Institut für Angewandte Forschung



Energieautonome Grundwasserförderung mit Formgedächtnislegierungen

Förderkennziffer: 17.075.99

Schlussbericht

Projektleiter:	Prof. DrIng. Paul Gümpel
Wiss. Mitarbeiter:	DiplIng. (FH) Ulrich Berg DiplIng. (FH) Joachim Strittmatter
Förderzeitraum:	01.09.1999 bis 30.04.2001

Schlußbericht: Energieautonome Bewässerung durch FGL Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einführung	Seite	4
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	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	6
2 Stand der Forschung	Seite	7
2.1 Formgedächtnislegierungen (FGL)	Seite	7
2.1.1 Entdeckung des Effekts	Seite	7
2.1.2 Erläuterung des Effekts	Seite	8
2.1.3 Technische Anwendungen	Seite	15
2.2 Wärmekraftmaschinen mit FGL im Überblick	Seite	19
2.2.1 Rotierende Maschine nach Banks	Seite	19
2.2.2 Das Thermobile nach F. Wang	Seite	20
2.2.3 Der Motor nach A.D. Johnson	Seite	21
2.2.4 Der Motor nach J.S. Cory	Seite	22
2.2.5 Der Motor nach W.K. Smith	Seite	23
2.2.6 Der Motor nach Ginell	Seite	23
2.2.7 Der Motor der Firma Krupp	Seite	24
2.2.8 Abschlußbetrachtung	Seite	25
2.3 Die bisherige Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine mit FGL	Seite	26
2.3.1 Aufbau der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine	Seite	26
2.3.2 Funktionsweise der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine	Seite	27
2.3.3 Einsatzgebiete der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine	Seite	31
2.4 Alternative Bewässerungssysteme	Seite	32
3 Durchgeführte Arbeiten / Ergebnisse	Seite	34
3.1 Umbau der bisherigen Wärmekraftmaschine	Seite	34
3.1.1 Umbaumaßnahmen	Seite	34
3.1.2 Testläufe und Ergebnisse	Seite	35
3.2 "Neubau P 1": Umbau der Wärmekraftmaschine; Sprühdüsenbetrieb		
3.2.1 Umbaumaßnahmen	Seite	36
3.2.2 Testläufe und Ergebnisse	Seite	44

Schlußbericht: Energieautonome Bewässerung durch FGL

Prof. Dr.-Ing. Paul Gümpel

3.	.3 "Neubau P2": Umbau der Wärmekraftmaschine; Tauchbadbetrieb	Seite	49
	3.3.1 Umbaumaßnahmen	Seite	50
	3.3.2 Testläufe und Ergebnisse	Seite	54
3	4 Trainieren der eingesetzten Drähte	Seite	60
3.	5 Arbeiten zur Verwendung von Drahtbündel	Seite	63
3.	.6 Meßwerterfassung / Sensorik	Seite	66
3.	7 Metallographische Untersuchung der erfolgten Drahtbrüche	Seite	68
	3.7.1 Drahtbrüche am Wärmekraftmaschinen-Prüfstand	Seite	68
	3.7.2 Drahtbrüche am Wärmekraftmaschinen-Modell	Seite	78
3	8 Berechnung wichtiger Bauteile über die Finite Elemente Methode	Seite	91
3.	9. Konstruktion verschiedener Demonstrationsmodelle	Seite	97
3	10 Demonstrationsfilm: Betrieb der Wärmekraftmaschine	Seite	98
3.	3.11 Status Quo: Prüfstand der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine		
3.	12 Zusammenarbeit mit Spanien	Seite	102
4	Vorträge, Veröffentlichungen, Veranstaltungen	Seite	103
5	Mittelverwendung	Seite	105
6	Zusammenfassung	Seite	106
7	Literaturverzeichnis	Seite	108

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

In Ländern mit aridem Klima, z.B. in Dürregebieten, und nicht flächendeckender Energieversorgung stellt der Antrieb von Pumpen zur landwirtschaftlichen Bewässerung und zur Trinkwasserversorgung ein erhebliches Problem dar. Bisherige Bewässerungsanlagen arbeiten größtenteils mit Dieselgeneratoren, welche die Umwelt mit Emissionen belasten und zur Verstärkung des weltweiten Treibhauseffektes führen, oder über photovoltaisch betriebene Anlagen. Letztere sind in der Anschaffung sehr kostenintensiv und aufgrund ihrer Funktionsweise gegenüber Störeinwirkungen sehr anfällig. Gerade in den sogenannten Dritte-Welt-Ländern, in denen in der Regel kein geschultes Fachpersonal für Wartungsarbeiten bereitsteht, ist der Ausfall der Anlagen schon kurz nach der Inbetriebnahme eine häufig berichtete Tatsache.

Im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Konstanz wurde ein System zur energieautonomen Wasserförderung entwickelt, bei der zum Antrieb der Pumpen Formgedächtnislegierungen (FGL) verwendet werden [1, 2]. Bei Sonnenschein arbeitet diese geplante Bewässerungsanlage völlig energieautonom: Die Wärmeenergie der Sonne wird durch die FG-Drähte direkt in mechanische Energie umgewandelt und betreibt die Bewässerungspumpen. Die Vorteile dieses einfachen Prinzips liegen in der Bedienerfreundlichkeit, Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der Anlage wie auch in der Flexibilität bezüglich weiterer Anwendungsfälle der modular einsetzbaren Wärmekraftmaschine in Industrie und Klimatechnik. Der angestrebte Einsatz von derartigen Anlagen würde zu einer entsprechenden Entlastung der immer stärker mit Emissionen belasteten Umwelt führen. Das überaus große Interesse an diesen Forschungsarbeiten sowie an einem Transfer der Bewässerungsanlage in die Industrie zeigte sich auch schon während früherer Teilnahmen an Messen, Tagungen und Konferenzen. Die Konkurrenzfähigkeit dieser sowohl neuartigen als auch sehr einfachen Systemlösung wurde, ausgehend von den damals zur Verfügung stehenden Ergebnissen, in einer bereits durchgeführten Studie nachgewiesen [2].

Im einzelnen sollten in diesem Projekt neben den anstehenden wissenschaftlichen Untersuchungen zwei Versuchsanlagen konstruiert und gefertigt werden. Dadurch sollten die nötigen Erkenntnisse gewonnen werden, um diese innovative Erfindung zu einem

späteren Zeitpunkt zu einer transferfähigen Anlage fertig zu entwickeln. Diese beiden Prototypen bauen auf den bisherigen Arbeiten in diesem Projekt auf, die mit Erfolg gezeigt haben, daß das entwickelte Prinzip sehr gut funktioniert. Ziel dieses Projektes war es also, diese neuartige, innovative Wärmekraftmaschine weiterzuentwickeln, zu optimieren und die nötigen Erkenntnisse zu gewinnen, um diese Anlage nach Abschluß dieses aFuE-Projektes in Zusammenarbeit mit der beteiligten oder neu zu gründenden Firmen zur Serienreife zu bringen.

Ein damit eng verbundenes, weiteres Ziel lag in der Entwicklung einer modular einsetzbaren Wärmekraftmaschine, die dann auch für die anderen nachfolgend genannten Anwendungsgebiete verwendet werden kann:

- Meerwasserentsalzung
- Klimatisierungstechnik
- Antrieb der Pumpen bei geothermischer Wärmeeinbringung
- Energierückgewinnung aus Wärmequellen (z.B. Geysire in Island)
- Energierückgewinnung in industriellen Kühlwasserkreisläufen
- Energierückgewinnung in der Verfahrenstechnik
- Restwärmenutzung bei konventioneller Energieerzeugung.

1.2 Voraussetzungen im Werkstoffprüflabor (Ausstattung, Know-how)

Durch die bisherigen Arbeiten in den Forschungsprojekten "Energieautonome Grundwasserförderung durch Einsatz von FGL", "Formgedächtnis-Marknagel zur Knochenverlängerung" und "Hydraulikventil mit Formgedächtnis-Aktuator" konnte am Institut für Angewandte Forschung, Schwerpunkt "Werkstoffe und Umwelt"," sehr weitreichendes Know-how bezüglich dem Verhalten von FGL wie auch deren Anwendungen gewonnen werden.

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 Forschungsprojekt erforderlichen Tests mit mäßigem Aufwand umgebaut werden. Darüber hinaus ist das Werkstoffkundelabor der FH Konstanz auch 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 Projektes orientierte sich am Zeit- und Finanzierungsplan des Antrages. Aufgrund der Tatsache, daß der zuerst eingestellte wissenschaftliche Mitarbeiter kurz nach der Hälfte des Projektlaufzeit in die Industrie wechselte und zur Weiterführung des Forschungsprojektes ein Nachfolger eingestellt werden mußte, kam es zum einen zu einer Überschneidung in der Beschäftigung und einer Verzögerung bei der Weiterführung der Arbeiten. Die daraus erfolgte Projektverlängerung um zwei Monate gegenüber der ursprünglichen Laufzeit war kostenneutral, da einige der Konstruktionen kostengünstig in den hochschuleigenen Werkstätten ausgeführt wurden, während die meisten der anderen Fertigungsarbeiten und Anschaffungen von der Firma MemoTec AG übernommen wurden.

Aufgrund der Ergebnisse des ersten Prototyps P 1 ergab sich eine geänderte Zielrichtung beim daran anschließenden Neubau des Prototyps P 2. Dadurch konnten die geplanten Feldversuche mit dem Prototyp P 2 nicht mehr im Berichtszeitraum zur Ausführung kommen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Vorhabens wurde vor allem mit der Firma MemoTec AG zusammengearbeitet, die sich sowohl in finanzieller Weise als auch durch Ihre Mitarbeit in besonderem Maße in das Projekt einbrachten. Als Drahtlieferant für die verwendeten FGL wurde vorwiegend mit der Firma Memory-Metalle GmbH in Weil am Rhein zusammengearbeitet.

Bezüglich der wissenschaftlichen Untersuchungen im metallographischen Bereich der FGL wurde die spanische Partnerhochschule in Sevilla, Spanien, mit in das Projekt involviert. Über diesen erfolgte auch der Zugang zu dem spanischen Testgelände "Plataforma Solar" in Almeria, das für die zukünftig geplanten Feldversuche der Wärmekraftmaschine gewonnen werden konnte.

2 Stand der Forschung

2.2 Formgedächtnislegierungen

2.2.1 Entdeckung des FG -Effekts

Bekannt ist der FG-Effekt 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 FG-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 Zweiwegeffekt, sind auch für die Anwendung in der Wärmekraftmaschine interessant. Die schlechte Zerspanbarkeit ist ein Nachteil.

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte [g/cm ³]	6,46,5	7,88,0	7,17,2
Zugfestigkeit [N/mm ²]	8001000	400700	700800
Zulässige Spannung σ _{zul} [N/mm²]	250	75	100
Bruchdehnung [%]	4050	1015	56
Maximale A _S -Temp. [°C]	120	120	170
Überhitzbarkeit [°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 %

Tabelle 2.1.1.1: Die Eigenschaften der wichtigsten Formgedächtnislegierungen [3]

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 Zwillingsstruktur. 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 verzwillingte 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 FG-Effekts:

- 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.





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 [3]

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.



Abb. 2.2.2.1.3: Schematische Darstellung des Gitters [3]

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 [2].

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.

Abb. 2.2.2.2.1 Zweiwegeffekt

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 Ti₃Ni₄-Ausscheidungsteilchen entstehen. (All-Round-Effekt) Auch beim Zweiwegeffekt 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 [3]

Der All-Round-Effekt wird durch die Ausscheidung von Ti₃Ni₄-Teilchen bei Legierungen mit mehr als 50,5 at.% Nickel verursacht und ist im Prinzip ein sehr stark ausgeprägter Zweiwegeffekt.



Abb. 2.2.2.3.1 All-Round-Effekt [3]

^{2.2.2.3} All-Round-Effekt

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 eingespannten Zustand unterhalb von 600° Grad einer Alterung unterzogen. Dabei entsteht die Ausscheidung von Ti₃Ni₄-Teilchen.

Abb. 2.2.2.3.1.c abgekühlt: Die Ti₃Ni₄-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 ----> R-Phase ---> 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 Umwandlungstemperaturen 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 [3]

- 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 Spannungs-induzierten 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 unab-

hängig. 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.





erwärmt

Abb. 2.2.3.1.1: Freies Formgedächtnis

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 (detaillierte Darstellung siehe Kapitel 2.2.2).



Abb. 2.2.3.1.2: Thermobile [3]

2.2.3.2 Unterdrücktes 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 (Um-wandlungstemperaturen 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 Temperaturänderung 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.



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 (detaillierte Darstellung siehe Kapitel 2.2.5).

Es ist auch möglich die Wärmeenergie direkt in eine Rotationsbewegung umzusetzen. An der FH-Konstanz wurde eine derartige Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine entwickelt, die auch ständig weiterentwickelt wird (Gegenstand dieses Projektberichtes). Die nachstehende Abbildung zeigt ein kleineres Modell einer Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine, wie sie vor allem zu Demonstrationszwecken, aber auch für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet wird. 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 im FG-Draht über die Tangentialkomponente und den Hebelarm in eine Rotation der Schrägscheibe 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.

17



Abb. 2.2.3.3.2 Kleines Modell der 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

2.2 Wärmekraftmaschinen mit FGL im Überblick

Mit der Entdeckung der FGL und deren Erforschung in der Mitte dieses Jahrhunderts, wurde in den 70er Jahren eine neue Form von Wärmekraftmaschine entwickelt. Ausschlaggebend dafür war nicht zuletzt die damalige Ölkrise, die die Suche nach alternativen Energiequellen anregte. Man erkannte, daß ein riesiges Potential an niederer thermischer Energie vorhanden war, wie z.B. industrielle Abwärme, geothermische Wärme und vor allem die solare Strahlung. Jedoch gab es bis zu dieser Zeit keine Maschine, die diese Form der Energie wirtschaftlich in mechanische Arbeit umwandeln konnte. FGL bieten die Möglichkeit, diese niedere thermische Energie in mechanische Energie umzuwandeln.

2.2.1 Rotierende Maschine nach Banks

Die erste Wärmekraftmaschine dieser Art baute Ridgway Banks 1973 (Abb. 2.2.2.1). Sein Motor besteht aus 20 NiTi-Stäben, die an Speichen befestigt sind. Die Speichen ihrerseits sind außen an einem beweglichen Ring befestigt und innen an einer exzentrisch gelagerten Nabe. Die Stäbe werden abwechselnd durch ein kaltes und ein warmes Bad gezogen. Die Hochtemperaturform des NiTi-Stabes ist gerade. In der kalten Phase werden die NiTi-Stäbe von der Maschine zu einem "U" gebogen. Werden die Stäbe wiederum erwärmt, sind sie bestrebt ihre Hochtemperaturform anzunehmen, wobei sie eine Kraft auf den äußeren Ring ausüben und diesen in Rotation versetzen.

Bei einer Warmwassertemperatur von 48 °C und einer Kaltwassertemperatur von 25 °C und damit einer Temperaturdifferenz von nur 23 K hatte der Motor eine Drehzahl von 69 U/min und lieferte dabei eine Leistung von 0,23 W.



Abb. 2.2.2.1: Rotierende Maschine nach Banks [4]

2.2.2 Das Thermobile nach F. Wang

Der Physiker Frederick Wang entwickelte ein sehr elegantes, aber doch bestechend einfaches Modell. In der nachfolgenden Abbildung ist das sogenannte "Thermobile" dargestellt. Es besteht aus zwei Rollen, wobei die kleinere Rolle aus Messing besteht und die große aus Kunststoff. Um diese beiden Rollen ist locker ein FG-Draht mit einem Durchmesser von 0,12 mm gespannt.



Abb. 2.2.2.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Thermobiles

Sobald das Messingrad in das warme Wasser eintaucht, wird der Draht erwärmt. Die Wärme bewirkt, daß sich der Draht strecken will, da seine Hochtemperaturform gerade ist. Die daraus entstehende Tangentialkraft versetzt die Rolle in Rotation. Außerhalb des Wassers liegt der Draht im martensitischen Zustand vor, in dem der Draht sich leicht biegen läßt. So übt der Draht auf der großen Rolle keine Tangentialkraft aus. Die nutzbare Arbeit ergibt sich aus der Differenz zwischen der durch das Strecken abgegebenen Arbeit und der zum Biegen des Drahtes benötigten Arbeit.

Bei einer Wassertemperatur von 55 °C und einer Raumtemperatur von 25 °C rotiert die große Rolle mit 700 U/min und hat dabei eine Leistung von 0,08 W. Bei dieser Geschwindigkeit durchläuft der Draht eine Temperaturdifferenz von nur 3 K [5].

Der selbe Wassermotor wurde auch schon mit 100 Nitinol-Schleifen gebaut. Bei gleichen Temperaturverhältnissen wie oben rotiert dieser ebenfalls mit 700 U/min und gibt eine Leistung von 8 W ab [5].

2.2.3 Der Motor nach A.D. Johnson



Abb. 2.2.3.1: Formgedächtnis-Wärmekraftmaschine nach Johnson [6]

Der Motor von Johnson besteht aus einer kontinuierlichen Schleife eines Nitinol-Drahtes oder einer Feder. Die Feder, wie in der Abbildung dargestellt, läuft über eine zweigeteilte Rolle mit unterschiedlichen Durchmessern und zwei Spannräder. Die beiden Spannräder fördern die Feder durch ein kaltes und ein warmes Bad. Da sich die zweigeteilte Rolle mit einer Drehzahl dreht aber unterschiedliche Durchmesser besitzt, wird die Feder über den großen Durchmesser der Rolle gedehnt. Hier befindet sich die Feder im martensitischen Zustand, wo sie sich leicht verformen läßt. Wird die Feder nun erwärmt, zieht sie sich zusammen und übt damit eine Kraft aus. Aus der Differenz zwischen Dehnkraft und Rückstellkraft ergibt sich das Drehmoment, das den Motor in Bewegung versetzt.

Mit einer 17 g schweren Federschleife erreichte Johnson eine Leistung von 2,2 W [6]. Der Wirkungsgrad dieser Maschine war allerdings recht gering, da die Feder Wasser transportierte, wodurch das kalte und warme Bad schnell vermischt wurden. Um dies zu verhindern könnte man statt der Feder eine Drahtschleife verwendet, die weniger Wasser mit sich transportiert.

Die Sharp Corporation entwickelte aus diesem Motorenprinzip eine Wärmekraftmaschine mit einer Leistung von 665 W [7]. Der Wirkungsgrad wurde dabei auf 4-5 % geschätzt.





2.2.4 Der Motor nach J.S. Cory

Das Funktionsprinzip dieser Maschine ähnelt sehr dem des Johnson-Motors. Im Gegensatz zum Johnson-Motor, bei dem die Dehnung des Drahtes durch eine zweigeteilte Rolle mit unterschiedlichen Durchmessern erreicht wird, verwendet Cory jedoch zwei Rollen mit gleichem Durchmesser. Beide Rollen sind, wie in Abb. 2.2.4.1 zu sehen ist, über ein Getriebe miteinander verbunden, wodurch sie mit unterschiedlicher Drehzahl rotieren. Dabei wird durch die schneller drehende Rolle der Draht gelängt. Die beiden Spannrollen fördern, wie schon beim Johnson-Motor, den Draht bzw. die Feder durch das kalte und warme Bad. Zieht sich der Draht im warmen Bad wieder zusammen, wird ein Moment erzeugt, das den Motor zum Laufen bringt.



Abb. 2.2.4.1: Formgedächtnis-Wärmekraftmaschine nach Cory [8]

Betreibt man den Motor mit 70 °C warmem und 5 °C kaltem Wasser, so erreicht er eine Drehzahl von 2500 U/min und liefert dabei eine Leistung von ca. 0,5 W [8].

2.2.5 Der Motor nach W.K. Smith

1978 wurde von Smith ein komplett anderes Motorenprinzip zum Patent angemeldet. Von der Mechanik her gleicht dieser Motor eher einem Verbrennungsmotor. Wie in Abb. 2.2.5.1 zu sehen ist, besteht der Motor aus mehreren Federn, die in Zylindern eingeschlossen sind. Die Federn sind über Schubstangen mit einer Kurbelwelle verbunden. Durchströmt abwechselnd ein warmes und kaltes Fluid die Zylinder, so dehnen sich die Federn aus und ziehen sich wieder zusammen. Diese Hin- und Herbewegung der Federn wird über die Schubstangen auf die Kurbelwelle übertragen, die somit in Rotation versetzt wird. Über ein an der Kurbelwelle befestigtes Schwungrad kann die Arbeit abgegriffen werden.



Abb. 2.2.5.1: Formgedächtnis-Wärmekraftmaschine nach Smith [9]

2.2.6 Der Motor nach Ginell

Dieser Motorentyp wurde 1974 von der McDonnell Douglas Corporation gebaut. Er gleicht sehr der Banks-Maschine, die schon in Kapitel 2.2.1 vorgestellt wurde. Im Gegensatz zu dieser besteht die Maschine nach Ginell aus 6 Nitinol Federn, die zwischen einer Nabe und einem Rad gespannt sind. Die Nabe ist, wie schon bei der Banks-Maschine, exzentrisch an einer starren Kurbel gelagert. Das gesamte Rad taucht bis zur Hälfte in ein warmes Wasserbad ein.

Verfolgt man nun den Zyklus einer Feder, so beginnt er damit, daß die gedehnte Feder in das warme Wasserbad eintaucht. Durch die Erwärmung zieht sie sich zusammen und übt dabei eine Tangentialkraft auf das Rad aus. Diese Kraft setzt das Rad in Bewegung und zieht die Feder durch das Wasserbad. Tritt die Feder wieder aus dem Wasserbad aus, wird sie von der Luft abgekühlt. In diesem Zustand kann die Feder wieder mit geringer Kraft gedehnt werden. Anschließend beginnt der Zyklus von neuem.



Abb. 2.2.6.1: Formgedächtnis-Wärmekraftmaschine nach Ginell [10]

Da der Wärmeübergang zwischen der Feder und der Luft relativ schlecht ist, erreicht die Maschine keine hohen Drehzahlen und Leistungen. Eine Temperaturdifferenz von 3-4 K reicht jedoch schon aus, um die Maschine in Bewegung zu setzen [10].

2.2.7 Der Motor der Firma Krupp

Das Krupp-Forschungsinstitut in Essen hat sich ebenfalls mit der Entwicklung einer Wärmekraftmaschine aus Formgedächtnismetallen befaßt. Das Konzept dieses Motors sieht folgendermaßen aus: Drei Rohre aus NiTi sind auf der einen Seite fest eingespannt und auf der anderen frei beweglich. Werden die Rohre in einem bestimmten Rhythmus mit Wasser erwärmt und wieder abgekühlt, führen sie, auf Grund ihres antrainierten Memory-Effektes, eine Drehbewegung in einem bestimmten Winkelbereich aus. Diese Bewegung wird über Freilauf, Stirnrad und weitere Getriebestufen auf ein Schwungrad übertragen. Die Temperaturzyklen - Erwärmen/Abkühlen - werden von einer Zeit-Programm-Schaltung geregelt und durch Magnetventile gesteuert.





2.2.8 Abschlußbetrachtung

Dieser Überblick zeigt unterschiedliche Varianten von Wärmekraftmaschinen, die den Joule-Effekt von FGL ausnutzen, um thermische Energie in mechanische umzuwandeln. Es konnte jedoch mit keinem Motorenprinzip ein durchschlagender Erfolg erzielt werden und so wurde vorerst die Weiterentwicklung solcher Wärmekraftmaschinen eingestellt. Die meisten der hier beschriebenen Wärmekraftmaschinen existieren lediglich als Demonstrationsmodelle.

In jüngster Zeit verstärken sich jedoch die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet wieder, nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, daß das Verhalten von FGL mittlerweile besser verstanden wird. Somit könnte diese Art der Energieumwandlung eine Alternative für die Zukunft darstellen, zumal niedere thermische Energie in vielen Teilen der Welt verfügbar ist.

Eine dieser neueren Entwicklungen ist Gegenstand dieses Forschungsprojektes. Den Forschungsstand dieser Wärmekraftmaschine zu Beginn der Projektlaufzeit sowie der beispielhafte Einsatz in einem energieautonomen Bewässerungssystem wird im nachfolgenden Kapitel aufgezeigt. Aufgrund der vielfach gemachten Erfahrung, daß Menschen, die erstmals mit diesem Projekt konfrontiert werden, oft Verständnisprobleme bei der Funktionsweise des Schrägscheibenprinzips haben, soll an dieser Stelle ausführlicher auf das Funktionsprinzip des Rotationsantriebes eingegangen werden. 2.3 Die bisherige Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine mit FGL

Anknüpfend an das vorherige Kapitel stellt die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine ein weiteres Motorenprinzip dar, das mittels Formgedächtnismetallen Niedertemperaturwärme in mechanische Energie umwandeln kann.



Abb. 2.3.1: Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine der FH-Konstanz

2.3.1 Aufbau der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine



Abb. 2.3.1.1: Schematischer Aufbau der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine

Die Maschine besteht aus bis zu 120 FG-Drähten, die zwischen zwei zueinander geneigten Scheiben über den Umfang verteilt befestigt sind. Die beiden Scheiben wiederum sind auf zwei separat gelagerten Wellen fixiert, die über ein Kardangelenk miteinander verbunden sind. Zudem ist die Maschine in einen warmen und einen kalten Bereich

aufgeteilt. Auf der warmen Seite werden die Drähte mittels Spritzbalken durch warmes Wasser erwärmt. Analog dazu werden sie auf der kalten Seite gekühlt. Die Spritzbalken sind über den Umfang verteilt in einem fest montierten Spritzschutz angebracht (siehe Abb. 2.3.1). Zu Beginn der Projektlaufzeit wurden NiTi FG-Drähte des chinesischen Herstellers Northwest Hi-Tech Corporation an diesem Versuchsstand verwendet. Sie haben einen Durchmesser von 1,0 mm und eine wirksame Länge von 800 mm.

2.3.2 Funktionsweise der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine

Die FG-Drähte stellen, wie schon bei den zuvor beschriebenen Wärmekraftmaschinen, den Antrieb dar. Sie werden hierbei ausschließlich auf Zug beansprucht. Wie bereits oben erwähnt, werden die Drähte abwechselnd mit warmem und kaltem Wasser bespritzt. Auf der kalten Seite, in der die Drähte im martensitischen Zustand vorliegen und damit "weich" sind, werden sie durch die Schrägstellung der Scheibe unter geringer Spannung gedehnt. Der Winkel der geneigten Scheibe ist dabei so eingestellt, daß die Drähte um bis zu 5% gelängt werden. Auf der warmen Seite ziehen sich die Drähte wieder zusammen, da ihre Hochtemperaturform kurz ist. Dabei üben sie auf die beiden Scheiben eine Kraft aus. Wie dem Zugspannungsverlauf in Abbildung 2.3.1.1 zu entnehmen ist, sind die Rückstellspannungen größer als die Dehnspannungen. Dies bewirkt, daß die Maschine in Rotation versetzt wird.

Folgt man dem Lauf eines Drahtes während einer Umdrehung, so kann man folgendes beobachten: Wir beginnen an der Stelle, wo der Draht in den warmen Bereich eintaucht und bereits seine größte Dehnung erfahren hat. Wird dieser nun erwärmt, zieht er sich zusammen und übt dadurch eine Kraft auf die beiden Scheiben aus. Dies erfolgt solange, bis der Draht seine aufgebrachte Dehnung vollständig zurückgestellt hat. Nach einem Drehwinkel von 180° ist dieser Punkt erreicht. Anschließend gelangt der Draht in den kalten Bereich, wo er wieder abgekühlt wird. Dadurch nimmt er seinen martensitischen und damit weicheren Zustand an. Nun wird der Draht unter Aufbringung einer Kraft wieder gedehnt. Dies erfolgt durch die Schrägstellung der Scheiben zueinander und die größeren Zugkräfte der Drähte im warmen Bereich. Nach einer weiteren Drehung um 180° hat der Draht wieder seinen Ausgangszustand erreicht und der Kreislauf beginnt von neuem. Da die Maschine mit mehreren Drähten bestückt ist, die über dem Umfang gleichmäßig verteilt sind, läuft sie von selbst an und rotiert, solange die Drähte mit warmem und kaltem Wasser bespritzt werden.

Wie sich nun im einzelnen aus der axialen Bewegung der Drähte eine Rotationsbewegung ergibt, wird nachfolgend beschrieben. In Abbildung 2 3.2.1 ist zu erkennen, wie durch Kräftezerlegung aus der Zugkraft F_D des Drahtes eine über den Drehwinkel γ veränderliche Tangentialkraft F_t erzeugt wird. Diese wiederum bewirkt ein Drehmoment, welches die Welle in Rotation versetzt.





Abb. 2.3.2.1: Mechanisches Prinzip der geneigten Welle

- M... Drehmoment
- F_D... Drahtkraft
- F_A... Axialkraft infolge von F_D
- F... Projektion von F_D auf die Scheibe
- Fr... Radialkraft infolge von FD

- Ft... Tangentialkraft infolge von FD
- R... Scheibenradius := Hebelarm
- α ... Neigungswinkel der Scheibe
- γ ... Drehwinkel

Für das Drehmoment gilt:

 $M(\gamma) = F_t R$ = F^*sin(\gamma)^*R = F_D^*sin(\alpha)^*F^*sin(\gamma)^*R

Wie oben schon beschrieben, wird der Draht auf der kalten Seite unter Aufbringung einer Kraft verformt. Auf der warmen Seite dagegen übt er eine Kraft auf die geneigt Scheibe aus, da er die zuvor aufgebrachte Verformung wieder zurückstellen will. Es wird hier nun angenommen, daß die zum Dehnen des Drahtes benötigte Kraft $F_{D.k}$ konstant ist und die Rückstellkraft von einem Maximalwert $F_{Dmax,w}$ linear über den Drehwinkel auf Null abnimmt. Diese Annahmen beruhen auf Last, Deformations-Versuchen an dem in der Maschine eingesetzten Draht. Somit ergibt sich für die Drahtkraft F_D :

28

warme Seite:

$$\mathsf{F}_{\mathsf{D},\mathsf{w}}(\gamma) = \mathsf{F}_{\mathsf{D}\,\mathsf{max},\mathsf{w}} * \frac{1}{2} (1 + \cos \gamma)$$

kalte Seite: F_{D.k}=const.

Das Drehmoment berechnet sich damit wie folgt:

für:
$$\gamma = 0...\pi$$
 $M(\gamma) = F_{Dmax,k} * \frac{1}{2} * (1 + \cos \gamma) * \sin \alpha * \sin \gamma * R$
 $\gamma = \pi...2\pi$ $M(\gamma) = F_{D,k} * \sin \alpha * F * \sin \gamma * R$

In Abbildung 2.3.2.2 ist der Drehmomentenverlauf für einen Draht während einer Drehung von γ =0...360° grafisch aufgezeigt. Dabei wurden für die kalte Seite eine Temperatur von 20°C und für die warme Seite eine Temperatur von 80°C angenommen. Aus eigenen Last-Deformations-Untersuchungen ergeben sich damit für F_D folgende Werte:

 $F_{D,w}(I) = \frac{F_{Dmax,w}}{\Delta I} * I \qquad \text{mit: } I = \frac{\Delta I * \cos \gamma + \Delta I}{2} = \frac{\Delta I}{2} (1 + \cos \gamma)$

F_{D.k}(20°C)=100N F_{Dmax.w}(80°C)=400N

Es ist deutlich zu erkennen, daß es im Winkelbereich von 0° bis 180° zu einer Linksverschiebung der Sinusfunktion kommt. Dies beruht auf der Annahme, daß die Rückstellkraft linear über den Drehwinkel abnimmt. Im Bereich von 180° bis 360° handelt es sich dagegen um eine reine Sinuskurve, da hier eine konstante Kraft für die Verformung angenommen wurde.



Abb. 2.3.2.2: Drehmomentenverlauf für einen Draht

Überlagert man nun, wie in Abb. 2.3.2.3 zu sehen ist, den Drehmomentenverlauf von mehreren Drähten, so ist zu erkennen, wie sich das Drehmoment weg von der Sinuskurve und hin zu einem linearen Verlauf entwickelt. Zudem kann man erkennen, daß die Maschine mindestens mit 4 um 90° versetzten Drähten bestückt sein muß, um ständig ein positives Moment zu erzeugen.



Abb. 2.3.2.3: Drehmomentenverläufe für mehrere Drähte

Aus dem Drehmoment läßt sich die mechanische Arbeit an der geneigten Scheibe wie folgt berechnen:

$$W_{mech} = \int_{0}^{2\pi} M(\gamma) d\gamma$$
$$W_{mech} = W_{mech,warm} + W_{mech,kalt}$$

warme Seite:

$$W_{\text{mech,warm}} = \int_{0}^{\pi} \left(F_{\text{Dmax,w}} * \frac{1}{2} * (1 + \cos \gamma) * \sin \alpha * \sin \gamma * R \right) d\gamma$$
$$W_{\text{mech,warm}} = \frac{F_{\text{Dmax,w}}}{2} * \Delta I$$

kalte Seite:

$$W_{\text{mech,kalt}} = \int_{\pi}^{2\pi} (F_{\text{D,k}} * \sin \alpha * \sin \gamma * R) d\gamma$$
$$W_{\text{mech,kalt}} = -F_{\text{D,k}} * \Delta I$$

daraus folgt

$$W_{\text{mech}} = \left(\frac{1}{2}F_{\text{Dmax,w}} - F_{\text{D,k}}\right) \star \varDelta I$$

Das Ergebnis zeigt, daß die Rückstellkraft F_{Dmax,w} mindestens doppelt so groß sein muß wie die zum Dehnen des Drahtes benötigte Kraft. Erst dann erreicht man, unter der Annahme eines reibungsfreien Zustandes, eine positive Arbeit und damit eine Rotation der Maschine.

Setzt man die oben genannten Werte für F_D in die Gleichung ein, so ergibt sich für die mechanische Arbeit eines Drahtes ein Wert von 4 J. Für die gesamte Anlage mit 120 Drähten bedeutet dies unter Vernachlässigung aller mechanischen Verluste eine abgegebene Arbeit von 480 J.

2.3.3 Einsatzgebiete der Schrägscheiben-Wärmkraftmaschine

Die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine kann beispielsweise als Antrieb von Pumpen in einem System zur energieautonomen Wasserförderung dienen. Die zum Betrieb der Anlage benötigte Wärme soll durch Solarenergie bereitgestellt werden. Geplant ist diese Anlage für den Einsatz in Ländern mit trockenem Klima und nicht flächendeckender Energieversorgung.



Abb. 2.3.1.1: Gesamtschema der Wasserförderanlage

Die Drehbewegung der Wärmekraftmaschine treibt die Pumpen für den Warm- und Kaltwasserkreislauf an. Je nach Art der eingesetzten Pumpen muß zwischen Motor und Pumpe noch ein Getriebe geschaltet werden, um die benötigten Drehzahlen zu erreichen. Ein Teil des geförderten Grundwassers wird im "offenen" Kaltwasserkreislauf zum Kühlen der Wärmekraftmaschine verwendet, bevor es auf die Felder weitergeleitet wird. Im geschlossenen Warmwasserkreislauf wird das Wasser in einem geeigneten Solarkollektor auf die benötigte Temperatur erwärmt. Die Sonne als Energieträger gewährleistet, daß das durch die Drähte leicht abgekühlte Wasser wieder auf die ursprüngliche Temperatur gebracht wird. Damit arbeitet die Anlage bei Sonneneinstrahlung praktische energieautonom.

Zum Start der Anlage dient ein als Wasserrad ausgebildetes Schwungrad, das durch Entladen eines Überlaufbeckens in Rotation versetzt wird. Das Überlaufbecken wird jeweils am Vortag durch das System selbst gefüllt. Als Auslöser für die Entladung dient ein FG-Element, das beim Erreichen einer bestimmten Temperatur des Warmwasserkreislaufes einen entsprechenden Schieber öffnet. Für die gesamte Anlage ist eine sehr einfache mechanische Regelung ausreichend, so daß sie leicht bedient werden kann und somit kein zusätzliches Wartungspersonal erforderlich ist. Selbst für anfallende Reparaturen ist kein Fachwissen notwendig.

2.4 Alternative Bewässerungssysteme

An dieser Stelle sei auf den Abschlußbericht des vorangegangenen Projektes verwiesen [2]. In der dort präsentierten Marktanalyse für das "Fallbeispiel Spanien" wurde die geplante energieautonome Bewässerungsanlage mit FGL mit einer ebenfalls energieautonomen photovoltaisch betriebenen Bewässerungsanlage (PVP-System) sowie einer dieselbetriebenen Anlage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, daß dieselbetriebene Pumpsysteme nach einigen Jahren unwirtschaftlicher sind als die untersuchten energieautonomen Bewässerungssysteme, obwohl der Investitionsbedarf bei dem Diesel-Pumpsystem deutlich niedriger ist. Durch die sehr niedrigen Betriebskosten amortisieren sich energieautonome Pumpsysteme im Laufe der Betriebszeit schon nach wenigen Jahren. Ein Vergleich nur anhand der Investitionskosten ist betriebswirtschaftlich demnach unsinnig.

Da die Betriebskosten des PVP-Systems und des FGL-Pumpsystems annähernd gleich niedrig sind, laufen die Geraden der Gesamtkosten auch nahezu parallel. Ein Kostenvergleich zwischen diesen beiden Pumpsystemen ist also nur aufgrund der Investitionskosten möglich. Hierbei ist zu beachten, daß photovoltaisch betriebene Systeme schon seit längerer Zeit in Betrieb und deren Forschungsstand und technische Reife weit fortgeschritten sind. Im Gegensatz dazu ist die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine mit FGL noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium was aber auch bedeutet, daß deren zukünftige Leistungs- und Effizienzsteigerung sowie eine potentielle Kostenreduzierung des Gesamtsystems mehr Spielraum aufweisen, als die anderen schon ausgereiften Pumpsysteme.

- 3 Durchgeführte Arbeiten / Ergebnisse
 - 3.1 Umbau der bisherigen Wärmekraftmaschine

Zunächst erfolgten einige Umbauten an der bestehenden, unter Kapitel 2.3 beschriebenen, Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine.

3.1.1 Umbaumaßnahmen

Die Wärmekraftmaschine wurde mit der maximal möglichen Drahtzahl bestückt. Dabei wurden die bisherigen Schraubverbindungen mit jeweils 6 Madenschrauben pro Einspannstelle verwendet. Zum Einsatz kamen die letzten neuen (noch nicht eingesetzten) Drähte des bisherigen Drahtherstellers Northwest Hi-Tech Corp. aus Xi'an, Shaanxi in China. Außerdem wurden verschiedene kleinere Umbaumaßnahmen an der Drahtbespritzung realisiert, um die Dichtigkeit zu verbessern und die Vermischung des Kalt- und Warmwassers zu verringern. Auch die Spritzbalken wurden ausgebaut und entsprechend gereinigt. Es hatte sich gezeigt, daß aufgrund eines Bioprozesses sehr viele Fremdkörper die Spritzlöcher in den Spritzbalken verstopften. Es wurden alle Lager ausgebaut, gereinigt und überholt. Außerdem wurden alle bis dato vorhandenen Sensorikbauteile eingebaut.



Abb.: 3.1.1.1: Wärmekraftmaschine mit Sprühbalkensystem



Abb.: 3.1.1.2: Detailansicht eines Sprühbalkens



Abb.: 3.1.1.3: Geradscheibe, mit 96 Drähten bestückt

3.1.2 Testläufe und Ergebnisse

Die 120 FG-Drähte mit einem Durchmesser von 1 mm und einer wirksamen Länge von 800 mm wurden in der Wärmekraftmaschine mit dem Spritzbalkensystem bei einer maximalen Dehnung von 5,5 % mit 20 °C kaltem und 80 °C warmem Wasser betrieben. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Bremse für den Prüfstand gefertigt war, konnte nur das Stillstandsdrehmoment bei arretierter Maschine über den Drehmomentaufnehmer ermittelt werden. Dieses Anlaufdrehmoment betrug maximal 126 Nm.

Nachdem die Arretierung an den Scheiben wieder entfernt wurde, lief die Wärmekraftmaschine sehr unrund, mit einer maximalen Drehzahl von 24 1/min. Neben diesem sehr schlechten Rundlauf mußte festgestellt werden, daß nach kürzester Zeit 18 der 120 Drähte rissen. Damit waren keine weitere Testläufe möglich. Statt dessen erfolgten zahlreiche metallographische Untersuchungen der Drahtbrüche, eine Finite Elemente Berechnung wichtiger Komponenten und ein Totalumbau der Wärmekraftmaschine.

3.2 "Neubau P 1": Umbau der Wärmekraftmaschine; Sprühdüsenbetrieb

Nach diesen unbefriedigenden Ergebnissen mit dem Sprühbalkensystem erfolgte der Neubau des Prototypen P 1, was einem Totalumbau des bisherigen Wärmekraftprüfstandes entspricht. Die Konstruktionen erfolgten an der FH-Konstanz auf CAD; Die erforderlichen Anschaffungs- und Fertigungsmaßnahmen wurden fast alle von der Firma MemoTec AG finanziert.

Die ab diesem Zeitpunkt durchgeführten metallographischen Untersuchungen der Drahtbrüche werden in einem späteren Kapitel behandelt (Kapitel 3.7). Ebenfalls parallel zu den Umbaumaßnahmen fand eine Berechnung der wichtigen neu zu konstruierenden Teile über die Finite Elemente Methode statt. Beispielhaft ist in Kapitel 3.8 die Berechnung der Schrägscheibe dargestellt.

3.2.1 Umbaumaßnahmen

Als wohl einschneidenste Umbaumaßnahme erfolgte der Umbau des Besprühungssystems. Der Hintergrund dafür lag vor allem in den Ergebnissen der hier im Hause durchgeführten Diplomarbeit, die den zur Umwandlung erforderlichen Wasserverbrauch mit dem tatsächlichen Wasserverbrauch verglich. Diese Untersuchung hatte zum Ergebnis, daß eine weit über 100-fache Wärmemenge über das Warmwasser eingebracht wird als zur Gefügeumwandlung in den austenitischen Zustand nötig ist. Dadurch geht der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine bei der Energieumwandlung nahezu gegen Null. Das alte System mit den acht Spritzbalken und der Spritzschutzummantelung wurde gegen ein völlig neues Besprühungssystem ersetzt.



Abb.: 3.2.1.1: Einstellbare Sprühnebeldüsen


Abb.: 3.2.1.2: Abnehmbarer Deckel mit integrierten Sprühdüsen

Dieses neue System besteht aus einer Vielzahl von kleinen Sprühnebeldüsen, die über die verdrehbare Kappe im Wasserdurchsatz individuell eingestellt werden kann. Diese Sprühnebeldüsen wurden in einem abnehmbaren Deckel integriert. In dem Deckel befinden sich jeweils für den Kalt- und Warmbereich drei parallel geführte Rohre. Diese Rohre mit den eingeklebten Sprühdüsen sind unterhalb des Deckels miteinander verbunden. Nach außen führt pro Wasserbereich je eine Steckkupplung, die mit den Pumpen des Warm- bzw. Kaltwasserkreislaufes verbunden werden. Auf diese Weise konnte zum einen ohne den Deckel sehr gut an der Maschine gearbeitet werden und zum anderen durch eine sehr schnelle und einfache Montage zum Testbetrieb gewechselt werden. Selbst zwischen den durchgeführten Tests war auf einfache Weise ein kompletter Einblick in die Wärmekraftmaschine möglich.

Dieser Sprühdüsenbetrieb bedingte allerdings noch weitere Umbaumaßnahmen. Da die Besprühung nun nur noch von oben erfolgte – davor waren die acht Spritzbalken am Umfang der Spritzschutzummantelung verteilt – war die vorhergehende Konstruktion mit einem großen Mittelrohr, den Abtropfleisten und Abtropfbürsten ungeeignet. Außerdem sollte der nach unten rieselnde Sprühnebel möglichst effektiv viele Drähte erwärmen bzw. abkühlen. Dieses Problem wurde durch eine schwimmend gelagerte Trennwand gelöst. In der unteren Hälfte wurde diese Trennwand aus Glas mit einer Ablaufrinne beschwert, so daß sie auch bei hohen Drehzahlen weitgehend senkrecht steht, den Kalt- und Warmbereich effektiv trennt und das sich an der Trennwand absetzende Wasser gleich zur Ablaufstelle transportiert.



Abb.: 3.2.1.3: Lagerung für die schwimmende Wand



Abb.: 3.2.1.4: Ansicht auf die schwimmende Trennwand von oben

Des weiteren war es auch erforderlich, den kompletten Arbeitsbereich der FG-Drähte inklusive der Stützscheibe zu kapseln. Die Blechverschalung beinhaltete auch verschiedene Einsichtöffnungen, die mit Glasscheiben abgedichtet wurden.



Abb.: 3.2.1.5.: Gesamtansicht der Wärmekraftmaschine mit gekapseltem Sprühbereich

Bei der Ausführung dieser Umbaukonstruktion, die ja auch die Neukonstruktion der Schräg- und Geradscheiben sowie der Mittelwelle beinhaltete, wurde auch der Abstand zwischen der Geradscheibe und der Schrägscheibe verlängert. Dies ließ sich durch die geänderten Dimensionierungen (Gewichtsoptimierung durch exakte FEM-Berechnung) und die neue Drahtbefestigung auf dem gleichen Rahmen des Prüfstandes realisieren., Dadurch konnte die zukünftige wirksame Länge der FG-Drähte auf 1015 mm erweitert werden.

Außerdem wurden die Drahteinspannungen wesentlich verbessert. Wie in vorhergehenden Arbeiten festgestellt wurden, sind Klebe- und Lötverfahren für die Drahtverbindungen ungeeignet. Die bis dato verwendete Lösung mit den vielen Schraubverbindungen aufgrund des hohen Einbauraumes, der damit bewegten Massen und auch der sehr zeitaufwendigen Montage stellten ebenso keine befriedigende Lösung dar. In verschiedenen Einpreßversuchen konnte schließlich eine akzeptable Lösung gefunden werden.

Zunächst wurden entsprechende Preßwerkzeuge konstruiert, gefertigt und anschließend in einer benachbarten Firma wärmegehandelt. Als Preßhülsen konnten zunächst Standard-Hochdruckrohre verwendet werden, die in den laboreigenen Wärmeöfen weichgeglüht wurden. Der Preßvorgang wurde an der Universal-Zugprüfmaschine durchgeführt.



Abb.: 3.2.1.6: 5 mm-Preßverbindung. Probe zur Ermittlung der Preßkraft

Nach der erfolgreichen Preßverbindung mit einem Außendurchmesser von 5 mm konnten nach intensiver Recherche Standardrohre mit einem Außendurchmesser von 3 mm und einem Innendurchmesser von 1,1 mm bezogen werden. In einem zweiten Schritt wurden neue Gesenke und auch eine Einpreßvorrichtung konstruiert und angefertigt. Die höchste Widerstandskraft bei Zugbeanspruchung wiesen Preßverbindungen auf, die mit einer Preßkraft von 150 kN verbunden wurden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Einpreßvorrichtung sowie die alte und neue Befestigung im Vergleich.



Abb. 3.2.1.7: Drähte und kleine Preßhülse in der Einpreßvorrichtung



Abb. 3.2.1.8: Vergleich der alten und neuen Drahtbefestigung

Wie Abbildung 3.2.1.8 zeigt wurde auch der Längenausgleich über eine Druckfeder verbessert. Dieser ist nötig, damit bei entsprechenden Drehzahlen die Drähte nicht durchhängen und durch die Zentrifugalkraft schlackern, wenn sie vom Kaltbereich in den Warmbereich übergehen und sich nicht sofort verkürzen. Diese neue Art des Längenausgleiches hat den Vorteil, daß eine Geradscheibe genügt (Abbildung 3.1.1.3 zeigt die vorherige Konstruktion mit der alten Drahtbefestigung und zwei Geradscheiben).

Eine weitere Verbesserung wurde durch die Neukonstruktion der Lagerung der Schrägscheibe realisiert. Aus bisherigen Arbeiten an einem kleinen Demonstrationsmodell mit einer zweiachsigen Winkelverstellmöglichkeit und nicht zuletzt durch ein innerhalb einer Diplomarbeit ausgearbeiteten Simulationsprogramm zur definierten Einstellung des Neigungswinkels an der Schrägscheibe, bestand schon seit längerer Zeit die Absicht, auch am Prüfstand eine zweite Winkelverstellmöglichkeit zu realisieren. Dies konnte innerhalb dieses größeren Totalumbaus verwirklicht werden. Durch berechneten Daten des Simulationsprogrammes kann somit der Winkel der Schrägscheibe optimal eingestellt werden, was sich entsprechend positiv auf den Rundlauf, die Leistung und den Gesamtwirkungsgrad der Anlage auswirkt.



Abb.: 3.2.1.9: Lagerung der Schrägscheibe. Zweiter Winkel durch vertikale Achse

Der Einsatz der Sprühdüsen senkt zum einen zwar den erforderlichen Volumenstrom, zum anderen muß jedoch auch der Systemdruck erhöht werden. Aus diesem Grund war es nötig, nach den ersten Versuchen die bis zu diesem Zeitpunkt im Prüfstand eingebauten Pumpen durch zwei leistungsstärkere Pumpen des Pumpenherstellers Grundfos zu ersetzten.



Abb. 3.2.1.10: Neue Warmwasserpumpe mit darüber angeordnetem Durchflußsensor

Zur späteren Aufnahme der Meßergebnisse mußten für die verschiedenen Meßwertsensoren auch entsprechende Halterungen angebracht werden. Dies beinhaltete im Falle der Drehmomentaufnahme auch eine kleinere Konstruktion einer Bremse. Eine Bremse ist an der Wärmekraftmaschine nötig, um für die dynamischen Messungen den Antrieb mit einem definierten Bremsmoment abzubremsen zu können. Erst dadurch kann der zwischen der Wärmekraftmaschine und Trommelbremse liegende Drehmomentenaufnehmer ein Abtriebsdrehmoment anzeigen. Diese Aufgabe wurde durch eine umgebaute Scheibenbremse aus dem Kfz-Bereich übernommen.



Abb. 3.2.1.11: Seitenansicht der Trommelbremse mit abgenommener Bremstrommel



Abb. 3.2.1.12: Ansicht der Trommelbremse mit Bremszugsystem

Beim Umbau erfolgten außerdem noch einige kleinere Verbesserungen, wie z.B. die Lagerung der Stützscheibe durch vier einzeln einstellbare Exzenterkugellager, auf die jedoch hier nicht näher eingegangen wird.

3.2.2 Testläufe und Ergebnisse

Bevor mit den eigentlichen Versuchen begonnen wurde, mußte zunächst der, nach aufwendiger Recherche und einigen Einzeldrahttests an den zugesandten Drahtmustern, neu erworbene NiTiCu Draht des deutschen Herstellers Memory-Metalle GmbH vor dem Einpressen genau vermessen werden. Dazu wurden 130 FG-Drähte bei Raumtemperatur annähernd gleich lang abgelängt und in einem Wasserbadprüfstand bei 90 °C vermessen. Die große Streuung der Ergebnisse zeigt das nachfolgende Diagramm 3.2.2.1.



Abb. 3.2.2.1: Gegenüberstellung der Meßergebnisse der FG-Drähte

Diese zeitintensive Vermessung war jedoch nötig, um die FG-Drähte in ihrem kurzen, austenitischen Zustand im Warmwasserbad anzuzeichnen und sie später auf eine definierte Länge einzupressen. Dadurch konnte gewährleistet werden, daß nach einer Umdrehung in der Wärmekraftmaschine bei einer definierten Einstellung der Schrägscheibe alle Zugdrähte um den gleichen Verlängerungsbetrag gedehnt werden und jeder Draht in der Lage ist, sich bei der Verkürzung im Warmzustand in den gleich kurzen Ausganszustand zurückzuwandeln.



Abb. 3.2.2.2: Einbau der einzeln dokumentierten Drähte

Die ersten Versuche mit dem nun total umgebauten Versuchsstand P 1 waren zunächst nur von kurzer Dauer, weil teilweise zu erwartende, aber auch unerwartete Probleme auftraten.

So gab es beispielsweise immer wieder Dichtigkeitsprobleme an den unterschiedlichsten Stellen des Prüfstandes, die dann durch kleinere Modifikationen schrittweise gelöst wurden. Das Sprühsystem konnte mit den neuen Pumpen schlußendlich gut betrieben werden, jedoch mußte die Anzahl der Sprühdüsen erhöht werden, um eine relativ gleichmäßige Sprühnebelverteilung in dem gekapselten Warm- und Kaltbereich zu gewährleisten. Auch das Justieren der Sprühdüsen bei schlußendlich 240 eingesetzten Düsen erforderte eine gewisse Zeit.

Die Lagerung der Schrägscheibe verursachte in mehrfacher Hinsicht Probleme: Zum einen hielten die ersten Lager aufgrund der hohen Belastungen verbunden mit den Warmwasserdämpfen aus den Versuchsreihen vor der Kapselung nicht sehr viele Betriebsstunden aus und mußten ersetzt werden. Zum anderen löste sich einmal das Gewinde der aus Einbaugründen zweigeteilten Schrägscheibenwelle, was den Bruch des Lagerzapfens mit sich führte. Bei der neuen Konstruktion wurde das Linksgewinde zusätzlich mit einem Loctite-Kleber verklebt. Außerdem erwies sich die Befestigung der Schrägscheibe über die vertikale Achse als zu schwach; Schon nach kurzer Versuchsdauer verstellte sich die Schrägscheibe hin zu kleineren Winkeln. Deshalb wurde bei dieser Testphase der Halterungsrahmen der Schrägscheibenlagerung nach dem Einstellen des Winkels zusätzlich zur Schraubverbindung mit Zwischenstücken verkantet.

Probleme ganz anderer Art verursachte das Meßwerterfassungssystem, dem jedoch ein eigenes Kapitel gewidmet ist (Kapitel 3.6).

Als die schwimmend gelagerte Trennwand zwischen dem Warm- und Kaltbereich kurzzeitig wieder ausgebaut werden mußte, weil sie trotz berücksichtigter Längenausdehnung bei Betrieb verspannte, wurde zwischenzeitlich folgender Testversuch gefahren: Die Wärmekraftmaschine wurde ohne Trennwand betrieben um deren Notwendigkeit zu überprüfen. Es wurde nach den ersten Versuchen festgestellt, daß durch die gezielte Einstellung der Spühdüsen die Vermischungszone des kalten und warmen Sprühnebels so gering sein könnte, daß die Verwendung einer aufwendig gelagerten Trennwand gar nicht zu einer wesentlichen Verbesserung der Leistung führen könnte. Bei diesem Testlauf lief die Maschine jedoch nur in den ersten Minuten mehr oder weniger rund. Schon nach kurzer Zeit verlangsamte sich die Drehzahl immer mehr und nach fünf Minuten blieb die Wärmekraftmaschine stehen. Es kann dadurch gefolgert werden, daß zum Betrieb der Anlage eine Trennung zwischen Warm- und Kaltbereich unbedingt erforderlich ist.

Weitere zu Vorversuchen zählende Testläufe und Messungen erfolgten bei den Wasserbehältern. So wurde zum Beispiel ermittelt, in welcher Zeit der bis zu 500 Liter fassende Warmwasserbehälter durch die drei elektrischen Heizstäbe erwärmt werden kann. Bei diesen Versuchen ging es auch darum, die Notwendigkeit einer Behälterisolation zu überprüfen. In verschiedenen Testreihen konnte gezeigt werden, daß trotz des Fehlens einer Behälterisolation die elektrische Heizleistung ausreichend ist, beim Testbetrieb eine definierte Warmwassertemperatur aufrecht zu halten. Außerdem konnte dadurch belegt werden, daß der Warmwasserbehälter über den Luftspalt zum Kaltwasserbehälter einen vernachlässigbaren Einfluß bewirkt.

46



Diagramm 3.2.2.3.: Heizungsverlauf im Kalt- und Wärmwasserbehälter

Das Ansteigen der Temperatur im Kaltwasserbehälter um ist also nicht durch die Wärmeübertragung des benachbarten Warmwasserbehälters bedingt, sondern durch die Erwärmung des kalten Sprühnebels beim Abkühlen der warmen Drähte und die Wasservermischung beim Rücklauf in den Behälter. In einem weiteren Versuch bei Arretierter Maschine und laufendem Sprühsystems konnte außerdem nachgewiesen werden, daß die Erwärmung des Kaltwasserbehälters hauptsächlich von der eingebrachten Wärme durch die abzukühlenden Drähte herrührt und die Wasservermischung diesen Effekt nur unerheblich verstärkt.

Während bei der gleichermaßen auftretenden Temperaturabsenkung im Warmwasserbehälter aufgrund der Abkühlung des warmen Sprühnebels durch die kalten Drähte dieser Temperaturänderung durch die leistungsstarken Heizstäbe weitgehend entgegengewirkt werden kann, ist bei längerer Versuchsdauer ein Ansteigen der Temperatur im Kaltwasserkreislauf nicht vermeidbar. Bei längeren Versuchen von über einer Stunde erfolgte eine Temperaturerhöhung im Kaltwasserbehälter von bis zu 20 °C. Da dennoch ein Betreiben der Wärmekraftmaschine möglich war, konnte zunächst von der geplanten Behälterauslagerung abgesehen werden.

Es wurde jedoch bei keinem der zahlreichen Testläufen ein gleichmäßiger Rundlauf der Wärmekraftmaschine erreicht. So wurde bei fast jedem Testlauf ein oder mehrere Parameter verändert, angefangen von dem Wasserdurchsatz an den Pumpen und der Einstellung an den Sprühdüsen, über die Starttemperatur im Warmwasserbehälter bis zu den Einstellungen an den beiden Winkeln der Schrägscheibe. Es konnten auch erst gegen Ende dieser Testläufe weitgehend alle erforderlichen Meßwerte über die Meßsoftware und die Sensoren aufgenommen werden. Davor wurden viele Werte nur unter Einsatz vieler "Beobachter" an manuellen Anzeigegeräten erfaßt. Während all dieser zeitintensiven Arbeiten zum Auffinden der Einstellparameter, die zu einem Rundlauf führen sollten, und den ebenso aufwendigen Arbeiten zur Fertigstellung des Meßwerterfassungssystems, um dann das Leistungsprofil der Wärmekraftmaschine für die unterschiedlichen Einstellungen systematisch zu erfassen und zu dokumentieren, setzte uns die Firma MemoTec AG immer stärker unter "Erfolgsdruck". Dadurch litt teilweise eine systematisch-wissenschaftliche Vorgehensweise und Problemlösung. Statt dessen wurden in immer kürzeren Zeitabständen immer mehr Parameter verändert, um doch noch einen Rundlauf zu erhalten. Der angestrebte Erfolg blieb aus.

Zusammenfassend mußte bei all den durchgeführten Versuchen mit dem Sprühdüsensystem festgestellt werden, daß kein gleichmäßiger Rundlauf erzielt werden konnte. Auch die Anstellung der Schrägscheibe um den Winkel β und die damit verbundene Phasenverschiebung der Längenänderung Δ I in Abhängigkeit vom Drehwinkel γ brachten diesbezüglich keine Verbesserung.

Aus oben genannten Gründen macht es auch keinen Sinn, die Testlaufergebnisse detailliert miteinander zu vergleichen, weil es kaum Wiederholungsversuche mit den gleichen Einstellparametern gab und die meisten Versuche schon nach 10 bis 30 Minuten abgebrochen werden mußten. Es konnte in der besten Einstellung mit 120 FG-Drähten mit einem Durchmesser von 1 mm und einer wirksamen Länge von 985 mm bei einer Kaltwassertemperatur von 17,5 °C und einer Warmwassertemperatur von 90 °C ein maximales Drehmoment von 68 Nm bei der zugehörigen Drehzahl von 7 Umdrehungen pro Minute erreicht werden. Aus diesen ermittelten Werten ergibt sich über die Beziehung

 $P_{max} = 2^* \pi^* n^* M$

eine maximale Leistung der Wärmekraftmaschine von 49,8 Watt.

Dieser niedrige Leistungswert, der deutlich unter den erwarteten 250 bis 500 Watt lag, führte dazu, daß die Firma MemoTec AG sich aus diesem aFuE-Projekt zurückzog. Als Begründung führte sie an, daß mit derart niedrigen Leistungsdaten eine angestrebte Vermarktung einer Wärmekraftmaschine in absehbarer Zeit als nicht wahrscheinlich erachtet werden muß.

Als eine weitere Folge der mit dieser Wärmekraftmaschine ermittelten Leistungsdaten und dem Ausscheiden der Firma MemoTec AG wechselte der bisherige Projektmitarbeiter Dipl.-Ing.(FH) U. Berg nach einer Übergangszeit in die Industrie. Herr Dipl.-Ing.(FH) J. Strittmatter übernahm die weiteren Aufgaben in diesem Projekt, sowohl während der noch verbleibenden Projektlaufzeit, als auch in den sechs Monaten danach. Letztere Arbeiten wurden dann vor allem in Studien- und Diplomarbeiten sowie auch mit Laborpraktikanten unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing.(FH) J. Strittmatter ausgeführt.

3.3 "Neubau P 2": Umbau der Wärmekraftmaschine; Tauchbadbetrieb

Da mit dem vorhergehenden Prototyp P 1 kein zufriedenstellender Betrieb der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine erreicht werden konnte, erfolgte ein zweiter Totalumbau zum Prototyp P 2. Sollte von der Projektplanung her dieser Neubau eine optimierte Version des Prototypen P 1 werden, der dann aufgrund der modularen Bauweise durch geringe Modifikationen auch für Feldversuche verwendbar sein sollte, ergab sich nun eine neue Zielsetzung.

Den Hintergrund für die nun durchgeführten Umbaumaßnahmen lieferten die überaus positiven Erfahrungen mit dem kleinen Demonstrationsmodell der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine (siehe Abb. 2.2.3.3.2). In diesem Modell, das seit der Präsentation auf der Hannovermesse im April 1996 mit den dort eingesetzten 0,43 mm NiTiCu-Zweiwegeffekt-Drähten der Firma A.M.T. aus Herk-de-Stad, Belgien, bei Wassertemperaturen zwischen 70 und 80°C und einfacher Luftkühlung bei allen weiteren Präsentationen und Untersuchungen hervorragend läuft und Drehzahlen von über 120 Umdrehungen pro Minute erreicht, läßt sich bei verschiedenen Einstellungen ein ausgezeichneter Rundlauf erreichen. So wurden in der nächsten Phase alle Teile für den Sprühbetrieb entfernt und ein Prototyp P 2 mit Tauchbadbetrieb realisiert. Damit sollte ein zufriedenstellender Rundlauf erreicht werden, um danach mit einer vollständig funktionie-

49

renden Meßwerterfassung systematische Untersuchungen zum Leistungsvermögen der FG-Drähte in dem Schrägscheibenantrieb durchführen zu können.

3.3.1 Umbaumaßnahmen

Zunächst wurden alle Teile entfernt, die ausschließlich für den Sprühbetrieb erforderlich waren. Die Neubaukonstruktionen wurden auf CAD konstruiert und in den hochschuleigenen Werkstätten gefertigt. An dieser Stelle sei erwähnt, daß die Umbaumaßnahmen zweistufig erfolgten. Zunächst wurden die weniger kosten- und zeitintensiven Maßnahmen umgesetzt. Als sich nach den ersten Tests das Tauchbadprinzip auch beim der großen Wärmekraftmaschinen-Prüfstand mit den relativ dicken FG-Drähten als erfolgversprechende Konstruktion erwies, erfolgten einige weitere Umbaumaßnahmen. Es werden hier beide Phasen dieser Umbaumaßnahmen zusammen dargestellt, während im nachfolgenden Kapitel 3.3.2 dann nur die Ergebnisse der letzten Tests mit automatischer Meßwerterfassung präsentiert werden.

Als erstes Neubauteil wurde ein Ring der Schrägscheibe gefertigt, der den gleichen Lochkreisdurchmesser aufweist wie die Geradscheibe und die Stützscheibe. Aufgrund des großen Durchmessers war dies auf üblichen Drehbänken nicht möglich und aufgrund des genannten Zeitdruckes ist dies bei dem Prototyp P 1 nie realisiert worden.



Abb. 3.3.1.1: Detailansicht der alten Schrägscheibe im Tauchbadbetrieb

Durch die unterschiedlichen Lochkreisdurchmesser auf sehr kleinem Abstand erfuhr der Übergangsstahldraht eine enorme Knick- und Reibbeanspruchung. Dies war auch der eigentliche Grund, weshalb bei den Testläufen mit P1 so zahlreiche Drähte rissen. Obwohl durch die Neukonstruktion der Schrägscheibe dieser systematische Fehler beseitigt werden konnte, wurde dennoch für diesen Prototyp P 2 ein noch widerstandsfähigerer Federstahldraht verwendet. Da die Fertigung dieser großen Schrägscheibe erst in der zweiten Phase zum Abschluß gebracht werden konnte, wurden die ersten Testläufe mit P 2 zunächst noch mit der alten, kleineren Schrägscheibe durchgeführt.



Abb. 3.3.1.2: Wärmekraftmaschine P 2 mit Tauchbadbetrieb

Es wurde eine Wanne konstruiert, die als Tauchbad mit Warmwasserzu- und ablauf dient. Darin taucht auch die Schrägscheibe ein, d.h. es könnte zu einem späteren Zeitpunkt versucht werden, den FG-Draht ohne das Übergangsstück aus Stahl zu verwenden. Damit würde ein Einpreßvorgang wegfallen und die wirksame Länge der Arbeitsdrähte entsprechend verlängert werden. Zunächst wurde jedoch weiterhin der Stahldraht verwendet, um etwaige Reibbeanspruchungen in den Durchgangsbohrungen der Stützscheibe und die Wechselbiegebelastung in der Aufnahme an der Schrägscheibe auf dem Stahldraht zu belassen und sie nicht auf den FG-Draht zu übertragen. Die ursprüngliche Tauchbadwanne mußte in der zweiten Umbauphase dann durch einen zusätzlichen seitlichen Spritzschutz erweitert werden, da bei hohen Wasserständen in Verbindung mit hohen Drehzahlen viel Wasser seitlich verloren ging. Der Zu- und Ablauf des Warmwassers wurde über Schläuche und Kugelhahnventile realisiert und im Laufe der durchgeführten Test weiter verbessert. Gegen Ende der Testläufe erfolgte die Wasserstandsanzeige dann nicht mehr über eine an der Wanneninnenwand angebrachten Skalierung, sondern über ein nach außen geführtes, U-förmiges Glasrohr.



Abb. 3.3.1.3: Detailansicht auf alte Schrägscheibe und Ventilatoren

Zur Abkühlung der FG-Drähte wurden zwei Ventilatoren eingesetzt, die in Verbindung mit der geöffneten Labortüre stets für eine ausreichende Kühlwirkung sorgten.

Da die Trommelbremse am Ende der ersten Versuchsreihen nicht mehr zufriedenstellend funktionierte, wurde die aus Aluminium gefertigte Welle und Scheibe durch eine Konstruktion aus Stahl ersetzt. Als sich dadurch eine über die Drehzahl konstante Abbremsung nur bedingt verbessern ließ, wurde die Installation eines zweiten Bremssystems beschlossen. In einer einfachen Reibbandbremse fand sich schließlich ein kostengünstige, schnell realisierbare und sehr effektive Lösung. Das Band umschlingt die Welle nach dem Drehmomentaufnehmer. Das eine Ende ist an dem Prüfstandgestell fest fixiert, während das andere Ende über das Auflegen von verschiedenen Gewichten belastet werden kann. Dadurch haben die Unwuchten in der stets leicht taumeInden Abtriebswelle keinen Einfluß auf das Bremsmoment und die Wärmekraftmaschine kann definiert abgebremst werden.

In der zweiten Umbauphase wurden auch neue Drehzahlsensoren angeschafft und direkt über der Geradscheibe angebracht. Dadurch gibt jeder vorbeilaufende Metallstift der Drahteinspannung ein Impuls und über diese Frequenz kann dann die Drehzahl ermittelt werden. Eine Überprüfung der Lagerung ergab, daß die Kugellager durch die ersten Testläufe mit dem Prototyp P 2 aufgrund der starken Wasserdampfentwicklung und dem direkt darunter liegenden Warmwassers wieder leicht schadhaft waren, so daß sie ersetzt werden mußten.



Abb. 3.3.1.3: Prüfstand P 2 mit neuer Schrägscheibe und erweitertem Spritzschutz



Abb. 3.3.1.4: Geradscheibe mit Längenausgleichsstiften und Drehzahlsensor

Während diese Umbaumaßnahmen in den hochschuleigenen Werkstätten ausgeführt wurden, begann das Trainieren der verbliebenen neuen Drähte (detaillierte Beschreibung im nachfolgenden Kapitel 3.4).

3.3.2 Testläufe und Ergebnisse

Zunächst wurden einige Testreihen bei arretierter Wärmekraftmaschine gefahren. Dabei wurden verschiedene Winkeleinstellungen an der Schrägscheibe eingestellt und die Drehmomente beim langsamen Befüllen der Wanne mit 90 °C warmem Wasser über der Höhe des Wasserstands aufgenommen. Teilweise wurde nur der horizontale Winkel verändert, während der vertikale Winkel auf null gesetzt wurde, aber auch umgekehrt. Daneben erfolgten Winkeleinstellungen, bei denen beide Einstellmöglichkeiten verändert wurden. Diese Versuche wurden mit einer Drahtbestückung von 120 FG-Drähten durchgeführt. Das höchste Drehmoment ergab sich mit 53,1 Nm bei der größten Einstellung des vertikalen Winkels von 6 °, einer Wasserstandshöhe von 18 cm (Oberkante des Tauchbades) und der kleinsten Einstellung am horizontalen Winkel von 0 °.

Damit die reinen Zugspannungen der FG-Drähte über die Tangentialkomponente eine Drehung der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine bewirken können, muß allerdings der horizontale Winkel auch eingestellt werden. (Kapitel 2.3.2). Nach verschiedenen Testläufen mit entsprechend niederen Wasserständen ergaben sich die besten Rundlaufeigenschaften bei der gleichen Verstellung der beiden Winkel. Bei den Versuchen ergab sich außerdem, daß die Laufeigenschaften der Schrägscheibenmaschine bei Wasserstandshöhen zwischen 10 und 11 cm ein Optimum erreichten. Dadurch war die größte Drahtlänge etwas unter der Wasseroberfläche und die kürzeste Drahtlänge um 180° verschoben auf der gegenüberliegenden Seite der Schrägscheibe. Durch die gleichen Winkeleinstellungen wurde ein sinnvoller Vergleich der Ergebnisse ermöglicht.

Die durch die Versuche festgestellte Tatsache, daß ein optimaler Lauf der Maschine dann gewährleistet ist, wenn die Stelle des längsten Abstandes für den Draht kurz unter der Wasseroberfläche angesiedelt ist, unterstreicht die Theorie, daß der Draht erst nach einer kurzen Verzögerungszeit durch das Wasserbad erwärmt wird. In Kombination mit der Winkelgeschwindigkeit des Drahtes durch das Drehen der Maschine führt diese träge Erwärmung dazu, daß die zur Umwandlung in das austenitische Gefüge erforderliche Drahttemperatur und die damit verbundene Verkürzung des Drahtes erst einige Zeit nach dem Wassereintritt erreicht wird. Durch die Einstellung des längsten Abstandes für den Draht etwa 2 cm unterhalb der Wasseroberfläche kann dann die bei der Umwandlung auftretende Zugkraft am effektivsten zum Antrieb der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine verwendet werden.

Es konnte zu Beginn der Testläufe zwar noch eine kleine Unwucht festgestellt werden, doch war dies viel besser als in den Versuchen mit P 1. Gegen Ende der Testläufe hatte die Wärmekraftmaschine bei den optimierten Einstellparametern einen sehr guten Rundlauf.



Abb. 3.3.2.1: Horizontale und vertikale Winkelverstellung der Schrägscheibe

In weiteren Versuchen konnte nun herausgefunden werden, wie sich die WKM bei unterschiedlichen Einstellwinkeln der Schrägscheibe und unterschiedlichen Wassertemperaturen verhält. Dabei wurde pro Versuch eine Winkeleinstellung und eine Wasserbadtemperatur festgelegt. Die Wasserbadtemperatur in den einzelnen Versuchen variierte zwischen 65 °C und 90 °C. In den Versuchen wurden drei verschiedenen Einstellungen der Schrägscheibe vorgenommen. Dadurch konnte eine Längenänderung im FG-Draht von 2%; 3,15% und 4,5% erlangt werden.

Nach Realisierung der zweiten Umbauphase wurde die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine mit nur noch 60 FG-Drähten bestückt. Diese wurden jedoch dem in Kapitel 3.4. erläuterten Trainingsverfahren unterzogen. Für die darauffolgenden Versuche wurde die Füllstandshöhe des Wasserbades auf 11cm festgelegt. Bei unterschiedlichen Dehnungen (durch Einstellungen des Schrägscheibenwinkels) und Wassertemperaturen wurden die Werte bezüglich der Drehzahl, des Moments, der Wassertemperatur und des Wasserdurchflusses computerunterstützt aufgezeichnet. Um ein Gesamtbild des Drehmomentenverlaufes zu erlangen wurde die Welle hinter dem Momentenaufnehmer mit Hilfe einer Bandbremse mit verschieden aufgelegten Gewichten verzögert. Sobald sich eine stabile Laufphase eingestellt hatte, wurde der Drehmomentwert mit dem zugehörigen Drehzahlwert aufgenommen.

In den folgenden Drehmoment-Drehzahl-Diagrammen (Diagramme 3.3.2.2, 3.3.2.3 und 3.3.2.4) sind die Ergebnisse bei diesen unterschiedlichen Dehnungen aufgezeichnet. Die durchschnittliche Wasserbadtemperatur lag bei diesen Auswertungen bei 85 $^{\circ}$ C und der Warmwasserzufluß wurde auf konstant 2 m³/h eingestellt.



Diagramm 3.3.2.2: Drehmoment-Drehzahl-Kennline bei 2% Dehnung



Diagramm 3.3.2.3: Drehmoment-Drehzahl-Kennline bei 3,15 % Dehnung



Diagramm 3.3.2.4: Drehmoment-Drehzahl-Kennline bei 4,5 % Dehnung

Die Diagramme zeigen eindeutig, daß bei allen Dehnungsraten das Moment zu höheren Drehzahlen hin abnimmt. Bei der Drehzahl 0 ergibt sich das höchste Moment, das sogenannte Stillstands- oder Anlaufmoment. Dies ist für die Dehnung von 3,15 % mit 22 Nm am höchsten. Es ist etwas verwunderlich, daß im Falle der 4,5 %-Dehnung dieses Anlaufdrehmoment sogar etwas niedriger ist, als bei der kleineren Dehnung. Da aber im folgenden Verlauf diese Drehmoment-Drehzahl-Kennline langsamer abfällt als im Falle der 3,15 %-Dehnung, deutet es auf eine Meßungenauigkeit beim ersten Wert hin. Ausgehend von diesen ermittelten Werten des Drehmoments und der Drehzahl wurden nun die Leistungskennwerte der Maschine berechnet. Die Leistung berechnet sich nach folgender Beziehung:

P[W]=2*Pi*(n[1/min]/60)*M[Nm]

Diese Leistungswerte wurden dann in Diagrammen über der Drehzahl aufgetragen, um die sogenannte Leistungskennlinie zu erhalten. Die nachfolgenden Diagramme zeigen diese Kennlinie für die drei unterschiedlichen Dehnungsraten.



Diagramm 3.3.2.5: Leistungskennlinie bei 2 % Dehnung



Diagramm 3.3.2.6: Leistungskennlinie bei 3,15 % Dehnung



Diagramm 3.3.2.7: Leistungskennlinie bei 4,5 % Dehnung

Alle Diagramme zeigen sehr ähnliche Kennlinien. Betrachtet man die polynomische Trendlinie, liegt die maximale Leistung bei kleine Dehnraten eher bei Drehzahlen zwischen 40 und 50 Umdrehungen pro Minute, bei höheren Dehnrate eher bei Drehzahlen zwischen 35 und 45 Umdrehungen pro Minute. Vergleicht man jedoch die gemessenen Werte, liegt die maximale Leistung bei kleinen Dehnraten bei Drehzahlen von 40 Umdrehungen pro Minute und bei höheren Dehnraten bei 50 Umdrehungen pro Minute. Allerdings muß man berücksichtigen, daß diese Unterschiede sehr gering sind und auch die maximalen Leistungswerte in bei allen drei Dehnraten über 60 Watt erreichen.

Die <u>maximale Leistung von 63 Watt</u> wird sowohl bei der Dehnrate von 3,15 %, als auch bei der Dehnrate von 4,5 % bei einer Drehzahl von 50 Umdrehungen pro Minute erreicht.

Der Leistungsunterschied zwischen den drei Einstellungen der Schrägscheibe ist jedoch gering und beträgt nur 3 Watt. Aufgrund der höheren Beanspruchung von Lager und Draht bei großen Winkeleinstellungen der Schrägscheibe ist es daher für weitere Versuche sinnvoll, kleinere Winkel einzustellen, die dann eine Dehnrate von beispielsweise 2 % bewirken. Aufgrund der Beziehung, daß die maximal erreichbaren Zyklenzahlen der FG-Drähte mit steigenden Dehnraten abnehmen, ist dann auch eine höhere Lebensdauer des Antriebs zu erwarten.



Diagramm 3.3.2.8: Theoretisch erreichbare Zyklenzahlen in Abhängigkeit der Belastung und Dehnung [Quelle: Memory-Metalle GmbH]

3.4 Trainieren der eingesetzten Drähte

Auch mit den für die Sprühbetriebtestläufe (P 1) einzeln im Wasserbad vermessenen Drähte wurde die Erfahrung gemacht, daß nach einer gewissen Laufzeit einige Drähte durchhängen und auf der Warmseite anscheinend nicht mehr die vorgesehen Verkürzung erreichen. Aus den Erfahrungen anderer Projekte mit FGL, die zu dieser Zeit im Werkstoffprüflabor bearbeitet wurden, liegt einer der Gründe sehr wahrscheinlich in der Verlängerung des Drahtmateriales bei den ersten Zyklen. Dieses Verhalten tritt vor allem bei neu angelieferten Drähte auf. Daher wurden die Drähte vor den Untersuchungen im Tauchbadbetrieb mit dem Prototyp P 2 einem speziellen Trainingsverfahren unterzogen.



Abb. 3.4.1: Trainiervorrichtung der FG-Drähte

Dazu wurde zunächst die in Abbildung 3.4.1 dargestellte Trainingsvorrichtung verwendet. In diesem Gestell können die einzelnen Drähte oben in eine Aufnahme eingehängt und unten mit Gewichten belastet werden. Um eine Zugspannung von 150 N/mm² zu erreichen, wurden die Drähte mit 12 kg Gewichtskraft belastet. Über ein Netzgerät konnte der Draht dann mit einem Strom von 7 A beaufschlagt werden. Durch die Joulsche Erwärmung wurde die Phasenumwandlung ausgelöst: Der FG-Draht zog sich zusammen und hob die Gewichtslast an. Nach 10 s wurde die Stromzuführung unterbrochen, da sich keine weitere Verkürzung mehr feststellen ließ. In der Folge kühlte die Umgebungsluft den Draht wieder ab. Dieser wandelte in das weichere, martensitische Gefüge um und die Gewichtskraft bewirkte die Verlängerung. Nach spätestens 3 Minuten konnte keine weitere Verlängerung festgestellt werden. Die Verkürzung und Verlängerung der Drähte wurde über die Position der angehängten Gewichte abgelesen. Diese Prozedur wurde ca. 30 Mal wiederholt, bis keine weitere Verlängerung des Drahtes gegenüber der Ausgangslänge feststellbar war. In einem abschließenden Versuch wurden die im martensitischen Zustand gedehnten Drähte in einem Wasserbad getestet. Auf einer Vorrichtung wurden Drähte in das 95 °C heiße Wasser getaucht. Da ein Ende des Drahtes auf dieser Vorrichtung fest fixiert war, konnte an der Meßstrecke des frei geführten Endes die maximale Verkürzung des Arbeitsdrahtes in heißem Wasser ab-

61

gelesen werden. Nachfolgende Tabelle zeigt, wie stark die ermittelten Werte für zwei Drahtproben ausfallen konnten.

	Probe 1 Stro	m	Probe 2 Strom		
1025	mm	Wasser Verkürz.	1030	mm	Wasser Verkürz.
1028	mm mit 12kg	20mm	1034	mm mit 12kg	40mm
	-				
	Verkürzung(mm)	Verlängerung(mm)		Verkürzung(mm)	Verlängerung(mm)
1	31	2,5	1	42	4
2	34,5	5	2	46	5
3	36	5	3	46	5
4	37	5,5	4	46	5
5	37	6	5	46	6
6	38	6	6	46	6
7	38	6	7	46	6
8	38	6	8	46	6
9	38	6	9	45	6
10	38	7	10	46	7
11	39	7	11	46	7
12	39	7	12	46	6
13	40	7	13	45	6
14	39	6	14	45	6
15	39	9	15	45	7
16	40	8	16	45	7
17	38	8	17	46	7
18	39	7	18	46	7
19	37	7	19	46	7
20	38	7	20	46	7
21	37	7,5	21	46	7
22	37,5	7	22	46	7
23	39	8	23	46	7
24	39	7	24	46	7
25	38	8	25	46	7
26	38	8	26	46	7
27	38	8	27	46	7
28			28	46	7
29			29	46	7
30			30	46	7
Durchschnitt	37,78	6,72	Durchschnitt	41,10	5,73
strom(%)	3,7		strom(%)	4,0	
wasser(%)	2,1		wasser(%)	3,9	
Verkürzung ol	hne Masse :	4mm	Verkürzung ohne Masse : 4mm		
/erkürzung ohne Masse, aber mit 7A : 35mm			Verkürzung ohne Masse, aber mit 7A: 45mm		

Abb. 3.4.2: Ermittelte Daten für zwei FG-Drähte

Anhand dieser Daten zeigt sich die Wichtigkeit dieses Trainierens. Die Drähte verlängern sich gegenüber ihrer Ausgangslänge um bis zu ein Prozent. Wird also ein Draht mit 1000 mm Ausgangslänge und einer Verkürzung von 3 % in die Wärmekraftmaschine eingebaut, verlängert dieser sich dieser innerhalb der ersten Zyklen um bis zu einem Prozent. Dadurch können schon nach wenigen Minuten Betriebsdauer nur noch 2 % der Verkürzung für die Umwandlung in mechanische Energie wirksam werden.

Außerdem zeigt sich durch den abschließenden Versuch im Wasserbad die maximal mögliche Verkürzung eines jeden Arbeitsdraht. Es könnten sehr starke Schwankungen festgestellt werden, die zwischen 2 und 4,5 % Dehnung lagen. Sehr wahrscheinlich sind bei diesem Draht zum Erreichen von 4 bis 5 % Verkürzung etwas höhere Temperaturen erforderlich, als durch das Heißwasser erreicht werden können. Einige Drähte erreichten aber dennoch bei der Prüftemperatur von 95 °C gute Dehnwerte.

Eine weitere Besonderheit, die für den späteren Einsatz der Wärmekraftmaschine nicht außer Acht gelassen werden darf, zeigten bei diesem Trainingsverfahren die Werte für die erste Umwandlung, die stets deutlich kleinere Verkürzungen aufwiesen, als die Werte für alle nachfolgenden Umwandlungen. Dies ist unter dem Begriff "Effekt der ersten Umwandlung" bekannt und bedeutet, daß aufgrund von Auslagerungseffekten die erstmalige Phasenumwandlung eine deutlich höhere Umwandlungstemperatur benötigt, als bei den nachfolgenden Umwandlungen. Da in unserem Fall bei uns in allen Zyklen mit der gleichen Stromstärke und der gleichen Bestromungsdauer gearbeitet wurde, ist folglich die Verkürzung im bei der ersten Umwandlung etwas geringer, als bei den nachfolgenden. Die muß also bei einer späteren Anwendung besonders beachtet werden, wenn die Wärmekraftmaschine sehr lange Stillstandszeiten aufweist.

Anhand dieser Daten konnten nun also die Drähte mit der größtmöglichen Verkürzung ausgewählt und so in die Einspannteile eingepreßt werden, daß sie alle bei einer Temperatur von 95 °C eine gleich kurze Länge in ihrem austenitischen Zustand erreichen können. Auf diese kurze Länge wurden die Drähte dann in die Wärmekraftmaschine einzeln eingebaut und der Antrieb einmal von Hand durchgedreht. Die wirksame Länge der Arbeitsdrähte in der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine P 2 war dadurch knapp über einem Meter: 1015 mm.

3.5 Arbeiten zur Verwendung von Drahtbündel

Bei der Durchführung dieses Forschungsprojektes erfolgten auch viele Gedanken im Sinne einer Weiterentwicklung des Schrägscheibenantriebs. Einige dieser meist nur als theoretische Weiterentwicklung erfolgten Ideen wurde aber auch durch kleinere Voruntersuchungen und Tests praktisch erforscht und teilweise umgesetzt. Einer der vielleicht interessantesten Ansätze soll in stark verkürzter Form hier vorgestellt werden.

Dieser Ansatz basiert auf der Tatsache, daß die mechanische Leistung des Schrägscheibenprinzips bei einem als konstant angenommenen Drehmoment ausschließlich von der Drehzahl abhängt. Je höher die Drehzahl bei diesem angenommenen Moment,

63

desto höher ist die Abgabeleistung des Antriebs. Dünne Drähte lassen sich aufgrund des günstigeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses wesentlich schneller erwärmen bzw. abkühlen als dickere Drähte; Allerdings sind die bei der Verkürzung auftretenden Zugspannung aufgrund der kleineren Querschnittsfläche auch wesentlich geringer. Da die Lebensdauer des Schrägscheibenmotors auch stark abhängig von der maximal erreichbaren Zahl der Umwandlungszyklen der Arbeitsdrähte abhängt, wurden in der bisherigen Wärmekraftmaschine die relativ dicken 1 mm Drähte eingesetzt. Das Oberlächen-Volumen-Verhältnis ist dort für den Wärmeübergang sehr viel schlechter, jedoch noch ausreichend gut, daß noch eine Drehbewegung erfolgt. Dadurch bewirken die großen Zugspannungen ein hohes Moment und es könnte trotz niederer Drehzahl eine ordentliche Leistung erreicht werden. Zwar bedingen die hohen Momente eine recht stabile Rahmenkonstruktion und entsprechend aufwendige Lagerungen, aber durch die langsamen Drehzahlen mit den damit verbundenen niedrigeren Umwandlungszyklen pro Einsatzdauer, kann von einer sehr viel höheren Einsatzdauer des Schrägscheibenantriebs ausgegangen werden.

Nachdem bei den ersten Testläufen der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine nur sehr kleine Leistungen ermittelt wurden und darüber hinaus auch ein erforderlicher Rundlauf nur kurzzeitig erreicht werden konnte, sollte das Verwenden von vielen dünnen Drähten das angestrebte Ziel erreichen lassen. Um nicht die komplette Konstruktion des bestehenden Prüfstandes ändern zu müssen, sollten anstelle der 1 mm Zugdrähte entsprechende Drahtbündel eingesetzt werden, die in der Summe ihrer Einzelquerschnitte auf etwa denselben Wert kommen sollten, wie die bisherigen FG-Drähte mit 1 mm Durchmesser. Dadurch sollten auch ein Vergleich der beim Einsatz von Drahtbündel zu messenden Werten bezüglich Drehzahl, Drehmoment und Wasserverbrauch mit den bisherigen Werten möglich gemacht werden.

Nach einer umfangreichen Recherche mußte leider festgestellt werden, daß die über verschieden Drahthersteller beziehbaren Drahtbündel sogenannte Litzenbündel sind. Dabei sind die dünnen Drähte nicht exakt parallel geführt, sondern aufgezwirbelt und verdreht. Am Ende sind sie miteinander verlötet. Versuche an einigen Mustern hatten zum Ergebnis, daß nur eine minimal verbesserte Erwärmung bzw. Abkühlung gemessen werden konnte und bei höheren Belastungen einzelne Drähte aus der Preßhülse am Litzenbündelende rutschten. Durch die verdrehten Drähte war gegenüber dem 1 mm Draht auch nur eine sehr geringe Oberflächenerhöhung erreicht worden, außerdem

64

wurden die innen liegenden Drähte nur ungenügend erwärmt bzw. abgekühlt, so daß auch die Zugkräfte weit unter den Werten des 1 mm Drahtes lagen.



Abb. 3.5.1: Probe eines Drähtbündels mit verlöteten Drahtenden

Aufbauend auf eigene Erfahrungen früherer Löt- und Klebeversuche von FGL wurde dann versucht, aus dünneren FG-Drähten selbst einbaufähige Drahtbündel zu fertigen. Zu diesem Zweck wurden fünf FG-Drähte mit dem Durchmesser 0,38 mm verwendet. Nachdem weder die Klebeversuche, noch die Lötversuche Erfolg zeigten, sollten durch ein kombiniertes Löt- und Klebeverfahren die fünf Drähte befestigt werden. Es wurden viele verschiedene Verbindungsarten gefertigt und in der Zugprüfmaschine auf deren Zugfestigkeit geprüft. Den größten Erfolg – auch bezüglich einer deutlich schnelleren Erwärmung und Abkühlung - versprach die nachfolgend dargestellte Verbindung, in der die fünf Drähte durch einzeln parallel geführt werden, durch separate Bohrungen in eine Hülse münden, dort durch ein spezielles Lötverfahren (Nitinol Flux 400 der Firma Shape Memory Applications, Inc.) miteinander verbunden werden und das komplette Ende mit Epoxidharz (Demotec 35) in der Hülse verklebt wird.



Abb. 3.5.2: Drahtbündel mit verlöteten Enden vor dem Einkleben in ein Hülse

Die Ergebnisse der Zugversuche ergaben jedoch, daß selbst mit dem kombinierten Löt-Klebe-Verfahren in Verbindung mit einer Befestigungshülse zu geringe Zugkräfte erreicht werden. Der mit 299 N als höchste Maximalkraft ermittelte Wert vor dem Herausgleiten des ersten Drahtes aus der Verbindung ist immer noch viel zu gering, als daß er als mögliche Alternative in der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine eingesetzt werden könnte. Deshalb wurde diese Idee der Leistungserhöhung des Antriebes durch das Ersetzten der 1 mm FG-Drähte durch mehrere als Drahtbündel gepaarte dünne Drähte in diesem Forschungsprojekt nicht mehr weiter verfolgt.

3.6 Meßwerterfassung / Sensorik

Für die Meßwerterfassung wurde ein Multifunktionsmeter PREMA 8017 mit zugehöriger Software verwendet.

Es wurden die nachstehenden Meßwerte aufgenommen:

- Drehzahl der Wärmekraftmaschine in Hertz bzw. 1/min
- Drehmoment der Wärmekraftmaschine in Nm
- Temperatur des Wassers in Tauchbad und Wassertank in Grad Celsius
- Durchfluß der Warmwassermenge an der Pumpe in m³/h



Abb. 3.6.1: PREMA 8017 Multifunktionsmeter und Betriebssoftware

Da die Wärmekraftmaschine mit 60 Drähten bestückt wurde und jeder Draht beim Vorbeigehen am Drehzahlsensor einen Impuls gab, entsprach der aufgenommene Frequenzwert auch der Drehzahl in 1/min. Abbildung 3.6.2 zeigt die Gesamtanordnung des Prüfstandes mit den Stellen der Meßsensoren.



Abb. 3.6.2: Gesamtansicht des Prüfstandes mit Meßwerterfassungssystem

Wie schon an anderer Stelle erwähnt wurde dieses Meßwerterfassungssystem erst in der Schlußphase des Projektes für jeden Meßwertsensor komplementiert. Davor erfolgte die Aufnahme der nicht automatisch erfaßten Meßwerte über analoge Meßgeräte und das manuelle Eintragen in eine Liste.

Zur Aufnahme des Drehmomentes war zum einen eine Kallibrierung des Sensors über das Anhängen von Gewichten bei arretierter Maschine (Abb. 3.6.3) als auch das Abbremsen des Schrägscheibenmaschine durch die Trommelbremse oder die Reibbandbremse (Abb. 3.6.4) erforderlich.







Abb. 3.6.4: Anordnung der Reibbandbremse und Darstellung der Geometrie

3.7 Metallographische Untersuchungen der Drahtbrüche

Während der Projektlaufzeit rissen bei der Durchführung von Testläufen zahlreiche Drähte. Auf die Ursachen und Art der Brüche soll in diesem Kapitel detailliert eingegangen werden, weil für die geplante Anwendung die Betriebssicherheit und erreichbare Zyklenzahl der Arbeitselemente von großer Wichtigkeit sind.

3.7.1 Drahtbrüche am Wärmekraftmaschinen-Prüfstand

Ein Einbaudraht im Prüfstand der Wärmekraftmaschine besteht aus einer Schraubverbindung an der Schrägscheibe (Abb. 3.7.1), einem Stück Federstahldraht zur Überbrükkung bis nach der Stützscheibe, einer Übergangspreßhülse als Zwischenverbindung zum FG-Draht (Abb. 3.7.2), dem Arbeitselement FG-Draht und dem Einpreßstift mit Längenausgleich zur Befestigung an der Geradscheibe (Abb. 3.7.3). Der FG-Draht hat einen Durchmesser von 1 mm, weist einen Einwegeffekt auf und wurde über den deutschen Hersteller Memory-Metalle GmbH bezogen. Der zu Beginn der Arbeiten verwendete Stahldraht hatte eine Durchmesser von 1 mm, wurde aber dann gegen einen qualitativ viel hochwertigeren Stahldraht der Qualität 1.4435 (kaltverfestigt) ausgetauscht, der ebenfalls einen Durchmesser von 1,0 mm aufweist.



Abb. 3.7.1: Schraubverbindung an Schrägscheibe



Abb. 3.7.2: Zwischenverbindung



Abb. 3.7.3: Einpreßstift mit justierbarem Längenausgleich

Eine komplette Anordnung zeigen auch die Abbildungen 3.7.4 und 3.7.5.





Abb. 3.7.4: Kompletter Einbaudraht



Abb. 3.7.5: Skizze über die Anordnung des Einbaudrahts

Während den Versuchsreihen erfolgten die Drahtbrüche im Bereich des Stahldrahtes gegenüber dem Bereich des FG-Drahtes mit einer ca. dreifachen Häufigkeit. Die Bruchstelle war vorwiegend zwischen der Schraubverbindung und Schrägscheibe. Der Grund hierfür liegt wohl in den häufigen Lastwechsel und der aus der Wechselbiegebelastung resultierenden Kaltverformung des Stahldrahtes. Da der Einbaudraht bei Betrieb der Prüfanlage ständig auf Zug beansprucht wird, erfolgt bei jeder Umdrehung aufgrund der Schrägstellung der Scheibe eine Wechselbiegebelastung durch das Taumeln der

Schraubverbindung auf der Schrägscheibe. Für die Untersuchung der Bruchart und des Bruchgrundes wurden folglich sowohl Stahlbruchproben als auch FG-Drahtbruchproben untersucht. Die sechs im Rasterelektronenmikroskop (REM) genauer untersuchten Drahtproben sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet. Während die Stahldrähte alle an der gleichen Stelle brachen (kurz vor der Einspannung) wurden bei den FG-Drähten Bruchproben in der Mitte des Drahtes und auch nahe der Einpreßstelle ausgewählt. Die Tabelle gibt außerdem für einige Proben die Mindestzahl der erfahrenen Lastwechsel an.

Proben-Nr.	Versuchs-Nr.	Probenart /	Mindest-Last-	
		Stelle des Bruchs	wechselzahl	
1	011024	FGL / nahe der Einspannung	?	
2	V011025A	FGL / Mitte	?	
3	V011025C	FGL / Mitte	Ca. 10 ⁴	
4	V011025C	Draht / Einspannung	?	
5	V011025C	Draht / hinter Einspannung	Ca. 10 ³	
6	V011025A	Draht / hinter Einspannung	?	

Tabelle 3.7.6: Tabelle der Drahtproben

Die verschiedenen Drähte wurden nebeneinander in einer Spannvorrichtung fixiert, im Ultraschallbad gereinigt und anschließend auf der Spannvorrichtung numeriert, damit sie später im REM auseinandergehalten werden konnten.



Abb. 3.7.8: Spannvorrichtung der Bruchproben

Die folgenden mikroskopischen REM-Aufnahmen sind in der Reihenfolge der Probennummern aufgeführt. Grundsätzlich ist bei den FG-Drähten die Schwingbruch- und Restbruchfläche schwer zu erkennen bzw. zu unterscheiden.



Abb. 3.7.9: Drahtprobe Nr. 1

Im Abb. 3.7.9 der Probe 1 ist ein FG-Draht zu sehen der unmittelbar hinter einer Pressung gebrochen ist. Die glatte Bruchfläche kann auf einen Dauerbruch hinweisen. Der Ursprung des Bruches ist im unteren Teil des Bildes zu erkennen (AP). Anhand der Richtung der Linien vom Ausgangspunkt ist zu erkennen, daß sich der Bruch weiter in den oberen Bereich entwickelt hat. Die Unterscheidung zwischen Schwing- und Restbruchfläche ist kaum zu erkennen.



Abb. 3.7.10: Drahtprobe Nr. 2, 80-fache Vergrößerung

Auch bei dieser Probe kann aufgrund der geraden Form des Bruches auf ein Dauerbruch geschlossen werden. Der Ausgangspunkt des Bruches beginnt scheinbar am Ri-
ßende (Abb. 3.7.11). Der Riß zieht sich längs durch den gesamten Werkstoff und deutet auf einen produktionsbedingten Werkstoffehler hin (Abb. 3.7.12).



Abb. 3.7.11: Drahtprobe Nr. 2, 200-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.12: Drahtprobe Nr. 2. 20-fache Vergrößerung

Probe 3 deutet wie bei den vorangegangenen Proben aufgrund des glatten Bruchoberfläche auf einen Dauerbruch hin. Auch hier ist ein Riß im Werkstoff zu erkennen. Der Ausgangspunkt ist jedoch im Gegensatz zu den anderen Proben nicht beim Schlitz, sondern auf der gegenüberliegenden Seite. Der Schwingbruch kann im Bereich A und der Restbruch im Bereich B gesehen werden.



Abb. 3.7.13: Drahtprobe Nr. 3. 80-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.14: Drahtprobe Nr. 3, Ausgangspunkt, 2000-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.15: Drahtprobe Nr. 3, Schwingbruchfläche, 2000-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.16: Drahtprobe Nr. 3, Restbruchfläche, 2000-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.17: Drahtprobe Nr. 3, Riß, Frontansicht, 2000-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.18: Drahtprobe Nr. 3, Riß, Längsansicht, 2000-fache Vergrößerung

Bei den Stahldrähten (Abbildungen 3.7.19 bis 3.7.21) sind die typischen Bruchmerkmale von Stahl zu erkennen. Die Restbruchfläche (B) ist deutlich zu sehen. Daraus kann der Ausgangspunkt (AP) ersehen werden. Die Stahldrahtbrüche weisen alle eine Einschnürung auf, welche auf eine starke Belastung deuten läßt. Bei den Stahldrähten war die Laufzeit, bzw. Lastwechsel zwischen 15 000 und 36 000 Zyklen.



Abb. 3.7.19: Drahtprobe Nr. 4, 80-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.20: Drahtprobe Nr. 5, 80-fache Vergrößerung



Abb. 3.7.21: Drahtprobe Nr. 6, 80-fache Vergrößerung

Schlußfolgerung

Während den Versuchen mußten die Stahldrähte etwa dreimal so oft ausgewechselt werden, wie die FG-Drähte. Um den Draht in die Wärmekraftmaschine einzuspannen, wurden die Stahldrähte in einer rohrförmigen Befestigung verschraubt. Diese Schraubverbindung lag mit der abgerundeten Spitze direkt in einer pfannenförmig ausgebildeten Kuhle auf der Schrägscheibe auf. Der Draht ist aufgrund der Zugspannung zwar bestrebt, die Horizontale zu bewahren und in der Scheibe hin und her zu taumeln. Bei hohem Anpreßdruck und schlechten Gleiteigenschaften des Stiftes auf der Scheibe ist dieses Ausgleichen jedoch teilweise oder auch ganz verhindert und der Draht erfährt bei Rotation direkt vor der Halterung eine Wechselbiegebelastung. Dadurch wird der Draht kaltverformt. Hinzu kommt die Reibung des Stahldrahtes an der Schrägscheibe. Die Stahldrähte brachen alle hinter der Einspannung.

Die FG-Drähte hingegen brachen wenn überhaupt überwiegend in der Mitte. In dieser Untersuchung liegt der Grund sehr wahrscheinlich in einem produktionsbedingten Materialfehler. Bei der Verwendung von besserem FG-Drahtmaterial ist zu erwarten, daß sich die Zahl der Drahtbrüche erheblich verringern läßt. Eine längere Haltbarkeit des kompletten Einbaudrahtes kann eventuell dadurch erlangt werden, indem man bei zukünftiger Bestückung auf das Übergangsstück aus Stahl verzichtet und direkt das FG-Material von dem Einpreßstift der Geradscheibe bis zur Einschraubverbindung an der Schrägscheibe führt. Bei der Tauchbadanordnung würde sich dadurch außerdem die wirksame Länge erheblich verlängern und eine zusätzliche Leistungserhöhung wäre wahrscheinlich.

3.7.2 Drahtbrüche am Wärmekraftmaschinen-Modell

Neben dem Prüfstand der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine existiert auch ein kleineres Demonstrationsmodell (Abb. 3.7.22), das ebenfalls auf dem Schrägscheibenprinzip beruht und im Tauchbadbetrieb mit warmem Wasser und kalter Luft betrieben wird. Darin werden 30 NiTiCu-Drähte mit einem Durchmesser von 0,43 mm des belgischen Herstellers A.M.T.b.v. mit einem Zweiwegeffekt entsprechend der (Abb. 3.7.23) befestigt. Dieses Modell wurde über mehrere Jahre im Werkstoffprüflabor im Rahmen von Forschungsarbeiten betrieben und zu Demonstrationszwecken auf vielen Messen vorgeführt. Die exakten Zyklenzahlen wurden dabei nicht erfaßt. Es läßt sich jedoch sagen, daß die untersuchten Drähte weit über 1000 Lastwechsel im Einsatz waren. Im Laufe des Betriebs kam es vor allem nach der Ausstellung auf der ACHEMA-Messe in Frankfurt an verschiedenen Stellen (Abb. 3.7.23) der FG-Drähte zum Bruch. Im nachfolgenden wurden diese Brüche genauer untersucht um eine Aussage bzgl. der Bruchursache machen zu können und mit den vorangegangenen Draht am Prüfstand vergleichen zu können.



a)

b)

Abb. 3.7.22: Wärmekraftmaschinen-Modell, a) Stillstand; b) im Betrieb



Beschreibung der Belastung

Fall 1: - Zugschwellbelastung

- Bruch in Drahtmitte (Name: Achema 1)

Fall 2: - zusätzlich statische Druckbelastung quer zur Zugschwellbelastung

- Bruch an Einspannung der Anpreßschrauben

Fall 3: - zusätzlich ist Reibbeanspruchung an der Oberfläche und dynamische Schubbeanspruchung quer zur Drahtachse nicht auszuschließen (Die Höhe der Schubbeanspruchung ist als gering einzuschätzen)

- Bruch im Bereich der Bohrung der Schrägscheibe

Dauerbrüche an FG-Drähten des Wärmekraftmaschinen-Modells

Die im folgenden beobachteten makroskopischen Bruchformen (200-fache Vergrößerung in Anbetracht der Bauteilgröße) zeigen ein Bild, wie es für einen Dauerbruch bei metallischen Legierungen typisch ist. Der Dauerbruch verläuft senkrecht zur Richtung der größten Zug-Normalspannung und zeigt insgesamt keine nennenswerte plastische Bauteildeformation.

Der Ausgangspunkt des Dauerbruches ist makroskopisch teilweise erkennbar. Die bei Stahl oft zu sehende makroskopische Einteilung des Dauerbruches in zwei Zonen mit Schwingbruchfläche und Restbruchfläche läßt sich hier nicht ohne weiteres vornehmen. Zum einen zeigt die Schwingbruchfläche nicht die typischen Rastlinien, zum anderen lassen sich beide Zonen schwer voneinander abgrenzen. Allerdings ist eine Einteilung in Schwingbruchfläche und Restbruchfläche mikroskopisch bei höherer Vergrößerung (2.000-10.000-fach) möglich. Dies verdeutlichen die folgenden drei Fälle anhand von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen.

Fall 1 (Name: Achema 1)



Abb. 3.7.24: Fall 1. Übersicht. 200-fach.



Abb. 3.7.25: Fall 1. Bereich A. 2000-fach.



Bild 3.7.26 Fall 1. Bereich B. 2000-fach.

Die Bilder 3.7.24, 3.7.25, 3.7.26 beschreiben den Dauerbruch aus Fall 1. Makroskopisch läßt sich weder der Ausgangspunkt, noch eine Einteilung der Bruchfläche bestimmen. Mikroskopisch kann man den Dauerbruch in eine Schwingbruchfläche (Bereich A, Bild 3.7.24, 3.7.25) und eine Restbruchfläche (Bereich B, Bild 3.7.24, 3.7.26) einteilen, wobei die Anteile jeweils ungefähr 50% der Gesamtbruchfläche ausmachen. Die Schwingbruchfläche (Bild 3.7.25) zeigt mikroskopisch keine Schwingungslinien, wie man sie gelegentlich bei Stahl beobachtet und macht aufgrund der entstandenen Hohlräume einen "porösen" Eindruck. Bei der Restbruchfläche (Bild 3.7.26) handelt es sich um einen duktilen Gewaltbruch mit der typischen Wabenstruktur, wie man sie von anderen metallischen Legierungen her kennt. Fall 2 (Name: Achema 4)



Bild 3.7.27 Fall 2. Übersicht. 200-fach



Bild 3.7.28 Fall 2. Der Ausgang des Dauerbruches



Abb. 3.7.29: Fall 2. Bereich A. 2000-fach



Abb. 3.7.30: Fall 2. Bereich B. 2000-fach

Die Bruchstrukturen aus Fall 2 (Abbildungen 3.7.27 bis 3.7.30) ähneln denen aus Fall 1. Der Bruchausgangspunkt AP (Abb. 3.7.27 und Abb. 3.7.28) kann hier makroskopisch bestimmt werden, da sich parallel vom Bruchausgangspunkt in Richtung Rißfortschritt eine gröbere Struktur (eine Art Stufenbildung) zeigt, wie man sie teilweise auch bei anderen metallischen Legierungen beobachten kann. Für die Auslösung eines Dauerbruches ist Kerbwirkung verantwortlich. Im vorliegenden Fall 2 kommt eine sogenannte geometrische Kerbe (Bruchausgangspunkt AP, Abb. 3.7.28) in Frage, die zum Beispiel durch Korrosion im Betrieb entstanden sein könnte. Zusätzlich wirkt in diesem Bereich des Drahtes eine sogenannte Belastungskerbe, da an dieser Stelle durch Anpreßschrauben Kräfte eingeleitet werden. Mikroskopisch erkennt man bei 2000-facher Vergrößerung die Schwingbruchfläche (Abb. 3.7.29) und die anteilsmäßig kleinere Restbruchfläche (Abb. 3.7.30).

Fall 3 (Name: Achema 5)



Abb. 3.7.31: Fall 3. Übersicht. 200-fach



Abb. 3.7.32: Fall 3. Bereich A. 2000-fach



Abb. 3.7.33: Fall 3. Bereich B. 2000-fach



Bild 3.7.34 Fall 3. Bereich A. 5000-fach



Bild 3.7.35 Fall . Bereich A. 10000-fach



Abb. 3.7.36: Fall 3. Bereich B. 5000-fach



Abb. 3.7.37: Fall 3. Bereich B. 10000-fach

Die Bruchstruktur aus Fall 3 (Abbildungen 3.7.31 bis 3.7.37) gleicht den vorherigen Fällen. Eine gröbere Stufenbildung deutet den Bruchausgangspunkt AP an (Abb. 3.7.31). Die Schwingbruchfläche befindet sich im Bereich A (Abbildungen 3.7.32, 3.7.34 und 3.7.35). Neben der auffällig "porösen" Struktur zeichnen sich Sekundärrisse (Abb. 3.7.32, 3.7.34) ab. Sekundärrisse und fehlende Schwingungslinien sind unter anderem auf der Schwingbruchfläche von höherfesten Stählen zu finden. Die Restbruchfläche (Abbildungen 3.7.33, 3.7.36 und Abb. 3.7.37) zeigt die bekannte Wabenstruktur.

Gewaltbrüche an FG-Drähten im Labor erzeugt

Um die an FG-Drähten im Betrieb aufgetretenen Brüche besser einordnen zu können, wurden an zwei ungebrauchten (neuen) FG-Drahtstücken zwei "Vergleichsbrüche" erzeugt.

Zugversuch (Name:Z1)

Die Bruchstruktur (Abbildungen 3.7.38 bis 3.7.41) zeigt einen Gleitbruch.



Abb. 3.7.38: Z1. Übersicht. 200-fach



Abb. 3.7.39: Z1. Bereich A. 2000-fach



Abb. 3.7.40: Z1. Bereich A. 5000-fach



Abb. 3.7.41: Z1. Bereich A. 10000-fach

Gewaltbruch bei reiner Schubbeanspruchung (Name: S2)

Für einen Gewaltbruch unter Schubbeanspruchung wurde der FG-Draht abgeschnitten (mit Seitenschneider abgezwickt). Der Draht zeigt insgesamt ein duktiles Verhalten, er hat sich makroskopisch plastisch verformt (Abb. 3.7.42). Bei Bereich A sieht man eine Eindellung, die durch eine Schneide verursacht wird. Bei Bereich B handelt es sich um den durch die Gegenschneide abgescherten Bereich. Mikroskopisch erinnert Bereich B (Abbildungen 3.7.43 und 3.7.45) an eine auf Reibverschleiß beanspruchte Oberfläche, wobei teilweise duktile Wabenstrukturen vorhanden sind. Eine kleinerer Bereich C bricht als reine Wabenstruktur (Abb. 3.7.44).



Abb. 3.7.42: S2. Übersicht. 200-fach



Abb. 3.7.43: S2. Bereich B. 2000-fach



Abb. 3.7.44: S2. Bereich B. 5000-fach



Abb. 3.7.45: S2. Bereich C. 2000-fach

3.8 Berechnung wichtiger Bauteile über die Finite Elemente Methode

Im Rahmen der Konstruktion für den Neubau P 1 wurden alle wichtigen Teile des Schrägscheibenantriebs auch mit der Finiten Elemente Methode durchgerechnet. Damit wurden zunächst die Sicherheitsreserven der Bauteile überprüft. Durch das sinnvolle Anpassen dieser Sicherheitsreserven konnte dann bei vielen Teilen eine erhebliche Dimensionsreduktion vorgenommen werden, was zum einen zu weniger bewegten Massen und damit Verlusten führte, zum andern aber auch die wirksame Länge der FG-Drähte erhöhte.

Eine detaillierte Darstellung aller berechneten Teile macht in diesem Bericht ebenso keinen Sinn, wie die Abbildung der Konstruktionszeichnungen aller Teile bei dem Kapitel der dargestellten Umbau- und Neubaumaßnahmen (Kap. 3.2). Dennoch soll hier der Versuch gemacht werden, anhand des Beispiels der Schrägscheibe das Vorgehen der Berechnung zu verdeutlichen.

Die Schrägscheibe wurde wie alle anderen Scheibe mit fünf verschiedenen Lastfällen durchgerechnet. Die Schrägscheibe besteht in diesem Fall aus den drei Einzelteilen (Geometrie der Scheibe siehe Zeichnungs-Nr.: 1001.18, 1001.19, 1001.20), die miteinander verschraubt werden. Sie werden in dieser Berechnung als ein Teil betrachtet.



Abb. 3.8.1: Kraftangriffspunkte an der Schrägscheibe

Auf der Warmseite ist die Belastung mit maximal 500 N pro Draht angenommen, auf der Kaltseite mit 100 N pro Draht. Bei der Berechnung werden nachfolgende fünf Fälle unterschieden:

Lastfall 1 : Warmseite 500 N, Kaltseite 100 N. \Rightarrow maximale Deformation: 0,3mm Lastfall 2 : Warmseite 450 N, Kaltseite 100 N. \Rightarrow maximale Deformation: 0,27 mm Lastfall 3 : Warmseite 400 N, Kaltseite 100 N. \Rightarrow maximale Deformation: 0,23 mm Lastfall 4 : Warmseite 350 N, Kaltseite 100 N. \Rightarrow maximale Deformation: 0,2 mm Lastfall 5 : Warmseite 300 N, Kaltseite 100 N. \Rightarrow maximale Deformation: 0,16 mm



Diagramm 3.8.2: Die fünf Belastungsfälle über der Deformation.

Die Berechnung wurde mit dem Programm ANSYS an der FH- Konstanz durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt beispielsweise die Darstellung für den Belastungsfall 4.



Abb. 3.8.3: ANSYS-Darstellung, Fall 3, von blau nach rot Deformation in mm

Der Spannungsverlauf im Bauteil für die fünf Belastungsfälle wird dabei folgendermaßen dargestellt:

	x – Richtung		y – Richtung		z – Richtung	
F [N]	Druck	Zug	Druck	Zug	Druck	Zug
	[N/mm ²]					
300	-30	24	-42	45,8	-21,8	12,5
350	-37	28	-51	55	-26,5	15
400	-44	34	-59,8	64,6	-31	17,6
450	-51	40	-70,4	76	-36,6	20,8
500	-57	44	-83,5	83,5	-40	22,9

Tabelle 3.8.4: Wertetabelle für die Spannungen im Bauteil



Abb. 3.8.5: Spannungen in positiver und negativer x-, y- und z-Richtung

Die Zwischenwerte für die Druck- bzw. Zugspannung lassen sich aus den jeweiligen Geradengleichungen berechnen. Für Linie 1 ist die Spannung (y – Wert):

y = -0,136x + 10,6, für x ist dann die Kraft einzusetzen.

Linie 2: $y = 0,104x - 0,76$,	
Linie 3: y = - 0,2048x + 20,58	Linie 4: y = 0,1928 x - 12,14
Linie 5: y = - 0,093x + 6,02	Linie 6: y = 0,0532x - 3,52

Beispiel: Linie 4 , Ermittlung der Spannung in y – Richtung , mit F = 360 N y = $0.1928 \cdot 360 - 12.14 = 57,268 \text{ N/mm}^2$

Auch hier ist zu sehen, daß die Maximalspannungen sich an den Einkerbungen befinden.



Abb. 3.8.6: ANSYS-Darstellung, Fall 3, von blau nach rot Spannung in N/mm²



Abb. 3.8.7: ANSYS-Darstellung, Fall 1, von blau nach rot Misesvergleichspannung in N/mm²



Abb. 3.8.8: ANSYS-Darstellung, Fall 3, von blau nach rot Misesvergleichspannung in N/mm²

Scheibendicke (1001.18)	10 mm	
Lastfall-Nr.	Deformation [mm]	Spannung [N/mm²]
1 mit 500 N/Draht	0,3	Druck: -77,5 σ _V : 125,5 Zug: 83,5
2 mit 450 N/Draht	0,27	Druck: -70,4 σ _V : 113,8 Zug: 76
3 mit 400 N/Draht	0,23	Druck: 59,8 σ _V : 96,2 Zug: 64,6
4 mit 350 N/Draht	0,2	Druck: -51 σ _V : 82 Zug: 55
5 mit 300 N/Draht	0,16	Druck: -42 σ _V : 67 Zug: 45,8

Tabelle 3.8.9: Die Werte zu den 5 Lastfällen

Anmerkung: Das Diagramm mit der Deformation ist in Abb. 3.8.3 dargestellt, das Diagramm mit den Spannung in x-Richtung in Abb. 3.8.6. Schlußbetrachtung:

Die größte Durchbiegung der Scheibe (15 mm) beträgt bei einer Kraft zwischen 300 N pro Draht und 500 N pro Draht 0,16 mm bis 0,3 mm.(siehe Abb. 3.8.3). Die Durchbiegung auf der Kaltseite wurde mit 100 N pro Draht berechnet und ist gegenüber der Warmseite mit 0,008 mm vernachlässigbar. Die Spannung in y-Richtung erreicht an der Stelle der Einkerbung (siehe Abb. 3.8.6) die Maximalwerte. Damit konnte sichergestellt werden, daß auch die neue Schrägscheibe in ihrer Dimensionierung den im Schrägscheibenantrieb auftretenden Belastungen standhält.

3.9 Konstruktion verschiedener Demonstrationsmodelle

Während der Projektlaufzeit entstanden auch verschiedene Modell zur Demonstration des FG-Effekts und des Schrägscheibenprinzips. Ein kleines Modell einer Wärmekraftmaschine wurde schon in vorhergehenden Projekten konzipiert, innerhalb der Projektlaufzeit dieses Forschungsprojektes jedoch ebenfalls weiterentwickelt. Eine Abbildung dieser Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine, die mit Zweiwegeffekt-Arbeitsdrähten aus NiTiCu durch ein erwärmtes Wasserbad und der Umgebungsluft angetrieben wird, zeigt Abb. 3.7.22.

Innerhalb dieses Projektes wurde auch ein Demonstrationsmodell konzipiert und gebaut, das zwar nicht das Schrägscheibenprinzip zeigt, dafür jedoch sehr eindrucksvoll die Funktionsweise der FG-Effektes veranschaulicht (Abb. 3.9.1). Dieses neue Modell für besteht aus einer Grundplatte aus Holz, die als Abstandsfixierung dient. Die beiden Aluminiumklötze sorgen zum einen für die nötige Bodenfreiheit, zum anderen erfolgt durch sie über direkten Anschluß die Stromversorgung. In der einen Fixierung ist der Draht fest eingespannt, auf der anderen Seite wird er über eine Umlenkrolle aus Messing geführt. An diesem Ende des Drahtes hängt ein Gewicht. Bei Bestromung des Drahtes mit ca. 10 V / 1 A erfolgt durch die Joulsche Erwärmung eine Temperaturerhöhung im Draht. Sobald die Phasenumwandlung vom martensitischen in den austenitischen Zustand erfolgt, baut sich eine Zugspannung im Draht auf, die dann so groß ist, daß dieses angehängte Massestück um ca. 3 cm angehoben wird. Sobald die Stromzufuhr unterbrochen wird, kühlt die Umgebungsluft diesen Draht wieder ab, er wandelt in den martensitischen mit den kleineren Zugspannungen um und folglich reicht die Gewichtskraft des angehängten Massestückes aus, diesen Draht wieder langsam zu

97

dehnen. Die Geschwindigkeit, mit der das Massestück angehoben wird, läßt sich über die Stromzufuhr regeln.



Abb. 3.9.1: Messemodell: Drahtmodell

In diesem Demonstrationsmodell erfolgt die Erwärmung des Drahtes zwar durch ein Netzgerät, doch der mit einer Sonne beklebte Betätigungsschalter läßt darauf schließen, daß die Umwandlung des Arbeitsdrahtes auch über sonnenerwärmte Medien ausgelöst werden kann. Aufgrund des Vorteils, daß sich dieses Modell jedoch sehr leicht transportieren läßt und sich damit dennoch sehr eindrucksvoll der FG-Effekt und damit auch das Antriebsprinzip einer Wärmekraftmaschine erklären läßt, konnte es bei sehr vielen Gelegenheit zur Demonstration eingesetzt werden.

3.10 Demonstrationsfilm: Betrieb der Wärmekraftmaschine

An dem Prüfstand der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine P 2 mit Tauchbadprinzip wurden viele der Testläufe mit einer Videokamera aufgenommen. Es wurden außerdem Filme beim Betrieb der Demonstrationsmodelle gedreht. Innerhalb der nächsten Zeit soll im Rahmen einer Studienarbeit versucht werden, aus diesem Videofilmmaterial einen kleinen Demonstrationsfilm zusammenzustellen. Dieser soll in einem weiteren Schritt ganz oder auch nur teilweise ins Netz gestellt werden, damit es in Zukunft möglich sein wird, von der Webseite dieses Forschungsprojektes aus die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine in Aktion zu sehen.



Abb. 3.10.1: Detailansicht der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine im Betrieb

3.11 Status Quo: Prüfstand der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine

Da innerhalb dieses Forschungsprojektes mehrere Weiterentwicklungen und sehr viele konstruktive Änderungen an dem Prüfstand der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine durchgeführt wurden, soll in diesem abschließenden Kapitel der letzte Stand kurz zusammengefaßt werden:

Der Prüfstand P 2 ist eine Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine im Tauchbadbetrieb mit erwärmtem Wasser und ventilatorgeführter Umgebungsluft. Die 60 Arbeitsdrähte sind auf einem Wirkkreis von 397 mm gleichmäßig verteilt und weisen eine wirksame Länge von 1015 mm auf. Auf der Geradscheibe sind die 1 mm dicken FG-Drähte der Legierung NiTiCu in ein 3 mm starkes Längenausgleichstück mit Feder eingepreßt. Auf der Gegenseite sind die FG-Drähte durch Übergangsstücke mit ca. 22 cm langen Edelstahldrähten des gleichen Durchmessers 1 mm verpreßt , welche ihrerseits in Endstükke mit rund geformter Auflagefläche verschraubt sind. Vor dieser Schrägscheibe befindet sich noch eine Stützscheibe, welche die Mittelwelle lagert. Die Schrägscheibe läßt Winkeleinstellungen in horizontaler und vertikaler Lage bis zu 12, 5 bzw. 15 Grad zu und ist mit der Mittelwelle über ein Kardangelenk verbunden. Unter der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine befindet sich der ca. 500 Liter fassende Behälter für das Warmwasser (der Kaltwasserbehälter wird derzeit nicht verwendet). Die Erwärmung erfolgt über drei elektrisch betriebene Heizstäbe mit je 10 kW Heizleistung. Das Warmwasser wird über eine elektrisch betriebene Pumpe in das Tauchbad geführt. Der Ablauf erfolgt durch die jeweilige Einstellung am Kugelhahnventil zurück in den Wärmebehälter. Bei Maximalbefüllung beträgt der Wasserstand im Tauchbad 19 cm. Die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine kann wahlweise durch eine Trommelbremse oder eine Reibbandbremse abgebremst werden. Beim Betrieb des Prüfstands werden die Werte Wassertemperatur, Wasserdurchfluß an der Pumpe, Drehzahl und Drehmoment über die automatische Meßwerterfassung und die Meßsoftware auf den angeschlossenen Rechner übertragen. Die Wasserhöhe im Tauchbad muß allerdings noch im Wasserstandsrohr abgelesen werden. Eine Prinzipskizze des Prüfstandes zeigt die Abb. 3.11.1.



Abb. 3.11.1: Prinzipskizze des Prüfstandes der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine

Mit diesem Prüfstand wurden Drehzahlen bis zu 80 Umdrehungen pro Minute erreicht, wobei die maximale Leistung von 63 Watt sowohl bei der Dehnrate von 3,15 %, als auch bei der Dehnrate von 4,5 % bei einer Drehzahl von 50 Umdrehungen pro Minute ermittelt wurden. Dabei betrugen die Temperatur des Warmwassers 85 °C, die der Umgebungsluft 22 °C, der Wasserdurchsatz im Tauchbad 2 m³/h und die Wasserstandshöhe 11 cm.



Abb. 3.11.2: Schrägscheibenprinzip im Tauchbadbetrieb



Abb. 3.11.3: Gesamtschema der energieautonomen Bewässerungsanlage

Abbildungen 3.11.2 und 3.11.3 zeigen das entsprechende Funktionsbild der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine im Tauchbadbetrieb und das Gesamtschema der energieautonomen Bewässerungsanlage.

3.12 Zusammenarbeit mit Spanien

Die schon bestehende Zusammenarbeit mit dem spanischen Partner an der Escuela Superior de Ingenieros der Universität in Sevilla, Andalusien, mit der die Fachhochschule Konstanz eine Hochschulkooperation verbindet, wurde innerhalb dieses Forschungsprojektes weiter ausgebaut. Nach der ersten gemeinsamen Veröffentlichung mit dem Titel "Metallographic Characterization of NiTiCu-Wires used in an Energy Autonomous Irrigation System" bei der Zeitschrift Praktische Metallographie wurde eine weitere gemeinsame Veröffentlichung mit dem Titel "Influence of Heat and Thermomechanical Treatments on the Phase Change Behaviour of Ni-Ti-Cu Shape Memory Alloys – Literature Review of NiTi- NiTi-X- and NiTiCu-Systems and Own Experiences" bei der Zeitschrift Advanced Engineering Materials eingereicht.

Daneben wurde eine Diplomarbeit eines Konstanzer Maschinenbaustudenten mit dem Titel "Influence of Heat and Thermomechanical Treatments on the Phase Change Behaviour of Ni-Ti-Cu Shape Memory Alloys – Literature Review of NiTi- NiTi-X- and Ni-TiCu-Systems and Own Experiences" an der E.S.I. in Sevilla durchgeführt. Es erfolgten auch Besuche in dem Solartestgelände Plataforma Solar in Almeria. Dort wurde dieses Forschungsprojekt vorgestellt und entsprechende Gespräche geführt, um einen modifizierten Prototyp der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine dort vor Ort unter Realbedingungen in einem überwachten Feldversuch zu testen. Die Durchführung dieses Feldversuches konnte bisher jedoch nicht realisiert werden. 4 Vorträge, Veröffentlichungen, Veranstaltungen

Innerhalb dieses Forschungsprojektes fanden nachstehende Vorträge und Veranstaltungen statt, bei denen das Bewässerungsprojekt und Modelle zur Wärmekraftmaschine vorgestellt wurden:

- Berg U., Strittmatter J.: Solarmesse in Freiburg, 25.-27.06.1999
- Bogatzky T., Seemann K., Strittmatter J.: Intertech-Messe in Dornbirn, Österreich, 4. 6.11.1999
- Strittmatter J.: "Einsatz von FGL", Vortrag auf der Sitzung der Bodensee-Interessengemeinschaft Werkstofftechnik, Konstanz, 25.11.1999
- Käßer M., Strittmatter J.: ACHEMA in Frankfurt, 24-26.05.2000
- Berg U., Strittmatter J.: SOLAR'2000 in Freiburg, 7.-9.07.2000
- Strittmatter J.: BOKOMAT'2000 in Bochum, 13.10.2000
- Strittmatter J.: NEW FORUM in Offenburg, 15.11.2001
- Gümpel P.: "Formgedächtnislegierungen und deren Einsatzmöglichkeiten in der Praxis", Vortrag auf dem Ostschweizer Technologiesymposium in St. Gallen, 23.11.2001

Neben zahlreichen Studienarbeiten wurden auch zwei Diplomarbeiten durchgeführt:

- Boussourkine D.: Formgedächtnismetalle Grundlagen und Anwendungen, Diplomarbeit an der Fachhochschule Konstanz, 2000

Folgende Veröffentlichung erfolgten bisher in diesem Projekt:

- Gläser S., Gümpel P., Käßer M., Strittmatter J.:
 "Verfahren und Vorrichtung zum Fördern von Wasser sowie Verwendung einer Formgedächtnislegierung", DE 195 21 226 A 1, Patentanmeldung am 14.06.1995
- Gallardo J.M., Herrera E.J., Gümpel P., Strittmatter J.: Metallographic Characterization of a NiTiCu Shape Memory Alloy Prakt. Metallogr. 36 (1999), S. 594 - 608
- Gümpel P., Strittmatter J.:
 Umweltschonend antreiben mit Formgedächtnislegierungen

103

Zeitschrift MM Maschinenmarkt Nr. 13, 27. März 2000

 Gümpel P., Strittmatter J.: Antriebe mit Formgedächtnislegierungen schonen Umwelt und Ressourcen", Zeitschrift: MM Maschinenmarkt Nr. 4, 22. Januar 2001

 Gallardo J.M., Gümpel P., Strittmatter J.: Influence of Heat and Thermomechanical Treatments on the Phase Change Behaviour of Several Nitinol Shape Memory Alloys – Literature Review and Authors' Experiences, Advanced Engineering Materials, zur Veröffentlichung eingereicht

Außerdem erfolgt eine aktive Teilnahme von Herrn Strittmatter im Arbeitskreis der Fachhochschulen Baden-Württembergs AK NEW "Nachhaltige Energiewirtschaft".

5 Mittelverwendung

Die Stelle einer wissenschaftlichen Hilfskraft mit Abschlußprüfung wurde durch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Berg besetzt, der jedoch kurz nach der Hälfte des Projektlaufzeit in die Industrie wechselte. Zur Weiterführung des Forschungsprojektes konnte Herr Dipl.-Ing. (FH) Joachim Strittmatter gewonnen werden. Dadurch kam es zum einen zu einer Überschneidung in der Beschäftigung und einer Verzögerung bei der Weiterführung der Arbeiten. Die daraus erfolgte Projektverlängerung um zwei Monate gegenüber der ursprünglichen Laufzeit war kostenneutral, da einige der Konstruktionen kostengünstig in den hochschuleigenen Werkstätten ausgeführt wurden, während die meisten der anderen Fertigungsarbeiten und Anschaffungen von der Firma MemoTec AG übernommen wurden. Obwohl nach den ermittelten Leistungsdaten die Firma MemoTec AG sich aus dem Projekt zurückzog, hat sie ein Vielfaches ihrer zugesagten Beteiligung geleistet.

Die Zahl der studentischen Hilfskräfte begründet sich in der Vielzahl der Umbaumaßnahmen und der Durchführung der Versuche. Wie geplant erfolgte in dem Projekt der Bau von zwei Wärmekraftmaschinen, wobei nach den Ergebnissen des ersten Prototypes die Zielrichtung des zweiten nicht mehr in einer reinen Weiterentwicklung vor dem Hintergrund eines möglichen Einsatzes bei der Durchführung von Feldversuchen lag, sondern in der Verbesserung des Betriebs durch die Anwendung eines neuen Drahterwärmungsprinzips.

Insgesamt wurde mit den Ausgaben wirtschaftlich und sparsam verfahren.

6 Zusammenfassung

Im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Konstanz wurde ein System zur energieautonomen Wasserförderung entwickelt, bei der zum Antrieb der Pumpen Formgedächtnislegierungen (FGL) verwendet werden. Bei Sonnenschein arbeitet diese geplante Bewässerungsanlage völlig energieautonom: die Wärmeenergie der Sonne wird durch die FG-Drähte direkt in mechanische Energie umgewandelt und betreibt die Bewässerungspumpen. Die Vorteile dieses einfachen Prinzips liegen in der Bedienerfreundlichkeit, Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der Anlage wie auch in der Flexibilität bezüglich weiterer Anwendungsfälle der modular einsetzbaren Wärmekraftmaschine in Industrie und Klimatechnik. Der angestrebte Einsatz von derartigen Anlagen würde zu einer entsprechenden Entlastung der immer stärker mit Emissionen belasteten Umwelt führen.

Im einzelnen wurden in diesem Projekt neben wissenschaftlichen Untersuchungen zwei Versuchsanlagen konstruiert, gefertigt und getestet. Während der erste weiterentwikkelte Prototyp P 1 durch einen Sprühbetrieb mit kaltem und erwärmtem Wasser betrieben wurde, erfolgt die Erwärmung der FG-Drähte im Prototyp P 2 durch erwärmtes Wasser im Tauchbadbetrieb, die Abkühlung durch ventilatorgeführter Umgebungsluft. Durch den weiteren Ausbau eines PC-unterstützten Meßwerterfassungssystems konnten die meisten der beim Testlauf relevanten Werte automatisch aufgenommen werden. An den Prototypen wurde außerdem unterschiedliche FGL getestet. Insgesamt ergaben sich viele Verbesserungen gegenüber den vorhergehenden Schrägscheiben-Wärmekraftmaschinen. Der beste Rundlauf und auch die höchsten Leistungsdaten konnten mit dem letzten Prototyp P 2 im Tauchbadbetrieb erzielt werden, wobei die Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine mit 60 NiTiCu-Drähte mit dem Durchmesser 1 mm und einer wirksamen Länge von 1015 mm bestückt war. Mit diesem Prüfstand wurden Drehzahlen bis zu 80 Umdrehungen pro Minute erreicht, wobei die maximale Leistung von 63 Watt sowohl bei der Dehnrate von 3,15 %, als auch bei der Dehnrate von 4,5 % bei einer Drehzahl von 50 Umdrehungen pro Minute ermittelt wurden. Dabei betrugen die Temperatur des Warmwassers 85 °C, die der Umgebungsluft 22 °C, der Wasserdurchsatz im Tauchbad 2 m³/h und die Wasserstandshöhe 11 cm.

Durch diese niedrig ausgefallenen Leistungsdaten, was zunächst auf die Qualität der eingesetzten Drähte zurückgeführt werden kann, konnte eines der ursprünglichen

106

Hauptziele dieses Projektes, diese neuartige, innovative Wärmekraftmaschine weiterzuentwickeln, zu optimieren und die nötigen Erkenntnisse zu gewinnen, um diese Anlage nach Abschluß dieses aFuE-Projektes in Zusammenarbeit mit der beteiligten oder auch neu zu gründenden Firmen zur Serienreife zu bringen, noch nicht in ihrer Gesamtheit erreicht werden. Durch eine Weiterführung von Versuchen an dem nun bestehenden Prüfstand im Rahmen von Diplomarbeiten soll jedoch versucht werden, weitere Erkenntnisse zu gewinnen, um eine Leistungserhöhung dieser innovative Erfindung zu erreichen und ggf. zu einem späteren Zeitpunkt doch noch zu einer transferfähigen Anlage fertig zu entwickeln.

Obwohl dieses o.g. Hauptziel in der Projektlaufzeit nicht vollständig erreicht werden konnte, ließen sich viele der ursprüngliche und auch neuen Teilziele mit Erfolg erreichen. So konnten z.B. die Umbaumaßnahmen vollständig auf CAD konstruiert und teilweise über FEM-Verfahren berechnet werden. Die Befestigung der Drähte durch Einpressen konnte realisiert und mehrfach verbessert werden. Es fanden Versuche zum Einlöten und Einkleben von Drahtbündeln statt. Die Meßwerterfassung konnte am Prüfstand über eine entsprechende Sensorik und eine programmierte Meßsoftware automatisiert werden. Durch eine umfassende metallographische Untersuchung konnten die Ursachen der Drahtbrüche untersucht werden. Die Zusammenarbeit mit Spanien konnte erfolgreich weitergeführt werden, was sich allein schon in der durchgeführten Diplomarbeit und den gemeinsamen Veröffentlichungen widerspiegelt. Außerdem konnte in dem Solartestgelände in Almeria der Grundstein für einen zukünftigen Feldversuch gelegt werden. Es wurden neue Demonstrationsmodelle konstruiert und gefertigt, die bei vie-Ien Gelegenheiten und Messen zur Verbreitung dieser innovativen Erfindung führt. Außerdem wurde das Prinzip der Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine und der Betrieb des Prüfstandes in Videofilmen aufgezeichnet. Nicht zuletzt spiegelt auch die Zahl der involvierten Studierenden das Interesse an dieser Erfindung, was sich auch sehr positiv auf den Bereich der Lehre auswirkte. Neben der rein wissenschaftlichen Bedeutung mit den daraus resultierenden, verbesserten Beziehungen zu regionalen Industriepartnern hat sich gezeigt, daß dieses Projekt hohes Interesse hervorruft und somit gut geeignet ist um Forschung an Fachhochschulen in der Öffentlichkeit zu präsentieren. Der daraus entstehende "Werbeeffekt" kommt dem IAF und den Fachhochschulen zugute, zeigt es doch, wie der Forschungsauftrag von den Fachhochschulen erfüllt wird. Schon jetzt zeigt sich, daß die Drittmittelfähigkeit des IAF mit dem durchgeführten Projekt erhöht wurde.

107

- 7 Literaturverzeichnis
- [1] Gümpel P.: Förderprogramm des Landes Baden-Württemberg "Innovative Projekte". Thema: Energieautonome Grundwasserförderung durch Einsatz von Formgedächtnislegierungen. Laufzeit 3/1995 bis 2/1997
- [2] Gümpel P.: Förderprogramm des Landes Baden-Württemberg "Innovative Projekte". Thema: Energieautonome Grundwasserförderung durch Einsatz von Formgedächtnislegierungen, Innovatives Projekt gefördert durch das MWK Baden-Württemberg, Förderzeitraum: 01.01. - 31.12.1998
- [3] Stöckel D., Hornbogen E., Ritter F., Tauzenberger P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Ehningen bei Böblin gen. expert verlag, 1988.
- [4] Müller, Ingo: "Metalle mit Gedächtnis", Faltblatt der Technischen Universität Berlin
- [5] Frederick E. Wang: "Metal with a memory drives low-power engine", Designers In Action, S. 52, 53
- [6] A.D. Johnson: "Nitinol Heat Engine", IECEC 75 Record
- [7] H. Tanaka, M. Kanda, S. Sugimoto, M. Mori, T. Okuda, T. Tanaka: Presentet at 93rd Annual Meeting of Japan Institute of Metals, Akita (1983)
- [8] W.S. Ginell, J.L. McNichols, J.S. Cory: "One Horsepower Thermoturbine Nitinol Engine", NSWC MP 79-44
- [9] Warren K. Smith: "Compound Memory Engine", United States Patent 4,086,769, Mai 1978
- [10] W.S. Ginell, J.L. McNichols, J.S. Cory: "Nitinol Heat Engines for low grade thermal energy conversion", Mai 1979, Mechanical Engineering
- [11]Krupp Forschungsinstitut: "Problemlösungen Die Memory-Legierung NiTi", Prospekt der Fried. Krupp GmbH Essen