

Abschlussbericht zum BMWK-Verbundprojekt NEKKA

„Entwicklung eines neuartigen elastokalorischen Klimasystems“

Teilvorhaben „Virtuelle Systembewertung sowie Validierung am Prüfstand“
TLK-Thermo GmbH, Braunschweig

Projektpartner:



Autoren: Dr.-Ing. Sven Försterling
Dipl.-Ing. Michael Bodmann
Dipl.-Ing. Norbert Stulgies
Dr.-Ing. Nicholas Lemke



**Finanziert von der
Europäischen Union**
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19I21050B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Kurze Darstellung	3
Aufgabenstellung	3
Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	10
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
Eingehende Darstellung (TLK-Thermo).....	13
Zuwendungsverwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen	13
AP 1 Anforderungs- und Testfalldefinition.....	13
UAP 1.1 Ableitung der Anforderungen an das Prototypensystem	13
UAP 1.2 Spezifikation der einzelnen Komponenten	21
UAP 1.4 Definition von Testfällen	21
AP 3 System-Modellierung und Simulation	22
UAP 3.1 Modellierung des elastokalorischen Subsystems.....	22
UAP 3.3 Gesamtsystems simulation (Prinzipsimulation).....	28
UAP 3.5 Simulationsbasierte Potentialabschätzung Testfälle	31
Weitere Arbeitspakete.....	33
UAP 2.3 Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung.....	33
UAP 2.4 Elastokalorische Charakterisierung.....	33
UAP 5.1 Prüfstandsdesign und Konstruktion der Komponenten.....	33
Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	35
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	35
Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse nach Verwertungsplan	36
Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	36
Literaturverzeichnis.....	37

Kurze Darstellung

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „NEKKA“ wird ein alternatives Klimatisierungssystem auf Basis des elastokalorischen Effekts für die Anwendung in Fahrzeugen entwickelt.

Die Herausforderungen dieser Entwicklung liegt in den folgenden Bereichen:

- Materialoptimierung und -herstellung (korrosionsbeständige, langzeitstabile Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen, die einen hohen COP ermöglichen).
- Simulationsgestützte Entwicklung des elastokalorischen Subsystems sowie des gesamten Produktprototypen (Kühl-/Heizsystem für den Automobilbereich).
- Entwicklung eines geeigneten Prüfsystems samt Messtechnik zur umfangreichen Evaluierung.
- Nach der Systemvalidierung auf dem Prüfstand war ursprünglich zum Projektende hin die Erprobung im Fahrzeug und damit eine Validierung in realer Umgebung vorgesehen.

Folgender Lösungsansatz ist für die Umsetzung ursprünglich geplant:

- Zunächst wird das FGL-Material für die Anwendung in Pkw-Klimaanlagen entwickelt.
- Auf der zweiten Stufe erfolgt der Einbau des FGL-Materials in das Hubelement.
- Aufbauend darauf kann über die dritte Stufe der Komponentendemonstrator realisiert werden.
- Im Anschluss erfolgt dessen Integration in den Fahrzeugkreislauf. Auf diese Weise entsteht ein Klimatisierungssystem, welches auf dem Systemprüfstand erprobt werden kann.
- Im letzten Schritt wird das Klimasystem in einem Versuchsfahrzeug verbaut. Der auf diese Weise erhaltene Fahrzeug-Demonstrator wird unter realen Bedingungen „auf der Straße“ getestet. Über dieses Fahrzeuggesamtsystem erfolgt die Ergebnisdarstellung des innovativen Klimatisierungssystems und die Validierung der im Projekt definierten KPIs.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines alternativen Klimatisierungssystems zur Erzielung besserer Effizienz (COP) und Umweltverträglichkeit sowie bei gleichzeitiger Reduzierung von Bauraum, Gewicht und Kosten.

Folgende Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Vorhabens seitens TLK-Thermo (TLK) erzielt werden:

- Erarbeitung von Randbedingungen und Vergleichsdaten für das Prototypensystem:
 - Aufbau eines Modelica/Dymola Modells für die simulative Referenzbetrachtung eines konventionellen mobilen Klima- und Heizsystems mit Wärmepumpenfunktion mit R-744 als Arbeitsmittel für E-Auto-Kleinwagen der Kompaktklasse (z.B. VW ID.3).
 - Simulative Berechnung von Referenzwerten für die Kälte- und Heizleistung sowie den COP (Coefficient of Performance) für unterschiedliche Umgebungstemperaturen und Feuchten.
 - Ermittlung statistisch berechneter Umgebungsrandbedingungen (Temperatur, Feuchte und Solarstrahlung) für Pkw in Deutschland und Europa basierend auf Wetterdaten, Bevölkerungsdichte, und landestypischen Nutzungsverhalten. Ableitung eines Temperaturclusters und Abschätzung des Energieverbrauchs für das konventionelle E-Referenz-Fahrzeug mit und ohne Klimatisierung für unterschiedlich Klimata in Deutschland und Europa.
 - Bereitstellung von Stoffdaten für Wasser/Glykol unter TILMedia.
- Aufbau eines thermischen Gesamtfahrzeugmodells für das Referenzfahrzeug mit R-744-System für Heizung und Kühlung als Vergleich.
- Planung von Prüfstandsaufbauten und Messmethodiken. Auswahl geeigneter Messgeräte und Sensorik.
- Simulative Auslegung und Design des Wasserkreislaufs für das elastokalorische System unter Verwendung der R-744 Referenzanlage für AC- und WP-Betrieb.
- Ableitung einer ersten Systemarchitektur für das elastokalorische System mit Hilfe des Simulationsmodells mit Wasserkreislauf. Einbindung eines elastokalorischen Teilmodells als FMU (Functional Mock-up Unit) in das Modelica Simulationsmodell für das Kühl- und Heizsystem und Umsetzung einer ersten Regelstrategie.
- Simulationsrechnungen mit dem elastokalorischen System für die Betriebsfälle Heizen und Kühlen und Ermittlung von Effizienzen für die festgelegten Randbedingungen. Vergleich der Ergebnisse mit dem Referenzsystem.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Heute verfügbare Fahrzeuge verwenden zum Kühlen der Fahrgastkabine Kompressionskältekreisläufe. Für batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge können damit auch zusätzliche Funktionen abgedeckt werden: das Kühlen der Batterie durch einen weiteren Verdampfer (Chiller) im Kühlmodus und das Heizen von Batterie und Kabine mittels der Heizfunktion im Wärmepumpenmodus. Dies führt insgesamt zu einem komplexen Kühlsystem, das mit geeignetem Kältemittel betrieben werden muss.

Im Hinblick auf Umweltfreundlichkeit ist zu beachten, dass es während der Betriebsdauer der Fahrzeuge durch unterschiedliche Effekte und zu Leckagen im Kältemittelkreislauf kommen kann. Das Kältemittel entweicht dabei in die Atmosphäre und trägt bei Verwendung von z.B. R-1234yf zusätzlich zur Erderwärmung bei. Alternativen wie Propan erfordern aufgrund der Brennbarkeit die Einführung eines Sekundärkreislaufs mit Wasser/Glykol zur Begrenzung der Kältemittelfüllmenge. Alternative Klima- und Heizsysteme, die das Arbeitsfluid Kohlendioxid verwenden, werden im Rahmen des Projekts als Referenzsystem betrachtet, das für mittlere Umgebungstemperaturen hohe energetische Effizienzen aufweist. Allerdings können sich hohe Umgebungstemperaturen aufgrund der überkritischen Betriebsweise im Vergleich zu anderen Kältemitteln energetisch nachteilig auf das System auswirken und zu einem Mehrverbrauch führen.

Um die Situation nachhaltig zu verbessern, zielt das hier beantragte Vorhaben NEKKA auf die Erforschung eines neuartigen Prinzips eines Fahrzeug-Klimatisierungssystems ab: Die Nutzung des elastokalorischen Effekts bietet das Potenzial einer deutlichen Effizienzsteigerung gegenüber herkömmlichen Klimaanlageanlagen. Das elastokalorische System verzichtet komplett auf leicht entzündliches oder treibhausschädliches Kältemittel. Gleichzeitig wird die Systemarchitektur vereinfacht, was zur Reduktion des benötigten Bauraums, zu Gewichtsreduktion sowie zu niedrigeren Systemkosten führt. Das hoch effiziente, kleine und kostengünstige elastokalorische System kann in allen Fahrzeugklassen zum Kühlen und Heizen eingesetzt werden.

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

Im Forschungsprojekt „NEKKA“ sind folgende Projektpartner beteiligt: Vitesco Technologies GmbH in Regensburg, Ingpus GmbH in Bochum, Universität des Saarlandes und die TLK-Thermo GmbH in Braunschweig.

In einer ersten Stufe wird das FGL-Material für die Anwendung in Pkw-Klimaanlagen entwickelt und in einem Materialprüfstand von Ingpus getestet. In einer zweiten Stufe wird es in ein Hubelement der Uni Saarbrücken eingebaut und dessen Funktionalität in einem Mechanik-Prüfstand getestet. Aufbauend wird in einer dritten Stufe ein Komponentendemonstrator realisiert, nachfolgend als „elastokalorisches System“ bezeichnet, der auf einem Funktionsprüfstand von Vitesco und der Uni Saarbrücken evaluiert wird. Parallel wird ein Simulati-

onsmodell des elastokalorischen Systems erstellt und von TLK in ein fahrzeugnahes Simulationsmodell mit Wasser- und Luftkreisläufen integriert. Weiterhin wird ein Gesamtfahrzeugmodell für die Bewertung herangezogen. Mit Hilfe der von TLK statistisch generierten mittleren Klima-Fahrzeug-Randbedingungen, einer Referenzanlage und einem Gesamtfahrzeugmodell wird simulativ ein Vergleich zwischen dem konventionellen R-744 Klima- und Heizmodul und dem elastokalorischen System durchgeführt.

Für die Erstellung des fahrzeugnahen Simulationsmodells und der Gesamtfahrzeugsimulation wird die Simulationsbibliothek „TIL Suite“ von TLK unter der Programmiersprache Modelica/Dymola verwendet. Das von Vitesco unter Matlab erstellte Kernmodell des elastokalorischen Systems wird über einen Modellaustausch als FMU in die Modelica Simulation eingebunden.

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

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in sieben Haupt-Arbeitspakete unterteilt. In Tabelle 1 sind die ursprünglichen Arbeitspakete unter Mitarbeit von TLK mit PM sowie die Leiter der einzelnen Arbeitspakete gemäß Projektskizze aufgelistet. Tabelle 2 zeigt die reale Mitarbeit von TLK.

Nr.	Arbeitspaket	Leitung	Mitarbeit PM TLK
0	Projektmanagement	Vitesco	3.00
0.1	Projektkoordination		1.00
0.2	Dokumentation und Ergebnisverbreitung		2.00
1	Anforderungs- und Testfalldefinition	Vitesco	6.00
1.1	Ableitung der Anforderungen an das Prototypsystem		3.00
1.2	Spezifikation der einzelnen Komponenten		1.00
1.3	Spezifikation der Materialien		
1.4	Definition von Testfällen		2.00
2	FGK-Entwicklung	Ingpuls	2.00
2.1	Legierungsdefinition		
2.2	Prozesskettenentwicklung FGL		
2.3	Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung		1.00
2.4	Elastokalorische Charakterisierung		1.00
2.5	Entwicklung Serienprozess		
3	System-Modellierung und -Simulation	Vitsco	12.00
3.1	Modellierung des elastokalorischen Subsystems		3.00
3.2	Optimierung der Spezifikationen		
3.3	Gesamtsystems simulation (Prinzip simulation)		5.00
3.4	Experimentelle Validation der Simulationsparameter		
3.5	Simulationsbasierte Potenzialabschätzung Testfälle		4.00
4	Prototypenentwicklung und Inbetriebnahme	UniSB	12.00
4.1	Ableitung der Systemarchitektur		6.00
4.2	Systemdesign und Konstruktion		2.00
4.3	Erste prototypische Umsetzung (3D-Druck)		
4.4	Fertigung und Montage finaler Prototyp		
4.5	Erstinbetriebnahme (trocken und nass)		4.00
5	Prüfstands aufbau und Prototyp evaluierung	UniSB	2.00
5.1	Prüfstand design und Konstruktion der Komponenten		2.00
5.2	Aufbau integrierter Prüfstände		
5.3	Elastokalorische Evaluierung erster Prototyp		
5.4	Elastokalorische Evaluierung finaler Prototyp		
6	Prototypenvalidierung (auf dem Prüfstand)	TLK	25.00
6.1	Installation des NEKKA-Systems in einen Prüfstand		12.00
6.2	Prüfstand tests gemäß AP1		6.00
6.3	Gesamtsystems simulation (Detailsimulation)		4.00
6.4	Optimierungsschleife		3.00
7	Optimierung für Fahrzeugintegrationsfähigkeit	Vitesco	6.00
7.1	Definition von Maßnahmen		
7.2	Bewertung von Maßnahmen		4.00
7.4	Implementierung der Maßnahmen		2.00

Tabelle 1: Arbeitspakete des Projekts NEKKA unter Mitarbeit von TLK gemäß Projektskizze.

Nr.	Arbeitspaket	Leitung	Mitarbeit PM TLK
0	Projektmanagement	Vitesco	3.00
0.1	Projektkoordination		1.00
0.2	Dokumentation und Ergebnisverbreitung		2.00
1	Anforderungs- und Testfalldefinition	Vitesco	6.00
1.1	Ableitung der Anforderungen an das Prototypsystem		3.00
1.2	Spezifikation der einzelnen Komponenten		1.00
1.3	Spezifikation der Materialien		
1.4	Definition von Testfällen		2.00
2	FGK-Entwicklung	Ingpuls	2.00
2.1	Legierungsdefinition		
2.2	Prozesskettenentwicklung FGL		
2.3	Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung		1.00
2.4	Elastokalorische Charakterisierung		1.00
2.5	Entwicklung Serienprozess		
3	System-Modellierung und -Simulation	Vitsco	10.00
3.1	Modellierung des elastokalorischen Subsystems		3.00
3.2	Optimierung der Spezifikationen		
3.3	Gesamtsystems simulation (Prinzipsimulation)		4.00
3.4	Experimentelle Validation der Simulationsparameter		
3.5	Simulationsbasierte Potenzialabschätzung Testfälle		3.00
4	Prototypenentwicklung und Inbetriebnahme	UniSB	12.00
4.1	Ableitung der Systemarchitektur		6.00
4.2	Systemdesign und Konstruktion		2.00
4.3	Erste prototypische Umsetzung (3D-Druck)		
4.4	Fertigung und Montage finaler Prototyp		
4.5	Erstinbetriebnahme (trocken und nass)		4.00
5	Prüfstandsaufbau und Prototypevaluierung	UniSB	33.00
5.1	Prüfstanddesign und Konstruktion der Komponenten		2.00
5.2	Aufbau integrierter Prüfstände		
5.3	Elastokalorische Evaluierung erster Prototyp		
5.4	Elastokalorische Evaluierung finaler Prototyp		
5.5	Evaluierung gekoppelter Betrieb Modell und Messung		25.00
5.6	Potenzialanalyse		6.00

Tabelle 2: Tatsächliche Arbeitspakete des Projekts NEKKA unter Mitarbeit von TLK.

Bild 1 zeigt den ursprünglichen Zeit- und Arbeitsplan mit Arbeitspaketen unter Mitarbeit von TLK gemäß der eingereichten Projektskizze. Der tatsächliche Zeit- und Arbeitsplan ist in Bild 2 dargestellt. Die Projektlaufzeit war auf 3 Jahre befristet, allerdings wurde das Projekt im Projektmonat 21 auf Initiative des Konsortialsführers Vitesco vorzeitig beendet.

Wissenschaftlicher und technischer Stand

Modelica ist derzeit eine bevorzugt verwendete Sprache bei der Modellierung thermischer Systeme und für die Abbildung von komplexen Thermomanagementsystemen in Fahrzeugen sowie für die Gesamtfahrzeugsimulation von Elektrofahrzeugen mit Batteriekühlung geeignet (vgl. [1], [2], [3], [4], [5]). Modelica kann unter verschiedenen gleichungsbasierten Simulatoren wie z. B. unter Dymola, SimulationX, OpenModelica, Modelon Impact, Wolfram SystemModeler oder MapleSim verwendet werden. Als Beispiel für eine weitere gleichungsbasierte Simulationsumgebung kann noch Simscape genannt werden das allerdings keine Open-Access Modellierungssprache wie Modelica verwendet, sondern auf einer speziellen Spracherweiterung zu Simulink basiert (vgl. [6]).

Die von TLK entwickelte Modelica Bibliothek TIL Suite enthält die wesentlichen Grundmodelle für die Abbildung von Kälte- und Kühlkreisläufen sowie die Luftseite und kann mittels Einbindung von weiteren Zusatzbibliotheken auch für komplexe Modellierungsaufgaben im Gesamtfahrzeug mit thermischen Kabinen- und Batteriemodell verwendet werden (vgl. [4], [5], [7]).

Während die wesentlichen Komponenten eines Klima-, Heiz- und Kühlsystems in den verschiedenen Modelica-Modell-Bibliotheken verfügbar sind, besteht die eigentliche Herausforderung bei der Erstellung eines Simulationsmodells für das elastokalorische Submodell darin, einen Modellierungsansatz zu finden, der in Echtzeit rechnet und mit den vorhandenen Modellen zusammen verwendet werden kann.

Das von Vitesco unter Matlab entwickelte echtzeitfähige Submodell wird im Rahmen dieses Projekts als FMU in die Modelica-Simulation integriert.

Für das Referenzsystem wird ein konventionelles mobiles R-744 Klima- und Wärmepumpensystem ausgewählt (vgl. [8], [9]) und simulativ abgebildet. Die Auslegung des Systems entspricht hinsichtlich der Leistungsklasse einem PKW der Kompaktklasse (z.B. VW ID.3).

Die Ermittlung repräsentativer ortsabhängiger Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Solarstrahlung) wurde in der Vergangenheit bereits für konventionelle Pkw durchgeführt (vgl. [10], [11]). Teilweise wurden diese Daten in der Vergangenheit auch für sehr spezifische Anwendungen für E-Fahrzeuge angepasst (vgl. [5]). Allerdings fehlt eine aktuelle Anpassung an das heutige Fahrzeug-Nutzungsverhalten mit aktuellen Klimadaten.

Dem Antragsteller ist auch nach aktueller Informationsrecherche (Literatur- und Patentrecherchen) nicht bekannt, dass die spezifischen Vorhaben von TLK im Projekt NEKKA bereits Gegenstand anderweitiger Forschungen, Entwicklungen, Untersuchungen oder Patente sind. Dementsprechend ist auch nicht zu erwarten, dass Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen können.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Forschungsprojekt „NEKKA“ sind folgende Projektpartner beteiligt: Vitesco Technologies GmbH in Regensburg (Konsortialführer), Ingpuls GmbH in Bochum, Universität des Saarlandes und die TLK-Thermo GmbH in Braunschweig.

Die Aufgabenverteilung zwischen den verschiedenen Projektpartnern ist dabei laut Projektskizze wie folgt aufgeteilt:

Vitesco Technologies GmbH

- Organisation Konsortium, Projektleitung, Dokumentation und Ergebnisverbreitung.
- Technische Definition des NEKKA-Systems.
- Modellierung des elastokalorischen Subsystems.
- Modellparametrisierung und Verifizierung der Simulation.
- Optimierung am Antriebssystem und Anpassung der Systemspezifikationen.
- Entwicklung eines Regealgorithmus für das System.
- Integration der Subsysteme in das elastokalorische Gesamtmodell.
- Export eines in Echtzeit laufenden Modells als FMU für die Fahrzeugbetrachtungen.
- Validierung des Modells mit Messdaten vom Prüfstand.
- Simulationsbasierte Potentialabschätzung.
- Prototypenentwicklung mittels Simulation, CAD und 3D-Druck.
- Fertigung und Montage eines finalen Prototyps.
- Integration des Elastokalorischen-Systems in ein Versuchsfahrzeug.

TLK-Thermo

- Erarbeitung der Randbedingungen eines elastokalorischen Fahrzeug-Klimasystems.
- Verständnis der FGL-Materialien aus Systemsicht.
- Erstellung einer physikalisch motivierten Simulationsbibliothek auf Komponenten- und Systemebene.
- Aufbau einer ersten fahrzeugnahen Gesamtsimulation mit elastokalorischem Fahrzeug-Klimasystem.
- Potentialabschätzung und Systembewertung mit Simulationen.
- Entwicklung eines für den Fahrzeugeinsatz optimierten Prototypen.
- Aufbau von teilweise dauerlauffähigen Systemprüfständen mit Prozessregelung.
- Detaillierte Erkenntnis über das Prototypenverhalten im Systemkontext unter maximal unterschiedlichen Randbedingungen.
- Erstellung einer realistischen kalibrierten Gesamtsimulation.
- Überprüfung der Ergebnisse im Fahrzeug.

Ingpuls GmbH

- Erstellung eines Lastenheftes für die Ziel-Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen und -komponenten.
- Entwicklung der im Lastenheft spezifizierten FGL im Labormaßstab.
- Skalierung der Produktion dieser FGL auf Serien-Produktionslinie.
- Verwendung von experimentellen Daten zur Steuerung der Parameter der Simulation
- Vergleich von Simulationsergebnissen und Messdaten.
- Integration der FGL-Halbzeuge in Prototypen.

Universität des Saarlandes

- Koordination der Arbeiten und Kommunikation, Dokumentation und Ergebnisverbreitung, Konferenzen und Messen.
- Erarbeitung des Verständnisses für Anforderungen und Randbedingungen im Automotive Bereich.
- Übertragung der technischen Ansätze von EC-Einzelementen auf ein EC-System.
- Definition von Schnittstellen zur Materialentwicklung.
- Erarbeitung von Materialspezifikationen aus Sicht der EC-Komponenten, des EC-Systems sowie der elastokalorischen Prozessführung.
- Iterative Charakterisierung neuentwickelter Materialien (mechanisch, thermomechanisch, Ermüdungsmechanismen).
- Definition des finalen Materialzustands am Ende des Serienprozesses.
- Entwicklung eines Simulations-Tools für Design und Auslegung von elastokalorischen Kühlsystemen sowie deren Potentialabschätzung.
- Prototypenentwicklung und Inbetriebnahme.
- Prüfstandsaufbau und Prototypenevaluierung.
- Fahrzeugintegration und Validierung.

Eingehende Darstellung (TLK-Thermo)

Zuwendungsverwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Die **zentralen** Arbeitspakete von TLK waren nach Tabelle 2 in AP 1 Anforderungs- und Testfalldefinition sowie in AP 3 System-Modellierung und Simulation:

- UAP 1.1 Ableitung der Anforderungen an das Prototypensystem
- UAP 1.2 Spezifikation der einzelnen Komponenten
- UAP 1.4 Definition von Testfällen
- UAP 3.1 Modellierung des elastokalorischen Subsystems
- UAP 3.3 Gesamtsystems simulation (Prinzip simulation)
- UAP 3.5 Simulationsbasierte Potentialabschätzung Testfälle

Weitere Mitarbeit ergab sich in AP 2 FGK-Entwicklung, in AP 4 Prototypenentwicklung sowie in AP 5 Prüfstands Aufbau und Prototypenevaluierung:

- UAP 2.3 Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung
- UAP 2.4 Elastokalorische Charakterisierung
- UAP 4.1 Ableitung der Systemarchitektur
- UAP 4.2 Systemdesign
- UAP 5.1 Prüfstandsdesign und Konstruktion der Komponenten

AP 1 Anforderungs- und Testfalldefinition

In den folgenden Abschnitten wird im UAP 1.1 „Ableitung der Anforderungen an das Prototypensystem“ das konventionelle mobile R-744 Referenzsystem definiert sowie ein entsprechendes Modelica Modell aufgebaut. Damit werden Werte für die Kälte- und Heizleistung für unterschiedliche Umgebungstemperaturen und Feuchten berechnet und als Anforderungen für das elastokalorische Prototypensystem abgeleitet. In UAP 1.2 „Spezifikation der einzelnen Komponenten“ werden die einzelnen technischen Anforderungen an die einzelnen Komponenten des Thermosystems simulativ ermittelt und die Auslegung der Komponenten spezifiziert. Mit Hilfe von Systemsimulationen und statistischen Klimarandbedingungen werden in UAP 1.4 „Definition von Testfällen“ Testfälle definiert.

UAP 1.1 Ableitung der Anforderungen an das Prototypensystem

Als konventionelles **Referenzsystem** wird ein mobiles Klima- und Heizsystem mit Wärmepumpenfunktion und dem Arbeitsfluid CO₂ ausgewählt. Hinsichtlich der Leistung entspricht die Auslegung dem System in einem PKW der Kompaktklasse (z.B. VW ID.3). Bild 3 zeigt den typischen Aufbau eines typischen elektrischen Referenzfahrzeugs mit Batterie und den Aufbau des Heiz- und Klimasystems mit R-744 als Arbeitsmittel. Neben der Konditionierung

der Innenraumlufte im Komfortbereich wird über einen Sekundärkreislauf mit Chiller das im Fahrzeugboden verbaute Batteriesystem im zulässigen Temperaturbereich temperiert.

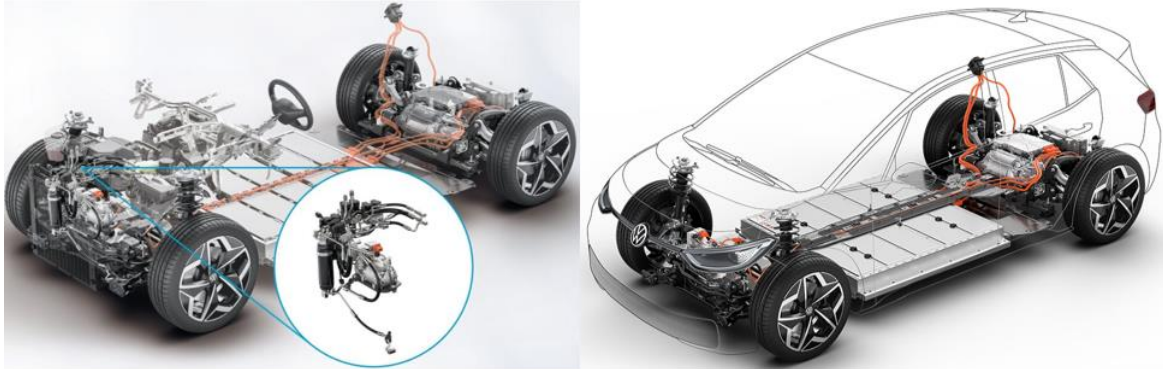


Bild 3: Referenzfahrzeug – Kleinwagen in der Kompaktklasse z.B. ID.3 mit R-744 Klima- und Heizsystem (vgl. [12], [13]).

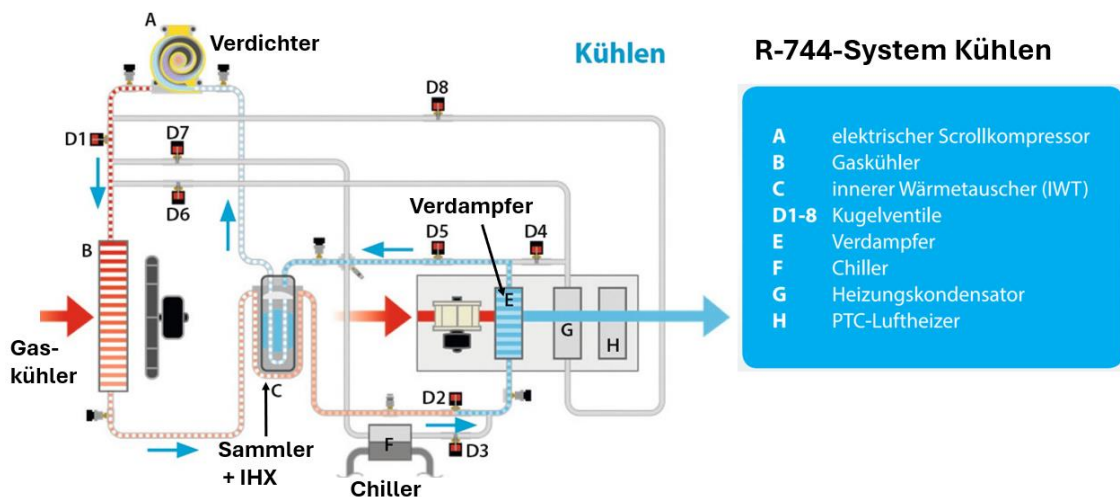


Bild 4: Mobiles R-744 für Klima- und Heizsystem: AC-Fall (vgl. [13], [14]).

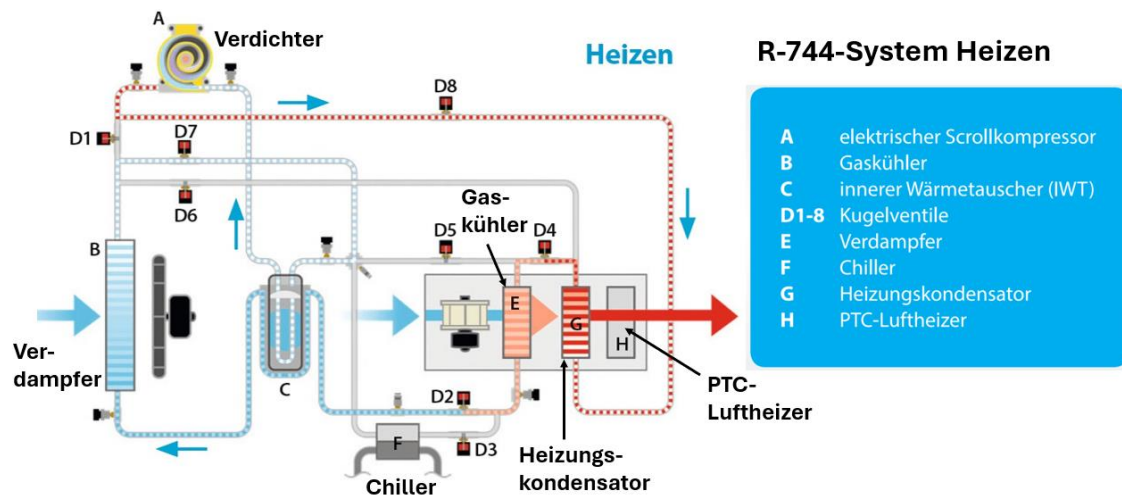


Bild 5: Mobiles R-744 für Klima- und Heizsystem: WP-Fall (vgl. [13], [14]).

Bild 4 zeigt den Aufbau und die Durchströmung des Systems für den Klimatisierungs- und Kühlbetrieb und Bild 5 analog die Verschaltung für den Heizbetrieb mittels Wärmepumpe. Durch den Einbau entsprechender Umschaltventile kann das System je nach Anforderungen zwischen den Betriebsfällen Heiz- und Kühlbetrieb und Reheat umgeschaltet werden.

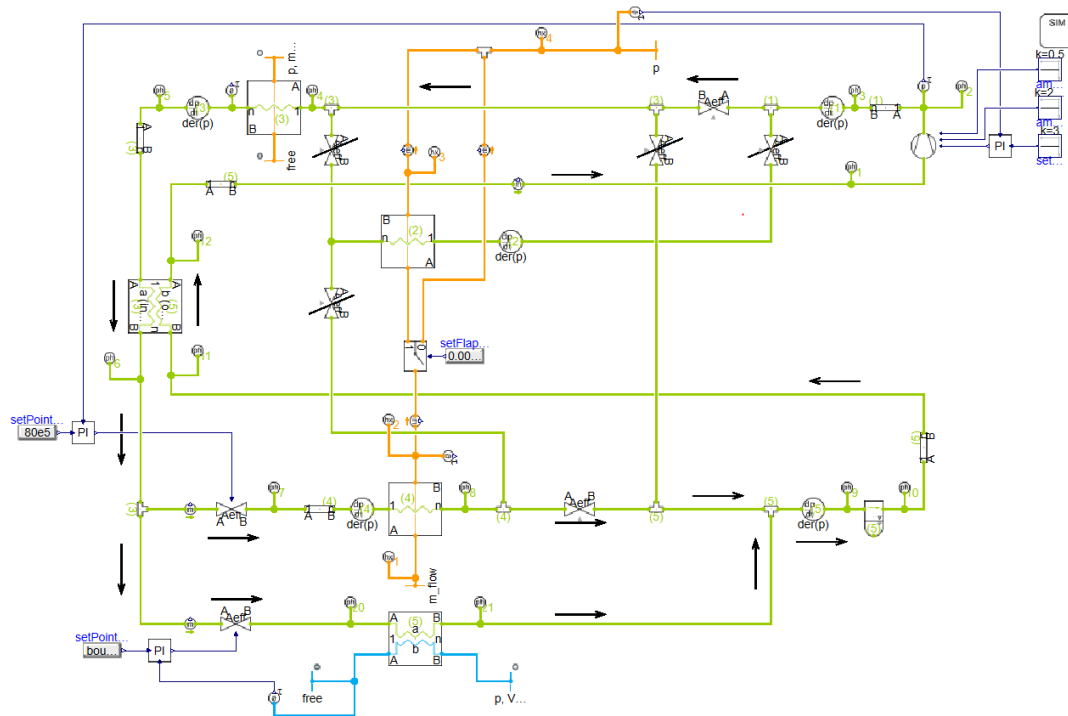


Bild 6: Graphische Darstellung des Simulationsmodells unter Modelica/Dymola und TIL Suite für das mobile R-744 Referenzklima- und Heizsystem.

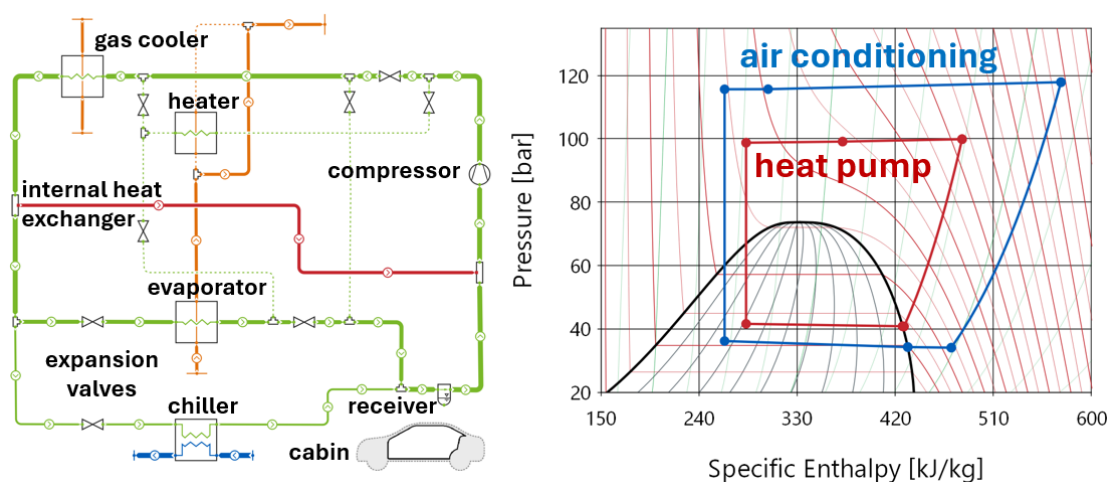


Bild 7: Darstellung der Simulationsergebnisse für das mobile R-744 Referenzsystems für Klima- und Heizfall mit Ankopplung an ein thermisches Fahrzeugmodell.

Die Berechnung typischer Vergleichswerte für die Bewertung des elastokalorischen Systems mit dem Referenzsystem erfolgt simulativ. Dazu wird unter der Programmiersprache Modelica/Dymola unter Verwendung der Modellbibliothek TIL Suite das in Bild 6 graphisch darge-

stellte Simulationsmodell aufgebaut und mit typischen Geometriedaten parametrisiert. Für die automatisierte Darstellung der Ergebnisse wird die TLK Software DaVE herangezogen. Bild 7 zeigt die Ergebnisse exemplarisch im Flussdiagramm sowie im p,h-Diagramm.

Das Simulationsmodell erlaubt die Berechnung der Referenzwerte für Kälte- und Heizleistung sowie COP für typische Randbedingungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Feuchten. Ergebnisse bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und erforderlichen Anforderungen für die Konditionierung von Innenraum- und die Batterie über den Chiller sind in Bild 8 tabellarisch und in Bild 9 graphisch über der Umgebungstemperatur dargestellt.

Die Ergebnisse werden den Projektpartnern als Polynom der Kühl- und Heizleistung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur zur Verfügung gestellt.

Punkte							
	$T_{air} / \varphi_{air} / m_{air}$	$T_{air-out} (SetPoint)$		$Q_{Chiller}$	$Q_{0-gesamt} [W]$	$Q_{air} [W]$	$COP [-]$
AC	20°C 40% 300 kg/h	3°C (3)	Set Point	2000 W	3700 W	1700 W	3.6
AC Reheat	20°C 80% 180 kg/h	10°C (3)	Set Point	2000 W	3700 W	1700 W	3.5
AC	25°C 40% 300 kg/h	3°C (3)	Set Point	2000 W	4500 W	2500 W	2.6
AC	30°C 40% 300 kg/h	3°C (3)	Set Point	2000 W	5500 W	3500 W	1.9
AC	35°C 40% 300 kg/h	3°C (3)	Set Point	2000 W	6500 W	4500 W	1.4
AC	40°C 40% 300 kg/h	6°C (3)	max. Punkt	2000 W	7500 W	5500 W	1.25
AC	45°C 25% 460 kg/h	14.6°C (3)	max. Punkt	2000 W	5700 W	7700 W	1.2
HP	-20°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		4600 W	2.2*
HP	-15°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		4400 W	2.4*
HP	-10°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		4100 W	2.5*
HP	-5°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		3800 W	2.6*
HP	0°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		3500 W	2.7*
HP	5°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		3200 W	2.75
HP	10°C 210 kg/h	60°C (60)	Set Point	0 W		2900 W	2.8

*bei hoher Luftfeuchte zusätzlich Vereisung und Abtauung nötig

Bild 8: Testmatrix und stationäre Simulationsergebnisse für R-744 Referenzanlage für AC- und HP-Randbedingungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Innenraumanforderungen.

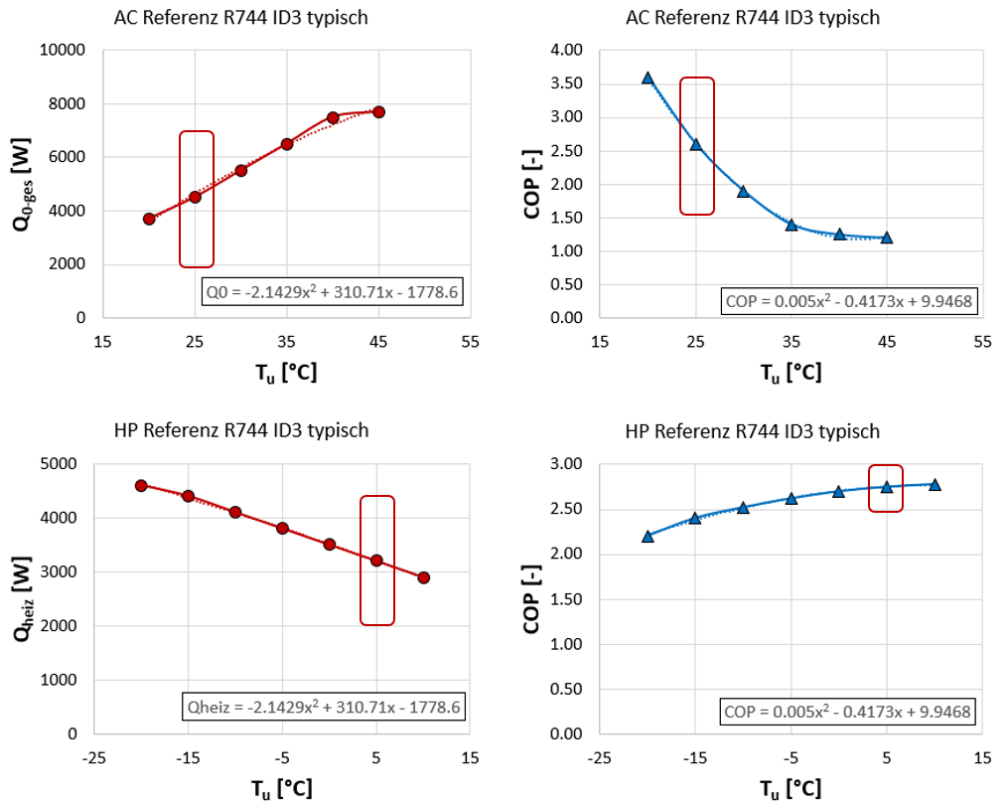
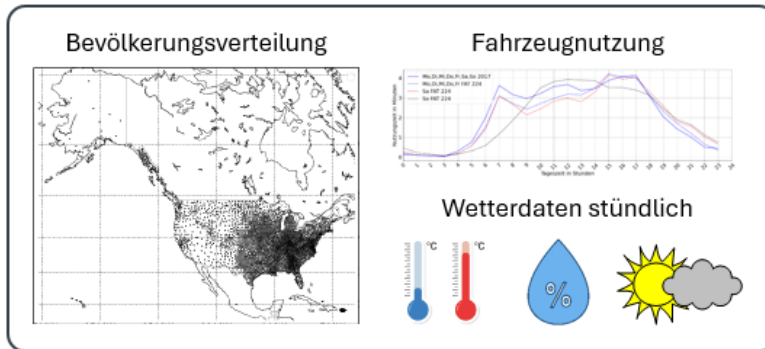


Bild 9: Stationäre Simulationsergebnisse für Kälte- und Heizleistung sowie für COP der R-744 Referenzanlage für AC und HP-Randbedingungen dargestellt über der Umgebungstemperatur.

Basierend auf aktuellen mittleren weltweit verfügbaren stündlich aufgelösten Wetterdaten der Software METEONORM (vgl. [15]), gewichtet mit der lokalen Bevölkerungsdichte auf Landkreisebene und dem landespezifischen Nutzungsverhalten von Pkw, wird das prozentuale Auftreten von Umgebungsrandbedingungen (Temperatur, Feuchte und Solarstrahlung), unter denen Pkw in Europa und weltweit genutzt werden, ermittelt (vgl. [16]).

Mittels dieser statistisch ermittelten Daten für Deutschland und Europa werden Simulationsrechnungen für die unterschiedlichen Temperaturbereiche zur Ermittlung typischer Leistungen und COPs durchgeführt. Hiermit wird eine Abschätzung des Energieverbrauchs für das konventionelle Heiz- und Klimasystem durchgeführt und der Energieverbrauch für die gesamte Lebensdauer des definierten E-Referenz-Fahrzeugs mit und ohne Heizung und Klimatisierung für unterschiedliche Klimata in Deutschland und Europa abgeschätzt.

Bild 10 und Bild 11 zeigen die von der TLK neu erstellten statistischen Daten, die im Vergleich zu der 2009 erstellten FAT Studie [11] an das aktuelle Nutzungsverhalten und die aktuellen Klimadaten der neusten METEONORM Version 8 [15] angepasst wurden. Darüber hinaus können die aktuell erstellten Daten über ein online-tool (<https://fat.tlk-thermo.com/>) über das Internet abgerufen werden. In Bild 11 sind die Nutzungshäufigkeiten für Pkw in Temperaturintervallen von 5 K unter Berücksichtigung von Solarstrahlung und Luftfeuchtigkeit für Deutschland (oben) und für Europa (unten) aufgetragen.



▪ Bericht beim VDA unter:
<https://tinyurl.com/5yfrfn29>

▪ Web-Tool:
<https://fat.tlk-thermo.com/>

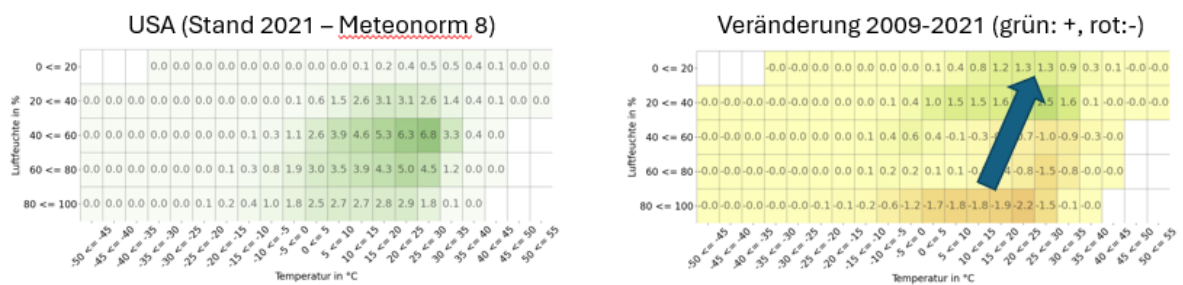


Bild 10: Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen (vgl. [11], [15], [16]).

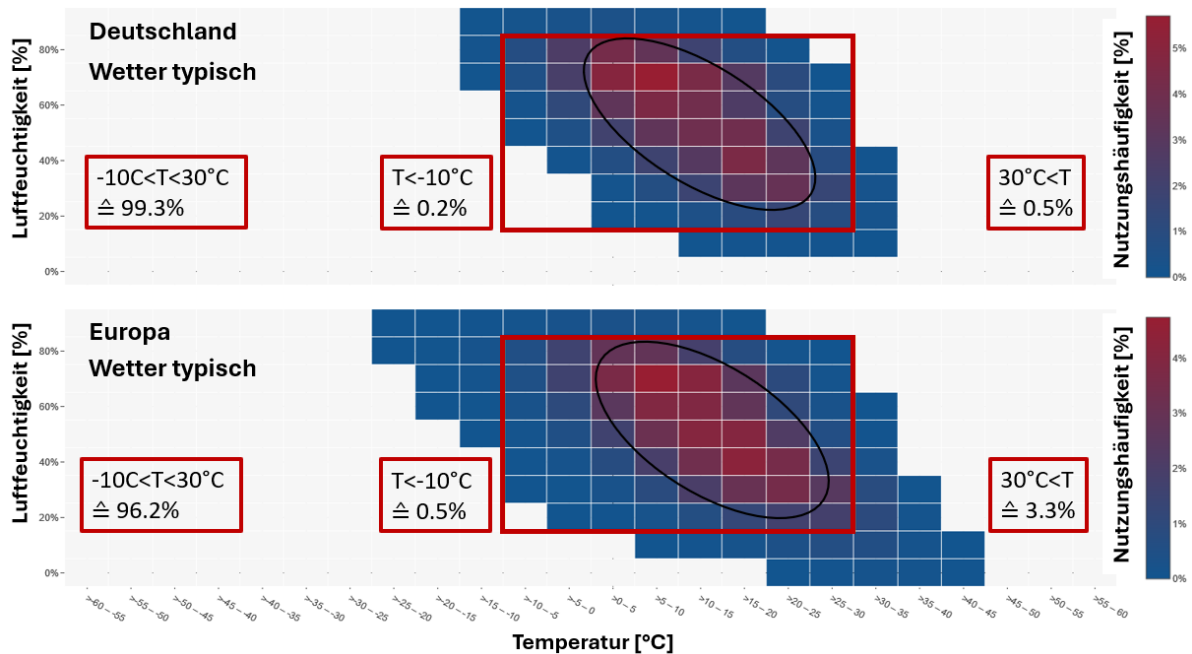


Bild 11: Klimadaten und Nutzungsverhalten für Deutschland und Europa für typische Wetterbedingungen (vgl. [15], [16]).

Daraus geht hervor, dass in Deutschland 99% und Europa 96% der Fahrten bei Umgebungstemperaturen zwischen -10°C und 30°C stattfinden. Der Nutzungsanteil über 30°C beträgt 0,5% (3,3% europaweit) und unter -10°C nur 0,2% der Fahrten (0,5% europaweit).

Im nächsten Schritt wird der Gesamt-Energieverbrauch für das Referenzsystem für Heizung und Kühlung basierend auf den statistischen Nutzungsdaten und den oben in Bild 9 berechneten Leistungen und Wirkungsgraden für die Lebensdauer des Referenzfahrzeugs abgeschätzt. Die Gesamtbetriebsstunden werden mit 15.000 h angenommen, wovon 11.000 h auf den Fahrbetrieb entfallen und 4.000 h auf das Laden. In Bild 12 sind die unterschiedlichen Betriebsweisen des Systems (Heizung, Kühlung und Reheat) für die unterschiedlichen Temperaturklassen dargestellt.

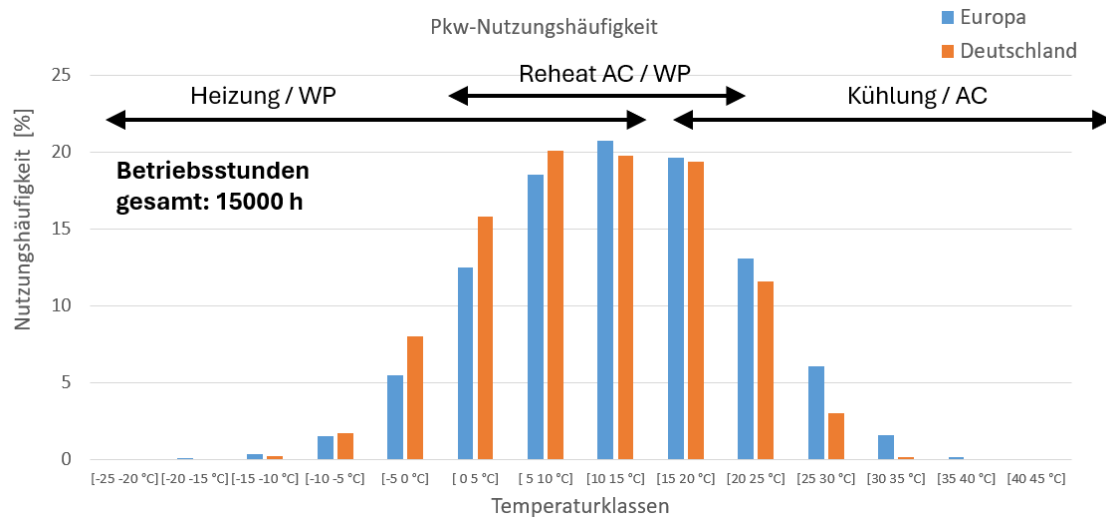


Bild 12: Nutzungshäufigkeiten von Pkw in Deutschland und Europa, aufgetragen für verschiedene Temperaturklassen.

Die weitere Abschätzung basiert auf zwei Szenarien für die Kühl- und Heizleistung: ein Szenario mit minimaler Leistung von 2-3 kW und eines mit maximaler Leistung von 3,2-7,5 kW. Als Gesamtfahrleistung werden 300.000 km und als Verbrauch 19,3 kWh/100km (vgl. [17]) angenommen.

Bild 13 zeigt die Energieverbräuche aufgetragen über die Temperaturklassen für die Leistungsszenarien für Deutschland und Europa. Bild 14 zeigt die kumulierten Energieverbräuche für Deutschland und Europa jeweils für die beiden Szenarien für minimale und maximale Leistung. Als Gesamtverbrauch des Fahrzeugs werden 57.900 kWh berechnet und als Referenzwert der Energieverbrauchsberechnung des Heizungs- und Kühlsystems zugrunde gelegt. Damit ergibt sich für Deutschland ein Energieverbrauch von rund 14-24% für das Heiz- und Kühlsystem bezogen auf den Gesamtverbrauch. Im Vergleich zur Betrachtung von Europa ist in Deutschland mit einem höherem Energieverbrauch für das Heizen zu rechnen.

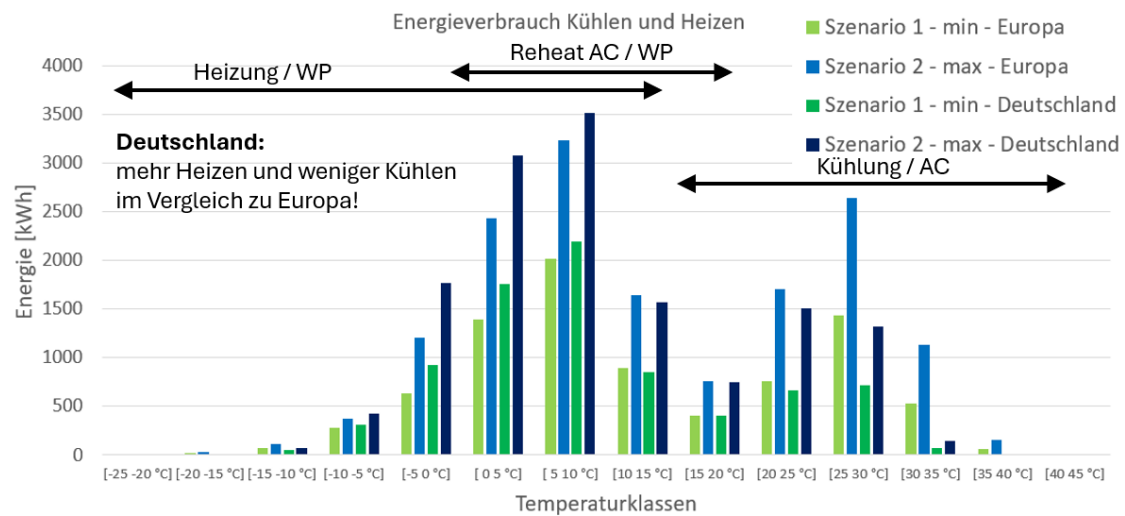


Bild 13: Abschätzung des Energieverbrauchs für Kühlen und Heizen des Referenzfahrzeugs in Deutschland und Europa, aufgetragen für verschiedene Temperaturklassen.

Energiebedarf Heizen Kühlen Gesamtlebensdauer

Betriebsstunden: 15000 h

		Szenario	Deutschland		Europa	
Heizen	Energie- verbrauch	Minimale Leistung	5237 kWh	9.0%*	4419 kWh	7.6%*
Kühlen			2709 kWh	4.7%*	4082 kWh	7.1%*
Summe			7949 kWh	13.7%*	8501 kWh	14.7%*
Heizen	Energie- verbrauch	Maximale Leistung	5288 kWh	15.3%*	7394 kWh	12.8%*
Kühlen			8844 kWh	9.1%*	8039 kWh	13.9%*
Summe			14132 kWh	24.4%*	15434 kWh	26.7%*

Testverbrauch: 19.3 kWh/100 km

Fahrleistung: 300 000 km

Verbrauch gesamt: 57 900 kWh

Deutschland: mehr Heizen und
weniger Kühlen im Vergleich zu Europa!

*bezogen auf Referenzwert
57 900 kWh

Bild 14: Abschätzung des Energieverbrauchs für Kühlen und Heizen des Referenzfahrzeugs in Deutschland und Europa aufgetragen für verschiedene Temperaturklassen.

Um die einheitliche Berechnung der Stoffdaten zu gewährleisten, hat TLK allen Projektpartnern die Software TILMedia mit Stoffdaten für Wasser/Glykol bereitgestellt. Hiermit können Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Viskosität, Ausdehnungskoeffizient, Prandl-Zahl, Enthalpie und Entropie als Funktion der Temperatur für unterschiedliche Glykol-Konzentrationen berechnet werden. Das elastokalorische System soll mit einer Mischung von 50/50m% Wasser/Glysantin als Frostschutz bis -38°C betrieben werden.

UAP 1.2 Spezifikation der einzelnen Komponenten

Basierend auf dem in UAP 1.1 definierten Referenzsystem für Heizen und Kühlen und des dafür erstellten Simulationsmodells wurden die technischen Anforderungen an die einzelnen Komponenten des elastokalorischen Therosystems simulativ ermittelt. Anhand von typischen Massenströmen von Wasser/Glykol werden im nächsten Schritt Druckverluste und Wärmeübergänge für das FGL-System berechnet. Luftseitig erfolgt die Auslegung der Wärmeübertrager näherungsweise in Anlehnung an die Geometrien des Referenzsystems (vgl. Bild 15). Die Flüssigkeitsseite wird basierend aus Erfahrungswerten hinsichtlich Wärmeübergang und Druckverlust so ausgelegt, dass die Zielleistungen abgebildet werden können. Für die wasserseitige Auslegung werden die Wärmeübergangsbeziehungen von Gnielinski und Dittus Boelter (vgl. [18], [19]) verwendet. Der Druckabfall wurde für raue Rohrleitungen mit Hilfe der Gleichung von Swamee-Jain abgeschätzt (vgl. [20], [21]). Die Auslegung des luftseitigen Wärmeübergangs erfolgt nach Chang und Wang (vgl. [22]).

AC-Betrieb + Reheat

Gaskühler Front, MPET

Axiallüfter 2160 kg/h idle, w-abhängig

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx 15-45^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} \approx T_{\text{Luft,ein}} + \Delta T$$



HP-Betrieb

Verdampfer Front, MPET

Axiallüfter Axiallüfter 2160 kg/h

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx -25-15^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} \approx T_{\text{Luft,ein}} - \Delta T$$

Referenz Geometrien

<input type="checkbox"/> hxHeight	0.45 m
<input type="checkbox"/> lengthOrthogonal	0.45 m
<input type="checkbox"/> hxWidth	0.6 m
<input type="checkbox"/> lengthAlongTubes	0.6 m
<input type="checkbox"/> hxDepth	0.015 m
<input type="checkbox"/> nLayers	1
<input type="checkbox"/> nPassesPerLayer	2

Heizgaskühler HVAC innen, MPET

Radiallüfter 150 .. 550 kg/h

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx 3-20^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} = 3-20^{\circ}\text{C} + \Delta T_{\text{reheat}}$$



Heizgaskühler HVAC innen, MPET

Radiallüfter 150 .. 550 kg/h

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx 30^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} \approx 60^{\circ}\text{C}$$

<input type="checkbox"/> hxHeight	0.23 m
<input type="checkbox"/> lengthOrthogonal	0.25 m
<input type="checkbox"/> hxWidth	0.25 m
<input type="checkbox"/> lengthAlongTubes	0.25 m
<input type="checkbox"/> hxDepth	0.04 m
<input type="checkbox"/> nLayers	2
<input type="checkbox"/> nPassesPerLayer	3

Verdampfer HVAC innen, MPET

Radiallüfter 150 .. 550 kg/h

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx 15-65^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} \approx 3-20^{\circ}\text{C}$$



Gaskühler HVAC innen, MPET

Radiallüfter 150 .. 550 kg/h

$$T_{\text{Luft,ein}} \approx -25-15^{\circ}\text{C}; T_{\text{Luft,aus}} \approx 30^{\circ}\text{C}$$

<input type="checkbox"/> hxHeight	0.23 m
<input type="checkbox"/> lengthOrthogonal	0.25 m
<input type="checkbox"/> hxWidth	0.25 m
<input type="checkbox"/> lengthAlongTubes	0.23 m
<input type="checkbox"/> hxDepth	0.04 m
<input type="checkbox"/> nLayers	2
<input type="checkbox"/> nPassesPerLayer	3

Chiller innen, Platte

Pumpe 5-20 l/min

$$T_{\text{H}_2\text{O,ein}} \approx 30^{\circ}\text{C}; T_{\text{H}_2\text{O,ein}} \approx 25^{\circ}\text{C}$$



Chiller innen, Platte

Pumpe 5-20 l/min

$$T_{\text{H}_2\text{O,ein}} \approx 30^{\circ}\text{C}; T_{\text{H}_2\text{O,ein}} \approx 25^{\circ}\text{C}$$

<input type="checkbox"/> numberOfPlates	20
<input type="checkbox"/> length	0.1 m
<input type="checkbox"/> width	0.08 m
<input type="checkbox"/> phi	35 deg
<input type="checkbox"/> wallThickness	0.00035 m
<input type="checkbox"/> patternAmplitude	0.002 m
<input type="checkbox"/> patternWaveLen...	0.0126 m
<input type="checkbox"/> geometryIsValid	true
<input type="checkbox"/> height	0.083 m

Bild 15: Basierend auf den Komponenten des Referenzsystem werden mit Wasser/Glykol durchströmte Komponenten für die Wärmeübertrager spezifiziert.

UAP 1.4 Definition von Testfällen

Mit Hilfe der Systemsimulation und den statistischen Klimarandbedingungen (siehe UA 1.1 + UA 1.2) wurden erste typische, auf dem Referenzsystem basierende Randbedingungen für die in AP 5 durchzuführenden Prüfstandtests ermittelt. Unter Anwendung von Erfahrungen aus der DoE-Messplanerstellung wurde daraus eine kompakte erste Messmatrix mit stationären Betriebspunkten abgeleitet (siehe Bild 8). Mit Hilfe dieser Toolkette können im Verlauf des Projektes weitere entsprechend verfeinerte Randbedingungen für den ersten elastokalorischen Prototypen berechnet werden. Für die dynamischen Untersuchungen wurden zum

einen Randbedingungen für Abkühlversuche und Aufheizvorgänge mit Einbindung einer Fahrzeugkabine definiert, zum andern Randbedingungen (Fahrzyklen und Klimabedingungen) für die Gesamtfahrzeugsimulation jeweils für die Orte Athen, Frankfurt und Trondheim.

Definition von Testfällen

DoE – Messplan modellbasiert

Model function $\hat{\eta}(\hat{x}, \hat{\theta})$ exists as FMU:

Using model FMU for DOE

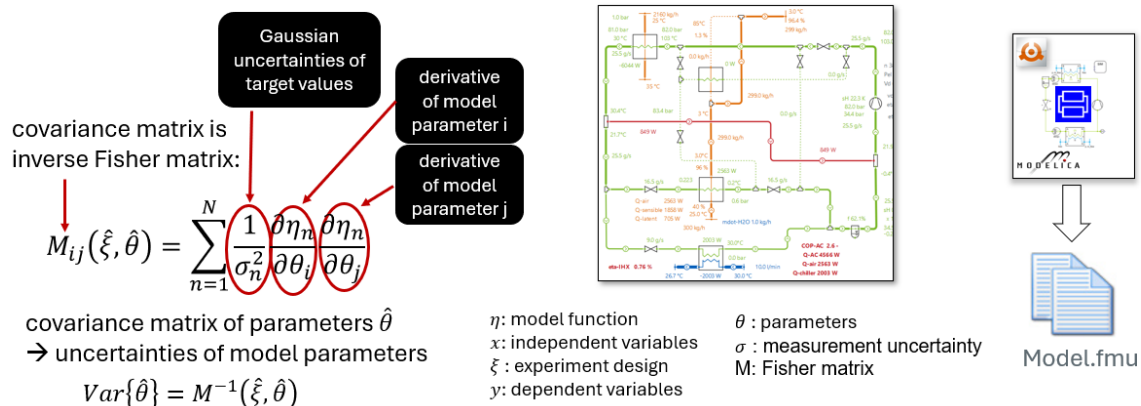


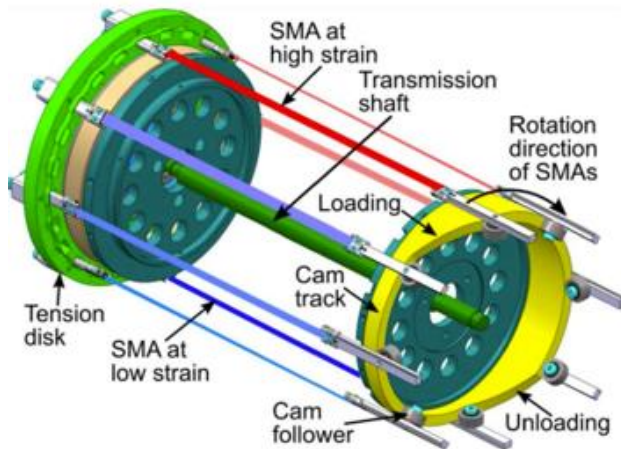
Bild 16: Toolkette für die modellbasierte Definition von Testfällen mittels DoE-Messplan.

AP 3 System-Modellierung und Simulation

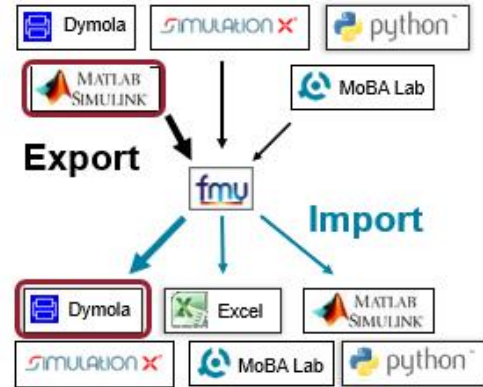
UAP 3.1 Modellierung des elastokalorischen Subsystems

Für die Erstellung des fahrzeugnahen Simulationsmodells und der Gesamtfahrzeugsimulation wird gleichfalls die Simulationsbibliothek TIL Suite unter Modelica/Dymola verwendet. Das von Vitesco unter Matlab erstellte physikalisch basierte Kernmodell des elastokalorischen Systems wird über einen Modellaustausch als FMU in die Modelica Simulation eingebunden. Der FMU-Export und Import ist schematisch in Bild 17 dargestellt.

Im ersten Schritt werden dazu nach Bild 18 gemeinsame Schnittstellen definiert, über die der Datenaustausch zwischen FMU und Modelica-Simulation als gekoppelte Co-simulation stattfindet. Im zweiten Schritt werden die Bilanzsätze überprüft und die Simulationszeit durch Anpassung der Schrittweiten optimiert. Nach mehreren Iterationsschleifen steht eine erste optimierte FMU des elastokalorischen Systems für die Einbindung in das Gesamtsystem zur Verfügung.



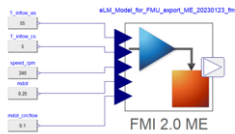
Simulation model for elastocaloric unit.
[Nicolas Michaelis, Dissertation Saarbrücken 2020]



FMU export from MATLAB and import to Dymola.

Bild 17: Toolkette für die prototypische Einbindung eines Matlab-Simulationsmodells [23] für die elastokalorische Einheit in Modelica/Dymola über FMU-Export.

FMU – Schnittstellen



Input	
mdot	kg/s
speed	rpm
T_inflow_cs	°C
T_inflow_ws	°C
mdot_circflow	kg/s

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{ws} &= \dot{H}_{in,cs} - \dot{H}_{out,ws} \\ \dot{Q}_{cs} &= \dot{H}_{in,ws} - \dot{H}_{out,cs} \\ COP_{heating,el} &= \dot{Q}_{ws}/P_{el} \\ COP_{cooling,el} &= \dot{Q}_{cs}/P_{el} \\ COP_{heating,mech} &= \dot{Q}_{ws}/P_{mech} \\ COP_{cooling,mech} &= \dot{Q}_{cs}/P_{mech}\end{aligned}$$

Output	
P-el	W
P-mech	W
x-H2O/Glykol	m%
mdot	kg/s
Vdot_in_ws	l/min
T_out,cs	°C
T_out,ws	°C
cp_out,cs	kJ/(kg*K)
cp_out,ws	kJ/(kg*K)
cp_in,cs	kJ/(kg*K)
cp_in,ws	kJ/(kg*K)
Qdot_ws	W
Qdot_cs	W
COP-cooling-el	-
COP-heating-el	-
COP-cooling-mech	-
COP-heating-mech	-
eta-motor	-

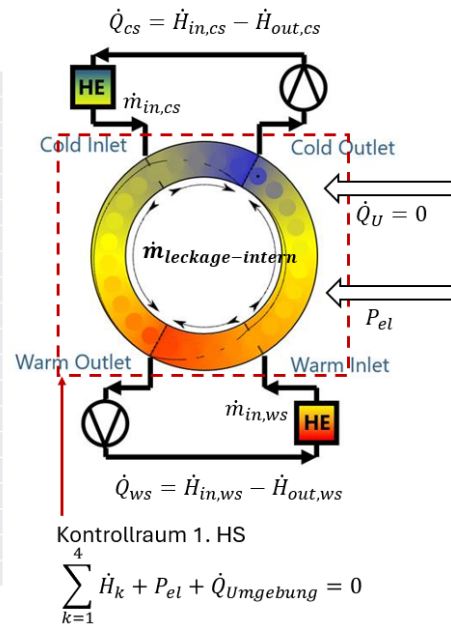


Bild 18: Schnittstellen für die Einbindung des Matlab-Simulationsmodells für die elastokalorische Einheit in Modelica/Dymola über FMU-Export mit Ein- und Ausgangsvariablen.

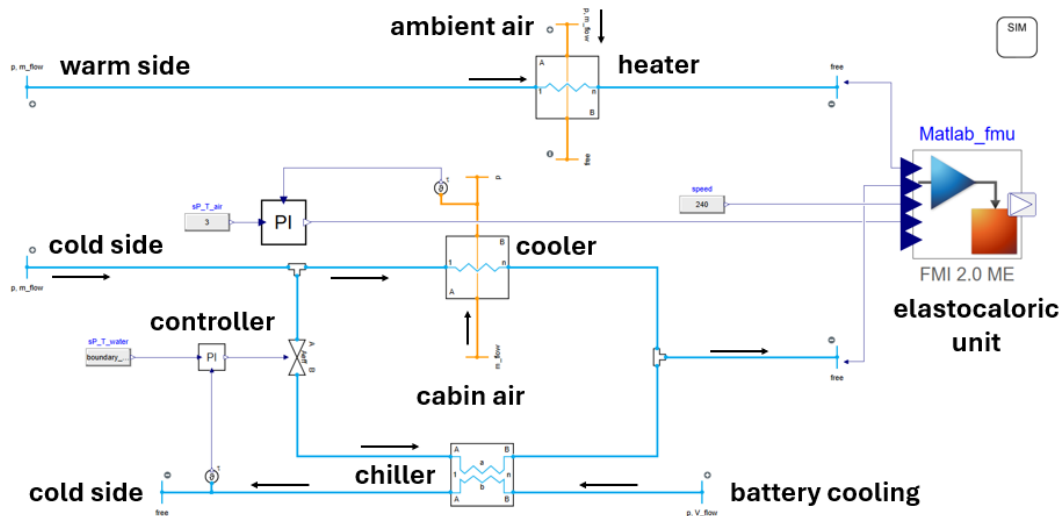
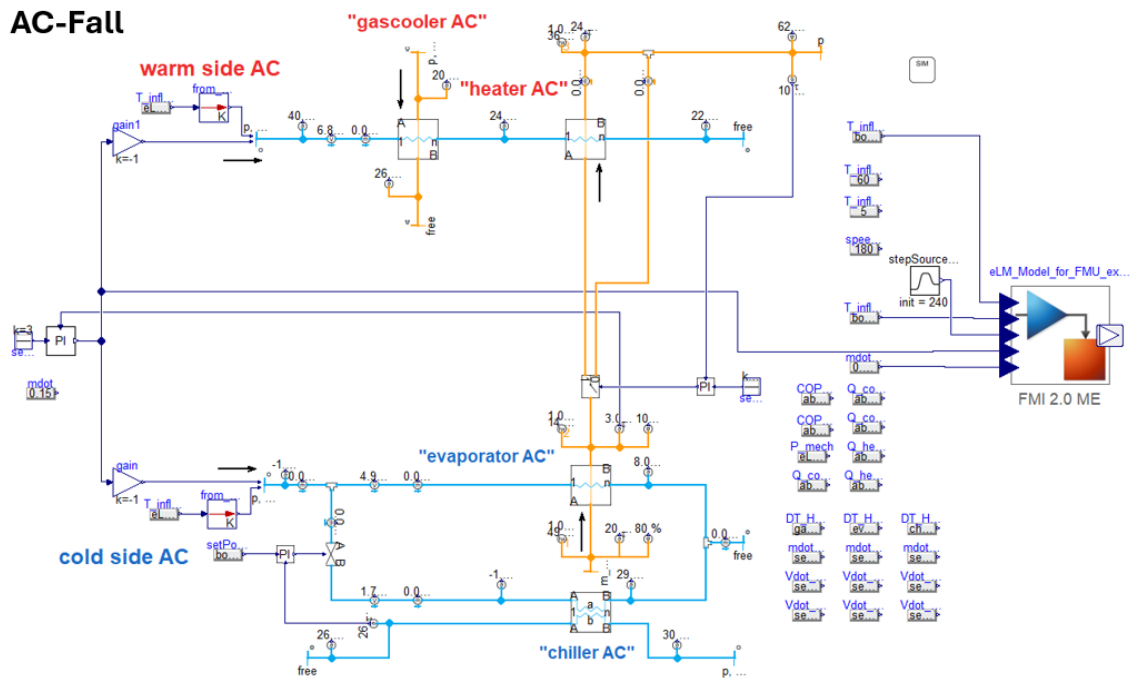


Bild 19: Einbindung des Matlab-Modells für das elastokalorische System als FMU in das Modelica/TIL Suite Simulationsmodell für das Fahrzeug-Thermosystem.

AC-Fall



Regelung

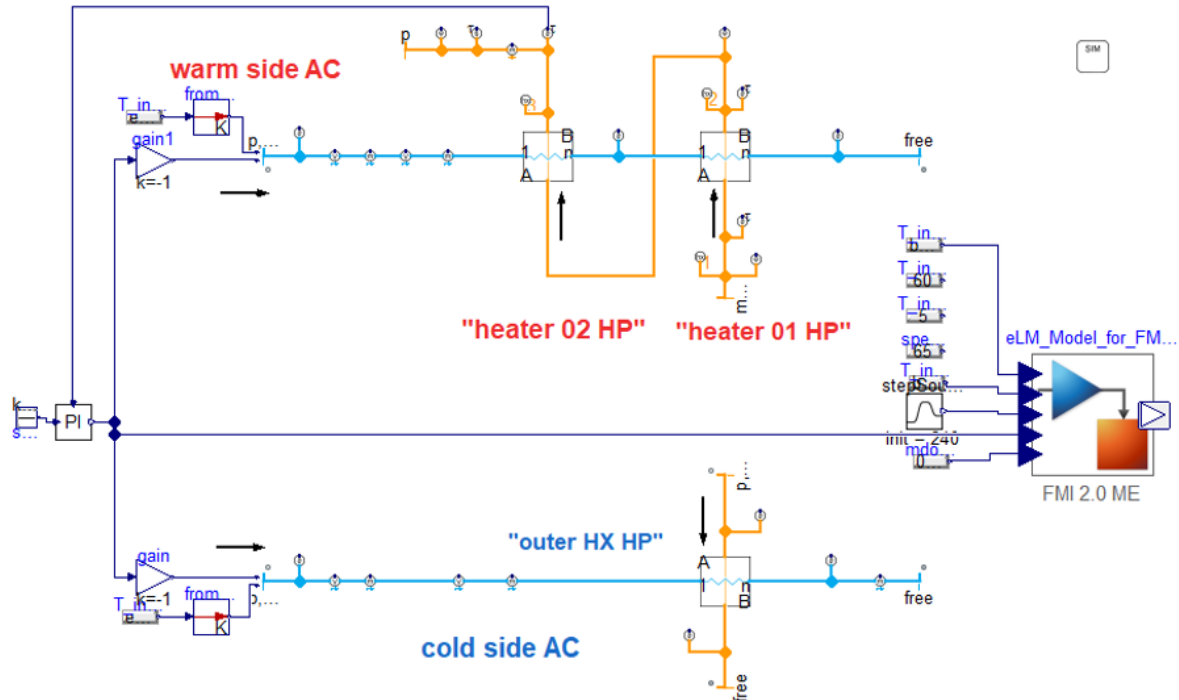
- Verdampfer-Lufttemperatur/Leistung über $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O-ges}}$
- Chiller- Wassertemperatur/Leistung mittels A_{Ventil}
- Reheat mittels Position Luftklappe

Berechnung ohne Verluste durch

- E-Motor, Wasserpumpen
- interne Leckage, interne Reibung

Bild 20: Einbindung des Matlab-Modells für das elastokalorische System als FMU in das Modelica/TIL Suite Simulationsmodell für das Fahrzeugsystem für den AC-Fall.

HP-Fall



Regelung

Heizer-Lufttemperatur/Leistung
mittels $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O-ges}}$

Berechnung ohne Verluste durch

- E-Motor, Wasserpumpen
- interne Leckage, interne Reibung

Bild 21: Einbindung des Matlab-Modells für das elastokalorische System als FMU in das Modelica/TIL Suite Simulationsmodell für das Fahrzeugsystem für den HP-Fall.

Für die weiteren Untersuchungen wird die FMU nach Bild 19 in das Fahrzeug-Thermosystem integriert und zunächst für die Klimatisierung getestet. Die Anbindung der Wasserkreisläufe an die elastokalorische Einheit erfolgt im Modell über sogenannte „Boundaries“, die mit den In- und Outputs mit der FMU verbunden sind. Die Systemkonfiguration besteht neben der elastokalorischen Einheit aus folgenden Komponenten:

- Heater: Umgebungs-Wärmeübertrager Luft/Wasser – Wärmeabgabe an die Umgebung
- Cooler: Innenraum-Wärmeübertrager Luft/Wasser – Kühlung der Kabinenluft
- Chiller: interner Wärmeübertrager Wasser/Wasser – Batteriekühlung

Weitere Komponenten und Nebenaggregate wie beispielsweise Pumpen, Rohre, Ausgleichsgefäße und Lüfter werden im ersten Ansatz noch nicht berücksichtigt.

Für die weitere Untersuchung werden wie in Bild 20 und Bild 21 gezeigt zwei getrennte Modelle aufgebaut:

- a) Modell AC + Reheat: für Klimatisierung und Reheat
- b) Modell HP: für Heizung

Folgende Regelkonzepte wurden jeweils für die beiden Modelle entworfen:

Modell AC + Reheat – Regelung Bild 20

- Verdampfer-Lufttemperatur über den Wassermassenstrom im System
- Chiller-Wassertemperatur über das Bypass-Ventil
- Reheat mittels Luftklappenposition
- COP-optimale Einstellung der Drehzahl in der Elastokalorik Einheit

Modell AC + Reheat – Regelung Bild 21

- Heizer-Lufttemperatur über den Wassermassenstrom im System
- Reheat mittels Luftklappenposition
- COP-optimale Einstellung der Drehzahl in der Elastokalorik Einheit

Die Ergebnisse der Systemsimulation sind vergleichend mit den Ergebnissen der Referenzanlage in Bild 22 tabellarisch und in Bild 23 graphisch über der Umgebungstemperatur aufgetragen. Der COP ist beim Referenzsystem auf die elektrische Antriebsleistung bezogen und beim elastokalorischen System auf die mechanische Leistung. Weiterhin werden beim elastokalorischen System die zusätzlich erforderlichen Leistungen der Wasserpumpen nicht berücksichtigt, die ebenfalls zu einer weiteren Reduktion des COP führen.

Die Simulationsergebnisse des elastokalorischen Systems erreichen im AC-Fall die geforderte Kälteleistung des Referenzsystems bis zu einer Umgebungstemperatur von 30°C. Für höhere Temperaturen liegt die Luft-Austrittstemperatur im Innenraum-WÜ über den geforderten 3°C. Der COP erreicht bei niedrigen Umgebungstemperaturen und kleinen Temperaturhuben für das elastokalorische System deutlich höhere Werte als beim Referenzsystem, während die Werte für höhere Temperaturen nur noch geringfügig höher liegen.

Die Ziel-Heizleistung wird bis zu einer Umgebungstemperatur von -10°C erreicht. Der COP liegt bei einer Umgebungstemperatur kleiner 5°C deutlich unterhalb des Wertes für das Referenzsystem.

Kühlen AC

	Referenz-System R744 ID3 typisch						Elastokalisches-System							
	$T_{air} / \varphi_{air} / m_{air}$ [°C/%/kg/h]	$T_{air-out} /$ setpoint	$Q_{chiller}$ [W]	Q_{D-ges} [W]	Q_{air} [W]	COP-ref [-]	$T_{air-out} /$ setpoint	$Q_{chiller}$ [W]	Q_{D-ges} [W]	Q_{air} [W]	COP*- elasto [-]	N* [rpm]	V_{H2O} [l/min] gc/eva/chil	ΔT [K] cs / ws
AC reheat	20 / 80 / 180	10°C (3)	2000	3700	1700	3.5	10°C (3)	2000	3740	1735	5.66	65	4.1 / 3 / 1	15.7 / 16.2
AC	20 / 40 / 300	3°C (3)	2000	3700	1700	3.6	3°C (3)	2000	3722	1718	5.02	70	4.3 / 3.2 / 1	14.9 / 17
AC	25 / 40 / 300	3°C (3)	2000	4500	2500	2.6	3°C (3)	2000	4566	2530	3.64	100	6.3 / 5.1 / 1	12.7 / 15.1
AC	30 / 40 / 300	3°C (3)	2000	5500	3500	1.9	3°C (3)	2000	5533	3533	2.10	180	11.1 / 10 / 1	8.8 / 11.8
AC	35 / 40 / 300	3°C (3)	2000	6500	4500	1.4	8°C (3)	2000	5870	3863	1.52	240	14.7 / 13 / 1.2	7.0 / 10.7
AC	40 / 40 / 300	6°C (3)	2000	7500	5500	1.25	16°C (3)	2000	5596	3588	1.68	220	12.5 / 10.3 / 1.8	7.8 / 11.6
AC	45 / 25 / 460	14.6°C (3)	2000	7700	5700	1.2	22°C (3)	2000	5300	3300	2.17	155	9.4 / 7 / 2.4	9.7 / 13.3

Heizen HP

	Referenz-System R744 ID3 typisch*						Elastokalisches-Sytem							
	T _{air} / m _{air} [°C/kg/h]	T _{air-out} / setpoint	Q _{chiller} [W]		Q _{air,heat} [W]	COP-ref [-]	T _{air-out} / setpoint	Q _{chiller} [W]	Q _{heiz-ges} [W]	Q _{air} [W]	COP*- elasto [-]	N* [rpm]	V _{H2O} [l/min] ws/cs	ΔT [K] ws/cs
HP	-20°C 210 kg/h	60°C (60)	0		4600 W	2.2	50 (60)	0	4115	4115	1.54	180	10.8/11.2	6/2.4
HP	-15°C 210 kg/h	60°C (60)	0		4400 W	2.4	55 (60)	0	4111	4111	1.65	160	9.4/9.8	6.8/3.1
HP	-10°C 210 kg/h	60°C (60)	0		4100 W	2.5	60 (60)	0	4111	4111	1.72	145	8.5/8.8	7.5/3.6
HP	-5°C 210 kg/h	60°C (60)	0		3800 W	2.6	60 (60)	0	3819	3819	2.14	110	6.4/6.6	9.3/5.6
HP	0°C 210 kg/h	60°C (60)	0		3500 W	2.7	60 (60)	0	3525	3525	2.47	90	5.1/5.3	10.7/7
HP	5°C 210 kg/h	60°C (60)	0		3200 W	2.75	60 (60)	0	3235	3235	2.97	70	4.1/4.2	12.4/9
HP	10°C 210 kg/h	60°C (60)	0		2900 W	2.8	60 (60)	0	2942	2942	3.23	70	3.5/3.6	13.3/10

Luftmassenstrom Außen-
WÜ: 2160 kg/s

[#]bei hoher Luftfeuchte zusätzlich
Vereisung und Abtauerung nötig

*bezogen auf mechanische Leistung – ohne Motor + LE Verluste, ohne
Druckverluste und Pumpenleistung
*Drehzahl für optimalen COP

Bild 22: Vergleich der Simulationsergebnisse für das elastokalorische System mit dem R-744 Referenzsystem für den AC-Fall oben und den HP-Fall unten.

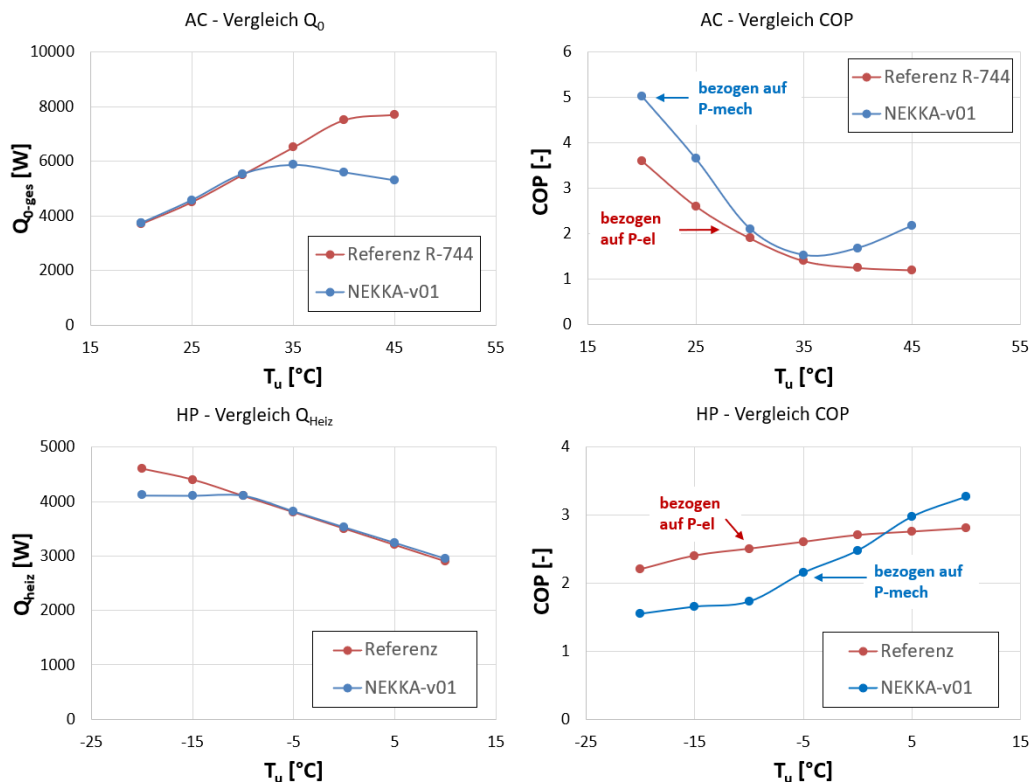


Bild 23: Vergleich der Simulationsergebnisse für das elastokalorische System mit dem R-744 Referenzsystem für den AC-Fall links und den HP-Fall rechts.

UAP 3.3 Gesamtsystems simulation (Prinzipisimulation)

Für die Durchführung von Gesamtfahrzeugsimulationen wurde ein Gesamtfahrzeugmodell mit Heiz- und Kühlsystem definiert. Ziel ist der Vergleich von verschiedenen Heiz- und Kühlsystemen. Im ersten Schritt werden Simulationen mit dem CO₂-Referenz Heiz- und Klimasystem durchgeführt. Im zweiten Schritt waren vergleichende Simulationen mit dem elastokalorischen System angedacht, die aufgrund des vorzeitigen Projektendes nicht mehr durchgeführt werden konnten.

Für die thermische Gesamtfahrzeugsimulation (vgl. [4], [5], [24], [25]) werden, wie in Bild 24 gezeigt, die verschiedenen thermischen Teilmodelle im Fahrzeug miteinander verknüpft: Die mechanischen Modelle für das Fahrzeug, die elektrischen Modelle für Motor, Batterie und die weiteren Elektronikmodule mit den thermischen Modellen des Fahrzeugs bestehend aus der Fahrzeugkabine und dem Heiz- und Kühlsystem. Die Fahrzustände werden je nach Fahrscenario über verschiedene Fahrzyklen zusammen mit den Klimabedingungen für verschiedene Klimata von außen dynamisch vorgegeben. Das Verhalten des Fahrers wird über einen Regler abgebildet. Als Fahrzyklus wird für die durchgeführten Simulationsrechnungen im ersten Schritt der WLTP verwendet. Weiterhin stehen z. B. der ADAC-Autobahnzyklus [26] oder der Stuttgart-Rundkurs [27] und weitere Kombinationen zur Verfügung.

Für die Abbildung verschiedener Klimatisierungs- und Heizbedingungen werden im ersten Schritt mittlere Tagesgang-Klimadaten aus METEONORM für drei verschiedene Städte in Europa - Athen, Frankfurt und Trondheim - zu unterschiedlichen Jahreszeiten im Sommer und Winter herangezogen.

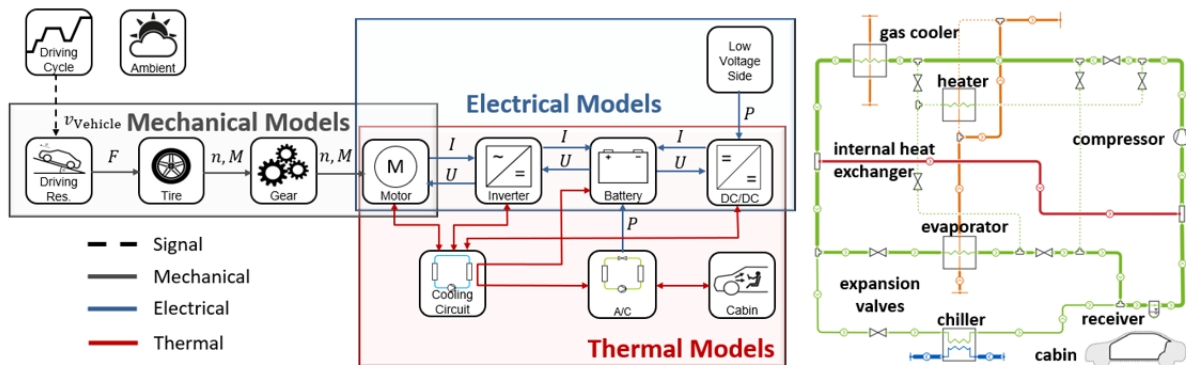


Bild 24: Thermisches Gesamtfahrzeugsimulationsmodell unter Modelica für die vergleichende Bewertung verschiedener HVAC-Systeme.

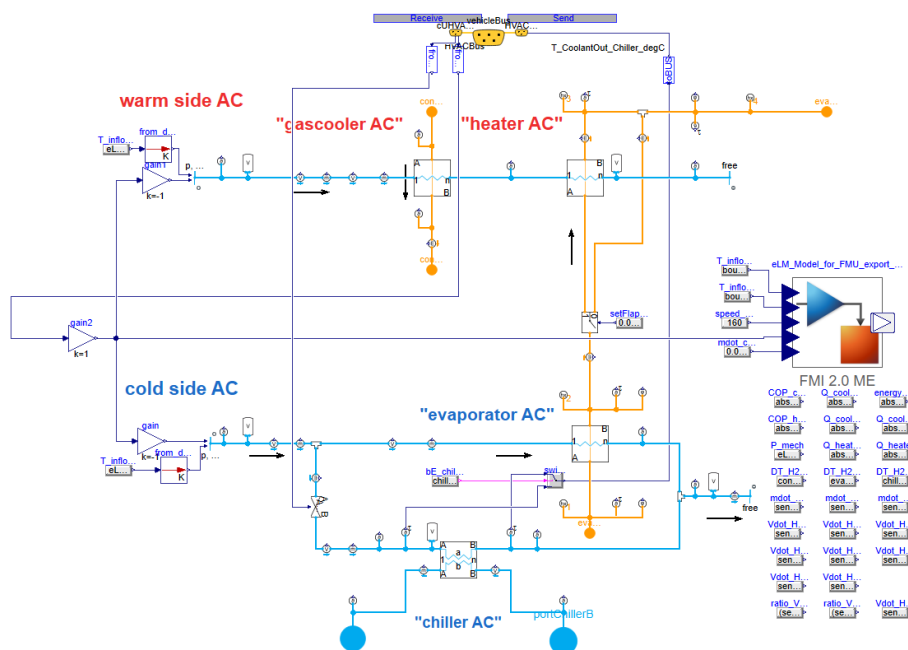


Bild 25: Integration des elastokalorischen Systems in das thermisches Gesamtfahrzeugsimulationsmodell unter Verwendung des FMU-Imports als Co-Simulation.

Die Simulationsrechnungen wurden basierend auf dem oben beschriebenen Referenzfahrzeug (Kleinwagen der Kompaktklasse z.B. VW ID.3) mit R-744 Heiz- und Kühlsystem durchgeführt. Die Heizfälle wurden mit Wärmepumpe und PTC als Alternative berechnet. Die berechneten Gesamtenergieverbräuche des Fahrzeugs sind zusammen mit der Kühl-

und Heizleistung sowie des COP in Bild 26 dargestellt und können für die Bewertung des elastokalorischen Systems als Referenz herangezogen werden.

Das Gesamtfahrzeugmodell wurde im ersten Schritt nach Bild 25 für die Simulation mit dem elastokalorischen Systems entsprechend erweitert. Allerdings konnten aufgrund des vorzeitigen Projektabbruchs keine Simulationen mehr durchgeführt werden.

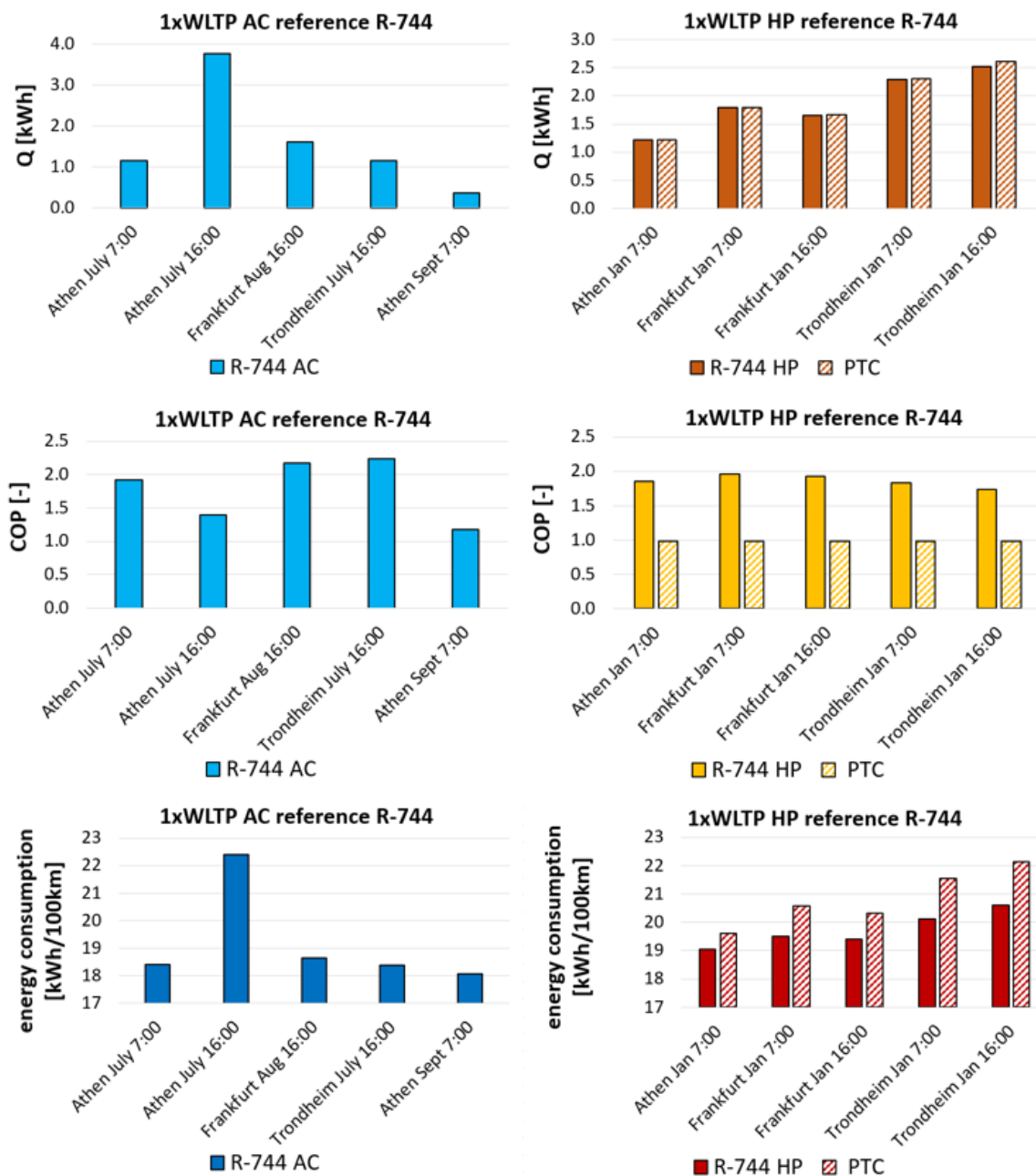


Bild 26: Ergebnisse der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation für das elektrische Referenzfahrzeug für drei verschiedene Orte mit WLTP Fahrzyklus und Verwendung des Referenz R-744 Systems: AC (links) und WP (rechts). Kälte- und Heizleistung (oben), COP (Mitte) und Fahrzeug-Gesamtverbrauch (unten).

UAP 3.5 Simulationsbasierte Potentialabschätzung Testfälle

Weitere dynamische Simulationsmodelle des elastokalorischen Systems wurden für die Simulation von Einschaltvorgängen, Abkühl- und Aufheizvorgängen zusammen mit einem thermischen Modell für die Fahrzeugkabine erstellt. Bild 27 zeigt das Modell mit elastokalorischer Kühlanlage und Kabinenmodell. Über Initialwerte werden die Temperaturen zum Startpunkt eingestellt. Die Werte für Umgebungstemperatur, Feuchte und Solarstrahlung werden anhand von Klimadaten über das Kabinenmodell vorgegeben. Bild 28 zeigt einen typischen Einschaltvorgang der Klimaanlage nach einer Zeit von 10 Minuten, in der sich die Kabinentemperatur aufgrund der höheren Umgebungstemperatur und Solarstrahlung leicht aufheizt.

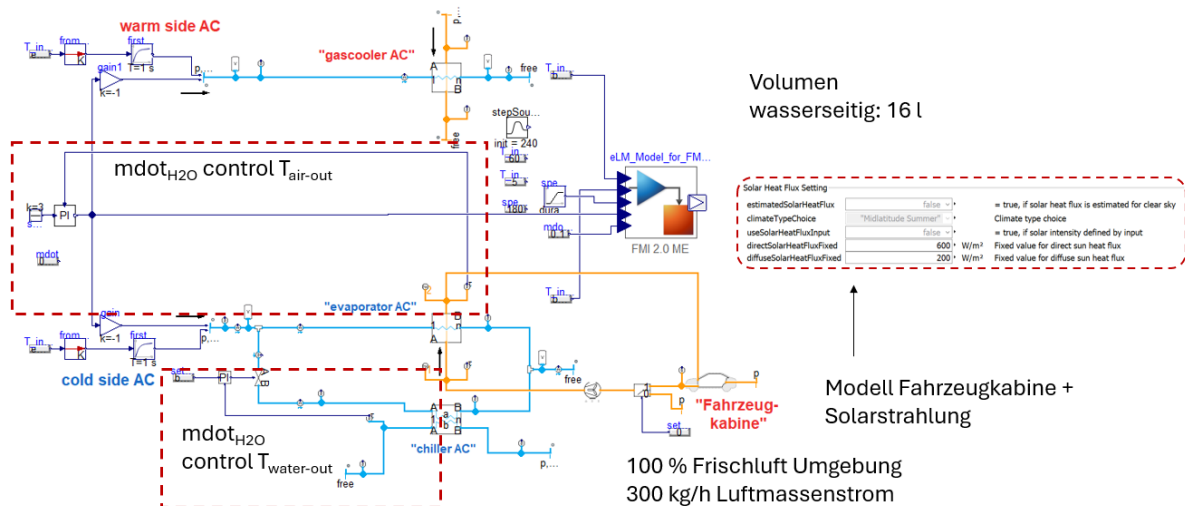


Bild 27: Simulationsmodell des elastokalorischen Systems mit Fahrzeugkabine für die Berechnung von Einschalt- und Abkühlvorgängen.

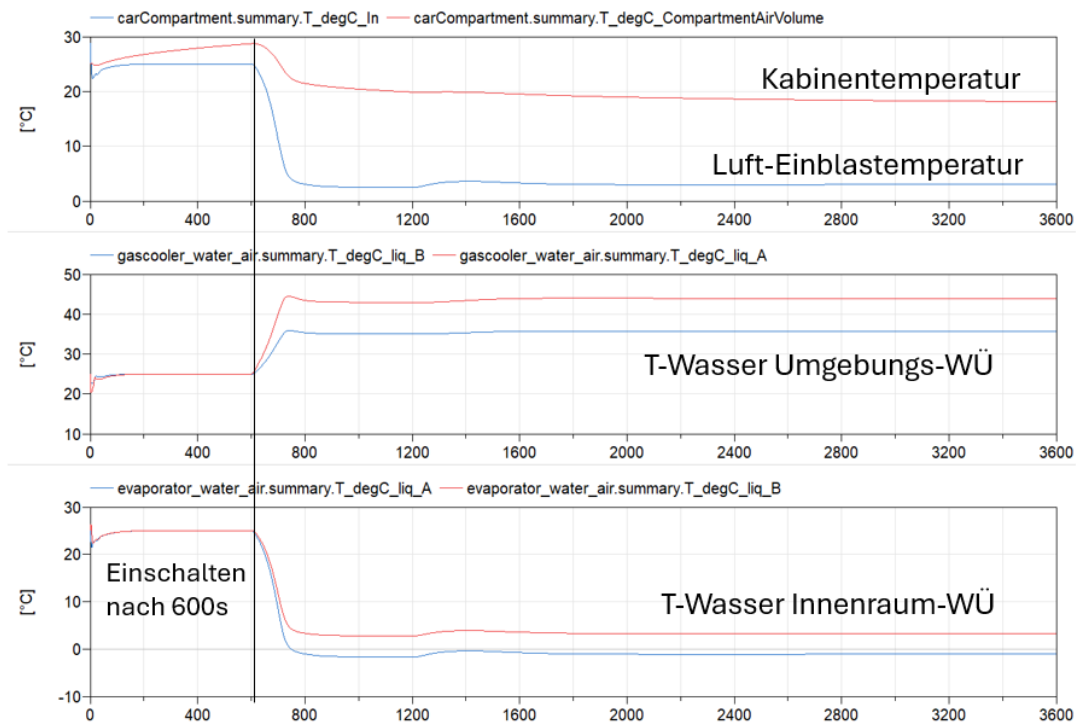


Bild 28: Beispielhafte Simulationsergebnisse für das Einschaltverhalten des elastokalorischen Systems mit Fahrzeugkabine.

Weitere Arbeitspakete

Weitere Mitarbeit ergab sich im AP 2 FGK-Entwicklung

- UAP 2.3 Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung
- UAP 2.4 Elastokalorische Charakterisierung

Ursprünglich war eine weitere Mitarbeit auch im AP 4 Prototypenentwicklung und Inbetriebnahme und AP 5 Prüfstands Aufbau und Prototypenevaluierung geplant

- UAP 4.1 Ableitung der Systemarchitektur
- UAP 4.2 Systemdesign
- UAP 5.1 Prüfstandsdesign und Konstruktion der Komponenten

UAP 2.3 Lebensdauertests und funktionale Charakterisierung

TLK stand beratend hinsichtlich der Anforderungen aus dem späteren Alltagseinsatz der FGL zur Verfügung. Es wurden Anforderungen an die FGL aus Simulationsrechnungen von TLK abgeleitet.

UAP 2.4 Elastokalorische Charakterisierung

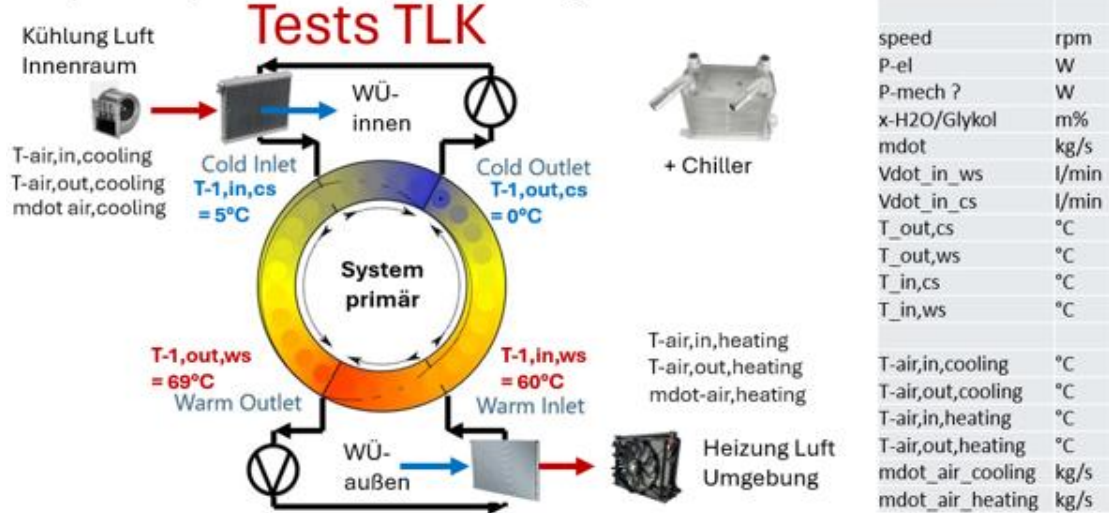
TLK stand beratend bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse zur Verfügung mit Fokus auf die thermischen Phänomene.

UAP 5.1 Prüfstandsdesign und Konstruktion der Komponenten

Für die experimentelle Untersuchung des elastokalorischen Prototypen war es ursprünglich geplant, die folgenden in Bild 29 gezeigten Prüfstände bei TLK im Labor aufzubauen: zum einen ein Komponentenprüfstand, zum anderen ein Gesamtsystemprüfstand mit fahrzeugnaher Anordnung von Luftkanälen, Fahrzeug-Wärmeübertragern, Rohrleitungen und Umschaltventilen von AC- auf HP-Fall. Zusammen mit den Projektpartnern wurden verschiedene Prüfstandsaufbauten diskutiert und Erfahrungen von TLK weitergegeben, insbesondere im Bereich Messtechnik und Sensorik.

Prüfstand – Thermosystem – luftseitig sekundär

Komponentenprüfstand AC-Falluntersuchung



Prüfstand – Thermosystem – luftseitig sekundär

Gesamtsystemprüfstand Fahrzeugnahe Tests

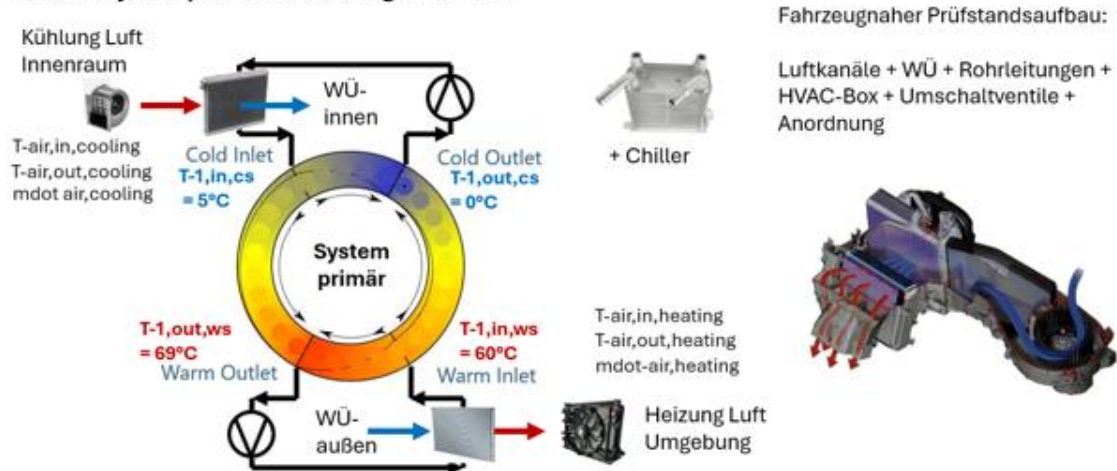


Bild 29: Schema für Komponentenprüfstand Thermosystem zur AC-Falluntersuchung (oben) und Gesamtsystemprüfstand (unten) für fahrzeugnahe Tests mit wichtigen Messgrößen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verbundvorhaben NEKKA setzen sich beim Teilvorhaben der TLK-Thermo GmbH die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aus Personalkosten und Reisekosten zusammen. Im Schnitt wurde eine Stelle eines Projektingenieurs über 21 Monate finanziert, wobei der Eigenanteil bei 30% der Gesamtkosten lag.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei der TLK-Thermo lagen die Schwerpunkte der Projektarbeit auf den AP 1 Anforderungs- und Testfalldefinition (Ableitungen der Anforderungen an das Prototypensystem, Spezifikation der einzelnen Komponenten und die Definition von Testfällen) und AP 3 System-Modellierung und -Simulation (Modellierung des elastokalorischen Subsystems, Gesamtsystems simulation, Simulationsbasierte Potentialabschätzung). Der geplante Kostenrahmen konnte eingehalten werden, die ursprünglichen Projektziele konnten aufgrund des vorzeitigen Projektabbruchs durch den Konsortialführer Vitesco nur zum Teil erreicht werden.

Es wurden Simulationsmodelle und Regelstrategien für die thermische Simulation von elastokalorischen Systemen erstellt und getestet. Entsprechende Anforderungen für das System mit Hilfe eines Prototypensystems und statistischen Klimarandbedingungen wurden abgeleitet und der Energieverbrauch des Referenzsystems für die Lebensdauer eines Elektrofahrzeuges abgeschätzt. Weiterhin wurde eine thermische Gesamtfahrzeuguntersuchung für den Test des elastokalorischen Systems entwickelt. Für die Bereitstellung von Referenzdaten wurden Simulationsrechnungen für verschiedene Orte und Klimata mit dem Referenzsystem unter Verwendung eines Fahrzyklus durchgeführt. Die Gesamtfahrzeuguntersuchung des elastokalorischen Systems wurde durch eine Erweiterung des Modells vorbereitet.

Die im Rahmen des Projektes NEKKA geleisteten Arbeiten waren aus Sicht von TLK-Thermo notwendig und angemessen für die effiziente Erreichung der angestrebten Projektziele. Die daraus entstandenen Ausgaben waren daher das Resultat sowohl einer erfolgreichen Bearbeitung der Projekt-Aufgaben unter einer wirtschaftlichen und effizienten Verwendung der zur Verfügung gestellten Mittel. Aufgrund von verschiedenen Projekten im Bereich der thermischen Fahrzeugsimulation hat sich die Anzahl der Mitarbeiter von TLK seit Projektabbruch bereits um zwei Stellen im Bereich der Softwareentwicklung und E-Fahrzeugsimulation erhöht. Insgesamt hat sich die Anzahl der festen Mitarbeiter von TLK-Thermo seit Antragsstellung von 55 auf inzwischen 75 vergrößert. Diese Entwicklung zeigt, dass der nachhaltige wirtschaftliche Nutzen, der aus aktuellen und zukünftigen Nachfolge-Projekten erwirtschaftet werden kann, langfristig den eingesetzten Projektaufwand übertreffen wird. Damit ergibt sich langfristig eine deutlich positive Bilanz bei der Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse nach Verwertungsplan

Im Projekt NEKKA wurden Fortschritte bei der Entwicklung neuer Simulationstechniken und -modelle zum Kühlen und Heizen von E-Fahrzeugen erzielt. Insbesondere wurden thermische Modelle für die Referenzanlage erstellt und Fahrzeug-Konfigurationen für das elastokalorische System erstellt und in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebunden. Weiterhin wurden Regelstrategien für den Betrieb eines elastokalorischen Systems zum Kühlen und Heizen von Elektrofahrzeugen entwickelt sowie klimatische Randbedingungen und Fahrprofile erarbeitet, die im Rahmen der Gesamtfahrzeugsimulation angewendet wurden. Aufgrund des gewonnen Erkenntnisgewinns sowie neuer Komponentenmodelle, Regelkonzepte und Randbedingungen können zukünftige Kundenprojekte in unterschiedlichen Anwendungsbereichen bearbeitet werden, z. B. E- und Hybrid-Fahrzeuge wie Pkw, Busse und Lkw, aber auch stationäre Klima- und Kälteanlagen in Gebäuden wie Supermarkt, Fabrikhallen, Büro- und Wohnhäusern.

Bezüglich der Anschlussfähigkeit des NEKKA-Projekts sind bei TLK folgende Maßnahmen geplant bzw. schon in der Durchführung (siehe auch Verwertungsplan im Antrag):

- Durchführung neuer Kundenprojekte unter Anwendung der neu gewonnenen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Regelungskonzepte (Thermomanagement im E-Fahrzeug, Elektrobus).
- Vermarktung der klimatischen Randbedingungen und Ermittlung weiterer Klimadaten im Kundenauftrag für weitere Regionen (Anschlussprojekte sind schon in der Bearbeitung).
- Verbesserte Simulationsmodelle, -techniken und Simulationsansätze für weitere thermische Modelle aus anderen Bereichen (Klimaverdichter, Batterie, Kühlkreislauf).
- Transfer auf andere Anwendungsgebiete: Anwendung der Konzepte des hochintegrierten Systems auf andere Bereiche, z.B. in der mobilen Klimatechnik (elektrische Verdichter mit integriertem Inverter für Pkw & Busse) und stationären Kühlung von Schaltschränken & Leistungselektronik.
- Erfolgte Publikation auf Fachtagungen (Tagung Elastocalorics in Saarbrücken).

Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

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

Literaturverzeichnis

- [1] W. Tegethoff, C. Schulze, M. Gräber, M. Huhn, N. Stulgies, C. Kaiser und M. Loeffler, TEMO - Thermische Echtzeitfähige Modelle. Abschlussbericht zu einem vom BMBF geförderten Verbundvorhaben mit den Förderkennzeichen 01IS08013A, 01IS08013B und 01IS, Braunschweig, 2011.
- [2] C. Richter, Proposal of New Object-Oriented Equation-Based Model Libraries for Thermo-dynamic Systems. Ph. D. thesis, Technische Universität, Braunschweig, 2008.
- [3] C. Schulze, A Contribution to Numerically Efficient Modelling of Thermodynamic Systems, Ph. D. thesis, Technische Universität Braunschweig, German., 2013.
- [4] C. Kaiser, Untersuchungen zur Effizienz- und Leistungssteigerung von Omnibusklimaanlagen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2020.
- [5] S. Försterling, S. Heinke und N. Lemke, „Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug mit hochintegriertem Antriebsmodul - eine simulative Studie,“ in *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs X*, ISBN 978-3-8169-3347-2, 2016.
- [6] Brandl F. , „Modelica vs. Simulink,“ TLK-Energy GmbH, 27 März 2023. [Online]. Available: <https://tlk-energy.de/blog/modelica-vs-simulink>. [Zugriff am 12 Februar 2024].
- [7] A. Varchmin, M. Gräber und J. Köhler, „11th International Modelica Conference,“ in *Modeling and Validation of a Multiple Evaporator Re-frigeration Cycle for Electric Vehicles*, Versailles, Frankreich, 2015.
- [8] N. Lemke, „R744-Wärmepumpe zur Fahrzeugklimatisierung, Pkw-Klimaanlagen mit dem Kältemittel R744 (CO₂)“, in *14. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium 2. Juni*, Karlsruhe, 2016.
- [9] N. Piesch, J. F. Hellmuth, S. Rai, W. Tegethoff, N. Lemke und J. Köhler, „Umschaltbare Wärmepumpe im elektrischen Fahrzeug: Direkte Temperierung der Batterie mit dem Kältemittel R744,“ in *Deutsche Kälte-Klima-Tagung, DKV-Tagungsberichte, 23.-24. November*, Hannover, 2023.
- [10] N. C. Strupp, N. Lemke, J. Köhler und C. Böttcher, „Klimatische Daten und PKW-Nutzung (Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa und den USA),“ in *DKV-Tagung, Berlin, November*, 2009.
- [11] N. C. Strupp und Lemke, Klimadaten und Pkw-Nutzung, Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa,

- USA, China u. Indien, Braunschweig: FAT-Schriftenreihe 224, September, 2009.
- [12] T. Langenbucher, „ecomento,“ ecomento, 24. 12. 2019. [Online]. Available: <https://ecomento.de/2019/12/24/vw-erklaert-meb-elektroauto-batteriesystem/>. [Zugriff am 13. 02. 2024].
- [13] F. Zink, „Die CO₂-Wärmepumpentechnologie von Volkswagen,“ *Krafthand*, 19. 06. 2021.
- [14] A. Lamm, „Von der Klimaanlage zur Wärmepumpe,“ AMZ Die Aftermarketzeitschrift, 6. 03. 2020. [Online]. Available: <https://www.amz.de/von-der-klimaanlage-zur-waermepumpe>. [Zugriff am 12. 02. 2024].
- [15] „Meteonorm Software Version 8,“ Meteonorm, 2024. [Online]. Available: <https://meteonorm.com>. [Zugriff am 12. Februar 2024].
- [16] „Auto - Klima - Nutzung Onlinetool zur FAT-Schriftenreihe 366,“ TLK-Thermo GmbH, 2022. [Online]. Available: <https://fat.tlk-thermo.com/>. [Zugriff am 12. Februar 2024].
- [17] ADAC, „VW ID. Pro PErformance 1st Max,“ ADAC e.v., 1. 2. 2019. [Online]. Available: [VW_ID_3_Pro_Performance_58_kWh_1st_Max.pdf](#). [Zugriff am 19. 2. 2024].
- [18] H. Baehr und K. Stephan, Wärme- und Stoffübertragung, Springer, 1996.
- [19] Gnielinski, „G1 Durchströmte Rohre,“ in *VDI Wärmeatlas*, 2013.
- [20] S. Genic, „A Reveiw of Explicit Approximations of Colebrooks Equation,“ *FME Transactions*, Bd. 39, Nr. 2, pp. 68-71, 2011.
- [21] D. Swamee und A. Jain, „Explicit equations for pipe flow problems,“ *Journal of the Hydraulics Division*, Bd. 102, Nr. 5, pp. 657-664, 1976.
- [22] C. a. Wang, „A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry,“ *Int. J. Heat Mass Transfer*, Bd. 40, p. pp. 533 to 544, 2000.
- [23] N. Michaelis, Experimentelle Untersuchung elastokalorischer Kühlprozesse: konvektive Thermodynamik, latente Wärme und Materialzustandsüberwachung, Saarbrücken, 2020.
- [24] R. Kossel, M. Loeffler, M. Bodmann und W. Tegethoff, „Verteilte Simulation von Energiesystemen im Fahrzeug,“ in *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau*, VDI-Verlag, 2010.
- [25] C. Kaiser, S. Försterling, W. Tegethoff und J. Köhler, „Untersuchungen von Regelstrategien für die Omnibusklimatisierung mit Hilfe einer Gesamtfahrzeugsimulation,“ in *ASIM-KonferenzSTS/GMMS*, 2012.
- [26] ADAC, „ADAC Ecotest Test- und Bewertungskriterien,“ 2021. [Online]. Available: [Methodik_ADAC_Ecotest_Version_5.pdf](#). [Zugriff am 22. 2. 2024].
- [27] G. Baumann, P. Rumbolz, A. Piegsa, M. Grimm und H.-C. Reuss, „Analyse des

Fahrereinflusses auf den Energieverbrauch,“ in *SIMVEC 2010 - Berechnung und Simulation im Fahrzeug*, Baden-Baden, 2010.

- [28] C. Seck, C. Kaiser und N. Lemke, „Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizungsanlagen,“ FAT-Schriftenreihe 366, Braunschweig, 2022.

Publikationen im Rahmen des Projektes

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

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)
3. Titel NEKKA - Entwicklung eines neuartigen elastokalorischen Klimasystems.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Försterling, Sven Stulgies, Norbert Bodmann, Michael Lemke, Nicholas	5. Abschlussdatum des Vorhabens September 2023
	6. Veröffentlichungsdatum April 2024
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) TLK-Thermo GmbH Rebenring 31 38106 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I21050B
	11. Seitenzahl 39
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 28
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 26
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Das Vorhaben NEKKA zielt auf die Erforschung eines neuartigen Prinzips ab – die Nutzung des elastokalorischen Effekts zur Fahrzeugklimatisierung. Dieser bietet das Potenzial einer deutlichen Effizienzsteigerung. Das elastokalorische System verzichtet komplett auf leicht entzündliches oder treibhausschädliches Kältemittel und kann in allen Fahrzeugklassen zum Kühlen und Heizen eingesetzt werden.

Im Forschungsprojekt „NEKKA“ waren folgende Projektpartner beteiligt: Vitesco Technologies GmbH, Inguls GmbH, Universität des Saarlandes und die TLK-Thermo GmbH.

Innerhalb des Projektes wurden von TLK-Thermo Vergleichsdaten für ein CO₂ Klima- und Heizmodul als Referenz simulativ mittels Modelica/Dymola und TIL Suite erzeugt. Zusammen mit aktualisierten statistischen Nutzungsdaten für Pkw und unter Verwendung von DoE-Methoden wurden Zielgrößen und Randbedingungen erstellt und Energieverbräuche abgeschätzt. Zur Auslegung der fahrzeugspezifischen Komponenten wurde ein Simulationsmodell des elastokalorischen Systems im Fahrzeug erstellt, das zur weiteren Evaluation und Optimierung herangezogen wurde. Für die Bewertung des Systems im Fahrzeug kam ein thermisches Gesamtfahrzeugsimulationsmodell zum Einsatz.

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

Folgende Ergebnisse wurden im Rahmen dieses Vorhabens von Seiten TLK-Thermo erzielt:

- Aufbau eines Modells für die Referenzbetrachtung des CO₂ Referenzsystems.
- Simulative Berechnung von Referenzwerten für die Leistung und Effizienz.
- Statistisches Nutzungsverhalten von Pkw in Deutschland und Europa basierend auf Wetterdaten, Bevölkerungsdichte und landestypischen Nutzungsverhalten.
- Abschätzung des Energieverbrauchs für das konventionelle E-Referenz-Fahrzeug.
- Bereitstellung von Stoffdaten für Wasser/Glykol unter TILMedia.
- Aufbau eines thermischen Gesamtfahrzeugmodells für Referenzfahrzeug mit CO₂-System.
- Planung Prüfstandsaufbauten und Messmethodiken, Auswahl Messgeräte und Sensorik.
- Ableitung Systemarchitektur für das elastokalorische System.
- Einbindung eines elastokalorischen Teilmodells als FMU in das Modell für das Kühl- und Heizsystem und Umsetzung einer ersten Regelstrategie.
- Simulationsrechnungen elastokalorisches System Heizen und Kühlen.

19. Schlagwörter

Elastokalorik, Thermische Simulation, Klimatisierung, Wärmepumpe, Elektromobilität, Klimadaten

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report		
3. title NEKKA – Development of a novel elastocaloric climate system.			
4. author(s) (family name, first name(s)) Försterling, Sven Stulgies, Norbert Bodmann, Michael Lemke, Nicholas		5. end of project September 2023	
		6. publication date February 2024	
		7. form of publication Final report	
8. performing organization(s) (name, address) TLK-Thermo GmbH Rebenring 31 38106 Braunschweig		9. originator's report no.	
		10. reference no. 19I21050B	
		11. no. of pages 39	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. no. of references 28	
		14. no. of tables 2	
		15. no. of figures 26	
16. supplementary notes Final report			
17. presented at (title, place, date)			

18. abstract

The NEKKA project aims to research a new type of principle - the use of the elastocaloric effect for vehicle air conditioning. This offers the potential for a significant increase in efficiency. The elastocaloric system completely dispenses with highly flammable or greenhouse-damaging refrigerants and can be used for cooling and heating in all vehicle classes.

The following project partners are involved in the NEKKA research project: Vitesco Technologies GmbH, Ingpus GmbH, Saarland University and TLK-Thermo GmbH.

TLK-Thermo generated comparative data for a CO₂ air conditioning and heating module as a reference using Modelica/Dymola and TIL Suite. Together with updated statistical usage data for cars and using DoE methods, target variables and boundary conditions were created, and energy consumption was estimated. To design the vehicle specific components, a simulation model of the elastocaloric system in the vehicle was created, which was used for further evaluation and optimization. An overall thermal vehicle simulation model was used to evaluate the system in the vehicle.

The main aim of the NEKKA project was to develop an alternative air conditioning system based on the elastocaloric effect for use in vehicles to achieve better efficiency (COP) and environmental compatibility as well as sustainability while reducing installation space, weight and costs.

The following results were achieved by TLK-Thermo as part of this project:

- Building a model for the reference analysis of the CO₂ reference system.
- Simulative calculation of reference values for performance and efficiency.
- Determination of current usage behavior for cars in Germany and Europe based on weather data, population density and country-typical usage behavior.
- Estimation of energy consumption for the conventional e-reference vehicle.
- Provision of substance data for water/glycol under TILMedia
- Construction of an overall thermal vehicle model for a reference vehicle with a CO₂ system.
- Planning test stand setups and measurement methods, selection of measuring devices and sensors.
- Derivation of system architecture for the elastocaloric system.
- Integration of an elastocaloric submodel as an FMU into the model for the cooling and heating system and implementation of a control strategy.
- Simulation calculations of elastocaloric system for heating and cooling.

19. keywords

Elastocaloric, thermal simulation, air conditioning, heat pump, electric mobility, climate data

20. publisher

21. price