

CHRISTIAN RATHMANN

FORMGEDÄCHTNISAKTORSYSTEME ALS ENABLER FÜR SMARTE PRODUKT-SERVICE-SYSTEME



LEHRSTUHL FÜR
PRODUKTIONSSYSTEME

Formgedächtnisaktorsysteme als Enabler
für smarte Produkt-Service-Systeme

Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Christian Rathmann

aus Duisburg

Bochum 2017

Dissertation eingereicht am: 18.12.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 05.03.2018

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Malik Čabaravdić

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 5/2018

Christian Rathmann

**Formgedächtnisaktorsysteme als Enabler
für smarte Produkt-Service-Systeme**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6174-1

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorveröffentlichungsverzeichnis

- [1] RATHMANN, C.; FLE CZOK, B.; OTIBAR, D.; KUHLENKÖTTER, B.: Improving the Performance of Electrically Activated NiTi Shape Memory Actuators by Pre-Aging. In: *Proceeding of the ICCEMS 2017 the Second International Conference on Civil Engineering and Materials Science*, 2017.
- [2] FLE CZOK, B.; RATHMANN, C.; OTIBAR, D.; WEIRICH, A.; KUHLENKÖTTER, B.: Impact of Different Electrical Time-Based Activations on NiTi Shape Memory Alloys. In: *Proceeding of the ICCEMS 2017 the Second International Conference on Civil Engineering and Materials Science*, 2017.
- [3] RATHMANN, C.; THEREN, B.; FLE CZOK, B.; KUHLENKÖTTER, B.: Experimental Validation of Condition Monitoring for Electrical Activated Shape Memory Alloys for an Unlocking Device. In *Proceeding of the ICCEMS 2017 the Second International Conference on Civil Engineering and Materials Science*, 2017.
- [4] OTIBAR, D.; RATHMANN, C.; LYGIN, K.; KREIMEIER, D.; SZYMANSKY, P.: Analyzing Laser-Welded NiTi-NiTi-Joints for Actuator Applications Using Design of Experiments. In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 5 (2015), Nr. 2.
- [5] RATHMANN, C.; FLE CZOK, B.; KREIMEIER, D.: An investigation using Self-Sensing to estimate the lifetime of shape memory actuators. In: *Proceedings of the SICASE 2015 Seoul International Conference on Applied Science*, 2015.
- [6] RATHMANN, C.; FLE CZOK, B.; KUHLENKÖTTER, B.: Functional and economical evaluation of reused SMA actuators. In: *Journal of Electrical Engineering* 3 (2015), Nr. 4, S. 194–202.
- [7] LYGIN, K.; LANGBEIN, S.; RATHMANN, C.; OTIBAR, D.; MEIER, H.: Design methodology for mechatronic systems based on shape memory technology. In: *Borgmann (Hg.) 2014 – Proceedings of the Actuator 2014*.
- [8] RATHMANN, C.; KLENK, S.; KREIMEIER, D.: Opportunities and Challenges in the Value Chain for Companies through a Changing Understanding of Products on the Example of Shape Memory Actuators Systems. In: *Journal of Entrepreneurship & Organization Management* 04 (2015), Nr. 01. URL: <http://dx.doi.org/10.4172/2169-026X.1000130>.
- [9] RATHMANN, C.; REMMETZ, T.; KREIMEIER, D.: Maintenance of Shape Memory Actuator Systems - Applications, Processes and Business Models. In: *Procedia CIRP* 30 (2015), S. 84–89. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711500462X>.
- [10] RATHMANN, C.; LENZ, N.: Formgedächtnisaktorik: Skript zum messtechnischen Laborpraktikum. Bochum, 2015.
- [11] OTIBAR, D.; RATHMANN, C.; LYGIN, K.; MEIER, H.: Development of a quality management method for the production process of semi-finished NiTi-SMA materials. In: *Proceedings of the SMST 2014 conference on shape memory and superelastic technologies*, 2014.
- [12] RATHMANN, C.; COEHLÖ NUNES, A.; BOBLAU, M.; MEIER, H.: Developing Customized Innovative Business Models for Shape Memory Technology. In: *Procedia CIRP* 16 (2014), S. 199–204.

- [13] RATHMANN, C.; FLECZOK, B.; LYGIN, K.; MEIER, H.: Optimizing the Recycling Process of a Roof Edge Profile by Using Shape Memory Alloy Connecting Elements. In: *Proceedings of the SMASIS 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. New York: ASME Digital Collection, 2014, S. V002T04A004.
- [14] RATHMANN, C.; OTIBAR, D.; LYGIN, K.; MEIER, H.: Reducing Measurement Uncertainty in Characterizing SMA Actuators through New Mountings. In: *Proceedings of the SMST 2014 conference on shape memory and superelastic technologies*, 2014.
- [15] RATHMANN, C.; VIERTELHAUSEN, A.; TEPEL, T.; MEIER, H.: Potentiale einer integrierten Wertschöpfungskette: Chancen und Risiken für Klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) am Beispiel der Formgedächtnistechnologie. In: *wt Werkstatttechnik online* 104 (2014), 7/8.
- [16] MEIER, H.; LAGEMANN, H.; MORLOCK, F.; RATHMANN, C.: Key Performance Indicators for Assessing the Planning and Delivery of Industrial Services. In: *Procedia CIRP* 11 (2013), S. 99–104.
- [17] RATHMANN, C.; CZECHOWICZ, A.; MEIER, H.: An Investigation of Service-Oriented Shape Memory Actuator Systems for Resource Efficiency. In: *Proceedings of the SMASIS 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2013, S. V001T04A006.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) an der Ruhr-Universität Bochum. Gefördert wurde diese Arbeit durch das Ministerium für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Verbundprojektes „hybride Produkte mit Formgedächtnisaktorik“ (hyProFGA) und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Industrieforschungsprojektes „Recycling von Formgedächtnislegierungen für Medizin und Industrie“ mit der Firma Ingpuls GmbH.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Inhaber dieses Lehrstuhls, danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit nach der Emeritierung von Prof. Dr.-Ing. Horst Meier fortzuführen sowie die wissenschaftliche Anleitung und großzügigen Freiheiten bei der Erstellung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Malik Čabaravdić danke ich für die Übernahme des Koreferats und den konstruktiven Austausch sowie die Zeit in Zenica, an welche ich gerne zurückdenke. Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Petermann danke ich für die kurzfristige Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meine Zeit am LPS werde ich immer als eine sehr lehrreiche Zeit in Erinnerung behalten. Meinen Kollegen und Kolleginnen am LPS sowie allen Projektpartnern möchte ich für die sehr gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft danken. Dies gilt insbesondere für Reinhard Ose, M.Sc., und Dr.-Ing. Burkhard Maaß von der Firma Ingpuls GmbH sowie Peter Szymansky von der PSL Technik GmbH. Hervorheben möchte ich auch Frau Vogt, welche mich stets bei der Bewältigung aller anfallenden universitären Verwaltungsaufgaben (was mitunter sehr viel sein kann) bestens unterstützte – ob mit Rat oder Tat. Für sie und auch Prof. Dr.-Ing. Dieter Kreimeier sind die Belange der Kollegen stets sehr wichtig und beide haben sich im Alltagsstress immer Zeit hierfür genommen. Weiterhin gilt mein Dank Peter Podworny, welcher jedes IT-bezogene Problem in kürzester Zeit lösen konnte, und Holger Sturmberg sowie Dennis Reinhard für die (teilweise kurzfristige) Anfertigung der für diese Arbeit wichtigen technischen Komponenten.

Für die vielen interessanten Diskussionen und ermutigenden Worte möchte ich vor allem Benjamin Flecok, M.Sc., Dr.-Ing. Mario Boßlau, Dr.-Ing. Arne Viertelhausen und Dipl.-Ing. Dennis Otibar ganz herzlich danken – daneben auch meinen ‚FGL-Kollegen‘: Antonia Weirich, M.Sc., Dr.-Ing. Konstantin Lygin, Dipl.-Ing. Jan Pollmann und Benedict Theren, M.Sc.. Bei den zahlreichen inhaltlichen Diskussionen kam der Spaß nie zu kurz und es war immer eine Freude, inner- und außerhalb der Arbeit gemeinsam Zeit zu verbringen. Diese entstandenen Freundschaften aus meiner Zeit am LPS möchte ich nicht missen.

Darüber hinaus standen mir meine ehemaligen studentischen Hilfskräfte immer unterstützend zur Seite – sei es bei der Bewältigung organisatorischer Aufgaben oder bei der Versuchsdurchführung und -auswertung. Hierdurch erleichterten sie mir die Arbeit ungemein. Hier sei gedankt: Marina Arcidiacono, M. Sc., Martin Lubisch, M. Sc., Alexander Ranft, M. Sc., Farina Schmidt, M. Sc., und Julian Tacke, B. Sc.

Weiterhin danke ich allen Studenten, die ich während meiner Promotionszeit betreut habe. Stellvertretend seien hier Tristan Tepel, M. Sc., Lukas Müller, M. Sc., Malte Viertelhausen, B. Sc., und André Coelho Nunes, M. Sc., genannt. Ihre Arbeiten leisteten wertvolle Beiträge zu der vorliegenden Dissertation.

Es bleibt für mich festzuhalten, dass – so wichtig diese Aspekte auch sind – der wichtigste Rückhalt während dieser Zeit Freunde und Familie sind. Allen voran mein Zwillingbruder Dipl.-Reg. Martin Rathmann, auf den ich mich immer voll verlassen konnte, kann und können werde. Meine Freunde hatten immer ein offenes Ohr und haben mich auf so manch gute Idee gebracht. Hier sei insbesondere Dr.-Ing. Sebastian Feldmann, Dr.-Ing. Levente Szöke und Dipl.-Ing. Birte Szöke, Dominik Schwarz sowie Marco Scholtyssek, B. Sc., gedankt. Eva Maria Nast, StR'in, möchte ich für die akribische Korrektur dieser Arbeit danken.

Daneben danke ich meinem Vater Michael Rathmann für die Unterstützung meiner Ausbildung und den festen Glauben an mich. Auch meiner Mutter Marlies Rathmann sei hierfür gedankt.

Ohne all diese Personen wäre es nie möglich gewesen, diese Arbeit abzuschließen. Ich danke Ihnen vielmals und weiß Ihre Unterstützung zu schätzen!

Kurzfassung

Unternehmen stehen vor vielfältigen globalen Herausforderungen, welche neue technologische Lösungen erfordern. Eine mögliche Antwort sind formgedächtnislegierungsbasierte (FGL) Aktorsysteme, da sich durch diese kompakte, leichte, effiziente und intelligente Systeme realisieren lassen. Unternehmen nutzen diese intelligenten Werkstoffe selten zur Lösung technischer Probleme, da diese für sie häufig zu komplex und teuer sind. Bei der Entwicklung technischer Lösungen stehen überwiegend technische Details im Mittelpunkt, wodurch sachleistungsorientierte Geschäftsmodelle die Regel sind. Diese werden dem Potenzial der Formgedächtnislegierungen nicht gerecht.

Die vorliegende Arbeit geht dieses Problem an und setzt sich zum Ziel, neue Anwendungsmöglichkeiten von NiTi-Formgedächtnisaktoren unter Berücksichtigung technologischer Trends für Unternehmen aufzuzeigen. Damit das Potenzial der Formgedächtnislegierungen vollständig genutzt werden kann, ist ein Umdenken in Bezug auf die technischen Eigenschaften erforderlich. Gelingt dies, werden dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle möglich, welche einen entscheidenden Beitrag zur nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen leisten können.

Basierend auf der systematischen Analyse der Forschungslandschaft zeigte sich, dass insbesondere die Sensoreigenschaften und die thermische Sensibilität der Formgedächtnislegierungen ein hohes Innovationspotenzial besitzen. Da wesentliche Untersuchungen fehlten, wurde die Fähigkeit zur Zustandsüberwachung anhand des elektrischen Widerstandsverhaltens experimentell validiert. Weiter wurde die Regenerationsfähigkeit durch die elektrische Wärmebehandlung technisch und wirtschaftlich untersucht. Darauf aufbauend wurden dann systematisch die Potenziale allgemeiner und datenbasierter Dienstleistungen anhand repräsentativer FGL-Produkte – basierend auf Expertenwissen – analysiert. Hier zeigte sich, dass insbesondere die elektrisch aktivierten Formgedächtnisaktoren vielfältige Dienstleistungen möglich machen.

Eine besondere Herausforderung für Unternehmen stellte die Überführung der Dienstleistungspotenziale in innovative Geschäftsmodelle dar. Aus diesem Grund wurde eine FGL-spezifisch strukturierte und qualitative Beschreibungsform für dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle in Form eines Geschäftsmodellbaukastens entwickelt und durch Geschäftsmodelloptionen konkretisiert. Abschließend wurden das Dienstleistungspotenzial und die damit möglichen dienstleistungsbasierten Geschäftsmodelle anhand eines konzeptionellen Fallbeispiels eines Kleinunternehmens der kunststoffverarbeitenden Industrie diskutiert.

Schlagwörter: Formgedächtnislegierungen, Experimente, Dienstleistungen, Geschäftsmodelle

Abstract

Today companies face a wide range of global challenges that require new technological solutions. One possibility is the use of shape memory alloy (SMA) based actuator systems, because they are compact, light-weight, efficient and intelligent systems. Nevertheless, companies barely use these intelligent materials to solve technical problems due to their high complexity and costs. When companies develop technical solutions, they tend to focus mainly on technical details, which results in product-oriented business models – while the main purpose is just to sell their products. These kinds of business models are not suitable for shape memory alloys.

This PhD thesis aims to identify new applications of shape memory actuators considering actual technological trends and thereby helping to spread the NiTi-shape memory alloys. In order to fully utilize the potential of shape memory alloys, a rethinking is required. By overcoming a focus on the technical product, it becomes possible to offer service-oriented business models. These business models can make a decisive contribution to sustainably secure the competitiveness of companies.

Based on a systematic analysis of the research landscape, it was found that the sensor properties and the thermal sensitivity of shape memory have a high potential for innovation. Since essential investigations had been missing, experiments were performed, which validated the capability to monitor the condition of shape memory actuators by using the behavior of the electrical resistance. Furthermore, the regenerative capacity of shape memory alloys was validated technically and economically, using electrical heat treatment. Based on this, the service potential of representative SMA-products was analyzed systematically by using expert knowledge. As it turned out, electrically-activated shape memory actuators allow a wide range of services.

A particular challenge for companies was the transfer of service potential into innovative business models. Therefore, a shape memory alloy-specific structured and qualitative model was required to help them develop proper service-oriented business models. For this reason, a business model kit was presented and based on these exemplary business model options. Finally, the service potential and possible service-oriented business model were discussed, using a conceptual case study of small enterprise in the plastic processing industry.

Keywords: shape memory alloys, experiments, service, business model

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen	8
2.1	Mechatronische Systeme	8
2.1.1	<i>Bestandteile eines mechatronischen Systems</i>	10
2.1.2	<i>Betrieb mechatronischer Systeme</i>	13
2.1.3	<i>Einordnung mechatronischer Systeme in CPS und IoT</i>	14
2.2	Formgedächtnislegierungen	16
2.2.1	<i>Formgedächtniseffekte</i>	17
2.2.2	<i>Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen</i>	23
2.2.3	<i>Ermüdungsverhalten von FGL</i>	27
2.2.4	<i>Wärmebehandlung für die funktionalen Eigenschaften von Formgedächtnisaktoren</i>	30
2.2.5	<i>Anwendungsgebiete von Formgedächtnisaktoren</i>	32
2.3	Sachleistungen, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle	36
2.3.1	<i>Sachleistungen, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systeme technischer Systeme</i>	36
2.3.2	<i>Geschäftsmodelle technischer Systeme</i>	39
2.3.3	<i>Dimensionen, Ebenen und weitere Aspekte von Geschäftsmodellen</i>	41
2.4	Zwischenfazit	44
3	Stand der Forschung	46
3.1	Sensoreigenschaften von Formgedächtnisaktoren	46
3.1.1	<i>Regelung von FGL-Aktoren</i>	46
3.1.2	<i>Sensoreigenschaften von FGL-Aktoren hinsichtlich Umwelt- und Einsatzbedingungen</i>	47
3.2	Regenerationsfähigkeit von Formgedächtnisaktoren durch Wärmebehandlung	50
3.2.1	<i>Regenerationsfähigkeit pseudoelastischer FGL durch thermische Wärmebehandlung</i>	51
3.2.2	<i>Regenerationsfähigkeit pseudoplastischer FGL durch thermische Wärmebehandlung</i>	52
3.2.3	<i>Regenerationsfähigkeit pseudoplastischer FGL durch elektrische Wärmebehandlung</i>	53
3.3	Sachleistungen, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systeme von Formgedächtnisaktoren	56
3.4	Auswahl und Bewertung von Dienstleistungen und Geschäftsmodellen technischer Systeme	59
3.4.1	<i>Einteilung und Auswahl von Dienstleistungen für technische Systeme</i>	60
3.4.2	<i>Komponenten und Auswahl dienstleistungsorientierter Geschäftsmodelle für technische Systeme</i>	64

3.5	Zwischenfazit	68
4	Handlungsbedarf	70
4.1	Forschungslücke	70
4.2	Zielsetzung dieser Arbeit	74
5	Experimentelle Untersuchungen zu Eigenschaften von Formgedächtnisaktoren für smarte Produkte	75
5.1	Experimentelle Untersuchungen zum Widerstandsverhalten bei struktureller Ermüdung von Formgedächtnislegierungen	75
5.1.1	<i>Versuchsaufbau zum Widerstandsverhalten bei struktureller Ermüdung</i>	76
5.1.2	<i>Versuchsdurchführung zum Widerstandsverhalten bei struktureller Ermüdung</i>	77
5.1.3	<i>Versuchsauswertung zum Widerstandsverhalten bei struktureller Ermüdung</i>	77
5.2	Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten der Stromstärke bei einer Blockierung von Formgedächtnislegierungen	85
5.2.1	<i>Versuchsaufbau zum Verhalten der Stromstärke bei einer Blockierung</i>	86
5.2.2	<i>Versuchsdurchführung zum Verhalten der Stromstärke bei einer Blockierung</i>	86
5.2.3	<i>Versuchsauswertung zum Verhalten der Stromstärke bei einer Blockierung</i>	87
5.3	Experimentelle Untersuchungen zur Regenerationsfähigkeit von Formgedächtnislegierungen	90
5.3.1	<i>Versuchsplanung zur Regenerationsfähigkeit durch elektrische Wärmebehandlung</i>	90
5.3.2	<i>Versuchsaufbau zur Regenerationsfähigkeit durch elektrische Wärmebehandlung</i>	92
5.3.3	<i>Versuchsdurchführung zur Regenerationsfähigkeit durch elektrische Wärmebehandlung</i>	93
5.3.4	<i>Versuchsauswertung zur Regenerationsfähigkeit durch elektrische Wärmebehandlung</i>	95
5.4	Zwischenfazit	100
6	Dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle für smarte FGL-Produkte	102
6.1	Bewertung der Eigenschaften von Formgedächtnisaktorsystemen für smarte Produkte	102
6.1.1	<i>FGL-Sensoreigenschaften zur Zustandserfassung für die Entscheidungsunterstützung</i>	102
6.1.2	<i>Regenerationsfähigkeit durch Wärmebehandlung für Instandhaltung und Recycling</i>	110
6.1.3	<i>Dienstleistungspotenziale von Formgedächtnislegierungen</i>	118
6.2	Geschäftsmodelle für smarte FGL-Produkte	129
6.2.1	<i>Geschäftsmodellbaukasten für dienstleistungsorientierte FGL-Produkte</i>	130
6.2.2	<i>Dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelloptionen für smarte FGL-Produkte</i>	144
6.3	Zwischenfazit	153
7	Anwendungsbeispiel: Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit durch FGL-Verriegelungsmechanismen für Extrusionsblasformanlagen	156
7.1	Ausgangssituation und Motivation eines zustandsüberwachungsintegrierten FGL-Verriegelungsmechanismus ⁴	156

7.2	Konzept eines zustandsüberwachungsintegrierten FGL-Verriegelungsmechanismus' inklusive seiner Dienstleistungspotenziale	160
7.3	Geschäftsmodelloption eines zustandsüberwachungsintegrierten FGL-Verriegelungsmechanismus'	164
7.4	Zwischenfazit	175
8	Zusammenfassung und Ausblick	176
8.1	Zusammenfassung	176
8.2	Ausblick	178
A	Anhang	180
A.1	Funktionsorientierte Übersicht und Einordnung der Akteure	180
A.2	Erweitertes Eigenschaftsprofil der Formgedächtnislegierungen	183
A.3	Übersicht und Definitionen der Dienstleistungen	185
A.4	Weiterführende Details zur Analyse der Experimente der Sensoreigenschaften	198
A.5	Weiterführende Details zur Analyse der Experimente der Regenerationsfähigkeit	206
A.6	Stückliste des Funktionsmusters und Prozesszeiten verschiedener Instandhaltungsvarianten	210
A.7	FGL-Produkte zur Bewertung der Dienstleistungspotenziale	212
A.8	Weiterführende Details zur Befragung des derzeitigen Standes von Geschäftsmodellen für FGL-Produkte	219
	Literaturverzeichnis	222
	Abbildungsverzeichnis	266
	Tabellenverzeichnis	271
	Abkürzungsverzeichnis	273
	Symbolverzeichnis	276
	Verzeichnis der betreuten studentischen Arbeiten	277
	Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme	281
	Lebenslauf	291