurde die Bewegung des Kerns aufgezeichnet.

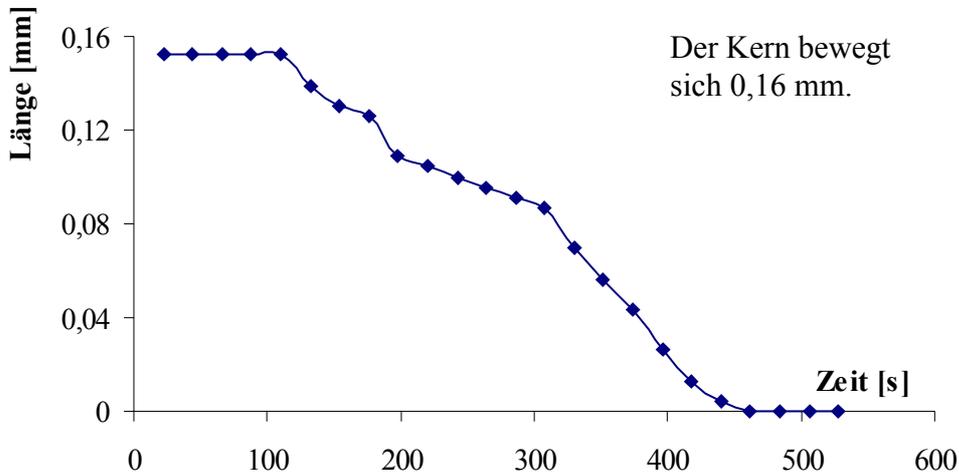


Abb. 3.8.2: Prototyp in

Dieses unerwartet niedrige Resultat war Anlaß für eine erneute Prüfung. Diesmal wurde nur der Kern unter den gleichen Bedingungen getestet, um als Ursache für das Ergebnis eine zu hohe Reibung zwischen Kern und Hülse auszuschließen.

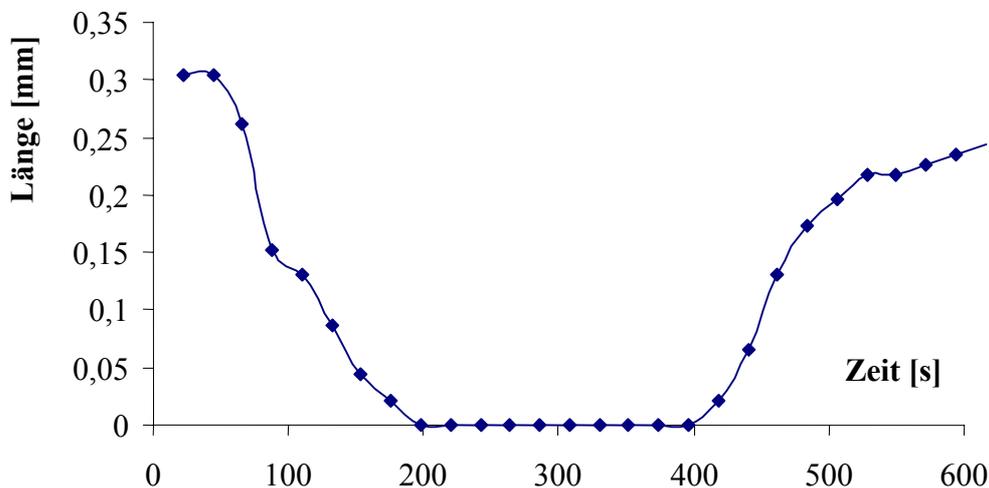


Abb. 3.8.3: Kern in der Klimakammer

Die Werte dieses Versuches waren zwar doppelt so hoch wie im vorhergehenden, aber immer noch weit von den benötigten 1,0....1,3 mm entfernt. Nach Überprüfen der Klebeverbindungen stellte sich heraus, daß sich diese gelöst hatten.

Das FG-Rohr und die Schieber wurden noch einmal mit Loctite 306 geklebt. Die Klebeverbindung härtete in der Klimakammer bei 40°C ca. 60 Stunden aus. Anschließend wurde der Versuch mit dem Kern in der Klimakammer wiederholt.

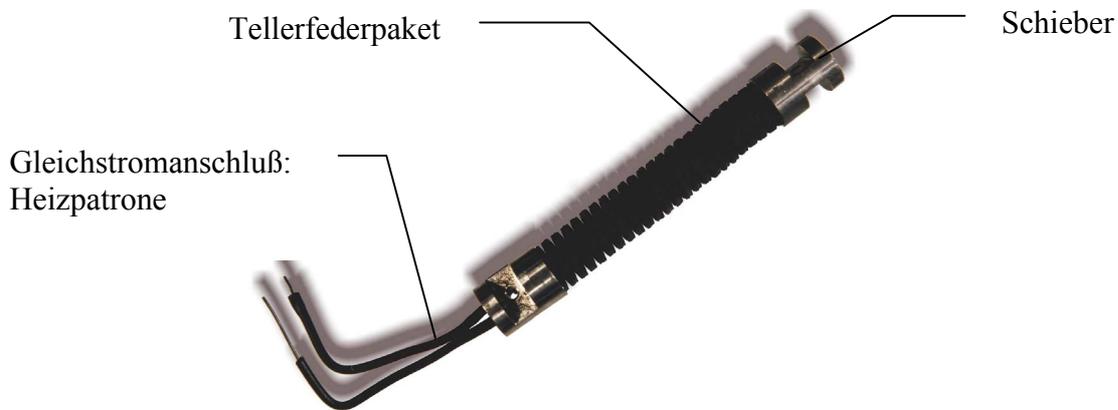


Abb. 3.8.4: Kern des Prototyps

Die Temperatur der Klimakammer betrug 37°C. Es wurde ein Temperaturfühler an das Tellerfederpaket angebracht. An dem vorderen Ende des Kerns konnte ein Wegmesser die Daten der Bewegung zum y – t Schreiber weiterleiten. Die Heizpatrone wurde solange erhitzt, bis an den Tellerfedern eine Temperatur von 80°C gemessen wurde.

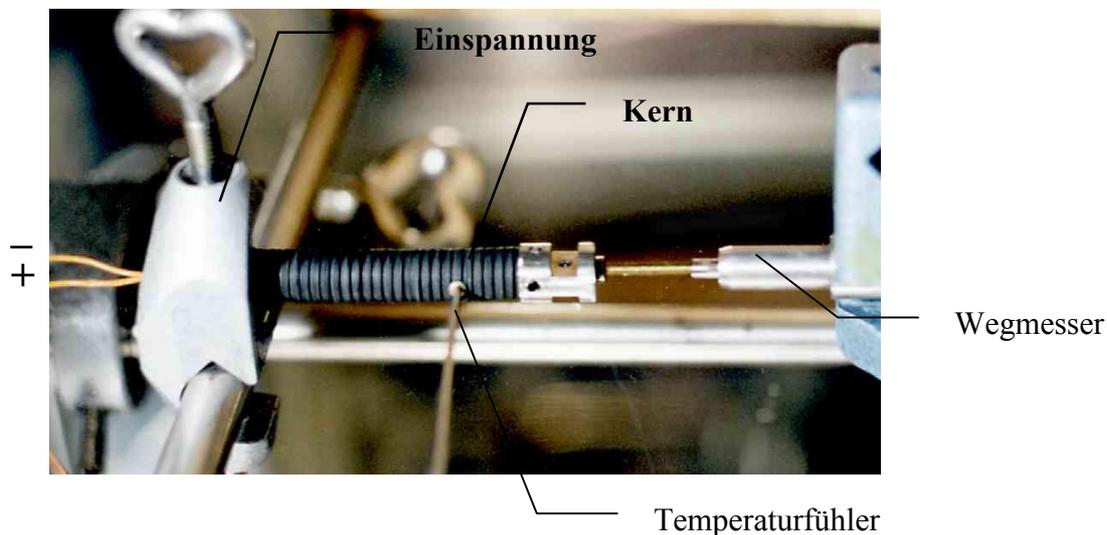
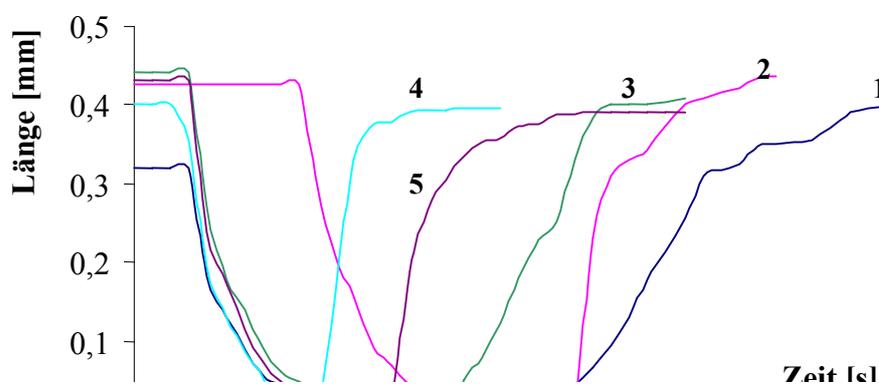


Abb. 3.8.5: Versuchsaufbau

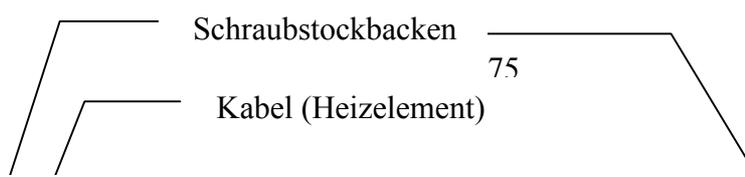


Die Kurven 4 und 5 sind etwas kürzer als die Kurven 1, 2 und 3, weil der Abkühlvorgang mit Preßluft unterstützt wurde. Allerdings zog sich das FG-Rohr bei Erwärmung nur um ca. 0,4 mm zusammen. Die Tellerfedern stellten bei Abkühlung diese Kontraktion wieder zurück. Für die Anwendung im FG-Marknagel ist dieser Stellweg zu klein, er muß mindestens 1 mm betragen, sonst können die Sperren im Kern die nächste Raste im Sägezahnprofil des Rohrsegments nicht erreichen und es erfolgt nach außen keine Bewegung.

Bei der Prüfung des Kerns stellte sich heraus, daß sich die Klebverbindung trotz aller Vorkehrungen gelockert hatte. Für das Lösen gibt es aus unserer Sicht nur einen möglichen Grund, wieso der Kleber nicht in der Lage ist, die aufgrund der Durchmesseränderung der FG-Rohres erfolgten Spannungen auszugleichen:

Auf dem FG-Rohr könnte sich eine Patina-Schicht bilden, auf der der getestete Kleber schlechter haftete. Die Änderung der Spaltbreite lockerte dann den Kleber.

Aus den Versuchen wurde deutlich, daß es nicht ausreicht, das FG-Rohr mit den Schiebern mit diesem Kleber zu verkleben. Um weitere Verschiebungen innerhalb des Projektzeitraumes zu vermeiden wurde in den folgenden Versuchen auf eine Klebverbindung verzichtet. In beide Schieber wurde ein Gewinde M3 geschnitten. Das Tellerfederpaket wurde neu ausgelegt und die Vorspannung vergrößert. Dadurch wurde sichergestellt, daß die Vorspannung des Tellerfederpakets ausreicht, um das FG-Rohr im martensitischen Zustand wieder auf die ursprüngliche Länge zurückzuschieben. Der Kern des Prototypen wurde nun in einer Vorrichtung zusammen montiert. Die Vorrichtung bestand aus einer Hülse, dessen Innendurchmesser dem Außendurchmesser des Kerns entsprach. Das Heizelement wurde im FG-Rohr plaziert und an einer Seite mit dem Schieber mit Hilfe der Madenschrauben verbunden. Das Teil wurde mit den Tellerfedern und dem Schieber in die Hülse eingelegt. Im Schraubstock konnten die Teile auf Maß eingespannt und der zweite Schieber verschraubt werden.



Die Vorspannkraft bzw. die Länge des Federpaketes wurde in Kap. 3.5. ermittelt. Die Klemmkraft der Madenschrauben reichte aus, um die Schieber an den Rohrenden trotz Vorspannung von 490 N zu fixieren.

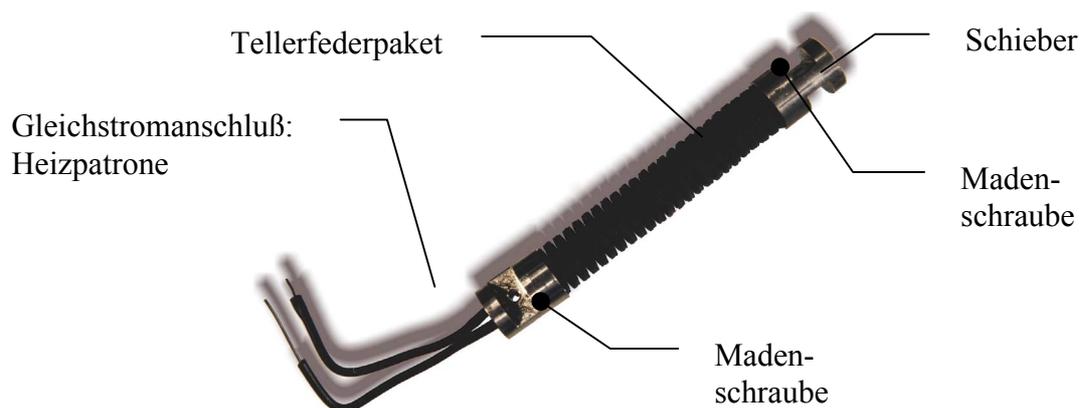


Abb. 3.8.8: Kern des Prototyps

Der Versuch wurde unter den gleichen Bedingungen durchgeführt, die Temperatur der Klimakammer betrug 37°C. Es wurden fünf Versuche gefahren. Die Aufheiztemperatur an der Oberfläche des Federpakets wurde dabei schrittweise von 60°C auf 53°C gesenkt.

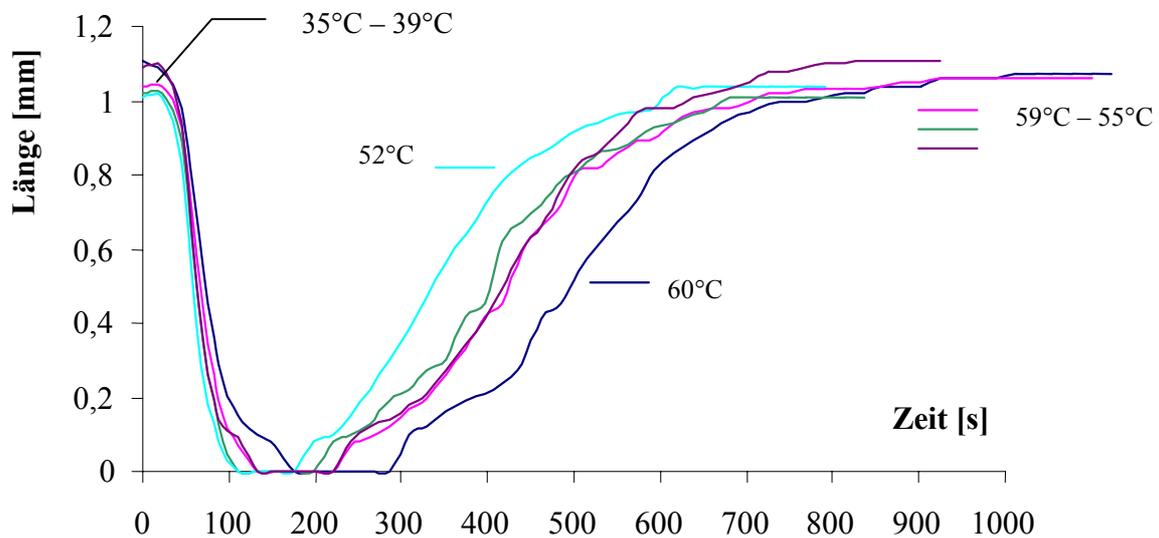


Abb. 3.8.9: Kern in der Klimakammer

Der Kern bewegte sich um ca. 1,1 mm. Der Gesamtweg der Dehnung blieb mit ca. 1 mm gleich. Das Absenken der Temperatur wirkte sich auf die Abkühlgeschwindigkeit und auf den Wegeffekt aus. Beim Vergleich der 55°C-Kurve mit der 60°C-Kurve erfolgte schon eine deutliche Verkürzung bei der Abkühlung. Bei der 52°C-Kurve verkürzte sich der gesamte Vorgang im Gegensatz zur 60°C-Kurve um ca. 2,5 Minuten. Allerdings ist der Wegeffekt mit knapp 1 mm der kürzeste.

In den nächsten Versuchen wurde der Kern wieder mit den montierten Sperrern in das Rohrsegment eingelegt. Der Wegeffekt von 1,1 mm sollte ausreichend sein, daß der Kern im Rohrsegment klettert. Allerdings funktionierte dies zunächst nicht. Es fanden verschiedene Oberflächenbehandlungen des Sägezahnprofils sowie Verlängerungen des FG-Rohres statt. Um den Wegeffekt um 0,1 mm zu verlängern, mußte das FG-Rohr zusätzlich zu seiner ursprüngliche Länge mit 4,7 mm pro zusätzlichen 0,1 mm länger dimensioniert werden. Die Länge des FG-Rohres wurde schrittweise um je 4,7 mm erhöht (was auch jedesmal eine neue Dimensionierung des Tellerfederpakets mit sich führte), bis die Kraftentwicklung im Aktuatorelement groß genug war, um den 1 mm langen Weg zur nächsten Raste im Sägezahnprofil zu erreichen.

Der gewünschte Erfolg stellte sich allerdings erst mit dem nachstehenden FG-Rohr ein: freie Weglänge = 80,47 mm, mit Berücksichtigung der Einspannung = 90,47 mm, Durchmesser = 5 mm, Wandstärke = 0,75 mm, $\sigma_{zul} = 250 \text{ N/mm}^2$, Federkraft ca. 500 N:

Die Versuche nur mit dem Kern in der Klimakammer erbrachten folgende Ergebnisse.

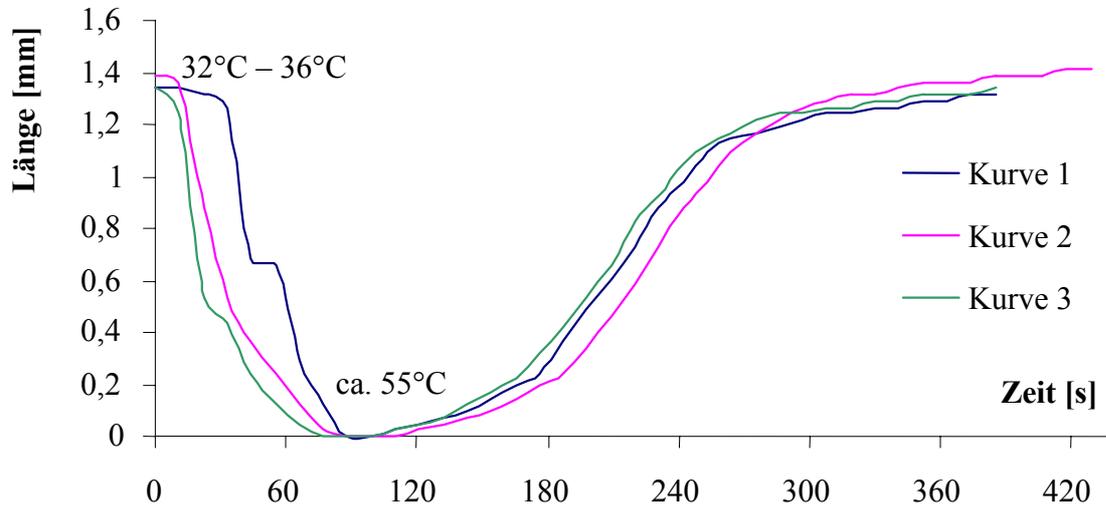


Abb.3.8.10: Kern in der Klimakammer

Das FG-Rohr wurde in der Klimakammer getestet. Nach ca. 100 Sekunden wurde der Strom für das Heizelement (55°C) abgestellt. Der Wegeffekt betrug in allen drei Versuchen fast 1,4 mm.

Danach wurde der Kern mit den montierten Schiebern in zum Prototyp zusammen gesetzt und in der Klimakammer getestet.

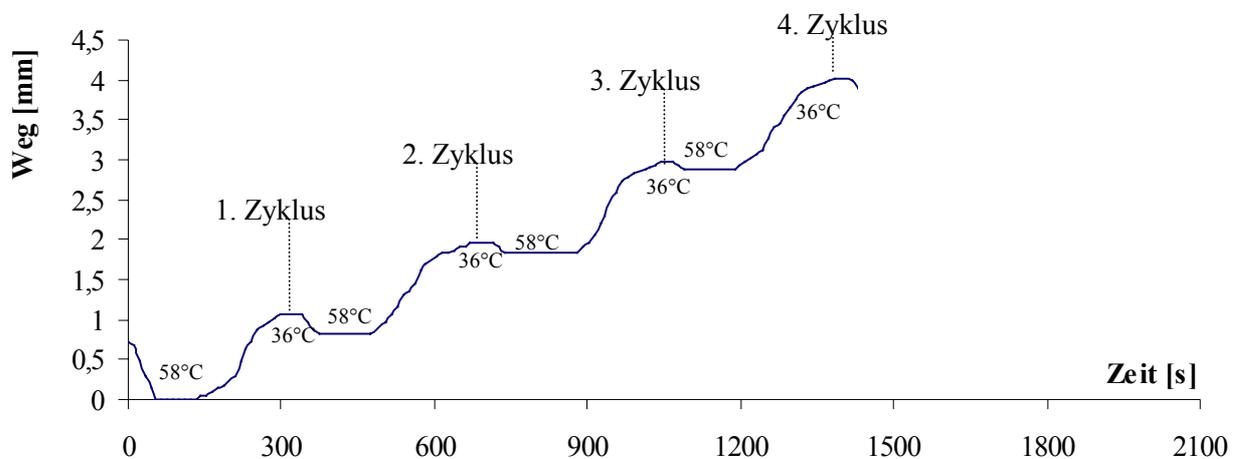


Abb. 3.8.11: Prototyp in der Klimakammer

1. Zyklus: Der Kern wurde auf 36°C vorgewärmt. Er zog sich um 0,7 mm zusammen,

dehnte sich nach Abschalten des Stroms bei 58°C um fast 1,2 mm aus und erreichte damit die nächste Raste.

- 2. Zyklus:** Nachdem der Kern auf 36°C abgekühlt, wurde der nächste Zyklus gestartet. Der Schieber an dem der Meßfühler sitzt zog sich zunächst einige Zehntel Millimeter zurück bis er einrastete. Der Rest der Kontraktion erfuhr der andere Schieber, der (nicht meßbar) in die nächste Raste nachgezogen wurde. Nach Abschalten des Stroms drückte die Gegenfeder dann den oberen Schieber um 1,3 mm bis über die nächste Raste (Gleiten), während nun der untere Schieber einrastete (Sperrern). Dadurch erfolgt der lineare Vorschub um effektiv 1 mm.
- 3. Zyklus:** Es geschah das selbe wie im 2. Zyklus. Der Kern wanderte einen weiteren Millimeter.
- 4. Zyklus:** Der Vorschubzyklus wiederholte sich: Der Kern kletterte weitere 1 mm.

Der Kern ist in dem Rohrsegment nach dem Anfangszyklus (1. Zyklus) effektiv 3 mm geklettert. **Der Marknagelprototyp funktioniert!**

3.9 Abschlußbemerkung zu den durchgeführten und nicht durchgeführten Arbeiten, mit Ausblick

Aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in dem Projekt verschieden Lösungsvarianten bzgl. des Sperrmechanismus theoretisch und praktisch untersucht. Nachdem die Fell- und Blechversuche keine befriedigenden Ergebnisse brachten, wurde aus Zeitgründen ein Sperrmechanismus mit Sägezahnprofil und entsprechenden Sperrern realisiert. Dieser mußte im Projektzeitraum durch verschiedenen Oberflächen- und Wärmebehandlungsverfahren des öfteren optimiert werden, um seine Funktion zu gewährleisten. Für zukünftige Arbeiten sollte daher das Marknagel-Rohr auf kompletter Länge über ein entsprechend geformtes Walzwerkzeug hergestellt werden.

Die Möglichkeit der Richtungsumkehr des Sperrmechanismus bzw. des Marknagelantriebes konnte im Projektzeitraum nicht mehr verwirklicht werden. Dieses Teilziel wurde zwar in der Antragstellung formuliert, ist für das Funktionieren des FG-Marknagels jedoch nicht unbedingt erforderlich. Es hätte lediglich nach dem Ausbau bei erfolgter Operation mit relativ kurzer Knochenverlängerung entsprechende Vorteile

gehabt. Mit der in diesem Projekt realisierten Lösungsvariante ist dann das "Durchfahren" des Kerns über die komplette Rohrlänge erforderlich, bevor das System - nach entsprechender Sterilisation - wieder eingesetzt werden könnte.

Bei der Auswahl eines FG-Aktuatorelementes hat das FG-Rohr gegenüber den FG-Drähten die besten Ergebnisse bzgl. Umwandlungstemperaturen, Kraft- und Stellweg ergeben. Außerdem läßt sich durch das FG-Rohr die vorteilhafte Erwärmung von in-nen realisieren. Der Dilatometerversuch hat gezeigt, daß sich das FG-Rohr beim Zusammenziehen im Durchmesser um 0,1 mm vergrößert. Obwohl dies laut Herstellerangabe keine Probleme bei einer Klebeverbindung bereiten sollte, war es nicht möglich, das Rohr sicher in den Schiebern zu befestigen. Aus Zeitgründen erfolgte die Befestigung über Madenschrauben, um die Funktion des Antriebsmechanismus zu testen. In einem späteren Schritt müßte die Klemmverbindung gegen eine platzsparendere Verbindung, z.B. durch Löten, Schweißen oder Kleben mit einem anderen Kleber ersetzt werden, um den Marknagel in seinen Dimensionen zu miniaturisieren.

Bei all den durchgeführten Arbeiten, die untereinander in sehr enger Wechselwirkung standen und daher teilweise fast gleichzeitig, teilweise in zeitlicher Abfolge erfolgten, spielten die Fragen nach der Materialauswahl und den Fertigungsverfahren eine große Rolle. Mit in die Überlegungen flossen z.B. die medizinische Zulassung, die Festigkeit, die Beschaffbarkeit, der Kostenfaktor und die Möglichkeit günstigerer Fertigungsverfahren, besonders bei einer späteren Serienfertigung. Dabei konnte auf das große Know-how zurückgegriffen werden, das teilweise im Werkstoffprüflabor bereits vorhanden war, teilweise über die Mitantragssteller und Kontakte zusätzlich in das Projekt einfließen.

Wie sich außerdem in den Versuchen gezeigt hat, kann das FG-Rohr durch sehr geringe Heizströme in relativ kurzer Zeit auf Umwandlungstemperatur gebracht werden, ohne das daraus Komplikationen im Sinne einer möglichen Gewebeschädigung zu erwarten wären. Dennoch sollte in weiteren Schritten das FG-Rohr eingeschliffen werden, um die zu erwärmende Masse zu verringern. Da das FG-Rohr weit unter der zulässigen Maximalspannung belastet wird, besteht ein großes Potential, die Heizenergie und die an der Marknageloberfläche resultierenden Temperaturen zu verringern.

Der letztendliche Erfolg eines funktionierenden Prototyps konnte erst mit einem - gegenüber der Berechnung - fast doppelt so langen FG-Rohr erreicht werden. Überraschend an dem Ergebnis war, daß man eigentlich einen Wegeffekt von ca. 1,7 mm erwartet hatte, aber die Dehnung im eingebauten Kern dann nur bei 1,4 mm lag. Dies zeigt, daß der Einfluß der Vorspannung durch das Federpaket sowie die Reibeinflüsse, die beim Gleiten der Sperren im Sägezahnprofil nicht zu unterschätzen ist und letztendlich nur im praktischen "trial and error"-Versuch erprobt werden kann.

Aufgrund der genannten Verschiebungen gegenüber dem Zeitplan des Vorhabens konnten in der Projektlaufzeit die Simulationsrechnungen sowie die Tests an weiteren Prüflingen im umzubauenden Marknagel-Teststand nicht mehr realisiert werden. Auch die Adaption der Energieeinspeisung für den FG-Linearantrieb (Hochfrequenz-Energieeinspeisung) sowie die klinische Erprobung verschiedener FG-Marknagel-Prototypen konnte aus zeitlichen Gründen nicht mehr im Berichtszeitraum erfolgen. Die derzeit laufenden Verhandlungen mit den beiden genannten Medizinfirmen werden zeigen, ob diese nun anstehenden Arbeiten in einem Anschlußprojekt durchgeführt werden.

4 Vorträge, Veröffentlichungen, Veranstaltungen

Innerhalb dieses Forschungsprojektes fanden nachstehende Vorträge und Veranstaltungen statt, bei denen das Marknagelprojekt vorgestellt bzw. Projektpartner gesucht wurden:

- J. Strittmatter: Teilnahme am Forum Medizintechnik in Ulm, 9./10.10.1998
- P. Gumpel, J. Strittmatter, U. Berg: Projektpräsentation auf der Messe "Wirtschaft trifft Wissenschaft", 8.-9.12.1998, Stuttgart.
- J. Strittmatter: Innovationsbörse Neue Materialien - Verfahren und Produkte, Haus der Wirtschaft in Stuttgart, 8.7.1999
- P. Gumpel, J. Strittmatter: Materialica-Messe in München, 28.09.1999
- J. Strittmatter: Intertech-Messe in Dornbirn, Österreich, 4.6.11.1999
- J. Strittmatter: Vortrag "Einsatz von FGL", Bodensee-Interessengemeinschaft Werkstofftechnik, Konstanz, 25.11.1999
- J. Strittmatter: MEDIZIN-Messe in Stuttgart, 11.02.2000

Neben zahlreichen Studienarbeiten wurden auch zwei Diplomarbeiten durchgeführt:

- Martin B. Köhnke: Formgedächtnis-Marknagel, Diplomarbeit an der Fachhochschule Konstanz, 2000
- Dmitri Boussourkin: Formgedächtnismetalle - Grundlagen und Anwendungen, Diplomarbeit an der Fachhochschule Konstanz, 2000

Als bisher einzige Veröffentlichung in diesem Projekt ist das Patent zu nennen:

- Europäische Patentanmeldung 98 120 882.0-2315 "FGL-Linear" bzw. EP 0 919 717 A1 "Antriebsvorrichtung mit einem aus einer Formgedächtnislegierung geformten Element sowie deren Verwendung", Anmeldetag 04.11.1998
- Fristgerechte Stellung des Prüfantrages für nachfolgende Länder: Österreich (AT), Belgien (BE), Schweiz und Liechtenstein (CH+LI), Deutschland (DE), Frankreich (FR), Großbritannien (GB) und Niederlande (NL)

Außerdem erfolgt die Projektvorstellung auf der Messe MEDICA 2000 in Düsseldorf, 22.-25. November 2000, bei der - wenn bis dahin nicht schon erfolgt - ein geeigneter Projektpartner für ein Anschlußprojekt gesucht werden kann.

5 Mittelverwendung

Für die Stelle einer wissenschaftlichen Hilfskraft mit Abschlußprüfung konnte Herr Dipl.-Ing.(FH) Joachim Strittmatter gewonnen werden, der die ihm gestellten Aufgaben wie bisher mit großem Engagement und Kreativität erledigte.

Aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche verzögerten sich in der Anfangsphase die praktischen Arbeiten und es traten vor allem in der zweiten Projektzeithälfte größere Ausgaben auf, die zum einen für die im Projektantrag genannten Material- und Fertigungsausgaben anfielen (die meisten der fertigungstechnisch komplexen Konstruktionen mußten von Dritten übernommen werden), aber auch zur Finanzierung der zahlreich eingesetzten Studentischen Hilfskräfte.

Ebenfalls aufgrund der im Bericht dargestellten Verschiebungen im Zeitplan konnten einige der letzteren Teilziele nicht mehr verwirklicht werden. Dadurch entfielen z.B. die Kosten für den vorgesehenen Werkvertrag zur Durchführung von Simulationsrechnungen sowie die Investition in die Simulationssoftware, die gemäß dem stattgegebenen Änderungsantrag für eine zweimonatige Projektverlängerung genutzt werden konnte.

Außerdem entfielen die Kosten für den beantragten Werkvertrag zur Adaption der Energieeinkopplung. Dieser nicht ausgegebene Betrag wurde nach dem Projektende zurück überwiesen (vgl. Verwendungsnachweis).

Ebenfalls nicht zur Realisierung kamen die von der Firma Osypka zugesagten Arbeiten an Biomaterialien im Wert von ca. 5 000 DM. Das Angebot der Firma besteht aber nach wie vor. Sobald in einem Anschlußprojekt diese Arbeiten erforderlich werden, will die Firma Ihre Zusage einlösen.

Insgesamt wurde mit den Ausgaben wirtschaftlich und sparsam verfahren.

6 Zusammenfassung

Knochendefekte können z.B. durch Tumor oder Unfall entstehen. Während der chirurgischen Behandlung dient der Marknagel zur Stabilisierung und ermöglicht bei geeigneter Gestaltung die körpereigene Neubildung von Knochenmaterial.

Gegenstand dieses Projektes war die Entwicklung eines Linearantriebes mittels Formgedächtnislegierungen (FGL) zur Knochenverlängerung und Defektüberbrückung entsprechend der Methode nach Betz und Baumgart. Nach der Knochendurchtrennung wird der Marknagel in die Markhöhle des Röhrenknochens eingeführt und an den beiden Knochenfragmenten fixiert. Durch Hochfrequenz-Energieeinkopplung erfolgt die Erwärmung des Formgedächtniselementes und dessen Dilatation bewirkt anschließend die Knochenverlängerung. Die Operationswunde wird nach der Implantation wieder vollständig geschlossen, so daß das Infektionsrisiko während der Applikation minimal bleibt. Beim Auseinanderwandern der Knochenfragmente - ca. 1 mm pro Tag - wird Knochenmaterial nachgebildet, welches später die hervorragenden mechanischen Eigenschaften des Röhrenknochens besitzt.

Derzeit im klinischen Einsatz befindliche Marknägel mit rotatorischen Systemen besitzen gegenüber allen bisherigen Lösungen entscheidende Vorteile; jedoch sind ihnen sowohl hinsichtlich der Miniaturisierung und Anpassung an die anatomische Gestalt des Röhrenknochens als auch aufgrund der hohen Ausfallwahrscheinlichkeit empfindliche Grenzen gesetzt.

Das sehr einfache mechanische Prinzip und die Kompaktheit des Formgedächtnis-(FG)-Marknagels ist daher besonders vorteilhaft für Anwendungen am Unterschenkel sowie an der oberen Extremität und hat den zusätzlichen Vorteil der Kostenersparnis und der erhöhten Betriebssicherheit.

Das Funktionsprinzip eines Linearantriebes mittels FGL wurde durch eine Patentanmeldung geschützt. Innerhalb dieses Forschungsprojektes konnten die wesentlichen Ziele erreicht und größtenteils auch technisch ausgeführt werden. Das Funktionsprinzip konnte durch einen Prototyp demonstriert werden.

Die daran anschließende Optimierung unter der Zielsetzung eines "modernen Industriedesigns" sowie die Realisierung der Energieeinspeisung über das Verfahren der Hochfrequenz-Energieeinkoppelung konnte im Förderzeitraum nicht mehr ausgeführt werden.

Es laufen jedoch seit Jahresanfang intensive Verhandlungen mit potentiellen Industriepartnern (Mathys Medizinaltechnik AG, Bettlach, Schweiz, und Stryker Osteo GmbH, Mühlheim, Deutschland), welche diese jetzt anstehenden Arbeiten im eigenen Hause (nach entsprechender Lizenznahme) oder zusammen mit der Hochschule in einem Kooperationsprojekt durchführen wollen.

In Kurzform läßt sich der Stand der Entwicklungsarbeiten nach Abschluß des Projektes wie folgt zusammenfassen:

Stand des Projektes:

Die Problemfelder wurden bearbeitet und größtenteils gelöst

Funktionsfähige Teilkomponenten liegen vor

- Linearantrieb mit Antriebseinheit "à la Raupenmechanismus"
- Sperrmechanismus für Belastung bis 1000 N (ca. 100 kg)
- Geeignetes FG-Element im Arbeitsbereich bis mindestens 700 N (ca. 70 kg), getestet bis 1000 N (ca. 100 kg)

Erster Prototyp mit Direktanschluß an Netzgerät wurde gefertigt

Patentsituation:

- Europäische Patentanmeldung 98 120 882.0-2315 "FGL-Linear" bzw. EP 0 919 717 A1 "Antriebsvorrichtung mit einem aus einer Formgedächtnislegierung geformten Element sowie deren Verwendung", Anmeldetag 04.11.1998
- Fristgerechte Stellung des Prüfantrages für nachfolgende Länder: Österreich (AT), Belgien (BE), Schweiz und Liechtenstein (CH+LI), Deutschland (DE), Frankreich (FR), Großbritannien (GB) und Niederlande (NL)

Weitere Vorgehensweise:

- Suche nach einem industriellen Partner zur Endentwicklung mit medizinischer Erprobung und anschließendem Transfer in ein kommerzielles Produkt

7 Literaturverzeichnis

- [1] Betz A.: Der vollimplantierbare aktive Marknagel. Buchbeitrag in: Kallusdistraktion, Hrsg. Rüter A., Kohn D., Corell J., Brutscher R., Urban und Schwarzenberg Verlag, 1997
- [2] Förderprogramm des Landes Baden-Württemberg "Innovative Projekte". Thema: Energieautonome Grundwasserförderung durch Einsatz von Formgedächtnislegierungen. Laufzeit 3/1995 bis 2/1997
- [3] Rüter, Kohn, Corell, Brutscher: Kallusdistraktion, Urban&Schwarzenberg, 1998
- [4] Roche Lexikon, Verlag Urban&Fischer, 4. Auflage, 1999
- [5] <http://www.chirurgie.medizin.uni-ulm.de>
- [6] TAM - Teleskopaktuator-Marknagel: FH-Konstanz, Institut für Angewandte Forschung, Faltblatt zur Hannovermesse 1997
- [7] Stöckel D., Hornbogen E., Ritter F., Tauzenberger P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Ehningen bei Böblingen. expert verlag, 1988.
- [8] Gumpel P., Hütterer H., Kühn H., Strittmatter J.: Antriebsvorrichtung mit einem aus einer Formgedächtnislegierung geformten Element sowie deren Verwendung. Deutsche Patentschrift vom 27.11.1997: DE 197 52 560.1
- [9] Grammont P., Giroux E.: Vorrichtung zur Verlängerung langer Knochen wie dem Oberschenkel. Französische Patentschrift vom 10.05.1996: FR 2 726 460
- [10] Campbell M., Bechtold J.E., Erdman A. G.: Implantierbarer Beinverlängerungsnagel angetrieben durch eine Formgedächtnislegierung. Amerikanisches Patent vom 16.05.1995: US 5,415,660
- [11] Kirsten M.: Untersuchungen zur Ansteuerung von Formgedächtnisantrieben in der Handhabungstechnik, Nr. 15 - 1994. Braunschweiger Schriften zu Mechanik
- [12] Advanced Materials and Technologies (A.M.T.), Living metals part 1, Firmenschrift. A.M.T.n.v., Industrieweg 43, B3540 Herk-de-Stad, Belgien