

ENTWICKLUNG EINES THERMOELEKTRISCHEN HEIZ- UND KÜHLSYSTEMS MIT HOHEM WIRKUNGSGRAD

T. Blum¹, S. Carrigan¹, D. Platzek² und O. Kornadt¹

¹Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

²PANCO GmbH, Mülheim Kärlich, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird über umfassende Untersuchungen sogenannter Peltier-Elemente berichtet, welche als kleine Wärmepumpen in einem neuartigen thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystem fungieren. Aufbauend auf grundlegenden experimentellen Untersuchungen zur Analyse der Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Peltier-Elemente werden thermische Bauteilsimulationen durchgeführt. Die Validierung der Simulationen durch den Vergleich mit den Messwerten gewährleistet die realitätsnahe Abbildung der Peltier-Elemente. Das resultierende Modell des Prototyps wird auf großformatige Wandsysteme erweitert. Es werden verschiedene Ausführungen des Systems in thermischen Bauteil- und Gebäudesimulationen untersucht, wodurch aufwendige experimentelle Versuchsreihen ersetzt werden. Erste Ergebnisse des in eine beispielhafte Wandkonstruktion integrierten Heizsystems weisen einen Systemwirkungsgrad von 1,8 auf.

ABSTRACT

In this paper comprehensive investigations of so-called Peltier elements are presented, which work like small heat pumps in an efficient novel thermoelectric heating and cooling system. Based on various fundamental experiments to analyse the performance and the efficiency of these Peltier elements, building components are simulated. A realistic approach to model the Peltier elements is ensured by comparing the results of the experimental test series with the various simulations. Within further simulations of building components and entire building systems, the resulting prototype is scaled up to realistic wall systems in order to avoid expensive and complex test series. First results show a system efficiency of 1,8.

EINLEITUNG

Zur Erreichung der ehrgeizigen Klimaschutzziele der EU, mit Blick auf die Herausforderung der Treibhausgasneutralität und angesichts zu erwartender Veränderungen des Außenklimas aufgrund des Klimawandels werden neuartige Systeme zur Heizung und Kühlung von Gebäuden benötigt.

Hier wird die Entwicklung eines thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems unter Verwendung von Peltier-Elementen vorgestellt. Peltier-Elemente sind kleine, auf Halbleitern basierende, thermoelektrische Wärmepumpen. Integriert in die Fassade transportieren sie im Heizfall Wärme aus der Umwelt ins Rauminnere. Durch Umkehr des Stromflusses wird zur Kühlung die Wärme aus dem Rauminnere entzogen und an die Umwelt abgegeben. Diese Flexibilität in Nutzung und Funktion der Peltier-Elemente birgt einige Besonderheiten und Herausforderungen bei Modellierung und Simulation des künftigen Systems.

Dabei können die Prozesse der Peltier-Elemente in den bewährten Bauteil- und Gebäudesimulationsprogrammen üblicherweise über deren thermische Einwirkungen auf die Konstruktion dargestellt werden. Um Aufschlüsse über die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen in den angedachten Konstruktionen unter bauüblichen Randbedingungen zu erhalten, ist eine experimentelle Untersuchung als Grundlage der Modellierung unumgänglich. Mit den daraus resultierenden Ergebnissen können die Simulationen validiert sowie die dreidimensionalen Wärmeströme und Temperaturverläufe auf Bauteilebene im stationären und im instationären Zustand analysiert werden. Diese Validierung ermöglicht anschließend eine Erweiterung der Simulationen auf großformatige Wandsysteme und ersetzt aufwendige experimentelle Untersuchungen unterschiedlich großer Prototypen.

Das Peltier-Element

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrischer Wandler, durch den bei der Leitung eines durchfließenden elektrischen Stroms Wärmeenergie von der einen zur anderen Seite des Elements transportiert wird (Peltier-Effekt). Umgekehrt wird bei einer anliegenden Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten ein Stromfluss erzeugt. Die Elemente bestehen aus zwei Keramikplatten, zwischen denen zwei elektrisch leitende, thermoelektrisch aktive Materialien alternierend miteinander verbunden sind. Dabei werden die Keramikplatten meist auf Basis von Aluminiumoxid

hergestellt, da sie dadurch verglichen mit anderen Keramikmaterialien eine ausreichend gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, bei gleichzeitig guter elektrischer Isolation (Fichthorn, o. D.). Im Gegensatz dazu sollten die gewählten elektrischen Leiter einerseits eine gute elektrische Leitfähigkeit vorweisen und andererseits die thermische Leitung begrenzen. Diesen Anforderungen werden Halbleiter am ehesten gerecht. Zur Gewährleistung des für den Peltier-Effekt notwendigen Elektronentransports ist eine unterschiedliche Dotierung (p- oder n-Dotierung) der alternierenden Halbleiter erforderlich, d.h. darin werden Fremdatome eingebracht, die als Störstellen im Leitermaterial fungieren und gezielt dessen elektrische Leitfähigkeit verändern.

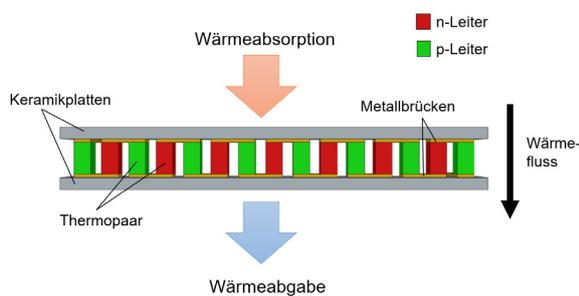


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Peltier-Elements und seiner Funktion

Bei der n-Dotierung besitzt jedes dieser Fremdatome ein zusätzliches negativ geladenes Elektron, das frei beweglich die elektrische Ladung transportiert. Umgekehrt besitzen die Fremdatome bei der p-Dotierung ein Elektron weniger als die Atome des Leitermaterials, was eine positive Ladung bewirkt. Die Kombination aus zwei jeweils unterschiedlich dotierten Halbleitern nennt man auch Thermopaar. Diese werden meist durch eine Kupferbrücke miteinander verlötet und sind elektrisch in Reihe und thermisch parallelgeschaltet (Paul et al, 2019).

An der Kontaktstelle zwischen den Halbleitermaterialien entstehen durch die Dotierungen unterschiedliche Fermi-Niveaus. Um von einem tieferen auf ein höheres Niveau zu gelangen, benötigen die Elektronen zusätzliche Energie. Diese Energie wird der Umgebung in Form von Wärmeenergie entzogen, wodurch sich die Keramikplatte an dieser Seite des Peltier-Elements abkühlt, und über die Elektronen zur anderen Keramikplatte des Peltier-Elements transportiert, wodurch sich diese erwärmt. Abbildung 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch ein Peltier-Element und stellt dessen Funktionsweise dar.

Eine größere angelegte Stromstärke geht mit einer höheren Leistung der Wärmepumpe einher, mit resultierenden höheren Temperaturen auf der warmen Seite und entsprechend niedrigeren auf der kalten. Eine große Temperaturdifferenz intensiviert den

Wärmerückfluss, der sich durch Wärmeleitung und -strahlung zwischen den beiden Peltier-Seiten einstellt. Das führt zu kleineren Leistungskennzahlen, auch COP (coefficient of performance) genannt. Der COP ist als Verhältnis der Wärmeleistung des Peltier-Elements zur für dessen Betrieb erforderlichen elektrischen Leistung definiert. Geringe Stromstärken verringern die Leistung der Wärmepumpen bei gleichzeitig höherem COP (Noriega et al. 2006).

Somit ist die Leistungsfähigkeit maßgeblich von den thermischen Randbedingungen beeinflussbar. Es ist notwendig, eine ausreichend effektive Wärmeleitung auf der kalten und eine effektive Wärmeableitung auf der warmen Seite zu gewährleisten. Unter idealen Bedingungen, mit geringen Stromstärken und effektiver Wärmezufuhr und -ableitung können Peltier-Elemente COPs größer als 4 erreichen (Peltier TEC12710T200 Datenblatt). Das bedeutet, dass mit 1 kW elektrischer Leistung mehr als 4 kW Wärme durch das Peltier-Element erzeugt werden.

Heiz- und Kühlsystem

Das im Rahmen eines Forschungsprojektes zu entwickelnde Heiz- und Kühlsystem basiert auf der Integration mehrerer dieser Peltier-Elemente in die innen- oder außengedämmte Fassade. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf der Untersuchung der Wärmepumpen innerhalb einer Leichtbaukonstruktion. Im weiteren Projektverlauf wird das System auch für massive Wände erforscht.

Bei der geplanten Leichtbauwand werden die Peltier-Elemente hinter der Verkleidung der Innenoberfläche installiert und dabei mit einem wärmeleitfähigen Material sowie ebenso mit der Außenfassade thermisch kontaktiert. Die erdachte Konstruktion ermöglicht durch die Auswahl von gut wärmeleitenden Baustoffen eine effektive Wärmezufuhr auf der kalten sowie die erforderliche Wärmeableitung auf der warmen Seite. Die Wärmeströme der Peltier-Elemente lassen sich durch die Änderung der Stromrichtung umkehren, sodass die Innenoberfläche im Sommer gekühlt und im Winter beheizt wird.

METHODIK

Im ersten Schritt, den experimentellen Untersuchungen, dienen aufeinander aufbauende Versuchskonzepte einer umfangreichen Analyse der Peltier-Elemente. Die dabei gewählten Konstruktionen liefern wichtige Erkenntnisse und Ergebnisse für die im zweiten Schritt durchgeführten Simulationen. Zu Beginn der Versuchsreihen sind erste zweidimensionale Bauteilsimulationen erforderlich, durch die die Materialauswahl und die erdachten Konstruktionen bewertet und optimiert werden können. Aluminium erfüllt die an den Wärmeleiter gestellten thermischen Anforderungen und wird für die ersten Prototypen ausgewählt. Zur

effektiven thermischen Kontaktierung werden die einzelnen Elemente zusätzlich mit Wärmeleitpaste verbunden, um entstehende Luftschichten und daraus resultierende Störungen im Wärmestrom zu verhindern.

Experimentelle Untersuchungen

- Versuchsreihe 1

Ziel der ersten Versuchsreihe ist es, Aufschlüsse über die Funktionsweise von Peltier-Elementen zu erhalten, die mit bauüblichen Materialien kontaktiert und in einer Konstruktion installiert sind, in der die Wärmeströme begrenzt sind. Ferner werden die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Randbedingungen und Stromstärken sowie die eindimensionalen Wärmeströme durch die Leiterstäbe analysiert. In Abbildung 2 ist die Versuchsskizze der durchgeführten Experimente zu sehen.

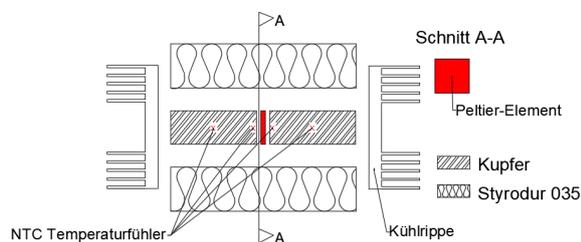


Abbildung 2: Skizze der Konstruktion der Versuchsreihe 1

Im Zentrum des Probekörpers ist das 4 x 4 x 0,36 cm große Peltier-Element zwischen zwei leitenden 10 cm langen Kupferstäben gleichen Querschnitts eingeschlossen. Eingepackt werden die drei Komponenten vollflächig in Wärmedämmung, um die Wärmeverluste in zwei Dimensionen zu minimieren und gleichzeitig den Wärmestrom in eine Richtung zu konzentrieren. In den Wärmeleitern sind jeweils am zum Peltier-Element gerichteten Rand sowie in der Mitte der Stäbe Löcher gebohrt, in denen NTC-Temperaturfühler eingebracht sind. Die am Ende der Stäbe befestigten Kühlrippen dienen der besseren Zu- und Abfuhr der Wärme in das und aus dem System. Unterschiedliche Randbedingungen werden mithilfe von Eiswasser und einer Wärmelampe erstellt. Zunächst werden die Peltier-Elemente bei Raumtemperatur betrieben. Anschließend wird der warmen Seite mithilfe des Eiswassers effektiver die Wärme entzogen und gleichzeitig strahlt die Wärmelampe Wärme über die kalte Seite in das System. Zur Simulation winterlicher Randbedingungen wird abschließend die kalte Seite mit Eiswasser gekühlt und die warme Seite behält den Kontakt zur Raumtemperatur des Labors.

- Versuchsreihe 2

Im zweiten Versuchsaufbau wird die oben vorgestellte Leichtbaukonstruktion im Labor errichtet. Zunächst erfolgen die Untersuchungen ohne Verkleidung und die Temperaturen werden an der wärmeleitenden Platte gemessen. Anschließend wird diese Konstruktion auf der Raumseite mit einer Gipskartonplatte und auf der gedachten Außenseite mit einer zementgebundenen Leichtbetonplatte verkleidet und die Temperaturen mithilfe von je vier NTC-Sensoren (Gipskartonplatte: NTC-01 bis -04) auf beiden Oberflächen gemessen (Abbildung 3). In dieser Versuchsreihe werden die Prüfkörper zunächst im Labor bei Raumtemperatur untersucht. Das Hauptaugenmerk liegt auf der dreidimensionalen Wärmeverteilung auf der Aluminiumplatte, bzw. anschließend auf Gipskarton und Leichtbeton.



Abbildung 3: verkleideter Prüfkörper der Leichtbaukonstruktion der Versuchsreihe 2

Simulationen

Mithilfe von TRISCO (TRISCO), VOLTRA (VOLTRA) und WUFI (WUFI@2D) wird das Heiz- und Kühlsystem zunächst auf Bauteilebene untersucht. Durch die Simulationsprogramme werden der stationäre und der instationäre Wärmetransport analysiert sowie die erforderlichen Leistungen im Heiz- und im Kühlfall mit den sich dabei einstellenden Temperaturprofilen im Außenbauteil und an der Bauteiloberfläche ermittelt. Im ersten Schritt erfolgt eine Überprüfung, ob das System mit besagten Programmen realistisch abbildbar ist. Hierzu werden die Versuchskörper der Versuchsreihe 2 zusammen mit den äußeren Randbedingungen im Labor mit und ohne Verkleidung modelliert. Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen werden mithilfe von thermischen Gebäudesimulationen in TRNSYS (TRNSYS 18) unterschiedliche Dimensionierungsvarianten des Gesamtsystems analysiert.

- TRISCO und VOLTRA

TRISCO und VOLTRA sind auf Finiten Elementen basierende Simulationsprogramme der Firma Physibel, mit denen man zwei- und dreidimensionale thermische Simulationen orthogonaler Bauteile durchführen kann. TRISCO ist auf stationäre Zustände beschränkt, während mit VOLTRA auch instationäre Bedingungen berücksichtigt werden können.

Untersucht werden sowohl die verkleideten Probekörper als auch jene ohne vorgesetzte Gipskarton- und Leichtbetonplatten. Zu beachten ist dabei, dass bei der Eingabe der unverkleideten Wandkonstruktionen der geringe Emissionsgrad des Aluminiums berücksichtigt werden muss. Dieser fließt mit ein in die Berechnung der Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946, 2018) und der entsprechende Wärmeübergangswiderstand wird der an das Aluminium grenzenden Luftschicht zugeordnet. Für die unverkleidete Konstruktion ergibt sich so ein Wärmeübergangskoeffizient von $2,75 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Dieser Wert wird in den durchgeführten Simulationen in den angrenzenden Luftschichten hinterlegt. Dagegen werden die Wärmeübergangskoeffizienten der verkleideten Probekörper nach besagter Norm mit $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ für horizontal gerichtete Wärmeströme im Innenraum angesetzt. Eigene Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass je nach Wandsituation (z. B. Wärmebrücke oder ungestörte Wand) der Wärmeübergangskoeffizient zwischen $5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und $9,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ liegen kann. Diese Bandbreite wird bei der Bestimmung der Wärmeströme berücksichtigt.

Die durch das Peltier-Element erzeugte Wärme wird als eine Grenzflächenrandbedingung modelliert. Dabei wird in der Grenzfläche zwischen zwei Materialien eine Temperatur vorgegeben. Den beiden Peltier-Seiten wird je ein eigenes Material zugeordnet. Zwischen diesen Peltier-Materialien und den angrenzenden Aluminiumbauteilen wird jeweils eine Grenzfläche definiert. Im stationären Zustand in TRISCO sind die beiden hinterlegten Temperaturen konstant. Diese Temperaturen werden aus den Messdaten der Versuchsreihe 2 zu dem Zeitpunkt entnommen, an dem sich die Temperaturverläufe annähernd stationär verhalten. Für die instationäre Betrachtung werden die am Peltier-Element mit einer Abtastrate von $0,5 \text{ Hz}$ gemessenen Temperaturverläufe zum Vergleich zwischen Simulation und Versuchsreihe in VOLTRA als Funktion gespeichert. Die beiden Funktionen der Warm- und der Kaltseite ersetzen die konstanten Temperaturen im Eingabefeld der Grenzflächenrandbedingung.

Ferner ermöglicht VOLTRA neben der grafischen Analyse der Wärmeströme die Definition von Ausgabeknoten, mit denen über die Berichtsdefinition virtuelle Temperaturfühler modelliert werden können.

Diese werden analog zu den am Versuchskörper angebrachten NTC-Fühlern positioniert.

Nach der Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse in den Simulationsprogrammen werden die Probekörper zu realistischen Wandaufbauten erweitert und auf entsprechende Abmessungen vergrößert. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Modellwand, mit der die für den Erhalt einer Normraumtemperatur von 20 °C erforderlichen Oberflächentemperaturen für verschiedene Leistungen der Peltier-Elemente und realistische Klimarandbedingungen bestimmt werden (Hofmann et al. 2017). Ermittelt werden die erforderlichen Oberflächentemperaturen durch Bilanzierung der Wärmeverluste eines beispielhaften 50 m^3 großen Raumes, der durch das Wandbauteil von der -5 °C warmen Außenluft getrennt ist. Die Betrachtung der Wärmeströme und -verluste erfolgt zunächst stationär. Je nach Leistung der Peltier-Elemente liegt die erforderliche Oberflächentemperatur zwischen 23 °C und 24 °C , da durch die höhere Temperatur der Innenoberfläche der aktivierten Wandkonstruktion größere Wärmeströme als Verluste nach außen treten.

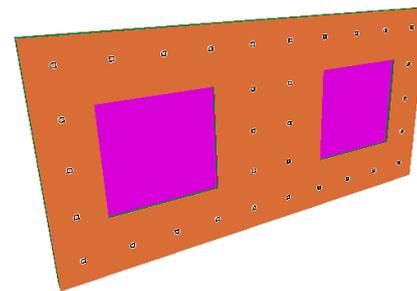


Abbildung 4: TRISCO/VOLTRA Modell einer beispielhaften Wand mit zwei Fenstern (lila) und 32 Peltier-Elementen

Die Wand besitzt denselben Aufbau wie die Versuchswände und ist in den Abmessungen $5,0 \times 2,5 \text{ m}$ mit zwei identischen $1,20 \times 1,20 \text{ m}$ großen Fenstern abgebildet. Der Fensteranteil beträgt somit ca. 25%. Die insgesamt 32 Peltier-Elemente sind zueinander in einem Abstand von 50 cm und zu den Außenkanten mit 25 cm Abstand angeordnet. Zu den Fenstern haben die Peltier-Elemente in der Horizontalen einen Abstand von 50 cm zur Mitte der Wand hin und von 30 cm an den Randbereichen sowie vertikale Abstände von 40 cm . Um die Simulationsergebnisse unterschiedlicher Ausführungen vergleichen zu können, werden diese mit den erforderlichen Oberflächentemperaturen verglichen.

- WUFI

Das Programm WUFI berücksichtigt zusätzlich zum Wärmetransport auch den daran gekoppelten Feuchtetransport im Bauteil.

Zunächst werden damit die instationären Wärmetransportvorgänge im System analysiert. Zukünftige Betrachtungen legen den Schwerpunkt auf den Feuchtetransport innerhalb der Konstruktion. Durch die wegen der Peltier-Kühlung auf der Kaltseite des Peltier-Elements im Winter zu erwartenden Temperaturen um den Gefrierpunkt ist eine Betrachtung der Feuchtigkeit im Wandinneren bezüglich Tauwasserausfall und Eiskristallbildung notwendig. Auch hierfür ist eine Validierung des Programms durch den Abgleich mit den in den Versuchen gemessenen Temperaturen erforderlich.

Die Hinterlegung der thermischen Einwirkungen der beiden Seiten des Peltier-Elements als Wärmequelle und -senke im Dialog Sources erweist sich für die Validierung als unpraktikabel. Die Eingabe einer Funktion in W/m erfordert entsprechende Messdaten, die aus den experimentellen Untersuchungen nicht hervorgehen.

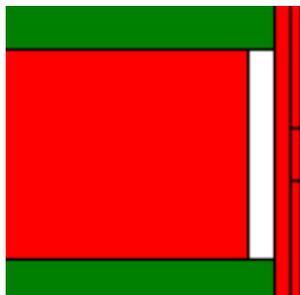


Abbildung 5: Ausschnitt des WUFI-Modells der Versuchsreihe 2 (unverkleidet) mit Darstellung des modellierten Peltier-Elements

Für eine zweite Variante werden *.KLI-Klimadateien erstellt und die gemessenen Temperaturen der Versuchsreihe mit der minimalen Intervallgröße im Programm von 0,01 h (36 s) gespeichert. Die Temperaturen der Versuchsreihe 1 werden unmittelbar am Peltier-Element gemessen. Bei der Versuchsreihe 2 werden die Temperaturen der Kaltseite ebenfalls unmittelbar am Peltier aufgenommen, die Messung der Temperatur der Warmseite erfolgt hingegen auf der Außenseite der Aluminiumplatte. Die in der Simulation maßgebenden Temperaturen für die Warmseite des Peltier-Elements sind durch die Wärmeleitung und durch die Wärmespeicherung in der Aluminiumplatte um etwa 0,6 K geringer als die Peltier-Temperaturen im Versuchsaufbau. Dies wird in der Versuchsauswertung berücksichtigt. Abbildung 5 stellt das maßgebende Detail des in WUFI hinterlegten Modells des unverkleideten Wandaufbaus der Versuchsreihe 2 dar.

Auf dem Screenshot sind in Rot die Aluminiumbauteile und in Grün die Dämmschicht erkennbar. Der weiße Bereich kennzeichnet das Peltier-Element und ist im Dialog Geometry nicht explizit definiert, sondern bildet eine Lücke in der

Konstruktion. Dies ermöglicht die Definition von zwei Klimarandbedingungen an den an das Aluminium angrenzenden Randflächen, die wie oben beschrieben mit den jeweiligen Messwerten verknüpft sind. Die Grenzflächen zur Wärmedämmung sind adiabat.

- TRNSYS

TRNSYS ist ein thermisches Gebäudesimulationsprogramm zur Analyse von instationären Systemen. Mit dessen Hilfe werden im Projekt unterschiedliche Dimensionierungsvarianten anhand thermischer Gebäudesimulationen verglichen. Die Simulationsergebnisse auf Bauteilebene der zuvor beschriebenen Programme dienen dabei als Grundlage für die Modellierung des Gesamtsystems.

ERGEBNISSE

Experimentelle Untersuchungen

- Versuchsreihe 1

Die Grundlagen-Versuchsreihen dienen einer ersten Evaluation der Leistung der Peltier-Elemente unter Verwendung unterschiedlicher Stromstärken zwischen 0,25 A und 2,0 A. Da die Peltier-Elemente stark von den äußeren Randbedingungen beeinflusst werden, sind die Ergebnisse lediglich für Konstruktionen in Systemen mit vergleichbaren thermischen Voraussetzungen aussagekräftig. Dennoch liefert die Versuchsauswertung wichtige Erkenntnisse zur Funktionsweise der Wärmepumpen. Tabelle 1 zeigt die mithilfe der Peltier-Elemente erreichten maximalen und minimalen Temperaturen (siehe auch Abbildung 6) in der Mitte des Leiterstabes in 0,5 A Schritten sowie die durchschnittliche Raumtemperatur während der Versuchsdurchführung und die Differenz der minimalen bzw. maximalen Temperatur zur Raumtemperatur.

Tabelle 1:

max. T und min. T in °C in Abhängigkeit von der Stromstärke in A, mit Differenz zur Raumtemperatur

	0,5 A (1,5 V)	1,0 A (3,2 V)	1,5 A (5,0 V)	2,0 A (6,9 V)
MAX. T [°C]	28,7 + 8,0	37,1 + 16,5	51,7 + 28,3	61,7 + 41,0
MIN. T [°C]	16,4 - 4,3	14,4 - 6,2	11,5 - 11,9	12,8 - 7,9
RAUM- TEMPERATU R [°C]	20,7	20,6	23,4	20,7

Wie zu erwarten ist, steigt die Temperaturdifferenz zwischen den Versuchstemperaturen und der Raumluft mit Zunahme der Stromstärke sowohl auf der kalten als auf der warmen Seite an. Jedoch entzieht das Peltier-Element bei 1,5 A auf der kalten Seite mehr Wärmeenergie als bei der höheren Stromstärke

von 2,0 A, da die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente dann am höchsten ist, wenn der Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Seite gering bleibt. Bei 2,0 A ist dieser Unterschied so groß, dass die entzogene Wärmemenge kleiner bleibt als bei 1,5 A.

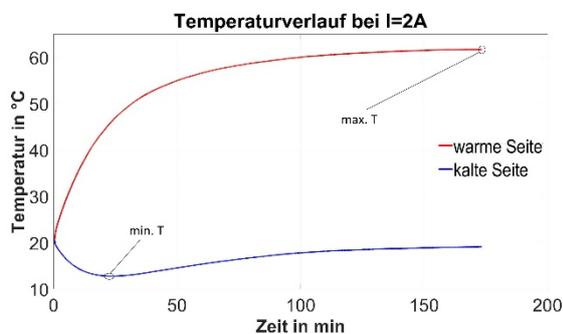


Abbildung 6: Temperaturverlauf der Messsensoren auf der warmen und kalten Peltier-Seite

Maßgebend wird dieser Effekt durch den eintretenden Wärmerückfluss und die im Peltier-Element erzeugte Joule'sche Wärme beeinflusst, sodass das Peltier-Element im Versuch bei 1,5 A auf der kalten Seite der Umgebung mehr Wärme entzieht als bei 2,0 A. Etwa nach 20 Minuten ist der in Abbildung 6 dargestellte Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Seite so hoch, dass durch die oben aufgeführten Effekte mehr Wärme auf die kalte Seite transportiert wird, als diese aus der Umgebung entziehen kann. Folglich steigt ab diesem Zeitpunkt die Temperatur der blauen Kurve wieder fast bis zum anfänglichen Wert.

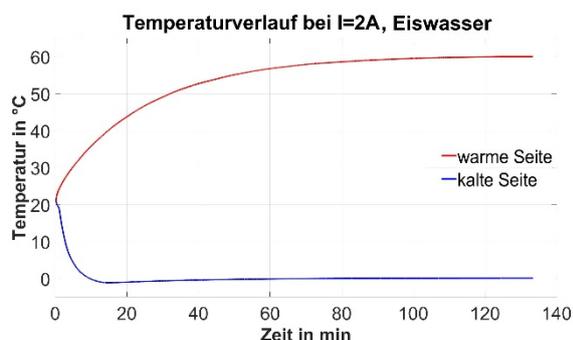


Abbildung 7: Temperaturen der warmen und kalten Seite des Peltier-Elements, bei Platzierung der kalten Seite in Eiswasser

Die Randbedingungen dieser ersten Versuche entsprechen allerdings nur bedingt denen des geplanten Heiz- und Kühlsystems. Interessanter für dessen Dimensionierung ist eine Betrachtung, bei der die kalte Seite in einer Umgebung um die 0 °C liegt und die warme einen Innenraum beheizt. Durch die Platzierung der Kühlrippen der kalten Seite des

Versuchskörpers in Eiswasser wird diese Situation simuliert.

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, erreicht die kalte Seite unter Kontakt mit Eiswasser nur kurzzeitig Temperaturen unter 0 °C und pendelt sich dann auf dem Nullpunkt ein. Da zur Entstehung eines Wärmestromes eine Temperaturdifferenz erforderlich ist, müsste die kalte Peltier-Seite geringere Temperaturen erreichen als das null Grad kalte Eiswasser. Wie bei den obigen Versuchsaufbauten bei Raumtemperatur verhindern der Wärmerückfluss und die Joule'sche Wärme langfristig Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes.

- Versuchsreihe 2

Mithilfe der Probekörper der Versuchsreihe 2 wird die dreidimensionale Wärmeverteilung auf den Oberflächen der Leichtbaukonstruktionen untersucht. Ferner wird die mittlere Oberflächentemperatur mit der für die beispielhafte Wand bilanzierten, erforderlichen Oberflächentemperatur verglichen. Abbildung 8 stellt diesen Vergleich für die verkleidete Konstruktion bei einer Stromstärke von 1,0 A dar.

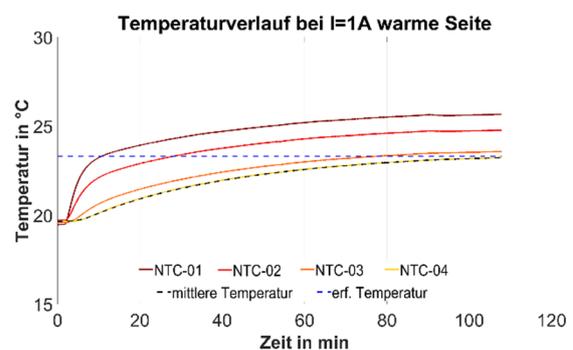


Abbildung 8: Oberflächentemperaturen der verkleideten Versuchskonstruktion, warme Peltier-Seite

Der Temperaturverlauf von innen nach außen ist an den vier durchgängigen Linien zu erkennen. Je näher die NTC-Sensoren am Peltier-Element in der Mitte der Platte positioniert sind, desto höher ist deren gemessene Temperatur. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet die mittlere Oberflächentemperatur und deckt sich mit der gelben Linie des äußersten Temperaturfühlers. Sie schneidet etwa ab Minute 100 die blau gestrichelte Gerade der erforderlichen Wandtemperatur.

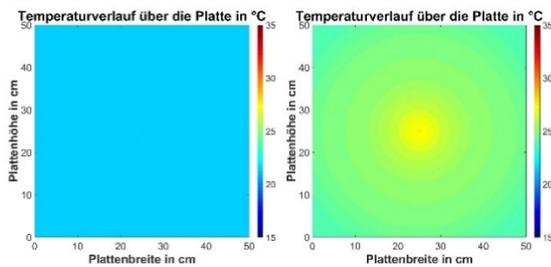


Abbildung 9: Temperaturentwicklung der Oberfläche der verkleideten Wand – links: Beginn der Messung; rechts: Ende der Messung

Durch die Trägheit des thermischen Systems ist zur Erreichung der erforderlichen Temperatur eine gewisse Vorlaufzeit notwendig. Die Temperaturentwicklung des über der Aluminiumplatte liegenden Bereiches der Gipskartonplatte wird in Abbildung 9 veranschaulicht.

Tabelle 2:
Systemwirkungsgrade und Vergleich der Oberflächentemperaturen der verkleideten Wand im Labor

	0,5 A (1,8 V)	1,0 A (4,5 V)	1,5 A (6,7 V)	2,0 A (7,7 V)
MITTL. OBERFLÄCHENTEMPERATUR [°C]	21,8	23,4	25,3	27,8
RAUM-TEMPERATUR WÄHREND DER VERSUCHE [°C]	20,5	19,8	19,7	19,7
ERF. OBERFLÄCHENTEMPERATUR [°C]	23,3	23,4	23,7	24,0
WIRKUNGSGRAD	2,8 oder 1,8-3,3	1,5 oder 1,0-1,8	1,1 oder 0,7-1,3	1,0 oder 0,7-1,2

In Tabelle 2 sind die Systemwirkungsgrade dargestellt. Jeweils der zuerst aufgelistete Wirkungsgrad wird unter Annahme eines normativen Wärmeübergangskoeffizienten ($h = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$) bestimmt. Die untere Angabe der Bandbreite beschreibt die Ergebnisse bei Betrachtung der Grenzwerte $5,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $9,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zur Berechnung des Systemwirkungsgrades werden der von der Wandoberfläche in das Rauminnere geleitete Wärmestrom ins Verhältnis zur erforderlichen elektrischen Leistung beim Betreiben des Peltier-Elements gesetzt. Der zur Ermittlung der Wärmeströme benötigte Temperaturunterschied bezieht sich dabei auf die Labor-Raumtemperatur während der Versuchsdurchführung. Unter thermischen Randbedingungen mit konstanter Labor-Raumtemperatur sind die Systemwirkungsgrade bei normativer Betrachtung mindestens 1,0.

Außerdem sind in der Tabelle die vorhandenen mittleren Oberflächentemperaturen den erforderlichen gegenübergestellt. Lediglich der Versuchsdurchlauf unter einer Stromstärke von 0,5 A erreicht die erforderlichen Temperaturen nicht. Nur für gemäßigte Außentemperaturen (ab 11 °C) ist die Wärmeleistung bei dieser Stromstärke ausreichend, um die durch die geringeren Temperaturunterschiede zwischen Raum- und Außenluft entstehenden kleineren Wärmeverluste auszugleichen.

Simulationen

- TRISCO und VOLTRA

Die Validierung von VOLTRA zeigt, dass die instationären thermischen Auswirkungen der Peltier-Elemente auf die Versuchskonstruktion realitätsnah simuliert werden (Tabelle 3). Die stationäre Betrachtung in TRISCO führt hingegen zu größeren Diskrepanzen. Grund hierfür ist die thermische Trägheit der Materialien. Experimentell verteilt sich die Wärme instationär im System, während TRISCO die Auswirkungen für den stationären Endzustand berechnet.

Tabelle 3:
Vergleich der Messdaten aus der Versuchsreihe 2 (verkleidet bei 2 A) mit den in VOLTRA simulierten Ergebnissen

	NTC-1	NTC-2	NTC-3	NTC-4
VERSUCHE [°C]	33,3	31,2	28,7	27,9
SIMULATION [°C]	32,9	31,5	28,9	27,8
DIFFERENZ [K]	-0,4	0,3	0,2	-0,1

Die validierten Simulationen lassen sich anschließend auf großformatige Wandsysteme erweitern. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, liegt das Hauptaugenmerk dabei auf der Wärmeverteilung auf der Innenoberfläche.

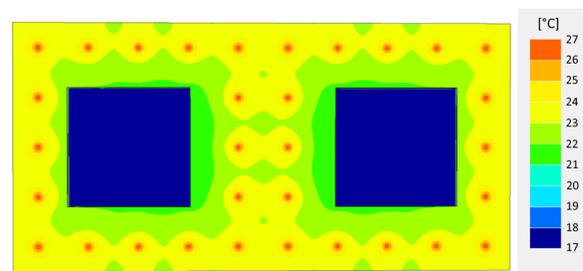


Abbildung 10: Temperaturverlauf der in TRISCO simulierten Beispielwand aus Abbildung 9

Unmittelbar am Peltier Element erreichen diese Temperaturen von bis zu 27 °C. Im Mittel liegt die Oberflächentemperatur bei 23,4 °C. Bei einer Innenraumtemperatur von 20 °C heizt das System den Raum folglich mit einem Wärmestrom zwischen 17,0 W/m² ($h = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) und 30,9 W/m² ($h = 9,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), bzw. nach Norm ($h = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) von 26,2 W/m². Das entspricht, für den normativen Wärmeübergangswiderstand, einer Wärmeleistung von 252 W. Bei dieser Simulation sind die Messwerte einem Versuch entnommen, in dem das Peltier-Element mit 1,0 A und 4,5 V betrieben wird und eine maximale Temperatur von 31,0 °C erreicht.

Unter der Annahme, dass für jedes Peltier-Element die gleiche elektrische Leistung erforderlich ist wie in den experimentellen Untersuchungen, ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 1,8 (bzw. 1,2 – 2,1).

- WUFI

Die Ergebnisse der WUFI-Validierung weisen, wie in Tabelle 4 zu sehen ist, größere Diskrepanzen zwischen den experimentellen Untersuchungen und den Simulationen auf.

*Tabelle 4:
Vergleich der Messdaten aus der Versuchsreihe 2
(unverkleidet bei 2,0 A) mit den in WUFI simulierten
Ergebnissen*

	NTC-1	NTC-2	NTC-3	NTC-4
Versuche [°C]	44,7	39,9	36,7	35,4
Simulation [°C]	43,2	40,8	37,1	34,8
Differenz [K]	-1.5	0.9	0.4	-0.6

Wie zu erwarten, liegt die simulierte Temperatur beim ersten NTC unterhalb des Messwertes, da die hinterlegte Temperatur nicht unmittelbar am Peltier-Element gemessen wird. Diese berücksichtigt somit bereits Verluste durch die Speicherfähigkeit des Aluminiums. Die Temperaturen der Simulation sind folglich nach oben zu korrigieren. Während die Werte für die NTCs 1 und 4 dadurch näher an die Versuchsergebnisse rücken, wächst die Diskrepanz bei den NTCs 2 und 3.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die Kombination aus experimentellen Untersuchungen und Simulationen mithilfe bewährter Bauteil- und Gebäudesimulationsprogramme lässt sich das vorgestellte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem umfassend erforschen.

Die durchgeführten Versuchsreihen dienen in erster Linie der Analyse der Wärmeströme innerhalb der Konstruktion sowie der Untersuchung der Funktionsweise und Leistungsfähigkeit der Peltier-

Elemente unter gebäudetypischen Randbedingungen. Ferner bilden sie die Grundlage, auf denen die Simulationen aufbauen und ermöglichen so deren Erweiterung auf großformatige Wandsysteme. Die daraus folgenden Simulationen ersetzen aufwendige experimentelle Versuchsreihen an großen Prototypen.

Erste Ergebnisse zeigen, dass das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem einen Systemwirkungsgrad von etwa 1,8 erreicht und die Innenoberflächen auf die erforderlichen Temperaturen beheizen kann. Zur Validierung sind sowohl weitere Simulationen als auch zusätzliche experimentelle Untersuchungen erforderlich.

Im nächsten Schritt werden die Leichtbaukonstruktionen mit den Peltier-Elementen in einem Kubus im Freien untersucht, um die Funktions- und Leistungsfähigkeit unter realen klimatischen Bedingungen zu analysieren. Zusätzlich erfolgen weitere Betrachtungen auf Bauteilebene mithilfe der vorgestellten Simulationsprogramme. Anschließend werden anhand thermischer Gebäudesimulationen verschiedene Dimensionierungsvarianten verglichen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

LITERATUR

- DIN EN ISO 6496: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren, 2018. Deutsches Institut für Normung, Deutschland.
- Fichthorn, H. (o. D.). Grundlagen-Peltier, SITUS Technicals GmbH, Deutschland.
- Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O., 2017. Bemessung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle auf der Grundlage von Raumklimamessungen. In: Bauphysik-Kalender 2017, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- Noriega, G., Villasevil, F., Lopez, A., Platzek, D., 2006. Acquisition of data curves in a thermoelectric system, Wien, Österreich.
- Paul, S., Paul, R., 2019. Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Deutschland.
- Peltier TEC-12710T200 Datenblatt. Aufgerufen 27. Februar 2020
- TRISCO version 12.0w: computer program to calculate 3D & 2D state heat transfer in rectangular objects, Physibel, Gent, Belgien

TRNSYS 18: Transient System Simulation Tool, Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists.

VOLTRA version 7.0w: computer program to calculate 3D & 2D transient heat transfer in objects described in a rectangular grid using the

energy balance technique, Physibel, Gent, Belgien

WUFI@2D V.3.4.2.181.DB.24.78, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen.