

Kurzfassung

Der Bedarf an Kühltechnik wächst weltweit. Dabei ist die kompressorbasierte Kühlung bis heute die vorherrschende Technologie. Eine vielversprechende, umweltfreundliche Alternative sind elastokalorische Kühlsysteme, die ohne schädliche Kältemittel auskommen: Elastokalorische Systeme nutzen eine Gefügeumwandlung in elastokalorischen Materialien (EKM), um einen Kühleffekt zu erzeugen. EKM wie beispielsweise Nickel-Titan-Legierungen erwärmen sich unter mechanischer Spannung. Führt man die Wärme an eine Wärmesenke ab und entfernt die Spannung, kühlt das EKM unter die Ausgangstemperatur ab. Nun kann es Wärme aus einer Wärmequelle aufnehmen. Wird der Wärmestrom gerichtet und der Kreislauf zyklisch wiederholt, kann Wärme gepumpt werden. Der Wärmestrom ist dabei proportional zur Materialmasse und bedingt proportional zur Zyklusfrequenz. Die meisten der bislang bekannten Prototypen nutzen filigrane EKM-Strukturen, die durch Zugspannung mechanisch belastet werden. Die Wärmeabfuhr erfolgt durch Konvektion oder Wärmeleitung. Bei diesen Systemen stellt die Langzeitstabilität eine Herausforderung dar.

Diese Arbeit setzt auf einen alternativen Ansatz: In einer Aktiven Elastokalorischen Heatpipe (AEH) wird die Gefügeumwandlung durch Druckspannung induziert. Um den schlechteren Wärmetransport aufgrund der dickeren Materialquerschnitte zu kompensieren, wird die Wärme latent durch Verdampfen und Kondensieren eines Fluids übertragen. Mit der AEH konnte erstmals eine Langzeitstabilität von mehr als 10^7 Zyklen in einem elastokalorischen Kühlsystem gezeigt werden. Eine weitere Herausforderung in der Elastokalorik stellt die dissipative Erwärmung aufgrund der Materialhysterese dar. Bei hohen Frequenzen bricht in der AEH aufgrund der dissipativen Erwärmung der Wärmetransport zusammen und limitiert die Kühlleistung der AEH. Zusätzliches Fluid auf dem EKM führt die dissipative Wärme ab. So konnte die Kühlleistung von 2 W/g auf 14 W/g bei einer Frequenz von 6 Hz gesteigert werden.

Die AEH wurde mit einer Simulation in MATLAB Simulink nachgebildet. Dabei wurde das Materialverhalten mit einem thermodynamisch konsistenten Modell abgebildet, welches mit Versuchsdaten validiert wurde. Das Modell ermöglicht es, Größen wie die adiabatische Temperaturänderung und die dissipative Wärme des EKM zu berechnen. Die Simulation wurde mit Messdaten der AEH validiert. Die Effizienz der AEH wurde auf 3 % abgeschätzt, maßgeblich bedingt durch die geringe Materialeffizienz von nur 15 %. Hinzu kommen Verluste durch unzureichende Isolierung des Verdampfers und zwischen EKM und Umgebung sowie durch den thermischen Widerstand zwischen EKM und Wärmeübertragerfluid. Werden die identifizierten Systemverluste soweit technisch möglich verbessert, steigt die Effizienz auf 10 %. Effizientere elastokalorische Materialien sind jedoch eine wichtige Voraussetzung zur Markteinführung der Technologie.

Abstract

The demand for refrigeration technology is growing worldwide. Compressor-based refrigeration is still the main technology used today. A promising, environmentally friendly alternative are elastocaloric cooling systems, which operate without harmful refrigerants: Elastocaloric systems use a phase transformation in elastocaloric materials (ECM) to create a cooling effect. ECM such as nickel-titanium alloys heat up under mechanical stress. If the heat is transferred to a heat sink and the stress is removed, the ECM cools below its initial temperature. Now it absorbs heat from a heat source. If the heat flow is directed and the process is repeated cyclically, heat can be pumped. The heat flow is proportional to the material mass and limited proportional the cycle frequency. Most of the prototypes known so far use ECM structures like thin films or wires that are mechanically loaded by tensile stress. Heat is transferred by convection or conduction. For these systems, long-term stability is a challenge.

This work relies on an alternative approach: In an Active Elastocaloric Heatpipe (AEH), the phase transformation is induced by compressive stress. To compensate for the poorer heat transfer due to the thicker material cross-sections, the heat is transferred latently by evaporation and condensation of a fluid. The AEH was the first system approach to demonstrate long-term stability of more than 10^7 cycles in an elastocaloric cooling system. Another challenge in elastocaloric cooling systems is dissipative heating due to material hysteresis. At high frequencies, heat transfer in the AEH breaks down and limits the cooling performance of the AEH. Additional fluid on the ECM dissipates the dissipative heat. Thus, the cooling power could be increased from 2 W/g to 14 W/g at a frequency of 6 Hz.

To determine the efficiency of the cooling system, the AEH was simulated using MATLAB Simulink. The material behavior was modeled with a thermodynamically consistent model, which was validated with experimental data. The model allows parameters such as adiabatic temperature change and dissipative heat of the ECM to be calculated. The simulation was validated with measured data from the AEH. The efficiency of the AEH was estimated to be 3 %, primarily due to the low material efficiency of only 15 %. In addition, there are losses due to insufficient insulation of the evaporator and between the ECM and the environment, as well as due to the thermal resistance between the ECM and the heat exchanger fluid. If the identified system losses are improved as far as technically possible, the efficiency could be increased to 10 %. However, more efficient elastocaloric materials are the most important prerequisite to introduce the technology into the market.

Vorwort der Autorin

Vielen Dank an Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, den fachlichen Austausch und besonders für die Bereitschaft sich mit einem Thema zu befassen, welches nicht zu den Kernthemen des Instituts für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gehört.

Vielen Dank an Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein für das große Interesse an meinem Thema und für die Übernahme des Korreferats. Darüber hinaus möchte ich mich für den unkomplizierten Umgang und für diverse Anregungen während meiner Zeit am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM bedanken.

Vielen Dank an Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und das Interesse an dem Thema.

Vielen Dank an Dr. Kilian Bartholomé für die ausgezeichnete fachliche Betreuung am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM. Dank auch für eine stets präzise und konstruktive Unterstützung und die hilfreichen fachlichen Diskussionen, bei denen ich viel lernen konnte.

Vielen Dank an Dr. Olaf Schäfer-Welsen für die Unterstützung und die bereichernden fachlichen Diskussionen, die meinen Blickwinkel auf das Thema erweitert haben.

Vielen Dank an meine Kolleginnen und Kollegen für die sehr gute und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Ich habe sehr gerne mit allen zusammengearbeitet. Besonderen Dank für die fachlichen Gespräche, die Unterstützung bei den Arbeiten im Labor, für das Erstellen von Konstruktionen, die Unterstützung beim Korrekturlesen und nicht zuletzt für die Hilfsbereitschaft der Kolleginnen und Kollegen.

Vielen Dank an meine Familie und meine Freunde für die Unterstützung in jeglicher Hinsicht und die Hilfsbereitschaft. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Uli und Gerd, die immer für mich da sind. Herzlichen Dank an meinen Mann Simon, der mich mit Liebe und Geduld unterstützt und mir viel Kraft gegeben hat.

1 Einleitung

Weltweit wächst der Bedarf an Kälte (She et al., 2018), so geht beispielsweise die internationale Energieagentur davon aus, dass 2/3 aller Haushalte im Jahr 2050 mit einer Klimaanlage ausgestattet sein werden, sodass die Gesamtkälteleistung in dem Sektor bis dahin um 370 % auf 23 TW steigen wird (IEA, 2022). Neben Klimaanlagen nimmt ebenfalls der Bedarf an Kühlleistung für Elektronik (Redwan et al., 2021) und für industrielle Prozesse zu.

Stand der Technik zur Erzeugung von Kälte sind kompressorbasierte Kühlsysteme, wofür rund 15 % des weltweit erzeugten Stroms aufgewendet werden (She et al., 2018). Diese Kühlsysteme erreichen jedoch nur rund 50 % der Carnot-Effizienz (Raveendran u. Sekhar, 2017). Eine Effizienzsteigerung stellt dagegen einen großen Beitrag zur Energieeinsparung und damit zur Erreichung der Klimaziele wie im Pariser Klimaabkommen gefordert (Europäischen Union, 2022), dar. Darüber hinaus ist die kompressorbasierte Kältetechnik aufgrund des Energieverbrauchs für 10 % der Emissionen von Treibhausgasen verantwortlich (She et al., 2018). Aber auch die verwendeten Kältemittel tragen zu Treibhausgasemissionen bei, besonders Fluorkohlenwasserstoffe stellen einen großen Anteil dieser Emissionen dar (McLinden et al., 2017) und werden deshalb seit 2014 reglementiert (Umweltbundesamt, 2022). Alternative Kältemittel wie Isobutan oder Kohlenstoffdioxid mit geringem Treibhauspotential (Longo et al., 2020) zeichnen sich durch Nachteile wie leicht entzündliches Verhalten oder einen sehr hohen Systemdruck aus (Kitanovski et al., 2015a).

Kalorische Kühlsysteme stellen eine umweltfreundliche Alternative zur kompressorbasierten Kühltechnik dar. Kalorische Materialien erwärmen sich beim Anlegen eines Feldes. Wird diese Wärme abgegeben und anschließend das Feld entfernt, kühlen diese Materialien unter Umgebungstemperatur ab (Takeuchi u. Sandeman, 2015). Dies wird als kalorischer Effekt bezeichnet und kann bei zyklischer Wiederholung zur Wärmez- und -abfuhr verwendet werden. Je nach Art des Feldes wird in Elasto-, Magneto- oder Elektrokolorik (mechanische Spannung, Magnetfeld, elektrische Spannung) unterschieden (Kitanovski et al., 2015a).

Elastokalorische Materialien (EKM), wie Nickel-Titan-Legierungen, erreichen besonders große Temperaturänderungen von bis zu 27 K (Porenta et al., 2020), was sie sehr attraktiv für Kühlsysteme macht. Gleichzeitig werden diese Materialien bereits in der Medizintechnik und Aktorik als Formgedächtnislegierungen genutzt und sind gut verfügbar.

Bereits existierende Prototypen von elastokalorischen Kühlsystemen (EKS) verwenden für den Wärmetransport innerhalb des Systems Wärmeleitung oder Konvektion und profitieren bei der Verwendung von Zugspannung von dem großen Oberfläche-zu-Volumenverhältnis des EKM (Kirsch et al., 2018). Jedoch stellt die Langzeitstabilität, also die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen des Materials, neben dissipativen Verlusten aufgrund der Materialhysterese eine große Herausforderung für die spätere Anwendung dar. Insbesondere in Systemen mit Zugspannung ist die Langzeitstabilität der Materialien eine Herausforderung, da eine Belastung unter Zugspannung Materialversagen beschleunigen kann (Hou et al., 2018).

Der hier verfolgte Ansatz der Aktiven Elastokalorischen Heatpipe (AEH) verwendet Druckspannung zur Steigerung der Langzeitstabilität des EKM. Um die Nachteile des geringeren Oberfläche-zu-Volumenverhältnisses auszugleichen, wird die Wärme in der AEH latent übertragen (Bartholome et al., 2019). Von der Wärmequelle, die hier einem Verdampfer entspricht, wird die Wärme mit dem EKM durch Verdampfen und Kondensieren von Wasser zur Wärmesenke (Kondensator) transportiert. Dies hat den Vorteil eines effizienten und schnellen Wärmeübergangs und ermöglicht hohe Zyklusfrequenzen für eine große Kühlleistung. Jedoch wird im EKM dissipative Wärme aufgrund der Materialhysterese frei. Diese Erwärmung ist proportional zur Zyklusfrequenz, daher bricht bei hohen Frequenzen der Wärmetransport zusammen und limitiert so die spezifische Kühlleistung.

Die Steigerung der Systemperformance der AEH ist das Ziel dieser Arbeit. Dafür wird experimentell untersucht, ob die Langzeitstabilität des EKM in der AEH von mehr als 10^7 Zyklen gezeigt werden kann. Einen weiteren Bestandteil stellt die Steigerung der Kühlleistung und der Temperaturspanne zwischen Wärmequelle und -senke dar. Hier wird untersucht, ob diese mit einer thermischen Stabilisierung des EKM möglich ist. Um diese Steigerung zu erreichen, wird durch das Verdampfen von zusätzlichem Fluid die dissipative Wärme des EKM in den Kondensator abgeführt. Dies soll der Erwärmung durch dissipative Effekte entgegenwirken, sodass die mittlere Temperatur des EKM konstant bleibt.

Um die experimentellen Ergebnisse einordnen und Aussagen zur Effizienz und zu Verlusten in der AEH treffen zu können, wird diese in einer Simulation mit und ohne thermische Stabilisierung in MATLAB Simulink abgebildet. Dafür wird ein Modell entwickelt, welches die Eigenschaften der EKM thermodynamisch konsistent abbildet.

Um diese Thesen zu überprüfen, werden zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen zum elastokalorischen Effekt und den EKM erläutert. Es wird darüber hinaus gezeigt, wie beispielsweise der Temperaturhub der EKM mit aus der Literatur bekannten Modellen abgebildet werden kann. Neben den Materialien wird der Stand der Technik von bereits existierenden Prototypen aufgezeigt und die notwendigen Grundlagen der fluidischen Eigenschaften für die AEH erklärt.

In Kapitel 3 wird vorgestellt, wie das EKM für die Verwendung in der AEH präpariert und charakterisiert wird. Neben dem Aufbau für die Materialcharakterisierung wird der Versuchsaufbau zur Charakterisierung der AEH vorgestellt. Dabei werden die Versuche zur Charakterisierung der Langzeitstabilität sowie die Versuche, in denen die Kühlleistung und die Temperaturspanne durch eine thermische Stabilisierung verbessert werden sollen, erklärt.

In Kapitel 4 wird das Materialmodell der Elastokalorik beschrieben und es werden Gleichungen zur Charakterisierung des Materialverhaltens hergeleitet. Diese Gleichungen beschreiben das Material in der Simulation, welche anschließend erläutert wird. Des Weiteren wird ein Modell zur Bestimmung von nicht messbaren Eingangsgrößen, wie thermischen Widerständen, für die Simulation vorgestellt.

Die Ergebnisse der Versuche und der Simulation werden in Kapitel 5 vorgestellt und diskutiert. Zunächst werden die Ergebnisse der Materialcharakterisierung beschrieben, da hiermit die Parameter des Materialmodells identifiziert werden. Im Weiteren werden die Versuchsergebnisse zur Steigerung der Systemperformance, also der Langzeitstabilität des EKM, der Kühlleistung und der Temperaturspanne der AEH gezeigt. Es wird diskutiert, inwieweit es