



Schlussbericht der Mahle International GmbH

Im Rahmen des BMBF Förderprojekts FZ: 16N11862

Verbundprojekt E-Generation:

**Schlüsseltechnologien für die nächste Generation von
Elektrofahrzeugen**

Teilprojekt 5: Klimatisierung

Entwicklung einer Thermoelektrischen Wärmepumpe

(Laufzeit: 01.01.2012 – 31.12.12.2014, kostenneutral verlängert bis 31.03.2015)

Autor: **Christian Heneka**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16N11862 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title Verbundprojekt E-Generation: "Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge", subproject 5 "climatization": thermoelectric heat pump		
4. author(s) (family name, first name(s)) Heneka, Christian	5. end of project 31.03.2015	
	6. publication date 01.12.2015	
	7. form of publication Dissertation	
8. performing organization(s) name, address MAHLE Behr GmbH & Co. KG Mausenstr. 3 D-70469 Stuttgart	9. originators report no.	
	10. reference no. 16N11862	
	11. no. of pages 47	
12. sponsoring agency (name, address) BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) Kapelle-Ufer 1 D-10117 Berlin	13. no. of references 0	
	14. no. of tables 7	
	15. no. of figures 32	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract <p>A big disadvantage of actual electrical vehicles is - besides of the high costs of the energy storage system - the electrical driving. It is further decreased in heating mode due to the energie necessary for the cabin heating.</p> <p>A possibility for a efficient heating system is the use of a thermoelectric heat pump. The heat pump can use existing waste heat on a low tempertur level, pump it to a higher temperature level to be able to use it for heat up the air streaming into the cabin.</p> <p>Within this subproject such a thermoelectric heat pump is developed and manufactured for the integration into the test vehicles.</p> <p>In the first phase of the project - the concept phase - a model of a thermoelectric heat pump is developed in simulation tools to be able to simulate the effect of different influencing factors and boundary conditions on the efficiency and heating power. The results of the simulations are included into the next phase - the design phase - where first prototypes for the test bench, and after a successful validation further prototypes for the test vehicles are designed.</p> <p>First measurements results on the test bench showed a remarkable benefit of the thermoelectric heat pump system compared to a conventional heating system, especially in a range of ambient temperatures between -5°C and +5°C. It can be showed, that the coolant temperatur on the cold side of the TEHP has a big influence on the pumped heat - that means the saved electrical power. In some operating points a decrease of the elctrical drivning range reduction of up to 30% seems to be possible. These results could be confirmed by test vehicle test in the climate chamber as well as on real vehicle road tests.</p>		
19. keywords thermoelectric heat pump, peltier elements, electrical vehicle, efficient cabin heating,		
20. publisher	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 307353-14

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Verbundprojekt E-Generation: Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge Teilprojekt 5.2: Thermoelektrische Wärmepumpe		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Heneka, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2015	
	6. Veröffentlichungsdatum 01.12.2015	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Mahle International GmbH Mausenstr. 3 D-70469 Stuttgart	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 16N11862	
	11. Seitenzahl 47	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) Kapelle-Ufer 1 D-10117 Berlin	13. Literaturangaben 0	
	14. Tabellen 7	
	15. Abbildungen 32	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung <p>Ein großer Nachteil momentan verfügbarer rein elektrisch betriebener Fahrzeuge ist – neben den durch den Energieträger verursachten hohen Kosten – die geringe Reichweite. Diese wird im Heizbetrieb bei niedrigen Außentemperaturen durch die meist elektrische betriebene Kabinen-Heizung weiter verringert. Eine Möglichkeit, die Heizfunktion effizient zu gestalten, stellt die Nutzung einer thermoelektrischen Wärmepumpe dar, die vorhandene Abwärmen auf tiefem Temperaturniveau nutzt und auf eine höheres Temperaturniveau pumpt, um damit die Kabinenzuluft zu erwärmen.</p> <p>In dem vorliegenden Bericht zugrunde liegenden Teilprojekt wurde solch eine thermoelektrische Wärmepumpe aufgebaut und für die Integration in die Versuchsfahrzeuge zur Verfügung gestellt.</p> <p>In der vorher gehenden Auslegungsphase wurden dazu Modelle der thermoelektrischen Wärmepumpe in verschiedene Simulations-Tools entwickelt und integriert und alle relevanten Einflussparameter hinsichtlich Leistung und Effizienz bewertet. Die Ergebnisse der Simulationen wurden beim Aufbau der Prototypen für den Prüfstand bzw. für die Versuchsfahrzeuge einbezogen. Erste Messergebnisse mit dem Prüfstand-Prototyp zeigen, dass v.a. im Temperatur-Bereich zwischen -5°C und 5°C ein erheblicher Benefit gegenüber konventionellen Systemen erreicht werden kann. Die pumpbare Wärmemenge, d.h. die eingesparte elektr. Leistung, ist umso größer, je höher die Vorlauftemperatur auf der kalten Seite der TEWP ist. Eine Verringerung der Reichweitenreduktion in einigen Betriebspunkten um mehr als 30% scheint möglich.</p> <p>Diese Ergebnisse konnten in Fahrzeug-Tests sowohl in der Klimakammer als auch in der realen Straßen-Erprobung bestätigt werden.</p>		
19. Schlagwörter Thermoelektrische Wärmepumpe (TEWP), Peltierelemente, Elektrofahrzeug, effiziente Heizung		
20. Verlag	21. Preis	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 306985-14

Inhaltsverzeichnis

Document control sheet.....	2
Berichtsblatt	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	6
Kurzzusammenfassung.....	7
I Zielsetzung des Teilvorhabens.....	8
1 Aufgabenstellung	8
2 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde.....	8
3 Bekannte Konstruktionen und Verfahren	9
4 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
II Technischer Bericht.....	11
1 Motivation.....	11
2 Zielsetzung.....	12
3 Konzeptphase	13
3.1 Topologievergleich.....	13
3.2 Wasserseitige thermoelektrische Wärmepumpe.....	14
3.2.1 Gewicht/Bauraum.....	15
3.2.2 Anbindung an KM-Kreisläufe (Randbedingungen kalte Seite)	15
3.2.3 Thermodynamische Randbedingungen.....	16
3.2.4 Elektrische Randbedingungen.....	17
4 Auslegung / Simulation.....	19
4.1 Grundsätzlicher Aufbau Thermoelektrischer Wärmeübertrager	19
4.2 Modellierung der thermoelektrischen Wärmepumpe.....	20
4.2.1 Optimierung der therm. Anbindung.....	23
4.2.2 Optimierung der Anzahl/der Verteilung der Peltierelemente	23
5 Design/Konstruktion	25
5.1 Aufbau Wärmeübertrager-Block	25
5.2 Elektrische Anbindung der Peltierelemente	25
5.3 Gesamtkomponente.....	26



6	Messungen.....	29
6.1	Stationäre Prüfstandmessungen	29
6.1.1	Vorversuche/Einstellung der Randbedingungen.....	30
6.1.2	Messergebnisse	32
6.2	Messung der Steuerelektronik.....	38
6.3	Messungen im Klimawindkanal	41
6.4	Wintererprobung	45
7	Zusammenfassung/ Fazit	47

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: mögliche Integration der TEWP in die Fahrzeug-Infrastruktur: Grundsätzliche Möglichkeiten	13
Abb. 2: Topologie der Kühlmittelkreisläufe im Versuchsfahrzeug (Porsche AG)	15
Abb. 3: Grundsätzlicher Aufbau TEWP	19
Abb. 4: schematischer Temperaturverlauf innerhalb einer TEWP	20
Abb. 5: Modellierung der TEWP	21
Abb. 6: schematischer Verlauf Leistung/Arbeitszahl in Abhängigkeit der Stromstärke	22
Abb. 7: Abhängigkeit des COPs von therm. Randbedingungen - Simulationsergebnisse	24
Abb. 8: Wärmeübertrager-Block der TEWP (CAD)	25
Abb. 9: elektr. Verschaltung der Peltierelemente (CAD)	26
Abb. 10: Frontansicht Gesamtkomponente (CAD)	27
Abb. 11: Relevante Abmaße TEWP	28
Abb. 12: schematischer Aufbau Prüfstand	29
Abb. 13: Prototyp 1 für Einbau in stationären Prüfstand	30
Abb. 14: Diskrepanz zwischen Lufttemperatur vor HVAC und vor Heizkörper	31
Abb. 15: Homogenität der Luft am Ein- bzw. Austritt des Heizkörpers	31
Abb. 16: Einfluss der Umgebungstemperatur auf Leistungen/COP bei Vorlauftemperatur kalte Seite TEWP von 10°C	33
Abb. 17: Einfluss der KM-Vorlauftemperatur (kalte Seite) auf Leistungen/COP bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen	34
Abb. 18: Abhängigkeit der Bypass-Anteils von der Mischklappenstellung	35
Abb. 19: Einfluss MK-Stellung auf Vorlauftemperatur kalte Seite TEWP	36
Abb. 20: Einfluss der MK-Stellung auf Arbeitszahl	36
Abb. 21: Einfluss der MK-Stellung auf Temperaturverlauf am Austritt der Düsen bei Sprung der MK-Stellung auf 100%	37
Abb. 22: Einfluss der KM-Vorlauftemperatur (kalte Seite) auf Leistungen/COP bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (MK-Stellung = 92%)	38
Abb. 23: Ersatz-Prüfstand zur Messung der Elektronik	39
Abb. 24: Verlustleistung und Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Leistungsstufe	40
Abb. 25: Infrarotmessung der Platine in Abhängigkeit von KM-Temperatur und Leistungsstufe	41
Abb. 26: Verlauf der Temperaturen vor/nach der TEWP auf der kalten Seite (MT) bzw. der warmen Seite (HWT) bei $T_{Umg} = -5^{\circ}C$	42
Abb. 27: elektr. Anschlussleistung von HV-PTC und TEWP bei $T_{Umg} = -5^{\circ}C$	43
Abb. 28: Verlauf der Temperaturen vor/nach der TEWP auf der kalten Seite (MT) bzw. der warmen Seite (HWT) bei $T_{Umg} = -5^{\circ}C$	44
Abb. 29: elektr. Anschlussleistung von HV-PTC und TEWP bei $T_{Umg} = 15^{\circ}C$	44
Abb. 30: Versuchsfahrzeuge im Wintererprobung	45
Abb. 31: Fahr- und Temperaturprofil der ausgewerteten Testfahrten	46
Abb. 32: Verlauf der gepumpten Leistung der TEWP (links) und der Arbeitszahl (rechts)	46

Kurzzusammenfassung

Ein großer Nachteil momentan verfügbarer rein elektrisch betriebener Fahrzeuge ist – neben den durch den Energieträger verursachten hohen Kosten – die geringe Reichweite. Diese wird im Heizbetrieb bei niedrigen Außentemperaturen durch die meist elektrische betriebene Kabinen-Heizung weiter verringert. Eine Möglichkeit, die Heizfunktion effizient zu gestalten, stellt die Nutzung einer thermoelektrischen Wärmepumpe dar, die vorhandene Abwärmen auf tiefem Temperaturniveau nutzt und auf ein höheres Temperaturniveau pumpt, um damit die Kabinenzuluft zu erwärmen.

In dem vorliegenden Bericht zugrunde liegenden Teilprojekt wurde solche eine thermoelektrische Wärmepumpe aufgebaut und für die Integration in die Versuchsfahrzeuge zur Verfügung gestellt.

In der vorher gehenden Auslegungsphase wurden dazu Modelle der thermoelektrischen Wärmepumpe in verschiedene Simulations-Tools entwickelt und integriert und alle relevanten Einflussparameter hinsichtlich Leistung und Effizienz bewertet. Die Ergebnisse der Simulationen wurden beim Aufbau der Prototypen für den Prüfstand bzw. für die Versuchsfahrzeuge einbezogen.

Erste Messergebnisse mit dem Prüfstand-Prototyp zeigen, dass v.a. im Temperatur-Bereich zwischen -5°C und 5°C ein erheblicher Benefiz gegenüber konventionellen Systemen erreicht werden kann. Die pumpbare Wärmemenge, d.h. die eingesparte elektr. Leistung, ist umso größer, je höher die Vorlauftemperatur auf der kalten Seite der TEWP ist. Eine Verringerung der Reichweitenreduktion in einigen Betriebspunkten um mehr als 30% scheint möglich.

Diese Ergebnisse konnten in Fahrzeug-Tests sowohl in der Klimakammer als auch in der realen Straßen-Erprobung bestätigt werden.

I Zielsetzung des Teilvorhabens

1 Aufgabenstellung

Die Kernpunkte der Förderbekanntmachung „STROM“ des BMBF sind im Wesentlichen: Klimaschutz und Energieversorgung; strategische Bedeutung von zukunftsfähiger Mobilität; Verzicht auf fossile Brennstoffe; Elektromobilität als Schlüsseltechnologie; Deutschland als Leitmarkt für Elektromobilität; neue Innovationspartnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft.

Das Schlüsselprojekt E-Generation deckt mit seinen Beiträgen zur Erreichung von Kundentauglichkeit des E-Autos und damit der Marktfähigkeit alle diese Ziele ab.

Ein entscheidender Schritt zur Realisierung von alltagstauglichen Elektrofahrzeugen ist ein ganzheitliches Konzept zum energieeffizienten Heizen und Kühlen des Innenraums und der Hochvoltbatterie. Bei aktuellen Konzepten wird durch den Betrieb der Klimaanlage bzw. der Heizung die elektrische Reichweite um bis zu 40% reduziert. Zur Entwicklung alltagstauglicher elektrischer Fahrzeuge ist demnach eine deutliche Reduktion der Energieaufnahme des Klimasystems (Heizen und Kühlen) notwendig. Durch den Einsatz einer passiven Bedarfsreduktion der Kühl- und Heizleistung (z.B. durch verminderte Aufheizung/Auskühlung des Fahrzeugs im Stand), deren Auswirkung auf die Reduzierung des Heiz – und kühlbedarfs im Rahmen dieses Teilvorhabens simuliert wird und die Untersuchung einer thermoelektrischen Wärmepumpe kann die Energieaufnahme des Klimatisierungssystems deutlich reduziert werden.

Eine weitere Herausforderung besteht in den unterschiedlichen Anforderungen verschiedener elektrischer Antriebstechnologien und Nutzungsszenarien an das Klimatisierungssystem. Um die verschiedenen Konfigurationen sowohl technisch als auch wirtschaftlich optimal umzusetzen sind Technologien und Strategien zur Modularisierung und Standardisierung des Klimatisierungssystems notwendig.

2 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Aktuell wird die Wärme zur Heizung des Innenraums durch PTC erreicht. Dabei wird elektrische Energie direkt in Wärmeenergie umgewandelt. Bei luftseitigen PTC-Heizern erreicht man dabei einen Wirkungsgrad von fast 1, bei wasserseitigen PTC hat man zusätzliche Verluste, so dass der Wirkungsgrad weit unter 1 sinkt. Damit sinkt die Reichweite eines Elektrofahrzeugs bei tiefen Temperaturen stark ab, denn für den Vortrieb und das Heizen wird fast die gleiche Energiemenge benötigt. Wärmepumpen können den Wirkungsgrad steigern und durch die Nutzung existierender Wärmequellen kann der Energiebedarf des Klimatisierungssystems

reduziert werden. Die hier genannten Werte gelten beispielhaft und hängen vom Fahrzyklus und anderen Randbedingungen ab.

Heute aktuell bereits verfügbare Wärmepumpen basieren auf einem Kältekreislauf. Dabei wird Wärme von einer Quelle (z.B. Batterieabwärme, Außenluft o.ä.) auf ein höheres Temperaturniveau gepumpt. Ein Wärmeübertrager (im Bild als „WP-Heizer“ bezeichnet) erwärmt dann die Kabinenluft. Ein Nachteil ist aber die stark erhöhte Komplexität des Kältekreislaufs inkl. zusätzlicher Kältemittelventile, Wärmepumpen-Verdampfer, Regelungen etc.

3 Bekannte Konstruktionen und Verfahren

Der Aufbau von Wärmeübertragern gehört seit Gründung der Firma BEHR vor über 100 Jahren zu deren Kernkompetenz. Die dabei eingesetzten Verbindungstechnologien umfassen das Löten, das Schweißen und das Kleben. Auch das Einbringen von elektrischen Bauteilen in den Wärmeübertrager ist seit vielen Jahren eine Kernkompetenz und bereits in Form von PTC Heizkörpern im Serieneinsatz. Die Grundlagen der Verbindungstechnologie zwischen thermoelektrischem Modul und anderen Materialien werden in dem Förderprojekt des BMWi (IIC2/PT-J/ERG1) bearbeitet. Dabei greifen wir auf das Teilvorhaben „Stoffschlüssige Verbindungstechnik“ des Verbundprojektes: Energieeffiziente thermoelektrische Generatoren durch Material und Fertigungsoptimierung, HighTEG, zurück

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten im Teilprojekt 5 gliedern sich in folgende Unterprojekte:

Teilprojekt 5.1.1: Theoretische Vorarbeiten

Inhalt:

- Anforderungsdefinition an die Klimatisierung
- Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung des Klimatisierungsaufwands u.a. durch
- Simulation der Auswirkung der passiven Reduktion des kühl- und Heizbedarfs, Effizienzsteigerung und Vorkonditionierung
- Theoretische Ausarbeitung und Maßnahmenkatalog

Teilprojekt 5.1.2: Thermoelektrische Wärmepumpe

Inhalt:

- Auslegung der thermoelektrischen Wärmepumpe
- Aufbau eines (oder mehrerer) Teilelement-Funktionsmuster, um die Funktionsweise zu belegen
- Aufbau eines (oder mehrerer) Voll-Funktionsmuster Heizkörper,. Um die Funktionsweise der Gesamtkomponente zu validieren.

- Aufbau von den Funktionsmustern für die Integration in die Demonstrator-fahrzeuge, Validierung der Funktion.

Teilprojekt 5.1.3: Hardwareaufbau und Erprobung

Inhalt:

- Vorversuche zur Reduktion des Klimatisierungsaufwandes an Erprobungsträgern
- Ableitung des Gesamtkonzepts für das Fahrzeug
- Integration der thermoelektrischen Wärmepumpe
- Untersuchung der thermodynamischen Abläufe (Wärmepumpe, Wärmeflüsse, etc) in Erprobungsfahrzeugen
- Validierung der Simulation

Teilprojekt 5.2: Standardisierung und Modularisierung

Inhalt:

- Theoretische Vorarbeiten
- Anforderungsdefinition
- Ableitung der Modulgrenzen
- Definition Schnittstellen zwischen den Modulen
- Unterstützung bei der Umsetzung in das Demonstratorfahrzeug und Fahrzeugintegration

II Technischer Bericht

1 Motivation

Die im Heizbetrieb notwendigen Heizleistungen zur Bereitstellung bzw. zum Erhalt des Klimakomforts in der Fahrzeugkabine bei reinen Elektrofahrzeug – d.h. Fahrzeugen, die ausschließlich über einen oder mehrere aus der Fahrzeug-Batterie versorgten Elektromotor angetrieben werden – haben einen großen Einfluss auf die elektrische Reichweite.

Grund dafür ist, dass – im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor – keine Motorabwärme auf hohem Temperaturniveau vorliegt, mit dem ein konventioneller Heizkörper im Klimagerät betrieben werden könnte. Die zur Heizung der Kabine notwendige Energie wird heute standardmäßig durch einen elektrischen Heizer dargestellt, der elektrische Energie in Wärme umwandelt.

Der Wirkungsgrad solcher Komponenten (PTC-Heizer, Induktionsheizer) ist maximal 1, d.h. die der Batterie entnommene Leistung entspricht mindestens der notwendigen Heizleistung. Dies hat zur Folge, dass die ohnehin geringe Reichweite reiner Elektro-Fahrzeuge durch den Heizbetrieb weiter verringert wird.

Darum gilt es, ein effizientes Heizsystem für Elektro-Fahrzeuge zu entwickeln. Grundsätzlich besteht dabei die Möglichkeit, die auch beim Elektro-Fahrzeug vorhandenen Abwärmern oder Umweltwärme auf niedrigem Temperaturniveau zu nutzen. Diese müssen allerdings zur Beheizung des Innenraums auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden. In einer konventionellen (Kompressor-getriebenen) Wärmepumpe wird dazu ein Kältemittel genutzt, dass bei der Wärmeaufnahme auf niedrigem Temperaturniveau verdampft, durch einen Kompressor auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau gebracht wird, und die Wärme anschließend an die der Kabine zugeführten Luft abgibt.

Solche Systeme können teilweise Komponenten des AC-Kreislaufes nutzen, allerdings führt dies zu aufwändigen Verschaltungen des Kältemittel-Kreislaufes mit vielen Ventilen und Leitungen.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Nutzung eines Wärmeübertragers auf der Basis von Peltierelementen, einer sog. Thermoelektrischen Wärmepumpe. Peltierelemente bestehen im Kern aus unterschiedlich dotierten Halbleiterelementen, die - elektrisch in Reihe geschaltet – bei Stromdurchfluss auf einer Seite des Elements Wärme aufnehmen, und auf der gegenüberliegenden zweiten Seite auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgeben. D.h. diese thermoelektrischen Module haben den Wärmepumpeneffekt intrinsisch integriert, wodurch kein zusätzlicher Kreislauf oder kein Kompressor benötigt wird.

2 Zielsetzung

Ziel des Teilprojektes ist der Aufbau einer thermoelektrischen Wärmepumpe (TEWP) zur Beheizung des Innenraums des Projektfahrzeuges. Bei der TEWP handelt es sich um eine komplette Neuentwicklung, woraus sich folgende Aufgabenpakete ableiten lassen:

- Erarbeitung der physikalischen Grundlagen zum Thema Thermoelektrik
- Erstellung/Bewertung verschiedener Konzepte zur Beheizung des Innenraums mit thermoelektrischen Modulen (TEM)
- Aufbau eines Simulationsmodells zur Auslegung der Komponente
- Durchführung von Simulationen mit vorläufigen Randbedingungen
- Erarbeitung einer Spezifikation für Schnittstellen ins Projektfahrzeug
- Design und Konstruktion eines Prototypen für stationäre Prüfstandmessungen
- Fertigung des ersten Prototyps
- Durchführung von Messungen eines Prototyps zur Validierung der Auslegungs-Simulationen
- Optimierung des Konzepts mithilfe vom Teilprojektspartner zur Verfügung gestellter Randbedingungen
- Design und Konstruktion der Prototypen für den Einbau in die Versuchsfahrzeuge
- Fertigung und Bereitstellung der Prototypen
- Inbetriebnahme des Prototyps mit Projektpartner
- Erprobung im Klimakammer – Bewertung der Ergebnisse
- Erprobung in Straßentests

3 Konzeptphase

3.1 Topologievergleich

Wie auch eine konventionelle Wärmepumpe nutzt die Thermoelektrische Wärmepumpe im Fahrzeug vorhandene Abwärmen oder Umweltwärme. Abwärmen treten bei unterschiedlichen Komponenten im Fahrzeug auf, so z.B. an der Batterie, am Elektro-Motor, am Getriebe, am Ladegerät, oder an Leistungselektroniken. Über einen oder mehrere Kühlmittelkreisläufe kann die anfallende Wärme an die „kalte Seite“ der thermoelektrischen Wärmepumpe geführt werden. Dort wird die Wärme auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und entweder direkt an die Kabinenzuluft oder indirekt über einen weiteren Kühlmittelkreislauf mit integriertem Heizkörper an die Kabinenzuluft übertragen. D.h. die Wärme wird im ersten Fall von einem Kühlmittelkreislauf an eine Luftströmung übertragen (dementsprechend wird für die TEWP die Bezeichnung „TEWP KM-Luft“ verwendet), im zweiten Fall von einem Kühlmittelkreislauf an einen zweiten Kühlmittelkreislauf gepumpt („TEWP KM-KM“). Diese beiden zugehörigen grundsätzlichen Topologien sind Abb. 1 schematisch dargestellt. Dargestellt sind jeweils ein Niedertemperatur-Kreislauf (NT-Kreislauf, blau) und ein Hochtemperatur-Kreislauf (HT-Kreislauf, rot), die, abhängig vom vorliegenden Temperaturniveau, mittels Ventil-Schaltungen auf die kalte Seite der TEWP geschaltet werden können.

Im ersten Fall der TEWP KM-KM wird ein zusätzlicher Heizungs-Kreislauf (HWT-Kreislauf, grün) benötigt, über den die Heizleistung der TEWP an einen konventionellen Heizungswärmetauscher (HWT) und dort an die Luft übertragen wird. Dieser Kreislauf beinhaltet einen Ausgleichsbehälter, eine elektrische Kühlmittel-Pumpe, die TEWP, einen Hochvolt-PTC-Heizer sowie den Heizungswärmetauscher. Der zusätzliche PTC-Heizer deckt die Fälle ab, in denen die Heizleistung der TEWP alleine nicht ausreicht. Durch die Nutzung eines konventionellen Heizungswärmetauschers im Klimagerät zur Übertragung der Wärme an die Luft kann das Klimagerät des Fahrzeuges unverändert bleiben.

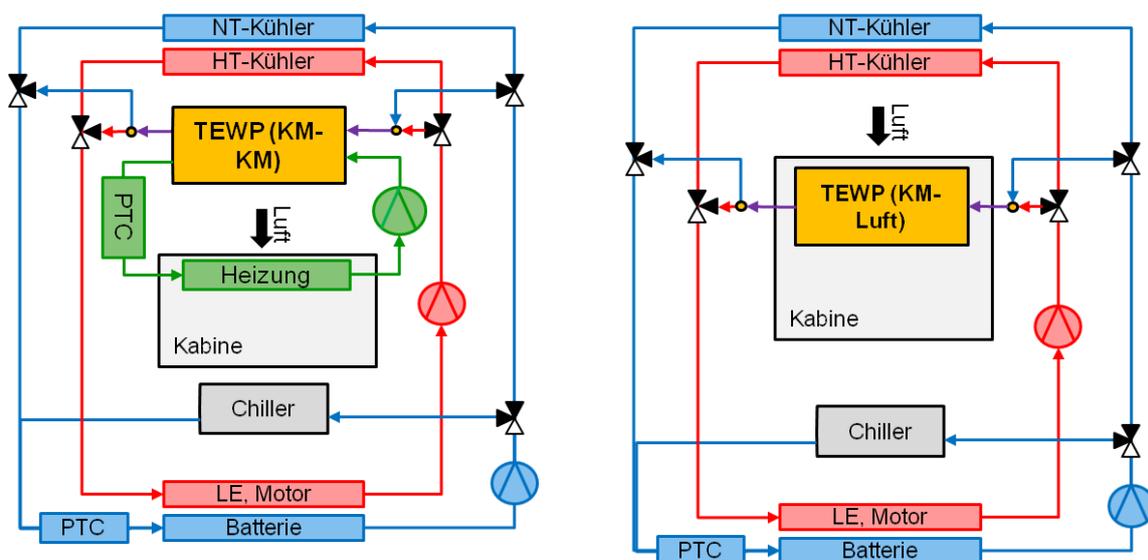


Abb. 1: mögliche Integration der TEWP in die Fahrzeug-Infrastruktur: Grundsätzliche Möglichkeiten

Typ	Thermoelektrische Wärmepumpe Wasser-Wasser (TEWP W/W)	Thermoelektrische Wärmepumpe Wasser-Luft (TEWP W/L)
Konzept	Wärme wird aus Kühlkreisläufen (E-Motor, LE, Batterie, ...) in HWT-Kreislauf gepumpt und über Standard-HWT im HVAC an Luft und Kabine übertragen	Wärme wird aus Kühlkreisläufen direkt im HVAC an Luft und Kabine übertragen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> HVAC kann unverändert bleiben 	<ul style="list-style-type: none"> Direkte Wärmeübertragung → guter Wirkungsgrad Hoch dynamisches Ansprechverhalten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzlicher KM-Kreislauf (→ Systemkosten) 	<ul style="list-style-type: none"> Restriktiver Bauraum (HVAC) → hohe Leistungsdichte erforderlich Kriterien für HVAC zu erfüllen Verblockung im HVAC → Druckverlust

Tab. 1: Konzeptvergleich wasserseitige TEWP – luftseitige TEWP

Im zweiten Fall muss die Thermoelektrische Wärmepumpe (KM-Luft) ins Klimagerät integriert werdend. Somit muss die gesamte Heizleistung über die TEWP an die Luft übertragen werden, d.h. die Leistungsdichte der TEWP muss für die Extremfälle (bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen) entsprechend hoch sein. Durch die notwendige Integration der thermoelektrischen Komponente ins Klimagerät sind vielschichtige Restriktionen zu beachten, u.a. hinsichtlich des verfügbaren Bauraums, des luftseitige Druckverlusts, und Sicherheitsaspekte.

Die Vor- und Nachteile der beiden beschriebenen Topologien sind in Tabelle **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Dem v.a. aus thermodynamischer Sicht größten Vorteil der direkten Wärmeübertragung bei der luftseitigen Variante steht der Nachteil der Notwendigkeit der Integration der neuen Komponente ins Klimagerät gegenüber. Letzteres würde einen erheblichen Eingriff in die Luftführung im Klimagerät darstellen und damit eine Anpassung des Klimagerätes sowie möglicherweise des Gebläses notwendig machen, was im Rahmen des aktuellen Projektes nicht darstellbar ist.

Aus diesem Grund wurde im weiteren Verlauf des Projektes die Entwicklung der wasserseitigen Variante weiter verfolgt.

3.2 Wasserseitige thermoelektrische Wärmepumpe

Bei der Auslegung und dem Design der wasserseitigen thermoelektrischen Wärmepumpe sind zahlreiche Randbedingungen zu beachten. Das Zusammenwirken dieser untersch. Randbedingungen beeinflusst maßgeblich die Gestaltung der Komponente.

3.2.1 Gewicht/Bauraum

Grundsätzlich ist im Automobilbereich jede Komponente hinsichtlich eines geringen Gewichtes bzw. eines geringes Bauraums zu entwickeln. Im Versuchsfahrzeug wurde der Bauraum im Vorderwagen hinter der vorderen Schottwand festgelegt. An dieser Schottwand muss die Thermoelektrische Wärmepumpe vibrationsarm befestigt werden.

3.2.2 Anbindung an KM-Kreisläufe (Randbedingungen kalte Seite)

In Abb. 2 sind alle im Versuchsfahrzeug realisierten Kreisläufe, die für die Klimatisierung der Kabine bzw. für die Kühlung der unterschiedlichen Komponenten notwendig sind, dargestellt.

Gelb dargestellt ist dabei der Mittel-Temperatur-Kreislauf (MT), der zur Kühlung der beiden Elektro-Motoren und der zugehörigen Leistungselektroniken dient. Die beiden Zweige des Kreislaufes sind dabei parallel geschaltet und können über ein Ventil zu- oder abgeschaltet werden. Die Abwärme der E-Motoren und Leistungselektroniken wird entweder im Heizfall durch entsprechende Ventilschaltung im Ventilblock an die kalte Seite der TEWP geführt und dort abgegeben, oder – bei keinem Heizbedarf - über die im Fahrzeug-Frontmodul befindlichen Kühler (MT-Kühler) an die Umgebung abgegeben.

Hellblau dargestellt ist der Kühlkreislauf für Batterie und Ladegerät. Die entsprechenden Abwärmen können entsprechend über den Ventilblock an die kalte Seite der TEWP abgegeben werden, oder bei hohen Außentemperaturen über einen Chiller an den Klimakreislauf (dunkelblau dargestellt) übertragen werden. In rot dargestellt ist der für die Heizung der Kabine zuständige Heizungs-Kreislauf. Wärme wird durch die TEWP und/oder den PTC bereitgestellt und über einen konventionellen Heizungswärmetauscher (HWT) im Klimagerät an die Luft übertragen.

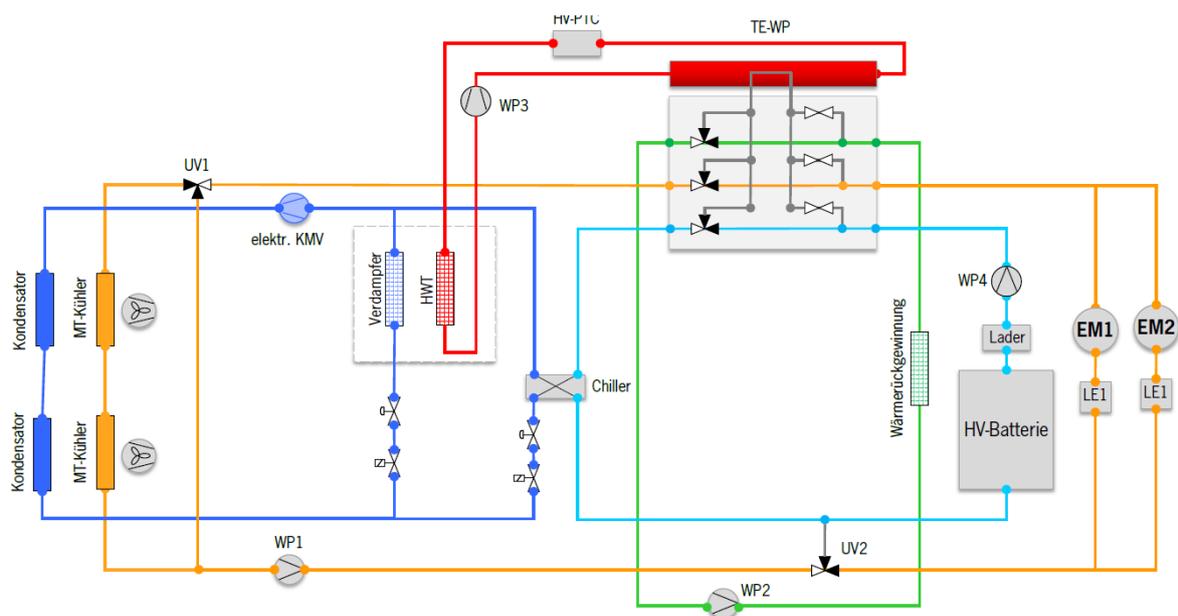


Abb. 2: Topologie der Kühlmittelkreisläufe im Versuchsfahrzeug (Porsche AG)

Um sowohl die im Betrieb des Versuchsfahrzeugs auftretenden Abwärmen der beiden Elektromotoren, der Leistungselektroniken und der Batterie bzw. des Ladegeräts nutzen zu können, wurde ein Ventilblock entwickelt, der beide Kühlmittelkreisläufe auf die kalte Seite der Thermoelektrischen Wärmepumpe schalten kann. Entscheidend für die Schaltung der Ventile ist das Temperaturniveau des Kühlmittels vor den jeweiligen Ventilen.

Für die thermodynamische Auslegung der thermoelektrischen Wärmepumpe ist die Vorlauftemperatur auf der kalten Seite mit entscheidend. Da diese stark abhängig ist vom Fahrprofil wie vom Wirkungsgrad der unterschiedlichen Komponenten und beim Versuchsfahrzeug a priori nicht bekannt ist, müssen Annahmen getroffen werden und die entsprechenden Parameter in der Auslegungsphase über mögliche Wertebereiche variiert werden.

3.2.3 Thermodynamische Randbedingungen

Zur Erfüllung des thermischen Komforts in der Kabine im Heizfall sind gewisse Randbedingungen zu erfüllen. Grundsätzlich gilt der Zusammenhang: mit sinkender Umgebungstemperatur steigt einerseits die notwendige Heizleistung, andererseits auch die Eintrittstemperatur der Luft in die Kabine (am Luftdüsenaustritt). Dies ist für die warme Seite der TEWP ein entscheidender Einflussfaktor, da die notwendige Temperatur am Düsenaustritt direkt das Temperaturniveau im HWT-Kreislauf beeinflusst. Je höher dieses Temperaturniveau, desto höher die Temperatur-Differenz über die zwischen kalter und warmer Seite der TEWP, wodurch der Wirkungsgrad der TEWP absinkt.

Nachfolgende Tabellen geben die notwendigen Heizleistungen, Luft-Massenströme und Luftaustrittstemperaturen bei 4 signifikanten Umgebungstemperaturen im stationären bzw. im heat-up wieder. Diese wurden in Messung am Serienfahrzeug mit Verbrennungsmotor ermittelt und vom Projektpartner (Porsche AG) als Ziel-Randbedingungen zur Verfügung gestellt.

Außentemperatur	- 20°C	- 10°C	0°C	+10°C
Heizleistung am HWT	4,8 kW	3,5 kW	2,1 kW	1,4 kW
Lufttemperatur nach HWT	45°C	40°C	30°C	25°C
Lufttemperatur vor HWT	-12°C	-5°C	0°C	+3°C (Reheat-Betrieb)
Luftvolumenstrom	300 kg/h	275 kg/h	250 kg/h	220 kg/h

Tab. 2: luftseitige Randbedingungen für Heizung der Kabine – stationärer Betrieb (Porsche AG)

Außentemperatur	- 20°C	- 10°C	0°C	+10°C
Heizleistung am HWT	6,5 kW	4,0 kW	2,7 kW	2,0 kW
Lufttemperatur nach HWT	50°C	40°C	35°C	30°C
Lufttemperatur vor HWT	-20°C	-10°C	0°C	+3°C (Reheat-Betrieb)
Luftvolumenstrom	310 kg/h	280 kg/h	275 kg/h	260 kg/h

Tab. 3: luftseitige Randbedingungen für Heizung der Kabine – heat-up (Porsche AG)

Der Unterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der Lufttemperatur vor HWT im stationären Betrieb resultiert aus der Aufheizung der Luft durch den Motorraum und das Klimagerät.

3.2.4 Elektrische Randbedingungen

In den Versuchsfahrzeugen stehen als Spannungsversorgung für die Thermoelektrische Wärmepumpe grundsätzlich das 12V-Boardnetz sowie das Hochvolt-System zur Verfügung. Im 12V-Netz ist die elektr. Leistung, die dem System entnommen werden darf, auf ca. 2,5kW begrenzt. Auch die sehr hohen Stromstärken von ca. 200A bei 2,5kW elektrischer Leistung stellen eine erhebliche Herausforderung bei der Auswahl geeigneter Komponenten für die Steuerelektronik dar. Bei der Anbindung an das Hochvolt-System (Spannungen größer 300kW) beträgt die Stromstärke bei 2,5kW elektrischer Leistung lediglich ca. 10A. Dieser Wert ist, was die Stromstärke angeht, unproblematisch, allerdings sind die Schutzmaßnahmen und die Anforderungen an Hochvolt-Systeme ungleich aufwändiger verglichen mit Niederspannungs-Systemen.

Aus diesem Grund ist die Thermoelektrische Wärmepumpe für die Anbindung ans 12V-Boardnetz mit einer maximalen elektrischen Leistung von 2,5 konzipiert.

Ein großer Vorteil einer TEWP ist die Möglichkeit der stufenlosen Regelung der Komponente. Durch Änderung der Versorgungsspannung (und der damit eintretenden Änderung der Stromstärke der Peltierelemente) kann die Heizleistung der TEWP hochdynamisch reguliert werden. Die Heizanforderung an die TEWP wird dabei vom Klimasteuergerät über den LIN-Bus an die Steuerelektronik der TEWP übergeben.



Folgende Vorgaben hinsichtlich der Steuerelektronik waren zu beachten:

- stufenlose Leistungsregelung
- Anbindung an 12V-Netz
- keine Beeinflussung des 12V-Netzes (Rückkopplung)
- Ansteuerung über LIN-Bus mit Vorgabe Heizleistung
- Diagnose-Signale wie Stromstärke, Spannung, Leistung
- Sicherheitsfunktionen (Überspannung, Überstrom, Übertemperaturschutz)

4 Auslegung / Simulation

Zur Auslegung des Systems bedarf es einer geeigneten Simulationssoftware mit der Möglichkeit der Modellierung einer Thermoelektrischen Wärmepumpe. Im Verlauf des Projektes wurden dabei zwei unterschiedliche Tools benutzt.

In der frühen Phase wurden die grundsätzlichen Zusammenhänge des Peltier-Effekts und die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Thermoelektrische Wärmepumpe mit Matlab Simulink entwickelt.

Für stationäre und instationäre Simulationen von Kreisläufen, Wärmeübertrager-Komponenten steht intern die Software BISS zur Verfügung. Darin besteht die Möglichkeit, alle im Fahrzeug vorhandenen Kreisläufe und Komponenten zu simulieren. Die für die Simulation der Thermoelektrischen Wärmepumpe notwendigen physikalischen Zusammenhänge wurden darin integriert.

4.1 Grundsätzlicher Aufbau Thermoelektrischer Wärmeübertrager

Ein thermoelektrischer Wärmeübertrager als Wärmepumpe zwischen zwei Kühlmittel-Kreisläufen beinhaltet zwangsläufig zwei Fluidströmungen und mehrere – mit einer geeigneten Kontaktierung versehenen – dazwischenliegende Peltierelemente. Grundsätzlich besteht ein solcher Wärmeübertrager aus einem ersten Kühlmittelrohr (für das kalte Fluid), ein daran in irgendeiner Form angebundenes Peltierelement sowie einem zweiten Kühlmittelrohr (für das heiße Fluid). Dies gilt es geeignet zu modellieren, wobei der komplette Wärmeübertragungspfad abgebildet und modelliert werden muss.

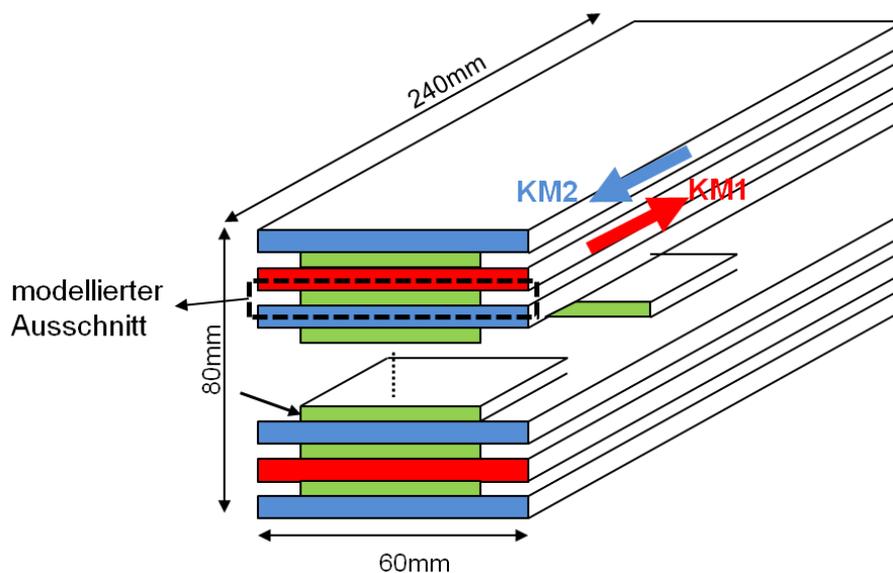


Abb. 3: Grundsätzlicher Aufbau TEWP

Darin enthalten ist der Wärmeübergang zwischen Fluid und Strömungsführung (z.B. Turbulenzstrukturen oder Wand), die Wärmeleitung über die thermische Anbindungsschicht zum Peltierelement, der Wärmepump-Effekt des Peltierelements selbst, sowie die entsprechende Wärmeübertragung auf das zweite Fluid. Der schematische Aufbau eines solchen grundlegenden Ausschnitts ist in Abb. 3 gezeigt.

Abb. 4 zeigt schematisch den Temperaturverlauf, der sich entlang des Wärmepfades darstellt. Die Temperatur sinkt vom Fluid auf der kalten Seite ($T_{\text{Fluid}2}$) zur Wand des Kühlmittelrohres ab, reduziert sich durch die Wärmeleitung durch die verschiedenen Schichten bis zur Unterseite der Halbleiterelemente (BiTe-Schenkel) weiter (Temperatur T_k), wird dort durch den Wärmepumpen-Effekt des Peltierelements auf die Temperatur T_h erhöht und fällt hin zum Fluid der heißen Seite wieder auf $T_{\text{Fluid}1}$ ab. D.h. die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der thermoelektrischen (BiTe-) Schicht ist größer als die nutzbare Temperaturdifferenz zwischen warmen und kaltem Fluid.

4.2 Modellierung der thermoelektrischen Wärmepumpe

Für die Berechnung dieses Wärmepfades ist kein analytischer Ansatz möglich. Deshalb muss dazu eine iterative Berechnung programmiert werden. Ein entsprechendes Modell wurde dazu in Matlab/Simulink aufgebaut, in dem die jeweiligen physikalischen Modelle programmiert wurden.

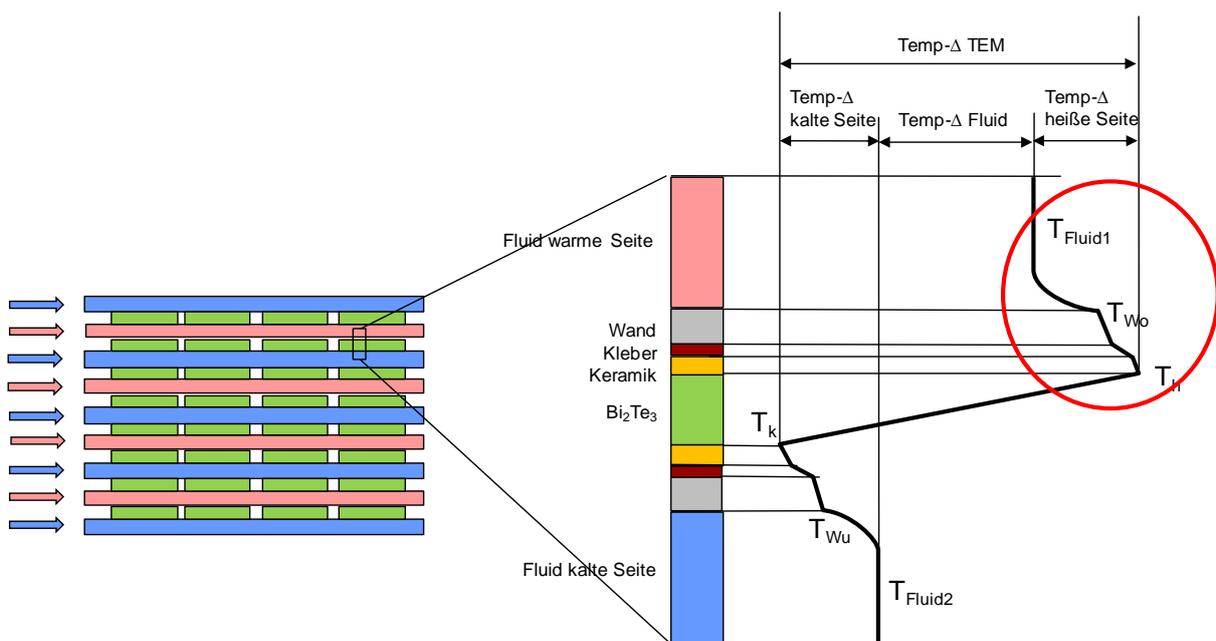


Abb. 4: schematischer Temperaturverlauf innerhalb einer TEWP

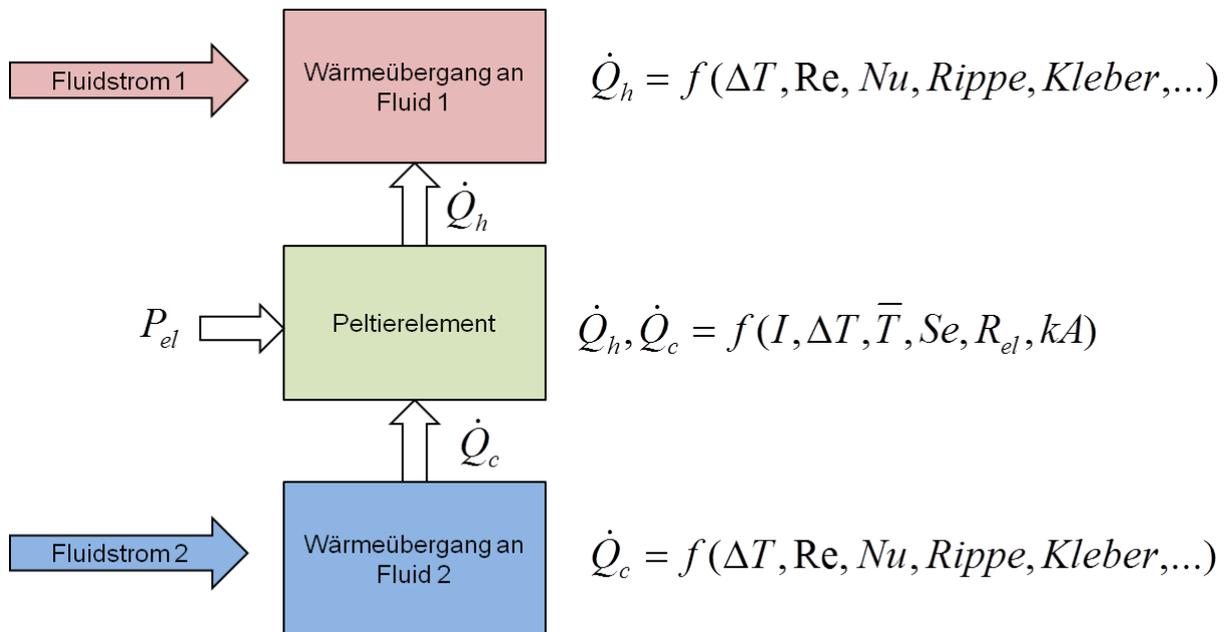


Abb. 5: Modellierung der TEWP

Zur Berechnung der Wärmeströme Q_h bzw. Q_c jeweils zwischen Fluid und Festkörper (Turbulenzstrukturen bzw. Wand) werden Wärmeübertragungsfunktionen benötigt. Diese können entsprechend Gleichung $Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Pr^{C_3}$

Gl. 1 durch geeignete Nusselt-Korrelationen bereitgestellt werden, deren Koeffizienten C_i aus Mahle-intern Messdaten der entsprechenden Komponenten entwickelt werden.

$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Pr^{C_3} \quad \text{Gl. 1}$$

Die sich bei der Bestromung des Peltierelements einstellenden Wärmeströme auf der kalten (Q_c) und heißen Seite (Q_h) des Peltierelements sowie die dafür notwendige elektrische Leistung (P_{el}) kann durch folgende analytische Gleichungen berechnet werden:

$$Q_h = Se \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot R_{el} \cdot I^2 - k \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q_c = Se \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot R_{el} \cdot I^2 - k \cdot A \cdot \Delta T$$

$$P_{el} = Se \cdot I \cdot \Delta T + R_{el} \cdot I^2$$

$$COP_h = \frac{Q_h}{P_{el}}$$

Gl. 2

Darin ist Se der Seebeck-Koeffizient, I die elektrische Stromstärke, R_{el} der elektrische Widerstand der Peltierelemente und kA die Wärmeleitung durch das Element. Diese für die Berechnung der Leistungen notwendigen physikalischen Parameter der Peltierelemente wurden im Vorfeld an einem Grundlagenprüfstand ermittelt. Dazu wurden einzelne Peltierelemente auf der einen Seite (kalte Seite) geeignet an eine Wärmequelle, auf der anderen Seite (warme Seite) an eine Wärmesenke angebunden.

Typische Verläufe der Leistungen und der Arbeitszahl abhängig von der Stromstärke I gemäß der Gleichungen 2 sind schematisch in Abb. 6 dargestellt für eine konstante Temperatur-Differenz zwischen kalter Seite T_c und heißer Seite T_h .

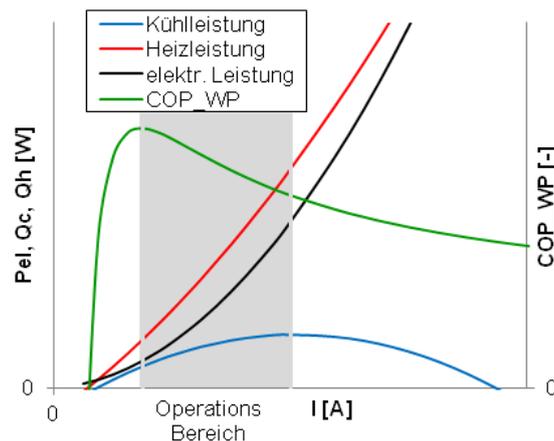


Abb. 6: schematischer Verlauf Leistung/Arbeitszahl in Abhängigkeit der Stromstärke

Mit steigender Stromstärke steigen die Heizleistung Q_h und die elektrische Leistung quadratisch an. Die gepumpte Leistung Q_c hat demgegenüber abhängig von den Parametern ein Maximum bei mittlerer Stromstärke. Die Arbeitszahl hat bei niedriger Stromstärke ihr Maximum, wodurch sich ein sinnvoller Arbeitsbereich für Kühlanwendungen (Zielgröße Kühlleistung Q_c) zwischen diesen beiden Maxima ergibt. Für die in der vorliegenden Anwendung relevante Heizleistung

können Betriebspunkte wegen des quadratisch steigenden Verlaufs der Heizleistung auch bei wesentlich höheren Stromstärken betrieben werden.

Analog zu konventionellen Wärmepumpen sind die gepumpte Leistung und die Arbeitszahl COP_h stark abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Seite des Peltierelements. Der Wirkungsgrad von Peltierelementen hat materialbedingt Grenzen (ZT-Wert). Das bedeutet, dass, um einen möglichst großen Wirkungsgrad zu erzielen, die Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Peltierelements minimiert werden sollte. Dazu müssen die thermischen Widerstände entlang des Wärmepfades um bei gegebener Temperaturdifferenz der anliegenden Fluide die Temperaturdifferenz über das Peltierelement zu minimieren (siehe Abb. 4).

4.2.1 Optimierung der therm. Anbindung

Für die Verbesserung des Wärmeübergangs vom Fluid zur Wand werden meist Turbulenzstrukturen verwendet. Einerseits wird dadurch der Wärmeübergangskoeffizient erhöht, andererseits wird die Übertragungsfläche erhöht. Beide Parameter führen direkt zu einer Reduktion des thermischen Widerstandes. Bei Mahle gibt es eine Vielzahl verschiedener Turbulenzstrukturen, die für unterschiedliche Anwendungen hin optimiert wurden. Zusammen mit den Abmessungen des fluidführenden Rohres (Kühlmittelrohr), d.h. mit der Wahl eines Verhältnisses von Breite zu Höhe, ist dies ein wichtiger Einfluss-Parameter. Grundsätzlich ist bei der Wahl auch der Einfluss auf den Druckverlust der Komponente zu beachten, der im Verbund mit den anderen im jeweiligen Kreislauf vorhandenen Komponenten den Druckaufbau der verwendeten Kühlmittel-Pumpe bei entsprechend notwendigem Volumenstrom nicht überschreiten darf.

Weiterhin ist die thermische Anbindung der Peltierelemente an die fluidführenden Bauteile (Kühlmittel-Rohre) entscheidend für die Effizienz des Gesamtsystems. Je geringer der thermische Widerstand und damit der Temperaturabfall dieser Zwischenschicht, desto höher ist die Gesamteffizienz des Systems. Im Vorfeld der Prototypen-Aufbauten wurden dazu Versuche an Funktionsmustern durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche, thermisch leitende Materialien mit variierenden Applikations-Parametern (Schichtdicke, Auftragungsart, ...) getestet, um für die Prototypen die optimale Anbindung auswählen zu können. Gleichzeitig muss diese thermische Schicht zwischen den verwendeten Kühlmittel-Rohren und den Peltierelementen eine gewisse Elastizität besitzen, damit die im Betrieb auftretenden thermischen Dehnung nicht auf das Peltierelement übertragen werden und dort zu einem Versagen des Bauteils führen können.

4.2.2 Optimierung der Anzahl/der Verteilung der Peltierelemente

Um den Bauraum bzw. das Gewicht der thermoelektrischen Wärmepumpe gering zu halten, sollte die Anzahl der Peltierelemente, mit der die geforderte Leistung (Tab. 2) dargestellt werden kann, minimiert werden. In den in der Auslegungsphase durchgeführten Simulationen (s.o.) wurde deutlich, dass dafür eine optimale Wahl der Anzahl und der Verteilung der Peltierelemente getroffen werden muss.

Als Ergebnis dieser Vielfalt von Simulationen konnte bei den angenommenen Randbedingungen eine minimale Anzahl von 48 Peltierelementen berechnet werden. Fluidseitig werden dabei in insgesamt 12 Schichten jeweils 4 Peltierelemente in Reihe geschaltet. Die beiden Fluidseiten werden als Gegenstrom-Wärmeübertrager betrieben.

In Abb. 7 sind Ergebnisse der Simulationen in Form der Arbeitszahl (COP_h) in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Vorlauftemperatur des Kühlmittels auf der kalten Seite der Thermoelektrischen Wärmepumpe dargestellt. Bei extremen Außentemperaturen von -20°C kann ein Wirkungsgrad größer als 1 erreicht werden, bei in häufiger auftretenden Fällen im Bereich $-5^\circ\text{C} < T_{\text{Um}} < 10^\circ\text{C}$ können Arbeitszahlen im Bereich 1.5 bis 2.5 erreicht werden, wodurch das Potential der Thermoelektrischen Wärmepumpe in diesem Bereich deutlich wird. Ausführlichere Ergebnisse finden sich dazu in Abschnitt bei den Messdaten.

COP_h [-]		KM-Vorlauftemperaturen [$^\circ\text{C}$]					
		15	20	25	30	35	40
Umgebungs- temperatur [$^\circ\text{C}$]	-20	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,41
	-10	1,27	1,34	1,42	1,50	1,59	1,69
	-5	1,38	1,47	1,57	1,69	1,82	1,97
	0	1,46	1,59	1,73	1,90	2,09	2,31
	10	1,58	1,77	2,00	2,28	2,63	3,07
	15	1,61	1,83	2,11	2,46	2,91	3,51

Abb. 7: Abhängigkeit des COPs von therm. Randbedingungen - Simulationsergebnisse

5 Design/Konstruktion

5.1 Aufbau Wärmeübertrager-Block

Mit den Ergebnissen der stationären Kennfeld-Simulationen sind Anzahl, Typ und Verteilung der Peltierelemente sowie die Abmessungen der Kühlmittelrohre und die integrierten Turbulenzeinlagen festgelegt. Die Thermoelektrische Wärmepumpe besteht demnach aus im Gegenstrom angeordneten Flachrohren (Abb. 8) mit eingelöteten Turbulenzeinlagen, zwischen die jeweils 4 Peltierelemente in Reihe thermisch angebunden sind. Insgesamt verfügt die TEWP aus 7 Flachrohren für das „kalte“ Fluid bzw. 6 Flachrohren für die warme Seite. D.h. die äußeren Flachrohre sind jeweils der kalten Seite zugeordnet. Insgesamt verfügt die TEWP demnach über 48 Peltierelemente.

Zur Anbindung der Peltierelemente zwischen den Flachrohren wird eine dünne Klebe-Schicht eines wärmeleitenden Silikon-Klebers verwendet. Die Sammler zur Zuführung des Kühlmittels in die Flachrohre werden aus zwischen die Flachrohre geklebten Stutzen gebildet. Diese werden jeweils am eingeschnürten Ende der Rohre mit einem Silikonkleber angebracht, um auftretende thermische Dehnungen auszugleichen. Die nach außen abschließenden Flachrohre werden mit VDA-Stutzen versehen, um eine einfache Integration der TEWP an die Kühlmittel-Kreisläufe in den Versuchsfahrzeugen die zu ermöglichen.

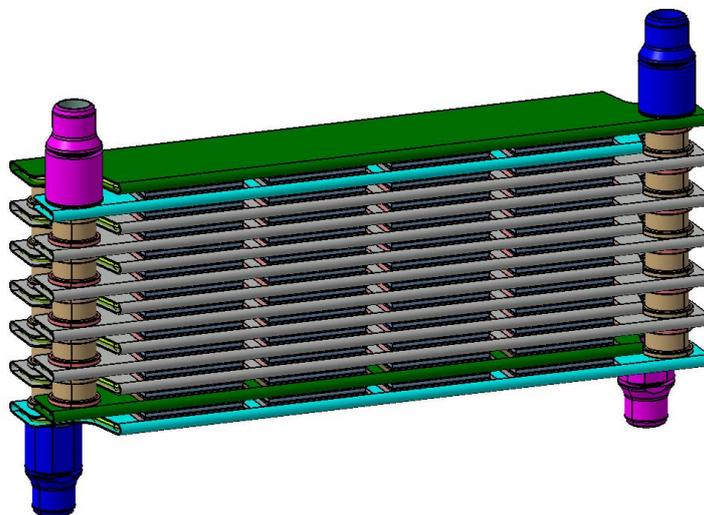


Abb. 8: Wärmeübertrager-Block der TEWP (CAD)

5.2 Elektrische Anbindung der Peltierelemente

Die gewählten Peltierelemente haben Ihren relevanten Betriebsbereich bei Spannungen im Bereich zwischen 0-13V. Das bedeutet, dass – im Hinblick auf die als Randbedingung definierte elektrische Anbindung an das 12V-Boardnetz – alle verbauten Peltierelemente in der Wärmeübertrager-Matrix elektrische parallel geschaltet werden müssen.

Die elektrische Verschaltung wird dabei stapelweise realisiert, d.h. das die jeweils 12 übereinander angeordneten Peltierelemente an gemeinsame Stromschienen angebunden werden. Für die 4 in Reihe angeordneten Stapel an Peltierelemente gibt es demnach insgesamt 8 Stromschienen (siehe Abb. 9).

Die Stromschienen sind für die maximale Stromstärke von ca. 40A (für jeweils 12 Peltierelemente) ausgelegt, und platzsparend auf einem Kunststoff-Rahmen, der auf die Wärmeübertrager-Matrix aufgeclipst wird und damit für die elektrischen Isolation gegenüber der WÜ-Matrix sorgt, montiert.

Die Steuerelektronik der Thermoelektrischen Wärmepumpe wird direkt in die Komponente integriert. Durch die auftretenden sehr hohen Stromstärken ist eine aktive Kühlung der Bauteile auf der Platine unumgänglich. Dazu wird die Steuerelektronik direkt auf das oberste Flachrohr (kalte Seite der TEWP) mit einer wärmeleitenden Folie aufgebracht.

Die Stromschienen werden durch die Platine durchgesteckt und von oben zur elektrischen Kontaktierung verschraubt. Auf der Platine gibt es für jeden 12er Stapel der Peltierelemente jeweils einen Kanal, der die anliegende Spannung aus dem 12-Boardnetz auf die gewünschte Versorgungsspannung für die Peltierelemente regelt.

Die Elektronik hat für die Leistungsversorgung der Peltierelemente zwei angelötete Kontakte, die nach über Stromschienen nach außen mit einem Stecker verbunden werden.

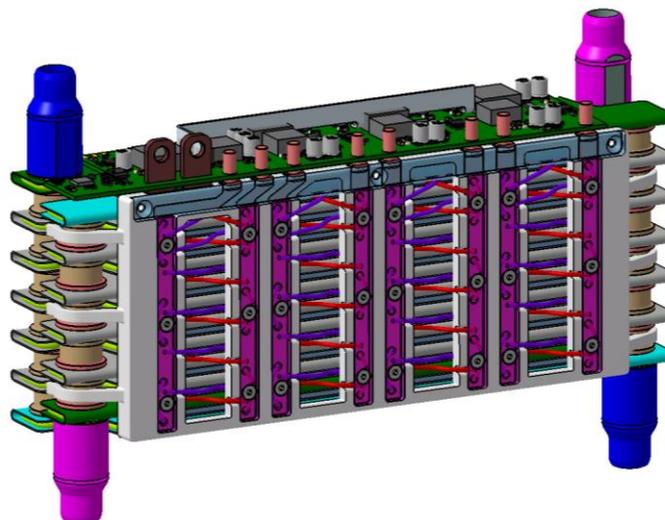


Abb. 9: elektr. Verschaltung der Peltierelemente (CAD)

5.3 Gesamtkomponente

Der komplette Wärmeübertrager-Block mit angebundener Steuerelektronik wird in ein zweigeteiltes Gehäuse integriert (Abb. 10). Die beiden Gehäuseteile werden miteinander

verclipst, die VDA-Stutzen für die Anbindung an die Kühlmittel-Kreisläufe durch die Gehäuseteile durchgesteckt und mittels Dichtelement gegen Verschmutzung abgedichtet. Für



Abb. 10: Frontansicht Gesamtkomponente (CAD)

die Signalleitung (vom Klimasteuergerät zur TEWP via LIN) und die Leistungsversorgung (12V-Boardnetz) ist jeweils eine Anschluss-Buchse direkt in das Gehäuse integriert.

Zur Montage in die Versuchsfahrzeuge hat die TEWP insgesamt 4 Halterungen mit Dämpfungselemente, die eine stabile Anbindung und einen vibrationsarmen Betrieb garantieren. Die TEWP wird in den Versuchsfahrzeugen im Vorderwagen im Bereich hinter dem vorderen Kofferraum an die Schottwand montiert.

Die äußeren Abmessungen der Thermoelektrischen Wärmepumpe (ohne Halterungen, Anschluss-Stutzen und Stecker) betragen 281*140*62mm³ (siehe Abb. 11), was einem Volumen von 2,44l entspricht. Das Gewicht der Gesamtkomponente beträgt (befüllt mit 50% Wasser-Glykol) ca. 3,4kg.

Leergewicht gesamt	ca. 2900g
Füllvolumen kalte Seite	ca. 220mL
Füllvolumen warme Seite	ca. 190mL
Gewicht befüllt	ca. 3400g
Volumen	2,44l

Tab. 4: Gewicht und Volumen der TEWP



Abb. 13: Prototyp 1 für Einbau in stationären Prüfstand

Mit einem System aus Verdichter, Vorverdampfer, Hauptverdampfer und Drosseln wird die Luft auf die gewünschten Parameter am Eintritt des Klimageräts konditioniert. Im Klimagerät durchströmt die Luft anschließend – entsprechend dem Zustand im Fahrzeug – nacheinander das Gebläse, den Filter, den Verdampfer und den Heizkörper. Ein Teil des Luftstroms kann auch am Heizkörper je nach Stellung der Mischklappe (Standardwert: 85%) durch einen Bypass vorbei geleitet werden. Vor und nach dem Heizkörper sowie am Austritt der Düsen zur Kabine sind Temperatursensoren für die luftseitige Bilanzierung angebracht.

Der Heizkörper stellt die Schnittstelle zum Heizungskreislauf (HWT-Kreislauf) dar. Im angeschlossenen Heizungskreislauf ist – wie im Fahrzeug später auch – neben der warmen Seite der Thermoelektrischen Wärmepumpe ein Ausgleichsbehälter, eine KM-Pumpe, ein Zusatz-PTC und eben der Heizungswärmetauscher (HWT) vorhanden. Vor und nach jeder Komponente wird für eine spätere wasserseitige Bilanzierung jeweils Druck und Temperatur gemessen, zusätzlich nach der Pumpe auch der Volumenstrom.

Die kalte Seite der TEWP ist mit einem Kroystaten verbunden, mit dem die im Fahrzeug auftretenden Abwärmen der verschiedenen Komponenten modelliert werden kann. Vor und nach der TEWP wird wieder Druck und Temperatur gemessen, zusätzlich vor der TEWP der Volumenstrom. Da kein Netzteil mit 12V Versorgungsspannung und 200A Stromstärke zur Verfügung stand, wurde die Thermoelektrische Wärmepumpe an ein Netzteil mit 48V Versorgungsspannung und max. 3kW angeschlossen. Die Verschaltung der Peltierelemente wurde entsprechend für diese Spannungslage angepasst. Dazu wurden die 4 Stapel mit 12 parallel geschalteten Peltierelementen in Reihe geschaltet (siehe Abb. 13)

6.1.1 Vorversuche/Einstellung der Randbedingungen

In Vorversuchen wurden zunächst die luftseitigen Randbedingungen und die Homogenität der Luftströmung an Ein- und Austritt des Heizkörpers (wichtig für eine spätere Bilanzierung) überprüft.

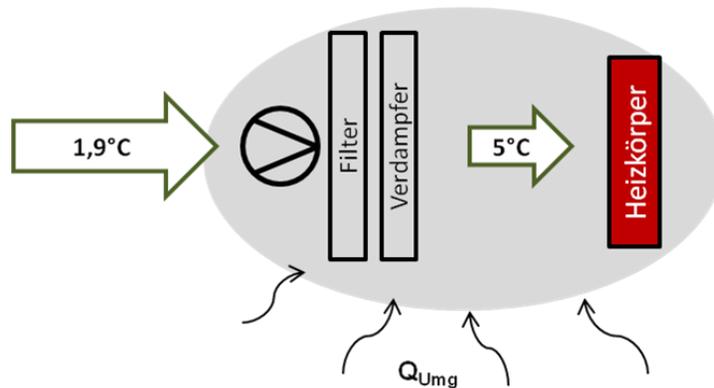


Abb. 14: Diskrepanz zwischen Lufttemperatur vor HVAC und vor Heizkörper

Wie in Abb. 14 schematisch angedeutet, ist die Temperatur vor dem Eintritt in den Heizkörper im Klimagerät (HVAC) nicht homogen, d.h. es gibt eine Diskrepanz zwischen der Eintrittstemperatur ins Klimagerät und der Lufttemperatur vor Heizkörper. Verantwortlich dafür ist v.a. der Wärmeeintrag aus der Umgebung (hier: Labor) über die Gehäusewandung ins HVAC. Für die leistungs- und Effizienz-Messungen mit variierenden KM-seitigen Randbedingungen wurde entschieden, als luftseitige Eintrittsbedingung die gemittelte Lufttemperatur am Eintritt des Heizkörpers zu verwenden. Dieser Wert wird aus 4 Einzelmessungen gemittelt (siehe Abb. 15).

Am Austritt des Heizkörpers wurde eine Vielzahl (insgesamt 16 Stk.) von Thermoelementen in die Luftströmung eingebracht. In Abb. 15 klar zu sehen ist der Einfluss der Kühlmittelseitigen Strömungsführung um Heizkörper auf die Verteilung der Austrittstemperatur. Im Bereich des Eintritts des heißen Kühlmittels (Im Bsp. 45.3°C) sind auch die Luftaustrittstemperaturen maximal, im Bereich des Kühlmittel-Austritts sind die Lufttemperaturen am niedrigsten. Für die Bilanzierung der Luftseite wurde das arithmetische Mittel aus allen 16 Temperatur-Messstellen verwendet.

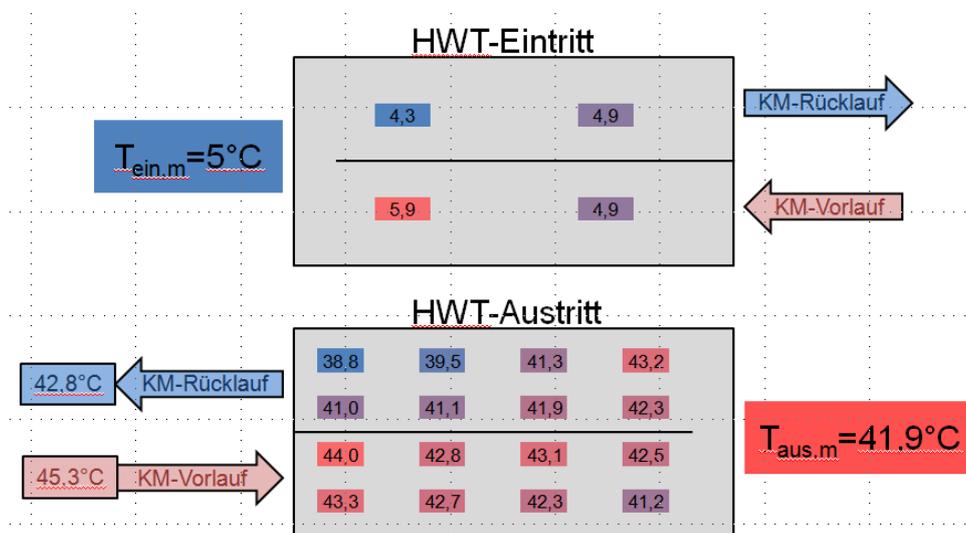


Abb. 15: Homogenität der Luft am Ein- bzw. Austritt des Heizkörpers

6.1.2 Messergebnisse

In Tab. 5 ist die Messmatrix für die stationären Betriebspunkte dargestellt, die im Wesentlichen die im Vorfeld definierten Ziel-Heizleistungen (siehe Tab. 2: luftseitige Randbedingungen für Heizung der Kabine – stationärer Betrieb (Porsche AG)) widerspiegelt. Für die Einstellung eines stationären Messpunktes wurde die Lufteintrittstemperatur und der Massenstrom der Luft werden eingestellt, die elektrische Leistung der Thermoelektrischen Wärmepumpe (und gegebenenfalls des HV-PTC) wird solange geregelt, bis am Düsenaustritt die gemittelte Temperatur der Zieltemperatur entspricht.

T_{Umg} [°C]	$T_{L,ein}$ [°C]	m [kg/h]	$T_{L,aus}$ [°C]
-20	-12	300	48
-5	-2,5	262,5	38
5	5	235	30,5
15	3	205	25,5

Tab. 5: Luftseitige Randbedingungen für Prüfstandmessungen

In diesen Messreihen wurden folgende Parameter variiert:

- Vorlauftemperatur auf der kalten Seite der TEWP
- Mischklappenstellung
- Volumenstrom der kalten Seite der TEWP

Einfluss der Umgebungstemperatur

In Abb. 16 sind beispielhaft die Ergebnisse der vier Betriebspunkte bei einer Vorlauftemperatur des Kühlmittels auf der kalten Seite der TEWP von 10°C gezeigt. Die Balken stellen die Leistungen dar, die Kurve zeigt die Effizienz in Form der Arbeitszahl COP. Die Summe der Balken entspricht der erforderlichen Heizleistung, wie sie durch die luftseitigen Randbedingungen vorgegeben sind. Diese steigt mit sinkender Umgebungstemperatur.

Bei einer Umgebungstemperatur von -20°C muss der zusätzlich im HWT-Kreislauf integrierte Hochvolt-PTC stark betrieben werden (2,34kW). Dort reicht die Effizienz der Thermoelektrischen Wärmepumpe nicht aus, um aus der maximal verfügbaren elektrischen Anschluss-Leistung von $P_{el,max}=2,4kW$ genügend Heizleistung zu generieren. Grund dafür ist die hohe Temperaturdifferenz zwischen Kühlmittel auf der Kaltseite (10°C) und der Warmseite. Um

eine Austrittstemperatur der Luft von 48°C zu erreichen, muss die KM-Temperatur am Eintritt entsprechend höher sein. Auch ist im Klimagerät standardmäßig eine Mischklappenstellung

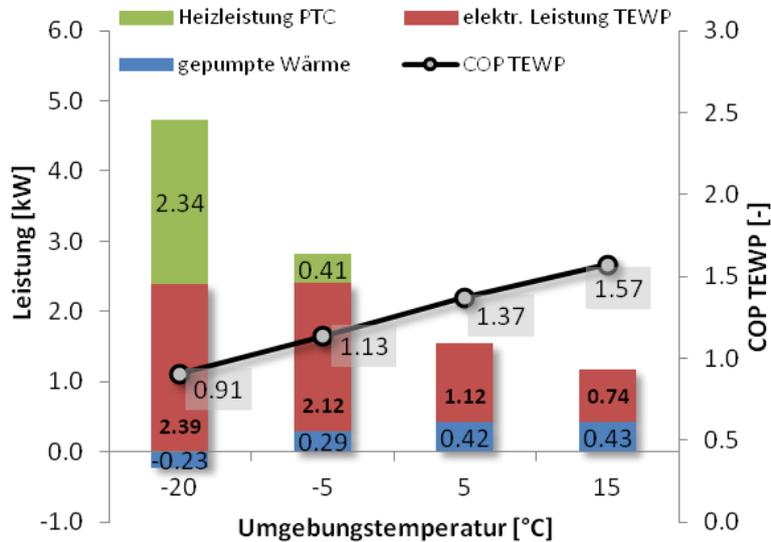


Abb. 16: Einfluss der Umgebungstemperatur auf Leistungen/COP bei Vorlauftemperatur kalte Seite TEWP von 10°C

geregelt, die einen gewissen Anteil der Luft am Heizkörper vorbeileitet, die im Mischraum später wieder hinzu gemischt wird. Entsprechend muss die Luft im Heizkörper auf eine noch höhere Temperatur aufgeheizt werden (siehe nächster Abschnitt). Dies führt zu einer Arbeitszahl geringer als 1, d.h. beide Seiten der TEWP werden geheizt.

Bei einer Umgebungstemperatur von -5°C ist nur noch eine geringe Leistung des HV-PTCs notwendig, der Hauptanteil der Heizleistung kommt von der TEWP. Mit einer Arbeitszahl von 1.13 können 290W aus der kalten Kreislauf gepumpt werden.

Bei weiterem Anstieg der Umgebungstemperatur wird die Heizleistung komplett in der Thermoelektrischen Wärmepumpe generiert, mit steigender gepumpter Leistung und steigender Arbeitszahl.

Einfluss der Kühlmitteltemperatur auf der kalten Seite

In Abb. 17 sind für die vier verschiedenen Betriebspunkte der Einfluss der Kühlmittel-seitigen Vorlauftemperatur auf der kalten Seite der Thermoelektrischen Wärmepumpe dargestellt. Bei einer Umgebungstemperatur von -20°C kann erst ab einer Vorlauftemperatur des Kühlmittels von +20°C Wärme gepumpt werden. Der Anteil der gepumpten Wärme steigt mit weiter steigender Vorlauftemperatur, entsprechend nimmt der Anteil der Heizleistung aus dem HV-PTC ab und die Effizienz in Form der Arbeitszahl steigt.

Bei einer Umgebungstemperatur von -5°C ist der HV-PTC nur bis zu einer Vorlauftemperatur von 20°C notwendig, bei höheren Temperaturen auf der Kaltseite der TEWP genügt die Heizleistung der TEWP.

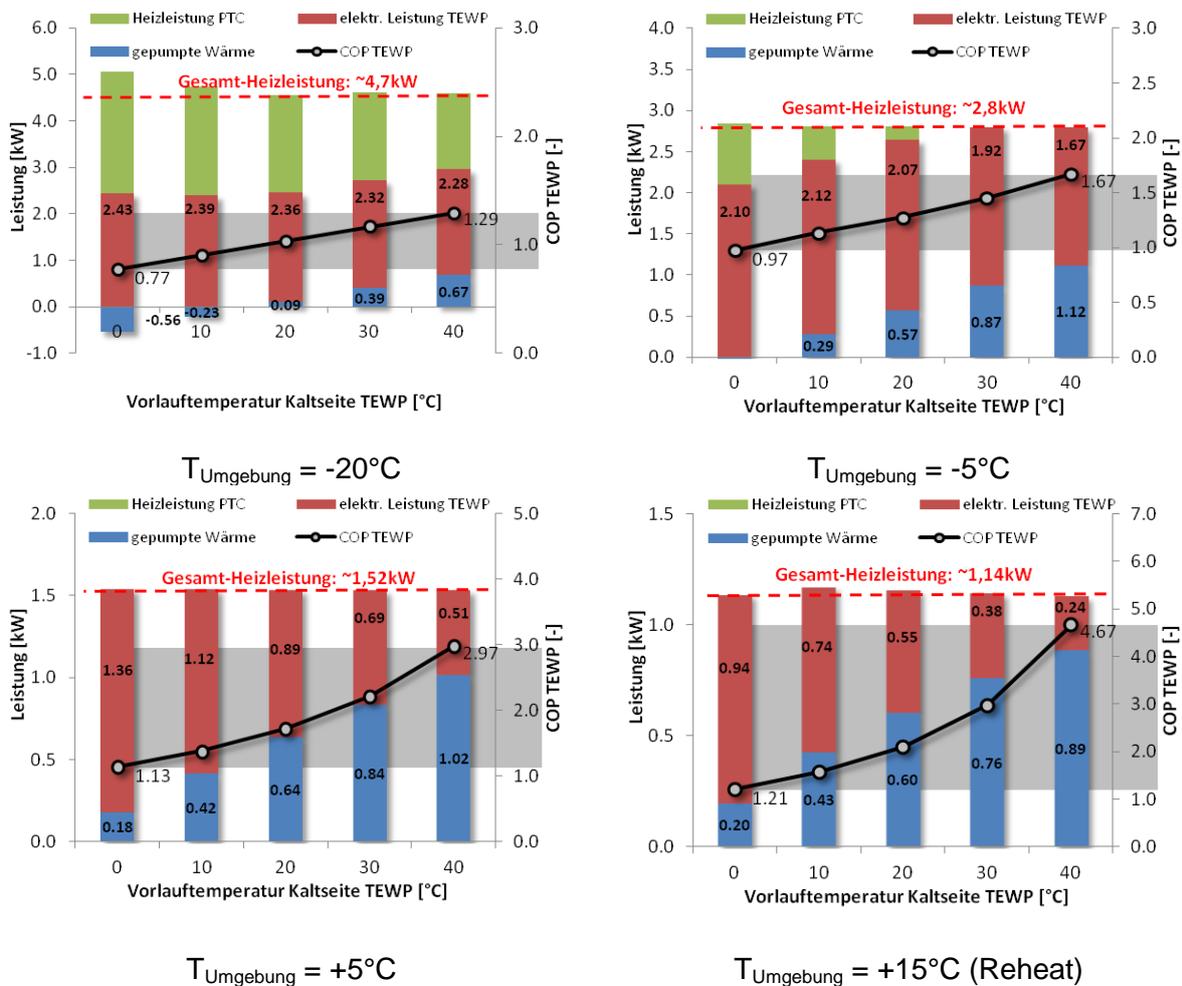


Abb. 17: Einfluss der KM-Vorlauftemperatur (kalte Seite) auf Leistungen/COP bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

Bei den beiden anderen Messpunkten ($T_{\text{Umgebung}} = +5^{\circ}\text{C}$ bzw. $+15^{\circ}\text{C}$) wird der PTC in keinem Betriebspunkt mehr benötigt.

Vergleicht man die gepumpten Wärmen bei z.B. einer Vorlauftemperatur auf der Kalten Seite von 30°C bei den unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, sieht man maximale Werte von $0,87\text{kW}$ bzw. $0,84\text{kW}$ für $T_{\text{Umgebung}} = -5^{\circ}\text{C}$ bzw. $+5^{\circ}\text{C}$. Bei niedrigerer Umgebungstemperatur von -20°C ist die Temperaturdifferenz über die Wärmepumpe zu hoch, um ein solch hohe Pumpleistung zu erreichen, bei einer hohen Umgebungstemperatur von $+15^{\circ}\text{C}$ ist die geforderte Heizleistung zu niedrig, d.h. auch in diesem Fall ist die gepumpte Leistung niedriger.

Einfluss der Mischklappenstellung

Einen großen Einfluss auf die Effizienz der Thermoelektrischen Wärmepumpe hat die Mischklappenstellung, da diese maßgeblich die notwendige Vorlauftemperatur und damit das Temperaturniveau auf der heißen Seite der TEWP beeinflusst. Je höher der Massenstrom-Anteil der Luft, die am Heizkörper vorbeiströmt und damit nicht geheizt wird, desto höher muss die Temperatur des Luftanteils am Austritt des Heizkörper sein, um nach dem Vermischen der Luftströme im Mischraum nach dem Heizkörper die Zieltemperatur zu erreichen. Um die hohe Lufttemperatur am Heizkörperaustritt zu erhalten, muss auch die Kühlmitteltemperatur am Eintritt des Heizkörpers und damit eben auch am Austritt der TEWP entsprechend hoch sein. Standardmäßig liegt die Mischklappenstellung bei stationären Messungen bei 85%, wobei dieser Wert die physikalische Klappenstellung und nicht der Massenstromanteil durch den Bypass widerspiegelt.

Notwendig ist der Bypass-Massenstrom, um bei einer plötzlichen Erhöhung der Heizleistungsanforderung durch Schließen der Mischklappe einen Temperatursprung und damit den gewünschten hochdynamischen Effekt zu erreichen.

Durch Bilanzierung Temperaturen vor und nach dem Heizkörper kann der Luftanteil ermittelt werden, der bei dieser MK-Stellung am HWT vorbeiströmt. In Abb. 18 ist die Abhängigkeit des Bypassanteils von der Mischklappenstellung dargestellt. Mit Erhöhung der Mischklappenstellung sinkt der Bypass-Massenstrom kontinuierlich ab. Dabei handelt es sich nicht um einen linearen Zusammenhang, vielmehr erhöht sich die Änderung mit steigender MK-Stellung.

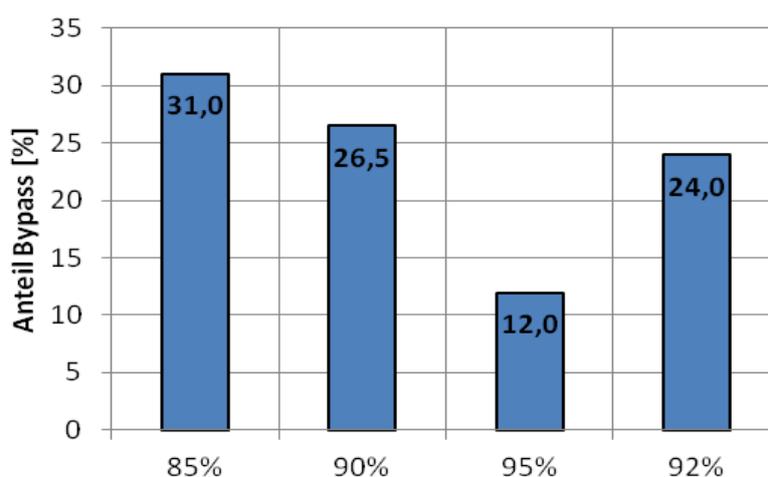


Abb. 18: Abhängigkeit der Bypass-Anteils von der Mischklappenstellung

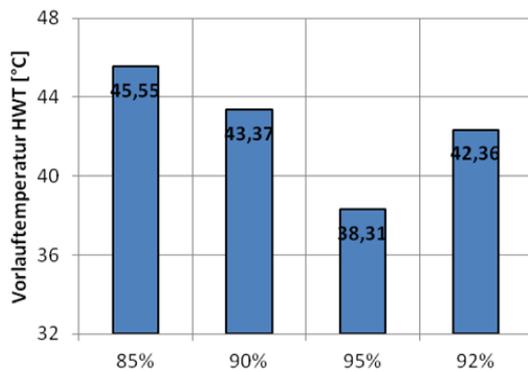


Abb. 19: Einfluss MK-Stellung auf Vorlauftemperatur kalte Seite TEWP

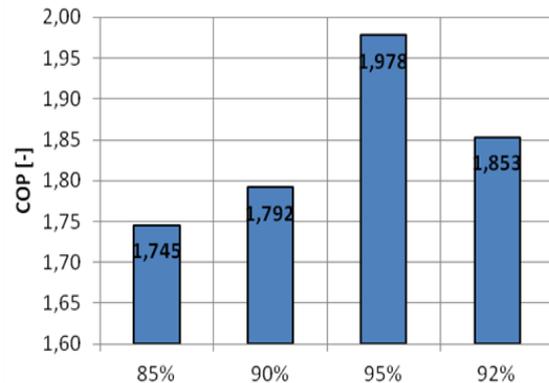


Abb. 20: Einfluss der MK-Stellung auf Arbeitszahl

Der Einfluss des Bypass-Anteils auf die notwendige KM-Vorlauftemperatur des Heizkörpers und die Arbeitszahl der Thermoelektrischen Wärmepumpe ist in Abb. 19 bzw. Abb. 20 dargestellt. Die entsprechenden Messungen wurden bei einem konstanten Betriebspunkt ($T_{Umg}=5^{\circ}\text{C}$) bei einer KM-Vorlauftemperatur auf der Kalt-Seite der TEWP von 20°C durchgeführt. Man erkennt deutlich das große Potential für die TEWP bei Erhöhung der MK-Stellung (=Absenkung des Bypass-Massenstroms). Die notwendige KM-Vorlauftemperatur des Heizkörpers verringert sich um bis zu 7K, was ein Anstieg der Arbeitszahl von bis zu 0,25 zur Folge hat.

Um den Einfluss des reduzierten Bypass-Anteils auf den oben beschriebenen vorzuhaltenden Heizleistungssprung zu untersuchen, wurden bei den 4 unterschiedlichen MK-Stellungen instationäre Messungen durchgeführt. Dazu wurde die Mischklappenstellung im stationären Zustand schlagartig auf 100% erhöht (d.h. der Bypass komplett geschlossen), ohne die elektrische Anschluss-Leistung der TEWP oder des PTCs zu ändern, und die Auswirkung auf die Temperaturen am Austritt des Klimageräts beobachtet. In Abb. 21 sind die Verläufe der Temperaturen an den 4 Düsen sowie die daraus (arithmetisch) gemittelte Temperatur dargestellt. Der konstante Betriebspunkt vor dem Temperatursprung (bei $t=10\text{min}$) ist bei allen 4 Fällen identisch. Durch die Änderung der MK-Stellung jedoch wird die Temperaturzunahme der mittleren Temperatur (orangene Kurve) nach Schließen des Bypasses (MK=100%) reduziert. Anstelle der Zunahme um ca. $5,4^{\circ}\text{C}$ bei 85% MK-Stellung wird beispielsweise bei 90% MK-Stellung noch 4K erreicht, bei 92% noch 3,3K. Gemeinsam mit dem Projektpartner Porsche AG wurde entschieden, die Mischklappenstellung für die stationären Punkte auf 92% festzulegen.

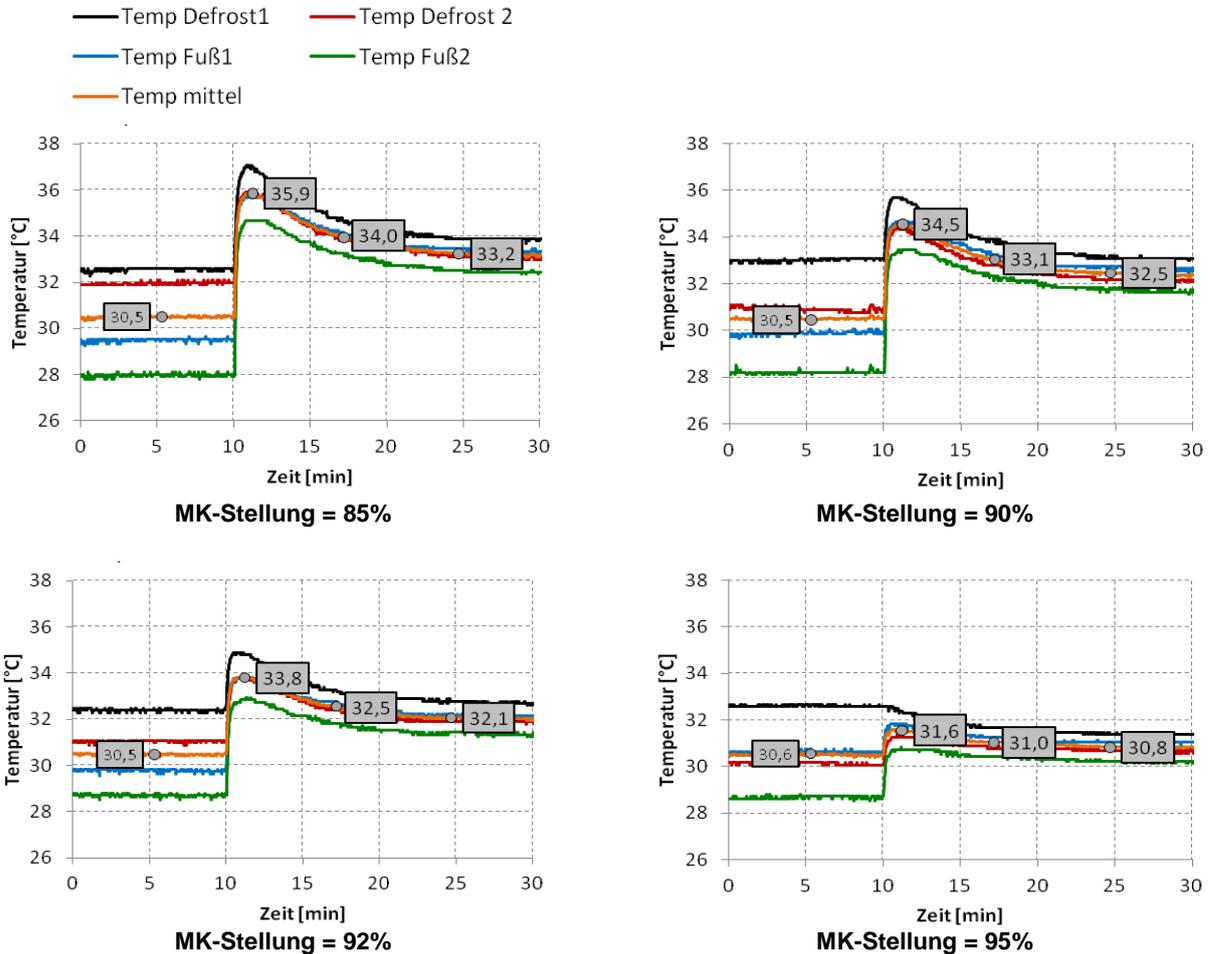
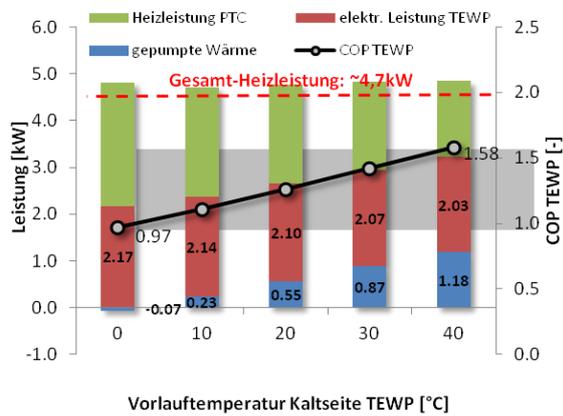


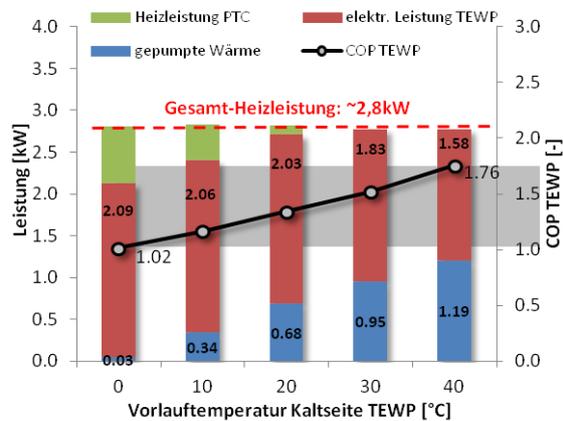
Abb. 21: Einfluss der MK-Stellung auf Temperaturverlauf am Austritt der Düsen bei Sprung der MK-Stellung auf 100%

Entsprechend wurden die Messungen der 4 Betriebspunkte mit Variation der Kühlmittelvorlauftemperatur auf der kalten Seite der TEWP mit diesem Wert der Mischklappenstellung wiederholt. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abb. 22 dargestellt.

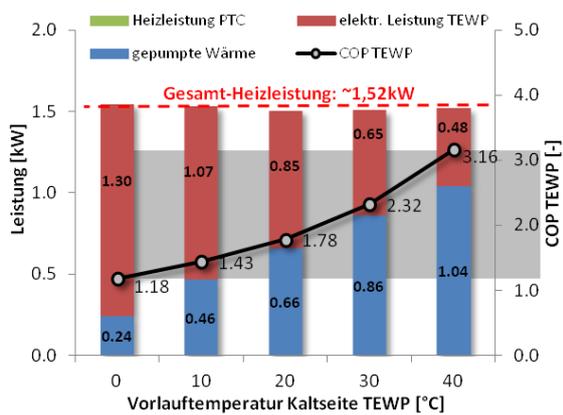
Gegenüber den Ergebnissen aus Abb. 17 zeigt sich – wie erwartet – eine deutliche Zunahme der gepumpten Wärme und entsprechend eine Zunahme der Arbeitszahl in allen Betriebspunkten. Die Verbesserung ist bei geringen Umgebungstemperaturen mehr ausgeprägt als bei hohen Umgebungstemperaturen, da im ersten Fall der Einfluss der Mischklappenstellung auf die notwendige Kühlmittel-seitige Vorlauftemperatur größer ist. Deswegen können höchste Werte der gepumpten Leistung bei identischen Vorlauftemperaturen auf der Kaltseite bei einer Umgebungstemperatur von -5°C erreicht werden.



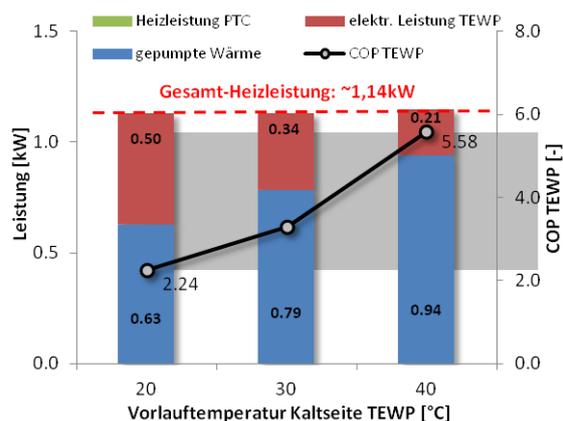
$T_{\text{Umgebung}} = -20^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{Umgebung}} = -5^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{Umgebung}} = +5^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{Umgebung}} = +15^{\circ}\text{C}$ (Reheat)

Abb. 22: Einfluss der KM-Vorlauftemperatur (kalte Seite) auf Leistungen/COP bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (MK-Stellung = 92%)

6.2 Messung der Steuerelektronik

Für die stufenlose Ansteuerung der Leistung der Thermoelektrischen Wärmepumpe wird eine Steuerelektronik benutzt, die direkt an der Oberseite des Wärmeübertrager-Blocks angebunden ist.

Durch die hohe Gesamt-Stromstärke (bis 160A bei 12V für 2kW elektrische Anschlussleistung) bzw. die hohen Stromstärken der 4 Kanäle (bis ca. 40A) treten bei den verbauten Komponenten (u.a. Mosfets, Spulen, Induktivität) Verluste in Form von Wärme auf. Einerseits gilt es, die Verluste so gering wie möglich zu halten, damit der Gesamtwirkungsgrad der Thermoelektrischen Wärmepumpe möglichst hoch ist, andererseits müssen diese Verlustwärmern geeignet abgeführt werden, damit es nicht zu lokalen Übertemperaturen bei einzelnen elektronischen Bauteilen und im Worst Case zum Versagen der Steuerelektronik



Abb. 23: Ersatz-Prüfstand zur Messung der Elektronik

kommt. Dazu wurden vor der Integration der Elektronik in die Prototypen umfangreiche Messungen durchgeführt. Für diese Messungen wurde ein Ersatzaufbau gewählt, mit dem es möglich ist, sowohl eine Temperaturmessung via Infrarot-Kamera, als auch Leistungstests durchzuführen. Dieser Aufbau ist in Abb. 23 gezeigt. Anstelle der in der Thermoelektrischen Wärmepumpe verbauten Peltierelemente wird die in der Steuerelektronik auf eine gewünschte Spannung gewandelte elektrische Leistung in elektrischen Widerständen in Wärme umgewandelt.

In Abb. 24 sind die Verlustleistung (links) und der Wirkungsgrad (rechts) dreier gemessener Steuerelektroniken in Abhängigkeit der prozentualen Leistungsstufe (%DC) dargestellt.

Die Verlustleistungen der drei Messreihen liegen relativ gut übereinander, was einerseits die Qualität der Messung, andererseits auch die Reproduzierbarkeit der Hardware, sprich der drei gemessenen Steuerelektroniken, beweist. Die Verlustleistung berechnet sich aus der Differenz der am Prüfstand angelegten elektrischen Versorgungsleistung am Eintritt der Steuerelektronik zu der Summe der vier Kanäle am Austritt der Steuerelektronik. Diese steigt mit der Leistungsstufe bis zu einem maximalen Wert von ca. 80W. Der quadratische Verlauf ist durch die Abhängigkeit der Verluste mit dem Quadrat der Stromstärke und durch die Widerstände und die Schaltvorgänge der Steuerelektronik begründet.

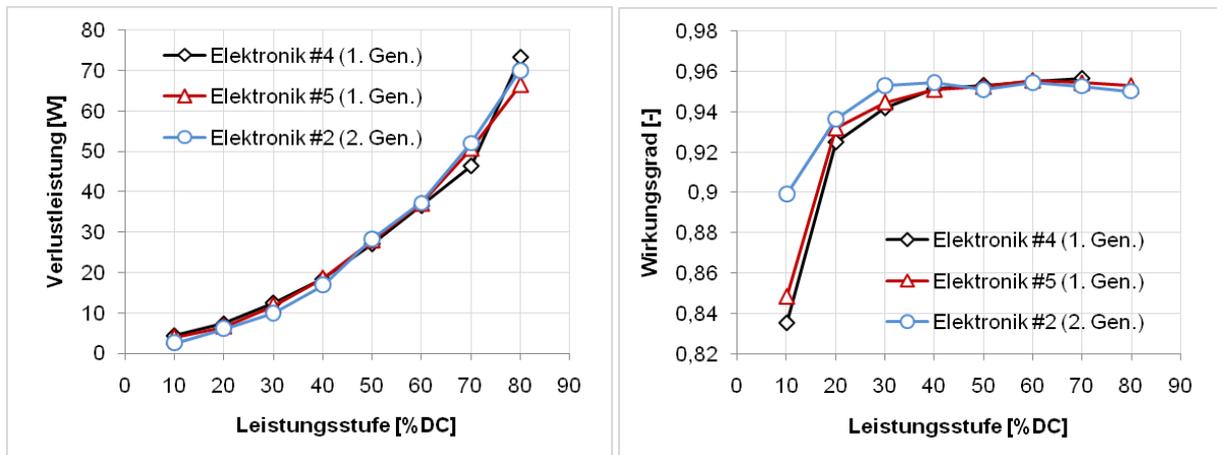


Abb. 24: Verlustleistung und Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Leistungsstufe

Bezieht man die Verlustleistung auf die Versorgungsleistung der Steuerelektronik, erhält man den Wirkungsgrad der Steuerelektronik (rechts dargestellt in Abb. 24). Auch hier wieder kann die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse anhand der geringen Abweichungen der drei gemessenen Kurven belegt werden.

Für den relevanten Betriebsbereich (Leistungsstufe >50%) werden nahezu ein konstant hoher Wirkungsgrad von >95% erreicht.

Die beschriebene Verlustleistung muss geeignet abgeführt werden, damit die elektronischen Bauteile auf der Steuerelektronik nicht ihre Bauteil-spezifische Temperaturgrenze erreichen. Dazu wird die Steuerelektronik rückseitig durch ein „kaltes“ Flachrohr gekühlt. Ob diese Kühlung ausreicht, wurde anhand von Infrarot-Messungen überprüft. Dazu wurde bei unterschiedlichen Leistungsanforderungen und Kühlmitteltemperaturen (in Abb. 25 sind die Messungen mit DC=30% bzw. DC=65% und bei Kühlmittel-Temperaturen von 20°C bzw. 40°C dargestellt) die Wärmestrahlung der Platinen-Oberseite mit einer Infrarot-Kamera detektiert und mithilfe von zusätzlich platzierten Thermoelementen in Temperaturen umgerechnet. Die in Abb. 25 maximal auftretende Temperatur von 72°C ist weit entfernt von den kritischen Temperaturen, woraus sich eine ausreichende Kühlung bewerten lässt.

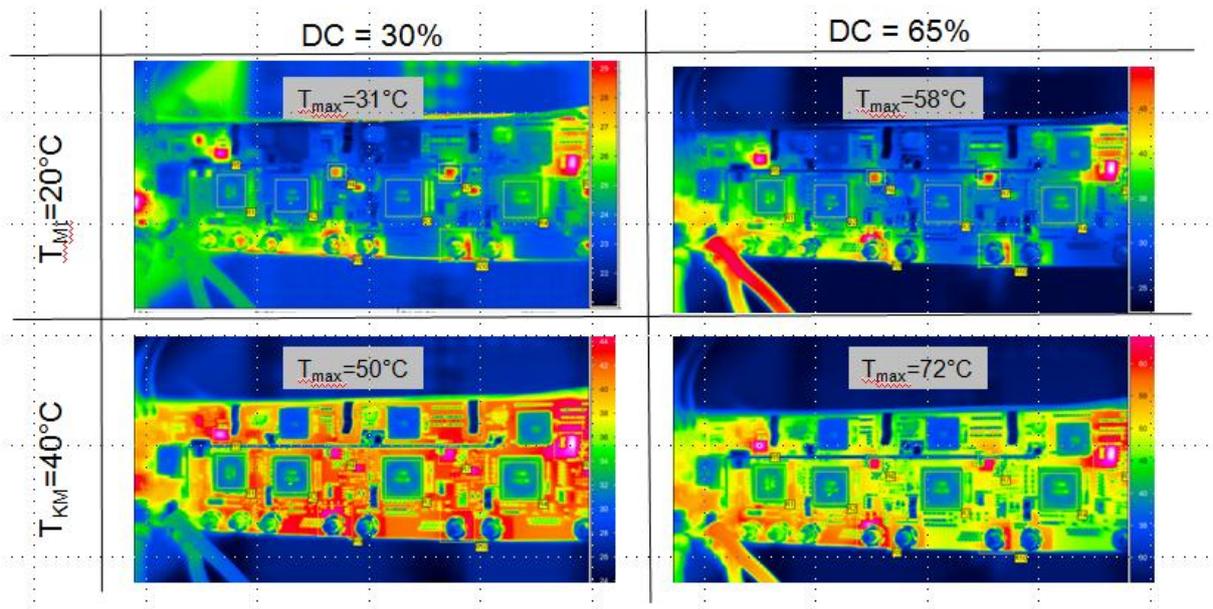


Abb. 25: Infrarotmessung der Platine in Abhängigkeit von KM-Temperatur und Leistungsstufe

6.3 Messungen im Klimawindkanal

Für die Beurteilung der Effizienz des Klimasystems wurden die Versuchsfahrzeuge mit integrierter Thermoelektrischer Wärmepumpe im Klimawindkanal gemessen. Dabei wurde der Artemis-Zyklus (CADC150) bei drei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gefahren. Für die Heizanwendung sind dabei die Umgebungstemperaturen von $T_{\text{umg}}=-5^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{umg}}=15^{\circ}\text{C}$ relevant.

T_{Umgebung} = -5°C

Der Verlauf der Temperaturen im Kühlkreislauf der Elektromotoren (MT-Kreislauf) bzw. im Heizungskreislauf (HWT-Kreislauf) jeweils vor und nach der Thermoelektrischen Wärmepumpe für eine Umgebungstemperatur von -5°C ist in Abb. 26 dargestellt. Abb. 27 zeigt die zugehörigen Leistungen des HV-PTCs und der TEWP.

Anfangs des Zyklus wird ausschließlich durch den PTC geheizt, da die Temperaturdifferenz zwischen kalter und heißer Seite der TEWP keinen effizienten Betrieb der TEWP zulässt. Bei einem vorgegebenen Schwellwert der Temperatur des MT-Kreislaufes vor der TEWP (frei gewählt mit 20°C) wird die TEWP zugeschaltet (bei ca. $t=1700\text{s}$). An dieser Stelle hat der Verlauf der Kühlmittel-Temperatur auf der kalten Seite nach der TEWP (grün dargestellt) einen Knick, fällt kurz ab, bevor die Temperatur wieder ansteigt. Am weiteren Anstieg der Kurve erkennt man auch, dass im System durch die elektrischen Komponenten (Elektro-Motor + Leistungselektronik) mehr Wärme abgegeben wird, als die TEWP pumpen kann. Die Differenz der roten und schwarzen Kurve stellt letztendlich die Heizleistung der TEWP dar, die im späten Verlauf relativ konstant ist.

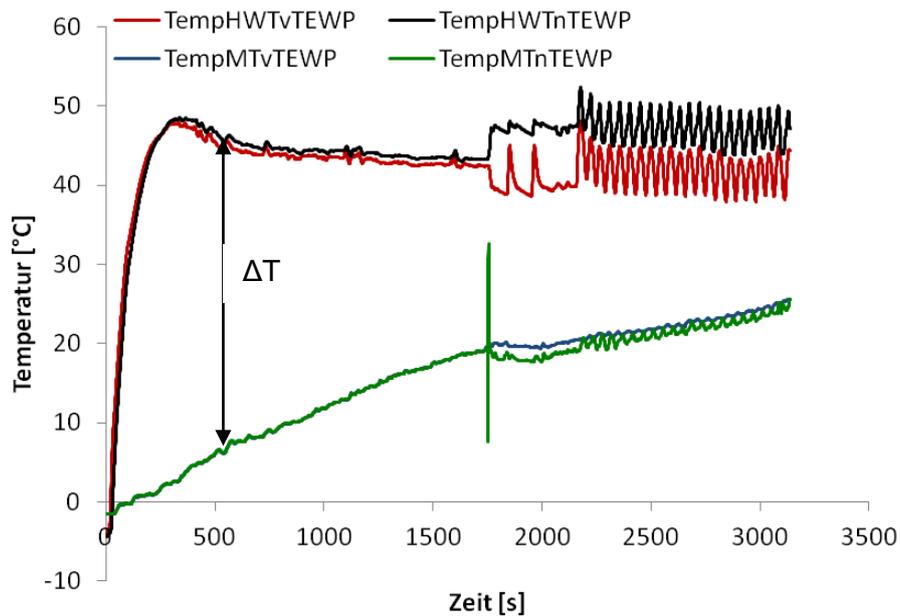


Abb. 26: Verlauf der Temperaturen vor/nach der TEWP auf der kalten Seite (MT) bzw. der warmen Seite (HWT) bei $T_{Um} = -5^{\circ}\text{C}$

Am Verlauf der Kurven in Abb. 27 sieht man die nicht ideale Ansteuerung der beiden Komponenten. Die TEWP wurde in diesem Stadium der Software des Klimasteuergerätes nicht stufenlos angesteuert, sondern lediglich hart an- und ausgeschaltet. Auch kann die stark oszillierende, abwechselnde Ansteuerung von PTC und TEWP nicht zielführend sein.

Aber selbst mit dieser 1. Version der Steuersoftware des Klimasteuergeräts lässt sich bei Bilanzierung der Leistungen über den Zyklus eine Ersparnis von ca. 11% (siehe

Tab. 6) gegenüber der Fahrt ohne Thermoelektrische Wärmepumpe erzielen.

elektr. Leistung HV-PTC [kWh]	2.50
elektr. Leistung TEWP [kWh]	0.68
Gesamtleistung [kWh]	3.18
virtuelle elektr. Leistung HV-PTC ohne TEWP [kWh]	3.57
Ersparnis [kWh]	-0.39
Ersparnis	-11%

Tab. 6: gemittelter Energieverbräuche und Einsparung durch Verwendung der TEWP

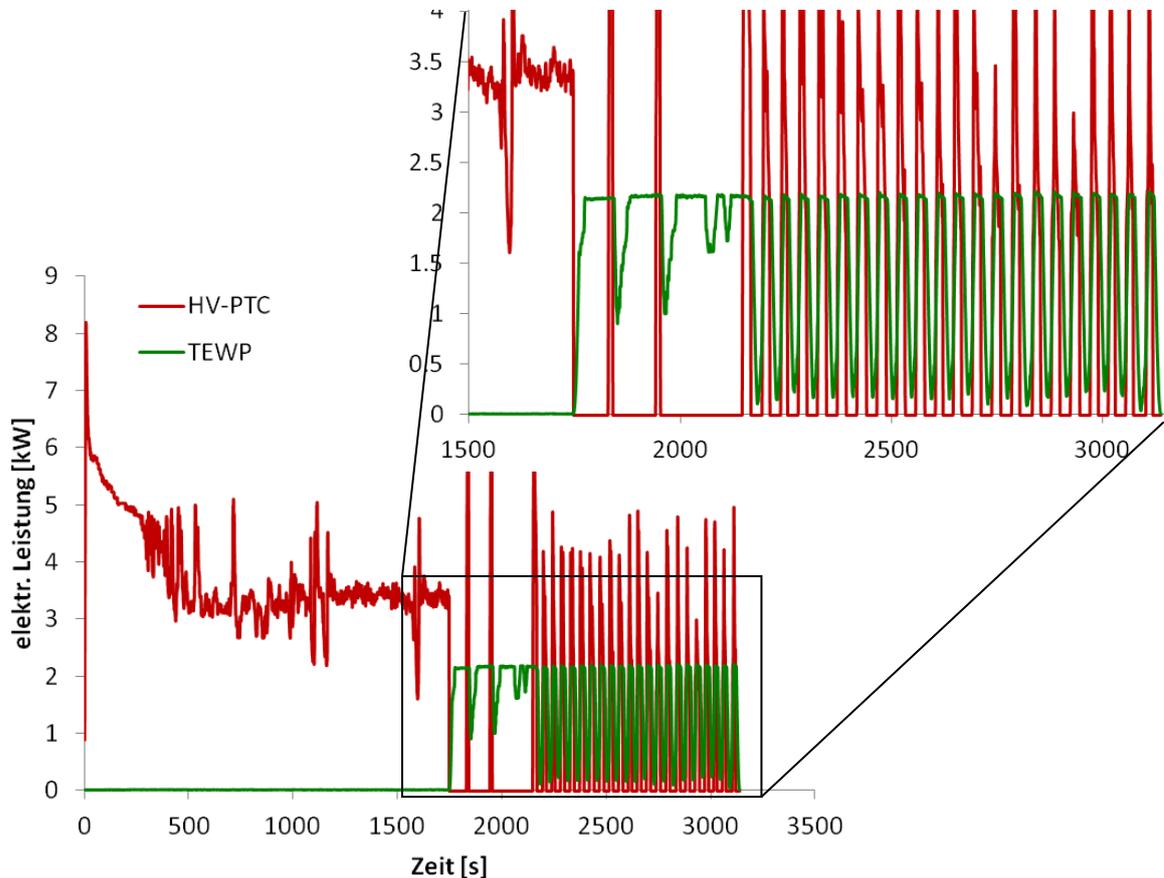


Abb. 27: elektr. Anschlussleistung von HV-PTC und TEWP bei TUmgebung=-5°C

TUmgebung = +15°C

Die entsprechenden Verläufe der Kühlmitteltemperaturen und der elektrischen Leistung der beiden Komponenten bei einer Messung bei Umgebungstemperatur von 15°C sind in Abb. 28 bzw. Abb. 29 gezeigt. In dieser Messung ist der PTC nur kurz zu Beginn der Messung notwendig, da die Vorlauftemperatur auf der Kaltseite der TEWP relativ schnell den eingestellten Schwellwert von 20°C erreicht. Um die geforderte Heizleistung bereitzustellen, wird die TEWP wieder hart ein- und ausgeschaltet, was an den Peaks der elektrischen Leistung für die TEWP zu erkennen ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt der warmen Seite der TEWP ist – verglichen mit obigen Messung – geringer, da die geforderte Heizleistung bei TUmgebung=15°C wesentlich geringer ist.. Der Verlauf der Temperatur am Austritt der kalten Seite der TEWP ist im hinteren Teil des Zyklus (ab ca. 1200s) auf relativ konstantem Niveau. D.h. dort ist ein Punkt erreicht, in dem sich die Abwärme der elektr. Komponenten und die gepumpte Wärme der TEWP die Waage halten.

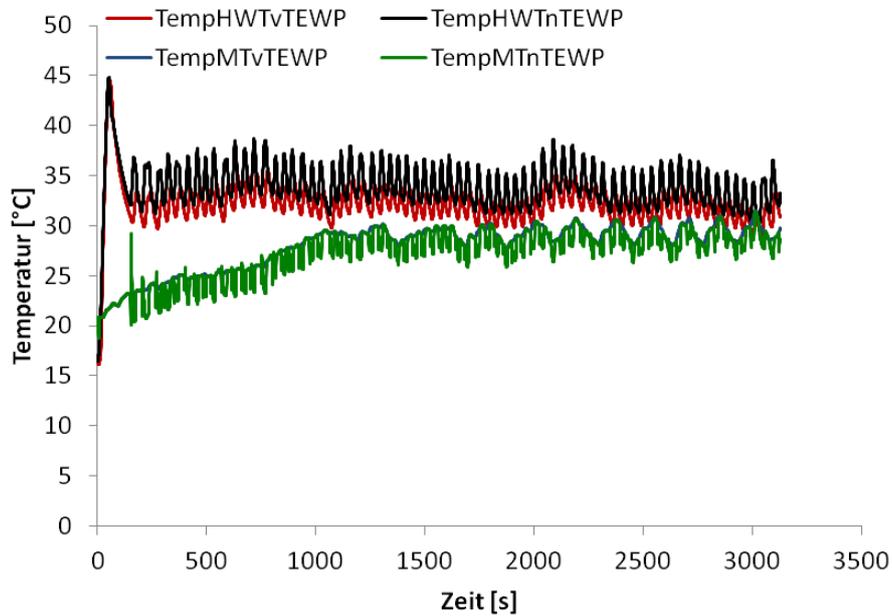


Abb. 28: Verlauf der Temperaturen vor/nach der TEWP auf der kalten Seite (MT) bzw. der warmen Seite (HWT) bei $T_{Um} = -5^{\circ}\text{C}$

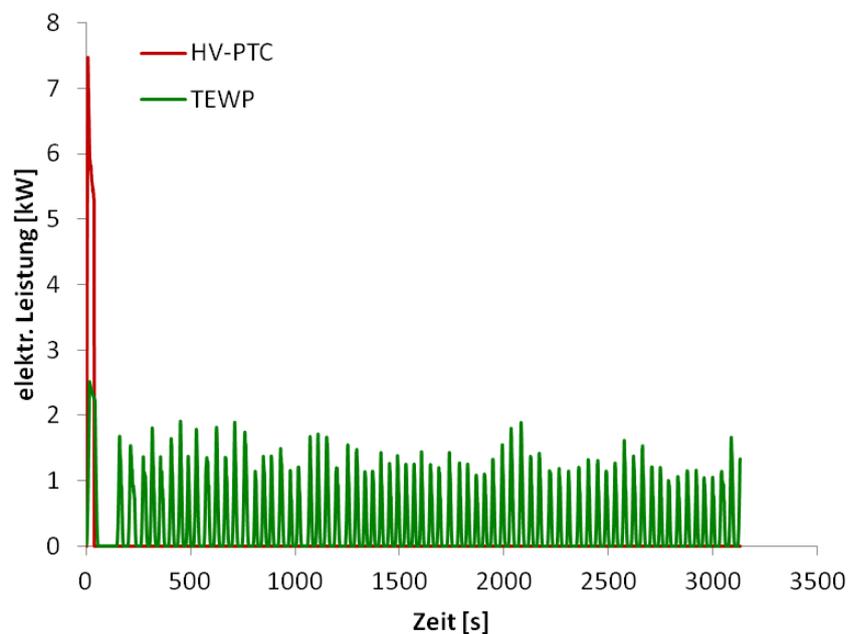


Abb. 29: elektr. Anschlussleistung von HV-PTC und TEWP bei $T_{Um} = 15^{\circ}\text{C}$

Bilanziert man wieder die Leistungen über den gesamten Zyklus (Tab. 7), erhält man eine Ersparnis bei dieser Umgebungstemperatur im CADC von ca. 36%.

elektr. Leistung HV-PTC [kWh]	~0.0
elektr. Leistung TEWP [kWh]	0.396
virtuelle elektr. Leistung HV-PTC ohne TEWP [kWh]	0.614
Ersparnis [kWh]	-0.218
Ersparnis	-36%

Tab. 7: gemittelter Energieverbräuche und Einsparung durch Verwendung der TEWP

6.4 Wintererprobung

Zusätzlich zu den Messungen im Klimawindkanal wurden Messungen im Realbetrieb durchgeführt. Dazu wurden mehrere Testfahrten mit identischem Streckenprofil bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Abb. 30 sind die beiden Versuchsfahrzeuge im Schnee dargestellt.

Das Streckenprofil und ein typischer Temperaturverlauf auf der Strecke sind in Abb. 31 zu sehen. Während der Testfahrt wurden zwei Berge mit einer Höhe von 1650 bzw. ca. 1800m angefahren, Start und Ziel und das Tal dazwischen befanden sich auf ca. 1000m Höhe. Entsprechend variiert die Außen-Temperatur während der Fahrt zwischen -5°C und +4°C. Die Testfahrt dauerte ca. 4000s und wurde während der Wintererprobung mehrere Male durchfahren, mit nahezu konstanten Verhältnissen.



Abb. 30: Versuchsfahrzeuge im Wintererprobung

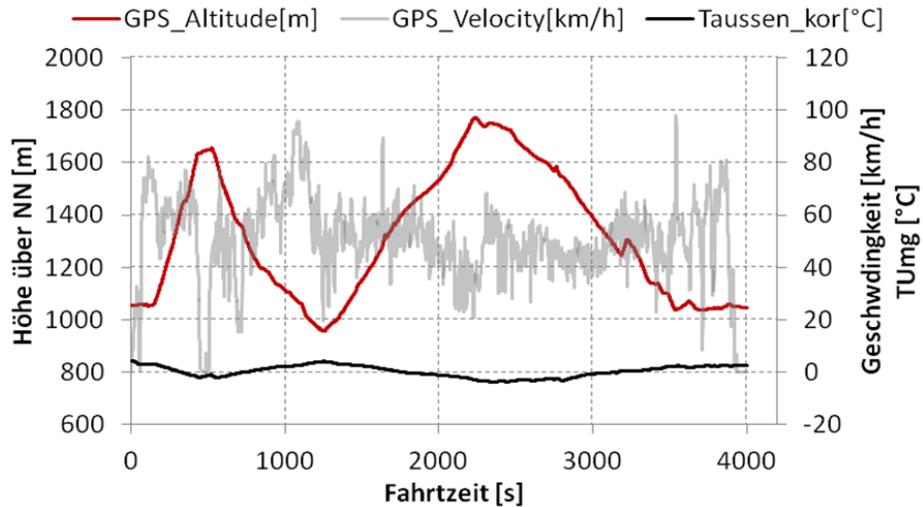


Abb. 31: Fahr- und Temperaturprofil der ausgewerteten Testfahrten

Die Ergebnisse einer dieser Fahrten sind in Abb. 32 dargestellt. Links ist die gepumpte Leistung, rechts der Verlauf der Arbeitszahl zu sehen. Gemittelt über den gesamten Fahrzyklus erhält man eine Leistung von ca. 800W bei einer mittleren Arbeitszahl von ca. 1,5. D.h. in diesem fahrt konnte durch die Verwendung der Thermoelektrischen Wärmepumpe gegenüber dem Betrieb mit einem HV-PTC eine Ersparnis von ungefähr 1kWh erzielt werden.

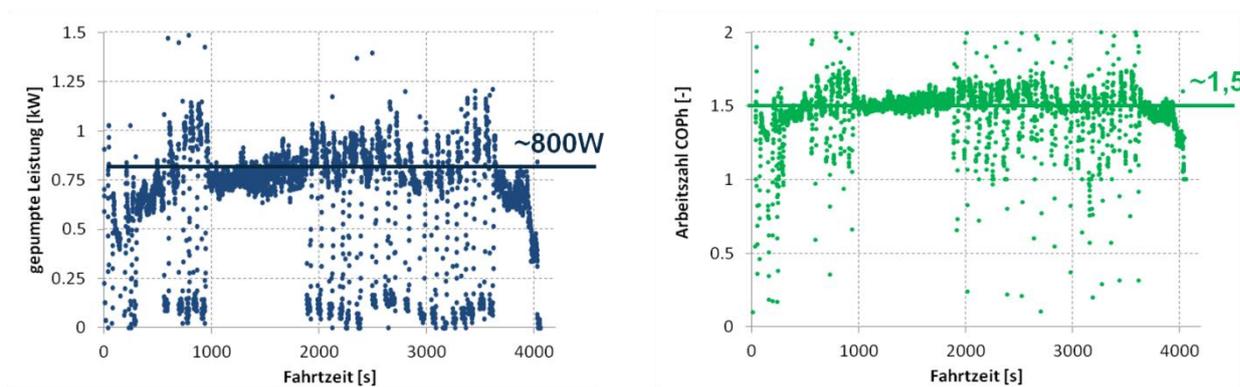


Abb. 32: Verlauf der gepumpten Leistung der TEWP (links) und der Arbeitszahl (rechts)

7 Zusammenfassung/ Fazit

Im Verlauf des Teilprojektes 5 „Klimatisierung“ des Projektes E-Generation wurde von der Fa. Mahle International GmbH eine Thermoelektrische Wärmepumpe ausgelegt, simuliert, aufgebaut und sowohl am Prüfstand als auch in den von Projektpartner bereitgestellten Versuchsfahrzeugen getestet.

Die aufgebaute Komponente beinhaltet neben dem Wärmeübertrager-Block mit integrierten, verschalteten Peltierelementen auch die Steuerelektronik für die stufenlose Ansteuerung der Komponente. Ausführliche Simulationen und Messungen von Funktionsmustern und Teil-Komponenten bildeten die Basis für den im späteren Projektverlauf erfolgreichen Aufbau und Einbau von Prototyp in die Versuchsfahrzeuge.

Es konnte in allen Phasen des Projektes der Benefiz des Systems gegenüber einem konventionellen System eines rein elektrischen Zuheizers gezeigt werden. Der Benefiz besteht darin, dass die Thermoelektrische Wärmepumpe im Fahrzeug vorhandenen Abwärmen auf ein höheres Temperaturniveau pumpt, um diese zur Heizung des Innenraums zu verwenden. Mit der dezentral im Fahrzeug angeordneten, vollkommen neuartigen Komponente kann im Heizbetrieb des Fahrzeugs damit Heiz-Energie eingespart werden und somit der signifikanten Reichweitenreduktion konventioneller Heizsystem entgegengewirkt werden.