





**Elastokalorisches Kühlen mit Ni-Ti-basierten Formgedächtnislegierungen:  
Thermodynamische Analyse, experimentelle Untersuchungen, Prozessoptimierung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Marvin Christopher Schmidt

Saarbrücken

2016

Tag des Kolloquiums: 17.01.2017

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze

Univ.-Prof. Dr. -Ing. Stefan Seelecke

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Manfred Kohl

Univ.-Prof. Dr. phil. Eduard Arzt

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Rainer Birringer

Akad. Mitarbeiterin: Dr. Dr. -Ing. Anne Jung

Berichte aus der Thermodynamik

**Marvin Christopher Schmidt**

**Elastokalorisches Kühlen  
mit Ni-Ti-basierten Formgedächtnislegierungen:  
Thermodynamische Analyse, experimentelle  
Untersuchungen, Prozessoptimierung**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5225-1

ISSN 0946-0829

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Kurzfassung**

Elastokalorisches Kühlen ist eine neue Technologie, die eine umweltfreundliche Alternative zu konventionellen kältekomppressionsbasierten Kühlsystemen darstellt. Bevor jedoch erste Systeme entwickelt werden können, muss ein Grundverständnis von Materialien und Prozessen geschaffen werden. Hierzu soll diese Arbeit einen Beitrag leisten.

Ausgehend von der thermodynamischen Analyse elastokalorischer Kühlprozesse werden optimierte Kreisprozesse entwickelt. Ziel der Optimierung ist eine Prozessführung, die sowohl hohe Kühlleistungen ermöglicht, als auch die Effizienz des Kühlprozesses optimiert. Mittels einer graphischen Analysemethode auf Basis thermodynamischer Zustandsdiagramme werden die Prozessvarianten bewertet und verglichen, um so eine optimale Prozessführung zu identifizieren. Mit dem graphischen Ansatz kann auch der Einfluss der elastokalorischen Materialien auf die Leistungszahl analysiert werden. Zur experimentellen Untersuchung von Materialien und Prozessen wurde eine wissenschaftliche Testplattform entwickelt, welche auch zur Modellvalidierung eingesetzt wird. Mit der Anlage wird der Einfluss von Material, thermodynamischen Kreisprozessen, Prozesssteuerung sowie den thermischen Randbedingungen auf die Kühlleistung und die Leistungszahl differenziert untersucht. Das System ermöglicht zudem eine Prozessanalyse unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Auf Basis der Ergebnisse werden optimierte Prozessvarianten abgeleitet, die in das Konzept eines Kühlsystems einfließen.



## **Abstract**

Elastocaloric cooling is a novel technology with the potential of an environmentally friendly alternative to conventional cooling systems based on vapor compression. A basic understanding of material and process is required, prior to the development of a cooling system. This work contributes in this direction, by providing optimized thermodynamic cycles and comprehensive experimental studies of elastocaloric materials and processes.

At first, starting from the thermodynamic analysis of elastocaloric cooling processes, optimized cycles are developed. The goal of the optimization approach is the development of a process control which provides higher efficiency in combination with a high cooling power. A graphical approach based on thermodynamic state diagrams is developed to identify an optimal process control. The graphical method allows for the analysis of the material influence on the coefficient of performance. In a second phase, a scientific test setup has been developed for experimental investigation of materials and processes and to perform model validation. The setup enables the independent investigation of the influence of material, thermodynamic cycles, process control, as well as thermal boundary conditions on the cooling power and the coefficient of performance. In addition, a process analysis at different operation conditions is performed. Based on the results, optimized processes have been designed and considered in the conception of a cooling device.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Elastokalorisches Kühlen - Stand der Technik .....	4
2.1	Formgedächtnislegierungen und ihre elastokalorischen Eigenschaften .....	4
2.2	Elastokalorische Kühlprozesse und -systeme .....	8
3	Ziele und Aufbau der Arbeit .....	14
4	Thermodynamische Betrachtung elastokalorischer Kreisprozesse .....	16
4.1	Adiabatischer Prozess .....	16
4.2	Isothermer Prozess .....	18
4.3	Nichtadiabatischer Prozess .....	21
4.4	Kombinierte Prozessformen .....	22
4.4.1	Adiabat-isotherm .....	22
4.4.2	Nichtadiabat-adiabat .....	24
4.5	Vergleich thermodynamischer Prozessvarianten .....	26
4.6	Graphischer Ansatz zur Prozessanalyse .....	27
5	Wissenschaftliche Testplattform .....	30
5.1	Experimenteller Ansatz zur Prozessanalyse .....	30
5.1.1	Einflussfaktor: Material/Legierung .....	30
5.1.2	Einflussfaktor: Prozessführung .....	31
5.1.3	Einflussfaktor: Thermodynamischer Kreisprozess .....	32
5.1.4	Einflussfaktor: Thermische Randbedingungen .....	33
5.2	Konzeptionierung .....	33
5.3	Planung .....	38
5.3.1	Konstruktion der Anlage mit integrierter Aktorik und Sensorik .....	38
5.3.2	Steuerung und Datenerfassung .....	39

5.4	Realisierung .....	40
5.5	Validierung .....	45
5.5.1	Materialcharakterisierung .....	45
5.5.2	Prozessvariation .....	47
5.5.3	Regelung Peltierelemente.....	51
6	Wissenschaftliche Untersuchungen .....	59
6.1	Legierungen .....	59
6.1.1	NiTiCo.....	59
6.1.2	NiTiCuV.....	60
6.2	Training – Materialstabilisierung .....	61
6.2.1	Mechanische Stabilisierung .....	61
6.2.2	Kalorische Stabilisierung .....	63
6.2.3	Thermische Stabilisierung.....	65
6.2.4	Ratenabhängige Stabilisierungseffekte.....	68
6.2.5	Diskussion Training - Materialstabilisierung.....	72
6.3	Charakterisierung elastokalorischer Materialien.....	73
6.3.1	Einfluss der Dehnrate auf die Prozessgrößen .....	74
6.3.2	Einfluss der Dehnung auf die Prozessgrößen .....	83
6.3.3	Einfluss des Trainings auf die Prozessgrößen .....	96
6.3.4	Einfluss der Probegeometrie auf die Prozessgrößen.....	99
6.3.5	Diskussion - Materialcharakterisierung.....	102
6.4	Elastokalorische Materialien unter veränderlicher Prozessführung im Kühlsystem.....	104
6.4.1	Variation der mechanischen Stellgrößen .....	104
6.4.2	Einfluss des Trainings.....	141
6.4.3	Einfluss der Probengeometrie .....	144
6.4.4	Einfluss der Legierung.....	147

6.4.5	Temperatur von Wärmesenke und Wärmequelle .....	152
6.4.6	Berechnung mittels graphischer Methoden .....	168
6.5	Prozessoptimierung .....	171
7	Zusammenfassung .....	176
8	Ausblick .....	182
8.1	Elastokalorische Kühlsysteme .....	182
8.1.1	Konzept eines kontinuierlichen elastokalorischen Kühlsystems .....	183
8.2	Arbeitsrückgewinnung .....	188
	Literaturverzeichnis .....	193
9	Anhang .....	203
9.1	Systemvalidierung .....	203
9.1.1	Modellansatz zur Kühlleistungsbestimmung mittels Peltierelementen.....	203
9.2	Einfluss der Dehnung NiTiCuV.....	206
9.3	Optimierung des thermodynamischen Zyklus: nichtadiabat-adiabat kombinierte Prozessform.....	212
9.4	Variation der Kontaktkraft - Bestimmung der Zeitkonstanten .....	213
9.5	Variation der Dehnung im Kühlprozess.....	215
9.5.1	Dehnung 5 %.....	216
9.5.2	Dehnung 4%.....	220
9.5.3	Dehnung 3 %.....	223
9.5.4	Dehnung 2 %.....	226
9.6	Variation der Dehnrate im Prozess; Detailbetrachtung $5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 5 % Dehnung.....	229
9.7	Einfluss der Kontaktphase nichtadiabat-adiabat kombinierter Prozess.....	232
9.7.1	Dehnrate $1 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .....	233
9.7.2	Dehnrate $5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ .....	236
	Eigene Veröffentlichungen .....	241
	Danksagung .....	243

Eidesstattliche Versicherung .....245