

Schlussbericht NEKKA

Navarro de Sosa, Iñaki: Ingpuls GmbH

Forschungsvorhaben:

19I21050C

Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien
Verbundvorhaben – NEKKA – „Entwicklung eines alternativen
Klimatisierungssystems auf Basis des elastokalorischen Effekts für die
Anwendung in Fahrzeugen“

Teilprojekt:

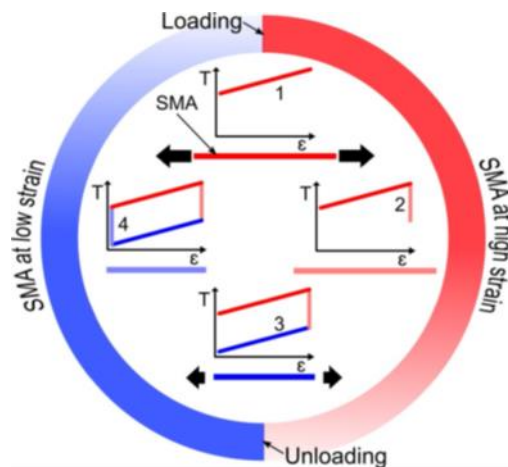
Entwicklung optimierter FGL-Halbzeuge für die Elastokalorik

Ausführende Stelle:

Ingpuls GmbH

Projektleiter:

Herr Dr.-Ing. Burkhard Maaß



Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand	6
I.4.1	Basis: Der elastokalorische Effekt	6
I.4.2	Vergleich elastokalorischer Materialien im Hinblick auf Effizienz (COP)	6
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II.	Eingehende Darstellung	8
II.1	Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate.....	8
II.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
II.4	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens	17
II.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	17
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	18

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens NEKKA war die Entwicklung eines alternativen Klimatisierungssystems auf Basis des elastokalorischen Effekts für die Anwendung in Fahrzeugen zur Erzielung besserer Effizienz (COP) und Umweltverträglichkeit sowie Nachhaltigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung von Bauraum, Gewicht und Kosten.

Das NEKKA-Klimatisierungssystem sollte mit seinen Vorteilen hohes Verwertungspotenzial besitzen. Das Konzept sollte auf System-, Funktions- und Komponentenebenen so skalierbar sein, dass es für alle Fahrzeugklassen geeignet ist.

Die Herausforderungen von Ingpus GmbH lagen hierbei auf dem Bereich der Materialoptimierung und -herstellung des Heiz- und Kältefeststoffmittels (korrosionsbeständige, langzeitstabile Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen, die hohe COP ermöglichen). Hierfür sollte das FGL-Material für die Anwendung in Pkw-Klimaanlagen entwickelt werden, welches in das Hubelement der Komponentendemonstrator für die Integration in das Klimatisierungssystem des Fahrzeuges eingebaut werden könnte.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Heute verfügbare Fahrzeuge verwenden zum Kühlen der Fahrgastkabine Kompressionskältekreisläufe. Zusätzliche Funktionen, wie Kühlen der Batterie sowie Heizen von Batterie und Kabine können bei batterieelektrischen Fahrzeugen über Wärmepumpen erfolgen. Dies führt insgesamt zu einem komplexen Kühlsystem, das mit geeignetem Kältemittel betrieben werden muss. Auf die heute eingesetzten Kältemittel und die damit verbundenen Gefahren, etwa Entzündlichkeit, Global Warming Potential (GWP) und Wirkungsgrad.

Im Hinblick auf Umweltfreundlichkeit ist zu beachten, dass es während der Betriebsdauer der Fahrzeuge nicht selten durch Steinschläge zu Leckagen im Kältemittelkreislauf kommt. Das umweltschädliche Kältemittel entweicht in die Atmosphäre und trägt zusätzlich zur Erderwärmung bei.

Tabelle 1: Verbesserungspotenziale des elastokalorischen Kühlsystems

	Klassischer Kältemittelkreis		Elastokalorisches System Ziele
COP	~1 - 3	↑	~ >6
Komponenten	Elektrischer Kompressor, >= 2 WT, >= 1 EXV, Kältemittel Leitungen, etc.	↓	Kleinerer E-Antrieb, Elastokalorisches System, Kühlmittleitungen
Systemdruck	2 - 130 bar	↓	~1 bar
GWP	1 - 4	↓	0
Kosten	~400-500 €	↘	Weniger Komponenten

Um die Situation nachhaltig zu verbessern, zielte das hier beantragte Vorhaben NEKKA auf die Erforschung eines radikal neuartigen Prinzips eines Fahrzeug-Klimatisierungssystems: Die Nutzung des

elastokalorischen Effekts bat das Potenzial einer deutlichen Effizienzsteigerung (Faktor 2-3) gegenüber herkömmlichen Klimaanlage (Tabelle 1). Das elastokalorische System sollte komplett auf leicht entzündliches oder treibhausschädliches Kältemittel verzichten. Gleichzeitig sollte die Systemarchitektur vereinfacht werden, was zur Reduktion des benötigten Bauraums, zu Gewichtsreduktion sowie zu niedrigeren Systemkosten führen sollte. Zum Nachweis dieses Ansatzes sollte im Rahmen von NEKKA ein Versuchsfahrzeug aufgebaut werden. Das hoch effiziente, kleine und kostengünstige elastokalorische System sollte in allen Fahrzeugklassen zum Kühlen und Heizen eingesetzt werden.

Vor dem Hintergrund von Energieeinsparungen und Umweltverträglichkeit sind die Innovationen dieses Projektvorhabens von zunehmender Bedeutung. Das auf dem elastokalorischen Prinzip basierende System adressiert höhere Energieeffizienz und bietet gleichzeitig verbesserten Klimaschutz. Beides sind zentrale Herausforderung des Individualverkehrs. Somit stellte NEKKA einen wesentlichen Baustein für die Erreichung der Ziele des Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ dar. NEKKA bezieht sich insbesondere auf die Säule „Leichtbaukonzepte für Straßenfahrzeuge“ und stärkt durch den Kompetenzaufbau den Standort Deutschland.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Forschungsvorhabens erfolgte gemeinsam mit den am Gesamtvorhaben beteiligten Projektbeteiligten Vitesco (Verbundkoordination), TLK-Thermo GmbH und Universität des Saarlandes. Die Arbeitsteilung orientierte sich an der Expertise der beteiligten Partner. Die vier Partner deckten sämtliche im Projekt benötigten Aspekte ab und brachten ihre umfangreichen Erfahrungen aus bisherigen Projekten mit in NEKKA ein.

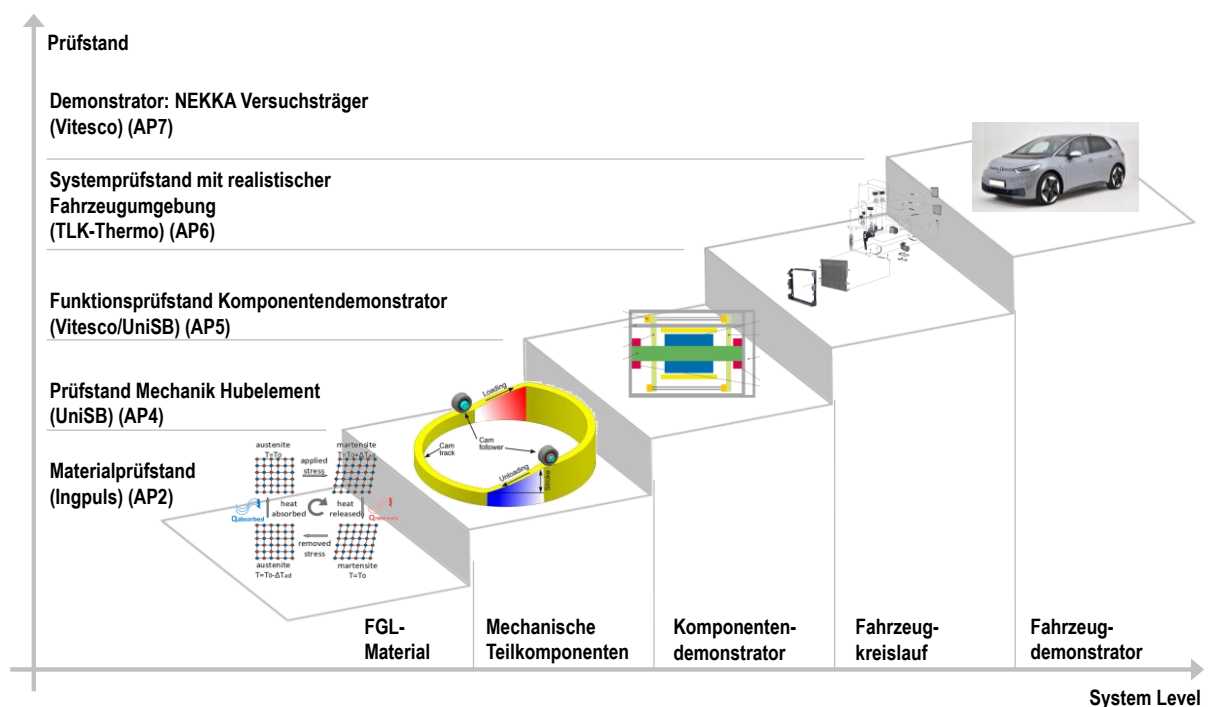


Abbildung 1: Stufenweises Vorgehen zur Zielerreichung und jeweils erforderliche Prüfstände zur Validierung der in der jeweiligen Stufe erreichten technischen Ziele.

Der Lösungsansatz wurde in mehreren Schritten umgesetzt und evaluiert:

- Zunächst sollte das FGL-Material für die Anwendung in Pkw-Klimaanlagen entwickelt werden.
- Auf der zweiten Stufe sollte der Einbau des FGL-Materials in das Hubelement erfolgen.

- Aufbauend darauf sollte über die dritte Stufe der Komponentendemonstrator realisiert werden.
- Im Anschluss sollte dessen Integration in den Fahrzeugkreislauf erfolgen. Auf diese Weise sollte ein Klimatisierungssystem entstehen, welches auf dem Systemprüfstand erprobt werden sollte.
- Im letzten Schritt sollte das Klimasystem in einem Versuchsfahrzeug verbaut werden. Der auf diese Weise erhaltene Fahrzeug-Demonstrator sollte unter realen Bedingungen „auf der Straße“ getestet werden. Über dieses Fahrzeugesamtsystem sollte letztendlich die Ergebnisdarstellung des innovativen Klimatisierungssystems und die Validierung der im Projekt definierten KPIs erfolgen.

Der Ablauf des Vorhabens war in sieben Arbeitspakete (AP) untergliedert, s. Abbildung 1. Die Projektlaufzeit war auf 3 Jahre befristet, allerdings wurde das Projekt im Projektmonat 21 auf Initiative des Konsortialsführers Vitesco vorzeitig beendet, s. Abbildung 2.

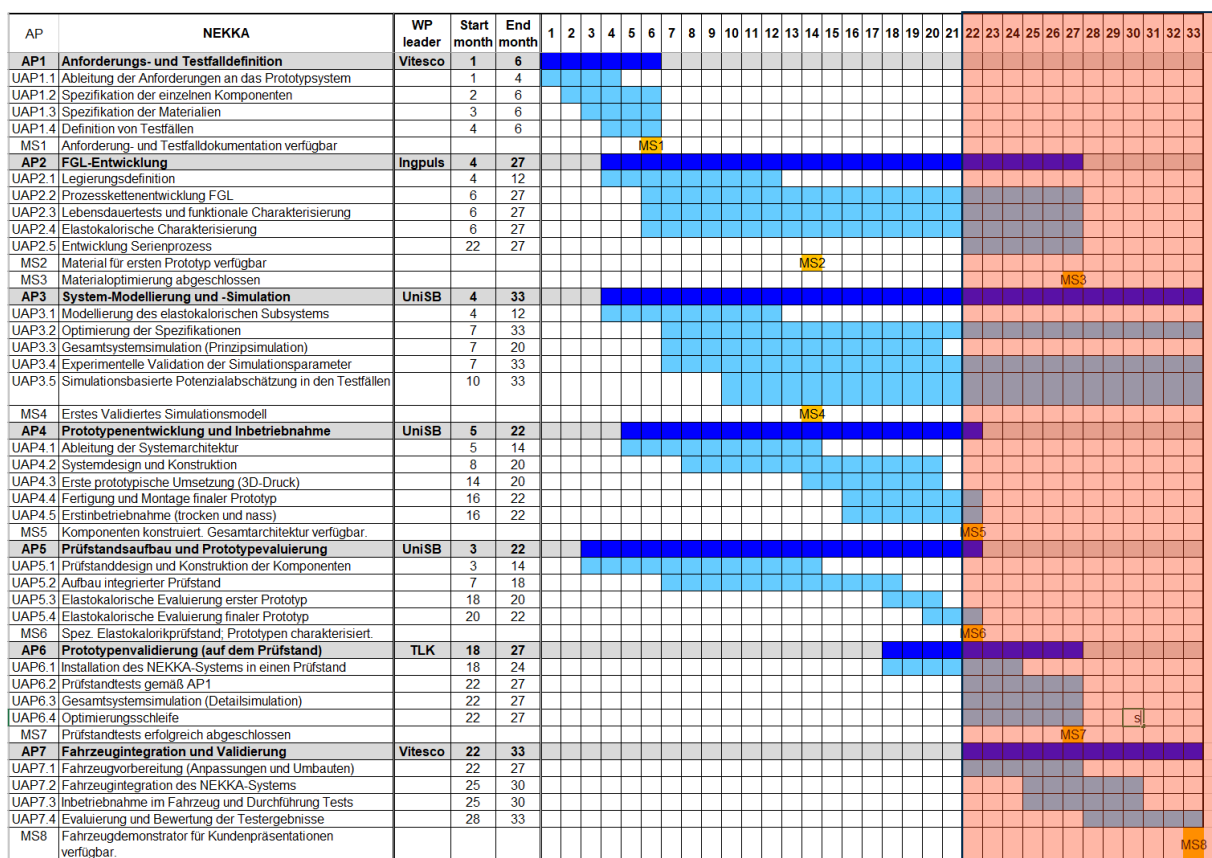


Abbildung 2: Zeit- und Arbeitsplan mit angepasster Projektverlauf, Vorhaben wurde bis Projektmonat 21 durchgeführt.

Ingpus GmbH war in den vier ersten APs beteiligt und in AP2 „FGL-Entwicklung“ als AP-Verantwortlicher. Dieses Arbeitspaket widmete sich der Entwicklung der Formgedächtnislegierung. Das AP sollte in mehreren Iterationen durchgeführt werden. Ziel war die Optimierung der FGL für die speziellen Herausforderungen in diesem Projekt, nämlich Langzeitstabilität bei hochzyklischer Beanspruchung des Materials. Im ersten Schritt erfolgte die Definition der FGL-Materialien auf Basis von Nickel-Titan. Neben der Entwicklung einer Prozesskette für die FGL wurden Lebensdauertests und die detaillierte Charakterisierung durchgeführt. Diese Ergebnisse sollten für die elastokalorische Charakterisierung benötigt werden. Gegen Ende des iterativen Vorgehens konnte ein für später geeigneter Serienprozess entwickelt werden.

Hierbei fünf unter APs wurden definiert:

UAP 2.1: Legierungsdefinition

UAP 2.2: Prozesskettenentwicklung FGL

UAP 2.3: Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung

UAP 2.4: Elastokalorische Charakterisierung

UAP 2.5: Entwicklung Serienprozess

I.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

I.4.1 Basis: Der elastokalorische Effekt

Im Gegensatz zu konventionellen Kühlsystemen, die auf dem Dampfkomppressionsverfahren mit flüchtigen Flüssigkeiten beruhen, werden bei elastokalorischen Kühlanwendungen Feststoffe zur Kälteerzeugung verwendet. Die Phasenumwandlung eines konventionellen Kühlprozesses erfolgt isotherm, und die Temperaturänderung des Kältemittels ist auf die isentrope Kompression bzw. adiabatische Expansion bezogen. Bei einer elastokalorischen Kühlung sind die latenten Wärmemengen des Materials für die Temperaturänderungen im Material verantwortlich. Sie können durch eine spannungsinduzierte Phasenumwandlung erreicht werden.

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigt einen typischen adiabatischen, elastokalorischen Kühlzyklus. Die vier Abschnitte des Zyklus sind in einem Temperatur-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Im ersten Abschnitt wird die FGL mechanisch belastet, was zu einer Phasenumwandlung von Austenit in Martensit mit zunehmender Dehnung ϵ führt. Bei hinreichend schneller Durchführung geschieht dies unter nahezu adiabatischen Bedingungen. Durch die Wiederfreisetzung der latenten Wärme steigt die Temperatur T im Material. Während der Haltephase in der zweiten Stufe wird die FGL-Dehnung konstant gehalten. Gleichzeitig findet der Wärmeaustausch mit der Umgebung statt, wodurch die FGL wieder abkühlt. Unter schneller adiabatischer Entlastung, im dritten Abschnitt, führen die latenten Wärmen der Phasenumwandlung zu einer weiteren Temperaturabsenkung des Materials auf Werte deutlich unterhalb der Umgebung. Im vierten Abschnitt findet bei konstanter Dehnung ein Wärmeübertragungsprozess statt, der mit dem zweiten Zustand vergleichbar ist.

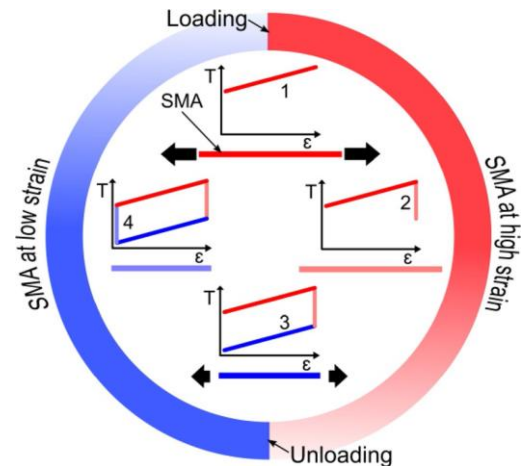


Abbildung 3: Veranschaulichung des Temperatur-T-Dehnungs-e-Verhaltens im vierstufigen Zyklus.

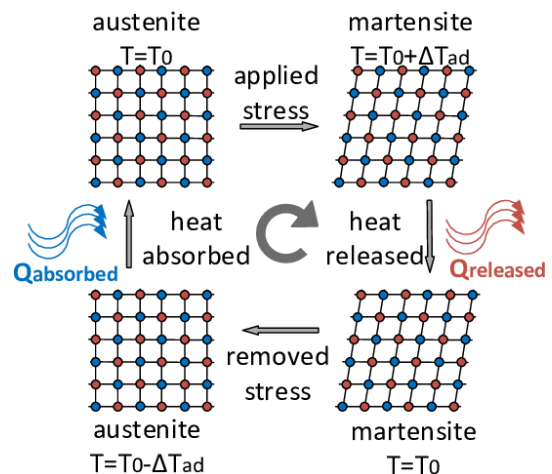


Abbildung 4: Übergänge in der Materialstruktur während des vierstufigen Zyklus

Quelle: Susanne-Marie Kirsch, Felix Welsch, Nicolas Michaelis, Marvin Schmidt, André Wiczorek, Jan Frenzel, Gunter Eggeler, Andreas Schütze, Stefan Seelecke; „NiTi-based elastocaloric cooling on the macroscale – from basic concepts to realization“, <https://doi.org/10.1002/ente.201800152>

I.4.2 Vergleich elastokalorischer Materialien im Hinblick auf Effizienz (COP)

Abbildung 5 zeigt eine Zusammenstellung von Ergebnissen zu Latentwärmern und thermischen Hysteresebreiten für verschiedene NiTi-basierte Legierungssysteme. Für hohe Kühleffizienz sind eine

große Latentwärme und gleichzeitig eine geringe Hysteresebreite erforderlich. Es konnten Latentwärmern zwischen 8,5 J/g bis ca. 30 J/g und thermische Hysteresebreiten von ca. 10 K bis >70 K ermittelt werden. Die Abbildung zeigt weiter, dass bei FGLs auf NiTi-Basis eine Korrelation zwischen der thermischen Hysteresebreite und der latenten Wärme besteht.

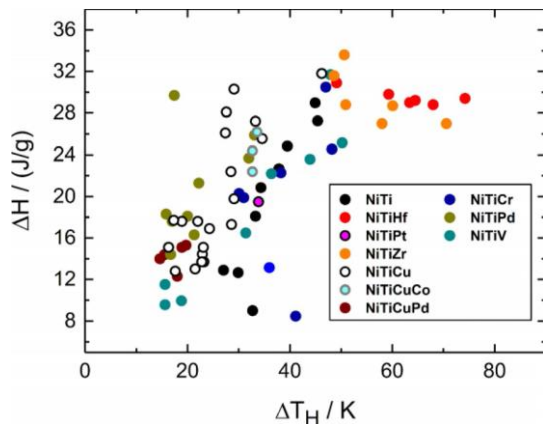


Abbildung 5: Korrelation zwischen (thermischer) Hysteresebreite ΔT_H und latenter Wärme ΔH für verschiedene NiTi-basierte FGL-Legierungssysteme. Copyright 2015, Elsevier.

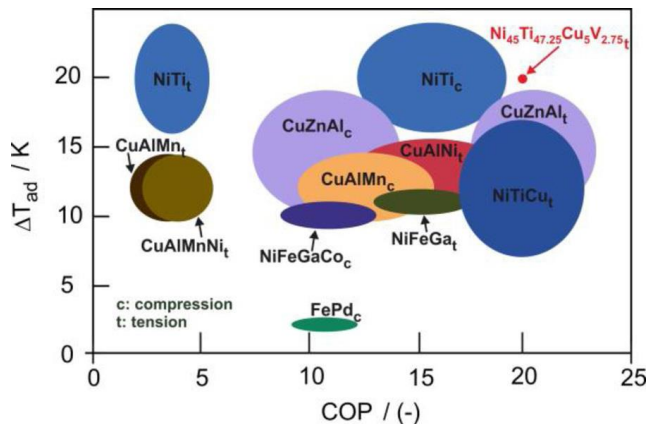


Abbildung 6: Vergleich verschiedener FGL-Systeme für die ferroische Kühlung in Bezug auf die adiabatische Temperaturänderung ΔT_{ad} und den COP-Wert. Copyright 2017, World Scientific.

Abbildung 6 fasst die Schlüsselparameter der ferroischen Kühlung für verschiedene FGL-Systeme zusammen. Die unterschiedlichen Legierungssysteme werden anhand der adiabatischen Temperaturänderung ΔT_{ad} und des COP-Werts bewertet. Das ferroische Kühlverhalten der verschiedenen FGL-Systeme unterscheidet sich, sobald eine Zug- oder Druckbelastung berücksichtigt wird, was durch die Indizes "c" (Kompression) und "t" (Zug) in Abbildung 6 angezeigt wird.

In den Abbildung 5 und Abbildung 6 wird allerdings nicht auf die zyklische Beanspruchung und die Ermüdungsresistenz der Materialien eingegangen. Diese sind für eine elastokalorische Anwendung jedoch von immenser Bedeutung. Abbildung 7 zeigt die Spannungs-Dehnungskurven einer NiTiCu-Dünnschichtkomponente, welche Lastwechsel in den anvisierten Größenordnungen ohne Degradation der funktionellen Eigenschaften aufweist. Ein Ziel des Projektes wird es sein, diese Eigenschaften auch auf konventionelle Draht-Halbzeuge zu übertragen, um diese wirtschaftlich produzieren zu können.

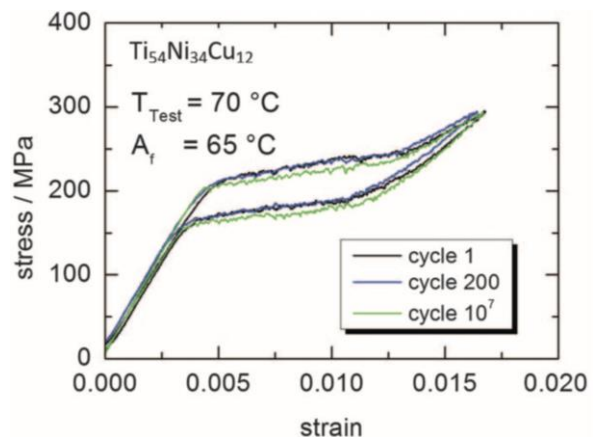


Abbildung 7: Ultralow fatigue in SMA films, aus: Ultralow-fatigue shape memory alloy films, Christoph Chluba et al., Science Vol 348, Issue 6238, 2015

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte während der Projektlaufzeit keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Projektkonsortiums. Sämtliche Fragestellungen wurden gemeinsam von den Projektteilnehmern bearbeitet. Dazu gab es regelmäßige Projekttreffen, zunächst fanden diese in Persona oder digital statt.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate

II.1.1 UAP2.1: Legierungsdefinition

Das Formgedächtnismaterial ist das Schlüsselglied für die Realisierung einer elastokalorischen Maschine. Die Phasenumwandlung der Formgedächtnislegierung ist für den Anstieg der thermischen Energie (exothermer Prozess) und die Abnahme der thermischen Energie (endothermer Prozess) verantwortlich. Für eine gute Performance einer elastokalorischen Maschine sind die elastokalorischen Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen fundamental wichtig. In der Literatur ist das sehr große Potential binärer NiTi Formgedächtnislegierungen für elastokalorische Anwendungen dokumentiert (Abbildung 8). Zugabe weiterer Legierungselemente zu NiTi beeinflusst die elastokalorischen negativ (Abbildung 9), die spezifischen Umwandlungswärmen nehmen tendenziell ab. Jedoch werden teilweise die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst. Da die mechanischen und elastokalorischen Eigenschaften gemeinsam die Performance einer elastokalorischen Maschine definieren, kann es sich trotzdem lohnen gewisse Einbußen der elastokalorischen Eigenschaften zu tolerieren. Insbesondere könnten verbesserte mechanische Eigenschaften sich positiv auf die Lebensdauer und funktionelle Stabilität der Materialien auswirken.

Ein weiter wichtiger Punkt ist die Herstellbarkeit der ausgewählten Legierungen im industriellen Maßstab. Nach einer ausgiebigen Literaturrecherche wurde zusätzlich zu einer binären Ni₅₁Ti₄₉ Legierung eine Ni₄₅Ti_{49,5}Cu₅Cr_{0,5} definiert. Dabei begünstigt das Kupfer die kristallografische Kompatibilität und verringert dadurch die mechanische Hysterese. Geringe Zugaben an Chrom reduzieren die Phasenumwandlungstemperaturen auf ein für die Anwendung benötigtes Niveau. Das Legierungselement Chrom könnte durch beispielsweise Vanadium ersetzt werden, jedoch besteht die Gefahr, dass der Umformprozess dieser Legierung mit konventionellen Mitteln nur schwer realisierbar ist. Durch bereits vorhandene Erfahrungen in der Prozessierung von NiTiCuCr wurde die oben beschriebene Zusammensetzung für weitere Untersuchungen ausgewählt.

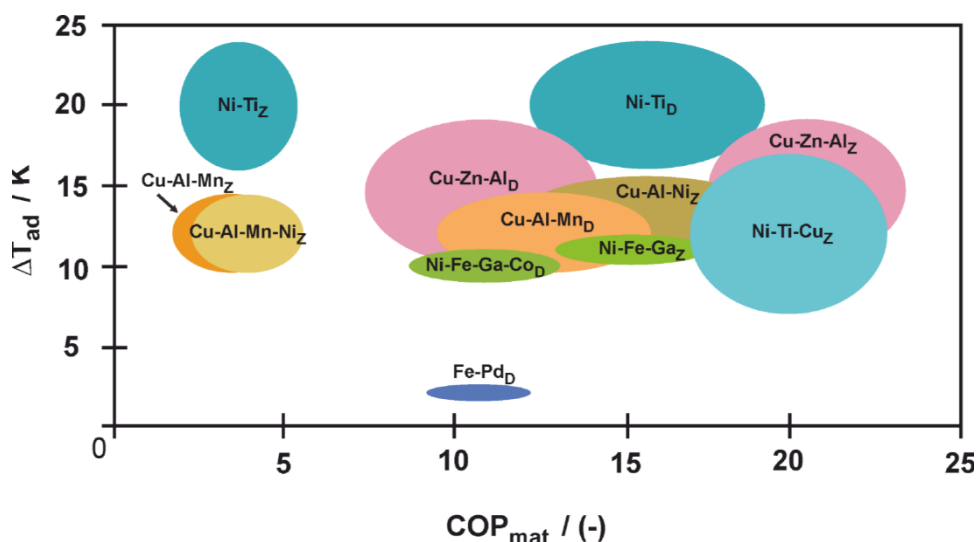


Abbildung 8: Übersicht der theoretischen Werte für Delta-T über COP (coefficient of performance) für unterschiedliche Formgedächtnislegierungen (Diss. Wieczorek 2016).

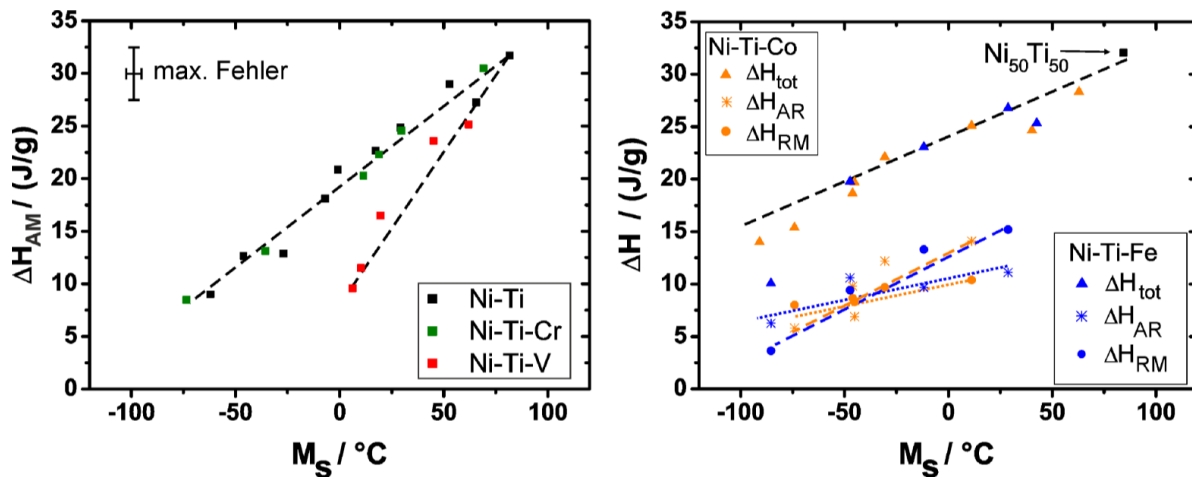


Abbildung 9: Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die spezifische Umwandlungswärme (Diss. Wieczorek 2016).

II.1.2 UAP2.2: Prozesskettenentwicklung FGL

Für die Herstellung standen verschiedene Fertigungsverfahren zur Verfügung, die jedoch alle auf einer schmelzmetallurgischen Route basierten. Für die verschiedenen Lösungsansätze und Schnittstellen wurde daher bewertet und abgeschätzt, ob die ausgewählten Legierungen in der jeweils erforderlichen Halbzeugform als Draht hergestellt werden konnten. Abbildung 10 zeigt die Schritte einer typischen Prozesskette zur Herstellung von pseudoelastischen FGL-Drähten, die aus Schmelzen (Einwaage, Schmelzen), Umformen (thermomechanische Behandlung) und Postprocessing (Training, WBH, Oberflächenbehandlung) besteht.

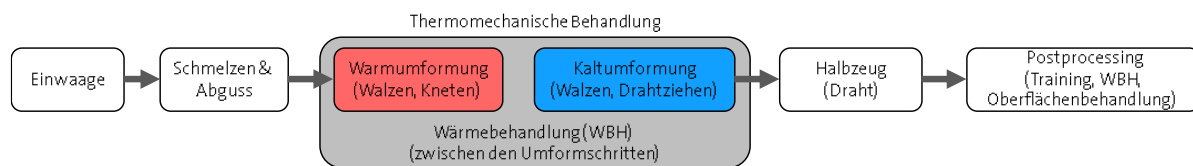


Abbildung 10: Prozesskette zur Herstellung von pseudoelastischen FGL.

Erste Parameterstudien entlang der Prozesskette wurden zur Herstellung beider Legierungen Ni51Ti49 und Ni45Ti49,5Cu5Cr0,5 durchgeführt. Dafür wurden Kombination von Warm- und Kaltumformung wie Schmieden und Drahtziehen gepaart mit Wärmebehandlungen realisiert. Verschiedene Werkzeuge wurden gefertigt, um unterschiedliche Umformgrade pro Umformschritt bis zu der Zielgeometrie einstellen zu können. Für die Studien wurden verschiedene Drahtdurchmesser zwischen von 0,25 mm und 0,4 mm ausgewählt. Die Prozesskette wurde so angepasst, dass die gewählten Umformschritte bei Erreichen des Zieldurchmessers die Mikrostruktur und damit verbundenen funktionellen Eigenschaften optimiert werden konnten. Bei den durchgeführten Anpassungen mussten stets die Randbedingungen von Material, der Anlagengrenzen und Werkzeugverschleiß berücksichtigt werden. Das primäre Ziel der Prozesskette, abgesehen von der Durchmesserreduktion, ist die Verfeinerung der Mikrostruktur durch eine geeignete Kombination an Mindestumformgrad und Rekristallisation. Die Wärmebehandlung sowie Art des Wärmeintrages wurden experimentell ermittelt.

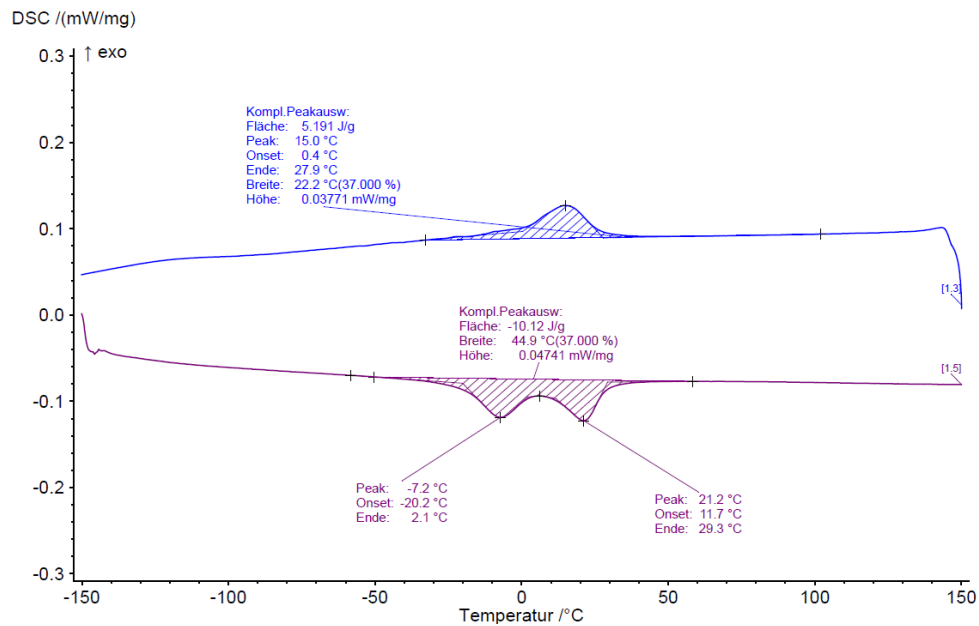


Abbildung 11: DSC-Kurve der Ni51Ti49-Legierung mit PUT im lastfreien Zustand (Ausgangsmaterial).

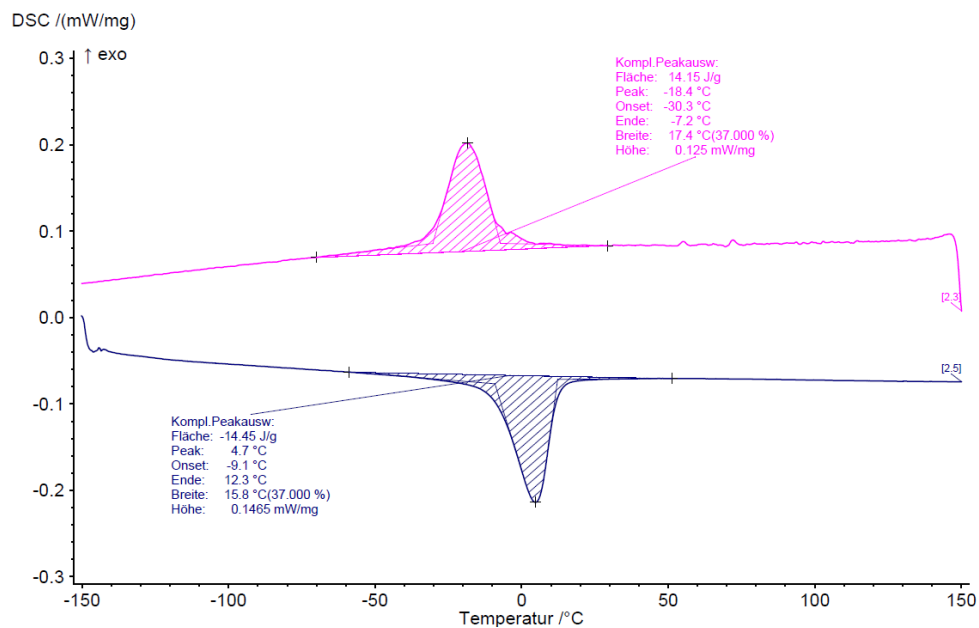


Abbildung 12: DSC-Kurve der Ni45Ti49,5Cu5Cr0,5-Legierung mit PUT im lastfreien Zustand (Ausgangsmaterial).

Zur Bestimmung der Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) wurden differenzkalorimetrischen (DSC-)Tests durchgeführt. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die DSC-Kurven samt der Phasenumwandlungstemperaturen der Legierungen Ni51Ti49 und Ni45Ti49,5Cu5Cr0,5, welche als Drahtmaterial produziert und bereitgestellt wurden.

Der Einfluss der Wärmebehandlungstemperatur auf die funktionellen Eigenschaften. wurde durch mechanische Zugversuche untersucht. Eine höhere WBH-Temperatur führt in beiden Legierungssystemen zu einer Abnahme der oberen und unteren Plateauspannung, s. Abbildung 13.

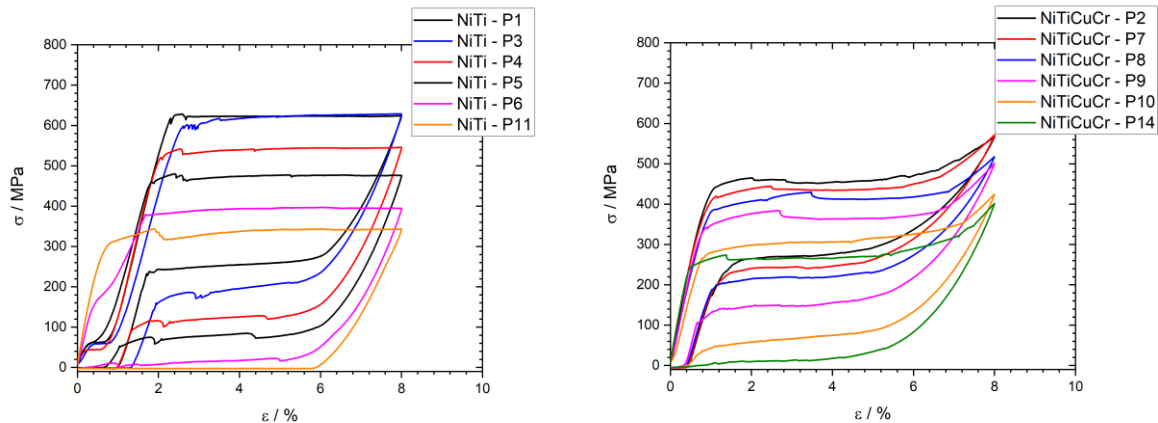


Abbildung 13: Einfluss der Wärmebehandlung auf den mechanischen Eigenschaften.

In der binären Legierung war die R-Phase sowohl in den DSC-Messungen als auch in den mechanischen Versuchen zu erkennen. Der Anteil von R-Phase konnte durch die Wärmebehandlungszeit angepasst werden. Eine Analyse der Zeiten zeigte, dass schnellere Wärmebehandlungen die R-Phase mehr unterdrückten, sodass der Anteil kleiner wurde.

Durch das Vorzyklieren der FGL-Drähte wird ein Zustand erreicht, in dem eine funktionelle Stabilität nach einem Einlaufverhalten erreicht werden kann.

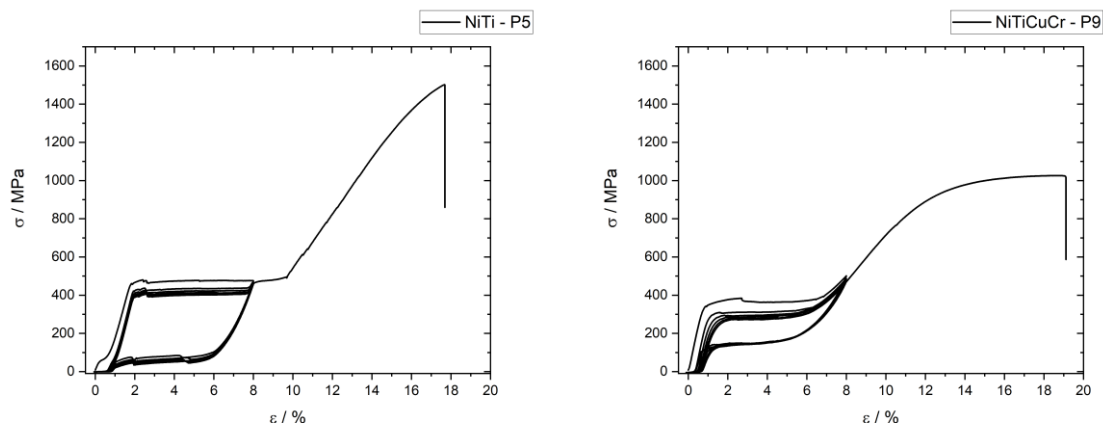


Abbildung 14: Repräsentative Messungen der funktionellen Stabilität und anschließend wurden die FGL-Drähte bis zum Bruch gezogen.

Die funktionelle Stabilität kann durch unterschiedliche Faktoren bzw. Merkmale beschrieben werden. Z.B. die irreversible Dehnung oder schmaler werdende Hysteresis, Abnahme der Plateauspannungen über der Zyklenzahl, s. Abbildung 14. Für die Wärmebehandlungstemperatur und die WBH-Geschwindigkeit wurde eine Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur festgestellt.

Im Fokus der andauernden Optimierung der Prozesskette befindet sich die Oberflächenqualität. Für die geforderten Lebensdauern muss die Oberfläche am fertigen Draht möglichst defektfrei vorliegen. Das Beizen von Draht auf einem größeren Drahtdurchmesser, kann zusammen mit der Optimierung der Prozessparameter die Oberflächenqualität enorm verbessern. Bisherige Untersuchungen sind mit dem Fokus auf das binäre NiTi beschränkt.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen in Abbildung 15 dokumentieren die Oberflächenqualität und die Bruchfläche von NiTi Drähten. Im linken Teil der Abbildung 15 ist ein Materialzustand im Zwischenstadium der Prozesskette gezeigt. Die bei dem Herstellungsprozess entstehende Oxidschicht

wurde durch einen Beizprozess entfernt. Die metallisch blanke Oberfläche weist parallel zur Drahtachse liegende Defekte auf, welche aus dem vorherigen Prozessschritten strammen. Im rechten Teil der Abbildung 15 ist eine exemplarische Bruchfläche nach einem Lebensdauertest an einem NiTi Draht gezeigt. Der Riss hat sich vermutlich an einem Oberflächendefekt gebildet und ist durch die zyklische Belastung im Laufe des Experiments weiter ins Innere gewachsen. Es fällt auf, dass sich eine Art Ring um die Bruchfläche gebildet hat. Entweder konnte der Riss entlang der Oberfläche einfacher wachsen oder es haben sich viele einzelne Risse vereint. Unabhängig davon, scheint die vorliegende Oberfläche für die Untersuchung der Lebensdauer nicht gut geeignet zu sein.

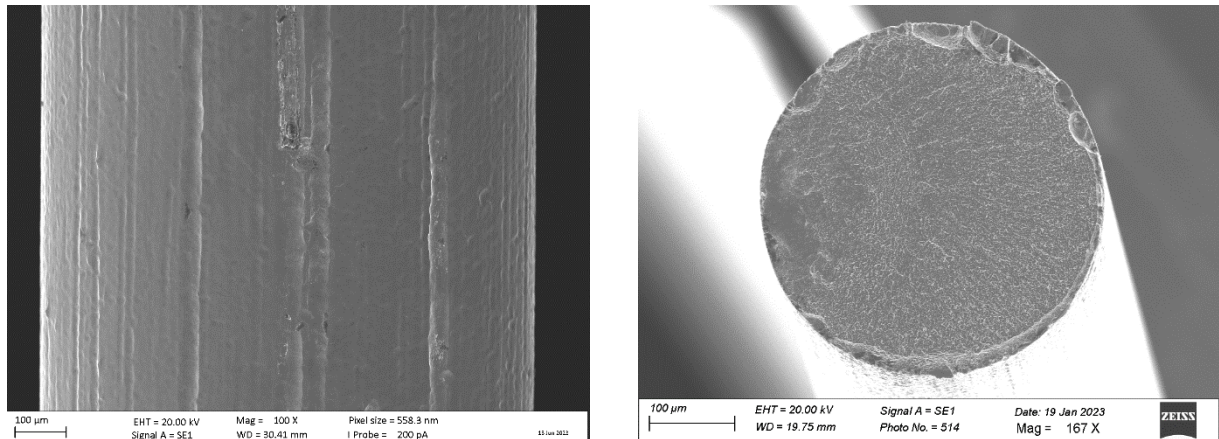


Abbildung 15: Exemplarische rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Links: Gebeizte Drahtoberfläche im Zwischenstadium der Prozesskette. Rechts: Bruchfläche eines Drahtes nach einem Lebensdauerversuch, mit Indizien für den Rissstart an einem Defekt in der Drahtoberfläche.

Weitere Untersuchungen waren in Arbeit, um die besseren Materialzustände entwickeln zu können. Auf Grundlage dieser Ergebnisse würde eine optimierte Prozesskette definiert werden können.

II.1.3 UAP2.3: Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung

Die funktionelle Ermüdung kann durch Legierungszusammensetzung, Optimierung der Mikrostruktur oder Oberflächenqualität minimiert werden.



Abbildung 16: Lebensdauerprüfstand zum Zyklieren den FGL-Drähten bei verschiedenen Frequenzen und Dehnungen.

Zur Ermittlung der Lebensdauer unter Berücksichtigung betriebsrelevanter Parameter (Frequenz, maximale Dehnung, Umgebungstemperatur, Medium, usw.) wurde ein Lebensdauerprüfstand konzipiert und aufgebaut, s. Abbildung 16.

Das Schubkurbelprinzip wurde angewendet, um die Drehbewegung eines elektrischen Antriebes in eine oszillierende Schubbewegung. Für die zyklischen Tests wurden dem NEKKA-System ähnlichen

Beanspruchungen (Dehnungen sowie Dehnraten und Umgebungstemperaturen) definiert.

Erste Lebensdauerversuche mit den definierten Versuchsparametern wurden durchgeführt, jedoch konnten bisher keine systematischen Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur, Dehnung und Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt werden. Gründe dafür sind: Die nicht-optimierte Oberfläche ist bei bisherigen Untersuchungen dominierend und würde zu stark verfälschten Ergebnissen führen. Die eventuell abgeleiteten Parameter würden nur für das „geschädigte“ (nicht-optimierte) Material ihre Gültigkeit haben. Ziel ist es Parameter zu finden, welche die Rissbildung minimieren. Da aber im Material viele Defekte vorhanden sind, kann diese Phase (Rissbildung) nicht untersucht werden. Stattdessen betrachtet man die Phase des Risswachstums, welche für den Betrieb weniger relevant ist.

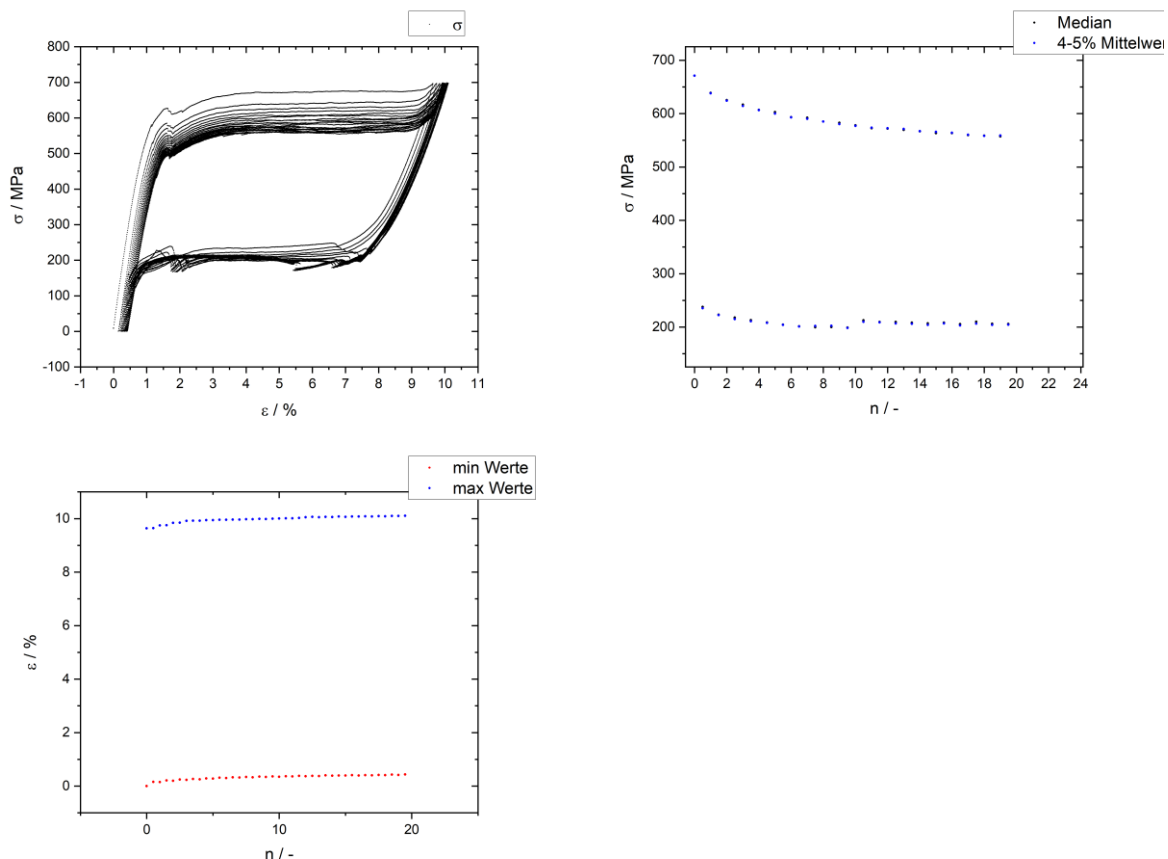


Abbildung 17: Charakterisierung der funktionellen Eigenschaften eines NiTi-Drahtes ohne Postprocessing. Zyklische Zugversuche bis 700 MPa bei Raumtemperatur (oben links). Entwicklung der oberen und unteren Plateauspannung über der Zyklenzahl (oben rechts). Auswertung der Drahtlänge (irreversible Dehnung) und der Maximaldehnung bei der aufgeprägten Spannung über der Zyklenzahl.

Wesentliche Erkenntnisse und Fortschritte konnten am binären NiTi im Bereich des Postprocessings erarbeitet werden. Die funktionellen Eigenschaften von FGL verändern sich beim Abrufen des FGE in den ersten Zyklen besonders stark. Durch das Postprocessing soll diese Veränderung vorweggenommen werden. Das Material wird für den Betrieb vorbereitet, so dass nur geringfügige bzw. gar keine Änderungen der funktionellen Eigenschaften im Betrieb auftreten. In Abbildung 17 ist das zyklische Verhalten eines NiTi Drahtes ohne ein Postprocessing gezeigt. Die pseudoelastischen Kurven im oberen, linken Teil der Abbildung 17 verdeutlichen, dass die Form der mechanischen Hysterese sich verändert, die obere und untere Plateauspannung nehmen ab. Die Probe wird länger. Der Verlauf für die obere und die untere Plateauspannung über der Zyklenzahl ist im oberen, rechten Teil der Abbildung 17 dargestellt. Besonders in den ersten 10 Zyklen nimmt die obere Plateauspannung deutlich ab. Im Vergleich zu der oberen Plateauspannung ist der Einfluss der

wiederholten Zugversuche auf die untere Plateauspannung weniger stark ausgeprägt, diese nimmt aber ebenfalls leicht ab.

Ein weiterer Vorteil dieses Prozessschritts ist die gezielte Beeinflussung der funktionellen Eigenschaften. Besonders wichtige Eigenschaften sind eine möglichst hohe untere Plateauspannung, eine möglichst niedrige obere Plateauspannung (aus diesen beiden Zielen resultiert eine möglichst geringe mechanische Hysterese). Diese Anforderungen führen dazu, dass ein größeres Temperaturfenster entsteht, in welchem das Material eingesetzt werden kann. Bisherige Untersuchungen identifizieren welche Art der Aktivierung des FGE schneller zu dem gewünschten Materialzustand führt. In Abbildung 18 sind 50 wiederholte Zugversuche bis 6% Dehnung für unterschiedlich postprozessierte Materialzustände gezeigt. Während die spannungsinduzierte Phasenumwandlung bei Raumtemperatur nach 20 Zyklen eine deutliche Verbesserung der gewünschten Kennwerte zeigt (Abbildung 18, links), zeigt eine Erhöhung der Versuchstemperatur auf z.B. 70° eine weitere enorme Verbesserung der Kennwerte (Abbildung 18, rechts). In diesem Fall führt die Temperaturerhöhung bei dem Postprocessing primär zum Absenken der oberen Plateauspannung. Die mechanische Hysterese wird deutlich reduziert.

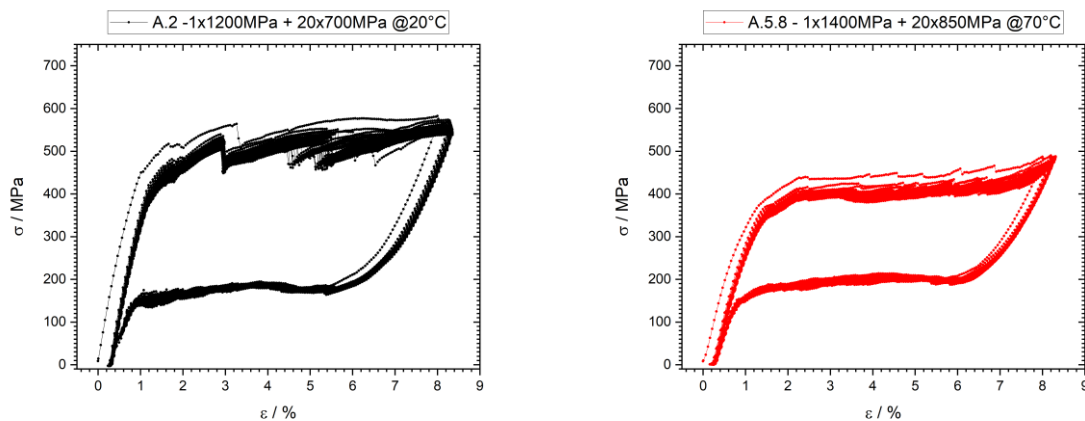


Abbildung 18: Vergleichende Messungen von unterschiedlich postprozessierten Materialzuständen. Bei Raumtemperatur postprozessiertes Material verbessert das zyklische Umwandlungsverhalten und reduziert die funktionelle Ermüdung (links). Eine Erhöhung der Temperatur beim Postprocessing reduziert die mechanische Hysterese und senkt die obere Plateauspannung deutlich (rechts).

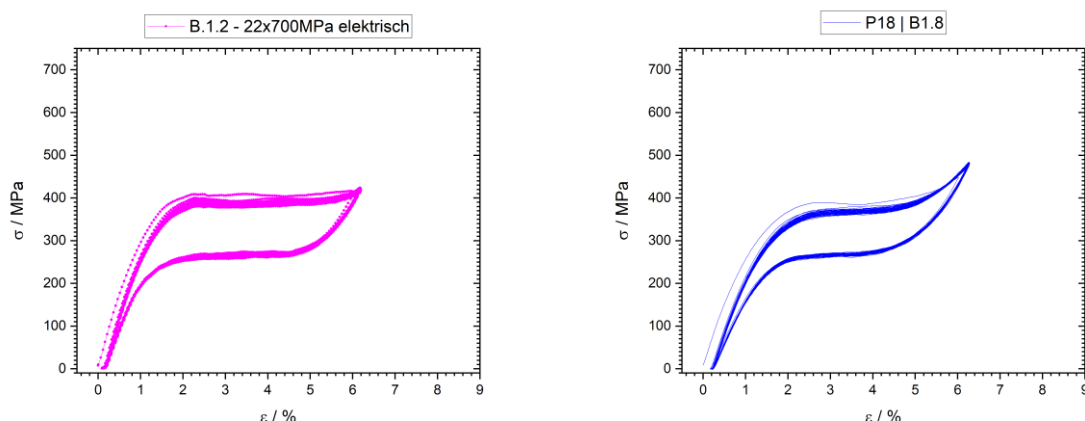


Abbildung 19: Vergleichende Messungen von unterschiedlich postprozessierten Materialzuständen. Bei konstanter Spannung postprozessiertes Material verbessert das zyklische Umwandlungsverhalten und reduziert die funktionelle Ermüdung (links). Eine Anpassung der Spannung beim Postprocessing reduziert die mechanische Hysterese (rechts).

Eine Alternative zu der spannungsinduzierten Phasenumwandlung bei einer konstanten Temperatur, ist die thermische Aktivierung bei einer konstanten Spannung. Untersuchungen zum Postprocessing

durch eine thermisch induzierte Phasenumwandlung haben zu nochmals deutlich verbesserten Materialzuständen geführt.

Abbildung 19 zeigt vergleichende Messungen nach dem gleichen Verfahren wie bereits in Abbildung 18 vorgestellt. Ein direkter Vergleich mit den Materialzuständen in Abbildung 18 zeigt von weiteren deutlichen Verbesserungen der Kennwerte, jedoch unter Einbußen von reversibler Dehnung. Die Versuchsparameter mussten so angepasst werden, dass die aufgeprägte Dehnung 6 statt 8% betrug. Die untere Plateauspannung beträgt ca. 250 MPa und ist damit im Vergleich zu den Kennwerten der Materialzustände in Abbildung 18 um mindestens 50 MPa höher. Beide Faktoren, geringere obere und höhere untere Plateauspannung, verringern die mechanische Hysterese. Die funktionelle Stabilität der beiden Zustände ist in den hier gezeigten Tests ebenfalls ausgezeichnet.

II.1.4 UAP2.4: Elastokalorische Charakterisierung

Für die initiale Ermittlung der elastokalorischen Kenndaten wurde Probenmaterial von beiden Legierungen in Drahtform hergestellt und den Projektpartnern Uni SB und Vitesco zur Verfügung gestellt. In gemeinsamen wöchentlichen Workshops wurden die werkstoffwissenschaftlichen Ergebnisse betrachtet, diskutiert und bewertet. Daraus wurden gemeinsam die nächsten Optimierungsschritten besprochen und beschlossen.

Während die grundlegende Charakterisierung der funktionellen Eigenschaften begleitend zu der Entwicklung des Postprocessings erfolgt, wurden ausgewählte Zustände weiterführend untersucht.



Abbildung 20: Differenzkalorimetrie Messungen (DSC - differential scanning calorimetry) unterschiedlicher Materialzustände.

In Abbildung 20 sind verglichen DSC-Messungen von Materialzuständen ohne und mit Postprocessing dargestellt. Üblicherweise werden diese Messungen verwendet um die Umwandlungstemperaturen und Umwandlungswärme (Enthalpie) einer Phasenumwandlung zu bestimmen. Jedoch sind die DSC-Ergebnisse aufgrund der geringen Korngröße nur schwer / bedingt interpretierbar.

Die Messsignale in Abbildung 20 sind vergleichsweise gering ausgeprägt, anhand dieser Messung würde das Material für den elastokalorischen Einsatz ungeeignet sein, die mechanischen Antworten im Zugversuch liefern jedoch Indizien dafür, dass trotz „schlechter“ DSC-Kurven die elastokalorische Performance der Materialzustände vielversprechend sein sollte.

Die funktionellen Eigenschaften der FGL ändern sich stark mit der Änderung der Umgebungstemperatur (bzw. der Materialtemperatur). Mit steigenden Temperaturen werden die mechanischen Spannungen höher, werden die Temperaturen zu gering, so kann der pseudoelastische FGE komplett unterdrückt werden (das Material kehrt nicht in die Ursprungsform zurück). Dieser Zusammenhang wird als der Clausius-Clapeyron Zusammenhang bezeichnet und beschreibt den Anstieg der Spannung pro Grad Celsius. Da in der anvisierten Anwendung das Material bei unterschiedlichen Temperaturen eingesetzt wird, muss das Verhalten der hergestellten Materialzustände in dem betriebsrelevanten Temperaturbereich charakterisiert werden.

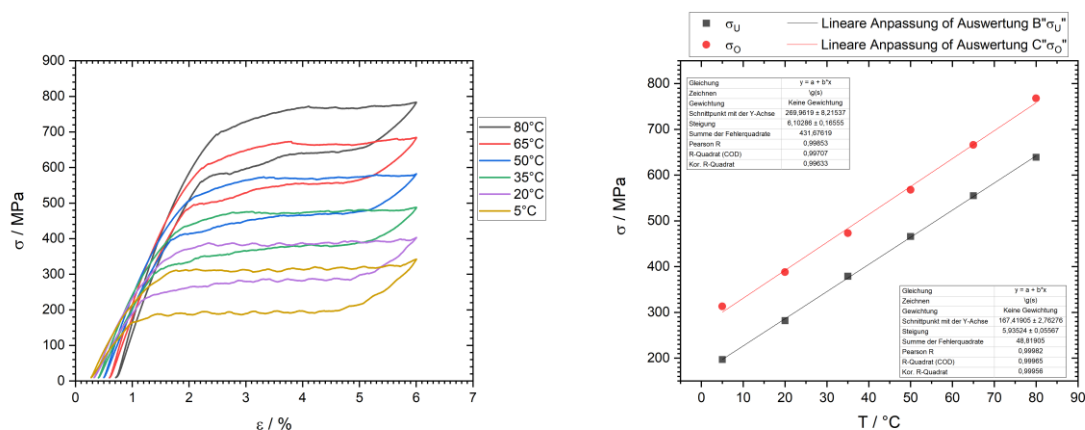


Abbildung 21: Charakterisierung der Materialeigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturen und Ermittlung des Clausius-Clapeyron Zusammenhangs.

In Abbildung 21 sind Zugkurven von postprozessiertem Material für den Temperaturbereich von 5 bis 80°C gezeigt (links). Im rechten Teil der Abbildung 21 sind die Veränderungen der Plateauspannungen über der Temperatur dargestellt und die Messwerte durch einen linearen Fit interpoliert. Die Steigungen der Ausgleichsgeraden betragen 6,1 MPa/K und 5,9 MPa/K für die obere und untere Plateauspannung entsprechend. Liegen die ermittelten Werte für den CC-Zusammenhang in den beiden Materialzuständen im Vergleich zu den Literaturwerten von ca. 8 MPa/K deutlich geringer. Ein möglichst geringer Wert ist für die anvisierte Anwendung besonders relevant, da hierdurch ein breiteres Temperaturfenster durch einen Materialzustand abgedeckt werden kann. Aufgrund der sehr feinkörnigen Mikrostruktur kann die Enthalpie der Phasenumwandlung nicht durch eine DSC-Messung verglichen werden, da jedoch ein Messaufbau an der UniSB die Oberflächentemperatur während des Zugversuches überwachen kann, wurde die elastokalorische Charakterisierung primär hierdurch erfolgt.

II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird in einem separaten Dokument erbracht und wird in diesem Abschlussbericht deshalb nicht explizit aufgeführt. Neben den Aufwendungen für Personal und Dienstreisen wurde ein Unterauftrag zur Oberflächenreinigung durch Beizen vergeben.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeiten im Fördervorhaben folgte entsprechend der im Projektantrag formulierten Planung bis zum Vorhabenabbruch. Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich

bearbeitet. Es waren keine zusätzlichen finanziellen oder materiellen Ressourcen für das Projektvorhaben nötig. Die anvisierten Kosten entsprachen den geplanten Schätzungen und mussten nicht angepasst werden.

Die Investitionen in das Vorhaben NEKKA waren notwendig und angemessen, da es sich um ein innovatives und zukunftsweisendes Projekt handelt, das eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Klimatisierung bietet. Hierbei eröffnet das Vorhaben die Verwendung von FGL-Materialien für diesen Bereich.

Das Vorhaben war ein Forschungsprojekt, das darauf abzielte, innovative Technologien und Materialien für die Entwicklung von Wärmepumpen zu erforschen und zu entwickeln. Es handelte sich um ein sehr ambitioniertes und komplexes Projekt, das viel Forschungsarbeit erforderte und mit erheblichen Risiken verbunden war. Die Kosten für die notwendige Infrastruktur, das Personal und die Materialien waren daher sehr hoch. Da es sich um ein sehr spezialisiertes und risikoreiches Projekt handelte, war es für private Investoren nicht attraktiv genug, um das nötige Kapital zu investieren. Daher war es notwendig, dass das Projekt durch öffentliche Mittel finanziert wurde, um sicherzustellen, dass es trotz der hohen Risiken und der langfristigen Ausrichtung durchgeführt werden konnte.

II.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Obwohl das Vorhaben nicht nach ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplan abgeschlossen werden konnte, kann eine nachstehende Verwertung daraus erschlossen werden.

Die Entwicklung des für die Aufgabenstellung geeigneten FGL-Materials und die dazugehörigen geeigneten Produktionsschritte war der zentrale Beitrag, den Ingpuls beigesteuert hat. Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnte ein weiterer Schritt zur Etablierung der FGL-Technologie in dem innovativen Umfeld der Elastokalorik gesetzt werden, welche für Ingpuls eine hoher Relevanz bezüglich der potenziellen Stückzahlen darstellt. Vor dem Hintergrund aktueller, sehr vorsichtiger Schätzungen ergibt sich ein enormes Marktpotential im Bereich der Elastokalorik. Durch den für FGL-Verhältnisse sehr hohen Materialeinsatz pro System, welches um ein Vielfaches höher ist als z.B. für einen Stent, kann ein Materialbedarf entstehen, welcher die Errichtung mehrerer Fertigungslinien notwendig machen würde. Ingpuls will hier als einziger deutscher FGL-Hersteller von Anfang an seinen Beitrag leisten. Da dies für auf die strategische Ausrichtung des Unternehmens einen großen Einfluss haben kann, muss die rechtzeitige Bereitstellung von Produktionskapazitäten gewährleistet werden.

Im Fokus der wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten steht für Ingpuls die Steigerung des Technologiereifegrades aus Werkstoffssicht. Hierbei die Etablierung neuen Legierungssystems mit bisher nicht erreichten Eigenschaften. Deren Entwicklung entsteht für Ingpuls ein Alleinstellungsmerkmal, welches auch mit der Schöpfung neuer Charakterisierungs- und Produktionsmethoden für FGL eine wichtige Basis für die Erschließung weiterer Anwendungsfelder bietet. Dank dieser Alleinstellungsmerkmale eröffnet weitere Anwendungsfelder abseits der Automobilindustrie.

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger ist während der Projektlaufzeit keine relevanten Arbeiten (Veröffentlichungen, Patente) von anderen Stellen bekannt geworden.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Folgende Veröffentlichung auf Fachtagungen wurden im Rahmen des Projektes vom Konsortium bereits publiziert:

Försterling, S.; Bodmann, M.; Stulgies, N.; Lemke, N.: Simulation of Automotive Elastocaloric Air Condition System using Mean Climate Data. Poster auf Tagung Elastocalorics, Saarbrücken, June 27.-28. 2023

Weitere Veröffentlichung der Ergebnisse wird gemeinsam mit den Projektpartnern abgestimmt.

Anhang B: Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien, Verbundvorhaben – NEKKA – „Entwicklung eines alternativen Klimatisierungssystems auf Basis des elastokalorischen Effekts für die Anwendung in Fahrzeugen“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Navarro de Sosa, Iñaki	<div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">5. Abschlussdatum des Vorhabens Am 30.09.2023 abgebrochen (Es war ursprünglich bis 30.09.2024 geplant)</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">6. Veröffentlichungsdatum</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">7. Form der Publikation Schlussbericht</div>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Inguls GmbH Von-Waldthausen-Straße 77 44894 Bochum	<div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">9. Ber. Nr. Durchführende Institution</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">10. Förderkennzeichen 19I21050C</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">11. Seitenzahl 19 zzgl. Anlage</div>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	<div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">13. Literaturangaben 0</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">14. Tabellen 1</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; padding: 5px;">15. Abbildungen 21</div>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Ziel des Projekts NEKKA liegt in der Entwicklung eines alternativen Klimatisierungssystems auf Basis des elastokalorischen Effekts für die Anwendung in Fahrzeugen zur Erzielung besserer Effizienz (COP) und Umweltverträglichkeit sowie Nachhaltigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung von Bauraum, Gewicht und Kosten. Das NEKKA-Klimatisierungssystem besitzt mit seinen Vorteilen hohes Verwertungspotenzial. Das Konzept soll auf System-, Funktions- und Komponentenebenen so skalierbar sein, dass es für alle Fahrzeugklassen geeignet ist. Die Basis des NEKKA System bilden Formgedächtnislegierungen, welche durch mechanische Beanspruchung eine Temperaturerhöhung zur Folge haben, wird diese mechanische Beanspruchung wieder weggenommen, hat dies eine Temperaturverringerung zur Folge. Durch diesen elastokalorischen Effekt ist es möglich daraus einen Prozess zu entwickeln, welcher kontinuierlich Wärme und Kälte zur Verfügung stellen kann. Die Herausforderungen von Inguls GmbH lagen hierbei auf dem Bereich der Materialoptimierung und -herstellung des Heiz- und Kältefeststoffmittels (korrosionsbeständige, langzeitstabile Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen, die hohe COP ermöglichen). Hierfür sollte das FGL-Material für die Anwendung in Pkw-Klimaanlagen entwickelt werden, welches in das Hubelement der Komponentendemonstrator für die Integration in das Klimatisierungssystem des Fahrzeuges eingebaut werden könnte. Das Vorhaben konnte nicht nach ursprünglichem Arbeits- und Zeitplan abgeschlossen werden, weil der Konsortialführer dieses auf eigener Initiative vorzeitig beendet hat. Die abgeschlossenen Arbeiten, erreichten Erkenntnissen und erzielten Ergebnisse sind im Schlussbericht dargestellt.	
19. Schlagwörter Elastokalorik, Formgedächtnislegierung, Automobil, Klimatisierung, Umweltverträglichkeit	
20. Verlag	21. Preis

Anhang C: Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Technical programme "New vehicle and system technologies, Collaborative project - NEKKA - "Development of an alternative air conditioning system based on the elastocaloric effect for use in vehicles"	
4. author(s) (family name, first name(s)) Navarro de Sosa, Iñaki	5. end of project Cancelled on 30/09/2023 (it was originally planned until 30/09/2024)
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Inguls GmbH Von-Waldthausen-Straße 77 44894 Bochum	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I21050C
	11. no. of pages 19 plus Annexes
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 0
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 21
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>The aim of the NEKKA project is to develop an alternative air conditioning system based on the elastocaloric effect for use in vehicles to achieve better efficiency (COP) and environmental compatibility as well as sustainability while simultaneously reducing installation space, weight and costs. With its advantages, the NEKKA air conditioning system has a high exploitation potential. The concept should be scalable at system, function and component level so that it is suitable for all vehicle classes. The NEKKA system is based on shape memory alloys, which under mechanical stress result a temperature rise. If this mechanical stress is removed, in temperature reduction is obtained. Among the elastocaloric effect it is feasible to develop a process that can continuously provide heat and cold.</p> <p>The challenges faced by Inguls GmbH were in the area of optimisation and production of the heating and cooling solid materials (corrosion-resistant, long-term stable nickel-titanium shape memory alloys that enable high COP). For this purpose, the SMA material was to be developed for use in car air conditioning systems, which could be installed in the lifting element of the component demonstrator.</p> <p>The project could not be completed according to the original work plan and schedule because the consortium leader terminated it prematurely on his own initiative. The completed work, findings and results achieved are presented in the final report.</p>	
19. keywords Elastocaloric, Shape memory alloys, Automotive, Air conditioning, Environmental sustainability	
20. publisher	21. price