

# **Entwicklung eines Antriebs- und Steuerungskonzeptes für eine Handprothese auf der Basis von aktiven Werkstoffen - ein Ansatz zur Ergänzung vorhandener Antriebssysteme von Fremdkraftprothesen**

## **Development of a drive and control concept for a hand prosthesis on the basis of active materials - an approach to complement existing drive systems of externally powered prostheses**

Christian Rotsch, André Bucht, Jakob Jung, Kenny Pagel, Andrea Böhm, Holger Kunze

### **Zusammenfassung**

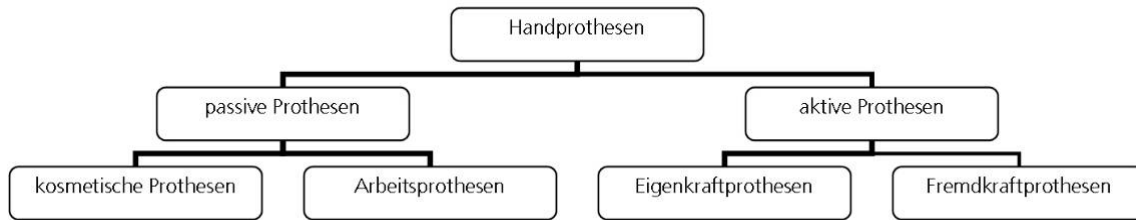
Drahtförmige Aktoren aus Formgedächtnismaterialien reagieren mit einer Kontraktionsbewegung, wenn sie über eine bestimmte Temperatur erwärmt werden. Neben einem sehr hohen volumenspezifischen Arbeitsvermögen besitzen sie auch die Möglichkeit zum „Self-Sensing“. Die Widerstandsänderung der Aktoren, welche durch die Längenänderung hervorgerufen wird, dient im vorliegenden Beispiel zur stufenlosen Steuerung eines Greifsystems nach dem Vorbild der menschlichen Hand.

### **Summary**

Wire-actuators from shape-memory materials respond with a contraction movement when they are heated to a certain temperature. Besides their very high volume-specific work output, they also have the ability for a "self-sensing" process. The change in resistance of the actuators, which is caused by the change in length, is used in the present example for a stepless control of a gripper system modelled on the human hand.

## **1. Einleitung**

Die Anforderungen an Handprothesen unterscheiden sich erheblich je nach dem gewünschten Einsatzzweck (s. Abb. 1) hinsichtlich ihrer Konstruktion, den eingesetzten Materialien und den Steuerungs- und Antriebssystemen. Die Einsatzfelder variieren hier von rein kosmetischen Exemplaren über myoelektrische Fremdkraftprothesen bis hin zu Prothesensystemen, die durch eine direkte Nervenbindung [1], [3] durch den Träger gesteuert werden können.



**Abb. 1: Einteilung von Handprothesen, nach [4]**

Eine weitere Untergliederung kann bspw. bei Betrachtung der unterschiedlichen Antriebskonzepte erfolgen. Aktuell eingesetzte Aktoren nach [2] sind u. a.:

- Elektromotoren (z. B. „Myohand“, Fa. Otto Bock)
- Fluidaktoren (z. B. „Fluidhand“, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH)
- Seilzüge, welche über Elektromotoren angesteuert werden. („Modular Prosthetic Hand – NTU, Hand III“, Universität Taiwan)
- Kombinationen unterschiedlicher Antriebsprinzipien.

Je höher üblicherweise die Anzahl der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade ist, desto komplexer und auch schwerer wird meist die Prothese. Bedingt durch den möglichen Bewegungsumfang, ist meist eine Positionsüberwachung der Finger bzw. der Hand notwendig. Hier müssen neben der notwendigen Aktorik auch Sensorikkomponenten integriert werden. Erfasst werden u. a. der Gelenkwinkel, die Kontaktkräfte im Bereich der Fingerkuppe oder auch die mechanische Spannung der eingesetzten Seilzüge zur Steuerung der Bewegungen der Prothesen [4], [7].

Bereits seit einigen Jahren arbeitet das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik auf dem Gebiet der Adaptronik mit dem Ziel, aufwendige und schwere Antriebssysteme durch aktive und adaptive Hybridstrukturen zu ersetzen [8]. Im vorliegenden Beitrag werden technische Möglichkeiten aber auch Grenzen der Aktorik auf Basis von Formgedächtnismaterialien für den Bereich der Prothetik dargestellt.

## 2. Konzept und technische Realisierung

### 2.1 Formgedächtnislegierungen als Aktor

Thermische Formgedächtnislegierungen (FGL) gehören zur Gruppe der aktiven Werkstoffe. Dabei handelt es sich um Materialien, die bei Einwirkung eines Feldes als Energiewandler zwischen der wirkenden Feldgröße und der mechanischen Energie fungieren. Bei thermischen Formgedächtnislegierungen ist das thermische Feld die entscheidende Größe. Im Unterschied zu Bimetallen entfaltet sich die aktorische Wirkung nur innerhalb eines schmalen Temperaturintervalls. Das Funktionsprinzip basiert auf einer reversiblen Gefügeumwandlung, die durch Temperaturänderungen veranlasst wird. Man spricht daher

von einem thermisch induzierten Formgedächtniseffekt (FGE). Aufgrund ihres hohen FGE werden vor allem Nickel-Titan-Legierungen (NiTi-Legierungen) eingesetzt. Thermische FGL besitzen die Fähigkeit zu einer reversiblen Phasenumwandlung zwischen der Hochtemperaturphase Austenit und der Tieftemperaturphase Martensit. Die zwei Gefügearten unterscheiden sich in einer Vielzahl physikalischer Eigenschaften, z. B. in ihrem Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Die Tieftemperaturphase ist durch mechanische Belastung leicht bleibend verformbar (Pseudoplastizität). Durch das Erwärmen kehrt das verformte Material in seine Ausgangsform zurück. Diese Materialeigenschaft nennt man daher ein Formgedächtnis.

Im Vergleich zu anderen möglichen Aktorprinzipien, wie Elektromotor oder Hydraulikantriebe, sind insbesondere das volumenspezifische Arbeitsvermögen (s. Abb. 2), bedingt durch die großen Stellkräfte (Spannungen bis über 200 MPa) sowie die akzeptablen Stellwege (Dehnungen bis vier Prozent bei einer hohen Lastwechselzyklenzahl)“ von Vorteil. Dies ermöglicht die Realisierung von Miniaturantrieben wie bspw. drahtförmigen Linearaktoren. Auffallend bei den FGL-Aktoren ist die Frequenzunabhängigkeit des Arbeitsvermögens. Dieses Verhalten liegt auch beim natürlichen Muskel vor, was den unter 2.2 dargestellten bionischen Ansatz unterstützt.

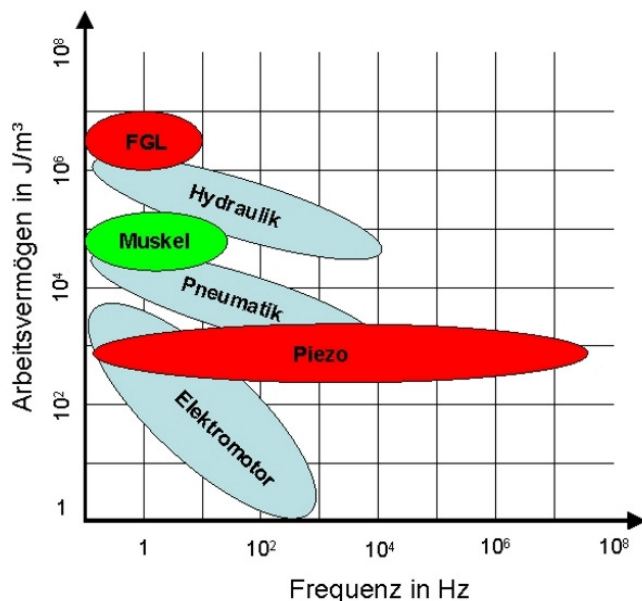


Abb. 2: Volumenspezifisches Arbeitsvermögen ausgewählter Aktoren [1]

## 2.2 Technische Realisierung und Ergebnisse

In ihrer Arbeitsweise ähneln die FGL-Aktordrähte Muskeln, woraus sich bionisch motivierte Entwurfsansätze ableiten lassen. Nach diesem Prinzip wurde ein Greifmechanismus aufgebaut, der als technische Abstrahierung der menschlichen Hand entstanden ist und

einen Ansatz zur Ergänzung vorhandener Antriebssysteme von Fremdkraftprothesen darstellt.

Das Hauptanliegen der Arbeiten am Fraunhofer IWU ist konzentriert auf die Entwicklung eines Antriebs- und Steuerungskonzeptes im Labormaßstab. Somit wird vorerst eine einfache Mechanik mit lediglich 4 Fingern eingesetzt und auf eine detailgetreue Nachbildung und kosmetische Aspekte verzichtet.

Die Aktordrähte sind im Unterarm aufgespannt und übertragen ihre Zugkraft über künstliche Sehnen auf die Finger. Um das Funktionsprinzip zu verdeutlichen, ist die Gelenkstruktur auf insgesamt neun Drehgelenke begrenzt, von denen sich zwei auf jedem der vier Finger und eins im Handgelenk befindet. Das ermöglicht die Ausführung eines sensiblen Griffes mit den Spitzen von Zeigefinger und Daumen (Pinzettengriff) und eines kraftvollen Griffes, bei dem Mittel- und Ringfinger einen Gegenstand gegen die Mittelhand drücken (Zylindergriff). Das Labormuster ist in Abb.3 dargestellt.



**Abb.3: Greifmechanismus, Funktionsmuster, links Pinzettengriff, rechts Zylindergriff [2]**

Die bereits beschriebene thermomechanische Energiewandlung findet nur beim Erwärmen der FGL-Aktoren (Einweegeffekt) statt. Die Beheizung erfolgt durch einen elektrischen Strom, was die problemlose Anpassung der Leistungszufuhr ermöglicht.

Als Voraussetzung für eine erneute Aktivierung muss der Draht beim Abkühlen gedehnt werden. Diese Funktion wird bei der Handprothese von Zugfedern wahrgenommen. In Kombination mit den Aktordrähten entsteht ein aus konstruktiver Sicht sehr einfacher Antriebsstrang.

Die eingesetzten Aktor-Drähte aus einer Nickel-Titan-Kupfer-Formgedächtnislegierung (NiTiCu-FGL) weisen im Gegensatz zu einer reinen NiTi-FGL einen linearen Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und mechanischer Dehnung auf, welcher als  $\Omega$ -Kennlinie bezeichnet wird [6]. Hierdurch ist es möglich die Position der einzelnen Finger indirekt über den Widerstand zu regeln, ohne diese eigentlich zu messen [8]. Da die elektrische Kontaktierung für die Leistungszufuhr zur Beheizung vorhanden ist, beschränkt sich der Aufwand für die Widerstandsmessung auf wenige ergänzende elektrische Bauelemente. Zur

vollständigen Abdeckung der Funktionalitäten wurde eine Mikrocontroller - basierte Ansteuerschaltung entworfen und programmiert. Die Messsignale (elektrische Spannung und elektrische Stromstärke) werden auf die Anlogschnittstelle des Controllers geführt, in dem die einzustellende Zufuhrleistung berechnet und wiederum als Signal ausgegeben wird.

Da sich der Zusammenhang zwischen Widerstand und Dehnung mit steigender Anzahl der Lastwechselzyklen verändert, ist es notwendig, die Aktoren in regelmäßigen Zeitabständen neu zu kalibrieren. Hierzu ist das Steuerprogramm mit einem Kalibriermodus ausgestattet, welcher nach dem Einschalten die Widerstände der Aktoren an definierten Positionen misst und somit die  $\Omega$ -Kennlinie ermittelt. Danach kann der Bediener die Fingerbewegungen über eine graphische Oberfläche vorgeben. Das Resultat der Entwicklung kann somit als „Self-Sensing-Aktor“ bezeichnet werden.

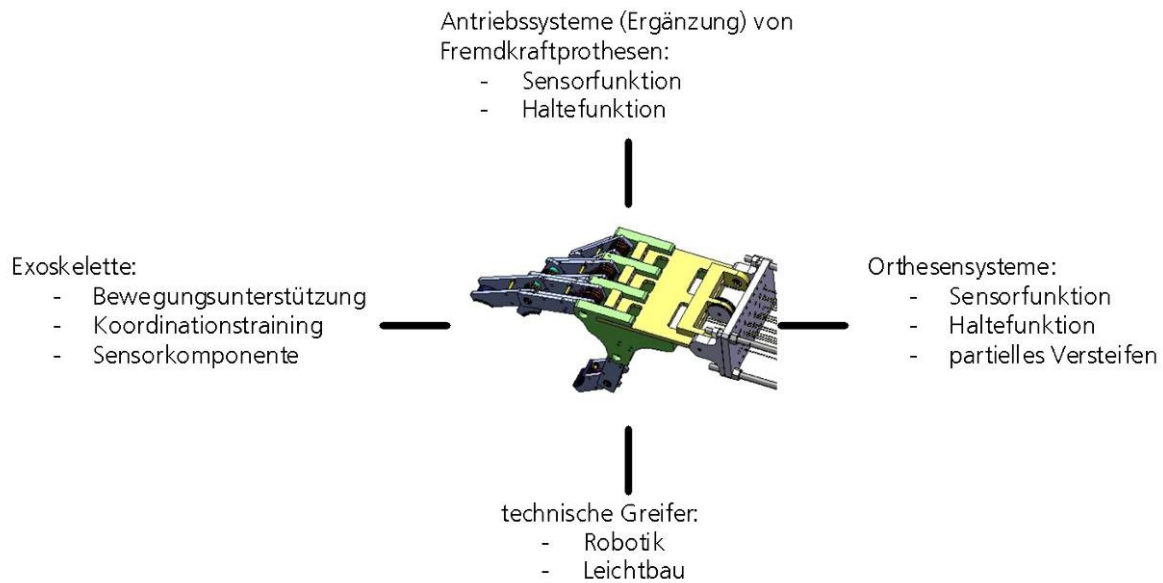
Für eine spätere Anwendung des entwickelten Greifsystems als Fremdkraftprothese ist die Einbindung von Steuerbefehlen, welche durch myoelektrische Elektrodensysteme erfasst werden, möglich.

### **3. Anwendungsfelder eines Self-Sensing-Aktors und Ausblick**

Das vorgestellte Prinzip eines Self-Sensing-Aktors auf Basis von NiTiCu-Drähten erlaubt neben der Handprothetik auch weitere Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Prothetik, Orthetik, aber auch in industriellen Anwendungen. Die vorliegenden Berechnungsmodelle erlauben die Anpassung der mechanischen Kenngrößen an die jeweiligen Anforderungen. Durch die geringen Abmessungen eines einzelnen Aktors, welche im hohen volumenspezifischen Arbeitsvermögen begründet sind, lässt sich die notwendige Aktorkraft bspw. durch die mechanische Verschaltung mehrerer NiTiCu-Drähte erhöhen.

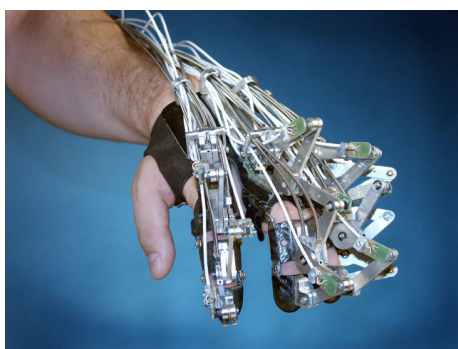
Da ein thermisches Feld zur Aktivierung genutzt wird, lässt sich die realisierbare Kraft aber nicht ohne die Betrachtung der thermischen Randbedingungen, wie Aufheizzeit, Isolationsvermögen des eingesetzten Gehäuses oder Abkühlzeit und der elektrischen Parameter, wie elektrischer Widerstand und Wirkungsgrad der Aktoren, verfügbare Stromquellen und zur Verfügung stehende und einkoppelbare Leistung, unbegrenzt steigern. Ein NiTiCu-Aktor ermöglicht somit den Aufbau und die Ergänzung vorhandener Antriebskonzepte von Fremdkraftprothesen.

Neben der Handprothetik werden ebenfalls Einsatzmöglichkeiten bei Bein- und Fußprothesen zur Bewegungsunterstützung gesehen.



**Abb. 4: Einsatzmöglichkeiten eines "Self-Sensing"-Aktors**

Durch ihren einfachen konstruktiven Aufbau ist die Anwendung der Aktoren auch im Bereich der Orthetik möglich. Hier können bspw. aktive Materialien zur partiellen und temporären Versteifung von Gelenken genutzt werden. Allgemein können die NiTiCu-Aktoren in allen Bereichen der Prothetik und Orthetik eingesetzt werden, in den auf Seilzugsysteme zurückgegriffen wird. Beispiele derartiger Anwendungen finden sich u. a. bei Exoskeletten im Hand- (s. Abb. 5) oder Beinbereich zur Bewegungsunterstützung oder zur messtechnischen Erfassung komplexer Bewegungen [2], [3]. Die Funktion derartiger Systeme wird durch die sensorischen und aktorischen Eigenschaften der NiTiCu-Drahtmaterialien unterstützt.



**Abb. 5: Hand-Exoskelett [2]**

Neben den rein medizintechnischen Anwendungen besteht auch die Möglichkeit des Einsatzes der NiTiCu-Aktoren in anderen interdisziplinären Gebieten. Sie bieten aufgrund ihrer hohen spezifischen Arbeitsdichte und der damit verbundenen kompakten Bauweise vielfältige Integrationsmöglichkeiten in vorhandene Systeme. Potentielle Einsatzfelder liegen

im Bereich der technischen Greifer für Industrieroboter oder auch möglicher zukünftiger Serviceroboter (s. Abb. 6) [9]



**Abb. 6: Technologieplattform, Projekt „Desire“ [9]**

## Literaturangaben

- [1] Burck, J., Michael J. Zeher, Robert Armiger und James D. Beaty: Entwicklung der modernsten Armprothese der Welt mit Model-Based Design, TheMathWorks News&Notes, 11 / 2009
- [2] Fleischer, C.: Exoskelette: Mit Hand und Fuß, Forschung AktUell, Nr. 51, September 2006, S. 22-24
- [3] Fleischer, C.: Controlling Exoskeletons with EMG signals and a Biomechanical Body Model, Dissertation, Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik, Technische Universität Berlin, 2007
- [4] Hoffmann, K.-P., M. C. Carrozza, S. Micera, K. P. Koch, K. Yoshida, R. Ruff: Die fühlende Handprothese – ein Projekt mit Zukunft, Orthopädie-Technik 8/07, S. 564 - 570
- [5] Jung, J.: Aufbau eines Greifmechanismus mit FGL-Drahtaktoren, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, 2009
- [6] Mertmann, M.: NiTi-Formgedächtnislegierungen für Aktoren der Greifertechnik. Fortschrittsbericht, VDI Reihe 5 Nr. 469. Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [7] Mounier, S.: Entwicklung einer realitätsnahen Krafrückkopplung bei fluidisch betriebenen Handprothesen, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 2004

- [8] Pagel, K., A. Bucht, J. Jung: Numerische Simulation des Aktivierungsverhaltens von thermischen Formgedächtnislegierungen, Vortrag, Model-Based Design Forum Germany 2009, Darmstadt, 26.09.2009
- [9] Reiser, U., R. Klausner, C. Parlitz, A. Verl: DESIRE WEB 2.0 - Integration Management and Distributed Software Development for Service Robots, Proceedings of the 14th Int. Conference on Advance Robotics (ICAR), 22-26 Jun. 2009, München, Deutschland