

KONVEKTA AG

REIS – Reduktion von klimarelevanten Emissionen im Schienenverkehr

vorläufiger
Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34556/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Michael Sonnekalb (Konvekta AG)

August 2023



Projektkennblatt einfügen

Inhalt

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis | 2 |
| Zusammenfassung | 3 |
| Einleitung..... | 4 |
| Hauptteil | 6 |
| Arbeitspaket 1: Konstruktion Mechanik | 6 |
| Arbeitspaket 2: Konstruktion Elektrik..... | 7 |
| Arbeitspaket 3: Erstellen technischer Dokumente | 7 |
| Arbeitspaket 4: Montage Prototyp | 7 |
| Arbeitspaket 5: Begleiten der technischen Prüfungen..... | 7 |
| Arbeitspaket 6: Schallmessung | 8 |
| Arbeitspaket 7: EMV-Messung | 10 |
| Arbeitspaket 8: Schwing- und Schockprüfung..... | 11 |
| Arbeitspaket 9: Klima-Test | 15 |
| Arbeitspaket 10: Einbau in Fahrzeug | 17 |
| Arbeitspaket 11: Software abstimmen | 18 |
| Arbeitspaket 12: Messequipment einrichten | 18 |
| Arbeitspaket 13: Feldtest / Simulation | 18 |
| Arbeitspaket 14: Auswertung | 21 |
| Fazit..... | 21 |
| Literatur | 22 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: HVAC 6709 und HVAC 3710..... | 6 |
| Abbildung 2: Komponenten HVAC6709..... | 6 |
| Abbildung 3: Schema Kommunikationsstruktur..... | 7 |
| Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau, Schallleistungs- und Schalldruckpegel..... | 8 |
| Abbildung 5: Ergebnisse Messung Schallleistungspegel..... | 9 |
| Abbildung 6: Prüfaufbau zu Funkstörfeldstärkemessungen im Halbabsorberraum (hier: Frequenzbereich 30 bis 1000 MHz)..... | 11 |
| Abbildung 7: Prüfaufbau zu Störfestigkeitsprüfungen gegen gestrahlte elektromagnetische HF-Felder (hier: Frequenzbereich 1 bis 6 GHz)..... | 11 |
| Abbildung 8: Prüfsignalamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz..... | 12 |
| Abbildung 9: Grenzfrequenzen in Abhängigkeit der Betriebsmittelmasse..... | 12 |
| Abbildung 10: ASD-Spektrum für Kategorie 1, Klasse A, am Fahrzeugkasten angebaut..... | 12 |
| Abbildung 11: Darstellung der Summenhäufigkeit..... | 13 |
| Abbildung 12: Signalverlauf der Stoßbelastung [8]..... | 13 |
| Abbildung 13: Amplituden der Stoßbelastung (Klassen A und B)..... | 13 |
| Abbildung 14: Funktionsschema des RPC-Verfahrens..... | 14 |
| Abbildung 15: Prüfstands Aufbau für die Prüfung in Querrichtung..... | 14 |
| Abbildung 16: Leistungsmessung HVAC 6406..... | 16 |
| Abbildung 17: Leistungsmessung HVAC 6709..... | 16 |
| Abbildung 18: Straßenbahn mit 2x HVAC 3710 und 2x HVAC 6709..... | 17 |
| Abbildung 19: Straßenbahn im Klima-Wind-Kanal [7]..... | 17 |
| Abbildung 20: Straßenbahn am Tieflader [7]..... | 17 |
| Abbildung 21: Umgebungstemperatur Süddeutschland 2023..... | 19 |
| Abbildung 22: Energieverbrauch Straßenbahn R-134a..... | 19 |
| Abbildung 23: Energieverbrauch Straßenbahn R-744..... | 20 |
| Abbildung 24: Temperaturhäufigkeiten..... | 20 |
| Abbildung 25: Schema Reihenschaltung Gaskühler..... | 21 |

Zusammenfassung

Im Rahmen des Förderprojektes konnten Klimaanlage mit dem Kältemittel R-744 zur Klimatisierung und Beheizung von Schienenfahrzeugen für den Fahrgastraum und den Fahrerarbeitsplatz entwickelt und getestet werden. Nach der Konstruktion und Prototypenfertigung wurden die Anlagen umfangreichen Testabläufen (Leistungsmessung, EMV-, Schall-, Schwing- und Schockprüfung) unterzogen, die letztlich bestanden wurden. Besonders hervorzuheben ist der beim ersten Durchgang bestandene Test im Klima-Wind-Kanal bei Rail Tec Arsenal Wien mit einem Erfüllungsgrad > 91 % bei dem die Betriebsfähigkeit der HVAC 6709 bei Umgebungstemperaturen von -25 °C bis 45 °C bestätigt wurde.

Aufgrund zeitlicher Verzögerung und einzuhaltender Terminketten der Fahrzeughersteller zur Auslieferung der Fahrzeuge konnte ein Messtechnikeinbau und eine folgende Felddatenerfassung im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden. Stattdessen wurden unter anderem basierend auf den Leistungsmessdaten Simulationsrechnungen durchgeführt. Im betrachteten Referenzfall wurden durch den Einsatz von R-744-Klimaanlagen mit Wärmepumpenfunktion im Vergleich zu konventionellen R-134a-Anlagen mit Elektroheizung Einsparungen im elektrischen Energieverbrauch und somit Betriebskosteneinsparungen (hinsichtlich Heizung und Klimatisierung) in Höhe von 26 % erzielt.

Die Ergebnisse des Projektes und insbesondere die identifizierten Optimierungsmaßnahmen können im weiteren Verlauf in die Serienentwicklung einfließen.

Das Projekt **REIS – Reduktion von klimarelevanten Emissionen im Schienenverkehr (Az: 34556/01)** wurde durch die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ermöglicht.

Einleitung

Ausgangssituation: Etwa 25 % der Treibhausgase werden durch Verkehr und Transporte verursacht. Dieser Anteil nimmt stetig zu, und trotz technischer Verbesserungen sinkt der CO₂-Ausstoß von Neufahrzeugen nur sehr langsam. Die bisherigen Effizienzsteigerungen können das immer noch stark steigende Verkehrsvolumen nicht wettmachen. Dies hemmt die Umsetzung der energie- und umweltpolitischen Zielstellungen. Dabei stehen schienengebundene Fahrzeuge schon seit langer Zeit im Fokus der umweltpolitischen Regulierung und ihre Energieeffizienz wird zu einem immer wichtigeren Erfolgskriterium im Wettbewerb der Verkehrsträger. Hersteller setzen zunehmend auf Elektro- und Hybridantriebe, um den Umweltaforderungen gerecht zu werden. Jedoch werden die Einsparerfolge begrenzt durch weitere technologische Trends: Bei schienengebundenen Fahrzeugen werden bei Neuanschaffungen nahezu alle mit einem Klimagerät ausgestattet. Gleichzeitig werden in den modernen Fahrzeugen teilweise mehrere Zusatzheizungen benötigt, die bei niedrigen Temperaturen die Innenraumluft erwärmen, da durch den Motor selbst bzw. andere Wärmequellen zu geringe Wärme abgegeben wird. Aus diesen beiden Faktoren (Klimatisierung und Zuheizung) ergeben sich zwei große Probleme: Emissionen an klimaschädlichem Kältemittel sowie ein erheblicher Energie-(mehr-)verbrauch.

Stand der Technik: Ein Fahrzeug-Klimagerät ist ein System, das im Fahrzeuginnenraum Temperatur und Feuchtigkeit auf einem bestimmten Niveau stabilisiert. Der Vorteil ist dabei ein erheblicher Komfort- und Sicherheitsgewinn. Ein Nachteil ist das Entweichen von klimaschädlichem Kältemittel durch Undichtigkeiten an Anschlüssen sowie bei Befüllung, Wartung und Reparatur, bei Unfällen und bei der Entsorgung. Des Weiteren werden bei niedrigen Temperaturen Zusatzheizungen mit niedriger Energieeffizienz betrieben, deren Betrieb zum Gesamtenergieverbrauch hinzuzurechnen ist. Darüber hinaus werden sowohl die Klimatisierungs- als auch die Heizleistung häufig als unzureichend empfunden, da das fahrzeugseitige Thermomanagement nicht auf die Passagiere abgestimmt werden kann.

Die Konvekta AG beschäftigt sich schon seit längerem mit dem Thema Energie- und Emissionseinsparung durch Verwendung des klimaneutralen Kältemittels R-744 (CO₂) in Kombination mit einer Wärmepumpenfunktion. Im Jahr 2010 startete im Geschäftsbereich Schienenklimatisierung der Konvekta AG das erste Projekt mit dem Kältemittel R-744 in Kombination einer Wärmepumpe in einem Schienenfahrzeug [1]. Die gewonnenen Erfahrungen führten zu Konzeptverbesserungen und somit entstand das aktuelle Projekt „Reduktion von Emissionen im Schienenverkehr“ durch den Einsatz von klimaneutralem Kältemittel R-744 in Kombination mit einer Wärmepumpe.

Es gab zwar Entwicklungen von Bahnklimageräten mit R-744 (z.B. DE202006014246) [2]. Zu Projektbeginn gab es aber keine serienreifen Klimageräte für den Bahnsektor mit dem Kältemittel R-744. Dies gilt ebenfalls für Klimageräte mit dem Kältemittel R-744 in Kombination mit einer Wärmepumpe. Im Rahmen einer vorwettbewerblichen Zusammenarbeit wurde von Mitgliedsfirmen des VDB und TÜV ein Leitfaden für den Einsatz von R-744 in Schienenfahrzeugen erarbeitet [3]. Die Konvekta AG hat einen Feldtest betrieben, der unter Realbedingungen (Straßenbahn in Freiburg) durchgeführt worden ist, um das aktuelle Fahrerplatzklimagerät mit dem Kältemittel R-744 - ohne Wärmepumpe - zu validieren.

Durch den Einsatz von klimaneutralem R-744 lassen sich Emissionen durch Diffusion, Unfällen, Wartungsarbeiten und Recycling mit aktuellen Kältemitteln wie z. B. R-134a verringern. Ebenso lassen sich indirekte Emissionen durch den energieeffizienten Betrieb einer Wärmepumpe mit dem Kältemittel R744, einsparen.

Vom Typ HVAC6406 wurden insgesamt ca. 1000 Klimageräte verkauft. Dieses Klimagerät enthält 7,5 kg des Kältemittels R-134a. Da es ein GWP von 1430 hat und somit von der F-Gas-Verordnung (517/2014 EU) betroffen ist, wird eine Ablösung dieses Kältemittels immer dringender. Schon heute sind deutliche Preissteigerungen durch Verknappung spürbar.

Die durchschnittlichen Leckagen im Bahnsektor liegen bei ca. 5% [4]. Dies betrifft sowohl das Kältemittel R-134a als auch R-744 (CO₂), entscheidend ist hier der Unterschied des GWP Wertes der beiden Kältemittel. Ein Ersatz bietet die von Konvekta im Busbereich erprobte CO₂-Technik an. Die im PKW hauptsächlich eingesetzte

Alternative R1234yf wird wegen seiner Brennbarkeit im Bahnbereich nicht akzeptiert. R-744 (CO₂) hat ein GWP von 1, R-1234yf ein GWP von 4 und R-134a ein GWP von 1430. Die fluorierten Kältemittel R-134a und R-1234yf zerfallen in der Atmosphäre schließlich zu Trifluoressigsäure (TFA), was zu einer Versauerung von Binnengewässern führt. Dies ist in sensiblen Bereichen und in der kompletten Biosphäre nicht mehr akzeptierbar [5].

Im Bus wurde bereits erfolgreich der Einsatz von R744 (CO₂) als Kältemittel für ein reversibles Klimagerät mit Wärmepumpenfunktion getestet (STW Klagenfurt). Diese neueste Generation von Buswärmepumpen für Elektrobusse konnte innerhalb des Projektes (Hessenagentur HA 371/13-10) [6] entwickelt werden. Das verbesserte System vermeidet im Gegensatz zu dem in DBU AZ 23864/7 geförderten Wärmepumpensystem aufwendige Umschaltventile und dadurch bedingte Verdichterstops. Das System wurde bereits bis Außentemperaturen von -15°C getestet und kann den Zusatzheizter (Diesel oder Elektro) ersetzen oder zumindest seine Einsatzzeit deutlich reduzieren.

Hierzu ein Auszug aus der EN14750-1 (Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs). Hier ist Deutschland in die Klimazone 2 eingegliedert. Dies bedeutet, dass Heizelemente auf -20°C Außentemperatur ausgelegt werden müssen.

Hauptteil

Nachfolgend werden die Inhalte der Arbeitspakete des Projektes beschrieben.

Arbeitspaket 1: Konstruktion Mechanik

Im Arbeitspaket mechanische Konstruktion wurden die Anlagen für den Fahrgastraum und den Fahrer Arbeitsplatz konstruiert. Die Außenansichten der HVAC 6709 (links) und HVAC 3710 (rechts) sind im folgenden Bild dargestellt.



Abbildung 1: HVAC 6709 und HVAC 3710

Die Herausforderungen in der mechanischen Konstruktion sind üblicherweise die Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, Schnittstellen, Leistungs- und Effizianz Anforderungen, Brandschutz, Geräusch, etc. Des Weiteren müssen die Komponenten in der Anlage gut zugänglich für die Montage und Wartung platziert sein. Die Wärmepumpenfunktion erfordert im Vergleich zur herkömmlichen reinen Klimatisierung einen höheren Aufwand bei der Verrohrung und Ventiltechnik, wie am Beispiel der HVAC 6709 im folgenden Bild zu sehen ist.

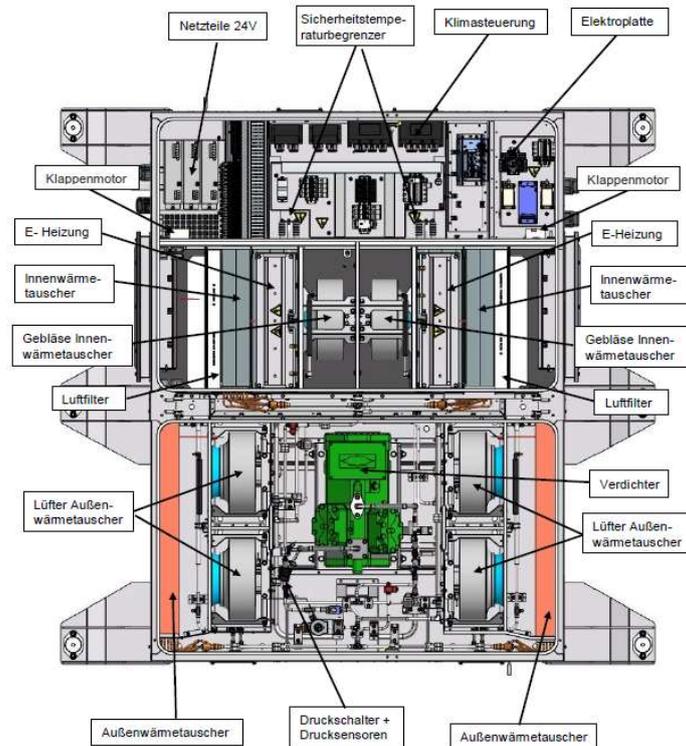


Abbildung 2: Komponenten HVAC6709

Arbeitspaket 2: Konstruktion Elektrik

Im Rahmen der elektrischen Konstruktion bestand der Schwerpunkt der Arbeit in der Entwicklung der Steuer- und Regelungstechnik sowie der Erstellung der Kommunikationsstruktur. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten ist im folgenden Bild schematisch dargestellt.

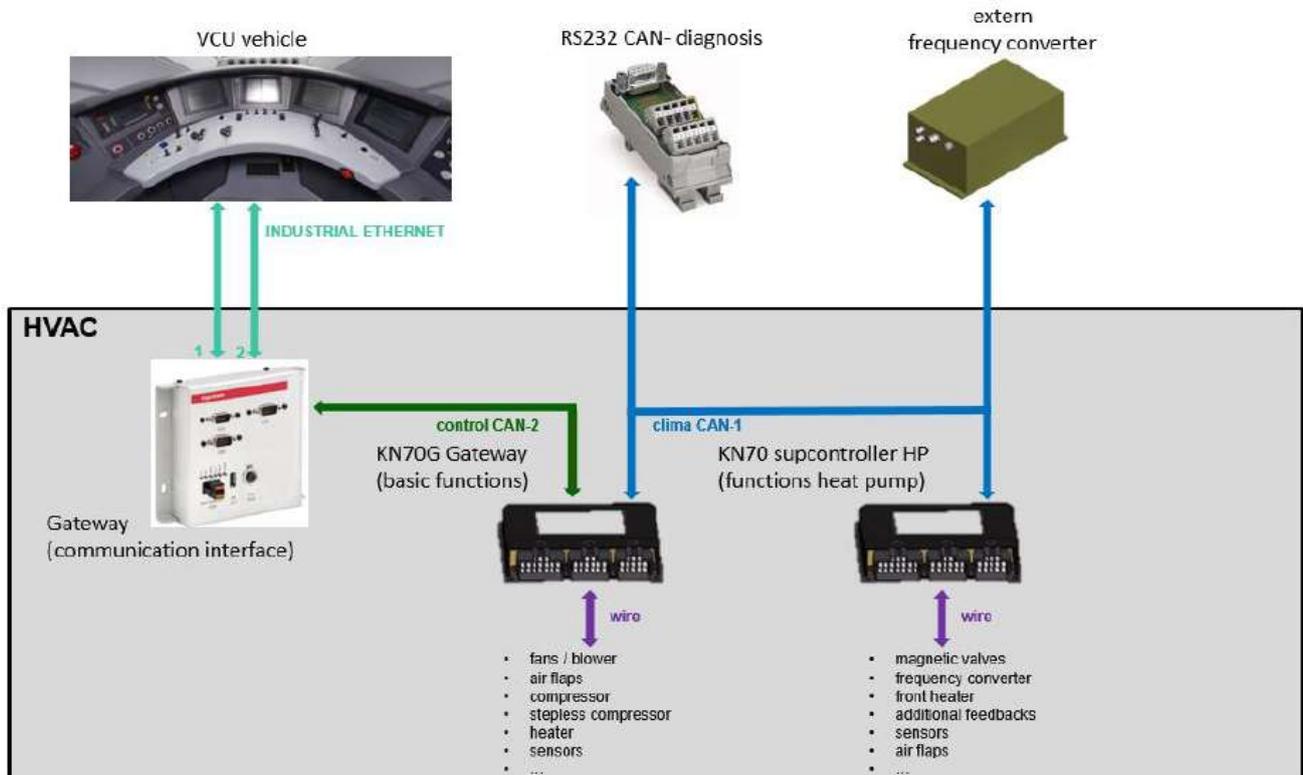


Abbildung 3: Schema Kommunikationsstruktur

Arbeitspaket 3: Erstellen technischer Dokumente

Parallel zur mechanischen und elektrischen Konstruktion wurden sämtliche technischen Dokumente zur Fertigung und Beschreibung der Anlagen wie Zeichnungen, Stücklisten und Schaltpläne erstellt.

Abschließend wurde die technische Beschreibung erstellt, die sämtliche technische Daten und Informationen zu den Komponenten und des Aufbaus der Anlage enthält.

Arbeitspaket 4: Montage Prototyp

Die Prototypen wurden im Musterbau gefertigt und dabei konstruktive Maßnahmen zur Optimierung der Fertigung identifiziert.

Arbeitspaket 5: Begleiten der technischen Prüfungen

Im Rahmen der technischen Prüfungen wurden die Schallmessung, die EMV-Messung, die Schwing- und Schockprüfung sowie die Klima-Messungen begleitet. Diese sind in den Arbeitspaketen 6-9 beschrieben.

Arbeitspaket 6: Schallmessung

Im Arbeitspaket 6 werden die Schalleistungen der Geräte HVAC6708 und HVAC6709 (beide mit R-744) mit denen der HVAC6406 (R-134a Serie) verglichen.

Die Referenzanlage HVAC6406 wurde nach DIN EN ISO 3744:2011-02 unter Volllast beim TÜV-Hessen in Kassel mit einem Schalleistungspegel von 94,0 dB(A) gemessen. Ausgehend von einer Höhe des Klimagerätes von 4 m über Boden ergibt sich über eine Ausbreitungsberechnung nach DIN ISO 9613-2, Ausgabe 1999, in einer Entfernung von 7,5 m zur äußeren Begrenzung des Gerätes bei Freifeldbedingungen über einer reflektierenden Ebene ein Schalldruckpegel von 66,5 dB(A).

Die HVAC6709 wurde im Mai 2022 bei Müller-BBM in München nach DIN EN ISO 9614-2 bei verschiedenen Betriebsmodi gemessen. Bei Volllast im Klimabetrieb wurden Schalleistungspegel von 76,7 dB(A) bis 90,2 dB(A) erreicht. Im Wärmepumpenbetrieb lagen die Schalleistungspegel zwischen 53,7 dB(A) und 67,7 dB(A). Die Terzspektren der A-bewerteten Schalleistungspegel sind im Anhang zusammen mit dem p-I-Index und dem Arbeitsbereich L_d der Intensitätssonde nach DIN 9614-2 für die Genauigkeitsklasse 2 angegeben. Der p-I-Index ergibt sich aus der Differenz des Schalldruckpegels L_p – Schallintensitätspegel L_i .

Die HVAC6708 wurde im Februar 2023 bei Müller-BBM in München nach DIN EN ISO 9614-2 bei verschiedenen Betriebsmodi gemessen. Bei Volllast im Klimabetrieb wurden Schalleistungspegel bis 94,0 dB(A) und im Wärmepumpenbetrieb bis 62,0 dB(A) erreicht. Ausgehend von einer Höhe des Klimagerätes von 4 m über Boden ergibt sich über eine Ausbreitungsberechnung nach DIN ISO 9613-2 in einer Entfernung von 7,5 m zur äußeren Begrenzung des Gerätes bei Freifeldbedingungen über einer reflektierenden Ebene ein Schalldruckpegel von 65,3 dB(A) links und 67,8 dB(A) rechts.

Die Geräuschemissionen der CO₂-Anlagen entsprechen denen des R-134a-Seriengerätes. Im Wärmepumpenbetrieb sind sie sogar deutlich niedriger als im Klimabetrieb.

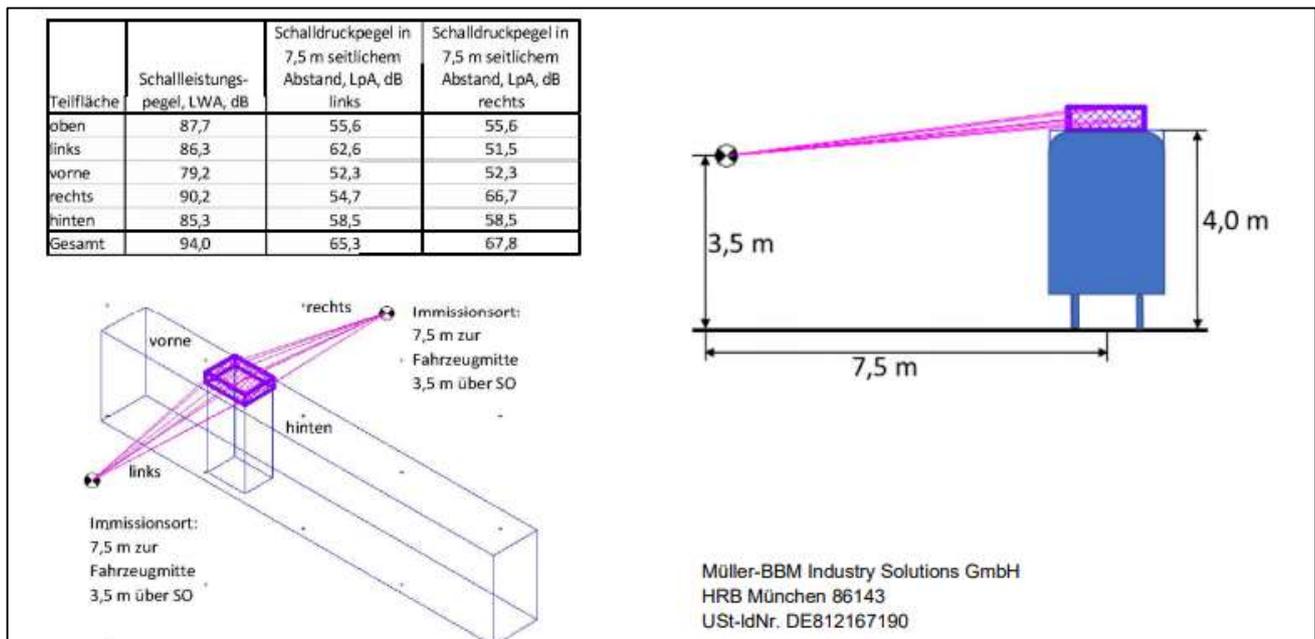


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau, Schalleistungs- und Schalldruckpegel

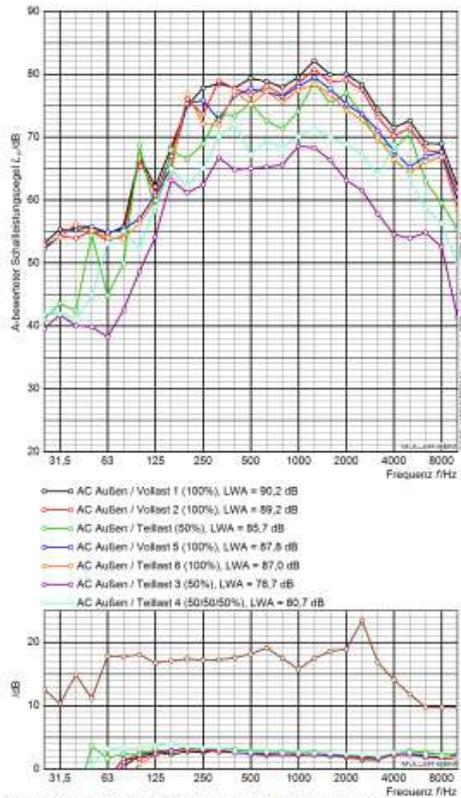


Abbildung 4 Kältebetrieb außen, Schallleistungspegel mit p-I-Index und Arbeitsbereich nach DIN 9614-2

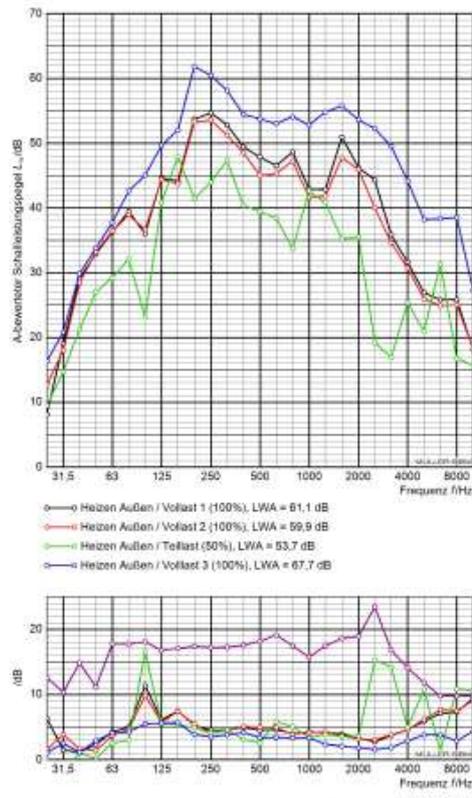


Abbildung 7 Heizen außen, Schallleistungspegel mit p-I-Index und Arbeitsbereich nach DIN 9614-2 (magenta)

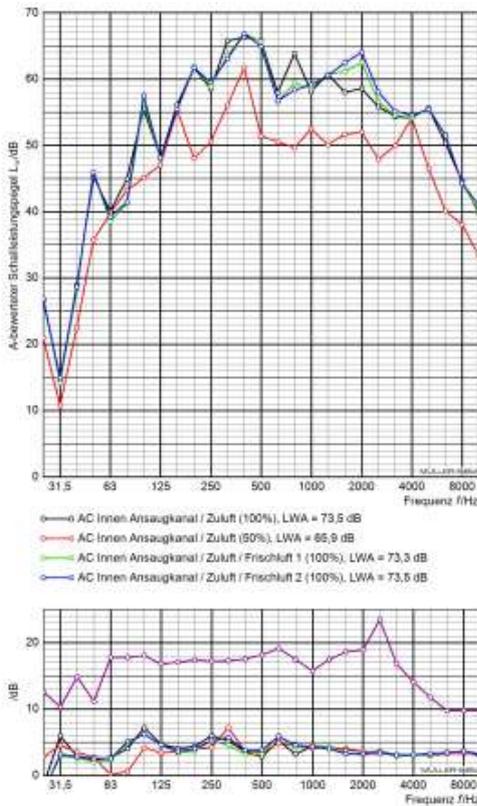


Abbildung 5 Kältebetrieb innen, Ansaugkanal, Schallleistungspegel mit p-I-Index und Arbeitsbereich nach DIN 9614-2 (magenta)

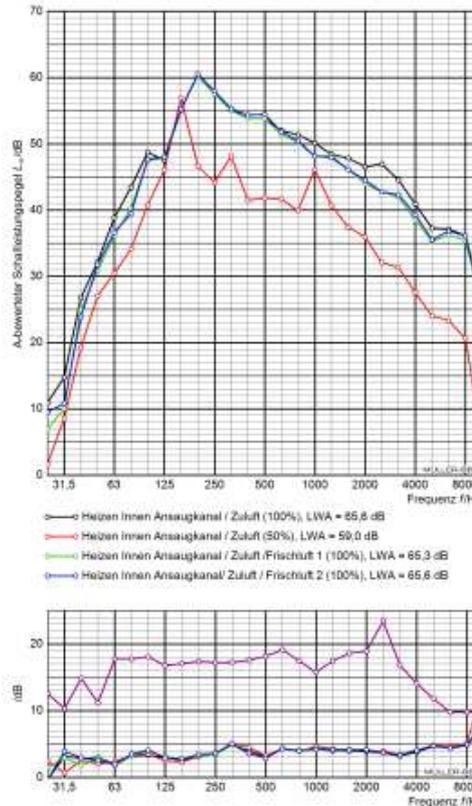


Abbildung 8 Heizen innen, Ansaugkanal, Schallleistungspegel mit p-I-Index und Arbeitsbereich nach DIN 9614-2 (magenta)

Abbildung 5: Ergebnisse Messung Schallleistungspegel

Arbeitspaket 7: EMV-Messung

Um Funktionsbeeinträchtigungen durch elektromagnetische Strahlung sowohl im Klimagerät als auch im Fahrzeug und seiner Umgebung auszuschließen, muss jeder Klimagerätetyp einer EMV-Prüfung unterzogen werden. Die Referenzanlage HVAC6406 hat im Januar 2014 die EMV-Prüfung beim TÜV Hessen in Kassel bestanden.

Die HVAC6708 wurde im Zeitraum von Februar bis April 2022 beim TÜV Hessen in Kassel getestet. Die Störaussendung wurde in Anlehnung an DIN EN 50121-3-2:2017-11 bewertet. Die Grenzwerte wurden sowohl bei der Funkstörspannung auf den Leistungseingängen als auch bei der Funkstörfeldstärke im Halbabstrahrraum von 3 Meter eingehalten. Die Messungen wurden gemäß der Fußnote c von der Tabelle 1 der DIN EN 61000-6-4 nur im Frequenzbereich 30 MHz - 2000 MHz durchgeführt, da die höchste interne Frequenz des Prüflings 120 MHz beträgt (Taktfrequenz der Klimasteuerung KN70G/KN70). Es besteht somit keine Gefahr durch Aussendung elektromagnetischer Strahlung durch die HVAC6708 in ihrer Umgebung. Die Störfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 50121-3-2:2017-11 bewertet. Die Prüfung auf gestrahlte elektromagnetische HF-Felder (DIN EN 61000-4-3) und Störgrößen auf die Eingänge – Burst (DIN EN 61000-4-4), Surge (DIN EN 61000-4-5) und HF-Einkopplung (DIN EN 61000-4-6) – wurde bestanden.

Die HVAC6709 wurde im Dezember 2021 beim TÜV Hessen in Kassel getestet. Die Störaussendung wurde in Anlehnung an DIN EN 50121-3-2:2017-11 bewertet. Die Grenzwerte wurden sowohl bei der Funkstörspannung auf den Leistungseingängen als auch bei der Funkstörfeldstärke im Halbabstrahrraum von 3 Meter eingehalten. Die Messungen wurden gemäß der Fußnote c von der Tabelle 1 der DIN EN 61000-6-4 nur im Frequenzbereich 30 MHz - 2000 MHz durchgeführt, da die höchste interne Frequenz des Prüflings 120 MHz beträgt (Taktfrequenz der Klimasteuerung KN70G/KN70). Es besteht somit keine Gefahr durch Aussendung elektromagnetischer Strahlung durch die HVAC6709 in ihrer Umgebung. Die Störfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 50121-3-2:2017-11 bewertet. Die Prüfung auf gestrahlte elektromagnetische HF-Felder (DIN EN 61000-4-3) und Störgrößen auf die Eingänge – Burst (DIN EN 61000-4-4), Surge (DIN EN 61000-4-5) und HF-Einkopplung (DIN EN 61000-4-6) – wurde bestanden.

Das Bahnklimagerät HVAC6709 war über den Anschluss X10 an eine 400 V / 50 Hz Drehstromversorgung (wird im Bahnfahrzeug von separatem Umrichter erzeugt) angeschlossen und wurde im Automatikbetrieb bei maximaler Kühlleistung betrieben und geprüft. Am Anschluss X20 war ein Notebook mit einer Diagnose-Software CANDiag 2 mittels einer daran angeschlossenen CAN-Bus-Leitung verbunden. Die Funktionsüberwachung erfolgte akustisch über die Lüfter- und Verdichterlaufgeräusche und metrologisch über das verbundene Notebook mit der Diagnose-Software. Das Betriebsverhalten während und nach allen Prüfungen war normal ohne ungewollte Änderungen des Betriebszustandes oder Fehlfunktion der Komponenten. Bei den Prüfungen wurden zwei Varistoren EPCOS S20K30 im 24 Volt Steuerstromkreis in der Wago-Leiste X13 eingebaut.

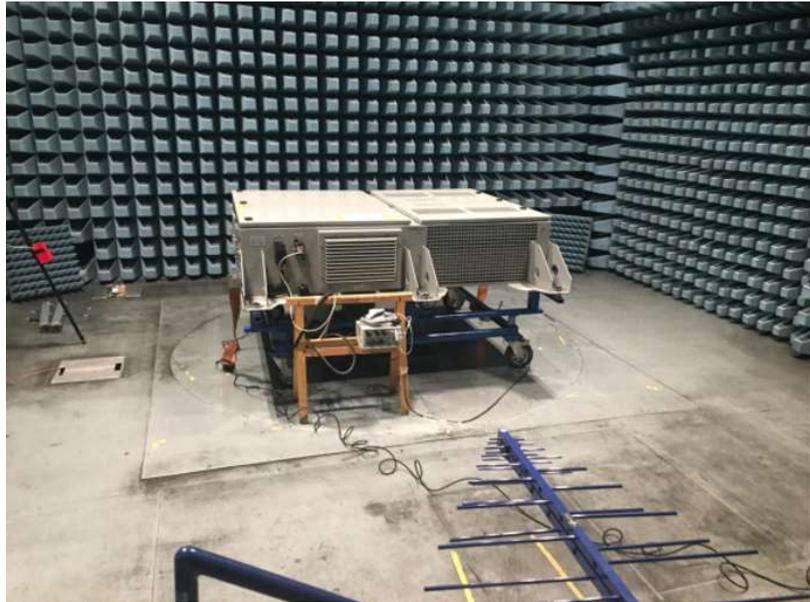


Abbildung 6: Prüfaufbau zu Funkstörfeldstärkemessungen im HalbabSORBerraum (hier: Frequenzbereich 30 bis 1000 MHz)

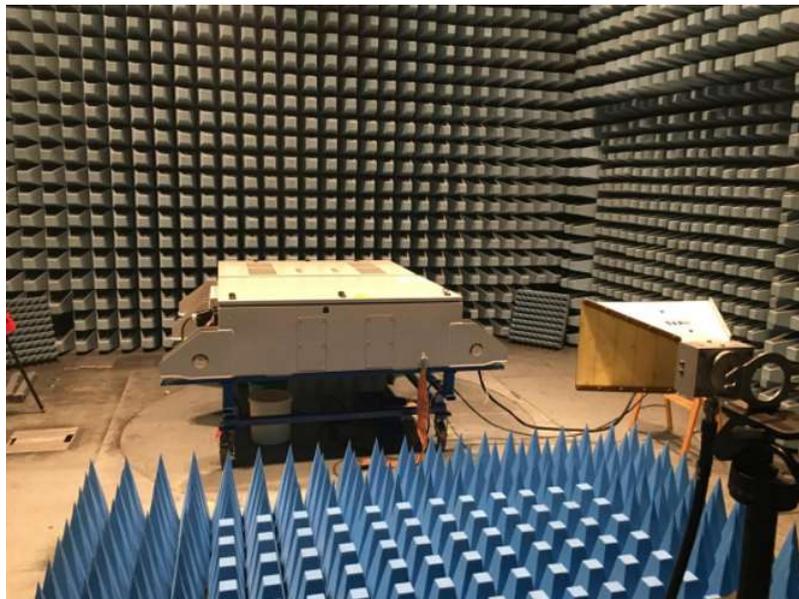


Abbildung 7: Prüfaufbau zu Störfestigkeitsprüfungen gegen gestrahlte elektromagnetische HF-Felder (hier: Frequenzbereich 1 bis 6 GHz)

Arbeitspaket 8: Schwing- und Schockprüfung

Die Referenzanlage HVAC6406 wurde im April 2014 nach IEC/EN 61373 bei fka in Aachen getestet.

Die HVAC6709 wurde im Februar 2022 nach IEC/EN 61373 bei fka in Aachen getestet. Die Vorschrift umfasst die Prüfung des Bauteils in drei Koordinatenrichtungen (vertikal, längs und quer) mit einem Breitbandrauschen sowie mit einer Stoßanregung. Die Höhen der Prüfpegel sind aus realen Betriebsmessungen abgeleitet und dienen als Nachweis der mechanischen Unversehrtheit der Betriebsmittel. Abhängig vom Einbauort und der jeweiligen Prüfrichtung wird die Anregungsamplitude von der Norm vorgegeben. Das Bauteil muss in „Kategorie 1, Klasse A“ eingeordnet werden. Die Schwingungsanregung des Prüflings erfolgt gemäß der Prüfvorschrift EN 61373 „Simulierte Lebensdauerprüfung, in drei Beanspruchungsrichtungen“ mit einem Breitbandrauschsignal. Der Prüfschärfegrad und der Frequenzbereich des Signals ergeben sich aus den

folgenden drei Abbildungen. In Abbildung 8 ist die spektrale Beschleunigungsdichte, die auch als Amplitudenleistungsdichtespektrum der Beschleunigung (ASD) bezeichnet wird, über der Frequenz aufgetragen. Der Frequenzbereich der Prüfung ergibt sich aus den Abbildungen 9 und 10 und beschreibt die Bestimmung der Pegelhöhe. Die Prüfung bezweckt den Nachweis der mechanischen Unversehrtheit des Betriebsmittels bei erhöhten Betriebspegeln. Die Norm ist in drei Kategorien unterteilt, die vom Einbauort des Betriebsmittels im Fahrzeug abhängen. Der zu untersuchende Prüfling gehört zur Kategorie 1, Klasse A (am Fahrzeugkasten angebaut). Die Breite des Rauschsignals im Frequenzbereich ist abhängig vom Gewicht des jeweiligen Prüflings [8].

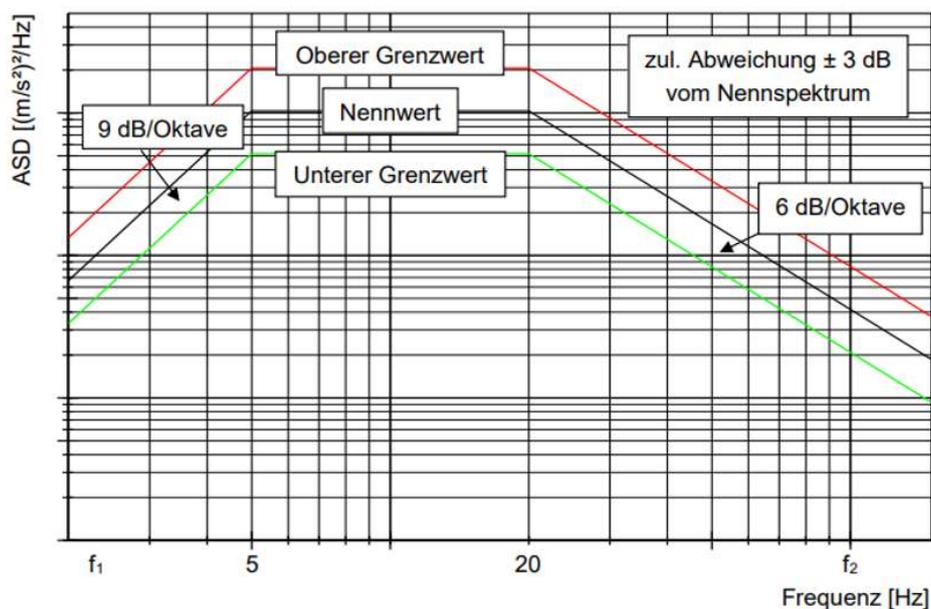


Abbildung 8: Prüfsignalamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz

| Masse (m) | f_1 | f_2 |
|--|--|---|
| $m < 500 \text{ kg}$ | 5 Hz | 150 Hz |
| $500 \text{ kg} < m < 1250 \text{ kg}$ | $\frac{1250 \text{ kg}}{\text{Masse}} \times 2 \text{ Hz}$ | $\frac{1250 \text{ kg}}{\text{Masse}} \times 60 \text{ Hz}$ |
| $m > 1250 \text{ kg}$ | 2 Hz | 60 Hz |

Abbildung 9: Grenzfrequenzen in Abhängigkeit der Betriebsmittelmasse

Jede Beanspruchungsrichtung wird jeweils 5 h lang mit dem geforderten Breitbandrauschen für diese Richtung geprüft.

| | Senkrechte Richtung | Querrichtung | Längsrichtung |
|--|---------------------|--------------|---------------|
| Langzeitprüfung ASD-Pegel $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ | 0,532 | 0,131 | 0,234 |
| Effektivwert m/s^2 5 bis 150 Hz | 4,25 | 2,09 | 2,83 |
| Anmerkung 1: Bei Betriebsmitteln mit Frequenzen kleiner als 5 Hz sind die Effektivwerte höher als die oben angegebenen. Anmerkung 2: Bei Betriebsmitteln mit Frequenzen kleiner als 150 Hz sind die Effektivwerte kleiner als die oben angegebenen. Anmerkung 3: Falls Frequenzen oberhalb von f_2 vorkommen, dürfen sie eingeschlossen werden. Die Amplitude wird ermittelt durch Verlängerung der 6-dB/Oktave-Linie bis zum Schnittpunkt mit der maximal erforderlichen Frequenz. In diesen Fällen wird der Pegel des Effektivwertes höher liegen. | | | |

Abbildung 10: ASD-Spektrum für Kategorie 1, Klasse A, am Fahrzeugkasten angebaut

Eine weitere Vorgabe der Norm EN 61373 besteht darin, dass die Zeitreihen der gemessenen Beschleunigungen annähernd einer Gauß'schen Verteilungskurve entsprechen müssen, wobei der Scheitelfaktor (CREST-Wert, Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert) mindestens 2,5 beträgt. Die Darstellung erfolgt in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm. Aufgetragen wird die Summenhäufigkeit der Beschleunigungssignale im Zeitbereich über der Beschleunigungsamplitude (Abbildung 11).

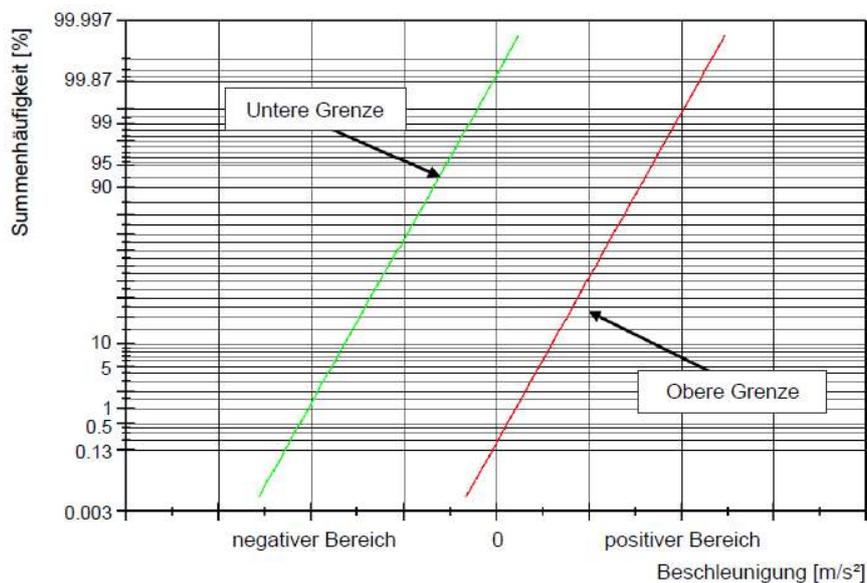


Abbildung 11: Darstellung der Summenhäufigkeit

Im Anschluss an jede Prüfung wird der Prüfling mit einer dreimaligen Stoßbelastung gemäß Abbildung 12 und 13 in positiver und negativer Richtung getestet.

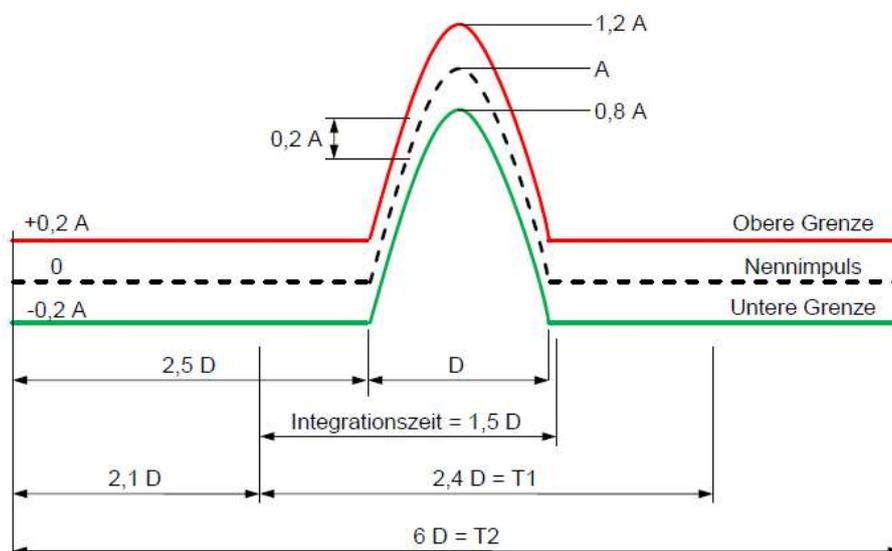


Abbildung 12: Signalverlauf der Stoßbelastung [8]

| Belastungsrichtung | Amplitude (A) | Nenndauer (D) |
|---------------------|---------------------|---------------|
| Senkrechte Richtung | 30 m/s ² | 30 ms |
| Querrichtung | 30 m/s ² | 30 ms |
| Längsrichtung | 50 m/s ² | 30 ms |

Abbildung 13: Amplituden der Stoßbelastung (Klassen A und B)

Das zu prüfende Bauteil Typ HVAC6709 hat ein Gewicht von 458 kg. Die Grenzfrequenz f_1 entspricht nach Abb. 2-2 für Prüflinge mit einem Gewicht von weniger als 500 kg 5 Hz, die Grenzfrequenz f_2 150 Hz. Da Beschleunigungs-/Zeitsignale nicht direkt für die Ansteuerung des servohydraulischen Prüfstands verwendbar sind, ist es erforderlich, die Beschleunigungssignale in Wegsignale umzuwandeln, die für die Ansteuerung des Prüfstands geeignet sind. Dafür wird die in der Prüfstandssteuerung implementierte Software RPC (Remote Parameter Control) verwendet.

Mit dem RPC-Verfahren können Beschleunigungen auf dem Prüfstand originalgetreu reproduziert werden. Das Verfahren basiert auf der Messung der Übertragungsfunktion zwischen Anregungszylinder und der Messstelle am Versuchsobjekt und der darauffolgenden Berechnung von Zylindersteuersignalen aus den vorgegebenen Beanspruchungsverläufen (Soll-Signalen). Die so gewonnenen Anregungssignale (Drive-Signale) werden vom Prüfstandsrechner iterativ verändert, bis die auf dem Hydropuls-Prüfstand gemessenen Ist-Signale den Soll-Signalen (Prüfvorschrift) mit der erforderlichen Genauigkeit entsprechen. In Abbildung 14 ist das Funktionsschema des Verfahrens grafisch dargestellt.

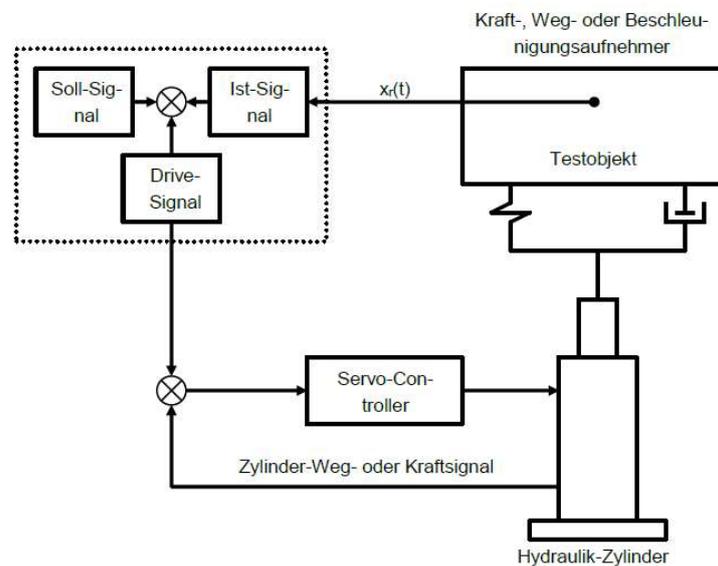


Abbildung 14: Funktionsschema des RPC-Verfahrens

In Abbildung 15 ist der Prüfstand für die Prüfung in Querrichtung zu sehen.



Abbildung 15: Prüfstands Aufbau für die Prüfung in Querrichtung

Prüfungsergebnis:

Das Produkt HVAC6709 der Firma Konvekta AG wurde Prüfungen gemäß dem mechanischen Teil der Prüfvorschrift IEC/EN 61373 „Bahnanwendungen - Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen - Prüfungen für Schwingen und Schocken“ (Ausgabe September 2010) mit den Belastungswerten nach Kategorie 1, Klasse A unterzogen. Das Bauteil trägt die folgenden Typenbezeichnungen:

Typ HVAC6709

Artikel-Nr. BKL-2404006C81

Serien-Nr. 800004011-1

Die Vorschrift beinhaltet die Prüfung des Bauteils in drei Richtungen nacheinander mit einem Rauschsignal sowie mit einem Stoßsignal. Es wurde in vertikaler Richtung, in Längsrichtung und in Querrichtung geprüft.

Im Verlauf der Vertikalprüfung wurde eine defekte Lötstelle der Verrohrungen festgestellt. Nach der Reparatur der Verrohrung und nach Ablauf aller Prüfungen konnten keine weiteren sichtbaren mechanischen Schäden am Bauteil identifiziert werden.

Arbeitspaket 9: Klima-Test

In der Konvekta Klimahalle wurden Leistungsmessungen folgender Anlagen durchgeführt:

| | |
|-----------|--|
| HVAC 6406 | Fahrgastraumanlage mit R-134a und elektrischer Heizung |
| HVAC 6708 | Fahrgastraumanlage mit R-744 und Wärmepumpenfunktion |
| HVAC 6709 | Fahrgastraumanlage mit R-744 und Wärmepumpenfunktion |
| HVAC 3405 | Fahrerarbeitsplatzanlage mit R-134a und elektrischer Heizung |
| HVAC 3706 | Fahrerarbeitsplatzanlage mit R-744 und elektrischer Heizung |
| HVAC 3709 | Fahrerarbeitsplatzanlage mit R-744 und elektrischer Heizung |

Die Messungen wurden bei Umgebungstemperaturen von -20 °C bis 40 °C durchgeführt. Exemplarisch sind nachfolgend die Ergebnisse im Vergleich der Anlagen HVAC 6406 und HVAC 6709 in Diagrammen (Abbildungen 16 und 17) dargestellt. Zu sehen sind jeweils die Heiz- bzw. Kühlleistung und die elektrische Aufnahmeleistung der Anlage bei definierten Temperaturbedingungen.

Die Heiz- und Kühlleistungen der Anlagen sind vergleichbar. Durch die Wärmepumpenfunktion sind bei der HVAC 6709 COPs bis 2,1 im Heizbetrieb möglich. Die Effizienz im Kühlbetrieb ist bei der HVAC 6406 höher als bei der HVAC 6709.

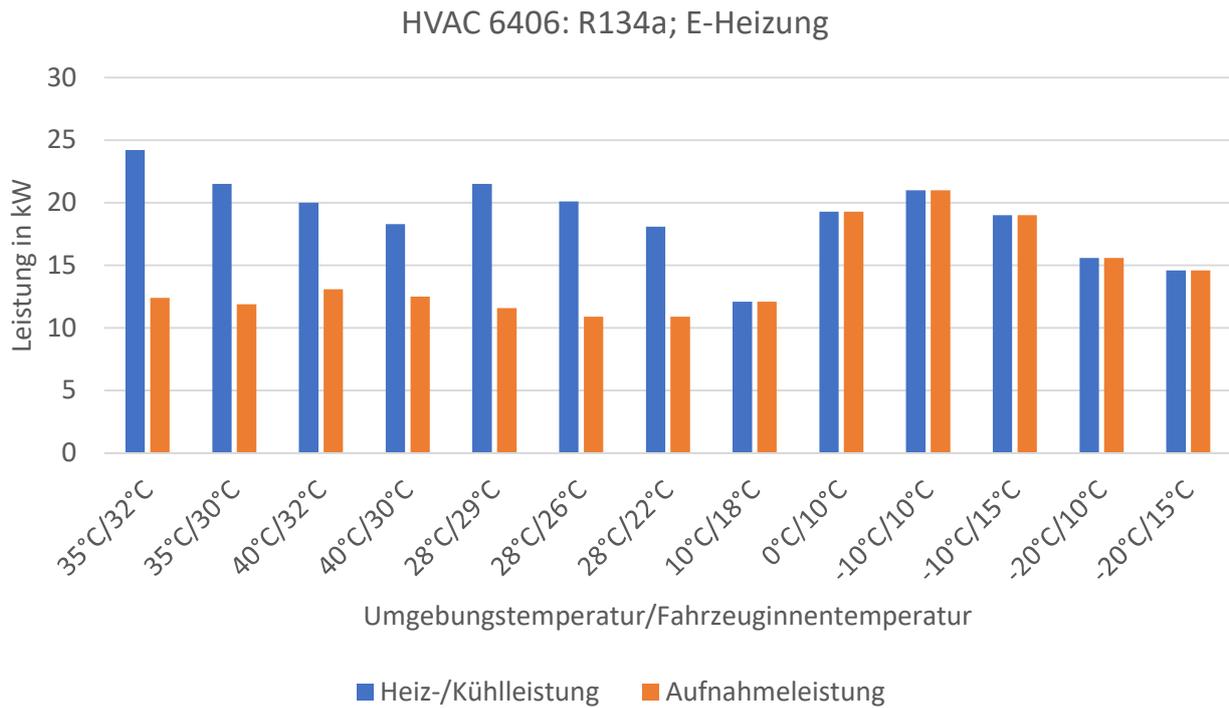


Abbildung 16: Leistungsmessung HVAC 6406

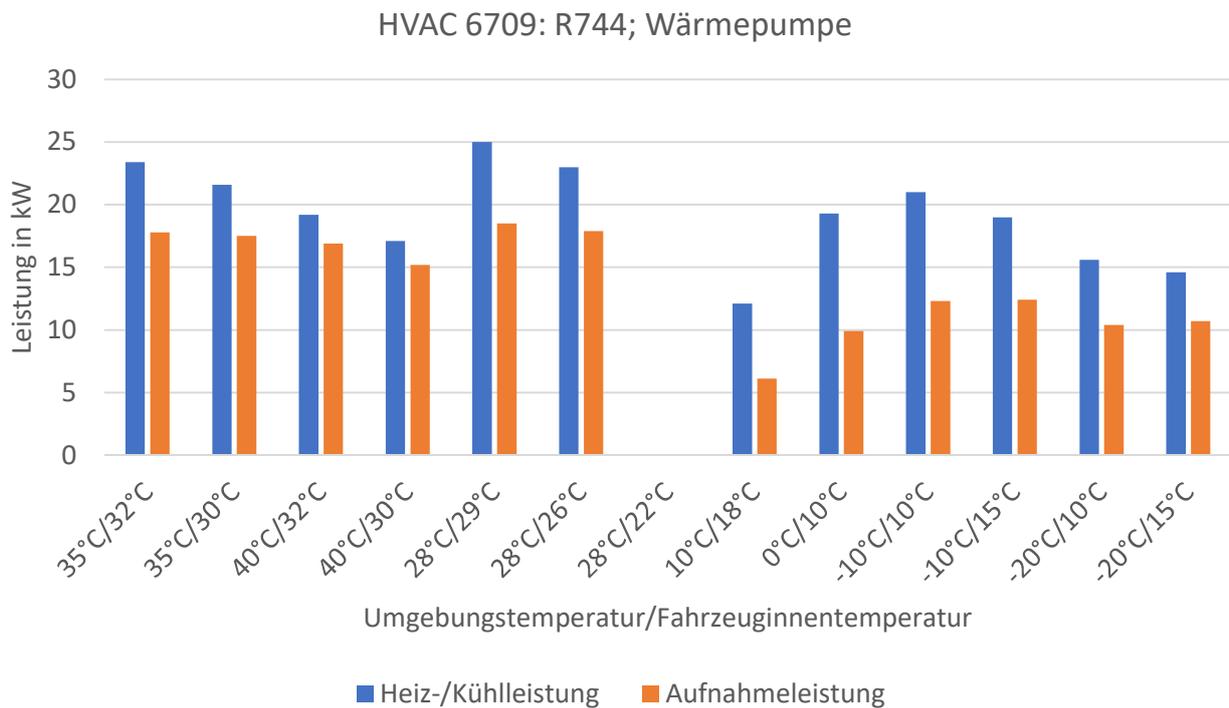


Abbildung 17: Leistungsmessung HVAC 6709

Im Klima-Wind-Kanal bei Rail Tec Arsenal Wien wurden zudem umfangreiche Messungen mit einer Straßenbahn mit 2x HVAC 3710 und 2x HVAC 6709 (siehe Abbildung 18) durchgeführt.

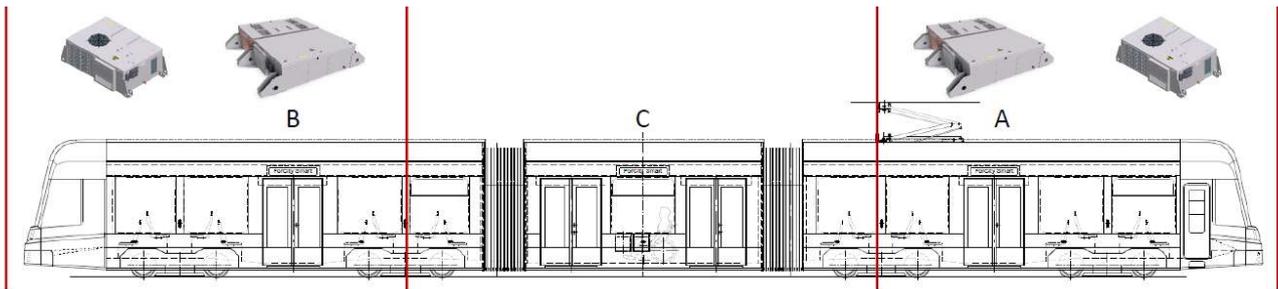


Abbildung 18: Straßenbahn mit 2x HVAC 3710 und 2x HVAC 6709

Der Klimahallentest wurde im ersten Durchgang mit einem Erfüllungsgrad $> 91\%$ bestanden, was einem außergewöhnlich guten Ergebnis entspricht. In dieser Messreihe wurden die Anlagen unter Extrembedingungen von -25 °C bis 45 °C Umgebungstemperaturen getestet. Besonders hervorzuheben ist, dass bei -25 °C Umgebungstemperatur eine Innenraumtemperatur von $18,8\text{ °C}$ (Sollwert 19 °C) erreicht wurde.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Fahrzeug im Klima-Wind-Kanal.



Abbildung 19: Straßenbahn im Klima-Wind-Kanal [7]

Arbeitspaket 10: Einbau in Fahrzeug

In Vorbereitung auf die Messreihe im Klima-Wind-Kanal bei Rail Tec Arsenal Wien wurden die prototypischen Anlagen in das Testfahrzeug eingebaut. Auf der folgenden Abbildung 20 ist das fertiggestellte Fahrzeug für den Transport vorbereitet zu sehen.



Abbildung 20: Straßenbahn am Tieflader [7]

Arbeitspaket 11: Software abstimmen

Während der umfangreichen Anlagentests wurden die Software-Parameter optimiert. Unter anderem wurde angepasst:

- Die Soll-Raumtemperatur sowie die Frischluftmenge wurden nach DIN EN 14813-1 und DIN EN 14750 eingestellt. Dafür wurde unter anderem die Frischluftklappenöffnung angepasst.
- Hoch- und Niederdruckregelung.
- Sollwerte der minimalen und maximalen Temperaturen im Luftkanal.
- Gebläsedrehzahlen im Heiz- und Kühlbetrieb.
- Öffnungsgrad der Betriebsartenklappe im Heiz- und Kühlbetrieb.

Arbeitspaket 12: Messequipment einrichten

Da es größere Verzögerungen im Zeitplan gab und die Fahrzeuge an die Kunden ausgeliefert werden mussten, konnten die Anlagen nicht mehr mit Messtechnik für Feldmessungen ausgerüstet werden.

Stattdessen wurde das Fahrzeug für die Messungen im Klima-Wind-Kanal von Rail Tec Arsenal umfangreich mit Messtechnik ausgerüstet.

Arbeitspaket 13: Feldtest / Simulation

Aus den in Arbeitspaket 12 beschriebenen Gründen konnten im Rahmen des Projektes keine Feldmessungen mehr durchgeführt werden. Stattdessen wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um mit gegebenen Randbedingungen und Leistungs- und Effizienzkurven aus den Messungen aus Arbeitspaket 9 die Energieverbräuche für ein Referenzjahr zu berechnen und zu vergleichen.

Nachfolgend sind die Randbedingungen der Vergleichsrechnungen aufgeführt:

- Innentemperatur nach VDV236eco
- Besetzungsgrad 20 % entspricht 45 Passagieren
- 420 m³/h Frischluft (8m³/h und Person)
- Wärmeleistung/Passagier: 100 W
- Täglicher Betrieb von 5 bis 21 Uhr
- Klimadaten: Süddeutschland 2023

Anlagenkonfiguration konventionell (R-134a-Klimaanlage mit Elektroheizung):

- 3x HVAC 6406
- 1x HVAC 3405

Anlagenkonfiguration R-744 (Fahrgastraumbeheizung mit Wärmepumpe; Fahrerarbeitsplatzbeheizung elektrisch):

- 3x HVAC 6709
- 1x HVAC 3706

Die Umgebungstemperaturen für den Standort in Süddeutschland im Jahr 2023 lagen zwischen -6 °C und 36 °C.

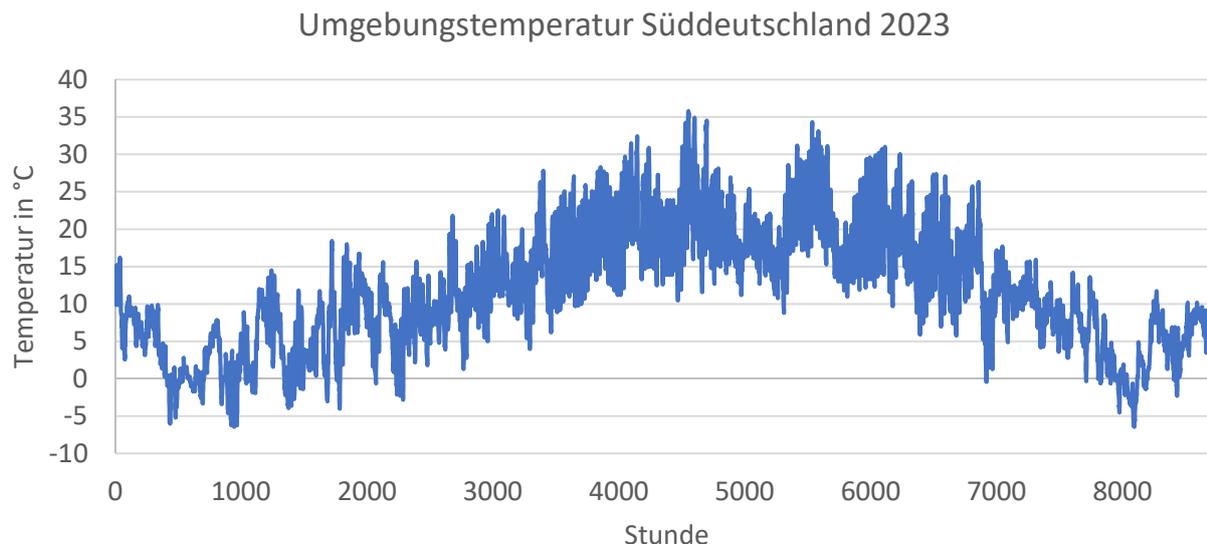


Abbildung 21: Umgebungstemperatur Süddeutschland 2023

In den folgenden beiden Diagrammen sind die Energieverbräuche pro Stunde für die 8760 Stunden des Jahres 2023 dargestellt. Stunden mit einem Energieverbrauch von 0 kWh liegen außerhalb der Betriebszeit. Im Vergleich ist zu sehen, dass das System mit den konventionellen R-134a-Anlagen im Klimabetrieb in den Sommermonaten geringere Energieverbräuche verursacht als die R-744-Anlagen. Entgegengesetzt wird im Heizbetrieb durch die Wärmepumpenfunktion mit den R-744-Anlagen deutlich weniger elektrische Energie verbraucht.

Für das Referenzjahr 2023 mit den angegebenen Randbedingungen ergeben sich folgende Jahresverbräuche für Heizung und Klimatisierung pro Fahrzeug:

- Konventionelle R-134a-Anlagen: 52.700 kWh
- R-744-Anlagen: 39.000 kWh

Somit werden jährlich 13.700 kWh elektrische Energie pro Fahrzeug eingespart.

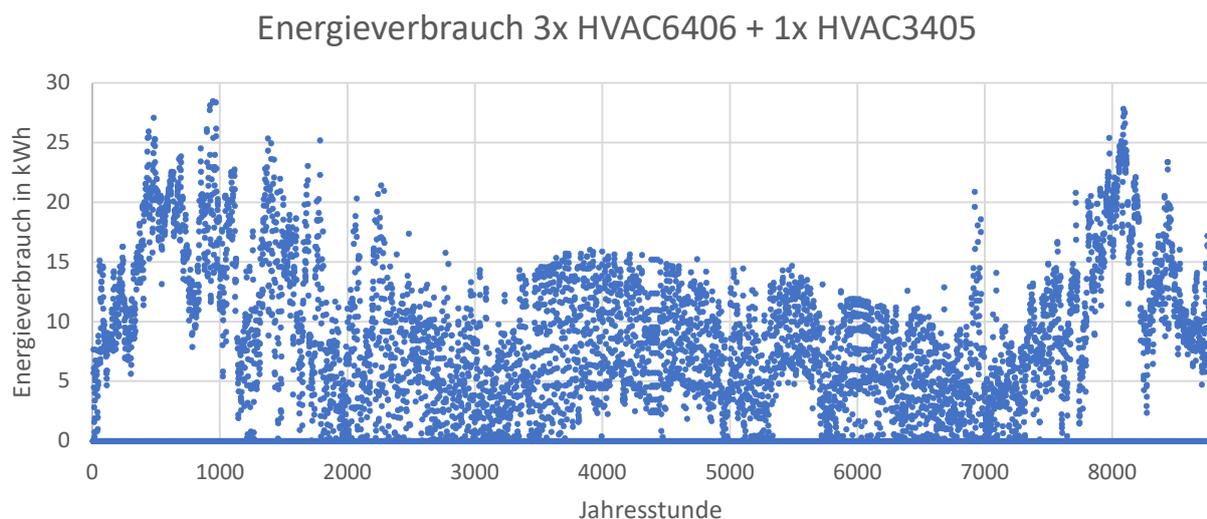


Abbildung 22: Energieverbrauch Straßenbahn R-134a

Energieverbrauch 3x HVAC6708 + 1x HVAC3706

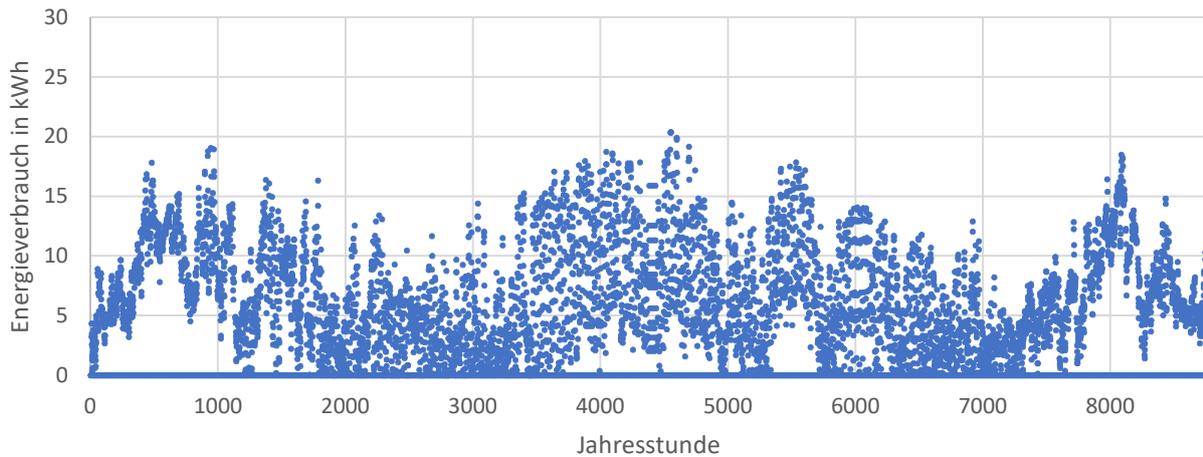


Abbildung 23: Energieverbrauch Straßenbahn R-744

Häufig wird für die Energieverbrauchsbewertung von Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge der DB-Energieverbrauchszyklus (Duty Cycle) als Referenz für den Vergleich verschiedener Systeme herangezogen. Er definiert unter anderem die Häufigkeit der auftretenden Temperaturen.

In den folgenden Diagrammen sind die Temperaturhäufigkeiten des Duty Cycle 2013 sowie die gemessene für den Standort Süddeutschland in 2023 dargestellt. Im Vergleich ist zu sehen, dass sich beim Duty Cycle deutlich mehr Stunden im Bereich $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ befinden, weshalb der Heizbetrieb bei einer Energieverbrauchsbewertung stärker gewichtet wird. Bei den gemessenen Werten aus 2023 sind die meisten Betriebsstunden im (unteren) Teillastbereich des Heizens und Kühlens zu finden.

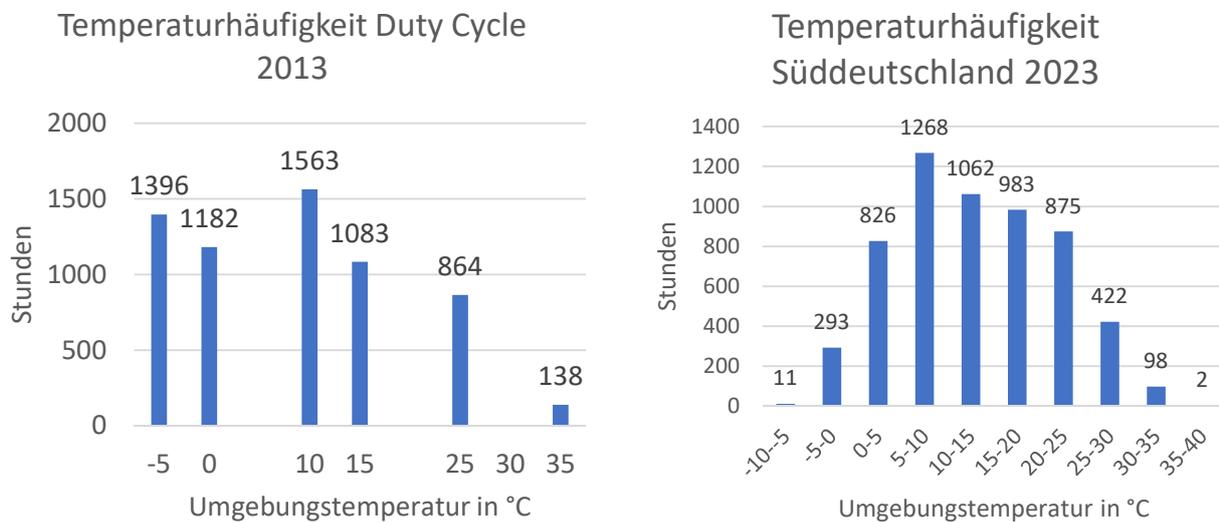


Abbildung 24: Temperaturhäufigkeiten

Wird die Berechnung nicht mit den Temperaturmesswerten aus 2023, sondern mit den Daten des Duty Cycle 2013 durchgeführt, ergeben sich für die verglichenen Systeme folgende Jahresverbräuche:

- Konventionelle R-134a-Anlagen: 85.900 kWh
- R-744-Anlagen: 63.900 kWh

Der absolute Verbrauch beider Systeme liegt hierbei deutlich höher als bei den Werten, die mit den gemessenen Temperaturwerten aus 2023 berechnet wurden. Die relative Einsparung bleibt mit rund 26 % nahezu gleich.

Arbeitspaket 14: Auswertung

Basierend auf den Ergebnissen der Messungen und Berechnungen in den Arbeitspaketen 9 und 13 lässt sich zusammenfassen, dass bereits mit der ersten Generation der prototypischen R-744-Anlagen zur Klimatisierung und Beheizung von Schienenfahrzeugen eine Reduktion des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs der Fahrzeuge erreicht wird. Durch die Analyse der umfangreichen Messreihen und die Erfahrungen aus dem Serienbetrieb der R-744-Wärmepumpen für Omnibusse konnten Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden, wodurch die Effizienz der R-744-Anlagen zur Klimatisierung und Beheizung von Schienenfahrzeugen erhöht werden können. Wesentliches Verbesserungspotential wird auf der wärmeabgebenden Seite der Anlage gesehen.

Bei den Omnibusanlagen werden COPs im Heizbetrieb von > 4 bei einer Umgebungstemperatur von 15 °C und > 2 bei Temperaturen unter -10 °C erreicht. Die wird insbesondere durch die Reihenschaltung zweier Gaskühler erreicht (siehe Abbildung 25). Dabei strömt das Heißgas zunächst durch einen Plattenwärmeübertrager und erwärmt einen Wasservolumenstrom des Warmwasserkreislaufes. Über diesen kann im Klimabetrieb Wärme an die Umgebung, oder im Heizbetrieb an den Fahrzeuginnenraum abgegeben werden. Nach dem Plattenwärmeübertrager strömt das Kältemittel durch den luftbeaufschlagten Wärmeübertrager und gibt Wärme an die Umgebung (Klimabetrieb) oder den Fahrzeuginnenraum (Heizbetrieb) ab.

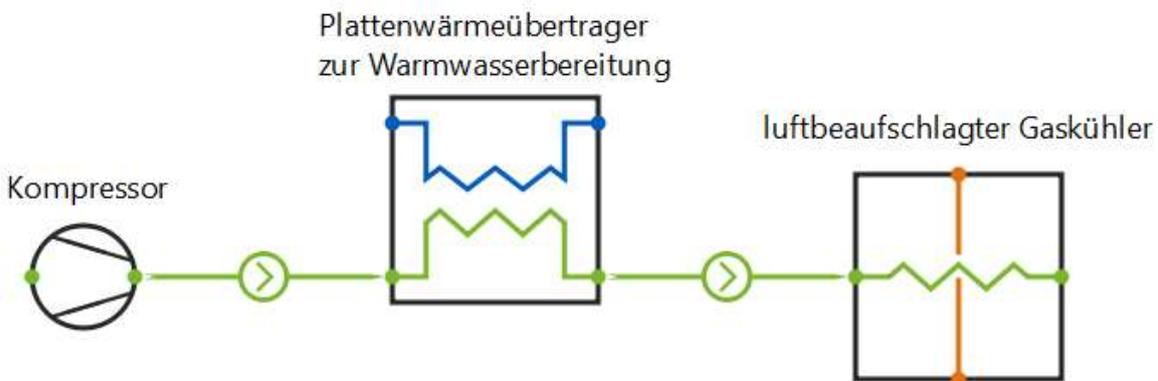


Abbildung 25: Schema Reihenschaltung Gaskühler

Die Einbindung der Wärme in einen Warmwasserkreislauf zum Beheizen des Fahrzeuges ermöglicht zudem die Wärmezufuhr über Konvektoren im unteren Fahrzeugbereich, wodurch die Behaglichkeit erhöht werden kann.

Fazit

Im Rahmen des Förderprojektes konnten Klimaanlage mit dem Kältemittel R-744 zur Klimatisierung und Beheizung von Schienenfahrzeugen für den Fahrgastraum und den Fahrerarbeitsplatz entwickelt und getestet werden. Nach der Konstruktion und Prototypenfertigung wurden die Anlagen umfangreichen Testabläufen (Leistungsmessung, EMV-, Schall-, Schwing- und Schockprüfung) unterzogen, die letztlich bestanden wurden. Besonders hervorzuheben ist der beim ersten Durchgang bestandene Test im Klima-Wind-Kanal bei Rail Tec Arsenal Wien mit einem Erfüllungsgrad $> 91\%$ bei dem die Betriebsfähigkeit der HVAC 6709 bei Umgebungstemperaturen von -25 °C bis 45 °C bestätigt wurde.

Aufgrund zeitlicher Verzögerung und einzuhaltender Terminketten der Fahrzeughersteller zur Auslieferung der Fahrzeuge konnte ein Messtechnik einbau und eine folgende Felddatenerfassung im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden. Stattdessen wurden unter anderem basierend auf den Leistungsmessdaten Simulationsrechnungen durchgeführt. Im betrachteten Referenzfall wurden durch den Einsatz von R-744-Klimaanlagen mit Wärmepumpenfunktion im Vergleich zu konventionellen R-134a-Anlagen mit Elektroheizung Einsparungen im elektrischen Energieverbrauch in Höhe von 26 % erzielt.

Unter Berücksichtigung der identifizierten Optimierungsmaßnahmen der Anlagen ist zu erwarten, dass deutlich höhere Energieeinsparungen möglich sind.

Literatur

- [1] Deutsche Bahn: CO2 MAC in German Trains (<https://www.ejarn.com/article/detail/16868>)
- [2] Liebherr-Transportation Systems GmbH, Gebrauchsmusterschrift DE202006014246
- [3] Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB), VDB-Leitfaden, R744-Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen: technische Auslegungsgrundlagen und Sicherheitsnachweise, Berlin 2017
http://bahnindustrie.info/fileadmin/Leitfaeden_DE/1703__VDB-Leitfaden_Klimatechnik.pdf
- [4] Friedrich, R.; Krawanja, A.: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Bahn-Klimaanlagen mit den Kältemitteln R729 (Luft) und R134a, Abschlussfachgespräch zum Umwelt-Forschungsprojekt zur Klimatisierung von Zügen, Berlin, 25. Januar 2018
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/04_wirtschaftlichkeit_sanalyse_-_r_friedrich_-_a_krawanja_liebherr.pdf
- [5] UBA: Chemikalieneintrag in Gewässer vermindern – Trifluoracetat (TFA) als persistente und mobile Substanz mit vielen Quellen - Quellen, Eintragspfade, Umweltkonzentrationen von TFA und regulatorische Ansätze, Berlin 2021.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chemikalieneintrag-in-gewaesser-vermindern>
- [6] Sonnekalb, M.; Laber, W.: Heizung und Klimatisierung im E-Bus – Aktuell verfügbare Technologien und weitere Effizienzpotentiale, 2. Energietechnologieforum Hessen: Energiewende durch innovative Energietechnologien „Made in Hessen“, 2. Dezember 2015 in Hanau.
https://www.innovationsfoerderung-hessen.de/mm/VORTRAG_4_Hessenagentur_2015_Konvekta_HEAG_Kompatibilittsmodus.pdf
- [7] <https://zdopravy.cz/obrazem-skoda-nechala-ve-vidni-zmrazit-a-zasnezit-prvni-tramvaj-pro-bonn-124354/>
- [8] N.N.; Cenelec; Bahnanwendungen - Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen, Prüfungen für Schwingen und Schocken, IEC/EN 61373, Deutsche Fassung, Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung, Brüssel, 2010