

TEXTE

23/2025

Abschlussbericht

Umweltfreundliche mobile Klimatisierung mit natürlichen Kältemitteln: Klimatisierung von Schienenfahrzeugen mit Propan (R290)

von:

Lutz Boeck, Steffen Poser, Sascha Mader, Andreas Marschinke
Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG, Schkeuditz

Peter Danzer, Dr. Peter Claus, Johannes Wegele, Leonhard Hörth
Deutsche Bahn AG, Berlin

Barbara Gschrey, Kristina Warncke, David Robin
Öko-Recherche Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/ Main

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 23/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 41 302 0
FB001540

Abschlussbericht

Umweltfreundliche mobile Klimatisierung mit natürlichen Kältemitteln: Klimatisierung von Schienenfahrzeugen mit Propan (R290)

von

Lutz Boeck, Steffen Poser, Sascha Mader, Andreas Marschinke
Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG, Schkeuditz

Peter Danzer, Dr. Peter Claus, Johannes Wegele, Leonhard Hörth
Deutsche Bahn AG, Berlin

Barbara Gschrey, Kristina Warncke, David Robin
Öko-Recherche Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH,
Frankfurt/ Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG
Industriestr. 60
04435 Schkeuditz

Abschlussdatum:

Juni 2023

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Gabriele Hoffmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Umweltfreundliche, mobile Klimatisierung mit natürlichen Kältemitteln: Klimatisierung von Schienenfahrzeugen mit Propan (R290)

Bisher verwenden Zugklimaanlagen vorrangig fluorierte Kältemittel. Aufgrund ihrer umweltbelastenden Eigenschaften werden diese Kältemittel zukünftig stärker reguliert.

Bisher wurden noch keine brennbaren Kältemittel in Zugklimaanlagen verwendet. In diesem Projekt wurde das natürliche Kältemittel R290 (Propan) erstmals für die Klimatisierung eines Zuges im normalen Fahrgastbetrieb erprobt. Vor Beginn des Projektes wurde das von einem Bahnhersteller entworfene Propan-Klimamodul auf dem Prüfstand getestet und umfangreichen Sicherheitsuntersuchungen unterworfen.

Im Projekt wurde dieses Propan-Anlagenmodul parallel zu einer R134a-Anlage in einen Regionalzug der Baureihe 440 eingebaut, wobei die Gerätearchitektur beider Anlagen sehr ähnlich war. Die beiden Anlagen wurden über ein Jahr im Zug betrieben und ausgewählte Betriebsparameter in einem Messprogramm erfasst und aufgezeichnet.

Die Auswertung der erfassten Daten im Versuchszeitraum zeigt, dass die Propan-Klimaanlage im regulären Zugbetrieb mindestens so leistungsfähig und energetisch effizient ist wie die R134a-Anlage. Simulationsberechnungen bestätigen die energetische Eignung von Propan. Danach könnte auch eine Wärmepumpenintegration energetisch vorteilhaft sein, was in der Praxis noch überprüft werden müsste. Durch diese Erprobung steht mit Propan nun neben CO₂ und Luft ein drittes natürliches Kältemittel für Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen zur Auswahl.

Abstract: Environmentally friendly mobile air conditioning with natural refrigerants: Air-conditioning of rail vehicles with propane (R290)

Up to now, mainly fluorinated refrigerants have been used in train air conditioning. These refrigerants are subject to stricter regulation due to their environmentally harmful properties.

To date, no flammable refrigerants have been used in train air conditioning systems. In this project, the natural refrigerant R290 (propane) was tested for the first time in a train air conditionings system in normal passenger service. Prior to the start of the project the propane air conditioning module, designed by a railway manufacturer, was tested on a test bench and subjected to extensive safety investigations.

In the project, the propane system was installed in parallel with an R134a system in a BR 440 series regional train of German Railways (Deutsche Bahn), with the equipment architecture of both systems being very similar. The two systems were operated on the train for over a year, with selected operating parameters recorded in a measurement program.

Evaluation of the data recorded during the test period shows that the propane air conditioning system is at least as powerful and energy efficient as the R134a system in regular train operation. Simulation calculations confirm the energy suitability of propane. According to these calculations, the integration of a heat pump could lead to energy savings, but this would have to be verified in practice.

This test showed that alongside CO₂ and air, propane is a feasible natural refrigerant option for air conditioning systems in rail vehicles.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	15
Summary	20
1 Einleitung.....	25
1.1 Regelungen für fluorierte Treibhausgase in der Europäischen Union.....	25
1.1.1 Die europäische F-Gas-Verordnung.....	25
1.1.2 F-Gas-Regelungen für die mobile Klimatisierung in Schienenfahrzeugen.....	26
1.1.3 Kältemittlemissionen aus Schienenfahrzeugen.....	27
1.1.4 Entwicklung des Schienenverkehrs.....	28
1.2 Natürliche Kältemittel für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen.....	29
1.3 Propan (R290) als Kältemittel in der mobilen Klimatisierung.....	31
2 Ziel und Herangehensweise	33
2.1 Zielsetzung des Vorhabens	33
2.2 Herangehensweise.....	34
2.3 Originalausrüstung – Klimaanlage mit R134a	35
2.4 Erprobungsanlage - Klimaanlage mit R290 (Propan).....	38
2.5 Technische Daten der R134a-Klimaanlage und der R290-Klimaanlage.....	41
2.6 Im Messprogramm erfasste Daten	43
3 Messkampagne	45
3.1 Überblick.....	45
3.2 Installation und Inbetriebnahme der beiden Klimaanlagen.....	45
3.3 Datenerfassung.....	47
3.3.1 Datenfluss	47
3.3.2 Überwachung der Messung.....	47
3.3.3 Änderungen der Datenerfassung.....	48
3.4 Wartung und Verbesserung der Datenerfassung	49
3.4.1 Arbeiten an der Anlage	49
3.4.2 Abweichungen und Störungen im Betrieb.....	49
3.4.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Datenerfassung.....	51
4 Messdatenauswertungen der parallelen Messungen.....	52

4.1	Gegenüberstellung ausgewählter Messwerte (Auswertungsebene 1)	53
4.2	Detaillierte Betrachtung definierter Zeitspannen (Auswertungsebene 2)	55
4.3	Statistische Analyse (Auswertungsebene 3)	57
4.4	Vergleich der Energieaufnahme beider Geräte	61
4.4.1	Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme	61
4.4.2	Vergleich der Leistungszahlen (COP)	65
4.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Datenauswertung	68
5	Modellierung und Prozesssimulation	70
5.1	Modellierungswerkzeuge und Basisdaten	70
5.2	Modellierung der Klimaanlage	73
5.2.1	Modellierung der R290-Anlage	73
5.2.2	Modellierung der R134a-Anlage im Kühlbetrieb	73
5.2.3	Modellierung der R744-Anlage im Kühlbetrieb	74
5.2.4	Modellierung des R290- und R744-Wärmepumpenbetriebs	75
5.3	Thermisches Fahrzeugmodell	77
5.3.1	Regelungsmodelle und Teillastbetrieb	77
5.3.1.1	Leistungsregelung	77
5.3.1.2	Regelung zur Prozessführung	79
5.4	Theoretischer Vergleich der Kältemittel	80
5.5	Verifizierung und Validierung der Kältekreismodelle	82
5.5.1	Verwendete Daten und Modell für die Validierung	82
5.5.2	Ergebnisse der Validierung	83
6	Simulative Vergleiche	88
6.1	Simulativer Vergleich der Anlagentypen mit den Kältemitteln R134a und R290 im Kühlbetrieb	88
6.2	Simulativer Vergleich des R290- und R744- mit dem R134a- System im Kühlbetrieb	90
6.3	Dynamische Berechnungen mit Fahrzeugmodell aller Anlagentypen im Kühlbetrieb	92
6.4	Vergleich der Kältemittel R290 und R744 im Wärmepumpenbetrieb	95
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Simulation	97
7	Schlussfolgerungen	98
7.1	Bewertung der Ergebnisse	98
7.2	Ausblick zum Einsatz von Propan (R290)-Anlagen	100
8	Quellenverzeichnis	101
A	Anhang	104

A.1	Schnittstellenzeichnung R134a-/R290-Klimaanlage	104
A.2	Kreislaufschemas	105
A.3	Elektrische Leistungsaufnahme an ausgewählten Tagen	106
A.4	Einsatzmöglichkeiten von R290-Klimaanlagen	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Jährliche Emissionen aus dem Betrieb von Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen von 1992 bis 2020 in Deutschland Tonnen	28
Abbildung 2:	Quartalsentwicklung des Passagieraufkommens in Milliarden Passagierkilometern von 2013 bis 2018 in der EU-28	29
Abbildung 3:	Regionalverkehrsfahrzeug BR 440 der DB Regio AG	34
Abbildung 4:	Konzept der R134a-Klimaanlage (oben: Seitenansicht, unten Aufsicht).....	36
Abbildung 5:	Konzept der R134a-Klimaanlage im Fahrgastraum (Schnitt) ...	37
Abbildung 6:	Konzept der R290-Klimaanlage (oben Seitenansicht, unten Aufsicht).....	38
Abbildung 7:	Konzept der R290-Klimaanlage (oben Seitenansicht, unten Aufsicht).....	39
Abbildung 8:	R290-Klimakompaktgerät für das Regionalverkehrsfahrzeug BR 440 der DB Regio AG in der Fertigungsstätte Schkeuditz.....	40
Abbildung 9:	Schnittzeichnung des Fahrzeugs BR 440 mit gekennzeichneten Einbauorten der Energiemesseinrichtungen und Datenübertragungsgeräte auf dem Dach des Fahrzeugs und im Fahrzeuginneren.....	46
Abbildung 10:	Systematische Darstellung des Datenflusses für die erfassten Messdaten	47
Abbildung 11:	Webansicht mit Geolokalisierung und Energiemonitoring im virtuellen Armaturenbrett.....	48
Abbildung 12:	Gegenüberstellung der Verfügbarkeit von Daten der Aufzeichnungsgeräte; ein Signalniveau von 1 zeigt das Vorhandensein der Messdaten	50
Abbildung 13:	Energiemessgerät der Fa. Janitza vom Typ UMG806 mit drei Drehstromwandlern und einem Ethernet Kommunikationsmodul 806-EC1. Foto vom Testaufbau.....	51
Abbildung 14:	Direkte Gegenüberstellung ausgewählter Messgrößen für R134a-Anlage (rot) und die R290-Anlage (blau) für einen Tagesgang von 16 h im Mai 2021	54
Abbildung 15:	Vergleich zur Bereitstellung der thermodynamischen Leistung im ersten Kältekreislauf (R134a oben, R290 unten).....	58

Abbildung 16:	Vergleich zur Bereitstellung der thermodynamischen Leistung im zweiten Kältekreislauf (R134a oben, R290 unten)	59
Abbildung 17:	Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme (R134a oben, R290 unten)	60
Abbildung 18:	Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche (R134a rot, R290 grün)	61
Abbildung 19:	Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche bei synchroner Datenverfügbarkeit (R134a rot, R290 grün)	62
Abbildung 20:	Komponentenbezogener Vergleich der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche für den Zeitraum Mai bis Oktober 2021 (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)	63
Abbildung 21:	Komponentenbezogener Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme je Kalenderwoche beider Geräte inklusive Heizregister für den Zeitraum August bis Oktober 2021 (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)	64
Abbildung 22:	Komponentenbezogener Vergleich der Aktivierungszeiten je Kalenderwoche beider Geräte inklusive Heizregister (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)	65
Abbildung 23:	Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterststände des R134a-Gerätes für August 2021	66
Abbildung 24:	Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterststände des R290-Gerätes für August 2021	66
Abbildung 25:	Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterststände des R134a-Gerätes für Oktober 2021	67
Abbildung 26:	Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterststände des R290-Gerätes für Oktober 2021	67
Abbildung 27:	Darstellung des Gesamtmodells in der Simulationsumgebung Dymola zur Veranschaulichung der Verknüpfung von Kältekreislaufmodell und Fahrzeugmodell	70
Abbildung 28:	Repräsentative grafische Darstellung des Simulationsmodells der R290-Anlage in Dymola	71
Abbildung 29:	Darstellung des virtuellen Kältemittelkreislaufs mit Umkehrventil für den Wärmepumpenbetrieb (Darstellung im Kühlmodus)	76

Abbildung 30:	Darstellung des virtuellen Kältekreises im Wärmepumpenbetrieb.....	76
Abbildung 31:	Schematische Darstellung der thermischen Lasten und der Luftströme der Klimaanlage am Schienenfahrzeug.	77
Abbildung 32:	Modell der Zustandsmaschine zur Leistungsregelung	78
Abbildung 33:	Repräsentative Vergleichsprozesse der Kältemittel R134a, R744 und R290 bei einer Verdampfungstemperatur von 0 °C.....	81
Abbildung 34:	Darstellung der volumetrischen und der spezifischen Kälteleistung der Kältemittel R290, R134a und R744 in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur und ohne Überhitzung nach der Verdampfung.....	82
Abbildung 35:	Graphische Abbildung des Modells zur Validierung der Kältekreise	83
Abbildung 36:	Auszug der Ergebnisse zur Validierung der Kältekreise R134a und R290.....	84
Abbildung 37:	Validierung der Kälteleistung der Kältekreise mit R290 und R134a.....	86
Abbildung 38:	Validierung der Verdichterleistung der Kältekreise mit R290 und R134a.....	86
Abbildung 39:	Validierung der Kälteleistungsziffer (EER) der Kältekreise mit R290 und R134a.....	87
Abbildung 40:	Simulativer Vergleich der Kälteleistung der Kältemittel R134a und R290 bei den vier ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13	89
Abbildung 41:	Vergleich der Kälteleistungsziffer EER der Kältemittel R134a und R290 bei den ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13	90
Abbildung 42:	Abweichung der Kälteleistungsziffern (EER) relativ zum R134a-System der Kältemittel R744 und R290 bei ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13.....	91
Abbildung 43:	Abweichung der Kälteleistung relativ zum R134a-System der Kältemittel R744 und R290 bei ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 12	92
Abbildung 44:	Lastprofil in Anlehnung an die Norm EN 13129 mit der Variation der Besetzung, solaren Einstrahlung, Fahrzeuggeschwindigkeit, Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte	93
Abbildung 45:	Temperaturverläufe der mittleren Raumtemperaturen (Tim) je Kältemittel mit Verlauf der Umgebungstemperatur.....	93
Abbildung 46:	Elektrischer Bedarf der Klimaanlagen nach den dynamischen Berechnungen im Lastprofil nach EN 13129 und bei konstanten Umgebungsbedingungen.	94

Abbildung 47:	Arbeitszahlen der berechneten Lastprofile bei konstanten Umgebungsbedingungen und nach EN 13129	95
Abbildung 48:	Ergebnisse der Simulationen im Wärmepumpenmodus unter stationären Randbedingungen	96
Abbildung 49:	Detaillierung der mechanischen und luftseitigen Schnittstellen der beiden Vergleichsgeräte	104
Abbildung 50:	Prinzipdarstellung des Kältekreislaufes des R134a-Klimagerätes (Bestandsanlage)	105
Abbildung 51:	Prinzipdarstellung des Kältekreislaufes des R290-Klimagerätes (Versuchsträger)	105
Abbildung 52:	08.05.2021, mittlere Besetzung, mittlere Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums.....	106
Abbildung 53:	31.03.2021, mittlere bis hohe Besetzung, mittlere Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums	107
Abbildung 54:	02.06.2021, hohe Besetzung, hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums.....	108
Abbildung 55:	09.05.2021, mittlere Besetzung, hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums.....	109
Abbildung 56:	10.05.2021, kein Fahrbetrieb, ohne Besetzung, mittlere bis hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung wesentlicher Parameter von R134a-Anlage und R290-Anlage	41
Tabelle 2:	Übersicht über die wesentlichen technischen Änderungen am Kältemittelkreislauf und die zu erwartenden Auswirkungen mit Relevanz für die Klimatisierung	42
Tabelle 3:	Gegenüberstellung wesentlicher Parameter von R134a-Anlage und R290-Anlage	43
Tabelle 4:	Anzahl und Dauer der Aktivierungen leistungsbestimmender Komponenten für ausgewählte vollständige Tage bei unterschiedlichen Lastbedingungen	56
Tabelle 5:	Beschreibung und Kenndaten der Hauptkomponenten des Kältekreislaufs der simulierten Anlagen mit R290 und R134a sowie des thermischen Fahrzeugmodells	72
Tabelle 6:	Beschreibung und Kenndaten der Hauptkomponenten des Kältekreislaufs der simulierten Anlage mit dem Kältemittel R744 (CO ₂).....	74
Tabelle 7:	In den Modellen implementierte Leistungsstufen zur Teillastregelung	78
Tabelle 8:	Darstellung der Lüfterstufen des Umgebungswärmeübertragers in Abhängigkeit vom Hochdruck im Kühlbetrieb	79
Tabelle 9:	Eigenschaften der natürlichen Kältemittel R290 und R744 im Vergleich zu R134a	80
Tabelle 10:	Definierte Umgebungsbedingungen für die Typtests zur Validierung der Kältekreismodelle mit R134a und R290.....	83
Tabelle 11:	Beschreibung der in Abbildung 36 dargestellten Kennzahlen mit Einheiten	85
Tabelle 12:	Randbedingungen der Simulationen für den Vergleich der Anlagen mit den Kältemitteln R290 und R134a	88
Tabelle 13:	Ausgewählte Laststufen und zugehörige Abkürzungen in der Modellierung	89
Tabelle 14:	Weitere durchgeführte Lastpunkte für dynamischen Berechnungen	94
Tabelle 15:	Übersicht zu Klimakompaktgeräten für Fahrzeugtyp XCC / BR 440 / BR 1440	111

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AP	Arbeitspaket
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, US-Verband, der Standards für die Kälte-Klima-Branche entwickelt
CAN	Controller Area Network
CEN	European Committee for Standardization- Europäisches Komitee für Normung
CFD-Simulationen	Computational Fluid Dynamics-Simulationen
CSM	Common safety method - gemeinsame Sicherheitsmethoden s
C-Schiene	Profil in Form eines C, hier aus Metall zur Befestigung von Komponenten
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC-Lüfter	EC = electronically commutated, elektronisch gesteuerter Lüfter
EU	Europäische Union
F-Gas	Fluoriertes (Treibhaus-) Gas
FTL	Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG
GHG	Greenhouse Gas (Treibhausgas)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential), wenn nicht anders angegeben GWP ₁₀₀ -Werte aus dem 4. Assessment Report des IPCC [IPCC 2007]
HF	Flusssäure
HFKW	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KK1/KK2	KK-Kältekreis – Kältekreis 1 / Kältekreis 2
KKG	Klimakompaktgerät
LTE	Long term evolution (Mobilfunkstandard der dritten Generation)
MRV	Monitoring, Reporting und Verifizierung
PI-Regler	Proportional–Integral Regler
R	engl. refrigerant, Kältemittel
R134a	Fluoriertes Kältemittel (Tetrafluorethan)
R407C	Kältemittelmischung aus fluorierten Gasen (52% R134a, 25% R125 und 23% R32)
RR	Rohrreihen
TFA	Trifluoressigsäure
TRL	Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)
WT oder HX	Wärmeübertrager

Einheiten/ Messgrößen	Erläuterung
bar	bar Einheit für den Druck
CO ₂ -Wert, CO ₂ -Mittel	Kohlendioxid-Wert, Kohlendioxid-Wert gemittelt
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
dB(A)	Schall(druck)pegel
Dp	Delta pressure = Druckdifferenz
EER	Energy Efficiency Ratio (Energieeffizienz-Verhältnis)
h	Enthalpie
k-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in W/m ² K
kW	Kilowatt, Einheit für die Leistung
kWh	Kilowattstunde, Einheit der Arbeit, Leistung über einen Zeitraum
m	Masse
m ²	Quadratmeter
m ³ /h	Kubikmeter pro Stunde
NP	Nennpunkt
p (opt, set)	Sollwert des optimalen Hochdrucks
Pel	Elektrische Leistung
Pa	Pascal. Einheit des Drucks
ppm	Parts per million
q, qv	spezifische Kälteleistung, volumetrische Kälteleistung
ρ	(Kältemittel-) Dichte
Qo	Kälteleistung
r. H.	Relative Luftfeuchte
Sonnenlast	(Sonnen-) Einstrahlungsleistung in W/m ²
to, tc	Verdampfungstemperatur in °C, Verflüssigungstemperatur in °C
toh	Sauggastemperatur in °C
T, Te, Tim	Temperatur, Eingangstemperatur, Mittlere Raumtemperatur
ΔT _{Tim}	Sollwertabweichung der Raumlufthtemperatur
ΔT _{TZUL}	Sollwertabweichung der Zulufttemperatur
V	Volumenstrom in m ³ /h

Zusammenfassung

Ausgangslage und Ziele

Klimaanlagen von Schienenfahrzeugen verwenden als Kältemittel heute vorrangig teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW). Typische Kältemittel sind d HFKW R134a und das HFKW-Gemisch R407C.

In Deutschland lagen die HFKW-Kältemittlemissionen aus dem Betrieb von Zugklimaanlagen in Schienenfahrzeugen im Jahr 2020 bei 23,3 Tonnen (entspricht rund 33.3 Kilotonnen CO₂-Äquivalenten). Mit dem Anstieg des Fahrgastaufkommens wird der Energie- und Kältemittelbedarf zunehmen. Damit werden auch die Emissionen steigen.

Die europäische Verordnung über fluoridierte Treibhausgase (EU-Kommission 2014, 2024) fordert die schrittweise Reduzierung von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) aufgrund ihres hohen Treibhauspotentials (GWP). Der in der Verordnung enthaltene Zeitplan, der sog. HFKW-Phase-down, verringert die auf dem EU-Markt verfügbare Menge von bestimmten HFKW-Kältemitteln mit hohem Treibhauspotential, wie zum Beispiel R134a. Auf internationaler Ebene wurde im Kigali Amendment zum Montrealer Protokoll ebenfalls ein Ausstieg aus den HFKW vereinbart.

Durch die zunehmende Verknappung der HFKW-Kältemittel wird in der Kälte-Klima-Technik insgesamt ein Umstieg auf alternative Kältemittel mit geringerem GWP nötig. Die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen ist durch die HFKW-Verknappung und den damit verbundenen Preisanstiegen sowie eventueller Verfügbarkeitseinschränkungen betroffen.

In den nächsten Jahren muss daher auch bei Schienenfahrzeugen eine weitreichende Umstellung auf Kältemittel mit geringem Treibhauspotential (GWP) erfolgen. Dabei besteht das Ziel darin, neue technische Lösungen für Schienenfahrzeuge zu entwickeln, die sowohl auf Kältemitteln mit geringem GWP basieren, als auch eine verbesserte, mindestens aber gleichwertige Energieeffizienz aufweisen.

Die Ausrüstungs-, Betriebs- oder Unterhaltskosten sollen sich dabei nicht signifikant erhöhen. Berücksichtigt werden müssen außerdem Faktoren wie Gewicht und Platzbedarf der Anlagen, insbesondere bei Nachrüstungen. Aus Umweltsicht sollte auf halogenfreie, sog. natürliche Kältemittel umgestellt werden.

Propan als Kältemittel für Schienenfahrzeuge testen

Für die Klimatisierung in Zügen wurden bereits natürliche Kältemittel erprobt: einige ICE-Züge sind regulär mit luftgestützten (Air-cycle) Klimaanlagen im Einsatz und es sind in mehreren Zügen Klimaanlagen mit dem Kältemittel R744 (CO₂) getestet worden. Eine neue Option wären Kohlenwasserstoffe wie Propan.

Die Brennbarkeit von Kohlenwasserstoffen wie Propan hatte Hersteller und Betreiber von Bahnklimaanlagen bisher davon abgehalten, diese Stoffgruppe für die Klimatisierung von Zügen in Betracht zu ziehen. Die Firma Faiveley Transport Leipzig (FTL, Wabtec) hat sich nun dieser Technologie angenommen und grundsätzliche Vorentwicklungen mit dem speziellen Fokus auf die Sicherheit gegen Leckagen und mögliche Brandsituationen geleistet.

Als Kältemittel hat Propan das Kurzzeichen R290. Es hat die chemische Formel C_3H_8 und ist ein einfacher Kohlenwasserstoff, also nicht halogeniert, und hat nur ein sehr kleines Treibhauspotential GWP_{100} von 0,02 (IPCC 2021).

In diesem Projekt wurde eine von der Fa. Faiveley entwickelte Zugklimaanlage mit dem Kältemittel Propan (R290) weltweit erstmalig im üblichen Fahrgastbetrieb erprobt und mit einem Messprogramm begleitet. Die Erprobung sollte dazu geeignet sein nachzuweisen, dass die Verwendung des brennbaren natürlichen Kältemittels R290 in Klimaanlagen von Schienenfahrzeugen im regulären Zugbetrieb leistungsfähig und energetisch effizient ist.

Auswahl des Zuges als Probeträger und des Vergleichssystems mit R134a

Als Schienenfahrzeug (Probeträger) wurde ein Nahverkehrszug der Deutschen Bahn der Baureihe BR 440 herangezogen. Dabei handelt es sich um eine langjährig gewachsene Plattformbaureihe die bereits ein R134a-basiertes Klimakompaktgerät der Fa. Faiveley nutzt. Das Fahrzeug der BR 440 ist mit einer typischen Aufdachklimaanlage ausgerüstet, wie sie auch bei anderen Baureihen für Metros, Regional- und Fernverkehrsfahrzeuge zum Einsatz kommt, um für Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu sorgen.

Dieses R134a-Klimagerät wird von Fa. Faiveley seit dem Jahr 2003 in der Grundform mit verschiedenen Modifikationen gebaut, es liegen daher umfassende Daten und Erfahrungen vor. So konnte der Aufwand für die Umstellung auf R290 überschaubar gehalten werden.

Die für das Fahrzeug konzipierten Klimakompaktgeräte werden zur Klimatisierung und zur Beheizung des Fahrgastraumbereiches in der Klimazone II nach DIN EN 14750-1 (DIN 2006) verwendet. Demnach ist die Heizleistung für eine Außentemperatur von minus 20°C und die Kühlleistung für eine Außentemperatur von 35°C bei 50 % relativer Luftfeuchte und einer Sonnenlast von 700 W/m² auszulegen.

Vorbereitende Arbeiten

Die für die Umrüstung vom Kältemittel R134a auf das Kältemittel R290 notwendigen technischen Änderungen am R290-Klimagerät im Vergleich zum R134a-Originalgerät wurden ermittelt. Sie sind eingeflossen in die Gefährdungsermittlung der parallel und generisch durchgeführten Gefahren- und Risikobetrachtung zur Evaluierung und Bewertung von Risiken im Eisenbahnbereich gemäß der CSM-Verordnung 403/2013 (EU-Kommission 2013). Änderungen, die notwendig waren, um aus dem Einsatz von R290 resultierende Risiken zu minimieren, wurden umgesetzt.

Die R290-Anlage ist im grundsätzlichen Aufbau identisch mit der R134a-Anlage. Die Grundstruktur des Klimaanlagengehäuses und die Schnittstellen zum Wagenkasten der R134a-Anlage wurden übernommen.

Aufgrund der ähnlichen kältetechnischen Eigenschaften von R290 und R134a konnte die Regelung der Klimaanlage übernommen werden, wobei die Parameter der neu verbauten Komponenten an Propan angepasst wurden. Im Wesentlichen betrafen die Änderungen Anpassungen der Regelgrenzen an die physikalischen Eigenschaften von R290 (d.h. Druck- und Temperaturgrenzen für den Kältekreislauf). In der technischen Ausführung wurden ein für R290 geeigneter und zugelassener Verdichter sowie die Wärmeübertrager, Zulüfter und Kondensatorlüfter angepasst.

Weitere Änderungen an der R290-Anlage betreffen die Führung der Kältemittelleitungen und die Gestaltung der Wärmeübertrager. Die Kältemittelfüllmenge pro Kreislauf konnte aufgrund der höheren volumetrischen Kälteleistung von R290 gegenüber R134a deutlich reduziert werden.

Im Juli 2020 erfolgte im DB-Werk Würzburg die Installation und Inbetriebnahme der beiden Klimaanlage (R134a und R290) auf dem Nahverkehrszug. Dabei wurden auch Systeme zur Datenaufzeichnung für die beiden Klimageräte und zur Erfassung und Fernübertragung von Energiedaten installiert.

Erprobungsphase

Der Nahverkehrszug mit den beiden messtechnisch untersuchten Klimaanlage befand sich vom 15. Juli 2020 bis Oktober 2021 im Fahrplaneinsatz mit Fahrgästen im Regionalverkehrsbereich Franken – Thüringen. Die Datenerfassung erfolgte von September 2020 bis Oktober 2021 unter realen Bedingungen im Passagierbetrieb.

Ende Oktober 2021 wurde die Felderprobung mit der Demontage des R290-Versuchsträgers abgeschlossen und der R290-Versuchsträger einer Inspektion und Funktionsprüfung zugeführt.

Datenauswertung und Bewertung

Ziel der Datenauswertung war es, einen Vergleich der beiden Versuchsanlagen mit R134a bzw. R290 insbesondere hinsichtlich des Energiebedarfs, der Leistungsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit zu erstellen sowie Ergebnisse zum Vergleich mit weiteren Anlagen zu liefern.

Die Daten, die getrennt in unterschiedlichen Erfassungssystemen (Geolokalisierung, Energieerfassung, Anlagendaten) gewonnen wurden, wurden auf Synchronität geprüft und gegebenenfalls nachträglich auf Basis von Vergleichskanälen synchronisiert.

Ein direkter Vergleich der kumulierten aufgenommenen elektrischen Energie wäre aufgrund der Unterschiede der Anlagen und des Anlagenbetriebes nicht zielführend gewesen. Zum einen war die technische Ausführung des Versuchsträgers hinsichtlich Komponenten und Regelung an die geänderten Anforderungen bei Verwendung des Kältemittels R290 angepasst. Zum anderen befanden sich der R290-Versuchsträger und die R134a-Vergleichsanlage zwar auf dem gleichen Fahrzeug, jedoch auf verschiedenen aneinandergrenzenden Wagen. Daher können sich trotz weitgehend gleicher äußerer thermischer Lasten die inneren Lasten zum Teil stark voneinander unterscheiden. Zum Anlagenvergleich war daher eine detailliertere Analyse erforderlich.

Dabei wurden drei Auswertungsebenen analysiert:

Die erste Auswertungsebene umfasste die direkte Gegenüberstellung der aufgezeichneten Messwerte aus den unterschiedlichen Datenerfassungssystemen. Dies bietet sich für ausgewählte, vergleichsweise kurze Zeiträume zur visuellen Vergleichs- und Auswirkungsanalyse an.

Aus der direkten Gegenüberstellung von Messwerten der Vergleichsgeräte bei gleichen Außenbedingungen können Rückschlüsse auf Zusammenhänge und wesentliche Unterschiede insbesondere für das zeitabhängige Verhalten des Anlagenbetriebes getroffen werden.

Bei ähnlicher Aktivierungshäufigkeit der Verdichter beider Anlagen zeigte das R134a-Vergleichsgerät eine deutlich höhere Aktivierungsdauer der Verdichter als das R290-Gerät. Hinsichtlich der Bypass-Aktivierung waren Häufigkeit und Dauer für das R134a-Vergleichsgerät zum Teil deutlich erhöht. Aufgrund der kältetechnischen Ausführung des Bypasses ist anzunehmen, dass unter diesen Bedingungen die Effizienz der R134a-Vergleichsanlage deutlicher geringer ausfällt als die des R290-Versuchsträgers.

Die zweite Auswertungsebene umfasste eine analytische Betrachtung definierter Zeitintervalle. Mittels mathematischer Methoden wurden erweiterte Informationen aus den erfassten Messdaten gewonnen. Durch eine Reduktion der Datenmenge auf wesentliche Parameter wurde eine Beschreibung für diese Zeiträume ermöglicht und so ein umfassender Überblick geschaffen. Zu den wesentlichen Parametern zählten beispielsweise Häufigkeit und Dauer der Aktivierung ausgewählter Komponenten der Klimageräte, kumulierte Energieaufnahme der Geräte und Komponenten, Median und Mittelwert für Außen- und Fahrgastraumtemperatur sowie die Schwankungsbreite der Innenraumtemperatur.

Es zeigte sich, dass die Betrachtung vollständiger Tage eine valide Methode ist, um die Auswirkung einzelner abweichender thermischer Lasten (vor allem innerer Lasten) in einer Gesamtbetrachtung einzuordnen. Für alle Aktivierungen eines oder beider Verdichter war die Gesamtaktivzeit des R290-Versuchsträgers geringer als die der R134a-Vergleichsanlage. Die Dauer der Aktivität des Bypasses war hingegen vor allem bei höheren thermischen Lasten für das R290-Gerät höher, was durch die größere Kälteleistung des gewählten R290-Verdichters begründet ist und die Erwartungen aus der Auslegungsrechnung bestätigt. Die kumulierte elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte, insgesamt und um den Beitrag der Lüfter reduziert, war an den betrachteten Tagen auf einem ähnlichen Niveau. Die elektrische Leistungsaufnahme könnte bei Einsatz einer kleineren Baugröße für das R290-Gerät gesenkt werden.

In der dritten Auswertungsebene wurden vor allem statistische Methoden angewandt, die der Darstellung unterschiedlicher Zusammenhänge für längere Zeiträume dienen. Dazu zählen die sog. Clusterung und Klassierungsverfahren wie die Verbundklassierung nach DIN 45667(1969), mittels derer die gemessenen und berechneten Daten auf ein geändertes Bezugssystem bezogen und dargestellt werden können. Dadurch tritt der zeitliche Bezug in den Hintergrund.

Die Datenauswertung führte zu folgenden Ergebnissen:

- ▶ Die erfassten Daten bilden den Betrieb der jeweiligen Klimaanlage umfassend und vollständig ab. Betriebsparameter, Zustandsdaten und Fehlerstatistik erlauben eine detaillierte und genaue Bewertung;
- ▶ Die gemessenen Parameter, insbesondere der Energieverbrauch der beiden Anlagen mit R290 und R134a, sind in der erwarteten Größenordnung;
- ▶ Bezogen auf die kumulierte Energieaufnahme der Verdichter sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Vergleichsgeräten mit R290 und R134a erkennbar;
- ▶ Der R290-Versuchsträger liefert bei Betrieb des Kältekreislaufes allgemein eine höhere Kälteleistung als das R134a-Vergleichsgerät;

- ▶ Trotz im Wesentlichen unveränderter Regelungsalgorithmen ist zum Teil ein deutlich unterschiedliches Anlagenverhalten erkennbar, etwa bei der simultanen Aktivierung beider Verdichter;
- ▶ Aufgrund der eher milden sommerlichen Temperaturen im Jahr 2021 und Lücken in der Datenaufzeichnung im entsprechenden Versuchszeitraum sind nur wenige simultane Vergleichsdaten beider Anlagen für Außentemperaturen oberhalb von 30°C verfügbar.

Modellierung und Prozesssimulation

Zum modellbasierten Vergleichen von Anlagen wurden Prozesssimulationen mit der Modellierungs- und Simulationsumgebung Dymola durchgeführt. Dymola erlaubt es unterschiedliche technische Bereiche in einem Gesamtmodell abzubilden. So konnte ein komponentenbasierter Kälteprozess mit einem thermischen Fahrzeugmodell in einem Gesamtmodell verknüpft werden.

In dem umfangreichen Simulationskonzept wurden die Referenz-Klimaanlage mit R134a, die R290 (Propan)-Klimaanlage sowie eine CO₂-Klimaanlage ohne und mit Wärmepumpe vergleichend gegenübergestellt.

Schlussfolgerungen

Vorteile für Propan (R290) als Kältemittel für Bahnklimaanlagen ergeben sich vor allem aus dem effizienten Betrieb. Die Ähnlichkeit von R290 mit R134a in Drucklage und Kühlbetrieb, Bordnetzspannung sowie Gewicht, Größe und Abmessungen der Klimaanlage vereinfacht einen Umstieg auf R290-Systeme. Die Komponenten für R290 sind im Vergleich zu CO₂ oder Air-cycle Luftklimaanlagen im Bahnbereich gut verfügbar

Die Ergebnisse der Demonstrationsphase mit der Propan-Klimaanlage bestätigten die Erwartungen an die technische Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit und den Jahresenergieverbrauch in vollem Umfang.

Es konnte gezeigt werden, dass Klimaanlagen mit Propan mindestens den Wirkungsgrad der heutigen HFKW-Anlagen erreichen und die erforderlichen Begrenzungen von Masse und Bauvolumen einhalten können.

Propan ist im Wärmepumpenbetrieb potentiell nutzbar bis zu niedrigen Außentemperaturen wie R744 (CO₂). Die Simulation zeigte, dass ein niedrigerer Jahresenergieverbrauch und damit niedrigere LCC-Kosten erreichbar wären.

Durch diese Erprobung steht mit Propan neben CO₂ und Luft ein drittes natürliches Kältemittel für Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen zur Auswahl.

Ausblick

Für den Anwendung im Zug wurde mit dem Kältemittel Propan bisher keine Anlage mit Wärmepumpenintegration in der Praxis realisiert. Wünschenswert wären daher weitere Versuche zur Überprüfung der Simulationsergebnisse für die Wärmepumpe in der Praxisanwendung.

Summary

Initial situation and goals

Air conditioning systems of rail vehicles currently use refrigerants belonging to the group of hydrofluorocarbons (HFCs). Common refrigerants are HFC R134a und the HFC blend R407C.

In Germany, HFC emissions from operation of rail vehicles amounted to around 23.3 tons (corresponds to 33,3 kilotons CO₂ equivalents). As the number of passengers increases, so will the demand for energy and refrigerants, which will also increase emissions.

The European Regulation on fluorinated greenhouse gases (2014, 2024) demands a stepwise reduction of hydrofluorocarbons (HFCs) based on their high global warming potential (GWP). The time table of the regulation, the so-called phase down, increasingly reduces the quantity of certain HFC refrigerants with high GWP like R134a on the EU market. At international level, an HFC phase down was also agreed on in the Kigali Amendment to the Montreal Protocol.

The increasing shortage of HFC refrigerants forces the refrigeration and air conditioning industry as a whole to switch to alternative refrigerants with a lower GWP. Air-conditioning of rail vehicles is impacted by this scheme due to the limited supply of HFCs and related price increases as well as potentially lacking availability of refrigerants.

Thus, a far-reaching technology transition to refrigerants with low GWP needs to be implemented in the next years. The aim should be to develop technical solutions relying on refrigerants with low GWP and ideally with an enhanced, or at least equal, energy efficiency without significant increases in costs for installation, operation and maintenance.

Moreover, requirements such as weight and space restrictions are to be accounted for, especially when it comes to retrofits. From an environmental point of view, a switch should be made to halogen-free, so-called natural refrigerants.

Testing propane as refrigerant for rail vehicles

Natural refrigerants have already been tested for air conditioning in trains: some ICE trains are regularly used with so called Air-cycle air conditioning systems, and air conditioning systems with the refrigerant R744 (CO₂) have been tested in several trains. A new option would be hydrocarbons such as propane.

The flammability of hydrocarbons such as propane had previously discouraged manufacturers and operators of railway air conditioning systems from considering this group of substances for the air conditioning of trains. However, the company Faiveley Transport Leipzig (FTL, Wabtec) has now taken on this technology and made fundamental preliminary developments with a special focus on safety against leaks and possible fire situations.

As refrigerant, propane is designated with the abbreviation R290. Propane has the chemical formula C₃H₈ and is a simple hydrocarbon, i.e. not halogenated, and has a very low global warming potential GWP₁₀₀ of 0.02 (IPCC 2021).

In this project, a rail air conditioning system developed by Faiveley (FTL, Wabtec) using the refrigerant propane (R290) was tested for the first time worldwide in normal passenger operation and accompanied by a measurement programme. The trial should be suitable for

demonstrating that the use of the flammable natural refrigerant R290 in air conditioning systems in rail vehicles is efficient in terms of performance and energy consumption in regular train operation.

Selection of the test carrier train and the comparative system with R134a

As rail vehicle (test carrier) a local passenger train of the DB-class series BR 440 operated by Deutsche Bahn (DB) was selected. This class represents a platform series developed over years which used a compact air conditioning system based on R134a by Faiveley. The rail vehicle was equipped with a typical rooftop air conditioning system, which is used in other series for metros, regional trains as well as long distance trains to allow for comparable results.

This air conditioning unit in its basic design has been built by the company Faiveley since 2003 with several modifications. Hence, comprehensive data and experience is available so that the transition to R290 was also considered as manageable.

The compact rail air conditioning systems are laid out for cooling and heating of the passenger compartment in climate zone II according to DIN EN 14750-1 (DIN 2006). Consequently, requirements to be met are an outside temperature of minus 20°C for heating performance as well as an outside temperature of 35°C at 50 % humidity and a solar load of 700 W/m².

Preparatory work

The technical changes required to convert the R134a air conditioning system to the R290 system due to the refrigerant change from R134a to R290 were identified. They have been incorporated into the hazard identification of the parallel and generic conducted risk analyses and assessment to evaluate and assess the risks in the railway sector in accordance with the CSM Directive 403/2013 (EU-Kommission 2013). Modifications to minimize the risks linked to the application of R290 were implemented.

In its basic structure, the test system running on R290 is identical with the system relying on R134a. The basic structure of the housing box and the interfaces to the wagon body of the R134a-system were adopted.

Due to the similar physical refrigeration characteristics the basic control technology of R134a system could be used with adjusting to the requirements of the refrigerant R290. These modifications related essentially to the adaption of the control limits for the physical properties of R290 (i.e. pressure and thermal limits of the refrigerant circuit). In the technical set-up of the R290 test system, a compressor suited and approved for the use with R290 as well as the heat exchangers, air inlet fans and condenser fans were adjusted.

Further adjustments of the R290 air conditioning system refer to the routing of the refrigerant pipes as well as the design of heat exchangers. The refrigerant charge per circuit could be reduced significantly due to the higher volumetric capacity of R290 as compared to R134a.

In July 2020, the two air conditioning systems (R134a and R290) were installed and commissioned on the passenger train at the DB plant in Würzburg. Systems for data recording for the two air conditioning units and for recording and remote transmission of energy data were also installed.

Test phase

The local passenger train equipped with both air conditioning systems operated from July 15, 2020 until end of October 2021 according to regular schedule with passengers in the regional transport area Franconia- Thuringia, Germany. The monitoring data collection was carried out from September 2020 to October 2021 under real conditions in passenger service.

End of October 2021, the field testing was completed and the R290 test system was dismantled, followed by an inspection and a functional test.

Data analysis and assessment

The goal of the data analysis and assessment was a comparative analysis of both air conditioning systems employing R134a and R290 concerning energy consumption, performance and cost-effectiveness, as well to provide results for comparison with other equipment

The data that were collected separately in different documentation systems (geo location, energy data, equipment data) were checked for synchronicity. If needed, the data was adjusted retroactively based on information from comparison channels.

A direct comparison of the cumulative power consumption would not have been expedient, due to the differences in systems and systems operation. Firstly, the technical set-up of the test system was adjusted in terms of components and control technology to the requirements of the refrigerant R290. Secondly, the R290 test system as well as the R134a test system were located on the same vehicle but in different cars next to each other. Thus, although external thermal loads were almost identical, the inside loads could differ. To perform the comparison of both systems, a more detailed analyses was required.

Three assessment levels were performed:

The first assessment level included the direct comparison of recorded measurement data from the different types of data logging systems. This was done for selected, rather short time periods in form of a visual comparison and impact analysis.

The direct comparison of measurement data of both air conditioning units under the same external conditions can lead to conclusions about similarities and differences of the equipment operation, especially about time-related behaviour.

Despite the similar frequency of activation of the compressors of both systems, the duration of activation of the compressor of the R134a system was significantly higher than for the compressor of the R290 system. Concerning the activation of the bypass, frequency and duration of activation of the R134a system was higher as well. Due to the characteristics of the bypass it can be assumed that the efficiency of the R134a system is lower than the efficiency of the R290 test system.

In the second assessment level, an analysis of defined time intervals was performed. Further information from the measurement data was derived through application of mathematical methods. Due to reducing the data quantity to significant parameters, these time intervals could be characterized to generate a comprehensive overview. The main parameters include frequency and duration of the activation of selected components of the air conditioning equipment, the cumulative energy consumption of the equipment and components, the median

and average values for outside and passenger compartment as well as variations of the inside temperatures.

It could be demonstrated that the assessment of full days is a valid method to summarize the influence of single deviating thermal loads (in particular internal loads). For all activations, one or both compressors of the R290 test system showed shorter total activation times than the R134a system. The duration of bypass activation, in contrast, was higher for the R290 test system, especially for higher thermal loads. This finding is in line with the design calculations and results from the higher cooling capacity of the selected R290 compressor. The level of cumulative power consumption of both systems, in total and also when deducting the consumption from fans, was similar during the selected days. The power consumption could be reduced further when choosing a smaller size of the R290 system.

In the third assessment level, statistical methods were applied to present different relationships during longer time periods, such as the so-called clustering and classification methods as the composite classification according to DIN 45667(1969). In this way, the measured and calculated data could be transferred to a modified reference system and the timereference of data became less relevant.

The data assessment led to the following results:

- ▶ The recorded data show a comprehensive and complete documentation of the operation of each air conditioning system. Operational parameters, status data and error statistics allow for detailed and precise evaluation;
- ▶ The parameters measured, in particular power consumption of both systems with R290 and R134a, are within the expected ranges;
- ▶ No significant differences between the two test systems with R290 and R134a were found regarding the cumulative power consumption of the compressors;
- ▶ The R290 test system delivered an overall higher cooling capacity compared to the R134a system;
- ▶ Despite the in essence unchanged control algorithms, in part a significant different system behaviour was observed, for example when both compressors are simultaneously activated;
- ▶ Due to the comparably mild summer temperatures in 2021 and gaps in the data recording during the testing period, only few simultaneous data for both systems for outside temperatures of more than 30°C are available.

Modelling and process simulation

For a model-based comparison of systems, different process simulation activities were performed with the modelling and simulation tool Dymola. Dymola allows for creating a comprehensive model from different technical areas. In this way, a component-based air conditioning process was linked to a thermal model for vehicles.

In the comprehensive simulation concept, the reference air conditioning system with R134a, the R290 (propane) air conditioning system and a CO₂ air conditioning system with and without a heat pump were compared.

Conclusions

Advantages of propane (R290) as refrigerant for air conditioning systems in rail vehicles arise foremost from the efficient operation. The results of the testing phase of the propane air conditioning system fully confirm the expectations concerning availability, performance and annual energy consumption. It was demonstrated that propane air conditioning systems meet at least the efficiencies of today's HFC systems while maintaining the requirements for space and dimensions.

The similarity of the R290 to R134a in operational pressure and cooling operation, on-board power supply voltage, weight as well size and dimensions of the air conditioning system simplifies a switch to R290 systems. The components for R290 are, compared to CO₂ and Air-cycle air conditioning systems, well available.

Propane can operate in heat pump mode down to the same low ambient temperatures as R744 (CO₂). The simulation results show that a low annual energy consumption and thus low LCC-costs would be achievable.

Due to this investigation propane is now next to CO₂ and air recognized as the third natural refrigerant option for air conditioning in rail vehicles.

Future perspectives

With the refrigerant propane no system with heat pump integration has been realised in practice for use in trains so far. Further tests to verify the simulation results for the heat pump in practical applications would therefore be desirable

1 Einleitung

1.1 Regelungen für fluorierte Treibhausgase in der Europäischen Union

1.1.1 Die europäische F-Gas-Verordnung

Die Europäische Union führte im Jahr 2006 als erste Region der Welt eine umfassende F-Gas-Gesetzgebung ein. Die erste F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (EU-Kommission 2006) enthielt Bestimmungen zur Zertifizierung von Technikern und Serviceunternehmen für den Umgang mit F-Gas-basierten Anlagen, Berichterstattung, Anforderungen an Dichtheitskontrollen und die Rückgewinnung von F-Gasen, Verbote des Inverkehrbringens einiger Anwendungen, die F-Gase enthalten oder zur Funktion benötigen, sowie Verbote für die Verwendung bestimmter F-Gase in spezifischen Anwendungen.

Am 1. Januar 2015 trat mit der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (EU-Kommission 2014) eine überarbeitete, in Teilen noch bis Ende 2024 geltende Fassung der F-Gas-Verordnung in Kraft. Der Geltungsbereich der F-Gas-Verordnung wurde erheblich ausgeweitet und um einen Zeitplan zur schrittweisen Reduzierung von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) ergänzt – den sog. HFKW-Phase-down. Des Weiteren beinhaltet die F-Gas-Verordnung ein Quotensystem für das Inverkehrbringen von HFKW, zusätzliche Zertifizierungs- und Berichterstattungsanforderungen sowie weitere Verbote für das Inverkehrbringen und die Verwendung von F-Gasen in bestimmten Anwendungen.

Primäres Ziel des HFKW-Phase-down ist die Verschiebung von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential, GWP) hin zu klimafreundlicheren Alternativen, wie natürlichen Kältemitteln. Erreicht werden soll dies durch die zunehmende Verknappung der HFKW mit hohem GWP auf dem EU-Markt, indem bis 2030 die zulässige Gesamtmenge an CO₂-Äquivalenten (CO₂e)¹ etwa 21 % des Basisjahres 2015 erreichen sollte.

Das F-Gas-Angebot auf dem europäischen Markt wird jedoch nach wie vor von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) dominiert. Im Jahr 2019 waren etwa 75 % (in metrischen Tonnen und in CO₂-Äquivalenten (CO₂e)) der F-Gase Gesamtmenge HFKW. HFKW werden in großen Mengen in stationären und mobilen Kälte- und Klimaanwendungen als Kältemittel eingesetzt.

Die F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2014) wurde von der EU-Kommission bis Ende 2022 überarbeitet. Der umfassende Bericht bewertete die Wirksamkeit der F-Gas-Verordnung und enthält neue Vorgaben, die zu einer Ausweitung des aktuellen Anwendungsbereichs der neuen F-Gas Verordnung führten (Birchby et al. 2022). Das EU-Parlament hat, basierend auf dem Vorschlag der EU-Kommission, weitere Beschränkungen hinsichtlich der Nutzung, vor allem von HFKW gefordert (European Parliament 2022). Während die EU-Kommission keinen Vorschlag zu Vorgaben für die Klimatisierung im Schienenverkehr gemacht hatte, hat das EU-Parlament diesen Sektor unter Paragraph 5, den Dichtheitskontrollen, mitaufgenommen. Dieser Vorschlag wurde in die neue F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2024) übernommen.

Am 7. Februar 2024 ist die zweite überarbeitete F-Gas Verordnung (EU) 2024/573 (EU-Kommission 2024) in Kraft getreten. Es wurde eine erhebliche Anzahl neuer Vorgaben beschlossen, die zu einer Ausweitung des Anwendungsbereichs der F-Gas Verordnung führen.

¹ Die Tonnage der einzelnen F-Gase wird mit dem jeweiligen Treibhauspotential multipliziert, dies ergibt die CO₂-Äquivalente, die durch das Phase-down der F-Gas Verordnung sinken sollen.

Die Verordnung enthält u. a. weitere Verbote, verschärft den HFKW-Phase-down bis zum Jahr 2030 und fordert, dass bis zum Jahr 2050 keine HFKW mehr auf den Markt gebracht werden dürfen. Pflichten zu Dichtheitskontrollen für mobile Klimaanlage wie Schienenfahrzeuge wurden neu aufgenommen.

Zusätzlich zur F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2014 und 2024) verbietet die Richtlinie 2006/40/EG (EU-Kommission 2006a) seit 2017 die Verwendung von Kältemitteln mit einem GWP über 150 in Klimaanlage neuer Pkw und Pkw-ähnlicher Nutzfahrzeuge in Europa. Dieses Verbot führte seit 2017 zu einem starken Rückgang des HFKW-Einsatzes, weil alle neuen Pkw und Pkw-ähnliche Nutzfahrzeuge vom HFKW-Kältemittel R134a (GWP 1430) auf das ungesättigte HFKW² R1234yf (GWP 4) und – in sehr geringem Umfang – das natürliche Kältemittel CO₂ (R744, GWP 1) umgestellt wurden.

Die F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2014 und 2024) und die Richtlinie 2006/40/EG (EU-Parlament 2006) bilden für die EU die zentralen regulativen Grundsteine für die Einhaltung ihrer internationalen Verpflichtungen im Rahmen des Montrealer Protokolls und des Beschlusses von Kigali, der ebenfalls die Reduktion des Einsatzes einiger HFKW fordert. Zudem leisten die Regelungen einen Beitrag dazu, die durch den EU Green Deal 2019 (EU-Kommission 2019) weiter verschärften EU-Klimaziele und damit die Langfristziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen.

Durch die Umstellung auf natürliche Kältemittel wäre der Schienenverkehr mittelfristig weniger abhängig von zukünftigen regulativen Maßnahmen für fluorierte Gase und deren Folgen für den Kältemittelmarkt. Längerfristig würde könnte der Schienenverkehr damit einen Beitrag leisten zur Reduktion des Einsatzes und der Emission fluoriertes Stoffe.

1.1.2 F-Gas-Regelungen für die mobile Klimatisierung in Schienenfahrzeugen

Die Richtlinie 2006/40/EG (EU-Kommission 2006a) gilt nur für Pkw und kleine Nutzfahrzeuge. Die F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2014) betraf vor allem stationäre Kälte- und Klimaanlage. Bei mobilen Kälteanlagen in Kühllastkraftfahrzeugen und -anhängern sind seit 2015 regelmäßige Dichtheitskontrollen vorgeschrieben. Ab 12. März 2027 müssen aufgrund der neuen F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2024) lt. Artikel 5 auch für Schienenfahrzeuge regelmäßige Dichtheitskontrollen im Rahmen der Inspektionen durchgeführt werden.

Für alle mobilen Anlagen gelten bereits heute die allgemeinen Regelungen der F-Gas-Verordnung, dass die Freisetzung der Gase zu verhindern ist und Leckagen unverzüglich repariert werden müssen. Zudem darf ein Eingriff in den Kältekreislauf der Klimaanlage nur durch angemessen geschultes Personal erfolgen. In Deutschland gilt ergänzend zur F-Gas-Verordnung die Chemikalien-Klimaschutzverordnung (Bundesregierung 2020), die für das Personal eine Sachkundebescheinigung fordert. Zudem gelten für F-Gase Berichtspflichten nach dem Umweltstatistikgesetz (Bundesregierung 2024).

Mittelbar ist die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen derzeit vor allem durch die HFKW-Verknappung in Folge des HFKW-Phase-down der F-Gas Verordnung und der damit verbundenen Preisanstiege und eventueller Verfügbarkeitseinschränkungen betroffen. Die

² Ungesättigte HFKW werden im angelsächsischen Raum auch als Hydrofluorolefine (HFO) bezeichnet

Verknappung wird sich durch das stärkere HFKW-Phase-down der F-Gas-Verordnung (EU-Kommission 2024) noch weiter verschärfen,

Der HFKW-Jahresbedarf des Schienenverkehrs in Deutschland beträgt über 19 Tonnen R134a sowie vereinzelt R407C (entspricht rund 30,3 Kilotonnen CO₂). Diese Größenordnung erscheint plausibel, da im Rahmen einer anderen Studie der Jahresbedarf für die EU im Jahr 2011 auf 97 Tonnen R134a geschätzt worden war (Schwarz et al. 2011). Im Vergleich zu anderen Kälte- und Klimaanwendungen erscheint diese Menge zwar eher gering, aber die Verringerung EU-Angebot von HFKW-Kältemitteln, d.h. auch der typischen Bahnkältemittel durch das HFKW-Phase-down muss mitberücksichtigt werden.

Bereits seit Inkrafttreten der EU F-Gas-Verordnung (2014) hat sich das Angebot auf dem EU-Kältemittelmarkt bereits deutlich verändert. Vor allem in den Bereichen der Gewerbekälte und der stationären Klimatisierung hat es Verschiebungen hin zu klimafreundlichen Alternativen gegeben. Ein Grund dafür sind die starken Preissteigerungen bei Kältemitteln mit hohem GWP (Ende 2019: + 300 bis 500 % im Vergleich zu 2015). Zudem haben in den vergangenen Jahren zwei der führenden Gasproduzenten die Kältemittel R404A (GWP 3922) und R507 (GWP 3985) vom Markt genommen. Perspektivisch könnte eine derartige Situation auch für weitere Kältemittel wie R134a (GWP 1430) und R407C (GWP 1774) eintreten, die aktuell in Schienenfahrzeugen in der Klimatisierung eingesetzt werden.

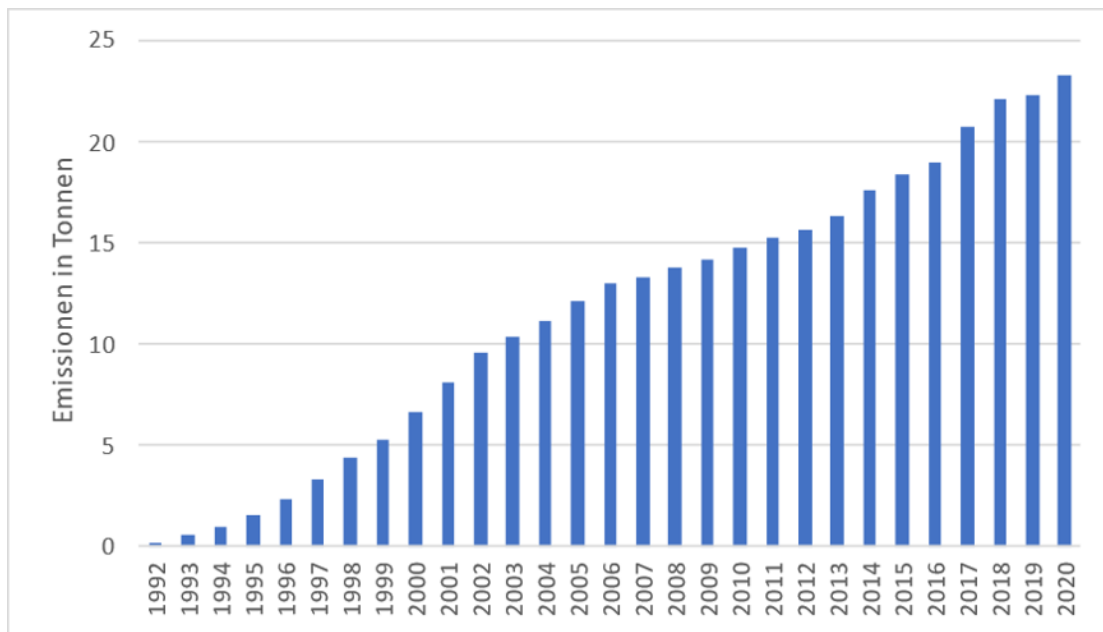
Um mögliche Kältemittelengpässe in den nächsten Jahren zu umgehen, wird daher auch in der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen eine weitreichende Umstellung auf Kältemittel mit deutlich niedrigerem GWP erfolgen müssen. Dabei ist es vorteilhaft, auf halogenfreie Alternativen zu setzen, um den Eintrag fluorierter Abbauprodukte zu verringern (Behringer et al 2021).

1.1.3 Kältemittlemissionen aus Schienenfahrzeugen

In Deutschland lagen die HFKW-Emissionen aus dem Betrieb von Schienenfahrzeugen im Jahr 2020 gemäß der deutschen Emissionsberichterstattung bei 23,3 Tonnen (entspricht 33,3 Tonnen CO₂-Äquivalent) basierend auf einer angenommenen Emissionsrate von 6 % (ZSE, 2022). Aufgrund der gestiegenen Anzahl an Komfortklimaanlagen haben sich Emissionen aus Zugklimaanlagen in Deutschland in den letzten 15 Jahren verdoppelt (Abbildung 1).

Lag die geschätzte Klimatisierungsquote im Jahr 2006 in Europa noch bei 44 % (Schwarz und Rhiemeier 2007), ist davon auszugehen, dass mittlerweile die meisten Schienenfahrzeuge mindestens über eine Fahrerstandsklimaanlage verfügen.

Abbildung 1: Jährliche Emissionen aus dem Betrieb von Klimaanlage in Schienenfahrzeugen von 1992 bis 2020 in Deutschland Tonnen



Quelle: eigene Darstellung. Öko-Recherche.

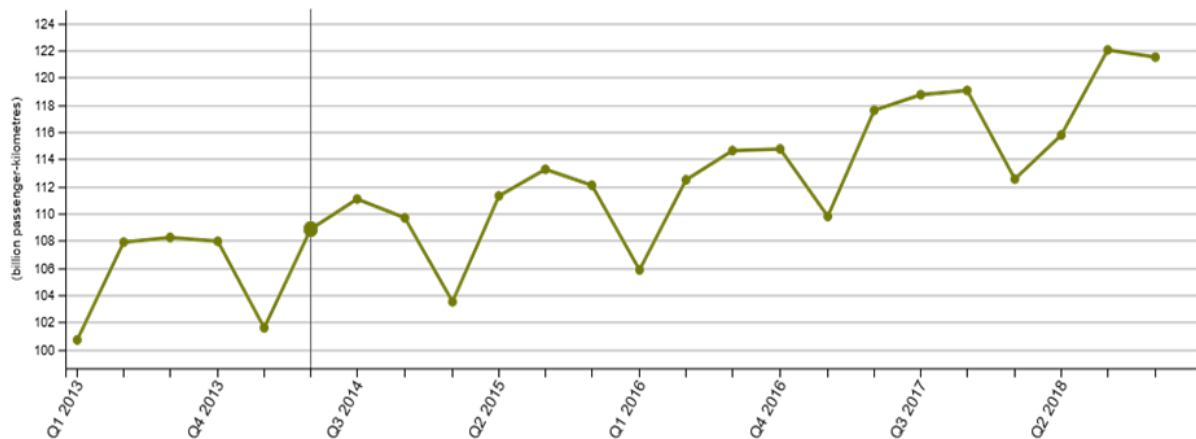
1.1.4 Entwicklung des Schienenverkehrs

In Deutschland ist die Anzahl der Passagiere im Schienenverkehr im letzten Jahrzehnt kontinuierlich gestiegen. Für das Jahr 2019 verzeichnete die Deutsche Bahn AG einen Rekord von 2,6 Milliarden Reisenden (Statista 2020). Auch in der Europäischen Union hat das Passagieraufkommen bis 2019 zugenommen. In Abbildung 2 sind exemplarisch die Passagierkilometer, das heißt das Produkt aus der Anzahl der Passagiere und der dabei zurückgelegten Strecke in Kilometern in Europa von 2013 bis Ende 2018 dargestellt.

Die Bundesregierung strebt im Schienenverkehr eine Verdopplung der Passagierzahlen bis 2030 an (Bundesregierung 2021). In Folge der Reiseeinschränkungen und des Lockdowns in den Jahren 2020 und 2021 reduzierten sich die Passagierzahlen stark und steigen nur langsam wieder an. Das Ziel für 2030 hat dennoch Bestand.

Gleichzeitig setzt sich der Sektor ambitionierte klimapolitische Ziele, um bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden, im Einklang mit den Zielsetzungen des EU Green Deal (EU-Kommission, 2019). Die Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER) unterstützt die neuen klimapolitischen Ziele der EU-Kommission und setzte sich eigene Meilensteine zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bis 2050 (um 25 % bis 2030, um 65 % bis 2040 und um 100 % bis 2050) (Community of European Railway and Infrastructure Companies, 2019).

Abbildung 2: Quartalsentwicklung des Passagieraufkommens in Milliarden Passagierkilometern von 2013 bis 2018 in der EU-28



Quelle: Eurostat (2020)

Vor dem Hintergrund von steigendem Klimatisierungsbedarf und tendenziell steigenden Passagierzahlen steht der Schienenverkehr angesichts der Verknappung der üblichen Kältemittel für Züge vor einer großen Herausforderung bei der betrieblichen Umweltbilanz, in der die Traktion (die Energie für den Antrieb) und die Klimatisierung der Schienenfahrzeuge die wesentlichsten Faktoren darstellen. Da Schienenfahrzeuge relativ lange Entwicklungszyklen und lange Lebensdauern von rund 25 bis 35 Jahren haben, ist zeitnah eine Umstellung auf langfristige und umweltfreundliche Lösungen erforderlich.

Neben den direkten Emissionen, die sich aus potenziellen Leckagen der verwendeten Kältemittel ergeben, spielen auch die indirekten Emissionen, die sich aus dem Energiebedarf der Klimaanlage während des Betriebes ergeben, eine entscheidende Rolle. Primäres Ziel ist es daher, technische Lösungen einzusetzen, die sowohl auf Kältemitteln mit geringem GWP basieren, als auch eine verbesserte, mindestens aber gleichwertige Energieeffizienz aufweisen, ohne signifikante Erhöhungen der Ausrüstungs-, Betriebs- oder Unterhaltskosten zu erzeugen. Zudem müssen Faktoren wie Gewicht und Platzbedarf berücksichtigt werden, insbesondere bei Nachrüstungen. Dabei sollten auch technische Lösungen diskutiert werden, die bisher im Schienenverkehr nicht in Betracht gezogen wurden, wie der Einsatz von brennbaren Kältemitteln.

Wenn die technischen Lösungen eine breite Anwendung in den verschiedenen Klimazonen ermöglichen, können sie darüber hinaus zum Erhalt und der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der in Deutschland tätigen Bahnindustrie beitragen.

1.2 Natürliche Kältemittel für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen

Bislang sind europaweit nur wenige Schienenfahrzeuge mit Klimaanlage mit natürlichen Kältemitteln ausgerüstet worden.

Aktuell werden in der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen im Wesentlichen kompakte, direktverdampfende Kompressionskälteanlagen (d. h. ein Kaldampfprozess) eingesetzt. Kältemittel sind fast ausschließlich fluorierte Gase, und zwar R134a und die Kältemittelmischung R407C. In Deutschland wird überwiegend das Kältemittel R134a

verwendet, nur die Klimaanlage der S-Bahn Hamburg (BR490) kühlt mit der Kältemittelmischung R407C.

Die Nutzung von Luft als natürliches Kältemittel erfolgt derzeit in sog. Kaltluftanlagen im ICE 3 der Deutschen Bahn AG, die erste Baureihe BR403 des ICE3 wurde mit Anlagen der Fa. Faiveley Transport Leipzig (432 Klimaanlage), die zweite Baureihe 406 mit Anlagen der Fa. Liebherr (120 Klimaanlage) ausgestattet. Darüber hinaus wurde der Betrieb von Klimaanlage mit dem Kältemittel CO₂ (auch als R744 bezeichnet) in mehreren Versuchsträgern getestet, z. B. im Rail Jet in Österreich (Liebherr 2020). Für Straßenbahnen gibt es ebenfalls erste CO₂-Anlagen (BMU 2019).

Im Gegensatz zum fluorierten Kältemittel R134a erfüllen Luft und CO₂ die Zielvorgabe des geringen Treibhauspotentials und sind als halogenfreie Kältemittel als zukunftssicher zu betrachten. Eine Universallösung gibt es allerdings nicht. Jede Anlagenkonfiguration hat ihre Herausforderungen und Einsatzgrenzen. Moderne Kaltluftanlagen (sog. Air-cycle-Anlagen) sind sowohl robust als auch durch die gute Regelbarkeit effizient. Diese Anlagen wurden in einem Forschungsprojekt bereits näher untersucht (Aigner et al. 2019). Nachteil sind hohe Investitionskosten, das größer zu dimensionierende elektrische Bordnetz und die eingeschränkte Verfügbarkeit der speziellen Motorturbinen.

Der Einsatz von CO₂-basierten Klimaanlage ist aktuell mit höheren Investitionskosten verbunden, da aufgrund der hohen Drucklage des transkritischen Prozesses (maximal zulässiger Druck PS beträgt 130 bar) deutlich dickwandigere und dadurch schwerere Anlagenkomponenten verwendet werden. Dies macht z. B. die Nachrüstung in dafür nicht ausgelegten Zügen schwierig. Die Verfügbarkeit von Komponenten ist ebenfalls noch beschränkt.

Voraussetzung für die Verwendung brennbarer Kältemittel in der mobilen Klimatisierung ist, dass eine mindestens vergleichbare Sicherheit zum heutigen Stand der Technik erreicht wird. Mit dem Einsatz neuer Energieträger, wie zum Beispiel dem Wasserstoffantrieb oder der batteriegestützten Versorgung von Schienenfahrzeugen, sind bereits technische Lösungen in der praktischen Umsetzung, die die Brennbarkeit mitberücksichtigt haben. Fahrzeuge mit brennbarem Wasserstoff sind für den schienengebundenen Personenverkehr bereits zugelassen,

Aktuell wird auch der Einsatz von synthetischen brennbaren Kältemitteln Sicherheitsklasse A2L (ASHRAE 2022; DIN EN 378-1 2020) wie den ungesättigten fluorierten HFKW R1234yf oder R1234ze(E) in Schienenfahrzeugen diskutiert. Allerdings weisen diese fluorierten Kältemittel Nachteile gegenüber natürlichen Kältemitteln auf. Dies sind zum einen die im Vergleich sehr hohen Preise. Während natürliche Kältemittel seit Einführung der F-Gas-Verordnung zu unverändert niedrigen Preisen (ca. 3 bis 8 €/kg) verfügbar sind, lagen die Einkaufspreise für R1234yf und R1234ze(E) noch um ein Vielfaches über dem von R134a.

Die Zerfallsprodukte der ungesättigten fluorierten HFKW sind aufgrund der Bildung hochaggressiver Fluorwasserstoff (HF) an heißen Oberflächen und im Brandfall hochtoxisch und daher wesentlich kritischer als bei natürlichen Kältemitteln.

Langfristige nachteilige Wirkungen dieser ungesättigten HFKW ergeben sich durch die Freisetzung in die Atmosphäre und die Bildung persistenter Trifluoressigsäure (TFA) als Abbauprodukt. TFA wurde mittlerweile im Wasser, in Pflanzen und in der Nahrung nachgewiesen (Scheurer et al, 2017; Scheurer und Nödler, 2021; Behringer et al, 2021; Freeling

et al, 2020). Die Vergangenheit zeigte, dass bis jetzt jedes synthetische Kältemittel einem Phase-out unterlag und deshalb immer wieder technische Anpassungen bzw. Umrüstungen erforderlich waren. Dies stellt insbesondere für den Bahnklimabereich mit den gegebenen langen Lebensdauern ein Risiko dar. Dieses Problem besteht potenziell mit R1234yf weiterhin.

1.3 Propan (R290) als Kältemittel in der mobilen Klimatisierung

In diesem Projekt wird der Einsatz des brennbaren Kältemittels Propan (R290), Sicherheitsklasse A3 (ASHRAE 2022; DIN EN 378-1 2020) in direktverdampfenden Systemen für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen untersucht. Grundsätzlich bietet die Verwendung von Propan (R290) eine Reihe von thermodynamischen, ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen:

- ▶ Kleines Treibhauspotential (GWP_{100}) von 0,02 (IPCC 2021);
- ▶ Drucklage und Technologie ähnlich wie bei bestehenden Systemen mit den Kältemitteln R134a bzw. R407C;
- ▶ Bauraum und Masse entsprechen denen von R134a-Systemen;
- ▶ Vergleichbares Kostenniveau für Herstellung und Betrieb wie bei R134a-Systemen;
- ▶ Leistungszahl über den gesamten Arbeitsbereich gleich bzw. höher als bei R134a-Systemen, wodurch eine höhere Energieeffizienz zu erwarten ist;
- ▶ Sehr gute Eignung für den Wärmepumpenbetrieb bis minus 20°C Umgebungstemperatur (im Vergleich zu minus 5°C bei R134a bzw. R407C), somit hohe Relevanz für den Betrieb in Nord- und Mitteleuropa und möglicher Ersatz ineffizienter Widerstandsheizungen für die Klimazonen I und II nach Normen EN 13129 (CEN 2016) bzw. EN 14750 (CEN 2006);
- ▶ Verringerung der Kältemittelfüllmenge bei R290 um rund 50 % im Vergleich zu R134a-Systemen;
- ▶ R290 muss nicht extra synthetisiert werden, R290 ist ein Nebenprodukt der Erdöl- und Erdgasgewinnung und -raffination;
- ▶ Weite Verbreitung in Haushalt und Werkstatt (Gasflaschen);
- ▶ Geringes und stabiles Preisniveau von R290 im Vergleich zu HFKW-Kältemitteln, deren Preise durch die künstliche Verknappung steigen;
- ▶ Unabhängigkeit von Verknappungen auf dem HFKW-Kältemittelmarkt;
- ▶ Aktuell (und zukünftig) keine Beschränkungen (z. B. Verbote) oder technische und administrative Verpflichtungen im Rahmen der F-Gas-Verordnung.

Trotz der höheren Brennbarkeit kommt R290 bereits in einigen Kälte- und Klimaanwendungen zum Einsatz wie zum Beispiel in steckerfertigen Geräten oder mobilen Raumklimageräten. R290 wird zudem als Option für weitere Klimaanwendungen in Betracht gezogen, wie zum Beispiel Single-Split-Geräte, Wärmepumpen und (kleine) Flüssigkeitskühlsätze.

Um die Sicherheit der Verwendung von R290 in der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen zu untersuchen, entwickelte Faiveley 2020 gemeinsam mit der DB Systemtechnik und weiteren

Partnern ein technisches Konzept für eine R290-Klimaanlage und baute ein Erprobungsgerät als direktverdampfende Kompaktanlage für Laborversuche. Dazu wurden detaillierte und umfangreiche Risiko- und Sicherheitsanalysen ausgearbeitet. Sie zeigen, dass für ein R290-basiertes System das gleiche Sicherheitsniveau wie bei R134a-Anlagen erreicht werden kann (Boeck und Poser, 2021). Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird ein R290-Aggregat in einem Regionalzug im Passagierbetrieb erprobt, um Daten zum Betrieb und zur Effizienz zu generieren und Verbesserungspotentiale aufzudecken.

2 Ziel und Herangehensweise

2.1 Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projektes ist die Erprobung einer Klimaanlage mit dem natürlichen Kältemittel Propan für die Klimatisierung eines Schienenfahrzeuges. Im Rahmen des Projektes werden zwei nahezu baugleiche Klimaanlagen in einem Messprogramm im Regelbetrieb auf einem Regionalzug untersucht: die neue Klimaanlage mit dem natürlichen Kältemittel R290 (Propan), das erstmals in einem Zug im Passagierbetrieb eingesetzt wird, und als Vergleich die bisher übliche Anlage mit dem Kältemittel R134a (Tetrafluorethan).

Erwartet werden Aussagen zum betrieblichen Verhalten im Fahrplaneinsatz, zur Energieeffizienz im Kühlbetrieb sowie zur Wartung und Instandhaltung, d.h. zu wesentlichen Komponenten des Lebenszyklus der beiden Zugklimaanlagen. Das Potential der Wärmepumpe soll mittels Simulationen untersucht werden.

Darüber hinaus werden Erkenntnisse zu Einsatzgrenzen und zur Störungsresistenz der verschiedenen Anlagenkomponenten gewonnen. Hierfür werden die Betriebsparameter und der Energieverbrauch für den Betrieb in den verschiedenen Jahreszeiten aufgezeichnet, so dass die Kühl-, Heiz- und Lüftungsfunktionen ausgewertet und für die R290- und die R134a-Anlage vergleichend betrachtet werden können.

Durch den ganztägigen Betrieb des Fahrzeuges im fahrplangebundenen Einsatz auf verschiedenen Bahnstrecken im Bereich Franken, vornehmlich Würzburg - Nürnberg können über den Tages- und Wochenverlauf unterschiedliche Auslastungsgrade berücksichtigt und erfasst werden. Durch den damit erfassten Bereich der klimatischen Umgebungsbedingungen, der Auslastungsgrade des Fahrzeuges und der betrieblichen Parameter (Fahrbetrieb, Park- und Abstellbetrieb) sind detaillierte Aussagen zum Voll-, Teil- und Schwachlastverhalten der R290-Klimaanlage im Kühlbetrieb im Vergleich zur R134a-Anlage möglich.

Das Projekt gliederte sich in vier Arbeitspakete (AP 1 bis 4):

AP 1 - Konzeption des Messprogramms: Inhaltliche und technische Vorbereitung des Messprogramms, Beschreibung der zu testenden Anlagen, Festlegung der notwendigen Betriebsdaten und deren Erfassung sowie Konzept zur Auswertung der Daten.

AP 2 – Durchführung des Messprogramms: Funktionsprüfung der Anlagen und der Messeinrichtungen im laufenden Passagierbetrieb an der R290- und der R134a-Klimaanlage. Durchführung des Messprogramms im laufenden Betrieb der R290- und der R134a-Klimaanlage mit Erhebung aller Messparameter, die AP 1 festgelegt wurden. Zeitraum für die Messung September 2020 bis September 2021, d.h. im Sommer, Übergangs- und Winterbetrieb.

AP 3 – Vergleich mit anderen Anlagen: Modellierungen von Klimaanlagen für R290, R134a und CO₂, Vergleich R290 zu einer CO₂-Klimaanlage und Vergleich einer R290-Klimaanlage mit Wärmepumpe mit einer CO₂-Anlage mit Wärmepumpe

AP 4 – Auswertung der Messungen: Auswertung der Messergebnisse aus dem Feldversuch, Bewertung der gewonnenen Daten für unterschiedliche Lastzustände und über einen gesamten Jahresverlauf. Vergleiche anhand der Anlagenmodellierungen. Bewertung der Energieeffizienz,

in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, zur Leistungsfähigkeit und zur Verfügbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge. Vorstellung der Ergebnisse in einem Fachgespräch und Veröffentlichung im Abschlussbericht.

2.2 Herangehensweise

Als Probeträger wurde ein Fahrzeug der Baureihe BR 440 als ein typisches Regionalverkehrsfahrzeug der DB Regio AG ausgewählt (Abbildung 3). Dieses Fahrzeug wird auch von anderen Verkehrsunternehmen eingesetzt. Das Fahrzeug ist im Regionalverkehr als Regionalexpress bzw. Regionalbahn im Gebiet Franken – Thüringen im Einsatz und wird durch das DB Werk in Würzburg betreut.

Abbildung 3: Regionalverkehrsfahrzeug BR 440 der DB Regio AG



Quelle: eigene Darstellung. Deutsche Bahn AG

Das Fahrzeug ist mit einer typischen Aufdachklimaanlage ausgerüstet – diese Bauform kommt auch bei anderen Baureihen für Metros, Regional- und Fernverkehrsfahrzeuge zum Einsatz. Damit besteht die Möglichkeit, Resultate des Forschungsprojektes über den vorliegenden Projektrahmen hinaus auf andere Schienenfahrzeuge zu übertragen.

Die für das Fahrzeug konzipierten Klimakompaktgeräte werden zur Klimatisierung und zur Beheizung des Fahrgastraumbereiches in der Klimazone II nach DIN EN 14750-1 (DIN 2006) verwendet. Mitteleuropäische Länder sind im Allgemeinen der Klimazone II zugeordnet. Das heißt, die Heizleistung ist für eine Außentemperatur von -20°C und die Kühlleistung für eine Außentemperatur von 35°C / 50 % relative Luftfeuchte und eine Sonnenlast von 700 W/m^2 auszulegen. Im bestimmungsgemäßen Regelbetrieb heizt, kühlt und belüftet das Komfortklimasystem den Fahrgastraum gemäß der vorgegebenen und in der Software hinterlegten Temperatursollwertkurve.

Das Komfortklimasystem besteht aus den folgenden Hauptsystembestandteilen:

- ▶ Bahnklimagerät als Kompaktanlage in Aufdachausführung
- ▶ Kanalsystem
- ▶ Regelung einschließlich der in der Klimaanlage integrierten Sensorik

- ▶ Externe Temperatursensoren im Fahrzeug für die Erfassung der Temperatur im Fahrgastraum
- ▶ Autark arbeitende, periphere Umluftheizgeräte in Fahrgastraumeinstiegen und Toilette
- ▶ Toilettenablüfter

Nachfolgend sind die einzelnen Teilsysteme hinsichtlich ihrer Zweckbestimmung bzw. Funktionalitäten erläutert:

In der Klimaanlage sind die Aggregate installiert, die die Heiz- und Kühlleistung für die Temperierung des Fahrzeuges liefern. In der Klimakompaktanlage ist das Ansaugkanalsystem integriert, das die für die Versorgung der Passagiere erforderliche Außenluftmenge in die Mischkammer der Klimaanlage ansaugt, filtert und mit Überdruck in das Innere des Wagens fördert. Die in äquivalenter Menge anfallende Fortluft wird dezentral und kanallos im Wagen erfasst und durch Überdruck im Wagen über einen im Inneren der Klimaanlage befindlichen Fortluftkanal aus dem Wagen gefördert. Die Außenluftansaugung kann über die in der Klimaanlage befindliche kombinierte Außenluft-Umluftklappe abgesperrt werden. Diese Einstellung wird im fahrgastfreien Vorbereitungsbetrieb des Wagens bis zur Erreichung des vorgesehenen Raumtemperatursollwertes genutzt.

Die Schalt- und Regelungstechnik für die Klimatisierung ist innerhalb des Klimagerätes installiert und regelt die Temperaturen im Fahrgastinnenraum und Außenluftmengen in den vorgesehenen Grenzen.

Das Kanalsystem des Wagens dient der Luftverteilung im Fahrgastraum. Es besteht aus einem zentralen Deckenkanal mit Lochdecke, vorzugsweise verwendet für das Einbringen von Luft im Kühlbetrieb, und den beidseitig angeordneten Bodenverteilkänen mit Auslassgittern, vorzugsweise für das Einbringen von Warmluft im Heizbetrieb. Mit den im Fahrgastraum positionierten Raumtemperatursensoren wird der Momentanwert der Raumtemperatur im Passagiererraum erfasst, mittels des Klimareglers ausgewertet und bei Ansteuerung einer für den Zustand erforderlichen Zulufttemperatur im definierten Raumtemperaturkomfortbereich gehalten. Der Fahrgastraumbereich weist keine zusätzlichen Heizer auf.

2.3 Originalausrüstung – Klimaanlage mit R134a

Bei der Auswahl der Baureihe BR 440 als Probeträger wurde bewusst eine langjährig gewachsene Plattformbaureihe als Basis für die Umrüstung ausgewählt, die ein R134a-basiertes Klimakompaktgerät der Fa. Faiveley nutzt. Der Lebenszyklus, d.h. der Weg des Gerätes von der Fertigung, Montage, Inbetriebnahme, Wartung bis zur Verschrottung ist bekannt. Der Umstellungsaufwand für das vergleichende Messprogramm blieb daher überschaubar. Gleichzeitig kann der für die Kältemittelumstellung notwendige Aufwand, d.h. von bestehender R134a-Technik auf R290-Technik, aufgezeigt werden.

Die R134a-Anlage wird von Fa. Faiveley seit dem Jahr 2003 in der Grundform mit verschiedenen Modifikationen gebaut und an das französische Transportunternehmen Alstom für die Ausrüstung von Nahverkehrs-Triebzügen des Typs XCC Coradia Continental geliefert (siehe auch Anhang A.4), so dass eine zusätzliche Anlage für die Umrüstung auf R290 mit vertretbarem Aufwand bereitgestellt werden konnte.

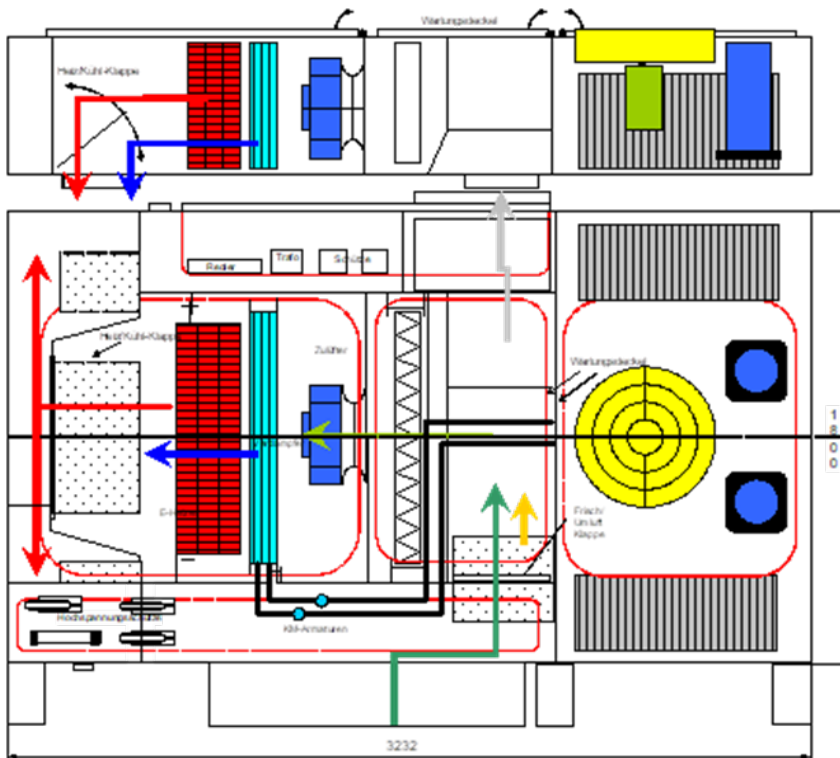
Die beiden Klimaanlage sind als Kompaktanlage ausgeführt, d.h. alle Funktionalitäten der Klimaanlage sind in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Dies ermöglicht die komplette Montage, Befüllung mit Kältemittel und Prüfung im Fertigungswerk. Daher waren bei der Montage der Klimaanlage auf das Fahrzeug keine Arbeiten am Kältemittelkreislauf erforderlich. Es erfolgten ausschließlich die mechanische Befestigung, der Anschluss der luftführenden Kanäle über entsprechende Schnittstellen und die Herstellung der elektrischen Versorgung über Steckverbinder. Nach Abschluss der Montage auf das Fahrzeug und einem Probelauf ist die Anlage sofort betriebsfähig.

Die folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 4 und Abbildung 5) zeigen den prinzipiellen Aufbau und die Hauptabmessungen der R134a-Anlage). Eine detaillierte Schnittstellenzeichnung befindet sich zudem im Anhang (A.1). Diese Schnittstellenzeichnung gilt auch für die R290-Klimaanlage.

Abbildung 4: Konzept der R134a-Klimaanlage (oben: Seitenansicht, unten Aufsicht)

Dargestellte Komponenten: Verdichter (blau), Verflüssigerlüfter (gelb), Verflüssiger (grau), Zulüfter (blau), Verdampfer (türkis), Heizer (rot)

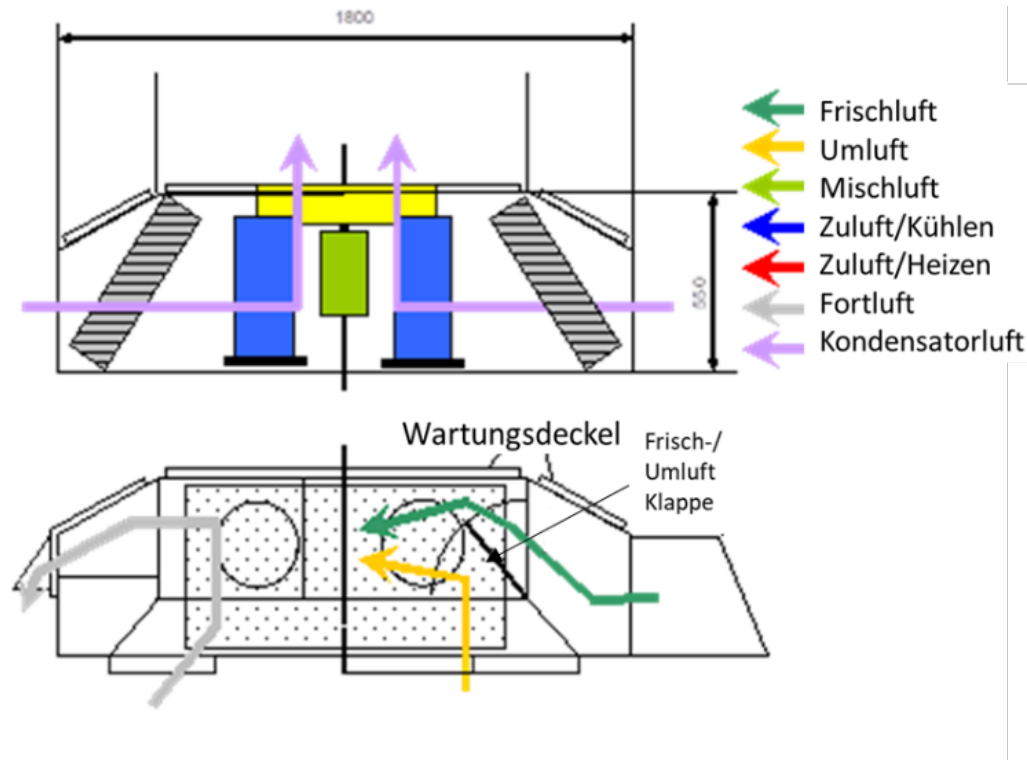
Luftrichtungen als Pfeile: Außenluft (grün), Fortluft (grau), Umluft (gelb), Kaltluft (blau), Heißluft (rot)



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 5: Konzept der R134a-Klimaanlage im Fahrgastraum (Schnitt)

Dargestellte Komponenten: Verflüssigerlüfter (gelb), Verflüssiger (grau), Zulüfter (blau)



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Die R134a-Anlage weist folgende wesentliche **Geräte Merkmale** auf:

- ▶ Gehäuse ausgeführt als Aluminium-Schweiß-Nietkonstruktion mit Farbgebung;
- ▶ Starre Aufstellung des Gerätes über sechs Haltepratzen auf den vorhandenen C-Schienen des Wagens;
- ▶ 2 redundante Kältekreisläufe, sicherheitsüberwacht über Sicherheitshochdruckwächter, Hochdrucküberwachung über Drucksensor, Saugdrucküberwachung über Druckschalter;
- ▶ 2 Scrollverdichter für R134a;
- ▶ 2 Verflüssiger, wobei jeweils ein Verflüssiger einem Kältekreislauf zugeordnet ist;
- ▶ 1 Verdampfer, gekreuzt verschaltet für beide Kältekreisläufe;
- ▶ Zugänglichkeit zu den Kältekreislaufbauteilen über Wartungsdeckel;
- ▶ Verflüssigerlüfter als Axialventilator in saugseitiger Anordnung zu den Wärmeübertragern angeordnet;
- ▶ 2 Zulüfter in drückender Anordnung zum Verdampfer und elektrischem Heizregister;
- ▶ 1 elektrisches Heizregister, aufgeteilt in 2 Gruppen (1/3 und 2/3 der Gesamtheizleistung).

Das Kältekreislaufschema der R134a-Anlage ist im Anhang in Abbildung 50 dargestellt.

2.4 Erprobungsanlage - Klimaanlage mit R290 (Propan)

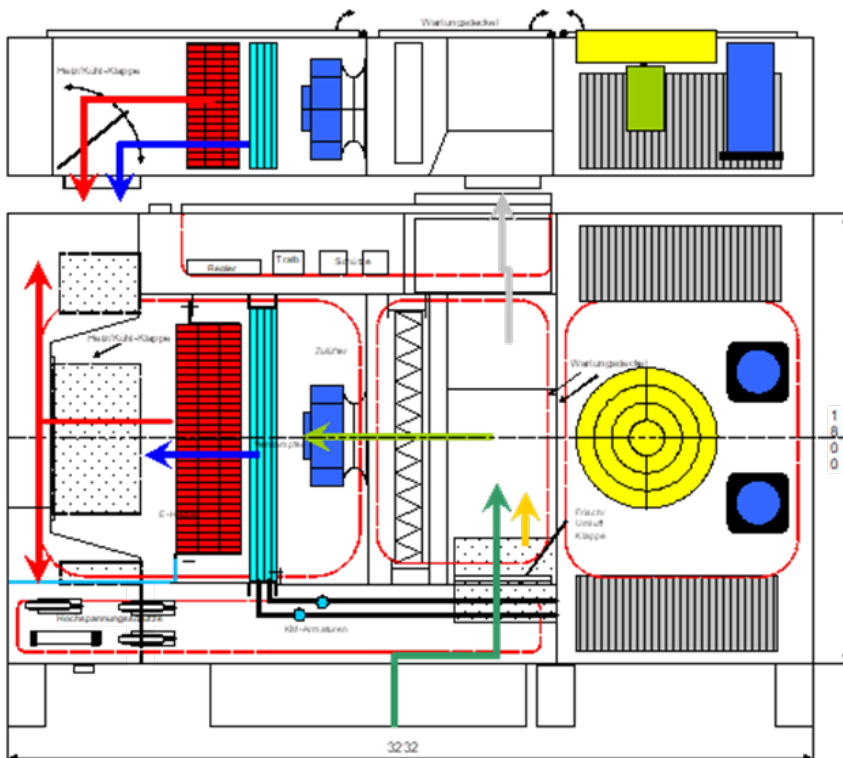
Die R290-Klimaanlage wurde von der Fa. Faiveley entwickelt. Die Ausgestaltung der R290-Anlage für den Regionalzug Baureihe 440 stellt eine konkrete Anlagenvariante dar. Das Anlagenprinzip ist jedoch auf alle Arten von Aufdachklimaanlagen übertragbar. Der grundsätzliche Aufbau und die Schnittstellen sind identisch zur R134a-Klimaanlage.

Die Abbildungen (6 und 7) zeigen den prinzipiellen Aufbau und die Hauptabmessungen des R290-Gerätes. Die Schnittstellenzeichnung für die R134a-Anlage im Anhang in Abbildung 49 ist ebenfalls für die R290-Klimaanlage gültig.

Abbildung 6: Konzept der R290-Klimaanlage (oben Seitenansicht, unten Aufsicht)

Dargestellte Komponenten: Verdichter (blau), Verflüssigerlüfter (gelb), Verflüssiger (grau), Zulüfter (blau), Verdampfer (türkis), Heizer (rot)

Luftrichtungen als Pfeile: Außenluft (grün), Fortluft (grau), Umluft (gelb), Kaltluft (blau), Heißluft (rot), Mischluft (hellgrün)

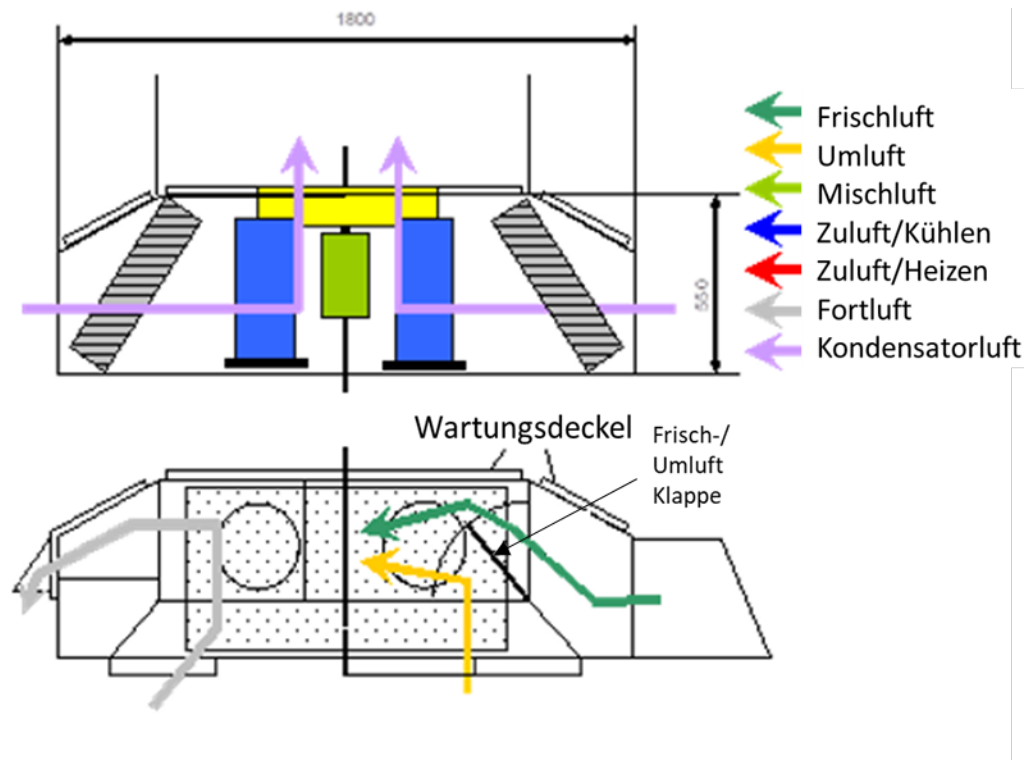


Quelle: eigene Darstellung, FTL

Änderungen für die R290-Anlage betreffen die Führung der Kältemittelleitungen und die Gestaltung der Wärmeübertrager. Die für die Umrüstung von R134a auf R290 notwendigen technischen Änderungen im Vergleich zum Originalgerät wurden ermittelt und sind eingeflossen in die Gefährdungsermittlung der parallel und generisch geführten Gefahren- und Risikobetrachtung zur Evaluierung und Bewertung von Risiken im Eisenbahnbereich gemäß der CSM-Verordnung (EU-Kommission 2013). Änderungen, die notwendig waren, um aus dem Einsatz von R290 resultierende Risiken zu minimieren, wurden umgesetzt.

Abbildung 7: Konzept der R290-Klimaanlage (oben Seitenansicht, unten Aufsicht)

Dargestellte Komponenten: Verflüssigerlüfter (gelb), Verflüssiger (grau), Zulüfter (blau)



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Die R290-Anlage weist folgende wesentliche **Geräte Merkmale** auf:

- ▶ Gehäuse ausgeführt als Aluminium-Schweiß-Nietkonstruktion mit Farbgebung;
- ▶ Starre Aufstellung des Gerätes über sechs Haltepratzen auf den vorhandenen C-Schienen des Wagens;
- ▶ 2 redundante Kältekreisläufe, sicherheitsüberwacht über Sicherheitshochdruckwächter, Hochdrucküberwachung über Drucksensor, Saugdrucküberwachung über Druckschalter;
- ▶ 2 Scrollverdichter für R290;
- ▶ 2 Verflüssiger, wobei jeweils ein Verflüssiger einem Kältekreislauf zugeordnet ist;
- ▶ 1 Verdampfer, gekreuzt verschaltet für beide Kältekreisläufe;
- ▶ Zugänglichkeit zu den Kältekreislaufbauteilen über Wartungsdeckel;
- ▶ Verflüssigerlüfter als Axialventilator in saugseitiger Anordnung zu den Wärmeübertragern angeordnet;
- ▶ 1 Zulüfter in drückender Anordnung zum Verdampfer und elektrischem Heizregister;
- ▶ 1 elektrisches Heizregister, aufgeteilt in 2 Gruppen (1/3 und 2/3 der Gesamtheizleistung).

Das Kältekreislaufschema ist im Anhang dargestellt.

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die R290-Anlage in der konkreten Form, wie sie für den Aufbau auf dem Probeträger (Regionalzug der BR 440) entwickelt wurde.

Abbildung 8: R290-Klimakompaktgerät für das Regionalverkehrsfahrzeug BR 440 der DB Regio AG in der Fertigungsstätte Schkeuditz



Quelle: eigene Darstellung, FTL

2.5 Technische Daten der R134a-Klimaanlage und der R290-Klimaanlage

In der nachfolgenden Übersicht sind wesentliche Parameter der R134a-Anlage und der auf das Kältemittel der auf R290 umgestellten Anlage gegenübergestellt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gegenüberstellung wesentlicher Parameter von R134a-Anlage und R290-Anlage

Parameter	R134a-Anlage	R290-Anlage
Gerätemasse	683 kg	658 kg
Elektrische Schnittstellen - Leistungsaufnahme - Steckerposition und -typ - Steckerbelegung	identisch	
Mechanische Schnittstelle - Luftschnittstellen - Lichtraumprofil - Befestigungspunkte - Entwässerung	identisch	
Kälteleistung im Auslegungspunkt	23 kW	23 kW
Kältemittelfüllmenge	2 x 4,8 kg	1,2 / 1,6 kg
Maximale Heizleistung	23 kW	23 kW
Leistungsaufnahme des Gerätes	ähnlich	
Schall außen	93,2 dB (A)	93,2 dB (A)
Softwareschnittstelle	Parameteranpassungen bei der R290-Anlage	
Geräteschwerpunkt	ähnlich	

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, sind die schnittstellenrelevanten Parameter und die Leistungsfähigkeit der beiden Anlagen identisch. Die Kältemittelfüllmenge pro Kreislauf konnte aufgrund der höheren volumetrischen Kälteleistung von R290 gegenüber R134a deutlich reduziert werden.

Der Versuchsträger R290 und die R134a-Vergleichsanlage sind ähnlich, aber nicht identisch. Der grundsätzliche Aufbau beider Geräte ist in Kapitel 2.3 und 2.4 dargestellt. Auf die Unterschiede wird nachfolgend eingegangen. Aufgrund der Weiterentwicklung des R134a-Klimakompaktgerätes über die verschiedenen Baureihen unterscheiden sich die in den Zügen eingesetzten R134a-Klimageräte. So wurden z. B. Lüfter und Wärmeübertrager modifiziert.

Für das R290-Gerät wurde als Basis ein aktuell in der Produktion befindliches R134a-Gerät genutzt, was von dem R134a-Vergleichsgerät, das älteren Baujahres ist, abweicht. Hinzu kommen beim R290-Gerät Änderungen in der konstruktiven Gestaltung und bei den Komponenten aufgrund der Verwendung des brennbaren Kältemittels Propan (R290).

Neben der notwendigen Anpassung des Verdichters auf das neue Kältemittel R290 wurden auch Zulüfter, Kondensatorlüfter und Verdampfer geändert. In Tabelle 2 sind die technischen Unterschiede der R290- und der R134a-Klimaanlage gegenübergestellt und die erwarteten Auswirkungen aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht über die wesentlichen technischen Änderungen am Kältemittelkreislauf und die zu erwartenden Auswirkungen mit Relevanz für die Klimatisierung

Komponente/Kennwert	R134a-Anlage	R290-Anlage	Auswirkung	Relevanz
Zulüfter Stufe 1 [kW] Stufe 2 [kW]	0,72 1,29	0,90 1,03	Gering, zwischen -7,0 und 1,4 kWh pro Tag	Heizen, Lüften, Kühlen
Wärmeübertrager (Verdampfer)	20 x 6 RR	19 x 4 RR	$t_{0\ R134a} > t_{0\ R290}$ bei gleichen thermischen Randbedingungen	Kühlen
Wärmeübertrager (Kondensator)	Gleicher Typ in beiden Kältekreisen	Zwei unterschiedliche Typen je Kältekreis	Unterschiedliche Betriebszustände beider Kältekreise beim R290-Gerät	Kühlen
Kondensatorlüfter Kleine Stufe [kW] Große Stufe [kW]	0,77 1,43	0,51 1,15	Gleiche Lüfter, aber andere Arbeitspunkte, R290- HX höherer Dp = geringere Luftmenge	Kühlen
Verdichtertyp	Scrollverdichter ZR72KCE-TFD	Scrollverdichter ZH13KCU-TFMN	$\text{Laufzeit}_{R134a} > \text{Laufzeit}_{R290}$	Kühlen
Expansionsventil	TX3-M28 801775 ohne Druckbegrenzung (MOP)	TGE10-4 067X0450	Gering, Ventilautorität unverändert projektiert	Kühlen
Wärme Q_0 [kW]	12,8	15,8	Mehr Bypass-Betrieb bei R290. Angaben gelten für $t_0/t_c = 10/50^\circ\text{C}$, $t_{oh} = 10\ \text{K}$.	-
Elektrische Leistungsaufnahme P_{el} [kW]	3,26	4,04	Mehr Bypass-Betrieb bei R290. Angaben gelten für $t_0/t_c = 10/50^\circ\text{C}$, $t_{oh} = 10\ \text{K}$.	-
Leistungszahl COP	3,93	3,90	Mehr Bypass-Betrieb bei R290. Angaben gelten für $t_0/t_c = 10/50^\circ\text{C}$, $t_{oh} = 10\ \text{K}$.	-
Massenstrom m [g/s]			Mehr Bypass-Betrieb bei R290. Angaben gelten für $t_0/t_c = 10/50^\circ\text{C}$, $t_{oh} = 10\ \text{K}$.	-
Volumenstrom V [m ³ /h]	17,1	17,1	Mehr Bypass-Betrieb bei R290. Angaben gelten für $t_0/t_c = 10/50^\circ\text{C}$, $t_{oh} = 10\ \text{K}$.	-

Abkürzungen: RR - Rohrreihen, t_0 - Verdampfungstemperatur in °C, t_c -Verflüssigungstemperatur in °C, t_{oh} -Sauggastemperatur in °C, HX – Wärmeübertrager, Dp (Delta Pressure = Druckdifferenz)

Quelle: eigene Darstellung, FTL

2.6 Im Messprogramm erfasste Daten

Im Rahmen des Messprogrammes wurden die relevanten Parameter erfasst, die eine Bewertung der Leistungsfähigkeit, der Energieeffizienz, der Betriebszeit und der Verfügbarkeit der beiden Klimaanlage ermöglichen (Tabelle 3)

Tabelle 3: Gegenüberstellung wesentlicher Parameter von R134a-Anlage und R290-Anlage

Nummer	Prozesswert	R290-Anlage	R134a-Anlage	Bemerkung
1	Raumtemperaturen Sollwert/Istwert	x	x	
2	Klappenpositionen	x	x	
3	Außentemperatur	x	x	
4	Zulufttemperaturen Sollwert/Istwert	x	x	
5	Hochdruck KK1 / KK2	x	x	
6	Saugdruck KK1 / KK2	x	x	
7	Temperatur Heißgas KK1 / KK2	x	-	Sensor nur in R290-Anlage
8	Temperatur Heißgas KK1 / KK2	x	-	Sensor nur in R290-Anlage
9	Temperatur Flüssigkeitsleitung KK1 / KK2	x	-	Sensor nur in R290-Anlage
10	Leistungsaufnahme KKG	x	x	
11	400 V Versorgung eingeschaltet	x	x	
12	Heizer Stufe I/II	x	x	
13	Kondensatorlüfter schnell/langsam	x	x	
14	Zulüfter schnell/langsam	x	x	
15	Verdichter Ein/Aus	x	x	
16	Magnetventil Auf/Zu	x	x	
17	Magnetventil Auf/Zu	x	x	
18	CO ₂ -Wert	x	x	
19	CO ₂ -Regelung aktiv	x	x	
20	Betriebsart	x	x	
21	Kühlanforderung	x	x	
22	Heizanforderung	x	x	
23	Diverse Fehler / Freigaben	x	x	
24	GPS-Position des Fahrzeuges	x		

Abkürzungen: KKG (Klimakompaktgerät), KK1 (Kältekreislauf1), KK 2 (Kältekreislauf 2).

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Für die Ermittlung der Daten wurden neben den serienmäßig vorhandenen Sensoren zusätzliche Geräte am Fahrzeug und in beiden Klimageräten installiert. Dies sind im Wesentlichen:

- ▶ zusätzliche Temperatur- und Drucksensoren an den beiden Kältekreisen jeder Anlage;
- ▶ die Leistungs- und Energieverbrauchsmesstechnik;
- ▶ die GPS-Positionserfassung;
- ▶ die Datenspeichermöglichkeiten für den autonomen Betrieb des Fahrzeuges.

3 Messkampagne

3.1 Überblick

Der Nahverkehrszug (Fahrzeugverbund T0440038) mit den beiden meßtechnisch zu untersuchenden Klimaanlage befand sich vom 15. Juli 2020 bis Oktober 2021 im Fahrpläneinsatz mit Fahrgästen im Regionalverkehrsbereich Franken - Thüringen. Beide Anlagen waren auf einem Zug in Betrieb. Die eigentliche Messkampagne wurde von September 2020 bis Oktober 2021 durchgeführt.

Im Berichtszeitraum gab es keine relevanten betrieblichen Störungen an der R290-Anlage. Die R134a-Anlage war aufgrund eines Fehlers tageweise gestört und nur im Lüftungsbetrieb aktiv. Die DB führte alle notwendigen plan- und unplanmäßigen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen aus, um das Fahrzeug in Betrieb zu halten.

Die Datenerfassung zeichnete die Daten kontinuierlich mit einer Abtastrate von 1 Minute auf, sofern die Anlagen störungsfrei liefen.

Die Analyse und Bewertung bezüglich Betriebsverhalten und Energieverbrauch wurde anhand der gewonnenen Daten vorgenommen.

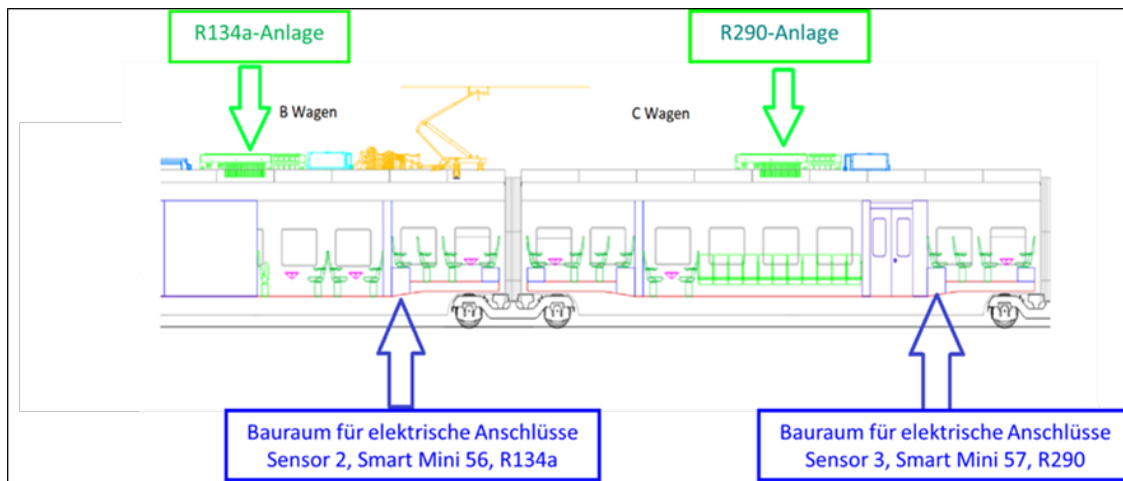
3.2 Installation und Inbetriebnahme der beiden Klimaanlagen

Beide Anlagen, die im Rahmen der Untersuchung betrieben wurden, wurden durch Faiveley vor der Montage auf das Fahrzeug funktionell überprüft. Für die R290-Anlage erfolgte eine komplette Typprüfung, für die R134a-Anlage eine funktionale Serienprüfung. Bei der Montage der Klimaanlagen auf das Fahrzeug erfolgte ein Systemtest, um die korrekte Funktion aller Komponenten des Klimatisierungssystems im Fahrzeug sicherzustellen.

Im Juli 2020 erfolgte im DB-Werk Würzburg die Installation und Inbetriebnahme der beiden Klimaanlagen auf dem Nahverkehrszug (Fahrzeug). Eine der vorhandenen R134a-Anlagen wurde durch die R290-Anlage ersetzt. Die R290-Klimaanlage wurde auf dem Mittelwagen mit der Fahrzeug-Nummer 94800440038-8 installiert.

Parallel erfolgte durch FTL die Installation von SD-Karten zur Datenaufzeichnung der Klimarechner. Durch die DB Systemtechnik wurde dabei das System zur Erfassung und Fernübertragung der Energiedaten installiert. Abbildung 9 zeigt die Einbauorte der Energiemesseinrichtungen und der Datenübertragungsgeräte.

Abbildung 9: Schnittzeichnung des Fahrzeugs BR 440 mit gekennzeichneten Einbauorten der Energiemesseinrichtungen und Datenübertragungsgeräte auf dem Dach des Fahrzeugs und im Fahrzeuginneren.



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Mit dem erfolgreichen Abschluß dieser Arbeiten wurde der Triebzug durch die DB in den fahrplangebundenen Passagierbetrieb überführt, so dass die Datenerfassung unter realen Betriebsbedingungen durchgeführt werden konnte. Dabei wurde erkannt, dass folgende Punkte zu verbessern sind:

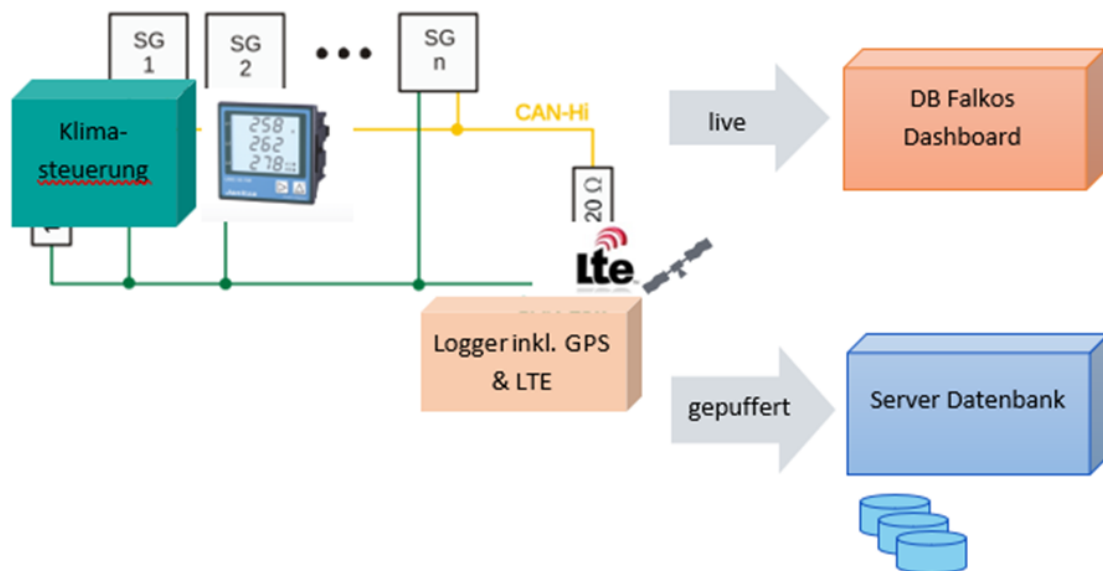
- ▶ Datenerfassung weiterer betrieblicher Parameter;
- ▶ Zuverlässigkeit der Erfassung der Daten auf SD-Karten bzw. per Fernübertragung;
- ▶ die betriebliche Verfügbarkeit der R134a-Anlage.

3.3 Datenerfassung

3.3.1 Datenfluss

In Abbildung 10 ist der Datenfluss systematisch dargestellt. Die Datenlogger erhalten Mess- und Steuerdaten (SG 1,2,...,n) über einen Datenbus (CAN-Hi) und übertragen die gepufferten Daten an eine Datenbank zur Weiterverarbeitung und an ein virtuelles Armaturenbrett (DB Falkos Dashboard). Zudem können sie im Dashboard auch live eingesehen werden.

Abbildung 10: Systematische Darstellung des Datenflusses für die erfassten Messdaten



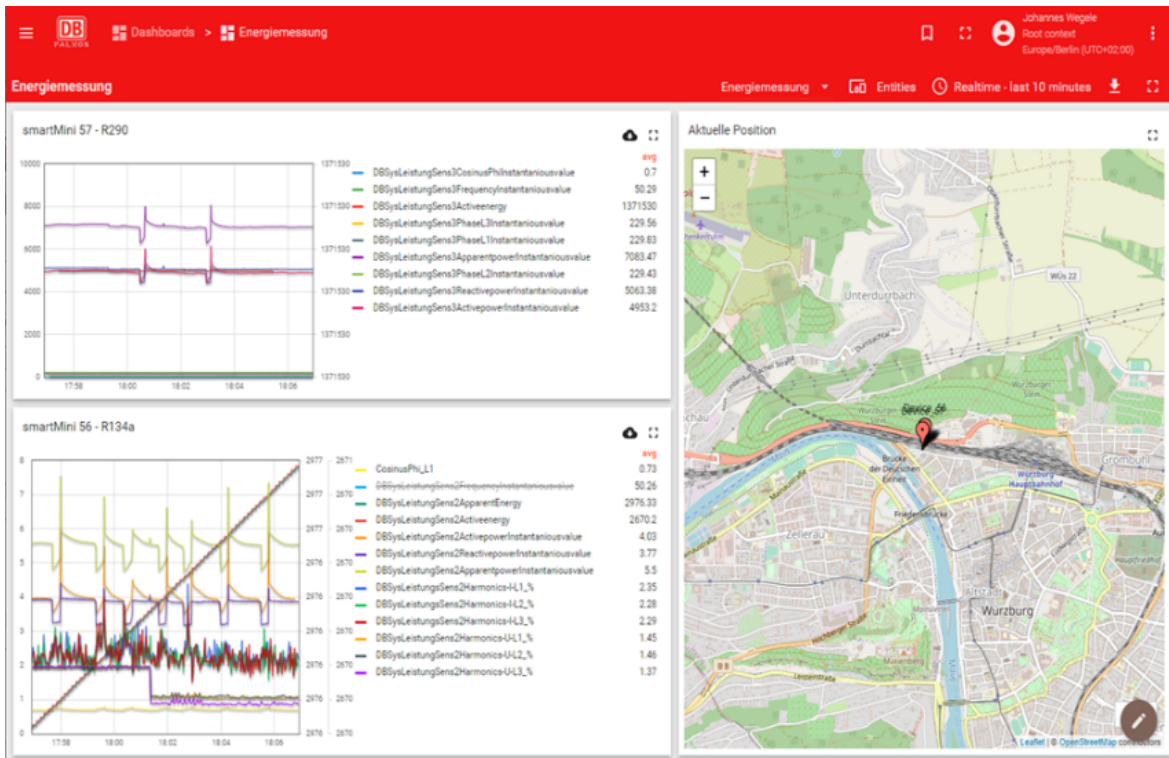
LTE- Long term evolution (Mobilfunkstandard der dritten Generation), GPS -global positioning system, SG 1,2 ...n – Mess- und Steuerdaten

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

3.3.2 Überwachung der Messung

Eine Geolokalisierung per Navigationssatelliten (GPS) ermöglichte es, den Betrieb zu überwachen. Durch die Positionserfassung kann die Situation des Zuges nachvollzogen werden. So lässt sich zum Beispiel eine niedrige Klimaleistung durch den Stillstand des Zuges in der Abstellung erklären, wie in Abbildung 11 illustrativ gezeigt. In zwei übereinander angeordneten Kacheln werden die Werte der Leistungsmessung angezeigt. Rechts ist die Position der Logger auf der Landkarte dargestellt.

Abbildung 11: Webansicht mit Geolokalisierung und Energiemonitoring im virtuellen Armaturenbrett



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

3.3.3 Änderungen der Datenerfassung

Im Verlauf der Messkampagne wurde zur Verbesserung von Integrität und Verfügbarkeit/Bereitstellung der Daten die Erfassung der Anlagendaten für beide Vergleichsgeräte verändert. Das System der SD-Kartenaufzeichnung wurde hierzu analog zur Energiedatenerfassung auf Datenlogger der Firma Optimeas umgestellt, die die Anlagendaten per CAN (Controller Area Network) vom Klimaregler übertragen bekommen. Das Verbesserungsziel konnte erreicht werden, jedoch gab es noch vereinzelte Ausfälle der Erfassung (siehe Abschnitt 3.4.2.).

Nach erfolgreicher Umstellung konnten die meisten der erfassten Daten auf dem Cloud-Service der Firma Optimeas betrachtet werden. Für ausgewählte Kanäle wurde eine webbasierte Übersicht (Dashboard) für alle Datenlogger erstellt. Auf diese Weise war es möglich, auf Probleme und Ausfälle zeitnah zu reagieren.

Die hohe erfasste Datenmenge, die per Fernübertragung direkt vom Optimeas-Datenlogger geladen wurde, kann nur mit speziellen Auswertungswerkzeugen wie z. B. NI-Diadem detailliert analysiert werden.

Die Datenerfassungsperiode lief bis Ende Oktober 2021. Danach wurde der R290-Versuchsträger demontiert und im Anschluss einer Inspektion und Funktionsprüfung unterzogen zugeführt. Im Anschluss erfolgte eine weitere Auswertung der erfassten Daten.

3.4 Wartung und Verbesserung der Datenerfassung

3.4.1 Arbeiten an der Anlage

Im Berichtszeitraum vom Juli 2020 bis Oktober 2021 wurden insgesamt 13 Serviceeinsätze durchgeführt-

Dabei wurden folgende Tätigkeiten bei allen Einsätzen durchgeführt:

- ▶ Auslesen der aufgezeichneten Daten aus Klimaregler und Datenlogger,
- ▶ Software-Versionen kontrollieren,
- ▶ Dichtheitsprüfung der Kältekreisläufe,
- ▶ Prüfung der elektrischen Anschlüsse,
- ▶ visuelle Inspektion.

Nach Bedarf wurden ausgeführt:

- ▶ Tausch von Luftfiltern an beiden Klimaanlage,
- ▶ Aufspielen von Software zur Erweiterung der Datenerfassung,
- ▶ Störungsbeseitigung an der R134a-Klimaanlage,
- ▶ Umstellung der Datenerfassung von SD-Karten auf Optimeas-Datenlogger.

Aufgrund einer alten Firmwareversion musste am 18. August 2021 der Datenlogger der R134a-Messwerterfassung getauscht werden, um die Zuverlässigkeit der Datenübertragung wiederherzustellen.

3.4.2 Abweichungen und Störungen im Betrieb

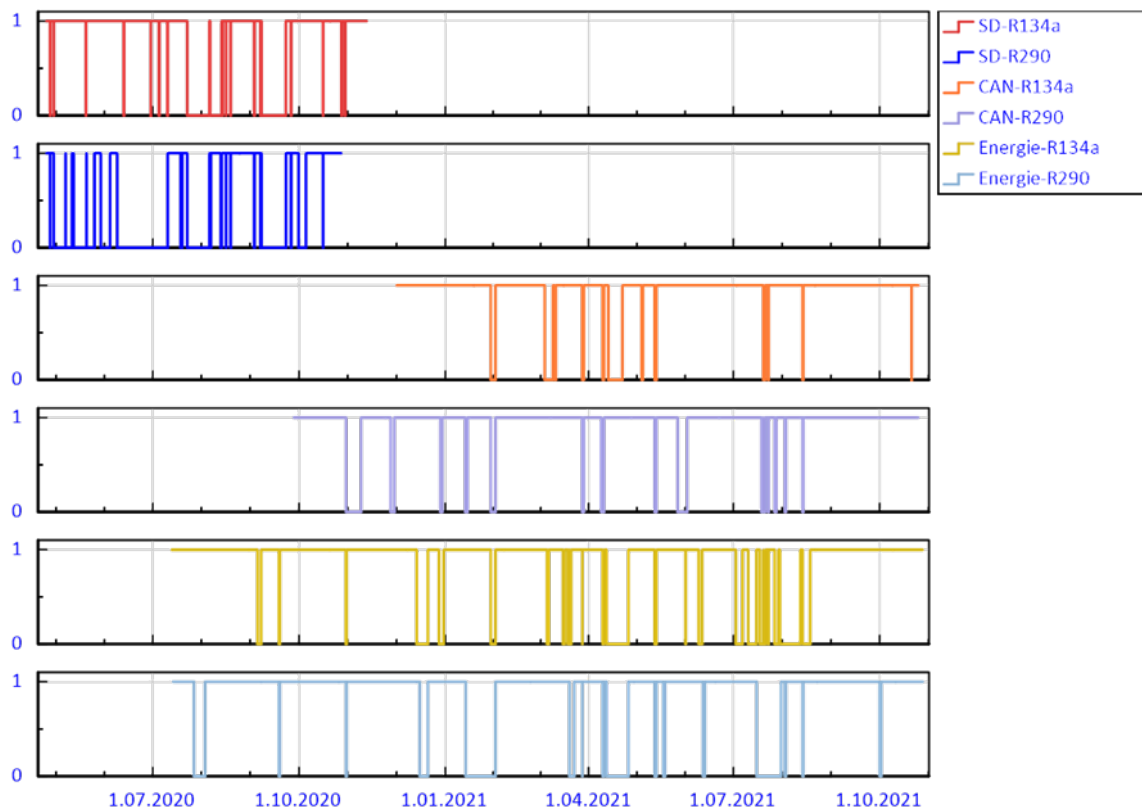
Im Rahmen des Betriebes wurden folgende Abweichungen und Störungen festgestellt:

- ▶ Die Clusterung der Energieverbrauchsmessdaten war nicht optimal, es fehlten bestimmte betriebliche Parameter.
- ▶ Die Erfassung der Daten auf SD-Karten bzw. per Fernübertragung war nicht ausreichend zuverlässig.
- ▶ Die betriebliche Verfügbarkeit der R134a-Anlage war aufgrund einer nicht systematischen Störung der Zuluftüberwachung (Betrieb ausschließlich im Lüftungsmodus, keine Freigabe des Kühl- bzw. Heizmodus) nicht befriedigend.

Im Rahmen des Systemtests wurde erkannt, dass weitere betriebliche Parameter auf dem Fahrzeug erfasst werden müssen. Dafür wurde eine neue Software beim Serviceeinsatz am 13.08.2020 aufgespielt.

Die Zuverlässigkeit der Datenerfassung und die betriebliche Verfügbarkeit wurden bei den darauffolgenden Serviceeinsätzen überprüft. In Abbildung 12 ist die Verfügbarkeit der aufgezeichneten Messdaten dargestellt.

Abbildung 12: Gegenüberstellung der Verfügbarkeit von Daten der Aufzeichnungsgeräte; ein Signalniveau von 1 zeigt das Vorhandensein der Messdaten



SD-R134a: rot, SD-R290: blau, CAN-R134a: orange, CAN-R290: violett, Energie-R134a: hellgrün, Energie-R290: hellblau

Quelle: eigene Darstellung, FTL

In Abbildung 12 an den beiden oberen Graphen (SD-R134a: und SD-R290) ist deutlich zu erkennen, dass die SD-Karten-Aufzeichnung keinen zufriedenstellenden kontinuierlichen Datenumfang liefern konnte. Die Umstellung auf die CAN-Logger (mittlere und untere Graphen) lieferte diesbezüglich eine deutliche Verbesserung.

Für die vier im Einsatz befindlichen Optimeas-Datenlogger, die seit dem 01.12.2020 für die Aufzeichnung der Anlagen- und der Energie-Daten verwendet wurden, sind Unterbrechungen der Datenverfügbarkeit hauptsächlich auf die Deaktivierung der zugehörigen Spannungsversorgung (z. B. während Wartungsmaßnahmen) zurückführbar. In vereinzelten Fällen ist in den Daten eine mangelnde Integrität feststellbar (z. B. sind einzelne Datenreihen nicht verfügbar), weshalb die entsprechenden Zeitbereiche aus den nachfolgenden Auswertungen ausgeschlossen wurden. Insbesondere in der Aufzeichnung der energiebezogenen Daten führten Probleme mit dem elektrischen Anschluss, dem Leistungsmessgerät und dem Firmwarestand der entsprechenden Datenlogger zu weiteren Datenausfällen.

Der Luftstromwächter der R134a-Anlage wurde im Jahr 2020 aufgrund eines Fehlverhaltens, das zur zeitlich begrenzten Deaktivierung der zugehörigen Kältekreisläufe führte, gewechselt. Mitte 2021 wurde durch die Auswertung der aufgezeichneten Daten insbesondere bei hohen Außentemperaturen erneut ein Fehler dieses Bauteils festgestellt, Grund war eine Fehljüstierung, die im Juli 2021 behoben wurde.

3.4.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Datenerfassung

Zur Beseitigung der potentiellen Fehlerquellen bei der Datenerfassung und für eine zeitnahe, tägliche Prüfung des Status der Klimaanlage verständigten sich FTL und DB, die Datenerfassung der Klimaanlage auf eine Onlineversion umzustellen. Dazu wurde die oben beschriebene Umstellung von der SD-Karten-Speicherung auf das OpiTmeas-Datenloggersystem vorgesehen. Für die R290-Anlage erfolgte dies am 27.10.2020, die Umstellung der R134a-Anlage erfolgte am 12.11.2020.

Um bei den Energiemessungen auch Oberschwingungen aufzuzeichnen und den Klirrfaktor (ein Maß für Verzerrungen eines ursprünglich sinusförmigen Wechselsignals) ermitteln zu können, ist der Einsatz eines Messgerätes der Fa. Janitza vorgesehen. Es ermöglicht die Aufzeichnung der harmonischen Oberschwingungen.

Abbildung 13: Energiemessgerät der Fa. Janitza vom Typ UMG806 mit drei Drehstromwandlern und einem Ethernet Kommunikationsmodul 806-EC1. Foto vom Testaufbau



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Bezüglich der realen Verfügbarkeit zeigte sich, dass der Fehler eines Druckschalters zur Luftstromüberwachung den Zulüfter weiterhin in Betrieb ließ, aber die Kühl- bzw. Heizfunktion der betreffenden Anlage gesperrt wurde. Dies führte betrieblich nur zu geringen Konsequenzen, da die Klimaanlage in den benachbarten Wagen die Klimatisierungsfunktion mit übernehmen konnten. Vermutlich gab es daher beim Ausfall der Kühl- und Heizfunktion der R134a-Anlage im Beobachtungszeitraum keine betrieblichen Meldungen dazu. Als Massnahme wurde eine Softwaremodifikation abgestimmt, so dass auch bei einem Fehler des Druckschalters die Anlage nicht abgeschaltet wurde.

4 Messdatenauswertungen der parallelen Messungen

Die erfassten Messdaten der beiden Versuchsanlagen mit den Kältemitteln R134a bzw. R290 (Propan) wurden ausgewertet hinsichtlich des Energiebedarfs, der Leistungsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit. Die Ergebnisse sollen auch zum Vergleich mit weiteren Anlagen genutzt werden.

Um den Anlagenvergleich durchzuführen genügt es nicht, die kumulierte aufgenommene elektrische Energie direkt zu vergleichen, es ist vielmehr eine detailliertere Analyse erforderlich. Grund ist, dass die technische Ausführung des Versuchsträgers hinsichtlich Hardware und Regelung an die geänderten Anforderungen bei Verwendung des Kältemittels R290 angepasst wurde. Im Wesentlichen betreffen die Änderungen bei der Regelung Anpassungen der Regelgrenzen an die physikalischen Eigenschaften von R290 (d.h. Druck- und Temperaturgrenzen für den Kältekreislauf). In der technischen Ausführung wurde ein für R290 geeigneter und zugelassener Verdichter sowie die Wärmeübertrager, Zulufter und Kondensatorlüfter des R290-Geräts angepasst (siehe Abschnitt 2.5).

Der R290-Versuchsträger und die R134a-Vergleichsanlage befanden sich auf dem gleichen Fahrzeug, jedoch auf verschiedenen aneinandergrenzenden Wagen. Daher konnten sich trotz weitgehend gleicher äußerer thermischer Lasten die inneren Lasten teilweise stark voneinander unterscheiden.

Die Daten, die getrennt in unterschiedlichen Erfassungssystemen (Geolokalisierung, Energieerfassung, Anlagendaten) gewonnen wurden, wurden auf Synchronität geprüft und gegebenenfalls nachträglich auf Basis von Vergleichskanälen synchronisiert. Essenziell ist hier insbesondere die Synchronität der Datenerfassungssysteme, die direkt der R134a bzw. der R290-Anlage zugeordnet sind, da hierüber Informationen beispielsweise über den Einfluss verschiedener Zustände und Komponenten (z. B. Aktivierung Bypass) auf die Leistungsaufnahme gewonnen werden können.

Für die Auswertungen wurden im Wesentlichen drei Ebenen der Analyse verwendet:

Die **erste Auswertungsebene** bildet die direkte Gegenüberstellung der aufgezeichneten Messwerte aus den unterschiedlichen Datenerfassungssystemen. Sie bietet sich für ausgewählte, vergleichsweise kurze Zeiträume im Sinne einer visuellen Vergleichs- und Auswirkungsanalyse an. Das sog. Dashboard von Optimeas bietet grafische Gegenüberstellungen von aufgezeichneten Messwerten an (siehe 4.1).

Die **zweite Auswertungsebene** umfasst eine analytische Betrachtung definierter Zeitintervalle. Ziel ist es hier zum einen mittels mathematischer Methoden erweiterte Informationen aus den erfassten Messdaten zu gewinnen (z. B. thermodynamische Leistung der Kältekreisläufe, Ermittlung der aufgewandten Heizleistungen). Zum anderen soll durch eine Reduktion der Datenmenge auf wesentliche Parameter eine Beschreibungsmöglichkeit für diese Zeiträume geschaffen werden. Zu den wesentlichen Parametern zählen beispielsweise Häufigkeit und Dauer der Aktivierung ausgewählter Komponenten der Klimageräte, kumulierte Energieaufnahme der Geräte und Komponenten, Median und Mittelwert für Außen- und Fahrgastraumtemperatur oder Maße für Schwankungsbreite der Innenraumtemperatur.

Zum Beispiel stellt die fortlaufende Betrachtung von 24h-Intervallen (sog. Tagesscheiben) unter den Bedingungen Einsatzfähigkeit der Klimageräte, uneingeschränkte Nutzbarkeit des entsprechenden Wagens und Verfügbarkeit der Messdaten eine sinnvolle Variante des Vergleichs der beiden Versuchsanlagen dar. Sie liefert auch für Zeitpunkte mit möglicherweise ungleichen Betriebsbedingungen einen adäquaten, zusammenfassenden Überblick (siehe Abschnitt 4.2).

Zur **dritten Auswertungsebene** zählen vor allem statistische Methoden, die der Darstellung unterschiedlicher Zusammenhänge für vergleichsweise lange Zeiträume dienen. Hierzu zählt die sog. Clusterung und Klassierungsverfahren wie die Verbundklassierung (nach DIN 45667, 1969), mittels derer die gemessenen und berechneten Daten quantisiert auf ein geändertes Bezugssystem bezogen und dargestellt werden können. Dadurch tritt der zeitliche Bezug in den Hintergrund.

Zu beachten ist, dass der Trägheit der im Versuchsträger zusätzlich eingebrachten Temperatursensoren (Auflegefühler) und durch das größtenteils stark instationäre Betriebsverhalten des Kältekreislaufes die Daten dieser Sensoren nicht verlässlich zur Bestimmung der Kältemitteltemperatur verwendet werden können. Die gemessenen kältetechnischen Parameter wie beispielsweise Überhitzung und Unterkühlung mit diesen Temperatursensoren spiegeln daher für einen Großteil des Anlagenbetriebes nicht das reale Verhalten der Anlage wider.

Zur Auswertung der thermodynamischen Leistung, die einen Grundstein zur Bestimmung von Leistungskennzahlen wie COP bzw. EER darstellt, bieten sich im Wesentlichen zwei Wege an. Zum einen kann mit den projektierten Zielgrößen die Gesamtleistung bestimmt werden, zum zweiten lässt sich durch ausschließliche Betrachtung der Zustandsänderungen im 2-Phasen-Gebiet ein Vergleichswert im Sinne einer thermodynamischen Leistung ermitteln. Beide Betrachtungsweisen werden in den Auswertungen angewandt (siehe Abschnitt 4.3).

Auf die drei Auswertungsebenen wird in den folgenden Unterkapiteln ausführlich eingegangen.

4.1 Gegenüberstellung ausgewählter Messwerte (Auswertungsebene 1)

Aus der direkten Gegenüberstellung von Messwerten der Vergleichsgeräte bei gleichen Außenbedingungen können Rückschlüsse auf Zusammenhänge und wesentliche Unterschiede insbesondere für das zeitabhängige Verhalten des Anlagenbetriebes getroffen werden. Hierzu zählen beispielsweise Vergleiche von Komponentenaktivierungen oder der Energieaufnahme der Verdichter im Vergleich.

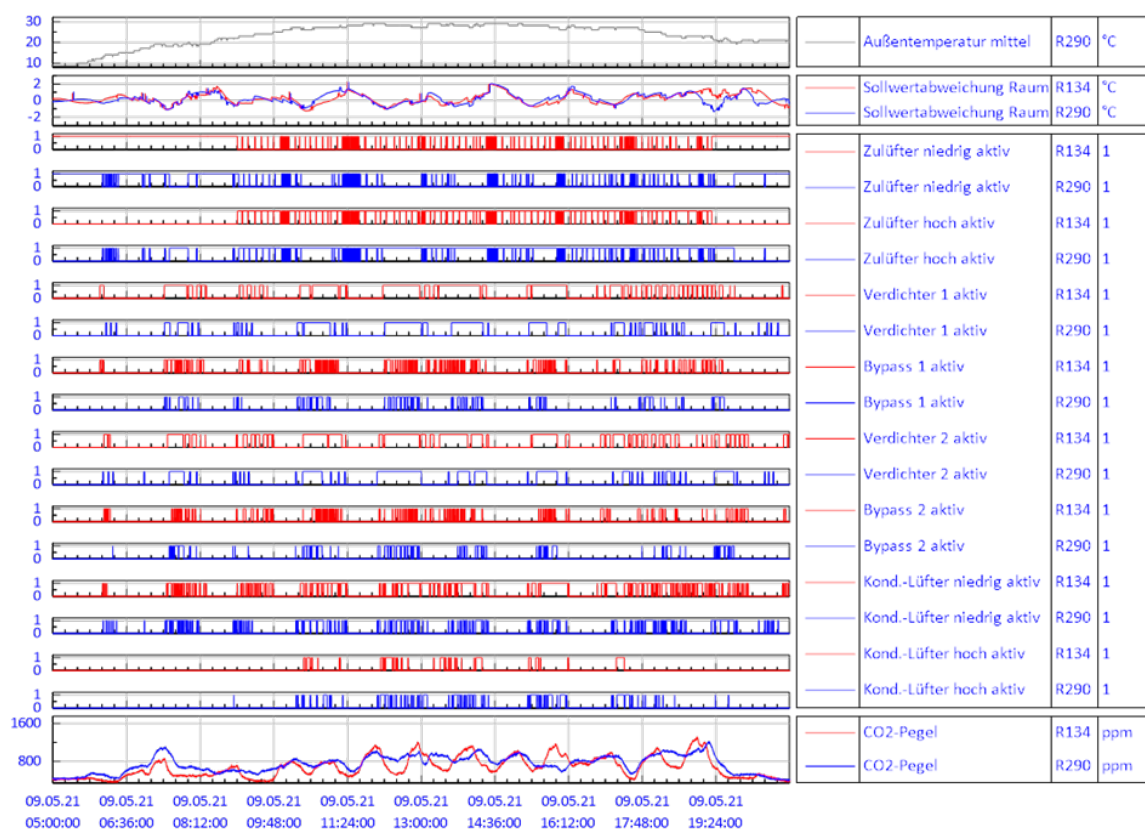
Abbildung 14 zeigt einen Betriebszeitraum eines Tages mit hoher Außentemperatur (bis ca. 30° C). Aufgezeichnet sind die mittlere Außentemperatur am Fahrzeug (Plot 1, oben), der Vergleich der Sollwertabweichungen (Plot 2), der Vergleich der Ansteuerungen der wesentlichen Komponenten des Klimageräts (Plot 3, Mitte, Vergleich mehrerer Komponenten) und der Vergleich der Innenraum-CO₂-Pegel als Besetzungsindikator (Plot 4, unten).

Die mittlerem bis hohen CO₂-Pegel (bis zu ca. 1200 ppm) bei beiden Anlagen lassen auf einen hohen Besetzungsgrad schließen. Das Klimatisierungsziel wird durch beide Anlagen erreicht.

Die Einschaltdauer der Verdichter 1 und 2 des R290-Versuchsträgers ist in diesem Zeitraum geringer. Im gleichen Zeitraum lässt sich zusätzlich ein deutlich unterschiedliches Aktivierungsverhalten des Bypasses und der Lüfter beider Vergleichsgeräte feststellen.

Bei ähnlicher Aktivierungshäufigkeit der Verdichter beider Anlagen zeigt das R134a-Vergleichsgerät eine deutlich höhere Aktivierungsdauer der Verdichter als das R290-Gerät. Der Bypass des R134a-Vergleichsgerätes ist zum Teil deutlich häufiger und länger aktiviert als beim R290-Gerät. Aufgrund der kältetechnischen Ausführung des Bypasses ist anzunehmen, dass in einem derartigen Szenario die Effizienz der R134a-Vergleichsanlage deutlich geringer ausfällt als die des R290-Versuchsträgers.

Abbildung 14: Direkte Gegenüberstellung ausgewählter Messgrößen für R134a-Anlage (rot) und die R290-Anlage (blau) für einen Tagesgang von 16 h im Mai 2021



Gezeigt sind die mittlere Außentemperatur am Fahrzeug (Plot 1, oben), Vergleich der Sollwertabweichungen (Plot 2), Vergleich der Ansteuerungen der wesentlichen Komponenten des Klimageräts (Plot 3, Mitte, groß), Vergleich der Innenraum-CO₂-Pegel als Besetzungsindikator (Plot 4, unten).

Quelle: eigene Darstellung, FTL

4.2 Detaillierte Betrachtung definierter Zeitspannen (Auswertungsebene 2)

Bei der Auswertung zeigte sich, dass die Betrachtung vollständiger Tage eine valide Methode ist, um die Auswirkung einzelner abweichender thermischer Lasten (vor allem innerer Lasten) im Sinne einer Gesamtbetrachtung einzuordnen. Tabelle 4 stellt exemplarisch Änderungen im Aktivitätsverhalten der R134a- und der R290-Anlage unter verschiedenen Randbedingungen dar. Die zugehörigen graphischen Übersichten der betrachteten Tage können dem Anhang (Abschnitt A.3) entnommen werden.

In Tabelle 4 sind für die fünf Beispieltage die Aktivierung und Dauer der Verdichter VD, die Leistungsreduzierung durch den Bypass BP, die Heizerstufen (Stufe 1: 0,33 %, Stufe 2: 66 %) und die Drehzahlstufen von Kondensatorlüfter und Zulüfter angegeben. Die CO₂-Gehalte in der Luft sind die Indikatoren für die Besetzung im Tagesmittel (CO₂-hoch: hohe Besetzung, CO₂-mittel: mittlere Besetzung) und für mittlere und hohe Außentemperatur Te im Tagesmittel, wobei v=0 bedeutet, dass der Zug an diesem Tag ohne Besetzung stand.

Die Analyse zeigt, dass für alle Aktivierungen entweder eines Verdichters oder beider Verdichter die Gesamtaktivzeit des R290-Versuchsträgers geringer ist als die der R134a-Vergleichsanlage. Die Aktivierung des Bypasses (Bypass-Dauer) ist hingegen vor allem bei höheren thermischen Lasten für das R290-Gerät höher. Dies ist durch die größere Kälteleistung des gewählten R290-Verdichters begründet und bestätigt die Erwartungen aus der Auslegungsrechnung.

Perspektivisch könnte der R290-Verdichter eine Baugröße kleiner gewählt werden. Die Höhe der kumulierten elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte, gesamt und um den Beitrag der Lüfter reduziert, ist an den betrachteten Tagen auf einem ähnlichen Niveau und könnte unter Einsatz einer kleineren Baugröße für das R290-Gerät zu dessen Vorteil gesenkt werden.

Tabelle 4: Anzahl und Dauer der Aktivierungen leistungsbestimmender Komponenten für ausgewählte vollständige Tage bei unterschiedlichen Lastbedingungen

10.05.21	09.05.21		02.06.21		31.03.21		08.05.21		Datum
	T _e hoch v=0	T _e hoch CO ₂ mitt.	T _e hoch CO ₂ hoch	T _e hoch CO ₂ hoch	T _e mittel CO ₂ hoch	T _e mittel CO ₂ mitt.	R290	R134a	
R290	R134a	R290	R134a	R290	R134a	R290	R134a	R290	R134a
54	66	51	39	62	56	31	32	31	32
10588	18885	17815	24263	30815	18268	12926	16468	12926	16468
3	4	65	104	191	50	50	103	50	103
118	164	7519	15018	11670	4529	7641	7416	7641	7416
55	46	49	39	63	21	33	39	33	39
7219	5799	14681	24091	29965	5523	9321	13197	9321	13197
1	1	91	133	184	19	62	93	62	93
1	36	7378	14196	10865	2598	5118	7698	5118	7698
208	234	218	178	1404	301	319	358	319	358
11942	15464	11821	11170	10779	19617	23015	23600	23015	23600
15	19	20	21	7	18	36	26	36	26
693	313	436	1051	455	790	2479	1404	2479	1404
118	37	184	221	217	127	51	4	51	4
50775	63185	47741	38198	55720	67307	60929	79470	60929	79470
117	37	185	1423	216	105	48	1	48	1
35623	23215	38656	47962	30442	34376	20903	2346	20903	2346
242	118	220	318	204	157	373	161	373	161
13134	22567	15757	25009	31248	18163	12143	9603	12143	9603
22	0	83	76	9	9	0	0	0	0
2392	0	6778	4063	735	269	0	0	0	0

VD Ein- Verdichter aktiv; BP - Leistungsreduzierung durch Bypass; Stufe 1 - Heizer Stufe 33%; Stufe 2 - Heizer Stufe 66%; Umin klein - Lüfter in kleiner Drehzahlstufe; Umin hoch - Lüfter in hoher Drehzahlstufe; KL - Kondensatorlüfter; CO2 hoch - Indikator für im Tagesmittel hohe Besetzung; CO2 mitt. - Indikator für im Tagesmittel mittlere Besetzung; Te hoch - Indikator für im Tagesmittel hohe Außentemperatur; Te mittel - Indikator für im Tagesmittel mittlere Außentemperatur; v=0 - Indikator für speziellen Tag ohne Fahrt und ohne Besetzung

Quelle: eigene Darstellung, FTL

4.3 Statistische Analyse (Auswertungsebene 3)

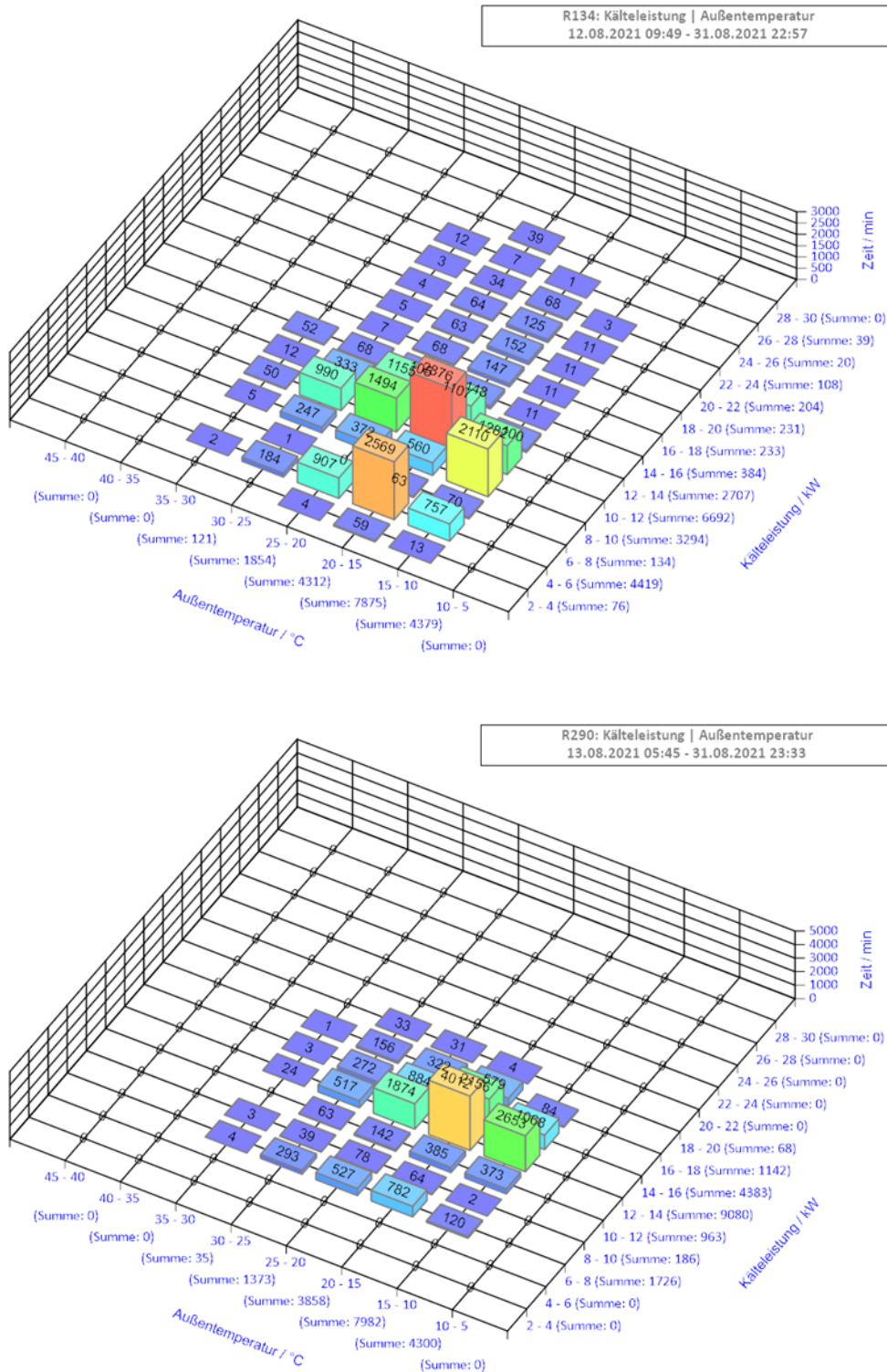
Die statistische Analyse ermöglicht die vom zeitlichen Zusammenhang losgelöste Betrachtung der Messergebnisse auch über längere Zeiträume. Die zu betrachtenden Größen können hierbei direkte Messgrößen oder daraus abgeleitete, berechnete Werte sein. Die Darstellungen in Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die mittleren Außentemperaturen ($^{\circ}\text{C}$, X-Achse), die berechnete Kälteleistung (kW, Y-Achse) sowie die Ergebnisse (Z-Achse), die als Zahlenangaben auf den dreidimensionalen Kästchen zu sehen sind, sofern beide Klassendimensionen erfüllt sind.

Beispielhaft ist in Abbildung 15 eine statistische Gegenüberstellung der bereitgestellten thermodynamischen Leistung (Kälteleistung) für Betriebszustände mit und ohne Bypass-Aktivierung im Zeitraum von 12. bis 31.08.2021 für jeweils den ersten Kältekreislauf des R134a und des R290-Gerätes gegeben. Im betrachteten Zeitraum sind die Verdichter bei Außentemperaturen zwischen 10°C und 30°C aktiviert. Der Großteil der Aktivierungen findet im Temperaturbereich von 10°C bis 25°C statt.

Die in Abbildung 16 dargestellte statistische Gegenüberstellung der zweiten Kreisläufe beider Anlagen zeigt eine zum jeweils ersten Kreislauf vergleichbare Verteilung der bereitgestellten Kälteleistung. Wie an den höheren Werten der Z-Achse erkennbar ist, stellt der R290-Versuchsträger für beide Kreisläufe im Mittel eine höhere Kälteleistung bereit.

In Abbildung 17 zeigt die Verteilung der elektrischen Leistungsaufnahme über den gleichen Zeitraum im August 2021 für beide Anlagen vergleichend dargestellt. Die höheren Leistungsaufnahmeniveaus (4 kW bis 8 kW) beider Anlagen sind auf die gleichzeitige Aktivierung beider Verdichter der Kreisläufe zurückzuführen. Die Verdichter in beiden Vergleichsanlagen besitzen ein identisches Fördervolumen. Aufgrund der höheren volumetrischen Kälteleistung der R290-Kälteanlage kann diese höhere Lastanforderungen im betrachteten Zeitraum in vielen Fällen durch Verwendung nur eines Kältemittelkreislaufes abdecken, was zu einer geringeren Häufigkeit der simultanen Aktivierung beider Verdichter der R290 Vergleichsanlage führt.

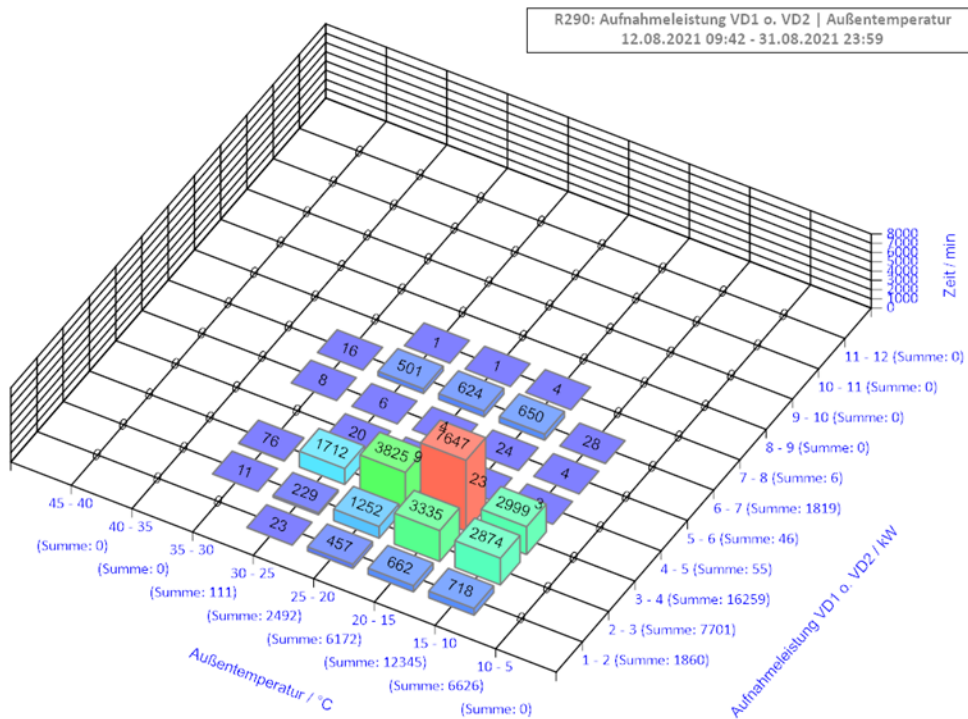
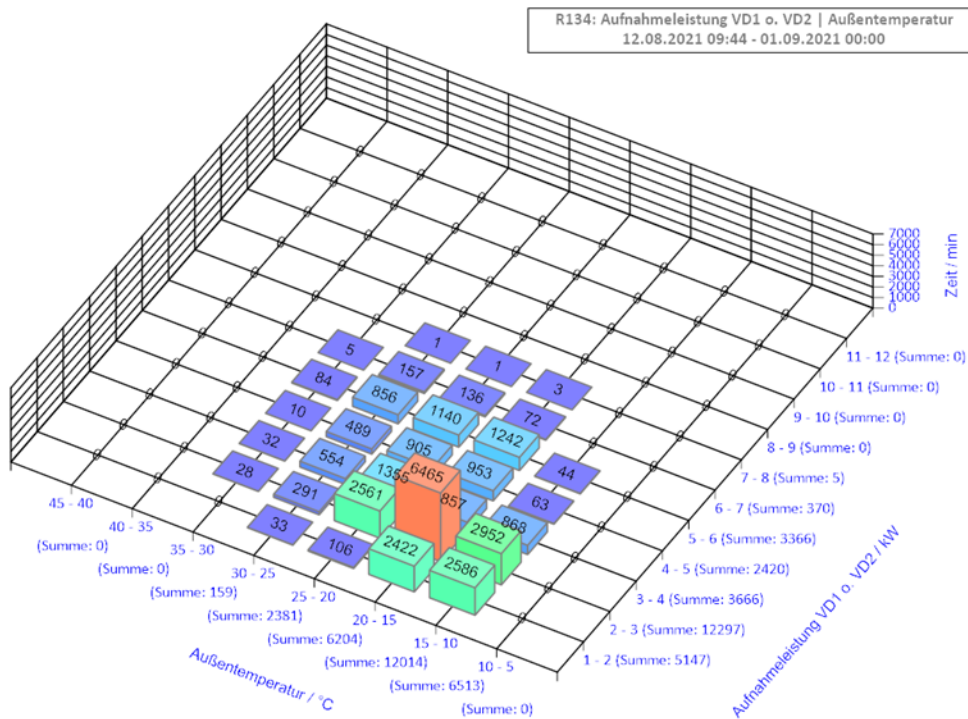
Abbildung 16: Vergleich zur Bereitstellung der thermodynamischen Leistung im zweiten Kältekreislauf (R134a oben, R290 unten)



Klassendimensionen sind die mittlere Außentemperatur (X-Achse) und die berechnete Kälteleistung (Y-Achse); Ergebnisse (Z-Achse) bestimmt durch kumulierte Dauer der Erfüllung beider Klassendimensionen

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 17: Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme (R134a oben, R290 unten)



Klassendimensionen sind die mittlere Außentemperatur (X-Achse) und bestimmte elektrische Leistung beider Verdichter (Y-Achse); Ergebnisse (Z-Achse) bestimmt durch kumulierte Dauer der Erfüllung beider Klassendimensionen

Quelle: eigene Darstellung, FTL

4.4 Vergleich der Energieaufnahme beider Geräte

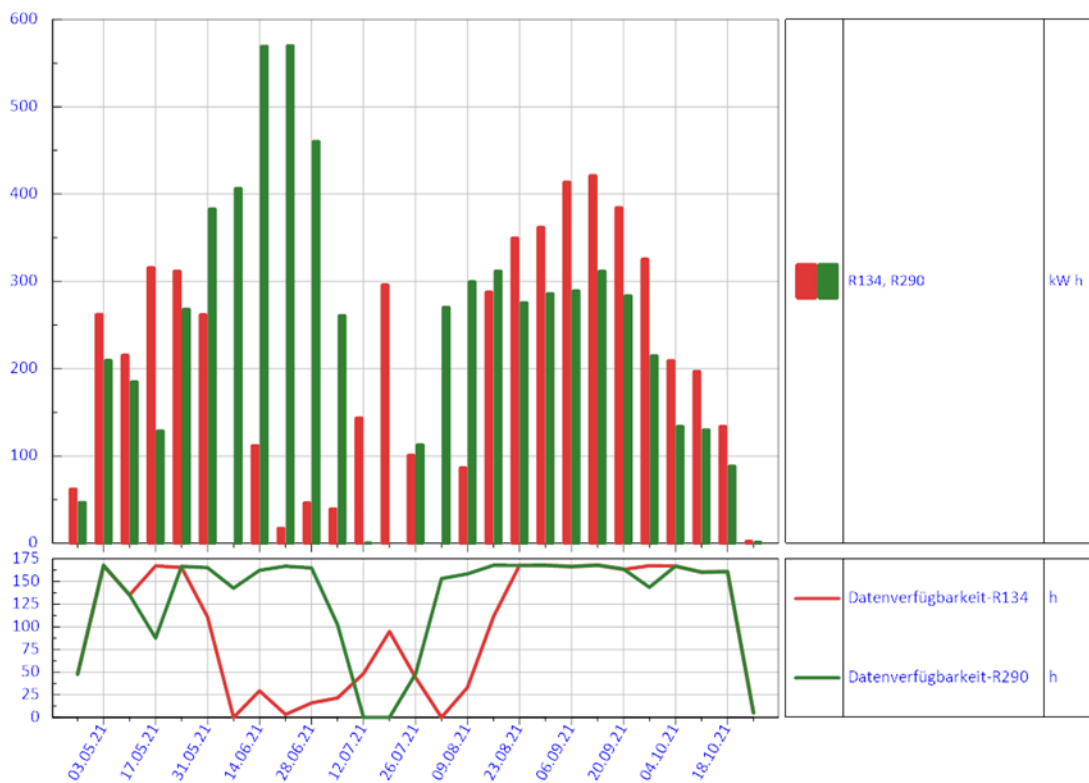
Die Messdatenerfassung beider Vergleichsgeräte wurde unter Verwendung mehrerer Datenlogger vorgenommen. Obwohl die damit einhergehende Aufteilung der messtechnisch zu bestimmenden Größen einen prinzipiellen Vorteil hinsichtlich der Verfügbarkeit einzelner Messgrößen liefert, ist die Gesamtheit der verfügbaren synchronen Daten hierdurch weiterhin nicht sicherzustellen. Insbesondere über einen längeren Zeitraum ist es für den Vergleich der Geräte untereinander nicht ausreichend, nur einander entsprechende Summenergebnisse direkt zu vergleichen.

Die vergleichende Auswertung erfolgt deshalb auf Basis der Kalenderwochen 18 bis 42 des Jahres 2021 (siehe bspw. Abbildung 18), die im Wesentlichen den Zeitraum der Datenerfassung aller Messgrößen durch einen Datenlogger der Fa. Optimeas umfassen. In einem weiteren Schritt werden ausschließlich Messdaten von Zeiträumen berücksichtigt, für die eine Aufzeichnung der wesentlichen Energiedaten der beiden Anlagen erfolgte.

4.4.1 Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme

Abbildung 18 zeigt, dass ein zusammenhängender Vergleich beider Geräte erst ab Kalenderwoche 33 des Jahres 2021 (ab 16.08.2021) sinnvoll ist, da ab diesem Zeitpunkt die Verfügbarkeit synchroner Daten erstmals ausreichend hoch ist.

Abbildung 18: Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche (R134a rot, R290 grün)

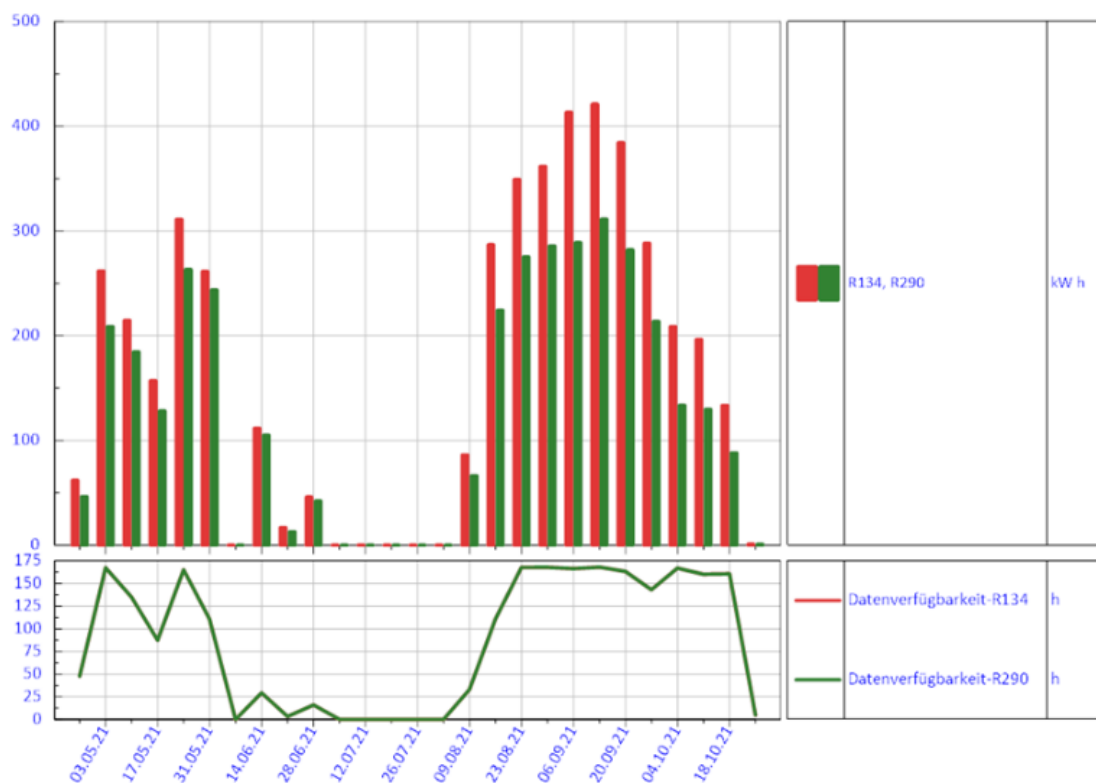


Der Parameter Datenverfügbarkeit beschreibt die Zeitspanne paralleler Datenverfügbarkeit der Logger für CAN- und Energiedaten von beiden Datenerfassungen.

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Betrachtet man ausschließlich Zeiträume mit synchron verfügbarer Aufzeichnung der Energiedaten, ist die gegenüber dem R-134a-Vergleichsgerät allgemein geringere akkumulierte Energieaufnahme der R290-Anlage deutlich zu erkennen (Abbildung 19). Die verminderte Repräsentativität der Zeiträume mit geringer (synchroner) Datenverfügbarkeit schließt einen direkten Vergleich mit anderen Zeitbereichen aus. Parameterwerte unterhalb des theoretischen Wochenmaximums von 168 Stunden würden die Wahrscheinlichkeit erhöhen, die Klimageräte bei stark unterschiedlichen Randbedingungen, beispielsweise bedingt durch tageszeitabhängige Außentemperaturen, zu vergleichen.

Abbildung 19: Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche bei synchroner Datenverfügbarkeit (R134a rot, R290 grün)



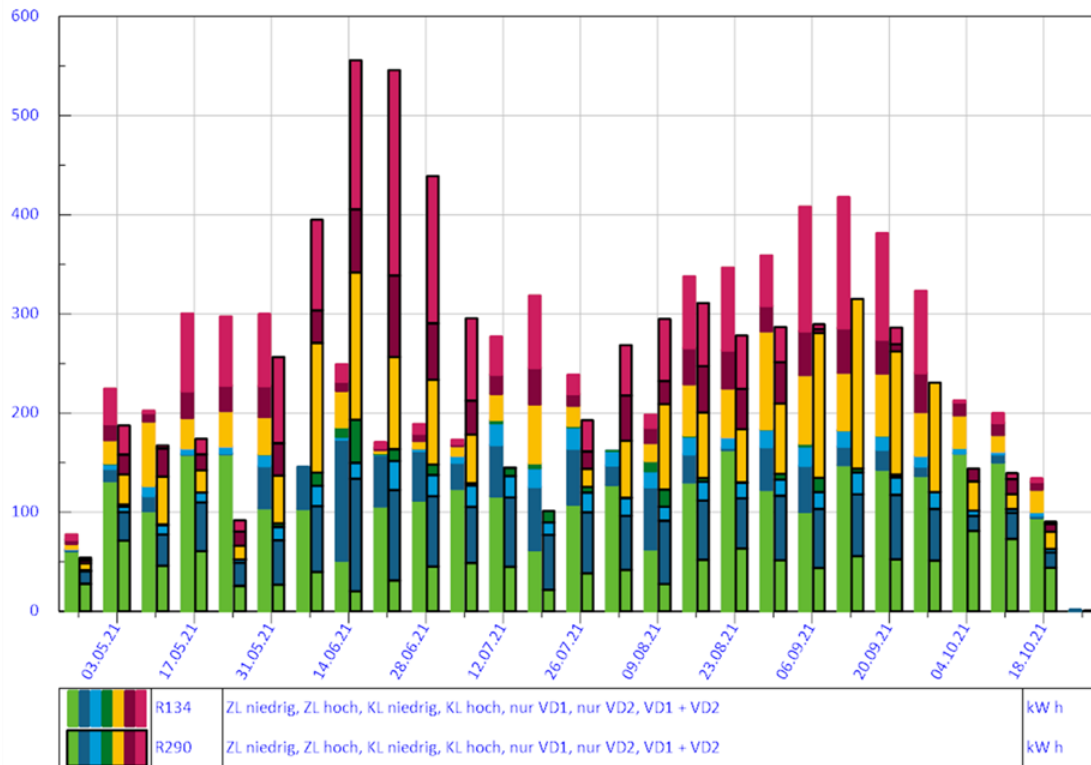
Der Parameter Datenverfügbarkeit beschreibt die Zeitspanne paralleler Datenverfügbarkeit der Logger für CAN- und Energiedaten von beiden Datenerfassungen.

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Die absolute elektrische Leistungsaufnahme eines Klimagerätes im Jahresmittel wird in Deutschland auch maßgeblich vom Betrieb der Heizer bestimmt. Die elektrische Leistungsaufnahme der Heizer wurde nicht messtechnisch erfasst, sondern für beide Vergleichsgeräte mit guter Genauigkeit aus dem Aktivierungssignal der Stufen des Heizregisters ermittelt. Um die gemessenen elektrischen Leistungen den jeweiligen Komponenten zuzuordnen, wurden zusätzlich die Aktivierungssignale der weiteren wesentlichen Komponenten, wie Lüfter und Kältemittel-Kompressoren, verwendet.

Abbildung 20 zeigt das Ergebnis einer komponentenbezogenen Betrachtung ohne Berücksichtigung der elektrischen Leistung der Heizregister.

Abbildung 20: Komponentenbezogener Vergleich der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme beider Geräte je Kalenderwoche für den Zeitraum Mai bis Oktober 2021 (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)

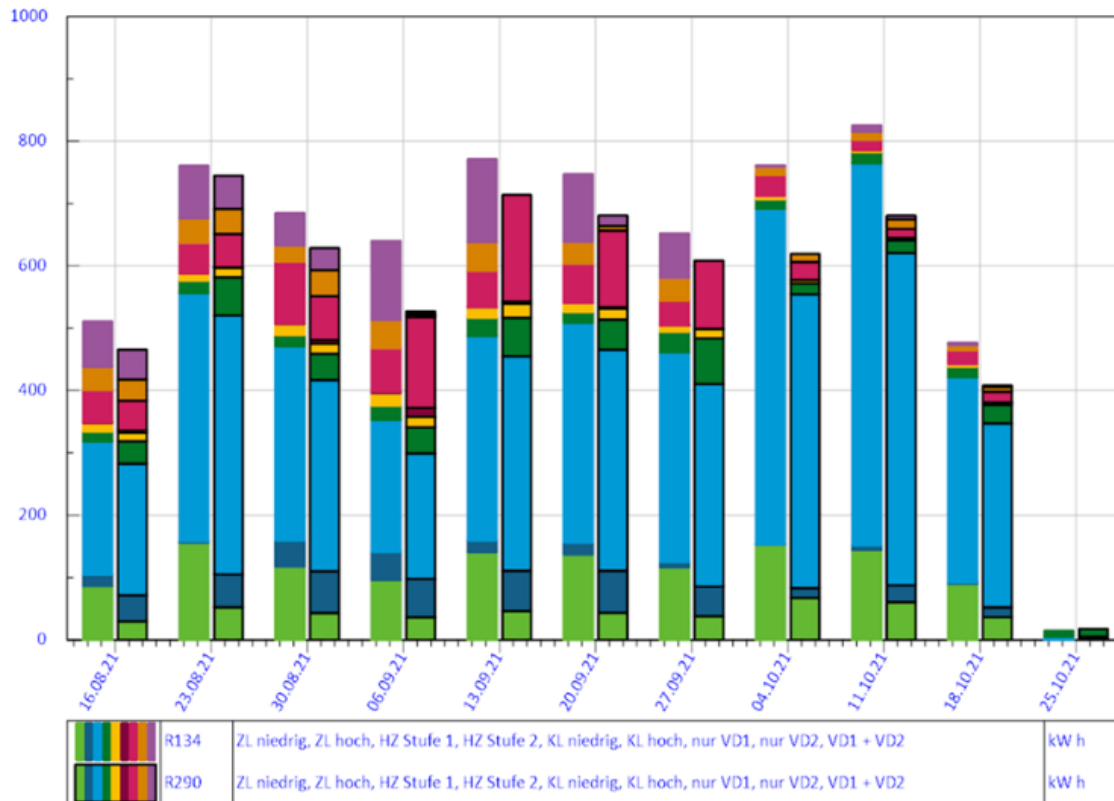


Abkürzungen: ZL (Zulüfter), KL (Kondensatorlüfter), VD (Verdichter)

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Für den Zeitraum vom ca. 16. August 2021 bis Aufzeichnungsende, für den eine sehr gute Datengrundlage zum Vergleich der beiden Geräte vorliegt, zeigt sich in Abbildung 21 mit Berücksichtigung der Heizregister ebenfalls eine geringere summierte Leistungsaufnahme des R290-Versuchsträgers. Unter Berücksichtigung der durch die Installation auf unterschiedlichen Wagen bedingten abweichenden Randbedingungen, und insbesondere den zwischen beiden Anlagen geänderten Zulüftern, sind beide Vergleichsgeräte für diesen Zeitraum als technologisch gleichwertig bezüglich deren Gesamtleistungsaufnahme anzusehen. Unterschiedliche Anlagenkonfigurationen haben hier technologisch nur geringen Einfluss.

Abbildung 21: Komponentenbezogener Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme je Kalenderwoche beider Geräte inklusive Heizregister für den Zeitraum August bis Oktober 2021 (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)



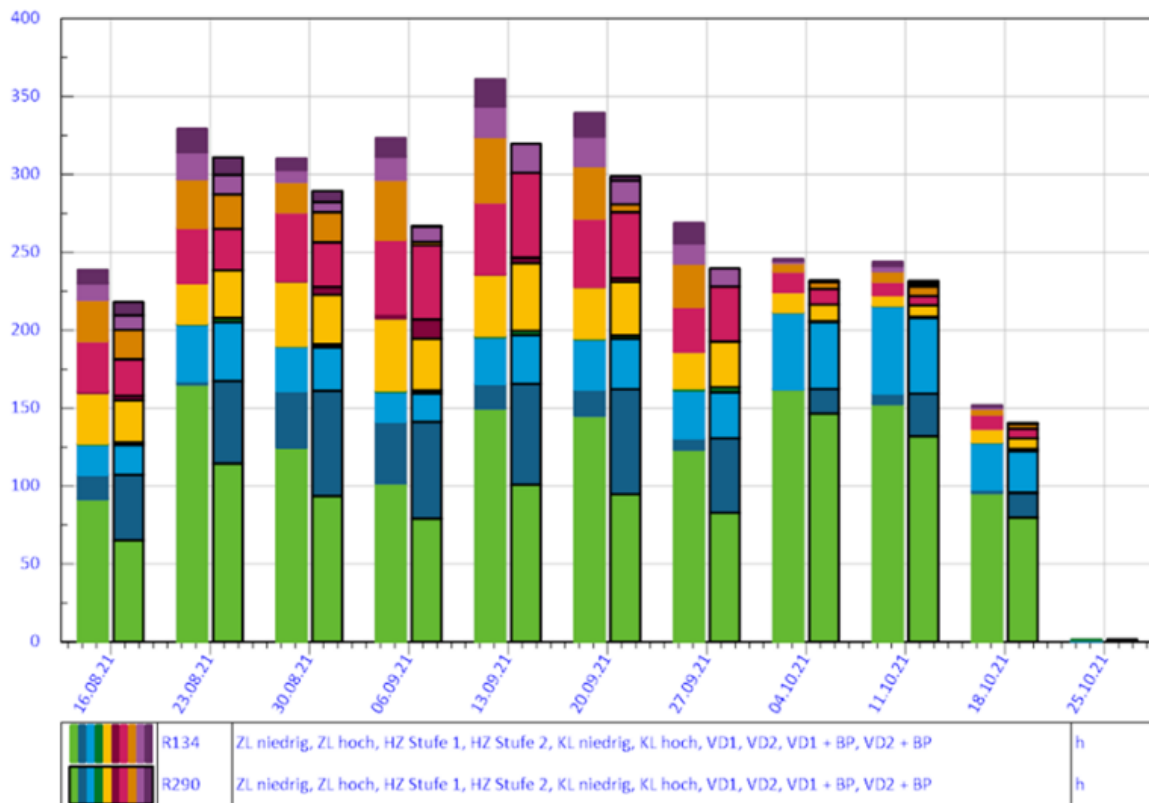
Abkürzungen: ZL (Zulüfter), HZ (Heizer), KL (Kondensatorlüfter), VD (Verdichter)

Quelle: eigene Darstellung, FTL

Durch den Vergleich der summierten Aktivierungsdauer der verschiedenen Komponenten kann ein erster Rückschluss auf den zeitlichen Aufwand zur Erreichung des Klimatisierungsziels gezogen werden. In Abbildung 22 sind die Summen der Aktivierungsdauer für Kühlen und Heizen beider Anlagen, aufgeteilt nach Komponenten, einander gegenübergestellt.

Das Klimatisierungsziel im Wagen des R290-Versuchsträgers wird im Mittel mit einer geringeren Aktivierungsdauer der Komponenten als bei der R134a-Vergleichsanlage erreicht. Im Zusammenhang mit den Betrachtungen zur elektrischen Leistungsaufnahme (Abbildung 17 bis Abbildung 21) zeigt dies eine im Mittel mindestens gleiche Gesamteffizienz des R290-Versuchsträgers für den betrachteten Zeitraum, was insbesondere durch das Aktivierungsverhalten der Kältemittelverdichter verdeutlicht wird.

Abbildung 22: Komponentenbezogener Vergleich der Aktivierungszeiten je Kalenderwoche beider Geräte inklusive Heizregister (Balken ohne Rahmen - R134a, Balken mit schwarzem Rahmen - R290, Farbreihenfolge in Legende entspricht Beschriftungsreihenfolge)



Abkürzungen: ZL (Zulüfter), HZ (Heizer), KL (Kondensatorlüfter), VD (Verdichter)

Quelle: eigene Darstellung, FTL

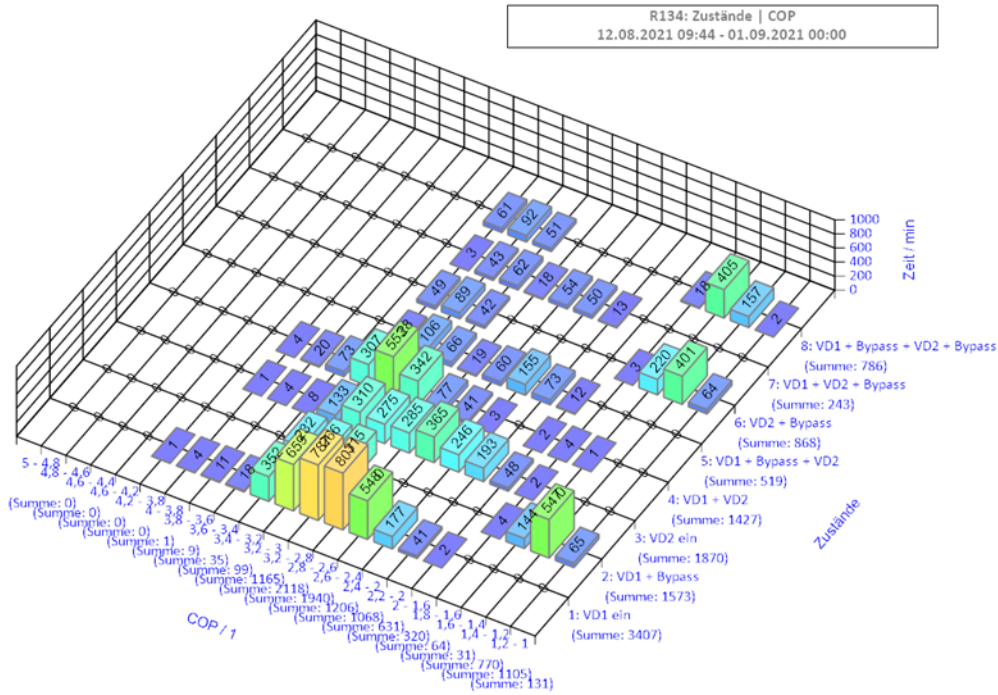
4.4.2 Vergleich der Leistungszahlen (COP)

Wesentlich in der vergleichenden Betrachtung der Gesamteffizienz der beiden Klimageräte ist der Beitrag der Leistungszahl (COP - Coefficient of Performance) zur Bereitstellung der Kälteleistung. Unter Berücksichtigung von erreichter Kälteleistung und dafür benötigter elektrischer Leistung der Klimageräte lässt sich der COP rechnerisch bestimmen.

$$COP = \frac{|Q|}{P_{el}}$$

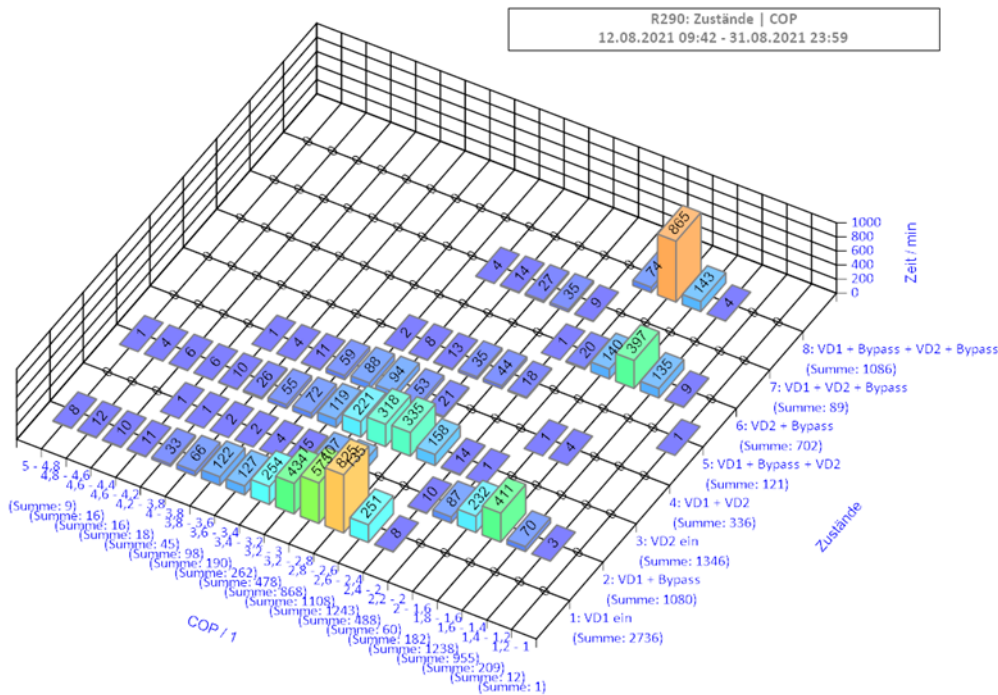
Abbildung 23 bis Abbildung 26 stellen die Verteilung der Leistungszahl in unterschiedlichen Verdichterstufen für beide Vergleichsgeräte dar, für einen Zeitraum im August 2021 mit im Mittel warmen Außentemperaturen und für einen Zeitraum im Oktober 2021 mit im Mittel gemäßigten Außentemperaturen. Die Darstellungen basieren auf Daten, die Umschaltvorgänge im Kältekreislauf herausfiltern (beispielsweise Einschalten der Verdichter und Aktivierung des Bypassbetriebs). Die geringere Gesamtsumme der Aktivzeiten der Zustände des R290-Versuchsträgers ist auf häufigeres Umschalten zurückzuführen, was eine direkte Folge der höheren von der Anlage bereitgestellten Kälteleistung ist. Die Mediane des COP sind für beide Anlagen im August vergleichbar, im Oktober ist der Median des COP des R290-Versuchsträgers leicht höher.

Abbildung 23: Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterzustände des R134a-Gerätes für August 2021



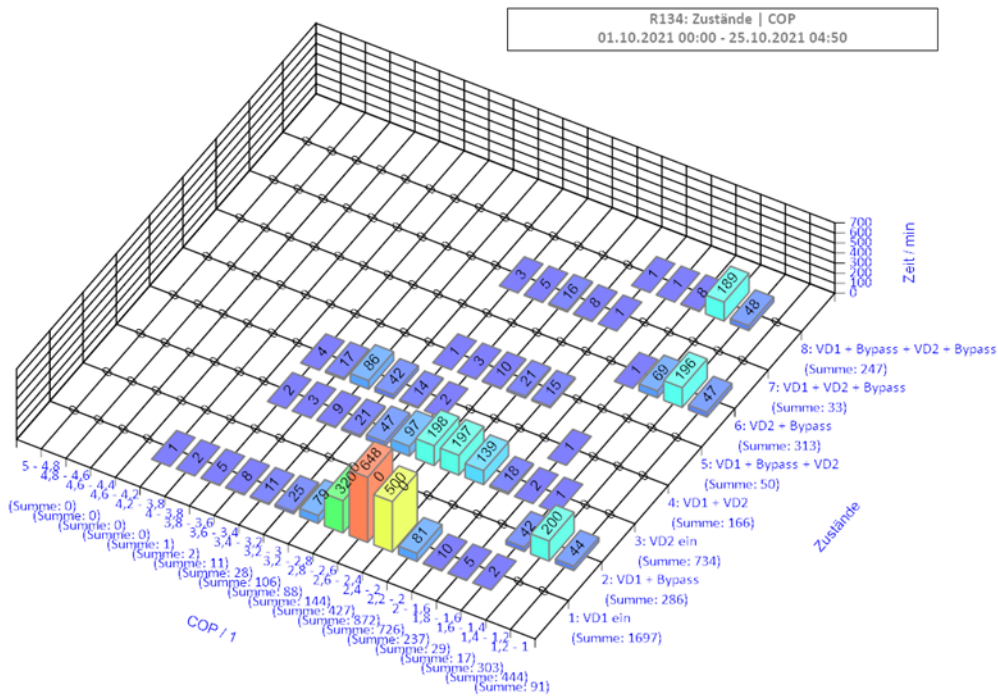
Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 24: Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichterzustände des R290-Gerätes für August 2021



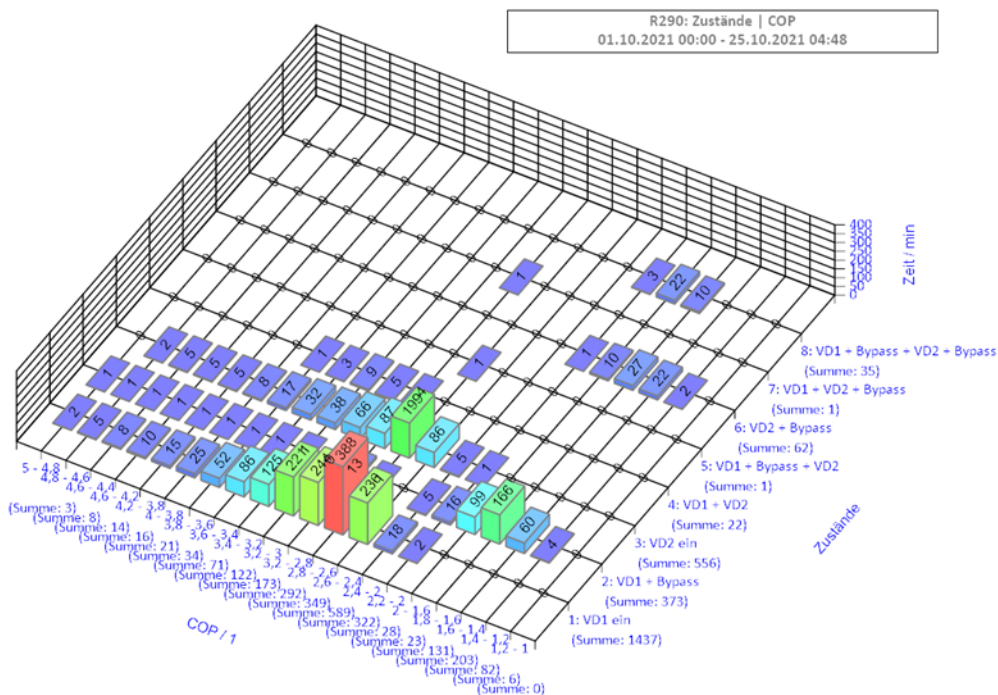
Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 25: Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichtierzustände des R134a-Gerätes für Oktober 2021



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 26: Bestimmung der Leistungszahl (COP) für verschiedene Verdichtierzustände des R290-Gerätes für Oktober 2021



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Bei weiterer Betrachtung ist zu erkennen, dass die R290-Anlage auch bei warmen Außentemperaturen nur selten mit beiden Verdichtern gleichzeitig arbeitet. Ein diesbezüglich ähnliches Verhalten der beiden Anlagen ist für Oktober zu erkennen, wobei für Zustände mit Aktivierung von nur einem Verdichter der Median des COP des R134a-Vergleichsgerätes stärker sinkt als für den COP des R290-Versuchsträgers.

Die Auswertung der im Feldversuch im Zeitraum vom 12. bis 31. August 2021 gewonnenen Daten zur elektrischen Leistungsaufnahme zeigt für den R290-Versuchsträger einen im Mittel leicht höheren COP für die Klimatisierungsleistung gegenüber dem R134a-Vergleichsgerät (Abbildung 23 und Abbildung 24). Auch für die weiteren Zeiträume mit hoher Datenverfügbarkeit ist dieser Vorteil des R290-Versuchsträgers in unterschiedlich deutlicher Ausprägung zu erkennen und deutet auf einen prinzipiellen Vorteil über das gesamte Jahr hin.

4.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Datenauswertung

Als Ergebnis der bisherigen Datenauswertung der im Feldversuch an der R290-Versuchsanlage und der R134a-Vergleichsanlage gewonnenen Daten kann folgendes festgestellt werden:

- ▶ Die erfassten Daten ergeben ein umfassendes und vollständiges Bild vom Betrieb der jeweiligen Klimaanlage. Betriebsparameter, Zustandsdaten und Fehlerstatistik erlauben eine detaillierte und genaue Bewertung.
- ▶ Der gemessenen Parameter, insbesondere der Energieverbrauch der beiden Anlagen, sind in der erwarteten Größenordnung.
- ▶ Bezogen auf die kumulierte Energieaufnahme der Verdichter sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Klimageräten mit R290 und R134a erkennbar.
- ▶ Der R290-Versuchsträger liefert bei Betrieb des Kältemittelkreislaufes allgemein eine höhere Kälteleistung als das R134a-Vergleichsgerät. Dies ist durch die Auswahl eines leistungsstärkeren Verdichters für das R290 Gerät verursacht, der aufgrund fehlender praktischer Erfahrungen und zur Absicherung der erforderlichen Kälteleistung für die Demonstrationsphase ausgewählt wurde. Im Ergebnis der Erprobung zeigte sich, dass für den R290-Kältekreislauf die nächstkleinere Baugröße dieser Typenreihe auch geeignet gewesen wäre, die notwendige Kälteleistung bereitzustellen. Für einen konkreten Lastzustand bedeutet dies, dass das R290 Gerät die notwendige Kälteleistung in kürzer Zeit aber mit einem höheren Energieverbrauch im Vergleich zum R134a Gerät bereitstellt. Der integrierte Energieverbrauch ist dabei aber in beiden Fällen annähernd gleich.
- ▶ Die Regelalgorithmen für das R290-Gerät wurden im Rahmen der Demonstrationsphase unverändert vom R134a-Gerät übernommen. Es erfolgte nur eine Parameteranpassung zur Berücksichtigung der abweichenden Drucklage bei R290. Trotzdem ergab sich aufgrund der unterschiedlichen Kälteleistungen der Verdichter ein zum Teil deutlich unterschiedliches Verhalten im Teillastbetrieb, erkennbar z. B. an der geringeren Häufigkeit der simultanen Aktivierung beider Verdichter in Abbildung 22. Dies ist unabhängig vom Kältemittel und beim Vergleich von Klimageräten grundsätzlich zu berücksichtigen.
- ▶ Für die Ermittlung von Jahresenergieverbräuchen muss eine ausreichende Anzahl von Testpunkten vorgesehen und die sich während der Messung im Tagesgang ändernden Lastbedingungen sollten berücksichtigt werden.

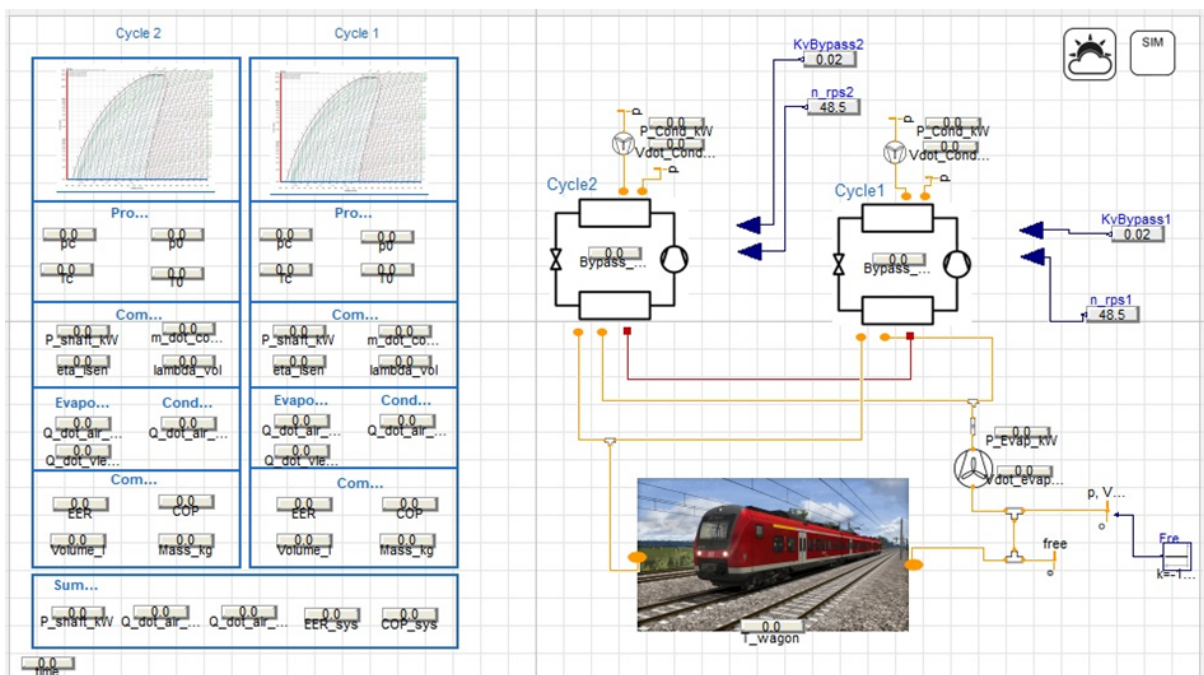
- ▶ Aufgrund von Lücken in der Datenaufzeichnung im Versuchszeitraum und der vergleichsweise milden sommerlichen Temperaturen im Jahr 2021 sind nur wenige simultane Vergleichsdaten beider Anlagen für Außentemperaturen oberhalb 30°C verfügbar. Dabei zeigten sich aber keine Auffälligkeiten in Bezug auf Kälteleistung oder Verfügbarkeit des R290- Gerätes im Vergleich zum R134a- Gerät.

5 Modellierung und Prozesssimulation

5.1 Modellierungswerkzeuge und Basisdaten

Das für die Erstellung der Modelle und die Durchführung der Simulationen verwendete Berechnungswerkzeug ist Dymola. Dymola ist eine Modellierungs- und Simulationsumgebung, die auf der Programmiersprache Modelica basiert und über Multi-Engineering-Funktionen verfügt, so dass die Modelle aus verschiedenen Komponenten unterschiedlicher technischer Bereiche bestehen können. Neben dem komponentenbasierten Kälteprozess kann so auch ein thermisches Fahrzeugmodell erstellt und die Modelle können in einem Gesamtmodell verknüpft werden. Folgende Abbildung 27 zeigt die Simulationsumgebung mit dem hier verwendeten Gesamtmodell.

Abbildung 27: Darstellung des Gesamtmodells in der Simulationsumgebung Dymola zur Veranschaulichung der Verknüpfung von Kältekreislaufmodell und Fahrzeugmodell

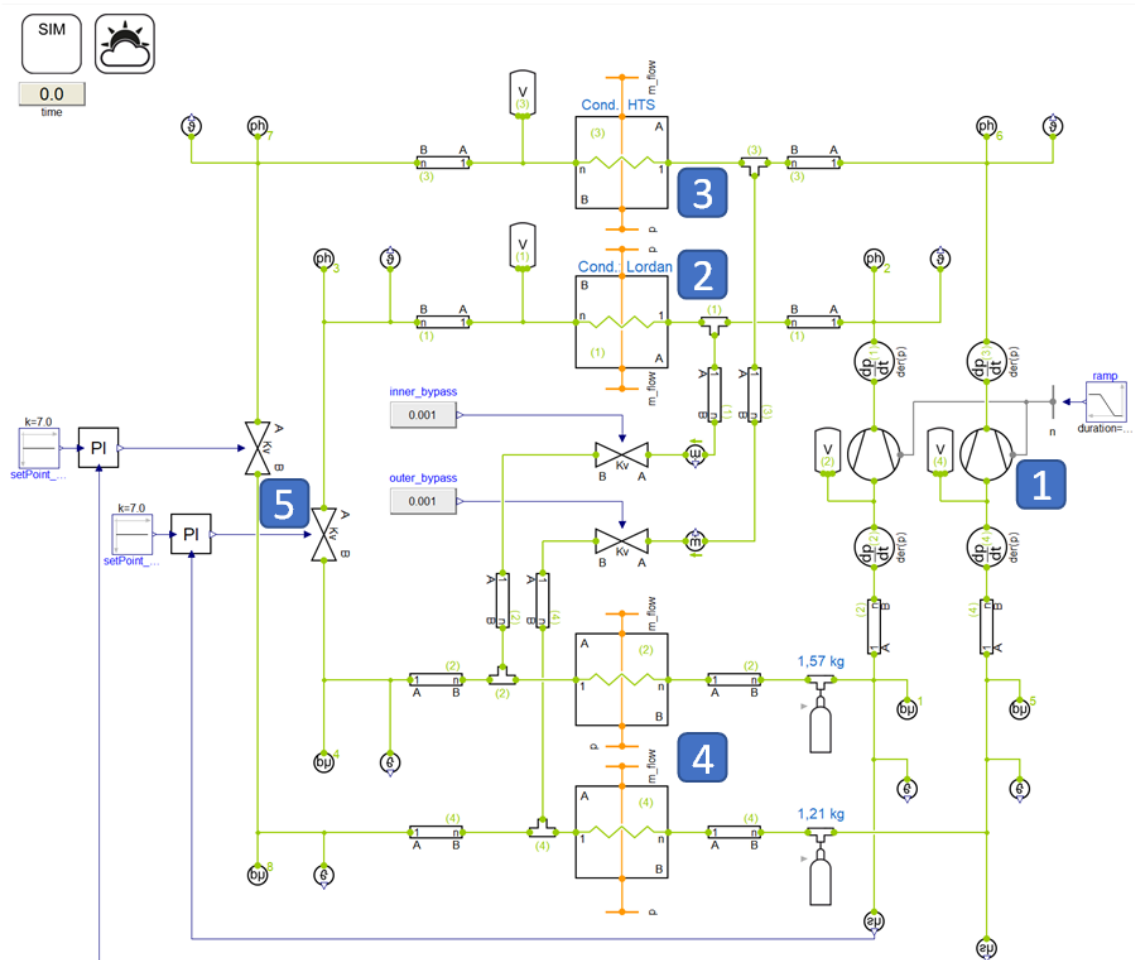


Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Für die Modellierung der Klimakompaktgeräte wird die kommerziell erhältliche Dymola-Bibliothek TIL-Suite der Fa. TLK-Thermo GmbH verwendet. Die Modelle der R290-Anlage, der R134a-Anlage und der R744 Anlage werden in der grafischen Oberfläche identisch abgebildet und unterscheiden sich nur in der thermisch-mathematischen Modellierung ihrer spezifischen Komponenten. Repräsentativ für alle Modelle mit unterschiedlichen Kältemitteln zeigt Abbildung 28 das grafische Kältekreismodell des R290-Kompaktgerätes mit den Hauptkomponenten 1 bis 5, Kompressoren (1), Wärmeübertrager (2,3,4) und Expansionsventile (5).

Die wichtigsten Eigenschaften der Kältekreiscomponenten für die R290 und die R134a Anlage sowie des thermischen Fahrzeugmodells sind in Tabelle 5 beschrieben und den Componenten in Abbildung 28 zugeordnet.

Abbildung 28: Repräsentative grafische Darstellung des Simulationsmodells der R290-Anlage in Dymola



(1) Kompressoren, (2, 3, 4) Wärmeübertrager, (5) Expansionsventile

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Tabelle 5: Beschreibung und Kenndaten der Hauptkomponenten des Kältekreislaufs der simulierten Anlagen mit R290 und R134a sowie des thermischen Fahrzeugmodells

Nr.	Komponente	Beschreibung/ Kenndaten	R290-Anlage	R134a-Anlage
1	Kompressoren	Hersteller	Copeland	Copeland
		Modell	ZH13KCU-TFMN	ZR72KCE-TFD
		Typ	Scroll	Scroll
		Hubvolumen [m ³ /h]	17,1	17,1
		Synchrondrehzahl [Hz]	50	50
2	Umgebungs-WT (innen)	Typ	Rohr-Lamellen-WT	Rohr-Lamellen-WT
		Luftseitige Oberfläche [m ²]	26,4	28,4
3	Umgebungs-WT (außen)	Typ	Rohr-Lamellen-WT	Rohr-Lamellen-WT
		Luftseitige Oberfläche [m ²]	27,9	28,4
4	Last-WT	Typ	Rohr-Lamellen-WT (verschränkt)	Rohr-Lamellen-WT (verschränkt)
		Luftseitige Oberfläche [m ²]	48,2	53,4
5	Expansionsventile	Hersteller	Danfoss	Alco
		Modell	TGE10-6	TX3-M28
		Typ	thermostatisch	thermostatisch
7	Zulüfter	Hersteller	Rosenberg	Rosenberg
		Typ	EC-Lüfter	EC-Lüfter
		Max. Leistung [kW]	0,71	0,71
		Max. Volumenstrom [m ³ /h]	2600	2600
8	Lüfter Umgebungs-WT	Typ	EC-Lüfter	EC-Lüfter
		Max. Leistung [kW]	0,7	0,7
		Max. Volumenstrom [m ³ /h]	8000	8000
9	Thermisches Fahrzeugmodell	Basis für Modell	BR 440 Mittelwagen	
		Innenvolumen [m ³]	75	
		Max. Personenbelegung [-]	68	
		Wagenkasten k-Wert [W/m ² K]	2,2 bei 15 km/h	
		Scheibenfläche [m ²]	17,2	
		Innere thermische Masse [kg]	3500 (Schätzung)	

WT: Wärmeübertrager, EC-Lüfter: Lüfterantrieb mit bürstenlosem Gleichstrommotor (engl. electronically commutated).

5.2 Modellierung der Klimaanlage

5.2.1 Modellierung der R290-Anlage

Im Rahmen der Modellierung sind alle Komponenten des Kältekreislaufs unter Verwendung der Herstellerangaben abgebildet und verbunden worden. Die zwei redundanten Kältekreisläufe (innerer und äußerer Kreislauf) enthalten jeweils einen Scrollverdichter des Herstellers Copeland, Modell ZH13KCU-TFMN. Die Herstellerangaben der Verdichter wurden über das zugehörige Herstellertool in Polynome nach DIN EN 12900 (2013) umgeformt. Über ein Schnittstellenmodell lassen sich aus den Polynomen in Dymola die Wirkungsgrade der Verdichter ableiten.

Das Anfahren der Verdichter wird über eine Rampenfunktion berücksichtigt, das innere Verdichtervolumen wurde entsprechend den Herstellerangaben implementiert. Die internen freien Kältemittelvolumina der Verdichter wurden entsprechend der Herstellerangaben in das Verdichtermodell implementiert, um das gesamte Kältemittelvolumen je Kältekreis exakt abbilden zu können.

Die beiden Kreisläufe (innen und außen) der R290-Anlage enthalten Wärmeübertrager (Kondensatoren) unterschiedlicher Hersteller. Der äußere Kreislauf ist mit einem Kondensator des Herstellers HTS ausgerüstet, der innere mit einem Kondensator des Herstellers Lordan. Die Kondensatoren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Geometrie und der damit verbundenen Wärmeübertragung. Als Grundlage für die Entwicklung der Berechnungsmodelle der luftseitigen Wärmeübertragung für die gewellten Lamellen-Rohrbündel-Wärmeübertrager dienen die Erkenntnisse aus Wang et al (1997).

Die thermostatischen Expansionsventile und die Magnetventile für die indirekte Heißgas-Bypass-Regelung wurden im Modell abgebildet. Die Überhitzung wird im Modell über die thermostatischen Expansionsventile mittels eines PI-Reglers (Proportional-Integral Regler) anhand der Durchflusskoeffizienten gesteuert.

5.2.2 Modellierung der R134a-Anlage im Kühlbetrieb

Die Prozessführung der modellierten R134a-Anlage ist identisch zu der Prozessführung der R290-Anlage. Die Rohrleitungsvolumina sowie die Regelung der Überhitzung und der Lüfter gleichen sich ebenfalls vollständig.

Beide redundanten R134a-Kältekreisläufe (innerer und äußerer Kreislauf) enthalten, im Unterschied zu der R290-Anlage, jeweils einen Scrollverdichter des Herstellers Copeland, Modell ZR72KCE-TFD. Die Herstellerangaben der Verdichter wurden ebenfalls über die zugehörige Herstellersoftware in Polynome nach DIN EN 12900 umgeformt. Über ein Schnittstellenmodell wurden die Wirkungsgrade der Verdichter in Dymola abgeleitet. Das innere Volumen der Verdichter wurde entsprechend den Herstellerangaben berücksichtigt. Das Anfahrverhalten wurde über eine Rampenfunktion dargestellt.

Im Gegensatz zur R290-Anlage werden in der R134a-Anlage zwei identische Kondensatoren eines Herstellers verwendet, deren Modellierung ebenfalls mit den Erkenntnissen der Studie von Wang et al. (1997) erfolgte.

5.2.3 Modellierung der R744-Anlage im Kühlbetrieb

Da in diesem Projekt keine Klimaanlage mit dem Kältemittel R744 (CO₂) erprobt wurde, erfolgte die Modellierung der R744-Klimaanlage anhand eines virtuell ausgelegten Kältekreis. Zudem standen Daten für die R744-Anlage von Faiveley Transport Leipzig (FTL, Wabtec) zur Verfügung, die im Rahmen einer Erprobung bei der norwegischen Eisenbahn NSB im Zeitraum 07/2017 bis 12/2018 aufgezeichnet und analysiert wurden. Die Modellierung der R744-Klimaanlage erfolgte seitens DB Systemtechnik anhand eines virtuell ausgelegten Kältekreis einer funktions- und leistungsgleichen Klimaanlage.

Als Basis der Modellierung diente das von Hörth & Berlitz (2021) veröffentlichte Modell sowie die von der Fa. FTL (Wabtec) zur Verfügung gestellten technischen Daten der Komponenten (siehe Tabelle 9). Um die geforderte Kälteleistung bereitzustellen, wurde das Modell an die R290-Architektur angepasst. d.h. die virtuelle R744-Klimaanlage enthält zwei Kältekreise mit je einem Verdichter.

Tabelle 6: Beschreibung und Kenndaten der Hauptkomponenten des Kältekreislaufs der simulierten Anlage mit dem Kältemittel R744 (CO₂)

Nr.	Komponente	Beschreibung/ Kenndaten	R744-Anlage
1	Kompressor	Modell	2MTE-5Z-40S
		Typ	Hubkolben
		Hubvolumen [m ³ /h]	3,3
		Synchrondrehzahl [Hz]	50
		Internes freies Kältemittelvolumen [l]	ca. 7,5
2	Umgebungs-Wärmeübertrager (beide Kreise)	Typ	Rohr-Lamellen-WT
		Luftseitige Oberfläche [m ²]	26,9
3	Last-Wärmeübertrager	Typ	Rohr-Lamellen-WT
		Luftseitige Oberfläche [m ²]	61,1
4	Expansionsventile	Modell	E2V24CS100
		Typ	elektronisch
5	Zulüfter	Typ	EC-Lüfter
		Max. Leistung [kW]	0,95
		Max. Volumenstrom [m ³ /h]	3500
6	Lüfter Umgebungs-Wärmeübertrager	Typ	2-Stufig Stern/Dreieck
		Leistung [kW] (Stern/Dreieck)	1,2/1,85
		Max. Volumenstrom [m ³ /h]	9500
7	Kältemittelabscheider	Typ	Saugseitig mit integriertem Wärmeübertrager

Nr.	Komponente	Beschreibung/ Kenndaten	R744-Anlage
		Kältemittelvolumen [l]	2,4
8	Kältemittel	Füllmenge [kg] pro Kreis	4,2

Im Unterschied zu den konventionell geführten Kältekreisläufen mit R134a oder R290 muss eine R744-Anlage aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Kältemittels von CO₂ im Kühlbetrieb transkritisch betrieben werden. Aufgrund der transkritischen Prozessführung von R744 erfolgte die Regelung der Expansionsventile nicht nach der Überhitzung am Verdampfer, sondern nach dem optimalen Hochdruck nach dem Gaskühler, indem es seinen Öffnungsgrad ändert. Um bei dieser Regelungsstrategie den Verdichter vor Flüssigkeitsschlägen zu schützen und Lastschwankungen auszugleichen benötigen solche R744-Systeme einen Kältemittelabscheider in der Saugleitung zum Verdichter.

Des Weiteren können Abscheider mit integriertem inneren Wärmeübertrager die Effizienz einer R744-Anlage maßgeblich steigern. In der Modellierung der R744-Anlage wurde deshalb die Komponente Kältemittelabscheider mit integriertem inneren Wärmeübertrager berücksichtigt. Abbildung 30 mit der Nummerierung in Tabelle 6 dient zur Veranschaulichung der Komponenten im Kältekreislauf.

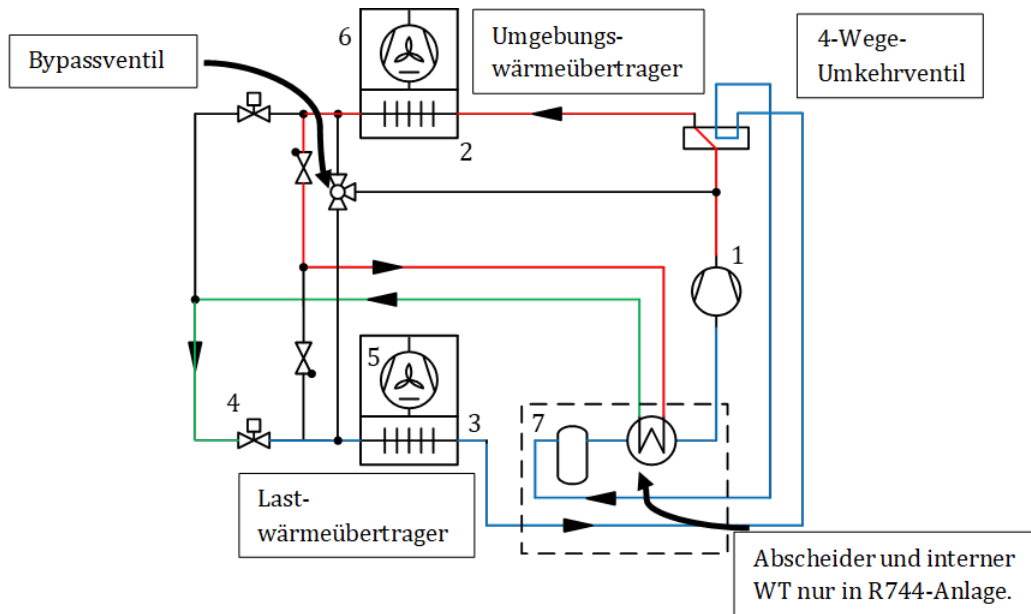
5.2.4 Modellierung des R290- und R744-Wärmepumpenbetriebs

Die Betriebsführung als Wärmepumpe wurde in diesem Projekt ebenfalls nicht erprobt. Dementsprechend erfolgte die Modellierung rein virtuell und ohne Validierung der Modelle, da in diesem Projekt keine Daten erhoben worden sind.

Der Wärmepumpenbetrieb einer Klimaanlage erfolgt nach Stand der Technik durch Umkehrung oder Umschaltung des Kältekreises, so dass z. B. der Last-Wärmeübertrager im Kühlmodus als Verdampfer und im Wärmepumpenmodus als Kondensator oder bei R744 als Gaskühler betrieben werden kann. Gewöhnlicherweise werden Klimaanlage mit Wärmepumpenfunktion für die höchste Last im Kühlmodus ausgelegt. Das hat neben wirtschaftlichen Gründen auch technische Gründe, wie z. B. max. verfügbare elektrische Anschlussleistung oder max. verfügbarer Bauraum.

Zur Modellierung des Wärmepumpenbetriebs sind aus den zuvor genannten Gründen dieselben geometrischen Wärmeübertrager-Modelle und Verdichter-Eigenschaften eingesetzt worden. Die Modelle für den reinen Kühlbetrieb unterschieden sich im Grunde nur in der Prozessführung und Ventilanzahl, also durch die kältemittelseitigen Druckverluste. Eine Vergleichbarkeit ist zwar durch die Modellbildung sichergestellt, allerdings erfolgt keine Optimierung hinsichtlich der Effizienz für den Wärmepumpenbetrieb. Wie eine Klimaanlage mit Wärmepumpenfunktion in der Realität prozesstechnisch umgesetzt werden könnte, zeigen hierzu die Abbildungen Abbildung 29 im Kühlmodus und Abbildung 30 im Wärmepumpenmodus.

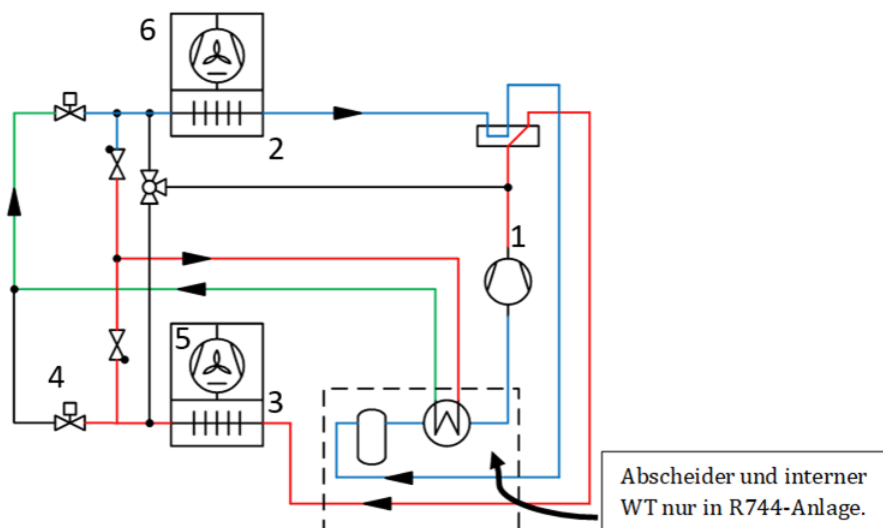
Abbildung 29: Darstellung des virtuellen Kältemittelkreislaufs mit Umkehrventil für den Wärmepumpenbetrieb (Darstellung im Kühlmodus)



Erläuterung der Zahlen der Grafik in Tabelle 6

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Abbildung 30: Darstellung des virtuellen Kältekreis im Wärmepumpenbetrieb



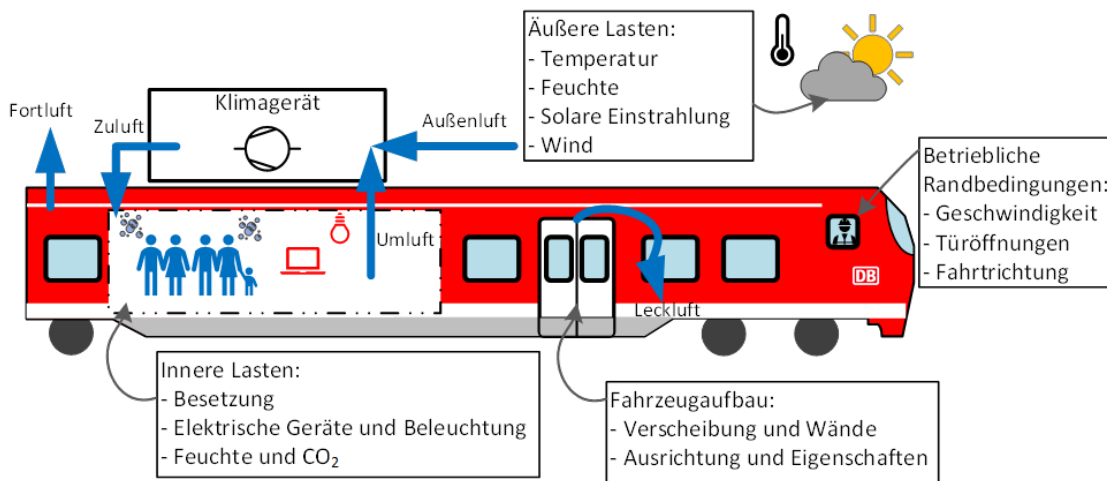
Erläuterung der Zahlen der Grafik in Tabelle 6

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

5.3 Thermisches Fahrzeugmodell

Bei der Erstellung des thermischen Fahrzeugmodells wurde der Ansatz von mehreren gleichwertigen thermischen Zonen gewählt. Das in diesem Projekt entstandene Modell teilt sich in vier räumliche Zonen auf, wobei die einzelnen Zonen als thermische Punktmassen ausgeführt sind. Zwischen den Zonen kann ein Luftaustausch aufgrund von Dichteunterschieden der Luft stattfinden. Aufgrund der Gleichverteilung der thermischen Lasten und der betrieblichen Randbedingungen verhalten sich die modellierten Zonen in den hier durchgeführten Berechnungen nahezu identisch. Das Strömungsverhalten der konditionierten Luft kann hier, im Unterschied zu CFD-Simulationen, nicht dargestellt werden. Dem Fahrzeugmodell können die unterschiedlichsten Randbedingungen aufgeprägt werden. Abbildung 31 zeigt hierzu alle Randbedingungen, die variiert werden können.

Abbildung 31: Schematische Darstellung der thermischen Lasten und der Luftströme der Klimaanlage am Schienenfahrzeug.



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

5.3.1 Regelungsmodelle und Teillastbetrieb

Für dynamische Berechnungen ist es notwendig, die Sollwerttemperatur des Fahrzeuginnenraums bei allen Randbedingungen einregeln zu können. Dazu sind für die Modelle mehrere Regelkreise entworfen worden. Das gesamte Regelungskonzept ist, soweit wie möglich, von den realen Reglern adaptiert, allerdings auch zugunsten der Simulationszeit vereinfacht und optimiert worden.

5.3.1.1 Leistungsregelung

Grundlage der Temperaturregelung des Fahrzeuginnenraums sind die Leistungsstufen der Kältekreise, die hier vereinfacht in fünf Stufen implementiert worden sind. Da die Klimaanlage aus zwei Kältekreisen besteht und je Kältekreis ein Bypassventil zur Teillastregelung vorhanden ist, sind mindestens fünf Laststufen möglich. Tabelle 7 zeigt die in den Modellen implementierten Leistungsstufen mit der zu erwartenden Kälte- oder Heizleistung in Prozent.

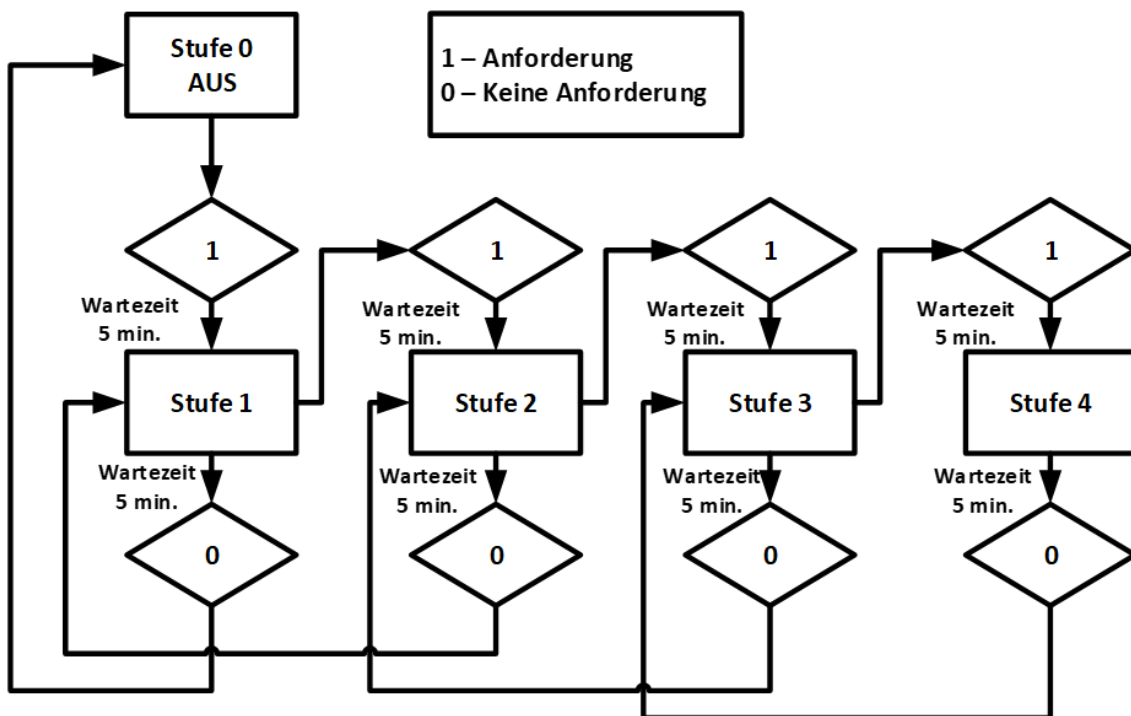
Tabelle 7: In den Modellen implementierte Leistungsstufen zur Teillastregelung

Leistungsstufe	Leistung in %	Verdichter 1	Bypass 1	Verdichter 2	Bypass 2
0	0%	AUS		AUS	
1	25%	AN	OFFEN	AUS	
2	50%	AN	ZU	AUS	
3	75%	AN	ZU	AN	OFFEN
4	100%	AN	ZU	AN	ZU

Die Berechnung der Leistungsanforderung zur Ansteuerung der Leistungsstufen erfolgte in Abhängigkeit von der Abweichung der Raumluft-Isttemperatur von der Raumluft-Solltemperatur (ΔT_{TIM}) und von der Sollwertabweichung der Zulufttemperatur (ΔT_{TZUL}). Der Raumlufttemperatursollwert ist dabei abhängig von der Umgebungstemperatur und erfüllt die Anforderungen der EN 14750 (CEN 2006). Der Zuluftsollwert wurde mittels einer Kaskadierung der Sollwertabweichungen über einen PI-Regler ermittelt. Eine modellierte Zustandsmaschine wechselt in Abhängigkeit von folgenden Bedingungen in die in Abbildung 32 beschriebenen Leistungsstufen:

- ▶ Leistungsanforderung bei: $\Delta T_{TIM} \geq 1 K$ und $\Delta T_{TZUL} \geq 6 K$
- ▶ Keine Leistungsanforderung bei: $\Delta T_{TIM} < -1 K$ und $\Delta T_{TZUL} < -6 K$

Abbildung 32: Modell der Zustandsmaschine zur Leistungsregelung



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Zwischen den Leistungsstufen wirkt eine Wartezeit von jeweils fünf Minuten, um Schaltspiele der Verdichter zu beschränken. Diese Bedingung ergibt ein Schaltspiel von maximal zwölf mal pro Stunde pro Verdichter.

5.3.1.2 Regelung zur Prozessführung

Expansionsventil

Entsprechend der jeweiligen Prozessführung (subkritisch oder transkritisch) wurde ein PI-Regler zur Regelung des Expansionsventils modelliert. Subkritisch wird der Öffnungsgrad des Expansionsventils nach der Überhitzung nach Verdampfer geregelt. Der Sollwert der Überhitzung wurde mit 7,5 K festgelegt. Transkritisch, also bei einem R744-System, wird das Expansionsventil nach dem optimalen Hochdruck sowie nach der Temperatur nach dem Umgebungswärmeübertrager geregelt. Da insbesondere im Wärmepumpenbetrieb die Prozessführung des R744-Systems auch subkritisch oder im Übergangsbereich verlaufen kann, wurde eine Korrelation entwickelt, die den gesamten Prozessbereich sub- und transkritisch sowie den Übergang abdeckt:

$$p_{opt,set} = e^{a + \frac{b}{c + T_{n,GC}}}$$

In der Gleichung entspricht $p_{opt,set}$ dem Sollwert des optimalen Hochdrucks in bar und $T_{n,GC}$ der Kältemitteltemperatur nach Gaskühler bzw. Kondensator in Kelvin. Die Konstanten a , b und c sind anlagenspezifisch zu ermitteln. Für diese Anlagenkonfiguration sind folgende Konstanten berechnet worden: $a = 10,1261$, $b = -1557,49$ und $c = -31,6865$. Im subkritischen Bereich bewirken die hier für die Gleichung gewählten Konstanten eine Unterkühlung nach Kondensator von 3 bis 6 K.

Lüfter des Umgebungswärmeübertragers

Im Kühlbetrieb werden die Lüfter des Umgebungswärmeübertragers, der in diesem Betriebsmodus als Kondensator oder Gaskühler betrieben wird, in Abhängigkeit vom Hochdruck zweistufig (Stern-Dreieck-Schaltung) angesteuert. Die Schaltschwellen sind nach den thermodynamischen Eigenschaften der jeweiligen Kältemittel gewählt worden. Dazu wurde eine Zustandsmaschine entworfen, die die in Tabelle 8 beschriebenen Schaltschwellen je Kältemittel im Kühlbetrieb abbildet.

Tabelle 8: Darstellung der Lüfterstufen des Umgebungswärmeübertragers in Abhängigkeit vom Hochdruck im Kühlbetrieb

Leistungsstufe	R134a	R290	R744
AUS	< 9 bar	< 13 bar	< 75 bar
Stern	≥ 9 bar und < 11 bar	≥ 13 bar und < 15 bar	≥ 75 bar und < 100 bar
Dreieck	≥ 14 bar	≥ 15 bar	≥ 100 bar

Im Wärmepumpenmodus wurde am Umgebungswärmeübertrager die maximale Lüfterleistung angesetzt.

Zulüfter und Frischluftvolumenstrom

Die Zulüfter werden bei allen Modellen je nach Leistungsstufe zweistufig geregelt. Bei den Leistungsstufen 0 und 1 werden die Zulüfter mit dem geringeren Volumenstrom von etwa 2200 m³/h und in den Leistungsstufen 2, 3 und 4 mit dem maximale Volumenstrom von etwa 3300 m³/h betrieben.

Der Frischluftvolumenstrom ist in den Modellen abhängig von der Besetzungsanzahl bzw. abhängig von der CO₂-Konzentration und erfüllt die Vorgaben der EN 14750 (CEN 2006).

5.4 Theoretischer Vergleich der Kältemittel

Die natürlichen Kältemittel R744 und R290 haben im Vergleich zum teilhalogenierten Kohlenwasserstoff (HFKW) R134a thermodynamische und ökologische Vorteile. Aufgrund ihrer weiteren Eigenschaften gibt es Herausforderungen bei der Umsetzung eines sicheren Betriebs.

Tabelle 9 fasst die wichtigsten Eigenschaften der hier behandelten Kältemittel zusammen.

Tabelle 9: Eigenschaften der natürlichen Kältemittel R290 und R744 im Vergleich zu R134a

Kältemittel	R134a	R290	R744
Sicherheitsklasse nach EN 378-Kategorie (DIN EN 378-1, 2020)	A1	A3	A1
GWP ₁₀₀ (IPCC 2007) ¹	1430	3	1
GWP ₁₀₀ (IPCC 2021) ²	1530	0,02	1
Kritische Temperatur (Bell, et al., 2014)	101,1 °C	96,7 °C	31,0 °C
Kritischer Druck (Bell, et al., 2014)	40,6 bar	42,5 bar	73,8 bar
Volumetrische Kälteleistung bei 0°C (Bell, et al., 2014)	2865 kJ/m ³	3880 kJ/m ³	22546 kJ/m ³
Sättigungsdruck bei 0°C (Bell, et al., 2014)	2,9 bar	4,7 bar	34,8 bar
Normalsiedepunkt (Bell, et al., 2014)	-26,1 °C	-42,2 °C	- ³

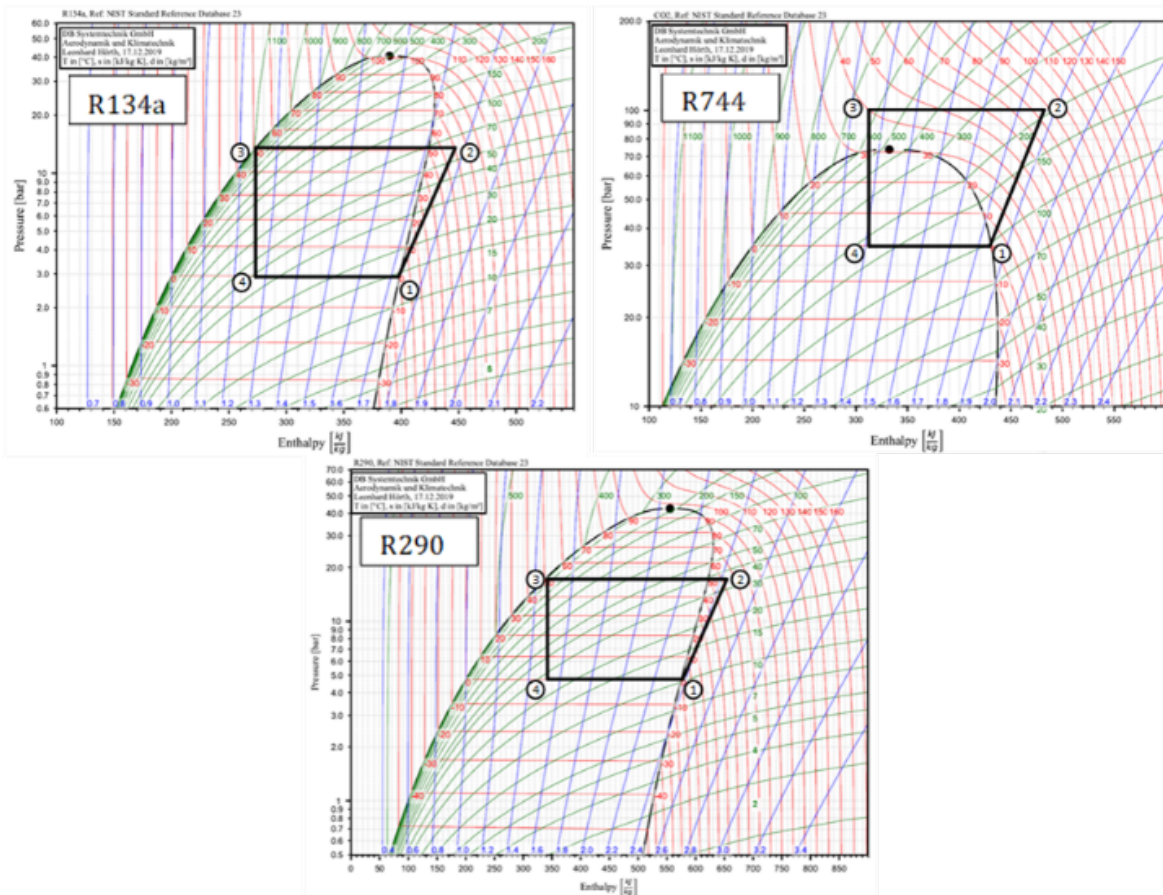
¹ GWP₁₀₀ – Global Warming Potential (Treibhauspotential) bezogen auf 100 Jahre in der Atmosphäre (AR4, IPCC 2007)

² GWP₁₀₀ – Global Warming Potential (Treibhauspotential) bezogen auf 100 Jahre in der Atmosphäre (AR6, IPCC 2021))

³ R744 sublimiert bei Umgebungsdruck bei -78,4 °C (Bell, et al., 2014), d.h. es geht vom festen direkt in den gasförmigen Zustand über, ohne zuerst flüssig zu werden.

Um die thermodynamischen Potentiale der natürlichen Kältemittel zu diskutieren und mit den Mess- und Simulationsergebnissen vergleichen zu können, ist ein idealer Vergleichsprozess entworfen worden (Abbildung 34). Der Vergleichsprozess enthält keinerlei Verluste bei der Wärmeübertragung und wurde in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur berechnet.

Abbildung 33: Repräsentative Vergleichsprozesse der Kältemittel R134a, R744 und R290 bei einer Verdampfungstemperatur von 0 °C



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Abbildung 34 zeigt die thermodynamischen Unterschiede der Kältemittel R290, R134a und R744 bei der volumetrischen und der spezifischen Kälteleistung des Vergleichsprozesses in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur. Die Kältemittel R134a und R290 wurden ohne Unterkühlung und bei 50 °C Kondensationstemperatur berechnet. CO₂ (R744) wurde mit einem optimalen Hochdruck von 100 bar und einer Temperatur nach Gaskühler von 40 °C berechnet. Bei allen Kältemitteln wurde der isentrope Wirkungsgrad der Verdichtung nach Robinson & Groll (1998) und eine Überhitzung von 0 K herangezogen.

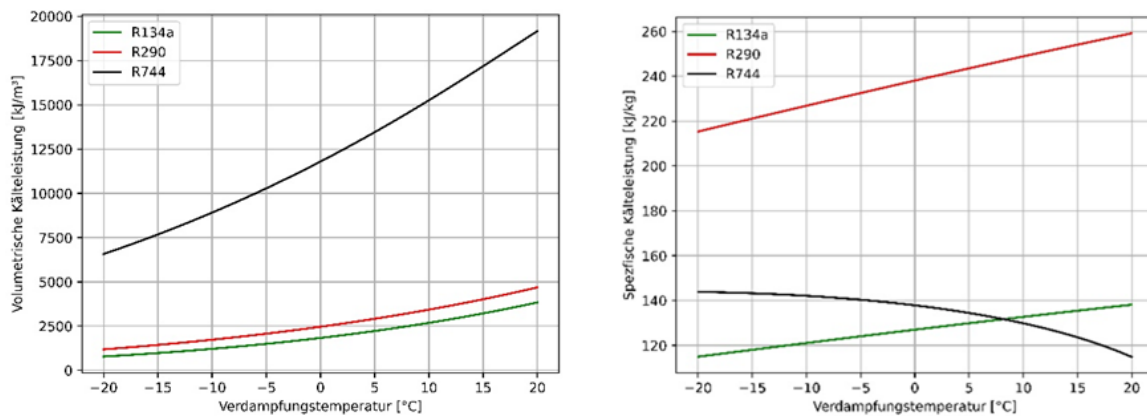
Die dabei dargestellte volumetrische Kälteleistung q_v berechnet sich aus der Enthalpiedifferenz an den Prozessstellen 1 und 3 (h_1 und h_3) sowie der Kältemitteldichte am Verdichter an der Stelle 1 (ρ_1):

$$q_v = (h_1 - h_3) \cdot \rho_1$$

Die spezifische Kälteleistung q berechnet sich nur aus der Enthalpiedifferenz des Verdampfungsprozesses:

$$q = (h_1 - h_3)$$

Abbildung 34: Darstellung der volumetrischen und der spezifischen Kälteleistung der Kältemittel R290, R134a und R744 in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur und ohne Überhitzung nach der Verdampfung.



Die Kältemittel R134a und R290 wurden ohne Unterkühlung und bei 50 °C Kondensationstemperatur berechnet. CO₂ (R744) wurde mit einem optimalen Hochdruck von 100 bar und einer Temperatur nach Gaskühler von 40 °C berechnet.

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

R744 zeigt im Vergleich zu den Kältemitteln R134a und R290 wesentlich höhere volumetrische Kälteleistungen. Das bedeutet, dass R744-Verdichter, bei gleicher geforderter Kälteleistung, ein etwa 1/5 kleineres Fördervolumen haben als R134a- oder R290-Verdichter. Prozessbezogen besitzt R744 im Kältekreis Nachteile, die sich bei höheren Verdampfungstemperaturen bei der gewählten Anlagenkonfiguration auf die spezifische Kälteleistung auswirken.

Propan zeigt etwas bessere Werte in der volumetrischen Kälteleistung als R134a und hat wesentliche Vorteile in der spezifischen Kälteleistung. Thermodynamisch ist zu erwarten, dass mit R290 im Vergleich zu R134a höhere effektive Kälteleistungen erzielt werden können.

5.5 Verifizierung und Validierung der Kältekreismodelle

5.5.1 Verwendete Daten und Modell für die Validierung

Die Verifizierung der einzelnen Modelle, wie Wärmeübertrager (WT) oder Verdichter erfolgte auf Basis der jeweiligen Herstellerangaben und -zeichnungen. Eine Validierung der einzelnen Komponentenmodelle erfolgte aufgrund fehlender Daten nicht, da Typtests einzelner Komponenten in diesem Projekt nicht durchgeführt wurden. Die Validierungen der Kältekreise und somit des Gesamtprozesses wurden mit Typtestdaten durchgeführt, die die Fa. FTL (Wabtec) am Prüfstand ermittelt hatte. Die Anlagentypen mit R134a und R290 wurden bei drei Szenarien bzw. bei drei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen vermessen. Diese Typtestbedingungen sind in der nachfolgenden Tabelle 10 aufgelistet.

Um die in der Tabelle 10 aufgeführten thermischen und betrieblichen Randbedingungen zur Validierung einsetzen zu können, mussten die Kältekreismodelle leicht modifiziert werden. Das heißt, dass die Randbedingungen bei der Validierung Konstanten sind, die entweder direkt im Modell eingegeben oder mittels PI-Regler eingeregelt wurden

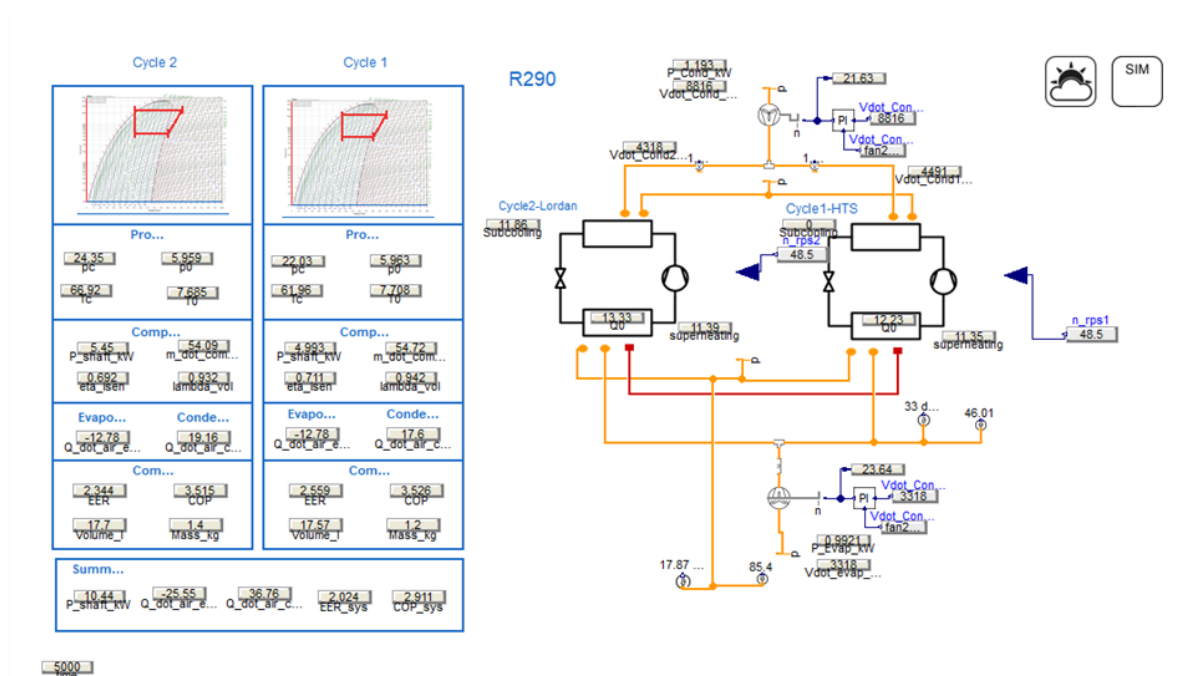
Tabelle 10: Definierte Umgebungsbedingungen für die Typtests zur Validierung der Kältekreismodelle mit R134a und R290

Größe	Einheit	NP 40°C/38%	NP 35°C/50%	NP 10°C / 82%
Umgebungstemperatur T_inf	°C	40	35	10
Umgebungsfeuchte phi_inf	%	38	50	82
Lufttemperatur Eintritt Gerät T_MIA	°C	33	30	18,5
Feuchte Eintritt Gerät phi_MIA	%	46	48	56
Zuluftvolumenstrom V_dot_SUP	m³/h	3300	3300	3300
Volumenstrom Kondensator V_dot_c	m³/h	9096 (R134a) 8816 (R290)	9096 (R134a) 8816 (R290)	5913 (R134a) 5949 (R290)
Betriebsmodus	-	Volllast (beide Kreise aktiv)	Volllast (beide Kreise aktiv)	Ein Kreis aktiv mit Bypass

NP: Nennpunkt

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt repräsentativ für alle Kältemittel ein Modell für die R290-Anlage mit den beiden Kältekreisläufen, das zur Validierung eingesetzt wurde.

Abbildung 35: Graphische Abbildung des Modells zur Validierung der Kältekreise



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

5.5.2 Ergebnisse der Validierung

In Abbildung 36 sind die wichtigsten Parameter zur Validierung aufgezeigt. Die wichtigsten Größen sind in der folgenden Tabelle 11 beschrieben.

Abbildung 36: Auszug der Ergebnisse zur Validierung der Kältekreise R134a und R290

		Randbedingungen Nennpunkt 40 °C / 38 %			
		T_inf	40 °C	T_MIA	33 °C
		phi_inf	38%	phi_MIA	46%
		Simulation		Typstest FTL	
Kennzahlen	Einheit	R134a	R290	R134a	R290
V_dot_c	m³/h	9098	8816	9098	8816
V_dot_SUP	m³/h	3298	3318	3298	3318
Q_dot_0	kW	23,90	25,6	24,7	26,4
Q_dot_c	kW	33,6	36,8	-	-
P_COMP	kW	9,1	10,4	8,8	11,1
T ₀	°C	10,7	7,7	10,2	8,6
T _c	°C	64,8	64,4	61,1	64,5
dT _{sh}	K	8,0	7,4	8,0	7,2
T_COMP_i	°C	22,6	19,7	24,8	20,9
T_COMP_o	°C	95,5	91,1	88,4	89,1
EER	-	2,6	2,5	2,8	2,4
T_SUP	°C	18,3	17,8	18,0	17,8

		Randbedingungen Nennpunkt 35 °C / 50 %			
		T_inf	35 °C	T_MIA	30 °C
		phi_inf	50%	phi_MIA	48%
		Simulation		Typstest FTL	
Kennzahlen	Einheit	R134a	R290	R134a	R290
V_dot_c	m³/h	9098	8816	9098	8816
V_dot_SUP	m³/h	3312	3311	3312	3311
Q_dot_0	kW	23,4	25,9	25,2	25,9
Q_dot_c	kW	32,1	36,6	-	-
P_COMP	kW	8,1	9,7	8,2	10,1
T ₀	°C	8,0	4,8	7,0	5,7
T _c	°C	59,7	60,6	54,5	58,9
dT _{sh}	K	8	7,4	8,3	7,4
T_COMP_i	°C	19,7	16,1	21,9	17,8
T_COMP_o	°C	89,7	87,0	81,5	83,1
EER	-	2,9	2,7	3,0	2,6
T_SUP	°C	15,6	14,8	15,1	15,1

		Randbedingungen Nennpunkt 10 °C / 82 %			
		T_inf	10 °C	T_MIA	18,5 °C
		phi_inf	82%	phi_MIA	56%
		Simulation		Typstest FTL	
Kennzahlen	Einheit	R134a	R290	R134a	R290
V_dot_c	m³/h	5913	5949	5913	5949
V_dot_SUP	m³/h	3304	3331	3304	3301
Q_dot_0	kW	8,8	7,7	8,3	7,7
Q_dot_c	kW	11,4	10,65	-	-
P_COMP	kW	3,1	3,0	3,22	2,98
T ₀	°C	4,6	3,7	3,3	-1,6
T _c	°C	36,2	30,7	33,0	30,4
dT _{sh}	K	7,5	7,4	7,2	7,8
T_COMP_i	°C	11,8	13,1	11,0	9,7
T_COMP_o	°C	56	52,7	51,0	51,4
EER	-	2,8	2,6	2,6	2,6
T_SUP	°C	10,8	12,9	11,6	11,7

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

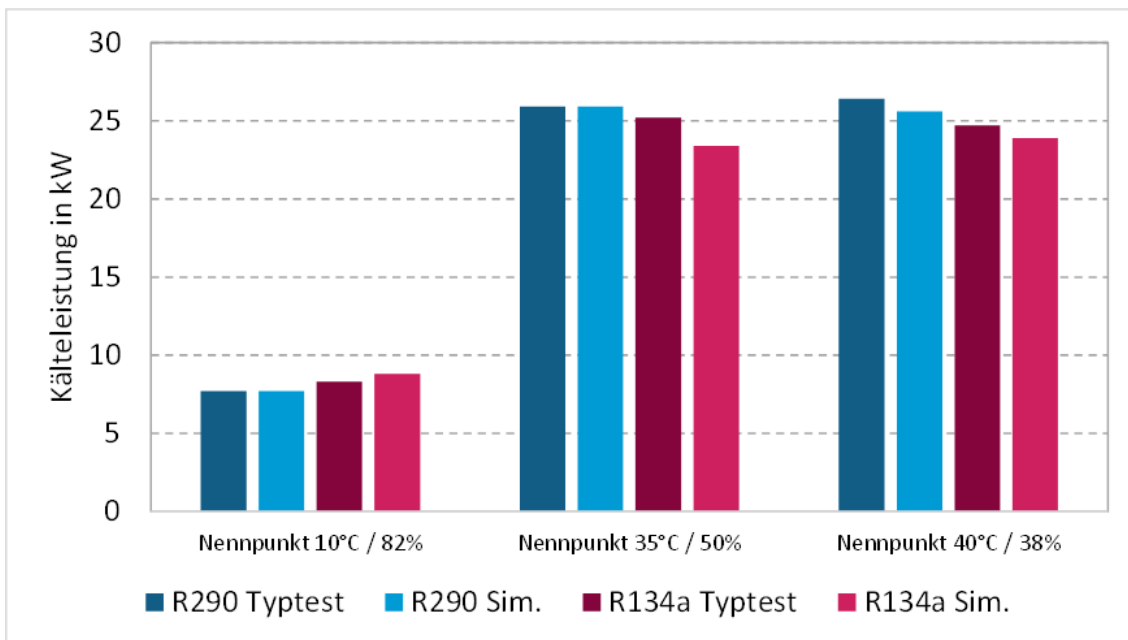
Tabelle 11: Beschreibung der in Abbildung 36 dargestellten Kennzahlen mit Einheiten

Beschreibung	Größe	Einheit
Volumenstrom am Kondensator	$V_{\dot{c}}$	m ³ /h
Volumenstrom der Zuluft	$V_{\dot{S}UP}$	m ³ /h
Kälteleistung	$Q_{\dot{0}}$	kW
Leistung am Kondensator	$Q_{\dot{c}}$	kW
Leistung Verdichter	P_{COMP}	kW
Verdampfungstemperatur	T_0	°C
Verflüssigungstemperatur	T_c	°C
Überhitzung nach Verdampfer	dT_{sh}	K
Kältemitteltemperatur vor Verdichter	T_{COMP_i}	°C
Kältemitteltemperatur nach Verdichter	T_{COMP_o}	°C
Kälteleistungsziffer (nur bezogen auf den Kältekreis ohne Lüfter)	EER	-
Zulufttemperatur	$T_{S}UP$	°C

Die Ergebnisse in Abbildung 36 zeigen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung der Typtestdaten mit den berechneten Simulationsdaten. Die Abweichungen betragen maximal 5 % bei den Leistungswerten. Größere Abweichungen von bis zu 6 K ergeben sich bei den Temperaturen nach Verdichter. Tendenziell sind diese berechneten Werte in der Simulation immer etwas höher als die in der Messung festgestellten Temperaturen. In Typtests wird diese Temperatur nach dem Verdichter am Heißgasrohr gemessen. In der Simulation dagegen wird die Verdichtungsendtemperatur ohne Verluste am Gehäuse ermittelt. Diese Temperaturabweichungen sind daher vernachlässigbar.

Die für die spätere Analyse der Systeme wichtigsten Parameter sind die aufgenommene Verdichterleistung und die Kälteleistung. Abbildung 37 und Abbildung 38 stellen die Verdichter- und Kälteleistungen im Vergleich graphisch dar und verdeutlichen die gute Übereinstimmung von Simulationen und Typtests bzw. die nur relativ geringen Abweichungen von nur 1 kW für R290 beim Nennpunkt 40°C/38 % sowie 2-3 kW im Fall von R134a bei allen Nennpunkten. Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abbildungen mit Sim. abgekürzt.

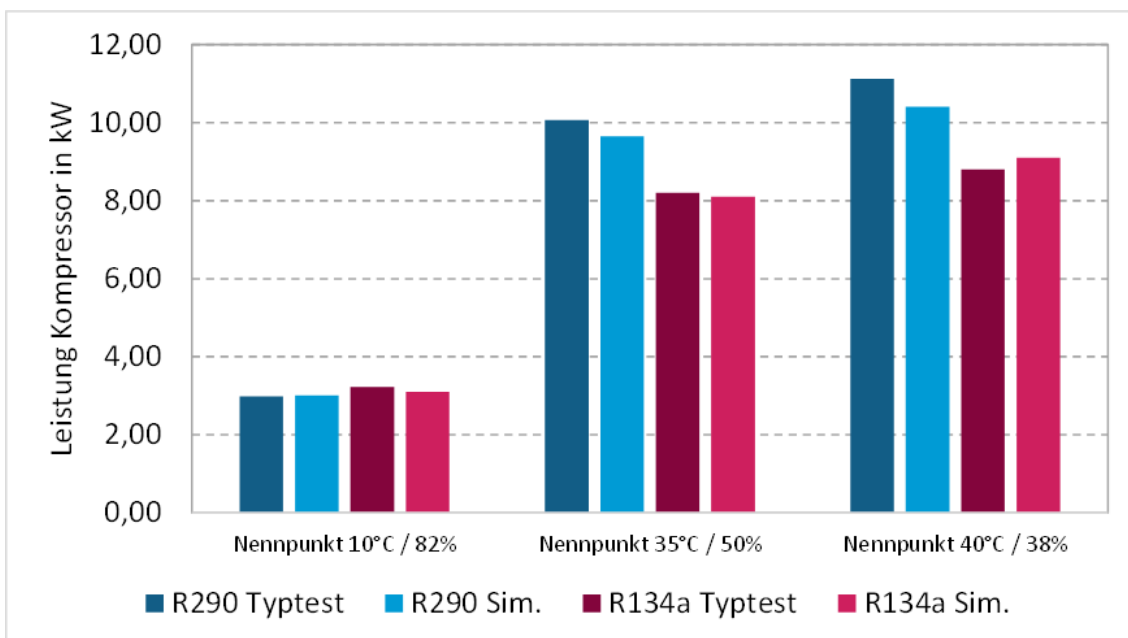
Abbildung 37: Validierung der Kälteleistung der Kältekreise mit R290 und R134a



Sim. -Simulation

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Abbildung 38: Validierung der Verdichterleistung der Kältekreise mit R290 und R134a



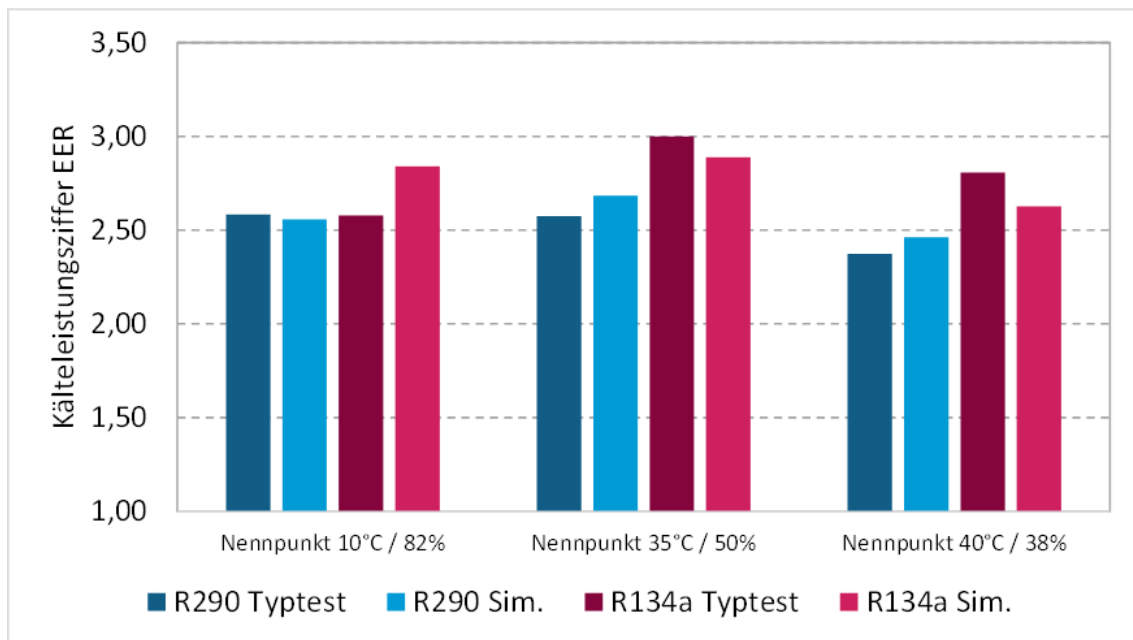
Sim. -Simulation

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Eine weitere wichtige Größe für die Validierung der Simulationsmodelle und für die Vergleichsanalyse ist die Kälteleistungsziffer. Die Kälteleistungsziffer wird hier nur prozessseitig betrachtet. Das bedeutet, dass die Energy Efficiency Ratio (EER, Energie-Effizienz-Verhältnis) nur dem Quotienten von Kälteleistung und Verdichterleistung entspricht und keine weiteren

Verbraucher, wie Lüfter, eingerechnet sind. Die Kälteleistungsziffer EER ohne weitere Verbraucher ist in Abbildung 39 abzulesen.

Abbildung 39: Validierung der Kälteleistungsziffer (EER) der Kältekreise mit R290 und R134a



Sim. -Simulation

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Eine Validierung des R744-Modells sowie der Wärmepumpenmodelle wurde nicht durchgeführt, da keine Testdaten für die virtuell ausgelegten Modelle vorhanden waren.

6 Simulative Vergleiche

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Anlagentypen mit den Kältemitteln R134a und R290 simulativ im Kühlbetrieb verglichen. Der simulative Vergleich im Kühlbetrieb mit R744 erfolgt in Abschnitt 6.2. Ergebnisse dynamischer Berechnungen aller Anlagentypen im Kühlbetrieb mit dem Fahrzeugmodell werden in Abschnitt 6.3 gezeigt. Der Vergleich des Wärmepumpenbetriebs mit den Kältemitteln R290 und R744 erfolgt in Abschnitt 6.4.

6.1 Simulativer Vergleich der Anlagentypen mit den Kältemitteln R134a und R290 im Kühlbetrieb

Da die Unterschiede der Anlagen hauptsächlich die Kältemittel betreffen, wird der simulative Anlagenvergleich zunächst ohne Fahrzeugmodell durchgeführt. Ein Vergleich mit Fahrzeugmodell ist anschließend in Abschnitt 6.3 ausgeführt.

Ähnlich wie bei der Validierung der Simulation wurden hier auch Randbedingungen für die Berechnungen definiert. In Tabelle 12 sind die festen Randbedingungen für den simulativen Vergleich der R290-Anlage mit der R134a-Anlage aufgelistet. Da in diesem Abschnitt nur der Kühlbetrieb betrachtet wird, wurden Umgebungstemperaturen im Bereich von 15 °C bis 45 °C festgelegt.

Tabelle 12: Randbedingungen der Simulationen für den Vergleich der Anlagen mit den Kältemitteln R290 und R134a

Größe	Einheit	45°C / 50%	40°C / 40%	35°C / 50%	28°C / 70%	25°C / 50%	20°C / 50%	15°C / 80%
Umgebungstemperatur T_{inf}	°C	45	40	35	28	25	20	15
Luftfeuchte ϕ_{inf}	%	50	40	50	70	50	50	80
Volumenstrom V_{dot_c}	m ³ /h	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
Volumenstrom $V_{dot_{SUP}}$	m ³ /h	3311	3311	3311	3311	3311	3311	3311

Die Berechnungen wurden nach Tabelle 12 bei sieben verschiedenen Umgebungsbedingungen und mit vier unterschiedlichen Laststufen durchgeführt. Die Laststufen sind in der nachfolgenden Tabelle 13 beschrieben. Bei allen Laststufen sind je Anlage beide Verdichter aktiv. Laststufen mit nur einem aktiven Verdichter werden weiter hinten beschrieben.

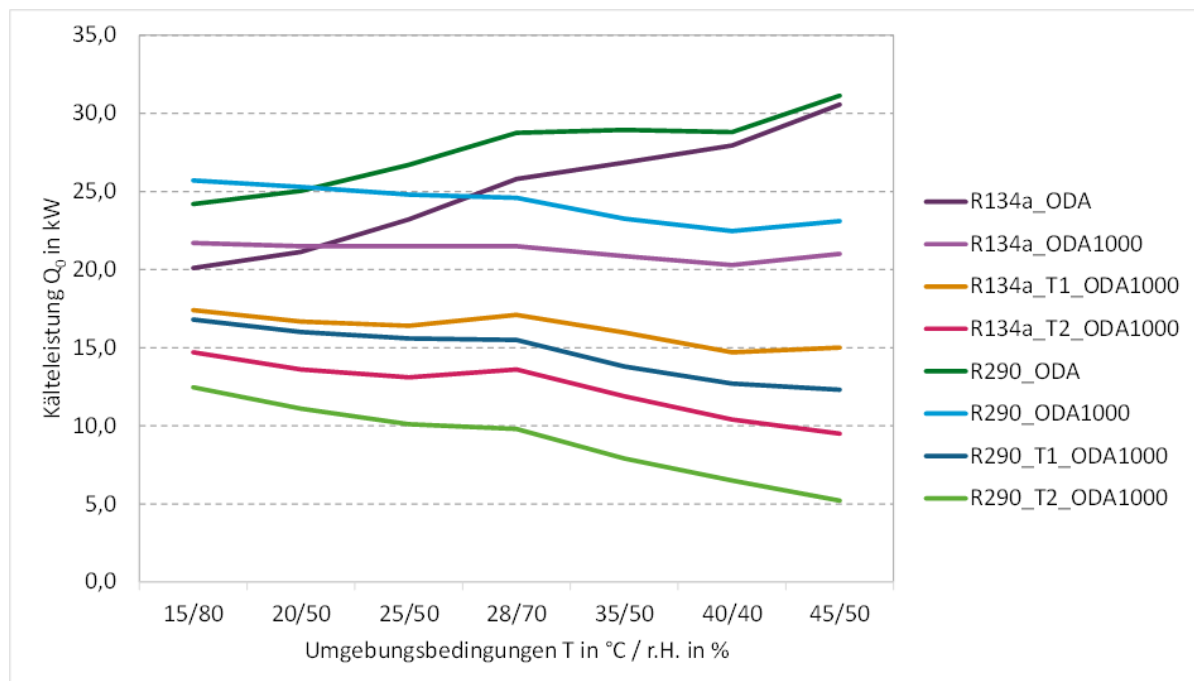
Den Simulationen ist jeweils mit eine Berechnungskonvention zugeordnet, die das ausgewählte Kältemittel und die Laststufe im Betrieb mit 100 % Frischluft oder Teilfrischluft beschreibt. Für die Frischluftmenge im Teilfrischluftbetrieb wurde ein Wert von 1000 m³/h als Volumenstrom festgesetzt. Die dabei gewählte Umlufttemperatur und -feuchte entspricht etwa den Komfortsollwerten im Wagenkasten. Auf die Simulation der Abhängigkeit der Komfortsollwerte von der Umgebungstemperatur (sog. Sollwertkurve) wurde aufgrund der Vergleichbarkeit bei beiden Anlagen verzichtet.

Tabelle 13: Ausgewählte Laststufen und zugehörige Abkürzungen in der Modellierung

Kältemittel	Berechnungsbezeichnung	Beschreibung der Simulation bzw. Laststufe
R290/R134a	_ODA	Volllast ohne Bypass mit 100% Frischluftbetrieb
R290/R134a	_ODA1000	Volllast ohne Bypass mit 1000 m ³ /h Volumenstrom Frischluft bei 21°C Umlufttemperatur und 50% Umluftfeuchte
R290/R134a	_T1_ODA1000	Teillast mit je einem Bypass geöffnet, mit 1000 m ³ /h Volumenstrom Frischluft bei 21°C Umlufttemperatur und 50% Umluftfeuchte
R290/R134a	_T2_ODA1000	Teillast mit je beiden Bypässen geöffnet, mit 1000 m ³ /h Volumenstrom Frischluft bei 21°C Umlufttemperatur und 50% Umluftfeuchte

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 40 und Abbildung 41) werden die Kälteleistung und die Kälteleistungszahl der Kältemittel R134a und R290 bei den zuvor definierten vier Laststufen (Tabelle 13) verglichen.

Abbildung 40: Simulativer Vergleich der Kälteleistung der Kältemittel R134a und R290 bei den vier ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13

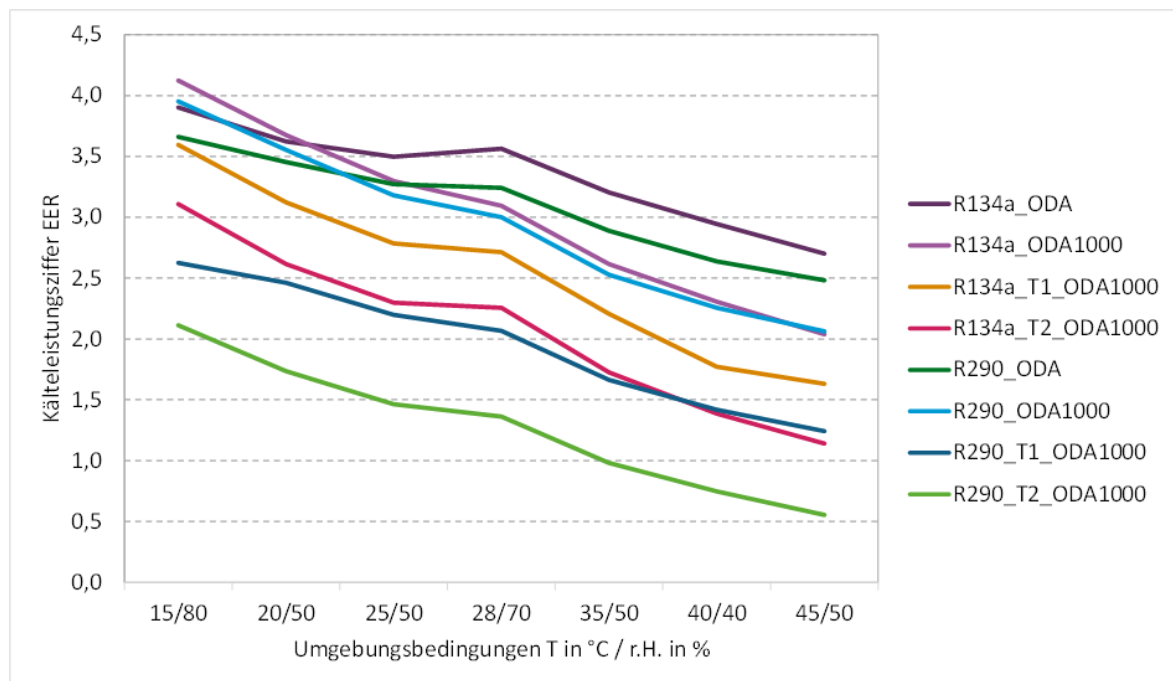


Quelle: eigene Darstellung, DB AG

In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass die Anlage mit R290 hinsichtlich der berechneten Kälteleistung leichte Vorteile unter Vollastbedingungen hat. Bei Laststufen mit geöffnetem Bypass zeigt die Anlage mit R134a ein höheres Leistungsvermögen. Dies ist allerdings nicht abhängig vom gewählten Kältemittel, sondern von der Auslegung des Bypasses. In dem für den Kühlbetrieb am relevantesten Temperaturbereich zwischen 25 °C und 35 °C zeigt R290 höhere Kälteleistungen von 2 bis 4 kW. Das bedeutet einen theoretischen Leistungsvorteil von R290 bis zu 20 % gegenüber R134a. Damit kann sich bei der R290-Anlage die zum Erreichen der Solltemperatur notwendige Verdichterlaufzeit oder die Laufzeit im Bypassbetrieb verringern.

Der Vergleich der Kälteleistungsziffern (EER) (Abbildung 41) zeigt für R134a leichte Vorteile, insbesondere im Teillastbetrieb mit geöffnetem Bypass. Im relevanten Bereich bei Umgebungstemperatur von 25°C bis 35°C und im Vollastbetrieb sind die Leistungsziffern von R290 und R134a ähnlich und weichen nur etwa bis zu 10 % voneinander ab. Im Teillastbetrieb sind die Unterschiede der Kälteleistungsziffern höher, wobei R134a bis zu 30 % höhere Werte liefert. Entsprechend dieser Differenzen werden sich die Verdichterleistungen bei R134a höher liegen. Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an elektrischer Leistung elektrische Verbrauch des R290-Systems etwas höher sein wird als der des R134a-Systems.

Abbildung 41: Vergleich der Kälteleistungsziffer EER der Kältemittel R134a und R290 bei den ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13



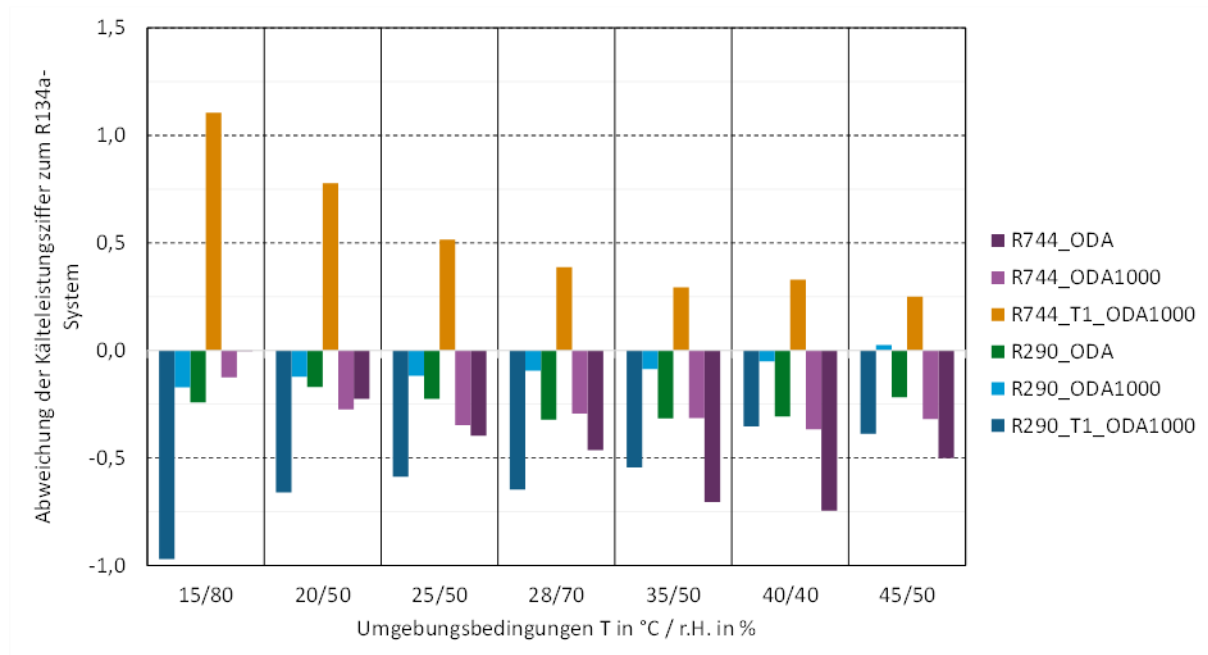
Quelle: eigene Darstellung, DB AG

6.2 Simulativer Vergleich des R290- und R744- mit dem R134a- System im Kühlbetrieb

Zum Vergleich mit der virtuellen R744-Anlage wurden dieselben Berechnungen nach den Randbedingungen in Tabelle 12 und Tabelle 13 durchgeführt. Zur besseren Veranschaulichung wurden die nachfolgenden Ergebnisse relativ zum R134a-System, da heißt als Abweichung vom R134a System dargestellt, das hier die Nulllinie bildet.

Abbildung 42 zeigt die Abweichungen der Kälteleistungsziffer (EER) relativ zum R134a-System.

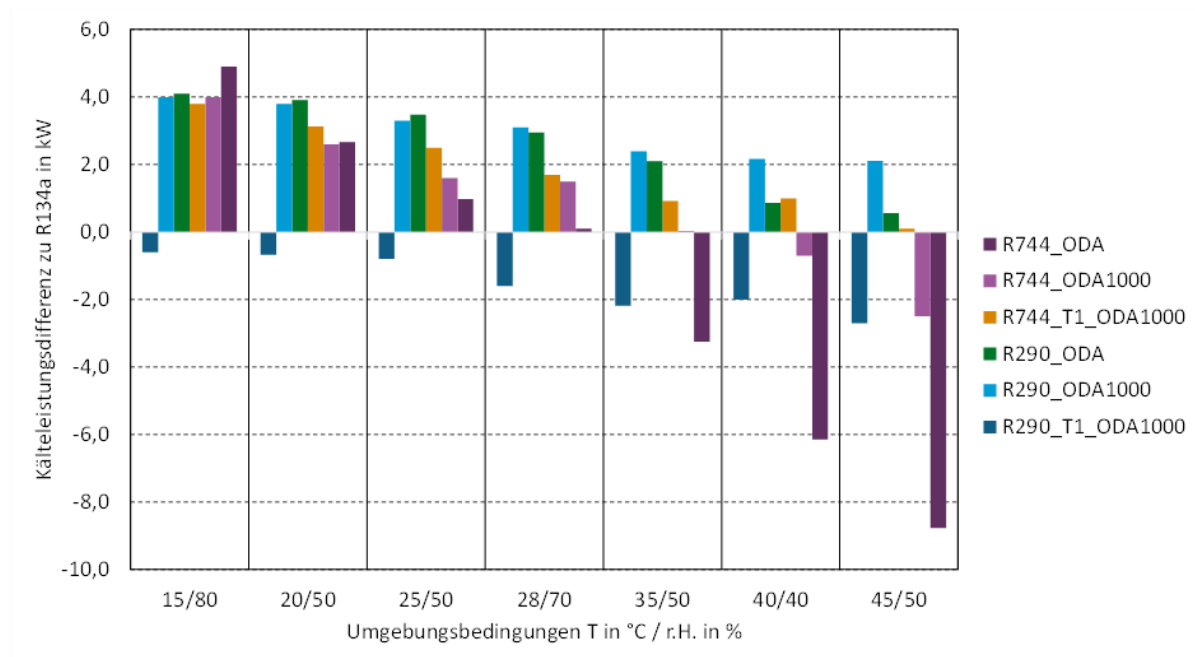
Abbildung 42: Abweichung der Kälteleistungsziffern (EER) relativ zum R134a-System der Kältemittel R744 und R290 bei ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Im Teillastbetrieb mit geöffneten Bypassventil (_T1_ODA1000) besitzt das simulierte R744-System Vorteile, insbesondere im niedrigen Teillastbereich < 20°C Umgebungstemperatur. Im Vollastbetrieb bei mittleren und hohen Temperaturen zeigt das R744-System die zu erwartenden Nachteile. Aufgrund der transkritischen Prozessführung und der darauf zurückzuführenden limitierten Wärmeabgabe am Gaskühler bei hohen Umgebungstemperaturen wird die Enthalpiedifferenz am Verdampfer eingeschränkt. Dieser Effekt führt im Vergleich zu den subkritischen Anlagen zu niedrigeren Leistungsziffern und weit niedrigeren Kälteleistungen. Abbildung 43 zeigt die Kälteleistungsdifferenz der R744-Anlage im Vergleich zu R134a und R290 bei hohen Umgebungsbedingungen deutlich. Über den nahezu gesamten Bereich besitzt das R290-System bzgl. der Kälteleistung Vorteile gegenüber R744 und R134a.

Abbildung 43: Abweichung der Kälteleistung relativ zum R134a-System der Kältemittel R744 und R290 bei ausgewählten Laststufen gemäß Tabelle 13

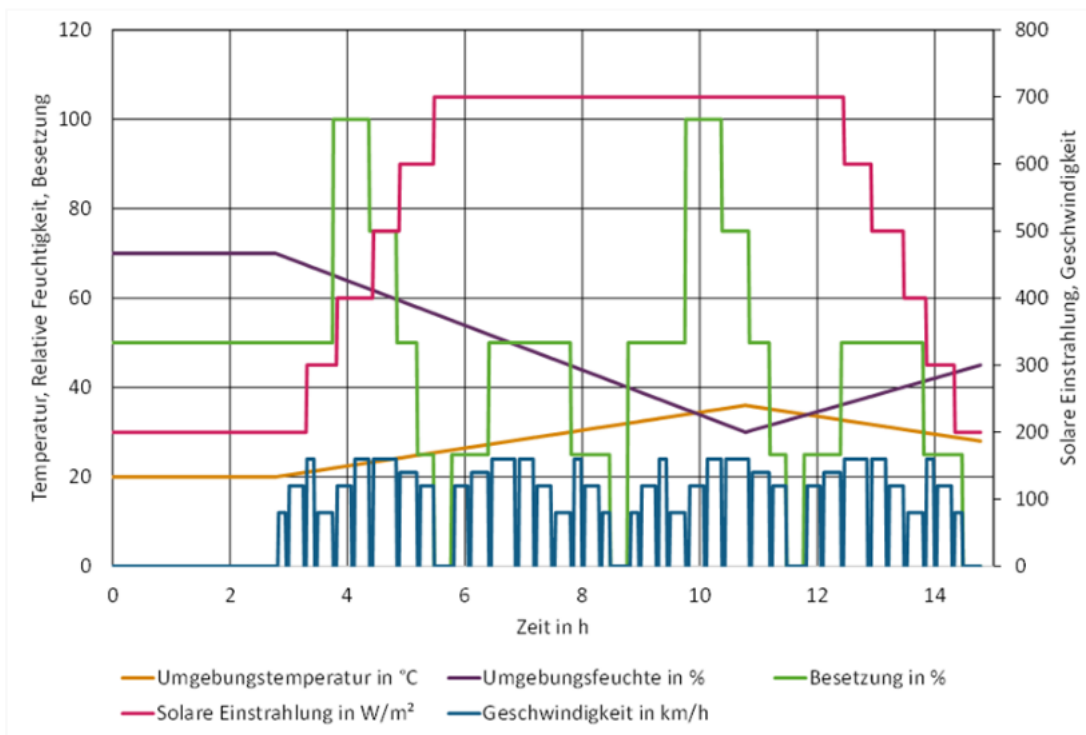


Quelle: eigene Darstellung, DB AG

6.3 Dynamische Berechnungen mit Fahrzeugmodell aller Anlagentypen im Kühlbetrieb

Die dynamischen Berechnungen wurden mit dem thermischen Fahrzeugmodell und dem beschriebenen Regelungskonzept in Abschnitt 5.3 durchgeführt. Dazu wurde ein Fahrzeuglastprofil in Anlehnung an die EN 13129 (CEN 2016) verwendet. Abbildung 44 zeigt das verwendete Lastprofil über eine simulierte Zeit von 15 Stunden. In das Profil wurde eine Einschwingphase von 2,75 Stunden implementiert, um je System gleiche Ausgangsbedingungen vor der dynamischen Phase zu gewährleisten. Variiert werden neben der Besetzung und der Fahrzeuggeschwindigkeit auch Umgebungsbedingungen, wie solare Einstrahlung, Temperatur und Umgebungsfeuchte. Das Profil soll dabei einen Sommertag mit Temperaturen bis 36°C bei Besetzungsgraden bis 100 % simulieren.

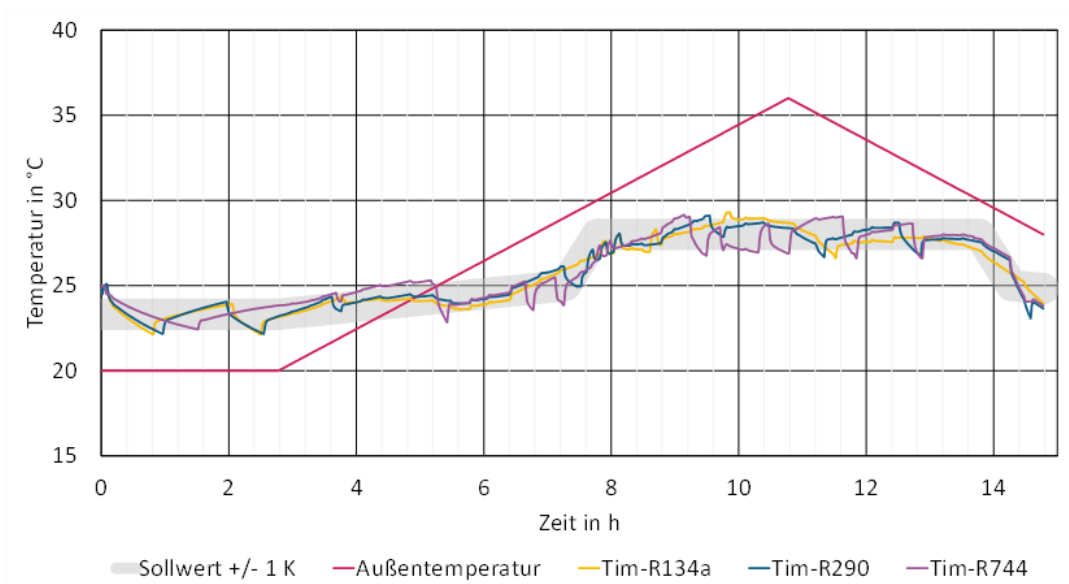
Abbildung 44: Lastprofil in Anlehnung an die Norm EN 13129 mit der Variation der Besetzung, solaren Einstrahlung, Fahrzeuggeschwindigkeit, Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Abbildung 45 zeigt die Verifikation des implementierten Regelalgorithmus zur Einhaltung der Raumsollwerttemperatur, die sich in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur ändert.

Abbildung 45: Temperaturverläufe der mittleren Raumtemperaturen (Tim) je Kältemittel mit Verlauf der Umgebungstemperatur



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

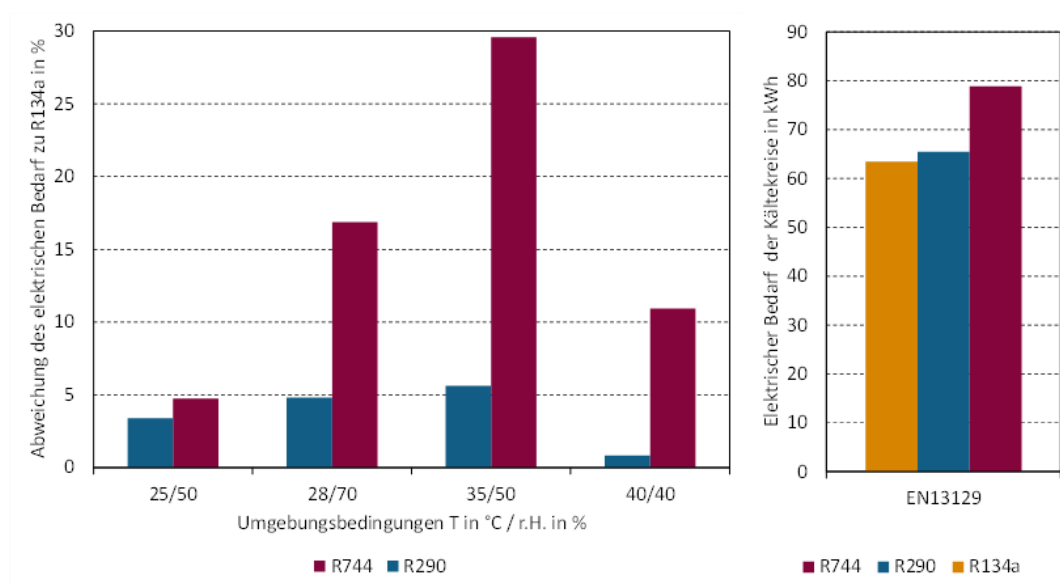
Alle simulierten Systeme halten die Sollwerttemperatur innerhalb einer Abweichung von +/- 1 K ein. Die Einhaltung der Sollwerttemperatur ist die Bedingung für die weiteren Berechnungen, da Abweichungen zu einer falschen Interpretation des Verhältnisses der untersuchten Kältemittel zueinander führen können. Zusätzlich zum standardisierten Profil wurden weitere Berechnungen mit konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt. Tabelle 14 beschreibt die zusätzlich simulierten Lastpunkte mit Variationen der Temperatur und der Luftfeuchte.

Tabelle 14: Weitere durchgeführte Lastpunkte für dynamischen Berechnungen

Lastpunkt	Temperatur	Rel. Feuchte	Geschwindigkeit	Besetzung	Einstrahlung
25/50	25 °C	50 %	Nach Abbildung 44	Nach Abbildung 44	300 W/m ²
28/70	28 °C	70 %	Nach Abbildung 44	Nach Abbildung 44	500 W/m ²
35/50	35 °C	50 %	Nach Abbildung 44	Nach Abbildung 44	700 W/m ²
40/40	40 °C	40 %	Nach Abbildung 44	Nach Abbildung 44	800 W/m ²

In Abbildung 46 ist der elektrische Bedarf der simulierten Anlagen bei konstanten Umgebungsbedingungen dargestellt. R134a stellt sich hier als die effizienteste Anlage in allen Lastprofilen heraus, auch im Lastprofil nach EN 13129 (CEN 2016). Grund dafür ist der effizientere Betrieb bei Leistungsreduktion, also im Bypassbetrieb. Die Vorteile gegenüber R290 betragen maximal bis zu 5 %. Bei einer Optimierung des Bypassbetriebs beim R290-Modell kann diese Lücke geschlossen bzw. auch übertroffen werden. Bei sehr hohen Temperaturen zeigt das R290-System nahezu gleichen elektrischen Bedarf wie die R134a-Anlage. Die Berechnungen des CO₂-Systems ergeben einen höheren im elektrischen Bedarf, was mit der niedrigeren Leistungsfähigkeit und damit längeren Laufzeit im Vollastbetrieb insbesondere bei höheren Temperaturen begründet werden kann.

Abbildung 46: Elektrischer Bedarf der Klimaanlage nach den dynamischen Berechnungen im Lastprofil nach EN 13129 und bei konstanten Umgebungsbedingungen.

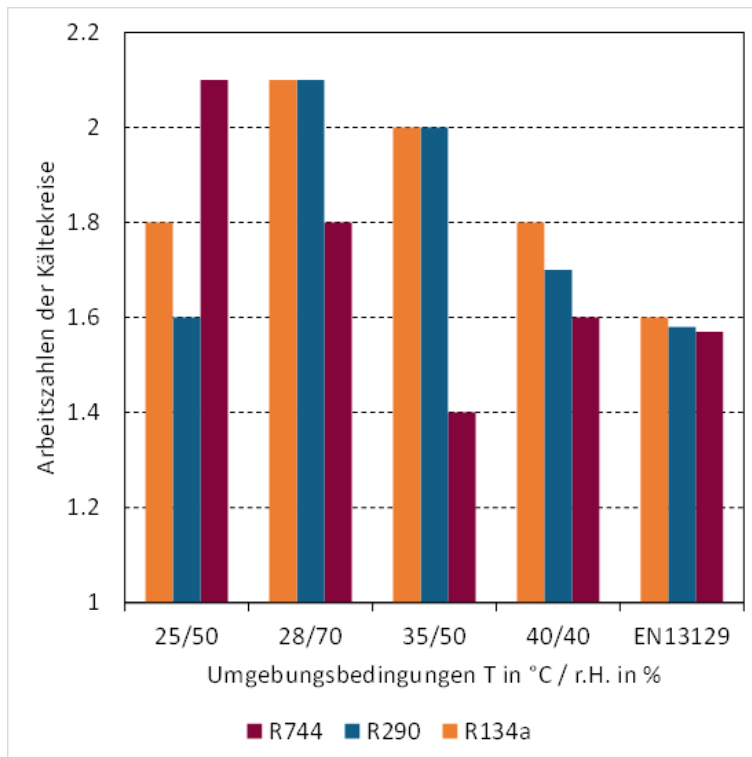


T - Umgebungstemperatur, r.H. in % - relative Luftfeuchte in Prozent, EN 13129- Lastprofil nach EN 13129 (CEN 2016)

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Das oben beschriebene Verhalten lässt sich auch anhand der Arbeitszahlen der simulierten Lastprofile erläutern. Da die Kälteleistungsziffern (EER) in einem dynamisch betriebenen System schwierig darzustellen und auszuwerten sind, kann stattdessen die Arbeitszahl als Effizienzkennziffer für diesen Vergleich dienen. Die Arbeitszahl generiert sich aus der zeitlichen Integration der Quotienten aus der aufgenommenen Wärme (in Wh) und dem elektrischen Aufwand (in Wh). Zum elektrischen Aufwand zählen alle elektrisch relevanten Komponenten (Verdichter, Zulüfter und Kondensatorlüfter).

Abbildung 47: Arbeitszahlen der berechneten Lastprofile bei konstanten Umgebungsbedingungen und nach EN 13129



T - Umgebungstemperatur, r.H. in % - relative Luftfeuchte in Prozent, EN 13129- Lastprofil nach EN 13129 (CEN 2016)

Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Die Arbeitszahlen in Abbildung 47 belegen die oben beschriebenen Nachteile des R744-Systems im Vergleich zu den Kältemitteln R290 und R134a, besonders im hohen Leistungsbereich und unter Vollastbedingungen. Mit abnehmender Umgebungstemperatur und damit sinkender thermischer Last zeigt CO₂ bessere Arbeitszahlen, was auf das bessere Teillastverhalten im Bypassbetrieb zurückzuführen ist. Die Abweichungen vom R290-System zum R134a-System sind sehr gering und die Systeme zeigen eine vergleichbare Effizienz.

6.4 Vergleich der Kältemittel R290 und R744 im Wärmepumpenbetrieb

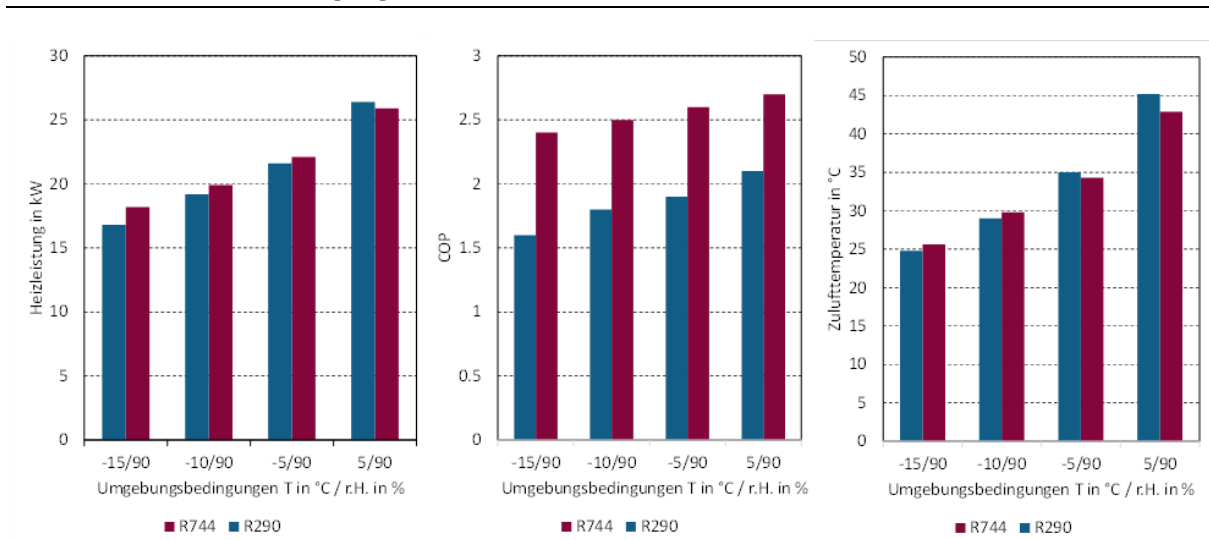
Wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben ist, erfolgte die Simulation des Wärmepumpenbetriebs mit identischen Eigenschaften der Hauptkomponenten Verdichter und Wärmeübertrager. Diese Modellierungs- bzw. Designvorgabe hat zur Folge, dass der Wärmepumpenmodus nicht monovalent simuliert bzw. betrieben werden kann.

Bei sehr niedrigen Umgebungsbedingungen (z. B. kleiner minus 10 °C) reicht die Heizleistung der Wärmepumpenfunktion nicht aus, um die Sollwerttemperatur erreichen zu können. Zusätzliche Beheizungsmaßnahmen wären notwendig, z. B. elektrische Heizregister. Bei höheren Temperaturen zwischen minus 5 °C und plus 5 °C produzieren die Systeme zu hohe Heizleistungen, so dass es einer Regelungsstrategie für den Teillastbetrieb bedarf.

Die Auslegung eines Regelungskonzeptes für den Wärmepumpenbetrieb ist sehr herausfordernd und komplex, da auch mögliche Vereisungs- und Abtauprozesse abgebildet werden müssten. Die Simulationen für den Wärmepumpenbetrieb sind daher bei stationären Umgebungsbedingungen von minus 15°C bis plus 5°C und unter der höchsten Leistungsstufe (beide Verdichter an und Bypässe geschlossen) durchgeführt worden. Zudem finden Vereisungsprozesse keine Berücksichtigung.

Ein Vergleich mit einer möglichen R134a-Wärmepumpe erfolgte ebenfalls nicht, da die thermodynamischen Eigenschaften von R134a bei niedrigen Umgebungstemperaturen äußerst ungünstig hinsichtlich Leistungsaufnahme und Effizienz sind.

Abbildung 48: Ergebnisse der Simulationen im Wärmepumpenmodus unter stationären Randbedingungen



Quelle: eigene Darstellung, DB AG

Abbildung 48 zeigt die Abhängigkeit der Kennzahlen Heizleistung, COP und Zulufttemperatur von der Umgebungstemperatur bei konstanter Luftfeuchte. Die R744-Wärmepumpe erreicht dabei die erwarteten wesentlich höheren COP-Werte (Coefficient of Performance, Leistungszahl) über den gesamten Temperaturbereich, wobei die Heizleistungen des R290-Systems bei höheren Umgebungsbedingungen vergleichbar sind. Die etwas höheren Leistungen bei sehr niedrigen Temperaturen zeigen die Vorteile von R744 als Wärmepumpenkältemittel.

Die absoluten Heizleistungen beider Systeme zeigen allerdings die Notwendigkeit einer zusätzlichen Beheizungseinrichtung auf, da die erforderliche Leistung von ca. 33 kW zur Beheizung des Wagenkastens nicht erreicht werden können.

Bei sehr hohen Druckverhältnissen im Kälteprozess und sehr niedrigen Umgebungstemperaturen ergeben sich weitere limitierende Faktoren bzw. Prozesswerte. Mit steigenden Druckverhältnissen können die Verdichtungsendtemperaturen an den Verdichtern so weit

ansteigen, dass die Gefahr der Ölverkokung besteht, was zum Ausfall der Anlage führen kann. Das bedeutet, dass die Verdichterleistung bei sehr niedrigen Temperaturen reduziert werden muss, um Ausfälle zu vermeiden.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Simulation

Die Ergebnisse der Simulationen belegen die Leistungsfähigkeit von R290 im Vergleich zu R134a. Das R290-System zeigt einen leichten Leistungsüberschuss bis zu 2 kW unter Vollastbedingungen, allerdings auch etwas niedrigere Kälteleistungsziffern (bis max. 0,25 Punkte der Leistungsziffer). Die Gesamtsimulationen mit dynamischem Lastprofil zeigen leichte Vorteile zugunsten von R134a. Das System mit R290 hat dabei einen bis zu 5 % höheren elektrischen Bedarf. R744 benötigt bei denselben Bedingungen bis zu 30 % mehr Energie bei gleicher Leistungsfähigkeit.

In Summe ergeben die simulierten Kreisläufe mit den Kältemitteln R134a und R290 nahezu vergleichbare Ergebnisse, R744 zeigt in den Simulationen bekannte Schwächen bei höheren Anforderungen für die Kühlleistung. Im Wärmepumpenbetrieb besitzt R744 allerdings Vorteile hinsichtlich der Effizienz, was auf die hohe Kältemitteldichte bei niedrigen Temperaturen zurückzuführen ist. Die Wärmepumpenfunktion und der Vergleich von R744 und R290 sind allerdings stark vereinfacht und ohne Regelungskonzept untersucht worden. Die Funktion Wärmepumpe in einer bivalenten Betriebsweise insbesondere das dazugehörige Regelungskonzept sollten in zukünftigen Projekten untersucht und optimiert werden.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Bewertung der Ergebnisse

Erfolgreiche Demonstration der Propan-Klimaanlage

Die Ergebnisse aus dem Feldversuch bestätigten die Erwartungen der Hersteller zur technischen Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit und zum Jahresenergieverbrauch der Propan-Klimaanlage in vollem Umfang. Es konnte demonstriert werden, dass Klimaanlagen mit Propan (R290) mindestens den Wirkungsgrad der heutigen HFKW-Anlagen erreichen und die erforderlichen Begrenzungen von Masse und Bauvolumen einhalten können.

Auswertung der Messergebnisse

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden mit mehreren Ansätzen gearbeitet, um verschiedene Aspekte hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, der Verfügbarkeit und Energieeffizienz beider Anlagen zu vergleichen. Auch Datenlücken konnten ausgeglichen werden, da nicht bei allen Auswertungsansätzen die zeitliche Dimension eine Rolle spielte.

Verbesserungspotentiale

Prinzipiell ist ein längerer Erfassungszeitraum für die Datenauswertung nützlich. Für die Messphase wurde ein Zeitraum von fast 16 Monaten über zwei Sommer (Mitte Juli 2020 bis Oktober 2021) ausgewählt, um auf jeden Fall Temperaturspitzen in den Sommermonaten abbilden zu können. Jedoch konnten aufgrund des eher milden Sommers 2021 keine Wetterextreme erfasst werden.

Innerhalb des Projektes und zur Beachtung in weiteren Projekten wurde festgestellt, dass eine vollständigere Datenerfassung der betrieblichen Parameter nötig ist und die Zuverlässigkeit der Datenübertragung gesichert werden muss. Ebenso sollten Ausfälle in Funktionsfähigkeit oder Verfügbarkeit der Testanlagen (wie bei der R134a-Anlage) zeitnah festgestellt werden können, um vollständige Messreihen beider Anlagen zu erhalten zu erhalten.

Modellierungen

Mit der Propan-Kälteanlage ist aufgrund der relativ niedrigen Drucklage und der hohen volumetrischen Kälteleistung insgesamt ein energetischer Vorteil gegenüber anderen Kältemitteln zu erwarten.

Bei der Modellierung als Luft/Luft-Wärmepumpe unter Berücksichtigung bahntypischer Randbedingungen für die Auslegung der Wärmeübertrager ergibt sich im Klimagerät eine untere Einsatzgrenze von ca. minus 15°C, wie sie auch beim Einsatz von CO₂ erreicht wird. Im Kühlbetrieb bei höheren Außentemperaturen treten mit R290 die von CO₂ bzw. Luft bekannten Effizienznachteile nicht auf. Es wird dieselbe Effizienz wie bei R134a erreicht.

Aufgrund der hohen volumetrischen Kälteleistung von R290 kann dabei die notwendige Kältemittelfüllmenge um ca. 50 bis 60 % gegenüber einem leistungsgleichen R134a-Klimagerät reduziert werden.

Vorteile von Propan

R290 weist sehr gute thermodynamische Eigenschaften für den Arbeitsbereich von Kaldampfkomppressionsanlagen in der Klimaanwendung auf. Es ermöglicht den Betrieb im bisher üblichen Druckbereich, so dass auf die bislang angewandte Technologie zurückgegriffen und auf die bisherigen betrieblichen Erfahrungen aufgebaut werden kann.

Die nachfolgenden Punkte fassen die Vorteile von R290 als Kältemittel für Bahnklimaanlagen zusammen:

- ▶ Grundlegend gleiche Technologie und Drucklage wie bei den bisher üblichen Kältemitteln R134a/R407C, (max. Drucklage kleiner 30 bar), Prozessführung wie bei R134a;
- ▶ Effizienz im Kühlbetrieb mindestens wie bei R134a;
- ▶ Einsatzgrenze für Propan im Wärmepumpenbetrieb ähnlich wie bei CO₂;
- ▶ Insgesamt wird damit für die Kombination von Klimaanlage und Wärmepumpe ein niedriger Jahresenergieverbrauch im Vergleich mit anderen Systemen erwartet;
- ▶ Gegenüber R134a und R407C unveränderte Masse und Abmessungen des Klimageräts;
- ▶ deutlich niedrigere LCC-Kosten im Vergleich zu CO₂ oder Luft erwartet;
- ▶ derzeit deutlich bessere Komponentenverfügbarkeit im Vergleich zu CO₂ oder Luft;
- ▶ Propan unterliegt gegenüber fluorierten Gasen keinen Regelungs- oder Verfügbarkeitseinschränkungen;
- ▶ keine Anpassung der Bordnetzauslegung am Fahrzeug erforderlich.

Herausforderungen brennbarer Kältemittel

Neben den Vorteilen von Propan (R290) gibt es Herausforderungen, mit denen es umzugehen gilt. Dies ist zum einen die leichte Entzündbarkeit von R290 in Luft, Propan ist brennbar in Luft im Bereich von 1,7 Vol% bis 10,8 Vol% (GisChem 2024). Zum anderen ist R290 schwerer als Luft, so dass es sich in tiefer liegenden Bodenbereichen ansammeln kann.

Für den dauerhaften Betrieb ist eine Kälteanlage bestimmungsgemäß als ein auf Dauer technisch dichtes System nach den Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS 722 (BAuA AGS 2022) bzw. als dauerhaft geschlossene Anlage nach der Norm für Kälteanlagen und Wärmepumpen EN 378-1 (2020) auszuführen.

Potenzielle Gefährdungen ergeben sich ausschließlich dann, wenn das Kältemittel durch Fehler im Betrieb oder bei der Wartung austritt. Nach den langjährigen Erfahrungen bei R134a- bzw. R407A-Bestandssystemen sind typische Leckagen des Kältemittels im Betrieb bauartbedingte schleichende Verluste in einer kleinen Größenordnung, Totalleckagen in kürzester Zeit sind nach Erfahrungen von Faiveley als Hersteller selten.

Bei den Wartungen wird auch die Kältemittelfüllmenge überprüft, um bauartbedingte Leckagen auszugleichen. Das Wartungspersonal muss daher für den Umgang mit dem brennbaren Kältemittel Propan ausreichend ausgebildet sein und ist regelmäßig zu schulen, um für den Umgang mit brennbaren Stoffen zu sensibilisieren.

7.2 Ausblick zum Einsatz von Propan (R290)-Anlagen

Durch die DB AG erfolgte nach Abschluss der Demonstrationsphase die Bewertung des erreichten Technical Readiness Levels (TRL) mit Einstufung in die Kategorie TRL 9 – Freigabe für Serieneinsatz. Mit R290-Anlagen steht damit eine weitere Lösung mit natürlichem Kältemittel zur Verfügung, die verfügbar und in allen üblichen Klimazonen einsetzbar ist.

Parallel zur Erprobung des Demonstrators im Rahmen des Vorhabens wurden vom Klimaanlageentwickler FTL (Wabtec) mit den wesentlichen europäischen Bahnbauern und Bahnbetreibern Workshops zu Bahnklimaanlagen mit R290 durchgeführt.

Im Ergebnis hat FTL (Wabtec) erste Serienaufträge erhalten und Geräte für eine Hochgeschwindigkeits- und eine Nahverkehrsplattform geliefert. Neuartige Bahnantriebe haben ebenfalls Heiz- und Kühlbedarf. Dafür wurden kombinierte Anlagen zur Wagenklimatisierung mit Wasser-Glykol-Kreislauf zur Temperierung der Batterie und der Brennstoffzelle entwickelt, die ebenfalls R290 als Kältemittel verwenden.

Insgesamt sind von FTL (Wabtec) fünf verschiedene Gerätetypen mit R290 als Kältemittel entwickelt worden – zwei verschiedene Fahrerstandklimageräte, zwei verschiedene Fahrgastraumklimageräte und ein Batteriekühler.

Neben FTL (Wabtec) bieten mittlerweile zwei weitere europäische Klimaanlagehersteller die R290-Technologie an, was auf eine steigende Akzeptanz von Propan (R290) als Kältemittel in der Bahnklimatisierung hinweist und eine weitere Marktdurchdringung erwarten lässt. Neben der DB AG und privaten Betreibern in Deutschland ist Propan (R290) mittlerweile in Norwegen, der Schweiz und Österreich in diversen Ausschreibungen als Option enthalten oder explizit gefordert.

FTL (Wabtec) geht für Propan (R290)-basierte Kühlsysteme von einer weiter stark steigenden Nachfrage bis 2050 aus. Damit wird der Einsatz halogenierter Kältemittel für die Bahnklimatisierung mittelfristig sinken. Damit würde der Schienenfahrzeugsektor einen wichtigen Beitrag zur breiteren Einführung umweltfreundlicher Systeme zum Thermomanagement bei mobilen Anwendungen leisten.

8 Quellenverzeichnis

- Aigner, R.; Krawanja, A.; Luger, C.; Wollweber, M.; Claus, P.; Hörth, L.; Streng, M. (2019): Umweltfreundliche Klimatisierung von Zügen: Felddatenmessung und -auswertung an luftgestützter Klimaanlage am ICE 3. Erprobung, Messung und Bewertung von Systemen mit natürlichen Kältemitteln zum nachhaltigen Kühlen und Heizen von öffentlichen Verkehrsmitteln - Ersatz fluorierter Treibhausgase. Abschlussbericht, UBA-Texte 119/2019, ISSN 1862-4804. www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltfreundliche-klimatisierung-von-zuegen (22.06.2023)
- ANSI/ASHRAE: Standard 34-2022, Designation and Safety Classification of Refrigerants, ed. 2022, www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards (22.07.2024)
- BAuA AGS - Ausschuss für Gefahrstoffe (2022) Technische Regel für Gefahrstoffe TRGS 722: Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische. Ausgabe: Februar 2021, GMBI 2021 S. 399-415 [Nr. 17-19] (vom 16.03.2021) Geändert: GMBI 2022 S. 196 [Nr. 8] (vom 14.03.2022)
- Behringer, D.; Heydel, F.; Gschrey, B.; Osterheld, S.; Schwarz, W.; Warncke, K.; Freeling, F.; Nödler, K.; Henne, S.; Reimann, S.; Blepp, M.; Jörß, W.; Liu, R.; Ludig, S.; Rüdenauer, I.; Gartiser S. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenerter Treib- und Kältemittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogenerter Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial. Abschlussbericht, UBA-Texte 36/2021, ISSN 1862-4804. www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogenerter-kaelte (22.06.2023)
- Bell, I.; Wronski, J.; Quoilin, S.; Lemort, V. (2014): Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. In: Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, Nr. 53-6, S. 2498-2508. <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie4033999>
- Birchby, D.; Dubey, J.; Johansen, B.; Hekman, J.; Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N. (2022): Support contract for an Evaluation and Impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases - Evaluation Final Report. climate.ec.europa.eu/system/files/2022-04/f-gas_evaluation_report_en.pdf (17.01.2024)
- Boeck, L.; Poser, S. (2021): R290 als natürliches Kältemittel für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen. In: ZEV-Rail, 2021, Nr. 4.
- Bundesregierung (2021): Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (30.07.2024)
- Bundesregierung (2020): Chemikalien-Klimaschutzverordnung vom 2. Juli 2008 (BGBl. I S. 1139), die zuletzt durch Artikel 299 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/chemklimaschutzv/BJNR113900008.html (23.01.2024)
- Bundesregierung (2024): Umweltstatistikgesetz vom 16. August 2005 (BGBl. I S. 2446), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 153) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/ustatg_2005/BJNR244610005.html (22.07.2024)
- Bundesumweltministerium (2019): BMU fördert umweltfreundliche Klimaanlage in Bonner Straßenbahnen mit CO₂ als Kältemittel. Pressemitteilung vom 19.12.2019. www.klimaschutz.de/de/service/meldungen/bmu-foerdert-umweltfreundliche-klimaanlagen-bonner-strassenbahnen-mit-co2-als (14.01.2024)
- Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER) (2019): Rail's priorities for the European Green Deal. Positionspapier, Brüssel, 12. November 2019. www.cer.be/images/newsroom/press-releases/191112_Rails_priorities_for_the_European_Green_Deal.pdf (18.12.2023)
- DIN (2020): DIN EN 378-1:2020-12: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien, DIN, 2020

DIN (2013): DIN EN 12900:2013-10: Kältemittel-Verdichter - Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten des Herstellers; Deutsche Fassung EN 12900:2013
DIN EN 13129:2016-12: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen; Deutsche Fassung EN 13129:2016

DIN (2006): DIN EN 14750-1:2006-08: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter; Deutsche Fassung EN 14750-1:2006

DIN (1969): DIN 45667:1969-10: Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen

CEN (2016): EN 13129:2016: Railway applications - Air conditioning for main line rolling stock - Comfort parameters and type tests, CEN, 24.08.2016

CEN (2006): EN 14750-1:2006: Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter, Deutsche Fassung.

EU-Kommission (2006): Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase, ABl. L 161 vom 14.6.2006, p. 1–11.
data.europa.eu/eli/reg/2006/842/oj

EU-Kommission (2006a): Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlage von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates, ABl. EU L 161/12-18, 14.06.2006. data.europa.eu/eli/dir/2006/40/oj

EU-Kommission (2013): Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der EU-Kommission vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 352/2009 [CSM-Verordnung] http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2013/402/oj

EU-Kommission (2014): VERORDNUNG (EU) Nr. 517/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 ABl. EU L 150/195-230, 20.05.2014. data.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj

EU-Kommission (2019): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Der europäische Grüne Deal. eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640 (02.07.2024)

EU-Kommission (2024): VERORDNUNG (EU) 2024/573 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 7. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014, OJ L, 2024/573, 20.2.2024, data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj

European Parliament (2022): Draft Report on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014. www.europarl.europa.eu/doceo/document/ENVI-PR-737211_EN.pdf (26.06.2024)

Eurostat (2020): Rail passenger transport statistics – quarterly and annual data. ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data (14.10.2021)

Freeling, F; Behringer D; Heydel F; Scheurer, M; Ternes, T. A; Nödler, K (2020): Trifluoroacetate in Precipitation: Deriving a Benchmark Data Set. Environmental Science & Technology 2020 54(18), 11210-11219 DOI: 10.1021/acs.est.0c02910

GisChem (2024): Gefahrstoffinformationssystem Chemikalien, Datenblatt Propan www.gischem.de/download/01_0-000074-98-6-000000_7_1_2347.PDF (22.07.2024)

Hörth, L.; Berlitz, T. (2021): Prozesssimulation von Schienenfahrzeug-Klimaanlagen mit CO2 als Kältemittel. In: ZEV-Rail, 2021, Nr. 06/07.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. www.ipcc.ch/report/ar4/wg1 (22.07.2024)

IPCC (2021): Smith, C., Z.R.J. Nicholls, K. Armour, W. Collins, P. Forster, M. Meinshausen, M.D. Palmer, and M. Watanabe, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. URL: www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07_Supplementary_Material.pdf (22.07.2024)

Liebherr (2020): Liebherr liefert Klimaanlage für die neue Reisezugwagen-Generation der ÖBB. Pressemitteilung Liebherr, 21.01.2020. www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/liebherr-liefert-klimaanlagen-f%C3%BCr-die-neue-reisezugwagen-generation-der-%C3%B6bb.html (26.06.2024)

Mallow, D.; Boeck, L. (2021): Brandschutz und natürliche Kältemittel R290 (Propan) in neuen Klimageräten. Vortrag auf der FACHTAGUNG Brandschutz für Schienenfahrzeuge, Veranstalter Breidenbach + Frost, Berlin, 17./18.06.2021.

Robinson, D.M.; Groll, E.A. (1998): Efficiencies of transcritical CO₂ cycles with and without an expansion turbine. In: International Journal of Refrigeration. 1998, Nr. 21, S. 577-589. DOI: 10.1016/S0140-7007(98)00024-3

Schwarz, W.; Rhiemeier, J.M. (2007): The analysis of the emissions of fluorinated greenhouse gases from refrigeration and air conditioning equipment used in the transport sector other than road transport and options for reducing these emissions – Maritime, Rail, and Aircraft Sector. climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/2_maritime_rail_aircraft_en.pdf (22.07.2024)

Scheurer, M; Nödler, K; Freeling, F; Janda, J; Happel, O; Riegel, M; Müller, U; Storck, F.R; Fleig, M; Lange, F.T; Brunsch, A; Brauch, H.J (2017): Small, mobile, persistent: Trifluoroacetate in the water cycle - Overlooked sources, pathways and consequences for drinking water supply. Water Research 126, 460-471 (2017). DOI: 10.1016/j.watres.2017.09.045

Scheurer, M; Nödler, K (2021): Ultrashort-chain perfluoroalkyl substance trifluoroacetate (TFA) in beer and tea – An unintended aqueous extraction. – in: Food Chemistry 351 (2021) 129304 DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129304

Schwarz, W.; Gschrey, B.; Leisewitz, A.; Herold, A.; Gores, S.; Papst, I.; Usinger, J.; Oppelt, D.; Croiset, I.; Pedersen, P.H.; Colbourne, D.; Kauffeld, M.; Kaar, K.; Lindborg, A. (2011): Preparatory study for the review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases. Final Report. September 2011. climate.ec.europa.eu/document/download/70d42bbd-3417-49ee-aa92-4e30c40b2c47_en?filename=2011_study_en.pdf (15.05.2024)

Statista (2021): Anzahl der Reisenden im Schienenpersonenverkehr der Deutsche Bahn AG in den Jahren 2005 bis 2020 (in Millionen). de.statista.com/statistik/daten/studie/13626/umfrage/reisende-im-schienenpersonenverkehr-der-db-ag/ (19.09.2021)

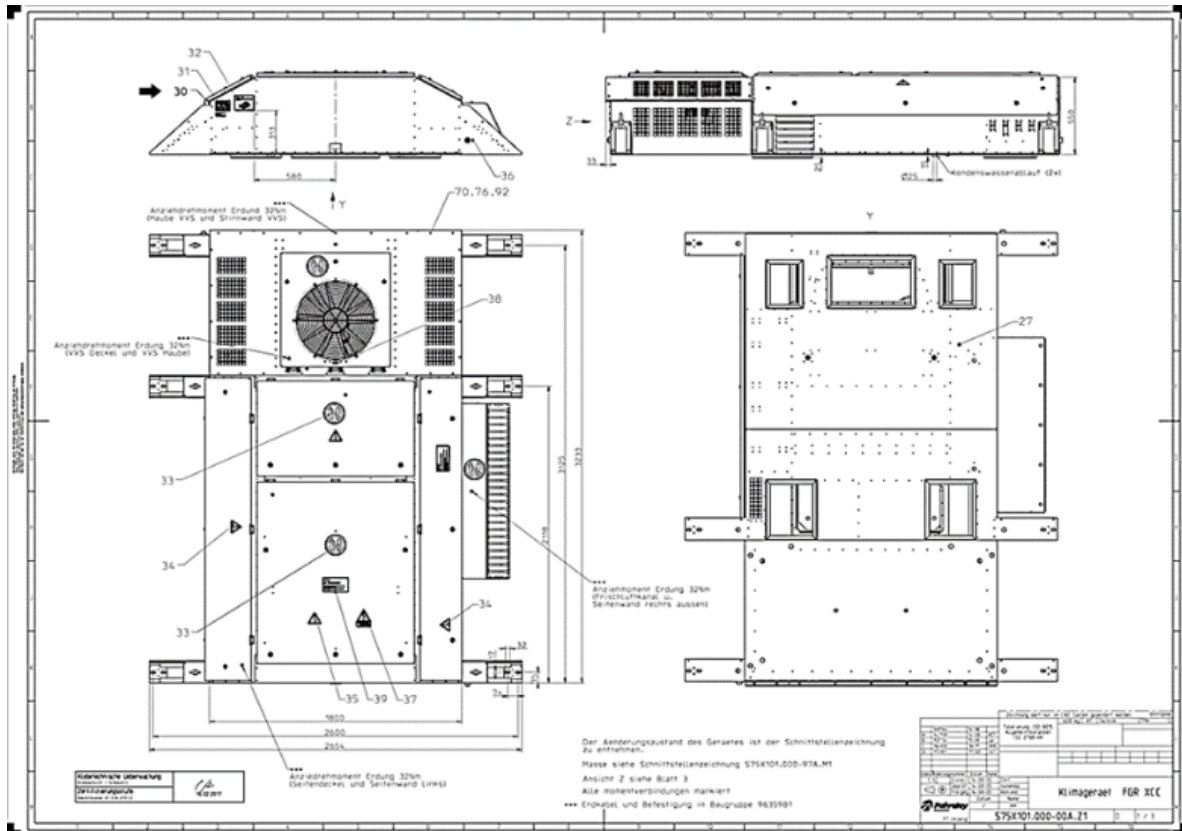
Wang, C.C.; Fu, W.L.; Chang, C.T. (1997): Heat Transfer and Friction Characteristics of Typical Wavy Fin-and-Tube Heat Exchangers. In: Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, S. 174-186. DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00056-8

ZSE – Zentrales System Emissionen (2022): Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes zu Treibhausgasen und klassischen Luftschadstoffen, Stand 23.01.2023.

A Anhang

A.1 Schnittstellenzeichnung R134a-/R290-Klimaanlage

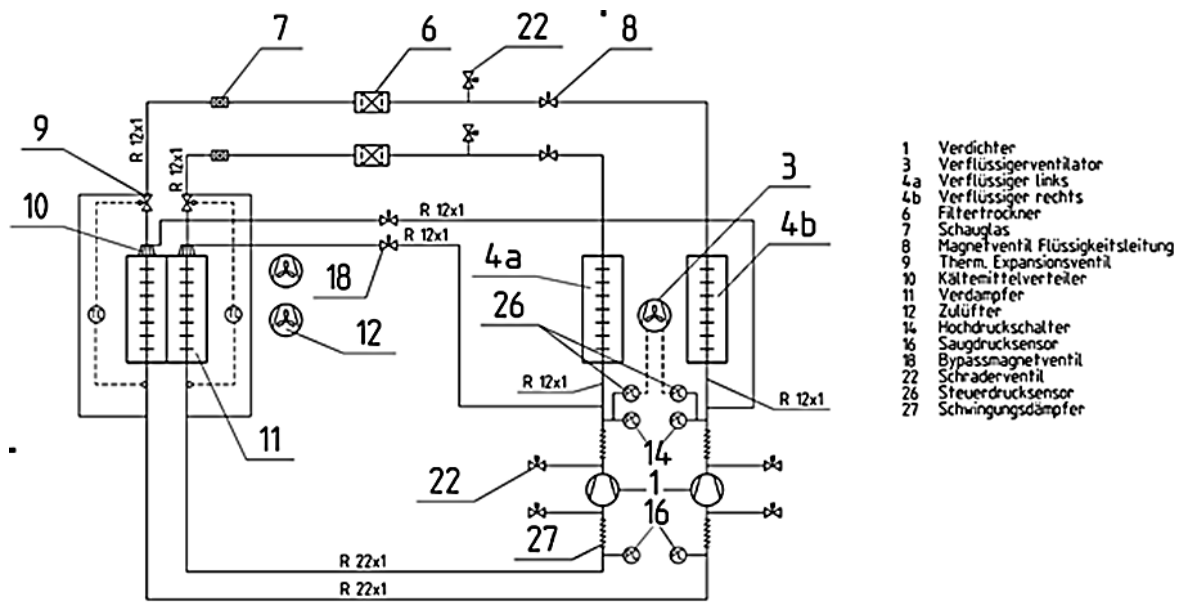
Abbildung 49: Detaillierung der mechanischen und luftseitigen Schnittstellen der beiden Vergleichsgeräte



Quelle: eigene Darstellung, FTL

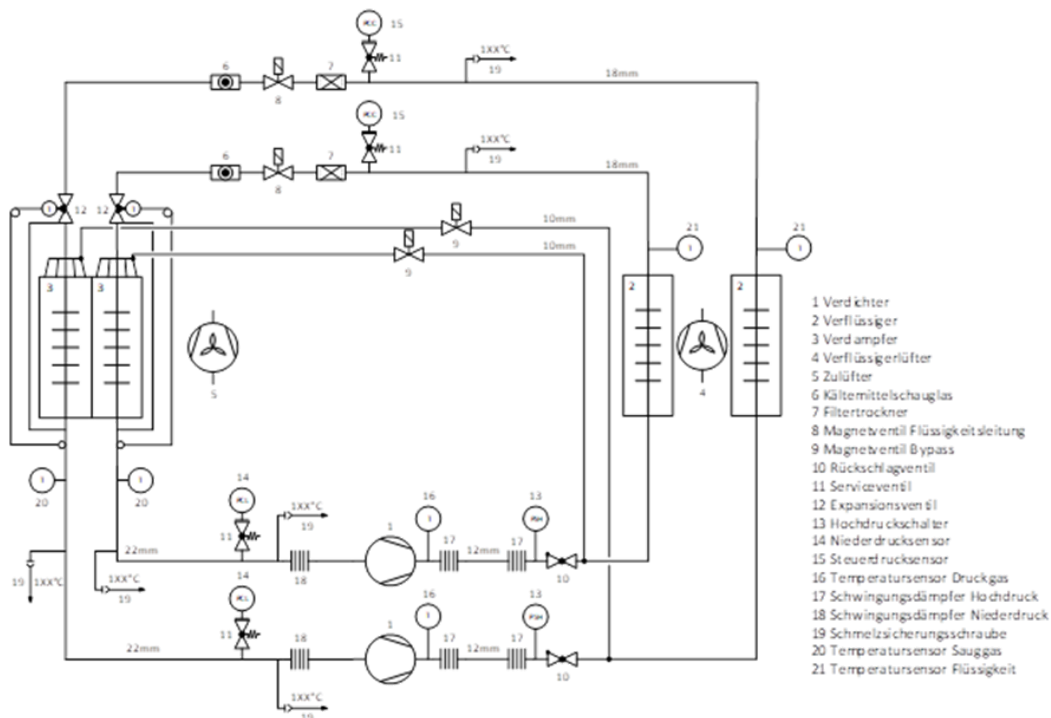
A.2 Kreislaufschemata

Abbildung 50: Prinzipdarstellung des Kältekreislaufes des R134a-Klimagerätes (Bestandsanlage)



Quelle: eigene Darstellung, FTL

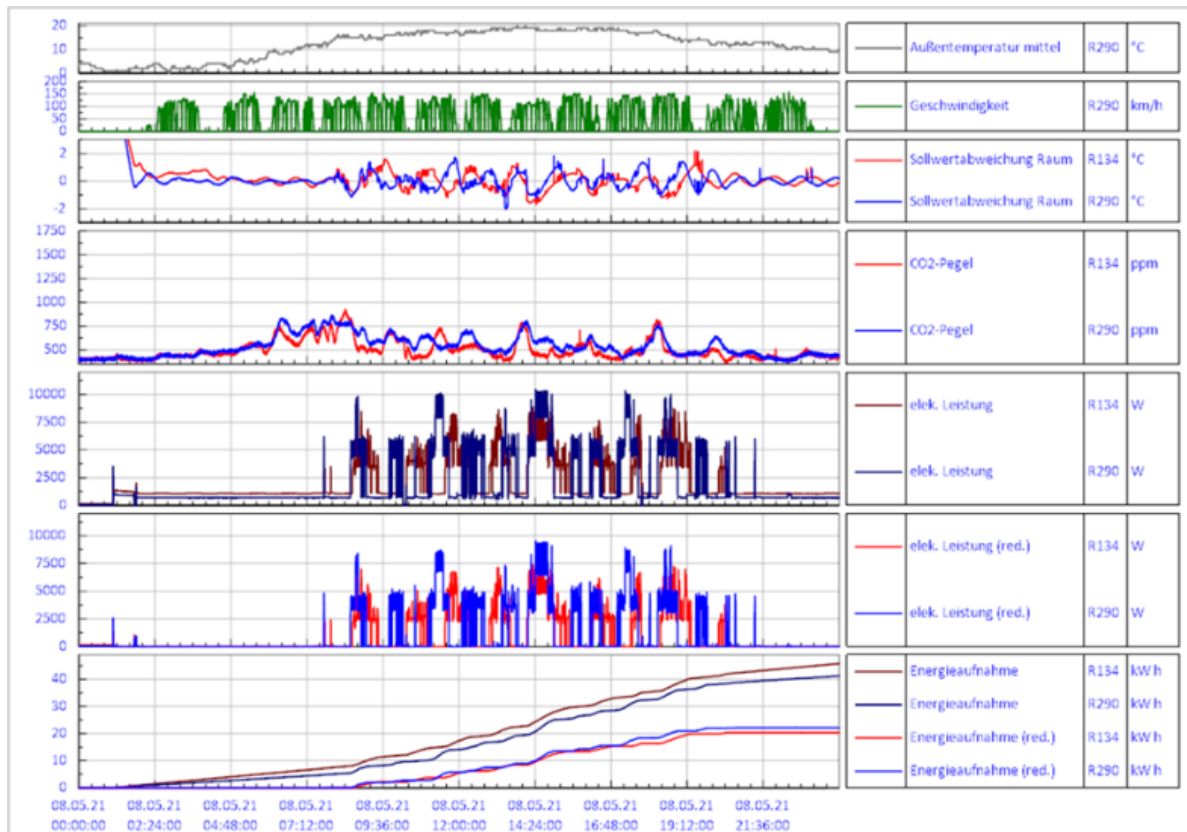
Abbildung 51: Prinzipdarstellung des Kältekreislaufes des R290-Klimagerätes (Versuchsträger)



Quelle: eigene Darstellung, FTL

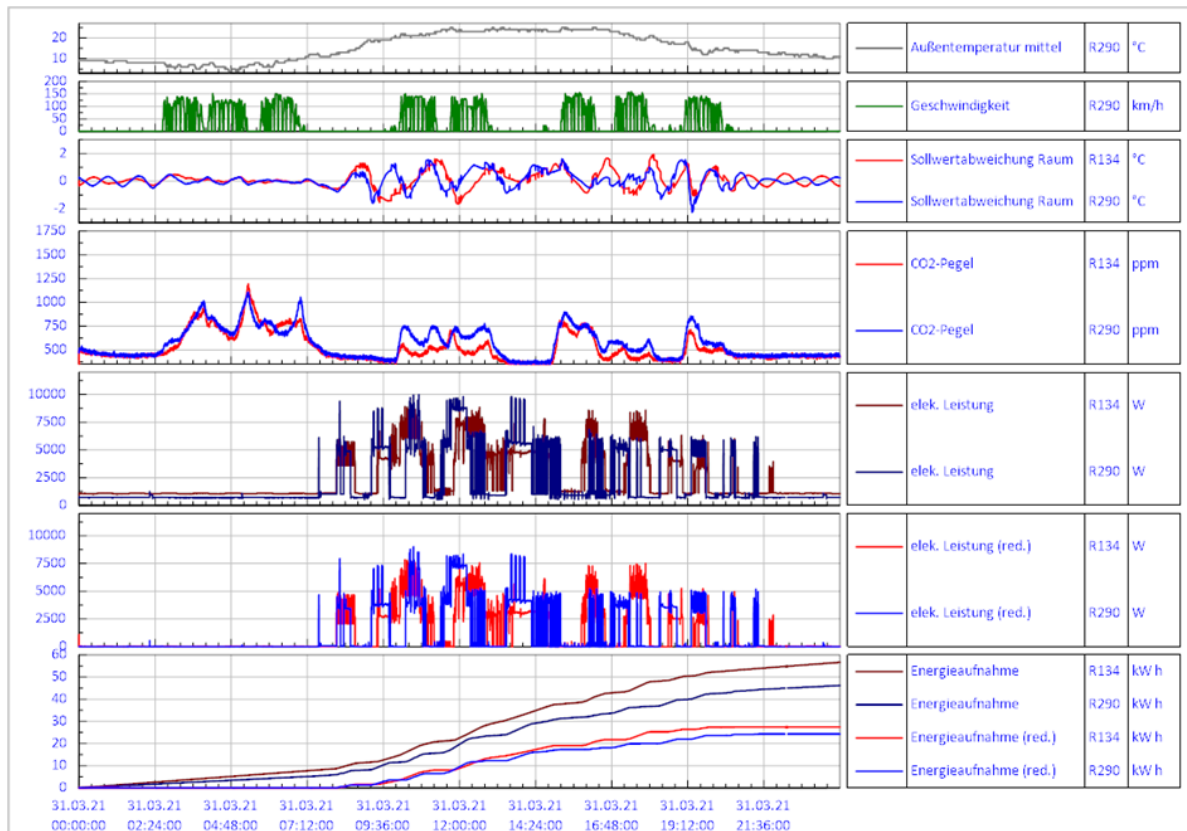
A.3 Elektrische Leistungsaufnahme an ausgewählten Tagen

Abbildung 52: 08.05.2021, mittlere Besetzung, mittlere Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums



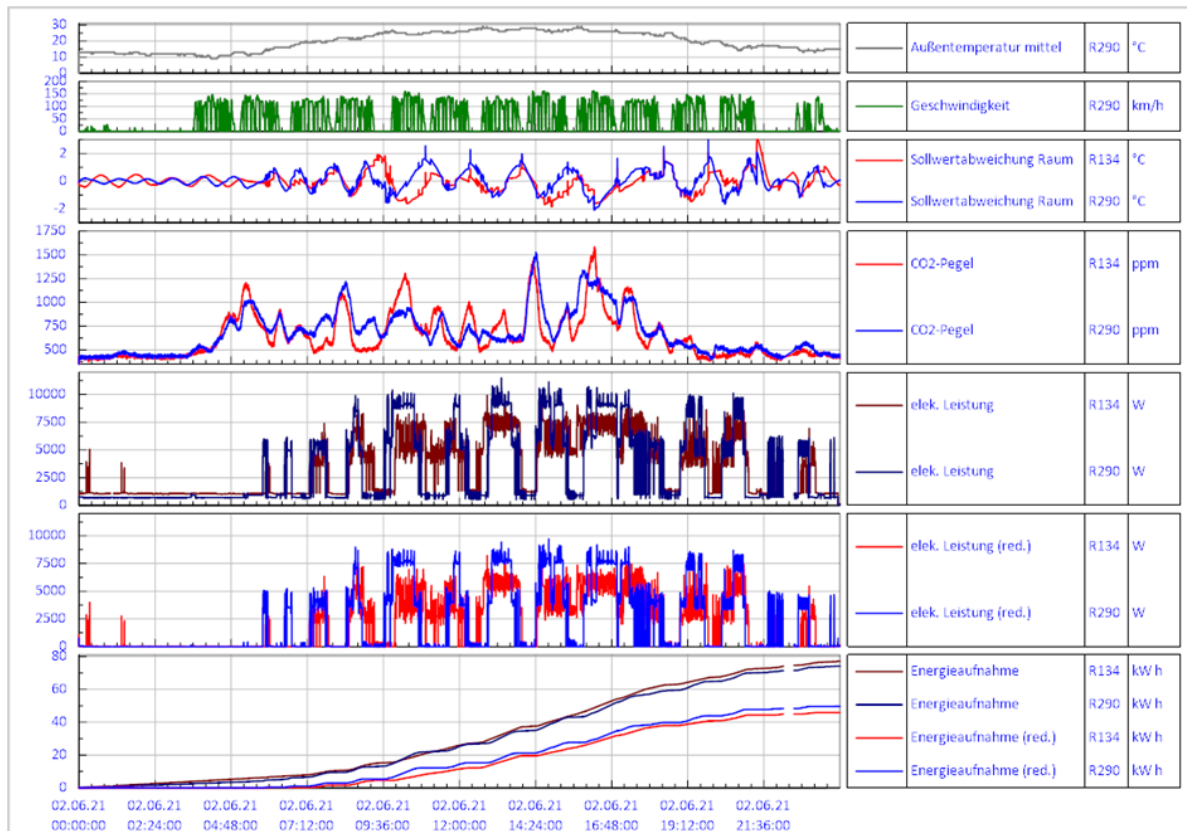
Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 53: 31.03.2021, mittlere bis hohe Besetzung, mittlere Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums



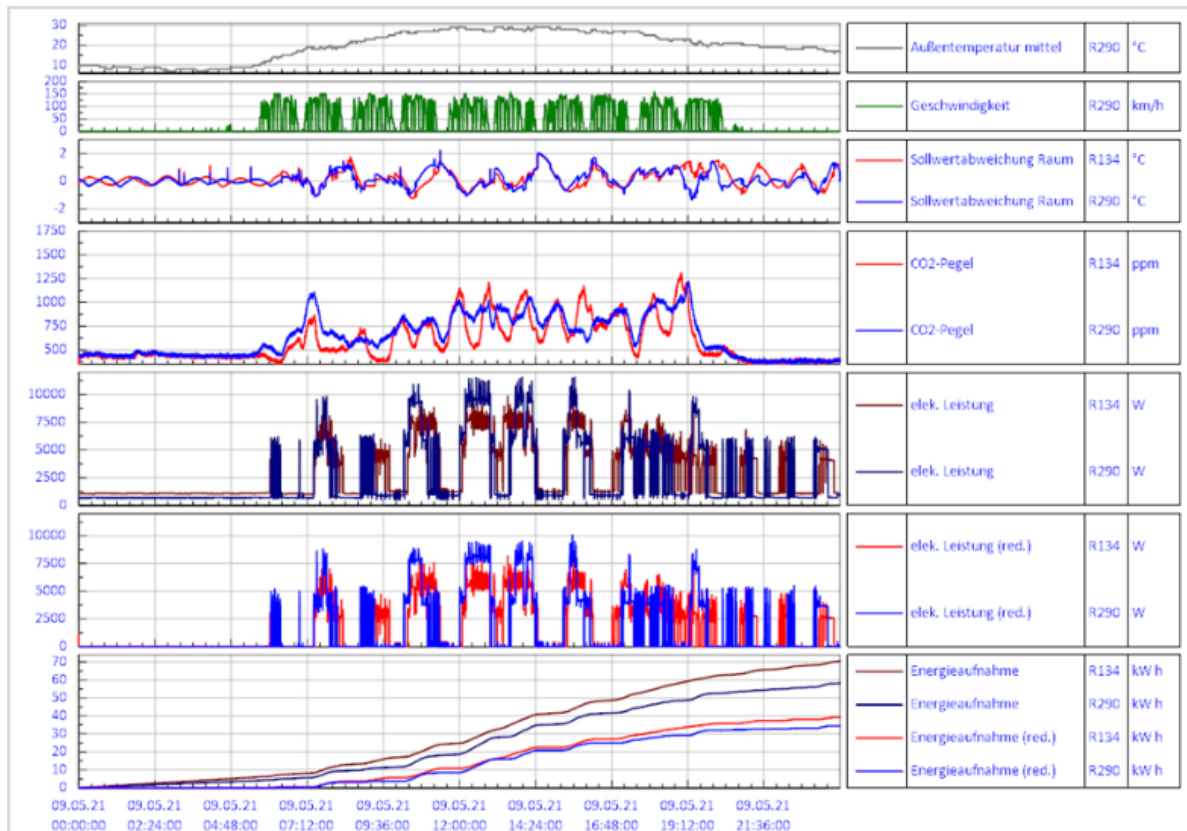
Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 54: 02.06.2021, hohe Besetzung, hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums



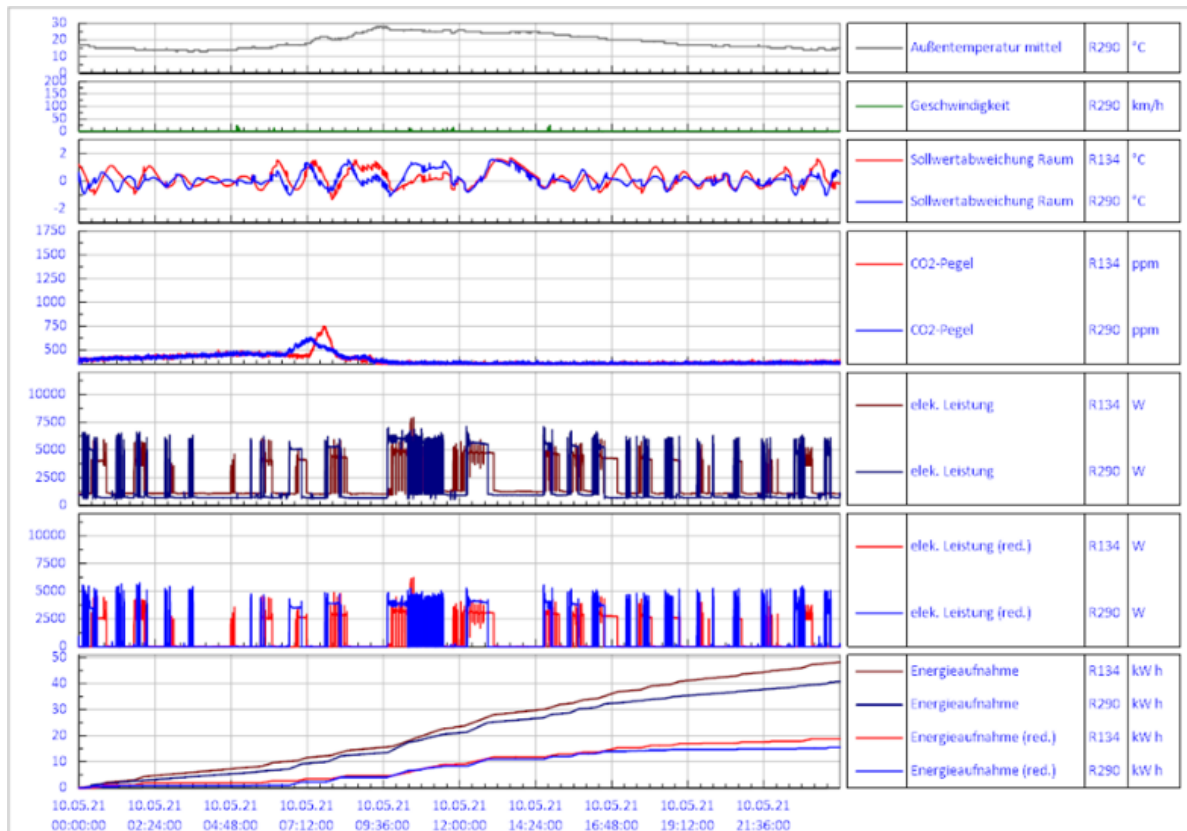
Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 55: 09.05.2021, mittlere Besetzung, hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums



Quelle: eigene Darstellung, FTL

Abbildung 56: 10.05.2021, kein Fahrbetrieb, ohne Besetzung, mittlere bis hohe Außentemperatur; Fokus auf Darstellung der gesamten elektrischen und auf den Beitrag der Verdichter reduzierten (red.) Leistungsaufnahme und der jeweiligen integrierten Gesamtenergie des betrachteten Zeitraums



Quelle: eigene Darstellung, FTL

A.4 Einsatzmöglichkeiten von R290-Klimaanlagen

Nachfolgende Tabelle 15 zeigt einen Überblick über Projekte, die von Faiveley (FTL) seit 2007 durchgeführt wurden und im Rahmen derer die Klimakompaktanlagen für den Fahrzeugtyp XCC auf Regionalfahrzeugen verbaut wurden. Die eingesetzten R134a-Anlagen könnten potenziell auf R290-Anlagen umgerüstet oder durch bauähnliche R290-Anlagen ersetzt werden.

Tabelle 15: Übersicht zu Klimakompaktgeräten für Fahrzeugtyp XCC / BR 440 / BR 1440

Projekte in Deutschland	Anzahl der Züge	Einzelwagen Kompaktklimageräte (R134a)	Lieferzeitraum
XCC Augsburg	37	148	2007-2008
XCC Würzburg	31	98	2008-2009
XCC Passau	12	54	2008-2009
XCC Regensburg	26	83	2009-2010
XCC Bremen	35	139	2009-2010
XCC S5/S8	28	84	2013-2014
XCC ENNO	20	80	2014-2014
XCC EMS Mittelsachsen	29	119	2014-2015
XCC ENNO	4	16	2016
XCC SHUM	30	107	2017-2018
XCC Breisgau	24	85	2018-2019
XCC RSN	51	210	2018-2020
XCC SHUM	5	20	2019
Summe	332	1243	

Quelle: eigene Darstellung, FTL