



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7251

Miniatur-Laserscanner für mobile Anwendungen

D. Brugger, M. Kohl

Institut für Mikrostrukturtechnik

August 2006

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7251

Miniatur-Laserscanner für mobile Anwendungen

Daniel Brugger ^{*)}, Manfred Kohl

Institut für Mikrostrukturtechnik

**^{*)} von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation**

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2006

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-072511

Miniatur-Laserscanner für mobile Anwendungen

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der

Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Daniel Brugger

aus Hausen i.W.

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Februar 2006

Hauptreferent: PD Dr. M. Kohl

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. C. Stiller

Kurzfassung

Laserscanner-Systeme zur hochaufgelösten Umfelderfassung nutzen momentan hauptsächlich makroskopische Aktoren zur Strahlableitung und unterliegen damit Einschränkungen hinsichtlich minimaler Baugröße und Unempfindlichkeit gegenüber Erschütterungen. Hauptgrund ist die Aktoreinheit, die meist große Spiegel- und Stullelemente und damit große bewegte Massen enthält. Eine deutliche Verbesserung verspricht der Einsatz von Mikroaktoren. Bisherige Entwicklungen ermöglichen meist jedoch nur kleine Scanwinkel um 10° . Große Winkel über 50° erfordern komplexe Aktorstrukturen, was mit aufwendiger Prozesstechnik und hohen Kosten verbunden ist.

Die hier vorgestellte Arbeit versucht die Nachteile makroskopischer Aktoren, sowie bisheriger Mikroaktoren, durch die gezielte Anwendung sogenannter „*Smart Materials*“ in mikroaktorischen Systemen zu beheben. Dazu wird zunächst ein neuartiger Aktormechanismus auf Basis der ferromagnetischen Formgedächtnislegierung Ni_2MnGa eingesetzt. Dieser vereint die Wirkmechanismen des Ferromagnetismus und des Formgedächtniseffektes in einem Dünnschicht-Bauteil. Den erzeugten antagonistischen Kräften stehen sehr kleine Rückstellkräfte gegenüber, wodurch sich große Scanwinkel in einem breiten Frequenzbereich erzeugen lassen. Weitere Mikroaktoren auf der Grundlage von „*Smart Materials*“ nutzen entweder Dünnschicht-Verbundschichten mit reinem Formgedächtniseffekt auf der Basis von NiTiCu oder mit rein ferromagnetischen Eigenschaften. In dieser Arbeit werden, ausgehend von den vorgestellten Aktormechanismen, 1D-Mikroaktoren mit einem Ablenkwinkel entwickelt und diese in einem weiteren Schritt zu 2D-Mikroaktoren mit zwei rechtwinklig zueinander stehenden Ablenkwinkeln erweitert. Abschließend erfolgt die Entwicklung eines 2D-Laserscanner-Systems bestehend aus einem 1D-Mikroaktor kombiniert mit einem Flugzeit-Entfernungsmesssystem (TOF-System).

Das Design der 1D-Mikroaktoren basiert auf Doppelbiegebalken, deren Strukturen auf eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung ausgelegt sind. Bei der Herstellung kommt eine Spaltschweiß-Technik zur Erzeugung kleiner und zuverlässiger elektrischer Verbindungen zum Einsatz. Verglichen mit anderen Wirkprinzipien, die meist eine passive Feder-Rückstellung nutzen, werden bei dem 1D-Mikroaktor aus Ni_2MnGa große, nahezu frequenzunabhängige optische Ablenkwinkel von 120° bei 60 Hz oder 60° bei 180 Hz erzielt. Die Baugröße liegt dabei im Millimeter-Bereich, der Energiebedarf bei weniger als 100 mW. 1D-Mikroaktoren aus der Verbundschicht mit der Formgedächtnislegierung NiTiCu zeigen weit größere Scanwinkel bis zu 170° , jedoch nur in Resonanz bei 85 Hz.

Das Design der 2D-Mikroaktoren ist monolithisch ausgeführt und benötigt nur einen Mikrospiegel zur Strahlableitung. 2D-Mikroaktoren aus Ni_2MnGa lehnen an das 1D-Design an und kombinieren Biegebewegungen mit einer zusätzlich hervorgerufenen Kippbewegung. Erste Prototypen zeigen in einem Frequenzbereich von 40 Hz bis 80 Hz bei leistungsoptimierter Ansteuerung 2D-Scanmuster mit optischen Scanwinkeln von $38^\circ \times 50^\circ$. Eine andere Variante besteht aus zwei strukturoptimierten und mechanisch gekoppelten, im 90° -Winkel zueinander angeordneten 1D-Aktoren aus der NiTiCu -Verbundschicht und erreicht maximale optische Scanwinkel von $20^\circ \times 40^\circ$. Diese Winkel treten nur bei 25, beziehungsweise 85 Hz in Resonanz auf und zeigen eine große mechanische Kopplung.

Im letzten Teil der Arbeit wird ein 2D-Laserscanner-System zur horizontalen Detektion von Entfernung und Winkel hergestellt. Dies gelingt durch die Integration einer Hochleistungs-Halbleiterlaserdioden, eines Ni_2MnGa 1D-Mikroaktors, eines optischen Winkelsensors und eines TOF-Systems. Der Winkelsensor wird durch einen Strahlteiler und einen positionsempfindlichen Photodetektor (PSD) auf einer optischen Bank realisiert. Dabei stellen die optischen Aperturen des TOF-Empfängers große Anforderungen an die Strahlkollimation des Lasers und die Fokussieroptik im Detektorstrahlengang. Berücksichtigt werden muss weiterhin die Abstimmung der komplexen Hardware- und Software-Komponenten der Sensorik. Ein erster Demonstrator zeigt eine maximale Messentfernung von 30 m, die neben der Laserleistung durch die Empfindlichkeit des optischen Empfängers begrenzt wird. Die erzielbare Ortsauflösung des Systems ist einerseits durch die Auflösung des Winkelsensors von 0.5° vorgegeben und wird weiterhin durch die zeitliche Auflösung des TOF-Systems von etwa 1 ns bestimmt.

Miniature-Laserscanner for Mobile Applications

Abstract

Laserscanning systems for highly resolved sensing of the environment are currently using macroscopic actuators for beam deflection and, thus, are restricted with respect to their size and insensitivity to shock. Main reason is the actuation unit, comprising large mirrors and actuators and, thus, large moving masses. It is expected that the use of microactuators will lead to a considerable improvement. In most cases, however, previous developments enable only small scanning angles in the order of 10 deg. Large angles above 50 deg require complex actuator structures resulting in extensive processing technology and higher costs.

This work is an effort to resolve the disadvantages of macroscopic as well as current microactuators by the systematic implementation of so called smart materials in microactuators. For this purpose, first a novel actuation mechanism on the basis of the ferromagnetic shape memory alloy Ni_2MnGa is introduced, combining the ferromagnetic and shape memory effect in one thin film component. The resulting antagonistic forces are opposed by small reset forces, thus, allowing large scanning angles in a wide frequency range. Further microactuators on the basis of smart materials make use of thin film composites with either pure shape memory effect on the basis of NiTiCu or pure ferromagnetic properties. Based on these actuation mechanisms this work pursues the development of 1D microactuators with one deflection angle and, in a further step, their extension to 2D microactuators with two scanning directions being at right angles with respect to each other. Finally, a 2D laserscanner system is developed consisting of a 1D microactuator combined with a time-of-flight (TOF) system.

The designs of the 1D microactuators are based on double-beam cantilever structures, which are constructed for a temperature distribution as homogeneous as possible. Fabrication technology comprises a gap welding technology to generate small size and reliable electrical contacts. Compared to other actuation mechanisms, which mostly utilize a passive reset spring, the 1D microactuators of Ni_2MnGa achieve large, nearly frequency-independent optical scanning angles of 120 deg at 60 Hz or 60 deg at 180 Hz. The size of the actuator is in the millimeter-range, while energy consumption is less than 100 mW. 1D microactuators of the NiTiCu composite show even larger scanning angles up to 170 deg but only at their resonance frequency of 85 Hz.

The 2D microactuators are designed monolithically using one micromirror for beam deflection. The 2D microactuators of Ni_2MnGa are based on the 1D design and combine the bending motion with an additionally excited tilting motion. First prototypes show in the frequency range of 40 to 80 Hz at optimized driving power 2D scanning patterns with optical scanning angles of 38 x 50 deg. An other variant comprising of two mechanically coupled, at right angles oriented 1D actuators of the NiTiCu composite achieves optical scanning angles of 20 x 40 deg. These scanning angles only occur at the resonance frequencies of 25 and 85 Hz, respectively, and show a stronger mechanical coupling.

In the final part of this work, a 2D laserscanner system for horizontal detection of distance and angle is built up. This is achieved by integration of a high-power semiconducting laser diode, a Ni_2MnGa 1D microactuator, an angle sensor and a TOF system. The angle sensor is realized on an optical bench by a beam splitter and a position sensitive detector (PSD). Thereby, the optical apertures of the TOF detector are making high demands on the beam collimation and focussing optics in the detector beam path. Furthermore, the adjustment of the complex software and hardware components of the sensor system has to be taken into account. A first demonstrator shows a maximum range detection of 30 m which is limited, besides the laser power, by the receiver sensitivity. The achievable spatial resolution of the system is on the one hand given by the resolution of the angle sensor of 0.5 deg and in addition by the time resolution of the TOF system of about 1 ns.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Aktorprinzipien	3
2.1.1	Elektrostatisch	4
2.1.2	Magnetisch.	5
2.1.3	Bimetall	6
2.1.4	Piezoelektrisch	8
2.2	Formgedächtniseffekt	9
2.2.1	Einweg-Effekt	10
2.2.2	Zweiweg-Effekt	11
2.2.3	Pseudoelastischer Effekt	12
2.3	Formgedächtnislegierungen	13
2.3.1	NiTiCu-Legierungen	13
2.3.2	Ferromagnetische Ni ₂ MnGa-Legierungen	15
2.4	Scanner	18
2.4.1	Makroskopische Scanner	18
2.4.2	Spiegelaktoren in Silizium-Technik	20
2.4.3	Alternative Konzepte	22
2.4.3.1	Elektromagnetische Spiegelaktoren	22
2.4.3.2	Elektrothermische Spiegelaktoren	23
2.4.3.3	Spiegelaktoren auf Basis von FGL.	23
3	Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung.	25
3.1	Herstellungsverfahren	25
3.1.1	Sputtern und Mikrostrukturierung	25
3.1.1.1	Sputter-Verfahren	26
3.1.1.2	Wärmebehandlung.	27
3.1.1.3	Mikrostrukturierung	28
3.1.1.4	Zusammenfassung.	31
3.1.2	Mechanische Aufbau- und Verbindungstechnik	32
3.1.3	Elektrische Kontaktierungsverfahren	32
3.1.3.1	Drahtbonden	32
3.1.3.2	Laserschweißen.	33

3.1.3.3	Spaltschweißen	33
3.1.3.4	Zusammenfassung.	34
3.2	Messverfahren	34
3.2.1	Dynamische Differenzenkalorimetrie	34
3.2.2	Wärmebildaufnahmen	35
3.2.3	Mechanische und elektrische Eigenschaften.	36
3.2.4	Dynamisches Schwingverhalten	37
3.3	Gekoppelte FEM–Simulation	38
3.3.1	Elektrisch–thermisch–magnetisch–mechanisch gekoppeltes Model.	39
3.3.2	Bewegungsgleichung.	40
3.4	Optische Simulation	42
4	Materialeigenschaften	43
4.1	Mechanische Eigenschaften.	43
4.1.1	Bestimmung des E–Moduls	43
4.2	Thermische Charakterisierung	45
4.2.1	Phasenumwandlungstemperaturen	45
4.2.2	Temperatur–Leistungs–Kennlinien.	48
4.2.3	Konvektive und konduktive Kühlung	49
4.2.4	Gekoppelte FEM–Simulation	52
4.3	Magnetische Charakterisierung	53
4.3.1	Ferromagnetische Formgedächtnislegierung	53
4.3.2	Gekoppelte magnetische Simulation	54
4.4	Zusammenfassung	55
5	Aktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung	57
5.1	Magnetischer Formgedächtnisaktor	57
5.1.1	Design und Aufbau.	57
5.1.2	Herstellung.	59
5.1.3	Charakterisierung	60
5.1.3.1	Auslenkung und Scanwinkel	60
5.1.3.2	Magnetischer Kreis	61
5.1.3.3	Statisches Verhalten	62
5.1.3.4	Dynamisches Verhalten	63
5.1.4	Zusammenfassung.	75
5.2	Verbundschichtaktor	76
5.2.1	Prinzip und Aufbau.	76
5.2.2	Design	77
5.2.3	Thermische Designoptimierung	79
5.2.3.1	FEM–Simulation.	80
5.2.4	Herstellung.	81
5.2.5	Charakterisierung	81
5.2.5.1	Statisches Verhalten	81
5.2.5.2	Dynamisches Verhalten	83

5.2.6 Zusammenfassung.	86
5.3 Magnetischer Verbundschichtaktor	86
5.3.1 Prinzip und Aufbau.	86
5.3.2 Technologische Umsetzung	87
5.3.3 Zusammenfassung.	89
6 Aktoren zur zweidimensionalen Strahlablenkung.	91
6.1 Ferromagnetischer Formgedächtnisaktor.	91
6.1.1 Design und Aufbau.	91
6.1.1.1 FEM–Simulation.	93
6.1.2 Herstellung.	93
6.1.3 Charakterisierung	94
6.2 Verbundschichtaktor	98
6.2.1 Design und Aufbau.	99
6.2.2 Herstellung.	101
6.2.3 Charakterisierung	101
6.3 Zusammenfassung und Bewertung	104
7 Laserscanner–System	107
7.1 Spezifikation	108
7.2 Design	109
7.2.1 Entfernungsmessung.	110
7.2.1.1 Konzepte	110
7.2.1.2 Laserdiode.	111
7.2.2 Empfänger	112
7.3 Optik–Simulation	114
7.3.1 Sender	114
7.3.2 Empfänger	115
7.4 Signalverarbeitung	117
7.5 Herstellung	117
7.6 Charakterisierung	117
7.6.1 Entfernungsmessung.	118
7.6.2 1D–Winkelmessung	118
7.6.3 2D–Laserscanner–System.	119
7.7 Zusammenfassung	120
8 Zusammenfassung und Ausblick	123
Anhang A - Formeln zu Abschnitt 7.1	127
Anhang B - FEM-Simulationsdaten	129
Anhang C - Symbol– und Abkürzungsverzeichnis	131
Literaturverzeichnis	139
Publikationsliste	145
Index	147

Kapitel 1

Einleitung

Mit der Einführung des Begriffs „*Mikrosystemtechnik*“ in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts begann die rasche Entwicklung eines neuen Wirtschaftszweiges. In den Anfängen wurden erste mikroaktorische Systeme auf der Grundlage von Fertigungsprozessen für einkristallines Silizium (Si) hergestellt, die bereits Strukturen im Mikrometermaßstab zuließen. Ausgehend von der Halbleiterindustrie wurden Methoden und Strukturen weiterentwickelt, um mikromechanische Sensoren und zunehmend komplexere Strukturen wie etwa freistehende Membranen herstellen zu können. Mit der Entwicklung der Oberflächen–Mikromechanik eröffneten sich Anwendungen in der Mikrooptik, Mikrofluidik und Biotechnologie.

Für Systeme, die optische Funktionen in Mikrosysteme integrieren, etablierte sich der Begriff MOEMS (Mikro–Optische–Elektro–Mechanische–Systeme). Dieser umfasst hauptsächlich die Gebiete der Freistrahloptik und Wellenleiter. Ein wichtiges Forschungsgebiet stellt die Entwicklung von Spiegelaktoren im Mikrometermaßstab dar, die zum Beispiel zum optischen Scannen, Schalten oder Ablenken benötigt werden. Prominentes Beispiel ist das *Digital Mirror Device* (DMD™) von Texas Instruments [1]. Das System basiert auf einem elektrostatischen Aktorprinzip, bei dem eine Matrix aus bis zu 1920 x 1080 Mikrospiegeln einfallendes Licht mit mehreren kHz moduliert und dadurch für das menschliche Auge bis zu 1024 Helligkeitsabstufungen erzeugt. Da bei elektrostatischen Aktoren nahezu keine Ströme fließen, verfügen diese über eine äußerst geringe Leistungsaufnahme. Ein großer Nachteil von Spiegelaktoren zeigt sich hierbei in den kleinen Kippwinkeln von nur wenigen Grad.

Die stetig steigende Nachfrage nach MOEMS–Bauelementen wurde in den letzten Jahren unter anderem durch die vielfachen Einsatzmöglichkeiten in Telekommunikations–Systemen hervorgerufen. In diesem Bereich werden Spiegelaktoren hauptsächlich als optische Schalter in Multiplexern oder Kreuzverteilern eingesetzt [2]. Ebenso wie bei Spiegelaktoren wird versucht, mit alternativen Aktorprinzipien die Einschränkungen elektrostatischer Mikromechanik, wie etwa geringe Scanwinkel oder Betrieb in Resonanz, zu umgehen. Häufig jedoch treten neue Nachteile wie etwa die Zunahme von Komplexität und Baugröße [3] oder eine vergrößerte Leistungsaufnahme [4] auf.

Dieser Arbeit liegt die Idee zugrunde, mikromechanische Spiegelaktoren basierend auf neuen Materialien aus der Materialklasse der „*Smart Materials*“ zu entwickeln. Durch den systematischen Einsatz von Formgedächtnislegierungen (FGL) sollen sowohl große Scanwinkel bei kleiner Baugröße als auch eine geringe Leistungsaufnahme erzielt werden. Die in Form dünner Schichten im μm -Bereich vorliegenden Materialien bestehen aus der ferromagnetischen Formgedächtnislegierung (FFGL) Ni_2MnGa , die Grundlage eines neuartigen Aktormechanismus ist [5], und aus einer FGL-Verbundschicht mit der Formgedächtnislegierung NiTiCu . Während bei Legierungen bestehend aus FFGL zwei intrinsische Effekte ausgenutzt werden, die thermisch gesteuerte, entgegengesetzt wirkende Kräfte erzeugen, nutzt die FGL-Verbundschicht die durch den Bimetall-Effekt hervorgerufenen Spannungen zwischen den einzelnen Schichten aus. Durch die integrierte FGL-Schicht ergeben sich dabei deutlich stärkere Spannungen, die sich innerhalb eines wenige Kelvin großen Temperaturbereichs stark ändern.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines miniaturisierten Laserscanner-Systems für mobile Anwendungen beschrieben. Aktuell verfügbare Laserscanner-Systeme sind in ihrer Baugröße beschränkt oder genügen nicht den strengen Anforderungen an Temperatur- und Erschütterungsfestigkeit, zum Beispiel in der Automobilindustrie. Wesentlicher Grund dafür ist der Einsatz von makroskopischen Spiegelaktoren mit großen bewegten Massen und großflächigen Spiegelementen.

Der erste Teil befasst sich mit der Entwicklung von Mikroaktoren mit einem Ablenkwinkel (1D). Die verwendeten Materialien liegen in Form wenige Mikrometer dicker Dünnschichten vor. Neben der Vorstellung der eingesetzten Aktorprinzipien wird auf das Design sowie die Herstellung und Charakterisierung der Mikroaktoren eingegangen.

Auf den 1D-Mikroaktoren aufbauend beschreibt der nachfolgende Teil die Vorgehensweise und die Entwicklung von Mikroaktoren mit zwei Ablenkwinkeln (2D). Ausgehend von mehreren Designideen werden 2D-Mikroaktoren auf Basis der FFGL und der FGL-Verbundschicht dargestellt.

Im letzten Teil der Arbeit werden ein Ni_2MnGa 1D-Mikroaktor mit einer Sensorik zur zeitaufgelösten Winkelmessung und ein Infrarot-Halbleiterlaser zu einem Laserscanner-System kombiniert, um mit Hilfe des horizontalen Ablenkwinkels und der gemessenen Entfernung eine 2D-Umfelderfassung zu realisieren (2D-Laserscanner-System). Dazu wird ein Verfahren zur hochaufgelösten Messung des Ablenkwinkels vorgestellt. Weiterhin kommen Konzepte zur Entfernungsmessung sowie der Entwurf einer optischen Bank zur Sprache, gefolgt von einem Überblick über die Anforderungen, die an das optische Sender- und Empfängersystem gestellt werden. Abschließend werden Aufbau und Charakterisierung eines ersten Demonstrators beschrieben.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden zuerst verschiedene Aktorprinzipien von Spiegelaktoren in MEMS vorgestellt und bewertet. Nach der Beschreibung des Formgedächtniseffektes folgt eine detaillierte Übersicht der eingesetzten Formgedächtnismaterialien. Anschließend werden in einem Überblick verschiedene Scanner–Anwendungen, bei denen Spiegelaktoren zum Einsatz kommen, dargestellt. In Kapitel 2.4.1 wird zunächst auf makroskopische Systeme eingegangen. Die zunehmende Miniaturisierung von optischen Scannern wird anhand von Beispielen aus der Silizium–Technik aufgezeigt und dabei ein Vergleich zu alternativen Scanner–Konzepten in Kapitel 2.4.3 angestellt.

2.1 Aktorprinzipien

MEMS–Spiegelaktoren nutzen unterschiedliche Aktorprinzipien zur Erzeugung der Schwenk– oder Kippbewegungen des angebrachten Ablenkspiegels. Im Folgenden werden diese näher beschrieben. Betrachtet man das Skalierverhalten bei der Verkleinerung von Aktoren, spielt unter anderem die Energiedichte im Volumen eine wichtige Rolle. Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht der erzeugbaren Arbeit pro Volumen für verschiedener Aktorprinzipien.

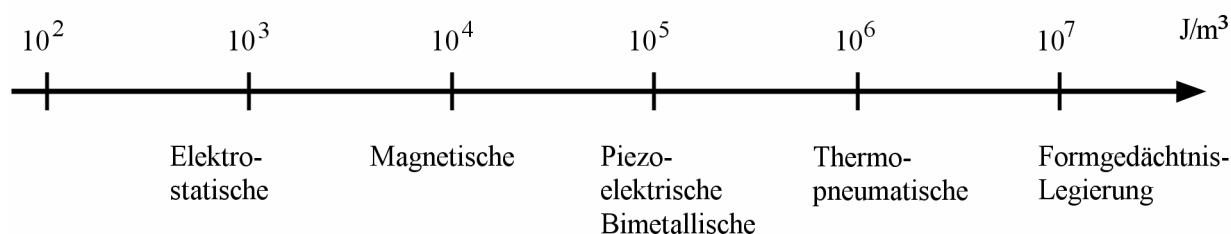


Abbildung 2.1: Energiedichte verschiedener Aktorprinzipien [6].

2.1.1 Elektrostatisch

Elektrostatistische Aktorprinzipien nutzen die Kraft, die zwischen zwei geladenen Flächen erzeugt wird und anziehend oder abstoßend auf diese einwirkt. Sie ist durch das Coulombsche Gesetz definiert zu:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{d^2}, \quad (2.1)$$

wobei ϵ_0 und ϵ_r die Dielektrizitätskonstante des Vakuums bzw. die Permeabilität in einem isotropen Medium sind. Q bezeichnet die Ladung der Flächen und d deren Abstand voneinander. Am Beispiel eines Plattenkondensators, dessen Platten mit Hilfe einer Spannung einen Potentialunterschied V aufweisen, folgt aus (2.1) die Anziehungskraft:

$$F = \frac{AV^2\epsilon_0\epsilon_r}{2d^2} \quad (2.2)$$

wobei A die überlappende Fläche der Kondensatorplatten und d deren Abstand bezeichnet. Bei vollständigem Plattenüberlapp ist die Kraft direkt proportional zur Fläche des Kondensators.

Um mit Hilfe des elektrostatischen Effekts eine ausreichende Menge an Arbeit und Verstellweg zu erzeugen, müssen die recht geringen elektrostatischen Kräfte verstärkt werden. Dazu kommen ineinander greifende Kamm-Strukturen, aus dem englischen Wort *comb drives* abgeleitet, zum Einsatz. Dies entspricht einer Reihenschaltung einzelner Plattenkondensatoren bestehend aus einer hochsymmetrischen Anordnung jeweils eines festen und einer beweglichen Kammstruktur, zwischen denen eine geringe Überlappung der Finger besteht. Ein durch eine elektrische Spannung hervorgerufener Potentialunterschied führt zu einer Ausrichtungskraft, die parallel zu den Kammfingern wirkt und einen vollständigen Überlapp dieser anstrebt. Erste Aktoren nutzten etwa den linearen Verstellweg des mit einer Rückstellfeder versehenen beweglichen Kamms zum Betätigen einer optischen Blende [7].

Da eine Linearbewegung sich nur schwer in eine Kippbewegung für einen Spiegelaktor überführen lässt, werden Designs zu direkter Erzeugung einer Torsionsschwingung entwickelt [3]. Abbildung 2.2 a) zeigt das Prinzip des *angular vertical comb drive* Aktors. Zwei vorausgelenkte Aktoreinheiten, die drehbar gelagert und in einem Winkel von 90° zueinander angeordnet sind, regen einen Rahmen und einen Mikrospiegel zu einer Torsionsschwingung an. Der Mikrospiegel ist somit in zwei Richtungen kippbar. Wird eine Spannung angelegt, drehen sich die Finger des drehbar gelagerten Kamms unter der elektrostatischen Ausrichtungskraft F_{ea} in Richtung der Finger des fixierten Kamms, bis diese gleich dem Rückstellmoment M_r des Torsionslagers entspricht. Mit Gleichung (2.2) und der Kondensatorgleichung für ein Fingerelement

$$C_{unit} = \epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

lässt sich F_{ea} mit der folgenden Formel berechnen

$$F_e = \frac{V^2}{2} \frac{\partial C}{\partial \Theta} = N_f V^2 \frac{\partial C_{unit}}{\partial \Theta} \quad (2.4)$$

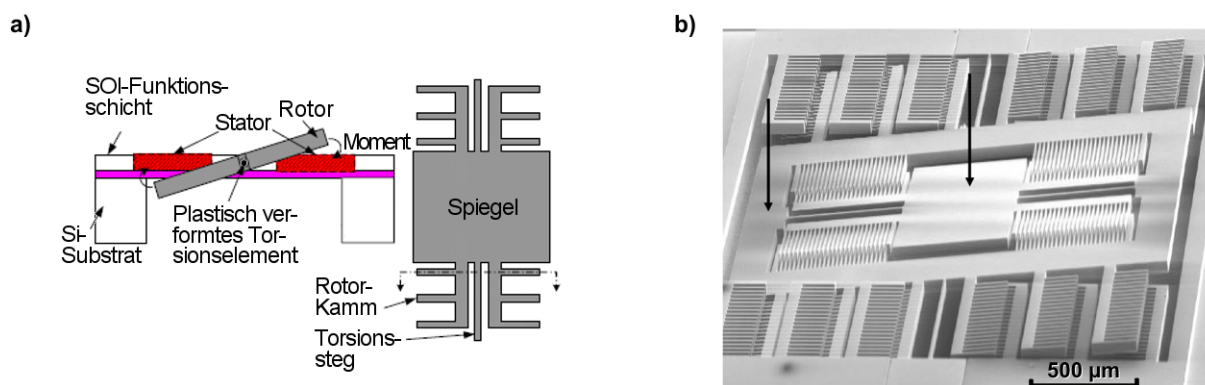


Abbildung 2.2: a) Funktionsprinzip eines elektrostatischen MEMS-Aktors, b) Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop [3].

wobei N_f die Anzahl der Finger der Kammstruktur und Θ den Kippwinkel bezeichnet. Dabei gilt die Annahme, dass jeder Finger aus zwei Kondensatorhälften besteht. Das Rückstellmoment M_r wird allgemein durch

$$M_r = k_s \cdot \Theta = \frac{2Gw_s^3t_s}{3l_s} \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{w_s}{t_s} \tanh\left(\frac{\pi t_s}{2w_s}\right) \right] \Theta \quad (2.5)$$

beschrieben [8] mit dem Schermodul G , der Dicke t_s , der Länge l_s und der Breite w_s des Torsionselements, auch Torsionsfederelement genannt. Dabei zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Vorauslenkung der drehbar gelagerten Kammstruktur und dem erzielbaren Scanwinkel. In dem Fall des in [8] beschriebenen Aktors folgt zum Beispiel, dass die nötige Vorauslenkung, um einen maximalen Scanwinkel zu erzielen, zwischen 30° und 40° liegt. Sie wird durch plastische Verformung der Torsionselemente erreicht. Nach der Herstellung pressen Säulenstrukturen eines Hilfswafers an mehreren Punkten auf die Aktorelemente und lenken diese aus. Eine nachfolgende Erwärmung auf ca. 600°C baut eingeprägte Spannungen ab und erhält den Verformungszustand der Torsionsfedern. Mit Hilfe einer mehrstufigen, symmetrischen Anordnung der Kammstrukturen können im Resonanzbetrieb bei 10.5 kHz und 1.5 kHz Scanwinkel von 27° und 20° für die beiden comb drives erzielt werden. Die benötigten Spannung liegen im Bereich von 30 V.

2.1.2 Magnetisch

Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich, lassen sich mit magnetischen Effekten im Vergleich zu elektrostatischen Wirkprinzipien höhere Energiedichten von bis zu einer Größenordnung erzielen. Der Riesen-Magnetostruktions Effekt (*Giant-MS*) basiert auf der Längenänderung eines magnetostruktiven Materials in einem Magnetfeld. Meist wird dazu ein Schichtverbund aus einem magnetostruktiven Material und einem Substrat genutzt, um eine Biegebewegung zu erzeugen. In Ref. [9] und [10] werden gesputterte Schichten aus Terfenol-D (TbDyFe-Legierung) auf Si-Substraten aufgebracht. Die erzielbaren Biegungen sind jedoch sehr gering und bewegen sich im Bereich von wenigen Grad [9].

Ein weiterer magnetischer Effekt ist die Lorentz–Kraft, die auf bewegte Ladungen in stromdurchflossenen Leitern in einem Magnetfeld wirkt. Für den Fall, dass der Leiter senkrecht zum Magnetfeld B verläuft (Abbildung 2.3) erhält man für die Lorentz–Kraft F_L

$$F_L = I \cdot l \cdot B \quad (2.6)$$

mit der Länge des Leiters l und dem Strom I . Bei dem in Abbildung 2.3 b) gezeigten Aufbau gilt die Annahme eines homogenen Magnetfelds in Richtung \hat{x} der Größe \vec{B}_x . Nur die vom Strom I durchflossenen Abschnitte \vec{L}_j des Leiters tragen zum Drehmoment bei, die rechtwinklig zu $B_x \hat{x}$ liegen. Die magnetische Kraft auf jedes \vec{L}_j ergibt sich zu $\vec{F}_j = I \vec{L}_j \times B_x \hat{x}$. Mit dem Abstandsvektor zur Rotationsachse \vec{r}_j für ein \vec{L}_j , der senkrecht auf der Rotationsachse steht, folgt der Beitrag zum Drehmoment Γ zu

$$\vec{\Gamma}_j = \vec{r}_j \times \vec{F}_j = \vec{r}_j \times (I \vec{L}_j \times B_x \hat{x}) = IB_x (r_j L_j) \quad (2.7)$$

für kleine Auslenkungen. Daraus ergibt sich das Gesamtdrehmoment Γ_{ges} zu

$$\Gamma_{ges} = \sum_{j=1}^N \Gamma_j = IB_x \sum_{j=1}^N r_j L_j = IB_x M \quad (2.8)$$

wobei M die Momentsumme des Leiters und somit aller Beiträge $r_j L_j$ ist [4]. Zur Erzeugung des Magnetfelds von ca. 0.4 T werden NdFeB–Dauermagnete mit einer starken Magnetisierung eingesetzt. Durch die starken Magnetfelder lassen sich hier große Scanwinkel bis zu 58° bei Leistungen um 200 mW erzeugen. Das Design magnetischer Spiegelaktoren wird neben dem großen Volumen der Dauermagnete zusätzlich durch die Vorgabe erschwert, ein homogenes Magnetfeld im Bereich des elektrischen Leiters zu erzeugen, da jeder Feldbeitrag in \hat{z} -Richtung den um die y -Achse schwingenden vertikalen Aktor stört [4].

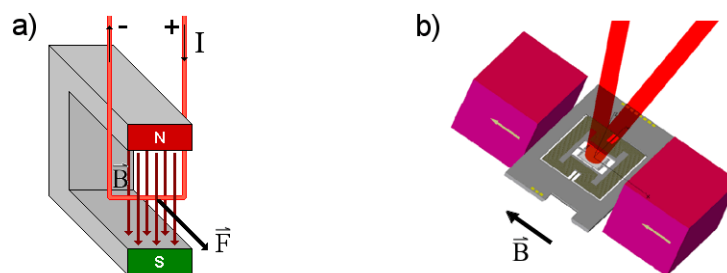


Abbildung 2.3: a) die Lorentz–Kraft, b) Funktionsskizze eines elektromagnetischen Spiegelaktors [4].

2.1.3 Bimetall

Das bimetalliche Wirkprinzip nutzt zwei oder mehr Materialien, die stoffschlüssig oder formschlüssig miteinander verbunden sind. Normalerweise werden zwei Materialien in einem Schichtverbund angeordnet (bimorph), aber auch drei (trimorph) oder mehr Schichten sind möglich. Bei

einer Erwärmung der Schichten entstehen aufgrund unterschiedlicher Längenausdehnungskoeffizienten α innere Spannungen, so dass sich der Schichtverbund in seiner Fläche wölbt.

Betrachtet man eine Balkenstruktur, die aus einer Verbundschicht besteht und an einer Seite eingespannt ist, kann eine äußere Kraft F den Balken am vorderen Ende auslenken. Abbildung 2.4 zeigt dies in schematischer Darstellung. Dabei wird eine Vorauslenkung, wie sie häufig bei der Herstellung der Verbundschichten auftritt, nicht berücksichtigt.

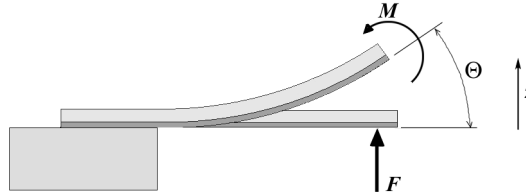


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Auslenkung einer Verbundschicht.

Die maximale Auslenkung z_{max} unter der Punktlast F am vorderen Ende ist

$$z_{max} = \frac{L^3}{3 \cdot EI} \cdot F \quad (2.9)$$

mit der Länge L des Balkens, dem E-Modul E und dem Trägheitsmoment I . Der dazugehörige Drehwinkel am freien Ende des Balkens ist

$$\Theta = \frac{l^2}{2 \cdot EI} \cdot F \quad (2.10)$$

Für eine bimorphe Verbundschicht mit zwei unterschiedlichen Materialien A und B ergibt sich EI zu [11]

$$EI = \frac{b}{12} \cdot \frac{E_A^2 t_A^4 + E_B^2 t_B^4 + E_A E_B t_A t_B (4t_A^2 + 6t_A t_B + 4t_B^2)}{E_A t_A + E_B t_B} \quad (2.11)$$

wobei t die Gesamtschichtdicke, b die Breite des Balkens und E_A, E_B die unterschiedlichen E-Module bezeichnen. Bei elektrisch leitenden Materialien wird ein elektrischer Strom zur Temperaturänderung im Material eingepreßt, das sogenannte Widerstandsheizen. Der durch Aufheizen hervorgerufene Drehwinkel Θ ist durch folgende Gleichung gegeben [12]

$$\Theta = LK = L \frac{1}{\rho} = \frac{3}{2} L \frac{T - T_0}{t} \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{1 + \frac{(E_A t_A^2 - E_B t_B^2)^2}{4 E_A t_A E_B t_B^2}} \quad (2.12)$$

Dabei sind ρ der Biegeradius $\frac{l^2 + z^2}{2z}$, t die Gesamtdicke $t_A + t_B$, T die Temperatur und T_0 die Umgebungstemperatur. Da der Drehwinkel direkt proportional zur Länge des Balkens ist, können verschiedene Scanwinkel unter anderem durch angepasste Designs mit unterschiedlicher Länge L erzeugt werden. Da die Resonanzfrequenz des Systems jedoch stark von der Länge und der Dicke des Balkens abhängig ist, wird diese hin zu kleineren Werten verändert. In Ref. [12] hergestellte Aktoren zeigen Scanwinkel bis zu 100° bei einer Länge von $300 \mu\text{m}$. Die mittlere elektrische Leistung von 1.5 mW ist dabei äußerst gering.

2.1.4 Piezoelektrisch

Der piezoelektrische Effekt, auch piezoelektrische Verformung, basiert auf der gerichteten Verformung auf Kristallebene beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Umgekehrt führt die Ausübung einer gerichteten Kraft in Richtung einer Raumachse des Materials zu einer Änderung der Polarisation in den Elementarzellen, die aufsummiert eine messbare elektrische Spannung ergeben. Diese beiden inversen Phänomene lassen sich beobachten, wenn durch ein äußeres elektrisches Feld eine mechanische Vibration erzeugt wird, die sich mit hoher Geschwindigkeit, abhängig von der Schallgeschwindigkeit des Materials und dessen Dicke, fortpflanzt. Typische Werte sind 30 kHz bis mehrere MHz [13]. Damit lassen sich aus piezoelektrischen Materialien nicht nur Sensoren (Drucksensoren) und Aktoren (Linearaktoren, Biegeaktoren) herstellen sondern auch Oszillatoren und Beschleunigungssensoren [14].

Von großen Vorteil sind die hohe Energiedichte und hohe Geschwindigkeit der kristallinen Umformung. Weiterhin sind nur minimale elektrische Leistungen im statischen Betrieb nötig, da die Aktoren als kapazitive Lasten anzusehen sind. Am häufigsten verwendete Materialien aus Keramik sind z.B. die Ferroelektrika Barium-Titanat (BTO) oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) [15]. Die Geschwindigkeit, mit der sich zum Beispiel ein Linearaktor auf seine Nominalposition ausdehnen kann, lässt sich wie folgt abschätzen:

$$T_{min} = \frac{1}{3f_0l} \quad (2.13)$$

wobei f_0 der Resonanzfrequenz entspricht und ein steiler Anstieg der Steuerspannung angenommen wird. Die Resonanzfrequenz entspricht in etwa der eines idealen Feder-Masse-Systems [16]

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{k_T}{m_{eff}}} \quad (2.14)$$

mit der Aktorstefigkeit k_T und der effektiven Masse $m_{eff} = \frac{1}{3}m$. Typische Werte von f_0 liegen bei mehreren kHz [15].

Um den Effekt in der Mikroaktorik zu nutzen, werden hauptsächlich Verbundschichten aus einer oder mehreren Lagen eines piezoelektrischen Materials hergestellt. Hier wird die Durchbiegung eines an einem Ende eingespannten Balkens durch die Kontraktion oder Expansion der PZT-Schicht erreicht, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird (Abbildung 2.5). Die Abhängigkeit des Scanwinkels entspricht aufgrund des Schichtaufbaus der Aktoren dem des Bimorph-Prinzips in Abschnitt 2.1.3. Der Scanwinkel ist proportional zur angelegten Steuerspannung, die meist im Bereich von 100 V liegt. Beschränkt wird diese Spannung durch Depolarisationseffekte bei Feldstärken größer 1 kV/mm. Der in [15] gezeigte Aktor erzielt an einem mehrfach aufgehängten Spiegel maximale statische Scanwinkel von 4° bei einer Ansteuerspannung von 60 V und einer Aktorlänge von 5 mm. Bei Betrieb in Resonanz bei 3750 Hz werden bei einer Steuerspannung von 15 V Scanwinkel von 25° erreicht. Zur Vergrößerung des Winkels kann der Semibipolarbetrieb mit einer entgegen gerichteten Feldstärke von 300 V/mm eine Steigerung von 20% erzielen [16].

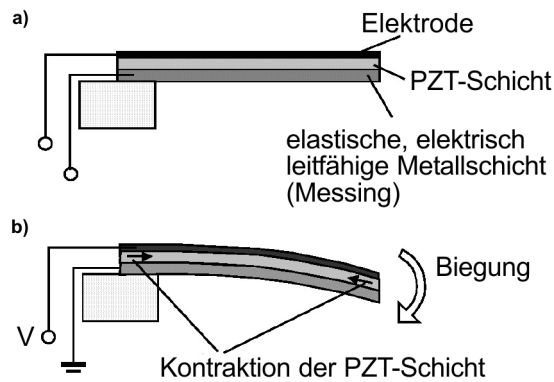


Abbildung 2.5: Schematischer Schichtaufbau a) und Funktionsprinzip b) eines unimorphen Biegebalken aus einlagigem PZT [15].

2.2 Formgedächtniseffekt

Beim Formgedächtniseffekt (FGE) handelt es sich um einen kristallinen Effekt, der auf der sogenannten martensitischen Umwandlung beruht. Grundlage des Effekts ist eine reversible Umwandlung von einer Niedertemperaturphase (Martensit, M-Phase) zu einer Hochtemperaturphase (Austenit, A-Phase) und umgekehrt. Der Prozess läuft diffusionslos ab. Die martensitische Strukturumwandlung in Metallen führt zu starken Verspannungen im Kristallgitter verbunden mit Versetzungsbildung und irreversibler Verformung. Bei Formgedächtnislegierungen wird dies durch Bildung speziell orientierter Martensitplatten, sogenannter „Zwillinge“, fast vollständig vermieden. Wie in Abbildung 2.6 gezeigt, erfolgt die Umwandlung der A-Phase in die M-Phase diffusionslos durch „Klappvorgänge“ vom kubisch raumzentrierten Austenit in eine verzwilligte Martensitstruktur. Durch „Entzwilligen“ des Martensits lässt sich diese leicht verformen.

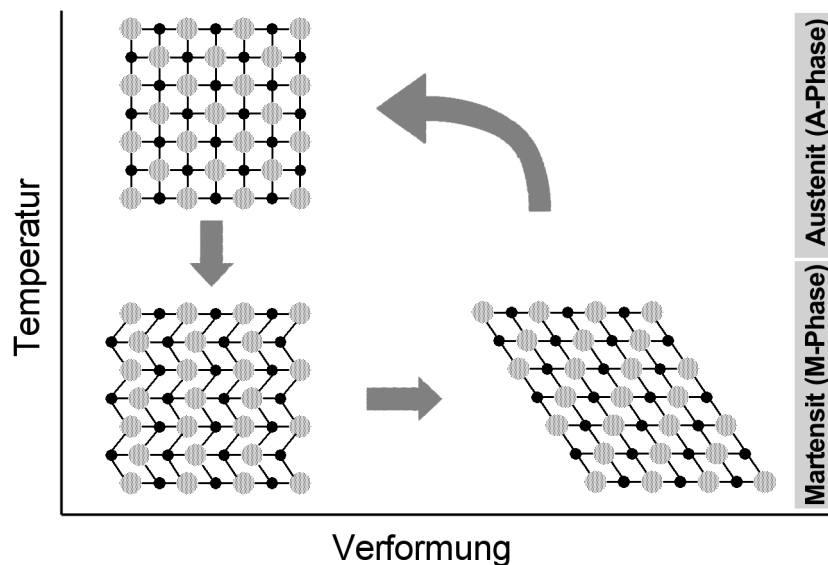


Abbildung 2.6: Martensitische Umwandlung und Formgedächtniseffekt (FGE) [6].

Bei der Formgedächtnislegierung (FGL) NiTi ist dies bis zu einem Prozentsatz von 10% möglich. Die Verformung bleibt bestehen, bis die sogenannte „Umwandlungstemperatur“ im Material überschritten wird. Dabei stellt sich aufgrund der Reversibilität der thermoelastischen martensitischen Umwandlung die Kristallorientierung des Austenits und damit die ursprüngliche Gestalt ein. Aufgrund der höheren Temperatur wird die Austenitphase (A-Phase) auch als „Hochtemperaturphase“ bezeichnet während die Martensitphase (M-Phase) eine „Niedertemperaturphase“ ist. Abbildung 2.7 zeigt die Umwandlungstemperaturen beim Durchlaufen der Umwandlungen Austenit/Martensit und Martensit/Austenit. Dabei bezeichnen M_s , M_f die martensitische Start- und Endtemperatur und A_s , A_f die austenitische Start- und Endtemperatur. Da M_s und A_f bzw. M_f und A_s bei unterschiedlichen Temperaturen liegen, wird eine Hysterese durchlaufen. Gründe dafür sind unter anderem die Entstehung von Gitterdefekten bei der Umwandlung oder die Reibung der Phasengrenze beim Umordnen im Kristallgitter. A-Phase und M-Phase zeigen vor allem im Festigkeitsverhalten charakteristische Unterschiede. Die darauf beruhenden Formgedächtniseffekte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

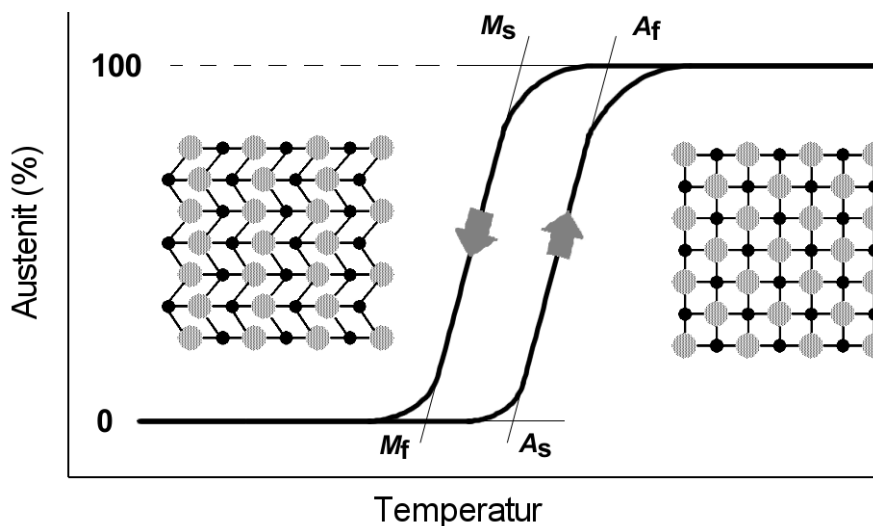


Abbildung 2.7: Umwandlungstemperaturen und Hysterese [6].

2.2.1 Einweg-Effekt

Aufgrund der Fähigkeiten von Formgedächtnislegierungen, einen bestimmten Grad von plastischer Verformung beim Erwärmen aufzuheben, der jedoch beim Abkühlen in die Niedertemperaturphase bestehen bleibt, spricht man vom Einweg-Effekt. Dies erfolgt anhand einer reversiblen Martensitverformung durch einen Umwandschritt in die Hochtemperaturphase. Erwärmt man plastisch verformtes Material, setzt ab der Temperatur A_s , dem Erreichen der Hochtemperaturphase, eine Ausgleichsbewegung ein. Diese ist bei A_f abgeschlossen, die eingepreßte „Gedächtnisgestalt“ im Austenit ist wiederhergestellt. Der Effekt ist in Abbildung 2.8 im Spannungs-Dehnungs-Temperatur Diagramm dargestellt. Die gesamte Entfaltung des Formgedächtniseffekts erfolgt innerhalb eines Temperaturbereichs von 10 bis 20 K. Durch die hohe Ener-

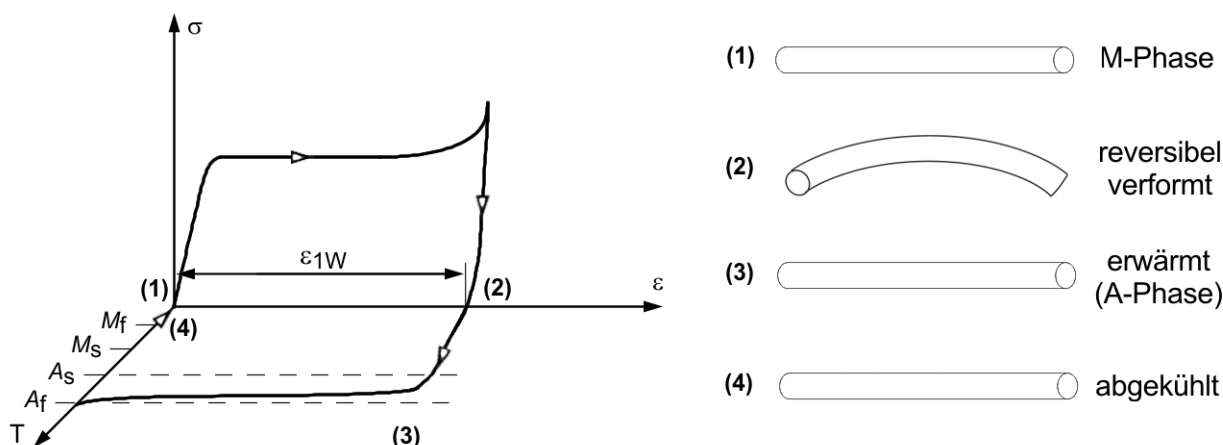


Abbildung 2.8: Spannungs–Dehnungs–Temperatur Diagramm für den Einweg–Effekt.

gedichte (siehe Abbildung 2.1) dieses Effekts lassen sich bei äußerer Belastung des Materials sehr hohe Formgedächtniskräfte in einem kleinen Temperaturbereich erzeugen. Abhängig vom Legierungssystem kann die A_s -Temperatur in einem Bereich von -150°C bis zu 150°C gezielt eingestellt werden.

2.2.2 Zweiweg–Effekt

Bauteile mit Zweiweg–Effekt können zwei eingeprägte Formen wiederholt einnehmen. Um den Effekt zu nutzen sind spezielle mechanische und thermische Werkstoffbehandlungen nötig, das sogenannte „Trainieren“ des Materials.

Beim Verfahren der starken Martensitumformung wird neben der reversiblen Verformung, dem Verschieben von Zwillingsgrenzen (Bild 2.6) auch ein Anteil irreversibler plastischer Verformung erzeugt. Der irreversible Anteil bildet dabei eine bestimmte Versetzungsstruktur aus. Bei Erwärmung in die A–Phase findet zunächst die dem Einweg–Effekt entsprechende Rückverformung des reversiblen Anteils statt. Das Material befindet sich nun in der A–Phase. Beim Abkühlen findet jedoch im Gegensatz zum Einweg–Effekt eine weitere Formänderung statt. Diese wird durch Einlagern des entstehenden Martensits in das Spannungsfeld der erzeugten Versetzungsstruktur der irreversiblen plastischen Verformung hervorgerufen. Es bildet sich eine Niedertemperaturform aus, die sich durch beliebig wiederholbare Temperaturzyklen in die A–Phase umwandeln lässt. Abbildung 2.9 zeigt dieses als Zweiweg–Effekt bezeichnete Verhalten in einem Spannungs–Dehnungs–Temperatur Diagramm. Für den Übergang zwischen den zwei Verformungszuständen ist somit keine erneute Verformung nötig. Die bei diesem Effekt erzielbare Formänderung ist jedoch geringer als beim Einweg–Effekt.

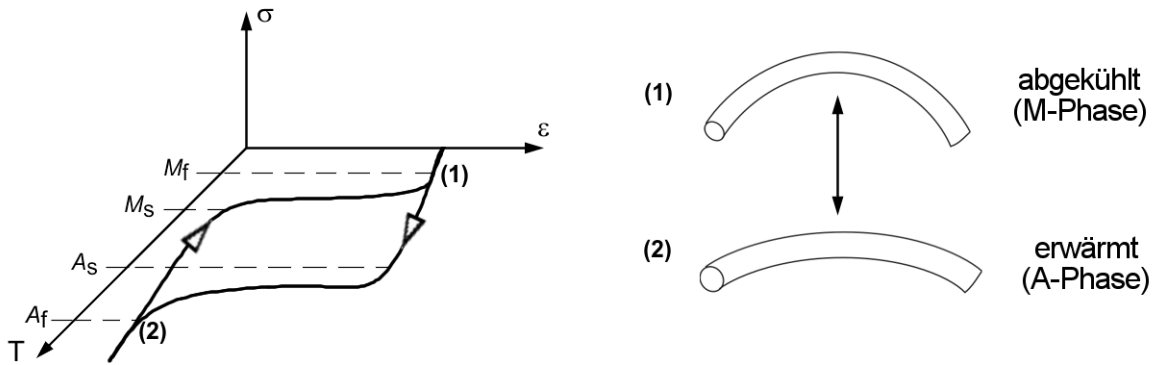


Abbildung 2.9: Spannungs-Dehnungs-Temperatur Diagramm für den Zweiweg-Effekt.

2.2.3 Pseudoelastischer Effekt

Einen ungewöhnliches Verhalten im Spannungs-Dehnungs Diagramm beschreibt der pseudoelastische Effekt. Die Martensitumwandlung lässt sich nicht nur durch thermische Einwirkung hervorrufen, sondern auch durch äußere mechanische Kräfte. Dieses Verhalten tritt in einem Temperaturbereich zwischen der Temperatur A_f und einer oberen kritischen Temperatur M_d auf. Wird eine Formgedächtnislegierung in diesem Temperaturbereich durch äußere Kräfte belastet, erfolgt durch die innere Spannung die Bildung von Martensit-Zwillingen, die jedoch sofort entzwillingen und eine Entspannung im Material hervorrufen. Es bildet sich, wie in Abbildung 2.10 gezeigt, ein sehr flacher Verlauf der Spannung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus. Wird das Material entlastet, verschwinden die Martensitvarianten aufgrund der Instabilität bei hohen Temperaturen von $T_1 > M_s$. Da die ursprüngliche Gestalt wieder vollständig hergestellt wird und die Dehnungen bis zu 6% betragen kann, spricht man auch von Superelastizität. Bei Temperaturen $T > M_d$ kann kein Martensit mehr erzeugt werden. Hier ist es leichter die Verformung mittels Versetzungen und deren Bewegung zu erzielen. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm gleicht dem konventioneller Legierungen.

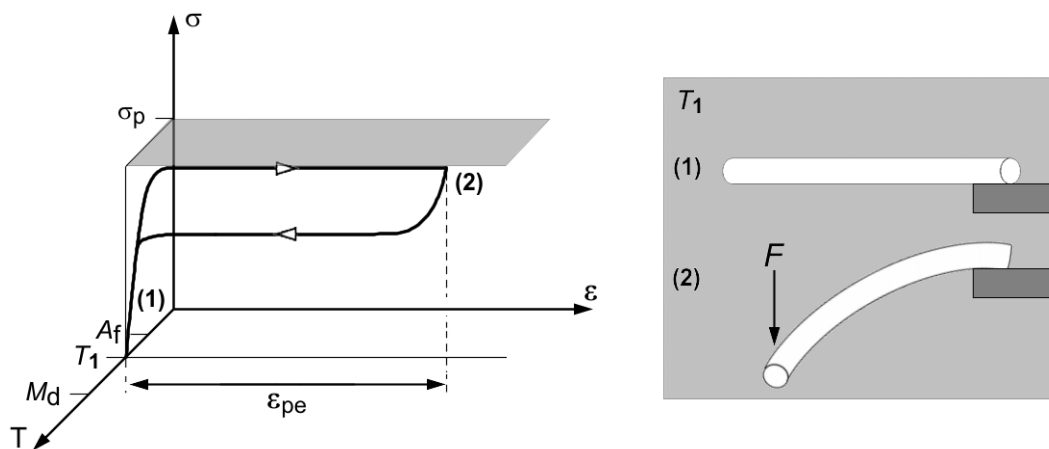


Abbildung 2.10: Spannungs-Dehnungs-Temperatur Diagramm für den pseudoelastischen Effekt.

2.3 Formgedächtnislegierungen

Die in dieser Arbeit verwendeten Formgedächtnislegierungen (FGL) sind die ternären metallischen Legierungen NiTiCu und Ni₂MnGa. Da diese verschiedene grundlegende Eigenschaften aufweisen, wird in den folgenden zwei Abschnitten genauer auf diese eingegangen. Grundsätzlich muss bei den vorgestellten Legierungen zwischen dem Vorkommen als Kompaktmaterial und Dünnschichtmaterial unterschieden werden. Die getrennte Betrachtung ist erforderlich, da ausgehend von den Kompaktmaterialien die beobachteten Effektgrößen sich nicht direkt auf Dünnschichtmaterialien übertragen lassen. Dies liegt hauptsächlich in der Herstellung der Dünnschichten mittels Sputterverfahren [17] begründet. Größte Herausforderungen sind dabei die exakte Reproduktion der stöchiometrischen Legierungszusammensetzung, die Verhinderung von Ablagerungen sowie die Kontrolle der anisotropen Materialeigenschaften. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich nur auf Dünnschichtmaterialien.

2.3.1 NiTiCu-Legierungen

Legierungen aus NiTi stehen schon sehr lange im Mittelpunkt der Forschung. Bereits seit 1958 kommen NiTi-Legierungen unter dem Begriff *NITINOL* (Nickel Titan Naval Ordnance Laboratory) auf vielfältige Weise in technischen Anwendungen zum Einsatz. Vorteile der Legierung sind die Reproduzierbarkeit mechanischer Eigenschaften in Bezug auf die Formgedächtniseffekte, die Korrosionsbeständigkeit und die Biokompatibilität.

Für die Herstellung dünner Schichten werden Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung eingesetzt (englisch: *physical vapour deposition*, PVD). Für die in dieser Arbeit eingesetzten Proben wird das hochfrequente Magnetron-Sputterverfahren verwendet, bei dem Abscheideraten von ungefähr 10 µm/h erreicht werden [17]. Das *Target*, das die Ausgangsmaterialien in hochreiner Form enthält, dient in der Anlage als „Spender“ aus dem die Atome mittels Argon (Ar)-Ionen herausgeschlagen werden und sich entsprechend der Konzentration im *Target* als Legierung auf einem Substrat ablagern. Die größte Herausforderung besteht dabei in der Kontrolle der erzeugten Stöchiometrie und der Sicherstellung hoher Reinheit in den Filmen. Da bei der Abscheidung eine geringere Ti-Konzentration in den Schichten als im *Target* beobachtet wird [18], muss die stöchiometrische Zusammensetzung zum Beispiel durch eine leicht erhöhte Titan-Konzentration im *Target* angepasst werden [19]. Verunreinigungen in den abgeschiedenen Schichten haben einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften. Ablagerungen verändern einerseits die stöchiometrische Zusammensetzung der Kristallmatrix und erhöhen andererseits die Sprödigkeit, was starke Auswirkungen etwa auf den pseudoelastischen Effekt hat. Dass dieser von der Orientierung der Kristallstruktur abhängt, zeigt die Untersuchung der superelastischen Dehnung in Einkristallen. Die Dehnung entlang der [111]_{B2}-Achse liegt mit 9.8% deutlich über dem der [001]_{B2}-Achse mit 2.7%. B2 bezeichnet die Kristallstruktur der Hochtemperaturphase (A-Phase). Sie entspricht der kubisch primitiven Struktur des Cäsium-Chlorid (CsCl) und besteht aus einem raumzentrierten Gitter.

Durch partielle Substitution von Ni mit Cu lassen sich die Eigenschaften der Formgedächtnislegierung bezüglich der Hysterese der Umwandlungstemperaturen beeinflussen. Diese lässt sich bei NiTiCu-Legierungen signifikant auf unter 13 K reduzieren [20]. Die Abhängigkeiten der Umwandlungstemperaturen vom Ti-Gehalt der ternären Legierung sind in Abbildung 2.11 gezeigt. Der Vorteil der Kupferbeigabe liegt in den nahezu konstanten Umwandlungstemperaturen für einen Ti-Gehalt in einem Bereich zwischen 47% und 51%. Bei binären NiTi-Legierungen mit einem Ti-Gehalt von 49 at.% sinkt etwa die martensitische Starttemperatur (M_s) bereits auf -100°C [21].

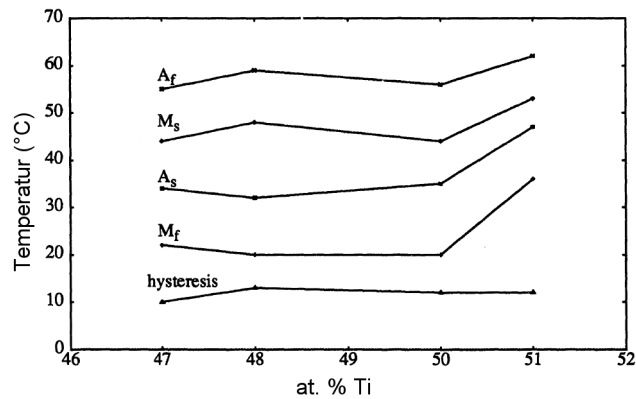


Abbildung 2.11: Umwandlungstemperaturen von NiTiCu-Legierungen und Breite der Hysterese in Abhängigkeit vom Ti-Gehalt [22].

Weiterhin zeigt sich, dass die wiederherstellbare Spannung σ_{rec} für den gleichen Bereich des Ti-Gehalts konstant hoch ist (Tabelle 2.1). σ_{rec} bezeichnet die wiederherstellbare Spannung als Differenz aus der Spannung in der A-Phase und der martensitischen Restspannung $\sigma_{y(M)}$ der M-Phase. Mit einem Maximalwert von 330 MPa liegt sie im Bereich, der ebenfalls in [23] berichtet wird.

Tabelle 2.1: Umwandlungstemperaturen, Hysteresebreite und wiederherstellbare Spannungen σ_{rec} für unterschiedliche Legierungszusammensetzungen [22].

Ti (at.%)	M_s (°C)	M_f (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	Hyst. (°C)	σ_{rec} (MPa)
51	53	36	47	62	10	330
50	44	20	35	56	13	210
48	48	20	32	59	12	310
47	44	22	34	55	12	295

Eine Möglichkeit den Einweg-Effekt zusammen mit der erzwungenen Formumwandlung in NiTiCu-Legierungen zu kombinieren sind Verbundschichten mit zwei oder mehr Lagen. Ist eine der Schichten in einem solchen Verbund eine Formgedächtnislegierung, die auf einer Substratschicht aufgebracht ist, können thermisch induzierte Spannungen durch die martensitische Umwandlung

„entspannt“ werden. Da dies innerhalb eines kleinen Temperaturbereichs von etwa 10–30 K stattfindet, lassen sich durch Temperaturänderungen in diesem Bereich sehr hohe Gestaltsänderungen beobachten. Um die thermischen Verspannungen zu induzieren, wird die Probe einem Tempervorgang bei Temperaturen von 500–1000°C unterzogen. Abhängig von der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten der Substrat- und NiTiCu-Schicht lassen sich Dehnungsspannungen bei Substraten aus Mo oder Si und kompressive Spannungen bei Stahlverbänden wie Fe₇₈Cr₁₈Ni₁₀ erzeugen. Die erzielbare Arbeit liegt eine Größenordnung über dem Bimetalleffekt [24].

2.3.2 Ferromagnetische Ni₂MnGa-Legierungen

Ferromagnetische Formgedächtnislegierungen (FFGL) zeigen großes Potential beim Einsatz als Aktoren, da sie magnetische Eigenschaften und den Formgedächtniseffekt in einem Material vereinen. Die Kopplung der beiden Phänomene bezeichnet man als ferromagnetischen Formgedächtniseffekt (FFGE). Er bewirkt eine Umorientierung der Martensitzwillinge und damit eine Formänderung, wie im oberen Teil von Abbildung 2.12 schematisch dargestellt. Während beim Einweg-Effekt eine plastische Verformung unterhalb von σ_{rec} durch Erwärmen in die austenitische Phase (A-Phase) die Formgedächtnisgestalt wiederhergestellt werden kann (Abbildung 2.12 c), erzeugt beim FFGE ein Magnetfeld mit der Flussdichte B die Formänderung bei Raumtemperatur in der M-Phase (Abbildung 2.12 b). Betrachtet man eine Einheitszelle des Kristallgitters in der M-Phase, so ist diese tetragonal flächenzentriert, wie im unteren Teil der Abbildung 2.12 a) dargestellt. Die beiden Gitterkonstanten a und c sind den Hauptachsen der Zelle zugeordnet, wobei die kürzere c -Achse der Vorzugsrichtung der magnetischen Domänen im Material entspricht. Das Magnetfeld versucht die magnetischen Momente der Martensitvarianten entlang des anliegenden Feldes auszurichten, was bei ausreichender Energie der magnetokristallinen Anisotropie zu einem Kippen der Einheitszelle führt. Die c -Achse richtet sich parallel zu den Feldlinien und im rechten Winkel zur ursprünglichen c -Achse aus [25]. Das Maximum der resultierenden Längenänderung beziehungsweise Dehnung $\Delta\varepsilon$ ist durch das Verhältnis a/c bestimmt. Dies gilt jedoch nur für einen Einkristall bei dem eine Martensitvariante und daraus resultierend nur eine Orientierung der Einheitszelle vorliegt. Das in Abbildung 2.12 gezeigte Verhältnis a/c ergibt ein $\Delta\varepsilon$ von 6.36%. Erste Untersuchungen an Kompaktmaterial aus stöchiometrischen Ni₂MnGa von Ullakko et al. [27] zeigten eine maximale Dehnung $\Delta\varepsilon$ von 0.19% bei -8°C und einer magnetischen Feldstärke von 63.7 kA/m. Die Umwandlungstemperaturen M_s und A_s betragen 3°C und 9°C.

Das Umwandlungsverhalten von Ni₂MnGa-Legierungen wurde erstmals 1984 von Webster et al. untersucht [26]. Er zeigte anhand von Magnetfeld-Untersuchungen an stöchiometrischen Ni₂MnGa, dass die Magnetisierung von der Temperatur abhängt wobei die M-Phase magnetisch anisotropes Verhalten und die A-Phase magnetisch isotropes Verhalten zeigt. Oberhalb der Curietemperatur (T_C) verliert das Material seine ferromagnetischen Eigenschaften, die spontane Magnetisierung, und zeigt ein paramagnetisches Verhalten. In diesem Zustand ist eine Magnetisierung durch ein äußeres Magnetfeld möglich, das Material verliert diese aber ohne äußeres Feld wieder. Für Kompaktmaterial wurde M_s zu -71°C und die Curietemperatur T_C zu 103°C

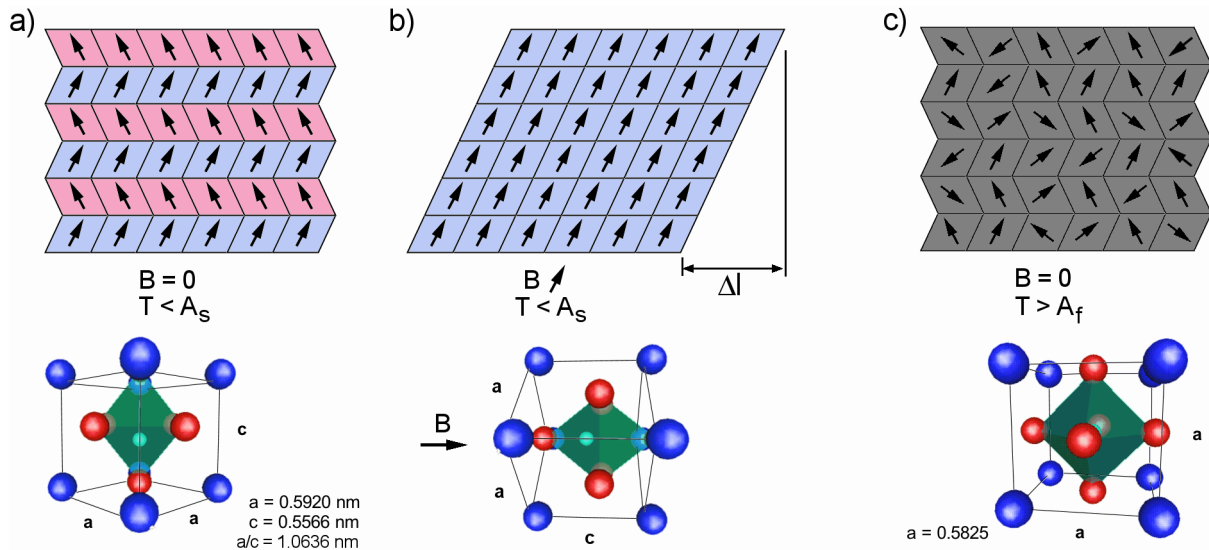


Abbildung 2.12: Magnetischer Formgedächtniseffekt (FFGE) und Struktur einer Einheitszelle des Kristallgitters. a) Martensitzwillinge mit tetragonal flächenzentrierten Kristallgitter. b) Bei der magnetischen Flussdichte B bilden sich Martensitvarianten, deren c -Achse der Einheitszelle in Feldrichtung ausgerichtet ist. c) kubisch flächenzentrierte Einheitszelle (Typ: Heusler $L2_1$) der A-Phase [26].

bestimmt [26]. Um den FFGE als Aktorprinzip bei Raumtemperatur nutzen zu können, müssen die Umwandlungstemperaturen, speziell M_s , oberhalb der Raumtemperatur (RT) liegen. Dies ist bei nicht-stöchiometrischen Ni_2MnGa möglich [28] und kann durch die Legierungszusammensetzung eingestellt werden. Abbildung 2.13 zeigt am Beispiel von M_s , dass eine Erhöhung des Ni-Gehalts von 5 at.% eine Änderung von 150 K zur Folge hat. Gleichzeitig nimmt T_C nur leicht ab. Dieser Aspekt ist für Aktoranwendungen interessant, da sich der Ni-Gehalt so einstellen lässt, dass M_s und T_C nahezu bei gleicher Temperatur liegen (ca. 54 at.%). Somit ist es möglich zwei Effekte, den Einweg-FGE und den FFGE, in einem Bauteil zu nutzen [29]. In nicht-stöchiometrischen Kompaktmaterial aus Ni_2MnGa lässt sich teilweise noch eine wesentlich größere Dehnung $\Delta \varepsilon$ beobachten. Bei der in Ref. [30] untersuchten Legierung aus $\text{Ni}_{48.8}\text{Mn}_{29.7}\text{Ga}_{21.5}$ zeigt sich, dass die M-Phase in zwei intermartensitische Phasen unterteilt ist, deren Kristallstruktur neben der tetragonalen Einheitszelle über eine orthorhombische Struktur verfügt. Bei M_f von 60°C und A_f von 69°C liegt im Bereich von RT die M-Phase in orthorhombischer Form vor. Die hier auftretende Dehnung im Magnetfeld beträgt bis zu 9.5% bei einer magnetischen Flussdichte von 1.05 T [30]. Mögliche Anwendungen für Aktoren aus Kompaktmaterial sind Linearaktoren mit großen Verstellwegen im mm-Bereich und hohen Frequenzen bis 500 Hz aufgrund der im Vergleich zum thermisch angesteuerten Einweg-Effekt schnellen Ansprechzeit des FFGE im Magnetfeld [25].

Weitere Anwendungen werden möglich, wenn der FFGE in Dünnschichtmaterialien nutzbar gemacht wird. Dies erlaubt zudem den Einsatz in Mikroaktoren. Die Kristallstruktur der Dünnschichten hängt von der Herstellungstechnik ab. Bei der *molecular beam epitaxy* (MBE) werden die einzelnen Legierungspartner präzise auf ein einkristallines Substrat abgeschieden, das Schichtwachstum kann bis auf eine Atomlage genau gesteuert werden. Die in [31] erzeugten stöchiometrischen

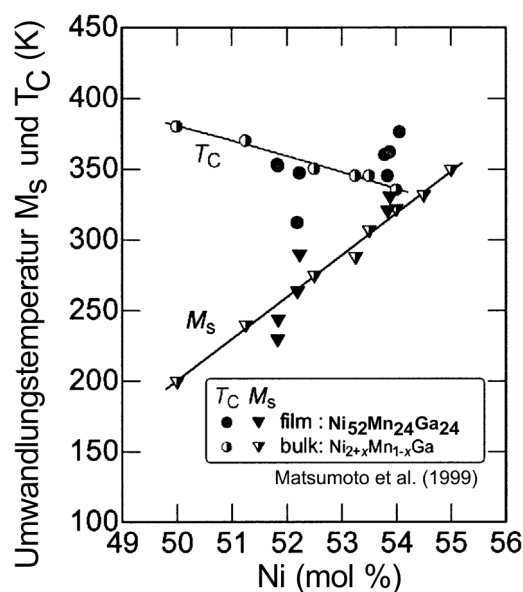


Abbildung 2.13: Abhängigkeit der Umwandlungstemperatur M_s und der Curietemperatur T_C vom Ni-Gehalt [28].

Dünnschichten aus Ni_2MnGa weisen eine einkristalline Struktur auf, die in freistehender Form bei -138°C den FFGE als auch den temperaturabhängigen Zweiweg-Effekt zeigen. Die Curietemperatur liegt bei etwa 67°C . Dünnschichten mit einer polykristallinen Struktur entstehen bei der mittels Hochfrequenz-Sputtertechnik mit stöchiometrischen oder nicht-stöchiometrischen Sputtertargets. Die abgeschiedenen Dünnschichten liegen in nicht-stöchiometrischer Form vor, da die einzelnen Legierungspartner meist eine unterschiedliche Abscheiderate aufweisen. In Ref. [32] gesputterte Dünnschichten zeigen nach dem Sputterprozess ungeordnete Martensitvarianten, was in der amorphen Struktur der abgeschiedenen Schicht begründet ist. Um die Martensitvarianten in einer Vorzugsrichtung anzuordnen, erfolgt eine Kristallisation der Dünnschichten bei 800°C mit einem anschließenden langsamen Abkühlvorgang. Die resultierende Kristallstruktur zeigt Kristallite mit Korngrößen von $0.1\ \mu\text{m}$ bis $1.0\ \mu\text{m}$ [33]. Bei polykristallinen Dünnschichten ist aufgrund der durch die Korngrenzen unterteilten Struktur der Martensitvarianten ein geringerer FFGE zu erwarten. Ein in Ref. [34] vorgestelltes analytisches Modell beschreibt die maximal mögliche Dehnung unter einem Magnetfeld mittels der Verteilung der magnetischen Momente definierter Partikelgruppen. Bezogen auf die maximale Dehnung in kristallinem Kompaktmaterial wird eine maximale Dehnung von 50% berechnet. Weiterhin wird basierend auf der in [35] beschriebenen dreidimensionalen Membran-Theorie gezeigt, dass die erzielbare Arbeit in freistehenden Ni_2MnGa -Dünnschichten wesentlich größer als in Kompaktmaterial ist, da die Deformationsmoden in dünnen Filmen nur auf Scherungs- und Dehnungsenergie beruhen und nicht auf Biegeenergie wie in Kompaktmaterial.

2.4 Scanner

Mit dem Begriff *Scanner* werden Systeme beschrieben, die unbekannte Objekte im Raum auf systematische Weise abtasten oder vermessen. Ziel ist es, aus einer Vielzahl von Einzelmessungen ein Gesamtbild des Objekts zu erzeugen. Zu den verschiedenen Scannertypen, die mit einem Einzelsensor arbeiten, können auch Laserscanner eingeordnet werden, bei denen die Abtastung der Objekte durch Laserstrahlen erfolgt. Im Folgenden werden zuerst verschiedene Spiegelaktoren unter dem Aspekt der Baugröße betrachtet.

2.4.1 Makroskopische Scanner

Ein Großteil der makroskopischen Scanner, deren Gehäuseabmessungen im zweistelligen Zentimeterbereich liegt, basiert auf einem konstant rotierenden Polygonspiegel. Abhängig von der Anzahl der Spiegelfacetten wird ein Laserstrahl über einen bestimmten Winkelbereich abgelenkt, er oszilliert auf einer virtuellen Linie immer zwischen den Endpunkten, was einer Strahlablenkung in einer Dimension entspricht. Der maximale optische Scanwinkel $2\Delta\alpha$ ergibt sich aus dem Reflexionsgesetz und dem Winkel $2\Delta\alpha_{\perp}$ zwischen den Normalen zweier benachbarter Spiegelflächen

$$2\Delta\alpha = 2\Delta\alpha_{\perp} = 2 \frac{360^{\circ}}{N} \quad (2.15)$$

wobei N der Anzahl der Facetten entspricht. Ein maximaler Scanwinkel von 240° lässt sich somit mit einem dreiseitigen Polygonspiegel erzielen, bei acht Spiegelementen beträgt er noch 90° . Von Nachteil sind durch den Antrieb hervorgerufene Vibrationen und das Fehlen einer direkten Bestimmung der Winkelposition des Polygonspiegels im Antrieb. Neben zusätzlichen optischen Sensoren werden außerdem bürstenlose Motoren eingesetzt, deren Ansteuersignal zur Positionsbestimmung herangezogen werden kann. Ein weiteres Problem bei Polygonspiegeln mit geringer Facettenanzahl besteht in einer lateralen oszillatorischen Bewegung l der Spiegeloberfläche an der Stelle an der der Laserstrahl auftrifft

$$l = R - \left(1 - \cos\left(\frac{360^{\circ}}{2N}\right)\right) \quad (2.16)$$

wobei l die laterale Bewegung der Spiegeloberfläche und R den äußeren Radius des Polygonspiegels bezeichnet. Diese Änderung des Lichtweges muss in bestimmten Fällen mit berücksichtigt werden, da die Drehzahlen der Polygonspiegel bis zu 40.000 Upm betragen. Mit der Anzahl der Facetten nimmt dieser Effekt ab, jedoch verringert sich auch der maximale Scanwinkel.

Abbildung 2.14 a) zeigt einen Polygonspiegel mit bürstenlosen Motor wie er in Laserdruckern zum Einsatz kommt. Dabei wird nach dem Prinzip der Elektrofotografie mit Hilfe eines modulierten Laserstrahls und des Polygonspiegels im Zeilenverfahren eine lichtempfindliche Trommel belichtet auf der nur an den unbelichteten Stellen der Toner elektrostatisch angezogen wird. Hauptschwierigkeit bei diesem Verfahren sind die Steuerung von Trommelgeschwindigkeit, Polygonspiegel-Drehzahl und Laserstrahlmodulation um ein homogenes und symmetrisches Punktraster auf der Trommel zu erzeugen.

Ein ähnliches Konzept nutzt der Alasca® Laserscanner der Firma IBEO AS in Bild 2.14 b). Anstelle eines rotierenden Polygonspiegels wird nur ein Spiegel genutzt, der unter einem Winkel von 45° zur Rotationsachse drehbar gelagert ist und ebenfalls mit konstanter Geschwindigkeit rotiert.

Neben der Information über den aktuellen Drehwinkel des Spiegels muss bei einem Laserscanner-System auch die Entfernungsinformation von Objekten erfasst werden. Befinden sich diese, wie in Abbildung 2.15 a) dargestellt, im horizontalen Sichtbereich des Laserscanners, kann über die Lichtlaufzeit der von einem Objekt zurück reflektierten Laserpulse dessen Entfernung berechnet werden. Bei diesem Messverfahren handelt es sich um ein direktes Messverfahren, da die Entfernung direkt messbar ist. Im Vergleich dazu müssen videobasierte Systeme die Tiefeninformation aus einer aufgenommenen Szene, Abbildung 2.15 b), indirekt etwa durch Triangulation mit Hilfe eines Stereokamera-Systems berechnen. Hierbei nimmt die Messunsicherheit mit steigender Entfernung zu, während sie bei der Lichtlaufzeitmessung in erster Näherung konstant bleibt.

In Abhängigkeit von dem eingesetzten Aktuator, der den Laserstrahl ablenkt, kann ein gewisser Raumbereich abgetastet werden. Bei rotierenden Spiegelsystemen erfolgt die Ablenkung in einer Dimension (1D), das heißt entlang einer Geraden. Eine ausreichende Abtastung des Raumbereichs ist meist nur bedingt möglich, da etwa bei horizontal ausgerichtetem Strahl nur Objekte erkannt werden, die die horizontale Ebene des abgestrahlten Lichts schneiden. Eine Lösung besteht darin, mehrere übereinander liegende Ebenen aus eindimensional abgelenkten Laserstrahlen zu nutzen um eine größere Anzahl von Objekten zu erfassen. Eine weitere Verbesserung der Abtastung kann durch zweidimensionale (2D) Ablenkung eines Laserstrahls erreicht werden. Auf diese Weise kann anstatt mehrerer Ebenen ein Raumbereich annähernd flächendeckend abgetastet werden.

Um bei dem in Abbildung 2.14 a) gezeigten Alasca® Laserscanner eine Messentfernung von über 100 m zu erreichen, dient der großflächige rotierende Ablenkspiegel zugleich als Einkoppelspiegel des auf den integrierten Empfänger zurück reflektierten Lichts. Dadurch kann eine ausreichende Lichtmenge eingefangen werden. Da der Scanner für den Einsatz in mobilen Anwendungen wie etwa Automobilen entwickelt wurde, muss sichergestellt werden, dass die horizontale Scanebene durch Nickbewegungen des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt eine Erkennung von Objekten ermöglicht. Dazu werden anstatt einer horizontalen Scanebene vier Ebenen durch Auffächern des

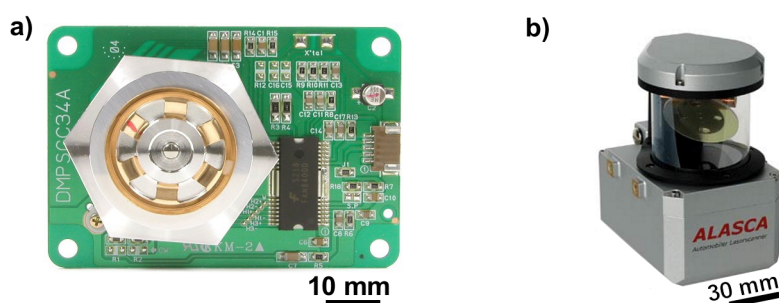


Abbildung 2.14: a) Polygonspiegel-System von Samsung Electro-Mechanics, b) Alasca® Laserscanner der IBEO AS GmbH.

Laserstrahl in vertikaler Richtung verwendet. Dieses System bietet einen maximalen Scanwinkel von 240° bei einer Scanfrequenz bis zu 40 Hz.

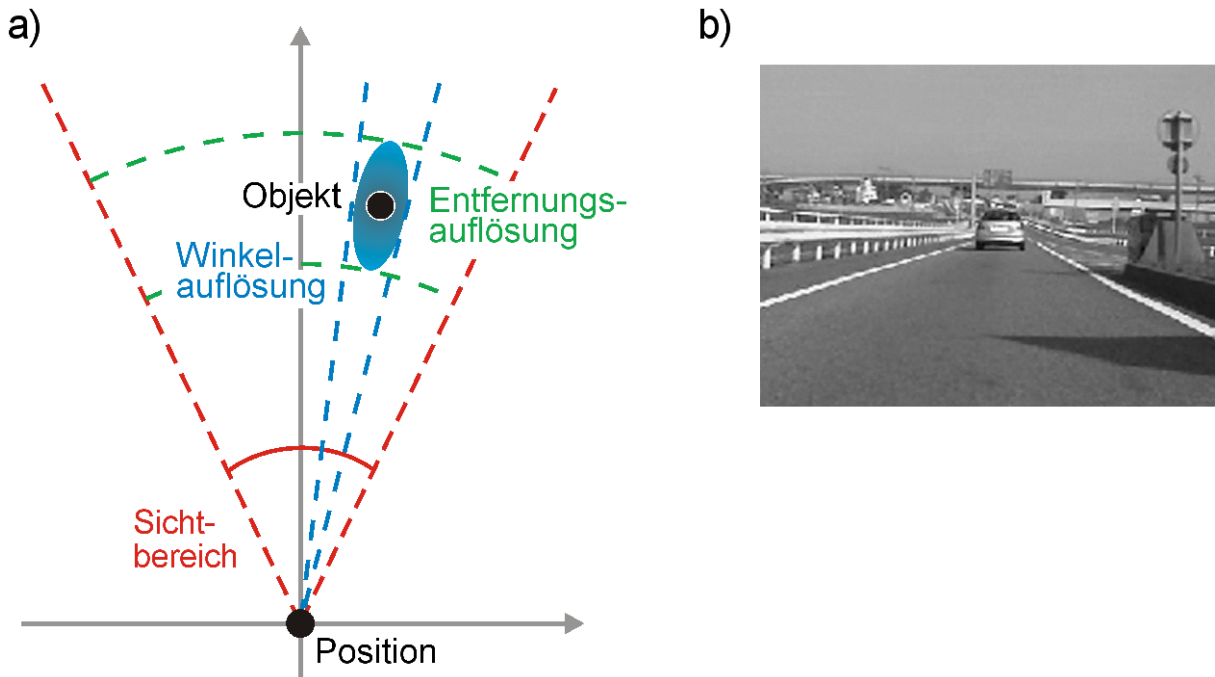


Abbildung 2.15: a) Vogelperspektive auf den Sichtbereich eines Laserscanners, b) Aufnahme einer Straßenszene mit einer Monokamera.

Zur Klassifizierung eines Laserscanner-Systems können die aus Abbildung 2.15 a) bezeichneten Größen herangezogen werden. Für die gezeigte horizontale Abtastung der 1D-Ablenkeinheit sind dies:

- Größe des Sichtbereichs, definiert durch den Scanwinkel.
- Maximale Messentfernung, gegeben durch die Laserleistung und die Empfindlichkeit des Empfängers.
- Genauigkeit der Entfernungsmessung, abhängig von der zeitlichen Auflösung des Entfernungsmesssystems.
- Genauigkeit der Winkelmessung, durch den Winkelsensor gegeben.

2.4.2 Spiegelaktoren in Silizium-Technik

Mit den neuen Prozessen der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Mikrostrukturen eröffnen sich auch neue Möglichkeiten im Bereich der Displaytechnik. Mit der steigenden Akzeptanz von neuen Materialien und immer besser kontrollierbaren Prozesstechniken in der IC-Industrie gilt MEMS heute als akzeptierte Technologie bei den Herstellern. Dies führte auch zur Aufnahme

sogenannter MEMS–Verpackung oder –Konfektionierung in die Produktkataloge der großen *high volume packaging* Hersteller [36]. Weiterhin gibt es einen Trend hin zu auftragsbasierten, kostenoptimierten IC–Fabriken, hauptsächlich im asiatischen Raum, die immer mehr Aufträge im Bereich MEMS von start-up Unternehmen ohne eigene Wafer–Fabriken annehmen. Auf diese Weise können Firmen immer wieder neue Nischen in der Display–Technik besetzen.

Der DMD™–Aktor von Texas Instruments beschreibt sehr gut die Entwicklung eines MOEMS Aktors in Si–Technik. Der Herstellungsprozess basiert auf einem typischen CMOS–Prozess mit drei Metalllagen und mehreren Opferschichten [1]. Über einer zuvor im Standard CMOS–Prozess hergestellten Lage mit einer elektrischen SRAM–Speicherzelle liegen die Aktorelemente des Displays (Bild 2.16). Mit einer Kantenlänge eines einzelnen Aktors von $17\ \mu\text{m}$ und einer Gesamtanzahl von über 2 Mio. Aktoren stellt dieses System hohe Anforderungen an den Herstellungsprozess. Diese heute unter dem Begriff Oberflächen–Mikromechanik und Opferschichtprozess bekannten Herstellungsverfahren wurden 1987 unter anderem in den Central Research Laboratories von Texas Instruments, ausgehend von den bekannten Sputter–, Lithographie– und Plasmaätz–Techniken, entwickelt um freistehende mikromechanische Aktorelemente auf einem Silizium–Wafer zu integrieren [1].

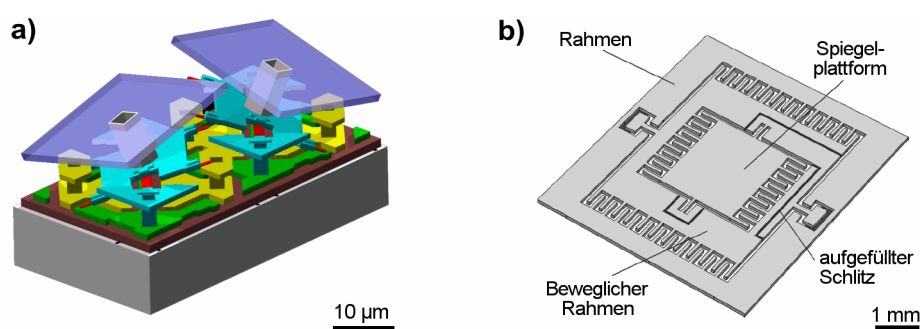


Abbildung 2.16: a) Digital Mirror Device, DMD™ von Texas Instruments [1], b) 2D Spiegelaktor [37].

Wie in Bild 2.16 gezeigt, kann das drehbar gelagerte Spiegelement mittels elektrostatischer Kräfte aus der horizontalen Ruhelage ausgelenkt werden. Der maximale Kippwinkel beträgt $\pm 10^\circ$ unter dem einfallendes Licht entweder auf einen Absorber oder auf die Projektionslinse gelenkt wird [1]. Für eine Vollfarbprojektion mit 3×2^8 Farben müssen die in Resonanz betriebenen Spiegelemente innerhalb von $21\ \mu\text{s}$ einen Umschaltvorgang durchführen [1]. Die Intensitätsabstufung einer Farbe wird durch das Verhältnis der Ein- und Ausschaltdauer eines Spiegels erzeugt. Die erforderlichen Arbeitsfrequenzen von ca. $50\ \text{kHz}$ ließen sich erst mit Aktorstrukturen im μm –Maßstab realisieren. Den größten Vorteil zeigen mikrotechnisch hergestellte aktive Strukturen jedoch bei Zuverlässigkeits– und Ermüdungstests. Aufgrund der kleinen Strukturen und äußerst geringen bewegten Massen ergibt sich eine extrem hohe Erschütterungs– und Vibrationsfestigkeit, da die Vibrationsmoden im System meist um mehrere Größenordnungen über den Arbeitsfrequenzen der Aktoren liegen und so ein Einkoppeln von Störschwingungen erschwert wird. Ermüdung oder Bruch der nur $1\ \mu\text{m}$ breiten Torsionsstege ist selbst nach 10^{12} Zyklen nicht zu beobachten. Nachteilig sind die meist geringen Kippwinkel der Spiegel die in diesem Fall mit $\pm 10^\circ$ jedoch

vergleichsweise groß sind. Eine zusätzliche Schwierigkeit zeigt hier der Einsatz von elektrostatischen Aktoren, da deren Kraft nichtlinear mit der angelegten Spannung steigt. Da die maximale Spannung in einem CMOS-Prozess auf 5 V begrenzt ist, konnte nur über eine Optimierung der Elektrodenfläche die erforderliche Kraft erzeugt werden [1].

Statt jedem Punkt auf einer Projektionsfläche einen einzelnen Spiegelaktor zuzuordnen nutzt das System in Bild 2.16 b) einen einzigen Spiegel, der in zwei zueinander rechtwinkligen Richtungen abgelenkt werden kann. Er basiert ebenfalls auf dem elektrostatische Prinzip, bei dem die Elektroden zur Verstärkung der elektrostatischen Kräfte eine Fingerstruktur und dadurch eine größere Elektrodenfläche aufweisen. Der Aktor wird ebenfalls in einem CMOS-Prozess auf einem *silicon on insulator* (SOI)-Wafer hergestellt. Auch hier lassen sich aufgrund der kleinen Spiegelabmessungen von $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ hohe Arbeitsfrequenzen bis zu 8 kHz in Resonanz erzielen. Diese sind nötig, da zur Ablenkung des Lichtstrahls nur ein Spiegel genutzt wird und die Projektionsfläche daher im Zeilenscanverfahren Zeile für Zeile abgefahren werden muss. Dazu wird meist eine Frequenz benötigt, die um drei bis vier Größenordnungen über der Bildwiederholfrequenz liegt. Der Aktor erzielt einen Kippwinkel von $\pm 11^\circ$ bei einer elektrostatischen Spannung von 16 V. Weiterhin verfügt er über eine Schockresistenz von über 10^3 g . Es zeigt sich aber, dass zur Vermeidung von gegenseitigen Störungen der Ablenkeinheiten ein sehr komplexes Design des Aktors erforderlich ist und die Güte des abgelenkten Lichts durch dynamische Verformungen im Spiegel herabgesetzt wird.

2.4.3 Alternative Konzepte

Eine Auswahl möglicher Alternativen zu Silizium-Spiegelaktoren ist im Folgenden aufgelistet. Bei diesen Konzepten wird versucht die bekannten Nachteile, wie geringe Kippwinkel und komplexe Mehrlagen-Prozesstechnik, durch Einsatz anderer Akteurprinzipien oder durch neue Herstellungstechnologien zu beheben.

- Elektromagnetische Spiegelaktoren
- Elektrothermische Spiegelaktoren mit deren Untergruppe der Spiegelaktoren auf Basis von Formgedächtnislegierungen (FGL)

2.4.3.1 Elektromagnetische Spiegelaktoren

Bild 2.17 a) zeigt einen Spiegelaktor basierend auf einem magnetischen Wirkprinzip [4]. Eine horizontale Ablenkeinheit nutzt eine elektrostatische Kammstruktur um eine Torsionsschwingung zu erzeugen, gleichzeitig sorgen elektrische Strompulse im äußeren Rahmen für eine Auslenkung im Magnetfeld aufgrund der Lorentz-Kraft. Neben der Baugröße, die durch die großen Permanentmagneten gegeben ist, muss ein mehrlagiger Herstellungsprozess in Verbindung mit Galvanik eingesetzt werden, woraus ein großer Herstellungsaufwand des Systems resultiert. Die benötigte

Leistung zum Betrieb des Aktors beträgt etwa 200 mW [4]. Der verwendete Spiegel misst 1.5 x 1.5 mm². Mit diesem Wirkprinzip werden in einer anderen Arbeit in Ref. [38] Kippwinkel bis zu 29° erzielt, was einem optischen Scanwinkel von 58° entspricht.

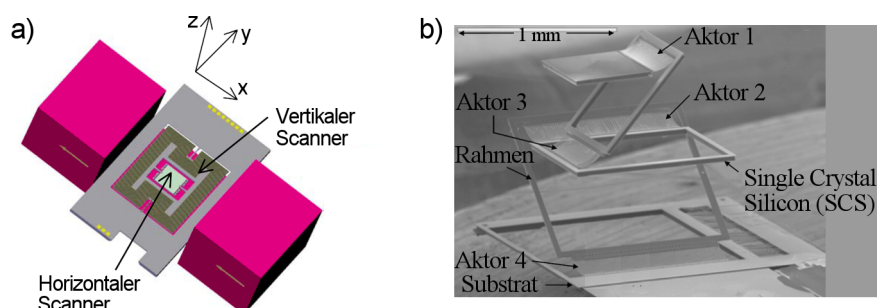


Abbildung 2.17: Alternative Spiegelaktor-Konzepte, a) elektromagnetisch und b) elektrothermisch.

2.4.3.2 Elektrothermische Spiegelaktoren

Einen Aktor mit einem Bimorph-Prinzip zeigt Bild 2.17 b). Um große Scanwinkel zu erreichen, werden mit Hilfe eines Dreilagigen CMOS-MEMS Prozesses vier *large-vertical-displacement* Mikroaktoren (LVD) hergestellt, die 1.24 mm über das Substrat ragen [39]. Bei einer Leistungsaufnahme von etwa 150 mW sind mit einem Spiegel von 0.5 x 0.5 mm² optische Scanwinkel von 60° erzielt worden. Allerdings lassen sich bei diesem komplexen System die Aktoren nur in Resonanz betreiben.

2.4.3.3 Spiegelaktoren auf Basis von FGL

Der für diesen Spiegelaktor am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) entwickelte Aktormechanismus [29] zur Erzeugung einer oszillierenden Auslenkung eines Doppelbiegebalkens basiert auf den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Materialeigenschaften der Ni₂MnGa-Legierung. Wie in Abbildung gezeigt 2.13 hängen sowohl die Phasenumwandlungstemperaturen als auch die Curie-Temperatur (T_C) vom Ni-Gehalt der gesputterten Legierung ab. Bei entsprechender Wahl lässt sich T_C in die Nähe der austenitischen Starttemperatur A_s verschieben, so dass mit dem Beginn der austenitischen Phasenumwandlung gleichzeitig die Temperatur T_C überschritten wird. Damit verliert das Material seine ferromagnetischen Eigenschaften und wird paramagnetisch.

Wird, wie Abbildung 2.18 (a) gezeigt, ein starker Permanentmagnet über dem freien Ende eines fixierten und elektrisch kontaktierten Doppelbiegebalken-Aktors angebracht, so übt bei Raumtemperatur (RT) die magnetische Flussdichte \vec{B} auf die ausgerichteten magnetischen Domänen mit dem magnetischen Moment \vec{p}_M im ferromagnetischen Zustand ein Drehmoment \vec{T} aus, das den Aktor zum Magneten hin auslenkt

$$\vec{T} = \vec{p}_M \times \vec{B} \quad (2.17)$$

Dabei wird auf das freie Ende des Aktors im inhomogenen Magnetfeld eine Kraft F_{mag}^{\rightarrow} von

$$\vec{F}_{mag} = (\vec{p}_M \nabla) \vec{B} \quad (2.18)$$

ausgeübt. Die dabei entstehende Rückstellkraft F_{mart} ist aufgrund der geringeren Steifigkeit des martensitischen Phasenzustands (M-Phase) im Vergleich zu F_{mag} wesentlich geringer. Wird der

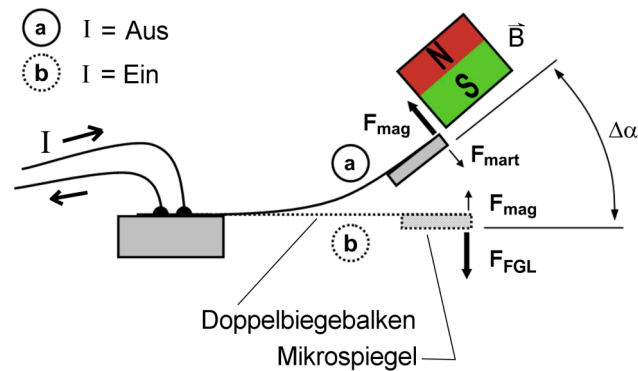


Abbildung 2.18: Funktionsprinzip des magnetischen Formgedächtnisaktors in der Seitenansicht. Legende: \vec{B} = Magnetfeld, I = elektrischer Strom, F_{mag} = magnetische Kraft, F_{FGE} = Formgedächtniskraft, F_{mart} = Rückstellkraft, $\Delta\alpha$ = mechanischer Ablenkwinkel.

Doppelbiegebalken, der elektrisch gesehen als eine Leiterschleife mit einem elektrischen Widerstand R_L ist, durch einen elektrischen Strom I aufgeheizt, ändern sich die Kräfteverhältnisse im Aktor mit dem Erreichen der austenitischen Phasenumwandlung, wie in Abbildung 2.18 (b) gezeigt. Durch das deutlich größere E^A steigt die Steifigkeit des Materials innerhalb eines sehr kurzen Temperaturintervalls an. Ist die Formgedächtnisgestalt des Materials in der horizontalen Ebene eingepreßt, so beginnt eine Kraft F_{FGE} im ausgelenkten Aktor zu wirken, die diesen in die horizontale Ebene zurückführen will. Wird bei dieser Temperatur gleichzeitig die Curie-Temperatur (T_C) überschritten verringert sich die nun als Rückstellkraft wirkende Kraft F_{mag} ebenfalls in einem kleinen Temperaturbereich und geht aufgrund der verschwindenden magnetischen Momente der magnetischen Domänen im nun paramagnetischen Zustand des Materials auf annähernd Null zurück. Im Gesamten führt dieses Verhalten zu zwei antagonistisch wirkenden Kräften F_{mag} und F_{FGE} , denen zugleich jeweils nur sehr geringe Rückstellkräfte F_{mart} und F_{mag} entgegen stehen.

Kapitel 3

Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung

Zunächst wird in diesem Kapitel die Herstellung und Charakterisierung der in dieser Arbeit vorgestellten Spiegelaktoren näher erläutert. Nachfolgend wird ein Modell vorgestellt, das am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) entwickelt und zur gekoppelten Simulation der elektrischen, thermischen, mechanischen und magnetischen Eigenschaften eingesetzt wird.

3.1 Herstellungsverfahren

Die Verfahren zur Herstellung und Aufbau der Mikroaktoren und lassen sich in drei Bereiche untergliedern. In Abschnitt 3.1.1 werden die Sputter- und Mikrostrukturierungs-Technologien vorgestellt, die für den Einsatz dünner Schichten bis zu mehreren μm geeignet sind. Abschnitt 3.1.2 und 3.1.3 befassen sich mit der Aufbau- und Verbindungstechnik, sowie den hier verwendeten elektrischen Kontaktierungsverfahren.

3.1.1 Sputtern und Mikrostrukturierung

Die in Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen Formgedächtnislegierungen (FGL) NiTiCu und Ni₂MnGa werden beide in einem Sputterprozess durch Aufwachsen der Metallschichten hergestellt. Die chemische Zusammensetzung der Legierung richtet sich nach dem prozentualen Anteil der Legierungspartner im Target. Die NiTiCu-Legierung wird zur Erzeugung großer Scanwinkel als bimorpher Schichtverbund hergestellt, während die Dünnschichten der Ni₂MnGa-Legierung als freistehendes Material zur Herstellung monolithischer Aktoren auf Basis eines neuen Aktormechanismus genutzt werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden daher der Sputterprozess sowie die Mikrostrukturierung der auf einem Trägermaterial vorliegenden NiTiCu-Verbundschicht und der freistehenden Ni₂MnGa-Dünnschichten getrennt beschrieben.

3.1.1.1 Sputter-Verfahren

Ni₂MnGa

Die Ni₂MnGa-Legierung wird mit Hilfe des RF-Magnetronspalterverfahrens (Gerät: Shibaura, CFS-4ES) an der Tohoku Universität in Japan hergestellt [32]. Die chemische Zusammensetzung der Legierungspartner im eingesetzten Target wird mittels Heißpressverfahren der Elemente Ni, Mn und Ga. Die Zusammensetzung im Target beträgt Ni₅₂Mn₂₄Ga₂₄. Sie wurde gewählt, da hier im Vergleich zu einem Target mit der stöchiometrischen Zusammensetzung Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅ etwa 100 K höhere Umwandlungstemperaturen vorliegen [32].

Der Ni₂MnGa-Dünnsfilm wird auf ein Substrat aus Polyvinylalkohol (PVA) gesputtert, das nach dem Prozess abgelöst wird um einen freistehenden Dünnsfilm zu erhalten. Während des Sputterprozesses wird das Substrat auf einer konstanten Temperatur von 323 K gehalten und von Ar-Gas mit 230 mm/s umspült. Die RF-Sputterleistung kann in einem Bereich von 50 W bis 200 W variiert werden, was einen direkten Einfluss auf den Ni-Anteil in der aufgewachsenen Ni₂MnGa-Schicht hat. Dies wiederum beeinflusst die Phasenumwandlungstemperaturen wie in Abbildung 2.13 gezeigt. Die Schichtdicke wird über die Sputterzeit eingestellt. Sie beträgt bei den verwendeten Dünnsfilmen 10 µm. Die Zusammensetzung der Legierungspartner ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Weitere Details zur Herstellung gibt Ref. [32].

Tabelle 3.1: Material-Kenndaten der Ni₂MnGa FG-Legierungen.

Bezeichnung	Legierungselement 1 (at.%)	Legierungselement 2 (at.%)	Legierungselement 3 (at.%)	Dicke (µm)	Herstellung
Target	Ni (52.0)	Mn (24.0)	Ga (24.0)		Heißpressverfahren
Ni ₂ MnGa	Ni (54.0)	Mn (24.1)	Ga (21.9)	10 µm	Sputtern P=50 W

NiTiCu

Die NiTiCu-Legierung wird am Forschungszentrum caesar in Bonn hergestellt [40]. Sie wird mit Hilfe des DC-Magnetronspalterverfahrens auf einem ungeheizten Molybdän (Mo)-Dünnsfilm aufgesputtert, auf deren Rückseite eine zusätzliche dritte Schicht aus Fe(Cr,Ni) ebenfalls durch Sputtern aufgebracht wird. Während des Sputterprozesses wird bei einem Ausgangsvakuum von 10⁻⁵ Pa Ar-Gas bei einem Druck von 0.4 Pa zugeleitet. Molybdän wurde als Substrat ausgewählt, da es im Vergleich zu NiTi-basierten Legierungen einen wesentlich geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist. Durch die große Differenz der Koeffizienten vergrößert sich der erzielbare Bimetall-Effekt. Die genaue Legierungszusammensetzung der in Abbildung 3.1 gezeigten Verbundschichtlagen ist in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

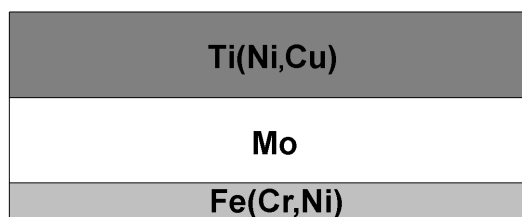


Abbildung 3.1: Schichtverbund mit NiTiCu FGL–Verbundschicht.

Tabelle 3.2: Material–Kenndaten der NiTiCu FGL–Verbundschicht.

Bezeichnung	Legierungs- element 1 (at.%)	Legierungs- element 2 (at.%)	Legierungs- element 3 (at.%)	Dicke (µm)		Herstellung
				a	b	
Target:	Ti (54.00)	Ni (31.00)	Cu (15.00)			Verbundtarget
Lage 1: NiTiCu	Ti (54.75)	Ni (31.30)	Cu (13.95)	2.5	4.0	Sputtern P=1000 W
Lage 2: Mo	Mo (100.0)			2.5	4.0	
Lage 3: Fe(Cr,Ni)	Fe (78.00)	Cr (12.00)	Ni (10.00)	0.5	0.8	

3.1.1.2 Wärmebehandlung

Zur Kristallisation der Filme und Einprägung der Formgedächtnisgestalt werden die gesputterten Schichten einem Tempervorgang von 600°C im Fall der NiTiCu–Legierung und 800°C bei der Ni₂MnGa–Legierung unterzogen. Dieser Prozess wird direkt nach dem Sputtervorgang bei den Herstellern durchgeführt um die abgeschiedenen Schichten von einer amorphen Struktur in eine kristalline Form zu überführen. Für Details dazu siehe [24, 32].

Die jeweils von den Herstellern verwendeten Parameter für den Tempervorgang sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Parameter des Tempervorgangs der FG–Legierungen.

Bezeichnung	Temperatur (°C)	Zeit (min)
Ni ₂ MnGa	800	60
Ni ₂ TiCu / Mo / Fe(Cr,Ni)	600	60

3.1.1.3 Mikrostrukturierung

Ni₂MnGa–Dünnsfilm

Die Strukturierung der Ni₂MnGa–Dünnsfilme basiert auf einem nasschemischen Ätzverfahren, das in früheren Arbeiten bereits für die Formgedächtnislegierungen NiTi und NiTiPd verwendet [41] und in [42] bezüglich Zusammensetzung der Ätzlösung angepasst und optimiert wurde.

Für die Anpassung der Ätzlösung an das vorliegende Material wurden Ätzwirkung und –fortschritt bei den Ni₂MnGa–Dünnsfilmen untersucht. Bei Zugabe von NaCl erfolgt ebenfalls eine schwarze Verfärbung der Oberfläche der Ni₂MnGa–Legierung, die den weiteren Ätzfortschritt verlangsamt aber nicht verhindert. Da ein Einfluss des zugegebenen Natriumchlorids auf die Bildung der Oberflächenverfärbung nicht zu beobachten ist, wird auf die Zugabe verzichtet. Dies resultiert in einer Verkürzung der Ätzzeiten von über 3 Minuten auf ca. 2 Minuten, was dem Unterätzen der Legierung entgegenwirkt und somit eine bessere Form der Ätzkanten begünstigt. Die Ätzrate liegt bei etwa 80 nm/min.

Die Schutzschicht wird an einer Bedampfungsanlage Typ MED010 des Instituts in einer Ar–Atmosphäre bei $4 \cdot 10^{-4}$ mbar auf die Oberseite des Dünnsfilms aufgedampft. Von Vorteil sind dabei die geringen Temperaturen von maximal 100°C die während des Vorgangs entstehen. Diese liegen unterhalb der kritischen Temperatur von etwa 200°C, bei der erste Diffusionsprozesse in der Legierung einsetzen. Die Schicht kann mit einer Geschwindigkeit von 150 nm/min aufgewachsen werden. Weiterhin ist ein Aufbringen der Schutzschicht bei Raumtemperatur möglich, wenn die Probe unter dem Plasma auf einem Drehtisch durchgeführt wird. Bei Drehzahlen von 20 Upm bleibt die Temperatur der Probe unter 40 °C wobei in diesem Fall die Aufwachsrate bei 80 nm/min liegt. Als Nachteil hat sich die geringe Packungsdichte der Schutzschicht herausgestellt, wenn sie in der Bedampfungsanlage aufgebracht wird. Dies äußert sich in einer größeren Ätzrate von zunächst 1 nm/s auf 2-3 nm/s. Um trotzdem eine ausreichende Stabilität gegen die Ätzlösung sicherzustellen, wird die Dicke der Schicht auf 150 nm erhöht.

Die Strukturtreue dieses Prozess beträgt ungefähr 10 µm bei einer maximalen Unterätzung von 10 µm und genügt damit für die Herstellung von Dünnsfilmaktoren mit einer minimalen Stegbreite von 400 µm. Für Aktoren mit minimalen Strukturen von 200 µm kann der in Abbildung 3.2 gezeigte Prozess um eine zweite Schutzschicht auf der Rückseite des Ni₂MnGa–Dünnsfilms erweitert werden, die die Rückseite des Films vor starker Unterätzung schützt. Abbildung 3.3 a) zeigt einen strukturierten Mikroaktor der mit einer einseitigen Schutzschicht hergestellt wurde und b) einen Mikroaktor mit minimalen Strukturen von 200 µm, der mit einer zweiten Schutzschicht versehen ist. Die Abfolge des Strukturierungsprozesses für Ni₂MnGa–Dünnsfilme bis 10 µm ist in Abbildung 3.2 gezeigt.

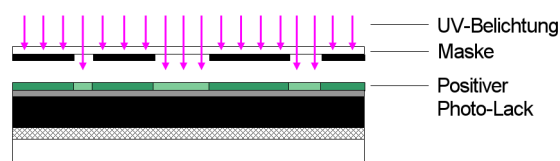
(1) Ni₂MnGa-Folie und Opferschicht auf einem Keramik-Substrat.



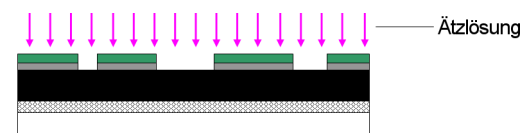
(2) Aufbringen einer Schutzschicht mittels Bedampfen.



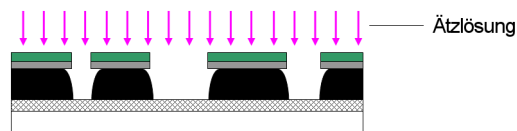
(3) Photolithographischer Prozess zur Strukturierung des Photo-Lacks.



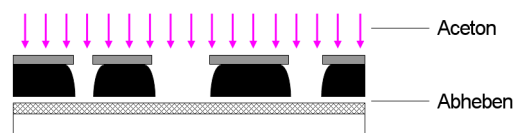
(4) Nasschemisches Ätzen der Schutzschicht.



(5) Nasschemisches Ätzen des Ni₂MnGa-Dünnschicht mittels Ätzlösung.



(6) Entfernen der Opferschicht und gleichzeitiges Abheben des Dünnschicht vom Keramik-Substrat.



(7) Entfernen der unter dem Photo-Lack zurück gebliebenen Schutzschicht.

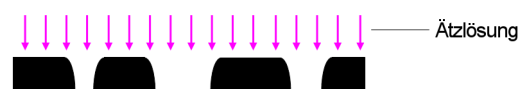


Abbildung 3.2: Photolithographischer Prozess zur Strukturierung freitragender Ni₂MnGa-Folien.

Der Prozessablauf ist wie folgt unterteilt.

- (1) Ausgangsmaterial ist ein Verbund aus Ni_2MnGa -Folie, Opferschicht und einem Keramik-Substrat.
- (2) Aufbringen einer $150\ \mu\text{m}$ dicken Schutzschicht durch Bedampfen.
- (3) Übertragen der Mikrostruktur in den aufgeschleuderten, $3,5\ \mu\text{m}$ dicken Positiv-Photolack mittels einer Maske, lithographischer Belichtung mit UV-Licht und anschließendem Entwicklungsschritt.
- (4) Die Mikrostruktur des Photo-Lacks wird mit einer Ätzlösung in die darunter liegende Schicht übertragen.
- (5) Durch die strukturierte Schicht wird der Ni_2MnGa -Dünnsfilm geätzt.
- (6) Die Opferschicht wird in einem Aceton-Bad entfernt. Dabei wird gleichzeitig der Dünnsfilm vom Substrat abgehoben.
- (7) Schließlich wird die zurückgebliebene Schutzschicht entfernt.

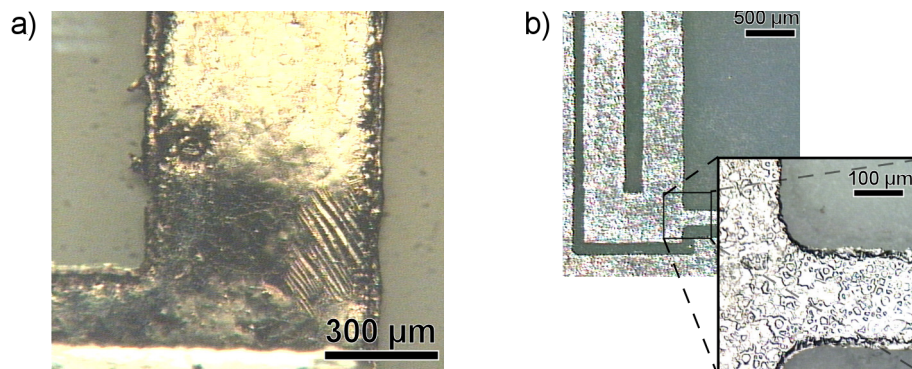


Abbildung 3.3: Detailansichten mikrostrukturierter Ni_2MnGa -Dünnsfilmaktoren nach dem nasschemischen Ätzprozess; a) mit einer Schutzschicht und b) mit zwei Schutzschichten für eine verbesserte Strukturtreue.

NiTiCu-Verbundschicht

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.1.1.3 gezeigten freistehenden, monolithischen Ni_2MnGa -Dünnsfilmen werden die NiTiCu-Legierungen als Verbundschicht mit einer Mo-Mittellage und einer Fe(Cr,Ni)-Lage hergestellt. Da dieser Schichtverbund aus einer Vielzahl unterschiedlicher metallischer Legierungen besteht wäre ein nasschemischer Strukturierungsprozess sehr aufwendig, da für jede Schicht eine Ätzlösung eingesetzt werden muss, die die restlichen Schichten nicht angreift. Dies ist vor allem bei der Mo-Schicht kritisch, da Molybdän als äußerst korrosions- und säurefest gilt. Als Alternative werden daher Tests an einem Schneidlaser durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Nd:YAG Festkörper-Laser mit einer Wellenlänge von $1064\ \text{nm}$. Für das

Schneiden der Verbundschicht war ursprünglich der Abtragsmodus des Lasers vorgesehen, da mit kleinerer Laserleistung die thermische Einwirkung auf die Probe so gering wie möglich gehalten werden sollte. Es zeigte sich jedoch, dass bei geringen Laserleistungen von 2–3 W bereits ein Abtrags-Durchlauf genügte um die Probe zu strukturieren. Die Daten der zu strukturierenden Muster können dabei direkt als CAD-Daten an den Laser übertragen werden. Abbildung 3.4 zeigt zwei laserstrukturierte Verbundschichten, die in einem Durchgang strukturiert werden. Dabei arbeitete der Nd:YAG-Laser im sogenannten *qswitch*-Modus bei 4000 Hz, der sehr kurze Pulszeiten von weniger als 30 ns ermöglicht. Der Spotdurchmesser betrug 30 μm . Die Strukturen in Bild 3.4 a) zeigen eine Schnittbreite von 65 μm mit einer Kantenrauigkeit kleiner als 10 μm . Verfärbungen des Materials durch thermische Einwirkung des Lasers sind nicht aufgetreten, was eine ausreichende thermische Verträglichkeit des Verfahrens bestätigt. Bei Berücksichtigung der Schnittbreite lassen sich so minimale Strukturen bis 50 μm herstellen. Bild 3.4 b) zeigt die vom Substrat abgehobene Aktorstruktur mit der durch innere Verspannungen der Verbundschicht hervorgerufenen initialen Biegung, beziehungsweise Wölbung.

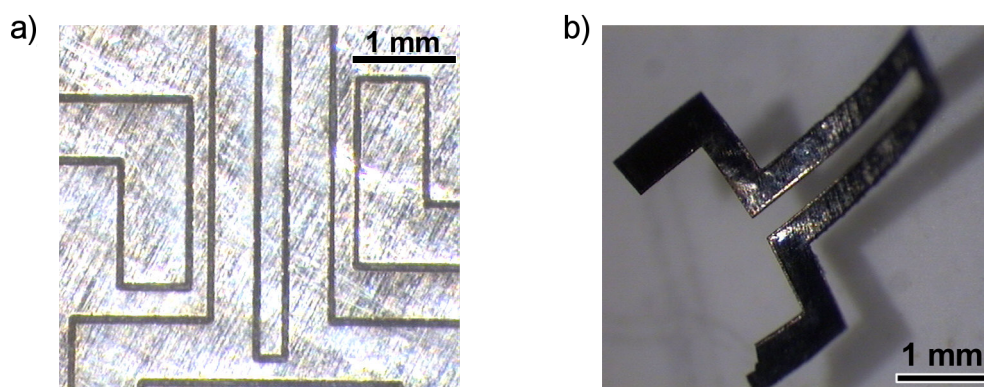


Abbildung 3.4: Laserstrukturierte NiTiCu/Mo/Fe(Cr,Ni)-Verbundschichten; a) auf einem Keramik-Substrat fixiert nach dem Laserschneiden und b) vom Substrat abgehoben.

3.1.1.4 Zusammenfassung

Das in Abschnitt 3.1.1.3 beschriebene Verfahren zur Strukturierung von Ni_2MnGa -Dünnschichten wurde an die entsprechende Legierung angepasst. Der Entfall der Zugabe von NaCl beschleunigte die Ätzrate auf ungefähr zwei Minuten, was einem verbesserten Schutz gegen Unterätzen aufgrund des schnelleren Ätzvorgangs ermöglicht. Die Erhöhung der Dicke der Schutzschicht resultiert in einer größeren Ausbeute, da Beschädigungen durch eine Diffusion der Ätzlösung in den Dünnschicht unterbunden werden. Mit der Herstellung kleiner Strukturen bis zu 200 μm durch Aufbringen einer zweiten Schutzschicht wird eine Strukturtreue von 10 μm erreicht.

Zur Strukturierung der NiTiCu-Verbundschicht wird ein Laserabtragsverfahren mittels Nd:YAG-Laser erfolgreich eingesetzt. Die hergestellten Strukturen zeigen keinerlei thermische Einflüsse des Lasers auf das Material sowie eine Schnittbreite von 65 μm , die die zuverlässige Herstellung

kleiner Strukturen bis zu 50 μm erlaubt. Die hohe Strukturtreue wird unter anderem durch die direkte Programmierung des Lasers aus den CAD-Daten der entsprechenden Zeichnung erreicht.

3.1.2 Mechanische Aufbau- und Verbindungstechnik

Beim Aufbau der Aktoren kommen vor allem Klebetechniken zum Einsatz. Sie dienen zum Beispiel zum Aufbringen auf eine thermische Isolierschicht, dem Befestigen auf einem stabilisierenden Substrat oder dem Anbringen des Mikrospiegels. Verwendet wird dabei ein Zweikomponenten-Epoxykleber. Mit einer Temperaturbeständigkeit bis 200 °C eignet er sich auch für Klebeverbindungen direkt am thermisch beheizten Aktor.

3.1.3 Elektrische Kontaktierungsverfahren

Die Herstellung einer elektrischen Kontaktierung bei den verwendeten Dünnschichtaktoren erfordert speziell angepasste Verfahren um die dünnen freistehenden Filme mit elektrischen Kontakten zu versehen, ohne den Film zu verformen oder thermisch zu überlasten. Weiterhin steht nur eine eingeschränkte Fläche von etwa 1 mm^2 als Kontaktfläche zur Verfügung. Im Folgenden wird auf einige Verfahren eingegangen, die hinsichtlich der beschriebenen Vorgaben ausgewählt werden und verfügbar waren. Detaillierte Untersuchungen bezüglich der Temperaturstabilität und des Übergangswiderstands der einzelnen Verfahren sind in [42] beschrieben.

3.1.3.1 Drahtbonden

Beim Drahtbonden wird ein elektrischer Kontakt zwischen zwei Kontaktflächen mittels dünner Drähtchen hergestellt deren Durchmesser 25 μm beträgt. Die Art wie die Drahtenden mit den Kontaktflächen eine stoffschlüssige Verbindung eingehen hängt vom Bondprozess ab. Beim Thermokompressionsbonden wird die Drahtspitze durch einen Lichtbogen bis zur Schmelztemperatur erwärmt. Dabei bildet sich durch die Oberflächenspannung des Drahtmaterials eine Kugel die leicht unter Stoffschluss auf die Kontaktfläche gepresst werden kann. Das andere Ende des Drahtes wird flachgedrückt und abgequetscht. Aufgrund des geringen Schmelzpunktes und der großen Oberflächenspannung eignet sich besonders Au-Drähte. Als nachteilig zeigt sich die benötigte Stromstärke für die Aktoranwendungen, die mehrere Bonddrähte pro Kontaktfläche erfordert. Dies ist problematisch, da die Fläche auf das Kontaktpad des Aktors beschränkt ist. Zudem steigt im Falle einer schlechten Bondverbindung eines der Drähte der Strom in den restlichen Bonddrähten aufgrund des größeren Übergangswiderstands an, was zu einer dauerhaften Überbelastung des elektrischen Kontakts führt. Weiterhin muss für die Herstellung der elektrischen Kontakte der Bonddraht auf dem fertig aufgebauten und fixierten Aktor angeschweißt werden. Aufgrund der geringen Dicke des Dünnschichtfilms von 10 μm tritt daher häufig Materialzerstörung während des mechanischen Schweißvorgangs auf, da der Dünnschichtfilm für die Zugkräfte beim Abtrennen des Bonddrahtes zu instabil ist.

3.1.3.2 Laserschweißen

Die Technik des Laserschweißens ist eine kontaktlose Verbindungstechnik die wie das Drahtbonds nicht lösbare Verbindungen erzeugt. Von Vorteil bei diesem Verfahren ist der kontaktlose Schweißvorgang, der keinerlei mechanischen Einwirkung auf die Probe hat. Allerdings wird eine sehr feine Leistungsregulierung der Lichtintensität und ein kleiner Schweißpunkt benötigt, um Mikrostrukturen mit geringen Schichtdicken und kleinen Kontaktflächen elektrisch zu kontaktieren.

Bei den Schweißtests kam ein Nd:YAG–Festkörperlaser der Firma Haas/Trumpf zum Einsatz, der neben Laserschweißen hauptsächlich zum Schneiden und Gravieren von Werkstücken ausgelegt ist. Er arbeitet bei einer Wellenlänge von 1064 nm mit maximal 150 W. Mit diesem war es möglich Schweißverbindungen mit 0.7 mm herzustellen, die den Dünnfilm nicht beschädigten. Nachteilig wirkte sich aus, dass am Gerät der Strahlfokus des vor jedem Schweißvorgang neu justiert werden musste. Weiterhin gestaltete sich die korrekte Einstellung der Schweißleistung als sehr umständlich, da eine Änderung dieser sich nicht direkt auf den nächsten Schweißpuls auswirkte. Eine verringerte Energieeinstellung stellte sich erst nach mehreren Schweißpulsen ein. Die manuelle Zuführung der Probe und die beschriebenen Nachteile führten zu einer hohen Fehlerrate bei der Kontaktierung.

3.1.3.3 Spaltschweißen

Eine Alternative stellt das Spaltschweißverfahren dar, das zu den Kontaktschweißverfahren zählt. Es ermöglicht sehr kleine Schweißpunkte bei präzise regelbarer Schweißenergie. Die Schweißenergie kann dabei nach drei unterschiedlichen Kriterien gesteuert werden

- Stromüberwacher Modus

Es wird ein maximaler Strom definiert, der während eines eingestellten Zeitintervalls konstant gehalten wird. Die Regelung ist rückgekoppelt, um zum Beispiel den Abfall des Übergangswiderstandes am Anfang des Schweißprozesses zu kompensieren.

- Spannungsüberwacht

Im Gegensatz zum stromüberwachten Modus wird hier eine maximale Spannung definiert, die während des Schweißprozesses stabil gehalten wird.

- Leistungsüberwacher Modus

Der leistungsüberwachte Modus misst den Strom und die Spannung während des eingestellten Zeitintervalls und steuert diese so, dass die definierte maximale Leistung nicht überschritten wird.

Die Einstellung der Parameter lässt sich in sehr feinen Schritten vornehmen um auch dünne Materialien aus Metall oder metallische Legierungen zu verschweißen. Durch die präzisen Einstellmöglichkeiten der Schweißparameter lassen sich sehr gute Schweißergebnisse erzielen. Der

Durchmesser eines Schweißpunktes beträgt minimal 0.2 mm^2 bei einer Aufstandsfläche des Elektrodenpaars von $1.2 \times 0.5 \text{ mm}^2$.

3.1.3.4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Tests mit den beschriebenen elektrischen Kontaktierungsverfahren zeigen, dass das Spaltschweißverfahren bei den kleinsten Schweißpunkt-Durchmessern die höchste Ausbeute an kontaktierten Dünnschichtbauelementen ergibt. Der Übergangswiderstand der auf diese Weise verschweißten Proben liegt im Bereich des Übergangswiderstands beim Laserschweißen, da ebenfalls eine intermetallische Phase in der Schmelzzone zwischen den Fügepartnern entsteht. Für die elektrische Kontaktierung der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Dünnschicht-Bauelemente wird daher das Spaltschweißverfahren angewendet.

3.2 Messverfahren

Zur Bestimmung der Materialcharakteristiken der FGL und der Aktorcharakteristiken kommen verschiedene Analysemethoden zum Einsatz. Als Grundlage bei diesen Untersuchungen dient eine Doppelbiegebalken-Teststruktur, die in Abbildung 3.5 gezeigt ist. Die Teststruktur hat eine definierte Länge l und eine Stegbreite b .

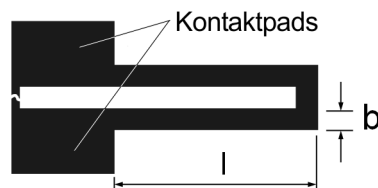


Abbildung 3.5: Design der Doppelbiegebalken-Teststruktur.

Die Analysemethoden und die dazugehörigen Versuchsaufbauten sind im Folgenden beschrieben.

3.2.1 Dynamische Differenzkalorimetrie

Da die martensitische Phasenumwandlung adiabatisch verläuft und daher Wärmeenergie mit der Umgebung austauscht, kann eine differenzierte Bestimmung der Umwandlungstemperaturen anhand des Wärmeflusses erfolgen. Bei der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK), engl. *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), wird die abgegebene und aufgenommene Wärmemenge einer Probe erfasst.

Aufgrund der Wärmekapazität einer mg schweren, gekapselten Probe führt eine Phasenänderung in der Probe zu einer Temperaturänderung ΔT im Vergleich zur Temperatur T_{Ref} einer leeren Referenzkapsel. Dazu werden die Wärmeströme der Probe und der Referenzkapsel, Θ_{FP} und Θ_{FR} ,

gemessen deren Differenz proportional zur Temperaturdifferenz ist ($\Theta_{FP} - \Theta_{FR} \approx \Delta T$). Abbildung 3.6 zeigt einen Heiz- und einen Abkühlvorgang einer Ni_2MnGa -Probe. Dabei zeigt ein Anstieg des Wärmeflusses beim Aufheizen der Probe die Start- und Endtemperaturen der austenitischen Phasenumwandlung (A-Phase), A_s und A_f , an. Beim Abkühlen lässt sich anhand der Wärmeabgabe der Probe die Start- und Endtemperaturen M_s und M_f der martensitischen Phasenumwandlung (M-Phase) ablesen. Dazu wird nach dem Tangentenverfahren aus der ansteigenden und abfallenden Flanke des Peaks im Wärmefluss wie in der Abbildung gezeigt bestimmt.

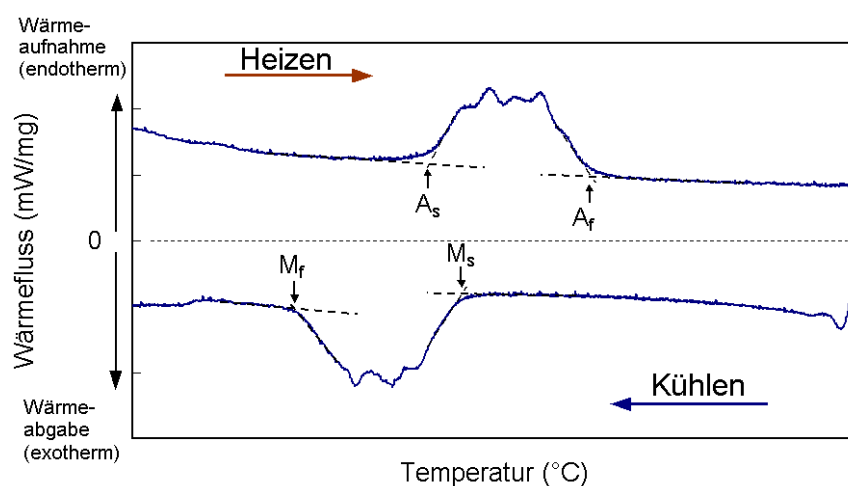


Abbildung 3.6: Aufgenommene DSC-Kennlinie einer Formgedächtnislegierung mit je einem charakteristischen Peak im Wärmefluss, der durch die Phasenumwandlung hervorgerufen wird.

Beim eingesetzten Gerät vom Typ DSC 204 Phoenix der Firma Netzsch wurde die Temperatur mit einer Geschwindigkeit von 10 K/min erhöht beziehungsweise verringert. Die Empfindlichkeit des Systems beträgt bei den Messungen ungefähr 3V/mW .

3.2.2 Wärmebildaufnahmen

Bei elektrothermischem Betrieb der mikrostrukturierten Dünnfilm-Aktoren wird das Temperaturprofil im Dünnfilm mittels Infrarot-Mikroskopie ermittelt. Dazu wurde eine Infrarotkamera (IR-Kamera) der Firma FLIR mit aktiver Detektorkühlung und einen Messbereich von -20°C bis 2000°C eingesetzt. Um bei Dünnfilm-Strukturen mit Abmessungen im sub-mm Bereich noch ausreichend detaillierte Bildinformationen zu erhalten, wird ein Makroobjektiv verwendet, das bei einem Messbereich von $4.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$ eine Auflösung von $10 \mu\text{m}$ erzielt. Für eine exakte Bestimmung der Temperatur wird normalerweise der Emissionskoeffizient ϵ des zu vermessenden Materials benötigt. Er gibt den Anteil der Wärmestrahlung im betrachteten Spektralbereich an, die von der Oberfläche des Materials abgestrahlt wird. Da dieser materialspezifische Faktor schwer zu bestimmen ist, wird eine dünne Graphitschicht auf die Oberfläche der Probe aufgetragen, deren Emissionskoeffizient ϵ bekannt ist.

3.2.3 Mechanische und elektrische Eigenschaften

Um den in Abschnitt 2.2 erläuterten Formgedächtniseffekt (FGE) in Abhängigkeit einer mechanischen Last oder der thermisch induzierten Phasenumwandlungen zu untersuchen, werden verschiedene mechanische und elektrische Messverfahren eingesetzt. Eine wichtige mechanische Kenngröße der in Abschnitt 2.3 beschriebenen FGL–Materialien ist der temperaturabhängige E–Modul des Materials. Aufschluss über das Phasenumwandlungsverhalten der Legierungen gibt zum Beispiel die temperaturabhängige Widerstandskennlinie des Materials.

Zur Durchführung der Experimente wird eine Doppelbiegebalken–Teststruktur verwendet. Sie weist eine definierte Länge l , Breite b und eine Dicke h auf und ist mit Kontaktpads zur elektrischen Kontaktierung mittels Spaltschweißen versehen. Um bei der Messung des elektrischen Widerstands den Einfluss der elektrischen Zuleitungen am gemessenen Widerstand zu kompensieren, wird die 4–Punkt–Messmethode eingesetzt. Das hierzu verwendete Digital–Multimeter der Firma HP erreicht eine Messgenauigkeit von $\pm 0.001 \Omega$.

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften erfolgt durch Auslenkung des frei beweglichen Doppelbiegebalkens durch eine äußere, am vorderen Ende angelegte Kraft. Dazu werden kalibrierte Mikrogewichte verwendet, die mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{N}$ hergestellt werden. Wie in Abbildung 3.7 gezeigt, führt die resultierende Kraft F der Mikrogewichte zu einer Auslenkung d des Doppelbiegebalkens, die mit einer CCD–Videokamera berührungslos gemessen werden kann. Mit Hilfe eines nachgeschalteten Vermessungssystems lässt sich eine Ortsauflösung von $6 \mu\text{m}$ erreichen. Für eine maximale Auslenkung d , die im Bereich von 20% der Länge l des Dop-

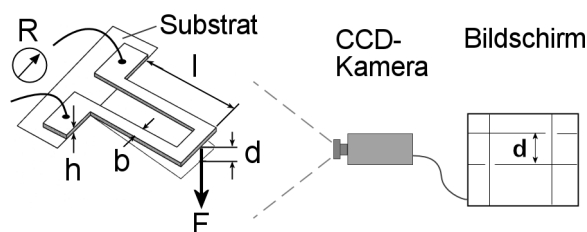


Abbildung 3.7: Biegebalken–Experiment zur Bestimmung mechanischer und elektrischer Kenngrößen von FG–Legierungen.

pelbiegebalkens liegt, ergibt sich mittels linearem Balkenmodell die Messauflösung für $l = 3 \text{ mm}$ zu

$$\frac{0.006\text{mm}}{0.2 \cdot 3.0\text{mm}} = 0.01 = 1\% \quad (3.1)$$

Zur Variation und Messung der Probentemperatur wird die Probe in einem stickstoffgekühlten und beheizbaren Kryostaten eingesetzt. In diesem wird die Probe unter einem Vakuum von 10^{-3} mbar einer homogenen Temperatur in einem Bereich von -60°C bis 200°C ausgesetzt. Zur präzisen Messung der Probentemperatur ist diese über ein thermisch leitfähiges Al_2O_3 –Substrat an den Heiz– und Kühlblock thermisch angekoppelt und somit auf dem gleichen thermischen Niveau. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Probe der korrekten Temperatur ausgesetzt ist. Zugleich kann diese über ein angebrachtes PT100–Thermoelement mit einer Messgenauigkeit von ± 0.1

K ausgelesen werden. Wie in Abbildung 3.8 gezeigt, wird die Temperatur der Heizung über eine PID-Regelung gesteuert, die auch in der Kühlphase durch gezielte Heizpulse den mit annähernd 70 K kalten N_2 -Gas durchströmten massiven Heiz- und Kühlblock konstant auf der eingestellten Temperatur hält.

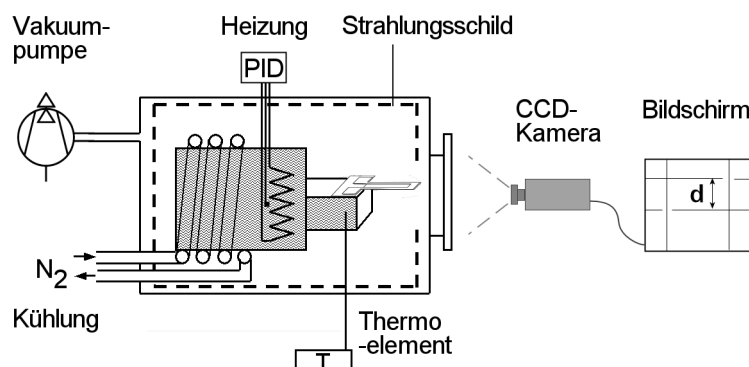


Abbildung 3.8: Biegebalken-Experiment in einem stickstoffgekühlten Kryostaten.

3.2.4 Dynamisches Schwingverhalten

Werden die aufgebauten Dünnschicht-Aktoren im dynamischen Betrieb zu harmonischen Schwingungen angeregt, lassen sich diese nur schwer mit einem gängigen Video-System zeitaufgelöst mit mehr als 25 Bildern pro Sekunde analysieren. Zur zeitlichen Auflösung im μs -Bereich wird daher ein eindimensionaler positionsempfindlicher Photodetektor (PSD) eingesetzt. Eine PSD erlaubt die schnelle, zeitaufgelöste Bestimmung des Schwerpunkts eines Lichtstrahlquerschnitts auf einer aktiven, photoempfindlichen Fläche. Dabei erstreckt sich die Lichtempfindlichkeit über einen weiten Spektralbereich. Das Messprinzip macht sich den Oberflächenwiderstand der photoempfindlichen Schicht zunutze um aus den angeregten Photoströmen den Auftreffpunkt des Lichts zu bestimmen.

Der in Abbildung 3.9 skizzierte Messaufbau nutzt einen kleinen Mikrospiegel an der frei beweglichen Vorderseite eines fixierten und elektrisch kontaktierten Dünnschicht-Aktors um einen fokussierten Laserstrahl auf eine eindimensionale PSD abzulenken. Wird der Aktor zu Schwingungen angeregt, wandert der Laserstrahl über die photoempfindliche Fläche der PSD. Der mechanische Winkel $\Delta\alpha$ zwischen den beiden Endpositionen des Mikrospiegels oder den Umkehrpunkten der Aktorschwingung wird durch Reflexion am Mikrospiegel zum optischen Scanwinkel $2\Delta\alpha$ verdoppelt. Trifft ein Lichtstrahl auf die PSD werden zwei Photoströme I_1 und I_2 erzeugt, die an bei den Enden, den Anoden A_1 und A_2 , des Detektors abfließen. Als Gegenkontakt dient eine gemeinsame Kathode C_c . Abhängig von der Position x , an der der Strahl auftrifft teilen sich I_1 und I_2 proportional zu den Distanzen zwischen x und A_1 respektive A_2 . Anhand der gemessenen Photoströme lässt sich die Position x anhand der Formel:

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{2x}{L} \quad (3.2)$$

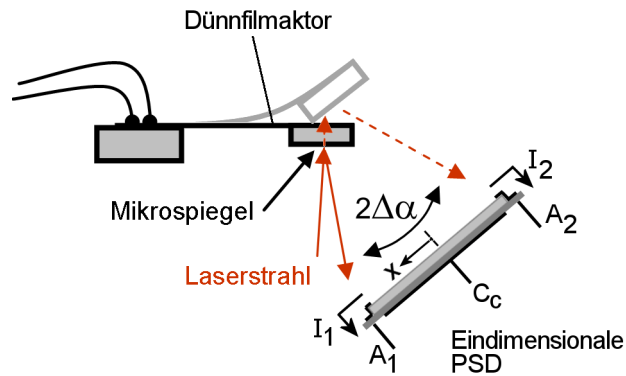


Abbildung 3.9: Versuchsaufbau zur Bestimmung des dynamischen Schwingverhaltens der Dünnschicht-Aktoren.

bestimmen, wobei L die Gesamtlänge der aktiven photoempfindlichen Fläche ist. Die Messmethode gibt mit x immer den Schwerpunkt des Querschnitts des auftreffenden Lichtstrahls an. Die schnelle Reaktionszeit des Detektors ist neben einem geringen Messfehler ein Hauptauswahlkriterium. Sie hängt stark vom Halbleitermaterial ab und wird in Fall der verwendeten PSD der Firma Laser2000 mit einer aktiven Fläche von $10 \times 2 \text{ mm}^2$ mit typisch 185 ns angegeben. Der Messfehler nimmt auf den äußeren 30% der aktiven Fläche leicht zu und beträgt dabei weniger als 0.5% der Gesamtlänge L .

3.3 Gekoppelte FEM-Simulation

Zur Optimierung der thermischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften der FGL-Materialien kommt ein am Institut für Mikrostrukturtechnik IMT entwickeltes Modell zur gekoppelten Finite Elemente (FEM)-Simulation zum Einsatz [43]. Es basiert auf Einzelmodulen zur thermischen, elektrischen, magnetischen und mechanischen Simulation. Ein Modul ist in der Regel ein FEM-Programm.

Jedem Modul ist ein Koppelprogramm zugeordnet, das den Datenaustausch mit den anderen Modulen übernimmt, aber auch zusätzliche Berechnungen auf Basis aller zur Verfügung stehender Daten ausführen kann. Es erlaubt weiterhin die Materialeigenschaften und Randbedingungen des erzeugten und zugeordneten FEM-Modells abzuändern. Die beliebige Aufrufreihenfolge der Module wird mit einem interaktiven Eingabeprogramm festgelegt. Ein übergeordnetes Steuerprogramm startet die einzelnen Module und die entsprechenden Koppelprogramme. Abbildung 3.10 zeigt ein Ablaufdiagramm dieses Prozesses.

3.3.1 Elektrisch–thermisch–magnetisch–mechanisch gekoppeltes Model

Für die Berechnung der Auslenkung eines elektrisch beheizten Aktors im Magnetfeld eines Permanentmagneten sind vier FEM–Rechnungen nacheinander durchzuführen

1. Stromdichteverteilung \vec{J} im Aktor
2. Temperaturverteilung \vec{T} im Aktor
3. Magnetfeld \vec{B} des Permanentmagneten in den zuvor definierten Volumenelementen des Aktors
4. Auslenkung \vec{d} des Aktors

Dazu müssen zusätzliche Berechnungen von den Koppelprogrammen selbst durchgeführt werden

- elektrische Heizleistung aus der Stromdichte \vec{J}
- Magnetisierung M im Aktor und magnetische Kräfte F_{mag} , beide abhängig von der Temperatur und dem Magnetfeld

Da die magnetischen Größen abhängig von der Aktorposition sind, müssen diese und die mechanische Auslenkung iterativ berechnet werden. Eine schnelle Konvergenz wird dabei durch die zusätzliche Berechnung der Gradienten der Kraft–Komponenten erreicht [44]. Der Simulationsablauf ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

Die Berechnung der Stromdichte und Temperaturverteilung T erfolgt mit dem FEM Programm *Tosca*. Die unterschiedlichen Randbedingungen für die elektrische und thermische Berechnung werden von den Koppelprogrammen gesetzt. Die mechanische Berechnung erfolgt mit einem im IMT entwickelten FEM–Programm, das ein phänomenologisches Modell für den Formgedächtniseffekt integriert. Dieses Modell nimmt an, dass sich aufgrund der Dehnung ε die Spannung σ in einem Element aus der Summe eines martensitischen Volumenanteils ζ und eines austenitischen Anteils $(1 - \zeta)$ zusammensetzt. Hierbei kann der martensitische Volumenanteil auch plastische Dehnung erfahren. Die gesamte Spannung ist damit durch

$$\sigma = \zeta \cdot \sigma_M + (1 - \zeta) \cdot \sigma_A = \left(\zeta \cdot E^M \cdot D_{pl} + (1 - \zeta) \cdot E^A \cdot D_0 \right) \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

gegeben. Hierbei bezeichnen E^M , und σ_M bzw. E^A und σ_A den E-Modul und die mechanische Spannung in der martensitischen bzw. austenitischen Phase. D_0 und D_{pl} sind Matrizen, die elastische und plastische Dehnung mit dem Stress für $E = 1$ verknüpfen. Der martensitische Phasenanteil ζ ist abhängig von der Temperatur T und einer effektiven Spannung (von Mises Spannung) σ_m . In dem hier verwendeten Modell wird folgende Umwandlungskinetik angenommen [45]:

$$\zeta = \frac{1}{\left(1 + e^{(k \cdot (T - T_0) - k \cdot c \cdot \sigma_m)} \right)} \quad (3.4)$$

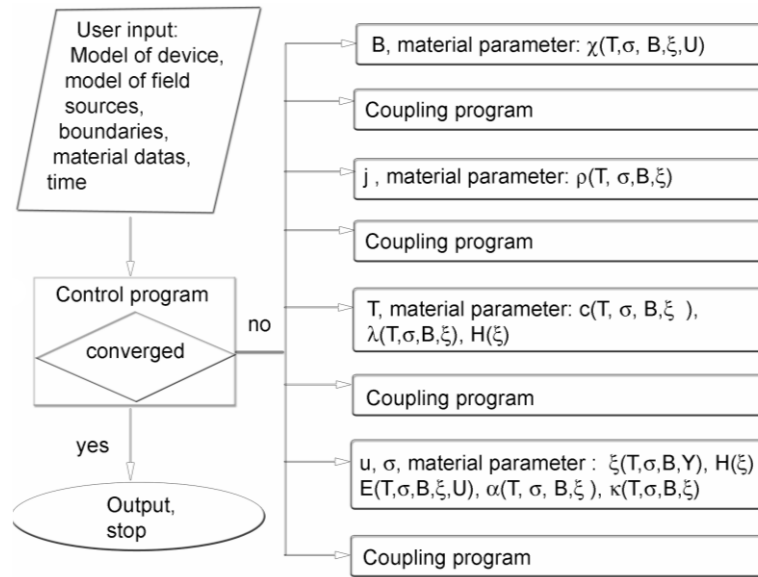


Abbildung 3.10: Schema zur gekoppelten FEM–Simulation. Die einzelnen FEM–Programme werden mit Hilfe von Koppelprogrammen miteinander verknüpft. Eine Überwachungsroutine steuert den Prozess von der Dateneingabe bis zur Datenausgabe.

Für die magnetischen Berechnungen wird eine integrale FE–Methode eingesetzt [43]. Sie berechnet die Magnetisierung eines Elements selbstkonsistent als Funktion aller anderen Magnetisierungen und äußerer Felder. Darauf basierend können alle magnetische Felder aller Magnetisierungen im gesamten Raum analytisch berechnet werden. Da die durch das Feld des Permanentmagneten magnetisierten Elemente des Aktors sich untereinander nicht messbar beeinflussen und ihre Rückwirkung auf den Permanentmagneten vernachlässigbar klein ist, ist die Berechnung der magnetischen Größen vergleichsweise einfach. Mit dem Feld \vec{B} des Permanentmagneten in einem Element wird anhand der bei Raumtemperatur gemessenen magnetischen Kennlinie für das Aktormaterial die Magnetisierung $M(B, T)$ bei Raumtemperatur berechnet. Mit $M(B, T)$ und dem Elementvolumen V_{el} ergibt sich die magnetische Kraft $F_{mag,el}$ auf ein Element zu

$$F_{mag,el} = \frac{1}{(2\mu_0)} \cdot grad(M(B, T) \cdot B) \cdot V_{el} \quad (3.5)$$

3.3.2 Bewegungsgleichung

Zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens des 1D-Aktors aus der Formgedächtnislegierung Ni_2MnGa müssen alle Kräfte, die auf das physikalische System wirken, berücksichtigt werden. Im Vergleich zu anderen harmonisch schwingenden Systemen erfolgt die Anregung nicht ausschließlich durch eine äußere Kraft, sondern vielmehr aus dem zeitlichen Zusammenspiel mehrerer äußerer Kräfte sowie der intrinsischen Formgedächtniskraft und der ferromagnetischen Kraft. Die Formgedächtniskraft ist in Abschnitt 2.2 beschrieben, die Anregung des Systems erfolgt wie in Abschnitt 5.1.3.4 skizziert.

Die im Aktorsystem wirkenden Kräfte sind in Abbildung 3.11 dargestellt. Näherungsweise lässt sich das Systemverhalten als Masse-Dämpfer-System mit zusätzlichen Kräften beschreiben, die sowohl antreibend als auch rückstellend wirken und dabei nichtlineares und hysteretisches Verhalten zeigen. Als Besonderheit zu nennen ist ein intrinsischer Antagonismus der einerseits mit einer aktiven Verstellung in die flache Lage durch die Kraftzunahme von $F_A - F_M$ und die gleichzeitige Abnahme der magnetischen Kraft um $F_{MAG}^{ferro} - F_{MAG}^{para}$ verbunden ist, andererseits mit einer aktiven Verstellung in die aufgerichtete Lage durch die Kraftzunahme $F_{MAG}^{ferro} - F_{MAG}^{para}$ und gleichzeitige Abnahme der Rückstellkraft um $F_A - F_M$. Die Masse m entspricht dem am frei beweglichen Ende des Biegeaktors angebrachten Mikrospiegel. Die Masse des Aktors ist um den Faktor 100 geringer und kann daher hier vernachlässigt werden.

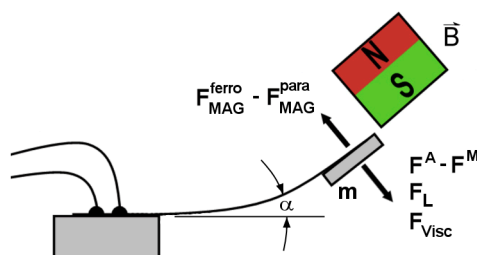


Abbildung 3.11: Im 1D-Aktorsystem aus der Formgedächtnislegierung Ni_2MnGa wirkende Kräfte.
 $F_{MAG}^{ferro} - F_{MAG}^{para}$ = magnetische Kraft $F_A - F_M$ = Formgedächtniskraft F_L = Lorentzkraft
 F_{Visc} = Luftreibung.

Die Abhängigkeit der Kräfte von der Auslenkung x , der Temperatur im Material und der Zeit stellt sich wie folgt dar:

$F_{MAG}^{ferro} - F_{MAG}^{para}$ Die magnetische Kraft ergibt sich aus dem Gradienten des Produkts der Magnetisierung der FGL und der Feldstärke. Die Magnetisierung ist aufgrund der Phasenumwandlung vom ferromagnetischen in den paramagnetischen Zustand und umgekehrt nichtlinear und hysteretisch von der Temperatur abhängig. Die Feldstärke ist nichtlinear vom Abstand x zum Permanentmagneten abhängig.

$F_A - F_M$ Die Formgedächtniskraft basiert auf der Kraftänderung bei der Rückumwandlung von Austenit zu Martensit und ist daher temperaturabhängig. Die Berechnung erfolgt aus der mechanischen Spannungsänderung bei der Phasenumwandlung im Material.

F_L Die Lorentzkraft ist als einzige Kraft explizit von der Zeit abhängig, da sie durch den zeitabhängigen Stromfluss des sich im Magnetfeld des Permanentmagneten befindenden Aktors hervorgerufen wird.

F_{Visc} Die viskose Kraft ist durch die Bewegung des Aktors in Luft gegeben und dadurch von dessen Geschwindigkeit beziehungsweise von der ersten zeitlichen Ableitung von α abhängig.

Die Darstellung der Bewegungsgleichung ist aufgrund der zeit- und temperaturabhängigen, nicht-linearen und hysteretischen Kräfte nicht in Form einer gewöhnlichen Differentialgleichung darstellbar. Zur Simulation des Bewegungsverhaltens müssen folgende Parameter bekannt sein:

- Die temperaturabhängigen Magnetisierungskennlinien mit Hysteresen.
- Die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Kennlinien mit den entsprechenden Hysteresen.
- Ein kinetisches Modell das die oben genannten Parameter berücksichtigt.
- In das kinetische Modell muss weiterhin die thermomechanische Kopplung (FGE), die thermomagnetische Kopplung (Ferromagnetismus in der FGL) sowie ein Modell zur magneto-mechanischen Kopplung eingebunden werden, siehe dazu Abschnitt 3.3.1.

Zur elementaren Lösung der Bewegungsgleichung ist aufgrund der Komplexität des Problems der Einsatz von numerischen Algorithmen erforderlich [43, 44].

3.4 Optische Simulation

Zur Unterstützung bei der Auswahl und Positionierung der optischen Komponenten des in Kapitel 7 beschriebenen Laserscanner-Systems wird auf das optische *Raytracing*-Programm *ZEMAX*® am Institut für Mikrosystemtechnik (IMT) zurückgegriffen [46]. Basierend auf den Gesetzen der geometrischen Optik betrachtet eine *Raytracing*-Anwendung Lichtquellen als Strahlbündel. Für jeden Strahl lässt sich dessen Ausbreitung in unterschiedlichen Medien sowie die Reflexion, Brechung und Beugung an den Grenzübergängen der Medien berechnen.

Bei den in dieser Arbeit eingesetzten optischen Elementen handelt es sich um Kollimatoroptiken zur Kollimation eines stark divergenten Laserstrahls, sowie um Systeme aus Sammellinsen zur Fokussierung von Streulicht. Bei den durchgeführten Berechnungen kamen zwei unterschiedliche Modelle zum Einsatz [46]:

- *Sequential Raytracing*: Die Berechnung des Strahlverlaufs durch unterschiedliche Medien und deren Grenzflächen erfolgt sequentiell in einer zuvor festgelegten Reihenfolge. Dies ist ein schnelles Rechenmodell, das sich unter anderem für die Beschreibung von Teleskopen, Mikroskopen oder Kameralinsen eignet.
- *Non-sequential Raytracing*: Hier handelt es sich um ein detaillierteres Modell, das Lichtstreuung berücksichtigt und damit eine beliebige Abfolge von Medien und Grenzflächen bei der Strahlausbreitung. Die hierbei im System befindlichen optischen Elemente werden durch dreidimensionale Festkörpermodelle beschrieben.

Kapitel 4

Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt wird die Charakterisierung der FGL-Dünnschichten Ni_2MnGa und NiTiCu vorgestellt. Die Herstellung ist in Abschnitt 3.1.1.1 und 3.1.1.2 beschrieben. Von Interesse sind neben den Material-Kenndaten die thermischen und im Fall der ferromagnetischen Ni_2MnGa -Legierung die magnetischen Eigenschaften. Diese Material-Kenndaten werden mit Hilfe der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren ermittelt.

4.1 Mechanische Eigenschaften

Bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wird zuerst der E-Modul bestimmt. Zusätzlich werden die mit den mechanischen Belastungsversuchen einhergehenden Dehnungen der Materialien näher betrachtet.

4.1.1 Bestimmung des E-Moduls

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) ist ein materialabhängiger Kennwert, der den Zusammenhang zwischen Spannung σ und Dehnung ε der elastischen Verformung eines Körpers beschreibt. In FGL-Materialien hängt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten vom jeweiligen Phasenzustand und damit direkt von der Temperatur ab. Zusätzlich kommt ein lastabhängiger Effekt zum Tragen, da die Phasenumwandlung des Materials durch induzierte Spannungen beeinflusst werden kann, wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben.

Zur Bestimmung des E-Moduls werden Auslenkung-Temperatur-Kennlinien bei verschiedenen Belastungen durchgeführt. Eine Doppelbiegebalken-Teststruktur wird bei homogener Temperaturverteilung durch Anbringen unterschiedlicher Lasten mit der Gewichtskraft F_G am vorderen Ende ausgelenkt. Dabei muss beachtet werden, dass die entsprechende maximale Dehnung $\sigma^{M,A}$ für die M-Phase und A-Phase nicht überschritten wird um eine plastische Deformation auszu-

schließen. Bei den in Abbildung 4.1 gezeigten Versuchen wird die Auslenkung der Strukturen zuerst ohne Gewicht und anschließend mit Gewichten durchgeführt. Für die Ni₂MnGa–Legierung ergibt sich ohne Gewicht keine Auslenkung d in der A–Phase, da die eingeprägte Formgedächtnisgestalt in der horizontalen Ebene liegt und damit Null ist.

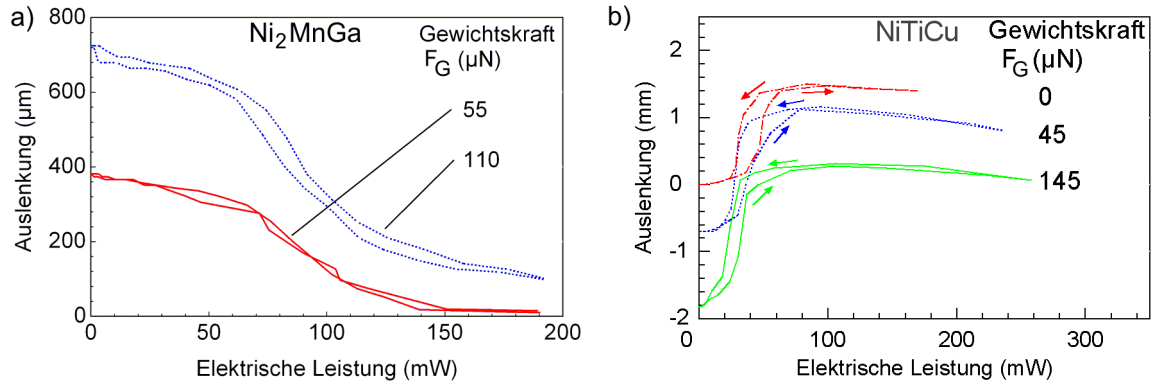


Abbildung 4.1: Auslenkung–Leistung–Kennlinie für Testaktoren aus einer 10 µm dicken Ni₂MnGa FG–Legierung a) und aus einer 5.5 µm dicken NiTiCu FG–Verbundschicht b) für unterschiedliche Gewichte.

Anhand der gemessenen Differenzauslenkung bei angebrachten Gewichten und den Designparametern der Teststruktur in Tabelle 4.1 lässt sich mit folgender Formel der E–Modul und der Steifigkeitskoeffizient $E^{M,A}$ für kleine Auslenkungen d bestimmen [47]:

$$d = \frac{2 \cdot F_G \cdot l^3}{E \cdot b \cdot h^3} \quad (4.1)$$

Für die in Abbildung 4.1 a) gezeigten Kennlinien der Ni₂MnGa–Legierung kann der E–Modul E^A für die austenitische Phase mit Gleichung (4.1) zu 120 GPa abgeschätzt werden. Die maximale Dehnung $\varepsilon_{M,A}$ an der Oberfläche der Teststruktur lässt sich nach der Formel

$$\varepsilon_{M,A} = \frac{6 \cdot F_G \cdot l}{E^{M,A} \cdot b \cdot h^2} \quad (4.2)$$

bestimmen. Sie beträgt in der A–Phase 0.4% und liegt noch innerhalb der Dehngrenze von $\varepsilon_{rec} = 0.8\%$ [48]. Im martensitischen Zustand ergeben sich größere Auslenkungen, was auf Pseudoplatizität der M–Phase schließen lässt. Aus dem durchgeführten Auslenkungs–Versuch wird die maximale Dehnung ε_M zu 0.23% bestimmt, was einer Steifigkeitskonstante E^M von 21 GPa entspricht.

Tabelle 4.1: Designparameter der Doppelbiegebalken–Teststrukturen.

Bezeichnung	Stegbreite b (mm)	Freie Länge l (mm)	Schichtdicke h (mm)
Ni ₂ MnGa	0.5	5.0	0.01
NiTiCu / Mo / Fe(Cr,Ni)	3.8	0.4	0.0055

Anhand der in Abbildung 4.1 b) gemessenen Auslenkungs–Temperatur–Kennlinien kann für die NiTiCu–Verbundschicht E^A zu 150 GPa bestimmt werden, wobei die maximale Dehnung $\varepsilon_A = 0.16\%$ beträgt. In der M–Phase zeigt sich die im Vergleich zur Ni₂MnGa–Legierung eine höhere Steifigkeit der Verbundschicht mit einem E^M von 120 GPa und einer maximalen Dehnung ε_M von 0.2%.

4.2 Thermische Charakterisierung

4.2.1 Phasenumwandlungstemperaturen

Bei den Phasenumwandlungstemperaturen der FGL erfolgt die kristalline Strukturänderung von der austenitischen Phase (A–Phase) zur martensitischen Phase (M–Phase). Die Bestimmung dieser Temperaturen wird zunächst mit der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) durchgeführt. Als weitere Messmethode kommen Widerstandsmessungen an Doppelbiegebalken–Teststrukturen zum Einsatz. Diese Verfahren werden in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Ni₂MnGa

Für diese Untersuchung liegen zwei unterschiedliche Varianten von Dünnschichten vor, die mit einer Sputterleistung von 50 W und 200 W hergestellt werden. Die Umwandlungstemperaturen der Materialien sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die Hysteresebreite H beträgt 14 K. Sie entspricht der Temperaturdifferenz ΔT in der Mitte der Umwandlung. Aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften des Materials unterhalb der Curie–Temperatur T_C wird die Legierungszusammensetzung so gewählt, dass T_C im Bereich der austenitischen Starttemperatur A_s liegt. Da die Curie–Temperatur nicht aus den gezeigten Kennlinien hervorgeht, erfolgt die Bestimmung von T_C durch Magnetisierungsmessungen, die in Abschnitt 4.3 beschrieben sind.

Abbildung 4.2 a) zeigt die DSC–Messung einer 4.5 mg schweren, mit 50 W gesputterten Probe (Ni₂MnGa_{50W}) in einem Temperaturbereich von 80 bis 225°C. Beim Heizen beginnt die Phasenumwandlung in die A–Phase bei der Temperatur $A_s = 135^\circ\text{C}$ und endet bei $A_f = 165^\circ\text{C}$. Beim nachfolgenden Abkühlen beginnt die Rückumwandlung in die M–Phase bei $M_s = 145^\circ\text{C}$. Bei $M_f = 115^\circ\text{C}$ ist sie abgeschlossen. Die Breite H der Hysterese ist in Abbildung 4.2 eingezeichnet. Sie beträgt 14 K.

Zur Messung der Widerstand–Temperatur–Kennlinie wurde eine 5.0 mm lange und 10.0 μm dicke Doppelbiegebalken–Teststruktur mit einer Stegbreite von 0.5 mm verwendet. Die Messung zeigt, dass der innere Widerstand der Ni₂MnGa–Legierung von 2.9 Ω in der M–Phase auf 2.25 Ω in der A–Phase abnimmt. Dies ist auf die Änderung der Kristallgitterstruktur und der damit verbundenen Änderung der Streuung der elektrischen Wellenfunktion zurückzuführen. Die führt zu einer Abnahme des Widerstands von 25% bei einer Temperaturänderung von 120°C auf 170°C. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

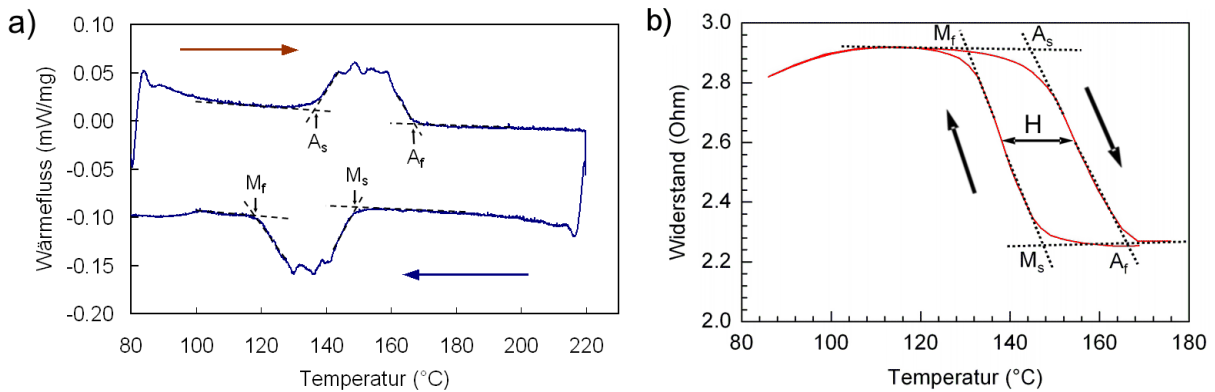


Abbildung 4.2: a) DSC-Messung und b) Widerstand-Temperatur-Kennlinie eines $\text{Ni}_2\text{MnGa}_{50\text{W}}$ -Dünnsfilms.

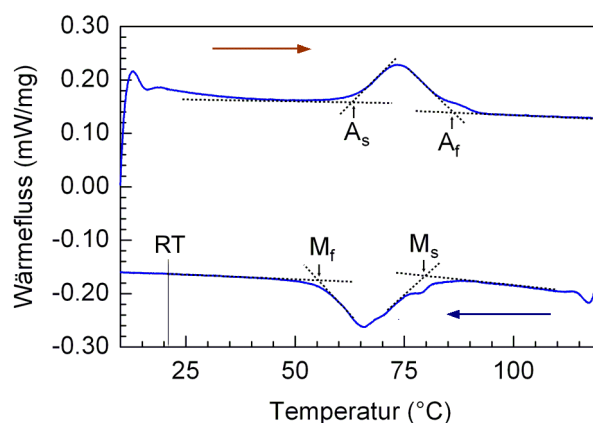
Tabelle 4.2: Phasenumwandlungstemperaturen der ferromagnetischen $\text{Ni}_2\text{MnGa}_{50\text{W}}$ FG-Legierung.

Bezeichnung	Messmethode	Umwandlungstemperatur (°C)			
		M_s	M_f	A_s	A_f
$\text{Ni}_2\text{MnGa}_{50\text{W}}$	DSC-Messung	145	115	135	165
	Widerstandsmessung	147	131	143	166

Es zeigt sich, dass die über die Widerstandsmessung bestimmten Umwandlungstemperaturen von denen der DSC-Messung abweichen. Dies liegt einerseits an der Vorbereitung der Probe für die DSC-Messung. Durch das Verpressen in der Messkapsel entstehen mechanische Spannungen in den Schichten, die zu einer Temperaturänderung führen. In Verbindung mit kurzen Verweilzeiten an den Messpunkten, wodurch nur nicht-stationäre Messwerte erfasst werden können, führt dies im Gesamten zu Abweichungen im Kelvin-Bereich. Demgegenüber stehen sehr geringe mechanische Verspannungen in den freitragenden Doppelbiegebalken-Strukturen bei der Widerstandsmessung. Eine lange Wartezeit zwischen den Temperaturänderungen ermöglicht die Erfassung quasi-stationärer Messwerte, die im Vergleich zur DSC-Messung genauer sind. Von Nachteil bei der Widerstandsmessung ist jedoch die schwierigere Messung der Proben temperatur im Kryostaten.

Bei der DSC-Messung der $\text{Ni}_2\text{MnGa}_{200\text{W}}$ -Dünnsfilme, die mit einer Sputterleistung von 200 W hergestellt werden, zeigt sich eine Abnahme der Phasenumwandlungstemperaturen mit zunehmender Sputterleistung. Im Vergleich zur Sputterleistung von 50 W wird eine Verschiebung von M_s um mehr als 65 K hin zu geringeren Temperaturen gefunden.

Wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, liegt M_f in diesem Fall nur noch 25 K über Raumtemperatur (RT). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass aus diesem Material hergestellte Aktoren eine wesentlich schlechteres dynamisches Verhalten aufweisen werden, da dies zu einer Zunahme der Kühlzeiten aufgrund eines geringeren Temperaturgradienten zur Raumtemperatur


 Abbildung 4.3: DSC-Messung eines $\text{Ni}_2\text{MnGa}_{200\text{W}}$ -Dünnsfilms.

RT führt. Weiterhin ist der Arbeitstemperaturbereich auf Temperaturen unter 65°C beschränkt, da ansonsten die Phasenumwandlung von der A-Phase zur M-Phase und umgekehrt nicht mehr vollständig durchlaufen werden kann. Tabelle 4.3 fasst die ermittelten Umwandlungstemperaturen nochmals zusammen.

Anhand der beschriebenen Nachteile werden daher die mit 50 W gesputterten Dünnsfilme als Grundlage für die in dieser Arbeit hergestellten Ni_2MnGa -Dünnsfilmaktoren verwendet.

Tabelle 4.3: Phasenumwandlungstemperaturen der ferromagnetischen $\text{Ni}_2\text{MnGa}_{200\text{W}}$ FG-Legierung.

Bezeichnung	Messmethode	Umwandlungstemperatur ($^\circ\text{C}$)			
		M_s	M_f	A_s	A_f
$\text{Ni}_2\text{MnGa}_{200\text{W}}$	DSC-Messung	79.5	56.0	63.0	87.0

NiTiCu

Die Phasenumwandlungstemperaturen der Verbundschicht mit der FGL NiTiCu werden ebenfalls anhand einer DSC-Messung ermittelt. Die dazugehörige Kennlinie ist in Abbildung 4.4 a) dargestellt. Eine durchgeführte Widerstand-Temperatur-Messung liefert kein Ergebnis, da wie in Abbildung 4.4 b) zu sehen, da der integrale Widerstand des Schichtverbunds nur eine lineare Änderung des Widerstands zeigt. Da sich der Gesamtwiderstand aus einer Parallelschaltung der einzelnen Schichtwiderstände zusammensetzt, dominiert das lineare Widerstandsverhalten der Mo- und der Fe(Cr,Ni)-Schicht.

Basierend auf der DSC-Messung in Abbildung 4.4 a) werden die Umwandlungstemperaturen M_s / M_f der M-Phase zu $47^\circ\text{C} / 38^\circ\text{C}$ und A_s / A_f der A-Phase zu $52^\circ\text{C} / 62^\circ\text{C}$ bestimmt. In Tabelle 4.4 sind die gemessenen Umwandlungstemperaturen zusammengestellt.

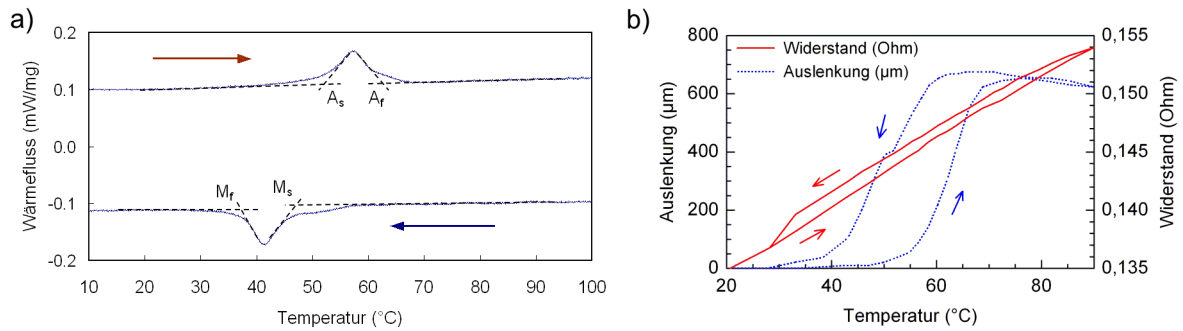


Abbildung 4.4: a) DSC-Messung einer NiTiCu-Verbundschicht, b) Widerstand-Temperatur-Kennlinie eines Testaktors mit dazugehöriger Auslenkung.

Die in Abbildung 4.4 b) zusätzlich aufgenommene Auslenkung des Testaktors in Abhängigkeit der Temperatur zeigt jedoch das typische Hystereseverhalten das auf den Phasenumwandlungsprozess hinweist. Die anhand dieser Kurve ermittelten Umwandlungstemperaturen stimmen sehr gut mit denen der DSC-Messung überein. Der verwendete Testaktor hat ebenfalls die Form eines Doppelbiegebalkens mit einer Länge von 5.0 mm und einer Stegbreite von 0.5 mm. Die Gesamtschichtdicke der FG-Verbundschicht beträgt 16.0 µm.

Tabelle 4.4: Phasenumwandlungstemperaturen der NiTiCu-Verbundschicht.

Bezeichnung	Messmethode	Umwandlungstemperatur (°C)			
		M _s	M _f	A _s	A _f
NiTiCu / Mo / Fe(Cr,Ni)	DSC-Messung	47	38	52	62
	Widerstandsmessung	–	–	–	–

4.2.2 Temperatur-Leistungs-Kennlinien

Die Temperatur auf der Oberfläche eines Steges des Doppelbiegebalken-Testaktors wird mit einem IR-Kamerasystem untersucht, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Bei elektrischer Beheizung wird die Temperaturverteilung im Material durch die Verteilung der Stromdichte J hervorgerufen. Mit Hilfe von IR-Aufnahmen kann einerseits die qualitative Verteilung der Temperatur auf der Oberfläche des Steges in Form eines Falschfarbenbildes oder eines Graustufenbildes dargestellt und andererseits die Temperatur für jeden vom IR-System auflösbaren Punkt ermittelt werden. Das in Abbildung 4.5 a) gezeigte Graustufenbild eines Steges des Doppelbiegebalkens zeigt zusätzlich zur qualitativen Temperaturverteilung die mit einem kleinen Kreuz markierte Maximaltemperatur von 170°C in der geometrische Mitte der Struktur. Im unteren Teil des Bildes ist die Struktur auf einem Träger fixiert und elektrisch kontaktiert. Diese stellen, wie in der Abbildung zu sehen, eine Wärmesenke dar. Am oberen Ende des Steges befindet sich die Masse eines Mikrospiegels, die ebenfalls aufgrund der großen thermischen Masse und Oberfläche die Temperatur im Steg verringert. Die entlang der eingezeichneten Mittenlinie des Steges quantitativ

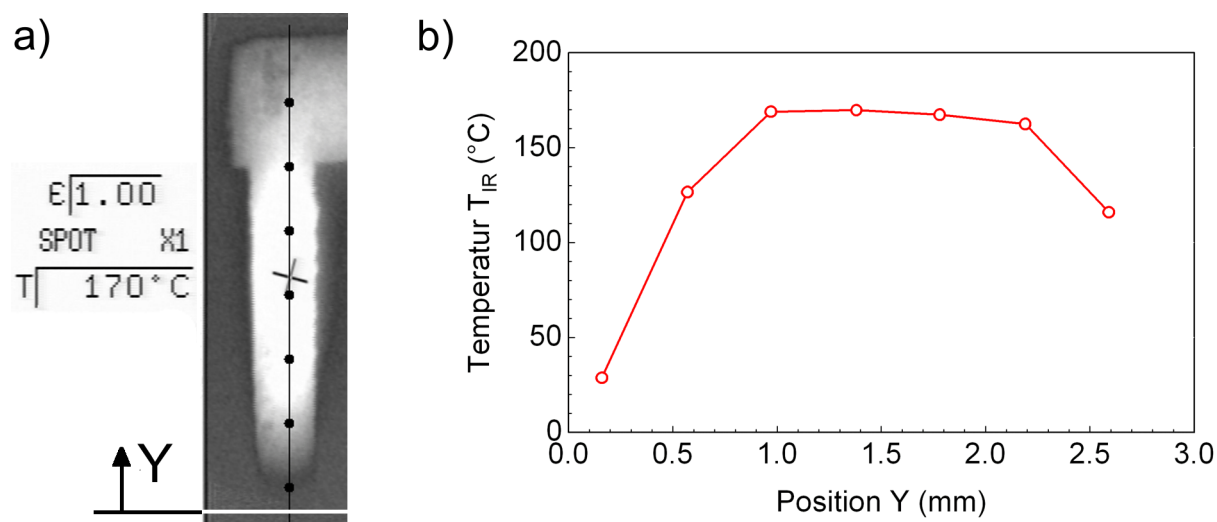


Abbildung 4.5: a) IR-Graustufenbild eines Steges des Doppelbiegebalkens und b) entlang der Mittellinie des Steges in y-Richtung ermittelte Temperaturen.

ermittelten Temperaturwerte sind in Abbildung 4.5 b) aufgetragen.

Für die Temperatur-Leistung-Kennlinie wurde der Doppelbiegebalken mit unterschiedlichen elektrischen Strömen beheizt und jeweils die maximale Temperatur auf der Materialoberfläche und die elektrische Leistung P_{el} bestimmt. In Abbildung 4.6 a) ist deren Zusammenhang aufgezeigt. Anhand des beobachteten linearen Zusammenhangs von Temperatur T und elektrischen Strom I in einem Bereich zwischen 80°C und 200°C von

$$T = 0.8193 \cdot I - 17.779 \quad (4.3)$$

lässt sich die Widerstand-Temperatur-Kennlinie berechnen. Abbildung 4.6 b) zeigt diese für einen Temperaturbereich von 85 bis 200°C . Im Vergleich zu den Temperaturen, die in Abschnitt 4.2.1 im Kryostat bei homogener Temperaturverteilung im Testaktor vorgenommen wurde, zeigen die Werte eine sehr genaue Übereinstimmung bei M_S und Abweichungen von 10 K bis 15 K bei M_f und A_S/A_f . Bei den hier aus der Temperatur-Leistung-Kennlinie errechneten Temperaturen haben neben der Verwendung der Maximaltemperatur in der Mitte des Steges Faktoren wie die Anzahl der Messpunkte der aufgenommenen Kennlinie, die bei der Tangentenmethode möglichst hoch sein sollte, einen großen Einfluss auf die Ablesegenauigkeit. Insgesamt ergibt sich eine gute Konsistenz der elektrischen und optischen Messmethoden. In Tabelle 4.5 sind die ermittelten Temperaturwerte zusammengestellt.

4.2.3 Konvektive und konduktive Kühlung

Die Funktion der thermisch betriebenen Aktoren hängt stark von der konvektiven Kühlung, das heißt der Wärmeabgabe an die den Aktor umgebende Luft, ab. Den Aktoren kurzzeitig elektrothermisch zugeführte Wärme ruft einerseits die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Effekte der Phasenumwandlung hervor, sie muss jedoch nach der Zuführung durch konvektive und konduktive

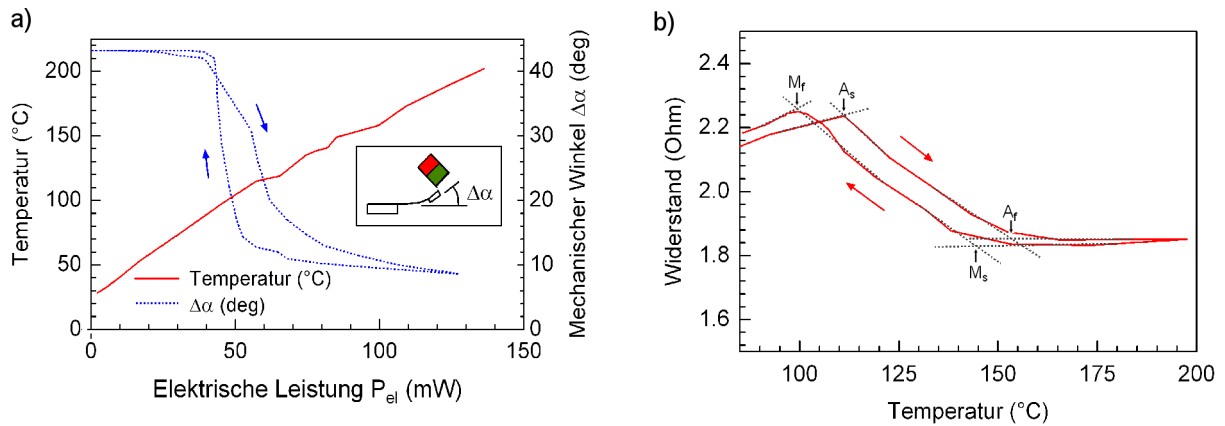


Abbildung 4.6: a) Temperatur–Leistungs–Kennlinie und b) aus a) berechnete Widerstand–Temperatur–Kennlinie mit Phasenumwandlungstemperaturen.

Tabelle 4.5: Aus der Temperatur–Leistungs–Kennlinie ermittelte Phasenumwandlungstemperaturen der Ni_2MnGa –Legierung.

Bezeichnung	Messmethode	Umwandlungstemperatur (°C)			
		M_s	M_f	A_s	A_f
Ni_2MnGa_{200W}	Temperatur–Leistungs–Kennlinie	145	115	135	165

Kühlung an die Umgebung abgeführt werden um die Phasenumwandlung wieder umzukehren. Betrachtet man einen gekapselten Spiegelaktor so kann dieser die Wärmeenergie konvektiv an das ihn umgebende Gasgemisch, hier Luft, oder konduktiv über die elektrischen Kontakte und das Substrat abgeben. Die konduktive Kühlung des Aktors wurde in Kapitel 4.2.2 anhand von IR–Aufnahmen betrachtet. Die Effektivität der konvektiven Kühlung wird durch den Wärmeübergangskoeffizient α beschrieben. Luftströmungen begünstigen die Wärmeabgabe und steigern somit die Effektivität der Kühlung was im Fall der verwendeten Spiegelaktoren die zeitliche Dynamik verbessern kann, α erhöht sich bis zu einem Faktor 10. Nachteilig kann sich eine große Luftströmung auswirken, wenn sie die harmonische Schwingung des Aktor–Systems stört.

Ni_2MnGa

Um den direkten Einfluss der konvektiven Kühlung zu untersuchen, wird in Abbildung 4.7 a) ein Ni_2MnGa –Testaktor mit 5.0 mm Länge verwendet. Der Charakterisierung des Aktors erfolgt zuerst ohne Luftstrom durch eine Auslenkungs–Frequenz–Kennlinie. Mit Hilfe eines Lüfters mit 80 mm Durchmesser wird anschließend ein definierter Luftstrom dem Aktor seitlich zugeführt, um der Strömung eine geringe Querschnittsfläche zu bieten. Die Abhängigkeit der Luftströmung von der angelegten Lüfterspannung wird durch eine Luftstrom–Spannung–Kennlinie des Lüfters erfasst.

Die Strömungsgeschwindigkeit v hängt dabei wie folgt von der Lüfterspannung U ab:

$$v = 0.0211 \cdot U^{1.8156} \quad (4.4)$$

Es zeigt sich, dass bei annähernd gleichem dynamischen Verhalten des Aktor–Systems die Amplitude bei einer Luftströmung von 1.1 m/s um den Faktor 3.5 zunimmt.

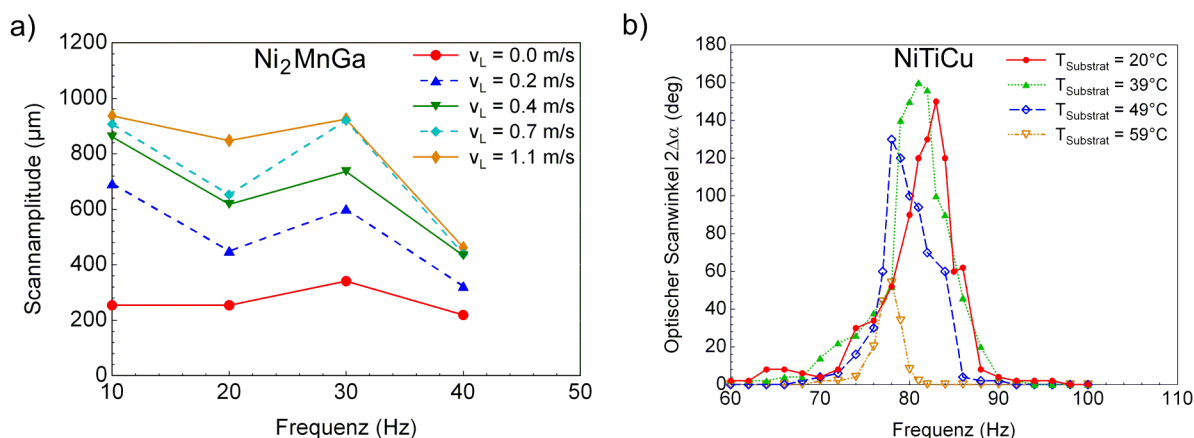


Abbildung 4.7: a) Auslenkungs–Frequenz–Kennlinie für einen Ni_2MnGa –Testaktor im dynamischen Betrieb für verschiedene Luftströmungen und b) Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz der NiTiCu –Verbundschicht.

Zur Untersuchung des Aktorverhaltens bei stark verringerter konvektiver Kühlung wird der Testaktor in einem Kryostaten betrieben. Der Umgebungsdruck ist auf 10^{-3} mbar gesenkt wobei im Inneren Raumtemperatur (RT) herrscht.

Abbildung 4.8 zeigt als Ergebnis eine deutliche Verringerung der Auslenkung um den Faktor 2. Lediglich bei Arbeitsfrequenzen von 1 bis 2 Hz zeigt sich eine zum offenen Betrieb vergleichbare Amplitude von $3000 \mu\text{m}$. Möglich wird dies durch die extrem langen Kühlzeiten nach jedem zugeführten Energiepuls von etwa 1000 bis 500 ms, was um einen Faktor von 50 bis 100 größer als im offenen Betrieb ist. Daraus lässt sich ableiten, dass sich bei Raumtemperatur (RT) und einem Vakuum von 10^{-3} mbar die konvektive Kühlung um den Faktor 50 bis 100 verschlechtert.

NiTiCu

Umgekehrt kann der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das thermodynamische Verhalten untersucht werden. Dazu wird ein 3.8 mm langer Testaktor, auf einem thermisch leitfähigen Al_2O_3 –Substrat mit einem ebenfalls thermisch leitfähigen Kleber fixiert. Das Substrat ist thermisch über einen Kupferblock an ein Heizelement gekoppelt, das von einem PID–Regler auf einer fest eingestellten Temperatur gehalten wird. Die NiTiCu –Verbundschicht eignet sich für diesen Versuch aufgrund der geringen Umwandlungstemperaturen sehr gut. In Abbildung 4.7 b) ist die Abhängigkeit des optischen Scanwinkels $2\Delta\alpha$ und der Resonanzfrequenz des Testaktors von der

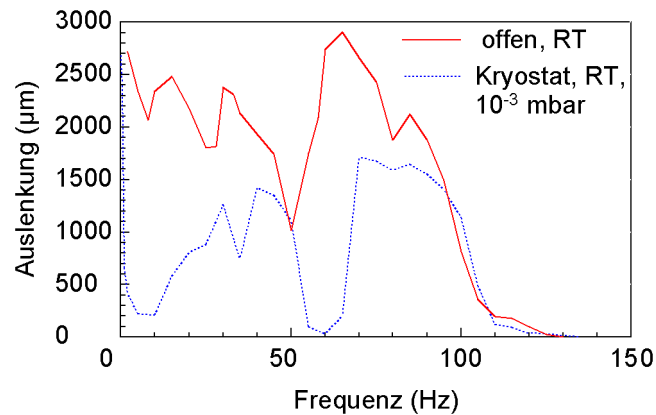


Abbildung 4.8: Auslenkung–Frequenz–Kennlinie einer 5.0 mm langen Doppelbiegebalken–Teststruktur für den ungekapselten Betrieb bei Raumtemperatur (offen, RT) und in einem Vakuum von 10^{-3} mbar bei Raumtemperatur (Kryostat, RT).

Temperatur des beheizten Kupferblocks aufgetragen. Die Änderung der Kennlinie ist dabei eher qualitativ anzusehen, da die thermische Kopplung zwischen Aktor und Substrat nicht optimal ist. Es zeigt sich jedoch eine eindeutige Verschiebung der Resonanzfrequenz um 5 K hin zu kleineren Frequenzen. Gleichzeitig findet sich eine optimale Amplitude des Scanwinkels bei einer Substrattemperatur von 39°C , die zu höheren Temperaturen hin stark abnimmt. Bei 65°C Substrattemperatur ist $A_s = 52^{\circ}\text{C}$ überschritten, was in einem Abfall der Amplitude auf Null resultiert. In diesem Fall lässt sich keine Schwingung im Aktor–System anregen.

4.2.4 Gekoppelte FEM–Simulation

Durch gekoppelte FEM–Simulation wird eine gemessene Temperaturverteilung in einem Steg des Ni_2MnGa Spiegelaktors verifiziert. Für eine vorgegebene elektrische Leistung von 150 mW wird durch elektrisch–thermische FEM–Simulation zuerst die stationäre Verteilung der Stromdichte J im Volumen eines Steges berechnet, um daraus die von J abhängige Temperaturverteilung für den statischen Fall zu bestimmen (Abbildung 4.9). In einer Gegenüberstellung werden sieben Messpunkte verglichen, die mit dem IR–System bestimmt und aus der grafisch dargestellten Temperaturverteilung FEM–Simulation abgelesen werden. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der in Abbildung 5.36 b) gezeigten Temperaturverläufe. Damit kann gezeigt werden, dass die Routinen der FEM–Simulation zur Berechnung des gekoppelten elektrisch–thermischen Verhaltens der Formgedächtnislegierung Ni_2MnGa ausreichend genau ist. Nachfolgend werden diese Simulationen als Werkzeug verwendet, um auch komplexere Zusammenhänge wie etwa das gekoppelte magnetisch–mechanische Verhalten im Material zu untersuchen.

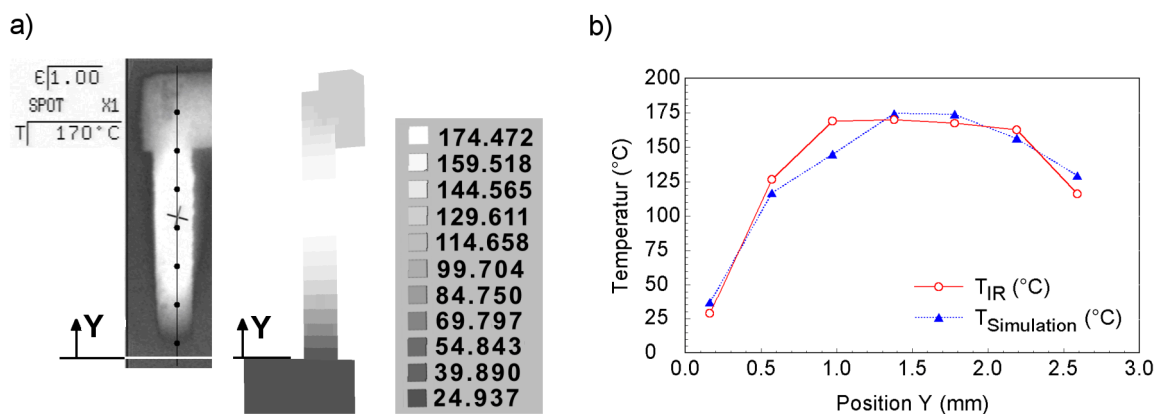


Abbildung 4.9: a) Vergleich von gemessener und simulierter Temperaturverteilung in einem Steg eines Doppelbiegebalkens sowie in b) Temperaturen entlang der Y-Achse der Mittellinie des Steges.

4.3 Magnetische Charakterisierung

4.3.1 Ferromagnetische Formgedächtnislegierung

Zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften der Ni_2MnGa -Dünnschichten werden $5.0\ \mu\text{m}$ dicke Dünnschichten in einem SQUID-Magnetometer untersucht. In Abbildung 4.10 a) ist die Magnetisierung des Materials als Funktion des angelegten Magnetfelds aufgetragen. Eine Sättigung der Kennlinie lässt sich am Abknicken des linearen Sättigungsverlaufs bei etwa $350\ \text{kA/m}$ beobachten.

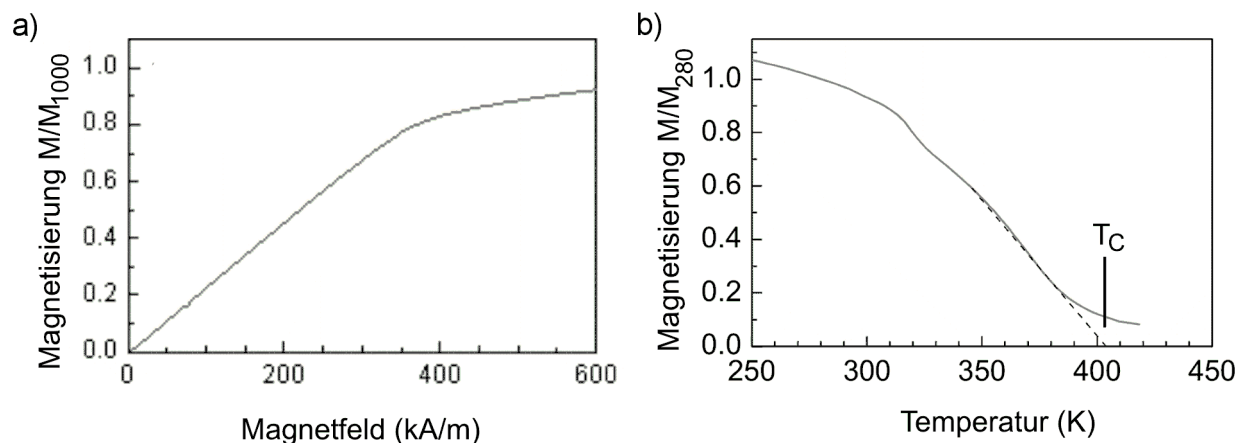


Abbildung 4.10: a) Auf $100\ \text{kA/m}$ normierte Sättigungsmagnetisierung eines $5.0\ \mu\text{m}$ dicken Dünnschichtfilms und b) auf $280\ \text{K}$ normierte Magnetisierung eines $5.0\ \mu\text{m}$ dicken Dünnschichtfilms nach einer Magnetisierung bei $1600\ \text{kA/m}$ in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen in einem SQUID.

Aus der Abhängigkeit der Magnetisierung von der Temperatur der Probe wird in Abbildung 4.10 b) die Curietemperatur T_C in der M-Phase bestimmt. Das angewendete Tangentenverfahren ergibt

einen Wert von 400 K. Der ermittelte Wert von $T_C = 127^\circ\text{C}$ liegt etwas unter den gemessenen austenitischen Umwandlungstemperaturen A_s / A_f ($135^\circ\text{C} / 165^\circ\text{C}$, siehe Abschnitt 4.2.1). Daher ist er der martensitischen Phase zuzuordnen. Dies ist eine geringe Abweichung vom Idealfall, da für eine optimale Nutzung des Materials für den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Aktormechanismus, mit zwei antagonistischen Kräften, T_C genau zwischen A_s und A_f liegen müsste.

4.3.2 Gekoppelte magnetische Simulation

Die Größe der Kraft F_{mag} hängt im Wesentlichen vom Magnetfeld B und seinem Gradienten ab. Die maximale Flussdichte des SmCo-Permanentmagneten wird zunächst experimentell mit einem Hall-Sensor zu 0.3 T bestimmt. Zur Berechnung des magnetischen Felds wird eine Integralmethode entwickelt [44]. Bei dieser werden die Magnetfelder im Raum durch Aufsummieren der Beiträge aller magnetischen Elemente bestimmt. Mit der Funktion der temperaturabhängigen Magnetisierung aus Abbildung 4.10 b), der berechneten magnetischen Feldstärke in jedem Punkt des Ni_2MnGa -Aktors und einem Modell, das die remanente Magnetisierung berücksichtigt, wird die maximale magnetische Kraft F_{mag} zu 100 mN berechnet.

In Abbildung 4.11 b) ist der Verlauf der magnetischen Flussdichte B in x -Richtung entlang der in Abbildung 4.11 a) eingezeichneten y -Ebene aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Maximalwert von B genau am vorderen Ende des von der Seite gezeichneten Doppelbiegebalkens wirkt, woraus eine große Kraft F_{mag} an dieser Stelle resultiert. Damit wird bestätigt, dass die gewählte Positionierung des Permanentmagneten mit einem Drehwinkel von 45° sehr gut ist. Der Knick der Flussdichte in Abbildung 4.11 b) deutet auf einen Bereich eines geringen Gradienten im Feldverlauf hin.

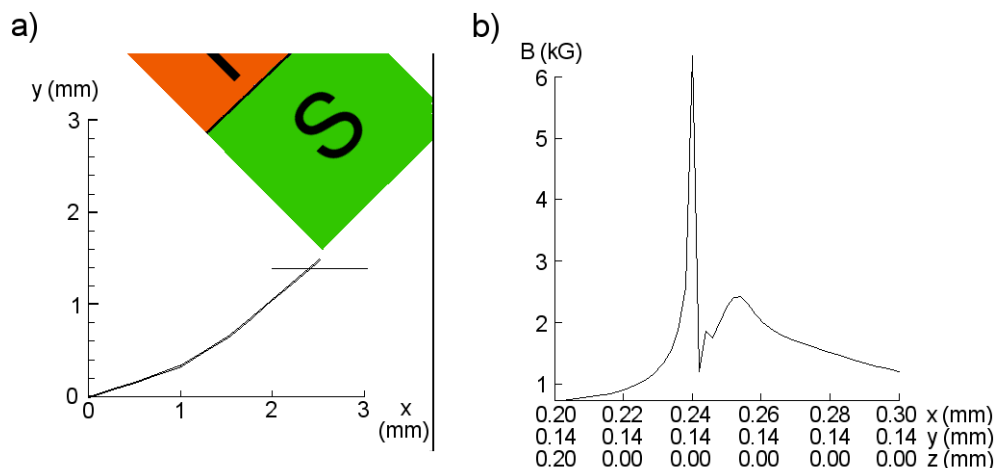


Abbildung 4.11: a) Position eines 3.0 mm langen Doppelbiegebalkens unter dem SmCo-Permanentmagnet. b) Verlauf der magnetischen Flussdichte in kG für die in a) angegebene Ebene.

4.4 Zusammenfassung

Die Material–Kenndaten der in dieser Arbeit verwendeten Materialien, die ferromagnetische Ni₂MnGa–Legierung und die Verbundschicht NiTiCu/Mo/Fe(Cr,Ni), werden experimentell mit Hilfe von Doppelbiegebalken–Teststrukturen ermittelt. Dazu zählen die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Dünnschichten sowie die magnetischen Kenngrößen der Ni₂MnGa–Legierung. Weiterhin wird der Einfluss der konvektiven Kühlung auf den dynamischen Betrieb der Aktor–Systeme untersucht.

Vergleicht man die Umwandlungstemperaturen der beiden verwendeten Materialien, zeigt sich eine große Differenz von über 100 K. Die hohen Temperaturen A_s/A_f der Ni₂MnGa–Legierung von 135°C/165°C versprechen hohe Betriebsfrequenzen der Aktoren aufgrund des großen Temperaturgradienten in der Abkühlphase des Systems. Unterstützt wird dies durch die kleine Hysterese der Phasenumwandlung von 14 K. Die Curietemperatur T_C der ferromagnetischen M–Phase wird mit Hilfe von SQUID–Magnetometeruntersuchungen zu 127°C bestimmt. Experimente zur konvektiven Kühlung im dynamischen Betrieb zeigen eine Zunahme der Aktoramplitude um den Faktor 3.5 wenn ein Luftstrom den Aktor mit circa 1.1 m/s von der Seite anströmt. Wird der Aktor im Vakuum bei einem Druck von 10⁻³ mbar betrieben, verringert sich die Aktoramplitude aufgrund der stark verringerten konvektiven Kühlung um den Faktor 2.

Die Verbundschicht mit der NiTiCu–Legierung zeigt niedrigere Phasenumwandlungstemperaturen M_s/A_f von 38°C/62°C. Eine Erhöhung der Substrattemperatur zeigt bei thermischen Experimenten im dynamischen Betrieb eine Verschiebung der Resonanzfrequenzen um 5 K hin zu kleineren Frequenzen. Die maximale Amplitude verringert sich bei Anstieg der Substrattemperatur an die Phasenumwandlungstemperatur von 59°C sehr stark. Bei einer Temperatur des Substrats von 65°C kann keine Schwingung mehr im Aktor–System angeregt werden. Der Elastizitätsmodul E^A wird für Ni₂MnGa zu 120 GPa, bei NiTiCu zu 150 GPa bestimmt.

Kapitel 5

Aktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung

Ausgehend von den mechanischen und thermischen Materialeigenschaften der Legierungen Ni₂MnGa und NiTiCu werden Spiegelaktoren entwickelt, hergestellt und charakterisiert. In diesem Kapitel werden zuerst Aktoren zur Strahlablenkung in einer Dimension vorgestellt. Sie basieren, abhängig von der verwendeten FGL, auf unterschiedlichen Wirkprinzipien. Aktoren aus der ferromagnetischen FGL Ni₂MnGa nutzen den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen neuartigen Aktormechanismus, der den thermischen FGE und den ferromagnetischen Effekt nutzt. Zum Vergleich werden NiTiCu-Verbundschicht-Aktoren vorgestellt, die auf der Verstärkung des Bimetall-Effekts durch den FGE beruhen. Abschließend wird die Herstellung und Charakterisierung eines rein magnetischen Verbundschicht-Aktors beschrieben, der aufgrund einer Magnetisierungsänderung eine Auslenkung erzeugen soll.

5.1 Magnetischer Formgedächtnisaktor

5.1.1 Design und Aufbau

Basierend auf dem in Abschnitt 2.4.3.3 vorgestellten Aktorprinzip lässt sich mit einem sehr einfachen Aufbau ein Spiegelaktor herstellen, der nur aus einem bewegten Teil, einem Doppelbiegebalken, besteht. Es ist lediglich eine elektrische Kontaktierung der Struktur nötig, um diese elektrothermisch beheizen zu können. Über dem frei beweglichen Ende des Doppelbiegebalkens wird ein Permanentmagnet angebracht, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

Bei der verwendeten Doppelbiegebalken-Struktur ist die erzielbare Auslenkung und damit die Verkippung des Mikrospiegels aufgrund des verwendeten Aktorprinzips nach der Biegebalken-Theorie direkt abhängig von der freien Länge l der Struktur. Wird l vergrößert, steigt die maximale Auslenkung, gleichzeitig verringert sich jedoch die Eigenfrequenz des Systems, die umgekehrt

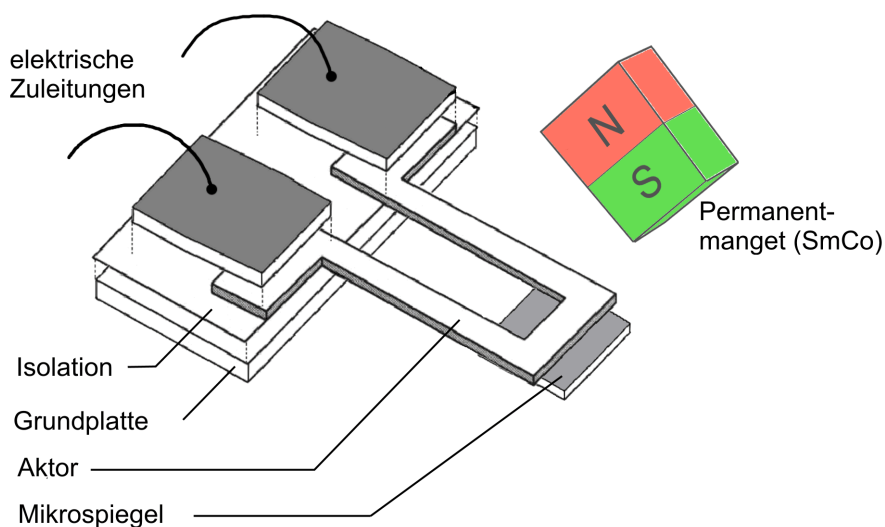


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des FFGL-Aktors.

proportional zu l ist.

Um Aktoren mit großen Scanwinkeln und großem Frequenzbereich der Arbeitsfrequenz zu erhalten, werden zwei unterschiedliche Designs der Doppelbiegebalken entwickelt. Zum Einsatz kommen die in Abbildung 5.2 gezeigten Strukturen. Die wichtigsten Designparameter sind zusammen mit den Abmessungen der jeweils verwendeten Mikrospiegel in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Designparameter der Ni_2MnGa -Mikroaktoren und der jeweils verwendeten Mikrospiegel.

Design	Bezeichnung	Gewicht (mg)	Abmessungen (mm)		
			Länge l	Breite b	Höhe h
Design 1	Doppelbiegebalken	–	5.0	0.5	0.01
	Mikrospiegel 1	1.3	1.5	1.5	0.25
Design 2	Doppelbiegebalken	–	3.0	0.4	0.01
	Mikrospiegel 2	0.57	0.8	0.8	0.38
	Mikrospiegel 3	0.56	1.5	0.8	0.20

Bei Design 2 werden zwei verschiedene Mikrospiegel verwendet. Mikrospiegel 3 hat bei annähernd gleicher Masse von Mikrospiegel 2 an den Strahlquerschnitt der verwendeten Laserdiode angepasste rechteckförmige Abmessungen.

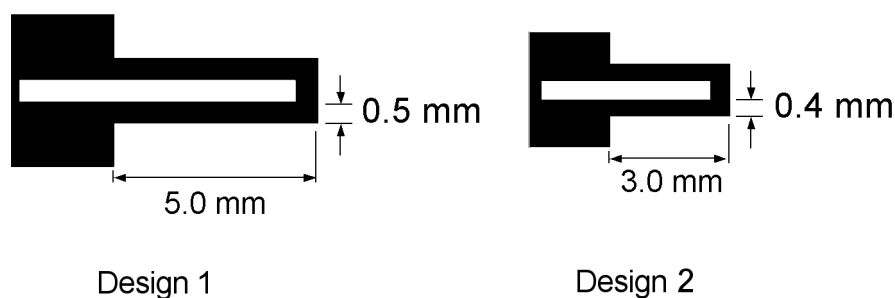


Abbildung 5.2: Design der Ni_2MnGa -Mikroaktoren und der verwendeten Mikrospiegel.

5.1.2 Herstellung

Die Herstellung der Einzelaktoren erfolgt nach den in Abschnitt 3.1.1.3 beschriebenen Verfahren. Zur Stabilisierung des Materials sind Hilfsstrukturen innerhalb des Designs vorhanden. Diese bestehen aus definierten Sollbruchstellen, die nach der Herstellung in einem abschließenden Schritt aufgetrennt werden. Nach dem Vereinzeln und der Montage wird der Mikrospiegel an der Vorderseite des Doppelbiegebalkens durch Tropfenkleben angebracht. Der Mikrospiegel besteht aus einem mit Gold bedampften Si-Wafer aus dem die Spiegel anschließend durch Vereinzeln hergestellt werden.

Der so aufgebaute Spiegelaktor wird in der in Abbildung 5.4 gezeigten Halterung montiert, die gleichzeitig die Positionierung des $3 \times 3 \times 2 \text{ mm}^2$ großen Permanentmagneten aus SmCo über dem vorderen Ende des Aktors erlaubt. Abbildung 5.3 zeigt einen aufgebauten, 5 mm langen Spiegelaktor mit angebrachtem Mikrospiegel und positioniertem SmCo-Magnet.

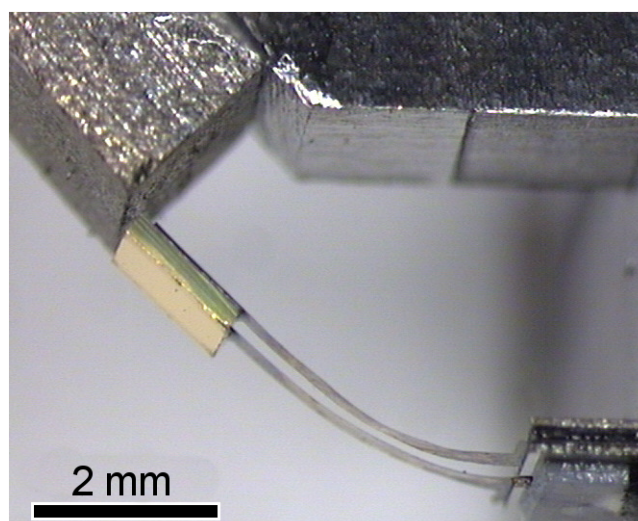


Abbildung 5.3: Hergestellter und montierter Spiegelaktor aus einem 5 mm langen Doppelbiegebalken mit angebrachtem Spiegel und Permanentmagnet.

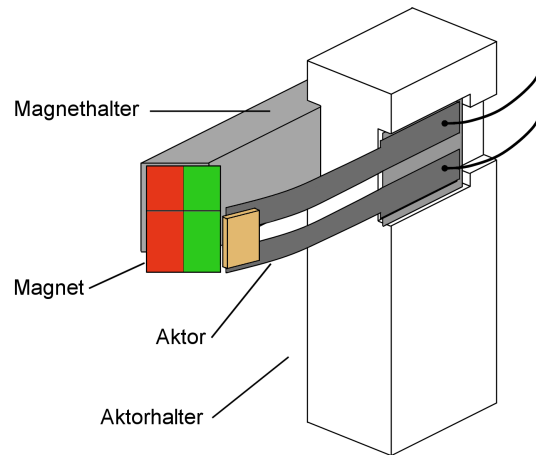


Abbildung 5.4: Halterung für den Aktor und den Permanentmagneten in schematischer Darstellung.

5.1.3 Charakterisierung

Die Charakterisierung der Spiegelaktoren gliedert sich in einen statischen und einen dynamischen Teil. Im statischen Teil wird das Verhalten der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen antagonistischen Kräfte in Abhängigkeit von elektrischer Leistung und Temperatur untersucht, während im dynamischen Teil hauptsächlich die Frequenzabhängigkeiten und der zeitliche Verlauf der angelegten Schwingung des Doppelbiegebalkens betrachtet wird.

5.1.3.1 Auslenkung und Scanwinkel

Bei der Auslenkung des Doppelbiegebalkens wird eine Verkippung des am frei beweglichen Ende angebrachten Mikrospiegels erzeugt. Ein auf den Mikrospiegel gerichteter Laserstrahl wird dabei genau unter diesem Verkippwinkel abgelenkt. Der hier als mechanische Scanwinkel $\Delta\alpha$ bezeichnete Winkel ergibt sich aus der relativen Differenz der Kippwinkel in den beiden Maximalpositionen der Auslenkung. Der Zusammenhang von $\Delta\alpha$ zu Auslenkung d ist in Abbildung 5.5 beschrieben. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der mechanische Scanwinkel $\Delta\alpha$ aufgrund der Durchbiegung des Doppelbiegebalkens größer ist als der aus der Auslenkung d bestimmte Winkel α_g . Näherungsweise gilt

$$\alpha_g = \arctan \frac{d}{l} \ll \Delta\alpha = \arctan \frac{d}{l_2} \quad (5.1)$$

Für die in dieser Arbeit verwendeten Doppelbiegebalkendesigns wird mit Hilfe von Auslenkungsversuchen folgende Näherung für den mechanischen Scanwinkel $\Delta\alpha$ bestimmt

$$\Delta\alpha = \arctan \left(\frac{d}{l_2} \right) = \arctan \left(\frac{d}{l \cdot (-0.0002d + 1)} \right) \quad (5.2)$$

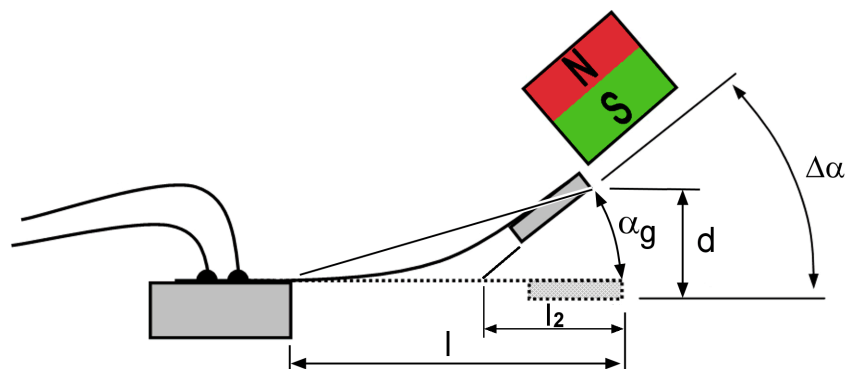


Abbildung 5.5: Abhängigkeit des mechanischen Scanwinkels $\Delta\alpha$ von der Auslenkung d .

Diese Näherung ermöglicht ausgehend von der bekannten freien Länge l und der Auslenkung d die näherungsweise Bestimmung von $\Delta\alpha$, da etwa in Kryostat-Versuchen die Aktoren nicht von der Seite beobachtet werden können und somit der Winkel nicht direkt ablesbar ist.

5.1.3.2 Magnetischer Kreis

Zu Beginn dieser Arbeit war bereits ein funktionsfähiger Demonstrator eines Spiegelaktors aus Ni_2MnGa hergestellt worden [48]. Er zeigte maximale optische Scanwinkel $2\Delta\alpha$ von 65° und war wie in Abbildung 5.6 a) gezeigt, aufgebaut. Die maximale Auslenkung des Aktors zum Magneten hin ist durch die Anstoßposition des Aktors gegeben. Der Permanentmagnet ist dabei unter einem Drehwinkel von 0° flach über dem Aktor positioniert. Zur Verbesserung des magnetischen

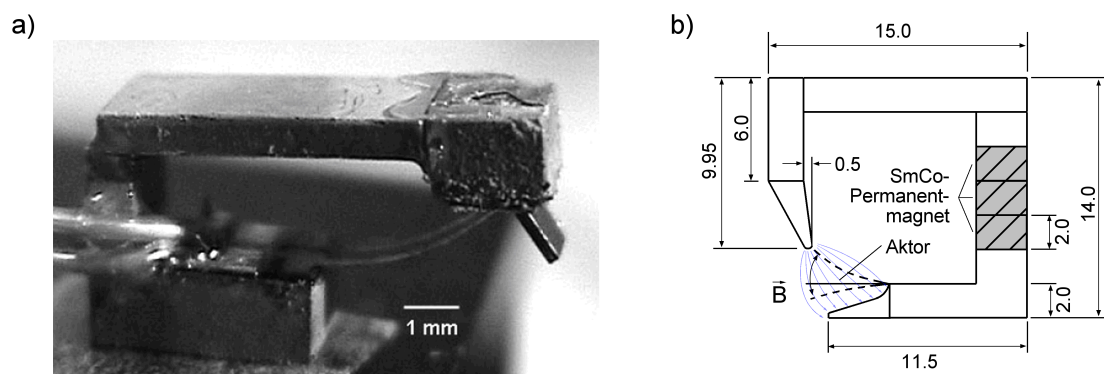


Abbildung 5.6: a) Vorhandener Spiegelaktor mit einem maximalen optischen Scanwinkel $2\Delta\alpha$ von 65° . b) hergestellter magnetischer Kreis zur Optimierung der magnetischen Kraft F_{mag} .

Feldes und damit der auf den Doppelbiegebalken wirkenden magnetischen Kraft F_{mag} wurde in dieser Arbeit ein magnetischer Kreis entworfen, der an die in Abbildung 5.6 a) gezeigten, bereits vorhandenen Haltestrukturen des Permanentmagneten anlehnte. Wie in Abbildung 5.6 b) schematisch skizziert, kann dies durch einen vergrößerten Gradienten der magnetischen Flussdichte B erreicht werden (Formel (2.18)). Dazu werden drei SmCo-Permanentmagnete im weichmagne-

tischen Material Eisen so angeordnet, dass die Feldlinien der Magnete gebündelt geführt werden, bis sie auf den Luftspalt treffen. Dieser ist so ausgelegt, dass der Übergang der Feldlinien von Eisen zur Luft über einen sehr geringen Krümmungsradius erfolgt. Das hat eine Bündelung der Feldlinien zur Folge, die im Gegensatz dazu auf der gegenüberliegenden Seite des Luftspalts auf eine speziell geformte große Eisenfläche treffen. Mit dieser Anordnung ergibt sich das gewünschte Gradientenfeld.

Erste Tests an diesem System zeigten jedoch sehr geringe Feldstärken, was nur zu geringen Auslenkungen der Aktoren und geringen magnetischen Kräften führte. Mit einem Hall-Sensor gemessene Werte bestätigten die geringe Feldstärke. Diese Ergebnisse sind auf Verluste im magnetischen Kreis zurückzuführen. Da dieser aus mehreren Einzelteilen besteht, sorgen kleinste Luftspalte an den aufeinander liegenden, leicht rauen Flächen bereits zu großen Verlusten der Feldstärke. In einem verbesserten Aufbau zeigte sich, dass ein direkt über dem Spiegelaktor angebrachter SmCo-Permanentmagnet mit Abmessungen von $3 \times 3 \times 2 \text{ m}^2$ wesentlich bessere Auslenkungen erzeugt. Daher wird anstatt des magnetischen Kreises diese direkte Anordnung des Magneten über dem Aktor als Ausgangspunkt für die folgenden Charakterisierungen gewählt. Dabei ist die Position des Magneten so zu wählen, dass der Aktor frei an ihm vorbei schwingen kann. Zusätzlich wird der Magnet, wie Abbildung 2.18 skizziert, um 45° gedreht um eine höhere Feldstärke in der Nähe des Aktors zu erreichen.

5.1.3.3 Statisches Verhalten

Mit Hilfe einer Scanwinkel-Leistungs-Kennlinie wird der Verlauf der Kräfte F_{mag} und F_{FGE} der Spiegelaktoren untersucht. Dazu wird der Spiegelaktor im statischen Betrieb von einem konstanten elektrischen Strom I durchflossen. Nach wenigen Sekunden stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der inneren Temperatur und der konvektiven Kühlung ein, so dass eine konstante Temperaturverteilung in den Stegen des Doppelbiegebalkens herrscht.

Bei Raumtemperatur befindet sich der Aktor in seiner Ausgangsstellung zum Permanentmagneten hin ausgelenkt. Wird mit steigender elektrischer Leistung der elektrische Strom und damit die Temperatur im Aktor erhöht, wird kurz vor dem Start der austenitischen Starttemperatur A_s bei etwa 127°C T_C erreicht. Durch die einsetzende Phasenumwandlung verringert sich F_{mag} , der Aktor beginnt sich aufgrund der kleinen Rückstellkraft F_{mart} vom Magneten weg zu bewegen, wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Bei einer weiteren Steigerung der Temperatur setzt die Phasenumwandlung hin zur A-Phase ein, so dass zur abnehmenden Kraft F_{mart} die wesentlich größere Kraft F_{FGE} hinzutritt. Dieser Vorgang findet im Bereich sehr kleiner Leistungsänderungen statt. Eine Änderung der Auslenkung von 90% auf 10% wird durch eine Leistungsdifferenz von 55 mW hervorgerufen. In der Mittenposition zeigt sich dabei ein instabiles Verhalten des Systems, da sich dort F_{mag} und F_{FGE} im Gleichgewicht befinden. Betrachtet man die ermittelten Widerstand-Temperatur-Kennlinien, ist eine Erhöhung der Temperatur im Aktor mit einer Verringerung des Innwiderstands verbunden. Bei Durchführung des Versuchs an einem typischerweise spannungsstabilisierten Labornetzteil führt eine Verringerung des Innwiderstands zu einer Vergrößerung des

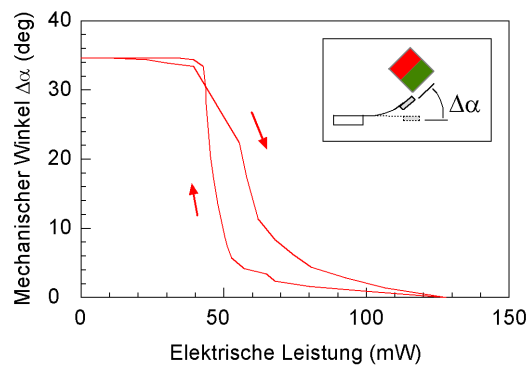


Abbildung 5.7: Auslenkung–Leistung–Kennlinie eines Spiegelaktors mit Abmessungen nach Design 1.

Stroms, was zu weiteren Beiträgen zur Kraft F_{FGE} führt. Dadurch bewegt sich das System innerhalb von Minuten allmählich aus der Gleichgewichtsposition. Wird die Temperatur durch Verringern der Leistung in kleinen Schritten abgesenkt, lässt sich eine kleine Hysterese beobachten. Erst bei geringfügig kleineren Leistungen von etwa 50 mW bewegt sich der Aktor zum Magneten hin in die Ausgangsstellung. Dies ist vor allem auf die Umwandlungshysterese des Materials und die Wärmekapazität des Mikrospiegels zurückzuführen. Bei sinkender Temperatur gibt der Mikrospiegel die gespeicherte Wärme wieder ab, wodurch eine Verschiebung der Kennlinie hin zu geringeren Leistungen erfolgt. Die Instabilität an der Mittenposition tritt auch in diesem Fall auf.

5.1.3.4 Dynamisches Verhalten

Zur Anregung einer harmonischen Schwingung wird die elektrische Leistung in Form rechteckförmiger Leistungspulse zugeführt. Wichtige Größen sind dabei die Pulsweite t_p , die Pulspausenzeit t_d und die Größe der Leistungsamplitude, wie in Abbildung 5.8 skizziert. Die Frequenz f der Pulse ergibt sich aus der Periodendauer τ zu $1/\tau = 1/(t_p + t_d)$. Im dynamischen Betrieb wird ei-

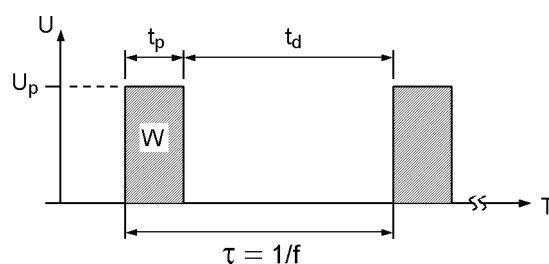


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der elektrischen Pulsleistung im dynamischen Betrieb.

ne Pulsfrequenz f und eine entsprechende Pulsdauer t_p vorgegeben. Für die pro Puls erzeugte Energie W gilt $W = U_p \cdot I \cdot t_p$. Die Signale werden von einem PC, der unter LabView arbeitet, erzeugt und über eine Digital–Analog–Wandlerkarte als unverstärktes TTL–Signal ausgegeben. Dieses wird über einen regelbaren Spannungsverstärker an den Aktor angelegt, wie in Abbildung

5.9 schematisch skizziert.

Bei den hergestellten Spiegelaktoren zeigt sich, dass eine Pulsdauer im Bereich von 0.5 bis 5.0 ms ausreicht um die zum Erwärmen benötigte elektrische Energie in das System zu überführen. Anhand empirischen Versuche wird ein Puls–zu–Pausen–Verhältnis zwischen t_p und t_d ermittelt, das größer als 1:7 sein sollte um eine ausreichend lange Abkühlzeit sicherzustellen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei kleinen Frequenzen unter 10 Hz kurze Pulszeiten t_p größere Ströme hervorrufen, die bei kleineren Defekten im Material schnell zu lokaler Überhitzung und damit zur Zerstörung der Aktorstege führen.

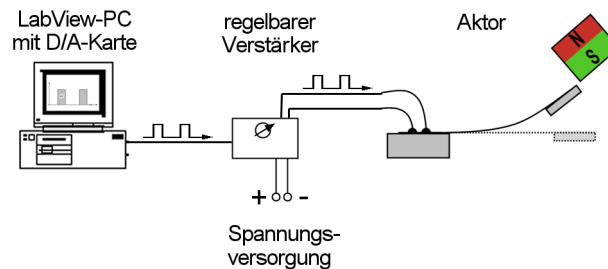


Abbildung 5.9: Schematischer Aufbau für den dynamischen Betrieb der Spiegelaktoren.

Abbildung 5.10 a) zeigt eine Fotografie, deren Belichtung auf die halbe Periodendauer der angelegten harmonischen Schwingung des Spiegelaktors mit Design 3 eingestellt wurde. So ließ sich die vollführte Schwingung des Aktors in einer Aufnahme festhalten. Die typische Geradenform eines abgelenkten Laserstrahls ist in Abbildung 5.10 b) zu sehen. Die gerade Linie zeigt, dass keine störenden Querkräfte im Betrieb des Aktors auftreten, die die Schwingung behindern würden.

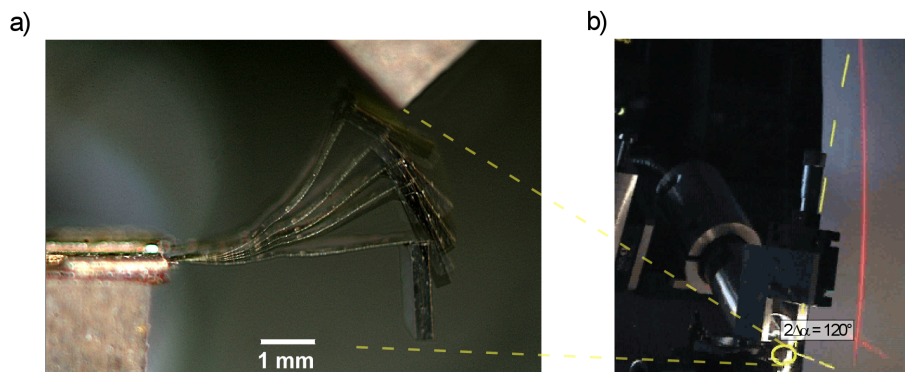


Abbildung 5.10: Dynamischer Betrieb eines Spiegelaktors mit Design 1 in einer Langzeitbelichtung a) und unter dem Winkel $2\Delta\alpha$ von 120° abgelenkter Laserstrahl, der die Form einer geraden Linie beschreibt b).

Spiegelaktoren mit Design 1

In diesem Abschnitt wird zuerst das dynamische Verhalten der Spiegelaktoren mit Design 1 untersucht.

Bei der Positionierung des Permanentmagneten über dem Aktor ist neben dem exakten Abstand zum Aktor vor allem der Winkel von Bedeutung, um den der Magnet gedreht wird. In Abbildung 5.11 ragt die Drehachse aus der Zeichenebene heraus, um die der Magnet um 45° gedreht wird.

Um den Einfluss des Drehwinkels zu untersuchen, werden die flache, um 0° gedrehte Magnetposition, und der Drehwinkel von 45° miteinander verglichen. Es zeigt sich dabei ein sehr ähnliches

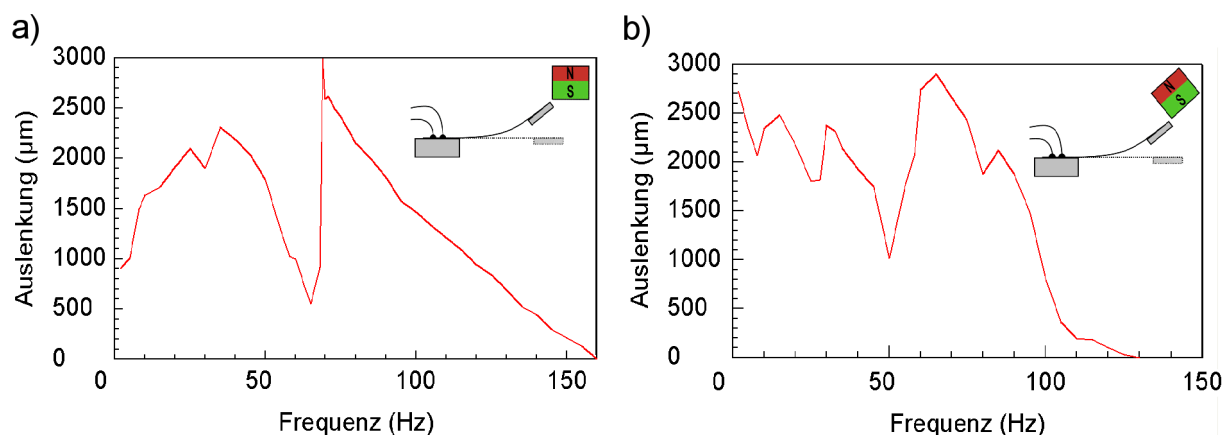


Abbildung 5.11: Auslenkung-Frequenz-Kennlinie eines Spiegelaktors mit Design 1 für einen Drehwinkel von 0° a) und 45° b).

frequenzabhängiges Verhalten, das sich nur bei kleinen Frequenzen unter 30 Hz unterscheidet. In diesem Bereich lassen sich bei einem Drehwinkel von 0° um einen Faktor 2 geringere Auslenkungen erzeugen. In dieser Konfiguration wirkt in unmittelbarer Nähe des Aktors eine Kraft F_{mag} , die größer als die im aufgeheiztem Zustand entgegenwirkende Kraft F_{FGE} ist. Der Aktor kann sich also schlechter vom Magneten lösen. Aufgrund der besseren Scanamplitude wird der Drehwinkel von 45° favorisiert. Abbildung 5.12 zeigt die Scanwinkel-Frequenz-Kennlinie eines Spiegelaktors mit Design 1. Für den favorisierten Drehwinkel des Permanentmagneten zeigt sich ein maximaler optischer Scanwinkel $2\Delta\alpha$ von über 100° .

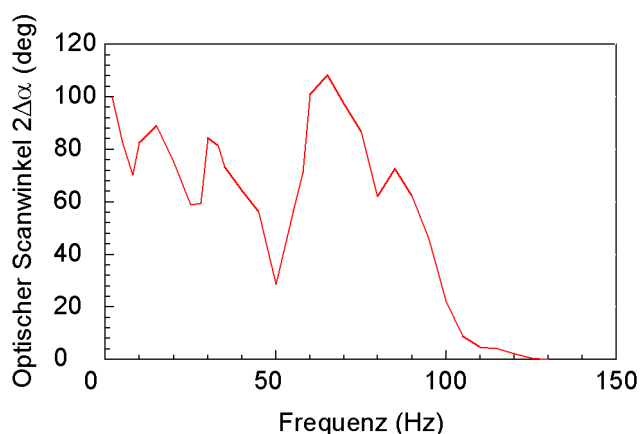


Abbildung 5.12: Scanwinkel-Frequenz-Kennlinie eines Spiegelaktors mit Design 1 für den favorisierten Drehwinkel von 45° .

Spiegelaktoren mit Design 2

In diesem Abschnitt wird das dynamische Verhalten der Spiegelaktoren mit Design 2 näher betrachtet. Detailliert untersucht werden dabei vor allem die genaue Regelcharakteristik der Spiegelaktoren sowie das zeitliche Verhalten der Aktorschwingung.

Zum Einsatz kommt dazu ein Aufbau auf einer optischen Bank, der eine Laserdiode, einen Umlenkspiegel sowie den auf einer Halterung montierten Aktor. Zur zeitlich aufgelösten Messung des mechanischen Scanwinkels $\Delta\alpha$ wird ein positionsempfindliche Photodetektor (PSD) eingesetzt (vergl. Abschnitt 3.2.4). Wie in Abbildung 5.13 gezeigt, wird mittels eines Strahlteilers der unter dem Winkel $2\Delta\alpha$ abgelenkte Laserstrahl zu einem kleinen Prozentsatz auf die PSD reflektiert, während über 95% des Lichts transmittiert wird. Da die Größe der empfindlichen Schicht der PSD begrenzt ist, muss diese entsprechend nahe am Strahlteiler positioniert werden, um den gesamten Winkelbereich $2\Delta\alpha$ aufnehmen zu können. Das gemessene Signal wird von einer separaten Verstärkerplatine als Spannungsamplitude ausgegeben. Das auf der optischen Bank aufgebaute System mit integrierter, hochaufgelösten Winkelmessung ermöglicht die Strahlableitung eines Laserstrahls in einer Dimension bei gleichzeitiger Bestimmung des aktuellen Scanwinkels $\Delta\alpha$ beziehungsweise $2\Delta\alpha$ mit einer Auflösung von 0.5° . Nachfolgend wird dieses System daher als 1D-Laserscanner-Demonstrator bezeichnet.

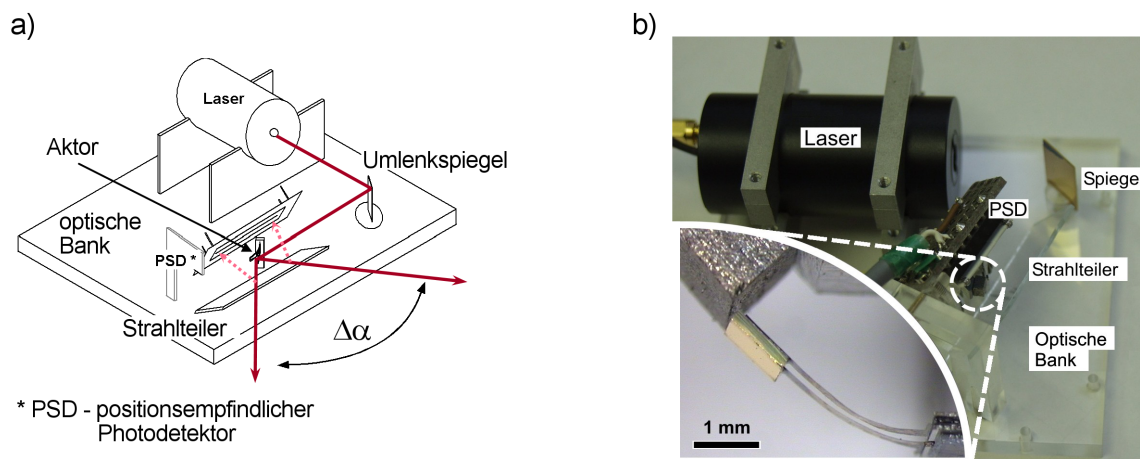


Abbildung 5.13: a) Schematischer Aufbau des Laserscanner-Demonstrators mit integrierter hochaufgelöster Winkelmessung und b) aufgebauter Demonstrator. Die Position des im Inset abgebildeten Spiegelaktors ist gekennzeichnet.

Mit Hilfe dieses Demonstratorsystems wird im Folgenden zuerst die Regelcharakteristik des Spiegelaktors untersucht. So zeigt sich etwa, dass zur Einstellung des maximalen Scanwinkels $2\Delta\alpha$ die elektrische Heizleistung eine Hysterese-Funktion durchlaufen muss.

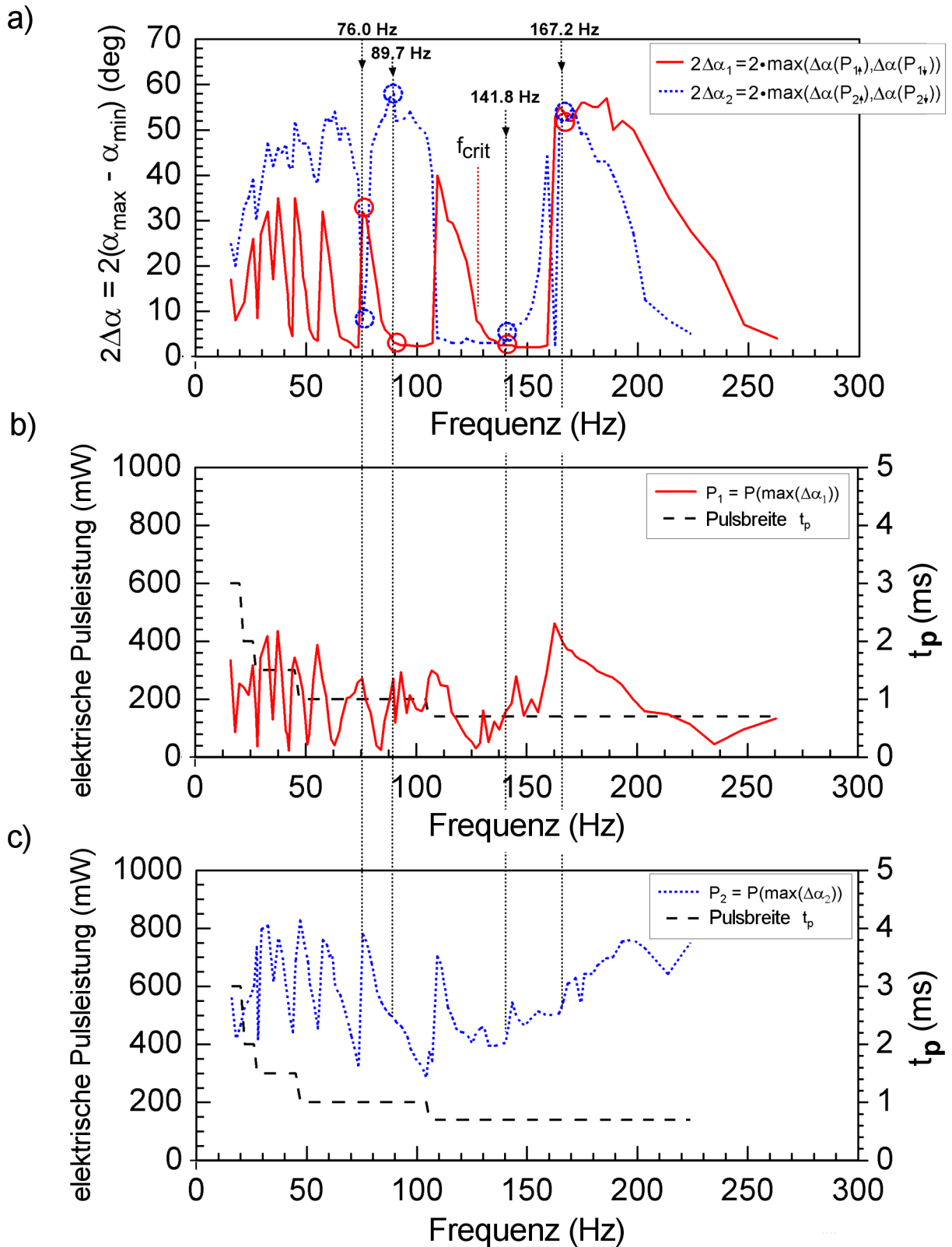


Abbildung 5.14: Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie eines Spiegelaktors mit Design 2 in Abhängigkeit von der elektrischen Pulsleistung und der Pulsdauer t_p .

Die Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie in Abbildung 5.14 a) zeigt ein relativ komplexes Verhalten des optischen Scanwinkels $2\Delta\alpha$ in Abhängigkeit von der angelegten Pulsfrequenz. Diese wird hier in 2-Hz–Schritten variiert, wobei jeweils eine optimale Pulsleistung für den maximalen Scanwinkel $2\Delta\alpha$ eingestellt wird. Dieser ergibt sich aus dem Maximum des mechanischen Scanwinkels $\Delta\alpha$ sowohl für Pulsleistungszunahme ($P_{1\uparrow}$) als auch für Leistungsabnahme ($P_{1\downarrow}$) in der Leistungshysterese multipliziert mit dem Faktor 2 ($2\Delta\alpha_1 = 2 \cdot \max(\Delta\alpha(P_{1\uparrow}), \Delta\alpha(P_{1\downarrow}))$), beziehungsweise $2\Delta\alpha_2 = 2 \cdot \max(\Delta\alpha(P_{2\uparrow}), \Delta\alpha(P_{2\downarrow}))$).

Unterhalb einer kritischen Frequenz f_{crit} von 130 Hz treten mehrere Maxima und Minima des Scanwinkels auf, die sehr stark von der Pulsleistung P_{opt1} und P_{opt2} abhängen. P_{opt1} und P_{opt2} sind in Abbildung 5.14 b) und c) aufgeführt. Wird f_{crit} überschritten, so nimmt $2\Delta\alpha$ unabhängig von der Pulsleistung stark ab. Dieses Tiefpassverhalten wird durch die bei steigender Frequenz immer kürzer werdenden Kühlzeiten t_d hervorgerufen, die bei nur leicht veränderbarer Pulszeit t_p linear abnehmen. Bei einer konstanten Pulszeit t_p von 1.0 ms verringert sich der Pulsabstand t_d zwischen 50 Hz und 100 Hz von 19.0 ms bei 50 Hz zu 9.0 ms bei 100 Hz, wie in Abbildung 5.14 c) zu sehen (gestrichelte Linie). Das gute dynamische Verhalten des Aktors bei diesen sehr kurzen Kühlzeiten liegt im großen Temperaturgradienten zwischen der Phasenumwandlungstemperatur und Raumtemperatur sowie in der konvektiven Kühlung aufgrund der Schwingbewegung des Aktors begründet. Ab 150 Hz zeigt sich ein breiter Resonanzbereich.

Die beiden Leistungsbereiche P_{opt1} und P_{opt2} der Pulsleistung sind ein charakteristisches Merkmal der Ni_2MnGa –Spiegelaktoren. In Abbildung 5.14 liegt P_{opt1} durchschnittlich im Bereich von 200 mW während P_{opt2} um den Faktor 3 höher bei 600 mW liegt. Um diese näher zu betrachten werden vier Frequenzen ausgewählt, die jeweils durch unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen $2\Delta\alpha_1$ und $2\Delta\alpha_2$ gekennzeichnet sind. Die Abhängigkeiten des Scanwinkels $2\Delta\alpha$ von der Pulsleistung werden in den folgenden Abbildungen 5.15–5.18 für die Frequenzen 76.0 Hz, 89.7 Hz, 141.8 Hz und 167.2 Hz untersucht.

In Abbildung 5.15 ist die Hysterese der Pulsleistung in der Scanwinkel–Pulsleistung–Kennlinie für 76.0 Hz aufgetragen. Deutlich zu erkennen sind die beiden Niveaus einer optimalen Pulsleistung, hier $P_{opt1\uparrow,\downarrow}$ und $P_{opt3\uparrow,\downarrow}$ mit dem dazugehörigen Hystereseverhalten für Zu– und Abnahme (gekennzeichnet durch die Pfeile \uparrow und \downarrow) der Leistung. Im Vergleich mit den weiteren ausgesuchten Frequenzen in den Abbildungen 5.16–5.18 zeigt sich, dass auf der Pulsleistungsskala drei Bereiche mit hohen Amplitude $2\Delta\alpha$ auftreten, die jedoch stark frequenzabhängig sind. Bei 76 Hz gibt es für Bereich 2 keine optimale Leistung $P_{opt2\uparrow,\downarrow}$. In Abbildung 5.15 b) ist die absolute Position der harmonischen Schwingung des Spiegelaktors aufgetragen, wobei der positive Wertebereich von $\alpha_{absolut}$ mit dem des mechanischen Scanwinkels $\Delta\alpha$ in Abbildung 5.5 entspricht. Mit zunehmenden positivem Winkel nähert sich der Aktor dem Magneten an, bei 0° befindet er sich in der horizontalen Formgedächtnisgestalt während ein negativer Wert ein überschwingen unterhalb die horizontale Position beschreibt. Jedem eingetragenen $\alpha_{absolut}$ ist der mechanische Scanwinkel $\Delta\alpha$, die Amplitude der harmonischen Schwingung, als Fehlerbalken zugeordnet. Es zeigt sich, dass der Nullpunkt der harmonische Schwingung bei geringen Leistungen in der Nähe des Dauermagneten liegt, während er bei höheren Leistungen sich immer mehr in Richtung der

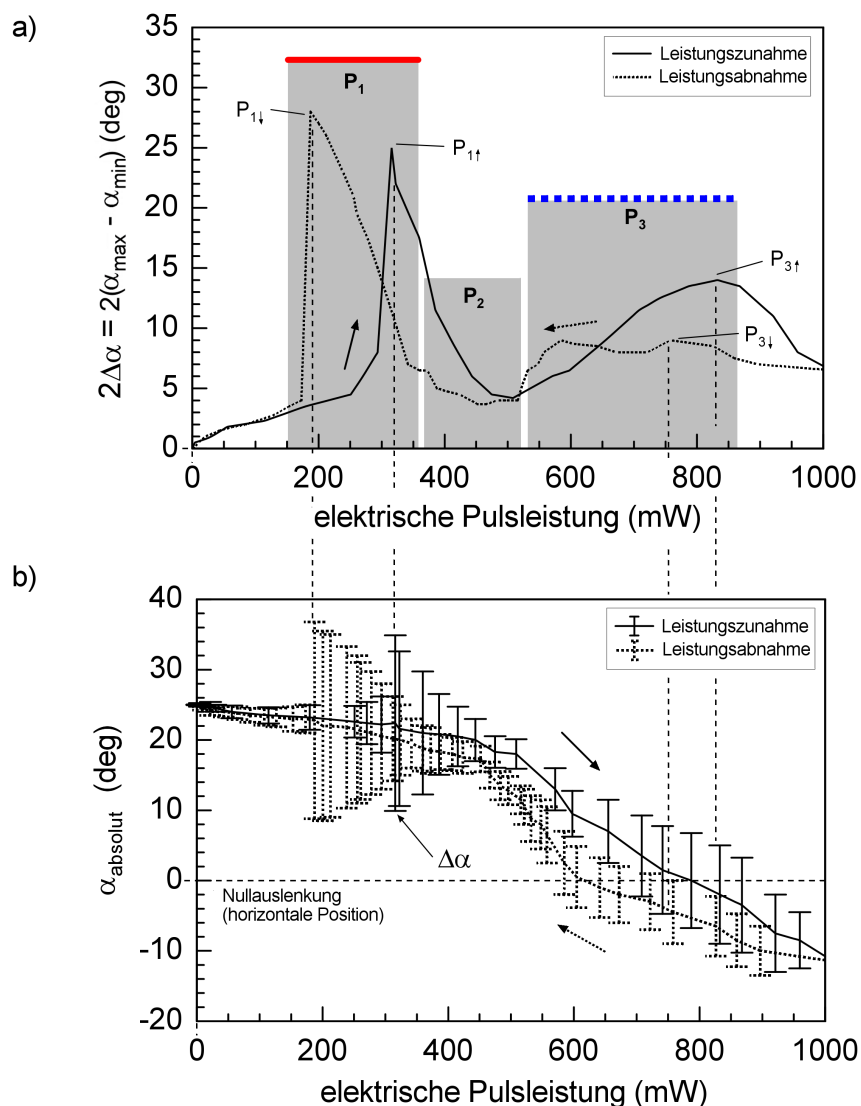


Abbildung 5.15: Scanwinkel–Leistungs–Kennlinie a) und absoluter Winkel α_{absolut} für eine Pulsfrequenz von 76.0 Hz b). Die Balken geben die maximale und minimale Auslenkung des Scanners an, aus der die Scanamplitude $2\Delta\alpha$ resultiert.

horizontalen Formgedächtnisgestalt des Aktors, und sogar darüber hinaus, bewegt.

Bei 89.7 Hz wird ein maximaler Scanwinkel $2\Delta\alpha$ von 50° in Pulsleistungs–Bereich 2 bei einer sehr geringen Hysterese der Leistung erreicht. In den Bereichen 1 und 3 kann dagegen keine große Scanamplitude $2\Delta\alpha$ angeregt werden. Die Mittenlage der harmonischen Schwingung befindet sich hier genau zwischen dem Magneten und der horizontalen Aktorposition.

Bei 141.8 Hz findet sich in keinem Bereich ein großer optischer Scanwinkel $2\Delta\alpha$. Die Werte von $2\Delta\alpha$ bewegen sich zwischen 3° und 7° über alle Bereiche verteilt mit einem Maximum in Bereich 3. Die Hysterese der Pulsleistung ist hier sehr ausgeprägt, wobei sich die Mittellage der harmonischen Schwingung jeweils in der horizontalen 0° –Lage befindet.

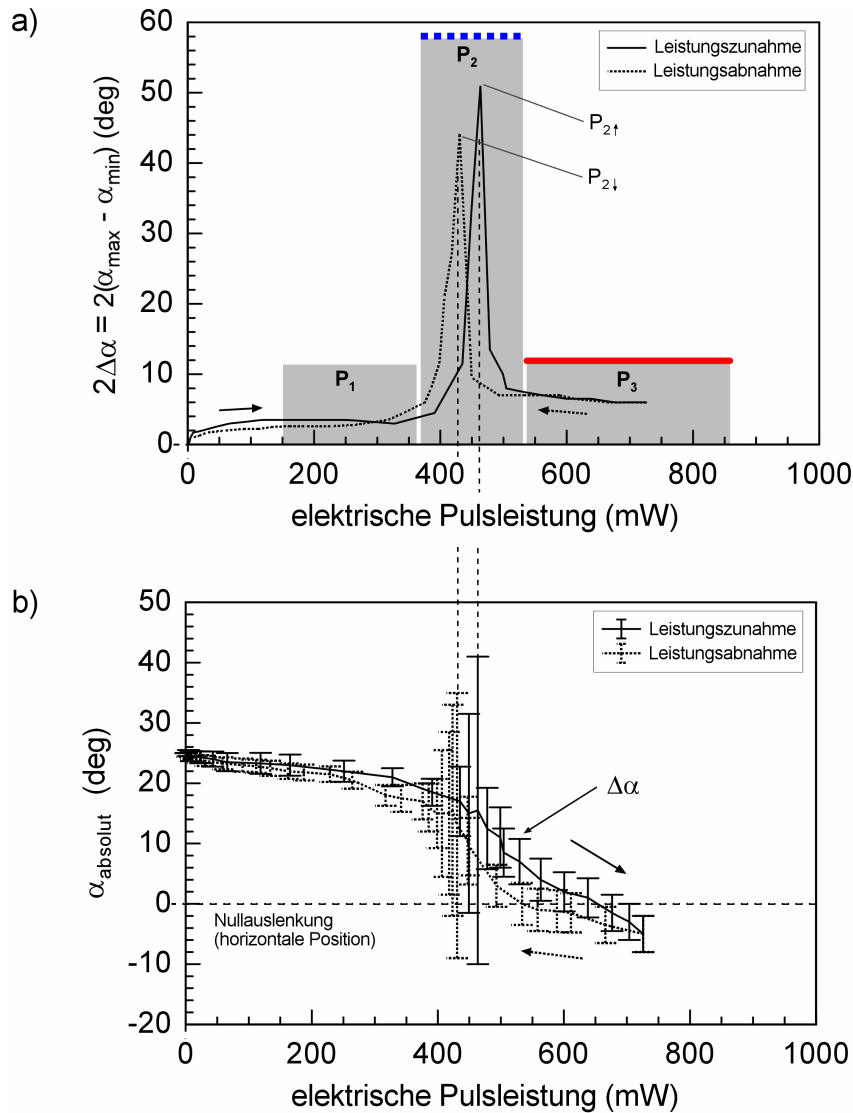


Abbildung 5.16: Scanwinkel–Leistungs–Kennlinie und absoluter Winkel α_{absolut} für eine Pulsfrequenz von 89.7 Hz.

Bei der Resonanzfrequenz 167.2 Hz (Abbildung 5.18) befindet sich der maximale Scanwinkels $2\Delta\alpha$ innerhalb der Bereiche 1 und 2. In beiden Fällen werden die größten optischen Scanwinkel $2\Delta\alpha_{1,2}$ von annähernd 60° erreicht, wobei sich die Mittenlage der harmonischen Schwingungen jeweils im Bereich der 0° -Lage befindet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die beobachteten Leistungsbereiche $P_{\text{opt}1}$ und $P_{\text{opt}2}$ unterschiedlichen Mittenpositionen der oszillierenden Scanbewegung entsprechen. Aufgrund des geringeren Leistungsniveaus von $P_{\text{opt}1}$ lässt sich dieses einer Mittenposition der Schwingung in der Nähe des Magneten zuordnen, während $P_{\text{opt}2}$ mit einem höheren Leistungsniveau einer Position um die horizontale Lage des Spiegelaktors entspricht. Im Bereich unterhalb der kritischen Frequenz von 130 Hz zeigt sich ein konträres Verhalten der Scanwinkel $2\Delta\alpha_1$ und $2\Delta\alpha_2$. Hier existiert immer jeweils nur ein optimaler, zu $P_{\text{opt}1}$ oder $P_{\text{opt}2}$ zugehöriger, Scanwinkel mit

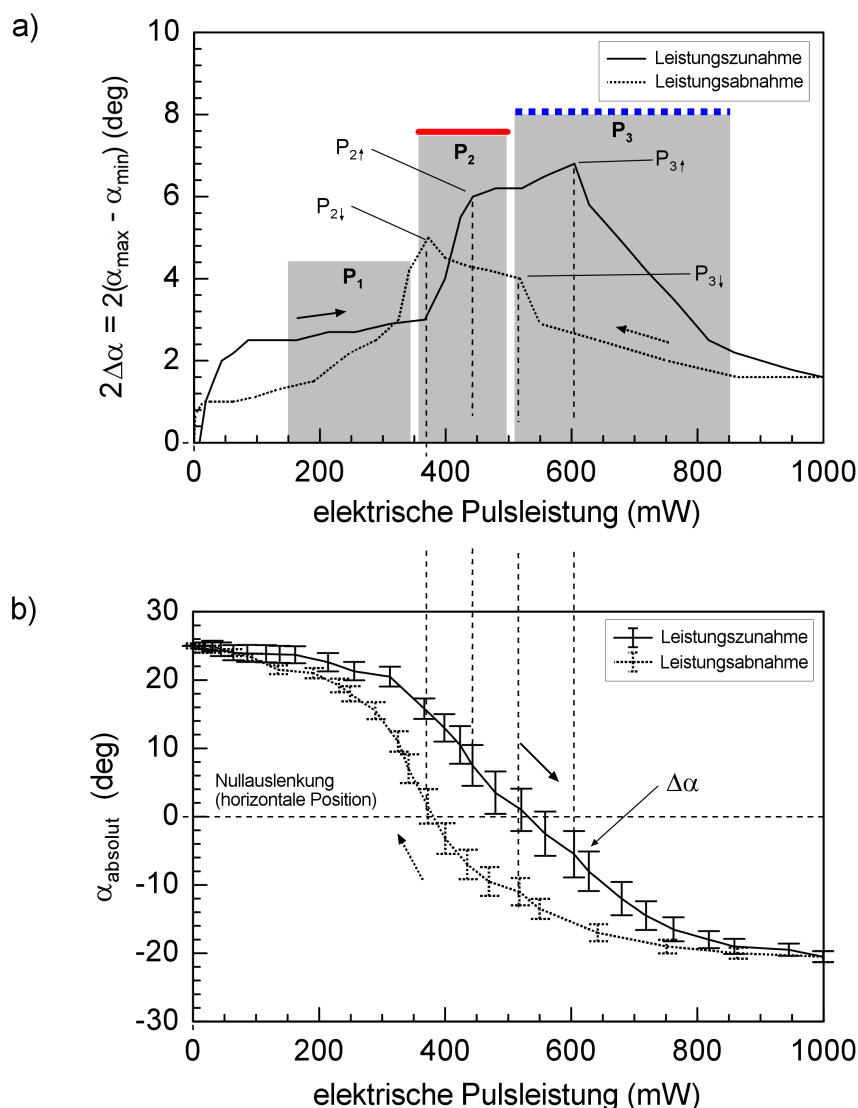


Abbildung 5.17: Scanwinkel–Leistungs–Kennlinie und absoluter Winkel α_{absolut} für eine Pulsfrequenz von 141.8 Hz.

einer großen Amplitude während der andere ein Minimum der Amplitude zeigt. Es kann damit immer nur in einem Leistungsbereich ein großer Scanwinkel angeregt werden.

Das zeitliche Verhalten des Spiegelaktors und damit die Form der harmonischen Schwingung wird mit Hilfe des integrierten Winkelsensors bestimmt. Bei den vorhergehenden Versuchen zeigte sich anhand der Projektion des abgelenkten Laserstrahls auf einen Schirm bereits die hohe Stabilität der Schwingungsform und deren Periodizität.

Wird der Spiegelaktor mit einem 3.0 ms langen Leistungspuls betrieben, erfährt er kurzzeitig die Kraft F_{FGE} bei sich stark verringernder Kraft F_{mag} was zu einer Auslenkung in Richtung der horizontalen Formgedächtnisgestalt führt. Danach führt er eine freie gedämpfte Schwingung aus, die in Abbildung 5.19 exemplarisch gezeigt ist. Die Eigenfrequenz der beobachteten Schwingung wird bei Mittelung über 10 Perioden zu 222 Hz bestimmt. Anhand der Abklingphase des stark

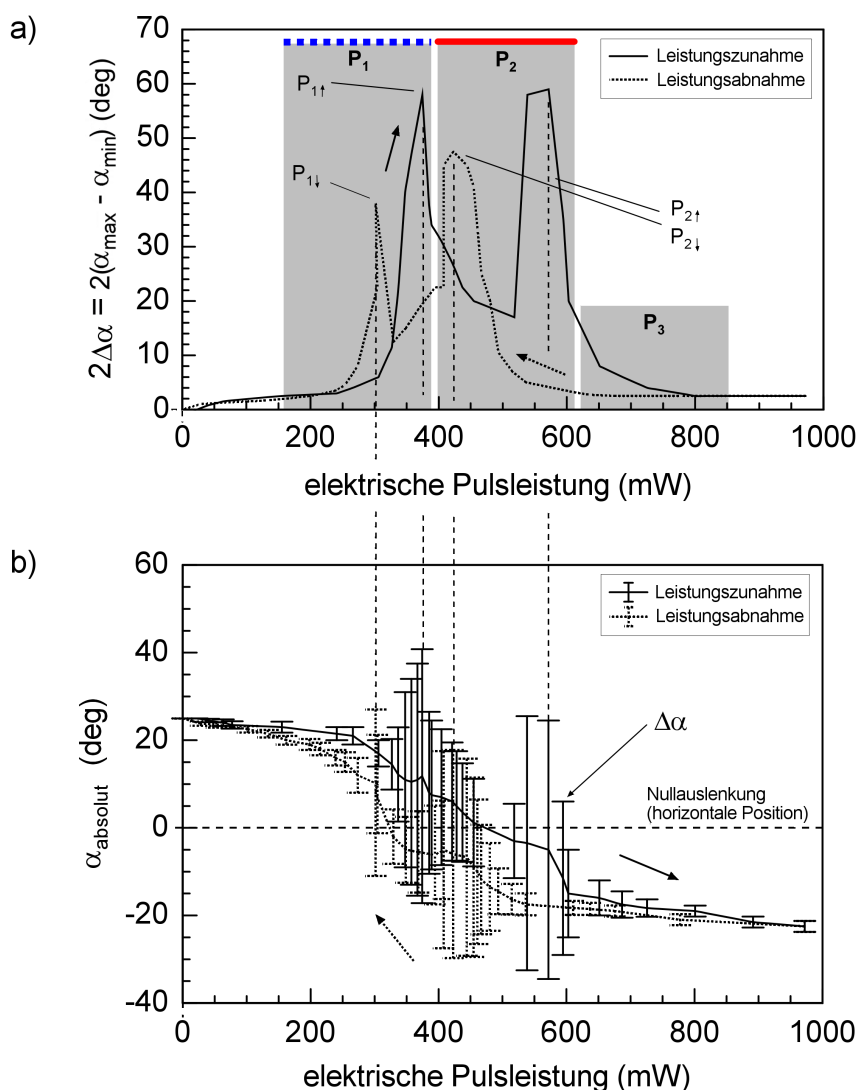


Abbildung 5.18: Scanwinkel–Leistungs–Kennlinie und absoluter Winkel α_{absolut} für eine Pulsfrequenz von 167.2 Hz.

gedämpften Systems lässt sich der Gütefaktor (Q -Faktor) mit $Q = 1/\tau_Q$ berechnen. τ_Q ist dabei die Zeit, in der die Amplitude der angeregten Schwingung auf $1/e$ abgefallen ist. Mit einem abgelesenen τ_Q von 134 ms errechnet sich Q zu 7.463.

Bei Anregung mit einer größeren Frequenz, zeigt sich zunächst eine starke Änderung der Eigenfrequenz. In Abbildung 5.20 a) beträgt f_{eigen} nur noch 129 Hz. Bei einem Vergleich mit Abbildung 5.19 fällt jedoch die geringere Pulsleistung auf. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Pulsleistung zu betrachten. Die Abhängigkeit der Eigenfrequenz in Abbildung 5.21 zeigt daher die zeitlich gemittelte Leistung \bar{P} .

Die Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der eingepprägten Leistung ist dabei sehr deutlich zu erkennen. Dieses Verhalten steht jedoch im Widerspruch zum typischen Verhalten eines Feder–Masse–Systems. Eine Erklärung ist in den Verläufen der magnetischen Kraft F_{mag} und des FGE

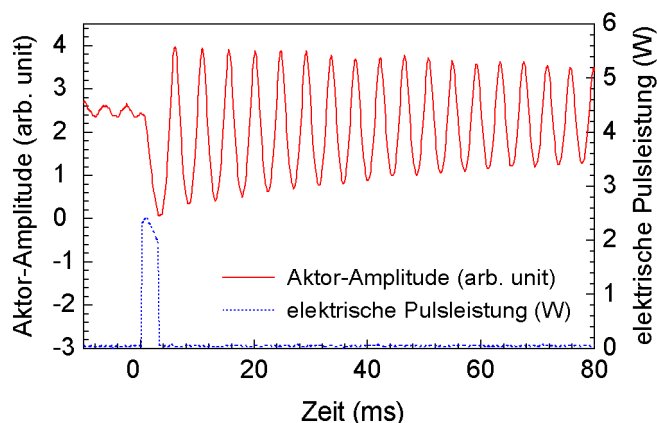


Abbildung 5.19: Antwortverhalten und Eigenfrequenz F_{eigen} auf einen Leistungspuls mit einer Pulsdauer t_p von 3.0 ms und einer Abkühlzeit t_d von 1000 ms.

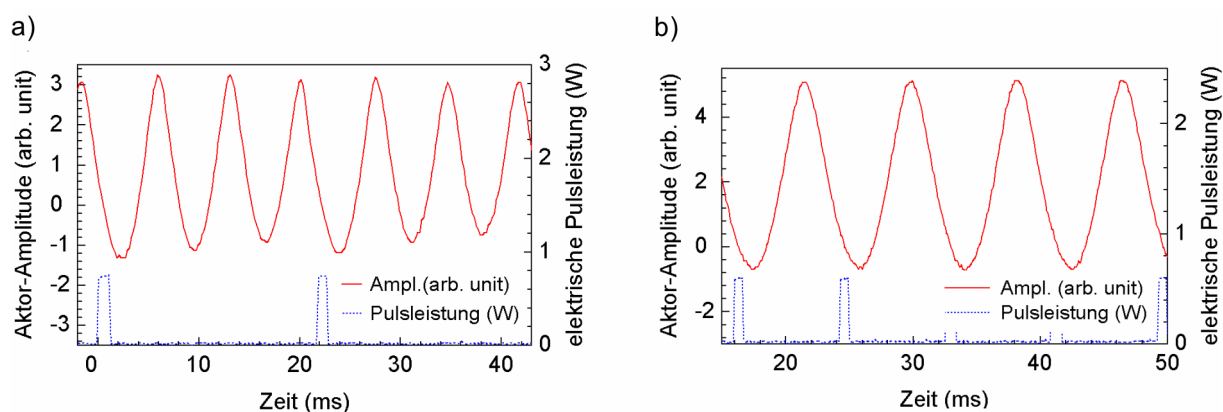


Abbildung 5.20: Antwortverhalten und Eigenfrequenz F_{eigen} auf einen Leistungspuls mit a) einer Frequenz von 46 Hz bei einer Pulsdauer t_p von 1.0 ms und b) einer Frequenz von 120 Hz bei einer Pulsdauer t_p von 0.7 ms.

zu suchen, die in Abhängigkeit der Aktorauslenkung d auf das System einwirken, wodurch sich sowohl das Dämpfungsverhalten ändert als auch eine starke Änderung der effektiven Federkonstante auftritt.

Bei einer Pulsfrequenz von 120 Hz folgt die Eigenfrequenz bereits der eingepprägten Pulsfrequenz, da für den verwendeten Spiegelaktor bereits bei 120 Hz der breite Bereich der Resonanzfrequenz erreicht ist, wie in Abbildung 5.20 a) und b) dargestellt. In diesem Frequenzbereich entspricht f_{eigen} der Resonanzfrequenz f_{res} . Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5.22 nochmals die vollständige Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie des Aktordesigns 2 dargestellt.

Eine weitere Untersuchung befasst sich mit dem Einfluss der Stromrichtung auf das Aktorverhalten. Da der Doppelbiegebalken elektrisch gesehen die Form einer Leiterschleife im Magnetfeld hat, durch die ein Strom fließt, wird aufgrund der Lorentz–Kraft ein zusätzliches magnetisches Moment $\vec{p}_{Lorentz}$ hervorgerufen. Dieses berechnet sich im homogenen Magnetfeld \vec{B} anhand fol-

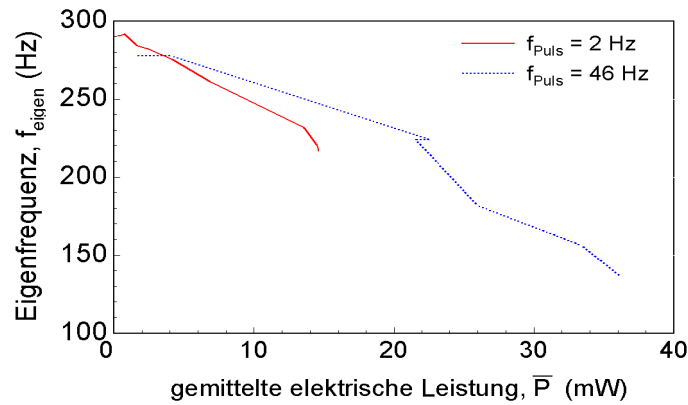


Abbildung 5.21: Berechnete Eigenfrequenz f_{eigen} für eine Anregung von 2 Hz und 46 Hz für unterschiedliche Pulsleistungen. In der Kennlinie dargestellt ist die gemittelte Leistung \bar{P} .

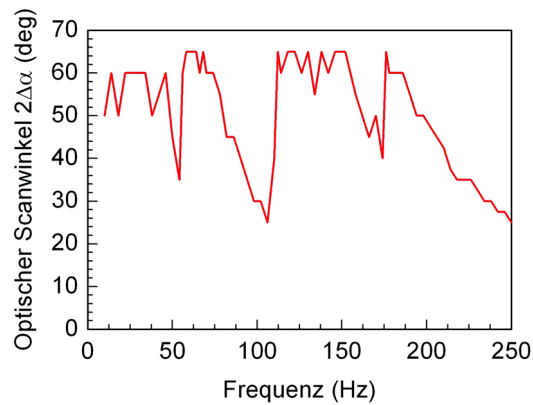


Abbildung 5.22: Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie für einen Ni_2MnGa -Aktor mit Design 2.

gender Formel

$$\vec{p}_{Lorentz} = I\vec{A} \tag{5.3}$$

Dabei ist \vec{A} der Vektor, der senkrecht auf der Fläche steht, in der der stromdurchflossene Leiter liegt. I bezeichnet den elektrischen Strom. Aufgrund von $\vec{p}_{Lorentz}$ bildet sich ein zusätzliches Drehmoment

$$\vec{T}_{Lorentz} = I\vec{A} \times \vec{B} \tag{5.4}$$

aus. Wenn $\vec{T}_{Lorentz}$ ausreichend groß wird, kann dies den Bewegungsprozess des Spiegelaktors positiv oder negativ beeinflussen. Da der Beitrag von $T_{Lorentz}$ zum Drehmoment nur während eines Stromflusses wirkt, kann das zusätzliche Drehmoment das durch F_{FGE} erzeugte Drehmoment hin zur horizontalen Formgedächtnisgestalt entweder vergrößern oder bei entgegengesetzter Richtung verringern.

Vergleicht man das Antwortverhalten bei kleinen Frequenzen f_{res} und bei einem Leistungspuls von 2.0 W mit einer Länge von 3.0 ms in Abbildung 5.23 und 5.24, zeigt sich ein deutlicher Einfluss des durch die Lorentzkraft hervorgerufenen Drehmoments $T_{Lorentz}$ auf Richtung und Amplitude der durch den Leistungspuls hervorgerufenen Schwingung.

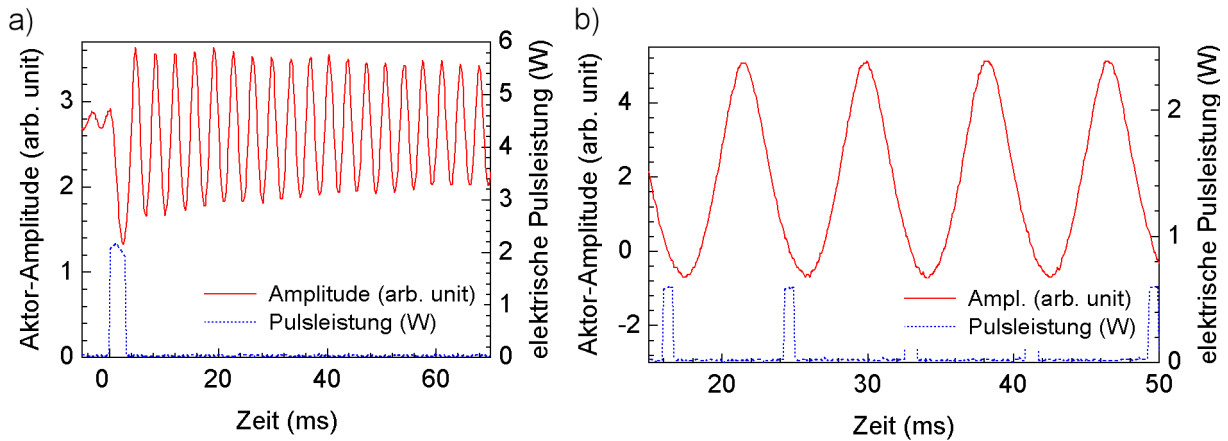


Abbildung 5.23: a) Antwort auf eine Pulsanregung von $t_p = 3.0$ ms mit langer Kühlzeit t_d und b) zeitliche Abhängigkeit der Aktorschwingung von der Pulsfrequenz.

Befindet sich der Aktor im Resonanzfrequenzbereich findet sich kein Einfluss von $T_{Lorentz}$ auf den Scanwinkel $2\Delta\alpha$. In Abbildung 5.23 b) und 5.24 b) wird lediglich die Richtung der durch den Puls hervorgerufenen Auslenkung umgekehrt.

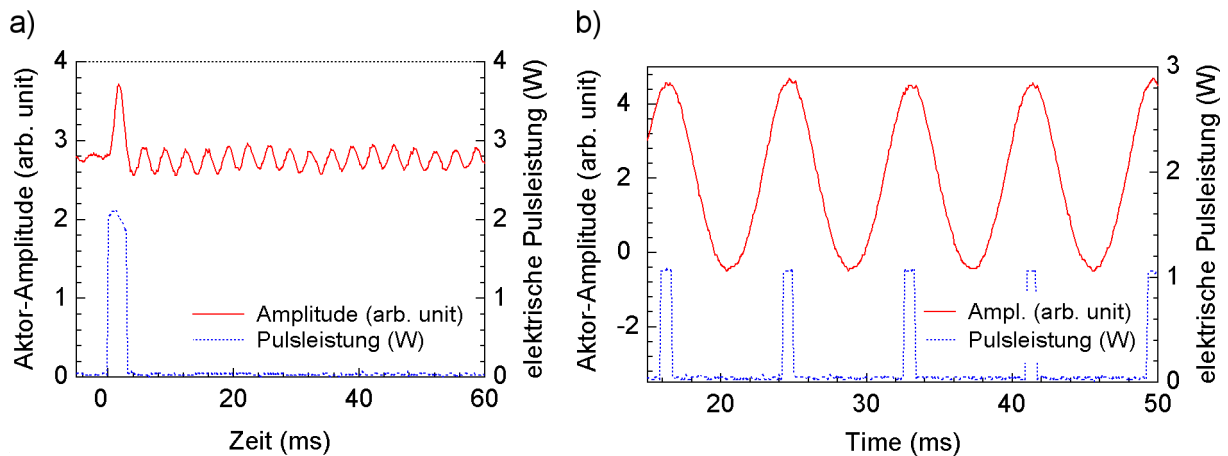


Abbildung 5.24: Vergleichsmessung zu Abbildung 5.23 mit umgekehrter Stromrichtung. Alle weiteren Parameter sind identisch.

5.1.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt werden auf einem neuartigen Wirkprinzip basierende Spiegelaktoren aus der ferromagnetischen FGL Ni_2MnGa zur Strahlableitung in einer Dimension vorgestellt. Das Aktorprinzip nutzt zwei in der ferromagnetischen Formgedächtnislegierung Ni_2MnGa vorhandene antagonistische Kräfte F_{mag} und F_{FGE} , die sich bei Temperaturen über $120^\circ C$ innerhalb eines sehr kleinen Temperaturbereichs umschalten lassen. Aufgrund der Abschaltung der jeweils nicht aktiven Kraft wirkt diese nur als geringe Rückstellkraft im System. Verglichen mit konventionellen

Aktorprinzipien, die meist eine passive, nicht veränderbare Rückstellkraft mittels eines Federelements erzeugen, ist bei dem hier beschriebenen Aktorprinzip die Erzeugung großer Scanwinkel in einem breiten Frequenzbereich bis 250 Hz möglich. Darauf aufbauende Spiegelaktoren werden mit unterschiedlichen Designs hergestellt und deren statisches und dynamisches Verhalten charakterisiert. Abhängig vom verwendeten Design mit 3 mm und 5 mm langen Doppelbiegebalken werden große optische Scanwinkel bis 110° bei maximal 60 Hz oder Scanwinkel bis 60° bei maximal 180 Hz erzeugt. Zum Betrieb der Aktoren ist lediglich ein Permanentmagnet nötig. Die Doppelbiegebalken–Struktur ist das einzige bewegte Bauteil im System, das sich in einem sehr einfachen und damit kostengünstigen Aufbau mit Abmessungen von $10 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ realisieren lässt. Der gezeigte 1D–Laserscanner–Demonstrator mit einer Kantenlänge von wenigen cm verfügt über eine geringe Leistungsaufnahme von unter 100 mW im dynamischen Betrieb und eine integrierte optischen Winkelmessung mit einer Auflösung von 0.5° . Damit eignet er sich hervorragend für den Einsatz in mobilen Laserscanner–Anwendungen. Speziell für Anwendungen im Automobilsektor mit hohen Anforderungen an den Arbeitstemperaturbereich sprechen die hohen Umwandlungstemperaturen und die Curie–Temperatur von über 120°C , die einen Betrieb des Systems bis zu 80°C sicherstellen.

5.2 Verbundschichtaktor

Dieser Abschnitt behandelt als Alternative zu dem in Abschnitt 5.1 vorgestellten Ni_2MnGa –Aktor einen Aktor auf Basis des reinen FGE in einer FGL–Verbundschicht. Dadurch entfällt der Einsatz eines Permanentmagneten, wodurch eine weitere Vereinfachung und eine verringerte Baugröße des Aktors erreichbar ist. Nach der Beschreibung des Aktormechanismus werden Aufbau und Herstellung von verschiedenen Spiegelaktordesigns sowie deren Charakterisierung behandelt.

5.2.1 Prinzip und Aufbau

Die eingesetzte ternäre Verbundschicht besteht aus drei Schichten, wie in Abbildung 5.25 skizziert. Die mittlere Schicht aus Molybdän (Mo) dient dabei als Substrat, auf dem die zwei äußeren Schichten durch Sputtern aufgebracht sind.

Das Aktorprinzip des FGL–Verbundschichtaktors basiert im Grunde auf dem Bimetall–Effekt, bei dem ein Verbundsystem aus zwei oder mehr Schichten unterschiedlicher Materialien durch innere Spannungen eine Verformung erfährt. Änderungen der inneren Spannungen werden beim Bimetall–Effekt durch unterschiedliche lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten α hervorgerufen, die sich mit der Temperatur ändern. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird die Größe der inneren Spannung durch die Tempertemperatur beim Konditionierungsprozess der Verbundschicht eingestellt. Wird das Material anschließend abgekühlt, stellt sich ab einer bestimmten Temperatur und einer inneren Spannung aufgrund der spannungsinduzierten Martensitumwandlung eine Relaxation der Spannung zwischen der NiTiCu –Schicht und dem Mo–Substrat ein. In diesem Fall

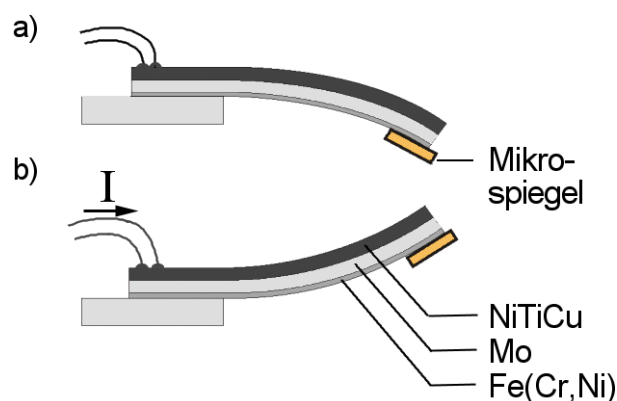


Abbildung 5.25: Wirkprinzip der dreilagigen FGL-Verbundschicht NiTiCu–Mo–Fe(Cr,Ni). a) Material bei Raumtemperatur (M-Phase), b) im aufgeheizten Zustand (M-Phase).

dominieren die inneren Spannungen zwischen der Mo- und der Fe(Cr,Ni)-Schicht, die durch eine negative Differenz der beiden Ausdehnungskoeffizienten α_{Mo} und $\alpha_{Fe(Cr,Ni)}$ eine kompressiv wirkt. Daher wird das Schichtsystem wie in Abbildung 5.25 a) gezeigt ausgelenkt. Wird die Verbundschicht durch elektrisches Beheizen in die austenitische Phase (A-Phase) umgewandelt, bauen sich die relaxierten Spannungen in der FGL-Verbundschicht wieder auf. Die positive Differenz von α_{NiTiCu} und α_{Mo} erzeugt Dehnungsspannungen, so dass die Verbundschicht wie in Abbildung 5.25 b) zu sehen, in die entgegengesetzte Richtung auslenkt. Dieses Verhalten ermöglicht die Erzeugung großer Auslenkungen innerhalb eines Temperaturbereichs von 30 K. Verglichen mit dem gewöhnlichen Bimetall-Effekt ist die erzeugbare Arbeit um einen Faktor 10 größer [24].

Der in Abbildung 5.26 schematisch dargestellte Aufbau von Spiegelaktoren aus der FGL-Verbundschicht entspricht dem Aufbau der Ni_2MnGa -Spiegelaktoren (vergleiche Abschnitt 5.1). Der ebenfalls aus einem strukturierten Doppelbiegebalken bestehende Aktor wird in einem mehrschichtigen Aufbau fixiert, elektrisch kontaktiert und mit einem Mikrospiegel am vorderen Ende des Doppelbiegebalkens versehen. Aufgrund des Wirkprinzips entfällt jedoch die Integration eines Permanentmagneten in System, was den Gesamtaufbau im Vergleich zu den Ni_2MnGa -Aktoren vereinfacht.

5.2.2 Design

Bei der Konzeption der Aktordesigns wird zunächst von der Überlegung ausgegangen, dass die durch den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α hervorgerufene Biegung in einem rechteckigen Film mit einer langen Seite a und der kurzen Seite b aus energetischen Gründen immer über b erfolgt, siehe Abbildung 5.27. Die ersten hergestellten Designs werden daher nach diesem Kriterium entworfen, was jedoch bei Vorgabe einer entsprechenden Aktorlänge l immer einer größeren Aktorbreite b bedarf. Abbildung 5.28 zeigt eine Übersicht der verwendeten Seitenverhältnisse. Die mit Design 1 hergestellten Aktoren benötigen einen elektrischen Strom von über 5

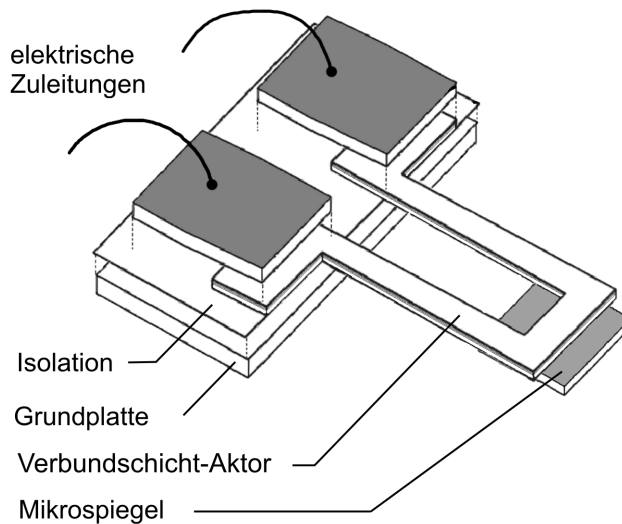


Abbildung 5.26: Schematischer Aufbau des Spiegelaktors aus der NiTiCu-Verbundschicht.

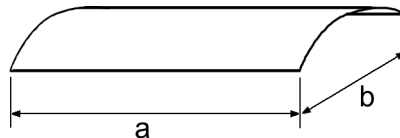


Abbildung 5.27: Wölbung einer Verbundschicht mit Bimetall-Effekt mit $a > b$.

A, um aufgrund des geringen Innenwiderstands die benötigte Wärmeenergie zu erzeugen. Daher werden schlanke Designs ($b < l$) entworfen um den Wölbungspunkt bei montierten Biegebalcken zu untersuchen. Dabei stellt sich heraus, dass die Annahme der Biegung über die kürzere Seite der Verbundschicht hier nicht zutreffend ist. Zur gerichteten Biegung tragen hauptsächlich folgende Gegebenheiten der montierten Aktoren bei:

- Eine einseitige Einspannung der Aktoren ermöglicht die Stabilisierung der Achse, über die keine Biegung erfolgen soll.
- Durch gerichtete intrinsische Spannungen in der NiTiCu-Schicht kann bei entsprechender Orientierung die Vorzugsrichtung der Biegung festgelegt werden.

Nach dem Tempervorgang weist die Verbundschicht eine Vorauslenkung auf, die bei dünnen, großflächigen Filmen zur Aufrollung mit einem Biegeradius unter 2 mm führt. Aktoren mit Design 2 und 3, die unter Berücksichtigung der beobachteten Biegung der Verbundschicht hergestellt werden, zeigen ausschließlich die gewünschte Biegung über die Länge l des Doppelbiegebalckens. In Tabelle 5.2 sind die wichtigsten Designparameter der Spiegelaktoren aufgeführt.

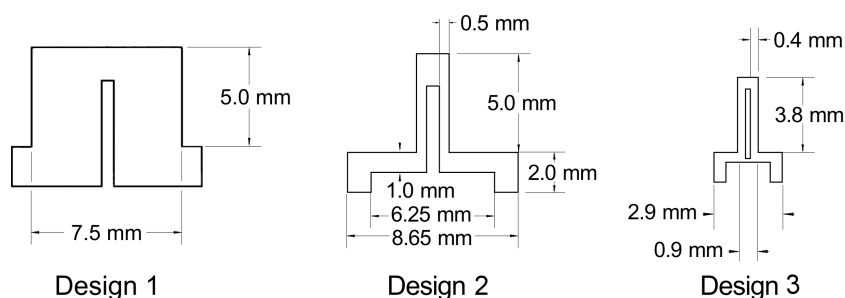


Abbildung 5.28: Designs der NiTiCu-Verbundschichtaktoren.

Tabelle 5.2: Designparameter der NiTiCu Verbundschichtaktoren und der zugehörigen Mikrospiegel.

Design	Bezeichnung	Gewicht (mg)	Abmessungen (mm)		
			Länge l	Breite b	Höhe h
Design 2	Doppelbiegebalken-Struktur	–	5.0	0.5	5.5
	Mikrospiegel 1	1.3	1.5	1.5	0.25
Design 3, Schicht a	thermisch optimierte Doppelbiegebalken-Struktur	–	3.8	0.4	5.5
	Mikrospiegel 2	0.57	0.8	0.8	0.38
Design 3, Schicht b	thermisch optimierte Doppelbiegebalken-Struktur	–	3.8	0.4	8.8
	Mikrospiegel 2	0.57	0.8	0.8	0.38

5.2.3 Thermische Designoptimierung

Bei den im Weiteren verwendeten Designs 2 und 3 wird eine Optimierung der Stegstruktur am eingespannten Ende durchgeführt. Da die gewünschte Biegung durch innere Spannungen hervorgerufen wird, sind die Beiträge zur Biegung des Aktors im Bereich der Einspannstelle am größten. An dieser Stelle wird jedoch ein Großteil der in den Aktorstegen erzeugten Wärme an die elektrischen Kontaktplättchen abgegeben. Zu einem geringen Teil erfolgt die Abgabe über die thermische Isolierschicht an die Grundplatte (siehe Abbildung 5.1, Seite 58, und vergleiche Abbildung 4.5 a) auf Seite 49). Durch ein Absinken der Temperatur in den Stegen zu der Einspannstelle hin, werden die erforderlichen Phasenumwandlungstemperaturen A_s und A_f nicht erreicht, wodurch sich an diesen Stellen keine oder nur teilweise eine Bimetall-Spannung aufbauen kann.

Um die Temperaturen im Steg in der Nähe der Einspannstelle zu erhöhen, wird der Steg über die Grundplatte verlängert. Das verlängerte Stück des Steges hat dabei die Stegbreite b und

verläuft auf der thermischen Isolationsschicht. Dadurch wird ein höheres Temperaturniveau im Bereich der Einspannstelle erreicht und zugleich die mechanische Fixierung erhalten. Bei Design 2 beträgt die verlängerte Strecke etwa 70% der Biegebalkenlänge l , bei Design 3 ungefähr 30%.

5.2.3.1 FEM–Simulation

Die Wirksamkeit der thermischen Designoptimierung wird mit Hilfe des in Abschnitt 3.3 beschriebenen gekoppelten FEM–Simulationsmodells überprüft. Dieses basiert auf einem Wärmeübergangsmodell. Ausgehend von der Verteilung der Stromdichte J wird die Temperaturverteilung in einem Steg der optimierten Doppelbiegebalkenstruktur simuliert. Dabei werden latente Wärmespeicherung der Verbundschicht, Wärmeleitung und konvektive Kühlung berücksichtigt.

Die grafische Ausgabe der Simulationsergebnisse ist für den statischen Fall bei einer konstanten Stromdichte J in Abbildung 5.29 zu sehen. Man erkennt, dass innerhalb des verlängerten Steges die Temperatur von 25°C in der Nähe des elektrischen Kontaktplättchens um mehr als 20 K bis zum Beginn des frei beweglichen Teil des Steges ansteigt. Mit 46°C befindet sich diese Stelle bereits in der Nähe der austenitischen Starttemperatur A_s . An der oberen Seite des Steges erkennt man den Mikrospiegel, der über eine Klebeschicht mit dem Steg verbunden ist. Die Wirkung des Spiegels als Wärmesenke ist hier teilweise erwünscht, da auf diese Weise die Klebeschicht nicht über ihre maximale Arbeitstemperatur von 200°C erwärmt wird. Der der Simulation zugrundegelegte Strom I müsste in diesem Fall noch vergrößert werden um mit einer Temperatursteigerung von etwa 10 K diese Stelle komplett über A_f zu erwärmen und damit das Material vollständig umzuwandeln. Im dynamischen Betrieb werden kurzzeitig hohe Leistungspulse angelegt, die zu wesentlich höheren Temperaturen führen, als die in der hier beschriebenen statischen Simulation berechneten.

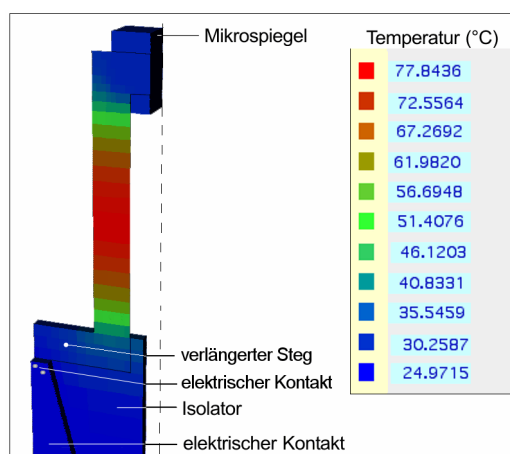


Abbildung 5.29: Simulierte Temperaturverteilung in einem Steg des NiTiCu Verbundschicht mit Design 3.

5.2.4 Herstellung

Bei der elektrischen Kontaktierung der NiTiCu-basierten Spiegelaktoren wird ebenfalls auf die Spaltschweißtechnik zurückgegriffen. Die Fixierung auf der thermischen Isolationsschicht und Befestigung auf der Grundplatte erfolgt in mehreren Klebeschritten, wie bei den Ni₂MnGa-basierten Spiegelaktoren. Abbildung 5.30 zeigt einen aufgebauten Spiegelaktor mit Design 2. Die entsprechende Schichtfolge ist in Tabelle 3.2 beschrieben.

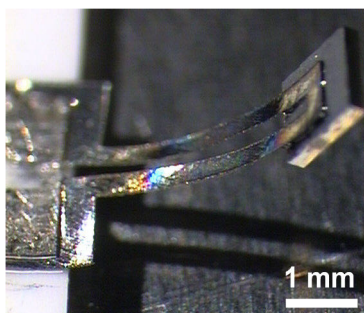


Abbildung 5.30: Prototyp eines Spiegelaktors bestehend aus einer NiTiCu-Verbundschicht mit Design 2 und Verbundschichtdicke a von 5.5 μm .

5.2.5 Charakterisierung

Die Charakterisierung der NiTiCu-Verbundschichtaktoren beschränkt sich zunächst auf das statische Verhalten. Nachfolgend wird der dynamische Scanbetrieb beschrieben.

5.2.5.1 Statisches Verhalten

Die Leistungsabhängigkeit der Auslenkung wird an zwei Aktoren mit Design 3 untersucht, die zwei verschiedene Verbundschichtdicken a und b besitzen. Abbildung 5.31 zeigt die Auslenkung-Leistung-Kennlinie für die Verbundschichtdicke a (Gesamtschichtdicke 5.5 μm) und b (Gesamtschichtdicke 8.8 μm). Bei Verbundschicht mit der Dicke b beträgt der maximale Winkel $\Delta\alpha$ 23° bei einer elektrischen Leistung von 200 mW. Die 37.5% dünnere Verbundschicht mit der Dicke a benötigt bei annähernd gleichem Winkel $\Delta\alpha$ eine 55% geringere Leistungsaufnahme. Dazu trägt vor allem die geringere thermische Masse der Schicht mit der Dicke a bei. Weiterhin spielt die Schichtdicke der dritten Schicht aus Fe(Cr,Ni) eine wichtige Rolle, die ebenfalls die elektrische Leistung bestimmt, die zur Erzeugung der Auslenkung nötig ist. Aufgrund der deutlich geringeren Leistungsaufnahme von Schichtdicke a bei gleich großen Auslenkungen wird diese als Ausgangsmaterial für die im Folgenden hergestellten und charakterisierten Spiegelaktoren gewählt.

Ein Vergleich von Design 2 und 3 bei identischen Schichten der Dicke a mit Hilfe der Auslenkung-Leistung-Kennlinien ist in Abbildung 5.32 a) und b) dargestellt. Sie zeigt die Abhängigkeit des

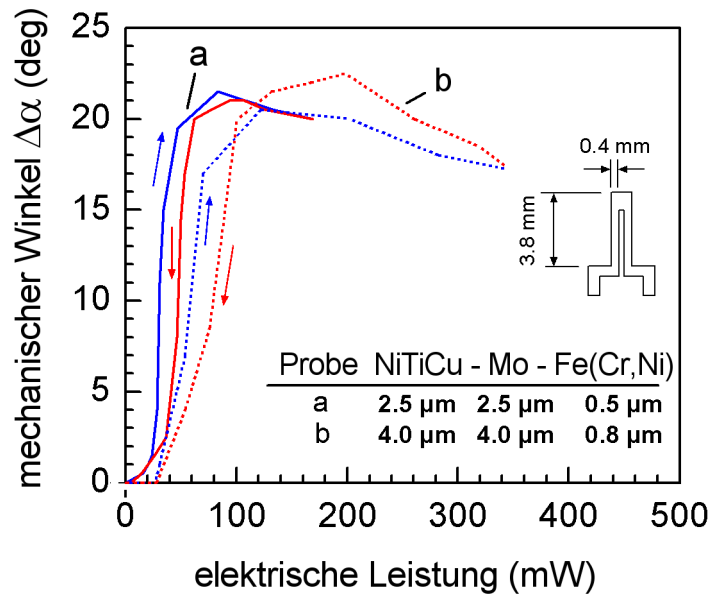


Abbildung 5.31: Auslenkung–Leistung–Kennlinie zweier Spiegelaktoren mit Design 3, die aus unterschiedlichen Dicken von aktiver und passiver Schicht bestehen.

mechanischen Winkels $\Delta\alpha$ von der Länge l der Doppelbiegebalkenstruktur. Es ergibt sich eine Zunahme des Winkels von 60%, dem eine Längendifferenz der Doppelbiegebalken von nur 34% gegenübersteht.

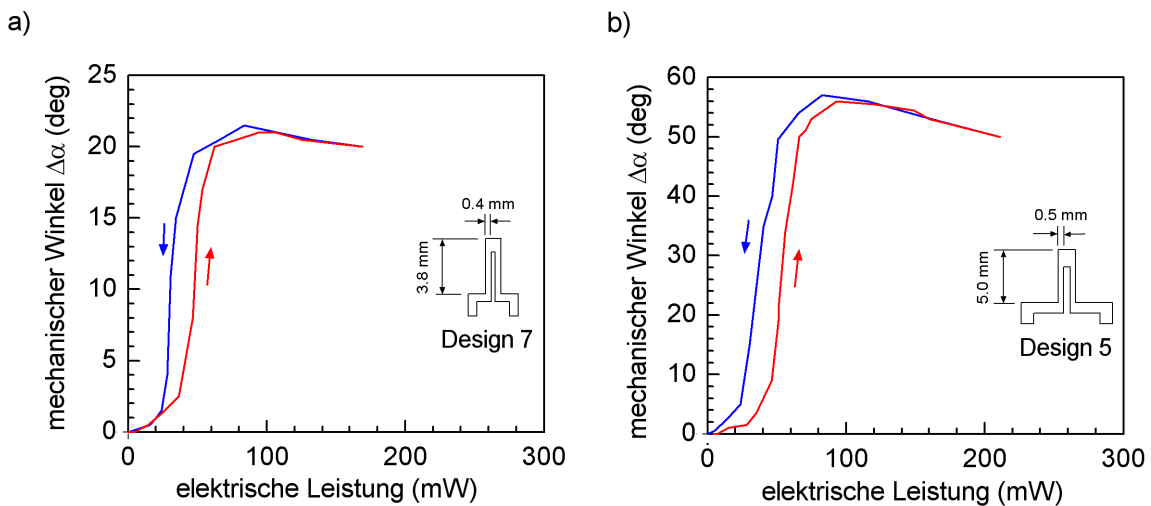


Abbildung 5.32: Auslenkung–Leistung–Kennlinie zweier Spiegelaktoren a) mit Design 3 und b) mit Design 2. Die Dicke der Verbundschicht ist in beiden Fällen gleich groß (5,5 μm).

5.2.5.2 Dynamisches Verhalten

Die Anregung periodischer Schwingungen des Aktors im dynamischen Betrieb erfolgt durch einprägen elektrischer Strompulse. Es wird ebenfalls eine rechteckige Pulsform verwendet, die auch bei den Spiegelaktoren aus Ni_2MnGa zum Einsatz kommt (siehe Abbildung 5.8). Es zeigt sich, dass ab einem Puls-zu-Pausen-Verhältnis $t_p:t_d$ kleiner 1:5 keine optimale elektrische Leistung mehr existiert, um entsprechend große Scanwinkel anzuregen. Dies liegt in der Kühlzeit nach einem Heizpuls begründet, in der die konvektive und konduktive Kühlung die Verbundschicht nicht mehr vollständig zurück in die Niedertemperaturphase (M-Phase) umzuwandeln vermag. Ein deutlicher Rückgang des Scanwinkels tritt bei Heizleistungen von über 1000 mW auf. Abbildung 5.33 zeigt die große Auslenkung eines aus der NiTiCu-Verbundschicht hergestellten Spiegelaktors mit Design 3. Durch die Kombination des Formgedächtnismaterials NiTiCu mit einem Bimetall-Verbund lassen sich in Verbindung mit der thermisch optimierten Doppelbiegebalkenstruktur große Scanwinkel erzielen, wie Abbildung 5.34 zeigt. Diese treten nach Überschreiten der Frequenz f_{crit} jedoch nur in Resonanzmoden auf. Der sich dabei einstellende mechanische Scanwinkel $\Delta\alpha$ ist mit 115° so groß, dass mit einem Laserstrahl nicht mehr beide Maximalpositionen des Mikrospiegels großflächig abgedeckt werden können. Die Reflexion eines Großteils des Strahlquerschnitts ist nur bis zu einem mechanischen Scanwinkel von 90° möglich. Aufgrund

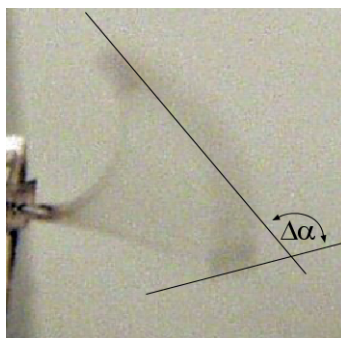


Abbildung 5.33: Einzelbild einer Videoaufnahme des schwingenden Spiegelaktors nach Design 7. Der gemessene mechanische Scanwinkel $2\Delta\alpha$ beträgt 115° bei einer Resonanzfrequenz von 83 Hz.

der insgesamt kleineren Umwandlungstemperaturen im Vergleich zur untersuchten Ni_2MnGa -Legierung tritt das bereits beobachtete Tiefpassverhalten in Abbildung 5.34 a) und b) bereits bei geringen Frequenzen f_{crit} von etwa 20 Hz auf.

Wird die Frequenzabhängigkeit des optischen Scanwinkels $2\Delta\alpha$ betrachtet, zeigen beide Designs ein sehr ähnliches Verhalten. Wie in Abbildung 5.34 zu erkennen, liegt f_{crit} unabhängig von der Länge der Aktoren bei 40 Hz. Die Resonanzfrequenzen von 83 Hz stimmen ebenfalls überein. Die Dicke der einzelnen Verbundschichtlagen spielt daher nicht nur bei der Erzeugung maximaler Scanwinkel eine Rolle, sie bestimmt zudem sehr stark die Lage der Resonanzfrequenz in der Scanwinkel-Frequenz-Kennlinie. Eine Untersuchung des Scanwinkels bei höheren Frequenzen bis 400 Hz zeigt keine weiteren Resonanzmoden.

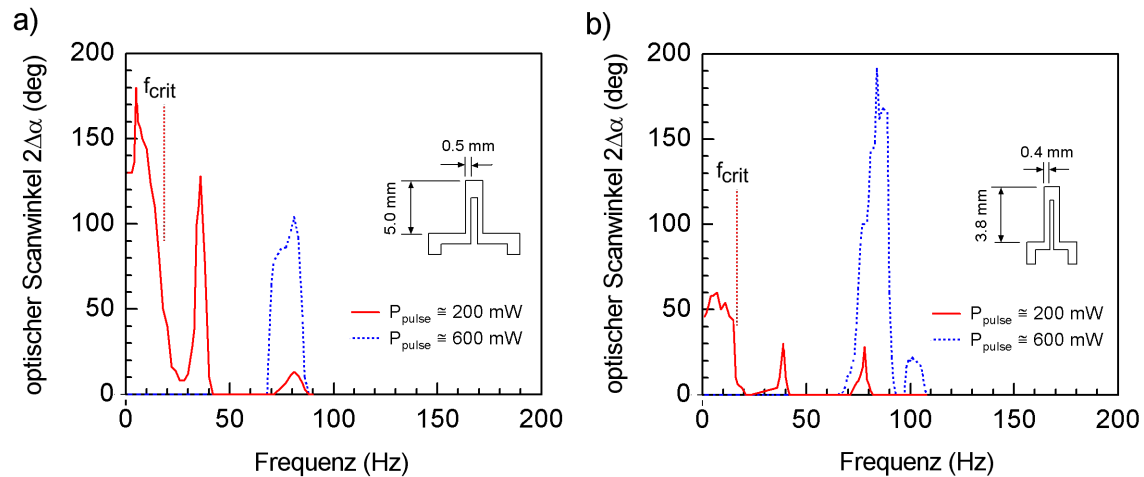


Abbildung 5.34: Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie für Spiegelaktoren a) nach Design 2 und b) nach Design 3. Die Dicke der Verbundschicht ist in beiden Fällen gleich groß (5.5 μm).

Weiterhin zeigt sich ein Hystereseverhalten bei der Einstellung der optimalen Pulsleistung für einen maximalen Scanwinkel, das dem der ferromagnetischen Ni_2MnGa -Spiegelaktoren sehr ähnlich ist. Wird der Aktor in Resonanz bei 83 Hz betrieben, lässt sich ein charakteristisches Verhalten des Scanwinkels in Abhängigkeit von zunehmender oder abnehmender Pulsleistung beobachten, wie in Abbildung 5.35 zu sehen. Dabei stellt sich der maximale optische Scanwinkel $2\Delta\alpha$ erst nach dem Durchlaufen der Hysterese bei einer sehr großen Leistung von 900 mW und anschließendem Verringern der Leistung auf etwa 600 mW ein. Ab einer Leistung von 1000 mW deutet die starke Abnahme des Scanwinkels auf Temperaturen im Material von deutlich über der austenitischen Endtemperatur A_f hin, die in der verfügbaren Kühlzeit t_d nicht mehr in den Bereich von A_s/A_f absinken können. Da somit keine Phasenumwandlung mehr erfolgen kann, wirkt nur noch die Bimetall-Spannung zwischen der Mo- und Fe(Cr,Ni)-Schicht. Dem gegenüber steht die FGL-Schicht mit dem großen E-Modul der A-Phase. Bei Frequenzen unter f_{crit} , wie zum Beispiel 5 Hz, wird dieses Verhalten nicht beobachtet. Hier stellen die langen Kühlzeiten eine ausreichend große Temperaturdifferenz zwischen Aufheizen und Abkühlen sicher, was in einem Verhalten ähnlich dem statischen Fall resultiert.

Durch zeitaufgelöste Erfassung des Scanwinkels mit einer PSD wird das Antwortverhalten auf einen Leistungspuls bei ausreichend langen Kühlzeiten t_d untersucht. Bei einer Dauer des Pulses t_p von 2 ms beträgt t_d mindestens 3 s, in dem der Spiegelaktor eine stark gedämpfte Schwingung vollführt. Um die Schwingung nicht zu beeinflussen wird berührungslos der abgelenkte Laserstrahl von einem Aktor mit Design 3 auf eine PSD gerichtet und das zum Scanwinkel proportionale Signal des Detektors mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. In dem in Abbildung 5.36 dargestellten zeitlichen Verhalten des Scanwinkels lassen sich zwei Bereiche unterschiedlicher Dämpfung beobachten. Aufgrund der sehr hohen Pulsleistung befindet sich kurz nach der Pulsdauer t_p ein Großteil der Aktorstege in der Austenitphase (Zeitintervall 1). Es lässt sich eine höhere Dämpfung beobachten als die nach einer gewissen Abkühlzeit in der gesamten Schicht erreichte Dämpfung der M-Phase (Zeitintervall 2). Im Bild zeigt sich die Änderung der Dämpfungskonstante ab etwa

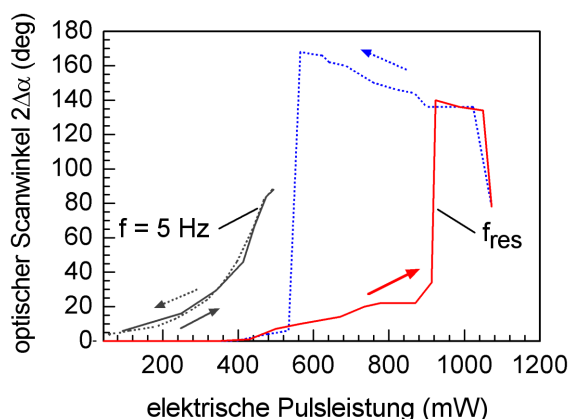


Abbildung 5.35: Scanwinkel–Pulsleistungs–Kennlinie für einen Aktoren nach Design 3 bei einer Pulsfrequenz von 5 Hz in Resonanz bei 83 Hz. Die Dicke der Verbundschicht beträgt 5.5 μm .

0.1 s. Der die Dämpfung beschreibende Q -Faktor beträgt 13.3 im Zeitintervall 1, im Zeitintervall 2 jedoch nur noch 1.9. Dies entspricht einer Änderung um den Faktor 7.

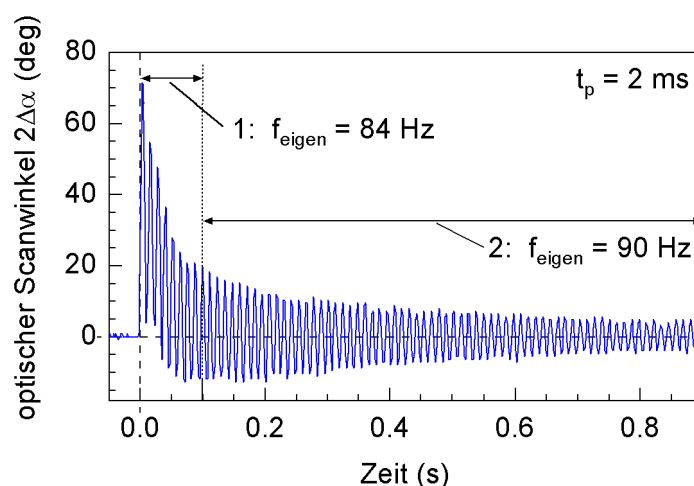


Abbildung 5.36: Antwortverhalten eines Spiegelaktors nach Design 7 für einen Leistungspuls mit einer Pulslänge t_p von 2.0 ms und einer Kühlzeit von 3000 ms.

Die dabei beobachtete Abnahme der Eigenfrequenz f_{eigen} von 90 Hz in der kälteren M-Phase auf 84 Hz in der Hochtemperaturphase (A-Phase), entspricht tendenziell dem Verhalten der Eigenfrequenz des ferromagnetischen NiMnGa-Aktors (siehe Abbildung 5.21). Da dieser Effekt auch bei Aktoren aus der NiTiCu-Verbundschicht auftritt, ist eine mögliche Erklärung eine Frequenzverschiebung aufgrund der starken Änderung der Dämpfungskonstante während der Rückumwandlung in die M-Phase. Weiterhin können gleichzeitig vorhandene, lokal unterschiedlich verteilte Phasenanteile der A-Phase und M-Phase während der Umwandlung im FGL-Material das Frequenzverhalten beeinflussen.

5.2.6 Zusammenfassung

Mit der Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von Spiegelaktoren, die auf einer NiTiCu-Verbundschicht basieren, wird deren Eignung für den Einsatz als Aktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung untersucht. Es wird gezeigt, dass große Auslenkungen erzeugt werden können, die mechanischen Winkeln von über 100° entsprechen. Dies liegt in der Kombination aus Verbundsystem und der FGL NiTiCu begründet, wodurch sich ein verstärkter, nichtlinearer Verlauf der Bimetall-Spannungen über der Temperatur erreichen lässt. Dieser Effekt tritt in Resonanz bei Frequenzen von 83 Hz auf. Die Resonanz wird maßgeblich von der Zusammensetzung der Verbundschicht bestimmt. Abhängigkeiten von der Länge des Aktors werden bei den entwickelten Designs mit einer Differenz der freien Länge des verbesserten Doppelbiegebalkens von 34% nicht beobachtet. Obwohl Pulsleistungen von 600 mW zum Betrieb des kleineren Designs 3 nötig sind, liegt die gemittelte Leistung mit 55 mW unter der mittleren Leistung von 100 mW der Ni₂MnGa-Spiegelaktoren. Da die NiTiCu-Spiegelaktoren auf dem FGE mit intrinsischer Rückstellfeder beruhen, wird kein magnetisches Feld zur Erzeugung einer Rückstellkraft im System benötigt. Die Gesamtabmessungen der Spiegelaktoren liegen ebenfalls im Bereich von $10 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ wodurch auch sie sich für den Einsatz im 1D-Laserscanner-Demonstrator eignen. Da sie deutlich geringere Umwandlungstemperaturen aufweisen, zeigt sich einerseits eine geringere Dynamik, was eine Beschränkung der Arbeitsfrequenzen im quasi-statischen Betrieb bis f_{crit} auf unter 40 Hz bedeutet. Andererseits zeigen die Untersuchungen zur konvektiven Kühlung, dass der Arbeitstemperaturbereich durch die martensitische Endtemperatur der Phasenumwandlung M_f bei 38°C auf den Bereich nahe Raumtemperatur beschränkt ist.

5.3 Magnetischer Verbundschichtaktor

Als weiterer alternativer Aktormechanismus wird eine Kombination des rein ferromagnetischen Effekts in Kombination mit einer elastischen Rückstellung vorgeschlagen. Prinzip und Aufbau, sowie die Herstellung erster Muster werden beschrieben und die Ergebnisse der Charakterisierung vorgestellt.

5.3.1 Prinzip und Aufbau

Bei dem Aktormechanismus erfolgt die Auslenkung des Aktors ebenfalls thermisch gesteuert, zum einen durch die Änderung der magnetischen Eigenschaften des Materials und zum anderen durch den Bimetall-Effekt. Mit der Erhöhung der Temperatur über die Curietemperatur T_C eines weichmagnetischen Materials findet ein Übergang von ferromagnetischem Verhalten im Feld eines Permanentmagneten hin zu paramagnetischem Verhalten. So lässt sich bei Raumtemperatur der Aktor mit Hilfe der magnetischer Kraft auslenken, die Rückstellung erfolgt mit dem Überschreiten der Curietemperatur, unterstützt durch den bei höheren Temperaturen auftretenden Bimetall-Effekt. Zur Realisierung wird daher eine Verbundschicht benötigt, die aus einem Material mit

entsprechenden magnetischen Eigenschaften besteht und zudem eine möglichst große Differenz des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α zum Material der zweiten Schicht aufweist.

Das Aktorprinzip und die im System vorhandenen Kräfte F_{mag} und $F_{bimetall}$ sind in Abbildung 5.37 dargestellt. Neben der linear von der Temperatur abhängigen Kraft $F_{bimetall}$ wirkt bei Raumtemperatur eine magnetische Kraft F_{mag} , wenn die ferromagnetische Schicht des Aktors im Magnetfeld eines Permanentmagneten magnetisiert wird. Oberhalb der Curietemperatur T_C geht F_{mag} auf annähernd Null zurück. Die Verbundschicht ist so aufgebaut, dass die Kraft $F_{bimetall}$ in entgegengesetzter Richtung zu F_{mag} wirkt.

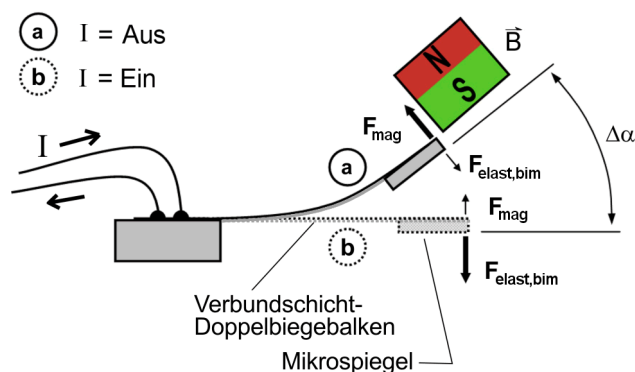


Abbildung 5.37: Funktionsprinzip des magnetischen Verbundschichtaktors aus FeCoBSi und Mo in der Seitenansicht. Legende: \vec{B} = Magnetfeld, I = elektrischer Strom, F_{mag} = magnetische Kraft, $F_{elast,bim}$ = Rückstellkraft mit elastischem Anteil und Bimetall-Effekt, $\Delta\alpha$ = mechanischer Ablenkwinkel.

Der Aufbau eines ersten Spiegelaktors erfolgt nach den gleichen Verfahren der ferromagnetischen FGL-Legierung und der FGL-Verbundschicht. Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels Spaltschweißen. Der Aktor ist über eine Isolationsschicht auf einer Grundplatte fixiert und an der Vorderseite des frei beweglichen Doppelbiegebalkens mit einem Mikrospiegel versehen, wie in Abbildung 5.38 gezeigt.

5.3.2 Technologische Umsetzung

Für das erste Muster des Spiegelaktors wird auf das bereits vorhandene verbesserte Doppelbiegebalken-Design 3 des NiTiCu-Verbundschichtaktors zurückgegriffen, vergleiche Abschnitt 5.2.2. Da hier ebenfalls der Bimetall-Effekt auftritt, kommt die thermisch optimierte Doppelbiegebalken-Struktur zum Einsatz.

Die Auswahl der Verbundschicht beschränkte sich auf am Institut für Materialforschung I des Forschungszentrum Karlsruhe bereits untersuchte weichmagnetische Materialien, da diese kurzfristig verfügbar sind. Verfügbar waren unter anderem Fe, Co, Ta und FeCoBSi. Das Hauptauswahlkriterium ist hier die Curietemperatur, die möglichst im Bereich zwischen 100°C und 200°C liegen soll. Weiterhin soll ein kleiner E-Modul eine möglichst geringe elastische Rückstellkraft erzeugen.

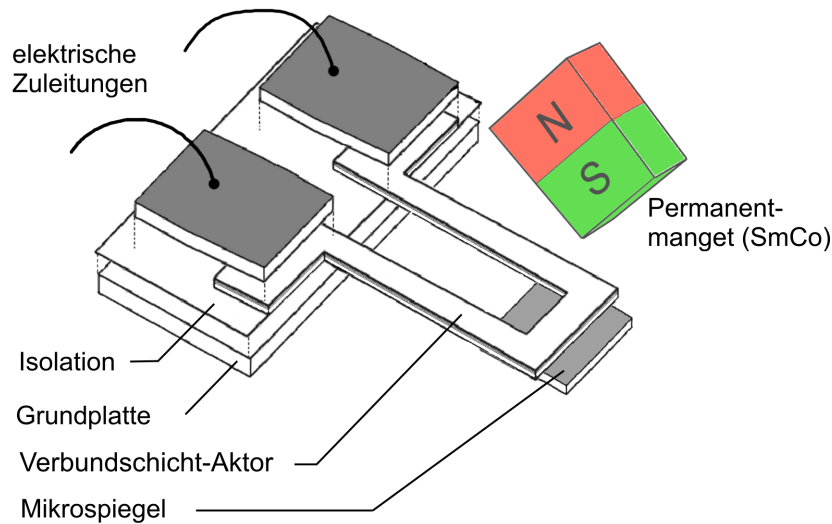


Abbildung 5.38: Schematischer Aufbau des Spiegelaktors basierend auf einer Verbundschicht mit weichmagnetischen Material.

Die Kriterien erfüllt FeCoBSi am besten, jedoch mit einer wesentlich größeren Curietemperatur von etwa 800°C bei einem E-Modul von etwa $150 \cdot 10^{-3} \text{N/mm}^2$. Als Material für die zweite Schicht wird das bereits bei der NiTiCu-Verbundschicht bewährte Substratmaterial Mo verwendet. Dies ergibt eine Differenz der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α von 11 zu 5.

Eine erste Verbundschicht wird an einer modifizierten RF-Sputteranlage vom Typ Leybold Z 550 hergestellt. Die Sputterleistung beträgt 250 W bei einem Ar-Gasdruck von 0.4 Pa. Die Zusammensetzung der Schicht ist in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3: Material-Kenndaten der FeCoBSi-Schicht.

Bezeichnung	Legierungselement 1 (at.%)	Legierungselement 2 (at.%)	Legierungselement 3 (at.%)	Legierungselement 4 (at.%)	Dicke (μm)
Target: FeCoBSi	Fe (66.0)	Co (17.0)	B (16.0)	Si (1.0)	
Lage 1: FeCoBSi	Fe (-)	Co (-)	B (-)	Si (-)	0.3
Lage 2: Mo	Mo (100.0)				2.5

Um einen Einfluss der nachfolgenden Mikrostrukturierung mittels Laserschneiden zu verhindern wird das Mo-Substrat bereits vor dem Sputterprozess auf einem Al_2O_3 -Träger fixiert und strukturiert. Als großer Nachteil stellt sich die recht hohe Curietemperatur von etwa 800°C heraus.

An einem aufgebauten Testaktor kann T_C durch elektrisches Heizen nicht ohne Zerstörung der Verbundschicht erreicht werden.

5.3.3 Zusammenfassung

Die Realisierung von Spiegelaktoren zur Strahlablenkung in einer Dimension wird anhand von drei unterschiedlichen Aktorprinzipien angestrebt. Erreicht wird dieses Ziel zum einen mit Spiegelaktoren basierend auf einem Aktormechanismus, der ferromagnetische Materialeigenschaften mit dem FGE-Effekt kombiniert, und zum anderen mit einer Verbundschicht, die den FGE mit einer elastischen Rückstellung kombiniert. Die Realisierung des Aktormechanismus mit den verfügbaren rein ferromagnetischen Materialien in Kombination mit elastischer Rückstellung war aufgrund der zu hohen elektrischen Ströme nicht praktikabel.

Kapitel 6

Aktoren zur zweidimensionalen Strahlablenkung

Der zweite Teil dieser Arbeit behandelt Design, Herstellung und Charakterisierung von Spiegelaktoren zur zweidimensionalen Strahlablenkung. Dabei wird von den Spiegelaktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung ausgegangen. Mit einer Gegenüberstellung der charakterisierten Leistungswerte erfolgt abschließend eine Bewertung der Designansätze.

6.1 Ferromagnetischer Formgedächtnisaktor

Der ferromagnetische 2D-Spiegelaktor nutzt den in Kapitel 2 beschriebenen, neuartigen Aktormechanismus basierend auf einer Ni_2MnGa Dünnschicht.

6.1.1 Design und Aufbau

Ausgehend von dem in Kapitel 5 beschriebenen Spiegelaktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung werden monolithische Designansätze verfolgt, mit folgenden Zielen:

- 2 Freiheitsgrade
- mechanisch, thermisch und magnetisch entkoppelt
- ein Mikrospiegel
- einfacher monolithischer Aufbau

Die Wahl eines monolithischen Designs wird durch die erprobte Herstellung großflächiger Strukturen in der Ebene unterstützt. Mit Hilfe des zuvor entwickelten photochemischen Nassätzprozesses

wurden bereits 1D-Aktoren und Aktoren für Mikroventile im μm -Bereich strukturiert [42].

Bei dem entwickelten Design wird die Biegeschwingung zweier Doppelbiegebalkenstrukturen ausgenutzt. Wie Abbildung 6.1 zeigt, sind diese an der Vorderseite der frei beweglichen Struktur durch zwei 200 μm breite Stege verbunden. Ein gegenphasiger Betrieb der getrennt ansteuerbaren Aktoren ermöglicht die Verkippung des Mikrospiegels über die Stegstruktur aufgrund der unterschiedlichen Auslenkungen d_1 und d_2 von Aktor 1 und Aktor 2. Bei der Wahl der Stegbreite muss einerseits die durch die Verkippung hervorgerufenen Dehnungen ε_M in den Stegen berücksichtigt werden, die aufgrund der Dehngrenze des sich in der M-Phase vorliegenden Materials einen Wert von 0.2% nicht überschreiten darf. Andererseits erschwert eine zu große Stegbreite ein Verkippen. Um Spannungsüberhöhungen an den Stegenden zu vermeiden, wird ein Radius an die entsprechenden Kanten gelegt um eine gleichmäßigere Kräfteinleitung sicherzustellen. Der Mikrospiegel wird auf einer Aufnahme, die zwischen den Verbindungsstegen liegt,

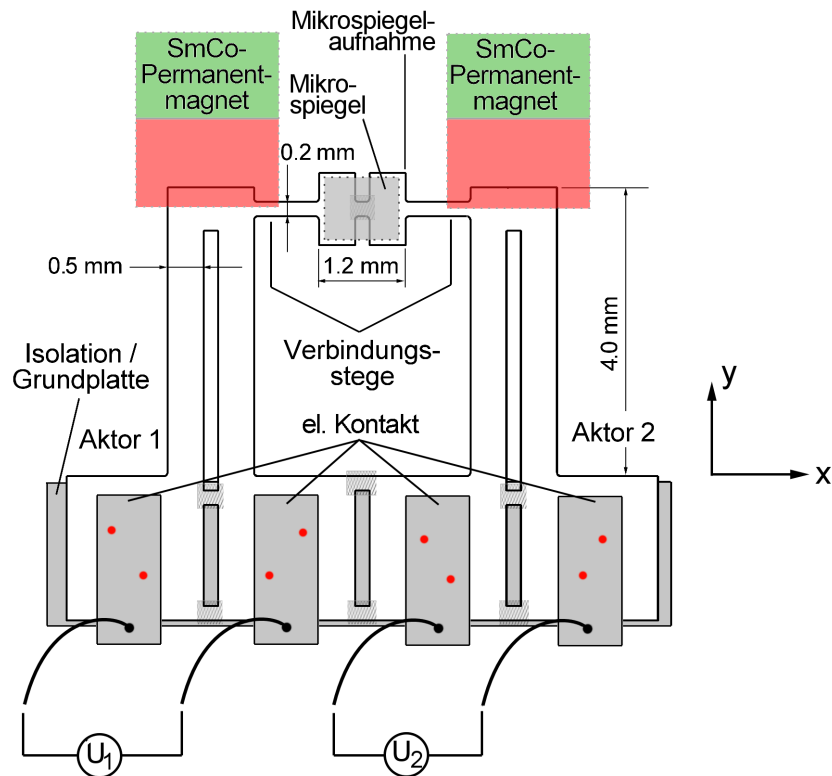


Abbildung 6.1: Schematisch dargestelltes Design des ferromagnetischen Ni_2MnGa -Spiegelaktors zur zweidimensionalen Strahlableitung in Draufsicht.

angebracht. Zur Berücksichtigung der Masse des Mikrospiegels, der sich bei Aktoren zur eindimensionalen Strahlableitung am frei beweglichen Ende der Doppelbiegebalkenstruktur befindet, sind entsprechende Gewichte an diesen Stellen vorgesehen.

6.1.1.1 FEM–Simulation

Die Bestimmung der Temperaturverteilung in den Stegen erfolgt in einem ersten Schritt durch elektrisch–thermisch gekoppelte FEM–Simulation. Es muss sichergestellt werden, dass die sich einstellenden Temperaturen in den Stegen nicht über den Phasenumwandelungstemperaturen liegen.

Abbildung 6.2 zeigt eine FEM–Simulation der Temperaturverteilung in Aktor 2. Im Bereich des Verbindungssteges ergeben sich Temperaturen oberhalb der Phasenumwandelungstemperatur A_f . Über die Länge des Steges stellt sich eine Temperaturdifferenz von 40 K ein, die Temperatur ändert sich von 206°C am Doppelbiegebalken bis auf 165°C an der Mikrospiegelaufnahme. Ein Vergleich mit Abbildung 5.29 zeigt jedoch, dass ein am vorderen Ende der Doppelbiegebalkenstruktur angebrachter Mikrospiegel die Temperatur bereits erheblich senkt, da sich in diesem Fall an jedem Ende der Aktorstegge eine Wärmesenke befindet. Neben der Funktion als Schwingungsmasse an den frei beweglichen Enden der beiden Doppelbiegebalken sind die vorgesehenen Massen daher aus thermischen Gesichtspunkten zwingend erforderlich. Wenn sich mit den genannten

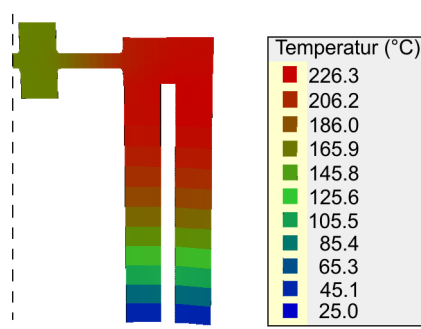


Abbildung 6.2: Berechnete Temperaturverteilung in Aktor 2 mittels elektrisch–thermisch gekoppelter FEM–Simulation. Betrachtet wird ein stationärer Zustand mit einer Heizleistung von 160 mW. Detaillierte Angaben finden sich im Anhang 8.

Maßnahmen das Material in den Verbindungsstegen bis in die M–Phase abkühlen lässt, bedeutet dies jedoch, dass das Material in diesem Bereich und im Bereich der Mikrospiegelaufnahme ferromagnetische Eigenschaften aufweisen, die eine unerwünschte auslenkungsabhängige Kraft erzeugen, die die Kopplung zwischen den Aktoruntereinheiten 1 und 2 verstärken. Daher sind im Design zwei Permanentmagnete so positioniert, dass der Luftspalt über den Verbindungsstegen das Magnetfeld an dieser Stelle reduziert.

6.1.2 Herstellung

Das monolithische Design des 2D–Spiegelaktors ermöglicht eine Vorgehensweise bei der Herstellung wie bei den 1D–Spiegelaktoren. Zur Verbesserung der Strukturtreue wird hier jedoch eine zweite Metallschutzschicht im Nassätzprozess eingeführt.

Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels Spaltschweißen, die Lage der Schweißpunkte ist in Abbildung 6.1 in roter Farbe dargestellt. Die mittels grau schraffierter Rechtecke markierten Hilfsstrukturen werden in einem abschließenden Schritt aufgetrennt um die beiden Aktoren gegeneinander elektrisch zu isolieren. Einen hergestellten Demonstrator des 2D–Spiegelaktors aus der Ni₂MnGa–Legierung zeigt Abbildung 6.3. Zu erkennen sind die positionierten Permanentmagnete aus SmCo und der Luftspalt. Der Mikrospiegel an der Unterseite der Mikrospiegelaufnahme wird im Bild 6.3 a) von einem roten Halbleiterlaser bestrahlt.

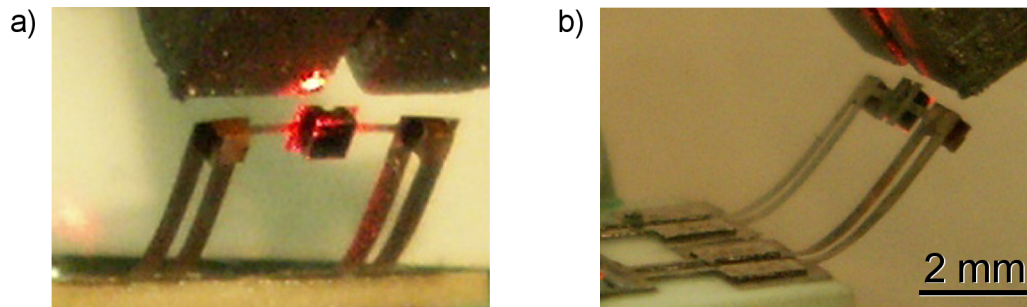


Abbildung 6.3: Hergestellter Demonstrator des ferromagnetischen 2D–Spiegelaktors mit zwei positionierten SmCo–Permanentmagneten.

6.1.3 Charakterisierung

Für den Betrieb mit zweidimensionaler Strahlableitung ist eine getrennte Ansteuerung der elektrisch voneinander isolierten Aktoren erforderlich. Die dazu verwendete Steuerelektronik zeigt der schematische Anschlussplan in Abbildung 6.4.

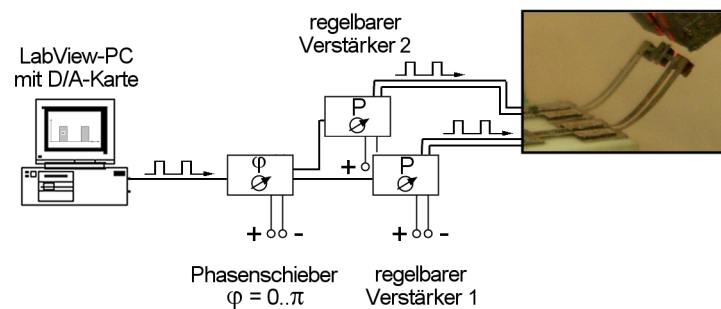


Abbildung 6.4: Schematischer Aufbau der Ansteuerung des magnetischen 2D–Spiegelaktors.

Die Heizleistung in den Dünnschichtaktoren erfolgt gleichermaßen wie bei den 1D–Spiegelaktoren durch rechteckförmige Strompulse. Aufgrund der getrennten Ansteuerung ergeben sich mehrere Möglichkeiten die elektrischen Leistungspulse einzuprägen:

Bei gleicher anregender Pulsfrequenz $f_{1A} = f_{2A}$

- phasengesteuert
- phasengesteuert, leistungsgeregt
- phasengleich, leistungsgeregt

sowie bei unterschiedlichen anregenden Pulsfrequenzen f_{1A} und f_{2A}

- phasengesteuert
- phasengesteuert, leistungsgeregt

Da das FG–Material und die elektrische Kontaktierung minimale Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in den Doppelbiegebalken hervorrufen, ist die rein phasengesteuerte Ansteuerung bei jeweils gleicher Pulsleistung für dieses Aktor–System nicht geeignet. Eine minimal geringere Auslenkung eines der Aktoren kann nicht kompensiert werden.

1D–Betrieb

Der 1D–Betrieb entspricht der phasengleichen leistungsgeregelten Ansteuerung, bei der jedoch beide Aktoren mit der gleichen Amplitude schwingen. In diesem Fall erfolgt näherungsweise keine Verkippung des Mikrospiegels. Er bewegt sich periodisch mit den Doppelbiegebalken, was dem Bewegungsmuster der 1D–Spiegelaktoren entspricht. Die im 1D–Betrieb aufgenommene

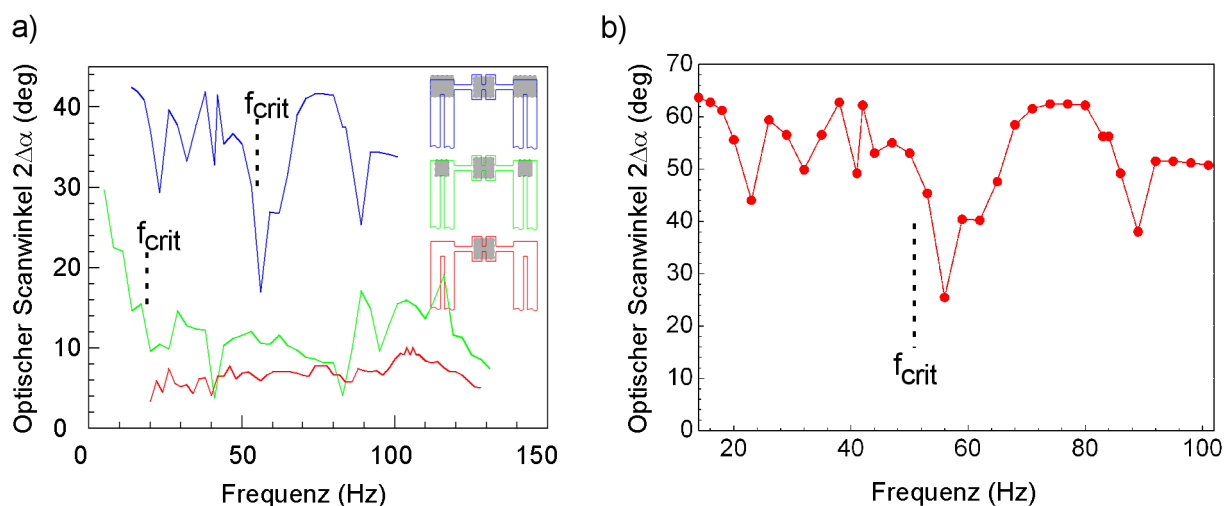


Abbildung 6.5: Scanwinkel–Frequenz–Kennlinien a) in Abhängigkeit unterschiedlicher Massen am vorderen Ende der frei beweglichen Doppelbiegebalken–Strukturen für jeweils optimierte Pulsleistungen. In b) sind die Massen der verwendeten Mikrospiegel an den Doppelbiegebalken durch in der Form angepasste Cu–Gewichte gleicher Masse ersetzt.

Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie in Abbildung 6.5 a) zeigt hierbei eine starke Abhängigkeit von

der Masse des Mikrospiegels. Ein maximaler Scanwinkel wird für zusätzlich angebrachte Massen an den Enden der Doppelbiegebalken beobachtet. Die jeweilige Konfiguration dieser Massen, für die die Mikrospiegel verwendet werden, ist in der Abbildung durch zwei unterschiedlich große, schraffierte Flächen gekennzeichnet. Dabei entspricht die größere Fläche dem in Tabelle 6.1 aufgeführten Mikrospiegel 1 und die kleinere dem Mikrospiegel 2. Die notwendige Anbringung des

Tabelle 6.1: Designparameter der verwendeten Mikrospiegel und –massen.

Bezeichnung	Abmessungen (mm)			Masse (mg)
	Länge l	Breite b	Höhe h	
Mikrospiegel 1 / (Gewicht 1)	1.50	1.50	0.25	1.30
Mikrospiegel 2 / (Gewicht 2)	0.80	0.80	0.38	0.57
Kupfergewicht 1	0.85	0.85	0.20	1.30

größeren Mikrospiegels 1 an den Enden der Doppelbiegebalken beeinflusste aufgrund der großen Fläche die freie Beweglichkeit der Stege durch Überlapp der Spiegelfläche. Das Gewicht „Mikrospiegel 1“ wurde daher durch „Kupfergewicht 1“ mit gleicher Masse jedoch mit wesentlich kleinerer Fläche ersetzt. Eine entsprechende Scanwinkel–Frequenz–Kennlinie für den 1D–Betrieb ist in Abbildung 6.5 b) dargestellt. Die beobachtete Frequenzcharakteristik mit einem Tiefpassverhalten bei der kritischen Frequenz f_{crit} und einem breiten Resonanzbereich gleicht dem der 1D–Spiegelaktoren.

2D–Betrieb

Im 2D–Betrieb erfolgt die Strahlableitung in eine orthogonale Richtung durch Verkippung der Stege um den Winkel $\Delta\beta$ und damit des Spiegels, in dem die beiden Aktoreinheiten unterschiedlich ausgelenkt werden.

Wie in Abbildung 6.6 gezeigt, resultiert der Winkel $\Delta\gamma$ zur Ablenkung in die erste Dimension aus der Mittenlage der beiden mechanischen Scanwinkel $\Delta\alpha_{1,2}$ der Aktoren 1 und 2 zu:

$$\Delta\gamma = \min(\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2) + \left(\frac{|\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2|}{2} \right) \quad (6.1)$$

Für die mechanischen Scanwinkel $\Delta\alpha_{1,2}$, die in erster Näherung sinusförmig angenommen werden, gilt

$$\Delta\alpha_{1,2} = \sin(\omega_{1,2} \cdot t), \quad \text{mit } \omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2} \quad (6.2)$$

mit der Pulsfrequenz $f_{1,2}$ für Aktoreinheit 1 und 2.

Der mechanische Verkippwinkel $\Delta\beta$ des Spiegels ergibt sich dann wie folgt:

$$\Delta\beta = \arcsin\left(\frac{|\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2|}{l_{VSteg}}\right) = \arcsin\left(\frac{|\sin(\omega_1 t) - \sin(\omega_2 t)|}{l_{VSteg}}\right) \quad (6.3)$$

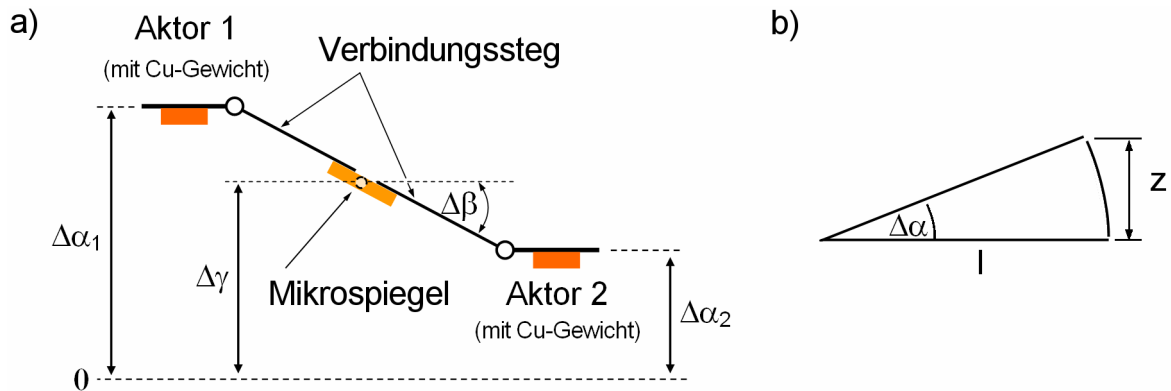


Abbildung 6.6: Mechanischer Scanwinkel $\Delta\gamma$ und mechanischer Kippwinkel $\Delta\beta$ des Mikrospiegels a) in Frontansicht auf das frei bewegliche Ende der Doppelbiegebalken und b) vereinfachte Seitenansicht auf einen Doppelbiegebalken.

mit der Länge des Verbindungsstegs l_{VSteg} zwischen den frei beweglichen Enden der Doppelbiegebalken. Damit zeigt $\Delta\beta$ eine komplexe Abhängigkeit der harmonischen Schwingungen der beiden Aktoreinheiten.

Eine Lichtprojektion an dem 2D–angeregten Spiegel weist ausgeprägte Scanmuster, sogenannte Lissajous–Figuren auf, wenn die Spiegelverkipfung um die x– und y–Achse bei unterschiedlichen Frequenzen jeweils mit Frequenzvielfachen angesteuert werden. Die Frequenzen reichen dabei bis zu 375 Hz, was genau der 5. Resonanzmode des in Abbildung 6.5 b) erkennbaren Bereichs der Resonanzfrequenz von 75 Hz entspricht.

Die beobachteten Lissajous–Figuren basieren auf der Überlagerung zweier unterschiedlicher Frequenzen f_1 und f_2 unter denen der Spiegel periodisch um die orthogonal zueinander stehenden Winkel $\Delta\gamma$ und $\Delta\beta$ verkippt wird. Die Frequenzen f_1 und f_2 müssen dabei von den anregenden Frequenzen f_{1A} und f_{2A} unterschieden werden, da sich zum Beispiel aus f_{1A} eine abweichende Frequenz f_1 der Verkippschwingung um den Winkel $\Delta\gamma$ ergeben kann. Für das Verhältnis $f_1 = 2 \cdot f_2$ ergibt die auf einen Schirm projizierte Trajektorie des abgelenkten Laserstrahls die Form einer Acht, wie in Abbildung 6.7 a) zu sehen. Weiterhin zeigt sich, dass die gekoppelten Aktoreinheiten nicht mehr dem Frequenzverhältnis von $f_{1A} = 3 \cdot f_{2A}$ der Anregung folgen. Das stattdessen sich einstellende komplex gekoppelte Verhalten von $\Delta\gamma$ und $\Delta\beta$ wurde anhand der Geometrie des Systems qualitativ in die zeitlichen Verläufe der Auslenkungen d_1 und d_2 der beiden Aktoreinheiten umgesetzt und ist in Abbildung 6.7 b) dargestellt. Es zeigt sich eine Abweichung von einer sinusförmigen Funktion hin zu einer hyperbolischen Sinusfunktion.

Durch die beschriebenen Abhängigkeiten von $\Delta\gamma$ und $\Delta\beta$ lassen sich weiterhin auch komplexere Lissajous–Figuren beobachten. Abbildung 6.8 a) zeigt eine Figur, sich aufgrund der in Abbildung 6.8 b) gezeigten Amplitudenmodulation bei gleicher Frequenz der Aktoreinheiten von $2\Delta\alpha_1$ und $2\Delta\alpha_2$ ergibt. Dabei wird das Muster zweimal in einer Schwingungsperiode der beiden Aktoren durchlaufen. Weiterhin ist ein fester Start– und Endpunkt zu erkennen, der auf die unterschiedlichen Amplituden von Aktor 1 und 2 zurückzuführen ist. Auch hier gilt, dass das Aktorsys-

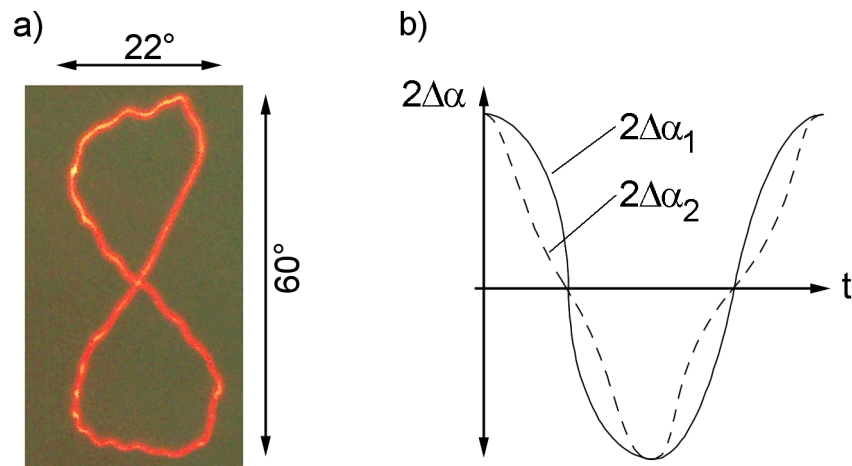


Abbildung 6.7: Lissajous-Figur im gleichphasig leistungsgeregelten Ansteuermodus bei den Frequenzen $f_{1A} = 25$ Hz und $f_{2A} = 75$ Hz.

tem mit dem Frequenzverhältnis $f_1 = f_2$ nicht den anregenden Frequenzen mit dem Verhältnis $f_{1A} = 2 \cdot f_{2A}$ folgt.

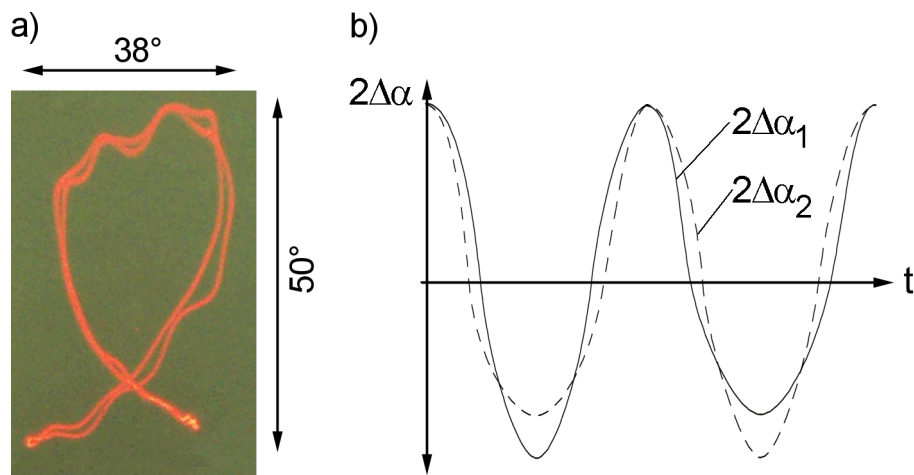


Abbildung 6.8: Lissajous-Figur im gleichphasig leistungsgeregelten Ansteuermodus bei den Frequenzen $f_{1A} = 37.5$ Hz und $f_{2A} = 75$ Hz.

6.2 Verbundschichtaktor

Im Vergleich zu der eher spröden Ni_2MnGa -Dünnschicht bietet die robustere FGL-Verbundschicht aus $\text{NiTiCu}/\text{Mo}/\text{Fe}(\text{Cr},\text{Ni})$ mehr Freiheiten im Design. Im folgenden Konzept wird ebenfalls ein Design mit nur einem Mikrospiegel zur Strahlableitung entwickelt. Da das Aktorprinzip ohne Permanentmagneten auskommt, ist grundsätzlich der Aufbau von Aktoren mit beliebigen Formen von Biegeschwingungen im dreidimensionalen Raum denkbar.

6.2.1 Design und Aufbau

Der hier gewählte Designansatz basiert auf dem seriell verschachtelten Aufbau zweier einzelner Verbundschichtaktoren. Dieser Ansatz wurde aufgrund folgender Überlegungen gewählt:

- Große Scanwinkel der hergestellten, korrespondierenden 1D–Spiegelaktoren mit relativ geringer Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Aktorlänge.
- Ein Aktor dient als Aufnahme für eine weitere Aktorstruktur.
- Geringe elektrische Leistungen aufgrund des Betriebs in Resonanz.
- Robustes Material, das freistehend und ohne Beeinträchtigung der Funktion mittels Spalt-schweißen zu mehreren Schichten aufgebaut werden kann.

Beim Aufbau des 2D–Aktors wird ein Verbundschichtaktor mit Design 4 eingesetzt, siehe Abbildung 6.9. Mit seiner etwas geringeren Größe als Design 3 werden etwas kleinere Scanwinkel erzeugt.

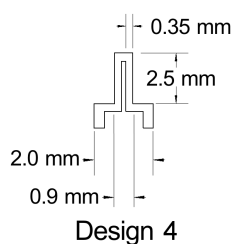


Abbildung 6.9: Design des kleinen, spiegeltragenden Aktors aus der NiTiCu–Verbundschicht für Ablenkeinheit 1.

Dieser Spiegelaktor agiert als Ablenkeinheit 1, die seriell mit einem etwas größeren Aktor 2 verbunden ist, sodass die erzeugten Scanwinkel $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$ orthogonal zueinander stehen. Das auf mehreren Schichten aufbauende 2D–Aktorsystem aus Aktor 1 und Aktor 2 sowie Grundplatte, Isolation und elektrischen Kontakten ist in Abbildung 6.10 schematisch dargestellt. Die grau schraffierten Bereiche dienen als Haltestrukturen, die nach dem Aufbau getrennt werden. Wie Schweißverbindungen sind als Punkte dargestellt.

Unter dem Befestigungspunkt von Aktor 1 wird eine stabilisierende Hilfsmasse angebracht, um eventuell auftretende Schwingungsmoden zwischen den Aktoren zu verhindern oder zumindest zu dämpfen. Da Aktor 1 nicht direkt an einen Stromkreis angeschlossen werden kann, dienen zwei zusätzliche Stege auf beiden Seiten von Aktor 2 als Stromzuführungen. Bei deren Dimensionierung wird berücksichtigt, dass bei Stromzufuhr nur eine selektive Erwärmung in Aktor 1 und nicht in den Stromzuführungen selbst erfolgt. Gleichzeitig behindern die Stromzuführungsstege die mechanische Entkopplung von Aktor 1 und 2.

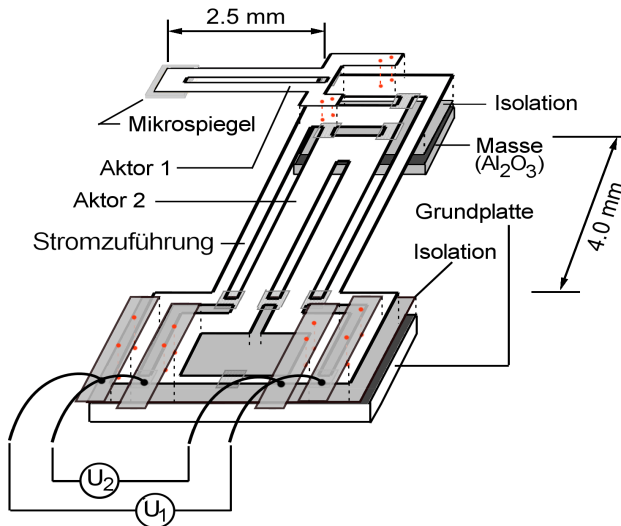


Abbildung 6.10: Design eines Spiegelaktors mit NiTiCu-Verbindschicht. Die Stegbreite beträgt 0.35 mm für Aktor 1, 0.50 mm für Aktor 2 und designabhängig 0.25 mm bis 0.50 mm für die neben Aktor 2 verlaufenden Stromzuführungen.

Im ersten Design liegt die Stegbreite der Stromzuführung im Bereich der Stegbreite von Aktor 2. Aufgrund der geringeren Stegbreite von Aktor 1 ist ein deutlich geringerer Pulsstrom zum Heizen von Aktor 1 nötig, wodurch die Erwärmung in den Stromzuführungen geringer ausfällt. Ein weiterer Ansatz stellt die selektive Beschichtung der Stromzuführungen mittels einer zusätzlichen metallischen Schicht dar, die eine hohe Leitfähigkeit besitzt. Wird die Stegbreite gleichzeitig reduziert und fällt die Schichtdicke im Vergleich zur Dicke der Stegbreite gering aus, kann die mechanische Kopplung zwischen Aktor 1 und 2 verringert werden.

Da der an Aktor 1 befestigte Mikrospiegel ausgeprägte Trajektorien im dreidimensionalen Raum aufweist, muss eine korrekte Beleuchtung des Spiegelements durch den Laserstrahl sichergestellt werden. Dabei ist vor allem ein entsprechendes Verhältnis von Stahldurchmesser und Abmessungen des Mikrospiegels wichtig, dessen Position in die Ebene des Strahlquerschnitts abgebildet eine laterale Verschiebung in zwei Dimensionen erfährt (Abbildung 6.11).

Wenn wie in Abbildung 6.11 a) die lateralen Verschiebungen weniger als 100% der Kantenlänge des Mikrospiegels betragen, kann durch exakte Fokussierung des Laserstrahls annähernd 100% des Lichts über den Spiegel reflektiert werden. Sind laterale Bewegungen größer als 100% der Kantenlänge unvermeidbar, kann eine gleichbleibende Intensität des zu reflektierenden Strahls nur durch dessen Aufweitung auf die Summe aus lateraler Verschiebung und Kantenlänge des Spiegels erreicht werden, wobei deutlich weniger als 100% Reflexion möglich ist, wie in Abbildung 6.11 b) schematisch dargestellt.

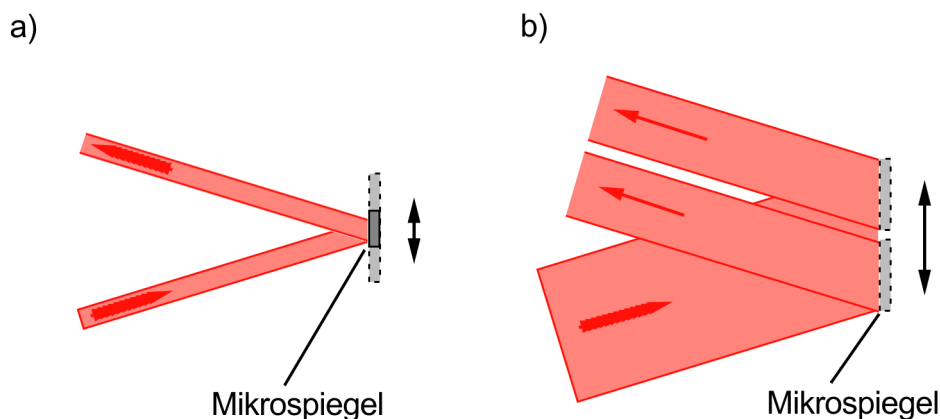


Abbildung 6.11: Fokussierung des Laserstrahls in Abhängigkeit von der lateralen Verschiebung des Mikrospiegels durch die Schwingbewegung des Aktors. In a) für Verschiebungen von weniger als 100% der Kantenlänge und in b) für mehr als 100% der Kantenlänge.

6.2.2 Herstellung

Die Herstellung des Verbundschichtaktors gliedert sich in zwei Teile. In einem ersten Schritt werden die freistehenden, lasergeschnittenen Aktoren 1 und 2 an den in Abbildung 6.10 rot gekennzeichneten Stellen mittels Spaltschweißen elektrisch verbunden. Es folgt das Durchtrennen der Hilfsstrukturen von Aktor 1 und der Stromzuführungen, die in Abbildung 6.10 durch grau schraffierte Rechtecke gekennzeichnet sind. Der weitere Herstellungsprozess erfolgt analog zum 1D-Verbundschichtaktor, wobei zuerst die vier Kontaktflächen durch Spaltschweißen elektrisch verbunden werden. Anschließend erfolgt der mechanische Aufbau durch Fixierung auf der Grundplatte und Anbringen der Hilfsmasse sowie des Mikrospiegels an Aktor 1 mittels Tropfenkleben.

Abbildung 6.12 zeigt eine Aufnahme des 2D-Spiegelaktors aus der NiTiCu-Verbundschicht. Deutlich zu erkennen ist die durch intrinsische Spannungen hervorgerufene Vorauslenkung des Aktorsystems. Diese macht eine präzise Justierung und Fokussierung des abzulenkenden Laserstrahls auf den Mikrospiegel nötig.

6.2.3 Charakterisierung

Arbeitet der kleinere Aktor 1 in Resonanz erfolgt bei ruhendem Aktor eine typische eindimensionale Strahlableitung. Das auf einen Schirm projizierte Scanmuster entspricht einer Geraden. Wird nun zusätzlich Aktor 2 in Schwingungen versetzt, erfährt der auf dem Schirm wandernde Laserstrahl eine Ablenkung in Form einer sinusähnlichen Welle, die bei einem konstanten Frequenzverhältnis $f_{1A} : f_{2A}$ der anregenden Frequenzen ein statisches Bild darstellt. Je größer das Frequenzverhältnis eingestellt wird, umso mehr schiebt sich der Wellenzug zu einem linienförmigen Rasterbild zusammen und überstreicht so innerhalb einer Periodendauer t einen Großteil der Fläche, die in zwei Dimensionen durch die maximalen optischen Scanwinkel $2\Delta\alpha$ und $2\Delta\beta$

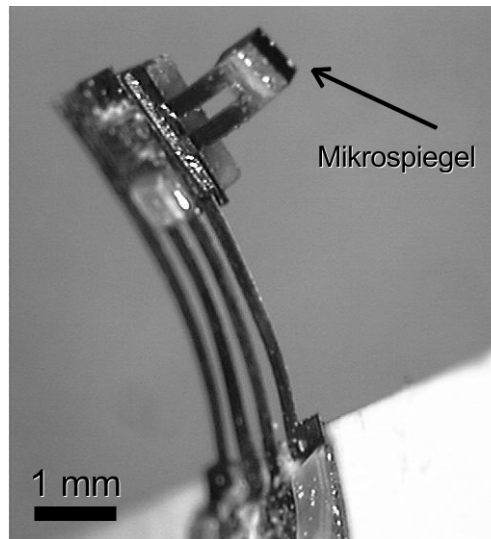


Abbildung 6.12: 2D-Spiegelaktor aus der NiTiCu FG-Verbundschicht.

auf einem Schirm aufgespannt wird. Die Rate oder auch Frequenz mit der ein Laserstrahl das zweidimensionale Scanmuster in einer Sekunde wiederholt überzeichnet, wird als Bildwiederhol-
frequenz bezeichnet und durch die kleinere der beiden Scanfrequenzen $f_{1,2}$ des Aktorsystems bestimmt.

Werden die Aktoren 1 und 2 mit den Frequenzen f_{1A} und f_{2A} angeregt, lassen sich flächige
Scanmuster erzeugen. Im Vergleich zum ferromagnetischen 2D-Spiegelaktor erfolgt die Verkip-
pung des Mikrospiegels direkt durch Aktor 1 und 2. Abbildung 6.13 zeigt ein entsprechendes
Scanmuster.

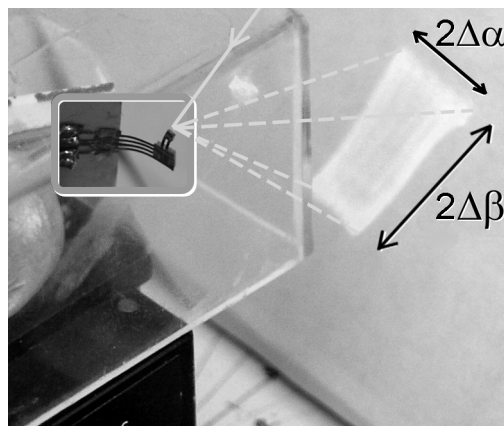


Abbildung 6.13: 2D-Scanmuster mittels Laserstrahl auf einen Schirm projiziert. Das Muster zeigt die Form typischer Rasterlinien.

Im dynamischen Betrieb zeigen die Aktoren jeweils die typischen Abhängigkeiten des Scanwin-
kels von der Frequenz. mit einem schmalen Resonanzfrequenzbereich bei 84 Hz bei Aktor 1 und
32 Hz bei Aktor 2. Bei der Charakterisierung des 2D-Aktorsystems konnten diverse Effekte, her-
vorgehoben durch die mechanische Kopplung der Aktoren, beobachtet werden. Ziel war es, ein

2D-Scanmuster durch Einstellung optimaler Pulsleistungen zu erreichen, das unter maximalen Scanwinkeln $2\Delta\alpha$ und $2\Delta\beta$ eine möglichst große Fläche auf einem Schirm überstreicht. Es wurde dabei auf die phasengleiche, leistungsgeregelte Ansteuerung mittels rechteckiger Leistungspulse zurückgegriffen, die bereits im vorhergehenden Abschnitt zum Einsatz kam.

Die Scanwinkel-Frequenz-Kennlinie im Bereich der Resonanzfrequenz um 90 Hz ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Sie zeigt den Verlauf des Scanwinkels von Aktor 1 über der anregenden Frequenz f_{1A} . Im Bereich von 90 Hz ist ein kombinierter Betrieb von Aktor 1 und 2 möglich, weshalb zusätzlich zwischen 76 Hz und 90 Hz die Frequenzabhängigkeit von Aktor 2 für verschiedene Frequenzen f_{2A} aufgetragen ist. Die Abhängigkeit des optischen Scanwinkels $2\Delta\beta$, der Aktor 1 zugeordnet wird, zeigt einen maximalen Scanwinkel von 25° ohne den Betrieb von Aktor 2. Verglichen mit dem Design des 1D-Spiegelaktors bedeutet dies eine Änderung des Scanwinkels von 170° auf 25° .

Eine Erzeugung von 2D-Scanmustern ist jedoch nur im Frequenzbereich der aufgetragenen Kurvenschar von 76 Hz bis 90 Hz möglich, wobei eine Verschiebung der Resonanzfrequenz um wenige Hz hin zu kleineren Frequenzen beobachtet wird. Gleichzeitig zeigt sich ein alternierendes Verhalten von $2\Delta\beta$ im Bereich von 20 Hz bis 65 Hz. Dies deutet auf einen Austausch mechanischer Schwingungsenergie zwischen den Aktoren hin, der über die Frequenz gesehen die abwechselnde Erzeugung großer oder sehr kleine Scanwinkel zulässt.

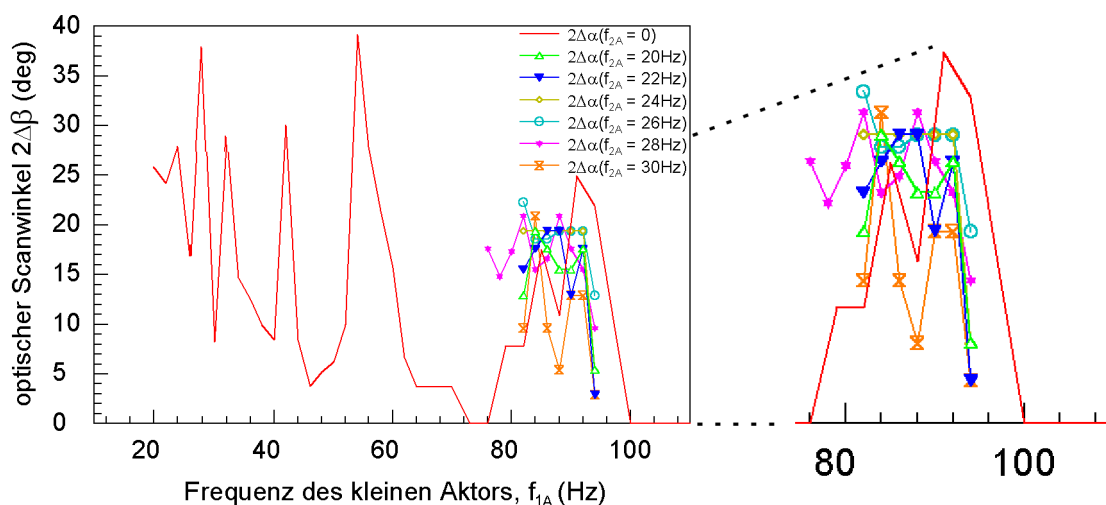


Abbildung 6.14: Scanwinkel-Frequenz-Kennlinienschar für Aktor 1 in Abhängigkeit der Frequenz von Aktor 2. Frequenzbereiche ohne zugehörige Kurvenschar erlaubten keinen kombinierten 2D-Betrieb der Aktoren 1 und 2.

In Abbildung 6.15 ist das Frequenzverhalten des optischen Scanwinkels $2\Delta\alpha$ von Aktor 2 dargestellt. Hier ergeben sich stärkere Abhängigkeiten von dem mit der Frequenz $f_{1A} = 85\text{ Hz}$ schwingenden Aktor 1. Dies ist hauptsächlich auf die Anbringung von Aktor 1 am frei beweglichen Ende von Aktor 2 zurückzuführen, die im 2D-Betrieb die periodische Schwingung von Aktor 2 stärker unterdrückt. Bei Aktor 2 verschiebt sich die Resonanzfrequenz von 32 Hz auf 22 Hz, was über 30% entspricht, siehe die eingezeichneten Markierungen in Abbildung 6.15.

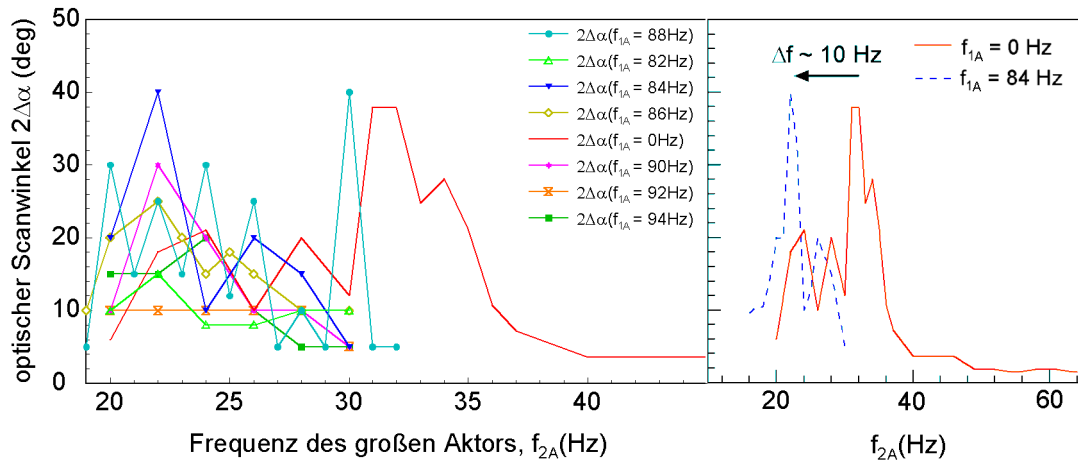


Abbildung 6.15: Scanwinkel–Frequenz–Kennlinienschar für Aktor 2 in Abhängigkeit der Frequenz von Aktor 1. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die Verschiebung der Resonanzfrequenz von Aktor 2 bei 1D– und 2D–Betrieb.

6.3 Zusammenfassung und Bewertung

Bei der Entwicklung von Spiegelaktoren zur zweidimensionalen Strahlableitung werden auf Basis der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen 1D–Spiegelaktoren aus der ferromagnetischen FGL–Legierung Ni_2MnGa und der FGL–Verbundschicht $\text{NiTiCu}/\text{Mo}/\text{Fe}(\text{Cr},\text{Ni})$ verschiedene Designansätze aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften und Wirkprinzipien gewählt. Beim ferromagnetischen 2D–Spiegelaktor ist dies ein monolithisches Design zweier Doppelbiegebalkenstrukturen, die am frei beweglichen Ende durch Verbindungsstege gekoppelt sind. Die NiTiCu –Verbundschicht basiert auf dem monolithischen Aufbau zweier seriell gekoppelter 1D–Aktoren mit Hilfe von Hybridintegration. Ziel dabei war ein 1–Spiegelbetrieb, der durch gleichzeitiges verkippen unter zwei orthogonal zueinander stehenden Winkeln einen Laserstrahl ablenkt und zweidimensionale Scanmuster erzeugt. Eine große Herausforderung stellt die thermische, mechanische und im Fall des ferromagnetischen Spiegelaktors, die magnetische Entkopplung der Aktoreinheiten untereinander dar.

Mit der Herstellung erster Demonstratoren und dem erfolgreichen 2D–Scanbetrieb konnte deren Funktionalität gezeigt werden. Aufbau und Herstellung basierten dabei auf den bereits eingesetzten Techniken und Prozessen bei den 1D–Spiegelaktoren.

Das 2D–Aktorsystem aus der ferromagnetischen Ni_2MnGa –Legierung nutzt die Scanbewegung zweier Doppelbiegebalken–Strukturen, die über einen Steg verbunden, der gleichzeitig ein Kippen des mittig auf dem Steg angebrachten Mikrospiegels erlaubt. Anhand dieses Prinzips können bei gleichphasiger, leistungsgeregelter Ansteuerung verschiedene Lissajous–Figuren erzeugt werden, die bei ganzzahligen Frequenzvielfachen, mit einer Grundfrequenz um den Resonanzfrequenzbereich bei 75 Hz auftreten. Weitere untersuchte anregende Frequenzen erstrecken sich von 18.75 Hz über 37.5 Hz bis zu 375 Hz. Die dabei maximal erzielten Scanwinkel $2\Delta\beta$ und $2\Delta\gamma$

betragen $50^\circ/38^\circ$ beziehungsweise $60^\circ/22^\circ$. Die Erzeugung flächenfüllender 2D–Scanmuster erscheint aufgrund der fehlenden Möglichkeit ausreichend große Frequenzverhältnisse größer 1:2 im Aktorsystem einzuprägen nur bedingt möglich. Grund dafür ist die mechanische Kopplung der Aktorbewegungen über die Verbindungsstege.

Ein aus zwei seriell mechanisch gekoppelten 1D–Verbundschichtaktoren der FG–Verbundschicht NiTiCu/Mo/Fe(Cr,Ni) entwickeltes Aktorsystem zeigte bei eingepprägten Frequenzvielfachen um 1:4 der ebenfalls gleichphasig, leistungsgeregelten Ansteuercharakteristik 2D–Scanmuster mit maximalen optischen Scanwinkeln von $\Delta\alpha = 20^\circ$ und $\Delta\beta = 40^\circ$. Aufgrund der mechanischen Kopplung ergeben sich Effekte, die eine Frequenzverschiebung hin zu geringeren Frequenzen zur Folge haben. Der für den 2D–Betriebe nutzbare Frequenzbereich des verwendeten Designs liegt bei $f_1 = 84$ Hz sowie $f_2 = 22$ Hz. Höhere Frequenzen sind jedoch durch entsprechende Anpassungen am Design, wie etwa kürzere Aktorlängen, möglich.

Anhand der Erkenntnisse über das mechanische, thermische und magnetische Verhalten sowie den charakterisierten Leistungswerten der 2D–Aktorsysteme lässt sich deren Eignung für das in Abschnitt 7 beschriebene 3D–Laserscanner–System feststellen. Die dazugehörige Spezifikation ist in Tabelle 7.1 aufgeführt.

- Die Anforderungen an den zweidimensionalen Scanbereich von $50^\circ \times 10^\circ$ lassen sich mit beiden 2D–Spiegelaktorsystemen erfüllen.
- Für die Erzeugung eines flächigen Scanmusters eignet sich das Aktorsystem aus der NiTiCu–Verbundschicht aufgrund des größeren Frequenzverhältnisses der beiden 1D–Aktoren besser.
- Die nötige Bildwiederholfrequenz von 10 Hz erbringen beide Systeme.
- Die für den mobilen Betrieb des Systems erforderliche Schockresistenz wird vom magnetischen Ni₂MnGa–Aktorsystem aufgrund der geringeren bewegten Massen besser erfüllt.
- Der größere Temperaturbereich der magnetischen Ni₂MnGa FG–Legierung (siehe Abschnitt 5.1.4) erfüllt zudem die Anforderungen für Anwendungen im Automobil besser.

Damit sind grundsätzlich beide entwickelten 2D–Aktorsysteme für das in dieser Arbeit angestrebte 3D–Laserscanner–System einsetzbar. Größte Einschränkung ist dabei die begrenzte Schockresistenz des Systems aus der NiTiCu–Verbundschicht. Die Eignung des Systems aus der magnetischen Ni₂MnGa FG–Legierung speziell für Anwendungen im Automobil hängt von den erzeugbaren Scanmustern ab.

Die Grenzen der vorgestellten 2D–Spiegelaktorsysteme bezüglich des Scanwinkels richten sich aufgrund der eingesetzten Doppelbiegebalkenstrukturen stark nach der Baugröße der Aktoreinheiten. Eine weitere Verkleinerung der Baugröße geht daher stets mit geringeren Scanwinkeln

einher, führt jedoch zu größeren Scanfrequenzen. Eine Verringerung der thermischen und mechanischen Kopplungen kann durch Optimierung der Aktorstrukturen erreicht werden. Dazu ist jedoch eine verstärkte Unterstützung durch gekoppelte FEM–Simulationen erforderlich.

Kapitel 7

Laserscanner–System

Der Aufbau eines miniaturisierten Laserscanner–Systems zur hochaufgelösten Umfelderkennung im zweidimensionalen Raum mittels horizontalem Winkel und Entfernung stellt den dritten Teil dieser Arbeit dar. Die Erweiterung der Erfassung im dreidimensionalen Raum durch den zusätzlichen vertikalen Winkel ist nur vorgesehen.

Das Laserscanner–System wird innerhalb einer Kooperation des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) mit dem Institut für Mess– und Regelungstechnik (MRT) spezifiziert und entwickelt. Das System baut auf dem in Kapitel 5.1.3.4 vorgestellten Laserscanner–Demonstrator mit integrierter Winkelmessung auf und nutzt die Scanmuster zur Abtastung des Raumbereichs. Eine flächige Ausleuchtung stellt sicher, dass kein Objekt kleiner als eine definierte Mindestgröße übersehen wird. Dazu ist zum einen die genaue Position des vom Spiegelaktor abgelenkten Laserstrahls zu erfassen und zum anderen eine ausreichend starke Beleuchtung des Raumes sicherzustellen, um eine ausreichende Intensität des von Objekten reflektierten Laserstrahls zu erhalten. Die Messbarkeit des reflektierten Lichts definiert somit die maximale Entfernung im Raum. Das Licht soll nicht sichtbar sein. Daher wird eine Hochleistungs–Halbleiter–Laserdioden mit einer Wellenlänge im nahen Infrarot (NIR) in das System integriert, die von einem Laser–Entfernungsmesssystem (LRF, *laser range finder*) gesteuert wird. Auf die mit dem Laserscanner–System erfassten Rohdaten sollen in Zukunft vom MRT entwickelte, echtzeitfähige Signalverarbeitungs–Algorithmen angewendet werden, die eine Erkennung von Objekten, deren Bewegung oder der Eigenbewegung des Systems erlauben.

In der Kooperation erbringt das IMT die Entwicklung der Spiegelaktoren zur eindimensionalen (1D) und zweidimensionalen (2D) Strahlableitung, die in einem ersten Demonstrator eines Laserscanners um die hochgenaue Winkelmessung ergänzt und charakterisiert werden. Das System zur Entfernungsmessung und die benötigte Soft– und Hardware für die Signalverarbeitung wird vom MRT entwickelt. Die einzeln vorgefertigten Module werden anschließend in einem Aufbau integriert. Die Charakterisierung des Gesamtsystems erfolgt gemeinschaftlich.

7.1 Spezifikation

Als Ausgangspunkt der Kooperation wird eine Spezifikation erstellt, die die wesentlichen Leistungsmerkmale des angestrebten Systems festschreibt. Deren Festlegung soll unter Berücksichtigung bereits am Markt befindlicher Laserscanner-Systeme erfolgen, die mit Abmessungen im Bereich von 15 cm bereits für mobile Anwendungen geeignet sind. Als Vergleich wird der in Abbildung 7.1 gezeigte Laserscanner Alasca® der IBEO AS GmbH herangezogen. Die Zusammenstellung aller Anforderungen sowie der jeweilige Vergleich zum Alasca® Laserscanner ist in Tabelle 7.1 aufgeführt. Erklärend dazu sind in Abbildung 7.2 der zu erfassende Raumbereich des 3D-Laserscanner-Systems sowie der vertikale Aufbau des Scafeldes skizziert.

Tabelle 7.1: Spezifikation des 3D-Laserscanner-Systems und Gegenüberstellung des Alasca®-Laserscanners [49].

Bezeichnung	IMT/MRT-Scanner-System	Alasca®-Scanner-System
Allgemein		
System-Komponenten	oszillierender Mikrospiegel, LRF	Rotierender Makrospiegel, LRF
Technische Daten		
Entfernungsmessung	Lichtlaufzeitmessung (<i>Time-of-Flight</i> , TOF)	Lichtlaufzeitmessung (TOF)
Scanfeld (Raumbereich)	50° horizontal, 10° vertikal	240° hor., 3.2° vert.
Auflösung (Winkel)	0.5° hor./2.5° vert.	0.25° hor./0.8° vert.
Reichweite	60 m bei 100%, 30 m bei 25% Reflexion	150 m (100% Reflexion)
Auflösung (Entfernung)	±2 cm	±1 cm
Messgenauigkeit	±5 cm	±5 cm
Strahldivergenz	5.0 mrad (= 0.286° oder 0.3 m in 60 m Entfernung)	
Strahldurchmesser	1.0 mm nach dem Mikroaktor	> 5 mm
Laserschutzklasse	1, augensicher [50]	1, augensicher [50]
Bildrate	10 Hz	10 Hz – 40 Hz
Pulsfrequenz Laser	5 kHz	
Abmessungen (L x B x H)	< 100 x 100 x 100 mm ³ , (ohne Elektronikintegration)	127 x 100 x 157 mm ³ , mit integrierter Elektronik
Signalverarbeitung		
Mehrzielfähigkeit	einzielfähig	mehrzielfähig (2 Ziele/Ebene)
Objekterkennung	bewegt und unbewegt	bewegt und unbewegt
	Position und Geschwindigkeit	Position und Geschwindigkeit
	Fahrbahn, Spur, Fußgänger	Fußgänger
Objektverfolgung	auch teilverdeckte Objekte	auch teilverdeckte Objekte

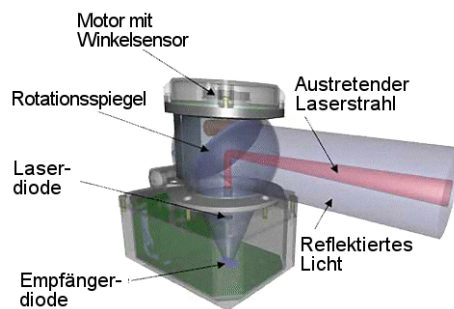


Abbildung 7.1: Funktionsprinzip des Alasca® Laserscanners der IBEO AS GmbH [51].

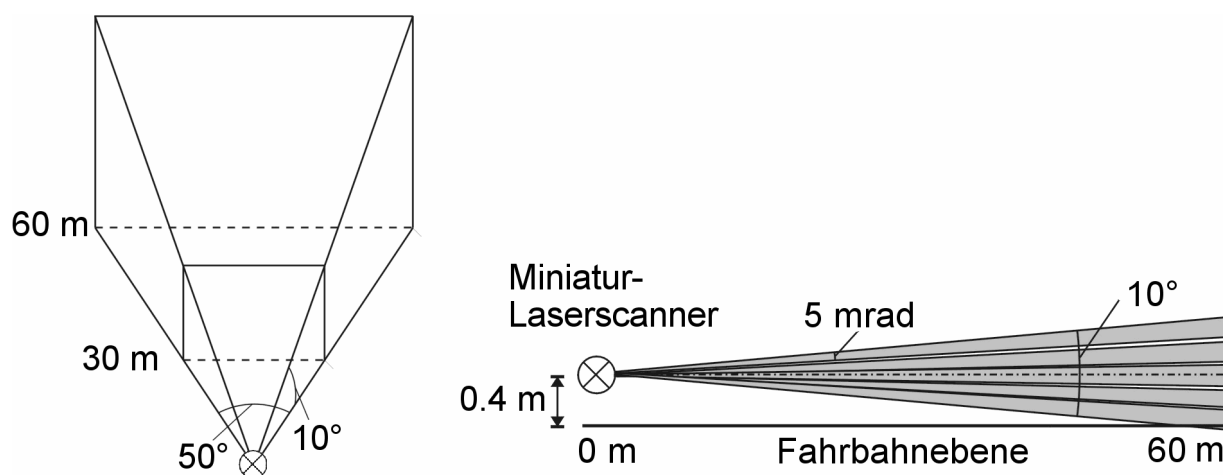


Abbildung 7.2: Erklärende Abbildung zur Spezifikation des Laserscanner–Systems.

7.2 Design

Ein schematische Zeichnung des Aufbaus ist in Abbildung 7.3 gezeigt. Das Design des Laserscanner–Systems basiert im Wesentlichen auf einem möglichst modular gehaltenen Aufbau. Es integriert die Laserscanner–Einheit, bestehend aus den 1D– und projiziert auch 2D–Spiegelaktoren mit integrierter Winkelmessung und der Laserentfernungsmessung. Zur Entfernungsmessung (LRF) werden die Hochleistungs–Halbleiter–Laserdiode und ein Empfänger mit Signalvorwertung benötigt. Ein integrierter Mikrocontroller steuert die Entfernungsmessung und verarbeitet die Daten der Entfernungsmessung und der Winkelmessung. Die so erstellten Datenpakete werden über einen bidirektionalen Datenbus an einen Computer übermittelt, der die Signalverarbeitung und Objekterkennung durchführt und die grafische Darstellung übernimmt. Die Datenpakete sind in ihrer Größe an den verwendeten Datenbus angepasst, wobei der Computer als Master die Datenpakete vom Mikrocontroller als Host anfordert. Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Punkte findet sich in den folgenden Abschnitten.

Die Schnittstellen und Richtung des Datenflusses sind mittels gerichteter Linien dargestellt. Da die Signale der Winkelmessung und der Empfangseinheit der Laserentfernungsmessung analog vorliegen, werden diese mittels Analog–Digital–Wandlern in zeit– und wertdiskrete Signale um-

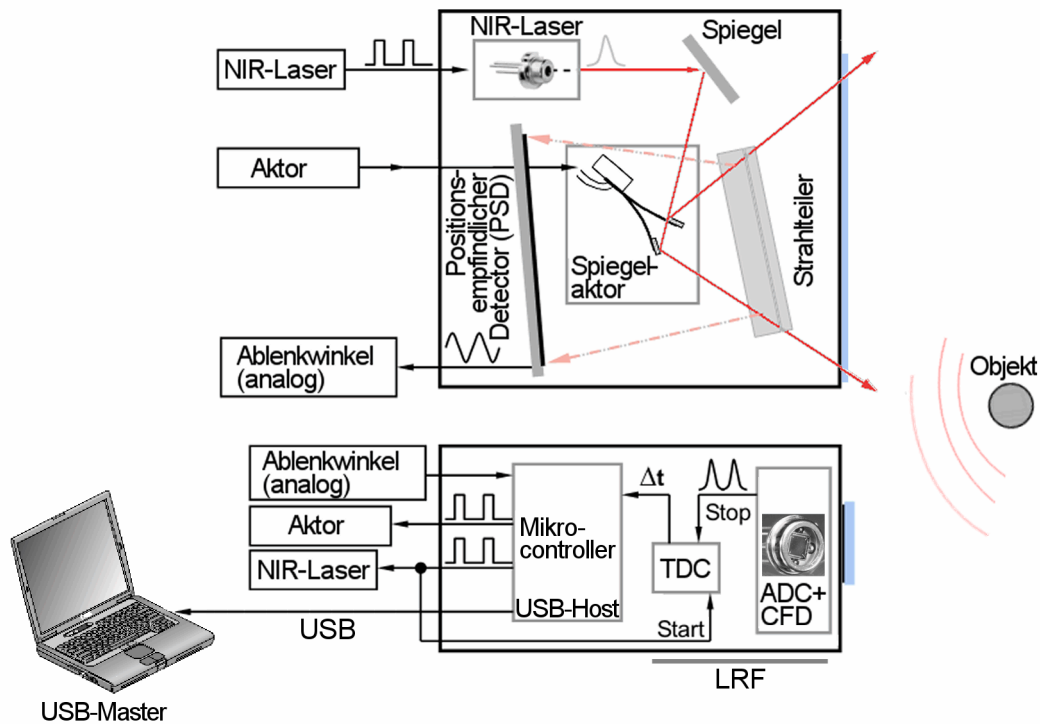


Abbildung 7.3: Funktionsprinzip des 2D-Laserscanner-Systems in schematischer Darstellung. Legende: APD = Avalanche Photodiode, CFD = *Constant Fraction Discriminator*, LRF = *Laser Range Finder*, TDC = *Time-to-Digital Converter*, USB = *Universal Serial Bus*.

gewandelt.

7.2.1 Entfernungsmessung

Die Entfernungsmessung durch einen Laserscanner erlaubt es explizit, ein räumlich aufgelöstes Tiefenbild zu erzeugen, wobei die Auflösung von der Entfernung abhängt. Im Gegensatz dazu sind aufgenommene Intensitätsbilder von Monokameras geeignet, um Formen und Strukturen zu erkennen, eine Tiefeninformation lässt sich nur indirekt bestimmen, etwa anhand von Bewegungen.

7.2.1.1 Konzepte

Das gewählte Prinzip zur Entfernungsmessung basiert auf dem Lichtlaufzeitverfahren. Verbreitet sind dabei folgende drei Verfahren

- **Phasemessverfahren:** Das Phasemessverfahren nutzt für die abgestrahlte Leistung ein sinusförmiges, amplitudenmoduliertes (AM) Signal. Anhand der Phasenverschiebung zwischen abgestrahltem Licht und empfangener Reflexion lässt sich die Entfernung bestimm-

men. Dies ist jedoch nur innerhalb eines sogenannten Eindeutigkeitsbereichs möglich, der durch die Periodendauer des Sinussignals bestimmt ist. Phasenverschiebungen, die größer als die Periodendauer sind, können nicht korrekt erfasst werden.

- **Frequenzmodulation:** Wird ein frequenzmoduliertes Signal (FM) eingesetzt, erlaubt die periodische Variation der Frequenz zusätzlich die Messung der Relativgeschwindigkeit von Objekten. Bei radarbasierten Systemen geschieht dies etwa in Form eines Sägezahns.
- **Pulslaufzeitverfahren:** Bei Verfahren der Pulslaufzeit wird direkt aus der Laufzeit eines wenige ns langen Laserpulses auf die Entfernung geschlossen.

Die Verfahren nach der AM– und FM–Methode liefern kontinuierliche Entfernungswerte, während das pulsbasierte Verfahren über diese nur nach dem Eintreffen eines reflektierten Laserpulses verfügt, was eine geringere Messrate bedeutet. Die einzelnen Laserpulse können dabei jedoch sehr hohe Leistungen aufweisen, um große Reichweiten zu erzielen. Eine Einhaltung von Laserschutzauflagen ist aufgrund der dort spezifizierten maximalen Lichtenergie trotzdem möglich, die durch das Produkt aus Pulsleistung und Pulslänge gegeben ist. Um die spezifizierte Reichweite des 3D–Laserscanner–Systems zu erreichen, insbesondere bei Zielen mit nur 25% Reflektivität, wird das Pulslaufzeitverfahren gewählt [52]. Dieses ist zudem robuster gegen Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel Partikel in der Luft. Da aus physikalischen Gründen die empfangene Lichtleistung stark mit der Entfernung des Objekts abnimmt, ergeben sich entsprechend hohe Anforderungen an die eingesetzte Laserdiode und den Empfänger.

7.2.1.2 Laserdiode

Um eine große maximale Messentfernung zu ermöglichen, muss die eingesetzte Laserdiode über eine möglichst hohe Pulsleistung verfügen. Ein Vergleich unterschiedlicher Laserquellen zeigt, dass neben Halbleiterlasern auch Festkörperlaser hohe Lichtausgangsleistungen erlauben. Jedoch verfügen momentan nur Halbleiterlaser ausreichend kleine Abmessungen für die Integration in das Laserscanner–System.

Anhand der Spezifikation lassen sich folgende Anforderungen an die Laserdiode identifizieren. Diese stellen zugleich die Herausforderungen an den Aufbau des Kollimatoroptik dar.

- Geringe Abmessungen im mm–Bereich.
- Gute Kollimation des Laserstrahls von 5 mrad oder 0.286° zum Erreichen der spezifizierten Ortsauflösung.
- Kleiner Strahlquerschnitt von 1 mm für vollständige Reflektion am Mikrospiegel.
- Hohe Pulsleistung von mindestens $50 W_{\text{peak}}$.
- Entsprechend kurze Pulsdauer unter 10 ns, zur Einhaltung der Laserschutzklasse 1.

Eine Einhaltung der spezifizierten Laserschutzklasse nach der Norm DIN/EN 60825-1 stellt sicher, dass die kurzzeitige Spitzenleistung, die gemittelte Leistung und die Energie, die in einem definierten Zeitraum in das Auge eines Betrachters trifft, einen kritischen Wert nicht übersteigt. Die Abschätzung der sich daraus ergebenden maximalen Laserleistung findet sich in Anhang A.

Bei der ausgewählten Laserdiode handelt es sich um das weit verbreitete Modell SPL PL90_3, eine „nanostack“-Laserdiode der OSRAM Opto GmbH. Sie kommt zum Beispiel in Laserpistolen zur Geschwindigkeitsmessung über mehrere hundert Meter zum Einsatz. Die Pulsleistung beträgt $75 W_{\text{peak}}$ bei einer Pulsdauer von 7 ns (FWHM) und einer Wellenlänge von 905 nm. Der Wellenlängenbereich des nahen Infrarot (NIR) stellt sicher, dass keine störenden Blendeffekte für einen Beobachter auftreten.

Um in einem Halbleiterlaser die nötige Ausgangsleistung von über $50 W_{\text{peak}}$ zu erzielen, wird bei der eingesetzten Laserdiode die sogenannte „nanostack“-Technologie eingesetzt, bei der mehrere emittierende Lagen epitaktisch übereinander angeordnet werden, wie in Abbildung 7.4 gezeigt. Die gesamte emittierende Fläche beträgt $10 \times 200 \mu\text{m}^2$, was aufgrund des großen Aspektverhältnisses der Fläche zu unterschiedlich großen Divergenzen des Laserstrahls führt.

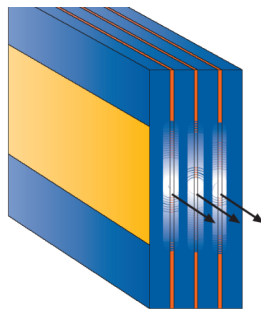


Abbildung 7.4: Dreilagiger Nanostack–Verbund mit einer emittierenden Querschnittsfläche von $200 \times 10 \mu\text{m}$ [53].

Für die Auslegung der Kollimatoroptik wird die Rohdivergenz mit Hilfe einer im Infrarotspektrum empfindlichen Digitalkamera aufgenommen und zu $18^\circ \times 6^\circ$ bestimmt, siehe Abbildung 7.5.

7.2.2 Empfänger

Zusätzlich zur Nutzung einer maximal möglichen Leistung des Laserpulses, ermöglicht der Einsatz eines hochempfindlichen Empfängers eine Steigerung der Messentfernung durch eine bessere Verstärkung des rückgestreuten Lichts. Die als Empfänger infrage kommende Avalanche Photodiode (APD) gleicht im Prinzip einer gewöhnlichen Si–Photodiode, erzielt aber durch eine schwach dotierte, hochohmige Zwischenlage eine längere Lebensdauer der aufgrund des photoelektrischen Effekts in der Halbleiterschicht erzeugten Elektronen. Dadurch wird die Messbarkeit kurzer Pulse verbessert, wobei eine hohe Gegenspannung das Signal zusätzlich mit Hilfe des Lawineneffektes von zusätzlich erzeugten Ladungsträgern verstärkt. Dies ist jedoch mit einem verringerten Signal–zu–Rausch–Verhältnis verbunden. Da die erzielbare Verstärkung bei einer

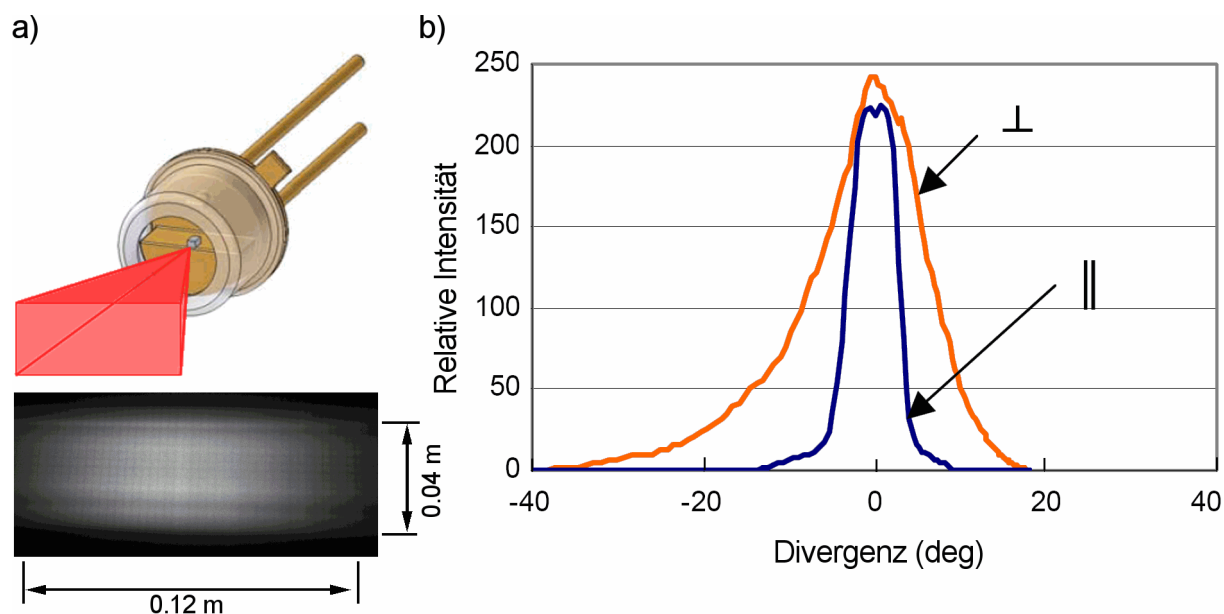


Abbildung 7.5: Hochleistungs-Halbleiterlaserdiode der OSRAM GmbH; a) Laserdiode mit Rohdivergenz; b) Intensität in Abhängigkeit der Divergenz für die Abstrahlrichtung in x- (\perp) und y-Richtung (\parallel) [53].

APD im Vergleich zu anderen verfügbaren Photodetektoren mit mehreren kV pro A Photostrom um etwa zwei Zehnerpotenzen größer ist, wurde diese ausgewählt. Dabei handelt es sich um die APD vom Typ 313A der Firma Analog Modules Inc. mit einer Verstärkung von 20 kV/A [54]. Um die etwa 1 mm große numerische Apertur der photoaktiven Fläche zu vergrößern und damit mehr Licht zu sammeln, ist der Einsatz einer Fokussieroptik vorgesehen. Deren Größe und damit die optische Apertur ist jedoch durch die Miniaturisierungsbestrebungen auf wenige Millimeter beschränkt.

Durch das verwendete Messprinzip ergibt sich eine starke Abhängigkeit der reflektierten Pulsform von der Messentfernung. Durch Dispersion des Pulssignals verringert sich die Amplitude des Pulses mit der Entfernung des reflektierenden Objekts.

Eine Detektion der reflektierten Pulsform mittels eines Schwellwertdetektors mit fester Schwelle erzeugt mit zunehmender Dispersion der Pulsform eine zusätzliche Zeitverschiebung Δt , was einer systematisch zu groß gemessenen Entfernung entspricht, siehe Abbildung 7.6 a) und b). Um diesen Effekt zu kompensieren, wird im vorgestellten System eine Signalvorverarbeitung mittels eines *constant fraction discriminator* (CFD) vorgenommen. Dessen Prinzip ist in Abbildung 7.6 skizziert. Anhand der bekannten zeitlichen Länge des Laserpulses wird die empfangene Pulsform mit einer zeitverschobenen Kopie geschnitten, wodurch eine von der Amplitude der Pulsform näherungsweise unabhängige Messung möglich ist.

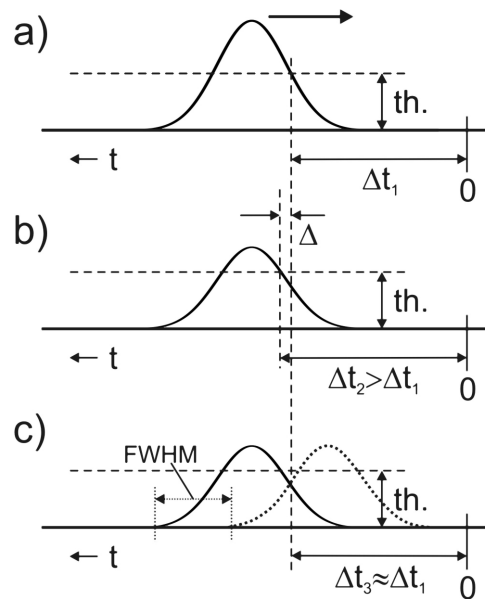


Abbildung 7.6: Prinzip des Schwellwertdetektors; a) mit fester Schwelle, b) bei kleinem Puls und c) CFD bei kleinem Puls [52]. Legende: $th.$ = *threshold*, Schwellwert; Δ = zeitliche Messabweichung; $\Delta t_{1,2,3}$ = ermittelte Messwerte.

7.3 Optik-Simulation

Bei der Auswahl der optischen Komponenten, bestehend aus einer Kollimatoroptik für die Laserdiode und einer Fokussieroptik für die APD, sollte auf verfügbare Standardkomponenten zurückgegriffen werden. Es zeigte sich jedoch sehr schnell anhand erster Versuche, dass aufgrund der großen Anforderungen an die Optiken eine einfache, auf Standardkomponenten aufgebaute Lösung nicht das geforderte Ergebnis aus Durchmesser und Divergenz des Laserstrahls, sowie ausreichender Fokussierung des empfangenen Laserpulses liefern kann. Bei der Wahl der optischen Komponenten wird daher anhand von Optik-Simulationen eine Bewertung durchgeführt. Der Simulationsablauf ist in Abschnitt 3.4 beschrieben.

7.3.1 Sender

Für die Kollimation des Laserstrahls werden Glaskollimatoren der Firma Kodak und der Firma Thorlabs Inc. ausgewählt. Für die Auswahl ist die Erfüllung folgender Kriterien notwendig

- Kurze Brennweite < 3 mm

Ein kurzer Abstand zur Laserdiode stellt einen kleinen Strahlquerschnitt sicher.

- Sehr gute Kollimationseigenschaften

Die Einhaltung der Strahldivergenz von 5 mrad bei einem Strahldurchmesser von etwa 1 mm und einer asymmetrischen Rohdivergenz stellt die größte Herausforderung dar.

Anhand der Optik–Simulation werden die Linsen in ihrer Anordnung zur Laserquelle optimiert und die erzielbare Divergenz anhand einer Projektion auf einen Schirm bestimmt. Die Modellierung der Laser–Quelle erfolgt dabei anhand der zuvor ermittelten Rohdivergenz und der flächigen Ausdehnung der lichtemittierenden „nanostack“–Halbleiterschichten. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.7 gezeigt und in Tabelle 7.2 zusammengestellt.

Tabelle 7.2: Ergebnisse der mittels Optik–Simulation berechneten Kollimatordaten in 2.85 m Abstand zur Quelle.

Bezeichnung	Thorlabs A140	Kodak A397
Strahlquerschnitt (mm)		
Breite x	35.9	5.1
Höhe y	251.3	30.8
Divergenz (mrad)		
x (\perp)	12.6	1.8
y (\parallel)	88.3	10.8

Es zeigt sich, dass die starke Asymmetrie der Rohdivergenz der Laser–Quelle in einer ebenfalls großen Ausdehnung des kollimierten Strahls resultiert. Aufgrund der Kollimationseigenschaften lässt sich dabei die größere Rohdivergenz in der x–Achse besser kollimieren, woraus bei der Kodak–Linse eine sehr gute Strahldivergenz von 1.8 mrad resultiert. Durch die große Ausdehnung in y–Richtung entsteht ein linienförmiger Strahlquerschnitt, der weit von dem geforderten, möglichst runden Strahlquerschnitt entfernt ist. Eine Strahlformung kann hier etwa durch den Einsatz einer Blende erreicht werden, was jedoch einen Großteil des Strahls ausblenden und damit die Laserleistung erheblich reduzieren würde. Ein zweiter Ansatz, der mit Hilfe von speziell optimierten Mikrolinsenelementen die x– und y–Richtung der Rohdivergenz separat kollimiert, ist aufgrund der damit verbundenen hohen Herstellungskosten beim aktuellen Stand der Arbeit nicht möglich.

7.3.2 Empfänger

Erste Tests mit einer Sammellinse von 20 mm Durchmesser ergeben bei optimaler Positionierung des Brennpunktes auf der aktiven Fläche der APD eine maximale Messentfernung von mehr als 30 m, wenn der Laserstrahl ohne scannenden Betrieb des Mikroaktors abgestrahlt wird. Wird davon ausgegangen, dass der Laserstrahl durch entsprechende Anordnung der Empfängeroptik parallel zur optischen Achse ausgesandt wird, erreicht der von einem Objekt reflektierte Laserpuls die Sammellinse ebenfalls in dieser Achse und wird auf die APD fokussiert. Im scannenden Betrieb des Mikroaktors abgelenkte Laserstrahlen erzeugen jedoch Reflexionen, die überwiegend unter einem Winkel und nicht parallel zur optischen Achse der Sammellinse eintreffen. Dieser Winkel entspricht dem abgestrahlten mechanischen Scanwinkel $\Delta\alpha$ beziehungsweise bei 2D–Aktorsystemen $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$. Nach der Spezifikation entspricht der maximale Einfallswinkel zur optischen Achse 25° .

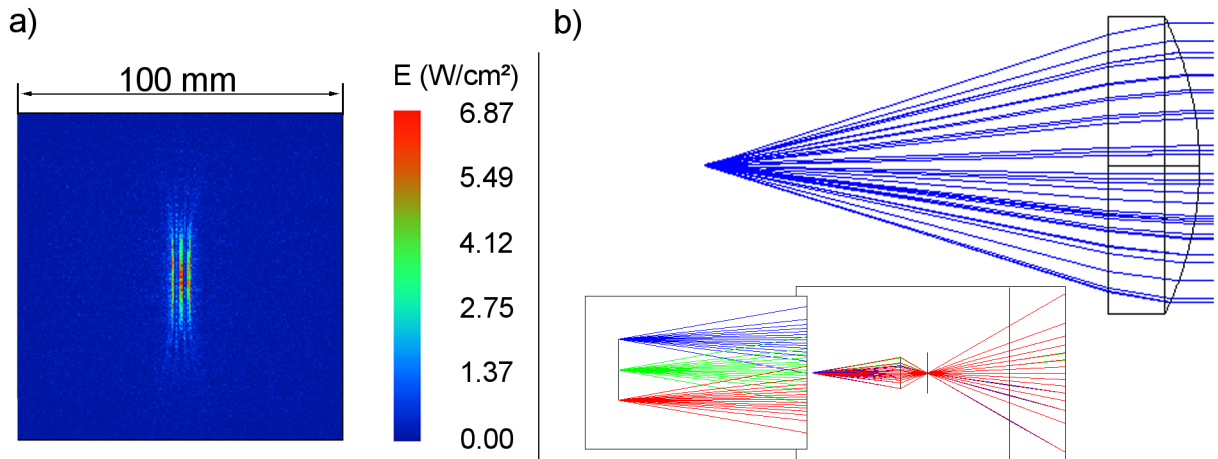


Abbildung 7.7: Simulierter Strahlengang des Kollimators A397 von Kodak; a) Strahlquerschnitt des kollimierten Laserstrahls auf einem 2.85 m entfernten Schirm; b) Strahlverlauf durch die Kollimatoroptik, im Inset ist die Modellierung der ausgedehnten Laser-Lichtquelle anhand dreier verteilter Strahler abgebildet.

Bei angebrachter Sammellinse ergeben unterschiedliche Einfallswinkel, bezogen auf die optische Achse der Sammellinsen, nach der Linsengleichung eine Verschiebung des Brennpunktes auf der APD. Somit ist eine Detektion der reflektierten Laserpulse nicht mehr möglich, da nicht mehr genügend zurück reflektiertes Licht auf die APD fällt. Mittels optischer Simulation wird daher eine Lösung mit verschachtelten Standardsammellinsen untersucht. Anhand mehrerer Linsen lässt sich unter einem Winkel einfallendes Licht stufenweise brechen und in einem Brennpunkt sammeln. Mit Hilfe des in Abbildung 7.8 berechneten dreilinsigen Systems wird bei einem Linsendurchmesser von 20 mm unter einem Winkel von maximal 25° einfallendes Licht innerhalb einer Fläche von 10 mm^2 fokussiert.

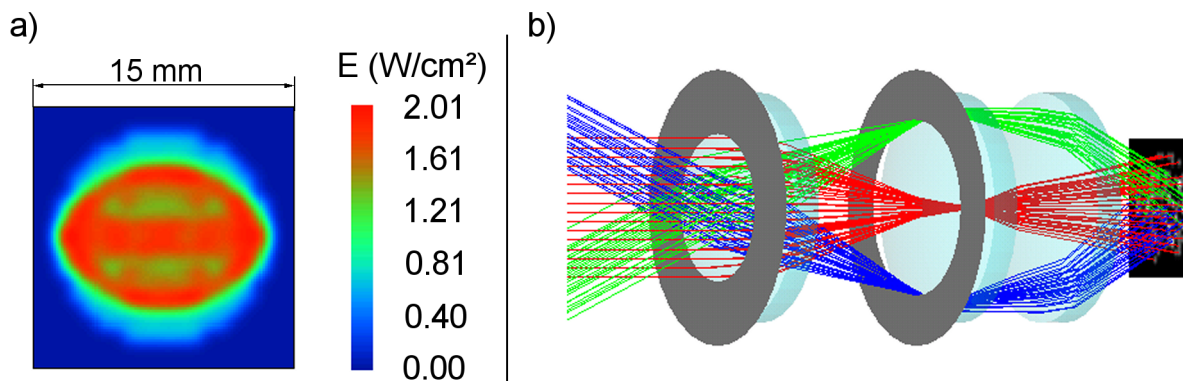


Abbildung 7.8: Dreistufige Fokussieroptik für unter einem Raumwinkel von 50° einfallendes, reflektiertes Licht a) Leistungsverteilung im Brennpunkt der APD und b) Strahlengang durch das System.

Bei dem Verhältnis der Aperturen der Sammellinse und des Fokusfläche von 20 mm : 10 mm ergibt sich eine vierfache Verstärkung der Intensität auf der aktiven Fläche der APD. Aufgrund

der berechneten Systemverbesserung wird dieses Linsensystem als Ausgangspunkt für den optischen Aufbau der Empfangseinheit gewählt, da aufgrund der nutzbaren Standardkomponenten und fehlender Alternativsysteme zum momentanen Zeitpunkt keine weitere Wahlmöglichkeit besteht.

7.4 Signalverarbeitung

Die Algorithmen zur Verarbeitung der erfassten Messdaten stammen zum Großteil aus der Bildverarbeitung und der robusten Schätzung [55]. Bei der Segmentierung werden etwa zur Detektion räumlich getrennter Objekte sogenannte Kantenoperatoren eingesetzt, die Sprünge im Entfernungsbild suchen. Die Objektverfolgung basiert auf Trackingalgorithmen wie zum Beispiel dem Kalman–Filter. Dieser nutzt die Assoziation gebildeter Gruppen aus aufeinander folgenden Bildern. Eine detaillierte Beschreibung der am MRT verwendeten Verfahren findet sich in [52] und [56].

7.5 Herstellung

Die Herstellung des Laserscanner–Systems orientiert sich an einem modularen Aufbau, der eine getrennte Herstellung und erste Charakterisierungen ohne das Gesamtsystem ermöglicht. Im modularen Aufbau des Systems enthalten die Laserquelle und die Empfangseinheit bereits eine integrierte Leistungselektronik zur Bereitstellung der benötigten Versorgungsspannungen von bis zu 190 V. Ebenfalls integriert sind bei diesen Modulen bereits die im vorhergehenden Abschnitt 7.3 beschriebenen Optiken.

Die Module der Laserentfernungsmessung (LRF), der Winkelsensorik und des Mikrocontrollers sind auf vom MRT entwickelten Platinen in einem 19“-Rack untergebracht. Die Datenübertragung erfolgt über eine bidirektionale USB–Verbindung. Vergleiche Abbildung 7.9.

7.6 Charakterisierung

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten ist geplant die Integration der 1D– und 2D–Spiegelaktoren zur Strahlableitung schrittweise durchzuführen. In einem ersten Schritt erfolgt daher der Einbau eines 1D–Spiegelaktors aus der ferromagnetischen Ni₂MnGa–Legierung. Die Charakterisierung des so aufgebauten 2D–Laserscanner–Systems erfolgt zuerst auf Basis der Einzelmodule. Nach der Untersuchung von Auflösung und Messgenauigkeit der Laserentfernungsmessung erfolgt die Messung der Winkelinformationen des schwingenden Aktors ebenfalls mittels der entwickelten Datenerfassung.

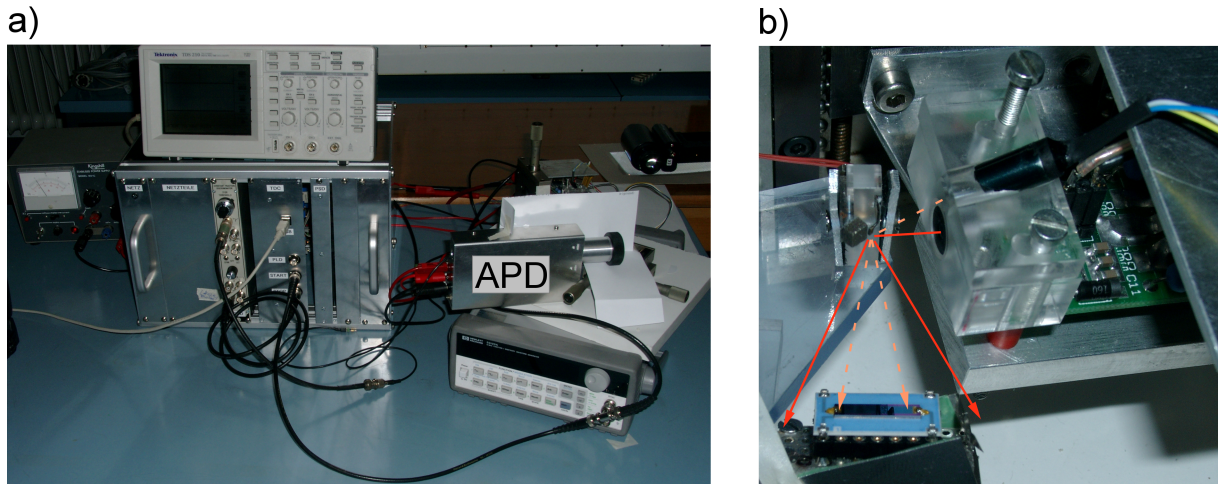


Abbildung 7.9: Aufgebautes 2D-Laserscanner-System. Fliegender Aufbau bestehend aus 19“-Rack mit elektronischen Komponenten, Signalgenerator und APD in a) sowie des 1D-Spiegelaktors mit Winkelsensorik und Hochleistungs-Halbleiterlaser in b). Der Strahlengang ist durch rote Pfeile veranschaulicht.

7.6.1 Entfernungsmessung

Die Charakterisierung der Entfernungsmessung wird zunächst bei nicht scannendem 1D-Spiegelaktor mit einer parallel zur optischen Achse der Empfangseinheit ausgesendeten Laserstrahl durchgeführt. In definierten Abständen werden Objekte platziert, die eine Bestimmung der gemessenen Entfernung über Mehrfachmessungen und anschließender Auswertung ermöglichen.

Die gemessenen Signale in Abbildung 7.10 zeigen ab einer Entfernung von etwa 7 m deutlich zunehmendes Rauschen. Im Nahbereich bis 2 m wird eine maximale Entfernungsauflösung von besser als 0.2 m erreicht und liegt damit noch um eine Größenordnung über dem geforderten Wert. Ab 14 Metern wird die Abstufung in Schritten von einem Meter vom Rauschen überlagert. Diese Aussage gilt jedoch nur für die Rohdaten, da nachfolgende Signalverarbeitungsalgorithmen trotz eines offensichtlich schlechten Signal-zu-Rauschverhältnis eine bessere Auswertung der Signale ermöglichen. Zur Signalverbesserung können zum Beispiel mehrere Scandurchgänge zu einem Bild zusammengefasst werden. Eine weitere Verbesserung wird mit Hilfe der verwendeten Empfangsoptik erzielt. Zudem kann der Einsatz an das System angepasster Signalverarbeitungsalgorithmen die Auflösung steigern.

7.6.2 1D-Winkelmessung

Um die Messung des aktuellen Scanwinkels durchführen zu können, müssen die Daten einerseits in Echtzeit erfasst und andererseits zeitsynchron an die Signalverarbeitung übermittelt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an den Mikrocontroller und den eingesetzten USB-Datenbus. Im Betrieb des aufgebauten Systems stellt sich die Programmierung des Mikrocontrollers als auch

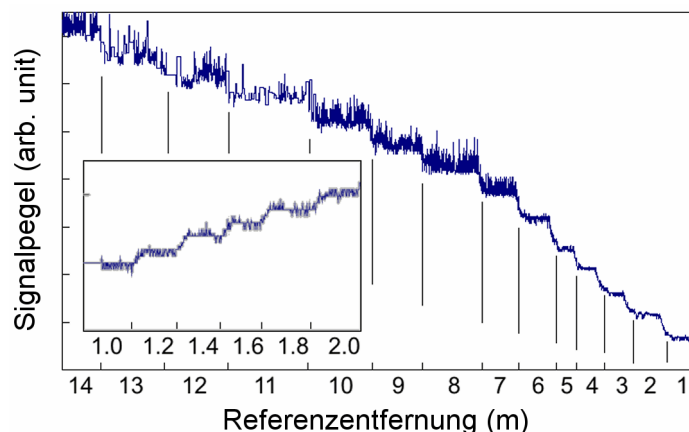


Abbildung 7.10: Charakterisierung der Entfernungsmessung mittels Messungen an einem reflektierenden Objekt dessen Entfernung variiert wurde.

die Aufbereitung der Daten als größte Herausforderung dar. Es zeigt sich, dass trotz ausreichender Übertragungskapazität auf dem Datenbus vorhanden war, die auf Betriebssystemebene erfassten Daten nicht die notwendige Zeitsynchronität aufweisen.

Die weitere Anpassung der Software macht daher einen erheblichen zeitlichen Zusatzaufwand erforderlich. Erste Ergebnisse in Abbildung 7.11 zeigen die mit einer Messrate von 500 Hz erfassten Daten der Winkelmessung eines sinusförmigen Signals mit 50 Hz. In diesem Fall wird die Signalform aufgrund der zu geringen Überabtastung des zu messenden Signals mit einem Faktor 10 verzerrt dargestellt.

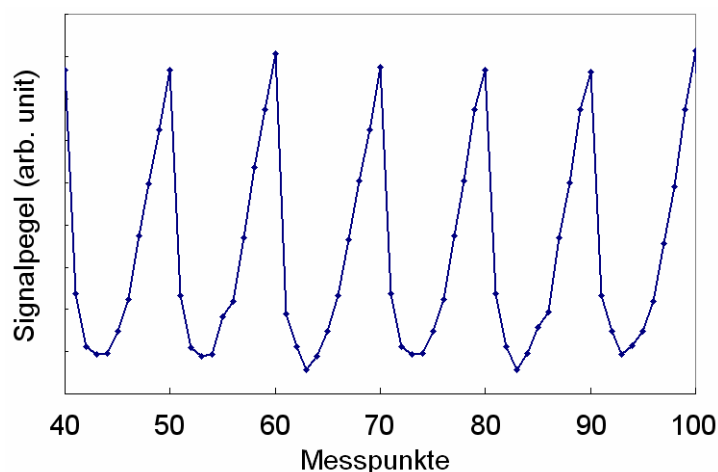


Abbildung 7.11: Abgetastetes Signal des Winkelsensors mit einer Frequenz von 500 Hz.

7.6.3 2D–Laserscanner–System

Erste Messungen am 2D–Gesamtsystem für Winkel und Entfernung zeigen, dass die geringe Zeitstabilität der Messwerte untereinander nur einen sehr eingeschränkten Blick auf die Gesamt-

heit der Datenerfassung von Entfernung und Winkel zulassen. Anhand der in Abbildung 7.12 dargestellten Messdaten für die Periodendauer einer Aktorschwingung kann jedoch die Grundfunktionalität des Gesamtsystems gezeigt werden.

In der verwendeten Darstellung einer vermessenen Szene in Draufsicht, dem sogenannten *bird's eye view*, lassen sich deutlich die Reflexionen von zwei fest stehenden Objekten erkennen, die jeweils mehrere Entfernungs- und Winkeldatenpunkte nach Auswertung der reflektierten Signale erzeugen. In diesem Fall beträgt die Pulsrate der Laserdiode 5 kHz bei einer Aktorfrequenz von etwa 150 Hz.

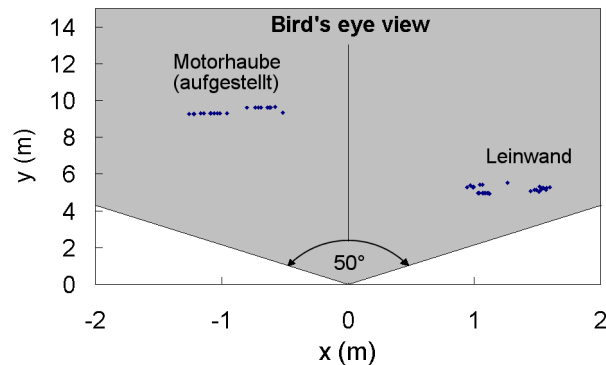


Abbildung 7.12: Abgetastete Szene mit zwei Objekten in 6 m und 9 m Abstand aus der Vogelperspektive. Die ermittelten blauen Datenpunkte liegen zunächst als Entfernung und Winkel in Polarkoordinaten vor und wurden hier in ein x–y–Diagramm übertragen.

7.7 Zusammenfassung

Der dritte Teil der Arbeit befasst sich mit dem Aufbau eines Laserscanner-Systems zur Umfelderkennung in zwei Dimensionen in Kooperation mit dem Institut für Mess- und Regelungstechnik MRT. Ausgehend von einer gemeinsam erstellten Spezifikation wird das Gesamtsystem modular entwickelt. Die Spezifikation orientiert sich dabei an einem bereits am Markt vorhandenen Laserscanner-System, das aufgrund seiner Abmessungen und seiner Spezifikation ebenfalls für den Einsatz in mobilen Anwendungen konzipiert ist. Durch einen modularen Aufbau sollte eine getrennte Entwicklung und Charakterisierung der Module sichergestellt werden.

Die einzelnen Module des Systems beinhalten neben dem Spiegelaktor mit integrierter Winkelmessung eine Laserentfernungsmessung bestehend aus einer Hochleistungs-Halbleiterlaserdiode sowie einer Avalanche Photodiode mit Signalaufbereitung. Die im System eingesetzte Halbleiterlaserdiode zur Laserentfernungsmessung nutzt eine Kollimatoroptik, die mit der Unterstützung von Optik-Simulationen integriert wird. Auch bei der Auswahl und Anordnung der Empfangsoptik kam die Optik-Simulation zum Einsatz.

Erste Messungen an einem 2D-Laserscanner-System mit Ni_2MnGa -Spiegelaktor zeigen die großen Herausforderungen, die bereits dieses System an die Soft- und Hardware der Signaler-

fassung und –verarbeitung stellt. Die getrennte Charakterisierung der Laserentfernungsmessung und der Winkelmessung zeigen eine Auflösung der Entfernungsmessung von weniger als 0.2 m im Nahbereich. Die maximal beobachtete wiederholbare Messentfernung beträgt 30 m bei einem reflektierenden Objekt. Die gleichzeitige Erfassung von Entfernungs– und Winkeldaten durch das Gesamtsystem ist mit besonderen Anforderungen an die Signalverarbeitungsgeschwindigkeit des Mikrocontrollers sowie des bidirektionalen Datenbusses zur Übertragung der Daten an einen Computer verbunden. Anhand erster Messungen wird hier jedoch die grundlegende Funktionalität aufgezeigt.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines miniaturisierten Laserscanner-Systems beschrieben. Da Laserscanner-Systeme momentan hauptsächlich makroskopische Spiegelaktoren zur Ablenkung des Laserstrahls nutzen, entstehen Nachteile bei den Gesamtabmessungen und der Unempfindlichkeit gegenüber Erschütterung aufgrund der großen Massen der Aktorsysteme. Der Einsatz von Mikroaktoren, der eine Verbesserung dieser Nachteile verspricht, wird durch die geringen Scanwinkel aktueller Mikroaktoren beschränkt. Mikroaktoren mit großen Scanwinkeln existieren bereits. Diese basieren jedoch auf komplexen Aktorstrukturen und bedürfen damit einer aufwendigen Prozesstechnik, die hohe Kosten nach sich zieht.

Um die Nachteile zu minimieren, werden in dieser Arbeit Dünnschichten aus sogenannten „*Smart Materials*“ eingesetzt, die sich durch multifunktionale Eigenschaften sowie hohe Energiedichten auszeichnen. Ausgangspunkte sind insbesondere ein neuartiger Aktormechanismus basierend auf einer ferromagnetischen Formgedächtnislegierung und neuartige Verbundschichtmaterialien, die große Spannungsänderungen in kleinen Temperaturintervallen zeigen. Die ferromagnetische Ni_2MnGa -Legierung bietet dabei zwei intrinsische Effekte, den FGE und ferromagnetisches Verhalten in einem Bauteil, während die Verbundschicht durch die Verbindung von Bimetall-Effekt und FGE großes Potential beim Einsatz in den mikromechanischen Spiegelaktoren zeigt.

Zunächst werden das Design, die Herstellung und Entwicklung von 1D-Mikroaktoren mit einem Ablenkwinkel beschrieben. Ausgehend von den Spiegelaktoren zur eindimensionalen Strahlablenkung werden danach im zweiten Teil unterschiedliche Aktoren zur zweidimensionalen Strahlablenkung entwickelt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der entsprechenden Materialeigenschaften und Wirkprinzipien, sowie der Idee, nur einen Mikrospiegel zur Strahlablenkung einzusetzen. Der dritte Abschnitt befasst sich mit dem Design und dem Aufbau eines miniaturisierten 2D-Laserscanner-Systems, bestehend aus einem 1D-Mikroaktor aus der ferromagnetischen Formgedächtnislegierung und einem Modul zur Laserentfernungsmessung.

Design: Ausgangspunkt der 1D-Mikroaktoren ist eine Doppelbiegebalkenstruktur, die hinsichtlich einer möglichst gleichmäßigen Temperaturverteilung in den Stegen ausgelegt ist. Die Auslegung

wird durch gekoppelte elektrisch–thermische Simulationsrechnungen auf der Basis der finiten Elemente–Methode unterstützt. Die Mikroaktoren nutzen wenige Mikrometer dicke Dünnschichten der vorgestellten Materialien, die eine Biegeschwingung zum einen mittels des Formgedächtniseffekts in Verbindung mit dem ferromagnetischen Effekt und zum anderen allein durch den Formgedächtniseffekt in einer Verbundschicht vollführen. Ein am frei beweglichen Ende angebrachter Mikrospiegel erfährt dabei eine Verkipfung, die zur Ablenkung eines Laserstrahls genutzt wird. Weiterhin wird die Realisierung eines Aktormechanismus untersucht, der den reinen ferromagnetischen Effekt nutzt.

Dem auf der ferromagnetischen Formgedächtnislegierung aufbauenden 2D–Mikroaktor liegt ein monolithischer Entwurf zugrunde, was einen einfachen Aufbau ermöglicht. Die zweite Ablenkrichtung des Mikrospiegels erfolgt anhand einer Verkipfung, die durch unterschiedliche Auslenkung zweier, am frei beweglichen Ende gekoppelter 1D–Aktordesigns, hervorgerufen wird. Die so erzeugten Ablenkwinkel stehen senkrecht zueinander.

Ein zweiter 2D–Mikroaktor basiert auf einem monolithischen Aufbau mit serieller Anordnung zweier NiTiCu 1D–Mikroaktoren. Ein 1D–Mikroaktor mit größeren Abmessungen trägt einen zweiten, in einem rechten Winkel angeordneten kleineren 1D–Mikroaktor, an dem der Mikrospiegel angebracht ist.

Das Design des Laserscanner–Systems stellt, um die Einhaltung der Spezifikation zu gewährleisten, hohe Anforderungen an die Strahlformung, die Leistung der Laserdiode sowie die Empfindlichkeit des dazugehörigen Empfängers der Entfernungsmessung. Dies liegt einerseits in der Integration der miniaturisierten Spiegelaktoren begründet, die kleinere Strahldurchmesser bei gleichzeitig kleiner Strahldivergenz erfordern. Andererseits bedeuten die geringen Gesamtabmessungen kleinere optische Aperturen des Empfängers, die die Detektionsausbeute des rückgestreuten Lichts begrenzen. Für die Auslegung der Kollimatoroptik der Laserdiode und der Fokussieroptik des Detektorstrahlengangs wird auf ein Optik–Raytracing–Programm zurückgegriffen.

Herstellung: Ferromagnetische Formgedächtnislegierungen sind aufgrund ihrer hohen chemischen Beständigkeit sowie ihrer Sprödigkeit schwer handhabbar. Die Mikrostrukturierung erfolgt hier mittels photolithografischer Prozesstechnik und einem nasschemischen Ätzverfahren. Die erforderliche Strukturtreue wird durch Aufbringen metallischer Schutzschichten erreicht. Die Strukturierung der sehr robusten Verbundschicht mit einer Formgedächtnislegierung erfolgt mit einem gepulsten Schneidlaser, wodurch minimale Stegbreiten von 50 μm möglich sind.

Ein Problem bei der Aufbau– und Verbindungstechnik der Aktoren ist die elektrische Kontaktierung. Hierfür wird am IMT ein Spaltschweißverfahren verwendet, das stabile und hochleitende Kontakte auf kleinsten Flächen erlaubt.

Ansteuerung und Signalverarbeitung: Der Betrieb der 1D– und 2D–Mikroaktoren erfolgt elektrothermisch mittels rechteckförmiger, gepulster Ströme. Diese werden mit Hilfe eines PC erzeugt, von einer Einheit mit Leistungssteuerung verstärkt und den Aktoren zugeführt.

Die Signalverarbeitung des Laserscanner-Systems erfolgt mit einem zentralen Mikrocontroller. Dieser erfasst die Informationen des Winkelsensors sowie die vorverarbeiteten Daten der Entfernungsmessung. Die Daten werden anschließend über einen Datenbus einem Computer übergeben. Die Leistungsmerkmale der entwickelten Aktoren sind im folgenden zusammengefasst.

1D-Mikroaktoren: Ni₂MnGa-Mikroaktoren zeigen verglichen mit anderen Mikroaktoren große Scanwinkel, die sich innerhalb eines breiten Frequenzbereichs anregen lassen. Abhängig von den Designparametern lässt sich eine Verschiebung des Bereichs hin zu größeren Frequenzen erreichen, was jedoch mit einer Verringerung des Scanwinkels verbunden ist. NiTiCu-Verbundschichtaktoren zeigen die höchsten Scanwinkel. Hierbei begrenzen jedoch geringe Umwandlungstemperaturen und der ausschließliche Betrieb in Resonanz deren Einsatz. Allgemein bestechen die 1D-Mikroaktoren durch einen äußerst einfachen Aufbau, der aus wenigen Bauteilen mit nur einer bewegten Komponente besteht.

2D-Mikroaktoren: Bei den Ni₂MnGa-Mikroaktoren lassen sich 2D-Scanmuster in Abhängigkeit von Phasen- und Frequenzverhältnis in Form von Lissajous-Figuren, wie etwa einer stehenden Acht, und teilweise komplexe, mehrfach pro Schwingungsperiode durchlaufene Muster erzeugen. Die Anregung des Aktorsystems ist wie bei den Ni₂MnGa 1D-Mikroaktoren innerhalb eines großen Frequenzbereichs möglich. Die gemessenen Scanwinkel von 50° x 20° genügen bereits den Anforderungen für die Integration in ein 3D-Laserscanner-System.

Die NiTiCu-Varianten der 2D-Aktoren zeigen ein flächenfüllendes 2D-Scanmuster, da hier ein größeres aber nicht veränderbares Frequenzverhältnis zwischen den Ablenkrichtungen besteht. Die Arbeitsfrequenzen liegen wie bei den 1D-Verbundschichtaktoren gleichen Materials in einem schmalen Resonanzbereich, der sich im gekoppelten Betrieb teilweise stark verschiebt. Die erzeugten Scanwinkel liegen momentan unter denen der Spezifikation des 2D-Laserscanner-Systems.

2D-Laserscanner-System: Die Charakterisierung der einzelnen Module an einem aufgebauten Demonstrator-System zeigt eine maximale Messentfernung des TOF-Systems von 30 m mit einer räumlichen Auflösung von 20 cm, was einer zeitlichen Auflösung von etwa einer Nanosekunde entspricht. Die Winkelmessung des unter einem Winkel von 50° arbeitenden Aktors liefert Daten mit einer Winkelauflösung im Bereich von 0.5°. Die Ergebnisse zeigen auf, dass eine weitere Optimierung der optischen Komponenten zur Erfüllung der Spezifikation von Messentfernung und Entfernungsauflösung erforderlich ist. Dies betrifft vor allem die Kollimatoroptik der Laserdiode und die Fokussieroptik am Detektor des Empfängers.

Für die Weiterentwicklung der Ni₂MnGa 1D-Mikroaktoren ist aufgrund der komplexen Abhängigkeit des Scanwinkels von der Frequenz und den inneren antagonistischen Kräften ein Echtzeit-Regelansatz nötig um konstante Scanwinkel bei gleichzeitiger Kompensation von Temperaturschwankung zu erreichen. Dazu bietet sich der Ansatz einer Modellbildung an, der im Rahmen

eines Förderprojekts am IMT untersucht wird. Das Modell soll die Hysteresetemperatur im Material beschreiben sowie das daran gekoppelte magneto–mechanische Verhalten, um daraus zu jedem Zeitpunkt das Verhalten des Systems etwa in Aktoranwendungen vorhersagen zu können. Dabei kann entweder die bereits vorhandene Winkelsensorik oder ein intrinsisches Sensorkonzept, basierend auf den vielseitigen Materialeigenschaften, eingebunden werden.

Ein stabilerer Betrieb der Aktoren aus der Formgedächtnisverbundschicht kann anhand weiterer Verbesserungen der Temperaturverteilung im Bauteil erreicht werden. Dies wird durch die Beschränkung der Maximaltemperaturen möglich, sowie durch eine verminderte thermische und mechanische Kopplung zwischen den seriell angeordneten 1D–Mikroaktoren im 2D–Aktorsystem.

Bei den 2D–Mikroaktoren hängt eine mögliche Anwendung insbesondere von den anregbaren Scanmustern ab, ebenso wie vom Temperatur– und Arbeitsfrequenzbereich der Aktorsysteme. Die Muster sollten zum Beispiel nach der Spezifikation des 2D–Laserscanner–Systems eine möglichst flächenfüllende Überdeckung des zu scannenden Raumbereichs ermöglichen. Bei Ni_2MnGa 2D–Aktorsystemen kann dies teilweise durch eine Ansteuerung mit sinusförmigen anstatt rechteckigen Pulsformen erreicht werden. Aufgrund des verwendeten Designs bedeutet eine Verkleinerung zur Steigerung der Arbeitsfrequenzen gleichzeitig eine Verringerung des Scanwinkels. Die erzielbaren Frequenzen sind somit auf deutlich unter ein Kiloherz beschränkt.

Bei den NiTiCu 2D–Aktorsystemen bestehend aus seriell gekoppelten 1D–Mikroaktoren ist die größte Einschränkung der geringe Temperaturbereich. Weitere thermische Designoptimierungen erlauben lediglich geringfügig die Beeinflussung der Kühlzeiten. Die Verringerung der mechanischen Kopplungen durch kleinere Aktoren bei gleichzeitig starker Reduzierung der bewegten Massen stellt eine Möglichkeit dar, die geringen Scanwinkel des 2D–Scanmusters zu vergrößern. Gleichzeitig werden dadurch die Resonanzfrequenzen angehoben, was wünschenswert ist.

Das 2D–Laserscanner–System zeigt erhebliches Optimierungs– jedoch auch Leistungspotential. Erste Schritte hinsichtlich der zeitsynchronen Messung von Winkel– und Entfernungsinformationen können etwa ein leistungsfähigerer Mikrocontroller oder ein Pufferspeicher für die berechneten Daten sein. Weiterhin lassen sich der Laserstrahlquerschnitt und die Fokussierung auf den Detektor des Empfängers durch weiter optimierte Linsensysteme verbessern, was eine deutliche Steigerung der Messentfernung verspricht.

Eine Erweiterung der Umfelderkennung in die dritte Dimension mittels Integration eines entsprechenden 2D–Mikroaktors mit zwei Ablenkungswinkeln konnte im Rahmen der Arbeit nicht mehr umgesetzt werden. Dazu ist eine zusätzliche Winkelsensorik für den zweiten Ablenkungswinkel zu entwickeln. Bei geringeren Anforderungen genügt jedoch eine einfache Lösung, zum Beispiel die integrierten sensorischen Fähigkeiten der ferromagnetischen Ni_2MnGa Formgedächtnislegierung.

Anhang A - Formeln zu Abschnitt 7.1

Laserleistung und Augensicherheit

Für die Abschätzung der Laserleistung bei gleichzeitiger Einhaltung der Augensicherheit nach der Laserschutzklasse 1 wird folgendes zugrunde gelegt

- Der Strahldurchmesser des Lasers beträgt 1 mm.
- Strahlenschutznorm nach DIN 60 825-1 [50].
- Der Sicherheitsabstand zu einem Betrachter beträgt 2 m.
- Das System ist im Stillstand abgeschaltet.
- Alle weiteren Annahmen nach den Spezifikationen des Laserscanner-Systems (Seite 108).

In 2 m Entfernung des Systems wird ein zweidimensionaler Raumbereich von $1.873 \times 0.35 \text{ m}^2$ überstrichen. Bei einer Bildfrequenz von 10 Hz erfolgt aufgrund der periodischen Ablenkung ein zweimaliger Durchlauf des Bereichs in jeweils 50 ms. Damit entfallen auf jede der fünf Zeilen bei ebenfalls zweimaligem Durchlauf jeweils 5 ms, was einer mittleren Scangeschwindigkeit des Strahls von 375 m/s entspricht. Daraus ergibt sich zusammen mit der Definition des menschlichen Auges nach DIN mit einer Blendenöffnung von 7 mm eine maximale Bestrahlungsdauer t_B von

$$t_B = \frac{s}{v} = \frac{0.007 \text{ m}}{375 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.87 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (8.1)$$

Die maximale Bestrahlungsstärke nach DIN EN 60 825-1, Tabelle VI, wird anhand der maximalen Bestrahlung H_{cw} für die Wellenlänge 905 nm bei einem kontinuierlichen Strahl (cw) mit t_B bestimmt

$$H_{cw} = 18 \cdot t_B^{0.75} \cdot C_4 \cdot C_6 = 0.013 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \quad (8.2)$$

Mit den aus der Norm entnommenen Korrekturfaktoren $C_4 = 2.57$ und $C_6 = 1$ berechnet sich die maximale Bestrahlungsstärke E_{cw} zu

$$E_{cw} = \frac{H}{t_b} = \frac{0.013 \text{ J/m}^2}{1.87 \cdot 10^{-5} \text{ s}} = 695 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (8.3)$$

Die erforderliche Pulsrate des Lasers ergibt sich aus dem Produkt Bildfrequenz · horizontale Messpunkte · vertikale Linien zu $10 \text{ Hz} \cdot 100 \cdot 5 = 5 \text{ kHz}$. Bei einer Pulsdauer von 7 ns ergibt sich ein Puls–zu–Pausen–Verhältnis von $1 : 2.86 \cdot 10^4$.

Für die Betrachtung gepulster Laserstrahlung gelten folgende Forderungen nach DIN EN 60 825, Abschnitt 13.3:

- a) Jeder Puls der vom Laser erzeugten Impulsfolge darf nicht den MZB–Wert (maximal zulässige Bestrahlung) für einen Einzelpuls von 7 ns überschreiten

$$H_{imp,a} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot C_4 \cdot C_6 = 0.0129 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \quad (8.4)$$

- b) Die mittlere Bestrahlung durch eine Pulsfolge der Länge $T = t_B$ darf nicht den MZB–Wert für einen Einzelpuls der Dauer T überschreiten

$$H_{imp,b} = 18 \cdot t_B^{0.75} \cdot C_4 \cdot C_6 = 0.013 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \quad (8.5)$$

- c) Die mittlere Bestrahlung durch einzelne Pulse einer Pulsfolge mit der Länge $T = t_B$ darf den Einzelpuls–MZB–Wert multipliziert mit dem aus der Norm entnommenen Korrekturfaktor $C_5 = N^{-0.25}$ nicht überschreiten. N ist die Anzahl der Impulse innerhalb t_B mit $N = 0.1$.

$$H_{imp,c} = H_{imp,a} \cdot C_5 = 0.0129 \cdot 1.78 = 0.023 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \quad (8.6)$$

Die Forderung mit der größten Beschränkung stellt a) dar. Daraus ergibt sich die maximale Bestrahlungsstärke im gepulsten Betrieb E_{imp} zu

$$E_{imp} = \frac{H_{imp,a}}{7 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 1.84 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (8.7)$$

Der Strahldurchmesser des Laserstrahls beträgt mit der gegebenen Divergenz in 2 m Abstand vom System etwa 11 mm . Die Einhaltung der Laserschutzklasse 1 erfordert dass die zugängliche Laserstrahlung für das menschliche Auge, auch bei direkter Bestrahlung, unschädlich ist. Um diese Forderung ab einem Abstand von 2 m zum Laserscanner–System zu erfüllen, ist die maximale Pulsleistung P_0 von

$$P_0 = E_{imp} \cdot A_{Strahl,2m} = 1.84 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot (0.0055 \text{ m})^2 \cdot \pi = 175 \text{ W} \quad (8.8)$$

zulässig.

Anhang B - FEM-Simulationsdaten

Elektrisch-thermisch gekoppelte FEM-Simulation

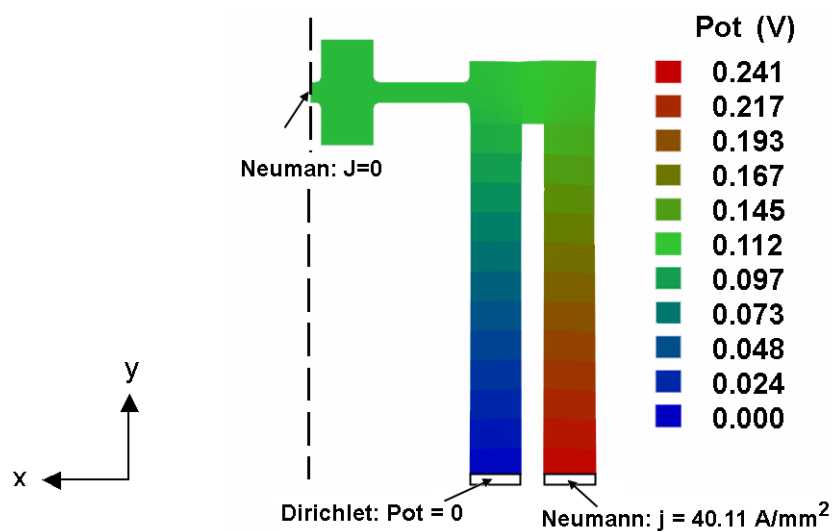


Abbildung B.1: Grafische Darstellung des Simulationsergebnisses der elektrischen Berechnung am Beispiel des 2D-Ni₂MnGa Aktors. Die Randbedingungen für die Befestigungspunkte und den Berührungspunkt an der vertikalen geometrischen Symmetrielinie sind eingezeichnet.

Tabelle B.1: Übersicht der Parameter der elektrisch-thermisch gekoppelten FEM-Simulation.

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Gesamtanzahl der Knoten im Maschennetz	3000	Stück	
Anzahl der Gitterebenen über die Dünnschichtdicke	3	Stück	Dünnschichtdicke: 10µm
Angenommene elektrische Leitfähigkeit	$1.25 \cdot 10^6$	1/Ωm	Für die elektrische Berechnung [43]
Eingesetzte Wärmeleitfähigkeit	18	W/mK	Thermische Berechnung
Eingeprägte Stromdichte	40.11	A/mm ²	

Elektrische Randbedingungen	0	A/mm ²	Neumann-Bedingung, an der geometrischen Symmetrielinie
	40.11	A/mm ²	Neumann-Bedingung an der Querschnittsfläche von Befestigung 2
	0	V	Neumann-Bedingung an der Querschnittsfläche von Befestigung 1
Thermische Randbedingungen	0	A/mm ²	Neumann-Randbedingung, an der geometrischen Symmetrielinie
	25	°C	Dirichlet-Bedingung an den Querschnittsflächen der Befestigungspunkte 1 und 2; Automatische Umsetzung der Randbedingungen beim Übergang vom elektrischen zum thermischen Problem [43]
Ausgabeformat der Daten	3DMF		ASCII-Format
Software zur Umwandlung in eine Grafik	Cinema 4D		Gerenderte 3D-Darstellung

Anhang C - Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

°	Winkel in Grad.
1	
1D	eindimensional.
2	
$2\Delta\alpha$	optischer Scanwinkel.
$2\Delta\beta$	optischer Verkippwinkel.
$2\Delta\gamma$	optischer Scanwinkel im 2D-Betrieb.
2D	zweidimensional.
3	
3D	dreidimensional.
A	
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, $\frac{10^{-6}}{K}$.
α	Wärmeübergangskoeffizient, $\frac{W}{K \cdot m^2}$.

A-Phase	austenitische Hochtemperaturphase.
A	Stromstärke, Ampere.
A_f	austenitische Endtemperatur.
Al	Chemisches Element Aluminium.
AM	Amplitudenmodulation.
APD	Avalanche Photodiode.
Ar	Chemisches Element Argon.
A_s	austenitische Starttemperatur.
at.%	Atomprozent.
Au	Chemisches Element Gold.
B	
B	Chemisches Element Bor.
B	magnetische Flussdichte, Tesla, $[B] = 1 \frac{Vs}{m^2}$.
B2	kubisch primitive Kristallstruktur.
bar	SI-konforme Einheit für Druck, $1 \text{ bar} = 10^5 = 10^5 \frac{N}{mm^2}$.
BTO	Metallsiche Legierung Barium-Titanat (BaTiO).
C	
C	Temperatur, Celsius.
CAD	<i>Computer Aided Design.</i>
CCD	<i>Charged Coupled Device</i> , lichtempfindlicher Halbleiterdetektor.
CFD	<i>Constant Fraction Discriminator.</i>
Cl	Chemisches Element Chlor.
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor.</i>
Co	Chemisches Element Kobalt.

Cr Chemisches Element Chrom.

Cs Chemisches Element Cäsium.

Cu Chemisches Element Kupfer.

D

$\Delta\alpha$ mechanischer Scanwinkel.

$\Delta\beta$ mechanischer Verkippwinkel.

$\Delta\gamma$ mechanischer Scanwinkel im 2D-Betrieb.

DC *Direct Current*, Gleichstrom.

DDK Dynamische Differenzkalorimetrie.

DMD *Digital Mirror Device*.

DSC *Differential Scanning Calorimetry*.

Dy Chemisches Element Dysprosium.

E

ε Wärmeemissionskoeffizient.

ε Dehnung, %.

ε_A Dehnung im austenitischen Zustand, %.

ε_M Dehnung im martensitischen Zustand, %.

$\varepsilon_{M,A}$ Dehnung im martensitischen, austenitischen Zustand, %.

ε_{rec} Reversible mechanische Dehnung.

E-Modul Elastizitätsmodul, N/m².

E^A austenistisches Elastizitätsmodul, N/m².

E^M martensitisches Elastizitätsmodul, N/m².

$E^{M,A}$ martensitisches, austenistisches Elastizitätsmodul, N/m².

F

Fe	Chemisches Element Eisen.
FEM	Finite-Elemente-Methode.
FFGE	Ferromagnetischer Formgedächtniseffekt.
FFGL	Ferromagnetische Formgedächtnislegierungen.
FG	Formgedächtnis.
F_G	Gewichtskraft, Newton.
FGE	Formgedächtniseffekt.
FGL	Formgedächtnislegierung.
FM	Frequenzmodulation.
FWHM	<i>Full-width at half-maximum</i> , Halbwertsbreite.
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe.

G

g	Gravitation, Newton.
g	Masse, Gramm.
G	Giga, 10^9 .
G	Einheit der magnetischen Flussdichte, Gauss, $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.
Ga	Chemisches Element Gallium.

H

h	Stunde.
HF	Chemische Säure, Flusssäure.
HNO₃	Chemische Säure, Salpetersäure.
H₂O	Wasser.
Hz	Frequenz, Hertz.

I

IC Integrated Circuit.

IMT Institut für Mikrostrukturtechnik.

IR Infrarot.

J

J Stromdichte, $J = \frac{I}{A}$.

K

k kilo, 10^3 .

K Absolute Temperatur, Kelvin.

L

LRF *Laser Range Finder.*

LVD *Large Vertical Displacement.*

M

μ micro, 10^{-6} .

m meter.

m milli, 10^{-3} .

M Mega, 10^6 .

M-Phase martensitische Niedertemperaturphase.

MBE *Molecular Beam Epitaxy.*

M_d kritische Temperatur beim pseudoelastischen Effekt.

MEMS Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme.

M_f martensitische Endtemperatur.

min	Minute.
Mio	Million, 10^6 .
Mn	Chemisches Element Mangan.
Mo	Chemisches Element Molybdän.
MOEMS	Mikro-Optische-Elektro-Mechanische-Systeme.
MRT	Institut für Mess- und Regelungstechnik.
MS	Magnetostriktion.
M_s	martensitische Starttemperatur.
N	
n	nano, 10^{-9} .
N	Kraft, Newton, $1N = 1kg \cdot \frac{m}{s^2}$.
Na	Chemisches Element Natrium.
Nd	Chemisches Element Neodym.
Nd:YAG	Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat-Laser, Festkörperlaser mit 1064 nm Wellenlänge.
Ni	Chemisches Element Nickel.
NIR	Nahes Infrarot, Wellenspektrum des Lichts.
NITINOL	<i>Nickel Titan Naval Ordnance Laboratory.</i>
O	
Ω	Elektrischer Widerstand, Ohm.
O	Chemisches Element Sauerstoff.
P	
P	Elektrische Leistung, $P = U \cdot I$.
Pa	Einheit für mechanischen Druck, Pascal, $1 Pa = 1 \frac{N}{mm^2}$.

PC	Personal Computer.
Pd	Chemisches Element Palladium.
PID	Proportional integrierend differenzierend, Regler-Charakteristik.
PSD	Positionempfindlicher Photodetektor, Halbleiterdetektor.
PVA	Polyvinyl-Alkohol, Kunststoff.
PVD	<i>Physical Vapour Deposition.</i>
PZT	Metallische Legierung Blei-Zirkonat-Titanat.
R	
RF	<i>Radio Frequency</i> , Hochfrequenz.
RT	Raumtemperatur.
S	
σ	Mechanische Spannung, 1 Pa = 1 N/m ² .
$\sigma^{M,A}$	Maximale mechanische Spannung für M-Phase und A-Phase, 1 Pa = 1 N/m ² .
σ_{rec}	Reversible mechanische Spannung, 1 Pa = 1 N/m ² .
$\sigma_{y(M)}$	Martensitische Restspannung, 1 Pa = 1 N/m ² .
s	Sekunde.
Si	Chemisches Element Silizium.
Sm	Chemisches Element Samarium.
SOI	<i>Silicon on Insulator.</i>
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i> , Magnetfeld-Sensor.
SRAM	<i>Static Random Access Memory.</i>

T

T Einheit der magnetischen Flussdichte, Tesla.

Ta Chemisches Element Tantal.

Tb Chemisches Element Terbium.

T_C Curietemperatur.

Ti Chemisches Element Titan.

TOF *Time-of-Flight*, Lichtlaufzeitmessung.

TTL Transistor-Transistor-Logik, Logikfamilie mit 5 V Signalpegel.

U

U Elektrische Spannung, Volt.

Upm Umdrehung pro Minute.

USB *Universal Serial Bus*.

V

V Einheit für Elektrische Spannung, Volt.

v Strömungsgeschwindigkeit, m/s.

W

W Einheit für die elektrische Leistung, Watt.

W elektrische Energie, $[W] = W \cdot s$.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Hornbeck, Digital Light Processing™: A New MEMS-Based Display Technology, Texas Instruments, white paper, (2002).
- [2] R. Guerre, F. Fahm and P. Renaud, 1x2 MEMS optical switch with Sub 10 μ s switching speed inside silicon gold coated planar hollow waveguides (PHW), Proc. of IEEE Optical MEMS Conference (MOEMS), Oulu, Finland, August 1-4, 2005, S. 115–116.
- [3] J. Kim, D. Christensen and L. Lin, 2-D Scanning mirror using plastically deformed angular vertical comb drive actuator, Proc. Transducers 2005, Seoul, Korea, June 5-9, 2005, S. 697–700.
- [4] J. Yan, S. Luanava and V. Casasanta, Magnetic actuation for MEMS scanners for retinal scanning displays, Proceedings of SPIE, Vol. 4985, MOEMS Display and Imaging Systems, (2003), S. 115–120.
- [5] M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka and T. Takagi, A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA thin films, Proc. Transducers 2003, Boston, USA, June 8-12, 2003. Journal of Sensors and Actuators A 114, (2004), S. 445–450.
- [6] D. Stöckel, P. Tautzenberger, F. Ritter and E. Hornbogen, Legierungen mit Formgedächtnis (Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen), Expert Verlag (Ehningen), 1988.
- [7] J. Grade, K. Yasumura and H. Jerman, A DRIE comb–drive actuator with large, stable deflection range for use as an optical shutter, Proc. Transducers 2003, Boston, USA, June 8-12, 2003, S. 568–571.
- [8] P. Patterson, D. Hah, H. Nguyen, H. Toshiyoshi, R. Chao and M. Wu, A scanning micromirror with angular comb drive actuation, Proc. 15th IEEE Int. Micro Electro Mech. Syst. Conf., MEMS 2002, Las Vegas, USA, January 20-24, 2002, S. 544–547.
- [9] A. Garnier, T. Bourouina, E. Orsier, T. Masuzawa, H. Fujita, T. Hiramoto and J. Peuzin, A fast, robust and simple 2-D micro-optical scanner based on contactless magnetostrictive actuation, Proc. 13th IEEE Int. Micro Electro Mech. Syst. Conf. (MEMS 2000), Miyazaki, Japan, Januar 23-27, 2000, S. 715–720.

- [10] E. Quandt, B. Gerlach and K. Seemann, Preparation- and applications of magnetostrictive thin films, *J. Appl. Phys.*, 76 (10), (1994), S. 7000–7002.
- [11] G. Gerlach and W. Dötzel, *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*, 1st edition, Hanser Verlag (München), 1997.
- [12] S. Schweizer, S. Calmes, M. Laudon and P. Renaud, Thermally actuated optical microscanner with large angle and low consumption, *Journal of Sensors and Actuators* 76, (1999), S. 470–477.
- [13] *Fundamentals of quartz oscillators*, Hewlett Packard, application note 200-2, (1997), S. 10.
- [14] R. Filler, The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators: a review, *IEEE Trans. on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 35(3), (1988), S. 297–305.
- [15] N. Kikuchi, Y. Haga, M. Maeda, W. Makishi and M. Esashi, Piezoelectric 2D micro scanner for minimally invasive therapy fabricated using femtosecond laser ablation, *Proc. Transducers 2003*, Boston, USA, June 8-12, 2003, S. 603–606.
- [16] *Tutorium: Nanopositionieren mit Piezos*, Physik Instrument GmbH (PI), Germany, 2004.
- [17] B. Winzek, S. Schmitz, H. Rumpf, T. Sterzl, R. Hassdorf, S. Thienhaus, J. Feydt, M. Moske and E. Quandt, Recent developments in shape memory thin film technology, *Mater. Sci. Eng.* A378, (2004), S. 40–46.
- [18] M. Bendahan, J. Seguin, P. Canet and H. Carchano, NiTi shape memory alloy thin films: composition control using optical emission spectroscopy, *Thin Solid Films* 283, (1996), S. 61–66.
- [19] H. Holleck, S. Kirchner, E. Quandt and P. Schloßmacher, Preparation and characterization of NiTi SMA thin films, *Proc. 4th. Int. Conf. Actuator 94*, Bremen, June 15-17, 1994, S. 361–364.
- [20] E. Quandt and H. Holleck, Shape Memory Thin Films of the System Ti-(Ni-Pd-Cu), *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 459, (1997), S. 465–470.
- [21] K. Melton, Ni-Ti Based Shape Memory Alloys, in: *Engineering aspects of shape memory alloys*, Butterworth–Heinemann Ltd., (London), 1990, S. 28-34.
- [22] P. Krulevitch, P. Ramsey, D. Makowiecki, A. Lee, M. Northrup and G. Johnson, Mixed–sputter deposition of Ni–Ti–Cu shape memory films, *Thin Solid Films* 274, (1996), S. 101–105.
- [23] S. Miyazaki and K. Nomura, Development of perfect shape memory effect in sputter-deposited Ti–Ni thin films, *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, MEMS94*, Kanagawa, Japan, January 25-28, 1994, S. 176–181.
- [24] B. Winzek and E. Quandt, Shape-memory Ti-Ni-X-films (X = Cu, Pd) under constraint, *Zeitschrift für Metallkunde* 90 (10), (1999), S. 796–802.

- [25] J. Tellinen, I. Suorsa, A. Jääskeläinen, I. Aaltio and K. Ullakko, Basic properties of magnetic shape memory actuators, Proc. Actuator 2002, 8th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, June 10-12, 2002, S. 566–569.
- [26] P. Webster, K. Ziebeck, S. Town and M. Peak, Magnetic order and phase transformation in Ni_2MnGa , Philos. Mag. B. 49, No. 3, (1984), S. 295.
- [27] K. Ullakko, J. Huang, C. Kantner, R. C. O’Handley and V. Kokorin, Large magnetic-field-induced strains in Ni_2MnGa single crystals, Appl. Phys. Lett. 69 (13), (1996), S. 1966–1968.
- [28] M. Matsumoto, T. Takagi, J. Tani, T. Kanomata, N. Muramatsu and A. Vasil’ev, Phase Transformation of Heusler Type $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ ($x = 0 \dots 0.19$), Mater. Sci. Eng. A273-275, (1999), S. 326–328.
- [29] M. Kohl, K. Yamauchi, M. Ohtsuka and T. Takagi, Aktor für einen optisch–mechanischen Scanner sowie Verfahren unter Verwendung des Aktors, EP1488103, PCT/EP03/02382, (2003).
- [30] A. Sozinov, A. Likhachev, N. Lanska and K. Ullakko, Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase, Appl. Phys. Lett. Vol. 80(10), (2002), S. 1746–1748.
- [31] J. Dong, J. Xie, J. Lu, C. Adelman and C. Palmstrøm, Shape memory and ferromagnetic shape memory effects in single-crystal Ni_2MnGa thin films, J. Appl. Phys., 95 (5), (2004), S. 2593–2600.
- [32] M. Suzuki, M. Ohtsuka, T. Suzuki, M. Matsumoto and H. Miki, Fabrication and characterisation of sputtered Ni_2MnGa thin films, Mat. Trans., JIM, Vol. 40(10), (1999), S. 1174–1177.
- [33] M. Kohl, V. Chernenko, M. Ohtsuka, H. Reuter and T. Takagi, Magnetic properties of submicron Ni-Mn-Ga martensitic thin films, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 855E, online publication, (2005), S. W2.8.1–W2.8.6.
- [34] M. Marioni, R. O’Handley and S. Allen, Analytical model for field-induced strain in ferromagnetic shape-memory alloy polycrystals, J. Appl. Phys. 91 (10), (1996), S. 7807–7809.
- [35] K. Bhattacharya, A. DeSimone, K. Hane, R. James and C. Palmstrøm, Tents and tunnels on martensitic films, Mat. Sci. Eng. A, A273–275, (1999), S. 685–689.
- [36] K. Petersen, A new age for MEMS, Proc. Transducers 2005, Seoul, Korea, June 5-9, 2005, S. 1–4.
- [37] H. Schenk, P. Dürr, D. Kunze, H. Lakner and H. Kück, A resonantly excited 2D-micro-scanning-mirror with large deflection, Sensors and Actuators A 89, (2001), S. 104–111.
- [38] H. Urey, A. Yalcinkaya, T. Montague, D. Brown, R. Sprague, O. Anac, C. Ataman and I. Basdogan, Two-axis MEMS scanner for display and imaging applications, Proc. of IEEE Optical MEMS Conference (MOEMS), Oulu, Finland, August 1-4, 2005, S. 17–18.

- [39] A. Jain and H. Xie, An electrothermal SCS micromirror for large bi-directional 2-D scanning, Proc. Transducers 2005, Seoul, Korea, June 5-9, 2005, S. 988–991.
- [40] R. Hassdorf, J. Feydt, R. Pascal, S. Thienhaus, M. Boese, T. Sterzl, B. Winzek and M. Moske, Phase Formation and Structural Sequence of Highly-Oriented MBE-Grown NiTiCu Shape Memory Films, Mat. Trans. 43, (2002), S. 933-938.
- [41] S. Hoffmann and M. Kohl, Entwicklung eines Mikroventils mit Formgedächtnisantrieb für die Laboranalytik, Diplomarbeit, Fachhochschule Karlsruhe, (2000).
- [42] Y. Liu and M. Kohl, Formgedächtnis–Mikroventile mit hoher Energiedichte, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6934, Dissertation, Universität Karlsruhe, (2003).
- [43] B. Krevet and M. Kohl, Simulation of a ferromagnetic shape memory actuator in a magnetic field, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 881E, (2005).
- [44] B. Krevet, Nonlinear magnetic field calculation using dipole approximation, IEEE Transactions on Magnetics, 28, (1992), S. 1060–1063.
- [45] J. Boyd and D. Lagoudas, A thermodynamical constitutive model for the shape memory effect due to transformation and reorientation, Proc. Int. Soc. Opt. Eng., 2189, (1994), S. 276–288.
- [46] ZEMAX® Software for optical design, Broschüre, ZEMAX Development Corporation, www.zemax.com, (2004).
- [47] W. Beitu and K.-H. Küttner, Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Aufl., Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [48] M. Kohl, S. Hoffmann, Y. Liu, M. Ohtsuka and T. Takagi, Optical scanner based on a NiMn-Ga thin film microactuator, Int. Conf. on Martensitic Transf. (ICOMAT 02), Proc. Journal de Physique IV, 112, (2003), S. 1185–1188.
- [49] Spezifikation des ALASCA®–Laserscanners, IBEO Automobil Sensor GmbH, Internetseiten des Unternehmens, 2005.
- [50] DIN EN 60825-1, Sicherheit von Laser-Einrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2003.
- [51] Scanner technology, IBEO Automobil Sensor GmbH, Internetseiten des Unternehmens, 2005.
- [52] A. Kapp and D. Brugger, Miniaturized laserscanner for vehicles, VDI-Gesellschaft 2004, 21th Int. VDI-VW-Gemeinschaftstagung Integrated Safety and Driver Assistance Systems, VDI-Berichte 1864, (2004), S. 239–249.
- [53] Pulsed Laser Diodes, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Datenblatt, 2002, S. 1–2.

- [54] Photodetector-Amplifier Module 313A, Datenblatt, Analog Modules Inc.: www.analogmodules.com, (2004).
- [55] P. Meer, D. Mintz and A. Rosenfeld, Robust regression methods for computer vision: a review, *Int. Journal of Computer Vision* 6, (1991), S. 59–70.
- [56] A. Kapp, Robust object segmentation and parametrization of 3D lidar data, *Proc. IEEE intelligent vehicles symposium, Las Vegas, USA, Juni 6-8, 2005*, S. 693–698.

Publikationsliste

Die im Zusammenhang dieser Arbeit entstandenen Publikationen sind im Folgenden aufgelistet:

M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka and T. Takagi, A novel actuation mechanism based on ferromagnetic SMA thin films, Proc. Transducers 03, Boston, USA, June 8-13, 2003, S. 1011-1014.

M. Kohl, D. Brugger, Formgedächtnis–Mikroscanner, 5. Statuskolloquium d. Programms Mikrosystemtechnik, FZKA 6990, Forschungszentrum Karlsruhe, 2004, S. 229-230.

M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka and T. Takagi, A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA thin films, Journal of Sensors and Actuators A, 114, (2004), S. 445-450.

M. Kohl, D. Brugger and B. Krevet, Ferromagnetic Shape Memory Microscanner, Selected for Participation in Photonics Innovation Village, „Best Photonics Dev.“-Award, SPIE Photonics Europe, Strasbourg, France, April 27-30, 2004.

D. Brugger, M. Kohl, B. Winzek and S. Schmitz, Optical microscanner based on a SMA thin film composite, Proc. Actuator 2004, 9th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, June 14-16, 2004, S. 90-93.

A. Kapp, D. Brugger, Miniaturized laserscanner for vehicles, VDI-Gesellschaft 2004, 21th Int. VDI-VW-Gemeinschaftstagung Integrated Safety and Driver Assistance Systems, Wolfsburg, October 27-29, 2004, VDI-Berichte 1864, 2004, S. 239-249.

D. Brugger, M. Kohl, B. Krevet, B. Winzek and S. Schmitz, 2 DOF Optical Microscanner with Large Deflection Angles, Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS 2005, Oulu, Finland, August 1-4, 2005, S. 77-78.

D. Brugger and A. Kapp, Miniaturized Laserscanner for Automotive Applications (Special issue: Student Poster Session), Proc. 10th Int. Conf. on the Commercialization of Micro and Nano Systems (COMS 2005), Baden-Baden, August 22-25, 2005, S. 655-658.

D. Brugger, M. Kohl, U. Hollenbach, A. Kapp and C. Stiller, Ferromagnetic Shape Memory Microscanner System for Automotive Applications, Proc. E-MRS 2005, Symposium C, Warsaw, Poland, September 12-16, 2005. To be published in IJAEM.

D. Brugger, M. Kohl, and B. Krevet, Ferromagnetic Shape Memory Microscanner with Large Deflection Angles, Proc. E-MRS, Fall Meeting 2005, Symposium C, Warsaw, Poland, September 12-16, 2005. To be published in IJAEM.

B. Krevet, M. Kohl and D. Brugger, Coupled simulation of the thermo-magneto-mechanical properties of a Ni-Mn-Ga actuator, Proc. of. E-MRS, Fall Meeting 2005, Symposium C, Warsaw, Poland, September 12-16, 2005. To be published: Int. J. Appl. Electromag. Mech., 2006

M. Kohl, B. Krevet, M. Ohtsuka, D. Brugger, Y. Liu, Ferromagnetic Shape Memory Microactuators (Special issue on Shape Memory Alloys). To be published: Mat. Trans., The Japan Institute of Metals (JIM), 2006.

M. Kohl, D. Brugger, B. Krevet, Ferromagnetic Shape Memory Actuator for Large 2-D Optical Scanning, Istanbul, Turkey, January 22-26, 2006. To be published: Proc. 19th IEEE Int. Micro Electro Mech. Syst. Conf. (MEMS 2006), 2006.

A. Kapp and D. Brugger, Konzept und Aufbau eines Laserscanners mit Mikroaktoreinheit, Freiburg/Breisgau, March 13-14, 2006. To be published: VDI-Berichte, Sensoren und Messsysteme, 2006.

Index

- Änderung
 - Temperatur-, 7
- Ätzfortschritt, 28
- A-Phase, 9
- Abkühlen, 11, 35, 45
- Ablagerungen, 13
- abtasten, 18
- Achse
 - x-, 115
 - Y-, 53
- Ätzlösung, 28–30
- A_f , 10
- Aktor
 - mechanismus, 25
 - system, 51, 52, 55
 - angular vertical comb drive, 4
 - Dünnschicht-, 28, 34, 35, 37, 38
 - Doppelbiegebalken-, 23
 - elektrostatischer, 1
 - ferromagnetischer NiMnGa-, 85
 - Linear-, 8
 - magnetischer Verbundschicht-, 57
 - Ni₂MnGa FG-Dünnschicht-, 47
 - Spiegel-, 3, 21, 50
 - Test-, 48, 51
- Aktoren, 15
- Aktorprinzip, 57
 - elektrostatisch, 1
- Aktorstruktur, 21
- Algorithmus
 - Signalverarbeitungs-, 107
- Amplitude
 - Spannungs-, 63, 66
- Anlage
 - Bedampfungs-, 28
 - Sputter-, 88
- Arbeit
 - erzielbare, 15, 17
- Arbeitsfrequenz, 21
- Arbeitstemperatur
 - bereich, 47
- A_s , 10
- Aufbau
 - Versuchs-, 34
- Aufbau- und Verbindungstechnik, 25
- Aufheizen, 35
- Auflösung, 35
 - Mess-, 36
 - Orts-, 36
- Ausbeute, 34
- Auslenkung
 - Vor-, 7
- Ausleuchtung
 - flächige, 107
- Austenit, 9, 10
 - kubisch raumzentriert, 9
- B2, 13
- Belichtung
 - lithographische, 30
- Bereich
 - Eindeutigkeits-, 111
 - Mess-, 35
 - Sicht-, 19
 - Spektral-, 35
- Betrieb
 - 2D-, 103
 - elektrothermischer, 35
 - Resonanz-, 5
 - Semibipolar-, 8
 - statischer, 8

-
- Bewegung
 - Ausgleichs–, 10
 - Biegebalken
 - Doppel–, 36
 - Biegung, 5, 78
 - initiale, 31
 - Bild
 - Falschfarben–, 48
 - Graustufen–, 48
 - Intensitäts–, 110
 - Tiefen–, 110
 - Bimetall
 - verbund, 83
 - bimorph, 6
 - Biokompatibilität, 13
 - Block
 - Heiz–, 36
 - Kühl–, 36
 - Bonden
 - Thermokompressions–, 32
 - BTO, 8
 - Charakteristik
 - Material–, 34
 - Regel–, 66
 - comb drive, 4
 - Computer, 109
 - Curietemperatur, 55
 - Dünnsfilm, 25
 - material, 16
 - freistehender, 26
 - Ni₂MnGa, 29
 - Ni₂MnGa–, 26, 28, 30
 - stöchiometrischer, 17
 - Darstellung
 - grafische, 109
 - Daten
 - CAD–, 31
 - Roh–, 107
 - Datenbus
 - bidirektionaler, 109
 - Defekt
 - Gitter–, 10
 - Dehngrenze, 44
 - Dehnung, 12, 43
 - Demonstrator
 - 1D–Laserscanner–, 66
 - Detektor
 - Schwellwert–, 113
 - Diagramm
 - Spannungs–Dehnungs–, 12
 - Spannungs–Dehnungs–Temperatur, 11
 - x–y–, 120
 - Dichte
 - Energie–, 8
 - Dicke
 - Verbundschicht–, 81
 - Differenz
 - Leistungs–, 62
 - Dimensionen
 - zwei, 101
 - DMD™, 1
 - Domäne
 - magnetische, 23
 - Doppelbiegebalken, 59
 - Testaktor, 48
 - Teststruktur, 43, 44, 52, 55
 - struktur
 - optimierte, 80
 - Doppelbiegebalkenstruktur
 - thermisch optimierte, 83
 - Draht
 - Au–, 32
 - Dünnsfilm
 - Ni₂MnGa–, 17
 - Durchbiegung, 60
 - E–Modul, 7
 - Ebene
 - horizontale, 24
 - y–, 54
 - Effekt
 - Bimetall–, 15, 26, 57, 76, 77, 86, 87
 - Depolarisations–, 8
 - Einweg–, 10, 11, 14, 16
 - Formgedächtnis–, 9
-

- Piezoelektrischer, 8
- Pseudoelastischer, 12
- Riesen-Magnetostriktion, 5
- Zweiweg-, 11, 17
- Eigenschaft
 - ferromagnetische, 93
- Einkristall, 13
- Einwirkung
 - thermische, 31
- Einzelnsensor, 18
- Elastizitätsmodul, 43
- Elektrofotografie, 18
- EModul
 - temperaturabhängiges, 36
- Empfangseinheit, 117
- Endpunkt, 97
- Energie
 - Biegungs-, 17
 - Dehnungs-, 17
 - Scherungs-, 17
 - Schweiß-, 33
- Energiedichte, 11
- Entfernungsinformation, 19
- entzwilligen, 9, 12
- Epoxykleber
 - Zweikomponenten-, 32
- Ermüdung, 21
- Erwärmung, 7, 11
- Experiment
 - Biegebalken-, 36, 37
- Füge
 - partner, 34
- Fabrik
 - Wafer-, 21
- Faktor
 - Q-, 72, 85
- Feder
 - Rückstell-, 4
- Federelement
 - Torsions-, 5
- Fehlerrate, 33
- Feld
 - beitrag, 6
 - Gradienten-, 62
- Feldlinien, 62
- Feldstärke, 8
- Ferroelektrika, 8
- FFGL, 15
- FGL, 10, 13, 22
- Filter
 - Kalman-, 117
- Fingerstruktur, 22
- Fläche
 - aktive, 38
 - photoempfindliche, 37
 - Querschnitts-, 50
- Flanke
 - abfallende, 35
 - ansteigende, 35
- Formgedächtnis
 - gestalt, 24, 27, 68
 - gestalt, eingeprägte, 44
 - legierung, ferromagnetische, 2
- Formgedächtnislegierung, 28
 - ferromagnetische, 2
- Formumwandlung
 - erzwungene, 14
- Frequenz
 - verhältnis, 97, 98, 101
 - verhalten, 85
 - Arbeits-, 58
 - Bildwiederhol-, 22, 102, 105
 - Eigen-, 85
 - Puls-, 63
 - Resonanz-, 7, 8, 83
- Funktion
 - Hysterese-, 66
- Galvanik, 22
- Gas
 - Ar-, 26
 - N₂-, 37
- Gedächtnisgestalt, 10
- Genauigkeit, 36
- Geschwindigkeit

-
- Relativ-, 111
 - Strömungs-, 51
 - Gesetz
 - Reflexions-, 18
 - Gestaltsänderung, 15
 - Gewicht
 - Mikro-, 36
 - Größenordnung, 5, 15, 22
 - Heizen, 45
 - elektrisches, 89
 - Widerstands-, 7
 - Heusler $L2_1$, 16
 - Hilfsmasse, 99
 - Hochtemperaturphase, 10
 - Hysterese, 45
 - breite, 45
 - Temperatur-, 10
 - Intensität, 100
 - IR
 - Kamerasystem, 48
 - Isolierschicht
 - thermische-, 32
 - Kühlung
 - Detektor-, 35
 - konvektive, 49, 50, 55, 62
 - Kühlzeit, 46
 - Kamera
 - Mono-, 110
 - Kantenrauigkeit, 31
 - Kapazität
 - Wärme-, 34
 - Kenndaten
 - Material-, 43
 - KenngroÙe
 - mechanische, 36
 - Kennlinie
 - Auslenkung-Frequenz-, 50, 52, 65
 - Auslenkung-Leistung-, 63, 81
 - Auslenkung-Temperatur-, 43, 45
 - Luftstrom-Spannung-, 50
 - Scanwinkel-Frequenz-, 65, 67, 68, 73, 74, 83, 95
 - Scanwinkel-Leistung-, 62, 69-72
 - Temperatur-Leistung-, 49, 50
 - temperaturabhängige Widerstands-, 36
 - Widerstand-Temperatur-, 46, 48, 49
 - Widerstands-Temperatur-, 50
 - Kippwinkel, 1
 - Klebeverbindungen, 32
 - Koeffizient
 - Ausdehnungs-, 15
 - Emissions-, 35
 - Längenausdehnungs-, 7
 - Steifigkeits-, 44
 - Wärmeausdehnungs-, 26
 - Kondensator
 - Platten-, 4
 - Konstante
 - Dielektrizitäts-, 4
 - Kontakt
 - fläche, 32
 - pad, 32
 - elektrischer, 32
 - Kontakte
 - elektrische, 32
 - Kontaktierung
 - elektrische, 32, 34, 36
 - Kontaktpad, 36
 - Kopplung
 - thermische, 52
 - Korrosionsbeständigkeit, 13
 - Kräfte
 - antagonistische, 54
 - Quer-, 64
 - Kräfteverhältnis, 24
 - Kraft
 - einleitung, 92
 - Formgedächtnis-, 11
 - Lorentz-, 6, 22, 73, 74
 - mechanische, 12
 - Rückstell-, 24, 86
 - Kristall
 - ebene, 8
-

- matrix, 13
- struktur, 13
- Kristallgitter, 9, 10
 - kubisch flächenzentriert, 16
 - tetragonal flächenzentriert, 16
- Kristallstruktur, 16
- Kriterium
 - Hauptauswahl–, 38
- Kryostat
 - stickstoffgekühlter, 36, 37
- Kupfer
 - block, 51, 52
- Lüfter, 50
- Labornetzteil
 - spannungsstabilisiertes, 62
- Lack
 - Photo–, 29
- Ladung
 - bewegte, 6
- Laser
 - diode, 66
 - schutzklasse, 112
 - schweißen, 33
 - Festkörper–, 30, 111
 - Halbleiter–, 2, 94, 111
- Laserdiode
 - nanostack*–, 112
 - Hochleistungs–Halbleiter–, 107, 109
- Laserscanner, 18
 - System, 2
- Laserstrahl, 37
 - fokussierter, 37
- Last
 - kapazitive, 8
 - mechanische, 36
- Legierung, 13
 - binäre, 14
 - ferromagnetische Ni₂MnGa–, 117
 - FG–, 27
 - Formgedächtnis–, 10, 14, 35
 - konventionelle, 12
 - metallische, 30
 - Ni₂MnGa FG–, 44
 - Ni₂MnGa–, 15, 23, 43, 55, 83
 - NiTiCu–, 14, 25, 30
 - TbDyFe–, 5
 - ternäre, 14
 - ternäre, metallische, 13
- Legierungs
 - zusammensetzung, 45
- Legierungspartner, 26
- Legierungszusammensetzung, 26
 - stöchiometrische, 13
- Leistung
 - elektrische, 7
 - elektrische Heiz–, 66
 - Laser–, 31
 - maximale, 33
 - RF–Sputter–, 26
 - Schweiß–, 33
- Leistungs
 - regulierung, 33
- Licht
 - laufzeit, 19
 - UV–, 30
- Lissajous
 - Figur, komplexe, 97
 - figur, 97
- Luftspalt, 93
- Luftstrom, 50
- M–Phase, 9
- Magnet
 - Dauer–, 6
 - NdFeB–, 6
 - Permanent–, 23, 77, 87, 93
 - SmCo–, 59
- Magnetfeld, 5, 6, 22
 - Untersuchung, 15
- Magnetisierung, 6, 15
 - Sättigungs–, 53
- Magnetisierungsänderung, 57
- Magnetometer
 - SQUID–, 53
- Makro

- objektiv, 35
- Martensit, 9, 12
 - struktur, 9
 - variante, 15
 - varianten, 12
 - zwillinge, 9, 12, 15
- Maske, 30
- Masse
 - Hilfs–, 101
- Material
 - kenndaten, 43
 - Dünnschicht–, 13
 - Kompakt–, 13, 15, 17
 - piezoelektrisches, 8
- Materialeigenschaft
 - anisotropische, 13
- Maxima, 68
- MEMS
 - Konfektionierung, 21
 - Verpackungen, 21
- Messbereich, 35
- Messgenauigkeit, 36
- Messmethode
 - 4–Punkt–, 36
- Messung
 - DSC–, 46–48
 - Entfernungs–, 109
 - Widerstand–Temperatur–, 47
 - Widerstands–, 45, 46, 48
 - Winkel–, 109
- Methode
 - Analyse–, 34
- M_f , 10
- Mikroaktor, 16
 - 1D–, 2
 - 2D–, 2
 - LVD–, 23
- Mikrocontroller, 109
- Mikromechanik
 - Oberflächen–, 21
- Mikroskopie
 - Infrarot–, 35
- Mikrospiegel, 1, 32, 95
- Minima, 68
- Modulation
 - Amplituden–, 97
- Modus
 - Deformations–, 17
 - leistungsüberwacher, 33
 - qswitch–, 31
 - spannungsüberwacher, 33
 - stromüberwacher, 33
- MOEMS, 1
- Moment
 - magnetisches, 23, 73
 - Rückstell–, 4
 - Trägheits–, 7
- M_s , 10
- Multimeter
 - Digital–, 36
- Muster
 - Bewegungs–, 95
- Ni_2MnGa
 - nicht–stöchiometrisches, 16
 - stöchiometrisches, 15
- Niedertemperaturform, 11
- Niedertemperaturphase, 10
- NITINOL, 13
- Nullpunkt, 68
- Objekt
 - erkennung, 109
- Optik
 - Kollimator–, 111, 112
- Optischer
 - Kreuzverteiler, 1
 - Multiplexer, 1
- Parameter
 - Design–, 58
- Phase
 - Hochtemperatur–, 9, 10
 - intermetallische, 34
 - Kühl–, 37
 - Niedertemperatur–, 9, 10
- Phasen

- umwandlungstemperaturen, 26
- Phasenänderung, 34
- Phasengrenze, 10
- Phasenumwandlung, 34, 43, 45, 50
 - austenitische, 24
- Photolack
 - Positiv–, 30
- Polarisation
 - piezoelektrische, 8
- Position
 - Magnet–, 65
- Prinzip
 - Bimorph–, 8
 - Mess–, 37
- Probe, 45
- Programm
 - FEM–, 40
 - Raytracing–, 42
- Projektion, 71
- Prozess
 - Bond–, 32
 - CMOS–, 21
 - CMOS–MEMS, 23
 - diffusionsloser, 9
 - Opferschicht–, 21
 - Phasenumwandlungs–, 48
 - Schweiß–, 33
 - Sputter–, 26, 88
- Pseudoplastizität, 44
- Pulsweite, 63
- PVD, 13
- PZT, 8

- Rückstellfeder
 - intrinsische, 86
- Rückstellung
 - elastische, 86
- Radius
 - Krümmungs–, 62
- Rate
 - Abscheide–, 13
- Raum
 - dreidimensionaler, 107
 - zweidimensionaler, 107
- Referenz
 - kapsel, 34
- Reflexion, 37
- Regelung
 - PID–, 37
 - rückgekoppelte, 33
- Reproduzierbarkeit, 13
- Resonanz, 21–23, 99, 101
 - bereich, 68
 - moden, 83
- Richtung
 - x–, 54, 113
 - y–, 49, 113, 115

- Scanbereich
 - zweidimensionaler, 105
- Scanmuster, 101, 107
 - flächiges, 105
- Scanner, 18
 - makroskopische–, 18
- Scanwinkel, 5–8, 18, 20, 23, 25
 - mechanischer, 60
 - optischer, 18, 23, 37, 68
 - statischer, 8
- Schaltung
 - Parallel–, 47
- Schicht
 - FGL–Verbund–, 77
 - Graphit–, 35
 - Ni₂MnGa–, 26
 - Verbund–, 7, 30
- Schichtverbund, 5
 - bimorpher, 6
- Schirm, 71, 101
- Schnittbreite, 31
- Schutzschicht, 28, 29, 31
- Schweiß
 - energie, 33
- Schweißen
 - spalt, 99
 - Spalt–, 101
- Schweißpunkt, 33

- durchmesser, 34
- Schwingung
 - harmonische, 68
- Schwingverhalten
 - dynamisches, 38
- Sensor
 - Beschleunigungs–, 8
 - Hall–, 62
- Signal
 - zeit– und wertdiskretes, 109
- Signalverarbeitung, 109
- Simulation
 - FEM–, 52
 - Optik–, 115
- SOI, 22
- Sollbruchstelle, 59
- Spannung
 - Bimetall–, 79
 - Dehnungs–, 15
 - innere, 7
 - kompressive, 15
 - maximale, 33
 - mechanische, 8, 14
 - thermisch induzierte, 14
 - wiederherstellbare, 14
- Spannungen
 - intrinsische, 101
- Spannungs
 - überhöhung, 92
- Spektralbereich, 37
- Spiegel
 - element, 2
 - facette, 18
 - Ablenk–, 19
 - Einkoppel–, 19
 - Mikro–, 37, 59, 60
- Spiegelaktor
 - makroskopischer, 2
- Sprödigkeit, 13
- Sputter
 - leistung, 46
 - zeit, 26
- Sputtertarget
 - nicht–stöchiometrisches, 17
 - stöchiometrisches, 17
- Stöchiometrie, 13
- Startpunkt, 97
- Stegbreite, 28, 100
- Strahl
 - fokus, 33
- Strahlung
 - Wärme–, 35
- Strom
 - maximaler, 33
 - Photo–, 37
- Struktur
 - Dünnschicht–, 35
 - einkristalline, 17
 - Hilfs–, 101
 - Kamm–, 4
 - polykristalline, 17
 - Versetzungs–, 11
- Strukturen
 - Hilfs–, 94
- Strukturierung, 29
- Strukturtreue, 28, 30–32
- Substitution, 14
- Substrat, 13, 26
 - Keramik–, 29–31
 - stabilisierendes, 32
- Superelastizität, 12
- System
 - Aktor–, 50
 - Demonstrator–, 66
 - Feder–Masse–, 8, 72
 - Laserscanner–, 19, 107, 111
 - 2D–, 2
 - miniaturisiertes, 2
 - radarbasiert, 111
 - Telekommunikations–, 1
 - Vermessungs–, 36
 - Video–, 37
- Target, 13, 25, 26
- Technik
 - Display–, 21

- hochfrequenz-Sputter-, 17
- Klebe-, 32
- Technologie
 - nanostack*-, 112
 - Mikrostrukturierungs-, 25
- Temperatur, 35
 - änderung, 34
 - bereich, 45
 - differenz, 45, 93
 - hysterese, 14
 - niveau, 80
 - profil, 35
 - Curie-, 15, 17, 23, 45, 76, 86, 88
 - End-, 35
 - Phasenumwandlungs-, 45, 46
 - Proben-, 36
 - Raum-, 46
 - Schmelz-, 32
 - Start-, 35
 - Substrat-, 52
 - Umwandlungs-, 10, 14, 16, 34
- Temperaturverteilung
 - homogene, 43
- Tempern, 15
- Terfenol-D, 5
- Teststruktur
 - Doppelbiegebalken-, 34, 36, 45
- Theorie
 - Biegebalken-, 57
- Thermoelement
 - PT100-, 36
- Tiefpass
 - verhalten, 96
- trainieren, 11
- trimorph, 6
- Umfelderfassung
 - hochaufgelöste, 107
- Umformung
 - kristalline, 8
 - starke Martensit-, 11
- Umkehrpunkt, 37
- Umwandlung
 - Martensit-, 12
 - martensitische, 9, 14
 - reversible, 9
- Umwandlungshysterese, 63
- Unterätzung, 28
- Unternehmen
 - start-up, 21
- Vakuum, 51, 52, 55
- Verbindungstechnik
 - kontaktlose, 33
- Verbund
 - Bimetall-, 83
- Verbundschicht, 8, 14, 31, 55
 - lagen, 26
 - bimorphe, 7
 - FG-, 47, 48
 - NiTiCu-, 25, 31, 44, 45, 48
- Verbundschichtaktor
 - magnetischer, 86
- Verfahren
 - DC-Magnetronsputter-, 26
 - Heißpress-, 26
 - Kontaktierungs-, 25
 - Kontaktierungsverfahren, 34
 - Kontaktschweiß-, 33
 - Lichtlaufzeit-, 110
 - Spaltschweiß-, 33, 34
 - Sputter-, 13
 - Zeilenscan-, 22
- Verformung
 - elastische, 43
 - irreversible, 9
 - irreversible, plastische, 11
 - plastische, 5, 10
 - reversible, 11
 - reversible Martensit-, 10
- Verhältnis
 - Puls-zu-Pausen-, 64, 83
 - Signal-zu-Rausch-, 112, 118
- Verhalten
 - dynamisches, 64, 66
 - Festigkeits-, 10

-
- gekoppeltes elektrisch–thermisches, 52
 - magnetisch anisotropes, 15
 - magnetisch isotropes, 15
 - Spannungs–Dehnungs–, 43
 - thermodynamisches, 51
 - zeitliches, 66
 - Verkippung, 60, 92
 - Verlauf
 - Sättigungs–, 53
 - Verspannungen
 - innere, 31
 - Verstärker
 - platine, 66
 - Versuch
 - Auslenkungs–, 44
 - Belastungs–, 43
 - Kryostat–, 61
 - Videokamera
 - CCD–, 36
 - Vorgang
 - Abkühl–, 35
 - Heiz–, 35
 - Wärme
 - abgabe, 50
 - fluss, 35
 - senke, 93
 - strom, 34
 - Wärmemenge
 - abgegebene, 34
 - aufgenommene, 34
 - Wärmesenke, 48
 - Wölbung, 31
 - Wafer
 - Hilfs–, 5
 - Si–, 21, 59
 - Widerstand
 - Übergangs–, 32
 - elektrischer, 36
 - Oberflächen–, 37
 - Winkel
 - Verkipp–, 60
 - Winkelmessung
 - hochaufgelöste, 66
 - integrierte, 107
 - x–Achse, 97
 - y–Achse, 97
 - Zeit
 - Pulspause–, 63
 - Zeitintervall, 33
 - Zellen
 - Elementar–, 8
 - Zusammensetzung, 26
 - stöchiometrische, 13
 - Zustand
 - paramagnetischer, 24
 - Zuverlässigkeit, 21
 - Zwillingsgrenzen, 11
-