

MODELLIERUNG, ANALYSE UND ERPROBUNG VON SENSOR- UND AKTUATORSTRATEGIEN FÜR DIE AKTIVE STRUKTURSTABILISIERUNG

F. Möller*, E. Franzen*, S. Holzhauer*, R. Förstner*

*Universität der Bundeswehr München, Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung,
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag gliedert sich in 3 Bereiche: Im ersten Teil werden Ansätze aufgezeigt, wie die dimensionale Stabilität von Satellitenstrukturen durch passive und aktive Kontrollmethoden verbessert werden kann. Die vorgestellten Sensor- und Aktuatorstrategien werden dazu von einem speziellen geschlossenen Filter-Regler-Ansatz abgegrenzt. Dieser Ansatz zur aktiven Kontrolle thermisch induzierter Verschiebungen wurde bereits in früheren Arbeiten theoretisch vorgestellt und praktisch validiert. Im zweiten Teil des Beitrags soll untersucht werden, ob durch eine Erweiterung um zwei zusätzliche Kontroll-Heizelemente eine verbesserte Verschiebungskompensation bei gleichzeitiger Senkung der Gesamtheizleistung realisierbar ist. Versuche in der Thermal-Vakuumkammer zeigten, dass die Verschiebungen in der Struktur ähnlich gut wie in früheren Konfigurationen kompensiert werden können, allerdings ohne die Kontroll-Heizleistung zu reduzieren. Im dritten Teil des Beitrags wird der Einsatz von Peltier-Elementen als Alternative zu den Heizelementen untersucht. Um eine Kühlung durch Kontroll-Heizelemente zu erreichen, müssen diese im stationären Zustand dauerhaft mit einer Referenzleistung betrieben werden. Ein Absenken dieser Leistung führt zu einer Verringerung der Wärmelast und damit einer Kühlung gegenüber des Ausgangszustands. Peltier-Elemente verfügen über eine heiße und eine kalte Seite, welche abhängig von der Richtung des Stromflusses variiert werden kann. Der dauerhafte Betrieb dieser Elemente zur Etablierung einer Referenzleistung ist nicht notwendig. Die Untersuchungen zeigten, dass eine aktive Kühlung sowie Erwärmung durch Umpolung der Elemente erreicht werden kann. Der Kühleffekt ist jedoch durch den Temperaturgradienten innerhalb des Elements und die Fähigkeit der Abstrahlung der Element-Rückseite begrenzt. Die durch das Modell des Filter-Regler-Ansatz berechneten, notwendigen Kontroll-Wärmeströme können, im Gegensatz zu den Heizelemente, bei denen eine direkte Korrelation zwischen anliegender Leistung und erreichtem Wärmestrom besteht, durch die Peltier-Elemente nicht abgebildet werden. Zusätzliche Nicht-Linearitäten erschweren die Aufstellung von Übertragungsfunktionen.

Keywords: Strukturstabilität, aktive Strukturstabilisierung, Peltier-Elemente, Smart Structures, Meta-Materialien

ABKÜRZUNGEN

CP	Cold Plate
FEM	Finite Element Methode
GSQ	Gleichstrom-Spannungsquelle
HP	Hot Plate
LQR	Linear-quadratischer Regler
PE	Peltier-Element
PKA	Prozess Kühlanlage
TEC	Thermoelectric Cooler
TEG	Thermoelectric Generator
TVK	Thermal Vakuum Kammer

1 EINLEITUNG

Durch stetige Verbesserungen der Genauigkeit von Sensoren steigen auch die Anforderungen an die Trägerstrukturen, wie optische Banken, auf denen diese Sensoren für weltraumgestützte Anwendungen montiert werden. Ausreichende Dimensionsstabilität bei Änderungen der thermischen Randbedingungen kann häufig durch rein passive

Methoden, wie die Verwendung von Materialien mit hoher Steifigkeit und geringer Wärmeausdehnung, nicht mehr gewährleistet werden. Im Rahmen der IRASSI Mission [1, 2] wurde daher ein Konzept für eine aktive Strukturstabilisierung durch gezielte Einbringung von Wärme zur Kompensation ungewollter Verformungen von Plattformen und Trägerstrukturen entwickelt. Die Funktionsfähigkeit dieses Ansatzes konnte durch erste Experimente bereits validiert werden [3, 4]. Die Optimierung der Sensor- und Aktuatorpositionen erlaubt die Stabilisierung der Struktur durch Verwendung eines LQ-Reglers in Verbindung mit einem Kalman-Filter in einem geschlossenen Filter- und Regleransatzes auch gegenüber zufälligen Störungen der thermalen Randbedingungen [5, 6]. In diesem Beitrag soll der Ansatz weiter verbessert und die Funktionsfähigkeit für komplexere Anwendungsfälle validiert werden. Dafür werden Redundanzen in den Heizelementen modellseitig wie experimentell implementiert, um die Performance des Filter-Regler-Ansatz zu verbessern und damit die Vorbereitungen für eine In-Orbit-Validierung innerhalb der SeRANIS-Mission [7] zu leisten. Darüber hinaus soll der Einsatz anderer Sensor- und Aktuatortechnologien zur Erreichung einer erhöhten Dimensionsstabilität untersucht und disku-

tiert werden. Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass der Energieverbrauch durch kontinuierliches Betreiben der Kontroll-Heizelemente ineffizient ist und daher eine missionskritische Komponente darstellen könnte. Daher wird insbesondere der Einsatz von Peltier Elementen als Aktuatoren intensiver analysiert und experimentell untersucht. Nachfolgend werden zuerst die notwendigen, theoretischen Grundlagen hierfür im Abschnitt 2 erläutert. Danach folgt eine detaillierte Beschreibung der Versuchsaufbauten sowie der experimentellen Methode in Abschnitt 3. In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen ausgewertet und analysiert.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, was Dimensionsstabilität bei Strukturen bedeutet, auf welche Arten Störungen wirken und wie diese minimiert werden können. Anschließend soll der Filter-Regler-Ansatz zur Kompensation von thermisch-induzierten Verschiebungen sowie die dazu notwendigen Systemparameter präsentiert werden. Abschließend werden Peltier-Elemente als alternative Aktuatoren für diesen Ansatz vorgestellt.

2.1 Dimensionsstabile Strukturen

Dimensionsstabilität ist eine allgemeine Eigenschaft eines Materials oder einer Struktur, die es ermöglicht, seine Form, Größe oder jede Dimension beizubehalten. Im Gegensatz dazu ist die dimensionsinstabile Eigenschaft der generische Begriff für alle Verzerrungen, Verformungen, Verschiebungen oder Spannungen, die ein Material oder eine Struktur erfährt, wenn es einer Änderung der Randbedingungen oder äußeren Einflüssen ausgesetzt ist. Die vereinfachte Duhamel-Newman-Beziehung kann zur Messung der Dimensionsinstabilität verwendet werden und beschreibt die Verformung in einer Struktur als Summe verschiedener Einflüsse gemäß [8]:

$$(1) \quad \epsilon_S = \frac{\Delta\sigma}{E} + \alpha\Delta T + \beta\Delta M + \eta\Delta t + \Psi\Delta q + \dots$$

Diese verschiedenen äußeren Einflüsse können aufgebrauchte Spannung σ , Temperatur T , aufgenommene Feuchtigkeit M , Zeit t oder Strahlung und Wärmeflüsse q sein, mit den entsprechenden Materialeigenschaften wie Elastizitätsmodul E , Wärmeausdehnungskoeffizient α , Koeffizient der Feuchtigkeitsausdehnung β , der zeitlichen Ausdehnung η und dem Strahlungsausdehnungskoeffizienten Ψ . Die Dimensionsstabilität beschreibt nicht nur eine Materialeigenschaft, sondern umfasst alle physikalischen Eigenschaften eines Materials oder einer Struktur, die zu einer Änderung im Vergleich zu einem Referenzzustand führen. Neben den hier genannten Einflüssen können auch Faktoren wie Materialzusammensetzung, Druck, elektrische und magnetische Felder, Schwerkraft oder Änderungen in den thermo-optischen Eigenschaften relevant sein [9]. Die Dimensionsstabilität einer Satellitenstruktur soll gemäß dem

in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz in Bezug auf Änderungen in den thermischen Randbedingungen erreicht werden. Der Einfluss von aufgenommener Feuchtigkeit auf Verschiebungen kann daher im Hochvakuum vernachlässigt werden. Ebenso sind mechanische Spannungen aufgrund externer oder interner Kräfte, die nicht durch thermische Belastungen verursacht werden, ausgeschlossen. Hinsichtlich zeitlicher Veränderungen können der Abbau von Materialeigenschaften sowie permanente oder reversible Veränderungen zusammengefasst werden. Wenn eine Struktur aus einer Aluminiumlegierung einen thermischen Zyklus in niedriger Erdumlaufbahn durchlaufen würde, würde die Größe und Form dieser Struktur nach Abschluss des Zyklus nicht signifikant verändert sein. Die Veränderungen während des Zyklus sind daher umkehrbar. Wenn dieselbe Struktur aus Standard-Zerodur, einer glaskeramischen Substanz mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten [8, 10], hergestellt wäre, würde sie dauerhaft verformt werden, da die Erhitzung dieses Materials zu dauerhaften Veränderungen führt [9]. Für diesen Ansatz müssen weder der Abbau von Materialeigenschaften noch irreversible Prozesse berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite ist der Effekt der Hysterese ein signifikanter zeitlicher Bestandteil bei der Betrachtung von Änderungen in den thermischen Randbedingungen.

Zur Klassifizierung von strukturellen Störungen kann anstelle ihres Ursprungs oder ihrer physikalischen Eigenschaften die Frequenz der wirkenden Störung selbst genutzt werden. Niedrigfrequente, langsam wirkende Störungen mit Perioden von Stunden bis Tagen oder sogar Wochen oder Jahren haben normalerweise thermischen Ursprung aufgrund einer Form der Wärmeübertragung. Änderungen der thermischen Bedingungen führen zu Temperaturschwankungen. Temperaturschwankungen wiederum führen, abhängig von der Art der Lagerung und den Eigenschaften der Struktur, zu Spannungen oder Verformungen. Mit zunehmender Frequenz wird die Dämpfung thermischer Störungen immer signifikanter, so dass sie im Hochfrequenzbereich völlig vernachlässigbar sind.

Die relevantesten Hochfrequenzstörungen, im Bereich von wenigen Hz bis zu mehreren tausend Hz, sind Vibrationen und daher rein mechanische Störungen. Diese führen zu Schwingungen in der Struktur, die zu Fehlausrichtungen zwischen einzelnen Punkten führen. Mechanische Störungen können verschiedene Ursachen haben und werden oft beweglichen Teilen des Satelliten zugeschrieben, wie sie für die Lageregelung, die Entfaltung der Nutzlast, die Bewegung von Antennen oder Solarmodulen oder die Zündung der Triebwerke verwendet werden. Es können jedoch auch andere Arten von externen und internen Störungen auftreten, die zu Starrkörperbewegungen des Raumfahrzeugs führen, wie z. B. der Strahlungsdruck der Sonne, die Gravitationsgradienten oder das Treibstoffschwappen.

Während einer Weltraummission erfährt die Struktur maximale Vibration und signifikante Temperaturschwankungen während des Starts. Nachdem der Satellit oder das Raumfahrzeug die Umlaufbahn oder sein Missions-

ziel erreicht hat und sich im Vakuum befindet, wird ein neues thermisches Gleichgewicht hergestellt, das erheblich von dem Zustand vor dem Start abweichen kann und oft während der gesamten Missionsdauer bestehen bleibt [11]. Die Charakterisierung dieses neuen thermischen Gleichgewichts stellt eine große Herausforderung dar und erfordert eine Kombination aus In-Orbit-Messungen und Modellierungstechniken. Dieser stationäre Zustand spielt in dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz eine entscheidende Rolle, da nur Veränderungen relativ zu diesem Zustand kontrolliert werden können [2]. Neben einer angemessenen Modellierung vor der Mission muss die Struktur für diesen erwarteten stationären Zustand durch thermische Vakuumtests kalibriert werden. In einem zweiten Schritt muss eine In-Orbit-Kalibrierung durchgeführt werden. Dies kann durch die Bestimmung des Temperaturfeldes und die Messung der bereits aufgetretenen Verschiebungen und Verformungen erfolgen. Um Messfehler und Ungenauigkeiten aufgrund der Modellierung auszugleichen, wird empfohlen, mehrere verschiedene Messmethoden zu kombinieren, insbesondere für hochpräzise Anwendungen.

Um Spannungen oder Verschiebungen in einer Struktur zu kontrollieren, kann zwischen passiven und aktiven Methoden unterschieden werden. Passive Methoden umfassen vordefinierte Verfahren, die keine Sensoren oder Aktuatoren erfordern und daher nicht adaptiv oder variabel eingesetzt werden können. Aktive Steuermethoden hingegen beinhalten den Einsatz von Sensoren, um Änderungen in den physikalischen Eigenschaften der Struktur zu messen. Mit Hilfe eines mathematischen Modells der Struktur können diese Änderungen analysiert und bewertet werden, und gewünschte Modifikationen der physikalischen Eigenschaften können über Aktuatoren auf die Struktur angewendet werden. Solche Strukturen werden in der Literatur oft als Smart Structures bezeichnet [12, 13, 14]. Der hier vorgestellte Ansatz kann effektiv in dieses Forschungsfeld integriert werden. Eine Übersicht über passive und aktive Steuermethoden wird in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt, um sie von dem vorgestellten Ansatz abzugrenzen und seine Vorteile herauszustellen.

2.1.1 Passive Kontrollmethoden

Der grundlegendste Ansatz zur Stabilisierung einer Struktur liegt in der Wahl der Materialien. Typischerweise sollten hochstabile Strukturen einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie hohe Steifigkeit bzw. großen E-Modul haben. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität spielen ebenfalls eine Rolle, da ihre Werte beschreiben, wie schnell thermische Veränderungen innerhalb der Struktur von ihrem Ursprungsort aus verbreitet werden und wie stark die Temperatur aufgrund der Wärmeänderung variiert. In der Luft- und Raumfahrt werden in der Regel Keramiken oder Verbundwerkstoffe für solche Zwecke verwendet [15, 16, 17]. Darüber hinaus spielt die Gestaltung der Struktur selbst eine entscheidende Rolle. Verbundwerkstoffe können beispielsweise so konstruiert werden,

dass sie einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben oder sich bei einachsiger Druckbelastung verdrehen. Solche Designstrukturen werden als Meta-Materialien bezeichnet [18, 19]. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine solche Struktur.

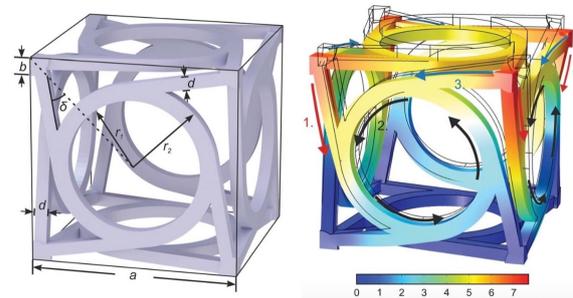


Abbildung 1: Würfelförmige Meta-Material-Struktur [20]

Eine weitere weit verbreitete Methode ist die thermische Strukturkontrolle, die darauf abzielt, die Gesamttemperaturschwankungen zu minimieren. Dies kann auf zwei Arten erreicht werden. Zum Einen, indem die am Strahlungsaustausch beteiligten Oberflächen entsprechend ihrer Sichtfaktoren gestaltet werden. Zum anderen kann der Strahlungsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten durch die Wahl thermo-optischer Eigenschaften, wie Oberflächentextur oder Farbe, beeinflusst werden, da dies direkt mit der Emissivität und Absorptivität korreliert. Abhängig von der Umlaufbahn, der Anwendung oder der Mission werden spezifische Oberflächen des Satelliten als Radiator verwendet, um Wärmeenergie abzuleiten oder gezielt Sonnenstrahlung aufzunehmen. Wärmerohre werden verwendet, um den Effekt der Wärmeleitung zum Wärmetransport innerhalb des Satelliten zu nutzen [21]. In aktuellen Forschungsansätzen werden darüberhinaus Phasenwechselmaterialien untersucht. Diese wachsähnliche Substanzen mit einem spezifischen Schmelzpunkt werden in einer Waben- oder Gitterstruktur eingebettet. Die Zufuhr von Wärme führt dazu, dass das Wachs schmilzt, wodurch keine Temperaturänderung in der Struktur selbst auftritt. Dies ermöglicht es, Strukturen um eine bestimmte erwartete Temperatur zu stabilisieren [22].

2.1.2 Aktive Kontrollmethoden

Bei aktiven Kontrollmethoden spielen Sensoren und Aktuatoren eine wichtige Rolle. Es stehen verschiedene Techniken und Ansätze zur Verfügung.

Im Fall der Befestigung von Linsen und Spiegeln oder optischen Bänken werden spezielle Arten von isostatischen Halterungen, wie Bipods, Hexapods oder Federn verwendet, die je nach mechanischer Belastung gesteuert werden können, um Vibrationen auszugleichen. Dies ermöglicht auch die Kontrolle einzelner Segmente eines Spiegels und verbessert so die optische Leistungsfähigkeit [23].

Die am häufigsten verwendeten Vorrichtungen zur aktiven Formkontrolle in Smart Structures sind Aktuatoren und

Sensoren, die den piezoelektrischen Effekt nutzen [24, 25]. Piezoelektrische Materialien deformieren sich nahezu linear in Reaktion auf eine angelegte externe Spannung. Dieser Effekt kann auch umgekehrt werden, so dass Änderungen in der Deformation durch Änderungen in der Spannung gemessen werden können, oder Änderungen in der Deformation können durch Änderungen in der Spannung erreicht werden. Mineralische Kristalle, wie Quarz, sowie Keramiken und Polymere können piezoelektrische Eigenschaften aufweisen. Piezoelektrische Aktuatoren eignen sich gut zur Dämpfung von Vibrationen, die Störungen mit höheren Frequenzen sind [26, 27, 28]. Niederfrequente Störungen aufgrund thermischer Effekte sind schwer durch das einfache Hinzufügen von Dämpfungskomponenten auszugleichen.

Die Wahl der Sensorstrategie spielt für die aktive Kontrolle ebenfalls eine entscheidende Rolle. Da im vorliegenden Ansatz thermisch induzierte Verschiebungen kontrolliert werden sollen, ist die Temperaturmessung entscheidend. Dies kann durch Thermoelemente oder Widerstandsthermometer erreicht werden, welche klassischerweise in der Raumfahrttechnik Anwendung finden [29]. Der Einsatz von faser-optischen Sensoren, wie Fiber-Bragg-Gittern [30, 31, 32] ist aber ebenso möglich wie die Nutzung von IR-Kameras.

Neben den passiven Methoden der thermischen Steuerung ermöglicht die Integration von Heizelementen oder Radiatoren in die Satellitenstruktur die aktive Steuerung des gesamten Temperaturfelds, sofern ausreichend Informationen über das Temperaturfeld durch Messungen vorliegen. In den meisten Fällen liegt der Fokus jedoch in erster Linie auf der Aufrechterhaltung der Stabilität des globalen Temperaturfelds und nicht auf der gezielten Beeinflussung eines Verzerrungsfelds an bestimmten Stellen der Struktur.

Der hier vorgestellte Ansatz konzentriert sich jedoch darauf, Verformungen und Verschiebungen nur an bestimmten Stellen zu kontrollieren. Dabei ist dieser Ansatz unabhängig von den gewählten Materialien und der Gestaltung der Struktur. Wie bei jeder Smart Structure werden die Sensor-Messungen während der Verarbeitungsphase mit dem Modell der Struktur verglichen. Daher ist eine präzise Modellierung entscheidend. Der wesentliche Vorteil des Ansatzes besteht darin, dass er nicht nur mit passiven Methoden oder anderen aktiven Methoden kombiniert werden kann, sondern sein volles Potenzial entfaltet, wenn er auf bereits stabile Strukturen angewendet wird. Wenn also Störungen vorhergesagt werden, die einen quasi-stationären Zustand verändern und nicht durch passive Methoden kompensiert werden können, bietet dieser Ansatz eine neue Alternative. Im Vergleich zu anderen aktiven Stabilisierungen, bei denen beispielsweise das Temperaturfeld aktiv gesteuert wird, um die Gleichmäßigkeit dessen aufrechtzuerhalten, beeinflusst dieser Ansatz die Verschiebungen direkt, indem er die thermomechanischen Übertragungsfunktionen ausnutzt. Der Ablauf hierfür wird im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

2.2 Filter-Regler-Ansatz

Für die detaillierten und umfassenden Herleitungen des mathematischen Modells des geschlossenen Filter- und Regler-Ansatzes wird auf [2, 4, 6] verwiesen. Im Folgenden soll daher nur das Grundprinzip erläutert sowie das abschließend zu lösende System vorgestellt werden.

Die zu stabilisierende Struktur jedweder Geometrie wird im ersten Schritt mit Hilfe der Finite Element Methode (FEM) modelliert. Dies kann für einfache Geometrien händisch oder für komplexere Strukturen mit einer FEM Software erfolgen. Die resultierenden Koordinaten der Knoten des FEM Modells sowie die entsprechende Auflistung der die jeweiligen Volumen- und Flächenelemente begrenzenden Knoten wird im zweiten Schritt genutzt, um dem Modell die notwendigen physikalischen Eigenschaften der Struktur, wie Dichte, E-Modul, die Wärmeleitfähigkeit oder den Wärmeausdehnungskoeffizienten zuzuweisen. Die für die Validierung des Ansatzes hier genutzte Platte aus einer Aluminiumlegierung besteht so aus einer Schicht von 100 Hexaedern. Ein Vorteil in dieser einfachen Geometrie ist, dass alle Oberflächenelemente ausschließlich mit der Umgebung im Strahlungsaustausch stehen und die mathematisch aufwendige Berechnung der Sichtfaktoren damit entfällt. Im dritten Schritt werden die zu erwartende Störung sowie die thermischen Randbedingungen charakterisiert. Die Störung kann durch einen Wärmestrom, eine interne volumetrische Wärmequelle oder eine externe Strahlungsquelle auf die Struktur wirken. Im vorliegenden Experiment wird die Störung durch ein auf die Struktur aufgeklebtes Heizelement simuliert, mit welchem reproduzierbare und wiederholbare Störungen dargestellt werden können. Im vierten Schritt werden Formfunktionen genutzt, um aus dem FEM Modell alle notwendigen Matrizen für das thermo-mechanische Problem zu erzeugen. Anschließend können damit die thermischen Gleichgewichtsbedingungen auf Grund der Randbedingungen und der Störung berechnet werden. Ein Kernpunkt in dem hier vorgestellten Ansatz besteht im sechsten Schritt, in welchem linearisierte Übertragungsfunktionen zwischen der Temperaturänderung an einem Knoten und der Änderung des Wärmestroms an einem Element des Modells um diesen stationären Zustand nach der Transformation des Problems in den Frequenzraum gebildet werden. In diesem Frequenzraum werden jedem Knoten thermische Moden zugewiesen, die in Summe das Temperaturfeld der Struktur widerspiegeln. Die thermische Übertragungsfunktion wird dann mit dem mechanischen Modell kombiniert, sodass eine thermo-mechanische Übertragungsfunktion entsteht, welche die Wärmestromänderung an einem Element mit der Verschiebung eines Knotens korreliert. Im siebten Schritt werden die optimalen Positionen der Kontroll-Heizelemente auf Basis der Auswertung der Übertragungsfunktionen für verschiedene Frequenzen festgelegt. Ist das Ziel die Verschiebung an bestimmten Punkten der Struktur mittels minimaler Kontroll-Heizeistung zu minimieren, so sollten die Heizelemente dort platziert werden,

wo die thermo-mechanischen Übertragungsfunktionen ihre maximale Verstärkung erreichen. Parallel dazu werden die, unter bestimmten Randbedingungen, optimalen Positionen von Temperatursensoren auf Basis der thermischen Moden mit maximaler Amplitude bestimmt. Im achten Schritt werden diese ausgewählten thermischen Moden genutzt, um eine Modalmatrix zu erzeugen, mit deren Hilfe das Temperaturfeld der gesamten Struktur auf Basis einiger weniger Sensormessungen rekonstruiert werden kann. Um die Verschiebungen auf Basis des Temperaturfelds zu kontrollieren wird nun ein diskretisierter Regelkreis entworfen, welcher für ein lineares System in einem in der Luft- und Raumfahrt üblicherweise verwendeten Linear-quadratischer Regler (LQR) mündet. Die hierfür notwendige proportionale Regelverstärkung wird im neunten Schritt bestimmt. Da die Sensormessungen verrauscht sind und die Kontroll-Heizleistung ebenfalls fehlerbehaftet ist, wird im zehnten und letzten Schritt ein Kalman-Filter implementiert, um die Mess- und Stellgrößen zu verarbeiten.

Das iterativ zu lösende Gesamtsystem lässt sich schlussendlich auf den folgenden Ausdruck reduzieren

$$(2) \quad \begin{Bmatrix} \delta T_c \\ \delta \hat{T} \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} = [A_{kal}]^{-1} [B_{kal}] \begin{Bmatrix} \delta T_c \\ \delta \hat{T} \end{Bmatrix}^t + [A_{kal}]^{-1} [C_{kal}] \{ \delta T_{sensor} \}_s^{t+\Delta t}.$$

Dabei können die Matrizen $[A_{kal}]$, $[B_{kal}]$ und $[C_{kal}]$ für einen bestimmten Versuchsaufbau mit bestimmten Randbedingungen vordefiniert werden, welche sich im Verlauf des Experiments nicht verändern. Durch die Messung der Temperaturdifferenzen gegenüber dem stationären Zustand an einigen wenigen Stellen des FEM-Modells kann somit auf das gesamte Temperaturfeld der Struktur, bestehend aus den durch das Kalman-Filter geschätzten Temperaturänderungen $\{\delta \hat{T}\}$ und den durch die Kontroll-Elemente eingebrachten Temperaturänderungen $\{\delta T_c\}$, geschlossen werden. Über Gleichung 3 kann dann unter Nutzung der Zustandsrückführung des LQR und der Verstärkungsmatrix $[K_{LQR}]$ als Lösung der zeit-diskreten Riccati-Gleichung [33] die notwendige Kontroll-Heizleistung direkt berechnet werden

$$(3) \quad \{ \delta q_c \}^t = -[K_{LQR}] \{ \delta T \}^t.$$

Die Performance des Kalman-Filters wird maßgeblich durch die Kovarianzen des Messrauschens und des Prozessrauschens beeinflusst. Da diese direkt proportional zu den Standardabweichungen der Sensoren bzw. Heizelemente sind, welche nicht exakt bestimmt werden können, führt eine Veränderung dieser Parameter zu veränderten Ergebnissen.

In [6] wurde bereits gezeigt, dass der Ansatz bei einer zufälligen Störung, welche aus der Überlagerung von fünf sinusförmigen Schwingungen der Heizleistung eines Heizelements mit unterschiedlicher Amplitude, Phase und Frequenz entsteht, eine Verbesserung von Faktor 3 gegenüber dem unkontrollierten Vergleichszustand erreichen

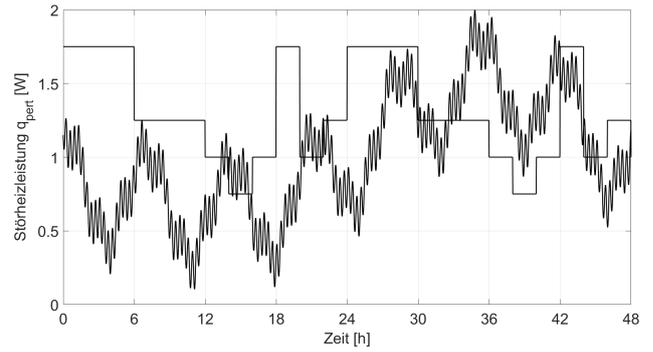


Abbildung 2: Zufällige und stufenförmige Stör-Heizleistung

Tabelle 1: Versuchsreihen und Systemparameter

Parameter		
Test	Störung	Kontrolle
1	zufällig	unkontrolliert
2	zufällig	$\sigma_H = 0.02$ W und $\sigma_S = 0.12$ K
3	stufenförmig	unkontrolliert
4	stufenförmig	$\sigma_H = 0.02$ W und $\sigma_S = 0.12$ K

kann. Die stufenförmigen Änderung der Heizleistung dieses Störelements zur Simulation von Ein- und Ausschaltvorgängen von elektrischen Geräten, die Energie in die Struktur dissipieren, wurde ebenfalls in [6] eingeführt. Im inhomogen-stationären Zustand werden die Kontroll-Heizelemente auch für die hier durchgeführten experimentellen Validierungen mit 0.5 W und das Stör-Heizelement mit 1 W betrieben. Ein kontinuierliches Betreiben der Kontroll-Heizelemente ist notwendig, damit durch Verringerung der Heizleistung eine Kühlung erreicht werden kann. Abbildung 2 zeigt die Verläufe der beiden Störungen. Die Systemparameter für die einzelnen hier durchgeführten Versuche sind in Tabelle 1 aufgeführt.

2.3 Peltier-Elemente

Ein Peltier-Element (PE) ist ein elektrisches Gerät, das thermoelektrische Effekte ausnutzt, um entweder als Wärmepumpe zu fungieren und damit Wärme auf einer Seite absorbiert und auf der anderen Seite emittiert (Thermoelectric Cooler (TEC)) oder als Generator einen Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten in eine elektrische Spannung umwandelt (Thermoelectric Generator (TEG)).

Thermoelektrische Effekte beschreiben die Wechselwirkung zwischen thermischer Energie und elektrischer Energie und sind in drei Phänomene unterteilt: Seebeck-, Peltier- und Thomson-Effekt. Der Seebeck-Effekt beschreibt die Entstehung einer elektrischen Spannung zwischen den Verbindungsstellen zweier unterschiedlicher elektrischer Leiter, wenn diese einem Temperaturgradienten unterliegen. Unter der Annahme, dass der temperatur-

abhängige Seebeck-Koeffizient S bei kleinen Temperaturunterschieden ΔT annähernd gleich ist, wird die entstehende Spannung V durch

$$(4) \quad V = S_{NP} \cdot \Delta T$$

beschrieben, wobei S_{NP} die Differenz der Seebeck-Koeffizienten der beiden Leitermaterialien ist.

Die Umkehrung dieses Effekts ist der Peltier-Effekt, der besagt, dass an einer Verbindungsstelle von zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern Wärme entweder absorbiert oder emittiert wird, wenn diese von Strom durchflossen werden. Der erzeugte Wärmestrom \dot{Q} ist proportional zur Differenz der Peltier-Koeffizienten der beiden Leitermaterialien Π_{NP} und der Stromstärke I und wird durch

$$(5) \quad \dot{Q} = \Pi_{NP} \cdot I$$

beschrieben, wobei auch hier die Temperaturabhängigkeit der Peltier-Koeffizienten nicht berücksichtigt wird.

Der Thomson-Effekt beschreibt die Absorption oder Emission von Wärme bei Ladungsträgern, die sich mit oder entgegen eines Temperaturgradienten bewegen. Bei PE hat dieser Effekt kaum einen Einfluss, die gleichnamige Thomson-Relation stellt allerdings den Zusammenhang von Peltier- und Seebeck-Koeffizienten über

$$(6) \quad \Pi = S \cdot T$$

her. Ein Thermopaar ist die kleinste Einheit in einem PE. Je ein p- und n-dotierter Halbleiter sind über Kupferbrücken elektrisch in Reihe geschaltet, aufgrund ihrer unterschiedlichen thermischen Ausrichtung in einem Aufbau wie in Abbildung 3 allerdings thermisch parallel. Eine Vielzahl aus Thermopaaren, die zwischen zwei Keramikplatten miteinander verschaltet sind, bilden ein PE. Die Form und Größe von PE kann beliebig skaliert und an die Anforderungen angepasst werden.

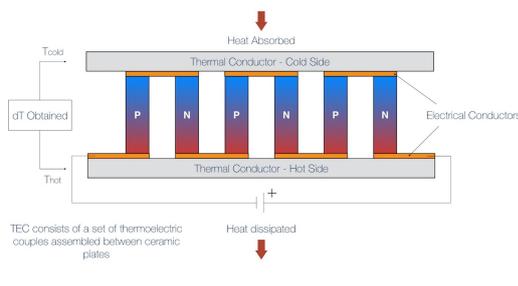


Abbildung 3: Thermoelectric Cooler [34].

Fließt ein Strom mit einer bestimmten Stromstärke durch das PE, so wird an der kalten Seite Wärme absorbiert (\dot{Q}_c) und an der warmen Seite des PE freigesetzt (\dot{Q}_h). Die Relationen

$$(7) \quad \dot{Q}_c = S \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 R - \kappa \cdot (T_h - T_c)$$

$$(8) \quad \dot{Q}_h = S \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot I^2 R - \kappa \cdot (T_h - T_c)$$

beschreiben diese, wobei S der Seebeck-Koeffizient, I die Stromstärke, T_c und T_h die Temperaturen der kalten und warmen Platte, R der Innenwiderstand des PE und κ die thermische Leitfähigkeit darstellt [35]. Der erste Summand ist der Peltier-Wärmestrom, der für den Wärmetransport maßgeblich ist (Gleichung 6 eingesetzt in Gleichung 5). Der zweite Summand ist der Joule'sche Wärmestrom von stromdurchflossenen Leitern. Der dritte Summand stellt den Wärmestrom dar, der aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Plattenseiten entsteht und somit dem Peltier-Wärmestrom entgegenwirkt.

Bei Kühlanwendungen haben PE einige Vorteile gegenüber konventionellen Kältemaschinen. PE haben keine beweglichen Teile, benötigen keine Kühlfluide, beanspruchen nur einen kleinen Bauraum bei gleichzeitig geringem Gewicht, weisen eine hohe Zuverlässigkeit auf und werden mit Gleichstrom betrieben. Nachteilig ist der geringe Wirkungsgrad und die relativ hohen Kosten [36]. Der geringe Wirkungsgrad ist der Hauptgrund, weshalb ein PE meist in Spezialanwendungen verbaut wird, wie z.B. tragbare Kühlboxen [36] oder zur Temperaturregelung von Prozessorchips [37]. In der Funktion als TEG werden PE in den Abgasanlagen von Kraftfahrzeugen erforscht, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren [38, 39].

PE können Wärmeströme mit sowohl negativem als auch positivem Vorzeichen generieren, je nach Flussrichtung des Stroms. Die hier und in [3, 5, 4, 6] verwendeten Heizwiderständen als Aktuatoren haben den Nachteil, dass sie lediglich einen positiven Wärmestrom erzeugen können. Daher werden die Heizelemente mit einer Referenzleistung betrieben und bei einem benötigtem negativen Wärmestrom die Leistung unter die Referenzleistung gesenkt. PE müssten nicht auf einem Referenzniveau betrieben werden und würden keine Energie im Ausgangszustand verbrauchen, wodurch die energetische Effizienz gesteigert werden könnte.

3 EXPERIMENTELLER VERSUCHSAUFBAU

3.1 Setup 1: Strukturstabilisierung

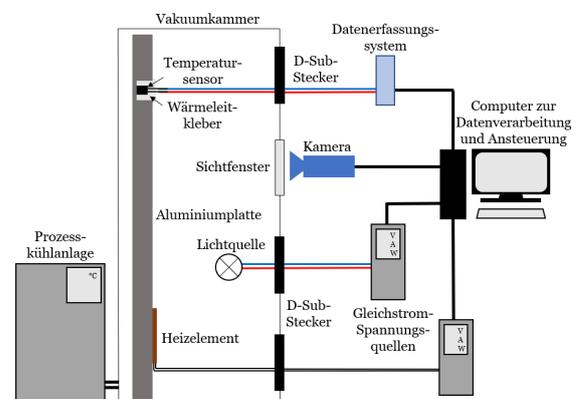


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau [5]

Abbildung 4 zeigt den schematischen Versuchsaufbau, welcher sich im Vergleich zu den bisherigen Evaluationen aus [3, 4, 5, 6] nicht verändert hat. Das Versuchsobjekt, die Platte aus einer Aluminiumlegierung, ist durch eine isostatische Halterung, welche einerseits das Objekt thermisch von der Halterung entkoppelt und andererseits die freie Ausdehnung der Struktur ermöglicht, in der Thermal Vakuum Kammer (TVK) montiert und mit Temperatursensoren und Heizelementen versehen. Eine Prozess Kühlanlage (PKA) hält alle Innenwände der TVK auf einer konstanten Temperatur von 5°C , sodass ein quasi-stationärer Zustand entsteht, gegenüber welchem die sich einstellenden Veränderungen bei Variation der Stör-Heizleistung durch den Filter-Regler-Ansatz kompensiert werden können. Datenerfassungsgeräte zeichnen die Temperaturmessungen auf, welche durch ein MATLAB Programm verarbeitet werden, sodass Kontroll-Heizleistungen an die Gleichstrom-Spannungsquelle (GSQ) kommandiert werden können. Eine hochauflösende Kamera nimmt in einem Abstand von 6 min Bilder der Vorderseite der Platte auf. Die Veränderungen in den Grauwerten des sich auf dieser Plattenseite befindlichen Speckle-Musters werden mit Hilfe einer Software zur digitalen Bildkorrelation analysiert und Verschiebungen im Material gegenüber dem quasi-stationären Referenzzustand berechnet.

Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsobjekt mit den Positionen des Stör-Heizelements (ganz links, rot) sowie den 6 Kontroll-Heizelementen (grün), den 18 Temperatursensoren (schwarze Knoten) sowie den beiden zu kontrollierenden Punkten (rote Knoten).

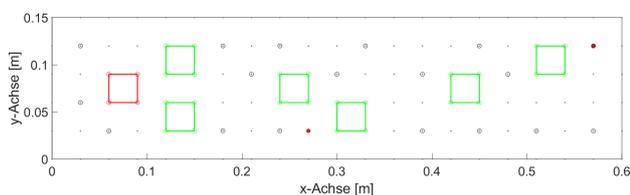


Abbildung 5: Schematisches Versuchsobjekt

Abbildung 6 zeigt das Versuchsobjekt montiert an der isostatischen Halterung im Inneren der TVK. Detaillierte Informationen zum Versuchsaufbau sowie zur Messmethode, -erfassung und -verarbeitung können [3, 4, 5, 6, 40] entnommen werden.

3.2 Setup 2: Peltier-Elemente

Die Basis des Versuchsaufbaus bildet eine Grundplatte aus der selben Aluminiumlegierung wie für den anderen Aufbau, auf der zwei PE und Pt-100 Temperatursensoren aufgeklebt sind. Eines der PE (TEC2) ist nur mit einem Temperatursensor auf der Rückseite versehen (Abbildung 7 oben rechts). Auf der Rückseite des zweiten PE (TEC1) ist ein Block aus jener Aluminiumlegierung aufgeklebt (siehe Abbildung 7 unten links und Abbildung 8).

Die Temperatursensoren erfassen die Temperaturen der beiden Plattenseiten der PE, die Temperaturen in dem auf-

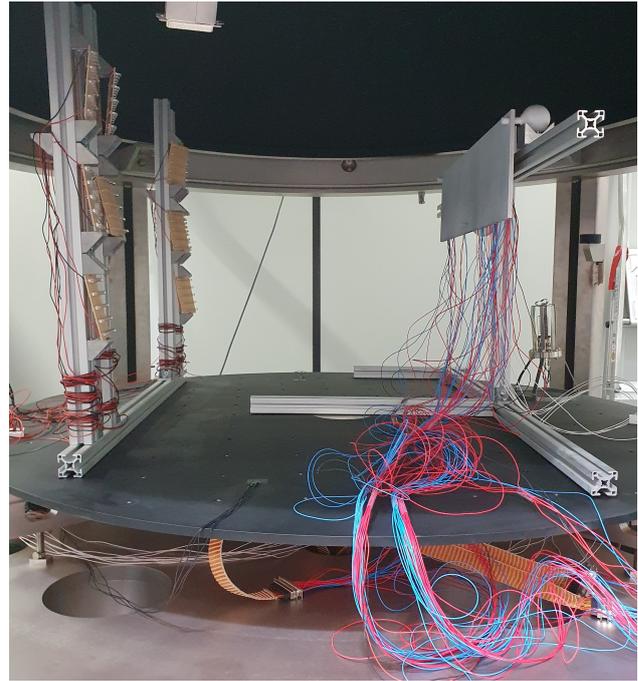


Abbildung 6: Versuchsaufbau

geklebten Block und die Temperaturen an diversen Punkten auf der Grundplatte. Durch die Temperaturerfassung soll die Absorption bzw. Emission von Wärme in Form von Temperaturänderungen erfasst werden. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt analog zum ersten Versuchsaufbau, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Die Ansteuerung der PE erfolgt über MATLAB. Jeweils eine an einen Rechner angeschlossene GSQ regelt die geforderte Stromstärke für ein PE. Mittels 2CH-Relais und einem Arduino-Mikrocontroller wird die Umpolung der anliegenden Spannung am PE geschaltet. Der Betrag sowie das Vorzeichen des Wärmestroms in den PE kann somit kontrolliert werden. Mit den GSQ werden ebenfalls die anliegenden Werte der Spannung, Stromstärke und elektrischer Leistung der gesamten Schaltung mit dem jeweiligen PE ermittelt und aufgezeichnet.

Das PE, welches frei auf die Grundplatte geklebt ist, soll den Fall untersuchen, in dem ein Heizelement durch ein PE ersetzt wird, ohne den Versuchsaufbau abzuändern. Wärme wird von der Grundplatte absorbiert oder in diese freigesetzt. Dabei kann die frei liegende Seite des PE nur über Strahlung Wärme mit der Umgebung austauschen.

Das PE, auf das der Block auf die Rückseite geklebt wurde, steht sowohl mit dem Block als auch der Grundplatte im Wärmeaustausch und kann Wärme von dem einen Körper in den anderen transportieren. Der aufgeklebte Block kann deutlich mehr Wärme speichern als die Keramik-Platte des PE. Zu beachten ist allerdings, dass das Volumen- und Massenverhältnis zwischen Grundplatte und Block bei $\sim 16 : 1$ liegt und der Block seine Temperatur sehr viel stärker ändert, wenn die selbe Wärmemenge ausgetauscht wird.

Es werden Versuche mit statischer und dynamischer Stromstärke durchgeführt. Beide PE werden in den stati-

schen Versuchen mit einer konstanten Stromstärke für eine gewisse Zeit betrieben. Das PE mit dem aufgeklebten Block wird zusätzlich noch einem dynamischen Test unterzogen, bei dem die Stromstärke konstant bei 0.5 A gehalten wird und die Polung mehrfach im Betrieb umgekehrt wird.

Tiefer gehende Erläuterungen zum Versuchsaufbau können [41] entnommen werden.

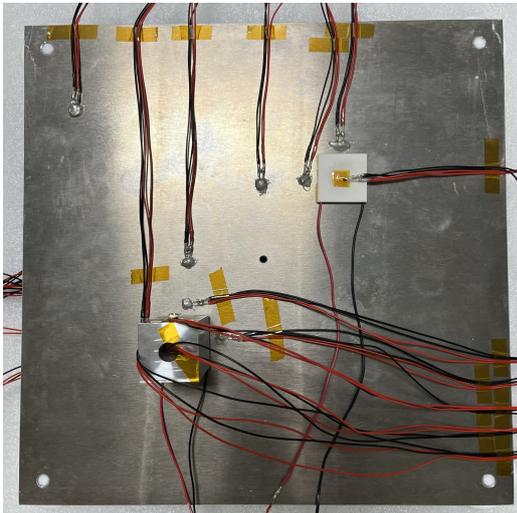


Abbildung 7: Versuchsaufbau PE Grundplatte [41]

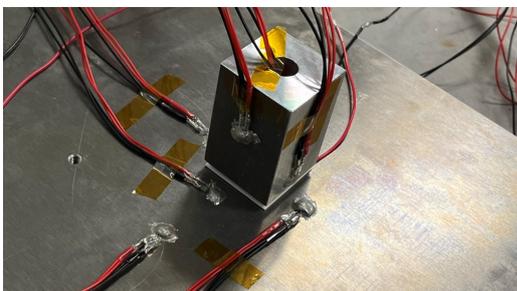


Abbildung 8: Versuchsaufbau PE Block [41]

4 ERGEBNISSE UND VALIDIERUNG

Im Folgenden werden zu erst die Ergebnisse des Filter-Regler-Systems für den auf 6 Kontroll-Heizelemente angepassten Versuchsaufbau präsentiert und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen. Anschließend wird die Funktionsfähigkeit der Peltier-Elemente als alternativer Aktuator analysiert.

4.1 Setup 1: Strukturstabilisierung

Für die beiden Versuchsreihen mit der zufälligen und stufenförmigen Störungen werden die Experimente mit den Simulationen jeweils für einen unkontrollierten Test und einen kontrollierten Test verglichen.

4.2 Test 1: Unkontrolliertes System, zufällige Störung

In Abbildung 9 sind die simulierten Temperaturverläufe aller 18 Sensoren im unkontrollierten System dargestellt. Die maximale Temperaturamplitude $A_{T,max}$ beträgt ± 2.15 K in Sensor 11. Dieser Sensor liegt dem Störheiz-element am nächsten. Die minimale Temperaturamplitude $A_{T,min}$ beträgt ± 0.91 K in Sensor 18. Dieser Sensor befindet sich am weitesten entfernt von der Störquelle. Der simulierte Verlauf ist vergleichbar mit den bisherigen Ergebnissen, jedoch sind alle Temperaturdaten um etwa 1.5°C höher. Das liegt an der zusätzlichen stationären Heizleistung von 1 W durch zwei weitere Heizelemente.

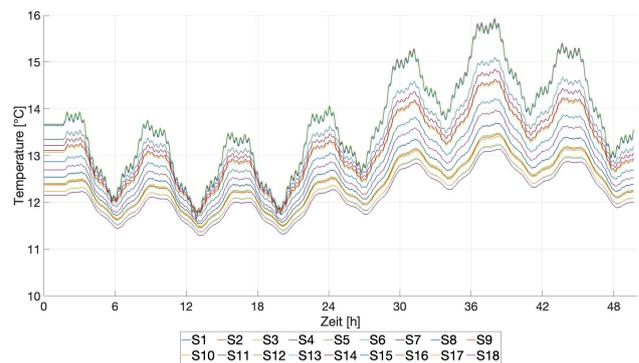


Abbildung 9: Temperatur Test 1, Simulation

In Abbildung 10 sind die Temperaturdaten aller 18 Sensoren im unkontrollierten Fall der zufälligen Störung zu sehen. Die maximale Temperaturamplitude $A_{T,max}$ beträgt ± 2.16 K und die minimale Temperaturamplitude $A_{T,min} = \pm 0.95$ K. Der Verlauf sowie die ermittelten Kenngrößen sind eindeutig mit der Simulation vergleichbar.

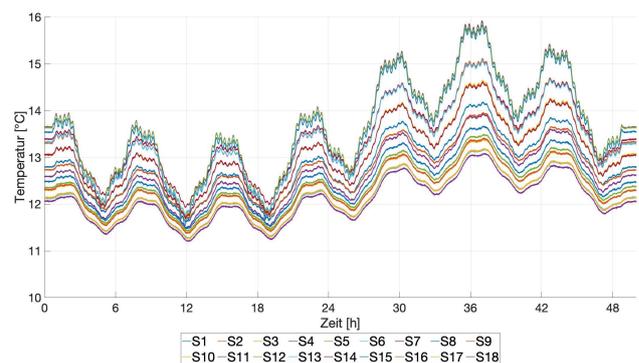


Abbildung 10: Temperatur Test 1, Experiment

Die maximalen Verschiebungen betragen $\pm 7.16 \mu\text{m}$ in x -Richtung und $\pm 3.44 \mu\text{m}$ in y -Richtung im unkontrollierten Fall. Diese sind in Abbildung 14 und 15 dargestellt. Die simulierten Werte stimmen, bei Betrachtung der Korrelation zwischen dem Wärmeausdehnungskoeffizienten der Aluminiumlegierung und Temperaturdifferenz, mit den erwarteten Werten überein.

In Abbildung 11 sind die gemessenen Verschiebungen

der unkontrollierten Störung dargestellt. Es fällt auf, dass in den ersten 24 h des Tests die Verschiebungen ausgeprägter schwanken als im weiteren Verlauf des Tests. Die maximale Gesamtverschiebung $u_{total,max}$ beträgt $10.74 \mu\text{m}$ und die maximalen Verschiebungen in x - und y -Richtung liegen bei $u_{x,max} = 10.58 \mu\text{m}$ und $u_{y,max} = 1.51 \mu\text{m}$. Diese sind damit geringfügig höher als in der Simulation.

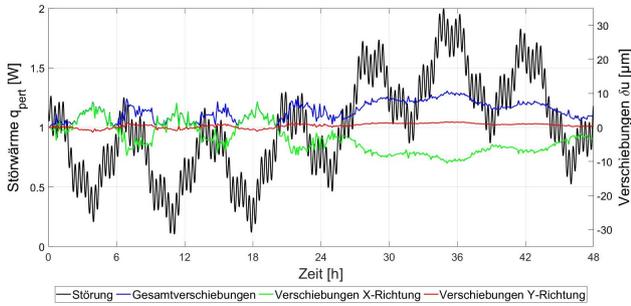


Abbildung 11: Verschiebungen Test 1, Experiment

4.3 Test 2: Kontrolliertes System, zufällige Störung

Die simulierten Daten des kontrollierten Tests mit den Systemparametern $\sigma_S = 0.12 \text{ K}$ und $\sigma_H = 0.02 \text{ W}$, sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Der simulierte Temperaturverlauf aller 18 Sensoren ist in Abbildung 12 dargestellt. Die maximale Temperaturamplitude $A_{T,max}$ beträgt $\pm 0.49 \text{ K}$.

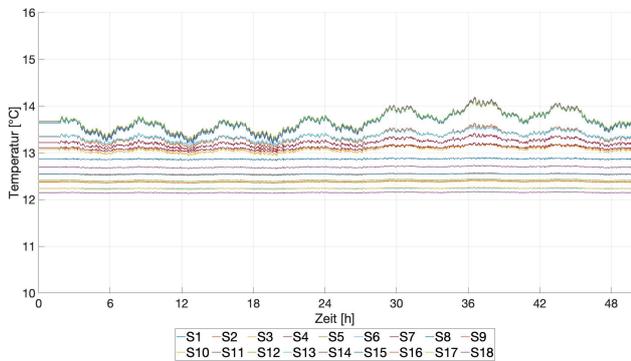


Abbildung 12: Temperatur Test 2, Simulation

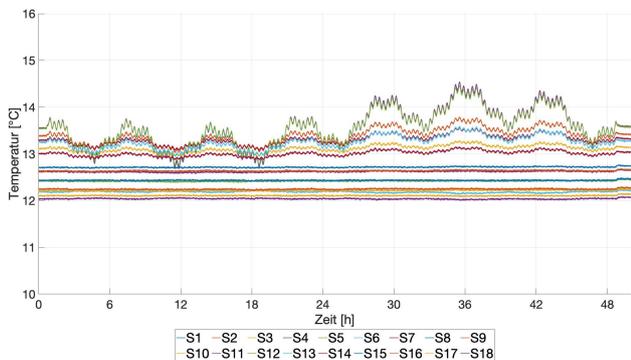


Abbildung 13: Temperatur Test 2, Experiment

Abbildung 13 zeigt die Temperaturdaten aller 18 Sensoren aus dem Experiment. Die maximale Temperaturamplitude $A_{T,max}$ ist mit $\pm 0.93 \text{ K}$ deutlich größer als in der Simulation. Die grundlegende Vergleichbarkeit ist aber gegeben. Die simulierten unkontrollierten und kontrollierten Verschiebungen in x - und y -Richtung sind in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt. Die maximalen Verschiebungen betragen in x -Richtung $u_{x,max} = 0.59 \mu\text{m}$ und in y -Richtung $u_{y,max} = 0.76 \mu\text{m}$ und sind damit fast gänzlich kompensiert.

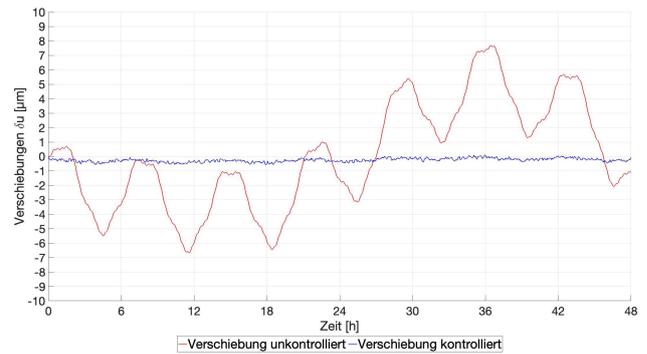


Abbildung 14: x-Verschiebungen Test 1/2, Simulation

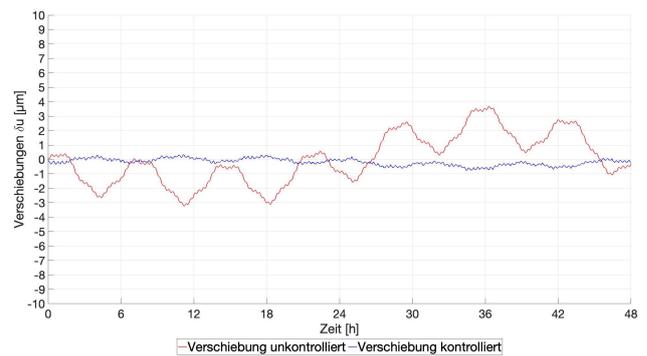


Abbildung 15: y-Verschiebungen Test 1/2, Simulation

Abbildung 16 zeigt die Auswertung der Verschiebungsdaten. Die maximale Gesamtverschiebung $u_{total,max}$ und die maximale Verschiebung in x -Richtung $u_{x,max}$ sind mit $5.68 \mu\text{m}$ und $5.60 \mu\text{m}$ deutlich größer als in der Simulation. Die maximale Verschiebung in y -Richtung $u_{y,max}$ ist mit $0.96 \mu\text{m}$ dagegen auf vergleichbarem Niveau. Wie auch in den vorherigen Versuchen in den anderen Konfigurationen zeigt sich, dass die Verschiebungen in y -Richtung deutlich kleiner sind, was mit der Plattengeometrie und der Art der isostatischen Halterung zusammenhängt. Dadurch, dass die Gravitation auf die Platte wirkt, ist die Verschiebung in y -Richtung nur gedämpft messbar. Im Vergleich zum unkontrollierten Test ist dennoch eine Verbesserung erkennbar, auch wenn diese deutlich kleiner ausfällt als in den vorherigen Tests. Die Schwankungen, welche im Tagesrhythmus auftreten, könnten mit den Tag-Nacht-Temperaturschwankungen im Labor zusammenhängen, welche deutlich Auswirkungen auf die Genauigkeit des Kamerasystems haben.

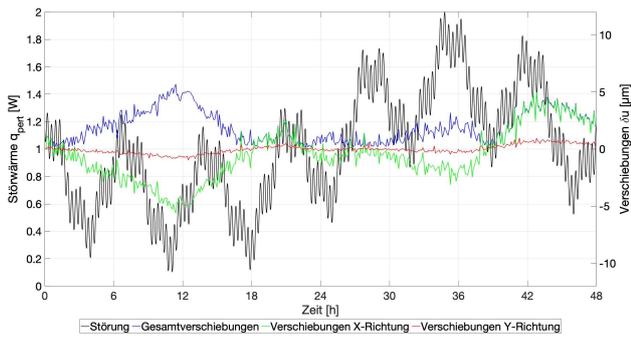


Abbildung 16: Verschiebungen Test 2, Experiment

Die in Abbildung 17 dargestellten simulierten Kontrollheizleistungen sind sehr stark verrauscht. Dennoch ist der Verlauf der Störung vor allem in den vorderen, dem Stör-Heizelement am nächstgelegenen Heizelementen, erkennbar. Die maximale Kontrollheizleistung $Q_{c,max}$ beträgt 0.95 W.

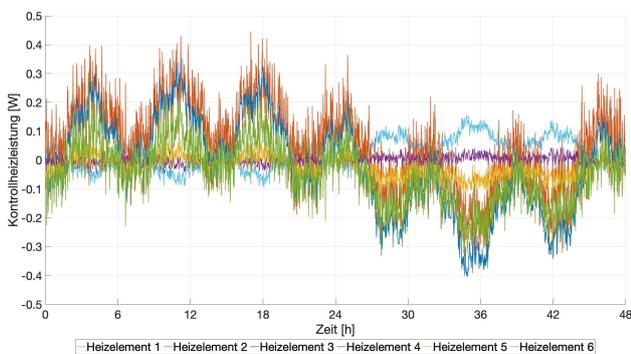


Abbildung 17: Kontrollheizleistung Test 2, Simulation

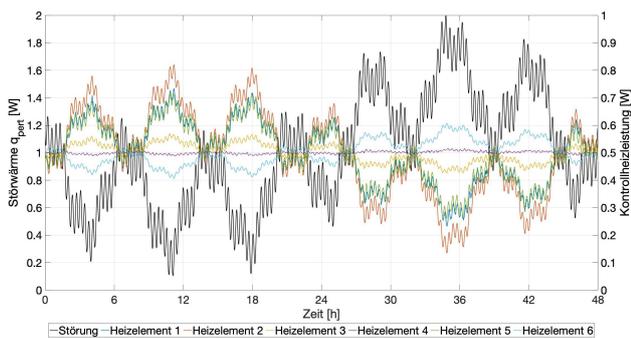


Abbildung 18: Kontrollheizleistung Test 2, Experiment

Der Verlauf der kommandierten Kontrollheizleistungen Q_c des Experiments ist in Abbildung 18 dargestellt und ähnelt der Simulation sehr stark. Auch hier leisten die Heizelemente 1, 2 und 5 am meisten und die weiter entfernten Heizelemente 3, 4 und 6 werden weniger stark angesteuert. Es fällt auf, dass der Verlauf deutlich weniger stark verrauscht ist. Dies hängt damit zusammen, dass in der Simulation für jede Sekunde ein neuer Wert berechnet wird, im Experiment aber nur alle 30 Sekunden aus dem Mittelwert von 5 Temperaturmessungen ein Wert kommandiert

wird. Der definierte Grenzwert von ± 0.5 W wird nicht überschritten. Die maximale Kontrollheizleistung $Q_{c,max}$ ist mit 0.82 W geringer als in der Simulation. Die genauen Kenngrößen der Simulation und des Experiments können den Tabellen 2 und 3 entnommen werden.

Tabelle 2: Kenngrößen der Simulation, zufällige Störung

Kenngröße	Unkontrolliert	Kontrolliert	Differenz	Faktor
$A_{T,max}$	2.15 K	0.49 K	1.66 K	4.39
$u_{total,max}$	10.60 μ m	1.35 μ m	9.25 μ m	7.85
$u_{x,max}$	7.16 μ m	0.59 μ m	6.57 μ m	12.14
$u_{y,max}$	3.44 μ m	0.76 μ m	2.68 μ m	4.53
$Q_{c,max}$	-	0.95 W	-	-

Tabelle 3: Kenngrößen des Experiments, zufällige Störung

Kenngröße	Unkontrolliert	Kontrolliert	Differenz	Faktor
$A_{T,max}$	2.16 K	0.93 K	1.23 K	2.32
$u_{total,max}$	10.74 μ m	5.68 μ m	5.06 μ m	1.89
$u_{x,max}$	10.58 μ m	5.60 μ m	4.98 μ m	1.89
$u_{y,max}$	1.51 μ m	0.96 μ m	0.55 μ m	1.57
$Q_{c,max}$	-	0.82 W	-	-

4.4 Test 3: Unkontrolliertes System, stufenförmige Störung

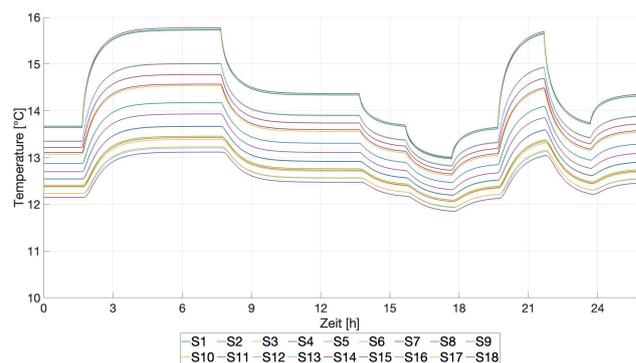


Abbildung 19: Temperatur Test 3, Simulation

Abbildung 19 zeigt die simulierten Temperaturverläufe aller 18 Sensoren im unkontrollierten System der stufenförmigen Störung. Wie auch schon bei der zufälligen Störung ist die Temperaturdifferenz in Sensor 11 am größten und in Sensor 18 am kleinsten. Die Werte sind mit $\Delta T_{max} = 2.1$ K und $\Delta T_{min} = 0.97$ K erwartungsgemäß etwas kleiner als bei der zufälligen Störung. Auch hier ist zu beob-

achten, dass alle Temperaturdaten um etwa 1.5°C höher sind als in den vorherigen Versuchen mit 4 Heizelementen.

Abbildung 20 zeigt den Temperaturverlauf aller 18 Sensoren der unkontrollierten rampenförmigen Störung. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} wird in Sensor 11 gemessen und beträgt 2.14 K. Damit ist dieser Wert vergleichbar mit den simulierten Daten.

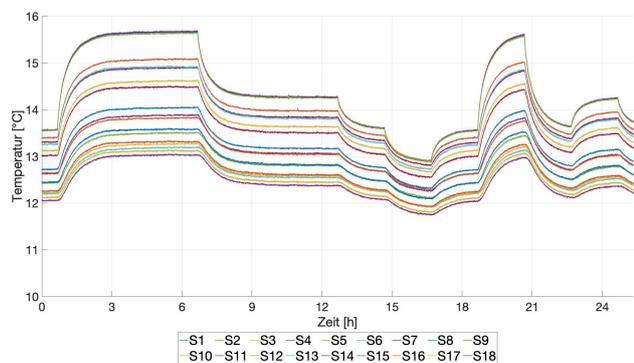


Abbildung 20: Temperatur Test 3, Experiment

In den Abbildungen 24 und 25 sind die simulierten Verschiebungen in x - und y -Richtung des unkontrollierten Systems im Vergleich zum kontrollierten System dargestellt. Die maximalen Verschiebungen betragen $7.54\ \mu\text{m}$ in x -Richtung und $3.49\ \mu\text{m}$ in y -Richtung. Bei der Betrachtung der Korrelation zwischen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Aluminiumlegierung und der Temperaturdifferenz werden die Sensoren 6 und 16, die in der Nähe der Referenzpunkte liegen, zur Berechnung herangezogen. Die simulierten Verschiebungen stimmen mit diesen berechneten Werten nahezu überein.

Der Verlauf der stufenförmigen Störung sowie die resultierenden Gesamtverschiebungen in x - und y -Richtung sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Gesamtverschiebung $u_{total,max}$ beträgt $18.40\ \mu\text{m}$ und die Verschiebungen in x - und y -Richtung liegen bei $u_{x,max} = 18.11\ \mu\text{m}$ und $u_{y,max} = 2.80\ \mu\text{m}$. Im Vergleich zur Simulation treten deutlich größere Verschiebungen auf. Dieses Verhalten konnte schon bei der zufälligen Störung beobachtet werden.

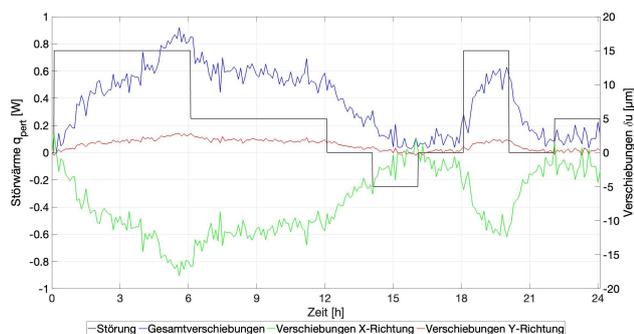


Abbildung 21: Verschiebungen Test 3, Experiment

4.5 Test 4: Kontrolliertes System, stufenförmige Störung

Der simulierte Temperaturverlauf in Abbildung 22 zeigt die gleichen Ähnlichkeiten wie beim Vergleich von Test 1 und Test 2. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} beträgt 0.48 K. Eine deutliche Dämpfung gegenüber dem unkontrollierten Test ist ebenso erkennbar wie der Verlauf der Störung.

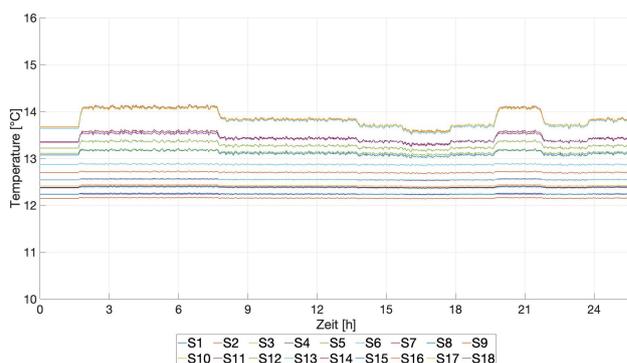


Abbildung 22: Temperatur Test 4, Simulation

Abbildung 23 zeigt die Messungen des Experiments. Qualitativ ähnelt der Verlauf sehr stark der Simulation, auch wenn die Verläufe weniger gedämpft sind. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} ist mit 0.83 K in etwa doppelt so hoch wie in der Simulation. Im Vergleich zu vorherigen Tests wirkt der Verlauf etwas schlechter geregelt.

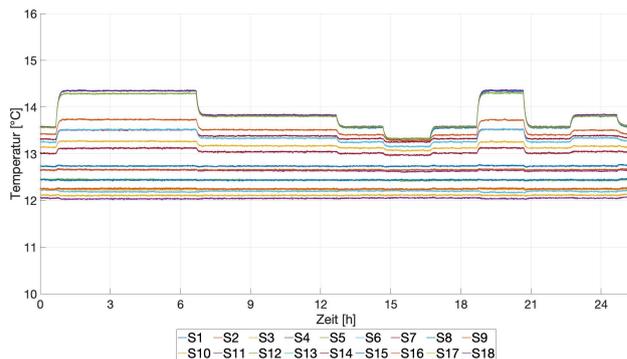


Abbildung 23: Temperatur Test 4, Experiment

In den Abbildungen 24 und 25 sind zum einen die simulierten unkontrollierten Verschiebungen (rot), zum anderen die simulierten kontrollierten Verschiebungen (blau) in x - und y -Richtung zu sehen. Die Verschiebungen in x - und y -Richtung sind mit $u_{x,max} = 0.72\ \mu\text{m}$ und $u_{y,max} = 0.41\ \mu\text{m}$ sind im kontrollierten Fall wieder deutlich gegenüber dem unkontrollierten Zustand gedämpft.

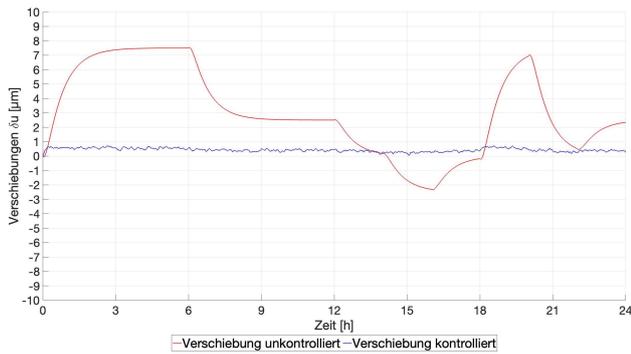


Abbildung 24: x-Verschiebungen Test 3/4, Simulation

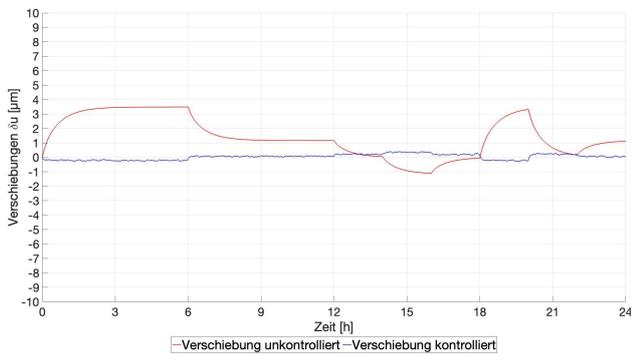


Abbildung 25: y-Verschiebungen Test 3/4, Simulation

In Abbildung 26 ist der Verlauf der Verschiebungen des kontrollierten Tests dargestellt. Ähnlich wie in Test 2 ist der Verschiebungsverlauf auch in diesem Fall durch die stark schwankenden Temperaturen im Labor, aufgrund des Tag-Nacht-Rhythmus, beeinträchtigt. Die maximale Gesamtverschiebung $u_{total,max} = 4.34 \mu\text{m}$ sowie die Verschiebungen in x -Richtung $u_{x,max} = 4.26 \mu\text{m}$ und y -Richtung $u_{y,max} = 0.74 \mu\text{m}$ sind auch hier schlechter als in der Simulation, liefern jedoch gegenüber dem unkontrollierten Zustand eine Verbesserung.

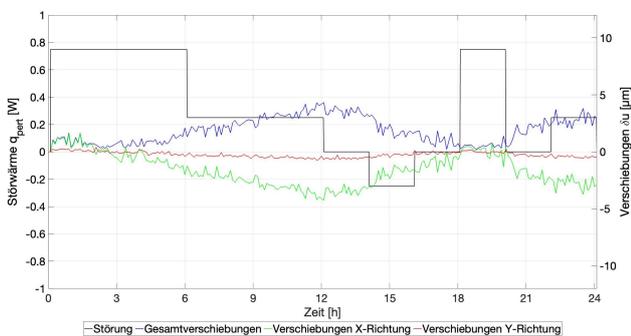


Abbildung 26: Verschiebungen Test 4, Experiment

Die simulierte Kontrollheizleistung Q_c in Abbildung 27 ähnelt qualitativ dem simulierten Verlauf aus den vorherigen Tests. Die maximale Kontrollheizleistung $Q_{c,max}$ ist mit 0.71 W jedoch deutlich niedriger als zuvor.

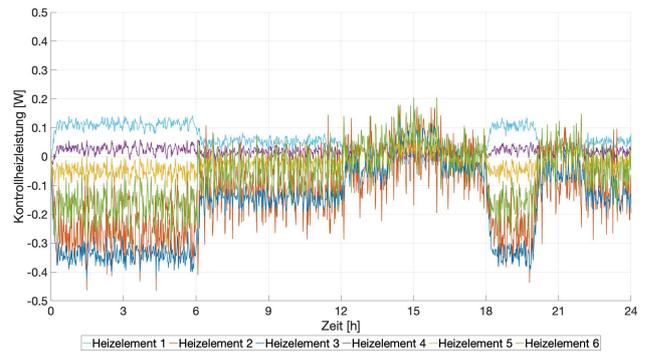


Abbildung 27: Kontrollheizleistung Test 4, Simulation

Der Verlauf der kommandierten Kontrollheizleistungen im Experiment ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Heizelemente 1, 2 und 5 werden wieder am meisten angesteuert und verlaufen gegenläufig zur Störung. Die Heizelemente 4 und 6 folgen wiederum eher dem Verlauf der Störung. Wie in der Simulation werden die definierten Grenzwerte von $\pm 0.5 \text{ W}$ nicht überschritten, die maximale Kontrollheizleistung $Q_{c,max}$ beträgt hier nur 0.60 W. Auf Grund der bereits vorher beschriebenen Mittelwertbildung ist im Experiment der Verlauf der Kontrollheizleistung weniger stark schwankend, sodass er weniger stark verrauscht im Vergleich zur Simulation wirkt.

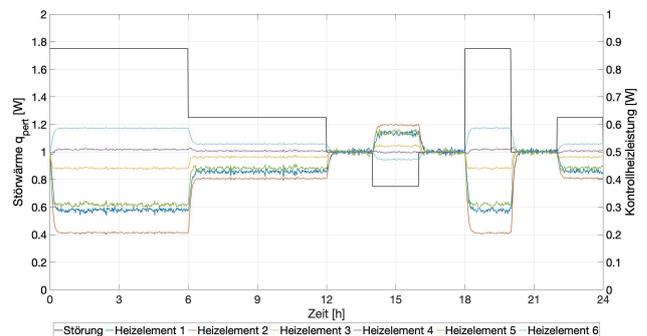


Abbildung 28: Kontrollheizleistung Test 4, Experiment

Alle simulierte und gemessene Kenngrößen können den nachfolgenden Tabellen 4 und 5 entnommen werden.

Tabelle 4: Kenngrößen der Simulation, stufenförmige Störung

Kenngröße	Unkontrolliert	Kontrolliert	Differenz	Faktor
ΔT_{max}	2.10 K	0.48 K	1.62 K	4.38
$u_{total,max}$	11.03 μm	1.13 μm	9.90 μm	9.76
$u_{x,max}$	7.54 μm	0.72 μm	6.82 μm	10.47
$u_{y,max}$	3.49 μm	0.41 μm	3.08 μm	8.51
$Q_{c,max}$	-	0.71 W	-	-

Tabelle 5: Kenngrößen des Experiments, stufenf. Störung

Kenngröße	Unkontrolliert	Kontrolliert	Differenz	Faktor
ΔT_{max}	2.14 K	0.83 K	1.31 K	2.58
$u_{total,max}$	18.40 μm	4.34 μm	14.06 μm	4.24
$u_{x,max}$	18.11 μm	4.26 μm	13.85 μm	4.25
$u_{y,max}$	2.80 μm	0.74 μm	2.06 μm	3.78
$Q_{c,max}$	-	0.60 W	-	-

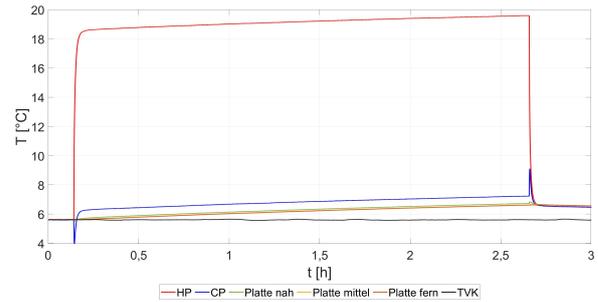
Die Ergebnisse zeigen, dass in beiden Fällen eine Verbesserung im Experiment zwischen unkontrollierten und kontrollierten Zuständen erreicht werden. Allerdings sind diese Verbesserungen deutlich geringer als aufgrund der Simulation erwartet worden wäre. Die Erweiterung des Versuchsaufbaus konnte keine nennenswerten Verbesserungen der Verschiebungskompensation erreichen. Die maximal kommandierte Kontrollheizleistung konnte zwar gesenkt werden, allerdings führt die zusätzlich aufgebrachte Kontrollwärme der beiden zusätzlichen Heizelemente zu einer Steigerung der notwendigen Gesamtleistung, sodass der geringfügige Vorteil verpufft.

4.6 Setup 2: Peltier-Elemente

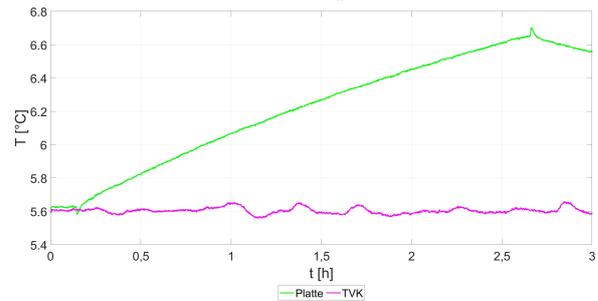
Im Folgenden werden die PE im Betrieb qualifiziert und Temperaturverläufe für verschiedene Betriebsarten und Zustände aufgezeigt. Ziel ist es die im Filter-Regler-Ansatz berechnete, notwendige Kontroll-Heizleistung so umzurechnen, dass diese durch ein PE aufgebracht werden können. Bei den bisher verwendeten Kapton-Heizelementen ist auf Grund des Wirkungsgrads von nahezu 100% eine direkte Korrelation möglich.

Abbildung 29 stellt Temperaturverläufe des Betriebs von TEC2 mit einer konstanten Stromstärke von 0.25 A und normaler Polung (kalte Seite des PE an der Platte) dar. Nach dem Einschalten der Spannungsversorgung stellt sich sehr schnell ein ΔT zwischen den beiden Plattenseiten Cold Plate (CP) (aufgeklebte Seite) und Hot Plate (HP) (freie Seite) ein, welches über den gesamten Versuch annähernd gleich bleibt. Anfangs wird Wärme von der CP zur HP transportiert, wodurch das ΔT aufgebaut wird. Mit steigendem ΔT steigt auch die Wärmeleitung zwischen HP und CP, welche bei dem maximalen ΔT gleich groß wie der Peltier-Wärmestrom ist. Ab diesem Moment wird der gesamte Peltier-Wärmestrom zur Aufrechterhaltung des ΔT benötigt und es findet kein Wärmetransport mehr statt.

Abbildung 29b zeigt auf, dass die Temperatur der Grundplatte kurz gesenkt werden kann. Wenige Minuten später wird allerdings keine Wärme mehr aus der Grundplatte absorbiert und die Grundplatte wird aufgrund des Joule'schen Wärmestrom (vgl. Gleichung 9) erwärmt.



(a) Gesamtplot.

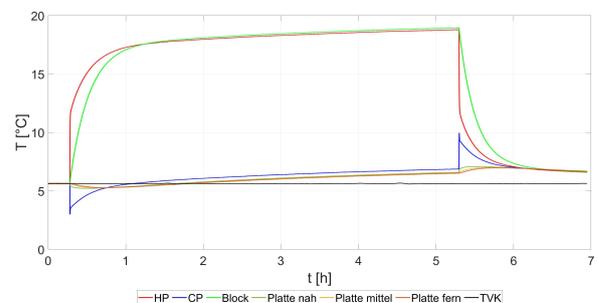


(b) Temperatur Platte.

 Abbildung 29: TEC2 $I = 0.25$ A stationär.

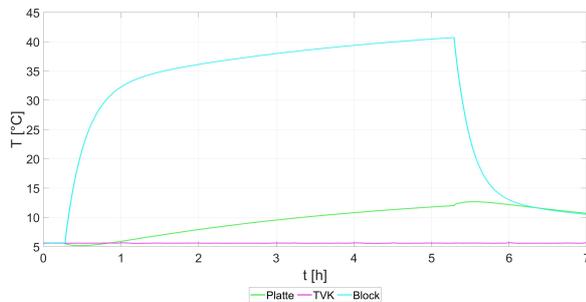
Dieser Ansatz stellt somit lediglich einen Heizwiderstand mit schlechtem Wirkungsgrad dar und kann nicht gewinnbringend die bisherigen Aktuatoren ersetzen. Der Hauptgrund dafür ist die geringe Wärmekapazität der Grundplatte, wodurch sich schnell ein ΔT zwischen CP und HP einstellt und keine Wärme mehr aus der Grundplatte absorbiert wird.

Bei TEC1 sorgt der auf die CP aufgeklebte Block für eine deutliche Erhöhung der Wärmekapazität. Das ΔT stellt sich deutlich langsamer ein, es wird dementsprechend länger Wärme aus der Grundplatte absorbiert (siehe Abbildung 30). Auch hier sorgt der Widerstand für die Entstehung eines Joule-Wärmestroms und für einen linearen Temperaturanstieg. Das ΔT hat den gleichen Betrag wie bei TEC2, allerdings stellt es sich erst sehr viel später ein. Hier konnte also tatsächlich ein negativer Wärmestrom aus der Grundplatte heraus erzeugt werden, wenn auch dieser nicht für unbegrenzte Zeit aufrecht erhalten werden konnte, da die Wärmekapazität des Blocks endlich ist.

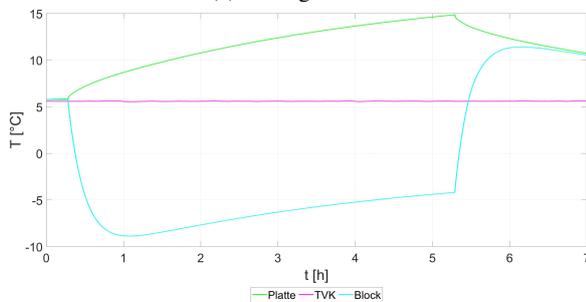

 Abbildung 30: TEC1 $I = 0.25$ A Gesamtplot.

Deutlicher wird dieser Effekt, wenn man die Polung umkehrt und versucht den Block abzukühlen. In Abbildung 31 sind die Temperaturverläufe von Grundplatte und Block aufgetragen. Bei normaler Polung wird Wärme aus der Grundplatte in den Block transportiert (Abbildung 31a). Der Block ändert seine Temperatur deutlich schneller als die Grundplatte, welche eine 16 mal größere Masse hat. Die Grundplatte kann nur in geringem Umfang heruntergekühlt werden, da das maximale ΔT zwischen den Plattenseiten des PE relativ schnell erreicht ist und danach die Joule'sche Wärme für einen linearen Temperaturanstieg sorgt. Bei umgekehrter Polung (Abbildung 31b) wird der Block gekühlt, der selbe Wärmestrom sorgt hier für eine deutliche Abkühlung des Blocks aufgrund des bereits beschriebenen Massenverhältnis. Der Block wird daraufhin für die Dauer des gesamten Versuchs auf einer Temperatur unterhalb der Referenztemperatur der PKA gehalten.

Grundlegend wurde sowohl ein positiver als auch ein negativer Wärmestrom mit dem PE erzeugt und nachgewiesen. Der beabsichtigte Nutzen als Wärmepumpe konnte somit validiert werden.



(a) Polung normal.



(b) Polung heater.

Abbildung 31: TEC1 $I = 0.75$ A stationär.

Die elektrische Spannung aufgrund des Seebeck-Effekts nach Abschalten der PE, sofern weiterhin ein ΔT zwischen HP und CP vorherrscht, konnte ebenfalls gemessen werden. Diese Spannung könnte über Rekuperation zur Energiegewinnung genutzt werden.

Um PE als alternativen Aktuator einsetzen zu können sind jedoch einige Aspekte zu berücksichtigen: Der Joule'sche Wärmestrom ist eine konstante Störgröße, welche über die Gleichung

$$(9) \quad \dot{Q}_{Joule} = R \cdot I^2$$

beschrieben wird, wobei I die Stromstärke und R der Innenwiderstand des PE ist. Während dieser Wärmestrom quadratisch von der Stromstärke abhängig ist, ist der Peltier-Wärmestrom linear von der Stromstärke abhängig (vgl. Gleichung 5). Diese Störgröße kann also durch die Aufteilung des notwendigen Wärmestroms auf mehrere PE reduziert werden. Da im hier beschriebenen Ansatz ein Flächenelement des FEM-Modells mit einem Kontroll-Heizelement versehen muss und damit die Größe des Heizelements die Größe des FEM-Modells bestimmt, müssten bei der Substitution durch PE diese sehr klein sein, sodass viele PE ein Heizelement darstellen. Damit steigen die Anforderungen an Ansteuerung, Verkabelung und damit Komplexität des Aufbaus stark an.

Der zweite Störfaktor ist der durch das ΔT zwischen den Plattenseiten des PE entstehende Wärmestrom, welcher den Peltier-Wärmestrom entgegengesetzt ist und zu einer Nullsumme mit diesem werden kann, wenn das ΔT zu groß wird. Dieser Störfaktor wird durch eine gute Wärmeableitung verringert. Wie in Abbildung 31 zu erkennen, kann der sehr viel kleinere Block deutlich stärker heruntergekühlt werden, als die größere Grundplatte. Der zu beeinflussende Körper muss demnach über das PE mit einer Wärmesenke verbunden werden, die eine sehr viel größere Wärmekapazität aufweist. Dadurch bleibt die Temperatur der Wärmesenke konstanter und der Wärmestrom in oder aus dem zu beeinflussenden Körper kann besser geregelt werden. Wenn das ΔT dauerhaft sehr klein gehalten wird, so kann der Peltier-Wärmestrom auch dauerhaft Wärme von einem zu beeinflussendem Objekt absorbieren oder emittieren.

Für den Einsatz in der Strukturstabilisierung müsste ein Versuchsaufbau mit einer möglichst hohen Abdeckung von PE entworfen werden, bei welchem die freie Seite der PE über eine Ableitung der Wärme spannungsfrei an eine Wärmesenke angeschlossen werden, welche ihre Temperatur möglichst konstant hält. Dies stellt allerdings große Herausforderungen an den Aufbau dar.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag schließt nahtlos an die vorangegangenen Arbeiten [3, 4, 5, 6] an. Der geschlossene Filter-Regler-Ansatz zur Kompensation thermisch induzierter Verschiebungen wurde bereits für sinusförmige, zufällige und stufenförmige Störungen validiert. Der größte Nachteil des Ansatzes für eine praktische Realisierung auf einem Satelliten ist die Notwendigkeit die Kontroll-Heizelemente kontinuierlich zu betreiben, damit durch Absenken der Leistung eine Kühlung gegenüber dem stationären Referenzzustand erreicht wird. In diesem Beitrag wurde die Anzahl der Kontroll-Heizelemente im bestehenden Versuchsaufbau um zwei erhöht. Ziel war es die Performance des Ansatzes dadurch zu verbessern, sodass die Verschiebungsstabilität bei gleichzeitiger Senkung der Kontroll-Heizleistung erhöht wird. Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass sich die Performance der Stabilisierung gegenüber

dem bisherigen Aufbau nicht verbessert hat. Die Änderung der Kontroll-Heizleistung konnte zwar geringfügig gesenkt werden. Dieser Vorteil ist jedoch in der Gesamtleistungsbilanz durch die Notwendigkeit des Betriebens von zwei weiteren Elementen sogar zu einem Nachteil umgekehrt. Lediglich der Faktor der Redundanz bleibt somit als positiver Effekt bestehen.

Um diesen Nachteil durch einen gänzlich anderen Ansatz ausgleichen zu können, wurden Peltier-Elemente untersucht. Diese sind potentiell in der Lage sowohl als Kühler oder als Heizer zu fungieren, wenn die Stromflussrichtung geändert wird. Um dieses Verhalten zu qualifizieren und zu quantifizieren wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt. Mit diesem konnte gezeigt werden, dass die Heizfunktion des PE sehr gute Ergebnisse liefert, die Kühlfunktion jedoch nur dann adäquat nutzbar ist, wenn die heiße, dem Versuchsobjekt abgewandte Seite mit einer ausreichend großen Masse verbunden ist, in die die Abwärme abgeleitet werden kann. Nur durch Strahlung ist dies nicht ausreichend gewährleistet. Dies stellt somit erhöhte Anforderungen an den Versuchsaufbau, da dieser isostatisch gelagert werden muss, um eine freie Ausdehnung sicherstellen zu können. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende direkte Korrelation zwischen angelegter elektrischer Leistung und umgewandelter Wärmeleistung, da vom Hersteller keine thermoelektrischen Koeffizienten zur Verfügung gestellt werden und diese nur ungenau experimentell bestimmt werden können. Der Wirkungsgrad eines PE ist deutlich geringer als der eines Heizelements. PE können die Heizelemente als Aktuatoren in diesem Ansatz ersetzen, sofern die beschriebenen Nachteile ausgeräumt werden. Dazu sind weitere experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung jener Korrelationen ebenso notwendig wie die Entwicklung eines neuen Versuchsaufbaus.

Zusätzlich kann dieser Ansatz mit anderen ebenfalls beschriebenen aktiven und passiven Kontrollmethoden kombiniert werden. So ist in einem nächsten Schritt die Nutzung von Meta-Materialien [42] oder Phasenwechselmaterial [22] möglich.

6 ANMERKUNGEN

Diese Studien stellen experimentelle Demonstrationen einer patentrechtlich geschützten Methode zur aktiven Strukturstabilisierung dar (Patent: EP000003502711B1) [43].

Literatur

- [1] L. Buinhas und E. Ferrer-Gil. “IRASSI: InfraRed astronomy satellite swarm interferometry — Mission concept and description”. In: *2016 IEEE Aerospace Conference: 5-12 March 2016*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. ISBN: 9781467376761. DOI: 10.1109/aero.2016.7500633. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/aero.2016.7500633>.
- [2] E. Ferrer Gil. “Framework for active stabilization of thermomechanical distortions in space structures”. Dissertation. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, Januar 2019.
- [3] Florian Möller u. a. “Initial validation of a closed loop filter and controller approach for active stabilization of thermomechanical distortions”. In: *73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 18-22 September 2022*. 2022.
- [4] Florian Möller u. a. “Initial validation of a closed loop filter and controller approach for active stabilization of thermomechanical distortions”. In: *Acta Astronautica* 213 (2023), S. 90–101. ISSN: 00945765. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.08.041. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576523004472>.
- [5] Florian Möller u. a. “Experimenteller Nachweis eines Ansatzes zur aktiven Strukturstabilisierung von Satellitenstrukturen gegenüber zufälligen Störungen der thermalen Randbedingungen mittels eines geschlossenen Filter- und Regleransatzes”. In: *DLRK 2022 proceedings: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK) 2022, Dresden, Germany*. Dresden: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR), 2022.
- [6] F. Möller u. a. “Experimental demonstration of a method to actively stabilize satellite structures against random perturbations of thermal boundary conditions using a closed-loop filter and controller approach”. In: *CEAS Space Journal* (2023), S. 1–18. ISSN: 1868-2510. DOI: 10.1007/s12567-023-00514-y. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12567-023-00514-y>.
- [7] Artur Kinzel u. a. “Seamless Radio Access Network for Internet of Space (SeRANIS): New Space Mission for Research, Development, and In-Orbit Demonstration of Cutting-Edge Technologies”. In: *Proceeding of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022*.
- [8] Ernest G. Wolff. *Introduction to the dimensional stability of composite materials*. Lancaster, PA: DEStech Publications, 2004. ISBN: 9781615830978.
- [9] Benjamin P. Dolgin, Jovan Moacanin und Timothy P. O’Donnell. “Theoretical limits of dimensional stability for space structures”. In: *Optomechanics and Dimensional Stability*. Hrsg. von Roger A. Paquin und Daniel Vukobratovich. SPIE Proceedings. SPIE, 1991, S. 229. DOI: 10.1117/12.48859.
- [10] SCHOTT AG. *ZERODUR® Zero Expansion Glass Ceramic*. Hrsg. von SCHOTT AG. 2023. URL: https://www.schott.com/d/advanced_optics/f7ae3c11-0226-4808-90c7-59d6c8816daf/1.3/schott_zerodur_

- katalog_july_2011_en.pdf (besucht am 12.09.2023).
- [11] H. D. Baehr und K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-05500-3. DOI: 10.1007/978-3-642-10194-6.
- [12] Sandor Kaliszky u. a. *Smart Structures*. Bd. 429. Vienna: Springer Vienna, 2001. ISBN: 978-3-211-83681-1. DOI: 10.1007/978-3-7091-2686-8.
- [13] Dong-Xu Li und Rui Xu. “Optimal Design and Control of Smart Space Structures: A Memetic Evolution Approach”. In: *IEEE Intelligent Systems* 29.1 (2014), S. 40–46. ISSN: 1541-1672. DOI: 10.1109/MIS.2013.26.
- [14] H. S. TZOU, H.-J. LEE und S. M. ARNOLD. “Smart Materials, Precision Sensors/Actuators, Smart Structures, and Structronic Systems”. In: *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 11.4-5 (2004), S. 367–393. ISSN: 1537-6494. DOI: 10.1080/15376490490451552.
- [15] Fenghua Zhang u. a. “Properties of Smart Adaptive Composite Materials”. In: *Smart composite coatings and membranes*. Hrsg. von M. F. Montemor. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. Amsterdam, Boston und Cambridge: Elsevier/WP Woodhead Publishing, 2016, S. 3–31. ISBN: 9781782422839. DOI: 10.1016/B978-1-78242-283-9.00001-4.
- [16] J Jortner und NS Priya. “Applications of Carbon/Carbon Composites”. In: *Comprehensive composite materials II*. Hrsg. von Alastair Johnson u. a. Bd. 5. Amsterdam, Boston und Heidelberg: Elsevier, 2017, S. 421–436. ISBN: 9780081023341.
- [17] Wael Zatar Hai Nguyen und Hiroshi Mutsuyoshi. “Hybrid Polymer Composites for Structural Applications”. In: *Hybrid Polymer Composite Materials*. Hrsg. von Vijay Kumar Thakur, Manju Kumari Thakur und Asokan Pappu. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017, S. 35–51. ISBN: 978-0-08-100785-3.
- [18] Jonathan Berger u. a. “The Design of Bonded Bimaterial Lattices that Combine Low Thermal Expansion with High Stiffness”. In: *Journal of the American Ceramic Society* 94 (2011), s42–s54. ISSN: 00027820. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2011.04503.x.
- [19] Amir A. Zadpoor. “Mechanical meta-materials”. In: *Materials Horizons* 3.5 (2016), S. 371–381. ISSN: 2051-6347. DOI: 10.1039/C6MH00065G.
- [20] Tobias Frenzel, Muamer Kadic und Martin Wegener. “Three-dimensional Mechanical Metamaterials with a Twist”. In: *Science* 358.6366 (2017), S. 1072–1074. ISSN: 1095-9203. DOI: 10.1126/science.aao4640. URL: <https://science.sciencemag.org/content/358/6366/1072>.
- [21] David G. Gilmore. *Spacecraft Thermal Control Handbook: Volume I: Fundamental Technologies*. 2. ed. Bd. 1. El Segundo, Calif.: The Aerospace Corporation, 2002. ISBN: 188498911X.
- [22] Dominik Wild, Markus Czupalla und Roger Foerstner. *Modeling, Prediction and Test of Additive Manufactured Integral Structures with Embedded Lattice and Phase Change Material Applying Infused Thermal Solutions (ITS)*. 50th International Conference on Environmental Systems, 2021. URL: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87104>.
- [23] H. J. Kärcher. “Die Kunst, Linsen und Spiegel zu halten: Strukturmechanik vom Allerfeinsten”. In: *Sterne und Weltraum* 3 (2012), S. 52–64. (Besucht am 28.09.2021).
- [24] H. Irschik. “A review on static and dynamic shape control of structures by piezoelectric actuation”. In: *Engineering Structures* 24.1 (2002), S. 5–11. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00081-5.
- [25] E. H. Anderson und N. W. Hagood. “Simultaneous Piezoelectric Sensing/Actuation: Analysis And Application To Controlled Structures”. In: *Journal of Sound and Vibration* 174.5 (1994), S. 617–639. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1006/jsvi.1994.1298.
- [26] S. X. Xu und T. S. Koko. “Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures”. In: *Finite Elements in Analysis and Design* 40.3 (2004), S. 241–262. ISSN: 0168874X. DOI: 10.1016/S0168-874X(02)00225-1.
- [27] Xiangshuai Song u. a. “Active shape control of an antenna reflector using piezoelectric actuators”. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 30.18-19 (2019), S. 2733–2747. ISSN: 1045-389X. DOI: 10.1177/1045389X19873422.
- [28] Le Gao u. a. “Active vibration control based on piezoelectric smart composite”. In: *Smart Materials and Structures* 22.12 (2013), S. 125032. ISSN: 0964-1726. DOI: 10.1088/0964-1726/22/12/125032.
- [29] Daniel Döring, Peter Jens Hein und Christian Spiessberger. “Temperature measurements in thermal-vacuum tests for spacecraft qualification – possibilities for infrared thermography”. In: *e-Journal of Nondestructive Testing* 22.02 (2017).

- URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=20682>.
- [30] Raman Kashyap. *Fiber Bragg gratings*. 2nd ed. Optics and photonics. Burlington, MA: Academic Press, 2010. ISBN: 9780080919911. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123725790>.
- [31] K. O. Hill und G. Meltz. "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview". In: *Journal of Lightwave Technology* 15.8 (1997), S. 1263–1276. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.618320.
- [32] Stephen J. Mihailov. "Fiber Bragg grating sensors for harsh environments". In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12.2 (2012), S. 1898–1918. DOI: 10.3390/s120201898.
- [33] Jan Lunze. *Regelungstechnik 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-10197-7. DOI: 10.1007/978-3-642-10198-4.
- [34] TEC Microsystems. *Thermoelectric Coolers Introduction - the Basics*. 2023. URL: <https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html> (besucht am 09.08.2023).
- [35] Dongliang Zhao und Gang Tan. "Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling". In: *Energy* 68 (2014), S. 658–666. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.090.
- [36] Dongliang Zhao und Gang Tan. "A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications". In: *Applied Thermal Engineering* 66.1-2 (2014), S. 15–24. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074.
- [37] Reiyu Chein und Guanming Huang. "Thermoelectric cooler application in electronic cooling". In: *Applied Thermal Engineering* 24.14-15 (2004), S. 2207–2217. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431104000675>.
- [38] Steve Zhengjie Jia. "Waste energy harvesting in sustainable manufacturing". In: *Sustainable Manufacturing Processes*. Elsevier, 2023, S. 231–256. ISBN: 9780323999908. DOI: 10.1016/B978-0-323-99990-8.00014-X.
- [39] Dimitri Tatarinov. "Charakterisierung und Simulation einer thermoelektrischen Generatoranlage zur Energie-Rekuperation aus Abgasen im Pkw". Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 19.06.2015.
- [40] Sebastian Holzhauser. "Modellierung, Analyse und Erprobung von Sensor- und Aktuatorstrategien für die aktive Strukturstabilisierung". Masterarbeit. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2023.
- [41] Elias Franzen. "Untersuchung von Peltier-Elementen als Aktuatoren zur aktiven Strukturstabilisierung in der Satellitentechnik". Bachelorarbeit. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2023.
- [42] Erhard Buchmann u. a. "Design and Investigation of a Thermoelastic Actuator with Tailored Unidirectional Thermal Expansion and Stiffness using Mechanical Metamaterials and Joule Heating Activation". In: Springer Vieweg, Cham, 2023, S. 1–14. DOI: 10.1007/978-3-031-33758-1_{\text{underline}}1. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-33758-1_1.
- [43] Roger Förstner und Eloi Ferrer Gil. "Method for thermomechanically stabilizing an apparatus, control unit, thermomechanical control system, and apparatus". EP3502711 (A1). 2019.