

TOBIAS BLUM

# Ganzheitliche Bewertung eines auf Peltier-Elementen basierenden Flächenheiz- und -kühlsystems

—  
Dissertation  
Bauingenieurwesen  
Februar 2023

Schriftenreihe des  
Fachgebiets Bauphysik  
Energetische Gebäudeoptimierung  
Herausgeber Prof. Dr. Oliver Kornadt  
**Band 06**

**R**  
**P** **TU** Rheinland-Pfälzische  
Technische Universität  
Kaiserslautern  
Landau

# Ganzheitliche Bewertung eines auf Peltier- Elementen basierenden Flächenheiz- und -kühlsystems

vom Fachbereich Bauingenieurwesen der  
Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau  
zur Verleihung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

## **DISSERTATION**

von

**Tobias Blum, M. Sc.**

aus Beckingen-Oppen

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer
1. Berichterstatterin:	apl. Prof. Dr. rer. nat. Svenja Carrigan
2. Berichterstatter	Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt
Tag der mündlichen Prüfung:	08.02.2023

Kaiserslautern 2023

D 386

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnd.ddb.de>

Herausgeber: Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung  
Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Postfach 3049  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
67663 Kaiserslautern

Verlag: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Druck: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
Dezernat 5 Technik  
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Der Herausgeber, Tobias Blum, Kaiserslautern 2023

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

ISSN: 2363-8206

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (vorher Technische Universität Kaiserslautern).

Für die Anstellung am Lehrstuhl, die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen, die fachliche Ausbildung und insbesondere die persönliche Förderung bedanke ich mich herzlich bei meinen beiden Betreuer\*innen Frau apl. Prof. Dr. rer. nat. Svenja Carrigan und Herr Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets möchte ich ebenfalls für die vielen fachlichen Gespräche, ihre Tipps und Denkanstöße bedanken, durch die diese Arbeit an vielen Stellen beeinflusst wurde. Das stets angenehme und konstruktive Arbeitsklima und die vielen interessanten persönlichen Gespräche machten die Arbeit im Fachgebiet für mich zu einer wertvollen Zeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für die vielfältige und immerwährende Unterstützung bei all den von mir angestrebten Zielen; meinen Eltern dafür, dass sie mir meinen eingeschlagenen Weg ermöglichten und mich in allen Entscheidungen unterstützten sowie meiner Partnerin Jessi, meinen Brüdern und engen Freunden für die viele Quality Time.

Kaiserslautern, Oktober 2022

Tobias Blum



## Kurzfassung

Neue nachhaltige und dezentrale Energiesysteme können einen großen Beitrag bei der Einsparung von Energie sowie für die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudesektors leisten. Bei der Entwicklung dieser Systeme ist eine ganzheitliche Betrachtung ihrer wesentlichen Auswirkungen und Einflussfaktoren essenziell. Ziel dieser Arbeit ist es, ein neuartiges, auf Peltier-Elementen basierendes Heiz- und Kühlsystem ganzheitlich zu bewerten. Peltier-Elemente sind kleine thermoelektrische Wandler und sollten, installiert in der Außenwand eines Gebäudes, als dezentrale Wärmepumpen fungieren. Die Bewertung des Gesamtsystems ist durch eine Kombination aus experimentellen Untersuchungen und thermischen Simulationen möglich. Die experimentellen Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente und wurden später zu Versuchen an einem Prototyp erweitert, der sowohl im Labor als auch im Freilandversuch analysiert wurde. Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Untersuchungen wurden thermische Bauteilsimulationen in TRISCO und VOLTRA sowie thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS durchgeführt. Anhand der Freilandversuche und der Gebäudesimulationen konnte das entwickelte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem abschließend energetisch bewertet werden. Mit einem durchschnittlichen jährlichen System-COP von 0,96 bis 1,02 erwies sich das erforschte System als nicht ausreichend effizient. Vor allem im direkten Vergleich mit einem auf einer Wärmepumpe basierenden Referenzsystem zeigte sich, dass das untersuchte Peltier-System beim derzeitigen Stand der Technik keine zukunftsfähige Technologie ist.



## Abstract

Innovative sustainable and decentralized energy systems have the potential to contribute significantly to energy saving and carbon emission reduction in the building sector. Developing these systems, it is essential to take a holistic approach to calculating its main influences and impacts. The aim of this work is to evaluate a new heating and cooling system based on Peltier elements. Peltier elements are small thermoelectric heat pumps which can be installed in the exterior wall as a decentralized heating and cooling unit. Through experimental investigations and thermal simulation studies, it was possible to evaluate the overall system. Initially, experimental studies focused on the performance of Peltier elements, and later a prototype was evaluated both in the laboratory and under outdoor conditions as part of a test cube. Based on the results of these experimental studies, thermal simulations were performed, focusing on building parts in VOLTRA and TRISCO and on whole buildings in TRNSYS. Combining the results of the outdoor evaluations with those of the building simulations in TRNSYS, the developed thermoelectric heating and cooling unit could finally be evaluated energetically. The mean annual COP of the system was measured between 0,96 and 1,02, which means that the studied system cannot be operated with sufficient efficiency. In particular, the comparison of the Peltier system with a heat pump reference system shows that the Peltier element-based system is not a sustainable alternative to current commercial systems at the current state of the art.





# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	iii
Kurzfassung.....	v
Abstract .....	vii
Inhaltsverzeichnis .....	ix
Nomenklatur .....	xi
1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen .....	5
2.1 Grundlagen der thermischen Behaglichkeit .....	5
2.1.1 Definitionen und Einflussfaktoren.....	5
2.1.2 Das Behaglichkeitsmodell nach Fanger – DIN EN ISO 7730 .....	7
2.1.3 Stand der Wissenschaft der thermischen Behaglichkeit.....	10
2.1.4 Auswertung des Stands der Wissenschaft der thermischen Behaglichkeit..	18
2.2 Grundlagen der Testreferenzjahre und Klimaszenarien .....	19
2.3 Das Peltier-Element.....	29
2.3.1 Physikalische Grundlagen .....	29
2.3.2 Coefficient of Performance – COP .....	36
2.3.3 Peltier-Elemente in Baupraxis und Forschung .....	40
2.3.4 Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik .....	41
3 Thermoelektrisches Heiz- und Kühlsystem .....	43
3.1 Konzeption .....	43
3.2 Chancen des Systems.....	45
3.3 Risiken des Systems .....	47
3.4 Lastenheft.....	48
4 Experimentelle Untersuchungen .....	50
4.1 Grundlagenversuche Peltier-Element .....	50
4.2 Laborversuche der Prototypen.....	56
4.3 Freilandversuche der Prototypen .....	58
5 Thermische Bauteilsimulationen in TRISCO und VOLTRA .....	65

5.1	Modellierung und Validierung des Prototyps .....	65
5.2	Modellierung und Simulation von Wandbauteilen .....	70
6	Thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS .....	72
6.1	Methodik .....	72
6.2	Modellierung und Simulation des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems ...	74
6.3	Modellierung der Referenzsysteme .....	78
7	Ergebnisauswertung der experimentellen Untersuchungen und Simulationen .....	80
7.1	Validierung der analytischen Gleichungen .....	80
7.2	Coefficient of Performance – COP .....	85
7.3	Wärmeleistung und Oberflächentemperaturen der Prototypen .....	91
7.4	System-COP der Prototypen .....	93
7.5	Behaglichkeit des Gesamtsystems .....	97
7.6	Energetische Bewertung des Gesamtsystems .....	100
7.7	Adaption des Systems an den Klimawandel .....	104
8	Vergleich des Systems mit konventionellen Heizsystemen .....	106
9	Zusammenfassung .....	110
9.1	Fazit .....	113
9.2	Ausblick .....	114
	Abbildungsverzeichnis .....	116
	Tabellenverzeichnis .....	120
	Literatur .....	122
	Anhang A: Thermoelektrisches Heiz- und Kühlsystem .....	132
	Anhang B: Experimentelle Untersuchungen .....	134
	Anhang C: Thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS .....	135
	Anhang D: Ergebnisauswertung .....	139
	Lebenslauf .....	144

# Nomenklatur

## Lateinische Symbole

$A$	$m^2$	Fläche
$A_i$	$m^2$	Fläche eines nicht temperierten Bauteils in TRNSYS
AMV	-	tatsächliches mittleres Votum (Actual Mean Vote)
$A_p$	$m^2$	Fläche der Peltier-Konstruktion in TRNSYS
$C$	$W$	Konvektion an der Kleidungsoberfläche
COP	-	Coefficient of Performance
$e_0$	$C$	Elementarladung
$E_d$	$W$	latente Wärme durch Dampfdiffusion über die Haut
$E_{re}$	$W$	latente Wärme der ausgeatmeten Luft
$E_{sw}$	$W$	latente Wärme durch das Verdunsten von Schweiß auf der Haut
$f_{cl}$	$m^2K/W$	Bekleidungsflächenfaktor
$h$	$W/m^2K$	Wärmeübergangskoeffizient
$h_c$	$W/m^2K$	Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion
$h_r$	$W/m^2K$	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung
$I$	$A$	Stromstärke
$I_{cl}$	clo	Bekleidungsisolationswert
$I_{max}$	$A$	maximale Stromstärke des Peltier-Elements
$K$	$W/K$	thermische Leitfähigkeit
$L$	$W$	sensible Wärme der ausgeatmeten Luft
$M$	met	Energieumsatz
$p_a$	Pa	Wasserdampfpartialdruck
PD	%	Prozentsatz Unzufriedener (Percentage of Dissatisfied)
$P_{el}$	$W$	elektrische Leistung
PMV	-	vorausgesagtes mittleres Votum (Predicted Mean Vote)
PPD	%	Prozentsatz Unzufriedener (Percentage of People Dissatisfied)
$Q$	$C$	Ladungsmenge
$Q_c$	$W$	Wärmestrom auf der kalten Seite des Peltier-Elementes
$Q_{c,max}$	$W$	maximal gemessener Wärmestrom von der kalten Seite des Peltier-Elements
$q_{ges}$	$W$	Gesamtwärmeverlust des menschlichen Körpers

$Q_h$	W	Wärmestrom auf der warmen Seite des Peltier-Elementes
$q_H$	W/m <sup>2</sup>	Wärmestromdichte von der Peltier-Konstruktion in den Raum
R	W	Wärmestrahlung
R	$\Omega$	Ohmscher Widerstand
$R_{se}$	m <sup>2</sup> K/W	äußerer Wärmeübergangswiderstand
$R_{si}$	m <sup>2</sup> K/W	innerer Wärmeübergangswiderstand
t	s	Zeit
T	K	absolute Temperatur
$t_a$	°C	Lufttemperatur
$T_a$	°C	Raumlufttemperatur
$T_c$	K	Temperatur auf der kalten Seite des Peltier-Elementes
$t_{cl}$	°C	Oberflächentemperatur der Bekleidung
$T_h$	K	Temperatur auf der warmen Seite des Peltier-Elementes
$T_p$	°C	mittlere Oberflächentemperatur der Peltier-Konstruktion in TRNSYS
$T_{rm}$	°C	mittlere Strahlungstemperatur
U	V	elektrische Spannung
U	W/m <sup>2</sup> K	U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient
$U_{max}$	V	maximale Spannung des Peltier-Elements
$v_{ar}$	m/s	relative Luftgeschwindigkeit
W	W/m <sup>2</sup>	wirksame Mechanische Leistung
$W_{AB}$	J	zwischen zwei Punkten umgesetzte potenzielle Energie

### Griechische Symbole

$\kappa$	S/m	spezifische elektrische Leitfähigkeit
$\alpha$	V/K	Seebeck-Koeffizient
$\Delta T$	K	Temperaturdifferenz
$\Delta T_{max}$	K	maximal gemessene Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Peltier-Seite
$\rho$	$\Omega m$	spezifischer elektrischer Widerstand
$\Pi$	V	Peltier-Koeffizient

**Abkürzungen**

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
eLCA	electronic Life Cycle Assessment, Online Tool für Ökobilanzierungen
EN	Europäische Norm
GKP	Gipskartonplatte
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Weltklimarat
ISO	Internationale Organisation für Normung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
NTC	Heißleiter, Temperaturfühler (Negative Temperature Coefficient Thermistor)
Pt100	Widerstandstemperturfühler aus Platin mit Nennwiderstand 100 Ω
PVC	Polyvinylchlorid, ein thermoplastisches Polymer
RCP	Representative Concentration Pathways, Klimaszenarien ab 2013
SRES	Special Report on Emissions Scenarios, Klimaszenarien ab 2000
SSP	Shared Socioeconomic Pathways, Klimaszenarien ab 2021
TRJ / TRY	Testreferenzjahr
UCB	University of California Berkeley
WLG	Wärmeleitgruppe
XPS	extrudiertes Polystyrol



# 1 Einleitung

Im Februar 2022 veröffentlichte der Weltklimarat IPCC seinen 6. Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe II [1] und fand darin deutliche Worte: „Die kumulierte wissenschaftliche Evidenz ist eindeutig: der Klimawandel ist eine Bedrohung für das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit des Planeten“ [2]. Ferner würde „jede weitere Verzögerung eines global konzentrierten Handelns [...] ein kurzes und sich schnell schließendes Zeitfenster verpassen und die Sicherung einer lebenswerten und nachhaltigen Zukunft gefährden“ [2]. Bereits im Jahr 2015 verpflichteten sich 197 Staaten mit dem Übereinkommen von Paris [3] zu mehr Klimaschutz und formulierten das Ziel, die globale Erwärmung „im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf ‚deutlich unter‘ zwei Grad Celsius zu begrenzen mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius“ [4]. Zur Erreichung der definierten Klimaschutzziele entwickelten die jeweiligen Länder Maßnahmen und legten den Schwerpunkt vor allem auf die Einsparung von Energie und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mit einem Anteil von 37% an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen [5] kommt dem Gebäudesektor dabei eine besondere Bedeutung zu, da dieser große Einsparpotenziale bietet. Durch die Erhöhung der Dämmstandards konnten die Wärmeenergiebedarfe in Neubauten bereits signifikant reduziert werden [6]. Ferner ist durch das sich erwärmende Weltklima auch in Deutschland perspektivisch ein höherer Kühlbedarf zu erwarten [7]. Aus diesem Grund kommt innovativen Heiz- und Kühlsystemen eine immer größer werdende Bedeutung für die Gebäudeklimatisierung zu. Dabei wurde in den letzten Jahren und vor dem Hintergrund des Klimawandels deutlich, dass Technologien, Prozesse etc. nicht von den Systemen, in denen sie anzutreffen sind, entkoppelt werden dürfen. Vielmehr ist eine systemische Denkweise erforderlich, die versucht, die komplexen Zusammenhänge ganzheitlich zu durchdringen. Ganzheitlich bedeutet „auf eine Ganzheit bezogen; über einzelne Fächer o. Ä. hinausgreifend und so einen größeren Zusammenhang darstellend“ [8]. Dieser ganzheitliche Ansatz wird vor allem auch in aktuellen Debatten um Nachhaltigkeit sowie für die Lösung ökologischer Probleme vermehrt gewählt [9, 10]. Auch im Gebäudesektor wird diese Brücke zwischen ganzheitlich und ökologisch geschlagen und eine möglichst ganzheitliche Betrachtung im Begriff der Nachhaltigkeit zusammengefasst. So werden auf dem „Informationsportal Nachhaltiges Bauen“ des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen Dimensionen und Schutzziele des nachhaltigen Bauens definiert [11]. Die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziokulturelles werden als gleichberechtigte Schwerpunkte eingeführt (Abbildung 1) und stellen die Grundsäulen für eine ganzheitliche und nachhaltige Bewertung dar.



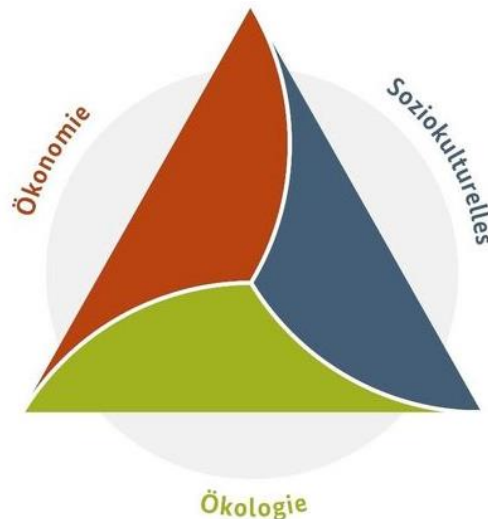


Abbildung 1 Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [11]

Um den Anforderungen an die Nachhaltigkeit im Gebäudesektor gerecht zu werden, sind neue energiesparende Systeme notwendig. Da bei der Umwandlung einer Energieform in eine andere stets Verluste entstehen, ist die Nutzung von Umweltwärme bei der Entwicklung neuer Heiz- und Kühlsysteme eine attraktive Möglichkeit, mit vergleichbar geringem Aufwand bereits vorhandene Wärmeenergie für den Gebäudebetrieb nutzbar zu machen, wie dies beispielsweise bei Wärmepumpen erfolgt. Peltier-Elemente sind kleine thermoelektrische Wandler und transportieren bei einem fließenden Strom Wärmeenergie von der einen zur anderen Seite des Moduls, fungieren also als kleine Wärmepumpen. Wegen ihres geringen Platzbedarfes sind sie vielseitig einsetzbar und könnten, integriert in die Außenfassade, im Heizfall Wärmeenergie von außen ins Gebäudeinnere transportieren. Der Vorteil der kleinen Elemente liegt darin, dass durch Umkehr des Stromflusses auch der Wärmefluss umgekehrt wird, sodass die Elemente im Sommer auch zur Kühlung von Gebäuden verwendet werden könnten. Somit böte ein solches dezentrales Heiz- und Kühlsystem eine hohe Anpassungsfähigkeit an die zukünftigen klimatischen Entwicklungen. Dabei müssen jedoch zunächst grundlegende Untersuchungen durchgeführt und die Eignung und Potenziale von Peltier-Elementen für den Einsatz im Bauwesen allgemein sowie speziell für Heiz- und Kühlsysteme untersucht werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, umfassende Untersuchungen von Peltier-Elementen zum Einsatz als dezentrale Wärmepumpen in einem thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystem durchzuführen und das erforschte System ganzheitlich zu bewerten. Um die Potenziale von Peltier-Elementen für den Einsatz in Gebäuden und speziell für das thermoelektrische Gesamtsystem möglichst präzise erörtern zu können, sind sowohl grundlegende Untersuchungen der Peltier-Elemente als auch die Analyse ihrer Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz als Bestandteil im Heiz- und Kühlsystem notwendig. Auf diese Weise können die Grenzen und Möglichkeiten der Anwendbarkeit der kleinen Wärmepumpen detektiert werden. Am Ende erfolgt eine auf den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufbauende ganzheitliche Bewertung des auf Peltier-Elementen basierenden Flächenheiz-

und -kühlsystems und die erforschte Technologie wird hinsichtlich ihrer Zukunftsfähigkeit abschließend beurteilt.

Diesem Ziel liegt methodisch eine Kombination aus experimentellen und simulativen Untersuchungen zugrunde. Nur so können die unterschiedlichen Aspekte des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems ganzheitlich berücksichtigt und dadurch die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in den Untersuchungen adressiert werden. Anhand dieser drei Dimensionen werden Untersuchungskriterien formuliert, aus denen sich wiederum unterschiedliche Methoden ableiten lassen. In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen der thermischen Behaglichkeit, des zukünftigen Klimas und der Testreferenzjahre geschaffen, welche als Werkzeug zur Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Entwicklungen in Simulationen dienen. Weiter werden Grundlagen der Peltier-Elemente, ihrer Funktionsweise als auch der diesen zugrunde liegenden (thermo-)elektrischen Grundlagen, dargestellt. Ein großer Schwerpunkt liegt auf der thermischen Behaglichkeit, durch die Aspekte der soziokulturellen Dimension berücksichtigt werden. Zu dieser gehören etwa „Werte wie Gesundheit, Mobilität und Lebensqualität sowie Partizipation und kulturelle Vielfalt“ [11]. Während Werte wie Mobilität, Partizipation und kulturelle Vielfalt vom Standort eines Gebäudes abhängen und somit deren Berücksichtigung in den Untersuchungen dieser Arbeit nicht sinnvoll wäre, ist die thermische Behaglichkeit ein wichtiger Bestandteil für die Werte Gesundheit und Lebensqualität. Im anschließenden Kapitel 3 wird das erforschte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem vorgestellt und dessen Chancen und Risiken erörtert. Darin werden die Kosten (Ökonomie) sowie der Ressourcenverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (beides Ökologie) jenen eines Referenzsystems gegenübergestellt. Zum Ende dieses Kapitels werden in einem Lastenheft die Anforderungen an die Funktionen und technischen Parameter des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems formuliert. In den Darstellungen der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4 werden zunächst grundlegende Untersuchungen der Peltier-Elemente und darauf aufbauend Labor- und Freilandversuche eines Prototyps beschrieben. Erstere waren für eine erste Evaluation der Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente erforderlich und die Versuche am Prototyp lieferten Informationen über die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Randbedingungen und Wärmeströme innerhalb des Gesamtsystems. Mithilfe der Ergebnisse der Laborversuche des Prototyps werden in Kapitel 5 Modelle für thermische Bauteilsimulationen in TRISCO und VOLTRA validiert und anschließend die Oberflächentemperaturen und Wärmeströme großflächiger Wandsysteme untersucht. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Freilandversuche des Prototyps in den thermischen Gebäudesimulationen in TRNSYS verwendet, um das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem realistisch abbilden zu können. Die Untersuchungen erfolgen anhand zweier Gebäudemodelle und verknüpfen die gemessenen Effizienzen des Prototyps mit einem technologieneutralen Flächentemperiersystem zu einem realistischen Modell des Gesamtsystems. Zusätzlich werden die Einflüsse unterschiedlicher Dämmstandards sowie zukünftiger Klimadaten auf die Energieeffizienz des Systems untersucht. Die vorgestellten experimentellen und simulativen Untersuchungen werden in Kapitel 7 ausgewertet. Ziel der Analyse des Gesamtsystems ist die

energetische Bewertung des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems und in Kapitel 8 ein abschließender Vergleich mit kommerziellen Referenzsystemen. Dieser Vergleich bezieht sich sowohl auf den Energiebedarf als auch auf die Nutzungskosten und umfasst somit die ökologische sowie die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit. Abschließend werden die Untersuchungen und deren wichtigste Ergebnisse in Kapitel 9 zusammengefasst und überprüft, ob das erforschte System die im Lastenheft formulierten Anforderungen einhalten konnte. Ausblickend werden dabei die Grenzen der derzeitigen Verwendbarkeit von Peltier-Elementen im Bauwesen sowie mögliche Anwendungsfälle diskutiert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Grundlagen der thermischen Behaglichkeit

#### 2.1.1 Definitionen und Einflussfaktoren

Zur ganzheitlichen Bewertung von Heiz- und Kühlsystemen ist eine Betrachtung und Analyse unterschiedlicher Aspekte notwendig, welche die Nutzer\*innen mehr oder weniger direkt betreffen. Neben der Energieeffizienz, die für die Bauherr\*innen und Bewohner\*innen hauptsächlich wegen der Heizkosten interessant ist, beeinflusst die thermische Behaglichkeit maßgeblich die Akzeptanz eines neuen Heiz- und Kühlsystems sowie soziokulturelle Werte wie Gesundheit und Lebensqualität. Dabei ist die Definition des Begriffs der thermischen Behaglichkeit in der Fachliteratur keineswegs einheitlich [12]. Während beispielsweise Richter et al. in [13] die thermische Behaglichkeit als „geringste thermoregulatorische Aufwendungen des Organismus zur Aufrechterhaltung der konstanten Körpertemperatur; anstrengungslose, unspürbare Wärmeabgabe; subjektive Empfindung des Wohlbehagens“ definieren, stimmt Benzinger in [14] mit dem internationalen ASHRAE 55 Standard [15] überein und bezeichnet die thermische Behaglichkeit als „das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“.

Der ASHRAE 55 Standard wird international zur Bewertung der Behaglichkeit von Gebäuden verwendet. Für die Bewertung von gemäßigten Umgebungsklimata wurde vom Europäischen Komitee für Normung die EN ISO 7730 [16] entwickelt. Beide Ansätze basieren auf den Untersuchungen von Fanger [17] und dem darin entwickelten Modell. Bereits in der Einleitung der EN ISO 7730 wird dies verdeutlicht, da „[d]as menschliche Wärmeempfinden [...] im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht (Wärmebilanz) des Körpers als Ganzem ab[hängt]“ [16]. Diese Wärmebilanz ist der Grundaspekt des Fangerschen Modells und auf ihr bauen die Berechnungen zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit auf.

Dabei hängt die Wärmebilanz des Körpers von unterschiedlichen Einflussfaktoren ab. In der DIN 1946-2 [18] wurden einige dieser Faktoren in der darin zu findenden Definition der thermischen Behaglichkeit bereits benannt, nach der sich der Mensch behaglich fühlt, wenn er „Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung und Wärmestrahlung in seiner Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.“ Diese Definition fokussierte sich rein auf physikalische Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit. In dem Modell nach Fanger [17] werden auch weitere Aspekte berücksichtigt, um ein möglichst umfassendes Modell der thermischen Behaglichkeit zu entwickeln. Die einzelnen Faktoren lassen sich nach [19] in drei Kategorien unterteilen, die physiologischen, die physikalischen und die intermediären Bedingungen (Abbildung 2). Die in Weiß dargestellten „primären und dominierenden Faktoren“ entsprechen auch den von Fanger [17] verwendeten und damit ebenso den in der DIN EN ISO 7730 [16] berücksichtigten Einflüssen auf die thermische Behaglichkeit. Die vier in der DIN 1946-2 genannten physikalischen Größen sind also durch die nutzerspezifischen Größen, den Tätigkeitsgrad und die Kleidung, ergänzt.

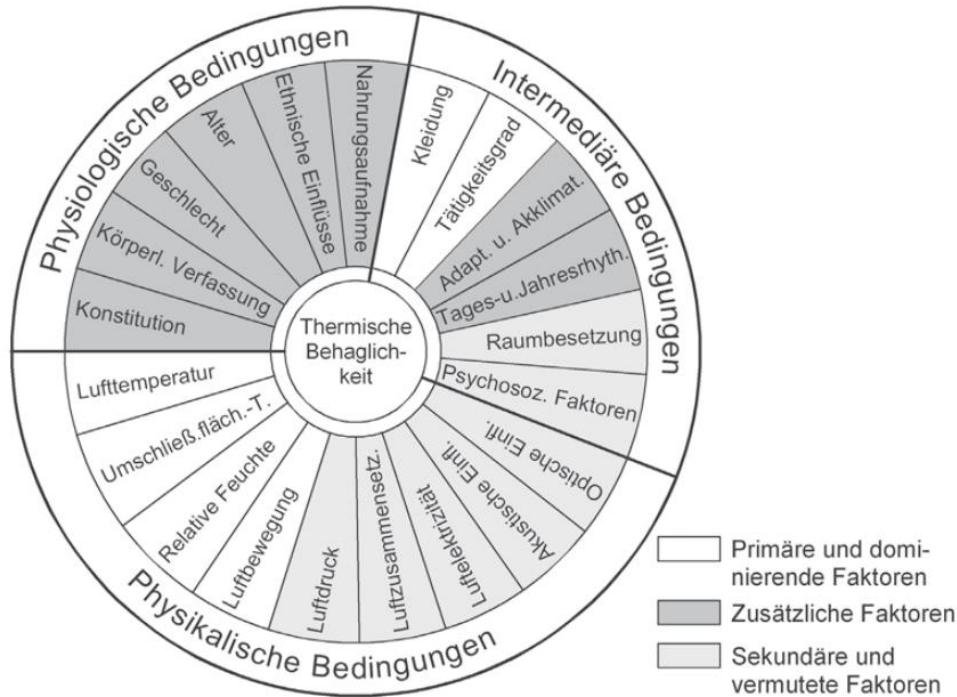


Abbildung 2 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit [19]

Die Auswahl dieser sechs Parameter ist auf die Wärmebilanz des menschlichen Körpers zurückzuführen. Ist diese im Gleichgewicht, so Fanger, fühlt sich der Mensch behaglich [17]. Vom Körper wird im Gleichgewicht so viel Wärme erzeugt, wie auch an den Raum abgegeben wird. Die Wärmeverluste des menschlichen Körpers sind in Gleichung (2.1) zusammengefasst [19].

$$q_{ges} = R + C + L + E_{re} + E_d + E_{sw} \quad (2.1)$$

Demnach setzt sich der Gesamtwärmeverlust  $q_{ges}$  aus den Anteilen der Wärmestrahlung  $R$ , der Konvektion (an der Kleidungsoberfläche)  $C$ , der sensiblen Wärme der ausgeatmeten Luft  $L$ , der latenten Wärme der ausgeatmeten Luft  $E_{re}$ , der Dampfdiffusion über die Haut  $E_d$  und aus dem Anteil durch das Verdunsten von Schweiß auf der Haut  $E_{sw}$  zusammen [19].

Der Anteil der Wärmestrahlung wird häufig auch über die operative Temperatur berücksichtigt. Diese fasst die Raumlufttemperatur und die Strahlungstemperatur zu einem Kennwert zusammen und ist qua Definition nach [16] die „gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden gleichmäßigen Umgebung“. Vereinfacht lässt sie sich bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten als arithmetisches Mittel der mittleren Strahlungstemperatur  $T_{rm}$  und der Raumlufttemperatur  $T_a$  berechnen [20].

$$T_{op} = \frac{T_{rm} + T_a}{2} \quad (2.2)$$

Die operative Temperatur berücksichtigt somit nicht nur die Raumlufttemperatur, sondern auch die Temperatur der Umgebungsflächen, die hauptsächlich über Wärmestrahlung, also über elektromagnetische Wellen, mit den Personen im Raum im Wärmeaustausch stehen. Sie bildet also die thermischen Einwirkungen auf die Raumnutzer\*innen im Raum vor allem bei Flächenheizungen realitätsnäher ab, als dies durch eine reine Betrachtung der Lufttemperatur möglich wäre. Aus diesem Grund wird die operative Temperatur häufig auch als „empfundene Temperatur“ bezeichnet [21].

Anhand der operativen Temperatur wird die gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Faktoren deutlich. Eine niedrigere Raumlufttemperatur könnte durch eine höhere Strahlungstemperatur ausgeglichen und das Raumklima dadurch weiterhin als behaglich empfunden werden. Darüber hinaus würde mit einer noch höheren operativen Temperatur eine höhere Anpassung durch die sogenannte Thermoregulation des Körpers einhergehen, das heißt der Körper würde den Wärmeaustausch mit der Umwelt sowie die eigene Wärmeproduktion aktiv über physiologische Prozesse steuern [12]. Physikalische Bedingungen beeinflussen somit direkt auch die physiologischen und die intermediären Bedingungen aus Abbildung 2 und umgekehrt. So werden durch den menschlichen Körper unter anderem auch die Konvektionsströme der Luft sowie die Luft- und Strahlungstemperatur im Raum beeinflusst. In seinem Modell der thermischen Behaglichkeit versuchte Fanger, die seiner Meinung nach wichtigsten Randbedingungen in einem Berechnungs- und Bewertungsmodell zusammenzufassen.

### 2.1.2 Das Behaglichkeitsmodell nach Fanger – DIN EN ISO 7730

Bereits 1970 entwickelte Fanger sein Modell zur Analyse und Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Dieses entstand aus experimentellen Untersuchungen mit mehr als 250 Teilnehmer\*innen, die zur Hälfte der Altersgruppe zwischen 20 und 25 Jahren angehörten und zur anderen Hälfte zwischen 63 und 73 Jahre alt waren. Das Modell nach Fanger basiert auf einer Wärmebilanz des menschlichen Körpers. In seinen experimentellen Untersuchungen wurden die Teilnehmenden unterschiedlichen Umgebungsklimata ausgesetzt und mussten ihren thermischen Zustand bewerten. Aus diesen Daten entwickelte Fanger anschließend ein statistisches Modell, um den relativen Anteil jener Personen vorherzusagen, die sich in einem bestimmten Innenraumklima unbehaglich fühlen werden. Dazu wurden die beiden Kennzahlen, das vorausgesagte mittlere Votum (predicted mean vote) PMV und der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (predicted percentage of dissatisfied) PPD, entwickelt. [17]

#### **PMV – predicted mean vote**

Nach Fanger ist die thermische Behaglichkeit grundsätzlich mit einem thermisch neutralen Zustand gleichzusetzen. Lediglich durch bspw. asymmetrische Strahlungsverhältnisse können Abweichungen bei diesem Zusammenhang auftreten. Ein thermisch neutraler Zustand stelle sich für die Raumnutzer\*innen dann ein, wenn diese weder ein wärmeres noch ein kühleres

Umgebungsklima bevorzugen würden. Mit Blick auf die Wärmebilanz bedeutet dies, dass der Körper genau so viel Wärme erzeugt, wie er auch wieder an die Umgebung abgibt. Auf dieser Prämisse aufbauend, wurden die Proband\*innen in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen nach ihrem thermischen Befinden befragt und sollten auf der in Abbildung 3 dargestellten Skala angeben, ob sie das Innenraumklima in diesem Moment als heiß, warm, etwas warm, neutral, etwas kühl, kühl oder kalt empfanden. [17]

+ 3	heiß
+ 2	warm
+ 1	etwas warm
0	neutral
- 1	etwas kühl
- 2	kühl
- 3	kalt

Abbildung 3 Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala nach [16]

Die siebenstufige Skala dient auch der Klimabeurteilung eines Raumes mithilfe des PMV. Das PMV ist ein Index, „der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand“ der in Abbildung 3 dargestellten Skala vorhersagt [16]. Zur Berechnung des PMV werden die nach Fanger wichtigsten, das thermische Empfinden beeinflussenden Variablen berücksichtigt und in den Gleichungen (2.3) bis (2.6) zusammengefasst. Diese Variablen sind der Energieumsatz  $M$ , die Bekleidungsisolations  $I_{cl}$ , die Lufttemperatur  $t_a$ , die mittlere Strahlungstemperatur  $\bar{t}_r$ , die relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  und die relative Luftfeuchte (vgl. Abbildung 2).

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M(34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c(t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}\{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (2.4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{für } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{für } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{für } I_{cl} \leq 0,078m^2 \cdot K/W \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{für } I_{cl} > 0,078m^2 \cdot K/W \end{cases} \quad (2.6)$$

Dabei ist:

- $W$  die wirksame Mechanische Leistung in  $W/m^2$ ;
- $f_{cl}$  der Bekleidungsflächenfaktor;
- $p_a$  der Wasserdampfpartialdruck in Pa;
- $h_c$  der konvektive Wärmeübergangskoeffizient in  $W/m^2K$ ;
- $t_{cl}$  die Oberflächentemperatur der Bekleidung in  $^{\circ}C$ .

Als Ergebnis sagt das PMV die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe im gleichen Innenraumklima voraus. Der Ergebniswert entspricht folglich einem Wert der siebenstufigen Skala aus Abbildung 3. Von diesem Mittelwert weichen jedoch auch einige individuelle Beurteilungen ab. Zur Vorhersage der Anzahl jener Personen, die das Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden werden, wurde der PPD entwickelt.

#### **PPD – predicted percentage of dissatisfied**

Der PPD ist ein Index zur quantitativen Vorhersage des Prozentsatzes jener Personen, die mit dem Umgebungsklima wahrscheinlich unzufrieden sein werden. Nach [16] trifft dies zu, wenn eine Person das Raumklima nach der siebenstufigen Klimabeurteilungsskala mit heiß, warm, kühl oder kalt bewertet, also die Werte kleiner als -1 oder größer als 1 sind. Der PPD lässt sich wie folgt aus dem PMV berechnen:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (2.7)$$

Die beiden Indizes PMV und PPD dienen somit einer Bewertung der Behaglichkeit in einem bestimmten Innenraumklima und beruhen auf einem statistischen Modell, das Behaglichkeit mit thermischer Neutralität gleichsetzt. Durch sie werden unterschiedliche Einflüsse auf die Behaglichkeit zusammengefasst, sowohl Einflüsse des Umgebungsklimas (Lufttemperatur, Luftfeuchte) als auch der Nutzer\*innen selbst (Energieumsatz, Bekleidung).

#### **Strahlungsasymmetrie**

In der DIN EN ISO 7730 werden zusätzlich weitere Faktoren und Indizes aufgeführt, um die Behaglichkeitsbeurteilung möglichst realitätsnah vornehmen zu können. Vor allem die Asymmetrie der Strahlungstemperatur, die die Behaglichkeit negativ beeinflussen kann, ist für das untersuchte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem von Bedeutung. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, wird beim Einfluss dieser Asymmetrien unterschieden, von welchen Umgebungsflächen die asymmetrische Strahlung ausgeht. Eine kühle Wand (2) beeinflusst die Behaglichkeit beispielsweise wesentlich mehr als eine warme Wand (4), die auch bei einer



Temperaturdifferenz von 30 K und einem PD von 6% lediglich für 6% Unzufriedene verantwortlich ist.

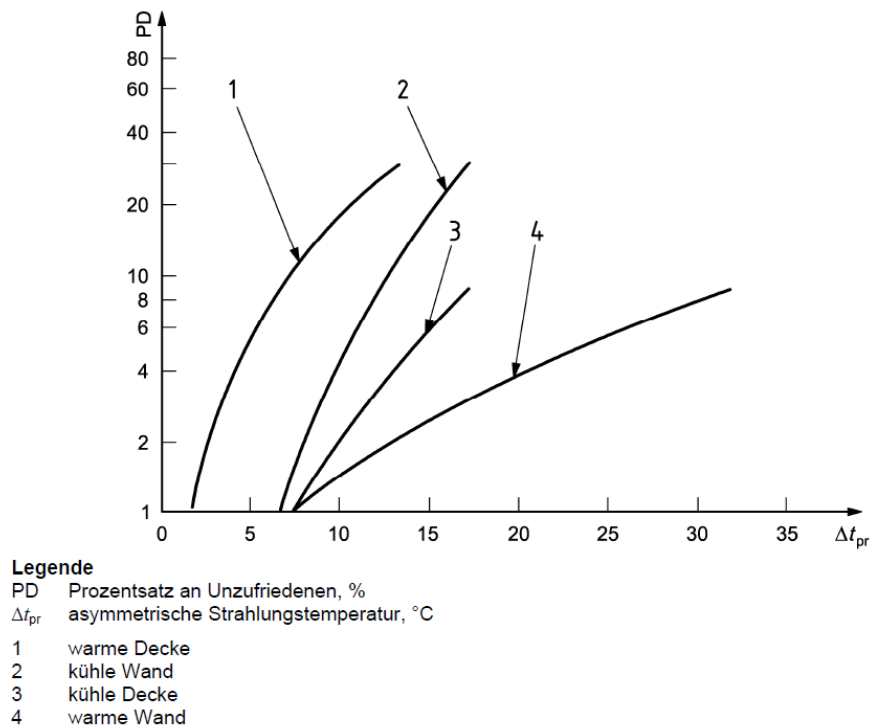


Abbildung 4 lokale thermische Unbehaglichkeit durch asymmetrische Strahlungstemperatur [16]

Das Fangersche PMV-Modell ist innerhalb der Behaglichkeitsforschung keineswegs unumstritten. In den letzten Jahren war die thermische Behaglichkeit Gegenstand unterschiedlichster Forschungsprojekte (s. Abbildung 5) und ihre Bewertung wurde um weitere Aspekte ergänzt [22].

### 2.1.3 Stand der Wissenschaft der thermischen Behaglichkeit

In der einschlägigen Forschung haben sich unterschiedliche Schwerpunkte bei der Analyse und Bewertung der thermischen Behaglichkeit etabliert. Die Forschungsprojekte reichen dabei von der Weiterentwicklung und Optimierung des Fangerschen Modells über dessen Ergänzung durch einzelne Aspekte und Faktoren sowie über die Betrachtung darin noch unberücksichtigter Bedingungen wie psychologischer Aspekte bis hin zur Entwicklung neuer Modelle, in denen unter anderem der Einfluss einzelner Körpersegmente auf die Gesamtbehaglichkeit eines Individuums untersucht wurde. Auch Untersuchungen und Messungen tatsächlicher Raumklimata in bestehenden Gebäuden waren Teil neuerer Forschungsprojekte. Fanger selbst gilt mit seinen Untersuchungen als Pionier der Forschung zur thermischen Behaglichkeit. In den Jahrzehnten nach seiner Veröffentlichung gewann das Thema in der Wissenschaft stetig an Interesse (Abbildung 5).

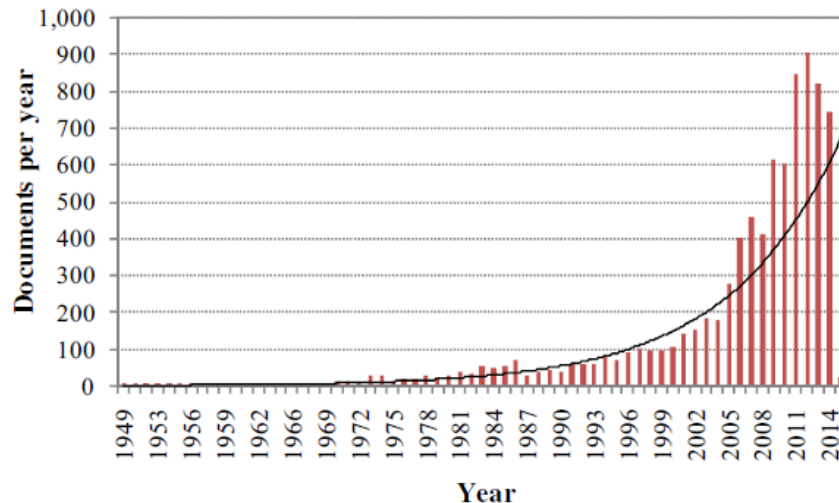


Abbildung 5 Darstellung des steigenden Interesses am Forschungsschwerpunkt der thermischen Behaglichkeit anhand der Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen [22]

Im Folgenden werden Forschungsprojekte vorgestellt, die einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der thermischen Behaglichkeit geleistet haben und auch für das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem relevant sein könnten.

### Kritik am Fangerschen Modell

In der Vergangenheit war das Fangersche Modell häufig Gegenstand unterschiedlicher Forschungsprojekte, in denen unter anderem die Grenzen des Systems oder einzelne Aspekte und Variablen untersucht wurden. Beispielsweise führten Tse und So et al. [23] in Hong Kong und Nasrohali et al. [24] im Iran Experimente durch, um das PMV-Modell in anderen Klimaregionen und mit Personen anderer Ethnien zu testen, da sich die Untersuchungen von Fanger auf Europa und Nordamerika beschränkten. Zum einen wurden in beiden Studien mithilfe von Behaglichkeitsmessständen die PMV-Werte gemessen und zum anderen sollten die Teilnehmer\*innen Fragebögen ausfüllen, in denen sie explizit nach ihrer thermischen Behaglichkeit, dem actual mean vote AMV, gefragt wurden. Anschließend wurden AMV und PMV gegenübergestellt und miteinander verglichen. Beide Studien kamen zu dem Ergebnis, dass das PMV-Modell in maschinell klimatisierten Büroräumen die tatsächliche thermische Behaglichkeit der anwesenden Personen gut beschreiben und vorhersagen könne.

Zu teils entgegengesetzten Ergebnissen kamen diverse Forschungsprojekte [25–31], die von van Hoof et al. in [32] mithilfe der Abbildung 6 zusammengefasst wurden. Darin ist zu sehen, dass das Verhältnis zwischen PPD und PMV von den Forschenden zum Teil signifikant anders dargestellt wurde. Das Modell von Mayer [27] basiert beispielsweise auf weiterführenden Studien, in denen die Teilnehmenden bereits ein PMV von -1 als unbehaglich empfanden. Daraus ergab sich, dass das optimale PMV nicht bei 0, sondern bei 0,4 liegen sollte und sich dabei ein Prozentsatz an Unzufriedenen PPD von etwa 16% und nicht wie zuvor angenommen von 5% einstellen müsste. Diese Verschiebung ist auch im Diagramm zu erkennen und zeigt ein Problem der Untersuchungsmethodik von Fanger auf. Dieser fragte die Teilnehmenden in

seinen Untersuchungen nicht nach ihrer thermischen Behaglichkeit, sondern lediglich nach ihrem thermischen Empfinden und baute sein weiteres Modell auf der Prämisse auf, dass kalt, kühl, warm und heiß gleichbedeutend mit thermischer Unbehaglichkeit seien.

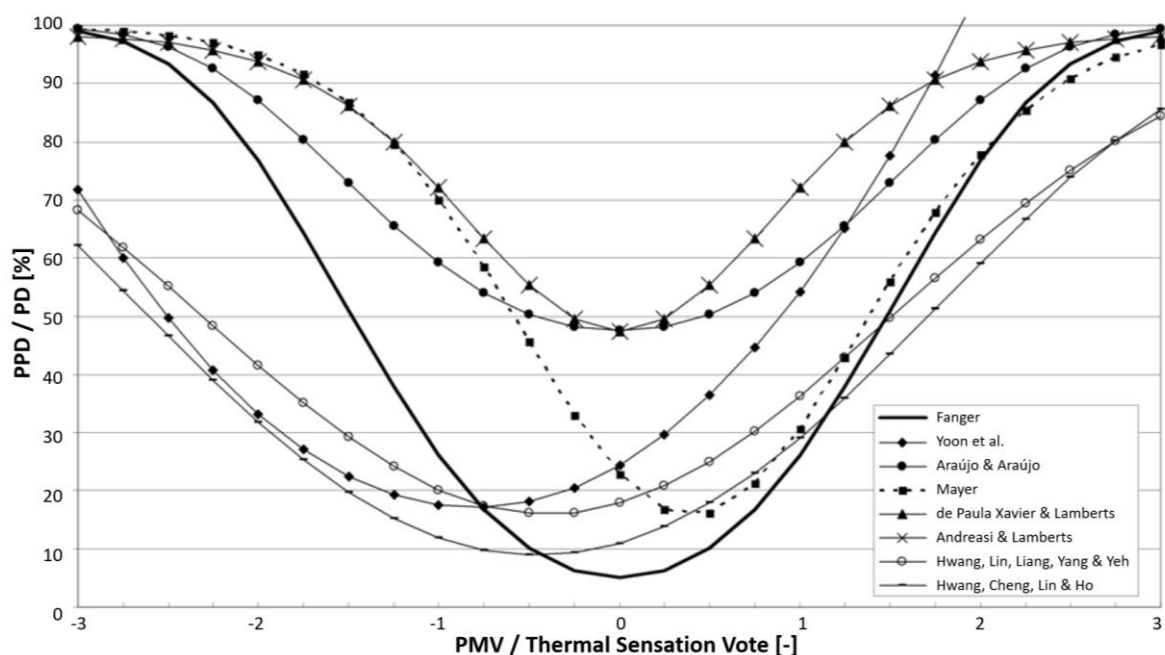


Abbildung 6 Relation PPD zu PMV [32], Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsprojekte im Vergleich zum Modell nach Fanger

Dass jedoch nicht für jede und jeden der neutrale thermische Zustand auch der gewünschte, optimale ist, wurde von Humphreys et al. in [33] aufgezeigt. In Hörsälen und anderen ausgewählten Räumlichkeiten wurden die Anwesenden nach ihrem aktuellen und anschließend nach ihrem gewünschten thermischen Empfinden befragt. Die Umfrage erfolgte mithilfe der siebenstufigen Skala von Fanger (Abbildung 3). Von den 868 Befragten bevorzugten 57% einen „nicht-neutralen“ Zustand. Humphreys et al. wiesen jedoch darauf hin, dass diese Untersuchung lediglich für Räumlichkeiten im Vereinigten Königreich gelte. Unterstützt wird diese Einschätzung selektiver Gültigkeit durch die Studien von Kimura et al. [34] und Nakano et al. [35]. Auch wenn Tse und So et al. [23] und Nasrollahi et al. [24] das PMV für Menschen aus Hong Kong und dem Iran als valide einstufen und dessen internationale Einsetzbarkeit bestätigten, kamen die beiden in Japan durchgeführten Studien zu dem Ergebnis, dass die klimatischen Bedingungen und kulturellen bzw. ethnischen Besonderheiten in anderen Ländern auch zu unterschiedlichen Wahrnehmungen der thermischen Behaglichkeit führten. Die männlichen japanischen Studienteilnehmer in [34] schwitzen weniger und hatten dementsprechend eine geringere Feuchtigkeit auf der Hautoberfläche als die amerikanischen Teilnehmer bei gleichem Innenraumklima. Auch die japanischen Frauen in [35] empfanden mit 25,2 °C eine um 3,1 K höhere Temperatur als thermisch neutral als Teilnehmerinnen aus Europa und Nordamerika. Weitere Kritikpunkte am Modell nach Fanger fokussierten sich auf die Tatsache, dass Sprachzusammenhänge nicht in jedem Land gleich sind und dadurch in den Umfragen Verzerrungen entstehen könnten

[36, 37], auch wenn Lee et al. in [37] nicht benennen konnten, inwiefern der sprachliche Einfluss statistisch signifikant sei. Darüber hinaus dürfe auch die Stichprobengröße bei solchen Untersuchungen nicht vernachlässigt werden, da das Modell für große Personengruppen ausgelegt ist und bei kleineren Stichprobengrößen somit Ungenauigkeiten auftreten könnten [32].

### Das UC Berkeley Thermal Comfort Model

Im Behaglichkeitsmodell der University of California Berkeley UCB wurde der Körper in 19 unterschiedliche Teilsegmente unterteilt und dadurch lokale Unbehaglichkeiten in der Analyse berücksichtigt [38–41]. Das Modell basiert auf der Idee von Stolwijk [42], bei der der Körper in drei zylindrische Segmente (Kopf, Rumpf und Extremitäten) unterteilt wurde. Im UCB-Modell erfolgte die Aufteilung des Körpers in Segmente durch die wesentlich höhere Anzahl jedoch mit einer höheren Auflösung (Abbildung 7, (d)). Durchgeführt wurden experimentelle Untersuchungen in einer Klimakammer, in der die Studienteilnehmer\*innen mit Apparaten verbunden wurden, die gezielt einzelne Körpersegmente heizten und kühlten (s. Abbildung 7, (a)). Die Wahrnehmung der jeweiligen Körpersegmente wird im Modell über eine logistische Funktion mithilfe der Eingabeparameter der lokalen und mittleren Hauttemperatur sowie der Ableitungen der Haut- und der Körperkerntemperatur jeweils über die Zeit vorhergesagt. Durch die mittlere Hauttemperatur wird der globale thermische Zustand des Körpers berücksichtigt. Die beiden Ableitungen über die Zeit ermöglichen die Analyse instationärer Raumklimata. Während der Versuche sollten die Teilnehmenden die thermische Wahrnehmung jener Körperteile bewerten, die durch die Apparate gekühlt oder beheizt wurden (s. Abbildung 7, (b)). Die siebenstufige Skala des Modells nach Fanger wurde dazu um die beiden Extrema -4 very cold und +4 very hot ergänzt. [38]

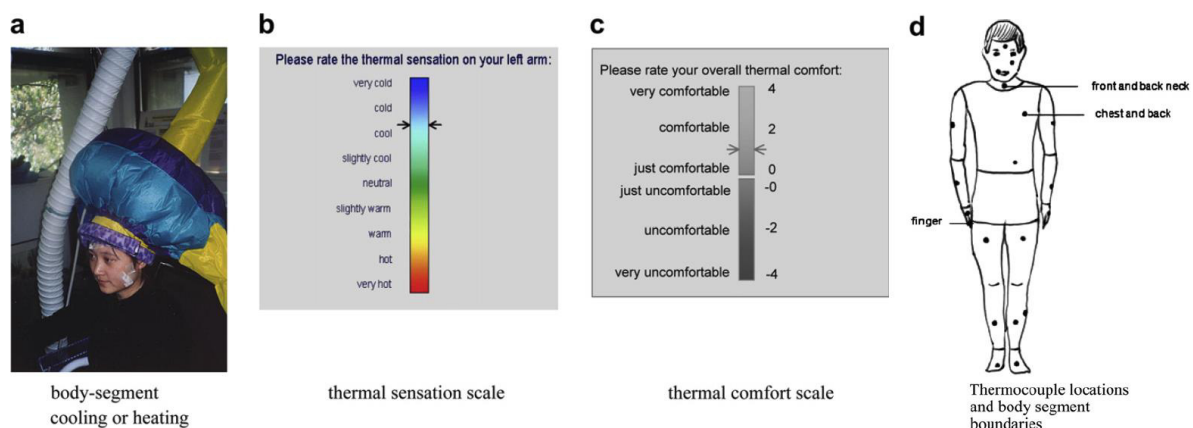


Abbildung 7 Ausschnitte der Methodik des UC Berkeley Modells nach [39] (a, b und c) und [38] (d): (a) Beispiel der Konditionierung des Kopf-Segments (b) Skala thermisches Empfinden (c) Skala thermische Behaglichkeit (d) Körpersegmente, Positionen zur Messung der Hauttemperatur und Grenzen der Körpersegmente

Mit dem Modell können homogene und heterogene sowie stationäre und instationäre Raumklimata analysiert werden. Außerdem sind damit Bewertungen der Gesamtbehaglichkeit als auch der lokalen Behaglichkeit der einzelnen Segmente möglich [38]. Dabei wird die

globale Behaglichkeit selbstverständlich von der lokalen beeinflusst. Nach [40] sollte für eine ganzheitliche Behaglichkeit daher der Fokus darauf liegen, die Behaglichkeit jener Körperteile zu verbessern, an denen die größte Unbehaglichkeit, bspw. durch Zugluft, entsteht.

Ergebnis der aufgezeigten Untersuchungen war das UCB Thermal Comfort Model. Darin müssen zunächst die Raumgeometrie, die physikalischen Randbedingungen sowie die Physiognomie, also das „Erscheinungsbild“, die „Form“ [43] der Testperson, definiert werden. Diese dienen als Grundlage für das thermophysiologische Modell, in dem die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers sowie dessen Temperaturen simuliert werden, ehe abschließend die Betrachtung des thermischen Empfindens und des thermischen Komforts lokal und global erfolgen kann. [12]

Auch das UCB Modell wurde in der Vergangenheit bereits auf seine Funktionalität hin untersucht. In [12] kam Völker zu dem Ergebnis, dass das UCB Modell bei der Simulation der Körperkern- und der Hauttemperatur in instationären Bedingungen zu guten Ergebnissen führte. Auch bei stationären Bedingungen erwies sich das Modell als verlässlich und genau. Schellen et al. [44] verglich das UCB Modell mit dem PMV Modell nach Fanger. Letzteres sei grundsätzlich gut, habe jedoch Schwierigkeiten in heterogenen Raumklimata und sei problematisch bei vielen unterschiedlichen Körperarten, Ethnien und Geschlechtern. Dagegen sei das UCB Modell auch bei heterogenen Raumklimata vielversprechend und darüber hinaus geeignet für die Vorhersage der Gesamtbehaglichkeit als auch der lokalen Behaglichkeit. Schellen et al. empfahlen in [44] jedoch eine genauere Bestimmung der neutralen Hauttemperatur und jener Körpersegmente mit dem größten Einfluss auf die Gesamtbehaglichkeit.

### **Adaptive Komfortmodelle**

Mithilfe adaptiver Komfortmodelle wird ein Ansatz verfolgt, in dem die Akzeptanz des Raumklimas durch die Nutzer\*innen und vor allem auch deren individuelle Anpassungen daran im Mittelpunkt stehen. Die darin zugrunde liegenden Annahmen stehen im Gegensatz zu den statischen Modellen, in denen Personen dem Umgebungsklima hilflos ausgesetzt zu sein scheinen und die Anpassung beispielsweise lediglich anhand der Wärmebilanz berücksichtigt ist. Nach de Dear und Brager [45] können drei Kategorien der Anpassung klassifiziert werden: Verhaltens- sowie physiologische und psychologische Anpassungen.

Verhaltensanpassungen beinhalten alle aktiven Maßnahmen zur Verbesserung der individuellen Behaglichkeit durch die Raumnutzer\*in, egal ob bewusst oder unbewusst. Sie stellen somit einen aktiven Eingriff in die Wärmebilanz des eigenen Körpers dar. Diese Eingriffe können auf persönlicher Ebene, z. B. durch Ablegen der obersten Kleidungsschicht, auf technischer Ebene, z. B. durch Anschalten eines Ventilators, oder auf kultureller Ebene, z. B. durch Einlegen einer Siesta, erfolgen. [45]

Physiologische Anpassungen wie etwa der Wärmeverlust durch die Verdunstung des Schweißes auf der Haut wurden bereits in der Wärmebilanzgleichung (2.1) aufgezeigt. Dazu zählen allerdings auch genetische Anpassungen, die sich intergenerational, also über mehrere

Generationen hinweg vollziehen. [45]

Letztlich dürfen auch psychologische Aspekte bei einem subjektiven Empfinden wie der Behaglichkeit nicht unberücksichtigt bleiben. Die Akzeptanz des Raumklimas wird dabei von veränderlichen Wahrnehmungen und Reaktionen auf dieses Klima beeinflusst. Sowohl Erwartungen an die Behaglichkeit als auch Erfahrungen aus der (unmittelbaren) Vergangenheiten spielen dabei eine wichtige Rolle [45]. Die adaptiven Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

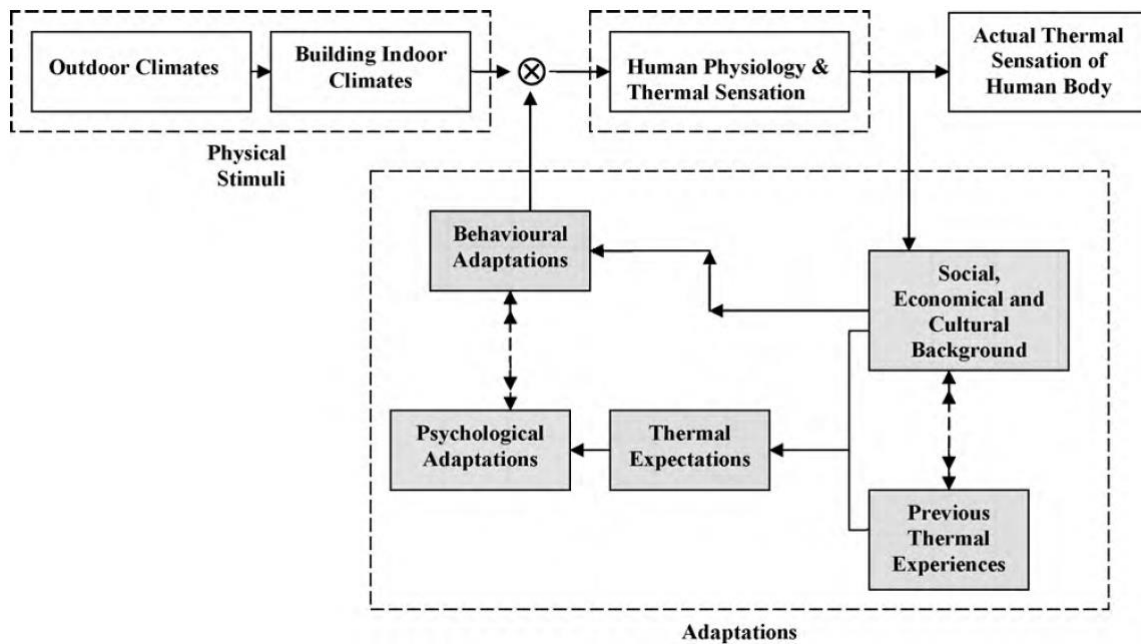


Abbildung 8 adaptive Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit [46]

Erfahrungen aus der Vergangenheit werden auch als thermische Geschichte (thermal history) bezeichnet und dabei in langfristige (long-term thermal history) und kurzfristige (short-term thermal history) unterteilt [22]. Die sozialen, ökologischen und kulturellen Hintergründe (social, economical and cultural background) aus Abbildung 8 sind dabei der langfristigen thermischen Geschichte zuzuordnen. Die vorherige thermische Erfahrung (previous thermal experiences) wie etwa der Kontakt mit dem Außenklima auf dem Weg ins Büro entspricht der kurzfristigen thermischen Geschichte der Raumnutzer\*innen.

Aus den Untersuchungen von de Dear und Brager [45] entstand das adaptive Behaglichkeitsmodell der DIN EN 16798-1 [47] (vormals DIN EN 15251 [48]), die eigentlich zur „Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden“ verwendet und in der auch die Außentemperatur berücksichtigt wird, da die Gebäudenutzer\*innen im Sommer andere Temperaturen als behaglich akzeptieren als im Winter und die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen nicht zu groß sein sollte. Diese Abhängigkeit zum Außenklima ist in Abbildung 9 aus der DIN EN 16798-1 [47] dargestellt. Darin wird auf der Abszisse die operative Innentemperatur für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur auf der Ordinate gegenübergestellt.

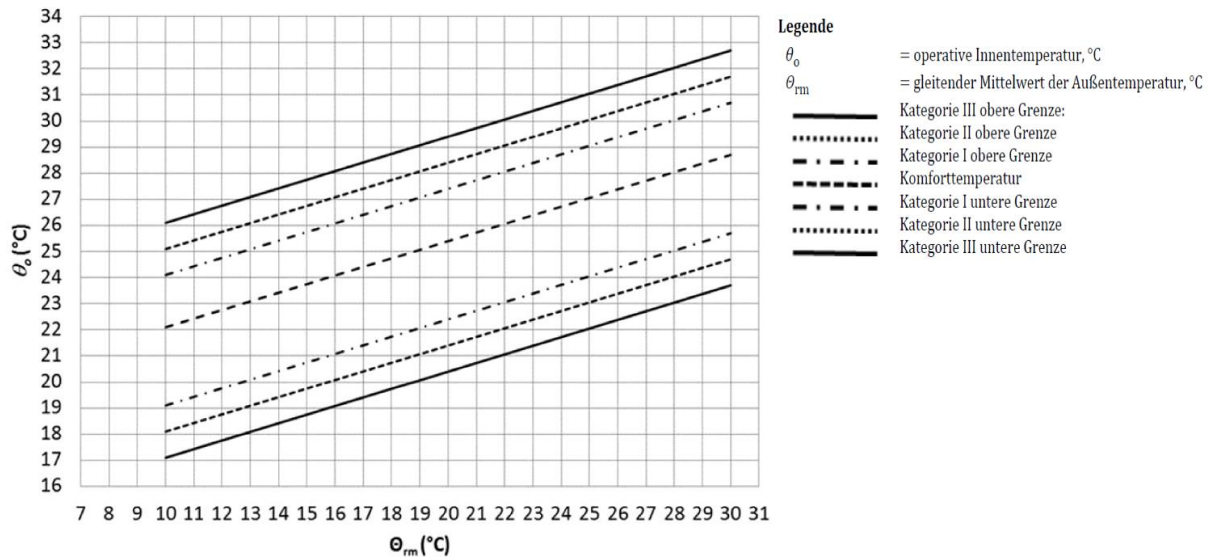


Abbildung 9 Standardauslegungswerte der operativen Innentemperatur für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen in Abhängigkeit vom exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwert der Außentemperatur [47]

Es ist zu erkennen, dass die Komforttemperatur mit steigender Außentemperatur wächst. Im Sommer werden folglich wärmere Raumlufttemperaturen noch als behaglich wahrgenommen, welche im Winter wiederum als zu warm erachtet würden. Die in der Abbildung aufgezeigten Kategorien geben das Maß an Erwartungen an die Innenraumluftqualität an. Kategorie I wird beispielsweise für Räume empfohlen, „in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten“ [48], wie etwa kranke oder ältere Personen. In diesen Kategorien sind also unterschiedliche Einflüsse auf die Klimaanpassung der Raumnutzer\*innen berücksichtigt, kranke Personen haben beispielsweise andere Erwartungen an ihre Umgebung und ihre Körper gegebenenfalls eingeschränkte thermophysiologische Möglichkeiten zur Adaption. Für natürlich belüftete Gebäude ist ein solcher adaptiver Ansatz auch im ASHRAE 55 Standard [15] integriert, darin werden somit zwei unterschiedliche Ansätze zur thermischen Behaglichkeit miteinander verknüpft.

Dabei wird, wie gesehen, im ASHRAE 55 Standard [15] hinsichtlich der Art der Gebäudeklimatisierung unterschieden. Der adaptive Ansatz wird lediglich bei natürlich belüfteten Gebäuden berücksichtigt, gerade weil durch die Maßnahmen der Gebäudenutzer\*innen (z. B. Öffnen eines Fensters) Innen- und Außenklima unmittelbar aneinandergesetzt sind. Allerdings dürfen bei der Art der Gebäudeklimatisierung die psychologischen Einflussfaktoren nicht vernachlässigt werden. Bereits de Dear und Brager erkannten in [45], dass sich Personen in mechanisch klimatisierten Gebäuden im üblichen Temperaturbereich von 22 °C bis 24 °C an das Innenklima anpassen können, jedoch intolerant gegenüber Temperaturen außerhalb dieser Erwartungen sind. Dagegen seien Raumnutzer\*innen in natürlich belüfteten Gebäuden mit einem signifikant größeren Temperaturbereich zufrieden, was zum Teil physikalisch erklärt werden könne, z. B. durch Unterschiede in der Kleidungswahl oder in den auftretenden Luftgeschwindigkeiten, zum anderen Teil jedoch psychologischen Ursprungs zu sein scheint [45]. Gestützt wurden diese

Erklärungen von weiteren Untersuchungen psychologischer Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit. In [49] untersuchten Schweiker et al. den Einfluss individueller Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas. Allein die Möglichkeit, in einem zu warmen Raum selbst das Fenster öffnen zu können, verbesserte das Wohlbefinden der Studienteilnehmer\*innen.

### Langzeitmessungen von Innenklimata

Dennoch wird das Nutzerverhalten in den meisten Modellen kaum bis gar nicht berücksichtigt. Zur besseren Einschätzung dieses Faktors untersuchten Hofmann et al. in [50, 51] mit Hilfe von Langzeitmessungen das Nutzerverhalten in verschiedenen Wohnungen, in denen von kinderlosen Paaren über Familien mit mehreren Kindern bis hin zu ganztägig anwesenden Seniorenpaaren eine Vielzahl möglicher Nutzungsarten abgedeckt waren. Die Studien dienten zwar einem Abgleich der tatsächlichen Raumnutzung mit der in der DIN EN ISO 13788 [52] vorgegebenen Nutzung, jedoch liefern diese auch wichtige Erkenntnisse zur thermischen Behaglichkeit in Wohngebäuden für unterschiedliche Räume als auch unterschiedliche Personengruppen. Ergebnisse der Untersuchungen spiegeln somit das Nutzerverhalten von verschiedenen Personengruppen in Deutschland wider. Der Schwerpunkt der Messungen lag dabei auf den Wohn- und Schlafzimmern. In Abbildung 10 sind Ergebnisse der Messungen in den Wohnzimmern dargestellt.

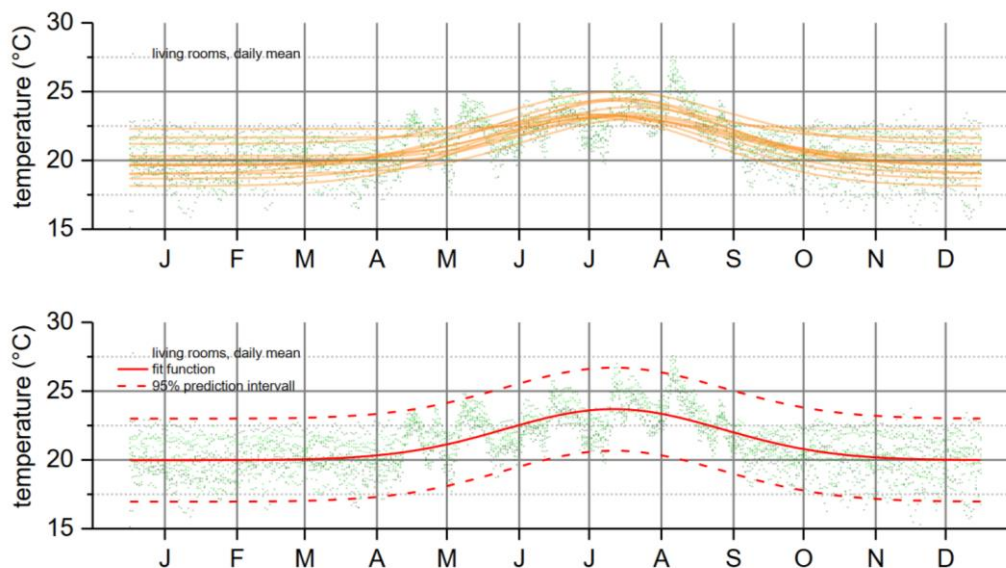


Abbildung 10 Tagesmittelwerte der Raumlufttemperatur mit Trendlinie für die Wohnräume einzeln (oben) und in Summe sowie 95%-Vorhersageintervall (unten) [50]

Darin stellen die grünen Punkte die Tagesmittelwerte der Raumlufttemperatur dar und werden mithilfe der Trendlinien in Orange und Rot zusammengefasst. Die individuellen Präferenzen der Nutzer\*innen sind anhand der Streuung der Messwerte klar zu erkennen. Die Raumlufttemperatur der einzelnen Wohnungen schwankte im Winter zwischen 18 °C und 22,5 °C bei einem Mittelwert von etwa 20 °C. Zusätzlich verglichen Hofmann et al. die gemessenen Temperaturen der Wohnzimmer mit jenen der Schlafzimmer (Abbildung 11).



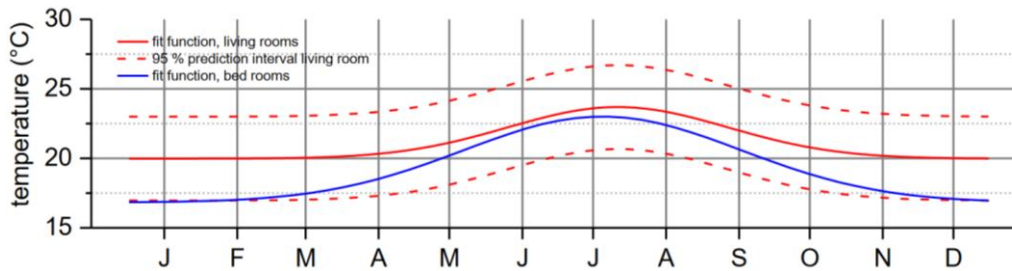


Abbildung 11 Gegenüberstellung der Trendlinien der Wohnzimmer (rot) und der Schlafzimmer (blau) [50]

Vor allem in den Wintermonaten treten hier große Abweichungen zwischen den beiden Räumen auf, da in den meisten Schlafzimmern in diesem Zeitraum wenig bis gar nicht geheizt wurde. Die Ergebnisse der Untersuchungen durch Hofmann et al. sollen in Zukunft zur Validierung von thermischen Gebäudesimulationen dienen und einen Beitrag zur energetischen Gebäudeoptimierung leisten. Vor allem durch die Interdependenz zwischen Innenraumklima und thermischer Behaglichkeit sind die Untersuchungen jedoch auch für das Gebiet der thermischen Behaglichkeit relevant.

#### 2.1.4 Auswertung des Stands der Wissenschaft der thermischen Behaglichkeit

Anhand der Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen der thermischen Behaglichkeit ist bereits zu erkennen, dass das Thema nicht trivial ist und unterschiedliche Blickwinkel und Methoden bei dessen Analyse durchaus notwendig sind. Van Hoof et al. [32] beschrieben die thermische Behaglichkeit als interdisziplinäres Feld mit vielen verschiedenen Aspekten und erklärten dadurch eine Notwendigkeit zur Integration unterschiedlicher Fachgebiete (z. B. Physiologie, Psychologie, Bauwesen usw.) innerhalb der Forschung. Auch bei der internationalen Normung spiegelt sich diese Breite wider. Das von Fanger entwickelte PMV-Modell fand Eingang in die EN ISO 7730 [16], den ASHRAE 55 Standard [15] und auch in der DIN EN 16798-1 [47] wird darauf verwiesen. Gleichzeitig werden adaptive Ansätze im ASHRAE 55 Standard [15] und der DIN EN 16798-1 [47] berücksichtigt.

Für die Bewertung des erforschten thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems liegt der Fokus zunächst auf dem Modell nach Fanger [17]. Dieses hat sich über die Jahre in Wissenschaft und Technik etabliert, auch wenn es nicht frei von Kritik geblieben ist. Zusätzlich ist auch im im Zuge dieser Dissertation verwendeten thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS (Kapitel 6) bereits ein PMV-Modul zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit vorinstalliert. Für eine erste Betrachtung der thermischen Behaglichkeit infolge der simulativen Untersuchungen bietet sich somit das Fangersche Modell an. Durch die normative Betrachtung und die Kompatibilität mit TRNSYS kann so das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem hinsichtlich seiner Behaglichkeit in einem ersten Ansatz bewertet werden. Ergänzend könnten anschließende Untersuchungen im Falle einer erfolgreichen Entwicklung des Systems in einer Klimakammer mithilfe des UCB Thermal Comfort Models durchgeführt werden. Vor allem heterogene Raumklimata, wie sie durch die Verwendung von

Flächenheizungen und -kühlungen wegen der unterschiedlich warmen Umgebungsflächen auftreten, werden nach [38] mit dem UCB Modell besser modelliert. Zusätzlich könnten durch dessen Verwendung auch instationäre Einflüsse genauer analysiert werden. Auch der adaptive Ansatz des ASHRAE 55 Standards [15] könnte in diesen Untersuchungen in der Klimakammer mitberücksichtigt werden, da das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem sowohl in natürlich als auch in maschinell belüfteten Gebäuden verwendet werden kann. Im Gegensatz zum adaptiven und zum UCB Modell werden die Ergebnisse der Langzeitmessungen von Hofmann et al. [50] bereits bei den in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zur realitätsnahen Modellierung der Nutzung eines Wohngebäudes berücksichtigt.

Ferner ist der Innenraum von Gebäuden keineswegs als entkoppelt vom Außenklima zu verstehen. Bereits beim adaptiven Modell wird die operative Temperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur für die Bewertung der Behaglichkeit herangezogen (s. Abbildung 9). Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer Betrachtung der klimatischen Verhältnisse, die nicht nur aus energetischen, sondern auch aus Gründen der thermischen Behaglichkeit erforderlich ist. Vor allem im Hinblick auf den Klimawandel und die durch diesen zu erwartenden Veränderungen ist es notwendig, bereits in heutigen Simulationen auch mögliche Zukunftsszenarien in die Untersuchungen zu integrieren.

## 2.2 Grundlagen der Testreferenzjahre und Klimaszenarien

### Testreferenzjahre

Mithilfe sogenannter Testreferenzjahre (TRJ oder TRY) kann in Simulationen das Außenklima berücksichtigt werden, wodurch eine realitätsnahe Abbildung der äußeren Einflüsse möglich ist. Sie sind „spezielle Wetterdatensätze zur thermischen Gebäudesimulation sowie zur Auslegungsberechnung von Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen [...] [und] bilden daher eine wesentliche Grundlage bei der Errichtung klimagerechter Gebäude“ [53]. Seit 1986 werden die Daten vom Deutschen Wetterdienst DWD bereitgestellt und umfassen unter anderem Informationen zum Bedeckungsgrad, der Windrichtung und -geschwindigkeit, zur Lufttemperatur, der relativen Feuchte, der direkten und diffusen Sonnenbestrahlung sowie den Koordinaten des Standortes. Ursprünglich wurde Deutschland in 15 Klimaregionen mit typischen Witterungsverhältnissen unterteilt und jeder Region eine Repräsentanzstation zugeordnet. Da durch diese Stationen jedoch viele Untersuchungsorte nur ungenau abgebildet werden konnten, wurden die 15 Klimaregionen mit Einführung der neuen TRJ Datensätze im Jahr 2017 verworfen und durch ein Gitternetz mit einer räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> ersetzt. Die Daten werden als Stundenwerte hinterlegt und sind dank der engmaschigen räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> für jeden beliebigen Ort in Deutschland abrufbar. Beginnend am 01. Januar um 01:00 Uhr beziehen sich die Daten stets auf ein ganzes Jahr, das Testreferenzjahr endet folglich am 31. Dezember um 24:00 Uhr. In Abbildung 12 sind beispielhaft vier Verläufe der Stundenwerte ausgewählter meteorologischer Parameter eines

TRJ mit Standort in Kaiserslautern dargestellt. [53–55]

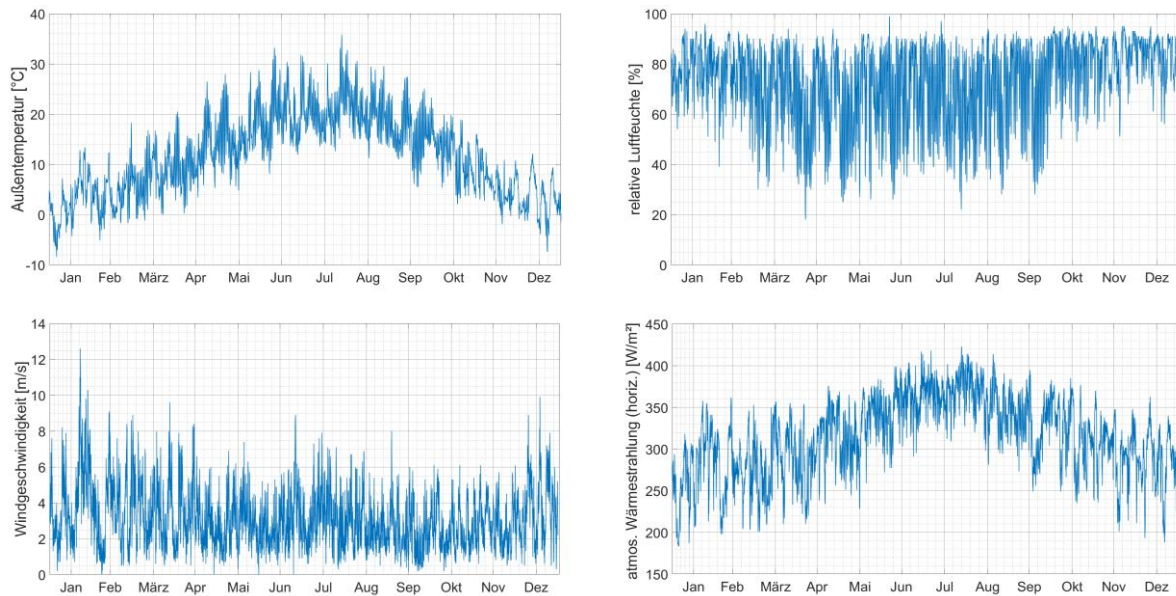


Abbildung 12 von links oben nach rechts unten: Stundenwerte der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über dem Grund und der Bestrahlungsstärke der atmosphärischen Wärmestrahlung (horiz. Ebene) eines beispielhaften TRJ des Standortes Kaiserslautern nach [56], Daten bereitgestellt durch Klimaberatungsmodul des DWD [57]

Als Referenzzeitraum eines typischen Witterungsverlaufes für die Wetterdaten dienen die Jahre 1995 bis 2012. Ein TRJ wird fragmentarisch aus Teilen der einzelnen Jahresdatensätze dieses Zeitraums zusammengesetzt. Die einzelnen Auswahlzeiträume werden so miteinander verknüpft, „dass die Abweichungen vom monatlichen und jahreszeitlichen Mittel der Periode 1995-2012 so gering wie möglich sind.“ [54] Für jeden der verfügbaren Standorte wird dabei eine individuelle Auswahl getroffen, die die von der DWD gestellten Anforderungen an einen TRJ Datensatz am besten erfüllt. Wie in Abbildung 13 beispielhaft zu sehen ist, werden die TRJ für unterschiedliche Standorte auch aus unterschiedlichen Auswahlzeiträumen zusammengesetzt. Im Vergleich zur Referenzperiode 1995-2012 dürfen dabei Mittelwert und Streuung der Lufttemperatur und der Mittelwert der Globalstrahlung einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten. Außerdem werden Daten für einen bestimmten Tag stets nur repräsentativ für genau diesen Tag verwendet, Messwerte des 1. Januars dürfen also auch im TRJ nur als 1. Januar hinterlegt werden. [53–55]

Standort: 4336500 / 2728500		Standort: 4150500 / 2503500	
Testreferenzjahr	Auswahlzeiträume	Testreferenzjahr	Auswahlzeiträume
01.01. - 27.01.	01.01.2002 - 27.01.2002	01.01. - 17.01.	01.01.2001 - 17.01.2001
28.01. - 06.02.	28.01.2003 - 06.02.2003	18.01. - 28.01.	18.01.2011 - 28.01.2011
07.02. - 16.02.	07.02.2007 - 16.02.2007	29.01. - 10.02.	29.01.1997 - 10.02.1997
17.02. - 27.02.	17.02.1999 - 27.02.1999	11.02. - 22.02.	11.02.2004 - 22.02.2004

Abbildung 13 Ausschnitt eines Beispiels für die Auswahlzeiträume der Witterungsabschnitte der TRJ-Datensätze der Koordinaten 4336500 / 2728500 (8 km nördlich von Görlitz) und 4150500 / 2503500 (3 km östlich von Teublitz) nach [54]

Für die Bewertung von Klimatisierungssystemen stellt der DWD zusätzlich extreme Testreferenzjahre zur Verfügung. TRJ mit einem sehr kalten Winterhalbjahr dienen der Evaluation von Heizsystemen und gewährleisten die Auslegung des Systems auch in überdurchschnittlich kalten Wintern. Analog dazu können mithilfe von TRJ mit sehr warmen Sommerhalbjahren der sommerliche Wärmeschutz und speziell Kühlsysteme entsprechend zu erwartender extremer Wetterlagen ausgelegt werden. Auch diese Datensätze beziehen sich auf ein ganzes Jahr, in dem lediglich entweder der Winter besonders kalt oder der Sommer besonders warm waren. Im Gegensatz zu den mittleren TRJ wurden diese Datensätze nicht mehr aus einzelnen Auswahlzeiträumen zusammengesetzt, sondern ein realer Jahreszeitraum gewählt. Da das Sommerhalbjahr stets in einem Jahreszeitraum anfällt, entspricht ein Sommer TRJ auch einem gesamten Jahr vom 1. Januar bis zum 31. Dezember. Dagegen teilt sich ein Winterhalbjahr stets auf zwei Jahreszeiträume auf, sodass sich die Winter TRJ aus den jeweiligen Jahreshälften der betrachteten Jahre zusammensetzen. Beispielsweise wird der Winter 2006/2007 somit in einem TRJ vom 1. Juli 2006 bis zum 30. Juni 2007 zusammengefasst. Da ein TRJ jedoch immer am 1. Januar beginnen muss, beginnt das entsprechende TRJ am 1. Januar 2007 und endet am 31. Dezember 2006. Auch für die extremen TRJ dienen die Jahre 1995 bis 2012 als Datenbasis. [53, 54] In Tabelle 1 sind die Temperaturen der drei aktuellen TRJ 2015 des DWD für den Standort Kaiserslautern [57] gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass die Anzahl der Sommertage sowohl im Sommer TRJ als auch im Winter TRJ höher ist als im mittleren TRJ. Sommertage sind die Tage, an denen die Außentemperatur mindestens 25 °C ist. Als „heiße Tage“ werden jene bezeichnet, an denen die Außentemperatur 30 °C überschreitet, an „Eistagen“ liegt die Temperatur ganztägig unter 0 °C [58]. Dass im Sommer TRJ die Eistage und im Winter TRJ die Sommer- und heißen Tage häufiger vorkommen können, ist durch die oben dargestellte Methodik bei der Erstellung der jeweiligen TRJ erklärbar, da bei den extremen TRJ stets das gesamte Jahr eines sehr kalten Winters oder sehr heißen Sommers als Datengrundlage dient und nicht die Mittelwerte über den gesamten Referenzzeitraum 1995-2012 berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die maximale und die minimale Temperatur im Verlauf des Jahres. Für die relevanten Zeiträume sind jedoch deutlich die zu erwartenden klimatischen Einflüsse in den Daten zu erkennen. Im Sommer TRJ liegen höhere Anzahlen an heißen Tagen und Sommertagen sowie eine höhere Jahresmitteltemperatur vor und im Winter TRJ eine höhere Anzahl an Eistagen und eine niedrigere Jahresmitteltemperatur.

Tabelle 1 Gegenüberstellung des mittleren TRJ und der beiden extremen TRJ für Sommer und Winter für den Standort Kaiserslautern, Daten aus [57]

	Mittleres TRJ	Sommer TRJ	Winter TRJ
<b>Anzahl Sommertage</b>	56	70	61
<b>Anzahl heißer Tage</b>	14	21	16
<b>Anzahl Eistage</b>	7	13	16
<b>Max. Temperatur</b>	35,8 °C	35,4 °C	35,8 °C
<b>Min. Temperatur</b>	-8,4 °C	-9,5 °C	-9,5 °C
<b>Jahresmitteltemperatur</b>	11,7 °C	12,0 °C	11,1 °C

Seit 2017 sind zusätzlich die sich vor allem auf die Temperatur und die Feuchte auswirkenden Einflüsse von Städten und Ballungsräumen, sogenannten urbanen Wärmeinseln berücksichtigt. Eine weitere Neuerung der Datensätze von 2017 sind die zukünftigen Testreferenzjahre TRJ 2045 auf Basis regionaler Klimamodelle für den Zeitraum 2031-2060, durch die auch eine auf zukünftigen meteorologischen Parametern aufbauende Simulation möglich ist. Auf diese Weise sollen Gebäude gegen die durch den Klimawandel auftretenden Veränderungen gewappnet sein. Aufbau und Struktur dieser Datensätze entsprechen jenen der aktuellen TRJ. Die zukünftigen TRJ basieren auf unterschiedlichen Simulationen von Klimamodellen und wurden auf Grundlage der daraus gewonnenen Daten entwickelt. Diesen Modellen wiederum liegen Klimaszenarien zugrunde, durch die eine Abschätzung möglicher zukünftiger Klimaveränderungen in Abhängigkeit bestimmter Einflussfaktoren realisiert wird. [53, 56]

### Klimaszenarien

Die Einflüsse einzelner Parameter auf das Klimasystem der Erde sind mit heutigen Mitteln, und bleiben auch mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft, nicht genau zu beschreiben oder vorherzusagen. Allein die zukünftigen Treibhausgasemissionen sind abhängig von komplexen dynamischen Systemen und werden unmittelbar von demographischen, sozio-ökonomischen, ökologischen und technologischen Entwicklungen beeinflusst [59]. Damit bleibt der Mensch, speziell die Frage, inwieweit der Klimawandel weiter durch dessen Handlungen vorangetrieben wird, eine variable Größe, sodass mögliche Vorhersagen des zukünftigen Klimas mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Dennoch ist es möglich, den künftigen Verlauf auf Basis bestimmter Annahmen zu berechnen. Diese Annahmen werden auch Klimaszenarien genannt. [59–61]

Vor dem 4. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aus dem Jahr 2007 [62] wurde 2000 bereits der Special Report on Emissions Scenarios (SRES)

[59] veröffentlicht. Darin wurden die neuen SRES-Szenarien vorgestellt, welche auf vier unterschiedlichen narrativen Annahmen basieren. Jedem dieser Szenarien liegt eine Narration möglicher Entwicklungen des Weltgeschehens zugrunde. Berücksichtigt werden demographische, soziale, ökonomische, technologische und ökologische Entwicklungen. An diese möglichen Entwicklungen wurden von den Forscher\*innen auch Treibhausgasemissionen geknüpft und der Einfluss des Menschen auf das Klima somit an die einzelnen Narrationen gekoppelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in vier Szenarien-Familien zusammengefasst (Abbildung 14).

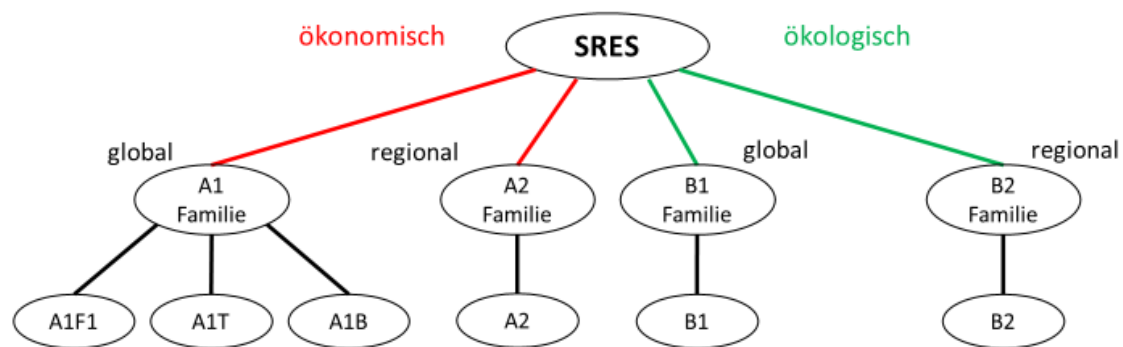


Abbildung 14 SRES-Szenarien nach [59] und [63]

Die Schwerpunkte der Szenarien bewegen sich zwischen ökonomischen und ökologischen sowie zwischen regionalen und globalen Entwicklungen. Während die A1 Familie von einer schnellen wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung ausgeht, mit großer Bedeutung der internationalen kulturellen wie ökonomischen Verflechtungen und der Höhepunkt des Bevölkerungswachstums in der Mitte des 21. Jahrhunderts erwartet wird, beschreibt das B2 Szenario eine Welt, in der die Lösung der klimatischen und gesellschaftlichen Probleme eher lokal und regional gesucht wird, die Bevölkerung stetig über das gesamte Jahrhundert wächst und die wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen eher moderat sind, auch wenn vielfältigere Technologien erwartet werden als bei der A1 Familie. Die Schwerpunkte des B2 Szenarios liegen eher auf sozialer Gerechtigkeit und Umweltschutz als auf wirtschaftlicher Prosperität und technologischem Fortschritt. Aus diesen Narrationen wurden mögliche Treibhausgasszenarien abgeleitet (Abbildung 15), die dann in den Simulationen weiterverarbeitet werden können, um Prognosen für die Klimaveränderungen zu erstellen. Die kurze Darstellung der beiden gegensätzlichen Szenarien-Familien A1 und B2 sollen die grundsätzliche Idee hinter den SRES vermitteln, für eine umfassende Beschreibung aller Szenarien und ihrer Auswirkungen sei jedoch auf [59, 63] verwiesen. Auf der rechten Seite der Abbildung 15 sind zusätzlich vier schwarze Balken dargestellt, um jene Streubereiche am Ende des Jahrhunderts zu erklären, die über die SRES Szenarien hinausgehen. Die IS92 Szenarien [64] waren die Vorgänger der SRES, wurden von diesen abgelöst und dennoch in [59] berücksichtigt. Zusätzlich führten die Wissenschaftler\*innen eine Analyse der einschlägigen Literatur durch und integrierten wichtige Ergebnisse in ihre Auswertungen. Die

„Intervention“-Szenarien integrierten dabei weitere Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels, während in „Non-intervention“ keine Maßnahmen berücksichtigt wurden. „Non-classified“ konnte keiner der beiden zuvor genannten Kategorien zugeordnet werden. [59] Wie zusätzlich an der roten Markierung zu erkennen ist, haben sich die jährlichen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 im Jahr 2021 bereits um etwa 70% erhöht [65].

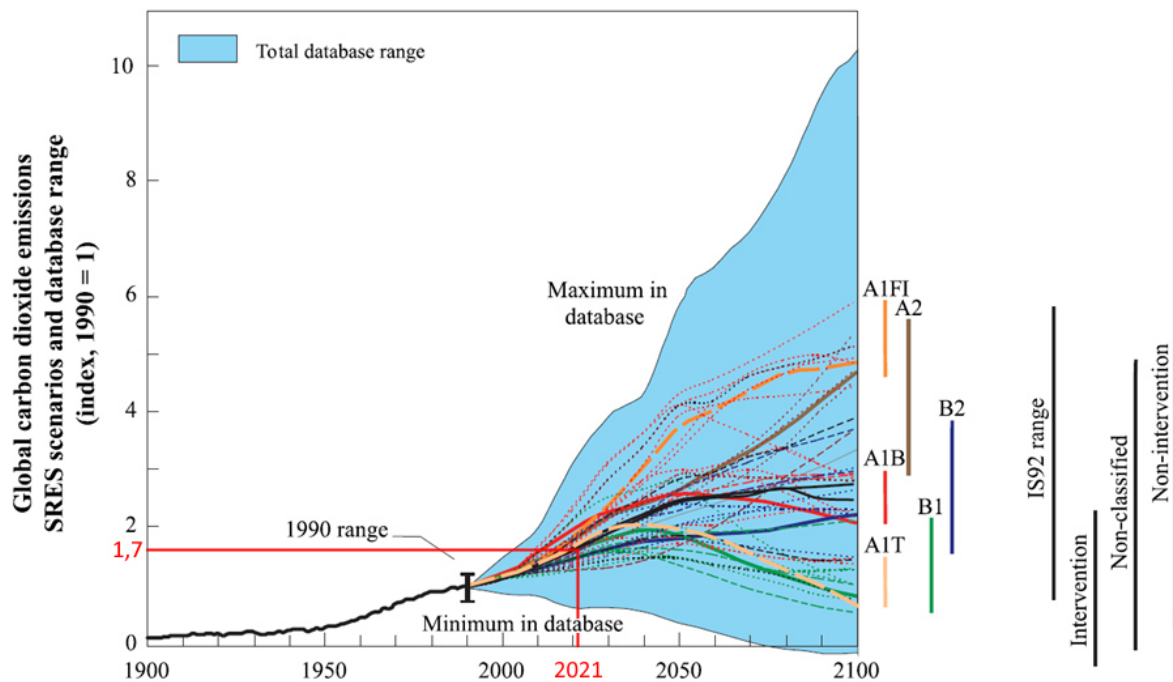


Abbildung 15 zu erwartender Bereich der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher SRES Szenarien nach [59] mit Werten für 2021 aus [65] und [66]

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des 4. Sachstandsberichts des IPCC waren die SRES bereits sieben Jahre alt und Stand der Technik von 2000 [63]. Mit dem 5. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2013 [67] wurden diese Szenarien durch die sogenannten RCP (Representative Concentration Pathways) ersetzt. Der Fokus dieser neuen Szenarien lag nicht mehr auf den Treibhausgasemissionen, sondern im Mittelpunkt der Untersuchungen lag nun der Strahlungsantrieb zum Ende des Jahrhunderts in W/m<sup>2</sup> und in der Konsequenz auch Temperaturveränderungen der Atmosphäre sowie der Erdoberfläche. Der Strahlungsantrieb gibt eine Veränderung der Strahlungsbilanz von eingehender und ausgehender Strahlung des Erdsystems an. Beispielsweise durch eine erhöhte Treibhausgaskonzentration gerät diese Bilanz aus dem Gleichgewicht. Die Strahlung, die die Erdatmosphäre wieder verlässt, ist geringer als die eingehende Strahlung und der Strahlungsantrieb dadurch positiv, d. h. es steht mehr Energie pro Quadratmeter Erdoberfläche zur Verfügung und die Erdoberfläche als auch die untere Atmosphäre erwärmen sich. Die Benennung der RCP Szenarien integriert deren jeweiligen Strahlungsantrieb. Beim RCP 8.5 Szenario wird folglich ein Strahlungsantrieb von 8,5 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2100 erwartet (s. Tabelle 2). [68–70]

Tabelle 2 Gegenüberstellung der RCP-Szenarien nach [71]

Szenario	Strahlungsantrieb (W/m <sup>2</sup> )	CO <sup>2</sup> -Äquivalent (ppm)	Kommentar
<b>RCP 8.5</b>	> 8,5 in 2100, bleibt bis 2300 auf hohem Niveau	> 1370 in 2100	ähnlich wie SRES-A2-Szenario
<b>RCP 6.0</b>	~6,0 mit Stabilisierung nach 2100, danach abnehmend bis 2300	~850 mit Stabilisierung nach 2100	ähnlich SRES-A1B-Szenario
<b>RCP 4.5</b>	~4,5 mit Stabilisierung nach 2100, bis 2300 auf gleichem Niveau	~650 mit Stabilisierung nach 2100	ähnlich SRES-B1-Szenario
<b>RCP 2.6</b>	Höchstwert bei ~3,0 vor 2100 und fällt danach ab auf ~2.6	Höchstwert bei ~500 vor 2100 und fällt danach ab	„Peak-Szenario“, RCP 2.6 entspricht Ziel der Vereinbarung von Paris

Auch hinsichtlich der Erstellung der Szenarien unterscheiden sich die RCP von den SRES. Für die Berechnung der SRES bauen einzelne Szenarien sukzessiv aufeinander auf. Dagegen erfolgt die Berechnung der RCP parallel und es werden Rückkopplungseffekte einzelner Komponenten berücksichtigt. Innerhalb der RCP werden verschiedene Zeitfenster betrachtet und für diese Zukunftsprojektionen erstellt. Die höchste Auflösung wird für den Zeitraum 2000 bis 2035 gewählt. Dafür wurden räumlich und zeitlich hochauflösende Zeitreihen erstellt, in denen der Schwerpunkt auf den Änderungen von Extremwerten lag. In einer geringeren räumlichen Auflösung erfolgte die Analyse der Landnutzungs- und Emissionsänderungen des Zeitraums bis 2100, während für 2100 bis 2300 teils Emissionen und teils Treibhausgaskonzentrationen konstant gehalten wurden. Zusätzlich wurden in den RCP-Szenarien auch die Auswirkungen möglicher Emissionsreduzierungs- und Anpassungsstrategien berücksichtigt. Das RCP 2.6 entspricht dabei einem Szenario, in dem die Vereinbarungen des Pariser Klimaschutzabkommens [3] eingehalten werden. Die erwartbaren Temperaturänderungen für die jeweiligen Szenarien werden in Abbildung 16 dargestellt. Auch bei den RCP-Szenarien sei für eine umfangreiche Beschreibung auf die weiterführende Literatur [69, 70] verwiesen.



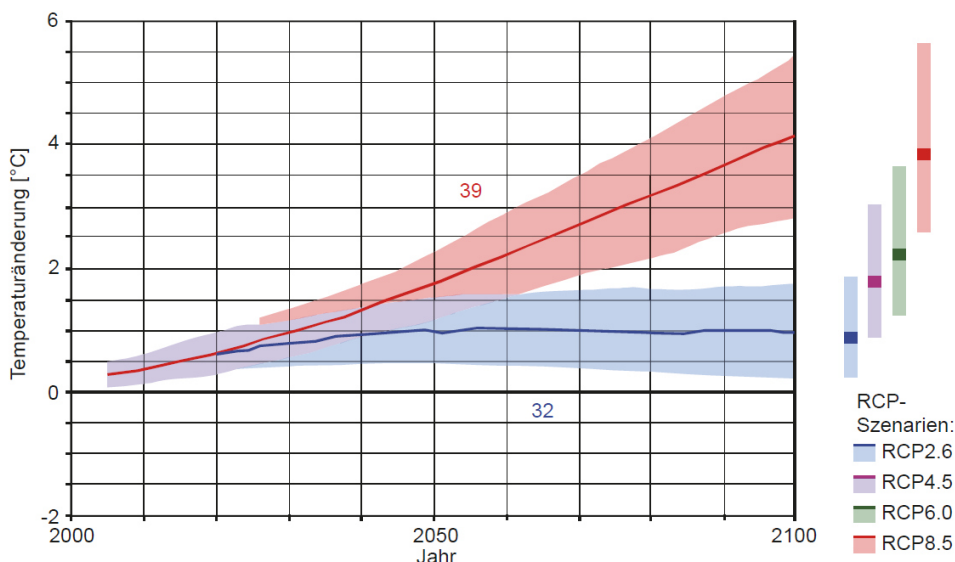


Abbildung 16 Abschätzung zukünftiger Klimaänderungen auf Basis der RCP-Emissionsszenarien [58]

Mit dem 6. Sachstandsbericht des IPCC [7] wurden 2021 auch die RCP-Szenarien aktualisiert und durch eine neue Generation, die SSP (Shared Socioeconomic Pathways) abgelöst. Die SSP beschreiben alternative Entwicklungen der gesellschaftlichen und natürlichen Systeme für das 21. Jahrhundert und basieren wie ihre Vorgänger auf Narrationen und auf quantitativen Messungen bisheriger Entwicklungen. Auch bei diesen Szenarien werden unterschiedliche sozio-ökonomische Pfade für die Zukunft definiert und der Strahlungsantrieb dient weiterhin als deren Referenz. Diese Pfade umfassen von Pfad SSP1 und dessen nachhaltigen und sozialen Entwicklungen sowie einer Orientierung der Technologie an ökologischen Maßstäben bis hin zum Pfad SSP5 mit weiterhin auf fossilen Energieträgern basierenden, jedoch auch höher entwickelten Technologien, mit denen eine bessere Anpassungen an den Klimawandel ermöglicht wird, ein breites Spektrum möglicher gesellschaftlicher Entwicklungen. Mit jedem dieser Pfade können grundsätzlich die Strahlungsantriebe der RCP erreicht werden. Lediglich das RCP 8.5 Szenario ist nur mit SSP5 erreichbar. [7, 72]

Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Abbildung 17 mögliche Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher SSP-Pfade [7]

Die in Abbildung 17 dargestellten Szenarien zeigen beispielhaft, welche Änderungen der globalen Oberflächentemperatur zu erwarten sind. Die Namen der Szenarien repräsentieren

den jeweiligen SSP-Pfad und den darin erreichten Strahlungsantrieb (SSP2-4.5: Pfad SSP2 mit 4,5 W/m<sup>2</sup>). Auch für umfassendere Informationen zu den neuen SSP-Szenarien sei an dieser Stelle an die weiterführende Literatur [7, 72] verwiesen.

Die neuen Szenarien von 2021 sind noch nicht in den Testreferenzjahren berücksichtigt. Die 2017 von der DWD bereitgestellten zukünftigen TRJ wurden mit Hilfe der Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 erstellt. Ersteres Szenario kann als untere Grenze angesehen werden, da in diesem bereits aktuelle Anstrengungen, den Klimawandel noch abzuschwächen, integriert wurden. Als obere Grenze dient das Szenario RCP 8.5, da aktuelle Entwicklungen zurzeit eher das Hochemissionsszenario erwarten lassen. Das mittlere Zukunfts-TRJ wurde somit „auf Basis eines Ensembles aus RCP 4.5- sowie RCP 8.5-basierten Szenarien erstellt“ [54]. Es wurde eine Vielzahl an Klimamodellen verwendet, um die Repräsentativität der Datenbasis zu erhöhen. Aus allen auf diesen regionalen Klimasimulationen für einen Standort aufbauenden Daten wurde für den Zeitraum von 2031 bis 2060 ein Mittelwert gebildet und anschließend, analog zu den aktuellen TRJ, aus den realen Datensätzen der Jahre 1995-2012 fragmentarisch ein neuer zukünftiger TRJ Datensatz erstellt. [54]

### Entwicklung des Klimas für den Standort Kaiserslautern

Anhand der in den Testreferenzjahren bereitgestellten Daten lassen sich bereits die Auswirkungen des Klimawandels auf den jeweiligen Standort abschätzen. In Tabelle 3 sind Daten der drei aktuellen TRJ 2015 des DWD für den Standort Kaiserslautern [57] jenen der entsprechenden zukünftigen TRJ 2045 [57] gegenübergestellt.

*Tabelle 3      Gegenüberstellung der aktuellen Datensätze TRJ 2015 und der zukünftigen TRJ 2045, Daten aus [57]*

	Mittleres TRJ		Sommer TRJ		Winter TRJ	
	2015	2045	2015	2045	2015	2045
<b>Anzahl Sommertage</b>	56	85	70	85	61	61
<b>Anzahl heißer Tage</b>	14	22	21	31	16	16
<b>Anzahl Eistage</b>	7	0	13	5	16	8
<b>Max. Temperatur</b>	35,8 °C	37,7 °C	35,4 °C	37,7 °C	35,8 °C	35,8 °C
<b>Min. Temperatur</b>	-8,4 °C	-5,6 °C	-9,5 °C	-7,8 °C	-9,5 °C	-8,7 °C
<b>Jahresmitteltemperatur</b>	11,7 °C	13,0 °C	12,0 °C	12,9 °C	11,1 °C	11,4 °C

Wie zu erwarten, simulierten die Klimamodelle des DWD für die mittleren TRJ und die Sommer TRJ jeweils eine Zunahme an heißen Tagen und Sommertagen, während die Anzahl der

Eistage geringer wurde. Im Winter TRJ sind dagegen lediglich weniger Eistage zu erwarten, die Anzahl der heißen Tage und der Sommertage bleibt gleich. Es wird ein Trend deutlich, der von Wang et al. in [73] beschrieben wurde. Die Sommer werden nicht nur wärmer, sondern auch immer länger. Mit 29 weiteren Sommertagen ist in den mittleren TRJ eine Erhöhung der Anzahl jener Tage, in denen die Außentemperatur mindestens 25 °C beträgt, um fast einen ganzen Monat im Zeitraum 2031-2060 zu erwarten. Gleichzeitig werden die Winter kürzer und, wie an der Anzahl der Eistage zu erkennen ist, auch gemäßiger. Im mittleren TRJ liegt mit 13 °C die Jahresmitteltemperatur um 1,3 K und somit 11,1% höher als im TRJ 2015. Im Sommer TRJ fällt diese Steigerung mit 0,9 K und 7,5% etwas geringer aus. Im Winter TRJ ist der Effekt bei einer Steigerung um 2,7% noch geringer. Durch einen Blick auf die Jahreszeitenmitteltemperaturen lässt sich dies noch etwas differenzierter betrachten (s. Tabelle 4).

Tabelle 4 Gegenüberstellung der mittleren Temperaturen der vier Jahreszeiten TRJ 2015 und TRJ 2045, Daten aus [57]

Jahreszeiten- mitteltemperatur	Mittleres TRJ		Sommer TRJ		Winter TRJ	
	2015	2045	2015	2045	2015	2045
Frühling	14,4 °C	15,1 °C	14,3 °C	14,8 °C	14,3 °C	13,5 °C
Sommer	19,5 °C	21,4 °C	21,0 °C	22,1 °C	20,0 °C	20,4 °C
Herbst	8,3 °C	9,4 °C	10,8 °C	9,2 °C	8,5 °C	7,8 °C
Winter	3,9 °C	5,4 °C	1,2 °C	4,9 °C	1,1 °C	3,4 °C

Am Vergleich der beiden mittleren TRJ mit den beiden Sommer TRJ ist zu erkennen, dass die Sommer für den Standort Kaiserslautern im Mittel um fast 2 K (+9,7%) wärmer werden, dagegen die extremen Sommer mit 1,1 K nur eine etwa 5,2% höhere Durchschnittstemperatur verzeichnen. Die Sommer werden folglich generell heißer, die extremen Sommer jedoch nicht in gleicher Proportion. Im Winter TRJ ist sogar nur ein Anstieg von 0,4 K und somit von 2% zu erkennen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen im Winter sind hingegen in allen drei TRJ deutlich zu erkennen. Mit 1,5 K und 38% fällt der Einfluss beim mittleren TRJ noch am geringsten aus. In den extremen TRJ sind die Durchschnittstemperaturen im Winter mit 3,7 K um 300% und mit 2,3 K um 200% höher. Selbstverständlich ist die relative Abweichung bei diesen geringen Temperaturen wesentlich höher als bei einem höheren Temperaturniveau. Dennoch ist im Sommer TRJ der Anstieg im Winter mehr als dreimal so hoch und im Winter TRJ mehr als fünfmal so hoch wie im Sommer. In Frühling und Herbst fallen die Durchschnittstemperaturen in den extremen zukünftigen TRJ teilweise geringer aus als in den aktuellen Datensätzen. Da diese jedoch lediglich wegen ihrer maßgebenden Jahreszeit (Sommer oder Winter) in Simulationen verwendet werden, sollte der Fokus dieser

beiden Jahreszeiten auf den mittleren TRJ liegen. Dort ist im Mittel ein um 0,7 K wärmerer Frühling und ein um 1,1 K wärmerer Herbst zu erwarten. Über das gesamte Jahr zeigt sich somit ein wärmeres Außenklima, sodass im Winter eine geringere Heizlast und im Sommer dagegen eine höhere Kühllast zu erwarten ist. Die dargestellten Werte sind dabei keineswegs als absolute quantitative Ergebnisse anzusehen, sie verdeutlichen aber den zu erwartenden Trend der klimatischen Veränderungen.

## 2.3 Das Peltier-Element

### 2.3.1 Physikalische Grundlagen

#### 2.3.1.1 Grundlagen der Elektrizität

Die elektrische Energie ist aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie ermöglicht unterschiedlichste alltägliche Aktivitäten, denn nur mit ihrer Hilfe lassen sich die meisten modernen Technologien nutzen, vom Handy über den Computer bis hin zu Autos, unabhängig davon, ob diese elektrisch oder mit fossilen Energieträgern betrieben werden. Zur Erklärung, wodurch diese Energie entsteht, ist zunächst ein Blick auf die Modelle der atomaren Vorgänge innerhalb von elektrischen Systemen notwendig.

Demnach bestehen Atome aus den Atomkern bildenden positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen sowie negativ geladenen Elektronen, die die Atomhülle bilden. Während sich jeweils die Paare gleicher Ladung voneinander abstoßen, existiert zwischen Elektronen und Protonen eine Anziehung, die für den Zusammenhalt des Atoms verantwortlich ist. Die Protonen im Atomkern binden die Elektronen der Atomhülle. Sind genauso viele Elektronen wie Protonen im Atom vorhanden, gleichen sich diese folglich aus, man spricht von neutralen Atomen. [74, 75]

Durch Zuführung von Energie (z. B. Wärme) können sich einzelne Elektronen in bestimmten Stoffen aus der Hülle des Atoms lösen und diese dienen dem System als bewegliche Ladungsträger. Durch die fehlenden Elektronen besitzt das Atom nun einen Protonenüberschuss. Die freigewordenen Elektronen können dabei durch das Medium strömen. Jedes Elementarteilchen, Elektron wie Proton, besitzt eine negative bzw. positive Elementarladung  $e_0 = 1,602177 \cdot 10^{-19}$  Coulomb, oder auch Amperesekunde. Das Produkt der Anzahl  $n$  der freigewordenen Elektronen mit der negativen Elementarladung  $-e_0$  wird dabei als Ladungsmenge  $Q$  bezeichnet. Der Transport der Ladungsmenge, die pro Zeiteinheit durch ein Medium fließt, wird durch die Stromstärke  $I$  beschrieben und in der Einheit Ampere angegeben. [74, 75]

$$I = \frac{dQ [C]}{dt [s]} [A] \quad (2.8)$$

Während die Elektronen bei den meisten Materialien fest an ihr Atom gebunden sind und wie oben beschrieben lediglich in bestimmten Stoffen durch Energiezufuhr in Bewegung geraten,

sind die Elektronen in metallischen Leitern nur sehr schwach im Atomverbund integriert. Zwischen den einzelnen Metallatomen herrscht ein ständiger Elektronenaustausch, da sich diese leicht lösen können und sich somit richtungsunabhängig im Metall bewegen. Diese Elektronen stehen als bewegliche Ladungsträger für einen Ladungstransport zur Verfügung. Mithilfe einer Spannungsquelle werden diese richtungsunabhängigen Bewegungen entlang des sich einstellenden elektrischen Feldes gerichtet. Auf dem Weg zwischen zwei Punkten A und B verlieren die strömenden Elektronen einen Teil ihrer potenziellen Energie bspw. durch die entstehende Reibung. Folglich stellt sich zwischen A und B eine Potenzialdifferenz ein, die man als elektrische Spannung  $U$  bezeichnet und die als Quotient aus der zwischen den Punkten umgesetzten potenziellen Energie  $W_{AB}$  und der transportierten Ladung  $Q$  definiert ist.

$$U = \frac{W_{AB} [J]}{Q [C]} [V] \quad (2.9)$$

Die Spannung hat dabei die Einheit Joule pro Coulomb, bzw. Joule pro Amperesekunde, was einem Volt entspricht [74–76]. Zur Ermittlung der elektrischen Leistung im System, also der in einer Zeiteinheit umgesetzten elektrischen Energie, werden Stromstärke  $I$  und Spannung  $U$  miteinander multipliziert.

$$P_{el} [W] = U [V] \cdot I [A] \quad (2.10)$$

Die zugehörige Einheit der elektrischen Leistung ergibt sich als ein Joule pro Sekunde, also als ein Watt. [74]

Um einen elektrischen Strom leiten zu können, müssen im Leitermedium frei bewegliche Ladungsträger vorhanden sein. Wie bereits beschrieben wurde, sind bspw. Metalle durch den schwachen Atomverbund sehr gut geeignet, um einen elektrischen Strom zu leiten. Generell werden Materialien nach ihrer Leitfähigkeit in drei Kategorien unterschieden.

### **Elektrische Leiter**

Elektrische Leiter haben eine große Dichte beweglicher Ladungsträger. In metallischen Leitern tragen die vielen frei beweglichen Elektronen die elektrische Ladung durch den Werkstoff, deren Konzentration bspw. in Kupfer etwa  $9,0 \cdot 10^{22}$  Elektronen/cm<sup>3</sup> beträgt. Diese Elektronen sind folglich der Grund für die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle sowie darüber hinaus auch für deren gute Wärmeleitfähigkeit, da auch die Wärme überwiegend durch die Leitungselektronen transportiert wird. [75, 77]

### **Nichtleiter (Isolator)**

In einem idealen Nichtleiter sind keine für die Leitung des elektrischen Stroms notwendigen, beweglichen Ladungsträger vorhanden, sodass ein Ladungstransport nicht möglich ist. Bei realen Nichtleitern können die Gitterverbände der Atome jedoch durch eine hohe Energiezufuhr (z. B. Wärme oder elektrische Spannung) aufgelöst werden, sodass in der Praxis keine idealen Nichtleiter existieren. Im Allgemeinen sind die Atomverbände von nichtleitenden Materialien stark genug, um eine autonome Trennung der Elektronen und den

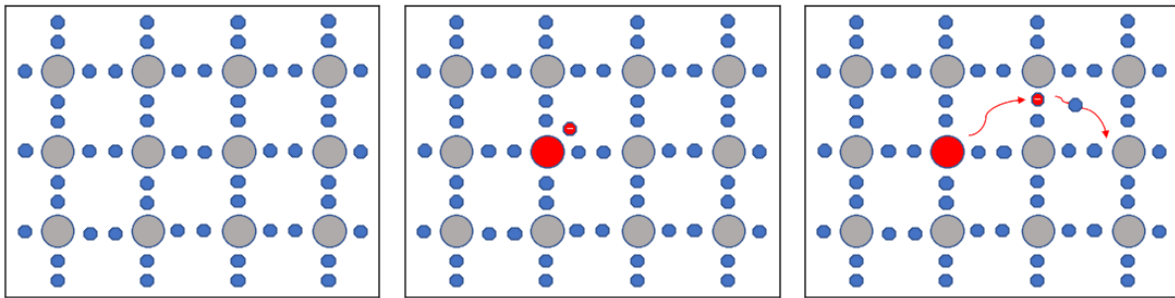
damit einhergehenden Ladungstransport zu verhindern. [75]

### **Halbleiter**

Betrachtet man die Anzahl der beweglichen Ladungsträger, bewegen sich Halbleiter zwischen den elektrischen Leitern und den Nichtleitern, wobei die Anzahl der freien Elektronen pro Volumeneinheit im Vergleich zu metallischen Leitern um die Größenordnung bis zu  $1,0 \cdot 10^{10}$  Elektronen/cm<sup>3</sup> geringer ist, wie folglich auch die elektrische und die Wärmeleitfähigkeit [75]. Zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitern werden gezielt geeignete Fremdatome in die Gitternetze der Halbleiter eingebaut, die dann als Ladungsträger dienen. Dieser Vorgang wird Dotierung genannt.

Bei einer Dotierung unterscheidet man je nach Art des Fremdatoms, das in das Leitermaterial eingebracht wird, in eine n-Dotierung und eine p-Dotierung. Erstere wird hergestellt, indem vom Donator negativ geladene Elektronen und zweitgenannte, indem vom Akzeptor sich wie positive Ladungsträger verhaltende Löcher bereitgestellt werden. Die Bezeichnungen Donator und Akzeptor deuten dabei bereits auf die Funktion im Leitermedium hin. Diese wird meist modellhaft mithilfe eines Leitungsbandes dargestellt, mit dem die elektrische Leitungsfähigkeit von Materialien erklärt wird. Donatoren (lat.: donare = geben) bringen mehr Elektronen in die Gitterstruktur des Leitermediums ein, als dort gebunden werden können. Befinden sich auf der Atomhülle des eingebrachten Fremdatoms beispielsweise fünf Elektronen, die Atome des Leitermaterials stellen jedoch nur vier Elektronen zur Bindung bereit, dann integriert sich das Fremdatom bestmöglich in die neue Umgebung, indem es ebenfalls mit vier Elektronen Bindungen eingeht. Dabei bleibt jedoch ein Elektron ohne Bindung, welches wiederum durch leichte (thermische) Energiezufuhr gelöst werden und anschließend ins Leitungsband übergehen kann (Abbildung 18, oben). Zur elektrischen Leitung benötigt dieses ungebundene Elektron wesentlich weniger Energie, als aufgebraucht werden müsste, um ein Elektron aus dem ursprünglichen Leitermaterial zu lösen und für den Ladungstransport nutzbar zu machen. Akzeptoren (lat.: accipere = aufnehmen) hingegen machen sich das gegenteilige Prinzip der Donatoren zunutze. Mit einem Elektron weniger versehen als die Atome des Leitermaterials, lösen die Akzeptoren ein Elektron aus dem Gitternetz der umgebenen Leiteratome und hinterlassen ein Loch in der ursprünglichen Bindung. Wird eine Spannung angelegt, können gebundene Nachbarlektronen in die entstandenen Löcher springen, wodurch an dieser Stelle ein neues Loch entsteht. So wandern die Löcher durch das Leitermaterial und verhalten sich dabei wie positive Ladungsträger (Abbildung 18, unten). [75, 78, 77]

## n-Dotierung



## p-Dotierung

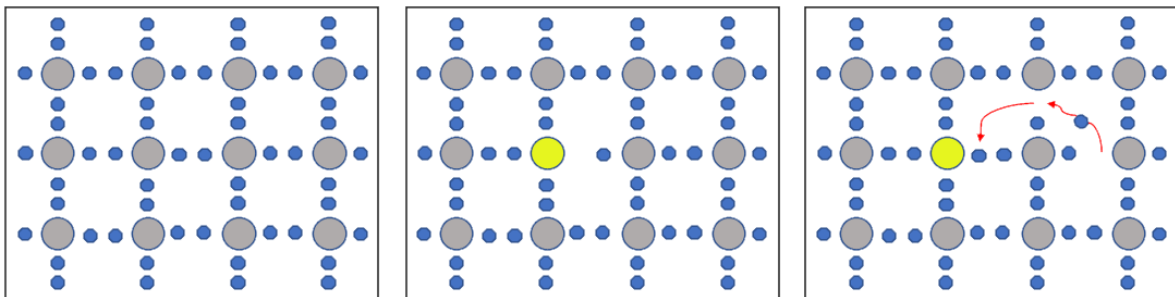


Abbildung 18 Leitung des elektrischen Stroms bei n- und p-Dotierung nach [75]. Das rote Fremdatom ist der Donator, der ein zusätzliches Elektron (ebenfalls rot) in die Gitterstruktur der grauen Atome integriert, das gelbe Fremdatom ist der Akzeptor mit einem Elektron weniger, wegen dem die Löcher durch die Gitterstruktur wandern.

Durch die Dotierung verbessert sich die spezifische elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  der Halbleiter, die sich aus der Dichte der frei beweglichen Ladungsträger und deren Beweglichkeit ermitteln lässt. Folglich verringert sich auch der ohmsche Widerstand  $R$ . Dieser beschreibt die Fähigkeit eines stofflichen Objekts, den elektrischen Strom zu begrenzen und ist abhängig vom Reziprok der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, dem spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ . Während die spezifische elektrische Leitfähigkeit und der spezifische elektrische Widerstand Materialkennwerte sind, bezieht sich der ohmsche Widerstand stets auf ein Objekt und lässt sich über dessen Länge  $L$  und Fläche  $A$  berechnen. [74]

$$R = \frac{\rho [\Omega\text{m}] \cdot L[\text{m}]}{A [\text{m}^2]} [\Omega] \quad (2.11)$$

Mithilfe des Ohmschen Gesetzes lässt sich für Ohmsche Leiter der Zusammenhang zwischen Stromstärke  $I$ , elektrischer Spannung  $U$  und dem Widerstand  $R$  wie folgt darstellen [74]:

$$U = R \cdot I \quad (2.12)$$

Da der ohmsche Widerstand von der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit abhängt, sind auch für diesen die Dichte der frei beweglichen Ladungsträger und deren Beweglichkeit entscheidend. Je größer der Widerstand, desto mehr Reibung entsteht bei den Elektronenbewegungen des elektrischen Stroms. Die beweglichen Elektronen stoßen dabei mit den atomaren Bausteinen des jeweiligen Leitermaterials zusammen und versetzen diese in Schwingung. Elektrische Energie wird in thermische Energie, also in Wärme, umgesetzt.

Die entstehende Wärme wird Joulesche Wärme genannt. Diesen Effekt machen sich bspw. Heizstäbe zunutze, in denen die gesamte elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Aus den Gleichungen (2.10) und (2.12) ergibt sich diese umgesetzte thermische Leistung  $P$  wie folgt [75]:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.13)$$

Durch einen elektrischen Stromfluss wird also auch die Temperatur eines Leiters beeinflusst. Da verschiedene Materialeigenschaften, wie die spezifische elektrische Leitfähigkeit, umgekehrt auch von der Temperatur beeinflusst werden, bedingen sich Temperatur und Elektrizität unmittelbar gegenseitig. Solche Effekte der gegenseitigen Beeinflussung von Temperatur und Elektrizität werden unter dem Begriff der Thermoelektrizität zusammengefasst.

### 2.3.1.2 Thermoelektrizität

Der Peltier-Effekt bildet zusammen mit dem Seebeck- und dem Thomson-Effekt die Grundlagen der Thermoelektrizität. Thomas Johann Seebeck entdeckte Anfang des 19. Jahrhunderts zufällig, dass bei zwei unterschiedlichen, einen Stromkreis bildenden Metallstangen eine elektrische Spannung entsteht, wenn jeweils zwischen den Enden einer Stange ein Temperaturunterschied herrscht. Folglich können Temperaturunterschiede dazu genutzt werden, elektrische Energie zu generieren. Der umgekehrte Effekt wird, nach seinem Entdecker, als Peltier-Effekt bezeichnet. Jean Charles Athanase Peltier schloss wenige Jahre nach Entdeckung des Seebeck-Effekts Bismut- und Kupferdrähte an eine Batterie an und durch den entstandenen Stromfluss wurde die eine Seite wärmer, während die andere abkühlte. Grund dafür sind die unterschiedlich hohen Fermi-Grenzen der beiden Halb-/Leiter, also die jeweils höchsten besetzten Energieniveaus der Teilchen in den beiden Systemen. Zwei verschiedene Stoffe haben unterschiedlich hohe Grundniveaus der Elektronen, die bei Kontakt durch Diffusion der Elektronen ausgeglichen werden. Das Material mit der geringeren Austrittsarbeit der Elektronen gibt so lange Elektronen ab, bis sich eine Kontaktspannung einstellt, die entgegengesetzt gleich der Differenz des Fermi-Niveaus ist. In beiden Richtungen treten dann gleich viele Elektronen über. Dort fließt jedoch noch kein Strom, da beide Spannungen gleich groß und entgegengesetzt geschaltet sind. Werden nun beide Enden mit unterschiedlichen Temperaturen konfrontiert, wird der Seebeck-Effekt wirksam. Durch die Temperaturveränderung verteilen sich die Elektronen auf die verschiedenen Energieniveaus um und eine Thermospannung wird messbar, Strom wird erzeugt. Umgekehrt wird für den Peltier-Effekt Strom durch den Kreislauf geleitet und dabei benötigen die Elektronen zusätzliche Energie, um von einem niedrigeren in ein höheres Niveau zu gelangen. Diese Energie wird der Umgebung in Form von Wärmeenergie entzogen. Die bewegten Elektronen transportieren also neben der elektrischen Ladung zusätzliche Energie. Diese wird an den Kontaktstellen entweder aus der Umgebung aufgenommen, folglich wird Wärme entzogen, oder sie wird abgegeben und das Material erhitzt sich. Die durch den Seebeck-Effekt



entstehende Spannung  $U$  lässt sich aus dem Produkt des Seebeck-Koeffizienten  $\alpha$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen warmer und kalter Seite berechnen. [75, 78, 77, 79]

$$U [V] = \alpha [V/K] \cdot \Delta T [K] \quad (2.14)$$

Der dritte thermoelektrische Effekt, der Thomson-Effekt, nach dem „auch in einem homogenen Leiter [...] bei Stromfluss Wärme erzeugt [wird], wenn man darin ein Temperaturgefälle  $\Delta T/l$  aufrechterhält“ [79], wird wegen seiner vernachlässigbar kleinen Auswirkungen auf die Peltier-Elemente nicht weiter berücksichtigt. Anhand der von William Thomson (auch Lord Kelvin) erkannten Relation lässt sich der Peltier-Koeffizient  $\Pi$  aus dem Seebeck-Koeffizient ableiten, indem dieser mit der absoluten Temperatur  $T$  in K multipliziert wird. [77, 80]

$$\Pi [V] = \alpha [V/K] \cdot T [K] \quad (2.15)$$

Die durch den Peltier-Effekt entstehende Wärmeleistung  $P$  ist proportional zur Stromstärke und wird nach Gleichung (2.16) berechnet.

$$P [W] = \Pi [V] \cdot I [A] \quad (2.16)$$

Der dabei verwendete Peltier-Koeffizient lässt sich aus den jeweiligen Koeffizienten der beiden verwendeten Materialien durch Subtraktion ermitteln. Er wird als Differenz der Peltier-Koeffizienten der beiden Stoffe verstanden. [80]

Durch Kombination verschiedener Leiter oder Halbleiter lässt sich folglich aufgrund thermoelektrischer Prozesse ein elektrischer Strom generieren oder Wärme von einem Punkt zum nächsten transportieren. Eine Technologie, die sich diese physikalischen Effekte zunutze macht, ist das Peltier-Element.

### 2.3.1.3 Das Peltier-Element

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrischer Wandler, der einen durchfließenden Strom in Wärmeenergie wandeln kann (Peltier-Effekt) und umgekehrt bei einer vorhandenen Temperaturdifferenz einen Stromfluss erzeugt (Seebeck-Effekt). Die Elemente bestehen aus zwei metallischen Keramikplatten, zwischen denen zwei elektrisch leitende Materialien alternierend elektrisch miteinander verbunden sind. Dabei werden die metallischen Keramikplatten meist auf Basis von Aluminium hergestellt (z. B. Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), da diese verglichen mit anderen Keramikmaterialien eine ausreichend gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, bei gleichzeitig guter elektrischer Isolation [81]. Im Gegensatz dazu sollten die gewählten Leiter einerseits eine gute elektrische Leitfähigkeit vorweisen und andererseits die thermische Leitung begrenzen. Jedoch geht mit der guten elektrischen meist auch eine gute thermische Leitfähigkeit einher. Diesen Anforderungen werden Halbleiter am ehesten gerecht. Aus diesem Grund findet in vielen Peltier-Elementen Bismuttellurid  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Verwendung als Leitermaterial. Zur Gewährleistung des für den Peltier-Effekt notwendigen Ladungstransports

ist eine unterschiedliche Dotierung der alternierenden Leiter erforderlich. Die Kombination aus zwei jeweils unterschiedlich dotierten Halbleitern nennt man auch Thermopaar. Diese werden meist durch eine Kupferbrücke miteinander verlötet und liegen elektrisch in Reihe und thermisch parallel [76]. Abbildung 19 stellt die Funktionsweise und den Aufbau von Peltier-Elementen schematisch dar.

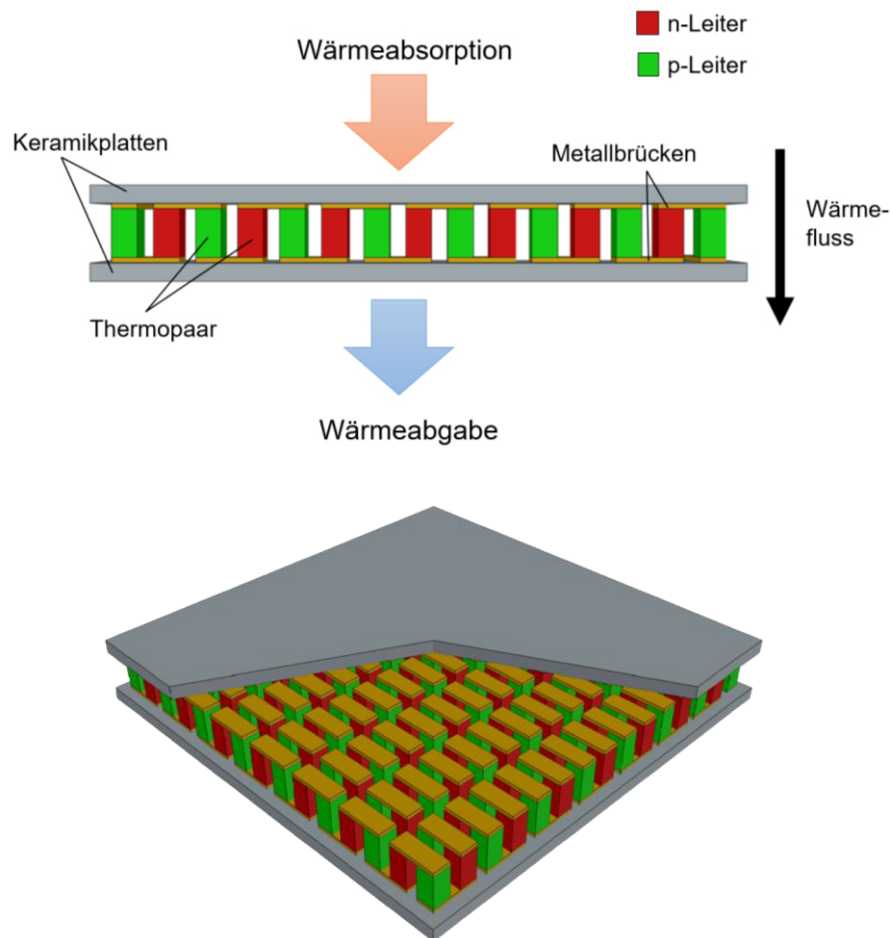


Abbildung 19 Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise eines Peltier-Elementes [82] nach [83]

Fließt durch das Peltier-Element ein elektrischer Strom, benötigen die Elektronen an den Kupferbrücken, den Übergängen zwischen n- und p-Leiter, auf der einen Seite zusätzliche Energie, die sie aus der Umgebung in Form von Wärme aufnehmen, und auf der anderen Seite geben sie diese Energie wieder an die Umgebung ab (s. 2.3.1.2). Es entsteht ein Wärmefluss.

Handelsübliche Peltier-Elemente werden mit Abmessungen zwischen 8 mm x 10 mm und 54 mm x 57 mm vertrieben [84, 85]. Diese haben eine rechteckige Querschnittsfläche und sind etwa 3-6 mm dick. In Abbildung 20 ist anhand eines 40 mm x 40 mm großen Peltier-Elementes deren Optik beispielhaft dargestellt.

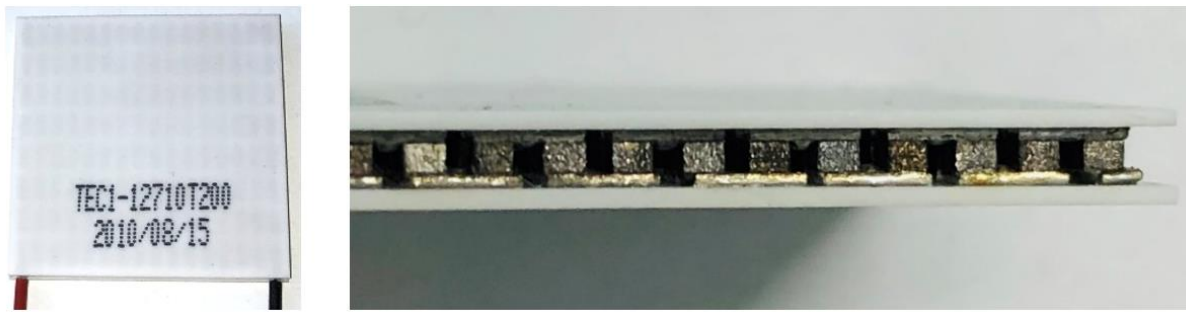


Abbildung 20 Peltier-Element TEC1-12710T200 in der Drauf- und Seitenansicht

Ferner werden auch mehrstufige Elemente hergestellt, die sich wie in Reihe geschaltete Peltier-Elemente verhalten. Durch die optimierte Konstruktion erfolgt der Wärmetransport dabei mit geringeren Verlusten und ist somit effizienter als bei der gleichen Anzahl hintereinander geschalteter separater Elemente.

Einstufige Elemente können Temperaturdifferenzen von mehr als 75 K [81, 86], mehrstufige höhere Werte mit mehr als 100 K erreichen. Vor allem die geringe Größe und der geräuschlose und wartungsarme Betrieb der Elemente sind für viele Anwendungen von Vorteil. Üblicherweise werden Peltier-Elemente zum Kühlen verwendet. Der Einsatz reicht dabei von der Kühlung von Sensoren (z. B. CCD-Chips in Digitalkameras) über die Kühlung von Akkus in Elektroautos bis hin zur Kühlung von Laserdioden in der medizinischen Anwendung. Die genannten Vorteile überwiegen bei diesen Anwendungen der geringen Energieeffizienz der Elemente im Kühlbetrieb, vor allem weil meist schwierige Platzverhältnisse den Einbau anderer Wärmesenken unmöglich machen. [81, 87]

Jedoch tritt diese geringe Energieeffizienz besonders bei hohen Temperaturdifferenzen auf. In den Datenblättern der Hersteller wird die Effizienz mithilfe des sogenannten Coefficient of Performance COP angegeben. Zum Verständnis der Funktions- und Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente ist ein genauerer Blick auf diese Kennzahl notwendig.

### 2.3.2 Coefficient of Performance – COP

Der COP setzt die nutzbare Wärmeenergie ins Verhältnis zur zum Betrieb des Peltier-Elementes erforderlichen elektrischen Energie. Er ist eine Kennzahl für die Energieeffizienz eines Peltier-Elementes. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente und damit bezogen auf die Leistung lässt sich der COP aus den Wärmeströmen  $Q_h$  und  $Q_c$  auf der warmen Seite (h für heating) und auf der kalten Seite (c für cooling) des Elementes sowie der elektrischen Leistung  $P_{el}$  berechnen.

$$COP_h = \frac{Q_h}{P_{el}} \quad (2.17)$$

$$COP_c = \frac{Q_c}{P_{el}} \quad (2.18)$$

Für ein Peltier-Element ergeben sich also immer zwei COPs. Die dafür benötigten Wärmeströme  $Q_h$  und  $Q_c$  geben an, wie viel Wärme von der kalten Seite absorbiert und wie viel Wärme auf die warme Seite transportiert wird. Nach dem Energieerhaltungssatz werden in einem geschlossenen System die Energien weder verbraucht noch erzeugt. Sie bleiben im System erhalten und wandeln sich ineinander um [75]. Daraus ergibt sich

$$Q_h = Q_c + P_{el} \quad (2.19)$$

als Relation zwischen den Wärmeströmen und der elektrischen Leistung. Zusammengefügt lässt sich aus den Gleichungen (2.17), (2.18) und (2.19) ableiten, dass der COP zum Heizen stets um 1 größer ist als jener COP, wenn das Peltier-Element zum Kühlen verwendet wird.

$$COP_h = COP_c + 1 \quad (2.20)$$

Die Effizienz eines Peltier-Elementes ist jedoch keineswegs konstant und für jedes Element lässt sich nicht lediglich eine Kennzahl berechnen. Vielmehr sind die sich einstellenden Wärmeströme von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Wie in 2.3.1.2 bereits dargestellt wurde, bedingen sich in thermoelektrischen Systemen thermische und elektrische Effekte gegenseitig. Der vornehmlich im Peltier-Element wirkende physikalische Effekt ist, wie der Name schon sagt, der Peltier-Effekt. Zusätzlich entsteht durch die Reibung der Elektronen in jedem elektrischen Stromkreis immer auch Joulesche Wärme. Auch stellt sich durch die hohen Temperaturdifferenzen zwischen der warmen und der kalten Peltier-Seite ein Wärmestrom ein, da nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik Wärmeenergie immer von warm nach kalt fließt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt [75, 78]. Dieser Wärmestrom ist proportional zur thermischen Leitfähigkeit  $K$  in W/K des Peltier-Elementes und zur sich einstellenden Temperaturdifferenz. Aus den Gleichungen (2.13), (2.15) und (2.16) ergeben sich zusammen mit dem Wärmefluss zwischen warmer und kalter Seite die Gleichungen (2.21) und (2.22) zur Ermittlung der Wärmeströme  $Q_h$  und  $Q_c$ . [76]

$$Q_h = \alpha \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K(T_h - T_c) \quad (2.21)$$

$$Q_c = \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K(T_h - T_c) \quad (2.22)$$

Sowohl auf der warmen als auch auf der kalten Seite wird der Peltier-Effekt als positiver Term in den beiden Gleichungen berücksichtigt. Auf der kalten Seite soll gekühlt werden, dort wird Wärme entzogen, und auf der warmen Seite soll geheizt werden, dorthin wird die Wärme transportiert. Diese Effekte werden mit dem ersten Term der Gleichung beschrieben und als Bezugstemperatur dient die jeweilige Temperatur auf der entsprechenden Seite. Die Joulesche Wärme wird auf beiden Seiten lediglich zur Hälfte angesetzt, da die Reibung und

damit die Stromwärme über den gesamten Stromkreis entsteht und sich damit gleichmäßig verteilt. Während auf der warmen Seite diese zusätzliche Wärme in der Gleichung als positiver Term berücksichtigt wird, diese soll gewärmt werden, ist ein zusätzlicher Wärmeeintrag bei der Kühlung auf der Kaltseite störend, da so die transportierte Wärmemenge und somit auch die Leistung reduziert werden. Der letzte Term der Gleichung beschreibt den Wärmefluss von der warmen zur kalten Seite und ist in beiden Gleichungen negativ. Von der Warmseite des Peltier-Elementes wird die Wärme wieder zurück zur Kaltseite geleitet, von wo sie eigentlich in Richtung Warmseite transportiert werden sollte. Zur Veranschaulichung dieser wirkenden Effekte werden die Wärmeströme in Abbildung 21 schematisch dargestellt.

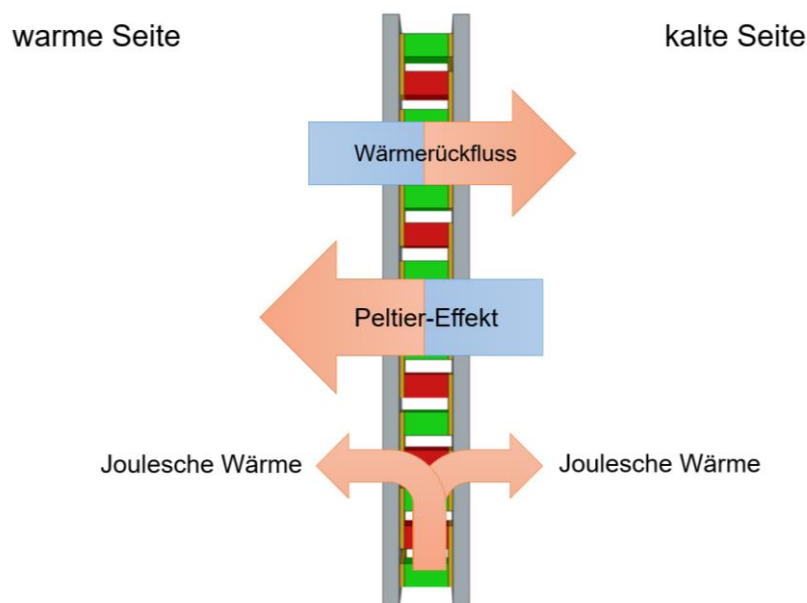


Abbildung 21 schematische Darstellung der Wärmeströme eines Peltier-Elementes, blaue Pfeile stellen einen Kühleffekt dar, orangene einen Heizeffekt

Durch die Gleichungen (2.21) und (2.22) zusammen mit der Abbildung 21 wird ersichtlich, dass zum effizienten Betreiben eines Peltier-Elementes der Wärmerückfluss so gering wie möglich gehalten werden muss und zumindest für den Kühleffekt auf der Kaltseite auch die Joulesche Wärme begrenzt werden sollte. Da die Werkstoffeigenschaften in den in dieser Arbeit betrachteten Temperaturbereichen einigermaßen konstant sind [88], sie durch ihre Temperaturabhängigkeit nur geringen Schwankungen unterliegen, können die negativen Effekte maßgeblich durch die anderen Variablen der Gleichung reguliert werden (Tabelle 5). So ist die Stärke des Wärmerückflusses proportional zur sich einstellenden Temperaturdifferenz zwischen den beiden Peltier-Seiten. Zum effizienten Betreiben des thermoelektrischen Wandlers muss der kalten Seite folglich effektiv Wärme zur Verfügung gestellt werden, während auf der Warmseite die entstehende Wärme schnellstmöglich vom Peltier-Element weg transportiert werden muss, sodass sich durch die Maßnahmen eine kleinstmögliche Temperaturdifferenz einstellt. Die durch den Peltier-Effekt transportierte Wärmemenge ist proportional zur Stromstärke und zur Temperatur auf der kalten bzw. warmen Seite des Elementes. Daraus folgt, dass mit steigender Stromstärke auch die Leistung des

Peltier-Elementes größer wird. Weiterhin wächst auf der Warmseite der zusätzliche Wärmegewinn durch die Joulesche Wärme mit dem Quadrat der Stromstärke, jedoch verringert sich auf der Kaltseite in gleicher Rate die Absorption der Wärmeenergie. Je mehr Strom durch das Peltier-Element fließt, desto mehr Wärme wird zunächst transportiert und desto höhere Temperaturen werden auf der warmen Seite erreicht. Mit steigenden Temperaturen und damit steigender Temperaturdifferenz kann der Wärmerückfluss jedoch zum maßgeblichen Effekt werden, sodass die kalte Peltier-Seite nicht mehr kühlt. Aus diesem Grund erreichen Peltier-Elemente die höchsten COPs bei kleinen Stromstärken und einer guten Wärmezu- bzw. -ableitung auf den jeweiligen Seiten.

Tabelle 5      Relationen der Stromstärke  $I$ , der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen warmer und kalter Peltier-Seite sowie des COPs

$I \uparrow$	$\rightarrow$	$\Delta T \uparrow$	$\text{COP} \downarrow$
$I \downarrow$	$\rightarrow$	$\Delta T \downarrow$	$\text{COP} \uparrow$
$\Delta T \uparrow$	$I \leftrightarrow$	$\rightarrow$	$\text{COP} \downarrow$
$\Delta T \downarrow$	$I \leftrightarrow$	$\rightarrow$	$\text{COP} \uparrow$

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich für Peltier-Elemente durchaus ein gewisses Potenzial, das jedoch nur mithilfe durchdachter Konzepte für die thermischen Randbedingungen ausgenutzt werden kann. Durch die starke Interdependenz der thermischen und elektrischen Effekte ist die Entwicklung solcher Konzepte nicht trivial und war in der Vergangenheit bereits Gegenstand unterschiedlicher Forschungsprojekte, in denen versucht wurde, die Peltier-Elemente für die Baupraxis nutzbar zu machen.

### 2.3.3 Peltier-Elemente in Baupraxis und Forschung

Aktuell sucht man in der Baupraxis vergeblich nach marktreifen Produkten, in denen Peltier-Elemente integriert sind. Lediglich mobile Luftentfeuchter greifen auf die Peltier-Technik zurück [89], in denen die feuchte Raumluft entlang der kalten Peltier-Seite bis zur Kondensation abgekühlt wird und die Luft einen Teil ihres gespeicherten Wassers abgibt, ehe die nun kältere Luft an der Warmseite des Peltier-Elementes vorbeiströmt und aufgewärmt und getrocknet wieder zurück in den Raum geleitet wird. Auch in der Forschung im Bauwesen nehmen Peltier-Elemente die Rolle eines Nischenproduktes ein. Innerhalb der Forschungsprojekte der letzten Jahre lag der Fokus hauptsächlich auf dem Einsatz von Peltier-Elementen zur Heizung und Kühlung von Gebäuden.

Martín-Gómez et al. [90] entwickelten eine in die Fassade integrierbare Klimaanlage auf Basis von Peltier-Elementen (s. Abbildung 22). Die Wärmeabgabe in den Raum funktioniert bei diesem System über die Raumluft als strömendes Medium. Diese wird in eine Kammer hinter der Innenoberfläche der Konstruktion geleitet und dort von den Peltier-Elementen erhitzt. Dadurch entsteht ein Konvektionsstrom im Raum. In Höhe des Fußbodens wird die kühlere Luft eingesogen und auf Höhe der Decke als wärmere Luft wieder rückgeführt. Um zu den Peltier-Elementen hin eine gute Zu- und Ableitung der Wärme zu gewährleisten, sind diese mit Kühlrippen verbunden. Auf der Außenseite der Konstruktion wird die Wärmezufuhr außerdem durch Ventilatoren unterstützt. Dieser Prototyp wurde in einem 4,0 m x 2,6 m x 2,4 m großen Testkubus installiert und analysiert. Auch wenn Martín-Gómez et al. nachweisen konnten, dass ihr System zur Beheizung des Innenraums des Kubus prinzipiell funktioniert, lag der Stromverbrauch höher als bei vergleichbaren Systemen, da die Peltier-Elemente nicht mit genügend hohen COPs betrieben werden konnten.

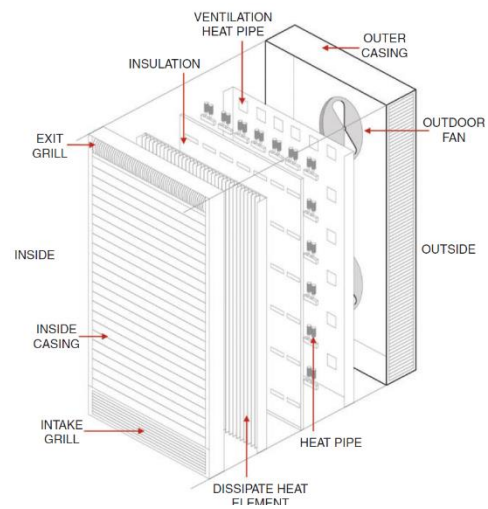


Abbildung 22 Skizze des Prototyps [90]

Auch in [91] kam ein ähnliches Konzept zur Anwendung, in dem mittels Luft als strömendes Medium die Konvektion zur Wärmeleitung und -übertragung ausgenutzt wurde. Darin wurde ebenfalls eine Technologie entwickelt, die in der Außenfassade integriert wird und durch Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage (PV) umweltfreundlich betrieben werden kann. Inspiriert wurden die Autoren unter anderem von dem Konzept von Liu et al. [92], welche ein in die Außenfassade zu integrierendes Wandelement entwickelten, das in etwa der Größe eines Fensters entspricht und auf der Außenseite ein PV-Element mit direkt hinter der Innenoberfläche liegenden Peltier-Elementen verbindet. Zwischen diesen Elementen liegt eine Luftschicht, durch die die Außenluft strömen kann. Die Strömung kann durch das Schließen von Klappen verhindert werden. In dieser Luftschicht wurden Kühlrippen für die Peltier-Elemente installiert, sodass Sonne und Luftzirkulation die Peltier-Elemente mit ausreichend

Wärmeenergie versorgen und diese effizient betrieben werden können. Die Wärme der Peltier-Elemente wird über eine Aluminiumplatte als Wärmeleitplatte an die Raumluft weitergegeben. Die Autoren konnten in ihren experimentellen Untersuchungen COPs von bis zu 2,3 messen. In [91] waren sogar COPs von bis zu 5 im Heizmodus und von maximal 1 im Kühlmodus möglich.

In einem an der TU Kaiserslautern betriebenen Forschungsprojekt entwickelten Kimmling et al. [93] ein mobiles Klimatisierungssystem und konzentrierten sich mit ihrer Technologie auf ein personennahes mobiles Wandelement, das mit Peltier-Elementen ausgestattet als kühle Oberfläche fungierte, die der Nutzer\*in im Sommer Wärme entziehen kann. Durch die geringe Distanz zwischen dem sogenannten Thecla Prototyp und den Proband\*innen kann zwischen diesen der Wärmeaustausch über Strahlung ausgenutzt werden. Während der experimentellen Untersuchungen wurden die Teilnehmer\*innen nach ihrem Behaglichkeitsempfinden befragt. In dieser grundlegenden Studie konnte der Kühleffekt der Peltier-Wand nachgewiesen werden, jedoch ohne Aussagen zur Effizienz des Systems. Außerdem stieg während der Versuche die Raumlufttemperatur an, da die Warmseite der Peltier-Elemente die transportierte Wärmeenergie wieder zurück in den Raum leitete. Mithilfe einer zusätzlichen Schicht Phasenwechselmaterials (PCM) soll dieser Wärmeeintrag in zukünftigen Untersuchungen verhindert werden.

Die beispielhaft aufgeführten Forschungsprojekte zeigen bereits unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten von Peltier-Elementen auf. Anhand der dabei verwendeten Methoden und generierten Ergebnisse lassen sich Schlüsse für die Konzeption und Untersuchungen des eigenen thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems ziehen. Dabei soll kritisch reflektiert werden, welche Erkenntnisse auch dem eigenen Projekt dienlich sind und welche Schwachstellen bereits vor Beginn der eigenen Untersuchungen ausgemerzt und verhindert werden können.

#### 2.3.4 Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik

Der in Abbildung 22 dargestellte Prototyp aus [90] verdeutlicht die Komplexität dieses Systems. Zusätzlich müssen dabei neben den Peltier-Elementen auch die Ventilatoren mit Elektrizität versorgt werden. Bereits Martín-Gómez et al. kritisieren in [90] die Ästhetik ihres Prototyps. Die von den Autoren selbst beschriebenen Vorteile der Peltier-Elemente, ihre Verlässlichkeit und die geringen Erhaltungskosten, sind durch die Komplexität des vorgestellten Systems selbst nicht mehr gegeben, da bspw. durch die beweglichen Komponenten mit der Zeit Wartungsarbeiten erforderlich werden. Zusätzlich erfolgt die Wärmeabgabe in den Raum über Konvektionsströme, wodurch Luftverwirbelungen auftreten, die mit einem höheren Staubtransport durch die Luft einhergehen [94, 95].

Der Vorteil der Prototypen in [92] und [93] liegt in der Ausnutzung der Wärmestrahlung als vorwiegender Effekt, da diese von den Nutzer\*innen als sehr angenehm wahrgenommen wird und eine Temperierung mit geringeren Temperaturen als herkömmliche konvektive



Heizsysteme ermöglicht [95, 96]. Jedoch erfolgt bei diesen Prototypen die Wärmeabgabe nur über kleine Flächen, wodurch eine höhere Wärmestromdichte erforderlich ist, die Elemente dadurch höhere Temperaturen erreichen müssen und deren Effizienz negativ beeinflusst wird. Kimmling et al. [93] kompensieren dies durch die Nähe ihrer mobilen Thecla-Wand zu den Nutzer\*innen. Dieses mobile System erfordert dabei jedoch ausreichend Platz, der nicht in jedem Büro gegeben ist. Zusätzlich findet durch die Positionierung im Inneren des Raumes eine ungewollte Erwärmung der Raumluft statt.

Aus den vorgestellten Untersuchungen wurde deutlich, dass Peltier-Elemente durchaus in Klimatisierungssysteme integrierbar sind und dabei gute COPs erreicht werden können. An den Konstruktionen ist aber auch zu erkennen, dass die gute Wärmezufuhr und -abfuhr essenziell ist für die Effizienz der Peltier-Elemente und damit für die des Gesamtsystems. Die dafür verwendeten Kühlrippen sind innerhalb von Konstruktionen in der Außenfassade sehr platzintensiv und verschlechtern, falls sie nicht von der Konstruktion verdeckt werden können, die Ästhetik maßgeblich. Bei der Konzeption eines Systems sollten die in [90] thematisierten Vorteile der Verlässlichkeit und des wartungsarmen Betriebens der Peltier-Elemente durch die Integration der Elemente in dieses Klimatisierungssystem nicht verworfen werden. Ferner wurde bereits in 2.3.1 deutlich, dass die Peltier-Elemente am effizientesten betrieben werden können, wenn sich kleine Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Seite einstellen. Durch großflächige Heizsysteme unter Ausnutzung von Strahlungswärme lässt sich bei gleichem Wärmeenergiebedarf für den Innenraum die erforderliche Wärmestromdichte und somit die maximale Temperatur auf der Warmseite reduzieren. Große Heiz- und Kühlflächen sollten also die Effizienz des Gesamtsystems verbessern können.

### 3 Thermoelektrisches Heiz- und Kühlsystem

#### 3.1 Konzeption

Wie in den dargestellten Forschungsprojekten (2.3.3) ist die grundlegende Idee des hier erforschten Heiz- und Kühlsystems die Verwendung von Peltier-Elementen als dezentrale Wärmepumpen. Der Vorteil von Wärmepumpen ist die Nutzung von Umweltwärme und dadurch die Möglichkeit, mehr Wärmeenergie nutzen zu können, als elektrische Energie zum Betreiben der Anlage bzw. des Systems benötigt wird [97]. Ziel ist es, die Peltier-Elemente hinter der Innenoberfläche der Außenwände zu installieren und durch das Bauteil die kleinen thermoelektrischen Wandler durch eine gute Wärmekontaktierung thermisch mit der Außenluft zu verbinden (Abbildung 23). Mit Hilfe eines durchfließenden elektrischen Stroms sollen die Wärmetransportfähigkeiten der Peltier-Elemente aktiviert werden. Dadurch soll im Heizfall Wärme aus der Außenluft entzogen und an das Gebäude abgegeben werden und umgekehrt im Kühlfall die Wärme über die Peltier-Elemente von innen nach außen fließen.

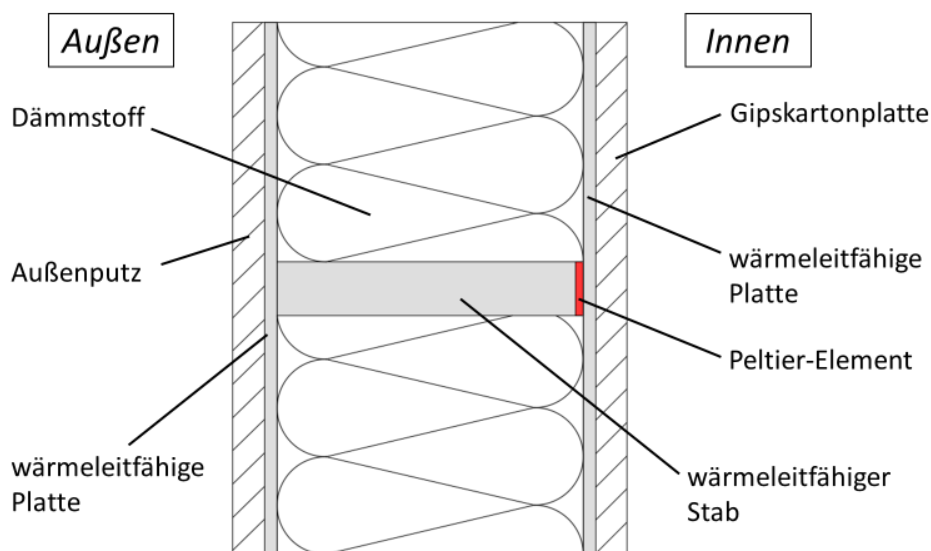


Abbildung 23 Entwurfsskizze des erforschten Heiz- und Kühlsystems am Beispiel einer Leichtbau-Außenwand

Aus 2.3.2 ist zu entnehmen, dass die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Peltier-Elementen von unterschiedlichen Faktoren und speziell von ihren thermischen Randbedingungen abhängig sind. Die kalte Seite muss effektiv mit Wärme versorgt und die Wärme auf der warmen Peltier-Seite schnellstmöglich abgeführt werden. Diese Verteilung der entstehenden und benötigten Wärme soll durch die wärmeleitfähigen Platten jeweils hinter der Innen- und Außenoberfläche sowie durch den wärmeleitfähigen Stab gewährleistet werden. Über den Stab werden Außen- und Innenklima thermisch miteinander verbunden und die wärmedämmende Eigenschaft der Wärmedämmung punktuell durchbrochen. Über diesen Weg wird im Heizfall Wärmeenergie von außen nach innen transportiert. Diese Wärme wird zuvor durch die gute Wärmeleitfähigkeit der Platte zum Stab geleitet und so eine schnelle

Zuleitung gewährleistet. Auf der Innenseite des Systems erfolgt die Wärmeableitung nach demselben Prinzip. Die vom Peltier-Element nach innen transportierte Wärme wird über die wärmeleitfähige Platte vollflächig auf der Wand verteilt und auf diese Weise schnell vom Peltier-Element weggeführt. Im Kühlfall wird der Wärmefluss umgekehrt und die Platten übernehmen jeweils die Funktion ihres auf der anderen Seite liegenden Partners. Ferner stellen die punktuellen Wärmebrücken in der Wand kein Problem dar, da der Wärmefluss aktiv vom Peltier-Element kontrolliert wird und so während des Betriebs des Temperiersystems im Winter keine Wärmeverluste entstehen. Dazu sollte das Heizsystem im Winter zumindest mit geringen Stromstärken im Dauerbetrieb sein.

Für die Materialauswahl der wärmeleitfähigen Platten und des Stabes ist eine wirtschaftliche und eine technische Betrachtung notwendig, um ein möglichst effektives System kostenoptimal herstellen zu können. Mit Wärmeleitfähigkeiten von ca.  $390 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und ca.  $220 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  sind beispielsweise Kupfer und Aluminium Materialien, die gut Wärme leiten und dabei wirtschaftlich erschwinglich sind. An den Außenputz und die Gipskartonplatte werden beim dargestellten System bauübliche Anforderungen gestellt, die es auch einzuhalten gilt. Ebenso richtet sich die Dämmstärke des Bauteils nach dem gewählten energetischen Standard.

Mit einer möglichen Wärmeleistungsabgabe von bis zu  $38 \text{ W}$  pro Element unter Verwendung des in Abbildung 20 dargestellten TEC1-12710 kann ein Beispielraum mit einer Grundfläche von  $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  und einer Höhe von  $2,7 \text{ m}$  mit 15 Peltier-Elementen beheizt werden. In diesem Raum ist eine  $5 \text{ m}$  lange Außenwand mit einem Fensteranteil von  $25\%$  das einzige Bauteil der wärmeübertragenden Umfassungsfläche. Diese Wand hat gemäß dem KfW 55 Gebäudestandard bei der dargestellten Geometrie einen mittleren U-Wert von  $0,375 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . Daraus ergibt sich nach DIN EN 12831-1 [98] an einem kalten Wintertag mit einer Außentemperatur von  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Innentemperatur von  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  für eine Luftwechselrate von  $0,7 \text{ h}^{-1}$  ein Heizwärmebedarf von etwa  $570 \text{ W}$  (Berechnung im Anhang A). Die angesetzten  $38 \text{ W}$  Leistung sind in dieser Vorbemessung aus dem Datenblatt des TEC1-12710 [99] abgeleitet (Abbildung 24).

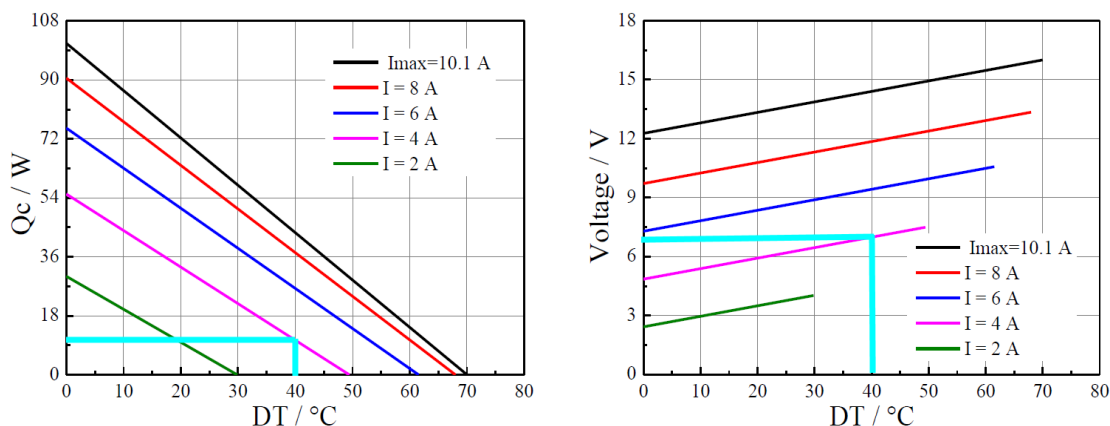


Abbildung 24 Leistungskurven des TEC1-12710 [99],  
links: Leistung auf der kalten Peltier-Seite in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz,  
rechts: erforderliche Spannung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Ausgehend von einer Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Peltier-Seite von etwa 40 K ist ein Wärmestrom auf der Kaltseite von 10 W bei einer Stromstärke von 4 A zu erwarten (s. türkise Markierungen auf der linken Seite der Abbildung 24). Für den Heizfall wird an dieser Stelle jedoch die Wärmeleistung auf der Warmseite benötigt. Nach (2.19) lässt sich die Wärmeleistung als Summe aus dem Wärmestrom der Kaltseite und der elektrischen Leistung berechnen. Auf der rechten Seite der Abbildung 24 ist für die dargestellten Randbedingungen mithilfe der türkisen Markierungen eine Spannung von 7 V abzulesen. Folglich beträgt die Wärmeleistung 38 W. Die Diagramme des Datenblattes gelten für eine Temperatur von 27 °C auf der Warmseite der Peltier-Elemente. Wie in Abbildung 24 zu sehen ist, kann das Peltier-Element auch mit höheren Stromstärken betrieben werden und dadurch größere Wärmeströme erzeugen, jedoch werden diese Werte von den Herstellern lediglich unter Laborbedingungen erreicht. Im Zuge erster Voruntersuchungen wurden bei geringeren Stromstärken bereits solche Temperaturdifferenzen erreicht, die in den Diagrammen erst mit höheren Stromstärken möglich sind. Bei der dargestellten Leistung liegt der COP des Peltier-Elementes etwa bei 1,4. Dies gilt jedoch nur für sehr kalte Tage. Aus einer Analyse der Daten eines TRJ mit extremem Winter für den Standort Kaiserslautern (vgl. Abbildung 12) zeigt sich, dass lediglich in 1,3% der Stunden eines Jahres Außentemperaturen von -5 °C bis -10 °C auftreten. Folglich sind fast über das gesamte Jahr bessere COPs zu erwarten.

### 3.2 Chancen des Systems

Aus den obigen Vorbemessungen lassen sich die Kosten des Systems ableiten. Der für die Bilanzierung verwendete Beispielraum hat eine Grundfläche von 20 m<sup>2</sup>, woraus sich bei 15 Peltier-Elementen eine Dichte von 0,75 Peltier-Elementen pro Quadratmeter Grundfläche und damit Anschaffungskosten von etwa 15 €/m<sup>2</sup> ergeben. Die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf in Deutschland beträgt 47,7 m<sup>2</sup> [100] und die durchschnittliche Haushaltsgröße 1,99 Personen pro Haushalt [101]. Daraus lässt sich eine durchschnittliche Wohnfläche für 2 Personen von etwa 96 m<sup>2</sup> berechnen. Für dieses Gebäude beliefen sich die Anschaffungskosten der Peltier-Elemente auf 1440€. Dagegen wäre eine herkömmliche Luft-Wasser-Wärmepumpe inklusive Fußbodenheizung mit Anschaffungskosten von etwa 10.000 – 20.000 € und Installationskosten von etwa 3.000 € neun- bis sechszehnmal teurer [102, 103]. Diese Vergleichswärmepumpe wird mit einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 3,0 betrieben [102]. Dem TEC1-12710 Datenblatt [99] können COP-Werte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für den Kühlfall entnommen werden. Diese sind bei einer Temperaturdifferenz von 20 K maximal 1,5 und bei 10 K etwa 3,7. Der COP für den Heizfall ist stets um 1 größer (vgl. 2.3.2). Somit sind für mildere Außentemperaturen COPs zwischen 2,5 und 4,7 möglich. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe berücksichtigt bereits unterschiedliche Effizienzen in Abhängigkeit der Außentemperatur und gibt den jährlichen Durchschnitt an. Das erforschte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem hat das Potenzial, eine vergleichbare durchschnittliche Jahreseffizienz wie die Referenzwärmepumpe zu erreichen. Der Vorteil des Systems liegt dann vor allem in den wesentlich geringeren

Anschaffungskosten.

Zusätzlich zu den geringeren Anschaffungskosten weisen die Materialien des Peltier-Systems im Vergleich zur Wärmepumpe mit Fußbodenheizung auch einen geringeren Energiebedarf sowie geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus auf. Hierzu wurde eine Analyse mithilfe des internetbasierten Lebenszyklusanalysetools eLCA [104] durchgeführt und eine Fußbodenheizung mit Kupferrohren mit einem Abstand von 200 mm und eine 7 kW Luft-Wasser-Wärmepumpe mit den Aluminiumbauteilen des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems über einen Zeitraum von 50 Jahren verglichen. Eine Betrachtung weiterer Bauteile und -stoffe war nicht erforderlich, da sowohl Fußboden- als auch Wandaufbauten der beiden Varianten nur durch die verglichenen Bauteile spezifisch sind und die übrigen Bauteile und -stoffe in beiden Varianten verwendet werden können. Für diesen Vergleich wurde das obige Referenzgebäude für zwei Personen mit einer Grundfläche von 96 m<sup>2</sup> gewählt. Das Peltier-System stößt mit 7,8 kg CO<sub>2</sub>-Äqu./m<sup>2</sup>a um 212% weniger CO<sub>2</sub> aus als die Wärmepumpe mit 24,4 kg CO<sub>2</sub>-Äqu./m<sup>2</sup>a. Auch der Energiebedarf der Wärmepumpe mit Fußbodenheizung ist mit 131,75 kWh/m<sup>2</sup>a (474,3 MJ/m<sup>2</sup>a) 3,4-mal größer als der des Peltier-Systems mit 38,5 kWh/m<sup>2</sup>a (138,6 MJ/m<sup>2</sup>a). Die Ergebnisse des Vergleiches in eLCA sind in Anhang A zusammengefasst. Sie basieren auf der ÖKOBAUDAT-Datenbank, in der über 1400 Datensätze für Bauprodukte gelistet sind [105]. Darin sind jedoch keine Daten zu Peltier-Elementen aufgeführt. Nach umfassender Recherche konnten auch in weiteren Quellen keine quantitativen Werte für die Berücksichtigung der Peltier-Elemente in der Ökobilanzierung gefunden werden. Aus diesem Grund können nur qualitative Überlegungen in die Analyse des Ressourcenverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen einfließen. Bei 0,75 Elementen pro Quadratmeter Grundfläche, wären im Gebäude 72 Peltier-Elemente in den Außenwänden installiert. Bei einer Gesamtgröße je Element von 3,6 mm x 40 mm x 40 mm entspräche dies einem Volumen von 4,15 E-4 m<sup>3</sup>. Grundsätzlich sind die Peltier-Elemente durch ihre geringen Abmessungen somit nicht ressourcenintensiv. Über die erforderlichen Ressourcen und Energien bei der Herstellung kann jedoch keine Aussage getroffen werden. Problematisch erscheint der Werkstoff Bismut in den Modulen, da dieser beim Recycling „strikt von anderen Werkstoffen getrennt“ [106] werden müsse. Aufgrund der geringen Abmessungen und verwendeten Mengen können die Auswirkungen jedoch auch hier wieder kaum abgeschätzt werden.

Ein weiterer Vorteil des Systems lässt sich aus der Wahl der Konstruktion ableiten. Ohne bewegliche Teile ist ein geringer Wartungsaufwand zu erwarten. Durch den Mangel an Heizkörpern im Gebäude wäre das System zusätzlich platzsparend. Die Peltier-Elemente bieten darüber hinaus die Möglichkeit, sowohl als Heiz- als auch als Kühlsystem verwendet zu werden. Diese Schaltbarkeit wird durch einfaches Umpolen der Kontaktierung der Peltier-Elemente erreicht. Mit einer intelligenten Steuer- und Regelungstechnik könnte die Peltier-Konstruktion somit neben der Beheizung im Winter auch einen entscheidenden Beitrag bei einem aktiven und effizienten sommerlichen Wärmeschutz leisten.

Ein weiterer positiver Aspekt ist außerdem, dass die Wärmeübertragung vom Peltier-System

in den Raum hauptsächlich über Wärmestrahlung erfolgt. Der Vorteil eines Flächentemperiersystems liegt darin, dass die Raumlufttemperatur durch die Ausnutzung der Wärmestrahlung nicht die alleinige maßgebende Größe ist. Wie in 2.1 anhand der operativen Temperatur dargestellt wurde, ermöglicht eine höhere mittlere Strahlungstemperatur trotz geringerer Lufttemperaturen eine vergleichbar hohe thermische Behaglichkeit, wodurch ein gewisses Energieeinsparpotenzial erkennbar wird, da die Raumluft auf einem niedrigeren Temperaturniveau gehalten werden kann. [95, 96]

Analog zu Wärmepumpen ist das thermoelektrische System bei Verfügbarkeit außerdem mit Sonnenenergie oder Windkraft kompatibel und wäre somit durch die Nutzung von regenerativen Energiequellen sowie unter Verwendung von Umweltwärme eine umweltfreundliche Technologie. Jedoch ist das vorgestellte Konzept auch mit Unsicherheiten und die Technologie somit mit Risiken verbunden.

### 3.3 Risiken des Systems

Einige Risiken des Systems ergeben sich bereits aus der Betrachtung der Funktionsweise der Peltier-Elemente in Kapitel 2.3.2. Nur mit einer sehr effizienten Wärmez- und -abfuhr kann ein hoher COP der kleinen Wärmepumpen gewährleistet werden. Daraus folgen Herausforderungen für die Konzeption der Wärmeübertragung innerhalb der Konstruktion. Diese soll, wie in Abbildung 23 dargestellt, mithilfe von gut wärmeleitenden Stäben und Platten erfolgen. Durch mangelhafte Zu- und Abfuhr der Wärme könnten die Peltier-Elemente jedoch überhitzen und sich deren Effizienz dadurch maßgeblich verschlechtern.

Auch wenn in den Datenblättern der Peltier-Elemente teils hohe COPs zu finden und diese im Heizfall noch höher sind, ist auch der Einfluss der thermischen Randbedingungen deutlich zu erkennen. Zum effizienten Betrieb ist eine geringe Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Peltier-Elementes erforderlich. Jedoch sind die Temperaturdifferenzen in einem Gebäude nicht steuer- und nur in geringem Maße beeinflussbar. Bei Außentemperaturen unter null ist im Gebäudeinneren seitens der Nutzer\*innen stets eine Raumtemperatur um die 20 °C erwünscht. Daraus ergeben sich bereits natürliche Temperaturdifferenzen zwischen 20 K und 30 K. Die Effizienz des Temperiersystems wird sich mit jener von Wärmepumpen messen lassen müssen. Damit besteht ein grundsätzliches Risiko, dass das System zwar effizient betrieben werden kann, jedoch weniger effizient ist als vergleichbare kommerzielle Systeme, und sich die höheren Anschaffungskosten der Wärmepumpen in Bezug auf das Peltier-System auf lange Sicht amortisieren.

Letztlich bewegt sich der Rahmen möglicher Anpassungen der Konstruktion innerhalb energetischer Standards und ästhetischer Ansprüche an eine Außenwand. Technisch mögliche Verbesserungen sind nur umsetzbar, solange diese Anforderungen auch eingehalten werden. Bei gegebenenfalls erforderlichen Optimierungen der Wärmeübertragung in der Konstruktion könnten konträre Anforderungen problematisch sein. Daher ist es sinnvoll, aus den Überlegungen der Chancen und Risiken des Systems eben solche Anforderungen als

notwendige Kriterien zu formulieren, von deren Erreichen der Erfolg des erforschten thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems abhängt.

### 3.4 Lastenheft

Folgende Anforderungen werden an die Funktionen und technischen Parameter des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems gestellt:

- Das System sollte eine energieeffiziente Beheizung und Kühlung von Gebäuden unter Verwendung von Umweltwärme und gegebenenfalls regenerativen Energiequellen gewährleisten.
- Die Wärmeübertragung vom Peltier-Element in den Raum bzw. die Wärmeableitung aus dem Raum muss gewährleistet werden, sodass durch das Flächentemperiersystem eine Wärmeverteilung über die gesamte Wandfläche erfolgt.
- Die Temperierung des gesamten Gebäudes sollte durch das Peltier-System als alleiniges System sichergestellt werden. Nur dadurch können auch die Vorteile des vorgestellten Konzepts, bspw. durch Verzicht auf bewegliche Teile, verwirklicht werden.
- Der durchschnittliche jährliche COP des Peltier-Systems sollte im Heizfall mindestens 3,0 sein. Bei geringeren Werten sind Wärmepumpen langfristig die effizientere Technologie.
- Durch das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem müssen die erforderlichen Innenraumtemperaturen bzw. ein behagliches Innenraumklima erreicht werden. Auch in Temperaturspitzen muss die Funktionsfähigkeit und Effektivität des Systems gewährleistet sein.
- Das Temperiersystem soll schaltbar sein und sowohl zum Kühlen im Sommer als auch zum Heizen im Winter eingesetzt werden können. Mithilfe einer intelligenten Steuer- und Regelungstechnik soll diese Schaltung möglichst effizient erfolgen.
- Der Erhalt des hohen Dämmniveaus der Fassade muss für verschiedene energetische Standards möglich sein. Die punktuellen Wärmebrücken dürfen dabei den Energiebedarf nicht negativ beeinflussen.
- Das Peltier-System sollte möglichst unauffällig in die Fassade integrierbar sein, um eine hohe Akzeptanz der Nutzer\*innen zu gewährleisten.
- Die Kosten des Gesamtsystems sollten über den Lebenszyklus geringer als bei oder vergleichbar mit konkurrierenden Systemen auf dem Markt sein.
- Die Langlebigkeit des Systems über die gesamte Nutzungsphase eines Gebäudes sollte sichergestellt sein. Zusätzlich muss das System wartungsfreundlich und die gegebenenfalls anfallenden Wartungen kostengünstig durchführbar sein.

Die aufgeführten Anforderungen erfordern umfassende experimentelle und simulative Untersuchungen. Bevor die ersten Versuche mit einem Prototyp durchgeführt werden konnten, waren jedoch grundlegende Versuche mit Peltier-Elementen notwendig.



## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Grundlagenversuche Peltier-Element

Die Grundlagenversuche der Peltier-Elemente dienten einer ersten Evaluation der Leistungsfähigkeit der kleinen Wärmepumpen. In den Datenblättern der Hersteller liegt der Fokus stets auf der Kühlung, da die Elemente in der Praxis vorwiegend zu diesem Zweck verwendet werden. Durch die Grundlagenversuche wurde die Effizienz und die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente für beide Modi, Heizen und Kühlen, untersucht. Zusätzlich fand ein Abgleich zwischen den in Kapitel 2.3 dargestellten theoretischen Grundlagen und den in den Versuchen gemessenen Werten statt. Beispielsweise wurde der Frage nachgegangen, ob die mithilfe der Gleichungen in Kapitel 2.3 berechneten Wärmeströme und COPs die Ergebnisse der Messungen abbilden können. Darüber hinaus basieren die Informationen der Datenblätter der Hersteller auf aufwendigen Laborversuchen, in denen die jeweiligen Seiten der Peltier-Elemente durch entsprechende Geräte gekühlt bzw. beheizt werden. Die darin dargestellten Diagramme wurden wiederum mithilfe der Gleichungen in Kapitel 2.3 erstellt. In den Grundlagenversuchen wurden die Peltier-Elemente unterschiedlichen thermischen Randbedingungen ausgesetzt, sodass speziell dieser Einfluss untersucht werden konnte, da er für die Funktionalität des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle spielt. Ferner wurden im Zuge der Grundlagenversuche zwei Peltier-Modelle analysiert und miteinander verglichen, um in die Konstruktion des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems ein möglichst effizientes Modell zu integrieren. Neben dem bereits vorgestellten TEC1-12710 wurde das zweistufige Modell TEC2-19006 in den Experimenten verwendet.

Für die ersten Untersuchungen wurden die Peltier-Elemente nacheinander zwischen zwei zehn Zentimeter langen Kupferstäben eingespannt und die Konstruktion mit 6 cm dicker Wärmedämmung WLG 035 ummantelt. In Abbildung 25 ist die Skizze des Versuchskörpers dargestellt.

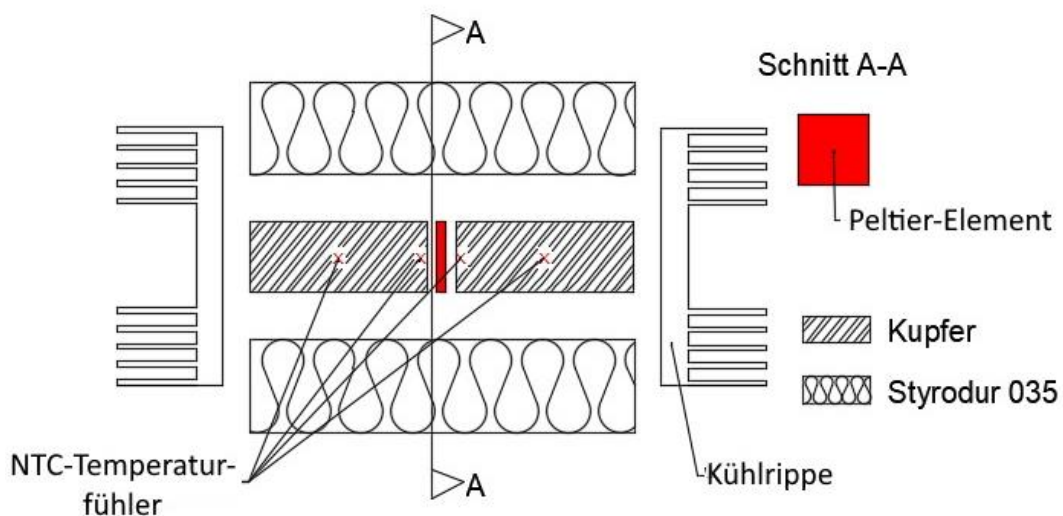


Abbildung 25 Skizze des Versuchskörpers für die Grundlagenversuche [82]

Zur besseren Wärmez- und -ableitung wurden die Enden der Kupferstäbe zusätzlich mit Kühlrippen versehen. Durch die größere Kontaktfläche zur Luft sollte so gewährleistet werden, dass die Wärme auf der kalten Seite der Peltier-Elemente effektiv zur Verfügung gestellt wird und umgekehrt sollte auf der warmen Seite die vom Peltier-Element transportierte Wärme schnellstmöglich konvektiv durch die Luft abgeführt werden. Zur Messung der Temperatur der beiden Peltier-Seiten wurde jeweils ein Loch im Kupferstab mit kleinstmöglichem Abstand zum Peltier-Element gebohrt und darin ein NTC-Temperaturfühler eingebracht. Mit einem Abstand von 5 cm wurde ein weiterer NTC-Sensor in der Mitte des Kupferstabes installiert, um mit dessen Hilfe Rückschlüsse über den Wärmestrom innerhalb der Konstruktion ziehen zu können. Die Kupferstäbe hatten, wie die Peltier-Elemente, eine Querschnittsfläche von 4 cm x 4 cm. Die Temperaturen wurden jeweils mittig im Stab gemessen. Die verwendeten NTC-Temperaturfühler haben eine Grenzabweichung von  $\pm 0,2$  K für einen Temperaturbereich zwischen 0 °C und 70 °C. Unterhalb von 0 °C beträgt diese Grenzabweichung  $\pm 0,4$  K. Mithilfe einer Wärmeleitpaste wurde zwischen dem Peltier-Element und den Kupferstäben sowie in den Bohrlöchern zwischen den NTC-Temperaturfühlern und dem jeweiligen Kupferstab die thermische Kontaktierung verbessert. Auf diese Weise wurde verhindert, dass die Wärmeleitung durch kleine Lufteinschlüsse gehemmt wird. In Abbildung 26 ist der fertige Aufbau des Versuchskörpers und daneben die Positionierung der Kupferstäbe und des Peltier-Elementes abgebildet.

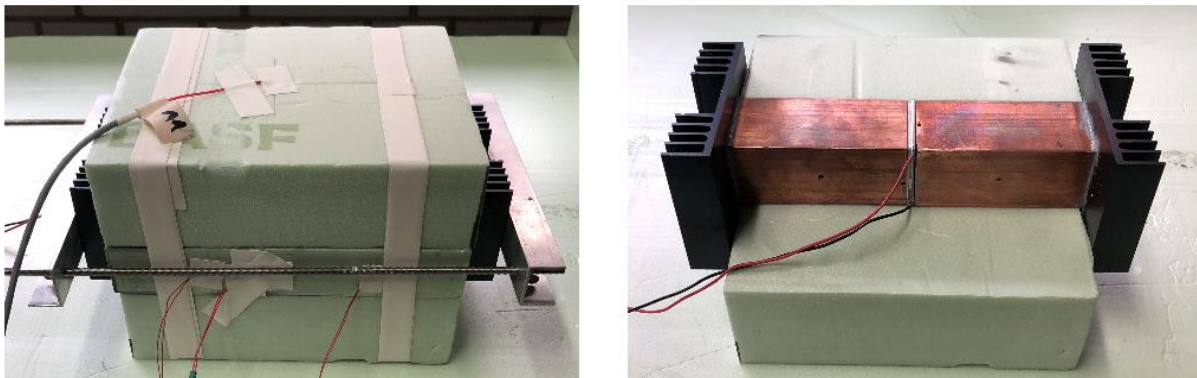


Abbildung 26 links: fertiger Versuchskörper; rechts: Peltier-Element zwischen den Kupferstäben

Die ersten Messungen fokussierten sich auf die Leistungsfähigkeit der kleinen Wärmepumpen in Abhängigkeit zur Stromstärke. Der Versuchskörper stand in den Laborräumen des Fachgebiets an der TU Kaiserslautern und wurde ohne zusätzliche Wärmequellen oder -senken betrieben. Dadurch lag die Umgebungstemperatur des Versuchskörpers für beide Seiten bei etwa 20 °C. Ergänzend wurden auf beiden Seiten der Konstruktion in den anschließenden Versuchen Wärmequellen und/oder Wärmesenken installiert, sodass neben dem Einfluss der Stromstärke auch der Einfluss der thermischen Randbedingungen auf die Peltier-Elemente untersucht werden konnte. Konzipiert wurden sowohl Versuche, in denen lediglich an einer Seite eine Wärmequelle oder -senke angebracht wurde, als auch solche, in denen auf der einen Seite eine Wärmequelle und auf der anderen eine Wärmesenke installiert

wurde. Durch die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (etwa 394 W/K) und die geringe Länge der Kupferstäbe beeinflussten diese Maßnahmen die Peltier-Elemente sehr stark.

In 0,25 A Schritten wurde die Stromstärke stufenweise erhöht. Ein Versuch wurde dabei so lange mit einer Stromstärke betrieben, bis sich ein quasistationärer Zustand einstellte, sowohl auf der warmen als auch auf der kalten Peltier-Seite also kaum noch Temperaturveränderungen gemessen wurden. Die geringste Stromstärke in den Versuchen war 0,25 A und die höchste 2,5 A. Mithilfe der Wärmesenken und -quellen wurde dem Versuchskörper so viel Energie entzogen bzw. zugeführt, dass für jede Stromstärke unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Seite messbar waren. Die Temperaturdifferenzen reichten in den Versuchen von 0 K bis 60 K, jedoch konnte nicht jede Temperaturdifferenz mit jeder Stromstärke erreicht werden, da die Peltier-Elemente wegen der geringen Leistung bei kleinen Stromstärken nur einen kleineren Temperaturbereich abdecken konnten. Die Wärmesenken und -quellen wurden so eingestellt, dass für jede Stromstärke die Temperaturdifferenzen in 5 K Schritten ein möglichst breites Spektrum abdeckten (s. Tabelle 6).

Tabelle 6 erreichte Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Peltier-Seite in Abhängigkeit der Stromstärke als Leistungsspektrum des Peltier-Elementes; Rot: Messungen TEC1-12710; Schwarz: TEC2-19006

I [A]	Temperaturdifferenz der Peltier-Seiten												
	0 [K]	5 [K]	10 [K]	15 [K]	20 [K]	25 [K]	30 [K]	35 [K]	40 [K]	45 [K]	50 [K]	55 [K]	60 [K]
0,25	x x	x x	x										
0,5	x x	x x	x x	x	x								
0,75	x x	x x	x x	x	x	x							
1,0	x x	x x	x x	x x	x	x	x						
1,25	x x	x x	x x	x x	x	x	x						
1,5	x	x x	x x	x x	x x	x	x	x	x	x			
1,75	x	x	x x	x x	x x	x x	x	x	x	x			
2,0	x	x	x	x x	x x	x x	x x	x	x	x	x	x	x
2,5					x	x	x	x	x				

Die Temperaturdifferenzen beziehen sich auf das Ende einer Messung, also auf einen Zeitpunkt, an dem sich ein beinahe stationärer Zustand einstellte. Die an der Warmseite des Peltier-Elementes gemessene Temperatur änderte sich zu diesem Zeitpunkt innerhalb einer Minute nur noch um 0,01 K. In Abbildung 27 sind beispielhaft zwei Temperaturverläufe beider Peltier-Seiten des zweistufigen Moduls als Ergebnis aus Versuchen mit einer Stromstärke von 2,0 A dargestellt. Im oberen Versuch wurde der Probekörper ohne thermische Beeinflussung bei einer Raumlufttemperatur von 21 °C betrieben, im unteren war auf der kalten Seite eine Wärmesenke angebracht, die lokal die Temperatur konstant auf 0 °C senkte.

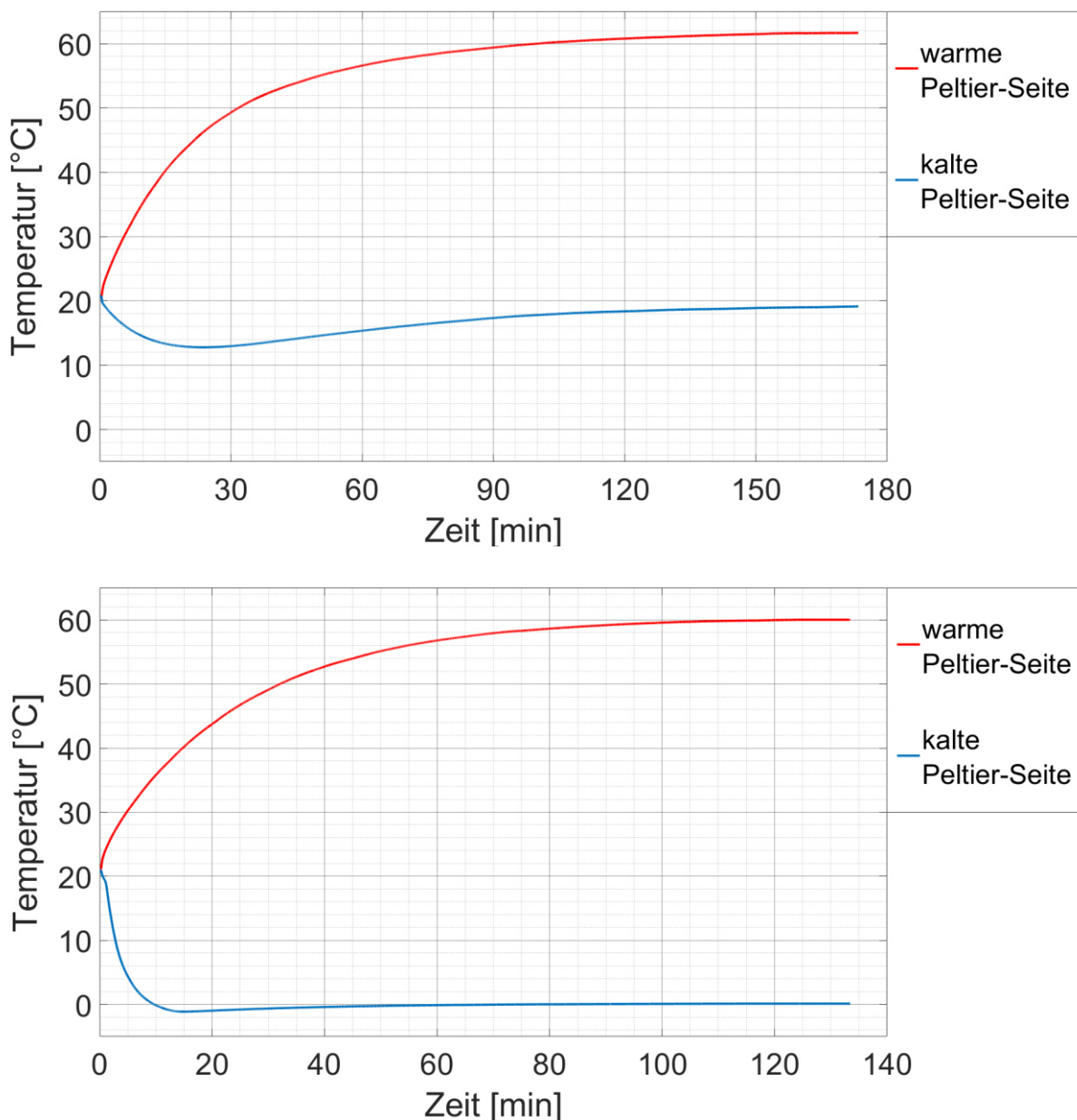


Abbildung 27 Temperaturverlauf der beiden Peltier-Seiten des TEC2-19006

Oben: Versuch ohne Wärmesenke oder -quelle, Raumtemperatur 21 °C

Unten: Versuch mit Wärmesenke mit 0 °C auf der kalten Peltier-Seite, Raumtemperatur 21 °C

In beiden Versuchen ist der Effekt des Wärmerückflusses gut zu erkennen. Zunächst fällt die Temperatur auf der kalten Seite in Blau im unteren Diagramm unter null, ehe sie mit steigender Temperaturdifferenz wieder bis auf 0 °C ansteigt. Im oberen Diagramm liegt das Temperaturminimum bei 12 °C. Zum Ende hin steigt die Temperatur auf der Kaltseite zurück auf 19,3 °C. Die Wärme wurde in der vorgestellten Konstruktion somit nicht effektiv von der Warmseite weggeleitet. Auffällig ist auch, dass in beiden Versuchen die maximalen Temperaturen auf der warmen Peltier-Seite (rote Linie) mit 61,7 °C und 60 °C nur um etwa 3% voneinander abweichen und in der gleichen Größenordnung liegen. Die Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten ist jedoch im Versuch mit Wärmesenke mit 60 K um fast 42% höher als beim Versuch ohne Wärmesenke mit 42,4 K. Die erforderliche elektrische Leistung in den beiden Versuchen war nahezu identisch. Bei einer Stromstärke von 2,0 A stellte sich beim Versuch mit Wärmesenke eine Spannung von 7,0 V und beim Versuch ohne Wärmesenke eine Spannung von 6,9 V ein. Auch wenn es auf den ersten Blick scheint, als würde die Wärmesenke die Leistung des Peltier-Elementes kaum beeinflussen, immerhin wurden in beiden Versuchen in etwa die gleichen Temperaturniveaus auf der Warmseite bei gleicher elektrischer Leistung erreicht, zeigen die Gleichungen (2.21) und (2.22), dass beim Versuch mit Wärmesenke weniger Wärme vom Peltier-Element transportiert wird. Auf der warmen Seite sind die durch den Peltier-Effekt transportierte Wärme mit einer Abweichung von 1% und die Joulesche Wärme mit 1,5% in beiden Versuchen in etwa gleich groß. Durch die 42% höhere Temperaturdifferenz zwischen beiden Versuchen ist jedoch der Wärmerückfluss wegen des linearen Verhältnisses im Versuch mit Wärmesenke ebenfalls um 42% höher als ohne. Auf der Kaltseite stellt sich durch das geringere Temperaturniveau zusätzlich ein geringerer Peltier-Effekt ein.

Mithilfe dieser ersten Ergebnisse konnte bereits der Effekt eines kalten Winters auf die Peltier-Elemente abgeschätzt werden. Diese zeigten, dass durch hohe Temperaturdifferenzen an sehr kalten Wintertagen weniger Wärme in den Innenraum transportiert werden kann. Umfassende Untersuchungen zur Energieeffizienz und zu den COPs während der aufgezeigten Grundlagenversuche werden in den Kapiteln 7.1 und 7.2 näher vorgestellt. Mit dem dargestellten System waren keine direkten Messungen der Wärmeströme möglich. Die Untersuchungen zur Energieeffizienz konnten daher zunächst nur mit den Gleichungen aus Kapitel 2.3 durchgeführt werden. Dazu wurden die Messdaten aus den Grundlagenversuchen mithilfe der theoretischen Formeln ausgewertet (Kapitel 7.1). Um diese Ergebnisse mit rein messtechnischen Daten vergleichen zu können, wurde der Grundlagenversuchskörper angepasst. Durch die Kürze der Kupferstäbe sind nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen den beiden in einem Stab angebrachten Temperatursensoren messbar. Diese Differenzen können innerhalb der Grenzabweichungen der NTC-Sensoren liegen, sodass dann unter Berücksichtigung der systematischen Fehler keine aufschlussreichen Ergebnisse generierbar waren. Auch die Verwendung von Wärmeflussmessplatten lieferte keine brauchbaren Ergebnisse, da diese invasiv maßen und innerhalb der Konstruktion die Wärmeflüsse beeinflussten. In einem neuen Versuchskörper wurde daher auf der warmen Peltier-Seite der 10 cm lange Kupferstab durch einen 100 cm langen Kupferstab ersetzt. Ein

Temperaturfühler wurde wieder unmittelbar am Peltier-Element angebracht, der zweite dieses Mal jedoch nicht mehr in der Mitte, sondern am anderen Ende des Stabes. In Kombination mit einer Wärmesenke konnten auf diese Weise ausreichend große Temperaturdifferenzen gemessen und der Wärmestrom berechnet werden. Zur Vermeidung zu hoher Wärmeverluste über die Länge des Kupferstabes wurde zusätzlich die Dicke der ummantelnden Wärmedämmung auf 30 cm erhöht und damit die Wärmedämmfähigkeit im Vergleich zum vorherigen Aufbau verfünffacht. Auch in dieser Konstruktion wurden an den Enden der Stäbe jeweils Kühlrippen angebracht. Der Aufbau entsprach somit grundsätzlich jenem des ersten Versuchskörpers aus Abbildung 26, nur dass die Dimensionen des Kupferstabes auf der Warmseite des Peltier-Elementes und die der Wärmedämmung angepasst wurden. In Abbildung 28 ist links der noch nicht fertiggestellte Versuchskörper dargestellt. Das Peltier-Element ist auf der linken Seite im Bild an den Kabeln und der dünnen Trennung zwischen den beiden Kupferstäben zu erkennen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der fertige Versuchskörper zu erkennen. Die Abmessungen des Quaders betragen 112 cm x 62 cm x 62 cm.



Abbildung 28 links: Peltier-Element zwischen den zwei unterschiedlich langen Kupferstäben  
rechts: fertiger Versuchskörper mit neuen Abmessungen

In diesem Versuchskörper wurde bereits nur noch das zweistufige TEC2-19006 Modell verwendet. Ein Vergleich der Effizienz der beiden vorgestellten Modelle zeigte, dass das zweistufige Modell effizienter betrieben werden konnte. Dies war vor allem auf die größeren Bereiche der Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite zurückzuführen (vgl. Tabelle 6). Beispielsweise erreichte das TEC1-12710 eine Temperaturdifferenz von etwa 20 K erst bei einer Stromstärke von 1,5 A und einer Spannung von 3,0 V. Dieselbe Differenz war beim TEC2-19006 bereits mit 0,75 A und 2,7 V auf einem vergleichbaren Temperaturniveau möglich. Das zweistufige Modul konnte mit geringeren Stromstärken somit höhere Temperaturdifferenzen erreichen. Aus diesem Grund fokussierten sich die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen der Prototypen auf das effizientere zweistufige TEC2-19006. Wie in Tabelle 6 weiter zu sehen ist, konnten mit diesem Modul auch wesentlich höhere Temperaturdifferenzen erreicht werden, sodass das TEC2-19006 einen größeren Einsatzbereich abdeckt und durch das Erreichen von höheren Temperaturdifferenzen bei niedrigeren Stromstärken einen effizienteren Betrieb ermöglicht.

## 4.2 Laborversuche der Prototypen

In den anschließenden Laborversuchen wurden erste Prototypen des in der Entwurfsskizze in Abbildung 23 vorgestellten thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems untersucht. Ziel der Experimente war eine Analyse der Leistungsfähigkeit der Konstruktion sowie die Messung der Oberflächentemperaturen für unterschiedliche Systemleistungen (Auswertung in Kapitel 7.3). Die Ergebnisse sollten auch für die Simulationen als Validierungsgrundlage dienen und eine realitätsnahe Modellierung ermöglichen. Der Vorteil der Untersuchungen im Labor lag unter anderem in den stationären thermischen Randbedingungen, da dort konstante Temperaturen um die 20 °C herrschten. Der Einfluss realistischer Klimabedingungen auf die Konstruktion wurde anschließend in den Freilandversuchen im Kubus untersucht. Zunächst wurde ein Prototyp entwickelt, in dem lediglich ein zentrales Peltier-Element installiert wurde (Abbildung 29). Mithilfe von simulativen Voruntersuchungen und unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Aspekte wurden zuvor die Materialien und der Aufbau der Konstruktion gewählt. Als wärmeleitendes Material der Leiterstäbe und Verteilerplatten erwies sich Aluminium als optimaler Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit, Verarbeitbarkeit und den technischen Anforderungen an das Material. Die beiden Aluminium- bzw. Gipskartonplatten wurden mithilfe von Gewindestangen miteinander befestigt und die Wärmedämmung dazwischen eingespannt. Diese Gewindestangen wurden wegen der vergleichsweise schlechten Wärmeleitung aus PVC hergestellt, sodass der zusätzliche Wärmetransport zwischen beiden Wärmeleitplatten begrenzt wurde. Auf diese Weise sollten die beiden Platten bestmöglich thermisch voneinander entkoppelt und trotzdem die Stabilität des Systems sichergestellt werden. Auch in diesem Versuchskörper wurde an den Kontaktflächen zwischen den jeweiligen Aluminiumbauteilen sowie zwischen dem Peltier-Element und den Aluminiumbauteilen wieder die thermische Kontaktierung mithilfe von Wärmeleitpaste verbessert. Die Kennwerte der wichtigsten Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe sind im Anhang B tabellarisch aufgelistet.

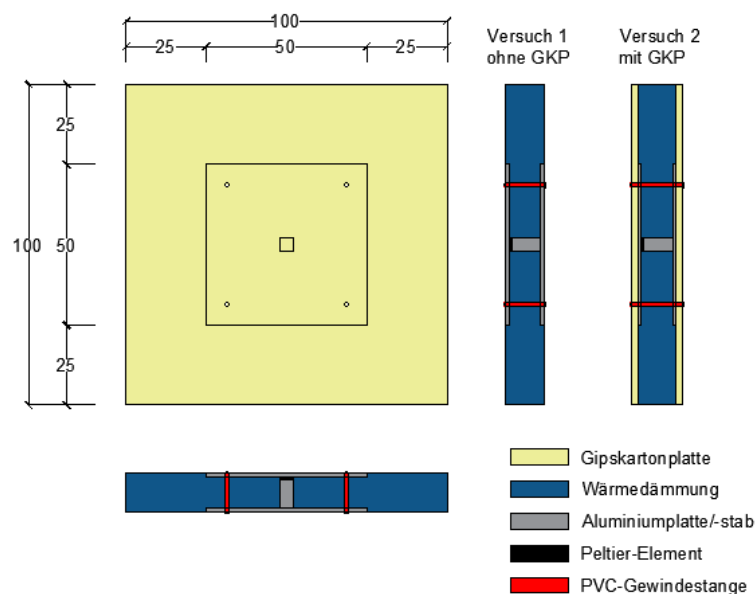


Abbildung 29 Skizze des ersten Prototyps mit einem Peltier-Element für zwei Versuchsreihen, mit und ohne Gipskartonplatte

Der erste Prototyp hatte eine Fläche von 100 cm x 100 cm und war etwa 12 cm dick. Als Dämmung wurde eine 10 cm dicke XPS Dämmplatte mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK gewählt, die Gipskartonplatten waren jeweils 10 mm dick. Wie in Abbildung 29 zu sehen ist, waren die wärmeverteilenden Platten mit den Maßen 50 cm x 50 cm x 0,5 cm kleiner als die darüberliegenden Gipskartonplatten. In der ersten Versuchsreihe wurde die Oberflächentemperatur der Aluminiumplatte gemessen, die Verkleidung aus Gipskarton war zu diesem Zeitpunkt noch nicht angebracht (Abbildung 30, links). Es wurden vier NTC-Temperaturfühler auf der Platte befestigt. Ein Temperaturfühler wurde in Höhe des Peltier-Elementes in der Mitte der Platte installiert, die weiteren wurden in Abständen von 5 cm, 11 cm und 21 cm zu diesem Sensor in vertikaler Richtung angeordnet, sodass der Temperaturverlauf über die Fläche nachvollzogen werden konnte. In der anschließenden Versuchsreihe wurden die Gipskartonplatten als zusätzliche äußere Schicht eingebaut und die Temperaturfühler in gleicher Anordnung wie zuvor auf der Verkleidung angebracht (Abbildung 30, rechts).

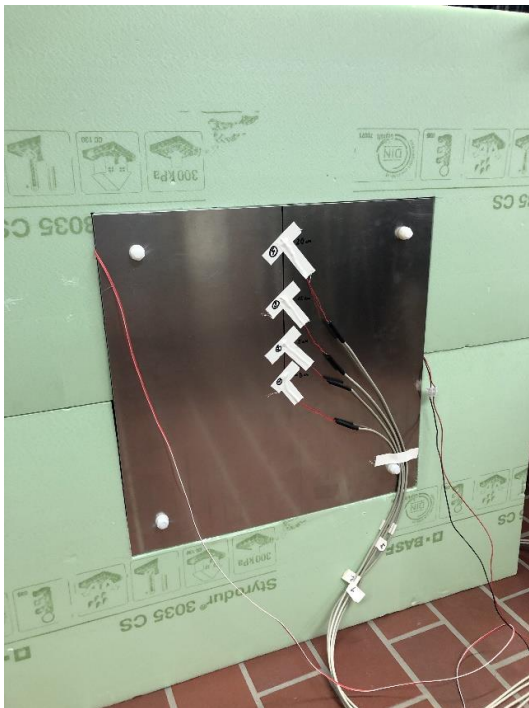


Abbildung 30 links: erster Prototyp ohne Gipskartonplatte, Temperaturmessung auf der Aluminiumplatte  
rechts: erster Prototyp mit Gipskartonplatte, Temperaturmessung auf der Gipskartonplatte

Analog zu den Grundlagenversuchen wurde jede experimentelle Untersuchung am ersten Prototyp so lange durchgeführt, bis sich ein beinahe stationärer Zustand einstellte. Die Messwerte der Oberflächentemperaturen auf der Aluminium- und auf der Gipskartonplatte dienen zur Validierung der Wandmodelle in den thermischen Bauteilsimulationen in VOLTRA und TRISCO (Kapitel 5.1). Zusätzlich wurde anhand der Oberflächentemperaturen die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente innerhalb der Konstruktion des Prototyps untersucht und erste Abschätzungen zur Effizienz des Gesamtsystems ermöglicht (Kapitel 7.3). Zunächst wurde jedoch der Prototyp in Freilandversuchen unter instationären Klimabedingungen analysiert.



### 4.3 Freilandversuche der Prototypen

Ziel der Freilandversuche war es, die Einflüsse realistischer thermischer Randbedingungen auf die Peltier-Konstruktion zu analysieren. Darüber hinaus sollten System-COPs für unterschiedliche Außentemperaturen bestimmt, also die Effizienz des Systems untersucht werden (Auswertung in Kapitel 7.4). Vor allem wegen der in Kapitel 2.3 dargelegten Abhängigkeit der Peltier-Elemente von ihren unmittelbaren thermischen Randbedingungen waren diese Untersuchungen erforderlich, da nur so die Leistungsfähigkeit der Gesamtkonstruktion bewertet werden konnte. Auch wenn die Peltier-Elemente in den Grundlagenversuchen in Kapitel 4.1 bereits unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt waren, lag der Fokus in diesen Untersuchungen noch auf der Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente selbst. In den Freilandversuchen wurde vielmehr die Leistungsfähigkeit der Gesamtkonstruktion analysiert. Wie in den vorangegangenen Laborversuchen wurde auch in diesen Versuchen die Temperaturverteilung auf der Gipskartonplatte untersucht. Versuche ohne Gipskartonplatten wurden nicht vorgenommen, es wurde lediglich der gesamte Prototyp analysiert.

Um die klimatischen Randbedingungen eines echten Gebäudes für die Peltier-Konstruktion so realitätsnah wie möglich abzubilden, waren auf den jeweiligen Seiten des Prototyps unterschiedliche Temperaturen erforderlich. Analog zur Rauminnenluft in einem Gebäude wurden auf der einen Seite Temperaturen um die 20 °C benötigt, während auf der anderen Seite die Temperaturen entsprechend dem Wetter schwankten. Aus diesem Grund wurde der Prototyp in einem Testkubus installiert, welcher im Außenbereich der TU Kaiserslautern aufgebaut wurde (Abbildung 31, links). Im Kubus konnte durch das Peltier-System die Lufttemperatur gesteuert werden, während sich draußen unterschiedliche Temperaturniveaus einstellten. Die übrigen Seiten des Kubus bestanden aus 18 cm dicken XPS Dämmplatten mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK. Das Innenvolumen des Würfels betrug etwa 1 m<sup>3</sup>.

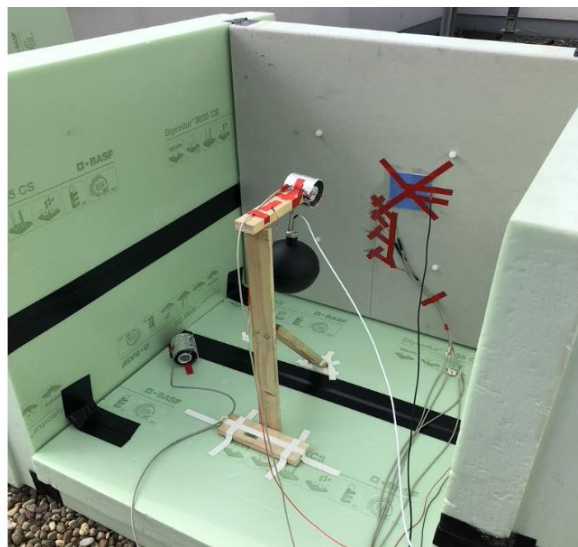


Abbildung 31 links: fertiger Kubus im Außenbereich der TU Kaiserslautern mit eingebautem Prototyp  
rechts: Messtechnik im Innenraum des Kubus

Im Inneren wurden an verschiedenen Positionen Temperaturfühler installiert, um so die Temperaturänderungen durch das Peltier-System überwachen zu können (Abbildung 31, rechts). Von der Strahlung im Raum abgeschirmte NTC-Sensoren maßen in den Versuchen die Raumlufftemperatur in unterschiedlichen Höhen. Einer dieser Sensoren befand sich in Bodennähe, ein weiterer wurde in etwa 70 cm Höhe an der Halterung des Globe-Thermometers angebracht. Dieses Globe-Thermometer diente der Messung der Strahlungswärme und wurde in der Mitte des Raumes in etwa 50 cm Höhe positioniert. Zur Messung der Oberflächentemperaturen wurden weiterhin vier NTC-Sensoren verwendet. Zusätzlich wurde ein NTC-Sensor zur Messung der Außentemperatur außerhalb des Kubus installiert.

In den ersten Wochen der Versuchsreihe stellte sich heraus, dass die Konstruktion mit einem Peltier-Element nicht ausreichend leistungsfähig war, um den Innenraum des Kubus annähernd auf eine Temperatur von 20 °C zu beheizen. Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, fiel die Raumlufftemperatur (blaue Linie) im Kubus trotz eingeschaltetem Prototyp bei einer Stromstärke von 2 A gegen 5:30 Uhr sogar unter 10 °C. Die Außentemperatur (orangene Linie) lag zu diesem Zeitpunkt unter -5 °C. In der dargestellten Nacht ist zwar an der Differenz zwischen der mittleren Oberflächentemperatur der Wand (schwarze Linie) und der Raumlufftemperatur erkennbar, dass das Peltier-Element heizte, jedoch nicht in ausreichendem Maße. Die mittlere Wandtemperatur bezieht sich in dieser Auswertung lediglich auf den Bereich direkt über der beheizten Aluminiumplatte und würde für die gesamte Wandkonstruktion niedriger ausfallen.

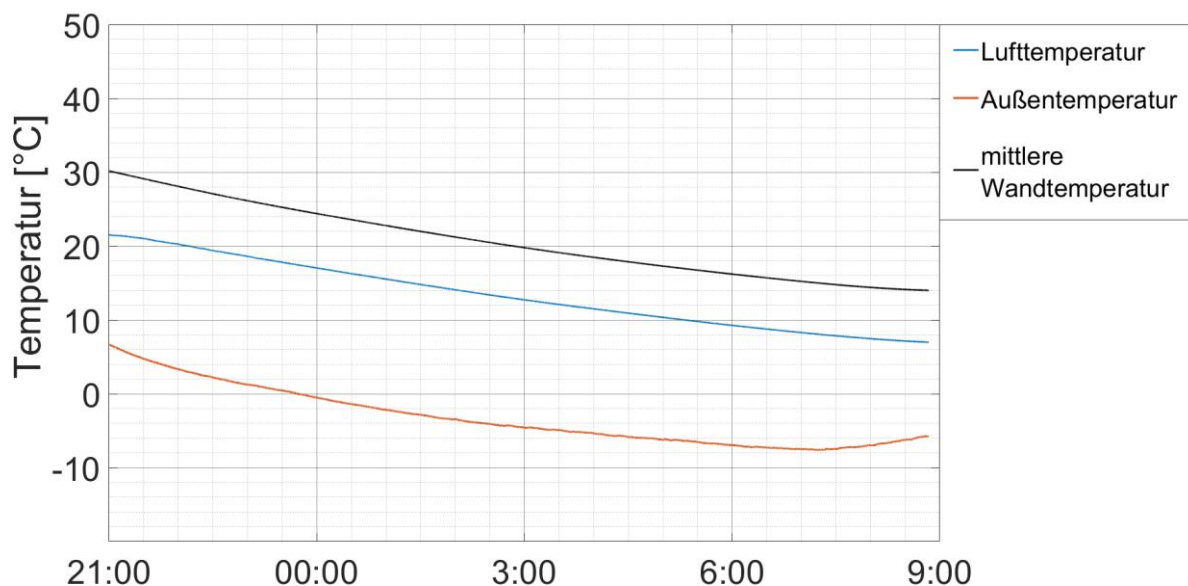


Abbildung 32 Gegenüberstellung der Lufttemperatur, Außentemperatur und der mittleren Wandtemperatur über der Aluminiumplatte des ersten Prototyps in der Nacht eines kalten Frühlingstages am 31.03.2020

Um das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem energetisch bewerten und in den Freilandversuchen analysieren zu können, war somit eine neue leistungsfähigere Konstruktion

erforderlich. Daher wurde ein neuer Prototyp konstruiert, in dem nun vier Peltier-Elemente mit einem horizontalen als auch vertikalen Abstand von 50 cm zueinander angebracht wurden. Zu den äußeren Rändern betrug der Abstand der Peltier-Elemente je 25 cm. Zusätzlich wurde die Dicke der Dämmung auf 18 cm erhöht, sodass der neue Prototyp mit einem U-Wert von  $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$  einem KfW55 Gebäudestandard entsprach. Auch die Aluminiumplatten zur Wärmeverteilung wurden auf eine Größe von  $1 \text{ m}^2$  vergrößert und deckten somit die gesamte Fläche des Prototyps ab. In Abbildung 33 ist der zweite Prototyp skizziert. Bei diesem Prototyp wurde die äußere Gipskartonplatte durch eine wasserabweisende Zementfaserplatte ersetzt, um so die Konstruktion vor Regen und Nässe zu schützen. Wegen einer zu hohen Hitzeentwicklung innerhalb der Konstruktion des ersten Prototyps musste außerdem das Wärmedämmmaterial ausgetauscht werden. In einem Versuch zur Kühlung des Kubus im Sommer 2020 erhitze sich ein Aluminiumstab so stark, dass die XPS-Dämmung lokal zu schmelzen begann. Im neuen Prototyp wurde daher Mineralwolle verwendet, die eine wesentlich bessere Hitzebeständigkeit und ebenfalls eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$  aufweist.

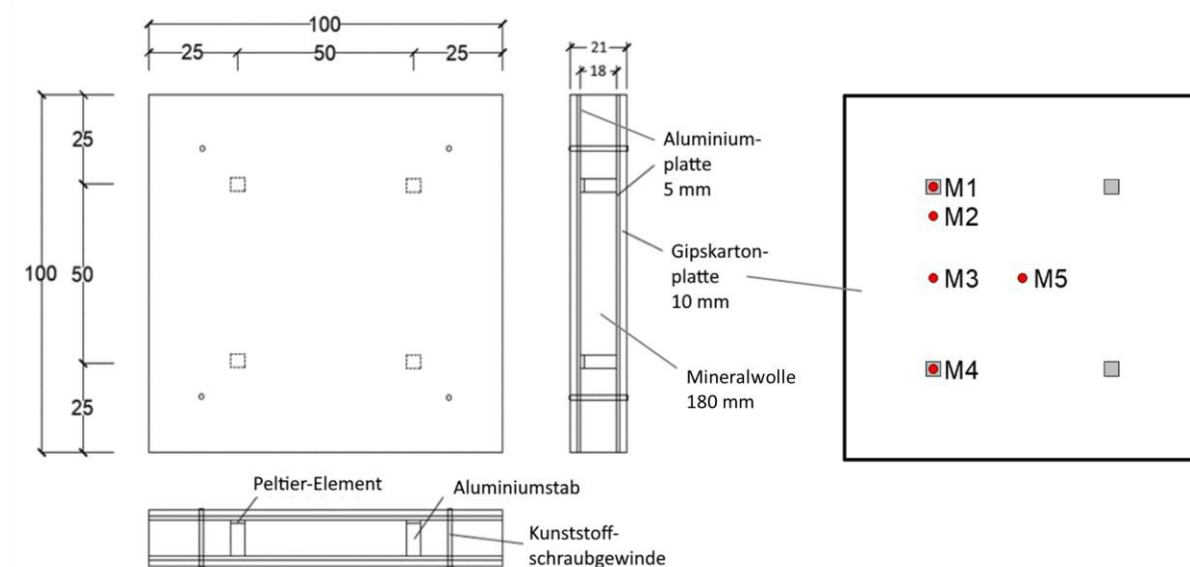


Abbildung 33 Systemskizze des zweiten Prototyps mit vier Peltier-Elementen und Anordnung der NTC-Temperaturfühler

Zur Messung der Oberflächentemperatur wurden fünf NTC-Temperaturfühler auf der Innenoberfläche verteilt (Abbildung 33, rechts). Die zwei Sensoren M1 und M4 wurden unmittelbar über zwei Peltier-Elementen auf der Gipskartonplatte angebracht, M2 und M3 maßen die Temperatur zwischen diesen beiden Peltier-Elementen. Mit dem Sensor M5 sollte die Temperatur in der Mitte erfasst werden, an einem Punkt, der von allen Peltier-Elementen gleich weit entfernt war. Der Temperaturfühler zur Messung der Außenluft wurde von der äußeren Konvektion abgeschirmt und schattig positioniert, sodass die Strahlungswärme der Sonne nicht das Messergebnis beeinflussen konnte.

Im Rahmen der Errichtung des neuen Prototyps wurde zusätzlich die Konstruktion der

Anschlüsse der Peltier-Elemente optimiert. Waren im ersten Prototyp die Peltier-Elemente lediglich mithilfe der Wärmeleitpaste an der Aluminiumplatte angeklebt, sicherten im neuen Aufbau kleine Winkelkonstruktionen eine stabile Befestigung der Peltier-Elemente an der Aluminiumplatte und am Aluminiumstab (Abbildung 34, rechts). Durch diese Konstruktionen war auch der Druck zwischen diesen Bauteilen besser einstellbar, sodass die Wärmeleitung innerhalb der Konstruktion verbessert wurde. Da Wärmeleitpaste über die Zeit austrocknet und dadurch die Wärmeleitfähigkeit abnimmt und darüber hinaus durch die neue Befestigung auch die Klebefähigkeit der Paste nicht mehr erforderlich war, wurde die Wärmeleitpaste durch dünne Grafitplättchen ersetzt (Abbildung 34, links), die eine bessere Wärmeleitfähigkeit aufweisen, nicht austrocknen und ebenfalls verhindern, dass kleine Luft einschüsse den Wärmefluss hemmen. Zur Verhinderung eines thermischen Kurzschlusses zwischen den beiden Seiten des Peltier-Elementes wurde zwischen den Winkeln und den kleinen Wärmepumpen ein Luftspalt gelassen und dieser mit Mineralwolle befüllt.

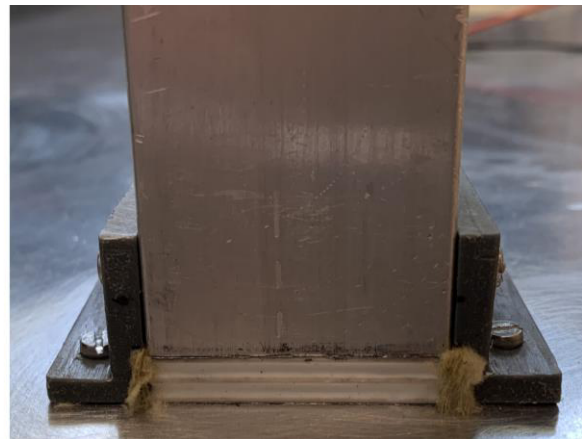
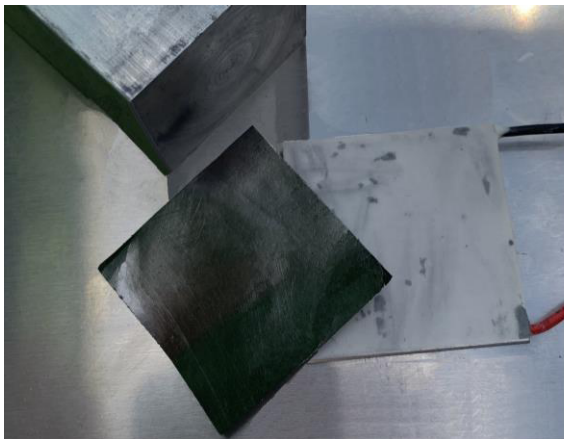


Abbildung 34 links: Grafitplättchen als Ersatz der Wärmeleitpaste zum Erreichen eines möglichst guten Wärmeverbundes zwischen Peltier-Element und den Aluminiumbauteilen  
rechts: Winkelkonstruktion zur Befestigung der Peltier-Elemente an der Aluminiumplatte und am Aluminiumstab

Die experimentellen Untersuchungen mit dem neuen, optimierten Prototyp erfolgten zur Analyse der Wärmeleistung über einen Zeitraum von etwa acht Monaten von September 2020 bis April 2021. Auf diese Weise konnte eine große Spanne an Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen gemessen und die Leistungsfähigkeit des Prototyps für ein breites Spektrum unterschiedlicher thermischer Randbedingungen untersucht werden. Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, konnte der neue Prototyp die erforderliche Raumtemperatur von etwa 20 °C im Kubus über einen längeren Zeitraum bei Außentemperaturen von bis zu -3 °C aufrechterhalten. Die mittlere absolute Abweichung vom Soll-Wert von 20 °C betrug während der betrachteten Woche 0,5 K, was auf die Oszillation um den Soll-Wert zurückzuführen ist. Das neue System erwies sich als ausreichend leistungsstark und konnte über den gesamten Versuchszeitraum den Kubus effektiv beheizen.

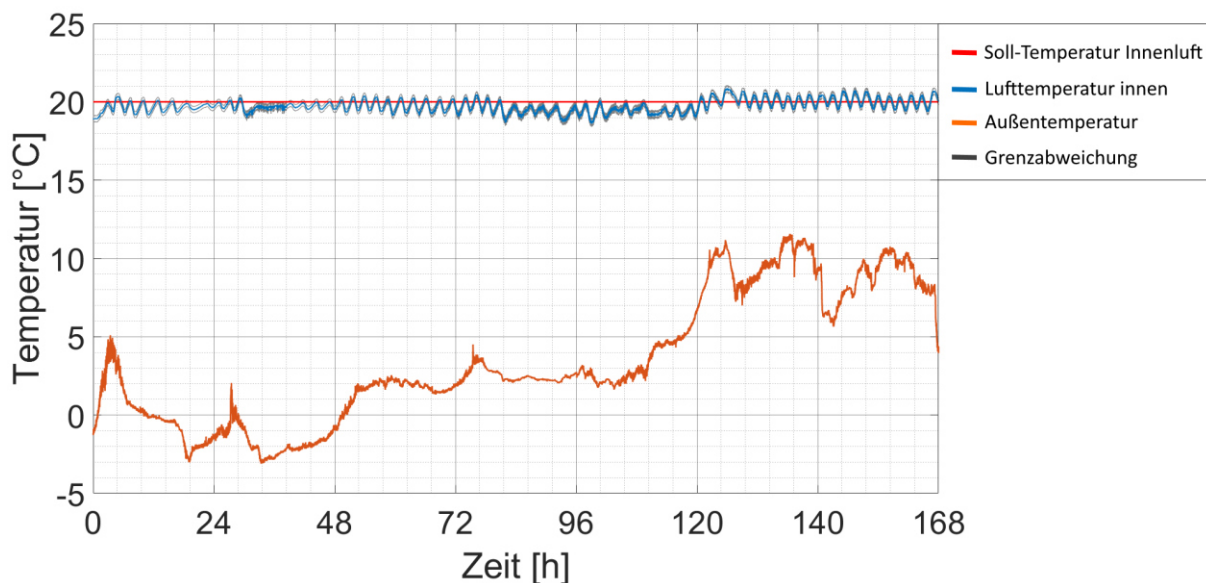


Abbildung 35 Vergleich der gemessenen Raumlufttemperatur mit der Soll-Temperatur von 20 °C unter Verwendung des zweiten Prototyps mit vier Peltier-Elementen im Januar 2021

Für diese Versuche wurde ein zusätzlicher Regler in den Versuchsaufbau integriert. Dieser Regler überwachte über einen Pt100 Temperaturfühler die Raumluft im Kubus und verglich den Wert mit einer voreingestellten Soll-Temperatur. War die Temperatur im Kubus unterhalb dieses Wertes, schaltete der Regler in eine Stufe mit hoher Stromstärke, wurde die Soll-Temperatur erreicht, verringerte der Regler die Stromstärke wieder. Auf diese Weise war es möglich, gezielt eine Soll-Temperatur für die Raumluft des Kubus anzusteuern und die Effektivität des Prototyps zu überwachen. Die beiden Stufen des Reglers konnten dabei individuell und variabel eingestellt werden. In Abbildung 36 ist das Fließdiagramm des Reglers für eine Soll-Temperatur von 20 °C dargestellt.

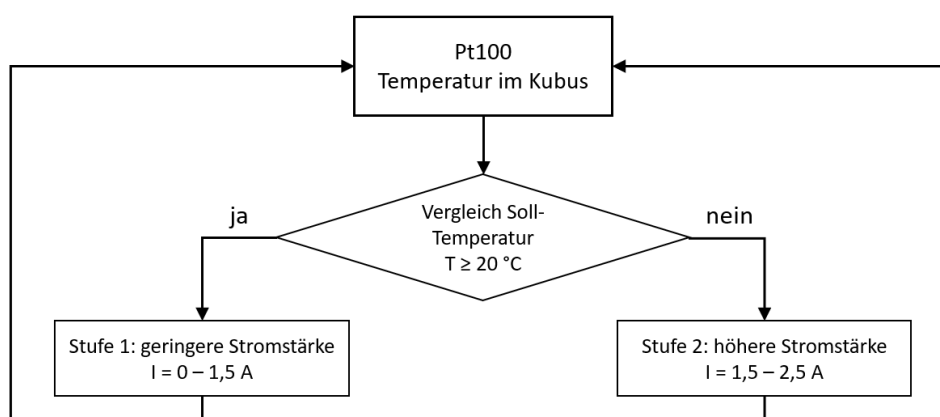


Abbildung 36 Fließdiagramm der Steuerung zur Temperierung des Kubus durch den zweistufigen Regler

Die stufenweise Steuerung durch den Regler ist in Abbildung 35 am oszillierenden Temperaturverlauf der mittleren Raumlufttemperatur in schwarz zu erkennen. Ferner konnte, wie im betrachteten Zeitraum zu sehen ist, der Prototyp durch die stufenweise Regelung die Temperatur im Kubus bei unterschiedlichen Außentemperaturen (orangene Linie) auf die

erforderliche Soll-Temperatur erwärmen. Diese Präzision war jedoch unmittelbar abhängig von der Einstellung der beiden Stufen des Reglers und vor allem von der maximalen Stromstärke der höheren Stufe. In dem aufgezeigten Versuch in Abbildung 35 wurden die Peltier-Elemente auf Stufe 1 mit 0,7 A und auf Stufe 2 mit 2,0 A betrieben.

Im Anschluss an die Untersuchungen für den Heizfall wurde auch die Leistungsfähigkeit des Prototyps für den Kühlfall im Sommer messtechnisch untersucht und analysiert. Die Versuche mussten aufgrund technischer Probleme mit dem Prototyp im Oktober 2021 durchgeführt werden und fanden dabei bei einem geringeren Temperaturniveau statt, als wenn sie in den Sommermonaten erfolgt wären. Nach Gleichung (2.22) erhöht sich proportional zur Temperatur auf der kalten Seite des Peltier-Elementes auch die durch den Peltier-Effekt transportierte Wärmeenergie. Da dabei die absolute Temperatur in K berücksichtigt wird, entspräche eine Erhöhung der Temperatur im Innenraum des Kubus um 20 °C lediglich einer Erhöhung des Peltier-Effektes um etwa 7%. Durch die hohen Temperaturen im Sommer wäre zusätzlich eine größere Temperaturdifferenz zwischen den beiden Peltier-Seiten zu erwarten, sodass der Wärmerückfluss die Wärmetransportleistung noch einmal verringern würde. Somit waren die Untersuchungen im Oktober für erste Untersuchungen der Leistungsfähigkeit der Konstruktion im Kühlbetrieb geeignet. Die gewählte Soll-Temperatur (Abbildung 37, rote Linie) lag mit 7 °C um mehrere Grad unterhalb der Raumlufthtemperatur (blaue Linie) zu Beginn des Versuches. Hier zeigte sich schnell, dass selbst mit vier Peltier-Elementen die Kühlleistung des Prototyps nicht ausreichte, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen wie im Heizfall in Abbildung 35. In unmittelbarer Nähe des Testkubus stand ein bis auf die Peltier-Wand baugleicher Referenzkubus zur Verfügung, der für Vergleichsmessungen genutzt werden konnte und so eine qualitative Analyse der Leistungsfähigkeit des Prototyps im Kühlbetrieb möglich war. Trotz der Positionierung dieses Referenzkubus in der direkten Umgebung des Testkubus, waren die Temperaturen in den beiden Würfeln zwar vergleichbar, jedoch herrschten in diesen keine identischen thermischen Randbedingungen. Durch einen qualitativen Vergleich der beiden Kuben konnte die Leistungsfähigkeit des Prototyps durch den Referenzkubus trotz mangelnder Effektivität der Peltier-Wand dennoch überschlägig beurteilt werden. Die gezielte Manipulation der Raumlufthtemperatur auf einen zuvor festgelegten Soll-Wert war zu keiner Zeit möglich. In Abbildung 37 ist zu erkennen, dass die Raumlufthtemperatur nicht wie beim Heizen um die Soll-Temperatur oszillierte. Im Mittel lag die Temperatur im Testkubus etwa 2,6 K unterhalb des Referenzkubus, woraus zu erkennen ist, dass die Peltier-Konstruktion zwar Wärme nach außen transportierte, jedoch nicht in ausreichender Menge. Darüber hinaus konnte der Prototyp während dieser Untersuchungen auch nicht energieeffizient betrieben werden. Mit einem maximalen System-COP der Konstruktion von etwa 0,3 war wesentlich mehr elektrische Energie erforderlich, als Wärmeenergie von den Peltier-Elementen transportiert werden konnte. Die Berechnung des System-COPs wird im Kapitel 7.4 vorgestellt. Er setzt die nutzbare Wärmeenergie, bzw. in diesem Fall die dem Kubus entzogene Wärmeenergie, ins Verhältnis zur dabei benötigten elektrischen Energie. Bei der Kühlung war also im besten Fall mehr als dreimal so viel elektrische Energie nötig, als Wärmeenergie entzogen wurde.

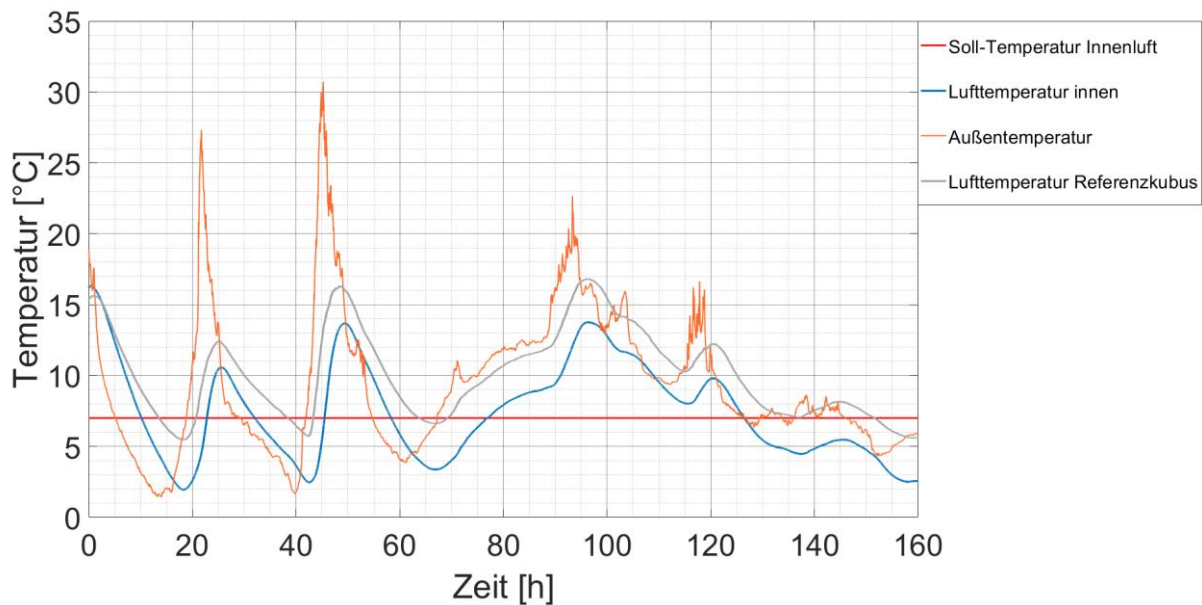


Abbildung 37 Leistungsfähigkeit der Kühlung durch den Prototyp mit vier Peltier-Elementen, Gegenüberstellung der Raumlufttemperatur, ihrer Soll-Temperatur und der mittleren Wandoberflächentemperatur

Das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem erwies sich somit während der experimentellen Freilandversuche im Kubus im Heizfall als leistungsfähig, im Kühlfall reichte die Leistung des Systems jedoch nicht aus, um die Raumlufttemperatur ausreichend zu kühlen. Aus diesem Grund wurde in den anschließenden Simulationen nur der Heizfall des Systems betrachtet und der Kühlfall blieb für die weiteren Untersuchungen unberücksichtigt. Somit konnte die Anforderung der Schaltbarkeit des Systems aus dem Lastenheft des Kapitels 3.4 zu diesem Zeitpunkt bereits nicht erfüllt werden. Nichtsdestotrotz wurde das thermoelektrische System als Heizsystem wegen der bisher aufgeführten Potenziale weiter untersucht und die experimentellen Untersuchungen durch Simulationen erweitert und ergänzt. Eine ausführliche Auswertung und Analyse der Effizienz des Prototyps während der Freilandversuche sowie dessen Oberflächentemperaturen und Leistungsfähigkeit erfolgt in den Kapiteln 7.3 und 7.4.

## 5 Thermische Bauteilsimulationen in TRISCO und VOLTRA

### 5.1 Modellierung und Validierung des Prototyps

Ehe das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem in den thermischen Bauteilsimulationsprogrammen TRISCO [107] und VOLTRA [108] untersucht werden konnte, mussten die darin errichteten Modelle des Systems validiert werden. Indem die Messdaten aus den Laborversuchen des ersten Prototyps aus Kapitel 4.2 mit den Ergebnissen der ersten Simulationen verglichen wurden, konnte die realitätsnahe Modellierung der Prototypen sichergestellt werden. Der Vorteil der Laborversuche lag in den konstanten Raumtemperaturen und den beinahe stationären Zuständen, die sich während dieser Versuche einstellten.

TRISCO und VOLTRA sind Programme des belgischen Unternehmens PHYSIBEL und ermöglichen die zwei- und dreidimensionale Modellierung von Bauteilen. In TRISCO können lediglich stationäre, in VOLTRA auch instationäre Randbedingungen berücksichtigt werden. Mit beiden Programmen können Wärmeströme und Temperaturverläufe analysiert werden, sodass die Programme im Bauwesen zur Untersuchung von Wärmebrücken genutzt werden. Zunächst wurde der Prototyp mit einem Peltier-Element (Abbildung 29 und Abbildung 30) sowohl mit als auch ohne Gipskartonplatte modelliert (Abbildung 38). Da in den Laborversuchen die Temperaturen nicht direkt am Peltier-Element, sondern auf der Aluminium- bzw. auf der Gipskartonplatte gemessen wurden, konnten in TRISCO zur Modellierung des Peltier-Elementes zunächst keine Werte direkt aus den experimentellen Untersuchungen auf die Modelle übertragen werden. In den ersten Untersuchungen ohne Gipskartonplatte wurde daher die Temperatur am Peltier-Element so eingestellt, dass die Temperaturen des unmittelbar über dem Element auf der Aluminiumplatte positionierten NTC-Sensors in Experiment und Simulation identisch waren.

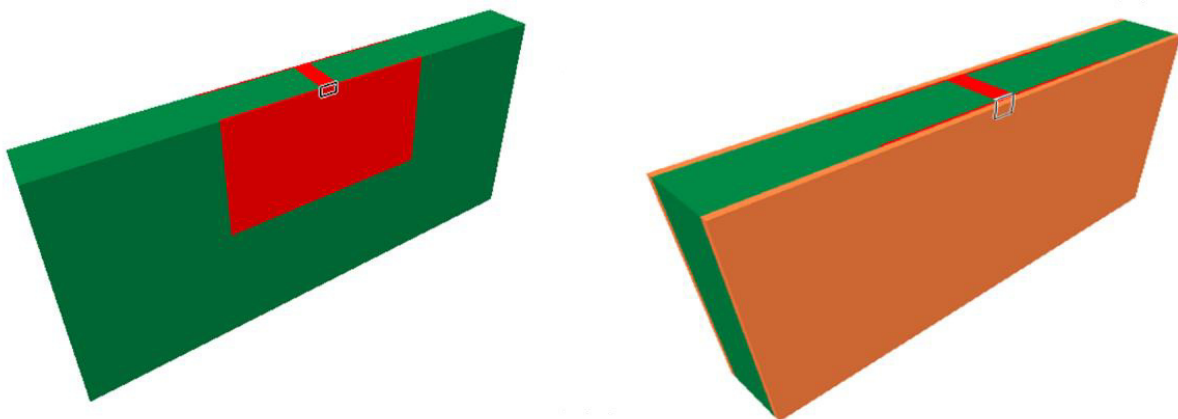


Abbildung 38 Modelle zur Validierung der Simulationen in TRISCO und VOLTRA  
links: Prototyp mit einem Peltier-Element ohne Gipskartonverkleidung  
rechts: selbiger Prototyp mit Gipskartonverkleidung



Geometrie und Materialkennwerte entsprachen in den dargestellten Modellen der Skizze in Abbildung 29 und den Datenblättern der verwendeten Materialien (Übersicht in Anhang B). In Abbildung 38 werden das Wärmedämmmaterial in Grün, Aluminium in Rot und die Verkleidung in Orange dargestellt. Auf beiden Abbildungen ist das Peltier-Element durch eine schmale Umrandung zu erkennen. Durch Ausnutzung der Symmetrie des Prototyps konnten die Modelle in beiden Programmen halbiert und somit auch die Rechendauer reduziert werden. Angrenzend an die Gipskartonplatten wurde die Raumluf mit den während der Laborversuche gemessenen Raumluf temperatures modelliert. Die restlichen Außenflächen grenzten an adiabate Randbedingungen. Auch die Wärmeleitpaste wurde in den Modellen als dünne Schicht zwischen Peltier-Element und den Aluminiumbauteilen berücksichtigt. Die Wärmeübertragung vom Peltier-Element über die Paste zu den Aluminiumbauteilen erfolgte über die Funktion *Grenzflächenrandbedingungen*, durch die eine konstante Temperatur oder ein konstanter Wärmestrom zwischen zwei Materialien implementiert werden konnte. Diese Temperatur entsprach der warmen Seite des Peltier-Elementes.

Die Wärmeübertragung zwischen Raumluf und Heizfläche wurde über den Wärmeübergangskoeffizient  $h$  eingestellt. Dieser Wert lässt sich als Reziprok der Wärmeübergangswiderstände  $R_{si}$  und  $R_{se}$  aus der DIN EN ISO 6946 [109] ermitteln und beträgt auf der Außenseite der Wandkonstruktion  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) und auf der Innenseite für bauübliche Wandoberflächen  $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). Für die Modelle mit Gipskartonplatte konnte folglich der Wärmeübergangskoeffizient innen mit  $h = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  gewählt werden. In den Bereichen des Modells ohne Verkleidung, in denen die Aluminiumplatte an die Raumluf grenzte, musste der Wärmeübergangskoeffizient jedoch berechnet werden. Mit einem hemisphärischen Emissionsgrad von 0,04 absorbiert Aluminium wesentlich weniger Strahlung als bauübliche Materialien (z. B. Gipskarton) mit 0,9, was gut an den spiegelnden Oberflächen der Aluminiumplatten zu erkennen ist. Mithilfe der in der DIN EN ISO 6946 aufgeführten Gleichungen ergab sich für das Modell ein Wärmeübergangskoeffizient für die an das Aluminium angrenzende Luftschicht von  $2,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Zunächst wurden die Modelle in TRISCO stationär berechnet. In Tabelle 7 werden beispielhaft für eine Messreihe mit einer Stromstärke von 2 A die gemessenen Oberflächentemperaturen den simulierten Werten gegenübergestellt. Der Sensor 01-NTC war in den Simulationen der Referenzsensor unmittelbar über dem Peltier-Element. Die übrigen Sensoren lagen von links nach rechts jeweils 5 cm, 11 cm und 21 cm vertikal oberhalb des 01-NTC (s. Abbildung 30).

Tabelle 7 Vergleich der experimentell ermittelten mit den in TRISCO simulierten Oberflächentemperaturen auf der unverkleideten Aluminiumplatte

	<b>01-NTC</b> [°C]	<b>02-NTC</b> [°C]	<b>03-NTC</b> [°C]	<b>04-NTC</b> [°C]
VERSUCHE	44,7	39,9	36,7	35,4
SIMULATION STATIONÄR	44,7	41,8	39,7	38,8
DIFFERENZ	0 K	+1,9 K	+3,0 K	+3,4 K
	0%	+4,8%	+8,2%	+9,6%

Da die Temperatur des Peltier-Elements in den Modellen so gewählt wurde, dass der Wert des Sensors 01-NTC in Simulation und experimenteller Messung identisch war, liegt hier auch keine Abweichung zwischen Messung und Simulation vor. Dagegen wird die Diskrepanz mit steigendem Abstand zur Mitte größer. Die größte Abweichung lag beim am weitesten entfernten Messsensor 04-NTC mit einer um 9,6% höheren Temperatur vor. Diese Diskrepanzen sind jedoch durch einen Blick auf die Berechnungsmethode in TRISCO erklärbar. Durch die stationäre Berechnung fehlt der Simulation die zeitliche Dimension, sodass im Ergebnis jener Zustand dargestellt wird, in dem sich die Temperaturen in einem Gleichgewichtszustand eingependelt haben. Im Vergleich dazu wurde in den experimentellen Untersuchungen noch kein Gleichgewichtszustand erreicht. Wie in Abbildung 39 zu sehen ist, wurde in dem Versuch zum Ende hin ein beinahe stationärer Zustand erreicht, eine geringe Steigung ist noch erkennbar. In der Abbildung ist die durch den 01-NTC gemessene Temperatur dargestellt. Diese Temperatur steigt während der etwas mehr als dreistündigen Versuchsdauer stetig an. Von dem Punkt des 01-NTC muss die Wärme erst an die anderen Messsensoren weitergeleitet werden. In der Simulation erfolgte diese Wärmeleitung bereits bis zum Erreichen des Gleichgewichts, in den Experimenten konnte der Gleichgewichtszustand innerhalb der Versuchsdauer jedoch nicht erreicht werden.

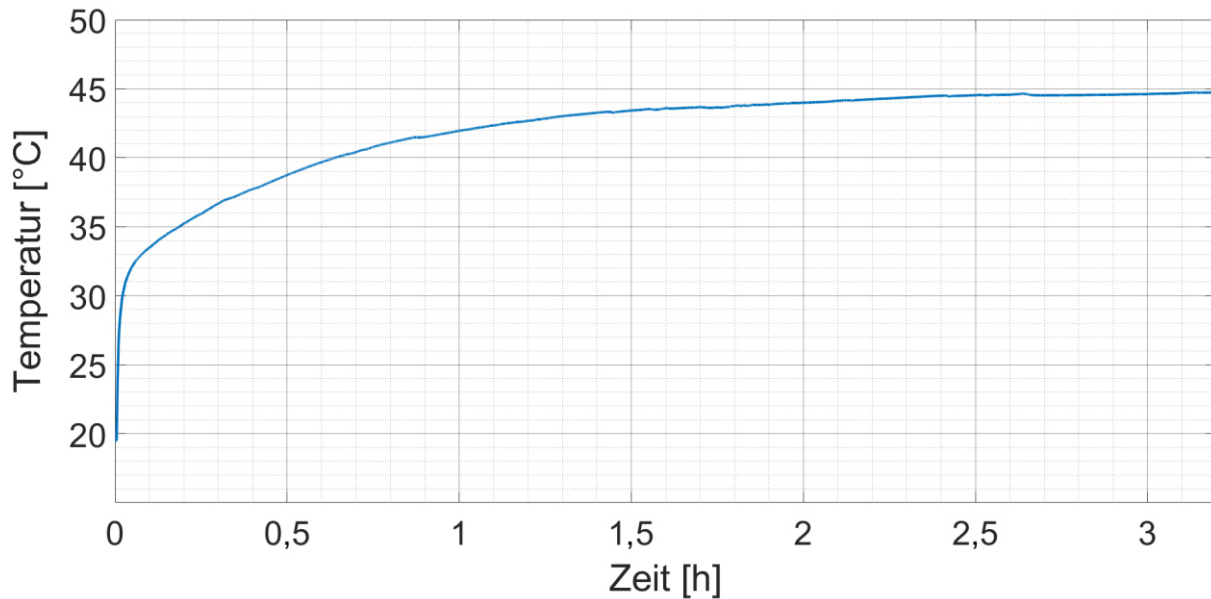


Abbildung 39 Temperaturverlauf des Messensors auf der Aluminiumplatte unmittelbar über dem Peltier-Element des Prototyps ohne Gipskartonplatte

Daher erscheint es plausibel, dass die Temperaturen in den Simulationen höher waren als in den experimentellen Untersuchungen. Allerdings ist dieser Effekt nur schwer quantifizierbar. Mithilfe von VOLTRA konnte anschließend auch die zeitliche Komponente der Wärmeverteilung in den Modellen analysiert und die obige Erklärung überprüft werden. Da die Temperaturen während der Versuche jedoch nicht unmittelbar am Peltier-Element gemessen wurden, konnte der Effekt der Peltier-Elemente auf den Prototyp nicht 1:1 modelliert werden. Vereinfachend wurden die Temperaturen des 01-NTC als Werte für die Modellierung des Peltier-Elements verwendet. Dadurch lagen die einzelnen Werte zwar etwas unterhalb der tatsächlich aufgetretenen Temperaturen, immerhin lag zwischen Peltier-Element und dem Ort der Messung eine 5 mm dicke Aluminiumplatte, allerdings war wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums ein recht kleiner Effekt zu erwarten. Diese Vereinfachung war notwendig, um die zeitliche Komponente der Messwerte der Peltier-Temperatur, also die Erhöhung der Temperatur über die Versuchsdauer in den Simulationen zu berücksichtigen. Eine iterative Erhöhung der Peltier-Temperatur wie in TRISCO war wegen der instationären Berechnung folglich nicht möglich. In Tabelle 8 sind Ergebnisse des Vergleichs zwischen den instationären Simulationen in VOLTRA und den experimentellen Untersuchungen beispielhaft für denselben Versuch wie in Tabelle 7 mit einer Stromstärke von 2 A dargestellt. Für diesen Versuch ist in Abbildung 39 der Temperaturverlauf des 01-NTC abgebildet. Dieser diente in dem betrachteten Vergleich als instationärer Temperaturverlauf des Peltier-Elements für die VOLTRA-Simulation.

Tabelle 8 Vergleich der experimentell ermittelten mit den in VOLTRA simulierten Oberflächentemperaturen auf der unverkleideten Aluminiumplatte

	<b>01-NTC</b> [°C]	<b>02-NTC</b> [°C]	<b>03-NTC</b> [°C]	<b>04-NTC</b> [°C]
VERSUCHE	44,7	39,9	36,7	35,4
SIMULATION INSTATIONÄR	43,4	39,3	36,2	34,9
DIFFERENZ	-1,3 K -3,0%	-0,6 K -1,5%	-0,5 K -1,4%	-0,5 K -1,4%

Es ist zu erkennen, dass die Diskrepanzen zwischen den instationären Simulationen und den Messungen wesentlich geringer ausfallen als bei den stationären Simulationen mit TRISCO. Die höchste Differenz entstand dabei am 01-NTC, der in den stationären Untersuchungen noch als Referenzpunkt verwendet wurde. Auch diese Abweichungen lassen sich mit Blick auf die Modellierung erklären. Die zur Modellierung des Peltier-Elements verwendeten Temperaturen wurden nicht unmittelbar an der kleinen Wärmepumpe gemessen, wodurch eine geringere Temperatur im Modell hinterlegt wurde, als tatsächlich in den Versuchen durch das Peltier-Element generiert wurde. Diese Diskrepanz spiegelt sich auch in der um 3,0% geringeren Oberflächentemperatur am Messpunkt 01-NTC wider. Zusätzlich erscheinen die nach außen hin abnehmenden Abweichungen plausibel, da bei der etwa kreisförmigen Ausbreitung der Wärme mit größerem Radius auch die Fläche wächst, über die die Wärme verteilt werden kann und somit die aufgezeigten Effekte abgeschwächt werden.

Dieselben Untersuchungen erfolgten anschließend mit dem Modell des mit Gipskartonplatten verkleideten Prototyps. Ergebnisse eines Versuchs mit einer Stromstärke von 2 A werden in Tabelle 9 den simulierten Werten gegenübergestellt.

Tabelle 9 Vergleich der experimentell ermittelten mit den in VOLTRA simulierten Oberflächentemperaturen des mit Gipskartonplatten verkleideten Prototyps

	<b>01-NTC</b> [°C]	<b>02-NTC</b> [°C]	<b>03-NTC</b> [°C]	<b>04-NTC</b> [°C]
VERSUCHE	33,3	31,2	28,7	27,9
SIMULATION INSTATIONÄR	32,9	31,5	28,9	27,8
DIFFERENZ	-0,4 K -1,2%	+0,3 K +1,0%	+0,2 K +0,7%	-0,1 K -0,4%

Mit einer maximalen Abweichung von 1,2% erwies sich das Modell in TRISCO und VOLTRA bei den Versuchen mit einer Stromstärke von 2 A als realitätsnahe Abbildung der im Labor untersuchten Prototypen des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems. Auch bei geringeren Stromstärken konnten die Modelle validiert werden. Die größte Diskrepanz trat in den Validierungen bei einem Versuch mit einer Stromstärke von 1,5 A am Messpunkt 01-NTC mit einer Abweichung von -2,4% auf. Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Effekte durch die Distanz zwischen Peltier-Element und dem Temperaturfühler, dessen Daten als Temperaturverlauf des Peltier-Elements in der Simulation diente, wäre diese Abweichung jedoch noch zu verringern. Wird auch die Grenzabweichung von  $\pm 0,2$  K der NTC-Sensoren in die Validierung mit einbezogen, ergibt sich für die maximale Abweichung des Versuchs mit 1,5 A ein Diskrepanzbereich zwischen 1,7% und 3,3%. Folglich zeigte sich das Modell in allen untersuchten Validierungsschritten als solide und realitätsnahe Abbildung des Prototyps und ermöglichte in den anschließenden Simulationen die Erweiterung des Untersuchungsrahmens auf großflächige Wandsysteme mit einer Vielzahl von Peltier-Elementen.

## 5.2 Modellierung und Simulation von Wandbauteilen

Die zuvor validierten Modelle konnten nun im nächsten Schritt für weitere Untersuchungen verwendet werden. Ziel der Simulationen in TRISCO und VOLTRA war die Analyse der Oberflächentemperaturen und Wärmeströme des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems. Mithilfe der Programme war eine Modellierung von Wandsystemen unterschiedlicher Größen und Geometrien möglich, wie in Abbildung 40 beispielhaft dargestellt. Auf diese Weise sollte untersucht werden, inwiefern die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems durch Öffnungen in der Wand, wie Fenster und Türen, oder auch durch unterschiedliche angrenzende Bauteile, z. B. eine Trennwand zu einem unbeheizten Raum oder eine Kellerdecke, beeinflusst wird. Außerdem war es durch die Simulationen möglich, die optimale Verteilung und Anzahl der Peltier-Elemente für unterschiedliche Wandgeometrien zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die Peltier-Elemente in Abständen zwischen 30 cm und 80 cm untereinander angeordnet und die Wärmeleistung und Effizienz der jeweiligen Systemvarianten analysiert und miteinander verglichen. Durch die unterschiedlichen Anordnungen änderten sich zusätzlich die Anzahl der Peltier-Elemente im Modell, deren Abstände zu den Außenkanten der Wand sowie die Abstände der Elemente zu den Öffnungen. So sollten Gesetzmäßigkeiten herausgearbeitet und dadurch der Systemaufbau optimiert werden.

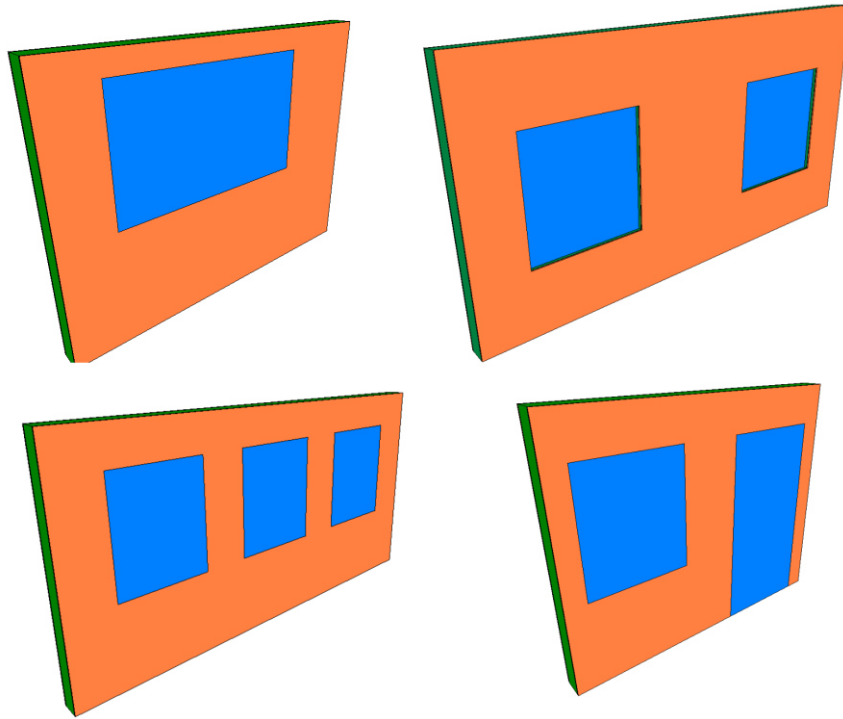


Abbildung 40 beispielhafte Wandmodelle der Untersuchungen in TRISCO und VOLTRA

## 6 Thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS

Mithilfe des thermischen Gebäudesimulationsprogramms TRNSYS [110] wurde das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem in Gebäuden unterschiedlicher Nutzungsart modelliert und konnte so über den Zeitraum eines gesamten Jahres energetisch bewertet und bezüglich der thermischen Behaglichkeit untersucht werden. Durch die beiden Schwerpunkte der ökologischen wie der soziokulturellen Dimension wurde eine ganzheitliche Betrachtung im Rahmen der Gebäudesimulationen ermöglicht.

### 6.1 Methodik

Für die Modellierung des Heizsystems und die abschließende Bewertung des Gesamtsystems mussten zwei Probleme adressiert werden, um so die realitätsnahe Abbildung der Peltier-Konstruktion sicherzustellen. Zunächst stellte sich die Frage, wie das Gesamtsystem in TRNSYS modelliert werden und weiter, wie die Funktionsweise der Peltier-Elemente in diesen Modellen möglichst akkurat abgebildet werden könne.

Üblicherweise werden Flächenheizsysteme in TRNSYS über wasserführende Rohre in einer aktivierten Schicht modelliert. Auf diese Weise wäre das auf Peltier-Elementen basierende System nicht realistisch nachbildbar gewesen. Zusätzlich erschwerten die im Kapitel 2.3 aufgeführten physikalischen Hintergründe und Interdependenzen zwischen thermischen und elektrischen Effekten die Modellierung des Systems in TRNSYS. Prinzipiell funktioniert das untersuchte System ähnlich wie eine handelsübliche elektrische Wandheizung. Die Peltier-Elemente erwärmen ein hinter der Innenoberfläche installiertes gut wärmeleitendes Material (hier die Aluminiumplatte), über das die Wärme über die Wand verteilt und in den Raum abgegeben wird. Für die Raumnutzer\*innen und auch für die Wärmeströme im Raum selbst ist lediglich die warme Wandoberfläche relevant. Vereinfacht wurde in TRNSYS die mittlere Oberflächentemperatur der thermoelektrischen Wandheizung über die gesamte Fläche konstant angenommen, auch wenn durch die Peltier-Elemente unmittelbar um diese herum kleine wärmere Hotspots entstehen und lokale Temperaturdifferenzen auftreten. Diese Effekte wurden jedoch wegen ihrer geringen Ausprägung und dadurch geringen Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit in TRNSYS vernachlässigt und sie werden in Kapitel 7.3 näher untersucht. Es wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem für die Modellierung der Wandheizung jene Wärmemenge ermittelt wurde, die zum Erreichen der für eine positive Raumwärmebilanz erforderlichen Wandoberflächentemperatur benötigt wurde. Diese Energiemenge wurde als Wärmegewinn auf der Innenseite der als Heizsystem modellierten Außenwand definiert. Auf diese Weise wurde eine Wandheizung modelliert, in der weder die Energieerzeugung noch die Art der zugrundeliegenden Wärmequelle berücksichtigt wurde.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen der im Kubus integrierten Prototypen konnte der Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen auf die Peltier-Konstruktion quantifiziert werden. Im Innenraum des Kubus wurde während der gesamten Versuchsreihe

konstant eine Temperatur von normativen 20 °C [111] gehalten. Die Temperaturdifferenzen zwischen Raum- und Außenluft entstanden folglich durch die veränderlichen Außentemperaturen. Dabei wurden die Leistungsfähigkeit und die Effizienz der Peltier-Elemente und damit der Prototypen bei den Versuchen vor allem durch die thermischen Randbedingungen der Konstruktion beeinflusst. Daher wurde die Energieeffizienz der Prototypen in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ermittelt (Auswertung der Versuche in Kapitel 7.4). Diese Abhängigkeiten sind für das untersuchte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem spezifisch und sind aufgrund der oben aufgeführten Einflüsse der klimatischen Bedingungen bei gleichen Temperaturniveaus auf die TRNSYS Modelle übertragbar. Die Energieeffizienz des im ersten Schritt entwickelten technologieneutralen Wandheizungsmodells konnte somit anschließend durch die Daten aus den Freilandversuchen analysiert und das Gesamtsystem energetisch bewertet werden.

Um den Einfluss unterschiedlicher Bauarten, Gebäudestandards und Nutzungsarten auf das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem zu untersuchen, wurden ein Einfamilienhaus (EFH) sowie ein Großraumbürogebäude in TRNSYS modelliert. Beide Gebäude wurden sowohl in einem KfW55 Standard als auch im Passivhausstandard ausgeführt. In diesen Bauten wurde zunächst das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem implementiert und anschließend zwei Referenzsysteme, eine wasserführende und eine elektrische Fußbodenheizung, integriert, um das Peltier-System mit kommerziellen Heizsystemen vergleichen zu können sowie zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des verwendeten Algorithmus in TRNSYS. So sollte gewährleistet werden, dass die erforderlichen Energiebedarfe, die unter Verwendung des Peltier-Systems berechnet wurden, auch mit in TRNSYS üblichen vergleichbaren Heizsystemen übereinstimmen. Durch die Betrachtung zweier unterschiedlicher Gebäudestandards sollte außerdem überprüft werden, inwiefern höhere oder niedrigere energetische Anforderungen das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem positiv oder negativ beeinflussen bzw. ab welchem Standard das System gegebenenfalls überhaupt funktionieren kann.

Da die Akzeptanz eines Klimatisierungssystems unmittelbar von dem Behaglichkeitsempfinden der Raumnutzer\*innen abhängt, war es erforderlich, nicht nur energetische, sondern auch Betrachtungen der Behaglichkeit in die Simulation zu integrieren. Aus diesem Grund wurden auch PMV, PPD und die operative Temperatur in der Bewertung der Modelle berücksichtigt. Energetische Effekte und solche der thermischen Behaglichkeit beeinflussen sich dabei stets gegenseitig. Ist zum Erreichen eines behaglichen Innenraumklimas beispielsweise eine höhere Temperatur im Raum notwendig, wirkt sich dies auch auf den Energiebedarf aus. Daher war auch für die energetische Bewertung eine ganzheitliche Betrachtung des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems in den TRNSYS Simulationen essenziell.

Auch das Außenklima darf bei diesen Untersuchungen nicht vernachlässigt werden, werden durch dieses doch sowohl die Behaglichkeit als auch der Energiebedarf eines Gebäudes unmittelbar beeinflusst. Aus diesem Grund wurden die Simulationen wegen des



fortschreitenden Klimawandels und den erwartbaren Veränderungen des hiesigen Klimas anschließend mit zukünftigen Testreferenzjahren wiederholt. Dadurch sollten die Chancen und Risiken des Systems auch im Zusammenhang mit künftigen Klimarandbedingungen evaluiert werden. Dazu wurden in den Modellen zunächst ein TRJ 2015 und anschließend ein TRJ 2045 hinterlegt. Beide Testreferenzjahre entstammen den 2017 von der DWD bereitgestellten Datensätzen. Zusammenfassend ist in Abbildung 41 die der thermischen Gebäudesimulation in TRNSYS zugrunde liegende Methodik dargestellt.

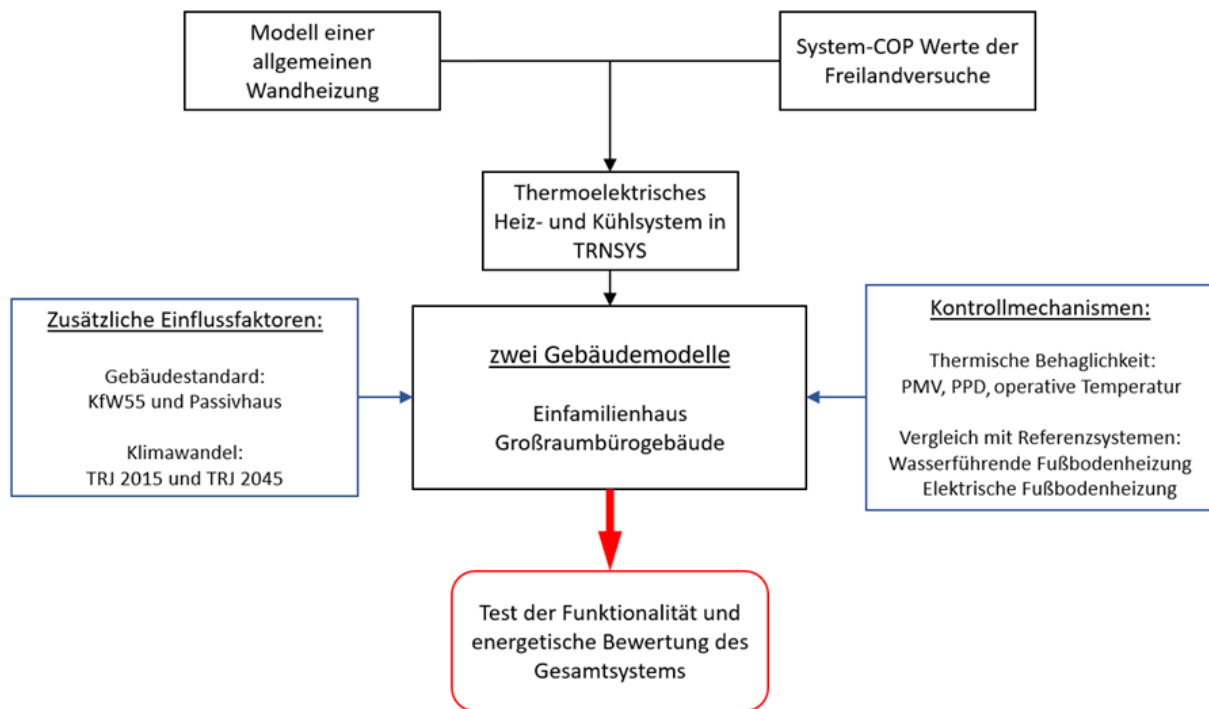


Abbildung 41 schematische Darstellung der den TRNSYS Simulationen zugrunde liegenden Methodik

## 6.2 Modellierung und Simulation des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems

Als Grundlage für die Simulationen in TRNSYS dienten die zwei in Abbildung 42 dargestellten Gebäudemodelle mit jeweils unterschiedlichen Nutzungsarten. Dabei wurde zur Modellierung der Gebäudenutzung für das Wohngebäude auf die DIN V 4108-6 [112] sowie die Ergebnisse der Untersuchungen nach Hofmann et al. [50, 51, 113] zurückgegriffen. Demnach ist in der Heizperiode in den Schlafzimmern ganztägig eine Temperatur von etwa 17 °C zu erwarten, da diese Räume lediglich zum Schlafen genutzt und entsprechend meist nicht beheizt werden. Dagegen wurden die Bäder in TRNSYS ganztägig auf 23 °C beheizt [114]. In Küche, Wohn- und Esszimmer sowie im Büro wurden gestaffelte Temperaturen hinterlegt. Außerhalb der Nutzungszeit konnten die Räume auf die Mindesttemperatur von 17 °C abkühlen, während sie in den Nutzungszeiten auf 21 °C beheizt wurden. Auch die Werte für die internen Gewinne entstammten der DIN V 4108-6.

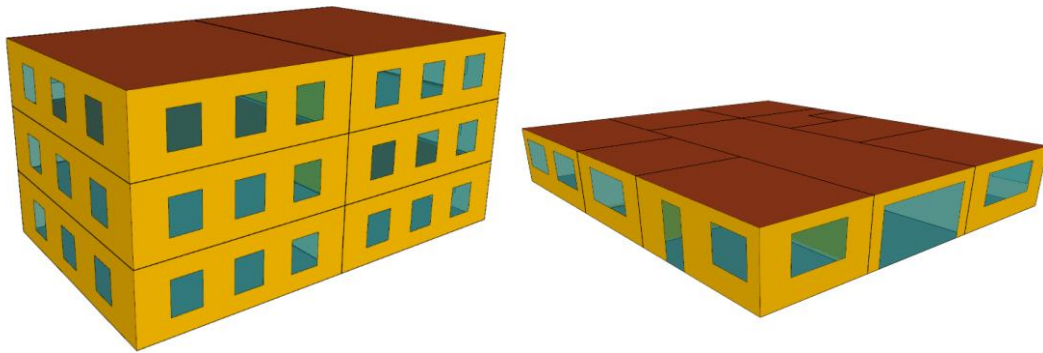


Abbildung 42 Gebäudemodelle der Simulationen in TRNSYS, links: Großraumbürogebäude, rechts: Einfamilienhaus, Bungalow

Im Nichtwohngebäude wurden die Nutzungszeiten in Anlehnung an die DIN V 18599-10 [115] ausgewählt. Darin sind unter anderem Nutzungsprofile für Einzel-, Gruppen- und Großraumbüros mit Informationen zur Belegungsdichte, zu internen Gewinnen, Nutzungszeiten und weiteren zu finden. Die wichtigsten Kenngrößen der jeweiligen Gebäude und der darin implementierten Nutzungsarten sind im Anhang C zu finden. Die Betrachtung der unterschiedlichen Gebäude- und Nutzungsarten ermöglichte eine Analyse des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems unter verschiedenen Randbedingungen. In den Räumen des Wohngebäudes lagen teils unterschiedliche Temperaturniveaus vor, die teilweise höher und teilweise niedriger als jene im Großraumbürogebäude waren. Ebenfalls wurden im Wohnhaus unterschiedliche Raumgeometrien und -größen, Nutzungszeiten sowie Fensterflächen berücksichtigt, sodass ein breites Spektrum verschiedener Randbedingungen untersucht werden konnte, um so gegebenenfalls Grenzen des Systems aufzuweisen. Das Wohngebäude wurde als Bungalow modelliert. Durch die größere Grundfläche im Vergleich zu einem mehrgeschossigen Einfamilienhaus konnte so die Raumaufteilung den Besonderheiten der Peltier-Wandheizung angepasst werden. Einige Räume haben dadurch lediglich eine Außenwand oder nur geringe Heizflächen. Zusätzlich wurde im Großraumbürogebäude die Leistungsfähigkeit des Systems in großflächigen Räumen und während eines Nutzungsprofils für Büroräume untersucht.

Für die Implementierung des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems wurde auf grundlegende (bau)physikalische Prozesse zurückgegriffen, da das System aufgrund der neuartigen Konstruktion nicht durch bestehende *Types* in TRNSYS modelliert werden konnte [116]. *Types* sind kleine Programme, auf die über die Datenbank in TRNSYS zurückgegriffen werden kann und die von den Programmierer\*innen als Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung oder zur Strukturierung und Datenverarbeitung des Modells bereitgestellt werden. Ohne entsprechende *Types* war für die Modellierung ein eigener Ansatz erforderlich. Aufbauend auf den physikalischen Prozessen bei der Wärmeübertragung zwischen der Raumluft und den raumumschließenden Oberflächen wurde die erforderliche Wärmeenergie berechnet und diese als Wärmegewinn über die als Peltier-Konstruktion ausgebildeten Außenwände in den Raum geleitet.

Die Wärmeübertragung einer Flächenheizung an das Rauminnere erfolgt zum Großteil über Wärmestrahlung [95]. Daher erwies sich die operative Temperatur als maßgebende Größe bei der Ermittlung der erforderlichen Wärmeenergie. Wie in Kapitel 2.1 bereits dargestellt wurde, lässt sich diese in Räumen, in denen niedrige Luftgeschwindigkeiten auftreten, als arithmetisches Mittel aus der Lufttemperatur  $T_a$  und der mittleren Strahlungstemperatur  $T_{rm}$  nach Gleichung (6.1) berechnen.

$$T_{op} = \frac{T_{rm} + T_a}{2} \quad (6.1)$$

Zur Ermittlung der erforderlichen Wärmeenergie war jedoch nicht die operative Temperatur gesucht. Diese ist in der obigen Gleichung vielmehr als Soll-Temperatur anzusehen und ihr Wert entsprach den erforderlichen Temperaturen der DIN V 18599-10 [115] und der DIN V 4108-6 [112] bzw. den Temperaturen in Anlehnung an die Untersuchungen von Hofmann et al. [50, 51, 113]. Die Lufttemperatur konnte wiederum den TRNSYS Berechnungen entnommen werden. Umgestellt nach der gesuchten mittleren Strahlungstemperatur ergibt sich somit die Gleichung (6.2).

$$T_{rm} = 2 \cdot T_{op} - T_a \quad (6.2)$$

Die mittlere Strahlungstemperatur lässt sich als flächengewichtetes Mittel der Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen verstehen (Gleichung (6.3)). Dementsprechend beeinflussen die Flächen und die Temperaturen der Wände, des Bodens und der Decke diesen Wert.

$$T_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6.3)$$

Mit:  $T_i$  = Oberflächentemperatur der Fläche  $i$   
 $A_i$  = Fläche  $i$

Bei der Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur werden folglich neben den Innenbauteilen auch die als Peltier-Konstruktion ausgebildeten Außenwände berücksichtigt. Im vorangehenden Schritt wurde der Wert der mittleren Strahlungstemperatur bereits mithilfe der Gleichung (6.2) berechnet. In der Gleichung (6.3) sind die Flächen aller Bauteile bekannt und die Oberflächentemperaturen der Innenbauteile lassen sich mithilfe von TRNSYS ermitteln. Die erforderliche Temperatur der Oberflächen der Peltier-Konstruktion kann somit durch Umstellung der Gleichung (6.3) mithilfe der Gleichung (6.4) berechnet werden.

$$T_p = \frac{T_{rm} \cdot \sum A_{ip} - \sum T_i A_i}{\sum A_p} \quad (6.4)$$

Mit:  $T_p$  = Oberflächentemperatur des temperierten Bauteils p  
 $A_i$  = Fläche des nicht temperierten Bauteils i  
 $A_p$  = Fläche des Bauteils p mit Temperiersystem  
 $\sum A_{ip}$  = Summe aller Flächen

Von der beheizten Oberfläche entsteht ein Wärmestrom zur kühleren Raumluft. Die Wärmestromdichte ist proportional zum Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  und der Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Raumluft und lässt sich nach Gleichung (6.5) berechnen.

$$q_H = h \cdot (T_p - T_a) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (6.5)$$

Üblicherweise wird die Wärmeleistung einer Wandheizung nach DIN EN 11855-2 [117] mit  $h = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt. Für die Modellierung in TRNSYS war jedoch keine rein normative Ermittlung der Wärmeleistung erforderlich, sondern es wurde versucht, die physikalischen Prozesse möglichst realitätsnah im Programm abzubilden. In der DIN EN ISO 6946 [109] sind die Grundlagen der Berechnung der beiden Anteile des Wärmeübergangskoeffizienten zu finden. Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung  $h_r$  kann demnach mithilfe der Gleichung (6.6) berechnet werden.

$$h_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot \left( \frac{2 \cdot T_p + T_a}{3} \right)^3 \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.6)$$

Dabei wird in der Gleichung mit dem Faktor  $5,67 \cdot 10^{-8}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante berücksichtigt, der Faktor 0,9 beschreibt den hemisphärischen Emissionsgrad für bauübliche Oberflächen. Der letzte Term der Gleichung repräsentiert die mittlere dynamische Temperatur der Heizfläche und ihrer unmittelbaren Umgebung. Wegen der unmittelbaren Nähe zur Heizfläche bei der Betrachtung des Wärmeübergangs zwischen Oberfläche und Raumluft wird die Oberflächentemperatur und somit die Strahlung bei der Bildung des arithmetischen Mittels doppelt gewichtet. Der Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion wiederum konnte in TRNSYS bei der Erstellung eines Bauteils direkt eingestellt werden. Auf der Innenseite einer Außenwand beträgt dieser dort standardmäßig  $11 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ . Umgerechnet ergibt sich daraus ein Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion  $h_c = 3,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dieser Wert liegt zwar über jenem der DIN EN ISO 6946 [109] mit  $h_c = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , jedoch ermittelten Koca et al. [118] in ihren Untersuchungen Werte zwischen  $2,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  und  $3,22 \text{ W/m}^2\text{K}$  und auch Awbi et al. maßen in [119] den Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion von  $3,18 - 4,09 \text{ W/m}^2\text{K}$  in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz zwischen der beheizten Wandoberfläche und der Raumluft. In beiden Untersuchungen wurde herausgestellt, dass der Wärmeübergangskoeffizient mit zunehmender Oberflächentemperatur ansteigt. Ein höherer als der normative Wert erscheint für die modellierte Wandheizung in TRNSYS somit plausibel.

Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient  $h$  zur Berechnung der Wärmestromdichte der Peltier-Konstruktion nach Gleichung (6.5) wird schließlich als Summe aus  $h_r$  und  $h_c$  gebildet.

Durch Multiplikation der Wärmestromdichte mit den jeweiligen Wandflächen konnte auf diese Weise die erforderliche Wärmeleistung berechnet und an die entsprechenden Bauteile weitergegeben werden. In den Simulationen erhitzen sich dadurch die Innenoberflächen der Außenwände, sodass das thermoelektrische Heizsystem modelliert werden konnte.

### 6.3 Modellierung der Referenzsysteme

Die Referenzsysteme wurden in dieselben Gebäudemodelle integriert wie das erforschte Peltier-System und als Fußbodenheizung ausgebildet, einmal als elektrisches, das andere Mal als wasserführendes System. Mithilfe dieser Referenzsysteme wurde qualitativ überprüft, ob die berechneten Energiebedarfe der thermoelektrischen Wandheizung plausibel sind. Ferner dienten sie als Vergleich bei der energetischen Bewertung.

#### Elektrische Fußbodenheizung

Der elektrischen Fußbodenheizung lagen dabei in TRNSYS dieselben Algorithmen wie dem Peltier-System zugrunde, nur dass nun der Fokus nicht mehr auf den Außenwänden, sondern auf dem Fußboden lag. Demnach wurden auch bei diesem System die Gleichungen (6.1) bis (6.6) verwendet, der Wärmeübergangskoeffizient wurde jedoch den physikalischen Randbedingungen entsprechend angepasst, da hier der Wärmestrom nicht horizontal, sondern vertikal von unten nach oben fließt [109]. Bei einer elektrischen Flächenheizung wird die elektrische Energie 1:1 in thermische Energie, also in Wärme umgewandelt [120]. Somit entsprach der erforderliche Heizwärmebedarf auch dem erforderlichen elektrischen Energiebedarf zum Betreiben des Heizsystems. In [116] wurden bereits die vorgestellten Algorithmen hinsichtlich ihrer Funktionalität untersucht, sodass die elektrische Fußbodenheizung durch diese realitätsnah abgebildet werden konnte. Durch die Berücksichtigung der Energieeffizienz von elektrischen Flächenheizungen konnte das technologieneutrale Modell anschließend energetisch bewertet und als Vergleichssystem herangezogen werden.

#### Wasserführende Fußbodenheizung

Die wasserführende Fußbodenheizung wurde hingegen über die Funktion *Active Layer* in TRNSYS modelliert. In den Bauteilen der Fußböden wurde eine aktive Schicht definiert, in der die Daten der Konstruktion einer Fußbodenheizung hinterlegt werden konnten. Das System wurde über die Definition der Abstände zwischen den Rohren sowie deren Durchmesser, Wärmeleitfähigkeit und Wandstärke modelliert. Mithilfe eines Controllers wurde die Raumlufttemperatur der einzelnen Räume überwacht. Lag die Temperatur unterhalb der eingestellten Soll-Temperatur entsprach der Volumenstrom durch die Wasserrohre dem durch TRNSYS vorgegebenen Mindestvolumenstrom, durch den eine turbulente Strömung in den Rohren gewährleistet wurde. Wurde die Soll-Temperatur überschritten, fiel der Volumenstrom

---

auf null. Die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung wurde auf 35 °C eingestellt. Anschließend ließ sich die an den Raum abgegebene Wärmeenergie aus der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie dem Volumenstrom berechnen. Als Heizsystem zum Erhitzen des Wassers in den Modellen des Referenzsystems wurde jene Luft-Wasser Wärmepumpe angesetzt, die bereits in Kapitel 3.2 als Vergleichssystem verwendet wurde. Die Jahresarbeitszahl dieses Systems betrug 3,0.

## 7 Ergebnisauswertung der experimentellen Untersuchungen und Simulationen

### 7.1 Validierung der analytischen Gleichungen

Die in Kapitel 4.1 vorgestellten Grundlagenversuche der Peltier-Elemente dienten einer ersten Evaluation der Leistungsfähigkeit der kleinen Wärmepumpen. Darin wurden die Peltier-Elemente unterschiedlichen thermischen Randbedingungen ausgesetzt, sodass speziell dieser Einfluss untersucht werden konnte, da er für die Funktionalität des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle spielt. Zunächst mussten jedoch die Gleichungen der analytischen Grundlagen des Kapitels 2.3 validiert werden, um die Verwendbarkeit der berechneten Werte für die Leistungsfähigkeit und die Effizienz der Peltier-Elemente zu überprüfen und in den Simulationen und folgenden experimentellen Untersuchungen weiter verwenden zu können. Dazu wurden gemessene Werte den berechneten gegenübergestellt. Der Fokus lag zunächst auf der elektrischen Spannung, da diese sowohl gemessen wurde als auch berechenbar war. Die Versuche erfolgten an zwei Peltier-Elementen, dem TEC1-12710 und dem TEC2-19006. In den folgenden Ergebnissen und ihren Auswertungen liegt der Fokus zunächst auf dem erstgenannten TEC1-12710, anschließend wird das TEC2-19006 analysiert.

In den Gleichungen (2.21) und (2.22) zur Berechnung der Wärmeleistung der Peltier-Elemente bzw. der von der kalten Seite abtransportierten Wärmeenergie werden Materialkennwerte der verwendeten Halbleiter benötigt: der Seebeck-Koeffizient  $\alpha$ , die elektrische Leitfähigkeit  $R$  und die thermische Leitfähigkeit  $K$ . Diese Werte werden von den Herstellern der Peltier-Elemente nicht veröffentlicht. Aus den in den Datenblättern der jeweiligen Peltier-Elemente angegebenen Messwerten lassen sich dennoch auf Basis der analytischen Berechnungsgrundlagen diese Materialkennwerte berechnen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit seien hier noch einmal die dazu wichtigsten Gleichungen aus Kapitel 2.3 aufgeführt.

$$P_{el} = U \cdot I \quad (2.10)$$

$$Q_h = Q_c + P_{el} \quad (2.19)$$

$$Q_h = \alpha \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K(T_h - T_c) \quad (2.21)$$

$$Q_c = \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K(T_h - T_c) \quad (2.22)$$

In den Datenblättern werden Informationen zur maximal gemessenen Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Peltier-Seite  $\Delta T_{max}$ , zum maximal gemessenen Wärmestrom von der kalten Seite  $Q_{c,max}$ , zur maximalen Stromstärke  $I_{max}$ , zur maximalen elektrischen Spannung  $U_{max}$  sowie zur Temperatur auf der warmen Peltier-Seite  $T_h$  während der dem

Datenblatt zugrunde liegenden Versuche bereitgestellt. Der maximale Wärmestrom  $Q_{c,max}$  wird in einem Versuchsdurchlauf erreicht, in dem die Temperaturdifferenz 0 K beträgt ( $T_h = T_c$ ) und das Peltier-Element mit der maximalen Stromstärke  $I_{max}$  betrieben wird. Bei der maximalen Temperaturdifferenz  $\Delta T_{max}$  kann außerdem kein Wärmestrom mehr auf der kalten Seite festgestellt werden, dieser beträgt somit Null. Während dieses Versuchsdurchlaufs wird das Peltier-Element mit  $I_{max}$  und  $U_{max}$  betrieben und die Temperatur auf der kalten Seite des Elementes lässt sich aus der Temperatur auf der warmen Seite und der Temperaturdifferenz berechnen ( $T_c = T_h - \Delta T_{max}$ ). Aus diesen Informationen lassen sich Randbedingungen zur Lösung der Gleichungen (2.21) und (2.22) wie folgt ableiten:

$$Q_{c,max} = \alpha \cdot T_h \cdot I_{max} - \frac{1}{2} \cdot I_{max}^2 \cdot R \quad (7.1)$$

$$Q_c = 0 = \alpha \cdot (T_h - \Delta T_{max}) \cdot I_{max} - \frac{1}{2} \cdot I_{max}^2 \cdot R - K \cdot \Delta T_{max} \quad (7.2)$$

Zur Lösung des Gleichungssystems mit drei Unbekannten fehlt noch eine weitere Gleichung. Werden in Gleichung (2.19) die Gleichungen (2.10), (2.21) und (2.22) eingesetzt und das Ergebnis nach der elektrischen Spannung  $U$  aufgelöst, lässt sich die elektrische Spannung der Peltier-Elemente nach Gleichung (7.3) berechnen:

$$U = \alpha \cdot \Delta T + I \cdot R \quad (7.3)$$

Unter Berücksichtigung der oben dargestellten Relationen der im Datenblatt angegebenen Parameter kann die fehlende dritte Gleichung zur Berechnung der Materialkennwerte als Gleichung (7.4) formuliert werden und lässt sich aus jenem Versuchslauf herleiten, in dem die maximale Temperaturdifferenz unter der Stromstärke  $I_{max}$  und der elektrischen Spannung  $U_{max}$  gemessen wurde.

$$U_{max} = \alpha \cdot \Delta T_{max} + I_{max} \cdot R \quad (7.4)$$

Mithilfe der drei Gleichungen (7.1), (7.2) und (7.4) sind schließlich die Materialkennwerte wie folgt zu berechnen:

$$\alpha = \frac{Q_{c,max} + \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot V_{max}}{T_h \cdot I_{max} + \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot \Delta T_{max}} \quad (7.5)$$

$$R = \frac{V_{max} - \alpha \cdot \Delta T_{max}}{I_{max}} \quad (7.6)$$



$$K = \frac{\alpha \cdot (T_h - \Delta T_{max}) \cdot I_{max} - \frac{1}{2} \cdot I_{max}^2 \cdot R}{\Delta T_{max}} \quad (7.7)$$

Die dargelegte Vorgehensweise erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von Zhang et al. [121] und Tan et al. [122], die wiederum auf [123] zurückzuführen sind. Darin unterlief Lineykin et al. [123] jedoch ein Fehler bei der Umstellung der Gleichungen, sodass die Materialkennwerte falsch berechnet wurden. Dieser Fehler wurde in [121] und [122] übernommen, worauf geringe Diskrepanzen in den jeweiligen Veröffentlichungen zurückzuführen sind.

Basierend auf den obigen Gleichungen ließen sich die Materialkennwerte des TEC1-12710 mithilfe der in Abbildung 43 aufgeführten Parameter aus dem entsprechenden Datenblatt [99] ermitteln. Für die angegebenen Messwerte wurden in den Datenblättern keine Grenzabweichungen dokumentiert. Die Genauigkeit der errechneten Materialkennwerte wurde daher anschließend anhand eigener experimenteller Untersuchungen analysiert. Bei einer Temperatur von 27 °C auf der warmen Peltier-Seite ergab sich für das Peltier-Element ein Seebeck-Koeffizient von  $\alpha = 0,0538 \text{ V/K}$ , die elektrische Leitfähigkeit von  $R = 1,212 \text{ V/A}$  und die thermische Leitfähigkeit von  $K = 0,901 \text{ W/K}$ . Bei einer Temperatur von 50 °C auf der warmen Peltier-Seite veränderten sich die Werte zu  $\alpha = 0,0539 \text{ V/K}$ ,  $R = 1,281 \text{ V/A}$  und  $K = 0,854 \text{ W/K}$ .

Th (°C)	27	50
DT <sub>max</sub> (°C)	70	79
U <sub>max</sub> (Voltage)	16	17.2
I <sub>max</sub> (Amps)	10.1	10.1
Q <sub>Cmax</sub> (Watts)	101.1	110.5
AC resistance (Ohms)	1.15~1.35	1.27~1.49

Abbildung 43 Auszug aus dem Datenblatt des TEC1-12710 [99]

Mit dem TEC1-12710 wurden 33 Versuche durchgeführt, in denen jeweils variierende Temperaturdifferenzen erreicht wurden und unterschiedliche Stromstärken durch die Peltier-Elemente flossen (vgl. Tabelle 6). Dabei wurden die Stromstärke, die elektrische Spannung sowie die jeweiligen Temperaturen auf der warmen wie auf der kalten Peltier-Seite gemessen. Mit der Gleichung (7.3) ließ sich aus den Messwerten der Temperaturen und der Stromstärke die elektrische Spannung berechnen. Die berechneten Werte wurden mit den Messwerten der elektrischen Spannung verglichen, um die Genauigkeit der verwendeten analytischen Gleichungen sowie der ermittelten Materialkennwerte zu überprüfen, ehe diese zur Bestimmung der Wärmeströme verwendet werden konnten. In Abhängigkeit der Stromstärke während der Versuche sind die mithilfe der gemessenen Temperaturen analytisch berechneten und die rein gemessenen Werte in Abbildung 44 dargestellt. Die in Grau

dargestellten berechneten Stromspannungen liegen darin vor den reinen Messwerten in Blau.

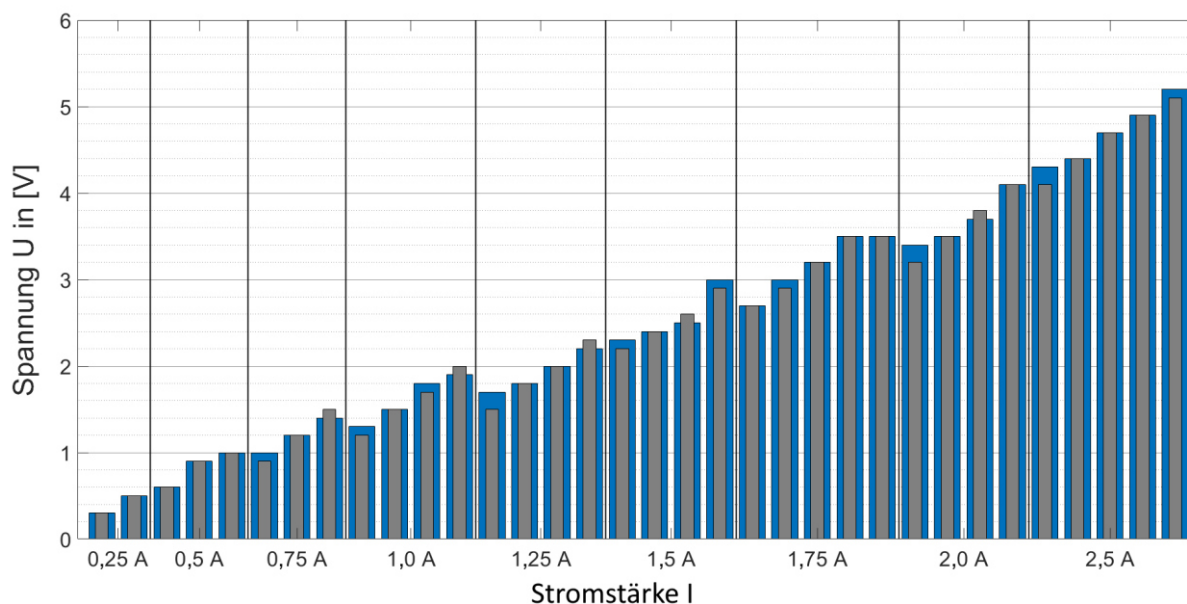


Abbildung 44 TEC1-12710 – Vergleich der reinen Messwerte und der Kombination aus Messung und analytischer Berechnung der elektrischen Spannung; Blau: Messwerte; Grau: berechnete Werte

Es ist zu erkennen, dass nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Verfahren auftreten. Im Mittel weichen die Berechnungen lediglich um 1% von den Messwerten ab, bei einer Standardabweichung von 3,7%. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichung von  $\pm 0,2$  K durch die NTC-Temperaturfühler liegen die Abweichungen der Mittelwerte zwischen 0% und 2% bei einer Standardabweichung um diese Mittelwerte von 4,3% bzw. 3,6%. Die maximale absolute Abweichung beträgt 0,21 V bei einer Stromstärke von 2,5 A und einer gemessenen Spannung von 4,3 V, die maximale relative Abweichung beläuft sich auf 11% bei 1,25 A und 1,7 V.

Diese Untersuchungen wurden anschließend mit dem zweistufigen TEC2-19006 wiederholt und aus den Angaben des Datenblattes (s. Abbildung 45) wurden die Materialkennwerte wie zuvor berechnet. Bei einer Temperatur von 30 °C auf der warmen Peltier-Seite ergab sich für das TEC2-19006 ein Seebeck-Koeffizient von  $\alpha = 0,0408$  V/K, die elektrische Leitfähigkeit von  $R = 2,122$  V/A und die thermische Leitfähigkeit von  $K = 0,205$  W/K.

$I_{\max}$	6.0A	$T_h=30^\circ\text{C}$
$V_{\max}$	16V	$T_h=30^\circ\text{C}$
$\Delta T_{\max}$	$\geq 80^\circ\text{C}$	$Q_c=0, T_h=30^\circ\text{C}$
$Q_{c\max}$	36W	$\Delta T=0^\circ\text{C}, T_h=30^\circ\text{C}$
$T_R$	-50~100°C	

Abbildung 45 Auszug aus dem Datenblatt des TEC2-19006 [124]

Mit dem TEC2-19006 wurden 75 Versuche durchgeführt. Analog zum einstufigen TEC1-12710 sind in Abbildung 46 die gemessenen Spannungen den berechneten gegenübergestellt. Darin sind wesentlich höhere Diskrepanzen zwischen den beiden Verfahren zu erkennen. Im Mittel weichen die Berechnungen um 9% von den Messwerten ab, bei einer Standardabweichung um den Mittelwert von 8,4%. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichung von  $\pm 0,2$  K durch die NTC-Temperaturfühler liegen die Abweichungen der Mittelwerte zwischen 9% und 10% bei einer Standardabweichung um diese Mittelwerte von 8,6% bzw. 8,2%. Die maximale absolute Abweichung beträgt 1,65 V bei einer Stromstärke von 2,0 A und einer gemessenen Spannung von 6,1 V, was einer maximalen relativen Abweichung von -27% entspricht.

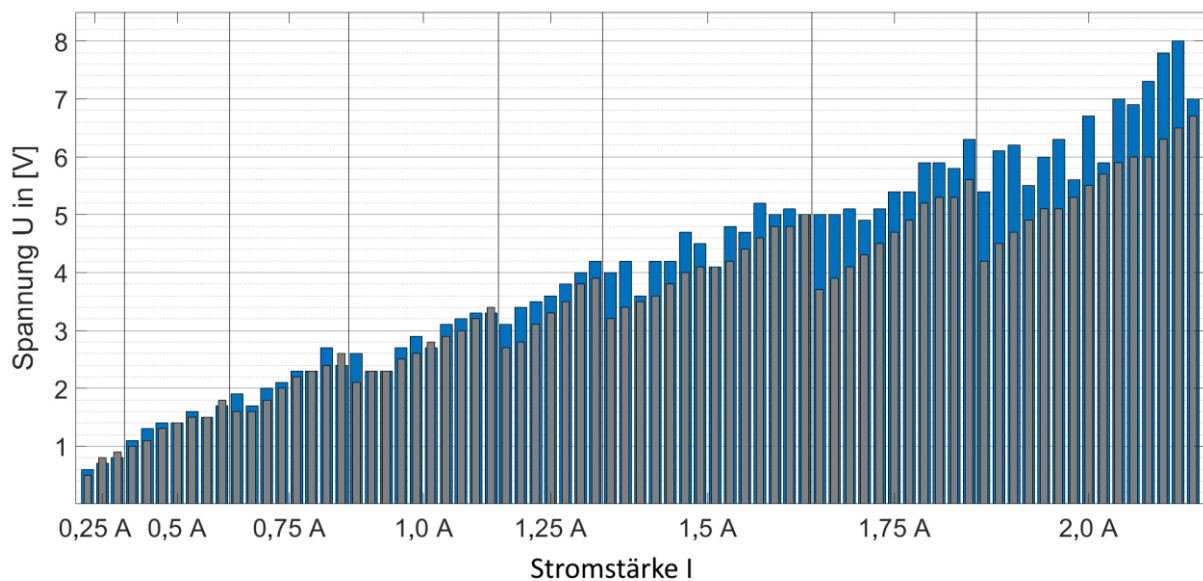


Abbildung 46 TEC2-19006 – Vergleich der reinen Messwerte und der Kombination aus Messung und analytischer Berechnung der elektrischen Spannung; Blau: Messwerte; Grau: berechnete Werte

Die größeren Diskrepanzen zwischen analytischer Berechnung und Messung sind durch die zwei Stufen des TEC2-19006 zu erklären. Die verwendeten Gleichungen sind lediglich für einstufige Peltier-Elemente ausgelegt. Wie in Abbildung 47 zu sehen ist, lässt sich der Wärmestrom durch das zweistufige Peltier-Element in zwei Teile aufgliedern.

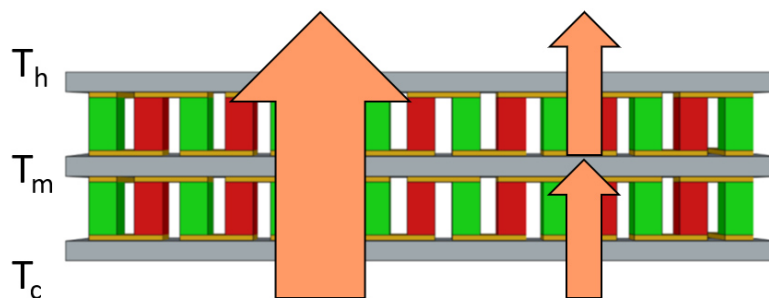


Abbildung 47 Temperaturen und Wärmeströme des zweistufigen TEC2-19006

Die beiden Stufen verhalten sich wie in Reihe geschaltete einzelne Peltier-Elemente, nur dass der thermische Kontakt zwischen beiden durch lediglich eine Keramikplatte mit geringeren Verlusten einhergeht und das Peltier-Element dadurch effizienter betrieben werden kann als zwei einzelne, in Reihe geschaltete Elemente. Bei der analytischen Berechnung der Wärmeströme ist dabei zu beachten, dass im Gegensatz zum einstufigen Element nun drei maßgebende Temperaturen berücksichtigt werden müssen. Neben den Temperaturen auf der warmen Seite  $T_h$  und auf der kalten Seite  $T_c$  ist auch die Temperatur der mittleren Platte  $T_m$  zur Bestimmung der Materialkennwerte relevant. Sind die beiden Stufen eines zweistufigen Peltier-Elementes unterschiedlich dick, oder es werden unterschiedliche Halbleitermaterialien verwendet, kann bei der Berechnung auch keine Vereinfachung durch Berücksichtigung einer vorhandenen Symmetrie ausgenutzt werden. Auch hier werden von den Herstellern keine für die Berechnung notwendigen Informationen veröffentlicht. Durch die zwei Stufen erhöht sich im in Kapitel 2.3 vorgestellten Gleichungssystem somit die Anzahl der Unbekannten auf Sieben, sodass die Berechnung der Materialkennwerte nicht mehr möglich ist.

Die im nachfolgenden Kapitel durchgeführte Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente wurde daher um eine weitere Versuchsreihe ergänzt. Mit den vorgestellten analytischen Berechnungsgrundlagen ließen sich zwar das einstufige Peltier-Element TEC1-12710 nachvollziehen und die auftretenden elektrischen Spannungen mit geringen Abweichungen berechnen, sodass auch eine Verwendung der Gleichungen zur Bestimmung der Wärmeströme als plausibel erscheint, jedoch waren die Diskrepanzen beim zweistufigen TEC2-19006 wesentlich höher, sodass zusätzlich weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt wurden.

## 7.2 Coefficient of Performance – COP

Wie im Kapitel 4.1 dargestellt wurde, konnte die transportierte Wärmeenergie in den ersten Grundlagenversuchen nicht ohne zu große Ungenauigkeiten gemessen sowie, wie im vorherigen Kapitel dargestellt, die Wärmeströme beim zweistufigen TEC2-19006 nur mit größeren Diskrepanzen analytisch berechnet werden. Aus diesem Grund erfolgte die Analyse der Wärmeströme zwar unter Zuhilfenahme der in Kapitel 2.3 vorgestellten analytischen Berechnungsgrundlagen, jedoch wurden die Untersuchungen des TEC2-19006 um weitere Experimente ergänzt. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagenversuche mithilfe der analytischen Gleichungen ausgewertet und anschließend Ergebnisse der zusätzlichen Untersuchungen des TEC2-19006 vorgestellt. Die Analyse fokussiert sich dabei auf die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente. Diese wird üblicherweise durch den Coefficient of Performance COP beschrieben, welcher die nutzbare Wärmeenergie zur erforderlichen elektrischen Energie ins Verhältnis setzt (s. 2.3.2).

In Abbildung 48 sind die COPs des TEC1-12710 in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Seite dargestellt. Wie zu erwarten, transportierte das Peltier-Element in den Versuchen mit geringen Temperaturdifferenzen und

geringen Stromstärken am effizientesten die Wärme von der einen zur anderen Seite. Diese hohe Effizienz geht jedoch auch mit geringeren Wärmeströmen einher. Der maximal ermittelte COP belief sich auf 51,1 bei einer Temperaturdifferenz von 0,2 K sowie einer Stromstärke von 0,25 A und einer Spannung von 0,3 V. Dabei stellte sich ein Wärmestrom auf der warmen Seite von 3,8 W ein. Dahingegen konnte bei einer Stromstärke von 2,5 A und einer Spannung von 5,2 V sowie einer Temperaturdifferenz von 37,8 K ein Wärmestrom von 14 W erreicht werden. In diesem Versuch wurde mit 1,08 der niedrigste COP ermittelt. Die meiste Wärmeenergie transportierte das TEC1-12710 in einem Versuch, der mit einer Stromstärke von 2,5 A und einer Spannung von 4,3 V durchgeführt wurde und bei dem sich eine Temperaturdifferenz von 19,8 K einstellte. Diese maximale Wärmeleistung lag bei 28,2 W.

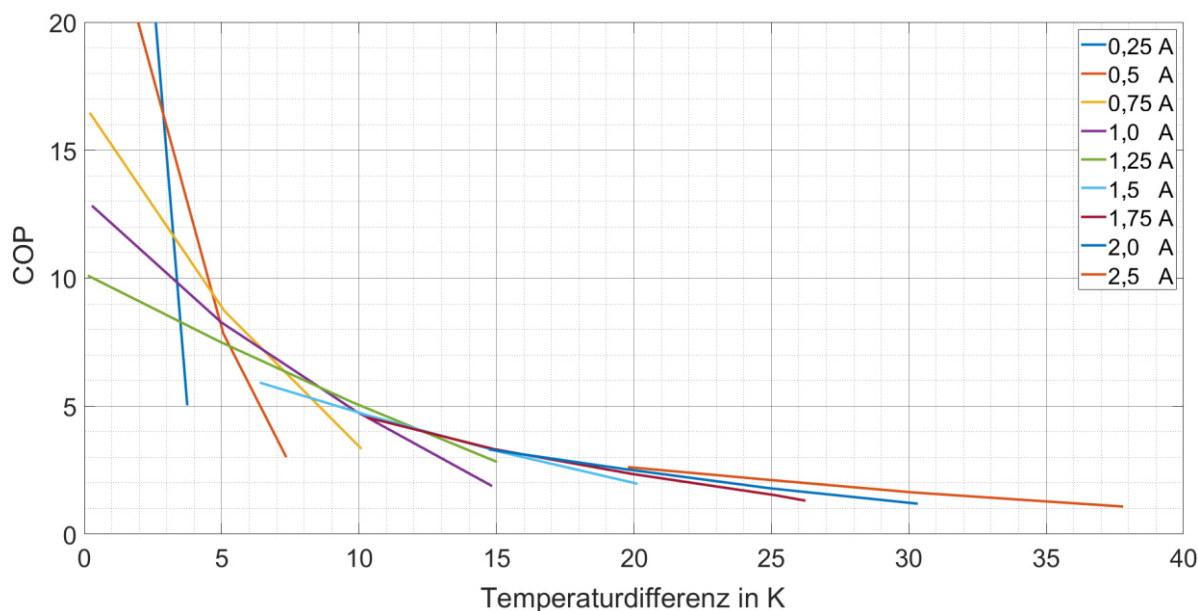


Abbildung 48 TEC1-12710 – berechnete COP des einstufigen Peltier-Elementes

Wärmeleistung und COP sind beide durch die Temperaturdifferenz und die Stromstärke bedingt. Die höchste Effizienz wird bei geringen Stromstärken und geringen Temperaturdifferenzen erreicht, die größte Wärmeleistung dagegen kann das Peltier-Element bei hohen Stromstärken und möglichst geringen Temperaturdifferenzen erbringen. Diese Abhängigkeiten konnten in den Grundlagenversuchen bestätigt werden und es ist zu erkennen, dass die Steuerung der Peltier-Elemente sowie deren erforderliche Wärmeleistung einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz der kleinen Wärmepumpen haben. Daher lohnt sich ein Blick auf die bestmöglichen COPs, die in den Grundlagenversuchen gemessen wurden, um die Grenzen der Elemente zu verdeutlichen (Abbildung 49). Die durch die Grenzabweichung  $\pm 0,2$  K der NTC-Temperaturfühler auftretenden Ungenauigkeiten der COPs wurden mithilfe einer Fehlerfortpflanzung nach Gauß ermittelt und sind in Grau dargestellt. Bei kleinen Stromstärken und dadurch auch kleinen Spannungen sind diese Grenzabweichungen der COPs größer als bei großen Stromstärken und Spannungen. Die maximale Grenzabweichung beträgt 4,77, die maximale relative Abweichung 9,33%, jeweils bei einem Versuch mit 0,25 A und dem maximalen COP von 51,1. Die geringste Grenzabweichung

entsprach einem absoluten Wert von 0,03 und einem relativen Wert von 1,18% und wurde bei einem COP von 2,6, einer Stromstärke von 2,5 A und einer Temperaturdifferenz von 19,8 K berechnet. Die Berechnung der Grenzabweichungen ist in Anhang D aufgeführt.

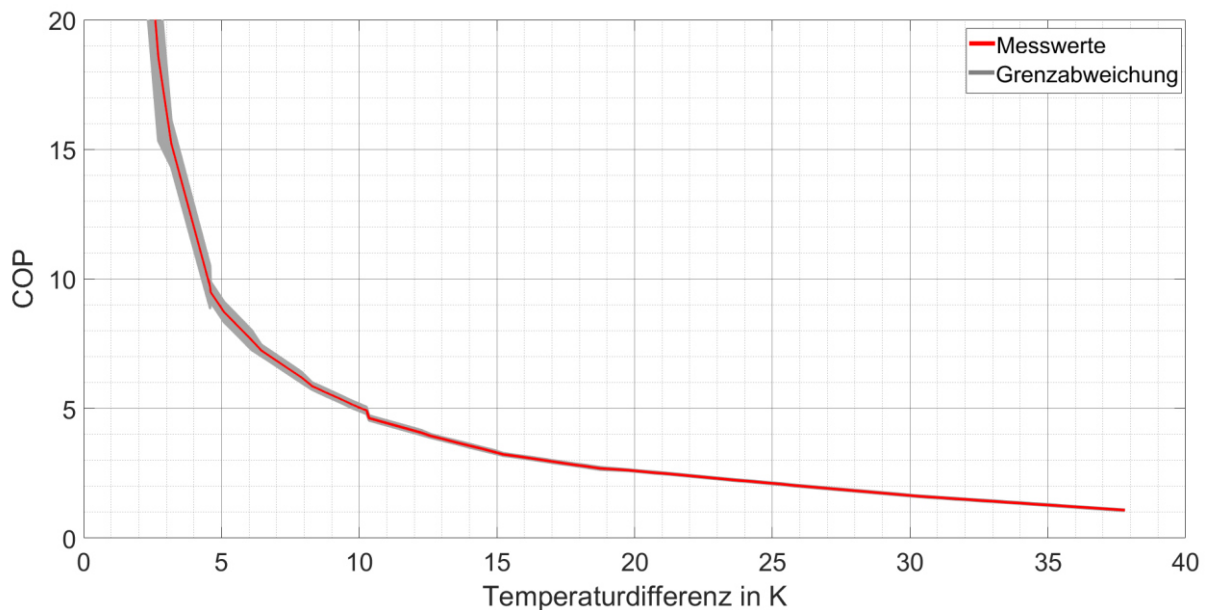


Abbildung 49 TEC1-12710 – maximale COPs der Grundlagenversuche

Anschließend erfolgten die obigen Betrachtungen am zweistufigen TEC2-19006. Auch bei diesem sind dieselben Relationen zwischen Stromstärke, Temperaturdifferenz und COP zu erkennen. Während der COP bei kleinen Stromstärken und Temperaturdifferenzen knapp über Null beim zweistufigen TEC2-19006 geringer ist als beim einstufigen TEC1-12710, liegt bereits bei 5 K der COP beim zweistufigen Element über dem des einstufigen. Diese höheren COPs sind über den gesamten Verlauf zu erkennen. Zusätzlich wurden mit dem TEC2-19006 mit allen Stromstärken höhere Temperaturdifferenzen erreicht.

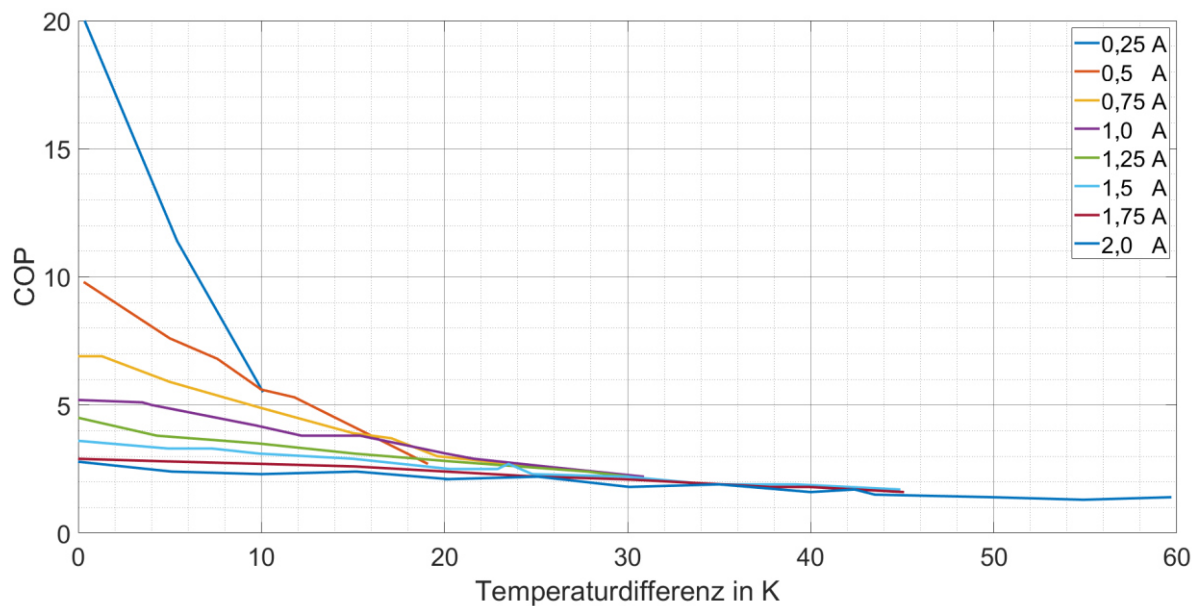


Abbildung 50 TEC2-19006 – berechnete COP des zweistufigen Peltier-Elementes

Der maximal ermittelte COP von 20,6 trat bei einer Temperaturdifferenz von 0 K sowie einer Stromstärke von 0,25 A und einer Spannung von 0,6 V auf. Dabei stellte sich ein Wärmestrom auf der warmen Seite von 3,1 W ein, somit 0,7 W weniger als beim TEC1-12710. Bei einer Stromstärke von 2,0 A und einer Spannung von 8,0 V sowie einer Temperaturdifferenz von 54,9 K konnte ein Wärmestrom von 21 W erreicht werden. Dabei wurde mit 1,3 der niedrigste COP ermittelt. Die meiste Wärmeenergie transportierte das TEC2-19006 in einem Versuch, der mit einer Stromstärke von 2,0 A und einer Spannung von 5,4 V durchgeführt wurde und bei dem sich eine Temperaturdifferenz von 0 K einstellte. Die Wärmeleistung in diesem Versuch lag bei 30,3 W. Dieser Wert liegt nur knapp über den 28,2 W des einstufigen Moduls. Das TEC1-12710 wurde jedoch mit einer 25% höheren Stromstärke für das Erreichen des maximalen Wärmestroms betrieben und der COP lag mit 2,6 unter dem COP des TEC2-19006 mit 2,8.

Auch beim zweistufigen Peltier-Element ist ein weiterer Blick auf die maximal gemessenen COPs sowie die Grenzabweichungen notwendig (Abbildung 51). Wie im Kapitel 7.1 bereits dargestellt wurde, konnte die Spannung während der Versuche mithilfe der analytischen Auswertung beim zweistufigen TEC2-19006 nur mit größeren Diskrepanzen zum tatsächlichen Messwert ermittelt werden. In Abbildung 46 ist zu sehen, dass jeder Messung eine relative Abweichung zwischen Messwert und Berechnung zugeordnet werden kann. Diese jeweiligen Werte aus dem Vergleich der Spannungen wurden in den Auswertungen der COPs zur Ermittlung der Grenzabweichung berücksichtigt und für die Berechnung der entsprechenden Wärmeleistungen angesetzt. Betrug bspw. die maximale relative Abweichung 27% bei einer Stromstärke von 2,0 A und einer gemessenen Spannung von 6,1 V, wurde diese Abweichung auch als Grenzabweichung in die Berechnung des COPs dieses Versuchsdurchlaufs übernommen. Der Einfluss der Grenzabweichungen der NTC-Temperaturfühler ist beim TEC2-19006 wegen der höheren Spannungen und des 24% kleineren Seebeck-Koeffizienten

geringer als beim einstufigen Modul.

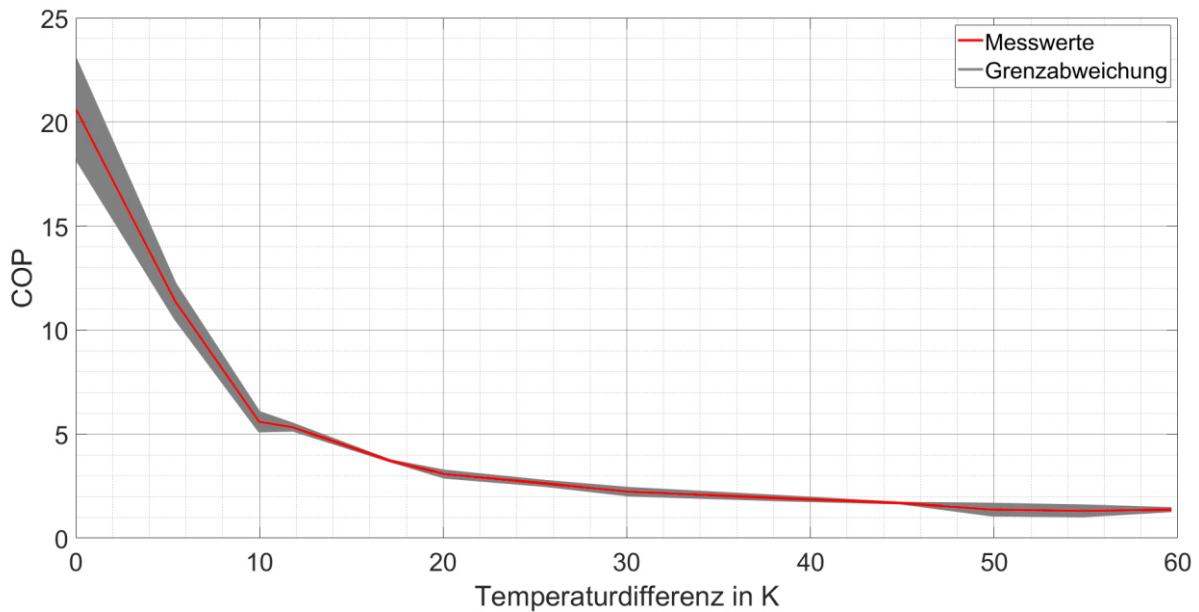


Abbildung 51 TEC2-19006 – maximale COPs und Grenzabweichung der Grundlagenversuche

Aufgrund der aufgeführten Diskrepanzen und der daraus resultierenden Grenzabweichung bei der Ermittlung der COPs wurde eine weitere Versuchsreihe mit dem zweistufigen TEC2-19006 durchgeführt, in der die warme Seite des Peltier-Elements an einen 1 m langen Kupferstab angeschlossen wurde (s. Kapitel 4.1). Durch die größeren Distanzen und dadurch höheren Temperaturdifferenzen zwischen den NTC-Temperaturfühlern konnten der Einfluss der Grenzabweichungen der NTCs minimiert und die Wärmeströme genauer berechnet werden. Die Berechnung der Wärmeströme und der Fehlerfortpflanzung sind Teil des Anhang D. In Abbildung 52 sind Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Darin werden wie zuvor die COPs in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturdifferenzen abgebildet.



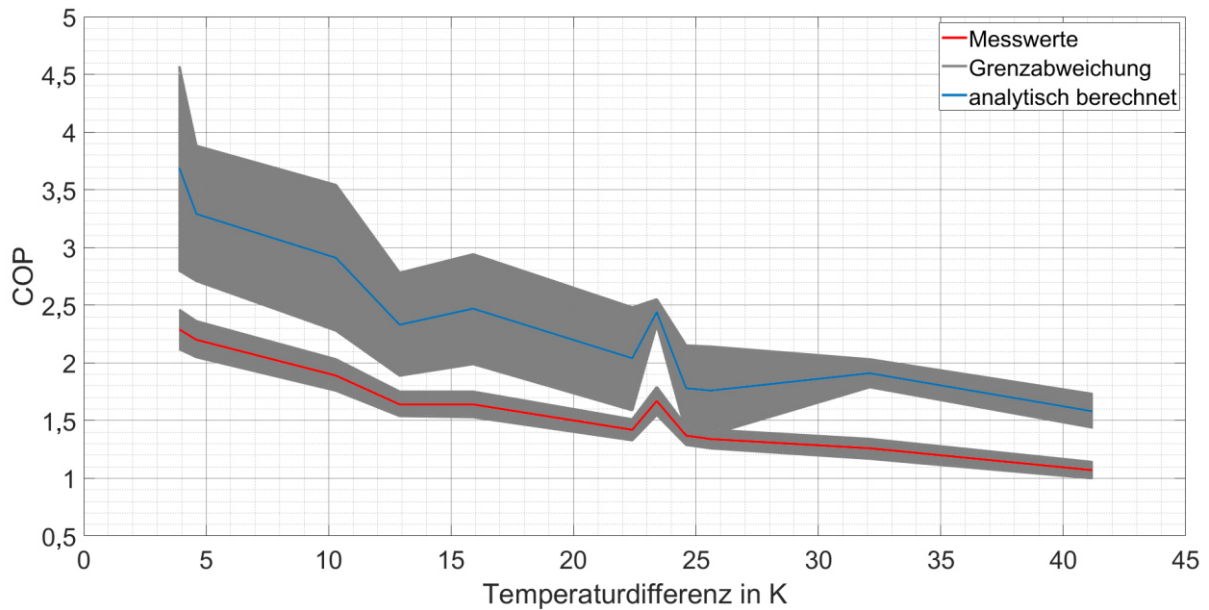


Abbildung 52 TEC2-19006 – COPs und Grenzabweichung der Versuche mit dem 1 m langen Kupferstab

Neben den aus der gemessenen Temperaturdifferenz im Kupferstab ermittelten COPs in Rot sind zusätzlich die analytisch berechneten COPs der Versuche in Blau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die COPs und daher auch die Wärmeleistung des TEC2-19006 durch die analytische Berechnung systematisch überschätzt werden. Im Mittel liegen die analytischen Werte um 46% über den gemessenen Wärmeströmen. Die beiden in Grau dargestellten Grenzabweichungen schneiden sich lediglich in einem kleinen Bereich um eine Temperaturdifferenz von 25 K herum. Die Diskrepanzen sind dadurch zu erklären, dass der Grenzbereich der analytischen Methode wie zuvor aus der relativen Differenz der gemessenen und der berechneten Spannung ermittelt wurde. In der Gleichung (7.3) werden jedoch lediglich zwei der drei Materialkennwerte berücksichtigt. Die thermische Leitfähigkeit  $K$  ist somit als unbekannte Ungenauigkeit in der Ermittlung der Grenzabweichung nicht berücksichtigt.

Es konnte gezeigt werden, dass die analytische Auswertung der Grundlagenversuche beim einstufigen TEC1-12710 lediglich zu geringen Abweichungen führte und folglich bei diesem Modul die Wärmeleistung und damit der COP mithilfe der verwendeten Gleichungen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Diese Gleichungen erwiesen sich jedoch beim zweistufigen TEC2-19006 nicht mehr als funktionelles Werkzeug. Die Diskrepanzen zwischen Messung und Berechnung waren systematisch größer als beim einstufigen Element und die Wärmeleistung und die COPs wurden systematisch überschätzt, was mithilfe eines weiteren modifizierten Versuchsaufbaus und dadurch messbaren Wärmeströmen nachgewiesen wurde. Zur Auswertung der Versuche der Prototypen konnte jedoch nicht auf genügend Ergebnisse dieser Grundlagenversuche zurückgegriffen werden, da die Versuche mit dem langen Kupferstab nur für einen geringen Temperaturbereich aussagekräftig sind und dabei hohe Temperaturdifferenzen benötigt werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu gewährleisten. Somit war es erforderlich, die Effizienz der Prototypen mithilfe eines neuen Kennwertes zu beschreiben und zu bewerten. Dafür waren

zunächst Untersuchungen der Oberflächentemperaturen auf den Prototypen notwendig, um die Leistungsfähigkeit analysieren zu können.

### 7.3 Wärmeleistung und Oberflächentemperaturen der Prototypen

Die Oberflächentemperaturen wurden experimentell anhand der Versuchsreihe im Kubus und simulativ in VOLTRA und TRISCO untersucht. Vor allem ein Blick auf die qualitativen Ergebnisse der Bauteilsimulationen verdeutlicht dabei die Temperaturverteilung auf den Oberflächen der Wandsysteme mit integrierter Flächenheizung. Wie in Abbildung 53 zu sehen ist, sind die Positionen der Peltier-Elemente anhand kleiner Hotspots klar zu erkennen. Dargestellt sind die vier bereits in Kapitel 5.2 vorgestellten Wandmodelle. Die Abstände zwischen den Peltier-Elementen betrugen 50 cm und die Peltier-Elemente erreichten eine maximale Temperatur von 35,3 °C, welche aus experimentellen Untersuchungen der Prototypen entnommen wurde.

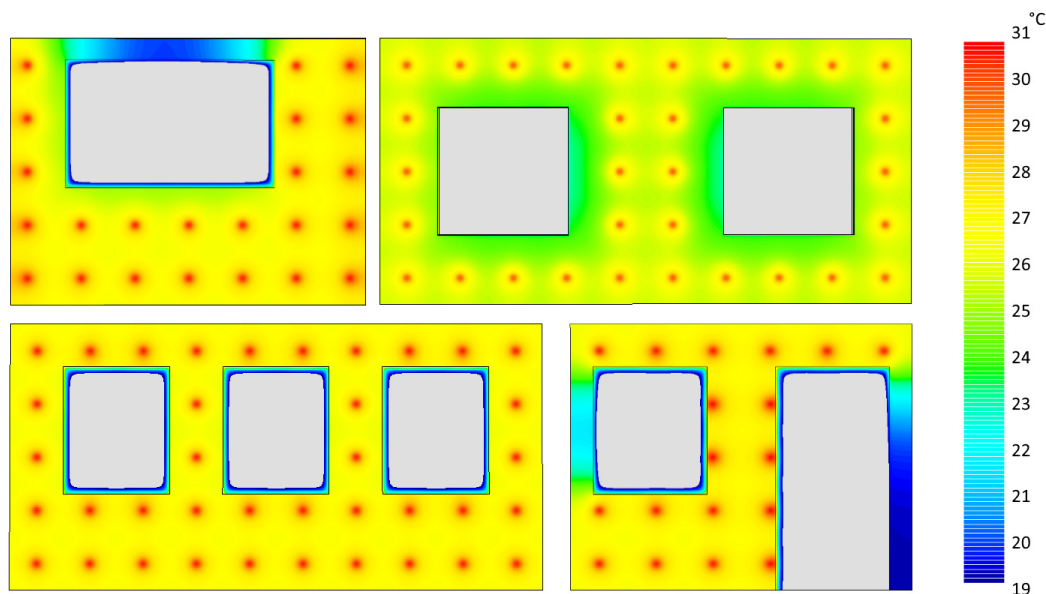


Abbildung 53 Temperaturverläufe auf unterschiedlichen Wandgeometrien, Simulationsergebnisse aus TRISCO

Die mittleren Oberflächentemperaturen der dargestellten Wandsysteme reichten von 25,7 °C bis 27,7 °C. Zusätzlich zu den Oberflächentemperaturen können in TRISCO auch die Wärmeleistungen pro Quadratmeter ausgegeben werden. Die höchste Wärmeleistung erreichte die untere linke Wand mit 55,9 W/m<sup>2</sup> und die geringste die obere rechte Wand mit 43,8 W/m<sup>2</sup>. Der Einfluss der Wandöffnungen und speziell jener Bereiche um diese Öffnungen, in denen keine Peltier-Elemente waren oder diese mit größerer Distanz zur Öffnung positioniert wurden, ist sowohl in der Abbildung 53 als auch in den ermittelten Wärmeleistungen der Wände deutlich zu erkennen. Durch die geringeren Temperaturen in diesen Bereichen reduziert sich auch die mittlere Wärmeleistung der jeweiligen Wand. Neben den bestmöglichen Abständen zwischen den Elementen müssen folglich auch die Abstände

zu den Wandöffnungen in der Konzeption eines Wandsystems berücksichtigt werden.

Während die mittlere Oberflächentemperatur in den Simulationsprogrammen ausgegeben werden kann, war es für die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erforderlich, anhand der Messpunkte auf der Oberfläche der Prototypen die mittlere Oberflächentemperatur näherungsweise zu berechnen. Dazu wurden weitere Temperaturen zwischen den Messpunkten iterativ berechnet und anschließend Temperaturfelder ermittelt. Durch Integration der Temperaturen über die Fläche der zugeordneten Felder konnte so eine mittlere Temperatur berechnet werden. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den in TRISCO ermittelten Oberflächentemperaturen verglichen. Dazu wurden in TRISCO in validierten Modellen der Kubusversuche die thermischen Randbedingungen und Peltier-Temperaturen realistisch an die Messwerte während der jeweiligen Versuche angepasst. Im Zuge dieser Untersuchungen stellte sich heraus, dass das arithmetische Mittel der beiden NTC-Temperaturfühler M2 und M3 (s. Abbildung 33) mit nur geringen Abweichungen der mittleren Oberflächentemperatur der Prototypen in den Simulationen entsprach. Da diese Modelle validiert waren und nur geringe Diskrepanzen zwischen gemessenen und simulierten Werten auftraten, konnte in den weiteren Untersuchungen vereinfacht das arithmetische Mittel aus M2 und M3 zur Ermittlung der mittleren Oberflächentemperatur verwendet werden. In Tabelle 10 sind beispielhaft Ergebnisse einer Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse aus einer Messung im Februar 2021 dargestellt. Auch in diesen Untersuchungen wurden NTC-Temperaturfühler mit einer Grenzabweichung von  $\pm 0,2$  K verwendet. Die größte Diskrepanz trat mit einer Abweichung von knapp 2% beim NTC-Temperaturfühler M5 in der Mitte des Prototyps auf. Die Abweichung der mittleren Oberflächentemperatur  $T_{R,M}$  betrug lediglich 0,38%. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichungen der Temperaturfühler erhöht sich die maximale Abweichung auf bis zu 2,9% und die Abweichung zur Oberflächentemperatur liegt in einem Bereich zwischen -0,5% und 1,3%. Der obere Wert dieser Spalte wurde als Ergebnis der Simulation in TRISCO ausgegeben, der untere entspricht dem arithmetischen Mittel aus M2 und M3. In den experimentellen Untersuchungen zeigte sich auch, dass nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen den Hotspots auf Höhe der Peltier-Elemente und der mittleren Oberflächentemperatur entstehen. In Tabelle 10 beträgt diese Abweichung 1,0 K. Die größten Abweichungen lagen in einem Bereich zwischen 3,5 und 4,6 K und traten unmittelbar auf Höhe der Peltier-Elemente auf. Aufgrund der geringen Ausdehnungen dieser wärmeren Bereiche beeinflussen die leicht heterogenen Temperaturverläufe die Symmetrie der Wärmestrahlung nicht maßgeblich und sind vernachlässigbar.

Tabelle 10 Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse einer Messung vom 02.02.2021 - 10.02.2021; Vergleich der mittleren Oberflächentemperatur  $T_{R,M}$  als Ergebnis der Simulation und aus vereinfachter Bestimmung als arithmetisches Mittel aus M2 und M3

	<b>M1</b> [°C]	<b>M2</b> [°C]	<b>M3</b> [°C]	<b>M4</b> [°C]	<b>M5</b> [°C]	<b>T<sub>R,M</sub></b> [°C]
VERSUCHE	23,49	22,79	22,37	23,43	21,98	22,49
SIMULATION	23,50	22,64	22,51	23,50	22,41	22,58
DIFFERENZ	0,04%	-0,66%	0,63%	0,30%	1,96%	-0,39%

Aus den mittleren Oberflächentemperaturen und der Raumlufttemperatur im Kubus ließ sich anschließend die Wärmeleistung der Prototypen berechnen. Wie bereits in Gleichung (6.5) vorgestellt wurde, wird nach DIN EN 11855-2 [117] die Wärmeleistung einer Wandheizung aus dem Produkt der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Raumluft und dem inneren horizontalen Wärmeübergangskoeffizient berechnet. Dieser wird in der DIN EN 11855-2 mit 8,0 W/m<sup>2</sup>K angegeben. Mithilfe der Wärmeleistung konnte anschließend die Effizienz der Prototypen untersucht werden.

#### 7.4 System-COP der Prototypen

Zur Analyse der energetischen Effizienz der Prototypen und der in den Simulationen untersuchten Modelle wurde ein System-COP als Quotient aus der im vorherigen Kapitel vorgestellten Wärmeleistung (Gleichung (6.5)) und der benötigten elektrischen Leistung berechnet.

$$\text{System-COP} = \frac{8 \cdot (T_{R,M} - T_a)}{U \cdot I} \quad (7.8)$$

Mithilfe dieses Kennwerts konnten zunächst die Wandmodelle in VOLTRA und TRISCO analysiert werden, um den optimalen Abstand zwischen den einzelnen Peltier-Elementen zu ermitteln. Dazu wurden unterschiedliche Wandgeometrien mit verschiedenen regelmäßigen Abständen zwischen den einzelnen Modulen modelliert. Die Peltier-Temperaturen und die erforderliche elektrische Energie aus durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde als Grundlage für die Modellierung der Peltier-Elemente verwendet. Ein Abstand von 60-70 cm zwischen den Peltier-Elementen erwies sich dabei als effizienteste Aufteilung der einzelnen Module, das Verhältnis der Wärmeleistung der betrachteten Wände zur benötigten elektrischen Energie der Peltier-Elemente war folglich am günstigsten, was wiederum auf die geringere Anzahl an Peltier-Elementen zurückzuführen war. Diese Effizienz ging jedoch durch die geringere Anzahl an Modulen auch mit einer geringeren Leistung als bei Abständen von 50 cm einher, sodass die Elemente häufiger mit höheren Stromstärken betrieben werden

müssten, um eine vergleichbare Leistung zu erzielen. In den Simulationen lagen lediglich Ergebnisse der erreichten Temperaturen der Peltier-Elemente und der dafür erforderlichen elektrischen Energie aus den Laborversuchen als Datengrundlage zur Verfügung. Die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Randbedingungen waren somit in den Vergleichen nicht möglich. Um diese Einflüsse für die optimale Verteilung der Peltier-Elemente auf der Wand untersuchen zu können, war es folglich notwendig, zuvor die Freilandversuche auszuwerten.

In den Freilandversuchen wurde ein Prototyp mit vier Peltier-Elementen in einem Kubus im Außenbereich der TU Kaiserslautern installiert (vgl. Kapitel 4.3). In diesen Versuchen wurden neben dem erforderlichen Strombedarf auch die Innen- und die Außentemperatur sowie an fünf Positionen die Oberflächentemperatur des Prototyps gemessen, sodass mithilfe der Gleichung (7.8) der System-COP zur Analyse der Effizienz des Prototyps ermittelt werden konnte. Zunächst wurden aus den über längere Zeiträume von ein bis zwei Wochen laufenden Versuchen die Daten jener Zeiträume entnommen, in denen sowohl die Außen- als auch die Innentemperatur konstant blieben und ein annähernd stationärer Zustand des Gesamtsystems vorlag (s. roter Bereich in Abbildung 54). Während die Außentemperatur in dem umrandeten Bereich annähernd konstant erscheint, oszilliert die Lufttemperatur im Kubus wegen der Schaltung des Prototyps um eine Soll-Temperatur von etwa 20 °C. Diese Innentemperatur von etwa 20 °C war eine notwendige Voraussetzung bei der Analyse der Effizienz des Prototyps, da so die Leistungsfähigkeit des Systems gewährleistet wurde. Auf diese Weise konnte der System-COP in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen außen und innen ermittelt werden.

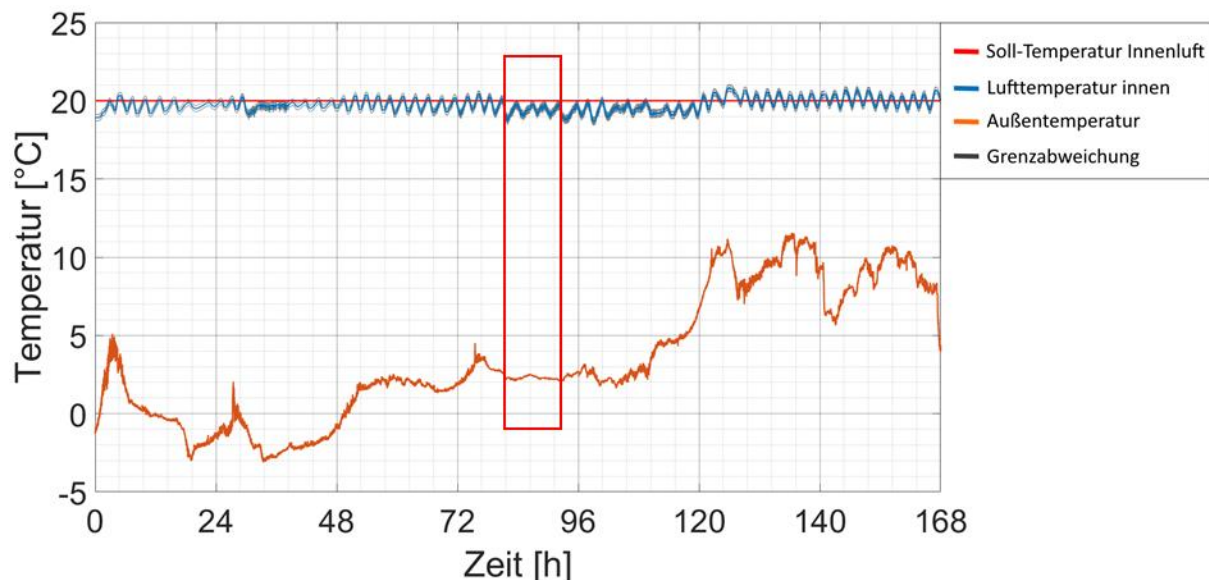


Abbildung 54 Beispiel eines ausgewählten Zeitraums (rotes Rechteck) aus einer einwöchigen Messung zur Analyse des System-COPs

Aus den ein- bis zweiwöchigen Zeiträumen wurde so eine Vielzahl von kleineren Zeiträumen mit einer Dauer von mindestens drei Stunden ausgewählt. Innerhalb dieser Zeiträume lief der

Prototyp mit einer zweistufigen Schaltung (vgl. Kapitel 4.3). Die Auswertung erfolgte, indem die Wärmeleistung des Prototyps, ebenso wie die elektrische Leistung zum Betrieb der vier Peltier-Elemente, jeweils über den kurzen Zeitraum gemittelt wurde. Daraus ergab sich jeweils ein System-COP in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz sowie der Stromstärke, mit der der Prototyp währenddessen betrieben wurde. Die Soll-Temperatur im Kubus blieb stets bei etwa 20 °C. Die Außentemperaturen unterlagen hingegen natürlichen Schwankungen und erreichten während der gesamten Testphase Temperaturen zwischen -7 °C und 25 °C. Die Stromstärke wurde manuell eingestellt und richtete sich nach den zu erwartenden Außentemperaturen zu Beginn einer jeden Testwoche. Dadurch ergaben sich bei einigen Temperaturdifferenzen unterschiedliche System-COPs, da der Prototyp bei identischen Außentemperaturen auch mit verschiedenen Stromstärken betrieben wurde. In Abbildung 55 sind Ergebnisse der Untersuchungen der Freilandversuche des Prototyps dargestellt.

Stromstärke des Reglers auf Stufe 2											
ΔT	2,4 A	2,3 A	2,2 A	2,1 A	2,0 A	1,9 A	1,8 A	1,7 A	1,6 A	1,5 A	1,4 A
25 K			0,76 ± 0,05								
24 K			0,77 ± 0,05								
23 K											
22 K			0,86 ± 0,07								
21 K						0,82 ± 0,07					
20 K							0,89 ± 0,08				
19 K			0,85 ± 0,09		0,96 ± 0,09		0,93 ± 0,09				
18 K			0,83 ± 0,09	0,95 ± 0,08			0,97 ± 0,10				
17 K			0,93 ± 0,09		0,98 ± 0,08		0,94 ± 0,10	0,91 ± 0,10			
16 K			0,84 ± 0,10			0,99 ± 0,10					
15 K					0,89 ± 0,13	1,07 ± 0,12		1 ± 0,13			
14 K					1,07 ± 0,15			1,04 ± 0,15	1,03 ± 0,13		
13 K	0,93 ± 0,11						0,9 ± 0,12				
12 K							1,12 ± 0,17				
11 K							1,12 ± 0,15				
10 K						1,28 ± 0,19					1,54 ± 0,33
9 K					1,04 ± 0,11				1,29 ± 0,21		
8 K											
7 K						1,54 ± 0,33					

Abbildung 55 Matrix der System-COP-Werte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen außen und innen sowie der Stromstärke auf Stufe 2 des Reglers

Es konnten 32 Zeiträume identifiziert werden, die die Anforderungen an die konstanten Außen- und Innentemperaturen erfüllten. Es stellten sich Temperaturdifferenzen von 7 K bis 25 K während der Untersuchungen ein. Die System-COPs sind in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie der Stromstärke auf Stufe 2 des zweistufigen Reglers dargestellt, also jener Stromstärke, die im Heizbetrieb für die Aufrechterhaltung der Soll-Temperatur maßgebend ist. Die Grenzabweichungen wurden mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung aus der Grenzabweichung von ±0,2 K der NTC-Temperaturfühler berechnet (s. Anhang D). Durch einen Blick auf die dreidimensionale Darstellung der Matrix in Abbildung 56 zeigen sich wieder die typischen Relationen der Peltier-Elemente. Die höchsten System-COPs werden vom Prototyp bei den geringsten Temperaturdifferenzen und Stromstärken erreicht (vorderer Bereich). Nach hinten fallen die System-COPs immer weiter ab und erreichen ihr Minimum von 0,76 bei der höchsten gemessenen Temperaturdifferenz von 25 K und einer Stromstärke von 2,2 A. Bis zu einer Temperaturdifferenz von 15 K konnten System-COPs größer 1 gemessen werden, darüber war mehr elektrische Energie notwendig, als Wärmeenergie genutzt werden konnte. Es konnte

somit gezeigt werden, dass der Prototyp grundsätzlich mit weniger Energie betrieben, als durch ihn nutzbar gemacht werden kann, jedoch nur bis zu einer gewissen Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Die hohen COPs der grundlegenden Peltier-Versuche, in welchen sich die Peltier-Elemente in einer Laborumgebung befanden, wurden in den Versuchen mit den Prototypen nicht erreicht, was auf Wärmeverluste innerhalb der Konstruktion zurückzuführen ist. Der System-COP des Prototyps wird aus der effektiv in den Raum geleiteten Wärme berechnet. Durch die hohen Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Seiten des Peltier-Elementes bzw. zwischen dessen warmer Seite und der Außenluft wird über die gesamte Fläche des Prototyps und speziell über die Aluminiumstäbe auch punktuell Wärme nach außen transportiert. Zusätzlich sind die Wärmespeicherkapazitäten der Aluminiumplatte sowie der Gipskartonplatte zu berücksichtigen, da in diesen ein Teil der Wärmeenergie gespeichert und nicht unmittelbar in den Raum abgegeben wird, wodurch sich der Wärmestrom in den Raum verringert. Durch die zweistufige Steuerung stellt sich zudem kein stationäres Gleichgewicht ein, sodass sich die Aufheiz- und Abkühlphasen der beiden Platten stets wiederholen und sich somit die Aluminium- und Gipskartonplatte nie in einem thermischen Gleichgewicht befinden. Um das thermoelektrische Heizsystem energetisch bewerten zu können, war es erforderlich, die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in eine Gebäudesimulation in TRNSYS zu integrieren und so zu untersuchen, welche Temperaturdifferenzen maßgebend für den Betrieb des Systems sind, über den Zeitraum eines gesamten Jahres.

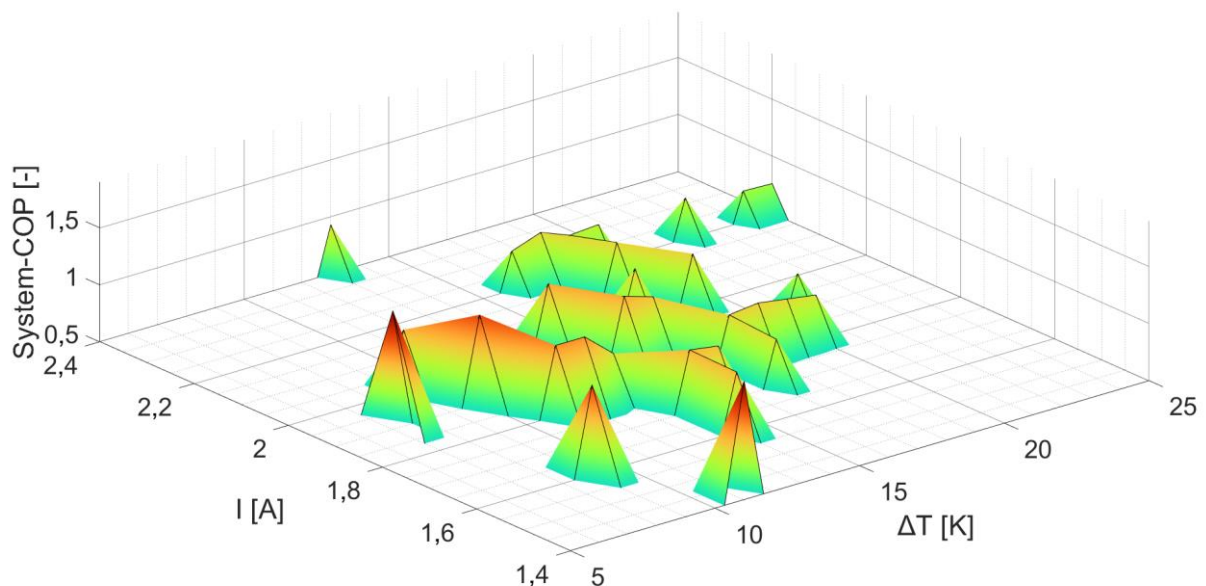


Abbildung 56 dreidimensionale Darstellung der System-COPs

Aus den obigen Untersuchungen wurde zusätzlich deutlich, dass das Heizsystem mit unterschiedlichen Stromstärken betrieben werden kann, um bei identischen Außentemperaturen die Soll-Innentemperatur von 20 °C aufrecht zu erhalten. Folglich ließ sich aus der Matrix in Abbildung 55 für jede Temperaturdifferenz ein optimaler System-COP ermitteln, der in den Freilandversuchen erreicht wurde und somit durch intelligente Steuerung

auch in Zukunft reproduzierbar wäre. Für die Simulationen in TRNSYS konnte daher jeder Temperaturdifferenz ein System-COP mit Grenzabweichung nach Abbildung 57 zugeordnet werden, durch den aus dem stündlichen Heizwärmebedarf die erforderliche elektrische Energie berechnet wurde. Da im Zuge der Freilandversuche nicht alle über den Zeitraum eines gesamten Jahres zu erwartenden Temperaturdifferenzen gemessen werden konnten, wurden für alle fehlenden Werte eines Bereiches zwischen 5 K und 30 K die entsprechenden System-COPs interpoliert. Die an TRNSYS übergebenen Werte (System-COPs und Grenzabweichungen) sind links neben dem Diagramm in Abbildung 57 dargestellt.

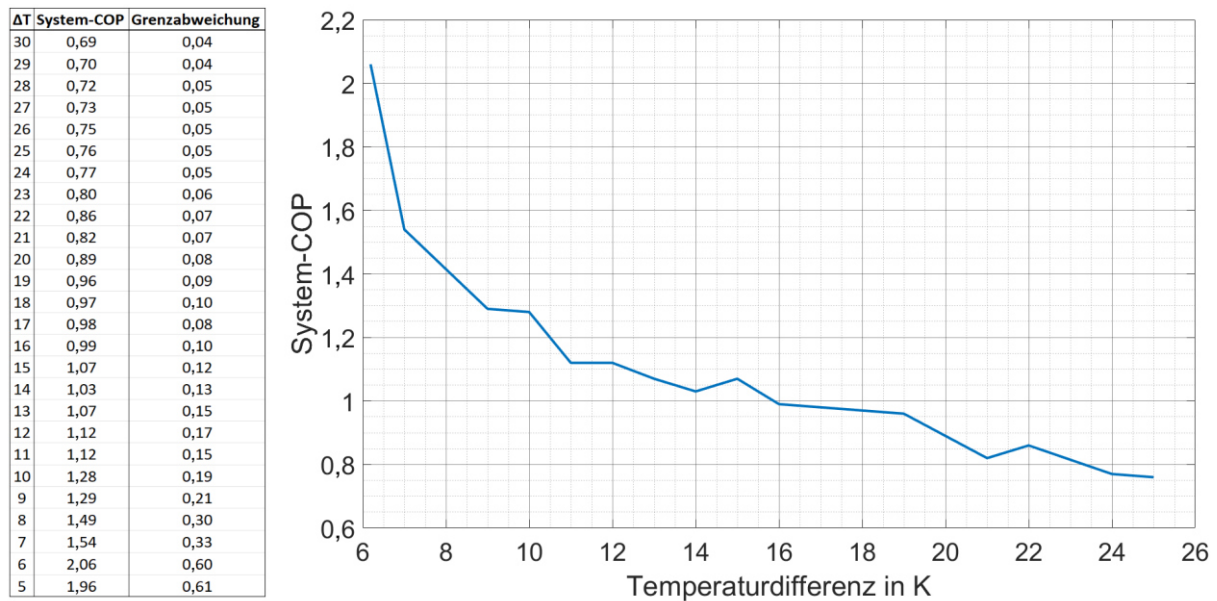


Abbildung 57 maßgebende System-COPs des Prototyps in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie der Stromstärke; Tabelle links als Grundlage für die Simulationen in TRNSYS

## 7.5 Behaglichkeit des Gesamtsystems

Bevor das Heizsystem in TRNSYS energetisch bewertet werden konnte, war es erforderlich, dessen Behaglichkeit näher zu betrachten. Dadurch wurde eine realistische Modellierung des thermoelektrischen Heizsystems gewährleistet und so die Auswirkungen auf die Nutzer\*innen in den Auswertungen berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde mithilfe der Behaglichkeitskennwerte PMV, PPD und der operativen Temperatur in den Simulationen ein Behaglichkeitsstandard sichergestellt und so ein realistisches Raumklima modelliert. Diese Einstellungen wirkten sich auf die Energiebedarfe der betrachteten Gebäude aus und waren daher Voraussetzung für die anschließenden energetischen Betrachtungen.

Im Bürogebäude (Abbildung 42, links) wurden in allen Zonen dieselben Randbedingungen für die Behaglichkeit hinterlegt. Als Bekleidungsisolationswert wurde 1,0 clo und die körperliche Aktivität wurde mit 1,2 met für eine sitzende Bürotätigkeit gewählt. In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind Ergebnisse der Simulationen dargestellt. Wie zu sehen ist, lag die thermische Behaglichkeit des thermoelektrischen Heizsystems in allen Jahreszeiten stets innerhalb der



Kategorie B der DIN EN ISO 7730 [16], das heißt die PMV-Werte lagen in allen betrachteten Stunden zwischen -0,5 und 0,5. In den dargestellten Ergebnissen wurden lediglich jene Stunden betrachtet, in denen der Raum genutzt wurde. Ferner lag der Fokus auf dem Heizfall. Maßgebend waren dabei PMV-Werte  $<0$ , da auf diese Weise verhindert wurde, dass die Einflüsse zu warmer Außentemperaturen berücksichtigt wurden und da durch die Art der Modellierung des Heizsystems durch dieses bedingt keine Werte  $>0$  möglich waren. Im Mittel lag der PPD während der Nutzungszeit im Winter in allen Zonen bei 7,1%. Diese Werte wurden bei einer operativen Temperatur von 20,8 °C bis 21,1 °C erreicht (Tabelle 12).

Tabelle 11 Anzahl der Stunden, in denen das PMV im Bürogebäude außerhalb der jeweiligen Kategorien nach DIN EN ISO 7730 [16] liegt, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten; nur Heizfall  $PMV < 0$

	EG 1	OG 1.1	OG 2.1	EG 2	OG 1.2	OG 2.2	
A	723	701	713	721	713	713	Winter
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	
A	234	165	180	230	180	181	Frühling
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	
A	0	0	0	0	0	0	Sommer
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	
A	159	144	158	159	158	158	Herbst
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	

Tabelle 12 operative Temperaturen der einzelnen Zonen des Bürogebäudes bei eingeschalteter Peltier-Heizung

	EG 1	OG 1.1	OG 2.1	EG 2	OG 1.2	OG 2.2
Operative Temperatur [°C]	21,1	20,8	21,1	21,1	21,1	21,1

Die Ergebnisse zeigen, dass das thermoelektrische Heizsystem im Bürogebäude ein behagliches Innenraumklima aufrechterhalten konnte. Mit einem PMV der Kategorie B und operativen Temperaturen um die 21 °C lag der Anteil jener Personen, die mit dem Raumklima wahrscheinlich unzufrieden sein werden (PPD, vgl. Kapitel 2.1.2) bei 7,1% und somit nur 2,1% über dem minimalen PPD von 5%.

Dagegen waren die Ergebnisse des Wohngebäudes (Abbildung 42, rechts) nicht so eindeutig. Die Besonderheit eines Wohngebäudes liegt in den unterschiedlichen Nutzungszeiten und -arten sowie Raumklimata der jeweiligen Räume (Anhang C). Für die Auswertung der

Behaglichkeit der einzelnen Räume ließen sich von vornherein bereits einige ausschließen. In Schlafzimmern liegen häufig Temperaturen vor, die mit dem PMV-Modell nach Fanger nicht zu bewerten sind und nachts fühlen sich dort Bewohner\*innen auch bei Temperaturen um die 17 °C noch behaglich [113]. In Badezimmern hingegen werden Temperaturen um die 23 °C als behaglich empfunden [114]. Die Bewertung der Behaglichkeit im Wohngebäude fokussierte sich daher auf das Wohnzimmer, das Büro und die Küche, da sich Bewohner\*innen üblicherweise über längere Zeiträume in diesen Räumen aufhalten und die Nutzungsarten am ehesten mit jenen des Modells nach Fanger vergleichbar sind. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt. Dabei ist auffällig, dass im Winter in 812 Stunden im Wohnzimmer keine Grenzwerte für eine der drei Kategorien nach DIN EN ISO 7730 [16] eingehalten werden können, das heißt, die PMV-Werte lagen außerhalb der Grenzwerte zwischen -0,7 und 0,7. Auch an der operativen Temperatur lässt sich erkennen, dass das thermoelektrische Heizsystem die erforderlichen Temperaturen in diesem Raum nicht aufrechterhalten konnte. Dagegen wurde in Küche und Bad ein ähnlicher Standard erreicht wie im Bürogebäude. Die Behaglichkeit ist der Kategorie B zuzuordnen und die operative Temperatur lag bei 20,9 °C und 21,3 °C. Auch im Wohngebäude lag der Fokus auf dem Heizfall und PMV-Werten  $\leq 0$ .

Tabelle 13 Anzahl der Stunden, in denen das PMV im Wohngebäude außerhalb der jeweiligen Kategorien nach DIN EN ISO 7730 [16] liegt, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten; nur Heizfall  $PMV < 0$

	Wohnzimmer	Küche	Büro	
A	812	407	622	Winter
B	812	0	0	
C	812	0	0	
A	797	96	226	Frühling
B	739	0	0	
C	687	0	0	
A	184	0	0	Sommer
B	102	0	0	
C	80	0	0	
A	530	64	140	Herbst
B	457	0	0	
C	417	0	0	

Tabelle 14 operative Temperaturen der drei betrachteten Räume des Wohngebäudes bei eingeschalteter Peltier-Heizung

	Wohnzimmer	Küche	Büro
Operative Temperatur [°C]	18,2	21,3	20,9

Das thermoelektrische Heizsystem konnte somit in Küche und Bad ein behagliches Innenraumklima gewährleisten, im Wohnzimmer war dies jedoch nicht möglich. Die Besonderheit bei diesem Raum lag in der Raumgeometrie und der im Verhältnis zur Raumgröße geringen Außenwandfläche, in der das Peltier-System installiert werden konnte. Diese Außenwand hatte zusätzlich einen sehr großen Fensterflächenanteil, sodass lediglich eine geringe Heizfläche zur Verfügung stand und dadurch keine ausreichende Wärmeleistung gewährleistet werden konnte.

Die Untersuchungen der thermischen Behaglichkeit in den vorgestellten Gebäuden konnte grundsätzlich aufzeigen, dass das thermoelektrische Heizsystem leistungsfähig ist und ein behagliches Innenraumklima sicherstellen kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das System vor allem bei Außenwänden mit großen Fensterflächenanteilen an seine Grenzen stoßen kann. Ist der zu beheizende Raum zusätzlich noch groß, könnte dies dazu führen, dass das Peltier-System, wie im Wohnzimmer des betrachteten Wohngebäudes, nicht als alleiniges Heizsystem verwendet werden kann. Im Anschluss an diese Untersuchungen wurden die Modelle in TRNSYS weiter untersucht. Dabei lag der Fokus auf der Energieeffizienz des thermoelektrischen Heizsystems.

## **7.6 Energetische Bewertung des Gesamtsystems**

Nachdem die Grundlagen der TRNSYS Simulationen durch die Auswertung der Freilandversuche und der TRNSYS Modelle bezüglich thermischer Behaglichkeit ausgearbeitet wurden, konzentrierten sich die abschließenden Untersuchungen auf die energetische Bewertung des Gesamtsystems. TRNSYS berechnet für jeden Zeitschritt eine Vielzahl unterschiedlicher Werte, die der Analyse des betrachteten Gebäudesystems dienen. Für die beiden Gebäudemodelle wurde ein Zeitschritt von 0,5 h gewählt, sodass TRNSYS für jede halbe Stunde unter anderem die Innen- und Außentemperatur sowie die erforderliche Wärmeenergie berechnete. Aus diesen Werten ließ sich mithilfe der System-COPs aus Abbildung 57 die Wärmeenergie in die erforderliche elektrische Energie zum Betreiben des thermoelektrischen Flächenheizsystems umrechnen. Dafür wurde jedem Zeitschritt in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ein System-COP zugeordnet. Aus diesen halbstündlichen System-COPs konnte zusätzlich ein jährlicher System-COP berechnet werden, um analog zur Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe aufzuzeigen, wie effizient das Peltier-System über das gesamte Jahr arbeiten kann.

In Abbildung 58 werden die erforderlichen Wärmeenergien der sechs Zonen des Bürogebäudes den Werten für die erforderliche elektrische Energie gegenübergestellt, also die Nutzenergiebedarfe den jeweiligen Endenergiebedarfen. Bezugspunkt ist jeweils die erforderliche Wärmeenergie mit 100% in Rot. Die elektrische Energie wird als relative Abweichung zur Wärmeenergie in Grau dargestellt. Dabei wurde in den Simulationen auch der Einfluss der Grenzabweichungen der NTC-Temperaturfühler auf die Grenzabweichung des System-COPs berücksichtigt. Der Fehlerbereich ist in Blau dargestellt. Der Abbildung ist zu

entnehmen, dass der Endenergiebedarf in allen Zonen zwischen 7,9% und 10,5% größer ist als die benötigte Nutzenergie. Die Grenzabweichungen umfassen einen Bereich zwischen 98,7% und 121,4% des Nutzenergiebedarfes.

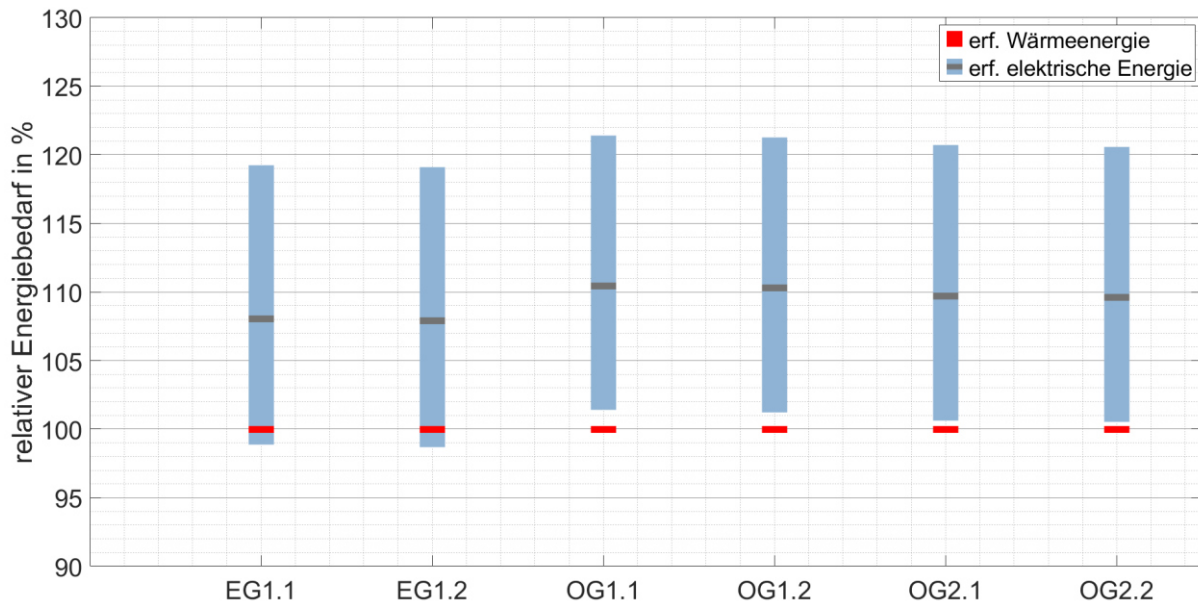


Abbildung 58 relative Abweichungen zwischen erforderlicher Wärme- und erforderlicher elektrischer Energie des Großraumbürogebäudes

Bezogen auf das gesamte Bürogebäude lassen sich die Ergebnisse in Tabelle 15 zusammenfassen. Wie darin zu sehen ist, erhöhte sich der spezifische Energiebedarf von 30,1 kWh/m<sup>2</sup>a Nutzenergie auf 33,2 kWh/m<sup>2</sup>a Endenergie und damit um 10,3%. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichungen liegt die Veränderung des Energiebedarfes innerhalb eines Bereiches von -2,8% bis 27,8%. Es zeigt sich, dass das untersuchte thermoelektrische Heizsystem im Verlauf eines gesamten Jahres nur ineffizient betrieben werden kann. Der mittlere System-COP des betrachteten Jahres betrug 0,96 und lag nach Berücksichtigung der Grenzabweichung in einem Bereich zwischen 0,86 und 1,06.

Tabelle 15 Gegenüberstellung der Nutzenergie und der Endenergie des Bürogebäudes

	Nutzenergie	Endenergie	Grenzabweichung	
			+	-
<b>Q<sub>gesamt,erf</sub> [kWh/m<sup>2</sup>a]</b>	30,1	33,2	29,3	38,4
<b>Q [kWh/a]</b>	21658	23897	21060	27677

Auch die energetische Bewertung des Wohngebäudes kam zu vergleichbaren Ergebnissen. Durch die Besonderheiten der unterschiedlichen Raumnutzungsarten lohnt sich jedoch ein differenzierterer Blick auf die einzelnen Auswirkungen dieser Randbedingungen. In Abbildung

59 sind wie zuvor die relativen Abweichungen der Endenergie zur Nutzenergie dargestellt. Es ist auffällig, dass die Endenergiebedarfe im Gegensatz zum Bürogebäude merklich heterogener ausfallen. Während beim Nichtwohngebäude die Diskrepanzen zwischen 7,9% und 10,5% lagen, sind in der unten dargestellten Abbildung Bereiche zu erkennen, in denen das untersuchte thermoelektrische Heizsystem vergleichsweise effizient betrieben zu werden scheint (Wohnzimmer), während die Endenergiebedarfe in Bad und WC um 11,8% bzw. 14,6% über den Nutzenergiebedarfen liegen. Die Spanne reicht von -3,1% bis +14,6%. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichungen erhöht sich diese auf einen Bereich zwischen 87% und 125,4% der erforderlichen Wärmeenergiebedarfe.

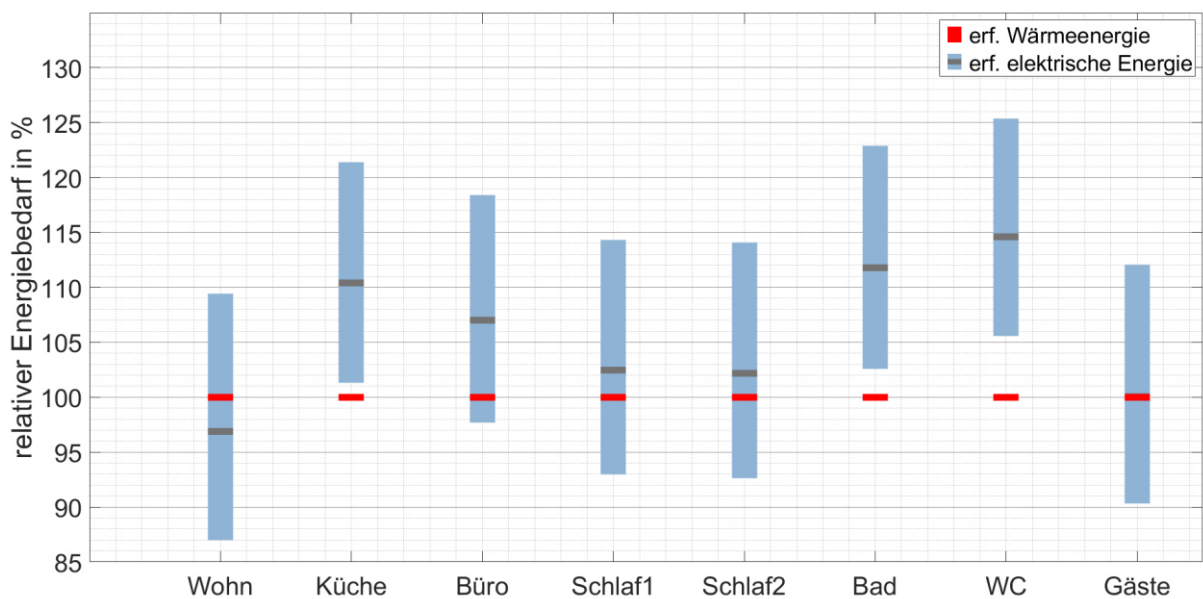


Abbildung 59 relative Abweichungen zwischen erforderlicher Wärme- und erforderlicher elektrischer Energie des Wohngebäudes

Wie bereits angedeutet, sind bei diesen Ergebnissen jedoch die Besonderheiten der Räume zu beachten. Im vorherigen Kapitel 7.5 wurde bereits darauf hingewiesen, dass im Wohnzimmer des betrachteten Wohngebäudes die thermische Behaglichkeit die geforderten Standards nicht erreichen konnte. Die operative Temperatur lag mit 18,2 °C im Mittel um fast 3 K unterhalb der Räume, die der Kategorie B zugeordnet wurden. Eine Erhöhung der Raumtemperatur würde erstens in einem höheren Energiebedarf resultieren und zweitens verschlechtert sich der System-COP mit steigender Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Dieser Effekt beeinflusst auch maßgeblich die Schlaf- und Gästezimmer sowie das Bad und das WC. In den Schlaf- und Gästezimmern wird lediglich eine Mindesttemperatur von 17 °C aufrechterhalten. Dadurch ist die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen um 3-4 K geringer als in Küche und Büro und somit konnte das Peltier-System dort mit höheren System-COPs betrieben werden. Der gegenteilige Effekt ist im Bad und im WC zu erkennen. Mit Soll-Temperaturen von 23 °C herrschen dort größere Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen und damit auch schlechtere System-COPs als in den anderen Räumen. Die aufgelisteten Besonderheiten der Räume des Wohngebäudes resultieren jedoch nicht in

Fehlern bei der Berechnung der Energiebedarfe, sondern dienen lediglich als Erklärung der auftretenden Effekte. Nur die Werte für das Wohnzimmer beeinflussen die Analyse und den Energiebedarf und müssen bei der Auswertung der Ergebnisse besonders betrachtet werden. Wird das Ergebnis des Wohnzimmers in der Berechnung des durchschnittlichen System-COPs über das gesamte Jahr berücksichtigt, liegt dieser Wert bei 1,02, bzw. zwischen 0,88 und 1,15, jedoch würde auch eine Reduzierung des jährlichen System-COPs des Wohnzimmers von 1,08 auf 0,9 lediglich eine Reduktion von 0,04 Punkten auf 0,98 für das Gesamtgebäude bedeuten. Die Energiebedarfe des gesamten Wohngebäudes sind in Tabelle 16 gegenübergestellt.

Tabelle 16 Gegenüberstellung der Nutzenergie und der Endenergie des Wohngebäudes

	Nutzenergie	Endenergie	Grenzabweichung	
			+	-
$Q_{\text{gesamt,erf}}$ [kWh/m <sup>2</sup> a]	40,4	42,4	38,6	47,1
$Q$ [kWh/a]	9340	9796	8912	10887

Darin ist zu sehen, dass auch beim Wohngebäude der Endenergiebedarf über dem Nutzenergiebedarf liegt. Die Erhöhung ist dabei mit 5% nur etwa halb so groß wie beim Bürogebäude, was auf die oben aufgeführten Raumnutzungsarten zurückzuführen ist. Unter Berücksichtigung der Grenzabweichungen bei der Berechnung der System-COPs lässt sich der Bereich der Endenergie, in dem der wahre Wert liegt, auf 95,4% bis 116,6% der Nutzenergie eingrenzen.

Anschließend wurde der Einfluss des Dämmstandards auf die Energiebedarfe und die Effizienz des Systems untersucht und die U-Werte der Gebäudehülle an den Passivhausstandard angepasst. Die U-Werte der opaken Bauteile wurden auf 0,15 W/m<sup>2</sup>K und die der Fenster auf 0,8 W/m<sup>2</sup>K reduziert [125]. Zwar konnten in beiden Gebäuden durch die Reduktion der U-Werte die Nutzenergiebedarfe um 10-15% reduziert werden, jedoch veränderten sich die Verhältnisse der End- zur Nutzenergie nicht, sodass das untersuchte thermoelektrische Heizsystem auch in noch besser gedämmten Gebäuden nicht effizient betrieben werden konnte. Dies liegt vor allem daran, dass sich auch in Gebäuden mit höheren Dämmstandards nicht die Anforderungen an das Innenraumklima und an die thermische Behaglichkeit ändern. Daher bleiben die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen und damit auch die Effizienz der Peltier-Elemente unverändert. Da durch den Klimawandel in Zukunft wärmere Temperaturen und mildere Heizperioden zu erwarten sind (vgl. Kapitel 2.2), könnte allerdings das sich verändernde Klima einen effizienteren Betrieb des Peltier-Systems ermöglichen.

## 7.7 Adaption des Systems an den Klimawandel

In anschließenden Untersuchungen wurden daher die Gebäudemodelle mit zukünftigen Klimadaten des TRJ 2045 verknüpft und so die möglichen Einflüsse des Klimawandels auf das thermoelektrische Heizsystem untersucht. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 17 dargestellt. Darin werden die Energiebedarfe der Simulationen des Bürogebäudes mit einem TRJ 2015 jenen aus Simulationen mit einem TRJ 2045 gegenübergestellt. Der Effekt des wärmeren zukünftigen TRJ ist an der Reduktion des Nutzenergiebedarfes um 8,6% zu erkennen. Ferner zeigt die größere Abweichung von 12,4% zwischen den zukünftigen und den aktuellen Endenergiebedarfen, dass die durchschnittlich höheren Außentemperaturen und dadurch geringeren Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen einen effizienteren Betrieb des untersuchten thermoelektrischen Heizsystems ermöglichen. Zusätzlich erhöhte sich der mittlere jährliche System-COP durch das veränderte Klima von 0,96 auf 1,0. Die Diskrepanz zwischen dem mittleren jährlichen System-COP, nach dem Nutz- und Endenergiebedarf identisch sein müssten, und der tatsächlichen Erhöhung des Energiebedarfs um 5,8% unter Berücksichtigung der Effizienz des Peltier-Systems ist dadurch zu erklären, dass bei der Bestimmung des mittleren jährlichen System-COP die jeweiligen Raumgrößen nicht berücksichtigt wurden. Große Räume mit schlechteren System-COPs haben bei der Ermittlung des Endenergiebedarfes ein größeres Gewicht als kleinere Räume, in denen bessere System-COPs möglich waren. Durch die Klimaveränderungen reduzierte sich die Abweichung zwischen End- und Nutzenergie von 10,3% auf 5,8%.

Tabelle 17 Vergleich der Nutz- und Endenergiebedarfe des Bürogebäudes mit unterschiedlichen TRJ; TRJ 2015 vs. TRJ 2045

	Nutzenergie		Endenergie		Grenzabweichung			
	2015	2045	2015	2045	+		-	
					2015	2045	2015	2045
<b>Q<sub>gesamt,erf</sub> [kWh/m<sup>2</sup>a]</b>	30,1	27,5	33,2	29,1	29,3	26,5	38,4	32,3
<b>Q [kWh/a]</b>	21658	19778	23897	20938	21060	19073	27677	23227
<b>Relative Abweichungen</b>	-8,6%		-12,4%					

Diese Effekte sind auch im Wohngebäude zu erkennen, jedoch wieder in abgeschwächter Form. Da bereits bei einem KfW 55 Standard die Dachfläche mit einem U-Wert kleiner als 0,14 W/m<sup>2</sup>K erforderlich ist und die Dachfläche des Wohngebäudes im Verhältnis zur Gesamtfläche wesentlich größer ist als beim Bürogebäude, wurde dieser Effekt zusätzlich weiter abgeschwächt. Wie in Tabelle 18 zu sehen ist, reduzierten sich durch die Klimaveränderungen der Nutzenergiebedarf nur um 1,2% und der Endenergiebedarf um 5,1%. Der effizientere Betrieb durch die geringeren Temperaturdifferenzen wird auch hier wieder

durch die größere Reduzierung der Endenergie deutlich. Durch die Klimaveränderungen verkleinerte sich die Abweichung zwischen End- und Nutzenergie von 5,0% auf 0,5%, sodass das Wohngebäude ähnlich viel elektrische Energie benötigt, wie das untersuchte Peltier-System an Wärmeenergie nutzbar machen kann. Jedoch sind auch hier wieder die in Kapitel 7.6 aufgeführten Besonderheiten des Wohngebäudes zu beachten und aufgrund der Verfehlung der Behaglichkeitsanforderungen im Wohnzimmer das Ergebnis etwas zu korrigieren.

*Tabelle 18 Vergleich der Nutz- und Endenergiebedarfe des Wohngebäudes mit unterschiedlichen TRJ; TRJ 2015 vs. TRJ 2045*

	Nutzenergie		Endenergie		Grenzabweichung			
	2015	2045	2015	2045	+		-	
					2015	2045	2015	2045
<b>Q<sub>gesamt,erf</sub> [kWh/m<sup>2</sup>a]</b>	40,4	40,0	42,4	40,2	38,6	36,4	47,1	45,1
<b>Q [kWh/a]</b>	9340	9228	9796	9295	8912	8401	10887	10410
<b>Relative Abweichungen</b>	-1,2%		-5,1%					

Die Untersuchungen mit einem zukünftigen TRJ 2045 zeigten, dass das erforschte thermoelektrische Heizsystem durch den Klimawandel zwar etwas effizienter betrieben werden könnte, die Ergebnisse jedoch nicht darauf hindeuten, dass das System auch energieeffizient funktionieren kann. Da das untersuchte Peltier-System bereits bei milderen Temperaturen nicht ausreichend leistungsfähig war, um in den Freilandversuchen den Innenraum des Kubus zu kühlen, wird sich das System auch in den zukünftigen wärmeren Sommern nicht zur Kühlung eignen. Wie in Kapitel 2.2 dargestellt wurde, werden die Sommer durch den Klimawandel heißer und länger. Der erhöhte Kühlbedarf kann vom erforschten System nicht gedeckt werden. Aus diesem Grund lag der Fokus der Untersuchungen auch in den dargestellten Simulationen mit den Klimadaten eines TRJ 2045 lediglich auf dem Heizfall und die Kühlung blieb unberücksichtigt. Für die endgültige Bewertung des erforschten Systems war ein zusätzlicher Vergleich mit gängigen Heizsystemen unerlässlich, um aufzeigen zu können, ob das untersuchte Peltier-System eine zukunftsfähige Option auf dem Markt der Heizsysteme sein könnte oder gegenüber vergleichbaren Systemen zu ineffizient ist.



## 8 Vergleich des Systems mit konventionellen Heizsystemen

Als Vergleichssysteme dienten in den TRNSYS Simulationen zwei Fußbodenheizungen, eine elektrische und eine wasserführende (vgl. Kapitel 6). Um einen aussagekräftigen Vergleich der Systeme zu gewährleisten, wurde in allen Modellen zunächst untersucht, ob die thermische Behaglichkeit der drei Systeme demselben Standard entsprach. Maßgeblich bei der Modellierung waren somit die operativen Temperaturen und die PMV-Werte der betrachteten Zonen. In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind Ergebnisse der beiden Kennwerte des Bürogebäudes zusammengefasst.

Tabelle 19 Bürogebäude – Vergleich der drei Varianten: Anzahl der Stunden, in denen das PMV außerhalb der jeweiligen Kategorien der DIN EN ISO 7730 [16] liegt, nur Winter, Heizfall  $PMV < 0$

	EG 1	OG 1.1	OG 2.1	EG 2	OG 1.2	OG 2.2	
A	723	701	713	721	713	713	Peltier
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	
A	456	265	341	452	268	346	Wasser
B	58	18	33	59	20	32	
C	15	6	11	14	7	11	
A	467	351	417	456	417	408	Elektrisch
B	0	0	0	0	0	0	
C	0	0	0	0	0	0	

Tabelle 20 Bürogebäude – Vergleich der operativen Temperaturen der drei Heizsysteme in der Nutzungszeit im Winter, Heizfall

	EG 1	OG 1.1	OG 2.1	EG 2	OG 1.2	OG 2.2
Peltier	21,1	20,8	21,1	21,1	21,1	21,1
Wasser	20,9	21,5	21,2	20,9	21,5	21,3
Elektrisch	21,3	21,4	21,3	21,3	21,4	21,3

Sowohl beim untersuchten Peltier-System als auch beim elektrischen Fußboden konnte im Winter durchgehend die Kategorie B eingehalten werden. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die Anzahl der Stunden, in denen die Kategorie A nicht erreicht wurde, bei der elektrischen Fußbodenheizung um 35% bis 50% geringer ist als bei der Peltier-Heizung, was auf die leichte Erhöhung der operativen Temperatur zurückzuführen ist. Diese lag in allen Zonen um 1,4% bis 2,9% über jener des Modells mit Peltier-System. Ähnliches ist auch bei der wasserführenden Fußbodenheizung zu erkennen, jedoch konnten durch dieses System im Winter nicht zu jeder Zeit die Kategorien B und C eingehalten werden. Im Mittel wurde im

Bürogebäude in 11 Stunden die Kategorie C und in 37 Stunden die Kategorie B unterschritten, obwohl die operativen Temperaturen die Werte des untersuchten Peltier-Systems lediglich um 1% unterschritten oder sogar um 3,4% überschritten. Dies ist auf die höhere Trägheit durch größere Wärmespeichermassen des wasserführenden Systems zurückzuführen. Zwischen den Wasserrohren und der Raumluft liegen eine 6 cm dicke Estrichschicht sowie der Fußbodenaufbau, welche zunächst erwärmt werden müssen und die Wärme länger speichern. Dagegen wird die Wärme der elektrischen Heizung in TRNSYS direkt auf der Oberfläche erzeugt und die oberste Schicht erhitzt. Dies führte dazu, dass die Temperaturen zu Beginn der Nutzungszeit trotz Vorlauf nicht immer das erforderliche Niveau erreichten. Aufgrund der geringen Abweichungen der operativen Temperaturen und der Nichteinhaltung der Kategorie B in lediglich 5% der Stunden, blieben die zugrundeliegenden Randbedingungen unverändert und die Systeme erwiesen sich als vergleichbar.

Anschließend an die Analyse der Behaglichkeit wurden die Energiebedarfe untersucht. Mithilfe der Tabelle 21 lassen sich die End- und Nutzenergiebedarfe der drei Heizsysteme vergleichen. Der Nutzenergiebedarf der Wandheizung war in den Modellen höher als jene der beiden Fußbodenheizungen, da sich durch die höheren Wandoberflächen der Außenwände auch ein höherer Transmissionswärmeverlust einstellte. Der Vorteil der Fußbodenheizungen liegt darin, dass im modellierten Bürogebäude lediglich im Erdgeschoss die Wärme über Transmission direkt an die Umgebung abgegeben wird. Unter Berücksichtigung der System-COPs der thermoelektrischen Wandheizung erhöhte sich der Endenergiebedarf im Vergleich zur Nutzenergie um 10%. Durch die Verwendung einer Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,0 ließ sich der Energiebedarf des wasserführenden Referenzsystems von 27,3 kWh/m<sup>2</sup>a um 67% auf 9,1 kWh/m<sup>2</sup>a reduzieren. Da eine elektrische Fußbodenheizung mit einem Wirkungsgrad von 1,0 so viel Wärmeenergie nutzbar macht, wie ihr an elektrischer Energie zugeführt wird, waren bei diesem System der Nutz- und Endenergiebedarf identisch.

Tabelle 21 Bürogebäude – Vergleich der End- und Nutzenergiebedarfe der drei Heizsysteme

	Nutzenergie	Endenergie	
<b>Q<sub>gesamt,erf</sub> [kWh/m<sup>2</sup>a]</b>	30,1	33,2	Peltier-System
	27,3	9,1	Wasserführende Fußbodenheizung
	28,9	28,9	Elektrische Fußbodenheizung

Die Untersuchungen der Referenzsysteme im Bürogebäude in TRNSYS verdeutlichen, dass das erforschte thermoelektrische Heizsystem eine geringere Effizienz aufweist als die beiden Referenzsysteme. Die Fußbodenheizung mit Wärmepumpe benötigt lediglich 27,4% der Endenergie des untersuchten Peltier-Systems, die elektrische Fußbodenheizung 87%.

Die obigen Untersuchungen wurden anschließend auch am Wohngebäude in TRNSYS durchgeführt. Zunächst wurde auch hier die Behaglichkeit der Systeme verglichen. In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind wie im Kapitel 7.5 Ergebnisse für das Wohnzimmer, die Küche und das Büro dargestellt.

Tabelle 22 Wohngebäude – Vergleich der drei Varianten: Anzahl der Stunden, in denen das PMV außerhalb der jeweiligen Kategorien der DIN EN ISO 7730 [16] liegt, nur Winter, Heizfall PMV < 0

	Wohnzimmer	Küche	Büro	
A	812	407	622	Peltier
B	812	0	0	
C	812	0	0	
A	812	536	285	Wasser
B	808	10	1	
C	804	0	0	
A	812	625	513	Elektrisch
B	812	0	7	
C	812	0	0	

Tabelle 23 Wohngebäude – Vergleich der operativen Temperaturen der drei Heizsysteme in der Nutzungszeit im Winter, Heizfall

	Wohnzimmer	Küche	Büro
Peltier	18,2	21,3	20,9
Wasser	21,4	21,1	21,4
Elektrisch	21,4	21,1	21,4

Analog zu den Kapiteln zuvor müssen auch in diesen Untersuchungen die Besonderheiten des Wohngebäudes berücksichtigt werden. Wie anhand der operativen Temperatur im Wohnzimmer zu erkennen ist, konnte das untersuchte Peltier-System die erforderlichen Temperaturen nicht erreichen, was sich auch in der Unterschreitung der Kategoriegrenzen des PMV widerspiegelt. Dies war auf die geringe Wandfläche zurückzuführen. Dagegen konnten die Fußbodenheizungen durch die ausreichende nutzbare Heizfläche operative Temperaturen von jeweils 21,4 °C erreichen und lagen damit im erforderlichen Temperaturbereich. Wie anhand der Tabelle 22 zu erkennen ist, lag der PMV im Wohnzimmer dennoch stets außerhalb der Kategorien. In diesem Zimmer wurden ein Bekleidungsisolationswert von 1,0 clo und ein Energieumsatz von 0,8 met als Randbedingungen gewählt und scheinen bei den simulierten Temperaturen nicht ausreichend zu sein. Vor allem in einem Wohnzimmer ergreifen Raumnutzer\*innen jedoch üblicherweise Maßnahmen, um ihre thermische Behaglichkeit zu verbessern. Bei der Bewertung dieses Raumes sollten somit auch adaptive Verhaltensanpassungen (vgl. Kapitel 2.1.3) berücksichtigt werden, wie etwa das Überziehen

einer Decke, wenn die Nutzer\*innen auf der Couch liegen. Schließlich war in Anbetracht dieses Aspekts sowie der übrigen operativen Temperaturen als auch der Ergebnisse der Tabelle 22 von Büro und Küche auch im Wohngebäude die thermische Behaglichkeit in den drei Modellen vergleichbar und wurde als ausreichend angesehen.

Die anschließende Gegenüberstellung der End- und Nutzenergiebedarfe kam zu ähnlichen Ergebnissen wie jene des Bürogebäudes. Auch hier ist jedoch wieder ein differenzierterer Blick in der Analyse der Ergebnisse notwendig. Durch das Erreichen höherer Temperaturen im Wohnzimmer bei Verwendung einer Fußbodenheizung erhöhten sich darin auch die Energiebedarfe. Die in Tabelle 24 dargestellten Werte erfordern somit eine zusätzliche Erläuterung.

Tabelle 24 Wohngebäude – Vergleich der End- und Nutzenergiebedarfe der drei Heizsysteme

	Nutzenergie	Endenergie	
<b>Q<sub>gesamt,erf</sub> [kWh/m<sup>2</sup>a]</b>	40,4	42,4	Peltier-System
	47,0	15,7	Wasserführende Fußbodenheizung
	44,0	44,0	Elektrische Fußbodenheizung

Werden die zusätzlichen Energiebedarfe des Wohnzimmers, verursacht durch die höheren Temperaturen, auf die Grundfläche des Gesamtgebäudes bezogen, ergibt sich eine Diskrepanz von 5,1 kWh/m<sup>2</sup>a zur elektrischen und von 6,4 kWh/m<sup>2</sup>a zur wasserführenden Fußbodenheizung. Auch wenn auf den ersten Blick das untersuchte thermoelektrische Heizsystem effizienter zu sein scheint als die elektrische Fußbodenheizung, ist dieser geringere Energiebedarf jedoch auf die durch das Wohnzimmer verursachte Diskrepanz zurückzuführen. Auch der Nutzenergiebedarf der wasserführenden Fußbodenheizung wäre nach unten zu korrigieren. Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Diskrepanzen ergibt sich ein um 8,3% geringerer Endenergiebedarf bei der elektrischen Fußbodenheizung und ein um 68% geringerer Endenergiebedarf bei der wasserführenden Fußbodenheizung verglichen mit der auf Peltier-Elementen basierenden Wandheizung. Das untersuchte thermoelektrische Heizsystem ist folglich auch beim Wohngebäude das System mit der geringsten Effizienz.

## 9 Zusammenfassung

Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen im Jahr 2015 setzten sich 197 Länder ehrgeizige Ziele, um den fortschreitenden Klimawandel einzudämmen [3, 4]. Daraus formulierten die einzelnen Länder Maßnahmen zur Umsetzung dieser Ziele. Vor allem der globale Gebäudesektor bietet mit seinem Anteil von 37% an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen [5] ein großes Einsparungspotenzial. Neue nachhaltige und dezentrale Energiesysteme können einen großen Beitrag bei der Einsparung von Energie sowie für die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit zur Erreichung der Ziele der deutschen Politik leisten. Diese Systeme erfordern stets eine ganzheitliche Betrachtung, um möglichst alle wichtigen Aspekte bei der Entwicklung eines nachhaltigen Produkts zu berücksichtigen.

In dieser Arbeit wurde zunächst auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit eingegangen und daraus wichtige Untersuchungskriterien formuliert. Darauf aufbauend wurden umfassend die Grundlagen der thermischen Behaglichkeit dargestellt, über die soziokulturelle Qualitäten wie Gesundheit und Lebensqualität bei der Entwicklung eines neuartigen Heiz- und Kühlsystems berücksichtigt werden. Anschließend wurden grundlegende Informationen zu Testreferenzjahren und der bei deren Erstellung zugrundeliegenden Methodik dargelegt, um die Aussagekraft der auf den TRJ aufbauenden Untersuchungen einschätzen zu können. Ehe das erforschte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem beschrieben werden konnte, wurden die Peltier-Elemente vorgestellt und ihre Funktionsweise detailliert ausgearbeitet. Diese Elemente sind der Grundstein für das erforschte System, daher wurde die Relevanz für ein solides Verständnis der Einflussfaktoren auf ihre Leistungsfähigkeit hervorgehoben. Zusätzlich wurde ein Blick auf die Verwendung der Peltier-Elemente in Baupraxis und Forschung geworfen und Aspekte der vorgestellten Projekte hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit für das eigene System untersucht.

Zielstellung der Arbeit war die ganzheitliche Betrachtung und Bewertung eines neuartigen Heiz- und Kühlsystems, in dem die vorgestellten Peltier-Elemente als dezentrale Wärmepumpen fungieren. Dieses System wurde als Gebäudeaußenwand entwickelt und durch die Verwendung von Umweltwärme sollte es möglich sein, ein Gebäude energieeffizient zu beheizen. In diesem Zusammenhang wurde durch einen überschlägigen Kostenvergleich mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe auch die ökonomische Qualität der Nachhaltigkeit in die Betrachtungen integriert. Dabei war es wichtig hervorzuheben, dass das erforschte System nur erfolgreich sein könne, wenn dessen COPs im Bereich üblicher Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen lägen. In diesen Betrachtungen lag ein Fokus auch auf der ökologischen Dimension, weshalb die CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiebedarfe der beiden Systeme über den gesamten Lebenszyklus miteinander verglichen wurden. Es wurden Chancen und Risiken formuliert und anschließend in einem Lastenheft Anforderungen an die Funktionen und die technischen Parameter des thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems vorgestellt. Die Erfüllung dieser Anforderungen war notwendig für ein erfolgreiches System.

In den darauffolgenden experimentellen Untersuchungen wurden zunächst

Grundlagenversuche vorgestellt, durch die die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Peltier-Elemente untersucht wurden. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden zudem die beiden untersuchten Peltier-Elemente verglichen und das zweistufige Peltier-Element zum Einbau in einen Prototyp gewählt. Dieser Prototyp wurde in Laborversuchen unter stationären Bedingungen und anschließend in Freilandversuchen in einem Kubus im Außenbereich der TU Kaiserslautern unter instationären Bedingungen näher untersucht. Dabei wurden die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Randbedingungen sowie die Funktionalität der Peltier-Elemente bei Integration in einen Prototyp analysiert. Das erforschte thermoelektrische Wandsystem erwies sich bei Stromstärken von bis zu 2,5 A im untersuchten Zeitraum für Temperaturen bis  $-7\text{ °C}$  als ausreichend leistungsfähig, um den Innenraum des Kubus auf eine Soll-Temperatur von etwa  $20\text{ °C}$  zu erhitzen, konnte jedoch nicht die Anforderungen an ein Kühlsystem erfüllen, sodass in den anschließenden Untersuchungen die Kühlung nicht weiter berücksichtigt wurde. Das erforschte System war von da an nur noch als Heizsystem Schwerpunkt der Untersuchungen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen dienten als Grundlage für die anschließenden Simulationen.

Die Simulationen untergliederten sich in thermische Bauteilsimulationen und thermische Gebäudesimulationen. Erstere erfolgten mit den Simulationsprogrammen TRISCO und VOLTRA. Durch die Nachmodellierung des in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Prototyps konnten die Modelle zunächst validiert werden. Anschließend erfolgte simulativ eine Untersuchung der Oberflächentemperaturen und Wärmeströme des thermoelektrischen Heizsystems sowie eine Erweiterung der in ihrer Größe begrenzten Prototypen auf realistische Wandsysteme unterschiedlicher Größen. Die Simulationen dienten zusätzlich der Bestimmung optimaler Abstände zwischen den einzelnen Peltier-Elementen sowie der Betrachtung der Einflüsse von Wandöffnungen und anderer Randbedingungen auf die Wärmeleistung des Systems.

Im Zuge der thermischen Gebäudesimulationen in TRNSYS wurde die Verknüpfung der Ergebnisse der Freilandversuche im Kubus mit den Modellen in TRNSYS dargelegt. Die vorgestellten Algorithmen ermöglichten die Modellierung eines technologieneutralen Flächenheiz- und -kühlsystems. Durch Integration der in den Freilandversuchen ermittelten System-COPs ließ sich das untersuchte Peltier-System realistisch abbilden und eine energetische Bewertung vornehmen. Zusätzlich wurden weitere Einflussfaktoren wie ein höherer Gebäudestandard und das durch den Klimawandel veränderte zukünftige Klima in den Simulationen berücksichtigt. Zur Kontrolle lag ein Schwerpunkt zunächst auf der thermischen Behaglichkeit und anschließend wurde das erforschte Heizsystem mit einer wasserführenden und einer elektrischen Fußbodenheizung mithilfe von TRNSYS verglichen. Den Simulationen lagen zwei Gebäudemodelle zugrunde, ein Großraumbürogebäude und ein Einfamilienhaus.

Nach der Vorstellung der Methodik der experimentellen und simulativen Untersuchungen wurden die generierten Ergebnisse ausgewertet. Zuerst wurden die analytischen Gleichungen zur Beschreibung der Wärmeströme der Peltier-Elemente validiert und die Genauigkeit für die verwendeten Peltier-Elemente analysiert. Während die Gleichungen die Wärmeströme des

einstufigen Moduls mit nur geringen Abweichungen beschreiben konnten, wurden beim zweistufigen Modul größere Diskrepanzen festgestellt. In den anschließenden Ergebnissen der COPs der beiden Peltier-Elemente wurden jene des zweistufigen Peltier-Elementes daher um gemessene COPs zusätzlicher leicht modifizierter Versuche ergänzt. Mithilfe der vorgestellten Methoden konnten die Leistungsfähigkeit und die Effizienz beider Peltier-Elemente ermittelt werden. Durch die größeren Diskrepanzen der analytischen Methode und den eingeschränkten Temperaturbereich der modifizierten Versuche konnten die Ergebnisse des im Prototyp verwendeten Peltier-Elementes jedoch nur bedingt für die weiteren Untersuchungen verwendet werden. Die darauffolgenden Auswertungen konzentrierten sich auf die Effizienz des Gesamtsystems. Im Zuge dessen wurden Simulationen unterschiedlicher Wandsysteme ausgewertet und die Ermittlung der Oberflächentemperaturen der Kubusversuche vorgestellt. Die ermittelten Oberflächentemperaturen und daraus berechneten Wärmeleistungen waren zur Bestimmung des System-COPs der Prototypen erforderlich, deren Berechnung und Auswertung detailliert dargelegt wurden. Aus den Freilandversuchen im Kubus ließen sich für Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen von 7 K bis 25 K System-COPs ermitteln, die in einem Bereich zwischen 0,76 und 1,54 lagen. Die Diskrepanz zwischen den COPs der Peltier-Elemente und den System-COPs des Prototyps war dabei auf Wärmeverluste in dessen Konstruktion sowie auf die Wärmespeicherkapazitäten der Aluminium- und Gipskartonplatten in Kombination mit wechselnden Aufheiz- und Abkühlphasen zurückzuführen. Der COP wurde direkt für das Peltier-Element ermittelt und der System-COP beschreibt lediglich die für den Raum nutzbare Wärmeenergie, integriert somit bereits die Verluste. Die ermittelten System-COPs wurden anschließend in TRNSYS hinterlegt und zur Bewertung der energetischen Effizienz eines Gesamtsystems über den Zeitraum eines gesamten Jahres weiterverwendet. Zunächst wurde jedoch die Behaglichkeit des Peltier-Systems untersucht, um die Auswirkungen des erforschten thermoelektrischen Heizsystems auf die Nutzer\*innen zu analysieren und so die soziokulturelle Qualität zu berücksichtigen. Das untersuchte Peltier-System erwies sich im Bürogebäude als thermisch behagliches Heizsystem, stieß im Wohngebäude jedoch aufgrund ungünstiger Raumgeometrien im Wohnzimmer an seine Grenzen. Mit der energetischen Bewertung des Gesamtsystems wurden anschließend weitere ökologische Qualitäten in die ganzheitliche Betrachtung integriert. Im Laufe eines gesamten Jahres erwies sich das untersuchte thermoelektrische Heizsystem als ineffiziente Technologie. Im Bürogebäude war 10% mehr elektrische Energie notwendig, als Wärmeenergie durch die Peltier-Elemente nutzbar gemacht werden konnte. Im Einfamilienhaus lag die Erhöhung des Energiebedarfes bei 5%. Auch unter Berücksichtigung des sich erwärmenden Klimas, unter Verwendung eines TRJ 2045 in den Simulationen, konnte das untersuchte thermoelektrische System nur ineffizient betrieben werden. Zwar reduzierten sich die Endenergiebedarfe in beiden Gebäuden, die durchschnittlichen System-COPs konnten jedoch nur unwesentlich verbessert werden. Diese lagen in allen Untersuchungen in einem Bereich zwischen 0,96 und 1,02.

Abschließend erfolgte ein Vergleich des untersuchten thermoelektrischen Heizsystems mit konventionellen Heizsystemen, einer elektrischen sowie einer wasserführenden

Fußbodenheizung mit Wärmepumpe. Die Referenzsysteme waren jeweils effizienter als das erforschte Peltier-System und konnten zusätzlich eine bessere thermische Behaglichkeit im Wohnzimmer des Wohngebäudes aufrechterhalten, da die Fläche des Fußbodens wesentlich größer war als die als Heizfläche nutzbare Außenwand.

## 9.1 Fazit

Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass Peltier-Elemente zwar grundsätzlich Potenziale bieten, energieeffizient Wärme zu transportieren und hohe COPs zu erreichen, aber auch, dass diese Leistungsfähigkeit und Effizienz als Bestandteil des vorgestellten thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems nicht realisierbar sind. Die Peltier-Elemente lieferten in den Laborversuchen vielversprechende Ergebnisse. Diese hohen Leistungsniveaus konnten in den realitätsnahen Freilandversuchen bei weitem nicht erreicht werden und die gemessenen System-COPs fielen deutlich niedriger aus. Das vorgestellte System kann viele der im Lastenheft (vgl. Kapitel 3.4) formulierten Anforderungen an die Funktionen und die technischen Parameter nicht einhalten. Daher lohnt sich an dieser Stelle ein Blick auf die darin formulierten Ansprüche an das System. Diese wurden im Folgenden entsprechend der Erkenntnisse der Untersuchungen angepasst:

- Das untersuchte System kann eine energieeffiziente Beheizung und Kühlung von Gebäuden unter Verwendung von Umweltwärme und gegebenenfalls regenerativen Energiequellen nicht gewährleisten.
- Die Wärmeübertragung vom Peltier-Element in den Raum konnte nachgewiesen werden, sodass durch das erforschte Flächentemperiersystem eine Wärmeverteilung über die gesamte Wandfläche erfolgt. Eine leistungsfähige Wärmeableitung aus dem Raum ist mit dem Peltier-System nicht möglich.
- Die Temperierung des gesamten Gebäudes durch das untersuchte Peltier-System als alleiniges System ist nur möglich, wenn ausreichend große Außenwandflächen zur Beheizung zur Verfügung stehen. Im untersuchten Einfamilienhaus war dies nicht möglich, wodurch die Vorteile des vorgestellten Konzepts, bspw. durch Verzicht auf bewegliche Teile, nicht verwirklicht werden können.
- Der durchschnittliche jährliche COP des erforschten Peltier-Systems lag etwas unterhalb von 1,0 und damit weit unterhalb der 3,0 der Referenzwärmepumpe.
- Durch das untersuchte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem können die erforderlichen Innenraumtemperaturen bzw. ein behagliches Innenraumklima erreicht werden. Auch in Temperaturspitzen ist die Funktionsfähigkeit und Effektivität, jedoch nicht die Effizienz des erforschten Systems gewährleistet.
- Das untersuchte Temperiersystem ist nicht schaltbar, da zum Kühlen im Sommer keine ausreichende Leistungsfähigkeit messbar war.



- Der Erhalt des hohen Dämmniveaus der Fassade ist für verschiedene energetische Standards möglich. Durch Wärmeverluste in der Konstruktion werden jedoch System-COPs unter 1,0 erreicht, sodass Wärme nach außen verloren gehen muss.
- Das erforschte Peltier-System ist unauffällig in die Fassade integrierbar.
- Die Kosten des Gesamtsystems über den Lebenszyklus sind durch die schlechte Effizienz höher als bei konkurrierenden Systemen auf dem Markt.
- Die Langlebigkeit des Systems über die gesamte Nutzungsphase eines Gebäudes wurde nicht untersucht, da das erforschte System nicht effizient betrieben werden kann.

## 9.2 Ausblick

Peltier-Elemente wurden bereits in einer Vielzahl von Forschungsprojekten untersucht und in Heiz- und Kühlsysteme integriert (vgl. Kapitel 2.3.3). Im Labor messbare hohe COPs sowie die platzsparende Installation und der geräuscharme Betrieb sind zu nennende Vorteile der kleinen Wärmepumpen und machen diese zu attraktiven Bestandteilen bei der Konzeption neuartiger Systeme. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch Grenzen der Technologie zur Anwendung in Baupraxis und -forschung auf. Die hohen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen machten einen effizienten Betrieb innerhalb der vorgestellten thermoelektrischen Außenwand unmöglich. Zur direkten Beheizung sind diese Temperaturdifferenzen jedoch unumgänglich. Anforderungen an die Behaglichkeit sowie normative Innentemperaturen von 20 °C definieren das Niveau der thermischen Randbedingungen auf einer Seite des Peltier-Elementes. Dadurch stellen sich automatisch hohe Temperaturdifferenzen von 15-30 K in den Wintermonaten ein. Ohne einen signifikanten Innovationsschub in der Peltier-Technologie sind beim vorgestellten System sowie ähnlichen Konzepten, in denen die Peltier-Elemente mit hohen Temperaturdifferenzen konfrontiert werden, keine leistungsfähigen Heizsysteme zu erwarten.

Können die Peltier-Elemente bei kleinen Temperaturdifferenzen eingesetzt werden, bieten sie dennoch weiterhin das Potenzial, ihren Beitrag für einen effizienten Wärmetransport zu leisten. Die Differenz zwischen den beiden Seiten eines Elements sollte dabei jedoch in einem Bereich bis maximal 10 K liegen. Zwar können Peltier-Elemente unter Laborbedingungen auch bei höheren Differenzen noch COPs von 2,0 bis 5,0 erreichen, jedoch zeigten die Untersuchungen der Prototypen, dass diese Werte als Teil eines Systems bei unzureichender Wärmezufuhr und -abfuhr schwierig zu erreichen sind. Eine intelligente Leitung der Wärmeströme innerhalb neuer Systeme bleibt somit ein essenzieller Bestandteil bei deren Konzeption. Unter Berücksichtigung der Besonderheiten und Anforderungen der Peltier-Elemente können diese somit als Komponente eines komplexeren Gesamtsystems verwendet werden, als dezentrale Wärmepumpen in der Fassade, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden, scheinen Peltier-Elemente derzeit jedoch nicht als effiziente Technologie nutzbar zu sein.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [11] .....	2
Abbildung 2	Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit [19].....	6
Abbildung 3	Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala nach [16] .....	8
Abbildung 4	lokale thermische Unbehaglichkeit durch asymmetrische Strahlungstemperatur [16] .....	10
Abbildung 5	Darstellung des steigenden Interesses am Forschungsschwerpunkt der thermischen Behaglichkeit anhand der Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen [22].....	11
Abbildung 6	Relation PPD zu PMV [32], Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsprojekte im Vergleich zum Modell nach Fanger .....	12
Abbildung 7	Ausschnitte der Methodik des UC Berkeley Modells nach [39] (a, b und c) und [38] (d): (a) Beispiel der Konditionierung des Kopf-Segments (b) Skala thermisches Empfinden (c) Skala thermische Behaglichkeit (d) Körpersegmente, Positionen zur Messung der Hauttemperatur und Grenzen der Körpersegmente .....	13
Abbildung 8	adaptive Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit [46].....	15
Abbildung 9	Standardauslegungswerte der operativen Innentemperatur für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen in Abhängigkeit vom exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwert der Außentemperatur [47].....	16
Abbildung 10	Tagesmittelwerte der Raumlufttemperatur mit Trendlinie für die Wohnräume einzeln (oben) und in Summe sowie 95%-Vorhersageintervall (unten) [50]...	17
Abbildung 11	Gegenüberstellung der Trendlinien der Wohnzimmer (rot) und der Schlafzimmer (blau) [50].....	18
Abbildung 12	von links oben nach rechts unten: Stundenwerte der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über dem Grund und der Bestrahlungsstärke der atmosphärischen Wärmestrahlung (horiz. Ebene) eines beispielhaften TRJ des Standortes Kaiserslautern nach [56], Daten bereitgestellt durch Klimaberatungsmodul des DWD [57].....	20
Abbildung 13	Ausschnitt eines Beispiels für die Auswahlzeiträume der Witterungsabschnitte der TRJ-Datensätze der Koordinaten 4336500 / 2728500 (8 km nördlich von Görlitz) und 4150500 / 2503500 (3 km östlich von Teublitz) nach [54] .....	20
Abbildung 14	SRES-Szenarien nach [59] und [63] .....	23
Abbildung 15	zu erwartender Bereich der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung	

	<i>unterschiedlicher SRES Szenarien nach [59] mit Werten für 2021 aus [65] und [66] .....</i>	<i>24</i>
Abbildung 16	<i>Abschätzung zukünftiger Klimaänderungen auf Basis der RCP-Emissionsszenarien [58].....</i>	<i>26</i>
Abbildung 17	<i>mögliche Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher SSP-Pfade [7] .....</i>	<i>26</i>
Abbildung 18	<i>Leitung des elektrischen Stroms bei n- und p-Dotierung nach [75]. Das rote Fremdatom ist der Donator, der ein zusätzliches Elektron (ebenfalls rot) in die Gitterstruktur der grauen Atome integriert, das gelbe Fremdatom ist der Akzeptor mit einem Elektron weniger, wegen dem die Löcher durch die Gitterstruktur wandern. ....</i>	<i>32</i>
Abbildung 19	<i>Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise eines Peltier-Elementes [82] nach [83].....</i>	<i>35</i>
Abbildung 20	<i>Peltier-Element TEC1-12710T200 in der Drauf- und Seitenansicht.....</i>	<i>36</i>
Abbildung 21	<i>schematische Darstellung der Wärmeströme eines Peltier-Elementes, blaue Pfeile stellen einen Kühleffekt dar, orangene einen Heizeffekt.....</i>	<i>38</i>
Abbildung 22	<i>Skizze des Prototyps [90] .....</i>	<i>40</i>
Abbildung 23	<i>Entwurfsskizze des erforschten Heiz- und Kühlsystems am Beispiel einer Leichtbau-Außenwand.....</i>	<i>43</i>
Abbildung 24	<i>Leistungskurven des TEC1-12710 [99], .....</i>	<i>44</i>
Abbildung 25	<i>Skizze des Versuchskörpers für die Grundlagenversuche [82] .....</i>	<i>50</i>
Abbildung 26	<i>links: fertiger Versuchskörper; rechts: Peltier-Element zwischen den Kupferstäben .....</i>	<i>51</i>
Abbildung 27	<i>Temperaturverlauf der beiden Peltier-Seiten des TEC2-19006.....</i>	<i>53</i>
Abbildung 28	<i>links: Peltier-Element zwischen den zwei unterschiedlich langen Kupferstäben .....</i>	<i>55</i>
Abbildung 29	<i>Skizze des ersten Prototyps mit einem Peltier-Element für zwei Versuchsreihen, mit und ohne Gipskartonplatte.....</i>	<i>56</i>
Abbildung 30	<i>links: erster Prototyp ohne Gipskartonplatte, Temperaturmessung auf der Aluminiumplatte rechts: erster Prototyp mit Gipskartonplatte, Temperaturmessung auf der Gipskartonplatte .....</i>	<i>57</i>
Abbildung 31	<i>links: fertiger Kubus im Außenbereich der TU Kaiserslautern mit eingebautem Prototyp rechts: Messtechnik im Innenraum des Kubus.....</i>	<i>58</i>
Abbildung 32	<i>Gegenüberstellung der Lufttemperatur, Außentemperatur und der mittleren Wandtemperatur über der Aluminiumplatte des ersten Prototyps in der Nacht</i>	

	<i>eines kalten Frühlingstages am 31.03.2020.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 33</i>	<i>Systemskizze des zweiten Prototyps mit vier Peltier-Elementen und Anordnung der NTC-Temperaturfühler .....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 34</i>	<i>links: Grafitplättchen als Ersatz der Wärmeleitpaste zum Erreichen eines möglichst guten Wärmeverbundes zwischen Peltier-Element und den Aluminiumbauteilen .....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 35</i>	<i>Vergleich der gemessenen Raumlufthtemperatur mit der Soll-Temperatur von 20 °C unter Verwendung des zweiten Prototyps mit vier Peltier-Elementen im Januar 2021.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 36</i>	<i>Fließdiagramm der Steuerung zur Temperierung des Kubus durch den zweistufigen Regler .....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 37</i>	<i>Leistungsfähigkeit der Kühlung durch den Prototyp mit vier Peltier-Elementen, Gegenüberstellung der Raumlufthtemperatur, ihrer Soll-Temperatur und der mittleren Wandoberflächentemperatur .....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 38</i>	<i>Modelle zur Validierung der Simulationen in TRISCO und VOLTRA.....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 39</i>	<i>Temperaturverlauf des Messsensors auf der Aluminiumplatte unmittelbar über dem Peltier-Element des Prototyps ohne Gipskartonplatte .....</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 40</i>	<i>beispielhafte Wandmodelle der Untersuchungen in TRISCO und VOLTRA ..</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 41</i>	<i>schematische Darstellung der den TRNSYS Simulationen zugrunde liegenden Methodik.....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 42</i>	<i>Gebäudemodelle der Simulationen in TRNSYS, links: Großraumbürogebäude, rechts: Einfamilienhaus, Bungalow .....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 43</i>	<i>Auszug aus dem Datenblatt des TEC1-12710 [99] .....</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 44</i>	<i>TEC1-12710 – Vergleich der reinen Messwerte und der Kombination aus Messung und analytischer Berechnung der elektrischen Spannung; Blau: Messwerte; Grau: berechnete Werte .....</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 45</i>	<i>Auszug aus dem Datenblatt des TEC2-19006 [124] .....</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 46</i>	<i>TEC2-19006 – Vergleich der reinen Messwerte und der Kombination aus Messung und analytischer Berechnung der elektrischen Spannung; Blau: Messwerte; Grau: berechnete Werte .....</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 47</i>	<i>Temperaturen und Wärmeströme des zweistufigen TEC2-19006.....</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 48</i>	<i>TEC1-12710 – berechnete COP des einstufigen Peltier-Elementes.....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 49</i>	<i>TEC1-12710 – maximale COPs der Grundlagenversuche .....</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 50</i>	<i>TEC2-19006 – berechnete COP des zweistufigen Peltier-Elementes .....</i>	<i>88</i>
<i>Abbildung 51</i>	<i>TEC2-19006 – maximale COPs und Grenzabweichung der</i>	

---

Grundlagenversuche .....	89
Abbildung 52 TEC2-19006 – COPs und Grenzabweichung der Versuche mit dem 1 m langen Kupferstab.....	90
Abbildung 53 Temperaturverläufe auf unterschiedlichen Wandgeometrien, Simulationsergebnisse aus TRISCO.....	91
Abbildung 54 Beispiel eines ausgewählten Zeitraums (rotes Rechteck) aus einer einwöchigen Messung zur Analyse des System-COPs.....	94
Abbildung 55 Matrix der System-COP-Werte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen außen und innen sowie der Stromstärke auf Stufe 2 des Reglers .	95
Abbildung 56 dreidimensionale Darstellung der System-COPs .....	96
Abbildung 57 maßgebende System-COPs des Prototyps in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie der Stromstärke; Tabelle links als Grundlage für die Simulationen in TRNSYS.....	97
Abbildung 58 relative Abweichungen zwischen erforderlicher Wärme- und erforderlicher elektrischer Energie des Großraumbürogebäudes.....	101
Abbildung 59 relative Abweichungen zwischen erforderlicher Wärme- und erforderlicher elektrischer Energie des Wohngebäudes.....	102

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1</i>	<i>Gegenüberstellung des mittleren TRJ und der beiden extremen TRJ für Sommer und Winter für den Standort Kaiserslautern, Daten aus [57] .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 2</i>	<i>Gegenüberstellung der RCP-Szenarien nach [71] .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3</i>	<i>Gegenüberstellung der aktuellen Datensätze TRJ 2015 und der zukünftigen TRJ 2045, Daten aus [57] .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 4</i>	<i>Gegenüberstellung der mittleren Temperaturen der vier Jahreszeiten TRJ 2015 und TRJ 2045, Daten aus [57] .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 5</i>	<i>Relationen der Stromstärke <math>I</math>, der Temperaturdifferenz <math>\Delta T</math> zwischen warmer und kalter Peltier-Seite sowie des COPs .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 6</i>	<i>erreichte Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Peltier-Seite in Abhängigkeit der Stromstärke als Leistungsspektrum des Peltier-Elementes; Rot: Messungen TEC1-12710; Schwarz: TEC2-19006 .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabelle 7</i>	<i>Vergleich der experimentell ermittelten mit den in TRISCO simulierten Oberflächentemperaturen auf der unverkleideten Aluminiumplatte .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 8</i>	<i>Vergleich der experimentell ermittelten mit den in VOLTRA simulierten Oberflächentemperaturen auf der unverkleideten Aluminiumplatte .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 9</i>	<i>Vergleich der experimentell ermittelten mit den in VOLTRA simulierten Oberflächentemperaturen des mit Gipskartonplatten verkleideten Prototyps .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 10</i>	<i>Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse einer Messung vom 02.02.2021 - 10.02.2021; Vergleich der mittleren Oberflächentemperatur <math>T_{R,M}</math> als Ergebnis der Simulation und aus vereinfachter Bestimmung als arithmetisches Mittel aus <math>M_2</math> und <math>M_3</math> .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 11</i>	<i>Anzahl der Stunden, in denen das PMV im Bürogebäude außerhalb der jeweiligen Kategorien nach DIN EN ISO 7730 [16] liegt, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten; nur Heizfall <math>PMV &lt; 0</math> .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabelle 12</i>	<i>operative Temperaturen der einzelnen Zonen des Bürogebäudes bei eingeschalteter Peltier-Heizung .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabelle 13</i>	<i>Anzahl der Stunden, in denen das PMV im Wohngebäude außerhalb der jeweiligen Kategorien nach DIN EN ISO 7730 [16] liegt, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten; nur Heizfall <math>PMV &lt; 0</math> .....</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 14</i>	<i>operative Temperaturen der drei betrachteten Räume des Wohngebäudes bei eingeschalteter Peltier-Heizung .....</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 15</i>	<i>Gegenüberstellung der Nutzenergie und der Endenergie des Bürogebäudes .....</i>	<i>101</i>

---

<i>Tabelle 16</i>	<i>Gegenüberstellung der Nutzenergie und der Endenergie des Wohngebäudes</i> .....	<i>103</i>
<i>Tabelle 17</i>	<i>Vergleich der Nutz- und Endenergiebedarfe des Bürogebäudes mit unterschiedlichen TRJ; TRJ 2015 vs. TRJ 2045</i> .....	<i>104</i>
<i>Tabelle 18</i>	<i>Vergleich der Nutz- und Endenergiebedarfe des Wohngebäudes mit unterschiedlichen TRJ; TRJ 2015 vs. TRJ 2045</i> .....	<i>105</i>
<i>Tabelle 19</i>	<i>Bürogebäude – Vergleich der drei Varianten: Anzahl der Stunden, in denen das PMV außerhalb der jeweiligen Kategorien der DIN EN ISO 7730 [16] liegt, nur Winter, Heizfall <math>PMV &lt; 0</math></i> .....	<i>106</i>
<i>Tabelle 20</i>	<i>Bürogebäude – Vergleich der operativen Temperaturen der drei Heizsysteme in der Nutzungszeit im Winter, Heizfall</i> .....	<i>106</i>
<i>Tabelle 21</i>	<i>Bürogebäude – Vergleich der End- und Nutzenergiebedarfe der drei Heizsysteme</i> .....	<i>107</i>
<i>Tabelle 22</i>	<i>Wohngebäude – Vergleich der drei Varianten: Anzahl der Stunden, in denen das PMV außerhalb der jeweiligen Kategorien der DIN EN ISO 7730 [16] liegt, nur Winter, Heizfall <math>PMV &lt; 0</math></i> .....	<i>108</i>
<i>Tabelle 23</i>	<i>Wohngebäude – Vergleich der operativen Temperaturen der drei Heizsysteme in der Nutzungszeit im Winter, Heizfall</i> .....	<i>108</i>
<i>Tabelle 24</i>	<i>Wohngebäude – Vergleich der End- und Nutzenergiebedarfe der drei Heizsysteme</i> .....	<i>109</i>



## Literatur

- [1] H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem: IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: : Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.
- [2] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Vom IPCC AR6 der WG I zum IPCC AR6 der WG II – Kernaussagen und ein Blick auf die Berge. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, [https://ccca.ac.at/fileadmin/00\\_DokumenteHauptmenue/02\\_Klimawissen/IPCC/AR6\\_WGII\\_Kas er\\_20220228.pdf](https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/IPCC/AR6_WGII_Kas er_20220228.pdf) [Zugriff am: 30.06.2022].
- [3] Europäische Union: Übereinkommen von Paris, 2015, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:22016A1019(01)) [Zugriff am: 16.03.2022].
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Abkommen von Paris. BMWK, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> [Zugriff am: 29.06.2022].
- [5] Hamilton, I.; Rapf, O.; Kockat, J. et al.: 2020 global status report for buildings and construction. In: United Nations Environmental Programme (2020).
- [6] Schöndube, T.; Beecken, C.; Becker, S. et al.: Primärenergiebedarf resultierend aus Herstellungs-, Nutzungs- und Instandhaltungsphase von Gebäuden in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard. In: Bauphysiktag 2019 in Weimar. Bauphysik in Forschung und Praxis. Schriftenreihe der Professur Bauphysik (2019), S. 82-87.
- [7] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- [8] Dudenredaktion: "ganzheitlich" auf Duden online., <https://www.duden.de/rechtschreibung/ganzheitlich> [Zugriff am: 01.07.2022].
- [9] Cambridge University Press: "holistic" auf Cambridge Dictionary online. Cambridge Dictionary, <https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/holistic> [Zugriff am: 01.07.2022].
- [10] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: holistischer Ansatz – Lexikon der Geowissenschaften, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/holistischer-ansatz/7042> [Zugriff am: 07.07.2022].
- [11] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR: Informationsportal Nachhaltiges

- Bauen – Dimensionen und Schutzziele des nachhaltigen Bauens. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen,  
<https://www.nachhaltigesbauen.de/hintergrund/dimensionen-und-schutzziele-des-nachhaltigen-bauens/> [Zugriff am: 01.07.2022].
- [12] Kornadt, O. (Hrsg.): Entwicklung und messtechnische Validierung der Kopplung von CFD-Simulation mit einem thermophysiologicalen Modell zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit. Autor: Völker, C.; Bauhaus-Universität Weimar, Verl. Im Jonas Verlag, ISBN 978-3-95773-051-0., 2012.
- [13] Richter, W.; Gritzki, R.; Knorr, M. et al.: Thermische Behaglichkeit unter sommerlichen Bedingungen bei Berücksichtigung verschiedener Raumkühlungsverfahren: Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007.
- [14] Benzinger, T.H.: The physiological basis for thermal comfort. *In: Indoor climate* (1979), S. 441-476.
- [15] ASHRAE 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, 2020.
- [16] DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPDIndexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [17] Fanger, P.O.: Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *In: Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.* (1970).
- [18] DIN 1946-2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1994.
- [19] Willems, W.M.; Schild, K.; Dinter, S. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Vieweg, Wiesbaden, 2006.
- [20] DIN EN 13779:2005-05, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [21] Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Büro- und Verwaltungsgebäude. Soziokulturelle Qualität - Kriterium: Thermischer Komfort. Ausgabe 2015.
- [22] Rupp, R.F.; Vásquez, N.G.; Lamberts, R.: A review of human thermal comfort in the built environment. *In: Energy and buildings* 105 (2015), S. 178-205.
- [23] Tse, W.L.; So, A.T.P.; Chan, W.L. et al.: The validity of predicted mean vote for air-conditioned offices. *In: Facilities* (2005).
- [24] Nasrollahi, N.; Knight, I.; Jones, P.: Workplace satisfaction and thermal comfort in air conditioned office buildings: Findings from a summer survey and field experiments in Iran. *In: Indoor and*

- Built Environment 17 (2008), Heft 1, S. 69-79.
- [25] Yoon, D.W.; Sohn, J.Y.; Cho, K.H.: The comparison on the thermal comfort sensation between the results of questionnaire survey and the calculation of the PMV values. *In: Proc Indoor Air 99* (1999), S. 137-141.
- [26] Araújo, V.M.D.; Araújo, E.H.S.: The applicability of ISO 7730 for the assessment of the thermal conditions of users of the buildings in Natal-Brazil. *In: Proc Indoor Air 99* (1999), S. 148-153.
- [27] Mayer, E.: A new correlation between predicted mean votes (PMV) and predicted percentages of dissatisfied (PPD). *In: Cib Report* (2002), S. 60-65.
- [28] Paula Xavier, A.A. de; Lamberts, R.: Indices of thermal comfort developed from field survey in Brazil. *In: Transactions-american Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers* 106 (2000), Heft 1, S. 45-58.
- [29] Andreasi, W.A.; Lamberts, R.: Thermal comfort in buildings located in regions of hot and humid climate of Brazil. *In: Proc Comfort and Energy Use in Buildings-Getting them Right*. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings (2006).
- [30] Hwang, R.-L.; Lin, T.-P.; Liang, H.-H. et al.: Additive model for thermal comfort generated by matrix experiment using orthogonal array. *In: Building and Environment* 44 (2009), Heft 8, S. 1730-1739.
- [31] Hwang, R.-L.; Cheng, M.-J.; Lin, T.-P. et al.: Thermal perceptions, general adaptation methods and occupant's idea about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot-humid regions. *In: Building and Environment* 44 (2009), Heft 6, S. 1128-1134.
- [32] van Hoof, J.; Mazej, M.; Hensen, J.L.M.: Thermal comfort: research and practice. *In: Frontiers in Bioscience* 15 (2010), Heft 2, S. 765-788.
- [33] Humphreys, M.A.; Nicol, J.F.: The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *In: Energy and buildings* 34 (2002), Heft 6, S. 667-684.
- [34] Kimura, K.; Tanabe, S.; Iwata, T.: Climate chamber studies for hot and humid regions. *In: Proceedings Thermal Comfort, Past, Present and Future*, Garston (1994), S. 88-105.
- [35] Nakano, J.; Tanabe, S.-i.; Kimura, K.-i.: Differences in perception of indoor environment between Japanese and non-Japanese workers. *In: Energy and buildings* 34 (2002), Heft 6, S. 615-621.
- [36] Pitts, A.: The language and semantics of thermal comfort. *In: Windsor Conference: Comfort and Energy Use in Buildings*, S. 1-7.
- [37] Lee, J.-Y.; Tochihara, Y.; Wakabayashi, H. et al.: Warm or slightly hot? Differences in linguistic dimensions describing perceived thermal sensation. *In: Journal of physiological anthropology* 28 (2009), Heft 1, S. 37-41.
- [38] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *In: Building and Environment* 45 (2010), Heft 2, S. 380-388.

- [39] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *In: Building and Environment* 45 (2010), Heft 2, S. 389-398.
- [40] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *In: Building and Environment* 45 (2010), Heft 2, S. 399-410.
- [41] Zhao, Y.; Zhang, H.; Arens, E.A. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *In: Building and Environment* 72 (2014), S. 300-308.
- [42] Stolwijk, J.A.J.; Hardy, J.D.: Temperature regulation in man—a theoretical study. *In: Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 291 (1966), Heft 2, S. 129-162.
- [43] Dudenredaktion: „Physiognomie“ auf Duden online, o. J., <https://www.duden.de/rechtschreibung/Physiognomie> [Zugriff am: 14.03.2022].
- [44] Schellen, L.; Loomans, M.; Kingma, B.R.M. et al.: The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: coupling with the indoor environment and thermal sensation. *In: Building and Environment* 59 (2013), S. 10-22.
- [45] Dear, R. de; Brager, G.S.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference (1998).
- [46] Djongyang, N.; Tchinda, R.; Njomo, D.: Thermal comfort: A review paper. *In: Renewable and sustainable energy reviews* 14 (2010), Heft 9, S. 2626-2640.
- [47] DIN EN 16798-1:2019, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6. Deutsche Fassung EN 16798-1:2019, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [48] DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [49] Schweiker, M.; Brasche, S.; Bischof, W. et al.: Explaining the individual processes leading to adaptive comfort: Exploring physiological, behavioural and psychological reactions to thermal stimuli. *In: Journal of Building Physics* 36 (2013), Heft 4, S. 438-463.
- [50] Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O.: Indoor Climate Measurements in Buildings and Design Functions for Building Simulations. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Heft 960. IOP Publishing, S. 42029.
- [51] Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O.: Auswertung von Raumklimamessungen und Bestimmung typischer Taupunkttemperaturen in natürlich belüfteten Wohnzimmern. *In: Bauphysik* 39 (2017), Heft 3, S. 151-158.

- [52] DIN EN ISO 13788:2012, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren. Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [53] *Deutscher Wetterdienst*: Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, 2017.
- [54] *Deutscher Wetterdienst*: Projektbericht Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. *In*: Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Deutschland (2017).
- [55] *Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung*: Forschungsprojekt: Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse – Forschungsprojekt Zukunft Bau von August 2013 - April 2017, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html> [Zugriff am: 07.02.2022].
- [56] *Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen*: Testreferenzjahre (TRY). Deutscher Wetterdienst, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> [Zugriff am: 04.02.2022].
- [57] *Deutscher Wetterdienst*: Klimaberatungsmodul. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2022, <https://kunden.dwd.de/obt/>.
- [58] *Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S. et al.*: Baukonstruktion im Klimawandel. Springer-Verlag, Wiesbaden, 2016.
- [59] *Nakic´enovic´, N.; Davidson, O.; Davis, G. et al.*: Summary for Policymakers - Emissions Scenarios: A Special Report of IPCC Working Group III, 2000.
- [60] *Deutscher Wetterdienst*: Klimaszenarien (Zukunft). Deutscher Wetterdienst, [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien\\_homenode.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_homenode.html) [Zugriff am: 07.02.2022].
- [61] *Umwelt Bundesamt*: Klimamodelle und Szenarien, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien> [Zugriff am: 07.02.2022].
- [62] IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- [63] *Deutscher Wetterdienst*: SRES-Szenarien. Deutscher Wetterdienst, [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/sres-szenarien\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/sres-szenarien_node.html) [Zugriff am: 07.02.2022].
- [64] *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*: IPCC IS92 Emissions Scenarios (A, B, C, D, E, F) Dataset Version 1.1. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC),

- Palisades, NY, 2000.
- [65] IEA (2022), Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, IEA, Paris  
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.
- [66] *Liu, Z.; Deng, Z.; Davis, S.J. et al.*: Monitoring global carbon emissions in 2021. *In: Nature Reviews Earth & Environment* 3 (2022), Heft 4, S. 217-219. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00285-w>.
- [67] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [68] *Christiane Beuermann; Hanna Hüging*: Vom Menschen gemacht – Der anthropogene Treibhauseffekt. Bundeszentrale für politische Bildung bpb, 2014,  
<https://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38441/anthropogener-treibhauseffekt>  
[Zugriff am: 08.02.2022].
- [69] *Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A. et al.*: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *In: Nature* 463 (2010), Heft 7282, S. 747-756.
- [70] *Deutscher Wetterdienst*: RCP-Szenarien. Deutscher Wetterdienst,  
[https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien_node.html)  
[Zugriff am: 07.02.2022].
- [71] *Münch, I.*: Klimawandel in Deutschland - Szenarien, Prognosen und ihre Auswirkungen auf ein neuartiges thermoelektrisches Heiz- und Kühlsystem. Kaiserslautern, Deutschland, TU Kaiserslautern, Studienprojekt am Fachgebiet Bauphysikalische Modellierung, 2021.
- [72] *O'Neill, B.C.; Kriegler, E.; Riahi, K. et al.*: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *In: Climatic change* 122 (2014), Heft 3, S. 387-400.
- [73] *Wang, J.; Guan, Y.; Wu, L. et al.*: Changing lengths of the four seasons by global warming. *In: Geophysical Research Letters* 48 (2021), Heft 6, e2020GL091753.
- [74] *Ose, R.*: Elektrotechnik für Ingenieure: Grundlagen. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, München, 2020.
- [75] *Harten, U.*: Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin, 2014.
- [76] *Paul, S.; Paul, R.*: Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2: Elektromagnetische Felder und ihre Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
- [77] *Meschede, D.*: Gerthsen Physik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015.
- [78] *Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.*: Physik für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin, 2016.

- 
- [79] *Müller, U.*: Anorganische Strukturchemie. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [80] *Raith, W.*: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2: Elektromagnetismus. De Gruyter, Berlin, New York, 2006.
- [81] *Lienig, J.; Brümmer, H.*: Elektronische Gerätetechnik. Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [82] *Blum, T.; Carrigan, S.; Platzek, D. et al.*: Entwicklung eines thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems mit hohem Wirkungsgrad. *In*: Proceedings, BauSIM2020, Graz, Österreich, 290-298.
- [83] *Snyder, G.J.; Toberer, E.S.*: Complex thermoelectric materials. *In*: Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from Nature Publishing Group (2011), S. 101-110.
- [84] *Panco GmbH*: Peltier-Elemente Produktkatalog, <https://www.panco.de/produkte-alle.php> [Zugriff am: 10.12.2021].
- [85] *Quick-Cool*: Peltier-Element Produktkatalog des Online-Shops, <https://quickcool-shop.de/k2/Peltierelemente> [Zugriff am: 10.12.2021].
- [86] *Conrad Electronic SE*: TEC1-12706 - Specification of Thermoelectric Module – Datenblatt. Conrad Electronics SE.
- [87] *Meerstetter Engineering GmbH*: Anwendungen mit Peltier-Elementen, 2021, <https://www.meerstetter.ch/de/kundencenter/kompendium/33-anwendungen-mit-peltier-elementen>.
- [88] *Tecteg*: Raw alloyed TEG Power Material available in P & N-Type – Datenblatt über Materialeigenschaften des Halbleitermaterials von Peltier-Elementen, <https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2014/07/Ingot-Raw-Material-BiTe-N-and-P.pdf> [Zugriff am: 09.02.2022].
- [89] *Trotec GmbH*: Peltier-Luftentfeuchter TTP 5 E, [https://de.trotec.com/shop/peltier-luftentfeuchter-ttp-5-e.html?gclid=EAlaIqobChMlv4KfjqHI9AIVEv2zCh3sKAWfEAYYA\\_iABEGKY4vD\\_BwE](https://de.trotec.com/shop/peltier-luftentfeuchter-ttp-5-e.html?gclid=EAlaIqobChMlv4KfjqHI9AIVEv2zCh3sKAWfEAYYA_iABEGKY4vD_BwE) [Zugriff am: 15.12.2021].
- [90] *Martín-Gómez, C.; Ibáñez-Puy, M.; Bermejo-Busto, J. et al.*: Thermoelectric cooling heating unit prototype. *In*: Building Services Engineering Research and Technology 37 (2016), Heft 4, S. 431-449.
- [91] *Ahmad Gondal, I.*: Design and experimental analysis of a solar thermoelectric heating, ventilation, and air conditioning system as an integral element of a building envelope. *In*: Building Services Engineering Research and Technology 40 (2019), Heft 2, S. 220-236.
- [92] *Liu, Z.; Zhang, L.; Gong, G. et al.*: Evaluation of a prototype active solar thermoelectric radiant wall system in winter conditions. *In*: Applied Thermal Engineering 89 (2015), S. 36-43.
- [93] *Kimmling, M.; Hoffmann, S.*: Preliminary study of thermal comfort in buildings with PV-powered thermoelectric surfaces for radiative cooling. *In*: Energy Procedia 121 (2017), S. 87-94.

- [94] *Olesen, B.W.*: Radiant floor heating in theory and practice. *In: ASHRAE journal* 44 (2002), Heft 7, S. 19-26.
- [95] *Rhee, K.-N.; Olesen, B.W.; Kim, K.W.*: Ten questions about radiant heating and cooling systems. *In: Building and Environment* 112 (2017), S. 367-381.
- [96] *Babiak, J.; Olesen, B.W.; Petras, D.*: Low temperature heating and high temperature cooling: REHVA GUIDEBOOK No 7 (2007).
- [97] *Sobotta, S.*: Praxis Wärmepumpe: Technik, Planung, Installation. Beuth Verlag, 2018.
- [98] DIN EN 12831-1:2017, Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [99] *Thermal Electric Corp., TEC*: Specification of Thermoelectric Module TEC1-12710 – Datenblatt des Peltier-Elements TEC1-12710, <https://espressomilkcooler.com/wp-content/uploads/2015/03/TEC1-12710-site-ready.pdf> [Zugriff am: 10.02.2022].
- [100] *Umweltbundesamt*: Wohnfläche, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#zahl-der-wohnungen-gestiegen> [Zugriff am: 04.07.2022].
- [101] *Bundeszentrale für politische Bildung bpb*: Bevölkerung und Haushalte, 2021, <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61584/bevoelkerung-und-haushalte/> [Zugriff am: 04.07.2022].
- [102] *Buderus, Bosch Thermotechnik GmbH*: Welche Kosten verursachen Wärmepumpen?, <https://www.buderus.de/de/waermepumpe/kosten#:~:text=Luft%2DWasser%2DW%C3%A4rmepumpen%20kosten%20in,f%C3%A4llig%20werden%20%E2%80%93%20je%20nach%20System> [Zugriff am: 10.02.2022].
- [103] *Buderus, Bosch Thermotechnik GmbH*: Die Kosten einer Luft-Wärmepumpe: Wie setzen sie sich zusammen? Was können Sie sparen?, <https://www.buderus.de/de/waermepumpe/luftwaermepumpe/kosten> [Zugriff am: 27.09.2022].
- [104] *Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR*: eLCA-TOOL. Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung BBR, <https://www.bauteileditor.de/> [Zugriff am: 04.07.2022].
- [105] *Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen*: ÖKOBAUDAT, <https://www.oekobaudat.de/> [Zugriff am: 04.07.2022].
- [106] *Deutsches Kupferinstitut*: Die Auswirkungen von Bismut als Bleiersatz, [https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/10/Factsheet\\_Bismut-als-Bleiersatz\\_final.pdf](https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/10/Factsheet_Bismut-als-Bleiersatz_final.pdf) [Zugriff am: 04.07.2022].
- [107] TRISCO version 12.0w: computer program to calculate 3D & 2D state heat transfer in rectangular objects, Physibel, Gent, Belgien.
- [108] 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.
- [109] DIN EN ISO 6946: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Deutschland (2018).
- [110] TRNSYS 18: Transient System Simulation Tool, Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists.
- [111] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Deutsches Institut für Normung, Berlin, Deutschland (2013).
- [112] DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Deutschland (2003).
- [113] *Hofmann, M., Geyer, C. und Kornadt, O.*: Indoor climate measurements and datasets for building simulations. *In: Indoor Air 2020 Seoul, Korea. Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (ISIAQ) (2020).*
- [114] *Raumklima.eu*: Die optimale Temperatur für Badezimmer, 2020, <https://raumklima.eu/temperatur/die-optimale-temperatur-fuer-badezimmer/> [Zugriff am: 07.06.2022].
- [115] DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Deutschland (2016).
- [116] *Blum, T.; Carrigan, S.; Platzek, D. et al.*: Flächenheizung- und -kühlung in TRNSYS - Lösungsansatz für nicht-wasserführende Systeme. *In: In: Proceedings, BauSIM2022, Weimar, Deutschland.*
- [117] DIN EN 11855-2: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 2: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung (ISO 11855-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 11855-2:2015, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Deutschland (2016).
- [118] *Koca, A.; Gemici, Z.; Topacoglu, Y. et al.*: Experimental investigation of heat transfer coefficients between hydronic radiant heated wall and room. *In: Energy and buildings 82 (2014), S. 211-221.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.045>.
- [119] *Awbi, H.B.; Hatton, A.*: Natural convection from heated room surfaces. *In: Energy and buildings 30 (1999), Heft 3, S. 233-244.* [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00004-3).
- [120] *Effizienzhaus-online*: Elektroheizungen: Wärme mit Hilfe von Strom, <https://www.effizienzhaus-online.de/elektroheizung/#:~:text=Auch%20die%20Verbrauchskosten%20von%20Elektroheizungen,einem%20Wirkungsgrad%20von%20100%20Prozent> [Zugriff am: 04.03.2022].

- 
- [121] *Zhang, H.Y.; Mui, Y.C.; Tarin, M.*: Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *In: Applied Thermal Engineering* 30 (2010), 6-7, S. 561-568.
- [122] *Tan, F.L.; Fok, S.C.*: Methodology on sizing and selecting thermoelectric cooler from different TEC manufacturers in cooling system design. *In: Energy conversion and management* 49 (2008), Heft 6, S. 1715-1723.
- [123] *Lineykin, S.; Ben-Yaakov, S.*: Analysis of thermoelectric coolers by a spice-compatible equivalent-circuit model. *In: IEEE Power Electronics Letters* 3 (2005), Heft 2, S. 63-66.
- [124] *Everredtronic Limited*: Specifications of Thermoelectric Module TEC2-19006 – Datenblatt des Peltier-Elements TEC2-19006. Everredtronic Limited, <https://www.everredtronic.com/files/TEC2-19006.pdf> [Zugriff am: 13.06.2022].
- [125] *Passivhaus Institut GmbH*: Qualitätsanforderungen an Passivhäuser, [https://passiv.de/de/02\\_informationen/02\\_qualitaetsanforderungen/02\\_qualitaetsanforderungen.htm](https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm) [Zugriff am: 24.06.2022].

## Anhang A: Thermoelektrisches Heiz- und Kühlsystem

### Heizwärmebedarf Beispielraum zur Vorbemessung des Peltier-Systems

Raumabmessungen:

Breite:	4 m
Länge:	5 m
Höhe:	2,7 m
Peltier-Wand:	$5 \cdot 2,7 = 13,5 \text{ m}^2$
Fensteranteil:	25%
Volumen:	$54 \text{ m}^3$

U-Werte:

Wand:	$0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Fenster:	$0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$
Mittlerer:	$0,75 \cdot 0,2 + 0,25 \cdot 0,9 = 0,375 \text{ W/m}^2\text{K}$

Randbedingungen:

Außenluft:	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$
Soll-Temperatur:	$21 \text{ }^\circ\text{C}$
Luftwechsel:	$0,7 \text{ 1/h}$

Kennwerte der Luft

Dichte:	$1,25 \text{ kg/m}^3$
Spez. Wärmekapazität:	$1.000 \text{ J/kgK}$

Wärmeverluste

Lüftung:	$1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (21 - (-10))\text{K} \cdot 0,7 \frac{1}{\text{h}} \cdot 54 \text{ m}^3 = 407 \text{ W}$
Transmission:	$0,375 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 13,5 \text{ m}^2 \cdot (21 - (10))\text{K} = 157 \text{ W}$
Gesamt:	$407 + 157 = 564 \text{ W}$

## Lebenszyklusanalyse – Vergleich Peltier-System vs. Wärmepumpe mit Fußbodenheizung

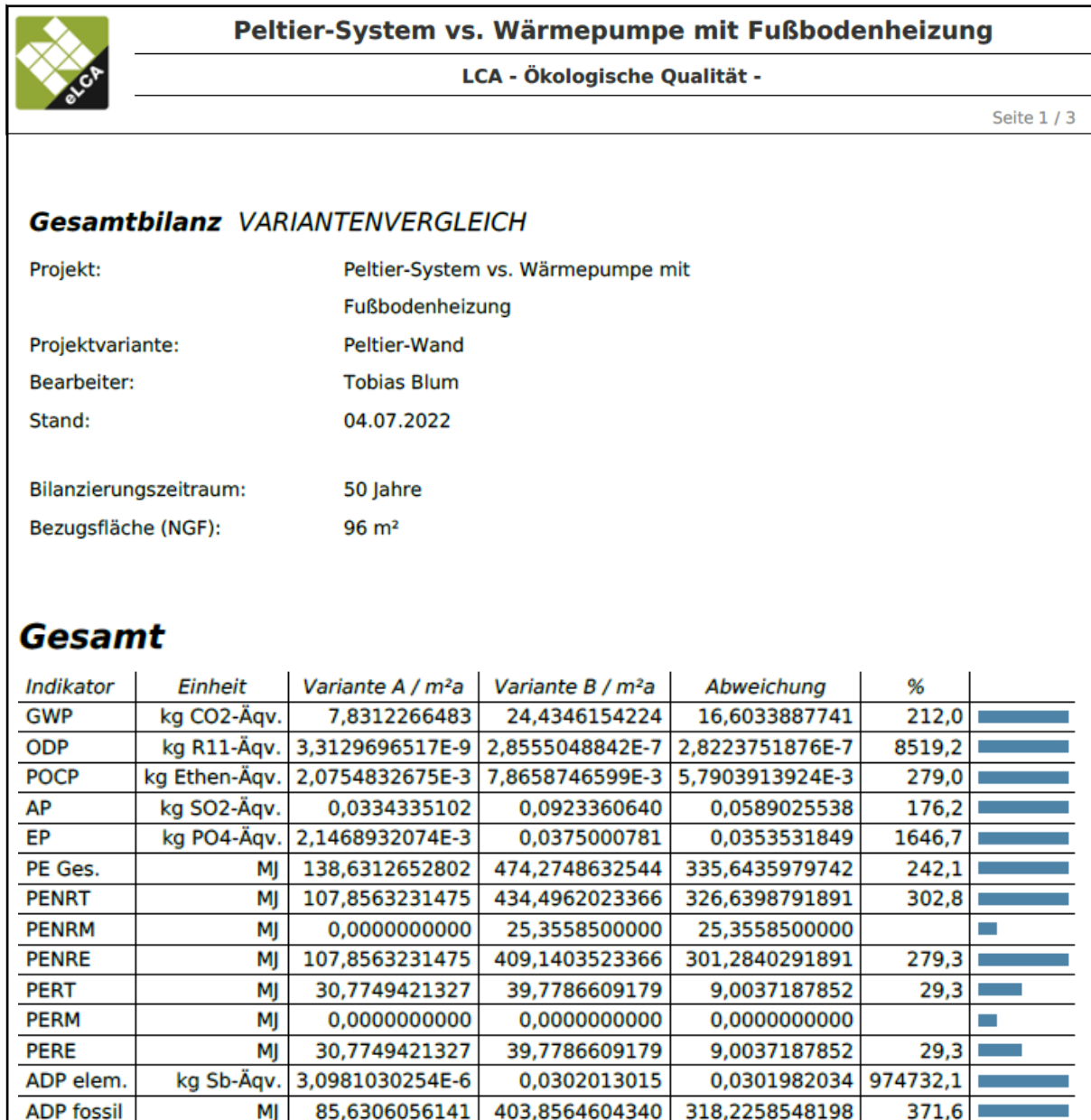


Abbildung A.1: Ausschnitt aus der Ergebniszusammenstellung des Variantenvergleichs mithilfe des eLCA-Tools

Variante A: Peltier-System

Variante B: Wärmepumpe mit Fußbodenheizung

## Anhang B: Experimentelle Untersuchungen

### Kennwerte der verwendeten Materialien und Bauteile

Gipskartonplatte, Miniform GKB 10 mm

Rohdichte:	680	kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit:	0,21	W/mK
Dicke:	10	mm
Spezifische Wärme:	n. a.	

XPS-Hartschaumplatte, Styrodur 3035 CS

Rohdichte:	n. a.	
Wärmeleitfähigkeit:	0,035	W/mK
Dicke:	120 - 180	mm
Spezifische Wärme:	n. a.	

Mineralwolle, Integra ZKF 1-035, Klemmfilz

Rohdichte:	n. a.	
Wärmeleitfähigkeit:	0,035	W/mK
Dicke:	180	mm
Spezifische Wärme:	840	J/kgK

Zementfaserplatte fermacell Powerpanel H<sub>2</sub>O

Rohdichte:	1.000	kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit:	0,17	W/mK
Dicke:	12,5	mm
Spezifische Wärme:	1.000	J/kgK

Kupfer, CU-ETP, CW004A

Rohdichte:	8.930	kg/m <sup>3</sup>	
Wärmeleitfähigkeit:	394	W/mK	bei 20°C
Spezifische Wärme:	386	J/kgK	bei 20°C

Aluminium, EN AW-2017A, AlCu4MgSi

Rohdichte:	2.800	kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit:	130 - 200	W/mK
Spezifische Wärme:	860	J/kgK

## Anhang C: Thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS

### Gebäudekenngrößen und Nutzungsarten der Modelle

Großraumbürogebäude nach DIN V 18599-10 [115]

#### Nutzungs- und Betriebszeit

Tägliche Nutzungszeit:	7:00 – 18:00 Uhr
Tägliche Betriebszeit Heizung:	5:00 – 18:00 Uhr

#### Raumtemperaturen

Raum-Solltemperatur Heizung:	21 °C
Temperatur außerhalb Nutzung:	17 °C
Maximaltemperatur Kühlung:	26 °C
Max. Temperatur außerhalb Nutzung:	30 °C

#### Interne Wärmequellen und Belegung

Belegungsdichte:	10,0 m <sup>2</sup> /P	mittel
Wärme durch Personen:	7,0 W/m <sup>2</sup>	
Arbeitshilfen:	10,0 W/m <sup>2</sup>	
Lüftungsrate:	0,6 1/h	

#### Randbedingungen der thermischen Behaglichkeit

Bekleidung:	1,0 clo (Arbeitskleidung 0,9 + Bürostuhl 0,1)
Energieumsatz:	1,2 met (sitzende Tätigkeit)
Externe Leistung:	0 W
Luftgeschwindigkeit:	0,1 m/s

#### Kubatur

Anzahl Geschosse:	3
Anzahl Nutzungseinheiten NE:	6
Breite je NE:	10,0 m
Länge je NE:	12,0 m
Höhe je NE:	3,0 m

Die oben aufgeführten Parameter gelten nur an Arbeitstagen unter der Woche. Am Wochenende werden die Büros nicht genutzt, sodass lediglich eine Mindesttemperatur von 17 °C aufrechterhalten wird.

## Einfamilienhaus

## Nutzungs- und Betriebszeit

Tägliche Nutzungszeiten

Wohnzimmer und Küche:	6:00 – 8:00 Uhr 17:00 – 24:00 Uhr
Büro:	7:00 – 17:00 Uhr
Bad und WC:	6:00 – 24:00 Uhr
Schlaf- und Gästezimmer:	23:00 – 7:00 Uhr
Flur und Heizungsraum:	keine Nutzungszeit

Tägliche Betriebszeiten Heizung

Wohnzimmer und Küche:	4:00 – 8:00 Uhr 15:00 – 24:00 Uhr
Büro:	5:00 – 17:00 Uhr
Bad und WC:	5:00 – 24:00 Uhr
Schlaf- und Gästezimmer:	nur Mindesttemperatur
Flur und Heizungsraum:	Mindesttemperatur durch heating type

## Raumtemperaturen

Operative Raum-Solltemperatur Heizung:	21 °C
Temperatur außerhalb Nutzung:	17 °C
Maximaltemperatur Kühlung:	26 °C
Max. Temperatur außerhalb Nutzung:	30 °C

## Interne Wärmequellen und Belegung nach DIN V 4108-6 Tabelle 2 [112]

Wohnzimmer:	TV, 3-4 Personen
Küche:	Kühlschrank, Geschirrspüler, Wasserkocher
Büro:	1 Person, pauschaler flächenbezogener Wert
Bad und WC:	Warmwasser
Schlaf- und Gästezimmer:	2 Personen
Heizungsraum:	Wäschetrockner, Gefriertruhe, Waschmaschine

Personen werden nur in der Nutzungszeit als Quellen berücksichtigt.

## Randbedingungen der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 [16]

Bekleidung:	$T_{\text{außen}} > 19^{\circ}\text{C} \rightarrow 1,0 \text{ clo}$
	$T_{\text{außen}} < 19^{\circ}\text{C} \rightarrow 0,7 \text{ clo}$
Externe Leistung:	0 W
Luftgeschwindigkeit:	0,1 m/s
<u>Energieumsatz</u>	
Wohnzimmer:	0,8 met (angelehnt)
Küche:	1,0 met (sitzend, entspannt)
Büro:	1,2 met (sitzende Tätigkeit)

In Bad, WC, Schlaf-, Gästezimmer, Flur und Heizungsraum findet die Behaglichkeit keine Berücksichtigung, da in diesen Räumen die Nutzungsarten und Soll-Temperaturen von üblichen Randbedingungen der DIN EN ISO 7730 abweichen.

## Kubatur

Anzahl Geschosse:	1
Anzahl der Räume:	10
Breite:	14,0 m
Länge:	16,5 m
Höhe:	3,0 m
<u>Raumgrößen</u>	
Wohnzimmer:	62,5 m <sup>2</sup>
Küche:	25,0 m <sup>2</sup>
Büro:	20,0 m <sup>2</sup>
Bad:	18,0 m <sup>2</sup>
WC:	4,0 m <sup>2</sup>
Schlafzimmer 1:	24,0 m <sup>2</sup>
Schlafzimmer 2:	24,0 m <sup>2</sup>
Gästezimmer:	20,0 m <sup>2</sup>
Heizungsraum:	20,0 m <sup>2</sup>
Flur:	13,5 m <sup>2</sup>
Gesamt:	231 m <sup>2</sup>





Abbildung C.1: Raumaufteilung des Einfamilienhauses

## Anhang D: Ergebnisauswertung

### Grenzabweichungen und Fehlerfortpflanzung der Grundlagenversuche

Grenzabweichung der NTC-Temperaturfühler

$$\Delta F = \pm 0,2 K \quad \text{für} \quad 0 \leq T \leq 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Gleichung zur Berechnung der elektrischen Spannung

$$U = \alpha \cdot \Delta T + IR = \alpha \cdot (T_h - T_c) + IR$$

Ableitungen

$$\frac{\partial U}{\partial T_h} = \alpha \quad \frac{\partial U}{\partial T_c} = -\alpha$$

Größtfehler, Grenzabweichung

$$\Delta f = \left| \frac{\partial U}{\partial T_h} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{\partial U}{\partial T_c} \right| \cdot \Delta F = 0,4 \cdot \alpha$$

2) Gleichung zur Berechnung der Wärmeleistung des Peltier-Elements

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c)$$

Ableitungen

$$\frac{\partial Q_h}{\partial T_h} = \alpha I - K \quad \frac{\partial Q_h}{\partial T_c} = K$$

Größtfehler, Grenzabweichung

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left| \frac{\partial Q_h}{\partial T_h} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{\partial Q_h}{\partial T_c} \right| \cdot \Delta F = |(\alpha I - K)| \cdot \Delta F + |K| \cdot \Delta F \\ &= 0,2 \cdot (|\alpha I - K| + |K|) \end{aligned}$$

3) Gleichung zur Berechnung der COPs des Peltier-Elements

$$COP = \frac{\alpha \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c)}{U \cdot I}$$

## Ableitungen

$$\frac{\partial COP}{\partial T_h} = \frac{\alpha I - K}{UI} \quad \frac{\partial COP}{\partial T_c} = \frac{K}{UI}$$

## Größtfehler, Grenzabweichung

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left| \frac{\partial COP}{\partial T_h} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{\partial COP}{\partial T_c} \right| \cdot \Delta F = \left| \frac{\alpha I - K}{UI} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{K}{UI} \right| \cdot \Delta F \\ &= 0,2 * \left( \left| \frac{\alpha I - K}{UI} \right| + \left| \frac{K}{UI} \right| \right) \end{aligned}$$

## Grenzabweichung und Fehlerfortpflanzung der modifizierten Grundlagenversuche mit 1 m langem Kupferstab

Grenzabweichung der NTC-Temperaturfühler

$$\Delta F_1 = \pm 0,2 \text{ K} \quad \text{für} \quad 0 \leq T \leq 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

Grenzabweichung der Wärmeleitfähigkeit des Kupfers

$$\Delta F_2 = 5\% = 0,05 \cdot 394 \frac{\text{W}}{\text{mK}} = 20 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Gleichung zur Berechnung der Wärmeleistung des Peltier-Elements

$$Q = \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot (T_{h,1} - T_{h,2})$$

mit:	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit des Kupfers
	$A$	Querschnittsfläche des Kupferstabes
	$l$	Länge des Kupferstabes (Abstand zwischen den NTC)
	$T_{h,1}$	Temperatur des NTC am Peltier-Element
	$T_{h,2}$	Temperatur des NTC am anderen Ende des Stabes

Ableitungen

$$\frac{\partial Q}{\partial T_{h,1}} = \lambda \cdot \frac{A}{l} \quad \frac{\partial Q}{\partial T_{h,2}} = -\lambda \cdot \frac{A}{l} \quad \frac{\partial Q}{\partial \lambda} = \frac{A}{l} \cdot (T_{h,1} - T_{h,2})$$

Größtfehler, Grenzabweichung

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left| \frac{\partial Q}{\partial T_{h,1}} \right| \cdot \Delta F_1 + \left| \frac{\partial Q}{\partial T_{h,2}} \right| \cdot \Delta F_1 + \left| \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \right| \cdot \Delta F_2 \\ &= 2 \cdot \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot 0,2 + \frac{A}{l} \cdot (T_{h,1} - T_{h,2}) \cdot 20 \end{aligned}$$

### Kalibrierung der beiden NTC-Temperaturfühler für die modifizierten Grundlagenversuche mit einem 1 m langen Kupferstab

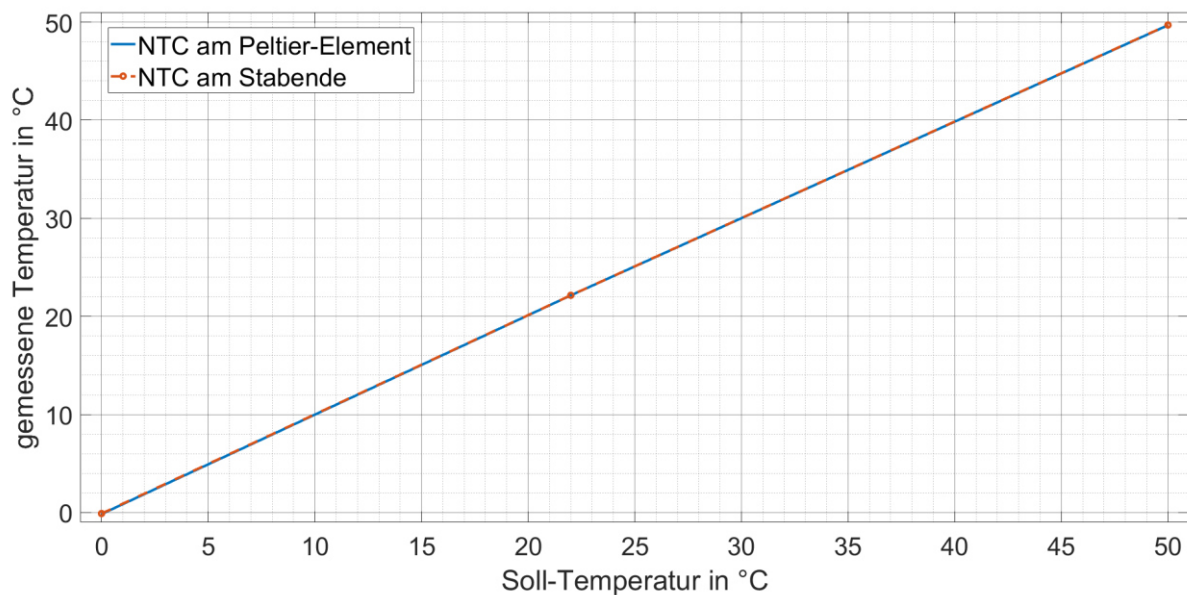


Abbildung D.1: Vergleich der Messgeraden der verwendeten NTC-Temperaturfühler

Tabelle D.1: gemessene Temperaturen zur Kalibrierung der NTC-Temperaturfühler

	Temperatur NTC1 [°C]	Temperatur NTC2 [°C]
Eisbad	-0,15	-0,1
Raumtemperatur	22,14	22,15
Ölbad bei 50 °C	49,68	49,7

**Grenzabweichung und Fehlerfortpflanzung der Freilandversuche mit Kubus**

Grenzabweichung der NTC-Temperaturfühler

$$\Delta F = \pm 0,2 \text{ K} \quad \text{für} \quad 0 \leq T \leq 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

Gleichung zur Berechnung der System-COPs

$$\text{SystemCOP} = \frac{8 \cdot (T_h - T_c)}{U \cdot I}$$

Ableitungen

$$\frac{\partial \text{SystemCOP}}{\partial T_h} = \frac{8}{UI} \quad \frac{\partial \text{SystemCOP}}{\partial T_c} = -\frac{8}{UI}$$

Größtfehler, Grenzabweichung

$$\Delta f = \left| \frac{\partial \text{SystemCOP}}{\partial T_h} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{\partial \text{SystemCOP}}{\partial T_c} \right| \cdot \Delta F = 0,4 \cdot \frac{8}{UI} = \frac{3,2}{UI}$$

## Lebenslauf

### Name

Tobias Blum

### Ausbildung

- Oktober 20 – September 21: Zertifikatsstudium am DISC der TU Kaiserslautern,  
Studienrichtung Technoethik
- Mai 19 – Februar 23: Promotionsstudium an der TU Kaiserslautern / RPTU  
Kaiserslautern-Landau,  
Fachbereich Bauingenieurwesen,  
Fachgebiet Bauphysik / Energetische  
Gebäudeoptimierung
- April 17 – April 19: Masterstudium, TU Kaiserslautern, Studienrichtung  
Bauingenieurwesen
- Oktober 13 – März 17: Bachelorstudium, HTW des Saarlandes, Studienrichtung  
Bauingenieurwesen

### Berufserfahrung

- seit Mai 19: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Bauphysik /  
Energetische Gebäudeoptimierung, TU Kaiserslautern

## **Eidesstattliche Erklärung**

**Tobias Blum, Kaiserslautern**

Hiermit erkläre ich an Eides statt,

- dass ich die eingereichte Dissertation selbständig verfasst und alle von mir für die Arbeit benutzten Hilfsmittel in dieser angegeben sowie die Anteile etwa beteiligter Mitarbeiter sowie anderer Autoren klar gekennzeichnet,
- dass ich die Dissertation oder Teile hiervon nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht und
- dass ich die gleiche oder eine andere Abhandlung nicht bei einem anderen Fachbereich oder einer anderen Universität als Dissertation eingereicht habe.

Ich erkläre an Eides statt, dass meine Angaben der Wahrheit entsprechen und ich diese nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe.

Kaiserslautern, den 20.10.2022

Tobias Blum



Neue nachhaltige und dezentrale Energiesysteme können einen großen Beitrag bei der Einsparung von Energie sowie für die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudesektors leisten. Bei der Entwicklung dieser Systeme ist eine ganzheitliche Betrachtung ihrer wesentlichen Auswirkungen und Einflussfaktoren essenziell. In dieser Arbeit wurde ein neuartiges, auf Peltier-Elementen basierendes Heiz- und Kühlsystem untersucht und ganzheitlich bewertet.

Peltier-Elemente sind kleine thermoelektrische Wandler und sollten, installiert in der Außenwand eines Gebäudes, als dezentrale Wärmepumpen fungieren. Die Bewertung des Gesamtsystems war durch eine Kombination aus experimentellen Untersuchungen und thermischen Simulationen möglich. Die experimentellen Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente und wurden später zu Versuchen an einem Prototyp erweitert, der sowohl im Labor als auch im Freilandversuch analysiert wurde.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Untersuchungen wurden thermische Bauteilsimulationen in TRISCO und VOLTRA sowie thermische Gebäudesimulationen in TRNSYS durchgeführt. Anhand der Freilandversuche und der Gebäudesimulationen konnte das entwickelte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem abschließend energetisch bewertet werden. Mit einem durchschnittlichen jährlichen System-COP von 0,96 bis 1,02 erwies sich das erforschte System als nicht ausreichend effizient. Vor allem im direkten Vergleich mit einem auf einer Wärmepumpe basierenden Referenzsystem zeigte sich, dass das untersuchte Peltier-System beim derzeitigen Stand der Technik keine zukunftsfähige Technologie ist.

---

Rheinland-Pfälzische  
Technische Universität  
Kaiserslautern-Landau

Fachgebiet Bauphysik  
Energetische Gebäudeoptimierung  
Paul-Ehrlich-Straße 29  
67663 Kaiserslautern  
+49 631 205 - 5470

---