

TEXTE

119/2019

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

TEXTE 119/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 95 311 0
FB000132

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

von

Reinhard Aigner, Andreas Krawanja, Dr. Christian Luger, Maik Wollweber
Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG, Korneuburg

Dr. Peter Claus, Leonhard Hörth, Dr. Mario Streng
DB Systemtechnik GmbH, München

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG
Liebherrstrasse 1
2100 Korneuburg
Österreich

Abschlussdatum:

Oktober 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Gabriele Hoffmann

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2019

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

Kurzbeschreibung

In bisherigen Klimasystemen bei Bahnfahrzeugen werden vorrangig fluorierte Kältemittel verwendet, die wegen ihrer klimaschädlichen Wirkung in den nächsten Jahren verknappt werden. Motiviert durch die Notwendigkeit, umweltfreundliche und nachhaltig verfügbare Techniken für die Klimatisierung von Personenzügen einzusetzen, wurde von Liebherr und der Deutschen Bahn ein Vergleich des Jahresenergiebedarfs und der Gesamtbetriebskosten von Bahn-Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) mit den Kältemitteln Luft und R134a durchgeführt. Betrachtet wurden im Betrieb eingesetzte sowie weiterentwickelte Anlagen. Im Betrieb gewonnene Messdaten und Modellrechnungen waren die Basis für die Bewertung. Für den mittleren primären Kühl-Jahresenergiebedarf zeigten die Air-Cycle Anlagen, die das Kältemittel Luft verwenden, Einsparungen von 16% bzw. 28% gegenüber den betrachteten R134a-Anlagen. Die höheren Investitionskosten der Air-Cycle Anlagen werden von niedrigeren Betriebskosten, insbesondere niedrigeren Energiekosten, und geringeren Wartungskosten kompensiert, sodass sich Air-Cycle Anlagen in der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit vorteilhaft darstellt. Air-Cycle Anlagen sind daher eine umweltfreundliche, wirtschaftliche und erprobte Lösung für die Kältemittelproblematik.

Abstract

Current air-conditioning systems for railway vehicles predominantly use fluorinated refrigerants, which will be phased down in the coming years because of their damaging impact on the climate. Motivated by the need to implement environmentally friendly technologies that will be available for the long term for the air conditioning of passenger trains, Liebherr and Deutsche Bahn conducted a comparison of the annual energy consumption and the Total Cost of Ownership (TCO) of railway heating, ventilation, and air-conditioning systems (HVAC) using air and R-134a as refrigerants. Systems in operation and advanced systems were both assessed. Measurement data and model calculations obtained from systems in operation formed the basis for evaluation. For the average primary annual energy consumption for cooling, the air-cycle systems, which use air as refrigerant, had savings of 16% and 28%, respectively, compared to the R-134a systems that were considered. The higher investment costs of air-cycle systems are compensated by lower operating costs, particularly lower energy costs, and by lower maintenance costs, so that air-cycle systems have the advantage in terms of economic efficiency. As a result, air-cycle systems are an environmentally friendly, economical and reliable solution to the refrigerant issue.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	16
Zusammenfassung	18
Summary	29
1 EINFÜHRUNG	40
1.1 Aufgabenstellung	41
1.2 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens.....	41
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	42
1.3.1 AP 1: Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms	42
1.3.2 AP 2: Durchführung des Messprogramms	42
1.3.3 AP 3: Vergleich mit anderen Klimaanlage.....	42
1.3.4 AP 4: Auswertung des Messprogramms	43
1.3.5 AP 5: Fachgespräch und Veröffentlichung.....	43
1.3.6 Zeitplan.....	43
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn	44
1.4.1 Kompaktklimagerät im ICE 3 (Luft)	44
1.4.2 Klimaanlage im ICE-T (R134a)	49
1.4.3 Vorangegangene Messungen zur Bestimmung des Energieverbrauchs.....	51
1.5 Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern	53
2 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DES PROJEKTES.....	54
2.1 Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms (AP1)	54
2.1.1 Messkonzept	54
2.1.2 Vorbereitung der zusätzlichen Messtechnik.....	55
2.1.2.1 Temperatur und Feuchte der Frischluft	56
2.1.2.2 Temperatur und Feuchte der Umluft	56
2.1.2.3 Position, Geschwindigkeit und Richtung des Zuges	57
2.1.2.4 Sonneneinstrahlung	58
2.1.2.5 Schaltschrank	58
2.1.3 Einbau der Messtechnik.....	62
2.1.3.1 Einbau der Schaltschrankmodule	63
2.1.3.2 Einbau der Temperatur- und Feuchtesensoren	65
2.1.3.3 Einbau des Besetzungszählers	65
2.1.3.4 Einbau der Solarsensoren	66

2.1.4	Kalibrierung der Messtechnik	67
2.1.5	Konzept zur Verarbeitung und Auswertung der Felddaten	71
2.1.5.1	Speicherung der Daten	73
2.1.5.2	Visualisierung der Daten zur manuellen Begutachtung und Verarbeitung	73
2.1.5.3	Programmgestützte Verarbeitung der Daten	75
2.1.6	Erstellung der Auswertungs-Software	75
2.2	Durchführung der Messung (AP2)	76
2.2.1	Datenaufzeichnung und -verarbeitung	78
2.2.2	Reparaturen der Messtechnik.....	78
2.2.2.1	Reparatur der Solarsensoren am 20. April 2016	79
2.2.2.2	Reparatur der Besetzungszählung am 23. Juni 2016	80
2.2.3	Modifikationen und Ergänzungen der Messtechnik	81
2.2.3.1	Austausch der UMTS-Router am 20. April 2016	81
2.2.3.2	Einbau eines zweiten GPS-Empfängers am 20. April 2016	84
2.2.3.3	Verbesserung der Datenaufzeichnung und -sicherung im Oktober 2016	85
2.2.4	Verfügbarkeit der Datenaufzeichnung.....	85
2.2.5	Organisatorisches.....	88
2.3	Auswertung des Messprogramms (AP 4)	89
2.3.1	Erstellung der Auswertungs-Software	89
2.3.2	Betrachtungen zu Leistungs- und Energiebedarf der Air-Cycle Anlage des ICE 3.....	90
2.3.2.1	Methodik	90
2.3.2.2	Überblick über vorhandene Messsignale als Grundlage der Untersuchungen und Messdatenverarbeitung	91
2.3.2.3	Aufbereitung von Messsignalen	92
2.3.2.4	Signal der Passagierbesetzung in TW7	93
2.3.2.5	Signal der Sonnenstrahlung in W/m ² und Abbildung von DWD Daten	93
2.3.2.6	Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme	94
2.3.2.7	Luftseitig eingebrachte Heizleistung und entzogene Kühlleistung	95
2.3.2.8	Ergebnisse aus der Betrachtung beispielhafter Zugfahrten aus dem Sommer- und Winterbetrieb	97
2.3.3	Vergleich verschiedener HLK-Systeme in Bezug auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf	102
2.3.3.1	Einleitung und Motivation	102
2.3.3.2	Einflussfaktoren auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf	102
2.3.3.3	Primärer, sekundärer und gesamter Leistungs-/Energiebedarf	103
2.3.3.4	HLK-Systeme für den Vergleich	104
2.3.3.5	Datenbasis	109

2.3.3.6	Methodik des Vergleichs	117
2.3.3.7	Zusammenfassung der Unterschiede zwischen den Auswertungen in diesem Projekt und der Arbeit von Meister (Meister, 2012)	136
2.3.4	Vergleich verschiedener HLK-Systeme in Bezug auf den Wartungsaufwand	138
2.3.4.1	Umfang der Instandhaltungstätigkeiten bei Klimasystem ICE 3	138
2.3.4.2	Umfang der betrachteten Instandhaltungstätigkeiten bei ICE-T	141
2.3.4.3	Erhobene Instandhaltungsdaten bei ICE 3 und ICE-T im Kostenvergleich	142
2.4	Vergleich mit anderen Klimaanlage (AP 3)	143
2.4.1	Vergleich des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfs verschiedener HLK-Systeme	143
2.4.1.1	Vergleich des primären Leistungsbedarfs gemäß Klasseneinteilung	143
2.4.1.2	Vergleich des Jahresenergiebedarfs	147
2.4.2	Gesamtanalyse der Lebenszykluskosten -LCC und Gesamtbetriebskosten -TCO	165
2.4.2.1	Aufbau des Werkzeugs zur Kostenanalyse - Cost Assessment Tool (CAT)	165
2.4.2.2	Konkreter Vergleich der HLK-Systeme	166
2.4.2.3	Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse	167
2.4.2.4	Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse	171
2.4.3	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	174
2.4.3.1	Ergebnisse zum Leistungs- und Energiebedarf	174
2.4.3.2	Fazit zur Wirtschaftlichkeit	175
2.5	Fachgespräch und Veröffentlichung (AP 5)	176
2.6	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	177
2.7	Verwertbarkeit der Ergebnisse	177
2.7.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	177
2.7.2	Wissenschaftliche Erfolgsaussichten.....	178
2.7.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	178
2.8	Fortschritte bei anderen Stellen	178
2.9	Veröffentlichungen	178
3	Quellenverzeichnis.....	179

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) (Vergleichssystem 1) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich (Vergleichssystem 2).....	23
Abbildung 2:	Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess (Vergleichssystem 6) und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich (Vergleichssystem 3).....	24
Figure 3:	Comparison of primary annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system ACS (ICE 3) (system 1) and the vapour cycle system VCS (ICE-T) (system 2)	34
Figure 4:	Comparison of the primary annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system (ACS) with direct loop (system 6) and the vapour cycle system (VCS) with variable-speed compressor and refrigerant bypass (system 3)	35
Abbildung 5:	Grafische Darstellung der Arbeitspakete in der Projektstruktur.....	42
Abbildung 6:	Zeitplanung	43
Abbildung 7:	Foto vom Pressetermin in München am 27. Oktober 2016	44
Abbildung 8:	Foto vom Pressetermin in München am 27. Oktober 2016	44
Abbildung 9:	Luftgestütztes Kompaktklimagerät für den ICE 3	45
Abbildung 10:	Schematische Darstellung von Klima- und Prozessluftkreis	45
Abbildung 11:	Luftführung im Kompaktklimagerät	46
Abbildung 12:	ICE 3 - Baureihe 403, Triebzug 301 der Deutschen Bahn AG	47
Abbildung 13:	Wagenübersicht des ersten Halbzuges ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 (Wagen 1 bis 4).....	48
Abbildung 14:	Wagenübersicht des zweiten Halbzuges ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 (Wagen 5 bis 8)	48
Abbildung 15:	Klimagerät ICE-T – Kompressionskälteanlage mit dem Kältemittel R134a	49
Abbildung 16:	Schematische Darstellung von Kältemittelkreislauf und –komponenten der Kompressionskälteanlage mit dem Kältemittel R134a	50
Abbildung 17:	Wagenübersicht des Vergleichszuges ICE-T	51
Abbildung 18:	Jahresenergieverbrauch für Kälteerzeugung pro Sitzplatz gem. vorangegangener Studie.....	52
Abbildung 19:	Positionen der eingebauten Sensorik und Anschlüsse im Kompaktklimagerät Nr. 4 im Dach des ICE 3 - Wagens TW7.....	55
Abbildung 20:	Position des Temperatur- und Feuchtesensors im Kompaktklimagerät	56
Abbildung 21:	Bildliche Darstellung der Position des Temperatur- und Feuchtesensors in der Umluft	57

Abbildung 22:	Im Kompaktklimagerät eingebautes GPS-Modul inklusive Blechhalter	57
Abbildung 23:	Solarsensoren: Zwei vorbereitete Anschlussstellen für die Solarsensoren (links), die beiden Solarsensoren mit Kabelenden (rechts oben), ein einzelner Solarsenor (rechts unten).....	58
Abbildung 24:	Einbaustudien der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank zum Kompaktklimagerät im Wagen TW7.....	59
Abbildung 25:	Bauraumuntersuchungen der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank.....	60
Abbildung 26:	Probearbeit der zusätzlichen Messtechnik (Module) im Schaltschrank (liegend).....	60
Abbildung 27:	Ethernet Switch (links), barometrischer Luftdrucksensor (rechts) und Zählleinheit des Besetzungszählers (mittig) – Probearbeit.....	61
Abbildung 28:	MVB (Feldbus)-Ausleseeinheit (oben links), zusätzlicher Klimarechner (BK3, Mitte unten), Stromversorgung der Sensorik (oben rechts) und USB-Verteiler (unten rechts) – Probearbeit.....	61
Abbildung 29:	Im Dach des Wagens TW7 des ICE 3 - BR 403 eingebautes Kompaktklimagerät Nr. 4.....	62
Abbildung 30:	Schaltschrankmodul mit Messtechnik für den Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403,.....	63
Abbildung 31:	Eingebautes und angeschlossenes oberes Schaltschrankmodul im Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403.....	63
Abbildung 32:	Eingebautes und angeschlossenes unteres Schaltschrankmodul im Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403.....	64
Abbildung 33:	Schaltschrank mit beiden Zusatzmodulen an der Tür und Verkabelung ICE 3 - BR 403, wagen TW 7.....	64
Abbildung 34:	Eingebauter Temperatur- und Feuchtesensor im ICE 3 - BR 403, Wagen TW2 (analog zum Wagen TW7).....	65
Abbildung 35:	Eingebaute Sensoren der Besetzungszählung in den Durchgängen des Wagens TW7 (links oben und rechts) und ein einzelner Sensor (links unten)	66
Abbildung 36:	Einbauzeichnung zu den beiden Dachsensoren (Sonneneinstrahlung)	66
Abbildung 37:	Maske zur Kalibrierung der Analogeingänge in den Wagen TW7 und TW2.....	67
Abbildung 38:	Maske zur Kalibrierung und Überprüfung der Besetzungszählung	68
Abbildung 39:	Maske zur Überprüfung ausgelesenen MVB(Feldbus)-Daten	68
Abbildung 40:	Online-Zugriff auf die zusätzlichen Messdaten (Ausschnitt der Anzeigemaske).....	69
Abbildung 41:	Online-Zugriff auf die Position und Geschwindigkeit des Zuges	69
Abbildung 42:	Testaufbau zur Kalibrierung der Solarsensoren (Ausschnitt)	70
Abbildung 43:	Vergleich PV-Zelle und Sternpyranometer	71

Abbildung 44:	Konzept des Datenflusses und der Verarbeitung der Felddaten.....	72
Abbildung 45:	Bildschirmabbild im Programm Grafana: Beispiel einer grafischen Anzeige (Plot).....	74
Abbildung 46:	Bildschirmabbild im Programm Grafana: Dialogseite zur einfachen und komfortablen Auswahl der grafischen Datenanzeige (Dashboard)	75
Abbildung 47:	ICE-Netz 2015	77
Abbildung 48:	Defekte Solarzelle (Kabelbruch) am Klimagerät des ICE 3 Wagens TW7	79
Abbildung 49:	Einbau der neuen Solarzelle im ICE 3 Wagen TW7 mit zusätzlicher Fixierung des Kabels	79
Abbildung 50:	Beschädigung am Sensorkabel des DILAX-Sensors zur Besetzungszählung	80
Abbildung 51:	Beschädigungen der DILAX-Sensoren zur Besetzungszählung	80
Abbildung 52:	Zwei neue Sensoren zur Besetzungszählung und ein neues Verbindungskabel im eingebauten Zustand.....	81
Abbildung 53:	3G/UTMS-Router PEPWAVE MAX BR1	82
Abbildung 54:	Router im eingebauten Zustand	82
Abbildung 55:	Einbau des neuen Routers (schwarz) und Entfall des USB-Hubs (blau)	83
Abbildung 56:	Einbau der neuen Mobilfunkantennen im Kompaktklimagerät im ICE 3, Wagen TW2	83
Abbildung 57:	Lage der neuen Mobilfunkantennen im Zug (auf Höhe der Frischluftgitter)	84
Abbildung 58:	Gesamtübersicht des modifizierten Schaltschranks im ICE 3 Wagen TW7 nach den ersten Anpassungen	84
Abbildung 59:	Einbauuntersuchung SSD-Speicher im Schaltschrank	85
Abbildung 60:	Exemplarische Auswertung der Datenaufzeichnung für Oktober 2015.....	86
Abbildung 61:	Datenaufzeichnung für März 2016 mit Datenlücke durch fehlerhafte Kommunikation zwischen elektronischen Bauteilen.....	86
Abbildung 62:	Datenlücke im April 2016 durch Fristarbeiten am Zug.....	87
Abbildung 63:	Datenlücke im August 2016 durch fehlerhafte Serverkommunikation.....	87
Abbildung 64:	Aufkleber zum Projekt am Tz301 „Freiburg im Breisgau“	88
Abbildung 65:	Übersicht über den implementierten Ablauf zur zugfahrtenbasierten Datenverarbeitung.....	91
Abbildung 66:	Schematische Darstellung der Abbildung von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes auf den Ort des Zuges.....	94
Abbildung 67:	Schematische Darstellung des Luftpfades im HLK-System mit integrierten Komponenten und relevanten Messstellen	96
Abbildung 68:	Temperaturverläufe der Außentemperatur für die Winterfahrt (links) und die Sommerfahrt (rechts)	97

Abbildung 69:	Passagieranzahl der Winterfahrt (links), relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft bei der Sommerfahrt (rechts).....	98
Abbildung 70:	Beispielhafte Visualisierung des Streckenverlaufes mit Darstellung der ermittelten Passagierbesetzung	99
Abbildung 71:	Elektrisch eingebrachte Heizleistungen bei exemplarischer Winterfahrt.....	99
Abbildung 72:	Vergleich von elektrisch eingebrachter Leistung am Hauptheizregister (schwarz) mit der luftseitig ermittelten Leistung (rot) über der Tageszeit in Stunden.....	100
Abbildung 73:	Kälteleistung und elektrische Leistungsaufnahme in kW.....	101
Abbildung 74:	Schema eines Personenschienenfahrzeuges mit HLK-System sowie Lasten und Einflussfaktoren	103
Abbildung 75:	Schema der betrachteten Air-Cycle Anlage mit dem offenen Prozessluftkreis (Vergleichssystem 1)	105
Abbildung 76:	Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und Gegenheizen für den niedrigen Teillastbereich (Vergleichssystem 2).....	106
Abbildung 77:	Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und gedachtem Bypass für den niedrigen Teillastbereich (Vergleichssystem 3).....	107
Abbildung 78:	Schema der Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess	109
Abbildung 79:	Datenbasis für ICE-T (Kaltdampfanlage) und ICE 3 (Air-Cycle Anlage)	111
Abbildung 80:	Untersucher ICE 3 Mittelwagen	111
Abbildung 81:	Punktvolke der gültigen Datenpunkte der Messungen am ICE 3.....	112
Abbildung 82:	Anzahl der Betriebspunkte aus gültigen Zugfahrten dargestellt pro Stunde für einen 24-Stunden-Tag.....	113
Abbildung 83:	Untersucher ICE-T Mittelwagen	113
Abbildung 84:	Solltemperatur (links) sowie Differenz zwischen Soll- und Isttemperatur für ICE-T (Absolutwert) rechts.....	115
Abbildung 85:	Punktvolke der gültigen Datenpunkte aus ICE-T Daten	115
Abbildung 86:	Schematische Darstellung zum Anlagenvergleich in Bezug auf den Leistungs- und Energiebedarf der Air-Cycle Anlage (ACS) des ICE 3 und der R134a-Kaltdampfanlage des ICE-T	117
Abbildung 87:	Schematische Darstellung der Klasseneinteilung der punktweisen Messdaten	119
Abbildung 88:	Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3, Kühlen.....	121
Abbildung 89:	Klasseneinteilung der Messwerte für ICE-T mit Gegenheizen, Kühlen	122
Abbildung 90:	Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3, Heizen	123
Abbildung 91:	Ergebnisse der Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3 und ICE-T für Kühlbetrieb.....	124

Abbildung 92:	Ergebnisse der Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3 für Heizbetrieb	125
Abbildung 93:	Gewichtungsmatrix für den Kühlanteil.....	127
Abbildung 94:	Referenzstädte für meteorologische Daten [Google Maps]	128
Abbildung 95:	Temperaturverteilungen drei verschiedener Klimazonen in Deutschland im Vergleich (Daten aus DIN 4710, Betrachtung 24-Stunden-Tage).....	129
Abbildung 96:	Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Braunlage (kühl)	131
Abbildung 97:	Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Kassel (moderat)	131
Abbildung 98:	Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Mannheim (warm)	131
Abbildung 99:	Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf den erfassten Felddaten im ICE 3	132
Abbildung 100:	Temperaturverteilungen aus Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Städte Braunlage und Mannheim im Vergleich mit den DWD-Daten für die 2-Jahres-Messperiode am ICE-3 2016/2017	134
Abbildung 101:	Aufbau Klimasystem ICE 3	139
Abbildung 102:	Schema Klimasystem ICE 3	140
Abbildung 103:	Kompaktklimakompaktgerät ICE 3, 2. Bauserie	141
Abbildung 104:	Primärer Leistungsbedarf für Kühlen, Vergleich für Anlagen mit tatsächlichen Messdaten.....	144
Abbildung 105:	Primärer Leistungsbedarf für Heizen, Vergleich für Anlagen mit tatsächlichen Messdaten.....	145
Abbildung 106:	Primärer Leistungsbedarf für Kühlen, Vergleich für Anlagen mit Daten aus Modellen/Berechnung.....	146
Abbildung 107:	Primärer Leistungsbedarf für Heizen, Vergleich für Anlagen mit Daten aus Modellen/Berechnung.....	146
Abbildung 108:	Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich.....	148
Abbildung 109:	Primärer Jahresenergiebedarf im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich.....	149
Abbildung 110:	Summe des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich.....	150
Abbildung 111:	Sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich.....	153
Abbildung 112:	Summe von primärem und sekundärem Jahresenergiebedarf für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich	155

Abbildung 113:	Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich	157
Abbildung 114:	Primärer Jahresenergiebedarf im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich	158
Abbildung 115:	Summe des primären Jahresenergiebedarfs für Kühlen und Heizen für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich	159
Abbildung 116:	Sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich.....	162
Abbildung 117:	Primärer und sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich	164
Abbildung 118:	Aufbau des Kostenanalysewerkzeugs -Cost Assessment Tool (CAT).....	166
Abbildung 119:	Übersicht zum Systemvergleich mit dem Cost Assessment Tool (CAT)	167
Abbildung 120:	Datenbasis für das Modell für die Lebenszykluskosten (LCC)	169
Abbildung 121:	Vergleich A: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index.....	172
Abbildung 122:	Vergleich B: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index.....	174
Abbildung 123:	Programm des Fachgespräches zum Klimaanlageprojekt am 25. Januar 2018 in Berlin	177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich A von Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) auf der Basis von Felddaten	19
Tabelle 2:	Vergleich B von weiterentwickelten Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) auf der Datenbasis aus Modellen und Simulation	20
Table 3:	Comparison A of heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) based on field data	30
Table 4:	Comparison B of advanced heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) based on data from models and simulation.....	31
Tabelle 5:	Grundlegende Formeln zur Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme.....	95
Tabelle 6:	Übersicht über die beispielhaft betrachteten Zugfahrten im Winter und im Sommer	97
Tabelle 7:	Temperaturverteilungen des Testreferenzjahres im Vergleich mit der Verteilung der 2-Jahres-Messperiode	135
Tabelle 8:	Gegenüberstellung der jährlichen Wartungskosten von ICE-T und ICE 3	142
Tabelle 9:	Vergleich des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit der Kaltdampfanlageanlage (ICE-T).....	151
Tabelle 10:	Vergleich des sekundären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit der Kaltdampfanlage (ICE-T)	152
Tabelle 11:	Vergleich der Summe des primären und sekundären Jahresenergiebedarfs der Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit dem der Kaltdampfanlage (ICE-T)	154
Tabelle 12:	Vergleich des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass	160
Tabelle 13:	Vergleich des sekundären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass	161
Tabelle 14:	Vergleich des primären und sekundären Jahresenergiebedarfs in Summe für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass	163
Tabelle 15:	Jahresenergiebedarf für das Cost Assessment Tool (CAT) bezogen auf das Referenzfahrzeug auf Basis der Felddaten.....	168
Tabelle 16:	Vergleich A - Instandhaltungskosten für die Klimasysteme ICE-T und ICE 3 2. Bauserie im Referenzfahrzeug gemäß Berechnung im Cost Assessment Tool (CAT)	170

Tabelle 17:	Vergleich B - Instandhaltungskosten für drei optimierte Klimasysteme im Referenzfahrzeug gemäß Berechnung im Cost Assessment Tool (CAT)	170
Tabelle 18:	Vergleich A: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) – im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index.....	172
Tabelle 19:	Vergleich B: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index.....	173

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
3G	Mobilfunkstandard der dritten Generation
ACS	Air-cycle system / Air-Cycle Anlage, luftgestützte Klimaanlage
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface/ Programmierschnittstelle
Apmzf	klimatisierter 1.Klasse-Großraumwagen mit Lounge (8 Plätze)
Avmz	klimatisierter 1.Klasse-Wagen mit Abteil/Großraumbereich
BK3	Bezeichnung des aktuellen Klimarechners von LVF
Bpmbz	klimatisierter 2.Klasse-Großraumwagen, behindertengerecht
Bpmz	klimatisierter 2.Klasse-Großraumwagen
Bpmzf	klimatisierter 2.Klasse-Großraumwagen mit Lounge (10 Plätze)
BRmz	klimatisierter Restaurantwagen
Bvmz	klimatisierter 2.Klasse-Wagen mit Abteil- und Großraumbereich
COP	Coefficient of Performance / Leistungszahl (Indikator für Energieeffizienz)
DB	Deutsche Bahn AG
DWD	Deutscher Wetterdienst
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ENVIRONM	Umweltkosten
EW	Endwagen
F&E	Forschung und Entwicklung
GPS	Global Positioning System / Satellitenortungssystem
GSM	Global System for Mobile Communications / globales System für Mobilkommunikation
GUI	Graphic User Interface / Grafische Nutzeroberfläche
GWP	Global Warming Potential / Treibhauspotenzial
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatisierung
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning (siehe HLK)
HX	Heat Exchanger / Wärmeübertrager
ICE	InterCity Express
KKG	Kompaktklimagerät
KNN	künstliches neuronales Netz
LCC	Life Cycle Costs / Lebenszykluskosten
LVF	Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG
MACM	Motorized Air-Cycle Machine (siehe MKT)

MC	Maintenance Cost / Wartungskosten
MKT	Motorisierte Kühlturbine / Turbomaschine
MTBF	Mean Time Between Failures / mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen
MTTR	Mean Time To Repair/ mittlere Reparaturzeit nach Ausfall eines Systems
MVB	Multifunction Vehicle Bus / multifunktionaler Feldbus
MW	Mittelwagen
NRC	Non Recurring Cost / Einmalkosten
OC	Operating Cost / Energiekosten
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PAX	Passengers / Passagiere
PV	Photovoltaik
RC	Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten
SSD	Solid State Drive / Halbleiterlaufwerk (Speichermedium mit schnellen Zugriffszeiten)
SW	Stromrichterwagen
TCO	Total Cost of Ownership / Gesamtkosten des Betriebs
TRY	Testreferenzjahr
TW	Trafowagen
Tz	Triebzug
UBA	Umweltbundesamt
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System / universeller Mobilfunkstandard
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change/ Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
USB	Universal Serial Bus / universeller serieller Bus (Standard für Datenübertragung an Schnittstellen zwischen elektronischen Geräten)
VCS	Vapor Cycle System, Kaltdampfanlage (auch Kompressionskälteanlage)

Zusammenfassung¹

Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit zählen heute zu den Schlüsselthemen bei Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) in Personenschienenfahrzeugen.

Typischerweise werden bis zu 30% des Gesamtenergieverbrauchs eines Zuges für die Klimatisierung aufgewendet (Schmitt & Berlitz, 2014). Damit ist die Senkung des Energiebedarfs ein starker Hebel zur Senkung der Betriebskosten (Energiekosten) und der Umweltbelastung durch die Energiebereitstellung.

Die heute in der Bahnklimatisierung hauptsächlich eingesetzten teilfluorierten Kältemittel (HFKW) R134a und R407C haben ein hohes direktes Treibhauspotenzial und tragen damit zur Erderwärmung bei. Zur Verminderung der HFKW-Emissionen wird seit 2016 auf Basis der europäischen F-Gas Verordnung (EU, 2014) schrittweise die am Markt verfügbare HFKW-Menge gesenkt, bis zum Jahr 2030 auf nur noch 21% der jeweils von der EU festgelegten Gesamtmenge.

Die Verknappung der HFKW-Kältemittel hat bereits zu drastischen Erhöhungen der Kältemittelpreise geführt, die künftige Preisentwicklung ist noch völlig ungewiss. Zudem ist die Verfügbarkeit von Kältemitteln gesunken, sodass auch Bahnbetreiber Schwierigkeiten haben, die erforderlichen Mengen überhaupt beziehen zu können.

Aktuell verfügbare fluorierte Kältemittel mit niedrigerem GWP, wie sie z.B. für die Automobilindustrie als Alternativen betrachtet werden, kommen für die Bahnindustrie wegen der Brennbarkeit oder Toxizität nicht infrage.

Um auch künftig die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen ohne Einschränkungen sicherzustellen, gibt es aus heutiger Sicht nur zwei umweltfreundliche und langfristig nachhaltige Alternativen:

- ▶ Klimaanlagen mit dem natürlichen Kältemittel Luft (praxisbewährtes Air-Cycle-System)
- ▶ Klimaanlagen mit R744 (CO₂) als Kältemittel

Das Air-Cycle System stand im Fokus dieses Forschungsprojektes, das von Liebherr-Transportation Systems in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn - DB Systemtechnik GmbH und DB Fernverkehr AG - im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert wurde (Claus, 2016). Ziel war es, insbesondere basierend auf im realen Betrieb gewonnenen Messdaten, den Energieverbrauch und die Gesamtbetriebskosten der Air-Cycle-Anlage zu ermitteln und eine Gegenüberstellung zu Anlagen mit konventionellen HFKW-Kältemitteln vorzunehmen.

Im ersten Schritt wurde in einem ICE 3 Zug der Deutschen Bahn, der mit neuen Air-Cycle Anlagen ausgerüstet worden war, zusätzliche Messtechnik und Systeme zur Betriebsdatenerfassung und Übertragung installiert. Über 2 Jahre wurden dann, während der im Zug im üblichen Fahrgastverkehr unterwegs war, kontinuierlich die Betriebsdaten aufgezeichnet und an eine stationäre Datenbank übermittelt. Daran schloss sich eine umfangreiche Datenaufbereitung.

Danach wurde, unter Verwendung der ausgewerteten Daten, der Jahresenergiebedarf verschiedener HLK-Systeme analysiert. Für den primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb zeigte sich im Mittel über die betrachteten Klimazonen eine Einsparung von 28% für eine Air-Cycle-Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3) im Vergleich zu einer R134a-Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und optionalem Gegenheizen (ICE-T). Für die weiterentwickelte Air-Cycle-Anlage mit Überdruck-

¹ Diese Zusammenfassung wurde in ähnlicher Form in (Luger et al., 2018) bzw. in (Krawanja et al., 2018) veröffentlicht.

prozess (Simulation) ergab sich eine Einsparung von 16% im Vergleich zu einer verbesserten Kalt-dampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass (Rechnung). Damit zeigte sich hinsichtlich des Jahresenergiebedarfs für den Kühlbetrieb ein klarer Vorteil der Air-Cycle-Technologie.

Unter Berücksichtigung des ermittelten Energiebedarfs wurde die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen HLK-Systeme verglichen. In der Kostenanalyse wurden laufende Beschaffungskosten, Einmalkosten, Instandhaltungskosten, Energiekosten und Umweltkosten betrachtet.

Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssysteme (HLK-Systeme) für den Vergleich

Die in diesem Projekt durchgeführten Vergleiche A und B von Bahn-HLK-Systemen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt und die Anlagen sind kurz charakterisiert. Die außerordentliche Nummerierung der Anlagen 1, 2, 6 und 3 ergibt sich aus der Reihenfolge, in der die Anlagen im ausführlichen Bericht betrachtet wurden.

Tabelle 1: Vergleich A von Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) auf der Basis von Felddaten

Vergleichssystem 1: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess und drehzahlgeregelter Turbomaschine	Vergleichssystem 2: Kaltdampfanlage (VCS, R134a) mit drehzahlgeregeltem Verdichter & Gegenheizen
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kältemittel Luft (natürlich/umweltfreundlich) ▶ Im Einsatz bei ICE 3 der DB ▶ Felddaten aus dem vorliegenden Projekt 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kältemittel R134 (treibhauswirksam!) ▶ Im Einsatz bei ICE-T der DB ▶ Felddaten von DB erfasst und bereitgestellt

Die Anlagenschemata sind hier nur zur Orientierung eingefügt, sie sind vergrößert und gut lesbar in den Abbildungen 75 und 76 zu finden.

Tabelle 2: Vergleich B von weiterentwickelten Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen) auf der Datenbasis aus Modellen und Simulation

Vergleichssystem 6: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess und drehzahl geregelter Turbomaschine	Vergleichssystem 3: Kaldampfanlage (VCS, R134a) mit drehzahl geregeltem Verdichter und Kältemittelbypass
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kältemittel Luft (natürlich/umweltfreundlich) ▶ neuartige optimierte Liebherr-Technologie ▶ Daten aus Simulation mit Liebherr-Software EOLE 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kältemittel R134 (hohes Treibhauspotential) ▶ Bypass für niedrigen Teillastbereich angenommen (Modell) ▶ Daten abgeleitet aus ICE-T Felddaten

Die Anlagenschemata sind hier nur zur Orientierung eingefügt, sie sind vergrößert und gut lesbar in den Abbildungen 78 und 77 zu finden.

Für den Vergleich der Vergleichssysteme 1 und 2 standen Felddaten zur Verfügung, für die Vergleichssysteme 6 und 3 war dies nicht der Fall. Deshalb wurden für die Vergleichssysteme 6 und 3 relevante Größen auf Basis von Annahmen und Modellen abgeleitet oder berechnet. Von (Meister, 2012) wurde das Vergleichssystem 1 mit dem Vergleichssystem 2 verglichen. Der aktuelle Vergleich lehnt sich an den von (Meister, 2012) durchgeführten an und erweitert ihn.

Bei den vier hier betrachteten HLK-Systemen besteht technologisch kein Unterschied hinsichtlich des Heizbetriebes. Nicht verfügbare Daten zum Heizbetrieb für die Vergleichssysteme 2, 3 und 6 konnten daher aus Daten für Vergleichssystem 1 abgeleitet werden.

Wenn ausreichend Daten vorliegen, ist zukünftig auch ein Vergleich einer Kaldampfanlage mit dem natürlichen Kältemittel Kohlendioxid (R744) möglich.

Analysen und Vergleiche zum Leistungs- und Energiebedarf

Der elektrische Energiebedarf ist ein wesentlicher Faktor in einer wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen): Der Energiebedarf führt zu Betriebskosten (Energiekosten) und – je nach Energiemix unterschiedlich hohen – Umweltbelastungen/Emissionen durch die Energiebereitstellung. Daher wurden die verschiedenen Bahn-HLK-Systeme hinsichtlich ihres Energiebedarfs verglichen.

Der Leistungs- bzw. Energiebedarf eines Bahn-HLK-Systems ist die Summe aus dem primären Bedarf für insbesondere Heizen, Kühlen und Luftbewegung und dem sekundären Bedarf für den Antrieb (Traktion), der vom Fahrzeugantrieb zu liefern ist. Für den primären Leistungs- bzw. Energiebedarf wurden, je nach Anlage, Verdichter oder Turbomaschine, Heizregister, Zuluft-Lüfter, Kondensator-Lüfter, Kühl-Lüfter, Regler und Magnetlager-Regler betrachtet.

Der Traktionsbedarf infolge der Masse des HLK-Systems wurde wegen des relativ geringen Anteils am Gesamtenergiebedarf und wegen der geringen Masseunterschiede der betrachteten Systeme nicht weiter berücksichtigt. Einen deutlich größeren Einfluss auf den Traktionsbedarf hat der Impulswiderstand, der von der ruhenden Luft, die in den bewegten Zug gesaugt wird, hervorgerufen wird. Der angesaugte Luftmassenstrom wurde für jede Anlage berücksichtigt. Zur Ermittlung wurde ein analytischer Ansatz verwendet.

Datenbasis

Die Felddaten für die Vergleichssysteme 1 und 2 wurden aufbereitet, auf gültige Werte gefiltert und über Softwarewerkzeuge (insbesondere Python und Matlab) verarbeitet. Für das Vergleichssystem 2 (ICE-T) wurde die Passagierbesetzung über ein stationäres Modell zur CO₂-Konzentration im Wagen und Prozessparameter zur Frischluftzufuhr abgeleitet. Für das Vergleichssystem 1 (ICE 3) wurden die Passagiere über optische Türsensoren gezählt. Der Datenstrom der Türsensoren wurde zur weiteren Verarbeitung in einzelne Zugfahrten gesplittet.

Die Schnittmenge der verfügbaren Variablen und Signale der Vergleichssysteme legte die Basis für den Vergleich fest: Die zwei unabhängigen Eingangsvariablen Außentemperatur und Besetzungsgrad der Vergleichssysteme wurden auf die Ausgangsvariable „elektrische Leistungsaufnahme im Komfortbetrieb Kühlen“ bezogen. Weitere an sich relevante Einflussfaktoren auf ein Bahn-HLK-System wie z.B. die Sonneneinstrahlung konnten damit nicht explizit berücksichtigt werden. Die Betriebsarten Vorkonditionierung und Abstellbetrieb wurden wegen unzureichender Datenlage nicht einbezogen.

Methodik des Vergleichs

Die Vergleichsmethodik orientierte sich an der Arbeit von (Meister, 2012) und umfasste folgende drei Schritte:

- ▶ Schritt 1: Klasseneinteilung der elektrischen Leistungsaufnahme
→ Modell der elektrischen Leistungsaufnahmen verschiedener HLK-Systeme
- ▶ Schritt 2: Gewichtung und Summierung der Klassen für konkrete Einsatzbedingungen
→ mittlere elektrische Leistungsaufnahme der HLK-Systeme
- ▶ Schritt 3: Skalierung auf typische Anzahl von Betriebsstunden/Jahr (6570 h/Jahr)
→ elektrischer Energiebedarf pro Jahr der HLK-Systeme

Schritt 1: Die ermittelten elektrischen Leistungsaufnahmen der verschiedenen Systeme wurden in Klassen nach Außentemperatur und Passagierbesetzung eingeordnet. Für die Außentemperatur in °C wurden 9 Klassen mit den Klassengrenzen {kleiner -5, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, größer 30} verwendet. Für die Passagierbesetzung in Prozent wurden 3 unterschiedlich breite Klassen mit den Klassengrenzen bei {0, 30, 50, größer 50} verwendet. Für jede Klasse wurde dann der mittlere Leistungswert (arithmetisches Mittel) berechnet.

Schritt 2: Das Ergebnis aus Schritt 1 ist je eine Matrix mit mittleren Leistungsaufnahmen im Kühlbetrieb und im Heizbetrieb für verschiedene HLK-Systeme. Diese Matrizen wurden mit zwei Arten von Gewichtungsmatrizen elementweise multipliziert und die so gewichteten Leistungswerte aufsummiert. Daraus ergeben sich die

- ▶ Matrix für Kühl- und Heizanteil und die
- ▶ Matrix für Verteilung der Modelleingangsparameter Temperatur und Passagierbesetzung.

Die Matrix für Kühl- und Heizanteil beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass in einer bestimmten Klasse Kühl- oder Heizbetrieb vorliegt. Die Matrix wurde aus Felddaten des Vergleichssystems 1 abgeleitet.

Die Matrix für die Verteilung der Modelleingangsparameter beschreibt, wie häufig einzelne Klassen unter unterschiedlich realistischen Einsatzbedingungen auftreten. Die Matrizen zur Verteilung der Modelleingangsparameter über Temperaturverteilungen wurden aus Testreferenzjahren für Braunlage (kühl), Kassel (moderat) und Mannheim (warm) unter der Berücksichtigung realistischer Einsatzzeiten im Komfortbetrieb von 04:00 bis 24:00 Uhr sowie über Daten zur Passagierzählung seitens der DB abgeleitet. Die Matrix zur Klassengewichtung wurde aus den Häufigkeiten der in diesem Projekt erfassten Felddaten abgeleitet.

Ergebnisse zum Vergleich des elektrischen Leistungsbedarfs

Es wurde ersichtlich, dass die Passagierbesetzung einen weitaus geringeren Einfluss auf die primäre elektrische Leistungsaufnahme hat als die Außentemperatur.

Bei sehr hohen Außentemperaturen im Bereich von 35°C lag die primäre elektrische Leistungsaufnahme bei den Air-Cycle Systemen deutlich über den primären Leistungsaufnahmen der Kaltdampfananlagen. Dies entspricht der Erwartung basierend auf theoretischen/physikalischen Überlegungen zu den jeweiligen Kreisprozessen. Für niedrigere Temperaturen im Bereich von z.B. 10°C oder 15°C waren die Air-Cycle Anlagen jedoch deutlich effizienter als die jeweils betrachteten Kaltdampfananlagen. In diesem Bereich zeigt sich der Vorteil einer energieeffizienten Teillastregelbarkeit. Die Kernfrage war nun, welche Temperaturbereiche im realistischen Betrieb mit welcher Häufigkeit auftreten.

Ergebnisse zum Vergleich des elektrischen Energiebedarfs

Der technische Unterschied zwischen den Systemen liegt im Kühlbetrieb. Vergleichsergebnisse zum primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb sind in Abbildung 1 (Vergleichssystem 1 gegenüber 2) und Abbildung 2 (Vergleichssystem 6 gegenüber 3) dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Komfortbetrieb der HLK-Anlagen (6570 Betriebsstunden pro Jahr), wobei der Komfortbetrieb den Passagierbetrieb umfasst. Die durch die Gewichtungsmatrizen zugrunde gelegten Einsatzbedingungen, insbesondere die Verteilung der Außentemperatur, beeinflussen das Ergebnis.

Die Temperaturverteilung während des Messzeitraumes war im Vergleich zur Temperaturverteilung aus den repräsentativen Jahren (Testreferenzjahren) zu höheren Temperaturen hin verschoben, wie eine Betrachtung von Temperaturmessdaten des Deutschen Wetterdienstes zeigte. Dies kommt zum Ausdruck im höheren primären Kühl-Jahresenergiebedarf für die Einsatzbedingungen „gemäß Felddaten“ verglichen mit den Einsatzbedingungen „kühl (Braunlage)“, „moderat (Kassel)“ und „warm (Mannheim)“. Die Air-Cycle Anlagen zeigen in den Vergleichen mit den jeweiligen Kaltdampfananlagen in allen Fällen Einsparungen. Je nach Einsatzbedingungen liegen die Einsparungen für Vergleichssystem 1 gegenüber 2 zwischen 21% und 36% und für Vergleichssystem 6 gegenüber 3 zwischen 5% u. 27%.

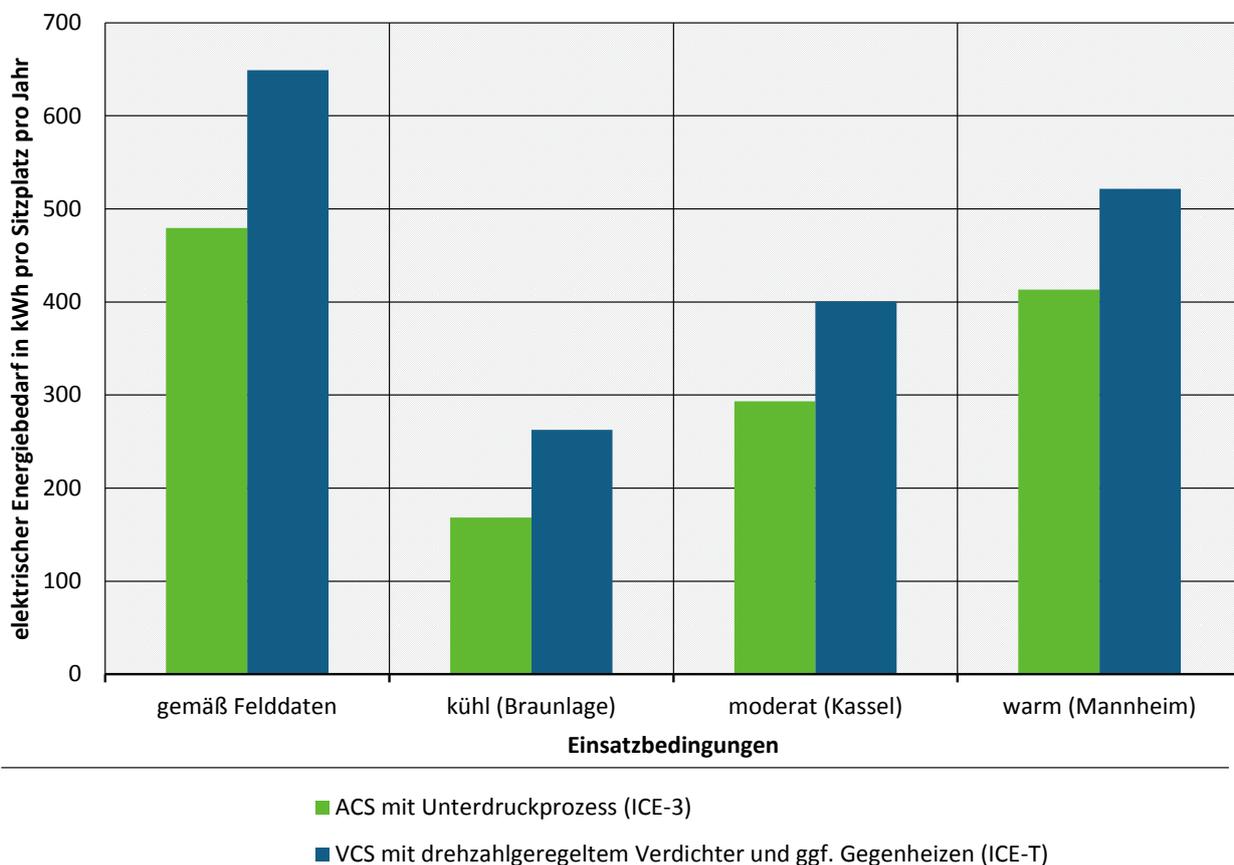
Wenn man annimmt, dass ein Zug in den Klimazonen kühl (Braunlage), moderat (Kassel) und warm (Mannheim) gleich häufig betrieben wird, ergibt sich im Mittel für den primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb eine Einsparung von 28% für eine Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3) im Vergleich zu einer Kaltdampfananlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und der Möglichkeit zum Gegenheizen für den niedrigen Teillastbereich (ICE-T). Für die weiterentwickelte Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess (Simulation) ergibt sich eine Einsparung von 16% im Vergleich zu einer Kaltdampfananlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass (Bypass rechnerisch angenommen).

(Meister, 2012) führte eine grundsätzlich ähnliche Untersuchung, jedoch mit teilweise unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Betriebsstunden, Verteilungen der Modelleingangsparameter (Gewichtungsmatrizen), untere Grenztemperatur in der Klasseneinteilung, etc.) durch. Die absoluten Zahlen zum primären Jahresenergiebedarf Kühlen unterschieden sich entsprechend, während die relativen Vergleiche sehr ähnliche Ergebnisse lieferten.

Die Hauptgründe für den Vorteil von Air-Cycle Anlagen beim primären Jahresenergiebedarf Kühlen liegen in der über den gesamten Leistungsbereich effizient regelbaren Kälteleistung der Air-Cycle Anlagen im Vergleich zu den betrachteten Kaltdampfanlagen und dem hohen Anteil an Lastanforderungen im unteren Leistungsbereich im Jahresverlauf für die betrachteten Einsatzbedingungen. Im sekundären Energiebedarf für das Kühlen zeigen sich wegen des geringeren Bedarfs an angesaugter Luft deutliche Einsparungen für Air-Cycle Anlagen von 56% bis 59% für Vergleichssystem 1 gegenüber 2 bzw. von 41% bis 46% für Vergleichssystem 6 gegenüber 3.

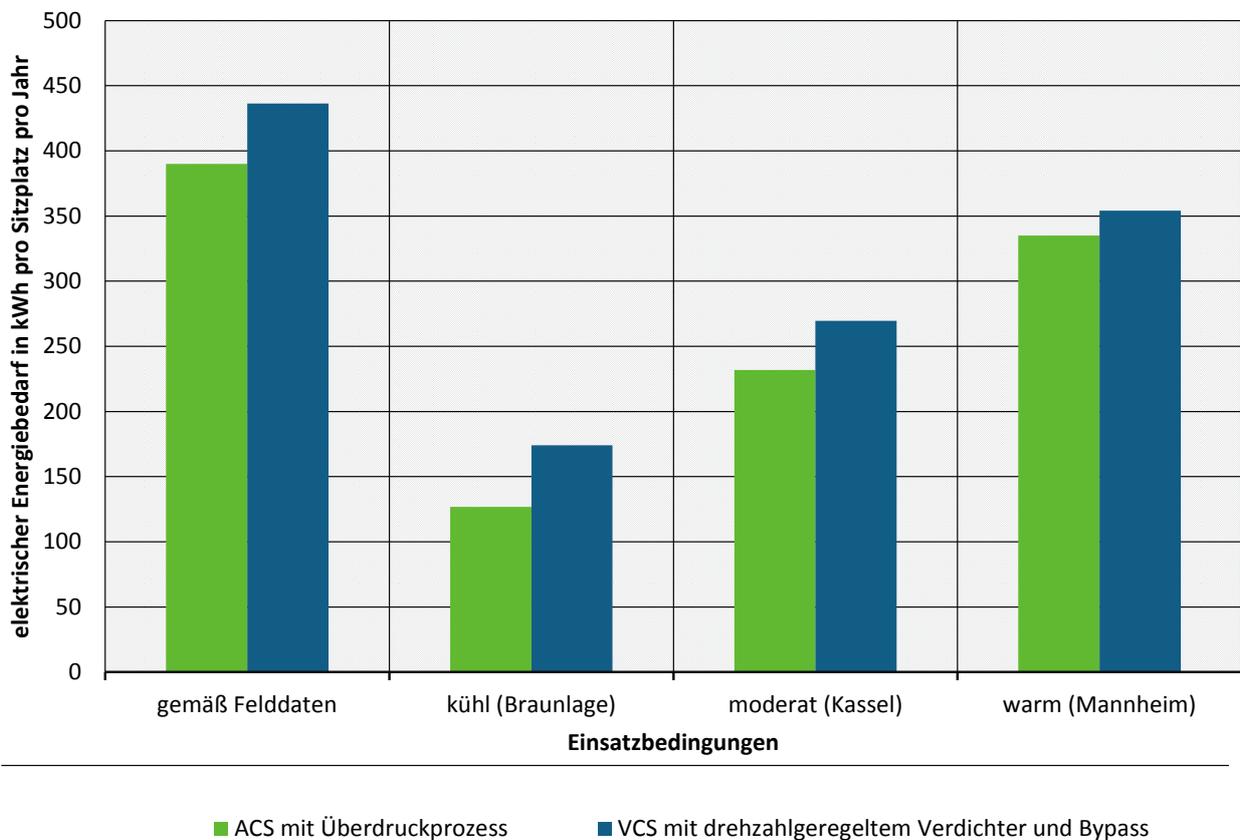
Im Heizbetrieb gibt es zwischen den Vergleichssystemen keine relevanten Unterschiede im primären und sekundären Energiebedarf. Die Einsparungen im Kühlbetrieb verringern den Gesamtjahresenergiebedarf; die prozentuale Verringerung des Gesamtjahresenergiebedarfs hängt ab vom Verhältnis zwischen Heiz- und Kühlbetrieb im betrachteten Jahr.

Abbildung 1: Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) (Vergleichssystem 1) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich (Vergleichssystem 2)



Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess (gem. Implementierung im ICE 3) und die Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und ggf. Gegenheizen (gem. Implementierung im ICE-T) (Datenbasis: Felddaten); Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr. Energiebedarf ist bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 2: Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess (Vergleichssystem 6) und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich (Vergleichssystem 3)



Vergleich des Jahresenergiebedarfs im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter (VCS) gemäß ICE-T und mit angenommenen Kältemittel-Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf ist bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Analysen und Vergleiche zur Wirtschaftlichkeit

Aufbau des Kostenanalysewerkzeugs CAT

Für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen HLK-Systeme wurde eine umfangreiche Kostenanalyse durchgeführt. Dafür wurde mit dem Cost Assessment Tool (CAT) ein Werkzeug verwendet, das in der Luftfahrt entwickelt wurde. CAT ermöglicht es, die Kosten verschiedener Ausrüstungsvarianten von Fluggeräten miteinander zu vergleichen. Ergebnis der Betrachtung sind dabei die in der Lebenszeit des Fluggeräts anfallenden Kosten („Total Cost of Ownership“) pro Flugstunde, die die jeweilige Ausrüstung verursacht. Mit CAT können sowohl bestehende Systeme als auch zukünftige Entwicklungen miteinander verglichen werden.

Bei der Anwendung des CAT für den Bahnbetrieb erfolgte die Darstellung der Kosten mit der Basis Euro pro Jahr je HLK-System (d.h. hier pro Wagen) bezogen auf die Lebenszeit des Eisenbahnfahrzeuges.

Zur Generierung der Ergebnisse werden in CAT verschiedene Werkzeuge vernetzt. Die Eingangsdaten kommen aus der Kostenplanung (Teil für Teil Kostenplanung) bzw. Stückliste, daraus werden die Herstellkosten und die Gerätemassen ermittelt. Auf Basis der Stücklisten werden im LCC Tool mit Zuverlässigkeitsdaten der Komponenten und Angaben des Betreibers zu Betriebsweise und Instandhaltung die Wartungskosten ermittelt.

Die Anlagensimulation greift auf Kennfelder der Komponenten zurück und errechnet mit dem Betriebsprofil des Fahrzeuges und den Klimadaten eine Prognose zum Energiebedarf.

Als Ergebnis erhält man für jede betrachtete Anlagenversion eine Aufteilung verschiedener Kostenarten auf Basis jährlicher Kosten pro HLK-Anlage:

- ▶ RC – Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten
- ▶ NRC – Non Recurring Cost / Einmalkosten (Entwicklungskosten, Engineering, Prototypenfertigung, Tests)
- ▶ MC – Maintenance Cost / Instandhaltungskosten
- ▶ OC – Operating Cost / Energiekosten
- ▶ Environm / Umweltkosten (CO₂-Steuer, Umrüstung auf umweltfreundliche Kältemittel)
- ▶ CAT Index / Summe aller Kosten pro Jahr

Grundsätzlich kann mit dem LCC Tool auch eine dynamische Analyse durchgeführt werden. Durch Vorgabe von Indizes für kalkulatorische Zinsen oder Preissteigerungsindizes, allgemein oder separat für Energie und Umweltkosten, können dynamische Entwicklungen untersucht werden. Im vorliegenden Projekt wurde dieser Punkt neutral betrachtet ohne Berücksichtigung von kalkulatorischen Zinsen, Entwicklung des Eigenkapitals des Operators, Inflation, Energiepreis- und Umweltkostenprogression.

Vergleich der HLK-Systeme

Ein wesentlicher Punkt des Vergleichs ist, dass für die HLK-Systeme gleiche Betriebsbedingungen simuliert werden. Alle Anlagen wurden deshalb auf ein Referenzfahrzeug bezogen, den Wagen TW7 des Triebzugs 301 (ICE 3, 2. Bauserie) aus der Felddatenanalyse.

Im ersten Schritt (Vergleich A) wurden die beiden seit vielen Jahren in Betrieb stehenden Anlagen verglichen bzw. auf das Referenzfahrzeug projiziert:

- ▶ ICE-T (Vergleichssystem 2)
- ▶ ICE 3, 2. Bauserie (Vergleichssystem 1)

Der zweite Schritt (Vergleich B) zeigt ein Zukunftsszenario. Hier wurden die R134a-Kaltdampfanlage und die Air-Cycle-Anlage mit den beschriebenen Verbesserungspotentialen sowie die luftgestützte Anlagentechnik der nächsten Generation gegenübergestellt:

- ▶ Konzept der ICE-T Anlage, Energie optimiert (Vergleichssystem 3)
- ▶ Konzept der ICE 3 Anlage, wartungsoptimiert (entspricht Vergleichssystem 1, im Wartungskostenmodell wurden jedoch mögliche Verbesserungen berücksichtigt, die bei der Analyse der Wartungsdaten ersichtlich wurden)
- ▶ Luftgestützte Anlage der nächsten Generation, offener Überdruckkreis (Vergleichssystem 6)

Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

NRC – Non Recurring Cost / Einmalkosten:

Die Entwicklungskosten wurden egalisiert, um einen fairen Vergleich von altbewährter und Zukunftstechnologie zu gewährleisten, da die Entwicklungskosten für eine neue Technologie nicht nur auf eine einzige Produktionsserie oder einen Wagentyp umgeschlagen werden. Es wurde angenommen, dass die Einmalkosten (NRC) sich für alle Systeme langfristig in einer Größenordnung von 1.000.000 € pro HLK-System und Fahrzeugtyp bewegen. Das vorliegende CAT Modell hat eine Seriengröße von 500 Wagen als Basis, auf die sich die angegebenen Einmalkosten verteilen.

RC – Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten:

Hier sind Richtpreise für das Referenzfahrzeug angeben, wie sie heute am Markt zu erwarten sind:

- ▶ RC Kaltdampfanlage: 40.000 € (ohne Kältemittelbypass)
- ▶ RC Kaltdampfanlage: 41.000 € (mit Kältemittelbypass)
- ▶ RC ACS Unterdruckprozess anlog ICE 3, 2.BS: 65.000 €
- ▶ RC ACS Überdruckkreis, „ACS next Generation“: 55.000 €

Die Herstellkosten für luftgestützte Systeme sind etwas höher als für Kaltdampfanlagen, wobei Potentiale zur Kostenverringerung durch Stückzahleffekte hier nicht ausgewiesen sind. Bei steigender Nachfrage nach luftgestützter Klimatechnik und erhöhter Auflage von entsprechenden Komponenten ist mit einer Verringerung der Stückkosten zu rechnen.

OC – Operating Cost / Energiekosten:

Zur Ermittlung der Energiekosten wurde der Jahresenergiebedarf gemäß Tabelle 15 herangezogen. Die Energiekosten für primären Energieverbrauch (Betrieb der HLK-Anlage) und sekundären Energieverbrauch (Fahrwiderstand durch Luftaustausch mit der Umgebung) wurden mit einem Stromtarif von 11,59 Euro Cent/kWh berechnet.

MC – Maintenance Cost / Wartungskosten:

Als Basis zur Ermittlung der Wartungskosten dient ein Modell, das, auf der Basis von Felddaten, Angaben vom Betreiber und der Datenbasis vom Liebherr Kundenservice, die korrektiven und präventiven Wartungskosten für das Referenzfahrzeug ausweist.

Die Eingangsgrößen sind:

- ▶ Betriebsstunden für Kühlen und Heizen für das Referenzfahrzeug gemäß Felddatenanalyse
- ▶ Stundensatz 90 €/h für Arbeit und Infrastruktur gemäß Betreiber DB AG
- ▶ Anzahl und Preis der Reparaturen, Anzahl und Preis der Ersatzteillieferungen nach Aufzeichnung vom Liebherr Kundenservice
- ▶ Präventive Wartung gemäß Anlagenhandbuch

Für das neue Air-Cycle System „ACS next Generation“ mit Überdruckkreis im Vergleich B können natürlich noch keine Daten vom Kundenservice oder Wartungshandbuch vorliegen. Für analoge Komponenten wurden daher Daten von den anderen Systemen übernommen oder Modellwerte gemäß Herstellerangaben herangezogen. Tabelle 16 zeigt Instandhaltungskosten für das CAT Referenzfahrzeug - Vergleich A, und Tabelle 17 zeigt die Instandhaltungskosten für Vergleich B.

ENVIRONM – Umweltkosten:

Im Vergleich A (Rückblick) sind die Umweltkosten für die Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 2 und 4) auf Basis der Kältemittelleckagen errechnet worden und setzen sich aus Emissionskosten pro CO₂-Äquivalenten, aus Kältemittelleckagen und Kosten für das Auffüllen von Kältemittel zusammen.

- ▶ Gesamtfüllmenge: 9 kg R134a
- ▶ GWP von R134a: 1430
- ▶ Leckage: 5% pro Jahr
- ▶ Kältemittelpreis: 36 €/kg R134a
- ▶ Emissionskostenbewertung der Kältemittelleckagen: 4,55 €/t CO₂-Äquivalent*)

Im Vergleich B (Zukunftsszenario) wurde der Umstieg auf ein Drop-In Kältemittel nach 5 Jahren Betrieb angenommen. Das gewählte Ersatz-Kältemittel R513A (Mischung von R1234yf und R134a) weist eine begrenzte Haltbarkeit auf, und es wird hier angenommen, dass auf Grund der hohen Betriebsstunden im Eisenbahnbereich die Kältemittelfüllung alle 2 Jahre gewechselt werden muss.

- ▶ Gesamtfüllmenge: 9 kg R134a
- ▶ Nach 5 Jahren Umstieg auf R513A
- ▶ Drop-In, keine Umbaukosten an der HLK-Anlage notwendig
- ▶ GWP von R513A: 547
- ▶ Leckage: 5% pro Jahr
- ▶ Alle 2 Jahre kompletter Wechsel des Kältemittels
- ▶ Kältemittelpreis: 50 €/kg R513A
- ▶ Emissionskostenbewertung der Kältemittelleckagen: 4,55 €/t CO₂-Äquivalent*)

*) Emissionshandel gemäß europäischem Auktionsmarkt (European Energy Exchange AG, 2016).

Da die Emissionskosten aus der Stromerzeugung bereits im Strompreis enthalten sind, ist der Wert für die Umweltkosten der Kaltluftsysteme mit 0 € angesetzt.

Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Kosten pro Jahr und HLK-System für erprobte Systeme (Vergleich A):

Es zeigt sich deutlich, dass Einmalkosten (NRC) und Umweltkosten eine untergeordnete Rolle spielen und kaum ins Gewicht fallen. Der größte Anteil der Kosten entfällt auf den Energieverbrauch. Bei der Kaltluftanlage ergeben sich hier Vorteile, die jedoch wieder von den höheren laufenden Beschaffungskosten (RC) egalisiert werden. Die Wartungskosten sind bei beiden Systemen etwa gleich. Der CAT-Index, also die Summe der Kostenanteile, liegt bei beiden System in der gleichen Größenordnung, wobei das Kaltluftsystem einen kleinen Kostenvorteil von rund 200 €/Jahr zeigt.

Einzelergebnisse der jährlichen Kosten für das Zukunftsszenario (Vergleich B):

Im Gegensatz zum Vergleich A mit erprobten Systemen fallen beim Zukunftsszenario die Umweltkosten mehr ins Gewicht. Die neue Kaltdampfanlage ist energieoptimiert, d.h. sie liegt im Energieverbrauch gleichauf mit der Kaltluftanlage im Unterdruckprozess. Diese Verbesserung wird aber zum Teil durch die erhöhten Umweltkosten aufgewogen. Der größte Anteil der Kosten entfällt nach wie vor auf den Energieverbrauch.

Bei der Kaltluftanlage der nächsten Generation sind Verbesserungen gegenüber heutigen Kaltluftsystemen bei den Beschaffungskosten und bei der Energieaufnahme zu erwarten, wodurch sich ein Kostenvorteil von rund 1000 €/Jahr gegenüber Kaltdampfsystemen nach Stand der Technik ergibt.

Fazit und Ausblick

Luftgestützte Bahnklimasysteme sind heute schon eine erfolgreich erprobte, umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative zu herkömmlichen Kaltdampfsystemen mit fluorierten Kältemitteln. Bei den verglichenen Systemen für Heizung, Lüftung, Klimatisierung (HLK-System), die sich seit vielen Jahren im regulären Passagierbetrieb befinden, zeigt sich, dass die bewährte umweltfreundliche luftgestützte Klimatechnik wirtschaftlich mindestens gleichwertig ist. Nutzt man im Rahmen der Studie ermitteltes Optimierungspotenzial und neue Entwicklungen, so zeichnet sich eine wirtschaftliche Besserstellung des luftgestützten Systems ab.

Die höheren Investitionskosten der luftgestützten Klimatechnik werden durch niedrigere Betriebskosten kompensiert. Generell spielen die Investitionskosten gemessen an den Energie- und Wartungskosten eine untergeordnete Rolle. Sie betragen jährlich etwa 10% bei herkömmlichen Kaltdampfsystemen und etwa 14% bei luftgestützten Systemen.

Für den primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb zeigt sich im Mittel über die betrachteten Klimazonen eine Einsparung von 28% für eine Air-Cycle-Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3) im Vergleich zu einer R134a-Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und optionalem Gegenheizen (ICE-T). Analog ergibt sich eine Einsparung von 16% für die weiterentwickelte Air-Cycle-Anlage mit Überdruckprozess (Simulation) im Vergleich zu einer Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass (Rechnung). Es zeigt sich also hinsichtlich des Jahresenergiebedarfs für den Kühlbetrieb ein klarer Vorteil der Air-Cycle-Technologie.

Im Rahmen des Projektes wurde zusätzliches Verbesserungspotenzial bei der Wartung der bestehenden Anlage ICE 3 2. Bauserie identifiziert. Die Umsetzung lässt eine deutliche Kosteneinsparung erwarten.

Die Potentiale der luftgestützten Klimatisierungstechnik sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft, es besteht eine sehr positive Perspektive zur luftgestützten Klimatisierung von Eisenbahnfahrzeugen mit der Weiterentwicklung der Architektur.

Summary

Energy efficiency and environmental friendliness are today's key topics for heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) in passenger rail vehicles.

Typically, up to 30% of the total energy consumption of a train is for air conditioning (Schmitt & Berlitz, 2014). Consequently, reducing the energy consumption is a powerful lever for reducing the operating costs (energy costs) and the environmental impact of energy supply.

The hydrofluorocarbon (HFC) refrigerants R-134a and R-407C, which are the most common refrigerants used in today's railway air conditioning, have a high direct global warming potential and consequently contribute to global warming. To reduce HFC emissions, the quantity of HFC available on the market has gradually been phased down since 2016 on the basis of the European F-gas Regulation (EU, 2014) with the goal of reaching only 21% of the total quantity stipulated by the EU by 2030.

The reduced availability of HFC refrigerant has already led to drastic increases in refrigerant prices. How the price will develop in the future remains completely uncertain. In addition, the availability of refrigerants has fallen, so that railway operators are also having difficulty procuring the quantities required.

Currently available fluorinated refrigerants with lower GWP, such as those being considered as alternatives for the automotive industry, are not an option for the railway industry because of their flammability or toxicity.

To ensure air conditioning of railway vehicles without limitations in the future, there are only two environmentally friendly alternatives that are sustainable in the long term from today's perspective:

- ▶ Air conditioning systems with air as natural refrigerant (the proven air-cycle system)
- ▶ Air conditioning systems with R744 (CO₂) as refrigerant

The air-cycle system was the focus of this research project conducted by Liebherr-Transportation Systems, in collaboration with Deutsche Bahn - DB Systemtechnik GmbH and DB Fernverkehr AG, on behalf of the German Federal Environment Agency and funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (Claus, 2016). The goal of the project was to determine the energy consumption and the Total Cost of Ownership (TCO) of the air-cycle system and conduct a comparison with systems that use conventional HFC refrigerants - specifically on the basis of measurement data obtained during real-world operation.

The first step consisted of installing additional measurement equipment and systems for collecting and transferring operating data transfer on an ICE 3 train owned by Deutsche Bahn, which had been fitted with new air-cycle systems. Over a period of 2 years while the train was in standard passenger service, operating data were recorded and transmitted to a stationary database. This was followed by extensive processing of the data.

The assessed data were then used to analyse the annual energy consumption of various HVAC systems. The primary annual energy consumption for cooling operation had average savings of 28% across the climate zones under consideration for an air-cycle system with reverse loop (ICE 3) compared to an R-134a vapour cycle system with variable-speed compressor and optional reheating (ICE-T). The advanced air-cycle system with direct loop (simulation) had savings of 16% compared to an improved vapour cycle system with variable-speed compressor and refrigerant bypass (calculation). This shows a clear advantage of the air-cycle technique with regard to the annual energy consumption for cooling operation.

Taking into account the determined energy consumption, the different HVAC systems were then compared in terms of economic efficiency. The cost analysis took into account the Recurring Cost, Non-Recurring Cost, Maintenance Cost, Operating Cost and Environmental Cost.

Heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) for comparison

Comparisons A and B of the railway HVAC systems, which were conducted in this project, are shown in Table 3 and Table 4 and the systems are briefly described. The non-consecutive numbers of the systems (1, 2, 6 and 3) refer to the order in which the systems were described in the detailed report.

Table 3: Comparison A of heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) based on field data

System 1: Air-cycle system (ACS) with reverse loop and variable-speed turbomachine	System 2: Vapour cycle system (VCS, R-134a) with variable-speed compressor and reheating
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Refrigerant: air (natural/environment-friendly) ▶ Used in the DB ICE 3 train ▶ Field data from this project 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Refrigerant: R134 (high global warming potential) ▶ Used in the DB ICE-T ▶ Field data recorded and provided by DB

The system diagrams are inserted here for orientation only, they can be found enlarged and clearly legible in Figures 75 and 76.

Table 4: Comparison B of advanced heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) based on data from models and simulation

System 6: Air-cycle system (ACS) with direct loop and variable-speed turbomachine	System 3: Vapour cycle system (VCS, R-134a) with variable-speed compressor and refrigerant bypass
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Refrigerant: air (natural/environment-friendly) ▶ New optimised Liebherr technology ▶ Data from simulation using the Liebherr software EOLE 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Refrigerant: R134 (high global warming potential) ▶ Bypass assumed for low part-load range (model) ▶ Data derived from the ICE-T field data

The system diagrams are inserted here for orientation only, they can be found enlarged and clearly legible in Figures 78 and 77.

Field data were available for the comparison of systems 1 and 2; no field data were available for systems 6 and 3. Therefore, relevant variables for systems 6 and 3 were derived or calculated on the basis of assumptions and models. (Meister, 2012) compared system 1 with system 2. The current comparison follows that of (Meister, 2012) and extends it.

From a technical point of view, there is no difference in terms of heating operation for the four HVAC systems compared here. It was therefore possible to derive the unavailable data for heating operation for systems 2, 3 and 6 from the data for system 1.

When sufficient data are available, it will also be possible to compare a vapour cycle system with the natural refrigerant carbon dioxide (R744).

Analyses and comparisons of power and energy consumption

The electric energy consumption is an essential factor when assessing heating, ventilation and air-conditioning systems (HVAC systems) in terms of economic efficiency and environmental impact. The energy consumption gives rise to operating costs (energy costs) and environmental impact/emissions – to varying degrees depending on the energy mix – due to the energy supply. The different railway HVAC systems were therefore compared in terms of their energy consumption.

The power or energy consumption of a railway HVAC system is the sum of the primary consumption, particularly for heating, cooling and air flow, and the secondary consumption for the drive (traction), which is provided by the vehicle drive. For the primary power or energy consumption, the compressor or turbomachine (depending on system), heater, supply air fan, condenser fan, cooling fan, controller and magnetic bearing controller were taken into account.

The traction required as a result of the mass of the HVAC system was not taken into account because of the relatively small share of the total energy consumption and the low differences in mass between the systems under consideration. The impulse resistance, which is created by the stationary air being drawn into the moving train, has a significantly greater impact on the required traction. The intake air mass flow was taken into account for every system. An analytical approach was used for the investigation.

Data sources

Field data for systems 1 and 2 were prepared, filtered for valid values, and processed with software tools (in particular Python and Matlab). For system 2 (ICE-T), the passenger occupancy was derived from a stationary model for CO₂ concentration in the carriage and process parameters for fresh air supply. For system 1 (ICE 3), the passenger occupancy was counted with optical door sensors. The data stream from the counters was split into individual train journeys for further processing.

The comparison was based on the intersection of available variables and signals for the systems: The two independent input variables, outside temperature and passenger occupancy rate, were mapped onto the output variable, electric power consumption, for cooling in comfort mode. Other relevant factors influencing a railway HVAC system, such as solar radiation, could not be explicitly taken into account. The pre-conditioning and parking modes were not taken into account due to insufficient data.

Methods of comparison

The comparison methodology followed the work of (Meister, 2012) and included the following three steps:

- ▶ Step 1: Classification of the electric power consumption
→ Model of the electric power consumptions of different HVAC systems
- ▶ Step 2: Weighting and summing of the classes for specific operating conditions
→ Average electric power consumption of the HVAC systems
- ▶ Step 3: Scaling to typical number of operating hours/year (6,570 h/year)
→ Electric energy consumption per year of the HVAC systems

Step 1: The electric power consumption values determined for the different systems were classified according to the outside temperature and passenger occupancy. For the outside temperature in °C, 9 classes were used with the class boundaries at {below -5, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, above 30}. For the passenger occupancy in percent, 3 classes of different ranges were used with the class boundaries at {0, 30, 50, above 50}. The mean power value (arithmetic mean) was calculated for each class.

Step 2: The result of step 1 is a matrix with mean power consumptions in cooling operation and in heating operation, respectively, for different HVAC systems. These matrices were multiplied element-by-element by two types of weighting matrices, and the resulting weighted power values were added together. This results to the

- ▶ Matrix for share of cooling and heating and the
- ▶ Matrix for distribution of the model input parameters of temperature and passenger occupancy.

The matrix for the share of cooling and heating describes the likelihood that cooling or heating operation is within a given class. The matrix was derived from field data for system 1. The matrix for the distribution of model input parameters describes how often specific classes occur under different realistic operating conditions. The matrices for the distribution of model input parameters against temperature distributions were derived from test reference years for the German cities of Braunlage

(cool), Kassel (moderate), and Mannheim (warm), taking realistic operating times in comfort mode from 04:00 to 24:00 hrs into account, as well as data for passenger occupancy from DB. The matrix for class weighting was derived from the frequencies of the field data recorded in this project.

Results of the comparison of electric power consumption

It was clear that passenger occupancy has a much smaller influence on the primary electric power consumption than the outside temperature.

At very high outside ambient temperatures in the range of 35 °C, the primary electric power consumption of the air-cycle systems was significantly higher than the primary power consumptions of the vapour cycle systems. This matches expectations based on theoretical/physical considerations for the respective thermodynamic cycles. But for lower temperatures in the range of, for example, 10 °C or 15 °C, the air-cycle systems were significantly more efficient than the vapour cycle systems. The advantage of energy-efficient part-load control is evident in this range. The key question was then which temperature ranges occur in real-world operation with what frequency.

Results of the comparison of electric energy consumption

The technical difference between the systems comes down to cooling operation. Results of comparison for the primary annual energy consumption in cooling operation are shown in Figure 3 (system 1 compared to system 2) and Figure 4 (system 6 compared to system 3). The results are for comfort mode of the HVAC systems (6,570 operating hours per year), where comfort mode means passenger service. The underlying operating conditions (weighting matrices), in particular the distribution of the outside ambient temperature, affect the result. The temperature distribution during the measurement period shifted to higher temperature levels compared to the temperature distribution of representative years (test reference years), as demonstrated by an examination of the temperature measurement data from the German Meteorological Service. This is reflected in the higher primary annual energy consumption for cooling for the operating conditions "according to the field data", compared to the operating conditions for "cool (Braunlage)", "moderate (Kassel)" and "warm (Mannheim)". In the comparisons with the respective vapour cycle systems, the air-cycle systems show savings in all cases. Depending on the operating conditions, the savings for system 1 compared to 2 are between 21% and 36% and for system 6 compared to system 3 between 5% and 27%.

Assuming that a train is operated with equal frequency in the climate zones (cool (Braunlage), moderate (Kassel) and warm (Mannheim)), the air-cycle system with reverse loop (ICE 3) resulted in average savings of 28% for primary annual energy consumption in cooling operation, compared to a vapour cycle system with variable-speed compressor and reheating option for the low part-load range (ICE-T). The advanced air-cycle system with direct loop (simulation) produces savings of 16% compared to a vapour cycle system with variable-speed compressor and refrigerant bypass (bypass assumed by calculation).

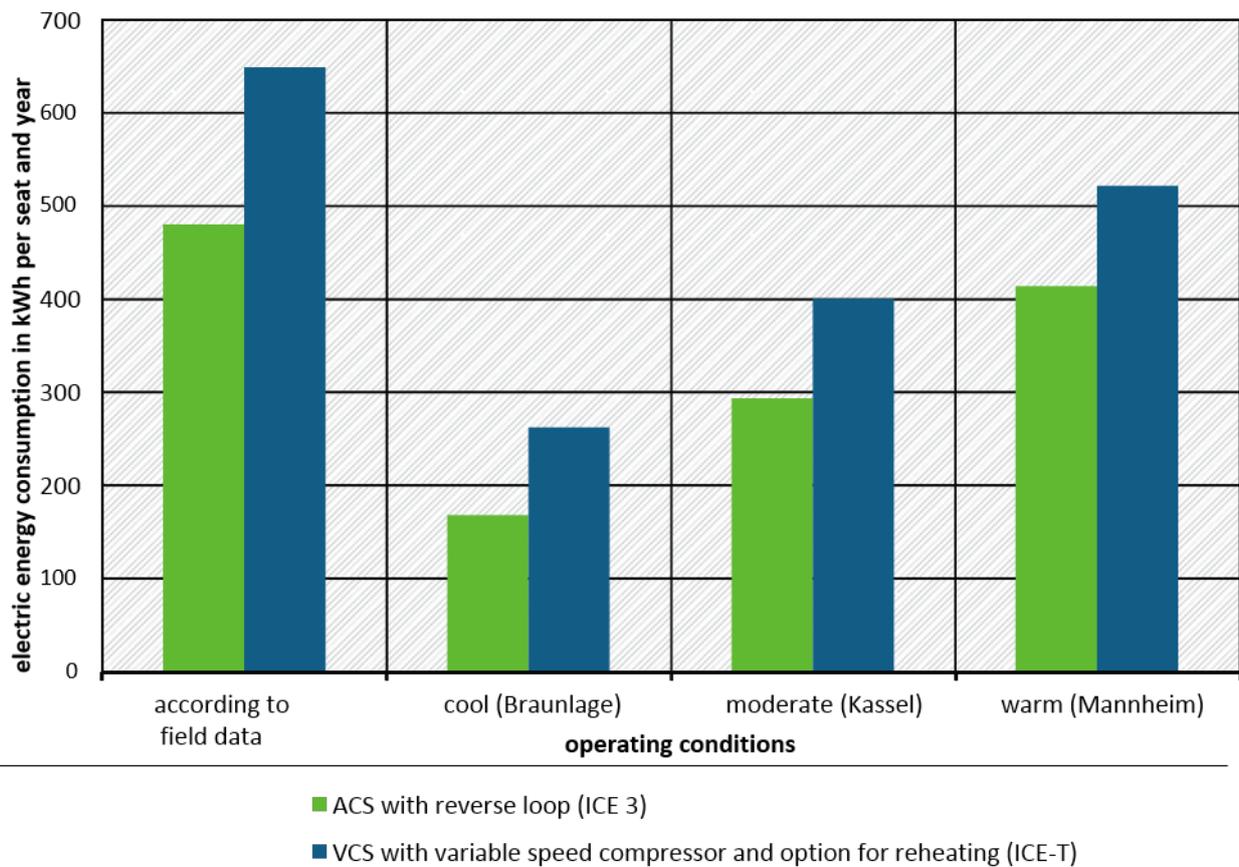
(Meister, 2012) carried out a generally comparable study, but with some different general conditions (operating hours, distributions of model input parameters (weighting matrices), lower limit temperature for the classification, etc.). The absolute figures for the primary annual energy consumption for cooling differed accordingly, while the relative comparisons yielded very similar results.

The main reasons for the advantage of air-cycle systems in terms of the primary annual energy consumption for cooling are the result of that fact that the cooling capacity of the air-cycle systems can be efficiently regulated over the entire output range, compared to the vapour cycle systems considered, and the air-cycle systems have a high proportion of load requirements in the lower performance range in the course of the year for the operating conditions considered.

Significant savings for air-cycle systems in secondary energy consumption for cooling are the result of the lower consumption for intake air of 56% to 59% for system 1 compared to system 2 or of 41% to 46% for system 6 compared to system 3.

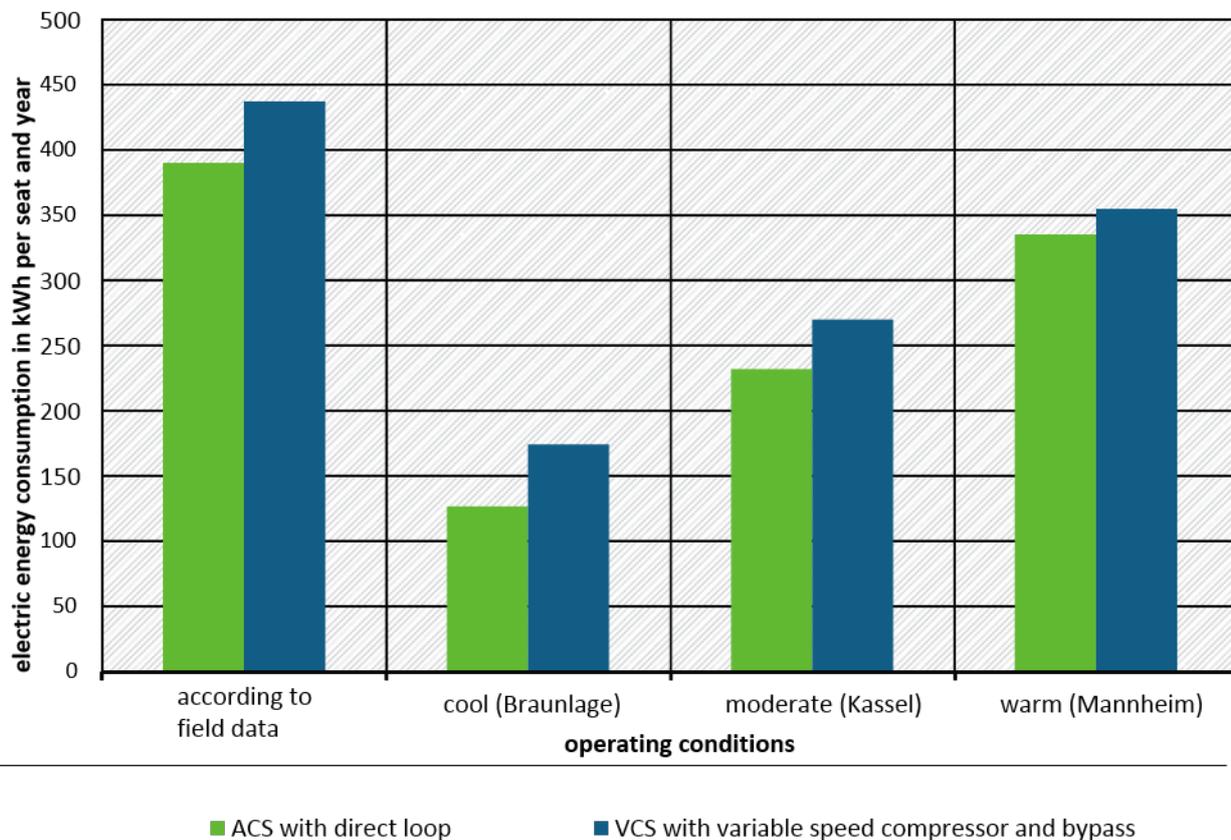
In heating operation, there are no relevant differences between the systems in terms of primary and secondary energy consumption. The savings in cooling operation reduce the total annual energy consumption; the percentage reduction of the total annual energy consumption depends on the ratio of heating and cooling operation in the given year.

Figure 3: Comparison of primary annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system ACS (ICE 3) (system 1) and the vapour cycle system VCS (ICE-T) (system 2)



Annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system (ACS) with reverse loop (based on implementation in ICE 3) and the vapour cycle system (VCS) with variable-speed compressor and option for reheating (based on implementation in ICE-T) (source data: field data); energy consumption is based on 6,570 operating hours in comfort mode per year. Energy consumption is at the device interface, i.e. excluding the efficiency of the on-board power supply up to the pantograph. Source: own illustration, Liebherr

Figure 4: Comparison of the primary annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system (ACS) with direct loop (system 6) and the vapour cycle system (VCS) with variable-speed compressor and refrigerant bypass (system 3)



Comparison of annual energy consumption in cooling operation for the air-cycle system (ACS) with direct loop from simulation with the vapour cycle system with variable-speed compressor (VCS) based on the ICE-T and with projected refrigerant bypass instead of reheating; Energy consumption based on 6,570 operating hours in comfort mode per year; Energy consumption is at the device interface, i.e. excluding the efficiency of the on-board power supply up to the pantograph. Source: own illustration, Liebherr

Analyses and comparisons of economic efficiency

Design of the Cost Assessment Tool (CAT)

An extensive cost analysis was performed to compare the economic efficiency of the different HVAC systems. The Cost Assessment Tool (CAT), developed for aviation, was used for this purpose. CAT can be used to compare the costs for different equipment variants on aircraft. The outcome of analysis is the cost over the life cycle of the aircraft ("Total Cost of Ownership") per flight hour that are incurred with the applicable equipment.

When using the CAT for railways, the costs are stated in Euros per year per HVAC system (carriage) against the life cycle of the railway vehicle.

It is possible to compare existing and future systems. Various tools are linked to generate the results.

The input data are taken from cost planning (item for item cost planning) or from the bill of materials, which are used to determine the production costs and the unit weights. Based on the bills of materials, the Maintenance Cost is determined in the LCC Tool using reliability data for the components and information from the operator about the method of operation and maintenance.

The system simulation relies on the performance data of the components and calculates a forecast of the energy consumption using the operating profile of the vehicle and the climate data.

The result is a distribution of different cost types based on the annual costs per HVAC system for each version of a system considered.

- ▶ RC - Recurring Cost
- ▶ NRC- Non-Recurring Cost (development costs, engineering, prototype production, tests)
- ▶ MC - Maintenance Cost
- ▶ OC - Operating Cost
- ▶ ENVIRONM/Environmental Cost (CO₂ tax, retrofitting for environmentally friendly refrigerant)
- ▶ CAT Index/Sum of all costs per year

In principle, the LCC Tool can also be used to perform a dynamic analysis. Dynamic developments can be investigated by specifying indexes for imputed interest or inflation indexes, in general or separately for energy and environmental costs. In this project, this was treated as neutral, without taking into account imputed interest, development of the equity of the operating company, inflation, or energy price and environmental cost progression.

Comparison of the HVAC systems

It is essential for comparison that identical operating conditions are simulated for the HVAC systems. For this reason, all the systems were based on a reference vehicle, carriage TW7 of trainset 301 (ICE 3, 2nd series) from the field data analysis.

In the first step (comparison A), both of the systems, which have been in operation for many years, were compared or projected onto the reference vehicle:

- ▶ ICE-T (system 2)
- ▶ ICE 3, 2nd series (system 1)

The second step (comparison B) shows a future scenario. In this case, the R-134a vapour-compression refrigeration system and the air-cycle system with the described potential for improvement as well as the next generation air-cycle system technology were compared:

- ▶ ICE-T system concept, energy-optimized (system 3)
- ▶ ICE 3 system concept, maintenance-optimized (corresponds to system 1; however, potential improvements identified during analysis of the maintenance data were taken into account in the maintenance cost model)
- ▶ Next generation air-cycle system, open direct loop (system 6)

Input variables for the analysis of economic efficiency

NRC – Non-Recurring Cost

The development costs were compensated for to ensure a fair comparison of conventional and future technologies, as the development costs for a new technology are not transferred to just one production series or type of carriage. It was assumed that the NRC in the long term would approach €1,000,000 per HVAC system and vehicle type for all systems. The current CAT model is based on a series of 500 carriages, across which the stated NRC is distributed.

RC - Recurring Cost

The manufacturers recommended prices for the reference vehicle, as expected for the current market, are as follows:

- ▶ RC for vapour cycle system: €40,000 (without refrigerant bypass)
- ▶ RC for vapour cycle system: €41,000 (with refrigerant bypass)
- ▶ RC for ACS reverse loop, analogous to ICE-3, 2nd series: €65,000
- ▶ RC for ACS direct loop, "Next generation ACS": €55,000

The manufacturing costs of air-cycle systems are a little higher than for vapour cycle systems, but the potential for economies of scale has not been taken into account. As demand for air-cycle technology increases and the quantities of corresponding components increases, one would expect a reduction in unit costs.

OC - Operating Cost:

The annual energy consumption according to Tabelle 15 was used to determine the Operating Cost. The Operating Cost for primary energy consumption (operation of the HVAC system) and secondary energy consumption (travel resistance from exchanging air with the environment) was calculated based on an electricity tariff of 11.59 Euro cents/kWh.

MC – Maintenance Cost:

A model showing the corrective and preventive maintenance cost for the reference vehicle based on field data, information from the operating company and the source data from the Liebherr customer service is used to determine the Maintenance Cost.

The input variables are:

- ▶ Operating hours for cooling and heating for the reference vehicle according to the field data analysis
- ▶ Hourly rate of €90/h for work and infrastructure according to the operating company, DB AG
- ▶ Quantity and price of repairs, quantity and price of delivery of spare parts, based on documentation from Liebherr customer service
- ▶ Preventive maintenance according to the system manual

For the new "next generation ACS" with direct loop in comparison B, there are, of course, no data from customer service or the maintenance manual. For this reason, data were taken from the other systems or model values based on the manufacturer's data for analogous components were used. Tabelle 16 shows the Maintenance Cost for the CAT reference vehicle (comparison A), and Tabelle 17 shows the Maintenance Cost (comparison B).

ENVIRONM – Environmental Cost:

In comparison A (retrospective), the Environmental Cost for the vapour cycle system (systems 2 and 4) is calculated based on refrigerant leaks and is made up of the Emission Cost per CO₂ equivalent, refrigerant leaks and costs for filling refrigerant.

- ▶ Total filling quantity: 9 kg R-134a
- ▶ GWP of R-134a: 1430
- ▶ Leaks: 5% per annum
- ▶ Refrigerant price: €36/kg R-134a
- ▶ Emission Cost assessment of refrigerant leaks: €4.55/t CO₂ equivalent*)

Comparison B (future scenario) assumed the system will change to a refrigerant drop-in after 5 years of operation. The selected refrigerant drop-in R-513A (blend of R-1234yf and R-134a) has limited durability and it is assumed that the refrigerant must be replaced every 2 years due to the high number of operating hours in railway operations.

- ▶ Total filling quantity: 9 kg R-134a
- ▶ Changeover to R-513A after 5 years
- ▶ Drop-in, no retrofitting costs required for the HVAC system
- ▶ GWP of R-513A: 547
- ▶ Leaks: 5% per annum
- ▶ Complete replacement of refrigerant every 2 years
- ▶ Refrigerant price: €50/kg R-513A
- ▶ Emission Cost assessment of refrigerant leaks: €4.55/t CO₂ equivalent*)

*) European Union Emissions Trading System (European Energy Exchange AG, 2016).

Since the Emission Cost from electricity generation is already included in the electricity price, the value for the Environmental Cost of the cold-air systems is set at €0.

Result of the analysis of economic efficiency

Costs per annum and HVAC system for tested systems (comparison A):

It is clear that the NRC and Environmental Cost play a secondary role and are practically negligible. The largest share of the costs comes from energy consumption. Although the cold-air system has benefits, they are offset again by the higher Recurring Cost (RC). The Maintenance Cost is about the same for the two systems. The CAT Index, i.e. the sum of the cost components, is within the same order of magnitude for both systems, whereby the cold-air system has a small cost advantage of approx. €200/year.

Breakdown of annual costs for the future scenario (comparison B):

In contrast to comparison A with tested systems, the Environmental Cost for the future scenario is of greater importance. The new vapour cycle system is energy-optimised, i.e. it is at the same level as the cold-air system with reverse loop in terms of energy consumption. However, this improvement is partially offset by the Environmental Cost. The largest share of the costs is still from energy consumption.

For the next generation of air-cycle systems, one would expect improvements compared to today's air-cycle systems in terms of procurement costs and energy consumption, which would result in a cost benefit of approx. €1,000/year compared to state-of-the-art cold vapour systems.

Conclusion and outlook

Air-cycle railway air-conditioning systems are a successfully tested, environmentally friendly and economical alternative to conventional vapour cycle systems with fluorinated refrigerants. For the HVAC systems compared here, which have been in regular passenger service for many years, it is evident that the proven environment-friendly air-cycle technology is at least equivalent in terms of economic efficiency. If the potential for optimisation identified in the course of the study and new developments are exploited, then the air-cycle system is more economically efficient.

The higher investment costs for the air-cycle air-conditioning technology are offset by lower operating costs. In general, investment costs play a subordinate role compared to energy and maintenance costs. They amount to approx. 10% annually for conventional vapour cycle systems and approx. 14% for air-cycle systems.

The primary annual energy consumption in cooling operation has average savings of 28% across the climate zones for an air-cycle system with reverse loop (ICE 3) compared to an R-134a vapour cycle system with variable-speed compressor and optional reheating (ICE-T). By analogy, there are savings of 16% for the advanced air-cycle system with direct loop (simulation) compared to a vapour cycle system with variable-speed compressor and refrigerant bypass (calculation). For the annual energy consumption for cooling operation, the air-cycle technology therefore has a clear advantage.

In the course of the project, additional potential for improvement was identified for the maintenance of the existing system ICE 3, 2nd series. One would expect that the implementation will lead to a significant reduction in costs.

The potential of air-cycle technology is far from exhausted. There is a very positive outlook for the air-cycle air-conditioning of railway vehicles as the architecture is further developed.

1 EINFÜHRUNG

Weltweit muss der Ausstoß von Treibhausgasen vermindert werden. Grundlage dafür sind internationale Abkommen wie das Montrealer Protokoll und die Klimarahmenkonvention (UNFCCC).

Auf der Basis dieser Rahmenabkommen sind die Staaten der Welt in den letzten Jahren immer weitreichendere Verpflichtungen eingegangen, die zur Minderung der Treibhausgasemissionen und damit zum Klimaschutz beitragen sollen. Zu nennen wären hier insbesondere das Kyoto-Protokoll (2007) und das Übereinkommen von Paris (2015) sowie das Kigali-Abkommen (2016) speziell zum Ausstieg aus bestimmten den teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW). Zur Erfüllung der Verpflichtungen aus diesen Abkommen hat sich die Europäische Union anspruchsvolle Klimaschutzziele gesetzt.

Deutschland hat sich frühzeitig zu einer Vorreiterrolle im Klimaschutz verpflichtet. Bis 2050 sollen die die Emissionen von Treibhausgasen in Deutschland um 80 bis 95 % der Vergleich zu 1990 reduziert werden.

Zu den Treibhausgasen zählen neben Gasen wie Kohlendioxid und Methan auch teil- und vollhalogenierte Kohlenwasserstoffe. Hauptanwendungsbereich der Gruppe der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) sind Kälte- und Klimaanlage. Die Treibhauswirkung von HFKW kann bis zu 14.800mal höher sein als die derselben Menge Kohlendioxid.

Die Klimatisierung gehört mittlerweile zum üblichen Leistungsumfang bei neuen ÖPNV-Fahrzeugen. Daher steigen der Anteil der Klimatisierung und die daraus resultierenden HFKW-Kältemittel-Emissionen aus Klimaanlage von Fahrzeugen. Die Kältemittellemissionen aus Bussen und Schienenfahrzeugen betragen im Jahr 2016 in Deutschland 124 Tonnen des Kältemittels R134a, das entspricht 179.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Dazu kommen die CO₂-Emissionen aus dem Energieverbrauch für Kühlung und Heizung.

Die Verwendung der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) muss zukünftig drastisch sinken. Entsprechende HFKW-Verbote und die schrittweise Reduktion der treibhausrelevanten HFKW-Mengen sind in der europäischen Verordnung Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase geregelt. Im Jahr 2030 sollen nur noch 21 % der CO₂-äquivalenten Mengen der HFKW des Jahres 2015 auf dem europäischen Markt gelangen. Das Kigali-Abkommen fordert von den Industriestaaten bis zum Jahr 2036 eine weitere Reduktion der HFKW auf 15 %.

Die europäische F-Gas Verordnung über fluorierte Treibhausgase 517/2014/EU, die seit 1. Januar 2015 gilt, enthält noch kein spezielles Verbot für HFKW für Klimaanlage in Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs, wie Schienenfahrzeuge oder Busse. Jedoch sind HFKW bereits heute aufgrund der Phase down Regelungen der F-Gas Verordnung teurer und knapper geworden. Alle Verwender von HFKW müssen sich nun um Alternativen bemühen.

Die Entwicklung und Erprobung von alternativen Klimatisierungskonzepten in Fahrzeugen des ÖPNV verläuft jedoch weltweit noch sehr zögerlich. Auch Deutschland kann bis heute nur wenige dokumentierte Beispiele und Erfahrungen zur Klimatisierung von ÖPNV-Fahrzeugen durch natürliche Kältemittel vorweisen, die Betreiber davon überzeugen könnten, solche Techniken in großem Maße nachzuzufügen.

Bisher gelten als aussichtsreiche alternative Techniken für Bahnfahrzeuge luftgestützte Klimaanlage auf der Basis der Luftkompression und Kompressions-Kältekreisläufe mit dem Kältemittel Kohlendioxid (CO₂; Kältemittelbezeichnung R744). Je nach eingesetzter Technik können durch umweltfreundliche, natürliche Kältemittel die Treibhausgasemissionen durch Kältemittel vermieden bzw. drastisch reduziert werden. Ebenso könnte durch Optimierungsmaßnahmen oder neue technische Ansätze zur Heizung der Energiebedarf verringert werden.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war es, wissenschaftlich valide Nachweise über die Funktionsfähigkeit und Praxistauglichkeit von alternativen Klimatisierungskonzepten in Schienenfahrzeugen bereitzustellen. Dazu sollten innovative Klimatisierungskonzepte für Schienenfahrzeuge mit umweltfreundlichen, natürlichen und für die Bahnanwendung geeigneten Kältemitteln im Praxisbetrieb untersucht werden.

An Klimaanlagen, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen und die mit natürlichen Kältemitteln kühlen, sollte ein Messprogramm in Schienenfahrzeugen im regulären Betrieb konzipiert und durchgeführt werden. Die Messungen sollten mindestens einmal über alle Jahreszeiten erfolgen und die Heizperiode einbeziehen. Die Erprobungsträger und die Klimaanlagen waren vom Auftragnehmer zur Verfügung zu stellen. Es war zu gewährleisten, dass der Erprobungsträger über die für Messungen notwendige Messdauer im Einsatz auf der Schiene betrieben werden kann.

Die gewonnenen Daten waren auszuwerten und Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Klimaanlagen abzuleiten, wobei eine Betrachtung über den Lebenszyklus erfolgen sollte. Ein Vergleich mit bisher üblichen Klimasystemen auf Basis von herkömmlichen teilfluorierten Kältemitteln (HKFW) sollte erfolgen.

Auf der Basis der Ergebnisse, insbesondere für den üblichen Fahrgastbetrieb, sollten Entwicklungserfordernisse für zukünftige Klimasysteme abgeleitet werden.

1.2 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens

Ein aus heutiger Sicht gut geeignetes natürliches Kältemittel für den Einsatz in Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge, für das bisher die längsten Praxiserfahrungen vorliegen, ist Luft (Kältemittelbezeichnung nach Norm R729).

Luftgestützte Klimaanlagen (Air-Cycle Anlagen, ACS) sind jedoch auf Grund der hohen Entwicklungskosten und durch bisher niedrige Stückzahlen bei den Investitionskosten anderen Systemen deutlich unterlegen. Ein Nachweis des Kostenvorteils für den Betreiber über die Betriebszeit der Anlage könnte wichtige Impulse für die weitere Einführung von luftgestützten Klimaanlagen geben.

Der Vergleich der verschiedenen Systeme lässt sich nicht im Labor durchführen, da dort die realen Betriebsbedingungen nicht ausreichend nachgestellt werden können. Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen auf der Strecke wie Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte, Luftverschmutzung, Beschattung, Betriebszeiten, Tunnelfahrten, Besetzung, Fahrgeschwindigkeit, Spannungsunterbrechungen, Netzgüte usw. bilden als Ganzes ein Betriebs- und Belastungsprofil, das entscheidenden Einfluss auf die Leistung und Standzeit der Klimaanlage hat. Daher ist eine wesentliche Voraussetzung für umfassende Anlagenvergleiche von luftgestützten Klimaanlagen mit Anlagen nach dem Kaltdampfsystem (Vapour Cycle System, VCS) die Erfassung feldnaher Betriebsprofile. Sie können zudem Hinweise für die Weiterentwicklung geben.

Nach Ausrüstung der zweiten Bauserie des ICE 3 ab 2004 von insgesamt 13 Zügen hatte die Deutsche Bahn AG (DB) im Zuge der Überarbeitung der ersten Bauserie des ICE 3 im Oktober 2014 die Liebherr-Transportation System GmbH & Co KG (LVF) wiederum beauftragt, einen ICE 3 Zug mit luftgestützten Klimaanlagen auszurüsten. Daher bot sich die Möglichkeit, den Zug und die neuen luftgestützten Klimaanlagen mit Messtechnik auszustatten, um erstmals ein umfassendes Betriebsprofil im realen Zugbetrieb zu ermitteln. Gemeinsam mit der DB sollte durch die Verfolgung der Instandhaltungsaktivitäten eine Analyse der Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) durchgeführt werden.

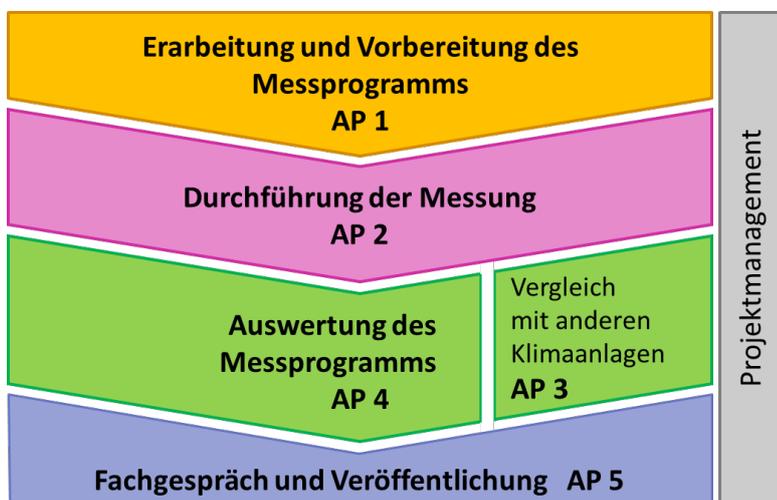
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in fünf Arbeitspakete (AP) aufgeteilt:

- ▶ AP 1: Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms
- ▶ AP 2: Durchführung der Messung
- ▶ AP 3: Vergleich mit anderen Klimaanlage
- ▶ AP 4: Auswertung des Messprogramms
- ▶ AP 5: Fachgespräch und Veröffentlichung

Daraus ergaben sich drei Projektphasen: die Vorbereitung der Messkampagne, die Durchführung der Messungen und Auswertung mit vergleichenden Analysen und die Diskussion der Ergebnisse. Die Projektstruktur ist in Abbildung 5 grafisch dargestellt.

Abbildung 5: Grafische Darstellung der Arbeitspakete in der Projektstruktur



Grafische Darstellung der Arbeitspakete in der Projektstruktur. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete sind nachfolgend kurz beschrieben. Die Durchführung der Arbeitspakete und die dazugehörigen Ergebnisse sind ausführlich in Kapitel 2 beschrieben.

1.3.1 AP 1: Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms

Es wurde ein Messprogramm für den üblichen Fahrgastbetrieb konzipiert, das alle Parameter erfasst, die für Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Klimaanlage notwendig sind. Das System zur Erfassung der notwendigen Daten im Betrieb wurde konzipiert und entwickelt. Die Messfühler und Datenspeicher wurden in Klimaanlage und Zug eingebaut und auf Funktion getestet.

1.3.2 AP 2: Durchführung des Messprogramms

Die Messungen am Zug wurden von Anfang 2016 bis Ende 2017 planmäßig durchgeführt.

1.3.3 AP 3: Vergleich mit anderen Klimaanlage

Da zum Vergleich mit Klimaanlage nach Stand der Technik keine Parallelmessung am selben oder gleichartigen Zug erfolgen konnte, wurden von der DB Daten von früheren Messung an einer R134a-Klimaanlage eines ICE-T Zuges zur Verfügung gestellt.

1.3.4 AP 4: Auswertung des Messprogramms

Die in Arbeitspaketen 2 und 3 gewonnenen Daten wurden ausgewertet, verglichen und bewertet. Dabei wurden sowohl Ergebnisse zum Energieverbrauch als auch die Kosten über den Lebenszyklus (Cost of Ownership) ermittelt.

1.3.5 AP 5: Fachgespräch und Veröffentlichung

Im Januar 2018 wurde mit dem Umweltbundesamt (UBA) ein Fachgespräch in Berlin organisiert. Hier wurden von LVF und DB die Ergebnisse des Projektes vorgestellt und diskutiert. Die Präsentationen des Fachgespräches sind auf der Webseite des UBA zu finden²

1.3.6 Zeitplan

Der Zeitplan ist in Abbildung 6 dargestellt. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden alle Arbeitspakete (AP 1 bis 5) wie geplant abgearbeitet. AP 1 wurde aufgrund von Nachbesserungsbedarf bei der Messtechnik verlängert, Details dazu sind Kapitel 2 zu entnehmen.

Abbildung 6: Zeitplanung

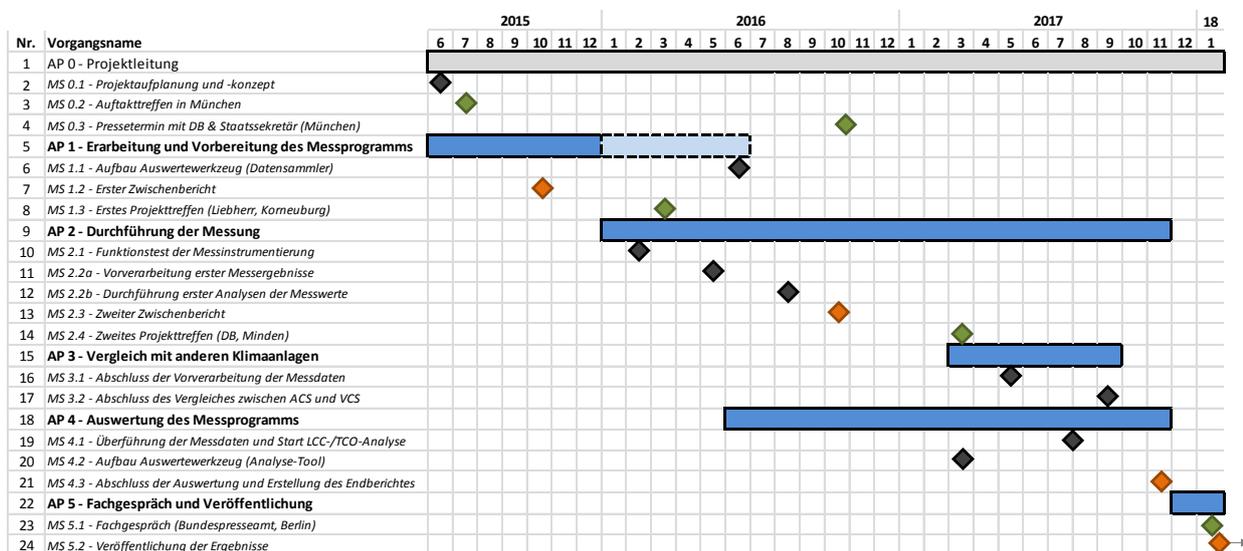


Abbildung des Zeitplans. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Am 27. Oktober 2016 wurde im ICE-Werk München ein Presstreffen mit der Deutschen Bahn (DB), Liebherr-Transportation System GmbH & Co KG (LVF) und dem Umweltbundesministerium (BMUB) durchgeführt, um das Projekt öffentlich bekannt zu machen. Jochen Flasbarth (Staatssekretär im BMUB) und Ronald Pofalla (Vorstand der DB) informierten sich über den Stand des Projektes direkt am ICE 3 „Freiburg im Breisgau“ und diskutierten die Notwendigkeit neuer Klimatisierungslösungen. Dazu wurden auch Pressemitteilungen von BMUB³ und LVF⁴ erstellt. Ein Aufkleber am Zug wies auf das Projekt hin. Nachfolgend sind zwei Fotos der Veranstaltung abgebildet.

² LINK: <https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/fachgespraech-klimatisierung-von-zuegen>, 12.03.2018

³ LINK: <https://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/klimaanlagen-ohne-fluorierte-treibhausgase/>, 13.03.2018

⁴ LINK: <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/umweltstaatssekret%C3%A4r-jochen-flasbarth-und-bahnvorstand-ronald-pofalla-informieren-sich-%C3%BCber-testprogramm-an-luftgest%C3%BCtzte-klimaanlagen-news.html>, 13.03.2018

Abbildung 7: Foto vom Pressetermin in München am 27. Oktober 2016



Ronald Pofalla (Deutsche Bahn, links) und Staatssekretär Jochen Flasbarth (BMUB, rechts) am ICE 3 „Freiburg im Breisgau“ vor dem Aufkleber am Zug, der über die Messkampagne informiert. Quelle: Copyright Deutsche Bahn AG/ Uwe Miethe

Abbildung 8: Foto vom Pressetermin in München am 27. Oktober 2016



Teilnehmer von BMUB, DB und LVF hören sich beim Pressetermin die technische Einführung auf dem Dach des ICE 3 an der geöffneten luftgestützten Klimaanlage an. Quelle: Copyright Deutsche Bahn AG/ Uwe Miethe

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Die beiden Klimatechniken für das Kältemittel Luft und für das fluorierte Kältemittel R134a, die Gegenstand der Untersuchung waren, sind bereits seit einigen Jahren im Einsatz bei der Deutschen Bahn. Beide Anlagentypen sind im Fahrzeugdach von Hochgeschwindigkeitszügen montiert.

Klimaanlagen mit dem Kältemittel Luft befinden sich in der ersten und zweiten Bauserie der ICE 3 Züge. Klimaanlagen mit R134a als Kältemittel werden u.a. im ICE-T der DB betrieben, aber auch in den meisten anderen ICE-Zügen. Nachfolgend werden die beiden betrachteten Anlagen und deren Funktionsweise näher erläutert.

1.4.1 Kompaktklimagerät im ICE 3 (Luft)

Das von Liebherr-Transportation Systems (LVF) entwickelte, luftgestützte Kompaktklimagerät (KKG) ist im vormontierten Zustand ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Anlage wird vom Hersteller als Air-Cycle

System Heating, Ventilation, Air Conditioning (ACS HVAC) oder kurz ACS bezeichnet; HVAC steht für Heizung, Lüftung und Klimatisierung.

Abbildung 9: Luftgestütztes Kompaktklimagerät für den ICE 3

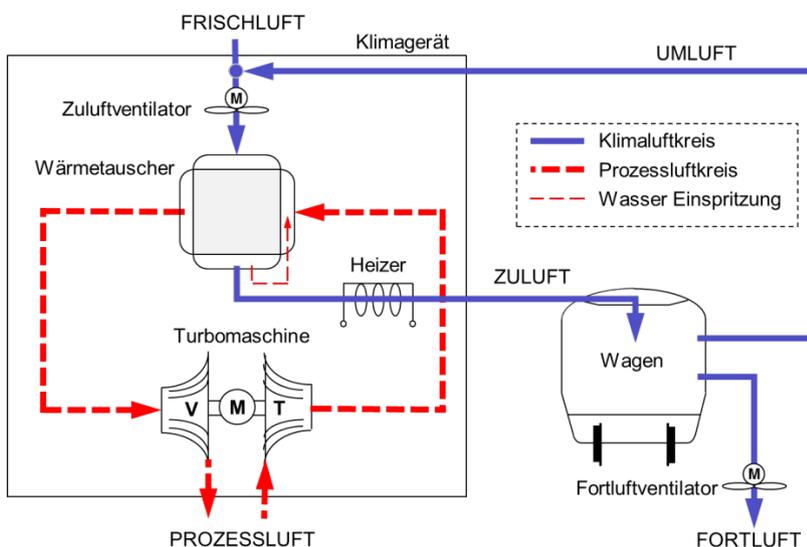


Luftgestütztes Kompaktklimagerät auf Transportrahmen und ohne Deckel. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Diese Anlage verwendet Luft als Kältemittel. Die Außenluft wird in der Anlage in einem unabhängigen Kreislauf abgekühlt. Diese sogenannte Prozessluft kühlt indirekt durch einen Wärmetauscher die sogenannte Klimaluft, die den Fahrgastraum klimatisiert und im Kontakt mit den Passagieren steht. Die Kreisläufe sind in Abbildung 10 zu sehen.

Luftgestützte Anlagen sind seit 2000 bei der Deutschen Bahn in Verwendung.

Abbildung 10: Schematische Darstellung von Klima- und Prozessluftkreis

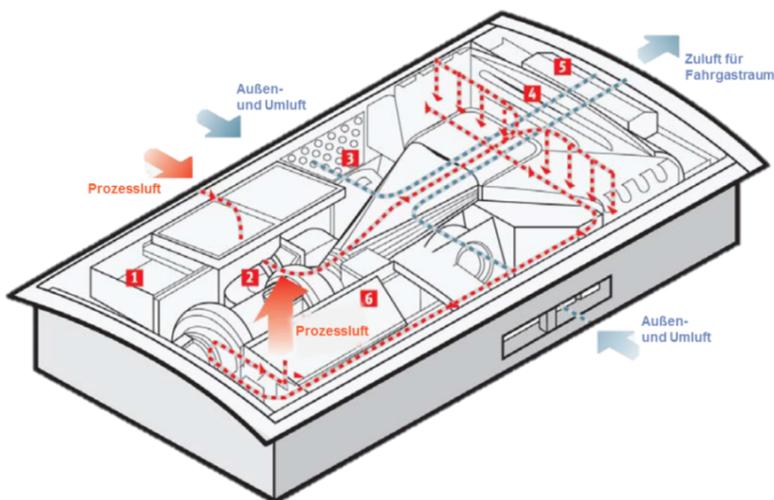


Schematische Darstellung von Klimaluftkreis (blau) und Prozessluftkreis (rot) (Motorisierte Kühlturbine besteht aus Verdichter (V), Motor (M) und Turbine (T)). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Luftführung innerhalb des KKG ist in Abbildung 11 eingezeichnet mit den Hauptkomponenten:

1. Prozesslufteinlasskasten
2. Motorisierte Kühlmaschine (MKT, Turbomaschine)
3. Zuluftlüfter
4. Wärmetauscher
5. Hauptheizregister
6. Prozessluftauslasskasten

Abbildung 11: Luftführung im Kompaktklimagerät



1 - Prozesslufteinlasskasten, 2 - Motorisierte Kühlmaschine, 3 - Zuluftlüfter, 4 - Wärmetauscher, 5 - Hauptheizregister, 6 - Prozessluftauslasskasten, Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Das Funktionsprinzip des luftgestützten Kompaktklimageräts (KKG) kann ebenfalls mit in Abbildung 11 verdeutlicht werden: Über den Prozesslufteinlass (1) der motorisierten Kühlmaschine (MKT, 2) wird die Prozessluft von außen angesaugt.

In der MKT wird die Prozessluft durch Druckabsenkung abgekühlt und über den Prozessluftschacht zum Wärmetauscher (4) geführt. Dort strömt sie dann von oben nach unten und kühlt die Zuluft. Über eine Rohrführung mit Schalldämpfer wird die erwärmte Prozessluft zum Ansaugstutzen geführt, von der MKT angesaugt und über den Prozessluftauslass (6) an die Umgebung abgegeben. Ein Kühlluftlüfter führt einen kühlenden Luftstrom über den Synchronmotor der MKT, der am Kühlluftauslass an die Umgebung abgegeben wird.

Die Zuluftlüfter (3) saugen die Luft aus den Mischluftkästen an und führen diese zum Wärmetauscher, der unterhalb des Prozessluftschachts angeordnet ist. Dort wird die Zuluft entweder durch die kalte Prozessluft abgekühlt oder durch das Hauptheizregister (5) erwärmt. Die konditionierte Zuluft wird dann über den Zuluftschalldämpfer weiter in das Zuluftkanalsystem eingeleitet.

Der Antrieb der Kühlmaschine (MKT) erfolgt über einen Synchronmotor mit stufenloser Drehzahlregelung. Dies ermöglicht eine stufenlose Regelung der Kälteleistung.

Im Rahmen einer kommerziellen Erprobung für eine Neuausstattung (Redesign) von ICE-Zügen der DB im Jahr 2015 wurde auf einem Zug des ICE 3, Baureihe 403, 1. Serie, Triebzug 301 in allen, insgesamt acht, Wagen je eines der in Abbildung 11 dargestellten luftgestützten Kompaktklimageräte installiert.

Abbildung 12: ICE 3 - Baureihe 403, Triebzug 301 der Deutschen Bahn AG



Zwei ICE 3 Baureihe 403, Quelle: Copyright Deutsche Bahn AG / Claus Weber

In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die acht Wagen des Triebzuges (Tz) 301 dargestellt. Die einzelnen Wagentypen sind:

- ▶ EW – Endwagen
- ▶ TW – Trafowagen
- ▶ SW – Stromrichterwagen
- ▶ MW – Mittelwagen

Abbildung 13: Wagenübersicht des ersten Halbzuges ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 (Wagen 1 bis 4)



Gesamtübersicht des ersten Halbzuges (Wagen 1 bis 4), Quelle: (Deutsche Bahn AG, Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016, 2017).

Abbildung 14: Wagenübersicht des zweiten Halbzuges ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 (Wagen 5 bis 8)



Gesamtübersicht des zweiten Halbzuges (Wagen 5 bis 8). Quelle: (Deutsche Bahn AG, Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016, 2017).

1.4.2 Klimaanlage im ICE-T (R134a)

Für Vergleiche in diesem Projekt wurde das von Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG (LVF) für den ICE-T entwickelte Klimagerät herangezogen. Eine Bild der Anlage im ausgebauten Zustand ist in Abbildung 15 beigefügt.

Diese Anlage ist eine konventionelle Kompressionskälteanlage – sie wird auch als Kaltdampfanlage bezeichnet (englisch Vapour Cycle System, kurz VCS). Als Kältemittel wird der teilfluorierten Kohlenwasserstoff mit der Kältemittelbezeichnung R134a, der chemische Name ist 1,1,1,2-Tetrafluorethan, verwendet.

Diese Anlagenart ist seit 1999 bei der Deutschen Bahn in Verwendung.

Abbildung 15: Klimagerät ICE-T – Kompressionskälteanlage mit dem Kältemittel R134a



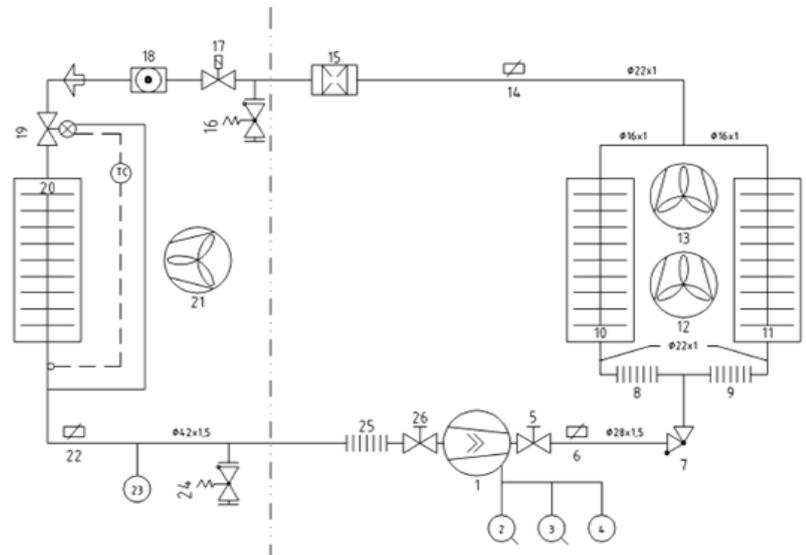
Klimagerät ICE-T in Transportrahmen und ohne Abdeckung. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Das Funktionsprinzip des VCS-Klimageräts ist nachfolgend beschrieben. Die Anmerkungen in Klammern beziehen sich auf Abbildung 16.

Der Kältemittelverdichter (1) saugt das gasförmige Kältemittel an und verdichtet es. Durch das Komprimieren steigt gleichzeitig auch die Temperatur des Kältemittels an. Das Kältemittel strömt in die Wärmetauscher (Verflüssiger, 10 und 11), wo es die Wärme an die Verflüssigerluft abgibt und bei hohem Druck verflüssigt wird. Die Verflüssigerlüfter (12 & 13) saugen Luft durch den Verflüssiger nach oben ins Freie.

Das flüssige, unter hohem Druck stehende Kältemittel im Kältemittelkreislauf gelangt nach weiteren Komponenten zum Expansionsventil (19), in welchem sich das Kältemittel auf den Verdampfungsdruck entspannt und dabei abkühlt. Das Expansionsventil regelt die Kältemittelzufuhr zum Verdampfer (20). Im zweiten Wärmetauscher (Verdampfer, 20) verdampft das Kältemittel, die dafür notwendige Wärme wird der über den Verdampfer strömenden Luft entzogen. Anschließend gelangt das gasförmige Kältemittel bei niedrigem Druck wieder in den Verdichter.

Abbildung 16: Schematische Darstellung von Kältemittelkreislauf und -komponenten der Kompressionskälteanlage mit dem Kältemittel R134a



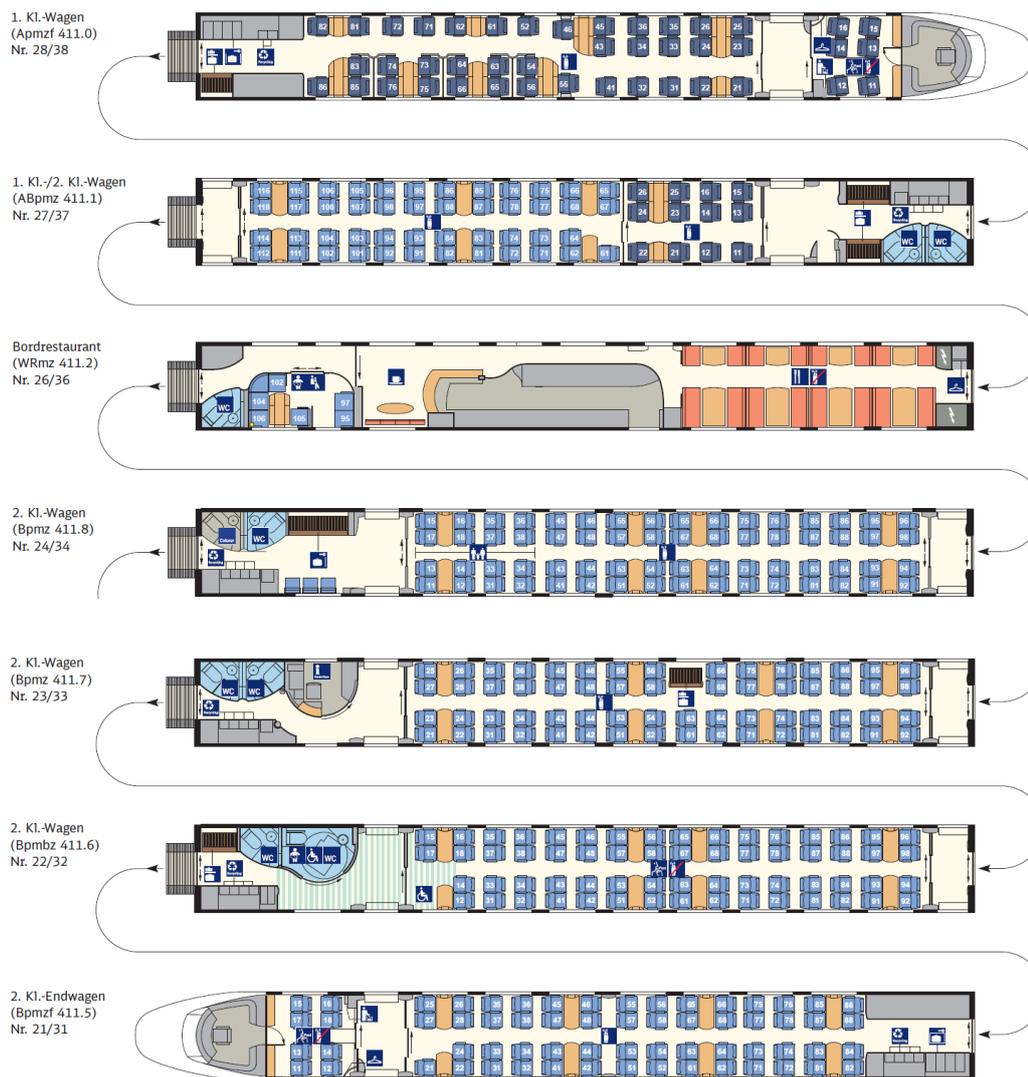
1 - Kältemittelverdichter, 10 & 11 - Wärmetauscher (Verflüssiger), 12 & 13 - Verflüssigerlüfter, 19 - Expansionsventil, 20 - Wärmetauscher (Verdampfer), 21 – Zuluflüfter. Das Heizregister ist hier nicht dargestellt, siehe dazu Abbildung 76. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Leistungsregelung der Kälteanlage erfolgt durch Frequenzregelung des Verdichters im Bereich von 25 bis 80 Hz. Bei Erreichen der Minimalfrequenz des Verdichters produziert die Anlage bei geringer Kühlanforderung zu viel Kälteleistung, wodurch ein Gegenheizen mit dem Heizregister notwendig ist.

Abbildung 17 zeigt die sieben Wagen des ICE-T, das heißt dieser Zug verfügt über einen Wagen weniger als der ICE 3 mit acht Wagen (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14).

Die daraus resultierenden Unterschiede bezüglich der Passagierbesetzung und des Jahresenergieverbrauches wurden beim Vergleich der Systeme berücksichtigt.

Abbildung 17: Wagenübersicht des Vergleichszuges ICE-T



Übersicht der sieben Wagen des Vergleichszuges ICE-T. Quelle: (Deutsche Bahn AG, Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016, 2017).

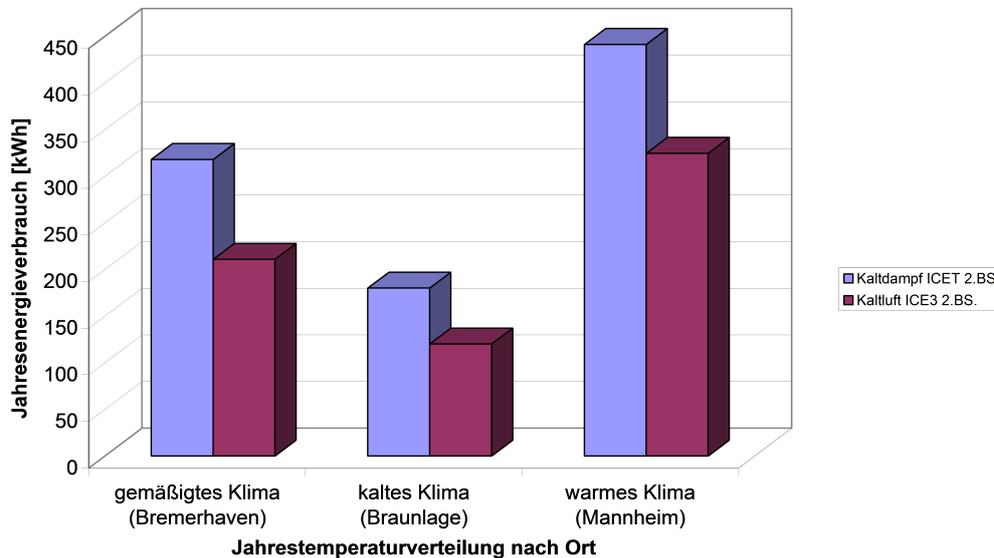
1.4.3 Vorangegangene Messungen zur Bestimmung des Energieverbrauchs

Vor Beginn dieser Arbeiten gab es eine Untersuchung der DB Systemtechnik GmbH zum Energieverbrauch. (Meister, 2012) führte vergleichende betriebliche Messungen zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Klimaanlage mit den Kältemitteln Luft und R134a durch. Verglichen wurden die in Abschnitt 1.4.1 und 1.4.2 beschriebenen Klimaanlage ACS und VCS. In den Jahren 2008 und 2009 wurden für diese Klimaanlage die Leistungsaufnahme sowie relevante Betriebsparameter im Feldbetrieb erfasst. Es wurde eine Vergleichsbasis geschaffen und der Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die beiden HLK-Anlagen ermittelt.

Basierend auf dem Vergleich der thermodynamischen Eigenschaften der beiden Kältemittel wurde von (Meister, 2012) ursprünglich über den gesamten Leistungsbereich eine höhere Energieeffizienz für die R134a-Anlage erwartet. In Summe zeigte die Betrachtung von (Meister, 2012) aber, dass der Jahresenergiebedarf der betrachteten luftgestützten Anlage niedriger ist als bei der betrachteten Kaltdampf-anlage mit dem konventionellen Kältemittel, wie in Abbildung 18 dargestellt. (Meister, 2012) ermittelte für die ICE 3-Anlage (ACS) eine Einsparung im Jahresenergieverbrauch im Kühlbetrieb von 26%

(Mannheim) bis 34% (Bremerhaven) gegenüber der ICE-T-Anlage (VCS). Als Gründe nennt (Meister, 2012) „die über den gesamten Leistungsbereich verlustfrei regelbare Kälteleistung der ICE 3-Anlage, das Regelkonzept der ICE-T-Anlage im Niedriglastbereich sowie der generell hohe Anteil an geringen Lastanforderungen im Jahresverlauf“.

Abbildung 18: Jahresenergieverbrauch für Kälteerzeugung pro Sitzplatz gem. vorangegangener Studie



Quelle: (Meister, 2012)

Die Arbeit von (Meister, 2012) stellt in vielen Bereichen die Basis und eine Referenz für die vorliegende Arbeit dar. Insbesondere wurden die von (Meister, 2012) verwendeten Felddaten zur VCS-Anlage in einem ICE-T auch in dieser Arbeit herangezogen. Hinsichtlich der Vergleichsmethodik (Klasseneinteilung, Gewichtung der Klassen) orientierte sich die vorliegende Studie an der Arbeit von (Meister, 2012).

In der vorliegenden Studie gehen die Betrachtungen für den Vergleich jedoch deutlich weiter und die Ansätze von Meister wurden weiterentwickelt. Insbesondere wird in der Arbeit von (Meister, 2012) keine Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit angestellt. Dies stellt einen wichtigen Beitrag der vorliegenden Arbeit dar.

Neben der Betrachtung der ACS und VCS Anlage wie bei (Meister, 2012), erfolgte in der vorliegenden Studie zusätzlich ein Vergleich zwischen weiterentwickelten/optimierten ACS und VCS Anlagen.

Hinsichtlich der Betrachtung zum Leistungs- und Energiebedarf werden in Abschnitt 2.3.3.7 die zentralen Unterschiede zwischen der Arbeit von (Meister, 2012) und der vorliegenden Arbeit beschrieben. Zu nennen sind insbesondere die Betrachtung des Kühl- und Heizbetriebs (statt der ausschließlichen Betrachtung des Kühlbetriebs), die Verwendung einer anderen und aktuelleren Datenbasis für meteorologische Daten (Testreferenzjahre) und Berücksichtigung typischer Betriebszeiten im Komfortbetrieb, die neue Datenbasis zu ACS und der Vergleich anhand des Betriebsprofils (Zugfahrten) gemäß der in dieser Studie erfolgten Felddatenerfassung.

1.5 Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern

Die Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG war als Auftragnehmer für die gesamte Durchführung des Vorhabens verantwortlich und hat zu diesem Zweck die Deutsche Bahn (DB) als Unterauftragnehmer einbezogen.

Die wichtigsten Punkte der Aufgabenverteilung auf die drei Projektpartner sind nachfolgend aufgeschlüsselt.

Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

- ▶ Bau und Bereitstellung des Kompaktklimageräts (KKG)
- ▶ Erstellung des Messprogramms (Konzept)
- ▶ Einbau der zusätzlichen Messtechnik
- ▶ Aufzeichnung und Auswertung der Daten
- ▶ Analyse der Gesamtbetriebskosten in Zusammenarbeit mit DB
- ▶ Diskussion und Abstimmung der Methodik und Ergebnisse

DB Systemtechnik GmbH

- ▶ Analyse und Bereitstellung der Betriebskosten der DB
- ▶ Unterstützung bei der Analyse der Messergebnisse
- ▶ Bereitstellung der Daten zu Vergleichsfahrzeugen und Wartungsdaten
- ▶ Diskussion und Abstimmung der Methodik und Ergebnisse

DB Fernverkehr AG

- ▶ Bereitstellung des Zuges
- ▶ Einbau des Kompaktklimageräts (KKG)
- ▶ Unterstützung beim Einbau der Messtechnik
- ▶ Diskussion und Abstimmung der Methodik und Ergebnisse

Zwischen diesen drei Projektpartnern fanden über die gesamte Laufzeit des Vorhabens mehrere Arbeitstreffen statt. Ergänzend dazu gab es insgesamt drei Projekttreffen der Projektpartner mit dem UBA, einen Presse- und Diskussionstermin mit weiteren Vertretern der Projektbeteiligten und ein Abschlussfachgespräch zur Vorstellung der Ergebnisse.

2 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DES PROJEKTES

In diesem Abschnitt werden die Maßnahmen und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete (AP) ausführlich beschrieben. Dabei wird in jedem AP eingangs die Zielsetzung kurz erläutert. Aus Gründen der Chronologie wird zuerst auf die Analyse der Ergebnisse der Messungen am ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 (AP4) eingegangen, bevor der Vergleich mit anderen Anlagen (AP3) gezogen wird.

Die Aufstellung der AP in diesem Kapitel lautet daher:

- ▶ AP 1: Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms
- ▶ AP 2: Durchführung der Messung
- ▶ AP 4: Auswertung des Messprogramms
- ▶ AP 3: Vergleich mit anderen Klimaanlagen
- ▶ AP 5: Fachgespräch und Veröffentlichung

2.1 Erarbeitung und Vorbereitung des Messprogramms (AP1)

Das erste Arbeitspaket (AP 1) diente der Vorbereitung aller weiteren AP dieses Vorhabens zur Erfassung von Felddaten der luftgestützten Klimaanlage. In diesem Arbeitspaket wurde das Messkonzept erstellt, mit dem Betreiber (Deutsche Bahn AG) abgestimmt, die Messtechnik installiert, in Betrieb genommen und getestet sowie ein Auswertungskonzept erarbeitet.

Der Einbau der benötigten Messtechnik und Datenaufzeichnung konnte zum Ende des Jahres 2015 erfolgreich abgeschlossen werden. Im Verlauf des Zeitraums von Juni bis Dezember 2015 wurde die gesamte Messtechnik und die dazugehörige Sensorik an mehreren Terminen in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn installiert und getestet. In diesem Zeitraum sind bereits Messwerte aufgezeichnet worden, die, sofern verwertbar, auch zur Analyse im AP 4 (siehe dazu Abschnitt 2.3) verwendet wurden.

Mit der Messtechnik gab es jedoch noch einige Probleme und Störungen, weshalb Modifikationen und Reparaturen notwendig wurden, die in Abschnitt 2.1.5 und 2.2.2 näher erläutert werden. Die daraus resultierende Verfügbarkeit der Daten ist in Abschnitt 2.2.2 grafisch dargestellt.

Mit diesen notwendigen Anpassungen und Reparaturen wurde das AP 1 im Juni 2016 abgeschlossen.

2.1.1 Messkonzept

Um den Energieverbrauch des luftgestützten Kompaktklimagerätes (KKG) im ICE 3 - BR 403, Triebzug 301 zu erfassen und in Abhängigkeit von frei wählbaren Parametern darstellen zu können, wurde ein Messkonzept entwickelt, das sich auf drei Bereiche der Datensammlung stützt.

Zum einen sind das die Daten, die im Rahmen der Regelung des KKGs anfallen und im Klimarechner (BK3) pro Gerät (insgesamt sind es acht KKGs) gespeichert werden. Weiterhin wurden Daten verwendet, die am Feldbus des Zuges (MVB) auslesbar sind. Außerdem wurden zusätzliche Sensoren und Messeinrichtungen im KKG Nr. 4 und in den Wagen TW7 und TW2 angebracht.

Auf diese Weise konnten alle klimarelevanten Daten der zwei Halbzüge, die über den MVB übertragen werden, von der Messausrüstung im Zehntelsekundenakt ausgelesen und gespeichert werden. Zusätzlich dazu wurden die im Klimarechner vorhandenen Werte aufgezeichnet – ebenfalls alle zehn Sekunden pro Halbzug.

Ergänzend wurden folgende Werte einmalig für den gesamten Zug erfasst:

- ▶ Relative Feuchte und Temperatur der Luft außen (Frischlufte)
- ▶ Position, Richtung und Geschwindigkeit des Zuges (über GPS)
- ▶ Sonneneinstrahlung (links und rechts auf dem Dach des TW7)

Weiterhin:

- ▶ Relative Feuchte und Temperatur der Luft innen (Umluft im TW7 und TW2)
- ▶ Passagierbesetzung des Wagens TW7
- ▶ Barometrischer Luftdruck innerhalb des Zuges

Alle vom MVB Gateway, dem BK3 und den zusätzlichen Sensoren gesammelten Daten und Informationen wurden auf einem weiteren Messrechner (ebenfalls ein BK3) zusammengetragen, mit eindeutigen Zeitstempeln versehen und in Logfiles lokal gespeichert. Anschließend erfolgte von jedem Halbzug eine stündliche Übertragung per GSM-USB-Modem und über das Mobilfunknetz zu stationären Geräten beim Auftragnehmer LVF. Dort wurden die Daten anschließend weiter verarbeitet (s. Abschnitt 2.1.5).

Die zusätzlich eingebauten Sensoren und die zusätzliche Messtechnik werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.1.2 Vorbereitung der zusätzlichen Messtechnik

Nach Abschluss der theoretischen Vorbetrachtungen und Vorbereitungen und der Erstellung des Messkonzeptes erfolgte die Beschaffung bzw. Entwicklung und Fertigung der Hardware für die Messdatenerfassung. Dazu gehörte unter anderem die Konstruktion der Anbindungspunkte des Datenerfassungssystems an die Klimaanlage und an das Klimasystem des Fahrzeugs.

In Abbildung 19 ist das komplett mit den zusätzlichen Sensoren und GPS ausgerüstete Kompaktklimagerät (KKG) Nr. 4 für den Wagen TW7 abgebildet. Die einzelnen Elemente werden in den folgenden Abschnitten ausführlich erläutert.

Abbildung 19: Positionen der eingebauten Sensorik und Anschlüsse im Kompaktklimagerät Nr. 4 im Dach des ICE 3 - Wagens TW7



Positionen des GPS und der eingebauten Sensoren für Solarstrahlung, Luftfeuchte/ Temperatur und deren Anschlüsse im Kompaktklimagerät Nr. 4 im Dach des ICE 3 - Wagens TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die zusätzliche Messtechnik konnte zum Teil bereits im Werk des Auftragnehmers LVF installiert werden, andere Geräte mussten vor Ort im Triebzug 301 eingebaut bzw. mit den bereits im KKG Nr. 4 verbauten Systemen verbunden und zum Schaltschrank verkabelt werden.

2.1.2.1 Temperatur und Feuchte der Frischluft

Da die acht Kompaktklimageräte (KKG) für den Erprobungsbetrieb der Deutschen Bahn (DB) beim Auftragnehmer Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG (LVF) neu produziert wurden, bestand die Möglichkeit, ein KKG an die Messanforderungen anzupassen, bevor es in den Wagen integriert wurde.

Um die Temperatur und relative Feuchte der Luft außerhalb des Zuges zu bestimmen, wurde ein kombinierter Feuchte/Temperatur-Sensor im Prozesslufterlasskasten verbaut (siehe Abbildung 20). Da die Anlage Prozessluft aus der Umgebung ansaugt, befindet sich der Sensor an dieser Position in einem kontinuierlichen Luftstrom, solange die motorisierte Kühlturbine (MKT) in Betrieb ist.

Abbildung 20: Position des Temperatur- und Feuchtesensors im Kompaktklimagerät



Position des Temperatur- und Feuchtesensors im Kompaktklimagerät. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Zur Installation des Sensors musste die Konstruktionszeichnung des KKG überarbeitet werden und es waren Änderungen im Ablauf der Montage erforderlich. Anschließend wurde der Sensor verkabelt, das Kabel mit entsprechender Länge im Gerät verlegt und zum Anschluss im Schaltschrank des Wagens TW7 vorbereitet.

2.1.2.2 Temperatur und Feuchte der Umluft

Für die Auswertung der Messungen war es sehr wichtig, die Temperatur und Feuchte der Umluft zu kennen, bevor diese wieder in das Kompaktklimagerät (KKG) zurückgeführt wird. Es befinden sich zwar Temperatursensoren in den Wagen, die ebenfalls ausgewertet wurden, aber die Raumfeuchte wurde bisher in keinem Wagen erfasst.

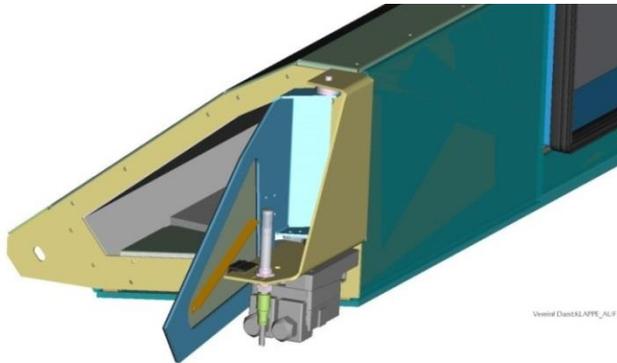
Daher wird die gleiche Art kombinierter Feuchte/Temperatur-Sensor, die für die Messung der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft außerhalb des Zuges verwendet wird, auch genutzt, um die relative Feuchte und Temperatur der Luft im Inneren des Wagens zu messen. Die Sensoren wurden in den Wagen TW7 und TW2 eingebaut. Der TW7 verfügt als Wagen zweiter Klasse mit 74 Sitzen über die nominell dichteste Besetzung, der TW2 mit 32+16 Sitzen über die nominell geringste Besetzung.

Es wurde entschieden, die Sensoren am Eingang des Mischluftkastens zu platzieren, um die relative Feuchte und Temperatur im Luftstrom der rücklaufenden Umluft zu messen, bevor die Umluft im

Mischluftkasten mit Frischluft von außen gemischt und zur neuen Zuluft für die Passagiere wird. Damit erhält man Informationen zur aktuellen Luftsituation im Wagen.

In Abbildung 21 ist eine Einbaustudie des Sensors vor der Umluftklappe des Mischluftkastens dargestellt. Der Sensor ist in der Bildmitte zu sehen, stehend, mit grünem Anschluss gezeichnet.

Abbildung 21: Bildliche Darstellung der Position des Temperatur- und Feuchtesensors in der Umluft



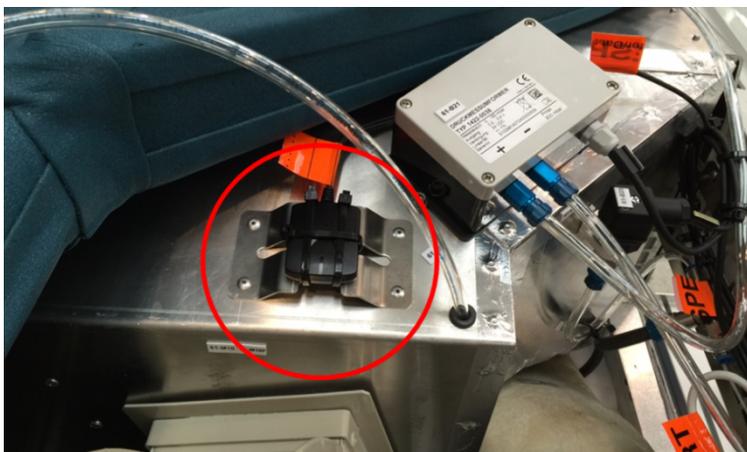
Bildliche Darstellung der Position des Temperatur- und Feuchtesensors in der Umluft. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.2.3 Position, Geschwindigkeit und Richtung des Zuges

Da es für die geplante Auswertung und vor allem für den Abgleich mit lokalen Wetterdaten wichtig war, die Position des Zuges und auch die Fahrgeschwindigkeit des Zuges zu kennen, wurde ein GPS-Modul beschafft und im Kompaktklimagerät (KKG) Nr. 4 verbaut (Abbildung 22). Das GPS-Modul ist in der Lage, Koordinaten, Richtung und Geschwindigkeit des Zuges zu bestimmen.

Für den Einbau des GPS musste die Konstruktionszeichnung des KKG überarbeitet und die Montage angepasst werden. Weiterhin war es erforderlich, einen speziellen Blechhalter separat zu konstruieren, zu zeichnen, zu fertigen und im Gerät zu montieren. Zudem war die optimale Verkabelung zu ermitteln, da die Signale per USB übertragen werden, aber die Signalstärke nur eine kurze Kabellänge überwinden kann. Schließlich wurde eine Kabellänge gefunden, die die Anforderungen erfüllt. Das Kabel wurde vorab für die Verbindung zum Schaltschrank des TW7 vorbereitet.

Abbildung 22: Im Kompaktklimagerät eingebautes GPS-Modul inklusive Blechhalter



Im Kompaktklimagerät eingebautes GPS-Modul inklusive Blechhalter. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Für den Empfang der Satellitensignale ist es nicht unerheblich, wo sich der GPS-Sensor befindet. Nach längeren Überlegungen wurde schließlich eine Position des GPS im Gerät gefunden, an der der Sensor lediglich vom Deckel des KKG überdeckt wird. Da der Deckel aus Glasfaser besteht, wird das Signal nicht wesentlich verschlechtert.

2.1.2.4 Sonneneinstrahlung

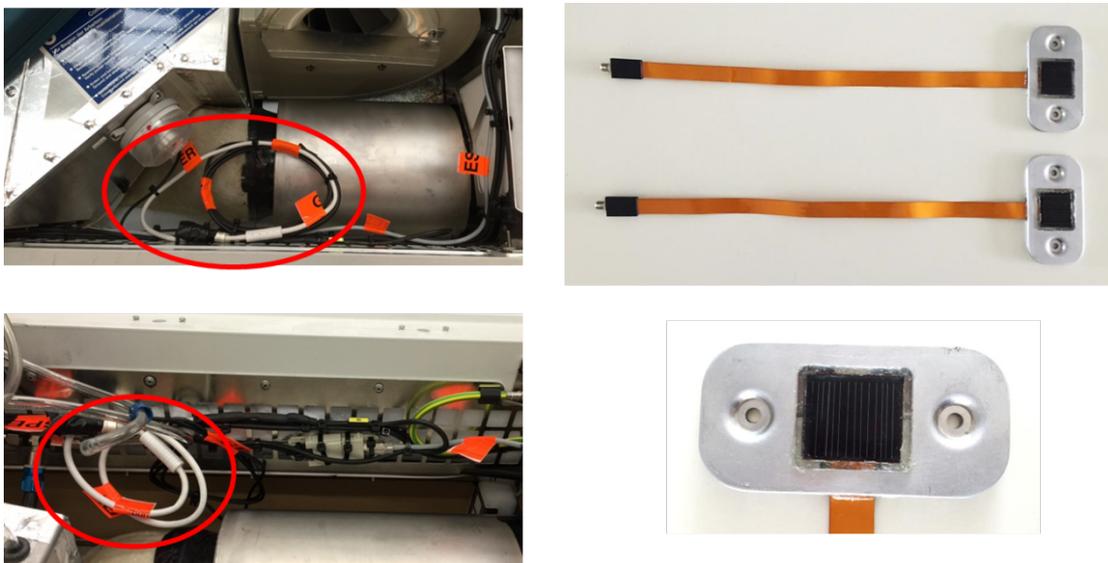
Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Wärmeeintrag durch die Sonneneinstrahlung. Gerade für die Regelung der Klimaanlage ist es wichtig, das Verhältnis von Strahlungs- und Umgebungswärme zu kennen. Daher wurden auf dem Dach des Zuges am Rahmen des Kompaktklimagerätes (KKG) Nr. 4 zwei Solarsensoren (Photovoltaikzellen, PV) installiert.

Dazu wurden drei PV-Zellen beschafft. Zwei dieser Zellen wurden zu Einheiten ergänzt, die sich montieren lassen. Dazu wurde ein koaxiales Flachbandkabel angelötet und jede Zelle mit einem Lastwiderstand versehen. Weiterhin wurde jeweils ein spezieller Halter konstruiert und gefertigt, der aus drei Teilen besteht und dazu dient, die PV-Zelle aufzunehmen und der als Befestigungsgrundlage auf dem Rahmen des KKG genutzt wird.

Die verlöteten Zellen wurden anschließend im Halter in einem Bad aus Zweikomponentenkleber fixiert. Die Kabelenden der beiden Sensoren passten zu den in Abbildung 23 ersichtlichen Kabelvorrichtungen im KKG Nr. 4.

In Abbildung 23 sind die gefertigten Solarsensoren und deren Anschlussstellen im KKG Nr. 4 dargestellt. Die abschließende Montage der Solarsensoren auf dem Dach des TW7 ist in Abschnitt 2.1.3.4 ausführlich erläutert.

Abbildung 23: Solarsensoren: Zwei vorbereitete Anschlussstellen für die Solarsensoren (links), die beiden Solarsensoren mit Kabelenden (rechts oben), ein einzelner Solarsensor (rechts unten)



Solarsensoren: Zwei vorbereitete Anschlussstellen für die Solarsensoren (links), die beiden Solarsensoren mit Kabelenden (rechts oben), ein einzelner Solarsensor (rechts unten). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.2.5 Schaltschrank

Zur Auswertung der Messdaten aller Sensoren sowie der zusätzlichen Daten des Feldbusses (MVB) und des Klimarechners war die Installation weiterer Messtechnik in den Schaltschränken der Wagen

TW2 und TW7 notwendig, die separat vom Kompaktklimagerät (KKG) im jeweiligen Wagen des Zuges verbaut ist. Jedes KKG besitzt einen eigenen Schaltschrank.

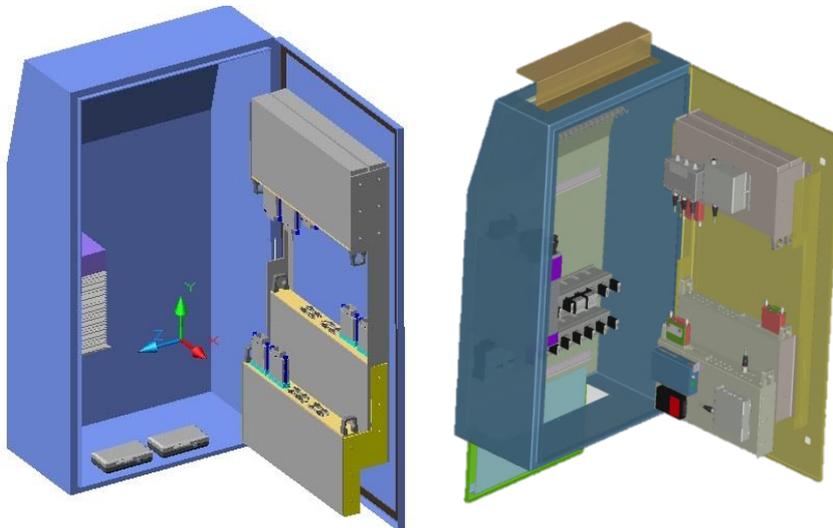
Die Integration von zusätzlichen Aggregaten im jeweiligen Schaltschrank stellte eine große Herausforderung dar, weil der zur Verfügung stehende Bauraum sehr begrenzt ist und durch die zusätzliche Messtechnik ein erhöhter Wärmeeintrag entsteht, der die ordnungsgemäße Funktion der Klimaregelung und -steuerung in keinem Fall beeinflussen darf.

Aus diesen Gründen wurden verschiedene Einbauuntersuchungen mit den notwendigen Modulen durchgeführt, um herauszufinden, wie eine Installation ermöglicht werden kann (siehe Abbildung 24).

Die zusätzlich zu integrierenden Komponenten waren:

- ▶ Klimarechner (BK3) für die Datenerfassung und -verarbeitung
- ▶ MVB Gateway für die Erfassung der Daten der Feldbusse (MVB) der Halbzüge
- ▶ Zählleinheit für die Besetzungszählung im Wagen TW7
- ▶ Barometrischer Luftdrucksensor für die Messung des Luftdruckes im Inneren des Zuges (nur im Wagen TW7)
- ▶ Zusätzlicher Temperatursensor für die Überwachung der Temperatur im Schaltschrank als Sicherheitsmaßnahme
- ▶ Ethernet Switch für die Verbindung zur Datenerfassung
- ▶ USB Hub für die Verbindung zum GPS-Sensor
- ▶ GSM-USB-Modem für die Datenübertragung direkt am Klimarechner BK3 mit Zusatzantenne
- ▶ Spannungsversorgung für die zusätzlichen Sensoren im Kompaktklimagerät (KKG) und Schaltschrank

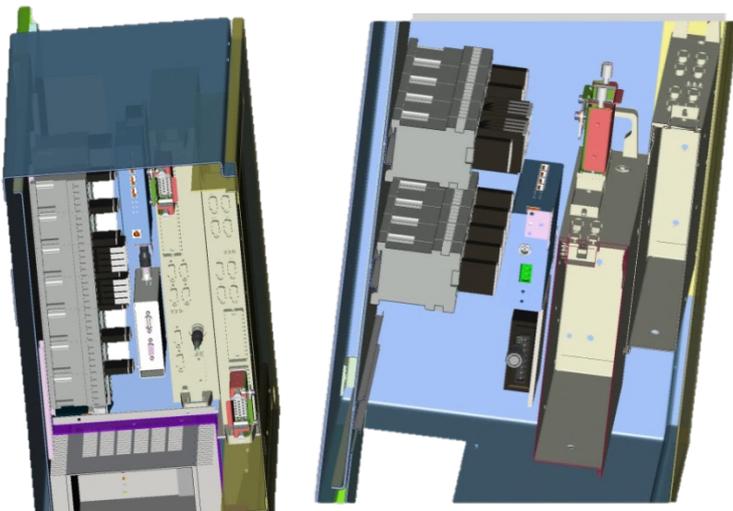
Abbildung 24: Einbaustudien der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank zum Kompaktklimagerät im Wagen TW7



Einbaustudien der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank zum Kompaktklimagerät im Wagen TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt die hohe Verdichtung aller Geräte im zur Verfügung stehenden Bauraum im Schaltschrank mit den geplanten Modulen.

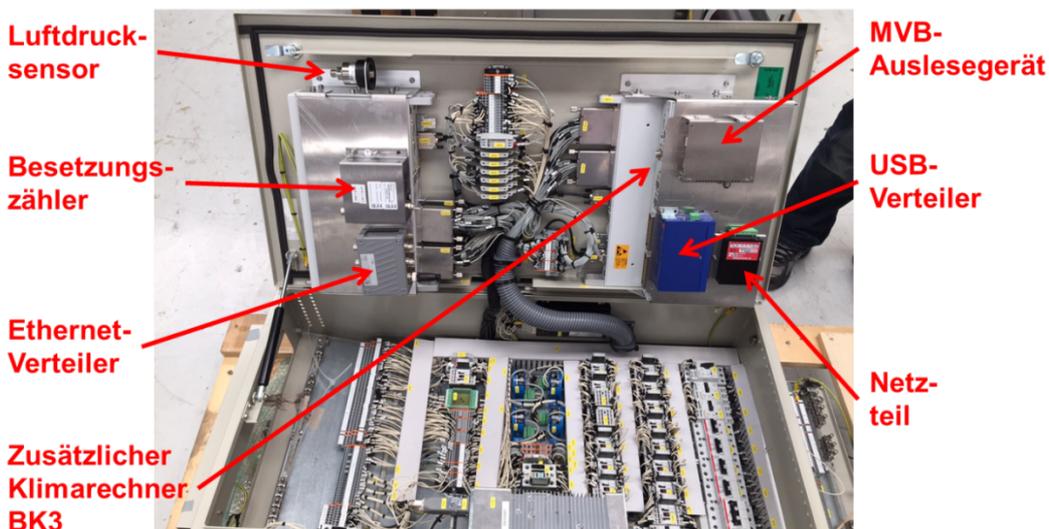
Abbildung 25: Bauraumuntersuchungen der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank



Bauraumuntersuchungen der zusätzlichen Messtechnik im Schaltschrank. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Lösung, die in den Einbaustudien gefunden wurde, musste noch an einem echten Schaltschrank getestet werden. Zu diesem Zweck wurden zwei großflächige Blechhalter konstruiert, gezeichnet und gefertigt, um die genannten zusätzlichen Komponenten aufzunehmen. Daraus entstanden zwei sogenannte Schaltschrankmodule. Ein Modul mit Luftdrucksensor, Zählleinrichtung und Ethernet Switch wurde im oberen Teil des Schaltschranks eingebaut. Ein zweites Modul wurde im unteren Teil des Schaltschranks untergebracht mit dem zusätzlichen Klimarechner BK3 unter dem Halter und dem MVB Gateway, dem USB Hub und der Spannungsversorgung auf dem Halter (siehe Abbildung 26).

Abbildung 26: Probeinbau der zusätzlichen Messtechnik (Module) im Schaltschrank (liegend)

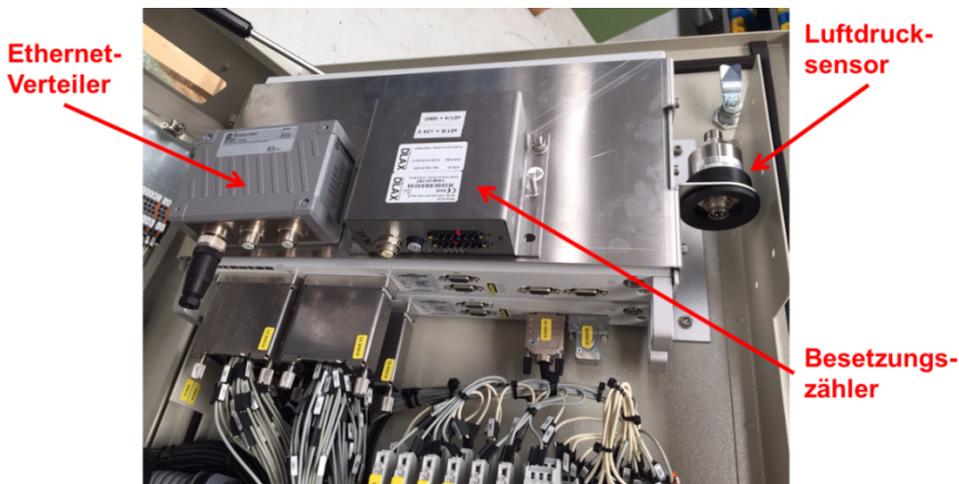


Probeinbau der zusätzlichen Messtechnik (Module) im Schaltschrank (liegend). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Der Probeinbau der beiden Module zeigte, dass eine Installation in den Schaltschränken der Wagen TW7 und TW2 prinzipiell möglich ist. Die Verkabelung des Schaltschranks konnte beim Probeinbau noch nicht berücksichtigt werden, diese Arbeiten konnten erst direkt am Zug vorgenommen werden (vgl. dazu Abbildung 33). Die Verkabelung ist in Abschnitt 2.1.3.1 näher erläutert.

In Abbildung 27 ist das obere Schaltschrankmodul beim Probeeinbau auf der Innenseite der Schaltschranktür ersichtlich.

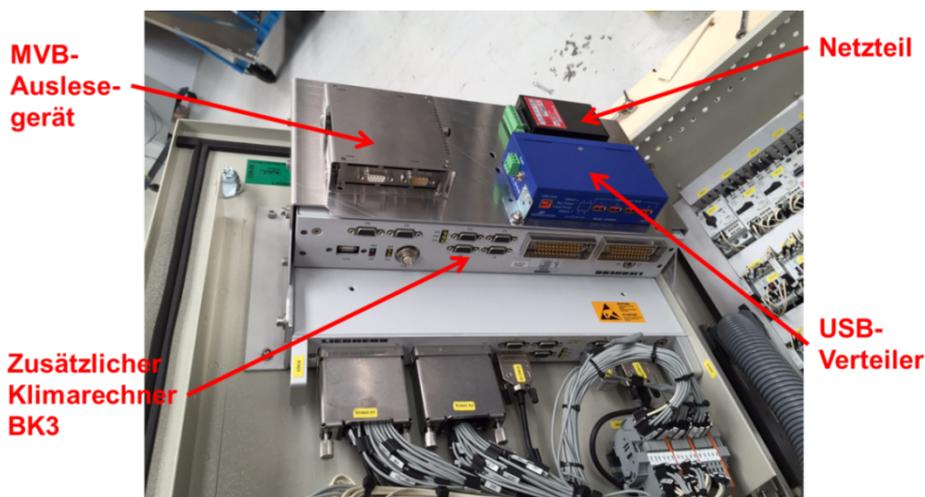
Abbildung 27: Ethernet Switch (links), barometrischer Luftdrucksensor (rechts) und Zähleinheit des Besetzungszählers (mittig) – Probeinbau



Ethernet Switch (links), barometrischer Luftdrucksensor (rechts) und Zähleinheit des Besetzungszählers (mittig) – Probeinbau. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 28 zeigt das untere Schaltschrankmodul beim Probeinbau auf der Innenseite der Schaltschranktür.

Abbildung 28: MVB (Feldbus)-Ausleseeinheit (oben links), zusätzlicher Klimarechner (BK3, Mitte unten), Stromversorgung der Sensorik (oben rechts) und USB-Verteiler (unten rechts) – Probeinbau



MVB (Feldbus)-Ausleseeinheit (oben links), zusätzlicher Klimarechner (BK3, Mitte unten), Stromversorgung der Sensorik (oben rechts) und USB-Verteiler (unten rechts) – Probeinbau. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Nach dem erfolgreichen Einbau der Module in den geringen zur Verfügung stehenden Bauraum in den Wagenschaltschränken musste eine Lösung für den erhöhten Wärmeeintrag in den Schaltschrank durch die Abwärme der zusätzlichen Komponenten gefunden werden.

Um keine Störung des normalen Ablaufes durch die Messinstrumentierung hervorzurufen und mögliche Gefahren für temperaturempfindliche Komponenten zu erkennen und ggf. abwenden zu können, wurde ein weiterer reiner Temperatursensor im Inneren des Schaltschranks verbaut, dessen Temperaturwerte erfasst wurden. Dieser Sensor ist in Abbildung 33 in Abschnitt 2.1.3.1 abgebildet (silberner Messkopf auf messingfarbener Schraubhalterung hängend im Schaltschrank, rot markiert).

2.1.3 Einbau der Messtechnik

Die Installationsphase der acht Kompaktklimageräte (KKGs) in den Triebzug Tz 301 des ICE 3 – BR 403, wurde für die Einrüstung der zusätzlichen Messtechnik genutzt.

Nachdem die acht KKGs im Zug installiert waren (siehe Abbildung 29), folgte der Einbau der zusätzlichen Sensorik in den Schaltschränken bzw. den Wagen TW7 und TW2, auf dem Dach des TW7 und im/am Kompaktklimagerät Nr. 4. Um die Installation der umfangreichen Nachrüstung durchzuführen, waren mehrere mehrtägige Zusatzaufenthalte im DB-Werk Nürnberg notwendig.

Nachfolgend werden die einzelnen Einbauabschnitte einzeln erläutert und beschrieben.

Abbildung 29: Im Dach des Wagens TW7 des ICE 3 - BR 403 eingebautes Kompaktklimagerät Nr. 4



Im Dach des Wagens TW7 eingebautes Kompaktklimagerät Nr. 4 mit zusätzlicher Sensorik und Verkabelung (orange markiert). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Auf dem vorstehenden Bild ist das in das Dach des Wagens TW7 eingebaute Kompaktklimagerät (KKG) Nr. 4 und der dazu notwendige Dacharbeitsstand zu sehen. Die orangenen Markierungen weisen auf die zusätzliche Messinstrumentierung hin. Der Rahmen des KKG bzw. der Übergang zum Wagendach ist mit gelbem Klebeband gekennzeichnet. Die Kabel rechts im Vordergrund wurden später in den Wagen und zum Schaltschrank verlegt.

2.1.3.1 Einbau der Schaltschrankmodule

Die vorher im Probereinbau zusammengestellten Module wurden vor Ort im Zug endmontiert. In Abbildung 30 ist das untere Modul für den Einbau in den Schaltschrank im Wagen TW7 abgebildet.

Abbildung 30: Schaltschrankmodul mit Messtechnik für den Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403,



Schaltschrankmodul mit Messtechnik für den Wagen TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Anschließend wurden die auf den beiden Blechhaltern montierten Komponenten in den Schaltschränken mittels Schraubbefestigung fixiert und mit den notwendigen Kabelanschlüssen versehen und verkabelt. Die Kabelanschlüsse vor Ort verlötet, um eine dauerhafte Verbindung zu ermöglichen.

In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind beide Schaltschrankmodule in ihren Einbaupositionen abgebildet.

Abbildung 31: Eingebautes und angeschlossenes oberes Schaltschrankmodul im Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403.



Eingebautes und angeschlossenes oberes Schaltschrankmodul im Wagen TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

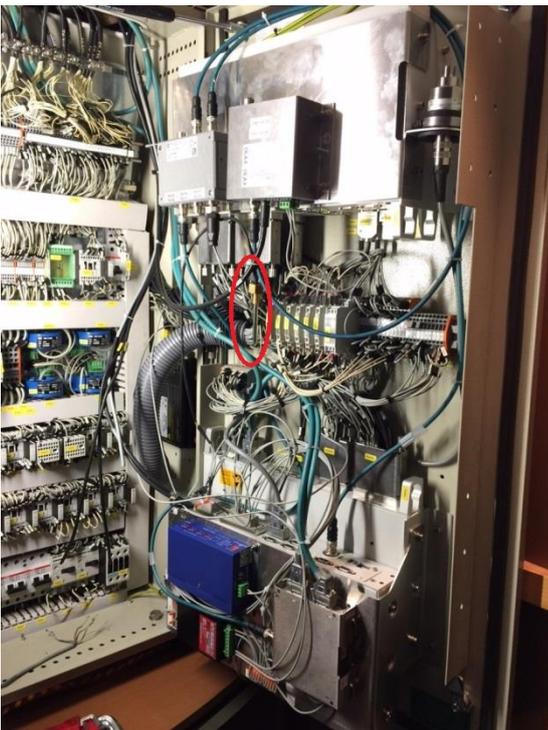
Abbildung 32: Eingebautes und angeschlossenes unteres Schaltschrankmodul im Wagen TW7 des ICE 3 - BR 403.



Eingebautes und angeschlossenes unteres Schaltschrankmodul im Wagen TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

In Abbildung 33 ist der mit allen Modulen ausgestattete Schaltschrank des Wagens TW7 abgebildet.

Abbildung 33: Schaltschrank mit beiden Zusatzmodulen an der Tür und Verkabelung ICE 3 - BR 403, wagen TW 7



Schaltschrank mit beiden Zusatzmodulen an der Tür und Verkabelung vor dem ersten Funktionstest (Temperatur-sensor rot markiert). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.3.2 Einbau der Temperatur- und Feuchtesensoren

Je ein kombinierter Feuchte/Temperatur-Sensor wurde vor dem Einlass zum Mischluftkasten in den Wagen TW7 und TW2 installiert (Abbildung 34). Die Funktionsfähigkeit dieser Sensoren konnte bereits direkt im DB-Werk in Nürnberg beim Einbau der Messtechnik nachgewiesen werden.

Abbildung 34: Eingebauter Temperatur- und Feuchtesensor im ICE 3 - BR 403, Wagen TW2 (analog zum Wagen TW7)



Eingebauter Temperatur- und Feuchtesensor im TW2 (analog zum TW7). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.3.3 Einbau des Besetzungszählers

Um die Besetzung des Zuges in Erfahrung zu bringen, gab es diverse Möglichkeiten. Diese reichten vom Gewicht auf den Achsen, der Auswertung des Reservierungssystems, Zählung durch die Zugbegleiter bis hin zur CO₂-Regelung (Sensor). Ausgewählt wurde schließlich eine in der Bahntechnik bereits an einigen Einstiegen bzw. Abteiltüren angewandte Technik: die Portaldurchgangserfassung der Passagiere an den beiden Großraumeingängen des Wagens TW7. An beiden Türen wurden die Ein- und Ausgänge erfasst (s. Abbildung 35).

Anschließend bildet das System die Differenz aus Ein- und Ausgängen, ermittelt die aktuelle Besetzung des Wagens und speichert diesen Wert im Logfile. Dies geschah im TW7 stellvertretend für den gesamten Zug, da Einbau und Beschaffung dieser Sensoren für alle Wagen des Zuges sehr kostenintensiv geworden wären. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass sich in einem Fernverkehrszug mit wenigen Halten und längeren Fahrten nur geringere Unterschiede in der relativen Besetzung der Wagen ergeben werden.

Die vier Sensoren (je zwei pro Tür/Durchgang), die Kabel und die Zähleinrichtung wurden beschafft und von der DB im Werk Nürnberg in die Deckeneinrichtung eingebaut. Dies ist in Abbildung 35 dargestellt.

Abschließend wurde mittels der mitgelieferten Software eine kurze Funktionsprüfung der Sensoren vor Ort vorgenommen und erfolgreich beendet. Die Ursachen sich anfangs zeigender geringer Ungenauigkeiten in der Erfassung konnten in einem weiteren Termin vor Ort gefunden und behoben werden.

Abbildung 35: Eingebaute Sensoren der Besetzungszählung in den Durchgängen des Wagens TW7 (links oben und rechts) und ein einzelner Sensor (links unten)

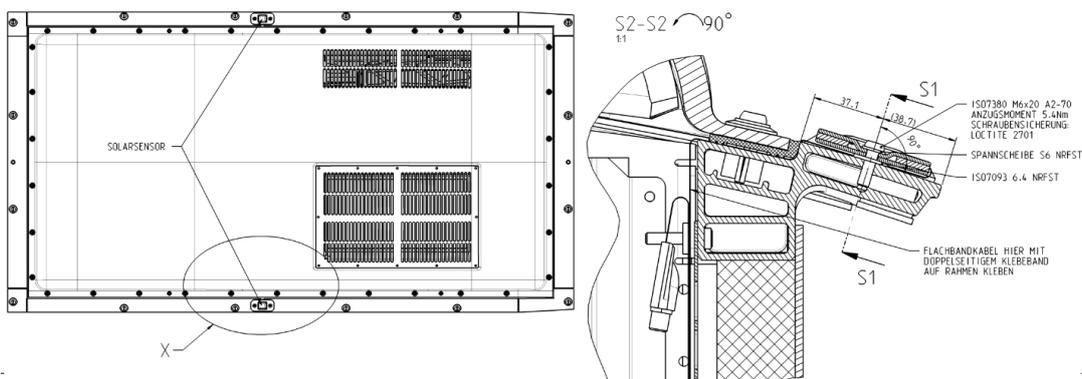


Eingebaute Sensoren der Besetzungszählung in den Durchgängen des Wagens TW7 (links oben und rechts) und ein einzelner Sensor (links unten). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.3.4 Einbau der Solarsensoren

Zur Erfassung der Sonneinstrahlung wurden die beiden in Abschnitt 2.1.2.4 beschriebenen Solarsensoren gemäß der nachfolgenden Zeichnung (Abbildung 36) am Rahmen des Kompaktklimagerätes (KKG) Nr. 4 befestigt. Diese Positionierung der Sensoren musste aufgrund der Rahmenkonstruktion sehr genau überlegt werden, wie aus Abbildung 36 ersichtlich. Danach wurden die Kabel ins Gerät verlegt und mit den bereits vorbereiteten Anschlüssen verbunden.

Abbildung 36: Einbauzeichnung zu den beiden Dachsensoren (Sonneneinstrahlung)



Einbauzeichnung zu den beiden Dachsensoren (Sonneneinstrahlung). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Da der Rahmen zu beiden Seiten einen leicht abfallenden Winkel aufweist, konnten die Sensoren die Strahlung im gesamten Raum über dem Zug und an den Seiten erfassen. Die Sensoren lieferten eine Spannung von maximal 4V, die vom System erfasst wurde. Um nicht nur eine qualitative Aussage zur Sonneneinstrahlung zu erhalten, sondern auch eine möglichst gute quantitative, sollte mittels der drit-

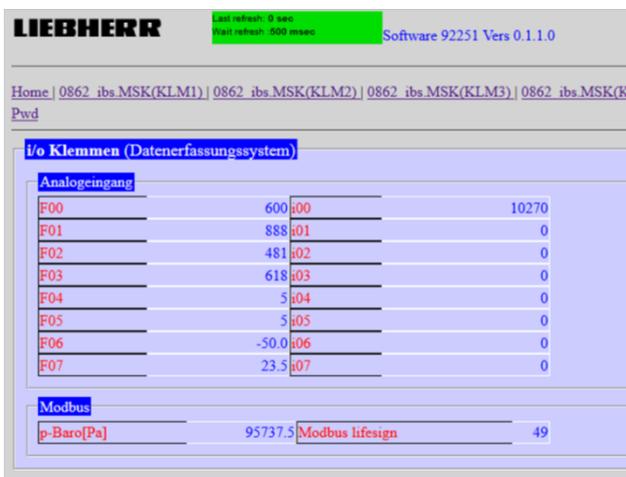
ten Photovoltaik(PV)-Zelle eine Korrelation zwischen der Spannung und der Strahlungsleistung in W/m^2 gefunden werden. Dies wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

2.1.4 Kalibrierung der Messtechnik

Nach Abschluss der Installation der zusätzlichen Messtechnik erfolgte eine erste Überprüfung und Kalibrierung vor Ort. Um die zukünftige Vorgehensweise nachzustellen, wurden in den Wagen TW7 und TW2 jeweils die Datenübertagungsmodems (GSM-Modems) aktiviert und die Datenverbindung mittels GSM-Netz aufgebaut. Die Funkverbindung stellte sich als sehr stabil heraus, sofern das Mobilfunknetz eine entsprechende Netzabdeckung aufwies.

In der nachfolgenden Abbildung 37 sind die Analogeingänge der zu kalibrierenden Sensoren am Klimarechner BK3 dargestellt.

Abbildung 37: Maske zur Kalibrierung der Analogeingänge in den Wagen TW7 und TW2



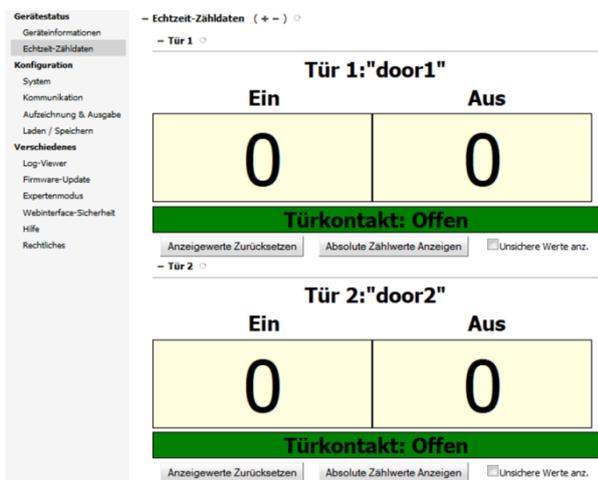
Maske zur Kalibrierung der Analogeingänge in den Wagen TW7 und TW2. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Signaleingänge der Solarzellen wurden aktiviert und geprüft. Danach wurden die Sensoren für Feuchte und Temperatur geprüft, bei denen nach erfolgreichem Signalempfang noch ein Offset (Ausgleichswert) eingestellt werden musste. Die so erhaltenen Werte wurden vor Ort mit einem kalibrierten Thermometer verglichen und bestätigt. Weiterhin wurde der Drucksensor aktiviert und in die Datenerfassung eingebunden. Diese Sensoren verfügten über eine so hohe Güte, dass eine weitere Kalibrierung nicht notwendig war.

Der letzte Schritt bezüglich der zusätzlichen Messinstrumentierung bestand in der Einbindung der Besetzungszählung in das System. Die mitgelieferte Software (Abbildung 38) wurde genutzt, um die Sensoren zu aktivieren. Anschließend wurde die Erfassung der Besetzung in mehreren Durchgängen mit realen Personen überprüft. Dabei waren einige Anpassungen notwendig, um ein erstes zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten. Diese Einstellungen wurden zunächst beibehalten.

Im realen Einsatz zeigte sich jedoch, dass es noch zu kleineren Abweichungen in der Personenzählung kam. Diese wurde mit einem Referenzsystem des Herstellers abgeglichen und bestätigt. Um die gewünschte Genauigkeit zu erhalten, wurden weitere Modifikationen an der Besetzungszählung vorgenommen.

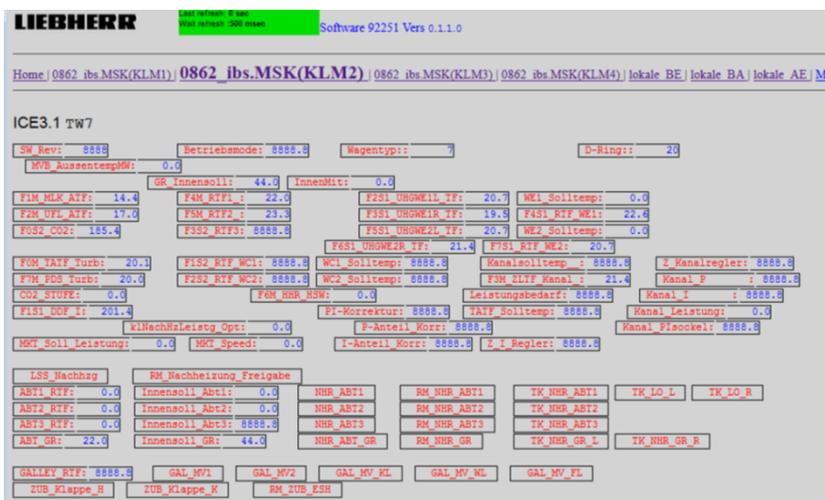
Abbildung 38: Maske zur Kalibrierung und Überprüfung der Besetzungszählung



Maske zur Kalibrierung und Überprüfung der Besetzungszählung. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die nächste Phase der Kalibrierung beinhaltete die Anbindung der Daten des Feldbusses (MVB) an den zusätzlichen Klimarechner BK3, der zur Aufzeichnung und Verarbeitung der Messwerte diente. Zu diesem Zweck wurden jeweils die Daten der MVBs der vier Wagen eines Halbzuges zusammengefasst und dem jeweiligen Klimarechner BK3 per Kabel zugeführt. Im BK3 konnte nun in einer Maske je vier Wagen überwachen (Abbildung 39). Für die Auswertung ist es sehr wichtig, dass die Zeitstempel der beiden Aufzeichnungen der BK3s jedes Halbzuges synchron sind. Dies wurde durch eine entsprechende Kalibrierung sichergestellt.

Abbildung 39: Maske zur Überprüfung ausgelesenen MVB(Feldbus)-Daten



Maske zur Überprüfung ausgelesenen MVB (Feldbus)-Daten. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Nach Abschluss dieser Maßnahme wurden alle Anschlüsse nochmals geprüft und auch die Vollständigkeit der eingehenden Signale verifiziert. Über die beiden Zugangspunkte der Modems an den beiden Klimarechnern (BK3) war es nun möglich, auf alle vier Wagen jedes Halbzuges zuzugreifen und so die klimarelevanten Daten pro Wagen aus dem jeweiligen Klimarechner, dem Feldbus des Zuges (MVB) und den zusätzlich installierten Sensoren abzurufen – und dies auch aus der Ferne per GSM-Netz.

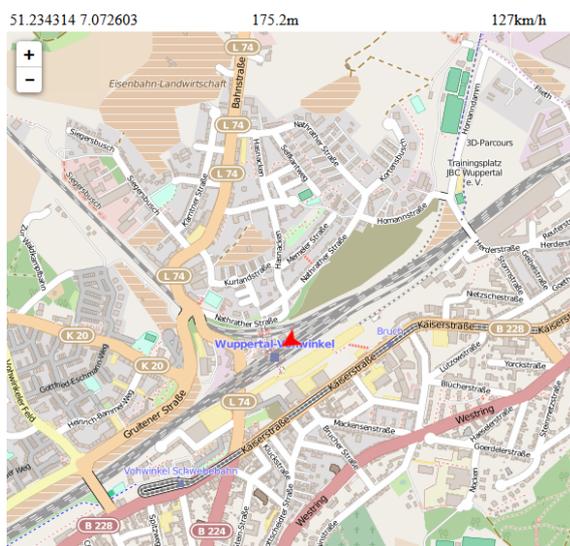
Weiterhin wurde ein Online-Zugriff auf die Momentanwerte realisiert, die in Zehnstundenabschnitten erfasst wurden. Dieser Zugriff auf die Momentanwerte war nicht ständig verfügbar, da er vom Empfang der beiden GSM-Modems abhängig war. Der Online-Zugriff diente vorrangig der Kommunikation mit der Messtechnik und zur Überprüfung der Tätigkeiten der Sensoren (Ausfälle etc.), eine ständige Verfügbarkeit war daher nicht zwingend notwendig. In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind Ausschnitte aus der Online-Überwachung dargestellt.

Abbildung 40: Online-Zugriff auf die zusätzlichen Messdaten (Ausschnitt der Anzeigemaske)

ICE3.1 TW7, lokale Sensorik			
T Frischluft [°C]	14.9	Phi Frischluft [%]	83
T Umluft [°C]	21.5	Phi Umluft [%]	53
Solar 1	5	Solar 2	314
T Schaltschrank [°C]	34.5	ZugNr	ICE726
p-Baro [mbar]	983	Personen	38
tech detail: doors			
01 door(0).in:	43	01 door(0).out:	45
02 door(1).in:	47	02 door(1).out:	36
04 Pers:	38	06 uptime:	6151
ICE3.1 TW2, lokale Sensorik			
T Frischluft [°C]	-39.6	Phi Frischluft [%]	0
T Umluft [°C]	20.3	Phi Umluft [%]	52

Online-Zugriff auf die zusätzlichen Messdaten (Ausschnitt der Anzeigemaske). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 41: Online-Zugriff auf die Position und Geschwindigkeit des Zuges



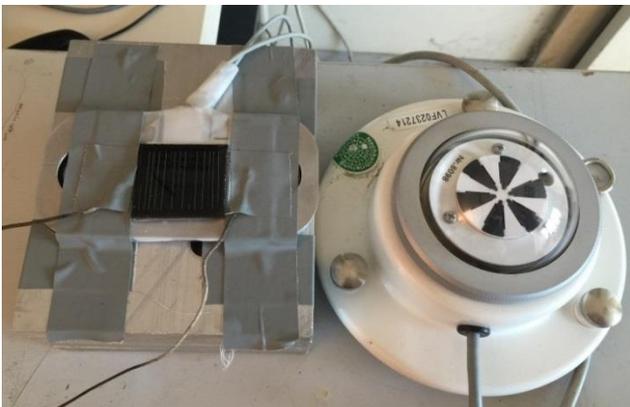
Online-Zugriff auf die Position und Geschwindigkeit des Zuges (Kartenausschnitt mit Markierung des Zugstandortes). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Einstellung der Messtechnik in den beiden Halbzügen sorgte dafür, dass stündlich Logfiles aller Messwerte pro Wagen auf den beiden Klimarechnern (BK3) abgelegt wurden. Je nach Empfang der

GSM-Modems wurden diese auch stündlich zum Auftragnehmer (LVF) übertragen. War dies nicht möglich, versuchte das System die Übertragung im nächsten Zeitfenster – so lange, bis die Übertragung erfolgreich war. Danach wurden die lokalen Kopien gelöscht. Das System fasste die stündlichen Aufzeichnungen automatisch zu sogenannten Sessions zusammen. Eine Session entsprach einem Zeitabschnitt zwischen dem Ein- und Ausschalten des Zuges. Innerhalb der Logfiles waren die Messwerte pro Zeitstempel in Zehnekundenabschnitten vorhanden und standen in dieser Form für die spätere Auswertung zur Verfügung.

Parallel wurde beim Auftragnehmer (LVF) ein Test zur Kalibrierung der Solarsensoren durchgeführt (s. Abbildung 42). Die dritte Photovoltaik (PV)-Zelle wurde dazu verwendet, im Vergleich mit einem kalibrierten Messgerät für die Strahlungsleistung unter verschiedenen Winkeln, Strahlungsintensitäten, Umgebungstemperaturen und Verschmutzungsgraden eine Korrelation zwischen der gemessenen Spannung und der Strahlungsleistung zu erhalten.

Abbildung 42: Testaufbau zur Kalibrierung der Solarsensoren (Ausschnitt)

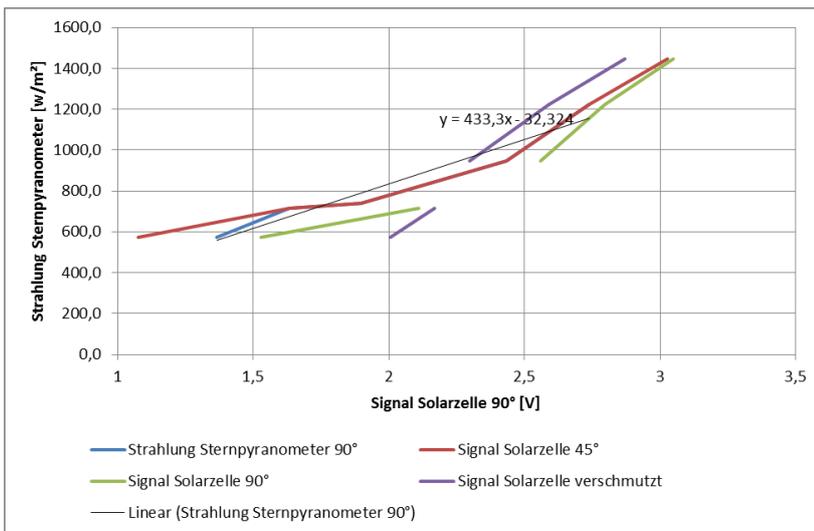


Testaufbau zur Kalibrierung der Solarsensoren – Vergleich mit einem Sternpyranometer. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Dieser Test ergab, dass mit ausreichender Genauigkeit ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der emittierten Spannung der PV-Zelle und der vorhandenen Strahlungsleistung besteht. Dieses Ergebnis wurde in die Auswertung in Abschnitt 2.3.2 einbezogen. Details dazu finden sich in Abschnitt 2.3.2.5.

In Abbildung 43 sind Teile der Vergleichsmessungen des Tests der Photovoltaikzelle dargestellt.

Abbildung 43: Vergleich PV-Zelle und Sternpyranometer



Vergleich PV-Zelle und Sternpyranometer. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

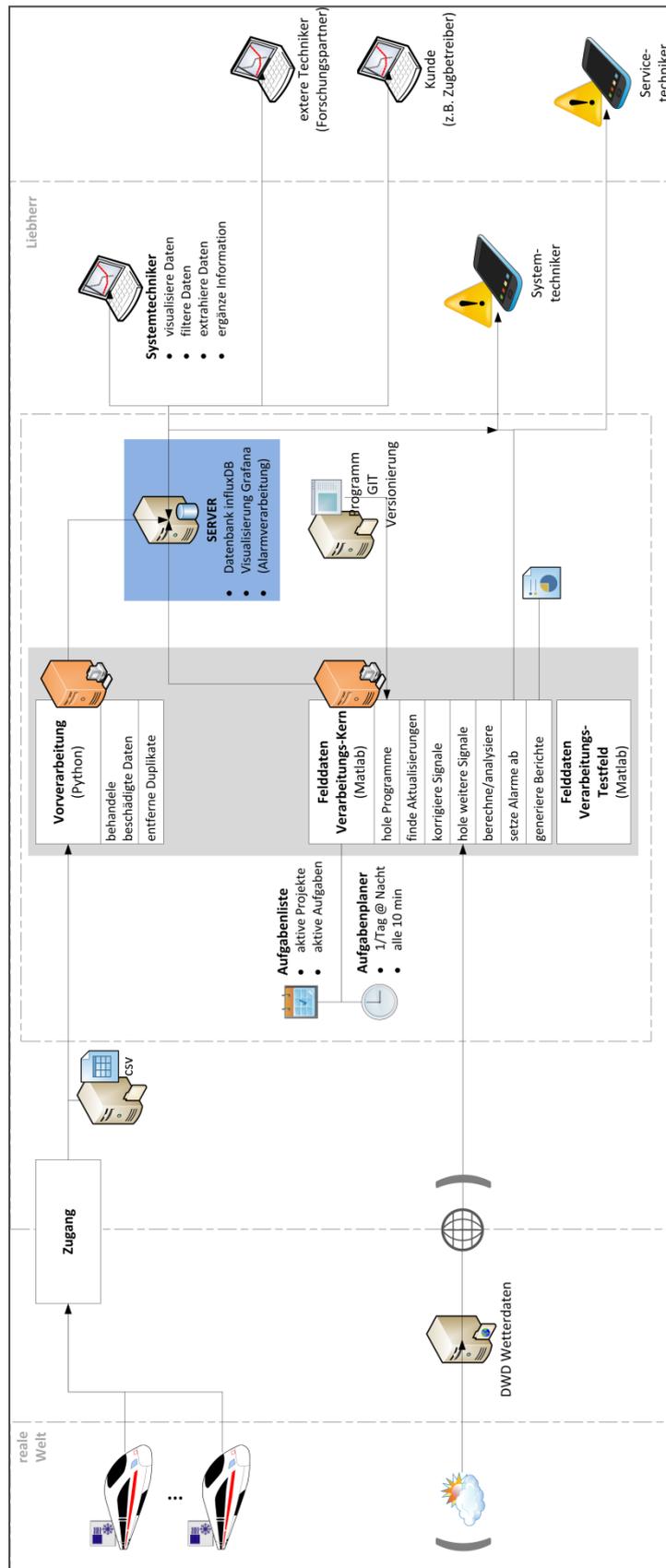
2.1.5 Konzept zur Verarbeitung und Auswertung der Felddaten

Abbildung 44 stellt das globale Konzept des Datenflusses grafisch dar: Daten eines Zuges oder mehrerer Züge im Feldbetrieb werden über ein entsprechendes Gateway zu Lieberr-Transportation Systems GmbH & Co KG (LVF) übertragen, vorverarbeitet und auf einem Server in einer geeigneten Datenbank für Zeitreihen abgelegt. Auf diese Datenbank können Experten von LVF, externe Ingenieure oder Kunden zugreifen um die Daten zu visualisieren, zu filtern und zu exportieren. Auf die Datenbank greift auch die im Projekt erstellte Auswertesoftware zu. Zusätzliche Schnittstellen für die Verwendung von z.B. meteorologischen Daten sind vorgesehen.

Es wurde bei der Konzepterstellung insbesondere auf flexible Erweiterbarkeit Wert gelegt. Zukünftig sollen auch Messdaten anderer Züge für ähnliche Vergleiche erfasst werden können. Ebenfalls soll zukünftig ein Alert-Handling, d.h. eine Generierung und Versendung von Warn- und Fehlermeldungen, implementiert werden können. Im vorliegenden Projekt wurde der Fokus auf unmittelbar erforderliche Funktionalität gelegt.

Eine detaillierte Beschreibung zur Auswertung folgt insbesondere im Abschnitt 2.3.

Abbildung 44: Konzept des Datenflusses und der Verarbeitung der Felddaten



Fließbild des Konzeptes des Datenflusses und der Verarbeitung der Felddaten. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.5.1 Speicherung der Daten

Die im Zug durch den Klimarechner BK3 erzeugten Datensätze (Logfiles) wurden per Mobilfunk auf einen Datenserver übertragen. Anschließend wurden die Daten über einen mit der Programmiersprache Python projektspezifisch implementierten „Importer“ in eine Datenbank geschrieben. Im Zuge dieses Imports wurden die Daten entsprechend umgeformt und vorverarbeitet, wobei das Augenmerk auf der Filterung von fehlerhaften Datensätzen lag. Beispielsweise wurden schadhafte oder unvollständige Datensätze verworfen.

Zur Speicherung der Felddaten wurde in einem ersten Schritt eine Datenbank auf einem bestehenden Programmiergerüst (Framework) aufgesetzt. Verwendet wurde eine klassische relationale SQL-basierte Datenbank auf einem Windows-Server. Ein geeignetes flexibel anpassbares Datenbankschema wurde entworfen. Beim Datenimport in diese Datenbank zeigten sich jedoch erhebliche Schwächen in Performance (Leistung). Es wurde nur eine sehr niedrige Schreibgeschwindigkeit erreicht und Abfragen aus der Datenbank waren mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Daher wurde nach geeigneten Alternativen gesucht.

Angedacht wurde zunächst die Ablage von sogenannten flat-files im Filesystem mit direktem Zugriff von einem Client aus. Für einen derartigen Ansatz gäbe es eine Vielzahl möglicher Speicherformate wie json, csv, NetCDF, HDF, mat. Die Daten werden dabei in textueller und menschlich lesbarer Form oder binär und damit kompakt abgelegt. Je nach Implementierung wäre bei diesem Ansatz mit flat-files am Filesystem ein erheblicher Aufwand für das Datenmanagement und die Speicherverwaltung erforderlich gewesen.

Als schlussendlich präferierte Alternative zeigte die Recherche, dass es für die vorhandenen Daten (Zeitreihen) spezielle nicht-relationale Datenbanken gibt, die den besonderen Speicheranforderungen und Zugriffsmustern bei Zeitreihen Rechnung tragen. Derartige Datenbanken werden als Time Series Databases (TSDB) bezeichnet. Typische Funktionen einer TSDB sind eine Bereichsabfrage zwischen zwei Zeitpunkten, Vorverarbeitung und Zusammenfassung der Daten (z.B. Resampling) sowie Komprimierung maschinengenerierter Rohdaten.

Beispiele für derartige Zeitreihendatenbanken sind InfluxDB (LINK: www.influxdata.com), Open TSDB (LINK: <http://opentsdb.net>) und Graphite (LINK: <https://graphiteapp.org>). Die Entscheidung fiel schließlich auf InfluxDB. Es handelt sich dabei um eine relative neue, weit verbreitete und auch für kommerzielle Anwendungen offene Datenbank. Die Datenbank lag zentral auf einem Server. Berechtigte konnten über das Netzwerk über ein http-API Daten schreiben bzw. abfragen. Die Datenbank ermöglichte es mehreren Benutzern oder Programmen parallel auf die Daten zuzugreifen und sie anzusehen bzw. die Daten zu verarbeiten.

2.1.5.2 Visualisierung der Daten zur manuellen Begutachtung und Verarbeitung

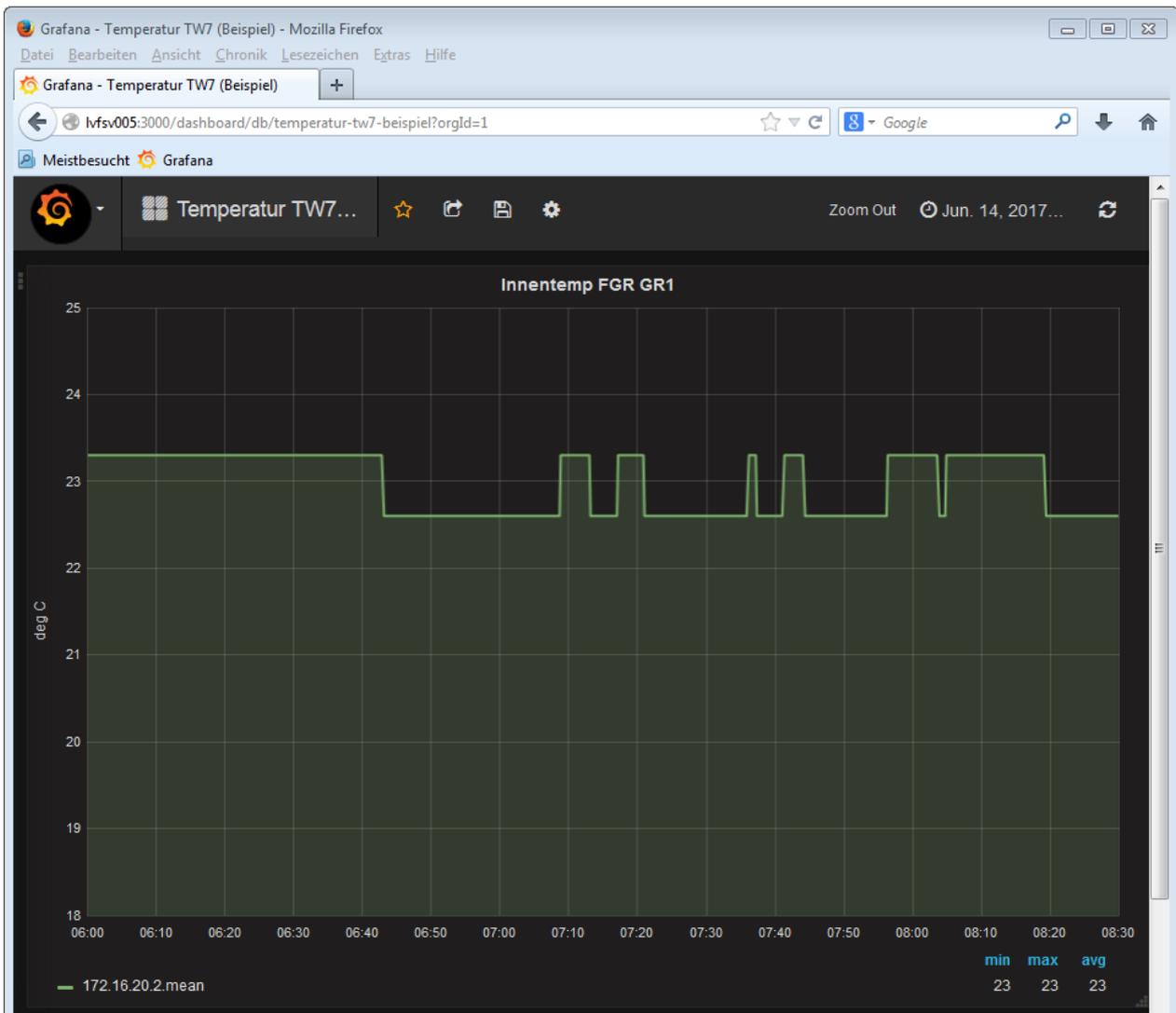
Um eine komfortable Betrachtung der Signale zu ermöglichen wurde mit Grafana ein webbasiertes Werkzeug zur Visualisierung eingeführt. Grafana (LINK <https://grafana.com>) greift direkt auf die Datenbank zu und zeigt dem Nutzer interessierende Signale als Diagramme oder Tabellen in einer grafischen Benutzeroberfläche (Dashboard) an. Zur automatisierten Erstellung von Dashboards basierend auf projektspezifischen Metadaten in einer Excel-Tabelle wurde ein geeignetes Werkzeug erstellt.

Der Nutzer kann neben den vorgefertigten projektspezifischen Dashboards in Grafana leicht eigene Datenbankabfragen erstellen und die entsprechenden Zeitsignale anzeigen lassen. Daten können bei Bedarf einfach aus der Datenbank exportiert und in Microsoft Excel weiterverarbeitet werden. Da Grafana serverbasiert ist, ermöglicht es eine effektive Zusammenarbeit im Team. Änderungen eines Nutzers stehen sofort sämtlichen anderen Nutzern zur Verfügung. Grafana bietet auch die Möglichkeit,

Benachrichtigungen (Alerts) zu definieren, sodass bei definierten Zuständen eines Messsignals eine rasche Benachrichtigung eines Verantwortlichen z.B. per E-Mail möglich ist.

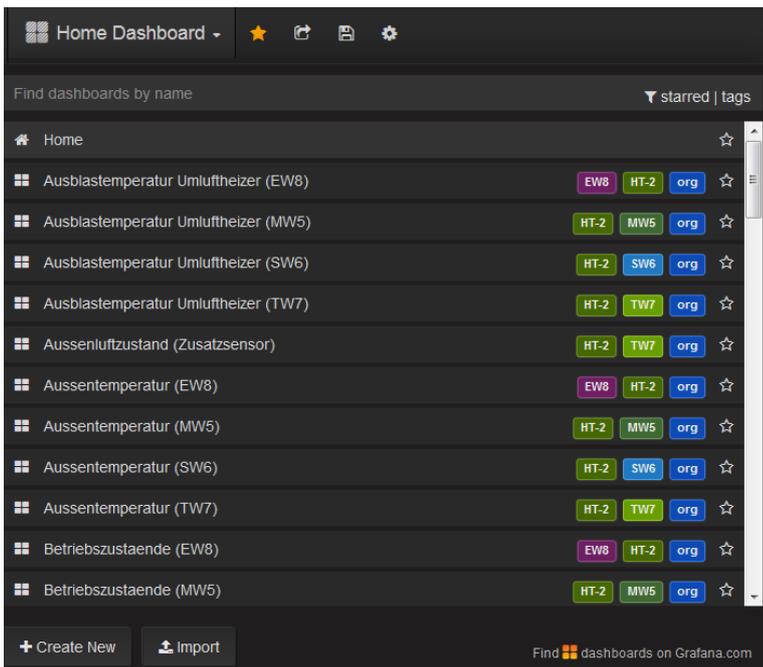
Abbildung 45 zeigt ein Beispiel eines Plots in Grafana. Abbildung 46 zeigt einen Screenshot des Auswahlfensters für verschiedene automatisch erstellte Dashboards mit wichtigen Signalen.

Abbildung 45: Bildschirmabbild im Programm Grafana: Beispiel einer grafischen Anzeige (Plot)



Dargestellt ist als Beispiel ein mit der Software Grafana erzeugter Plot der Innentemperatur im Wagen TW7 für einen Zeitabschnitt des 14. Juni 2017. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 46: Bildschirmabbild im Programm Grafana: Dialogseite zur einfachen und komfortablen Auswahl der grafischen Datenanzeige (Dashboard)



Dargestellt sind folgende Menüpunkte: Ausblasttemperatur, Außentemperatur und Betriebszustände an verschiedenen Wagen des ICE 3. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.1.5.3 Programmgestützte Verarbeitung der Daten

Zur Auswertung der Daten wurden angepasste Datenverarbeitungsprogramme, die auf die Datenbank zugriffen, herangezogen. Eine genaue Beschreibung erfolgt in Abschnitt 2.3.

2.1.6 Erstellung der Auswertungs-Software

Im Rahmen von AP 1 wurden konzeptionelle Überlegungen und kleinere Tests durchgeführt, um prinzipielle Fragen der Softwaregestaltung zu klären. Alle weiteren Aktivitäten wurden im Rahmen von AP 4 durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 2.3.

2.2 Durchführung der Messung (AP2)

Das Ziel des Arbeitspaketes AP 2 war die Organisation, Durchführung und Überwachung des geplanten Messprogramms. Als erstes wurde die im vorhergehenden AP 1 ausgeführte Ausrüstung des Probezuges verifiziert. Dazu wurden alle Messinstrumente nacheinander nochmals auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. Nachdem die Erfassung aller Daten und Parameter im ICE 3, Triebzug 301 (Tz 301) der DB einwandfrei funktionierte, erfolgte der Wechsel auf die kontinuierliche Online-Datenerfassung im Kühl- und Heizbetrieb. Die Messungen liefen für die Dauer des Vorhabens im realen Passagierbetrieb auf festgelegten Strecken im Fernverkehr der DB über zwei Jahre und parallel zu den weiteren Aktivitäten im Projekt

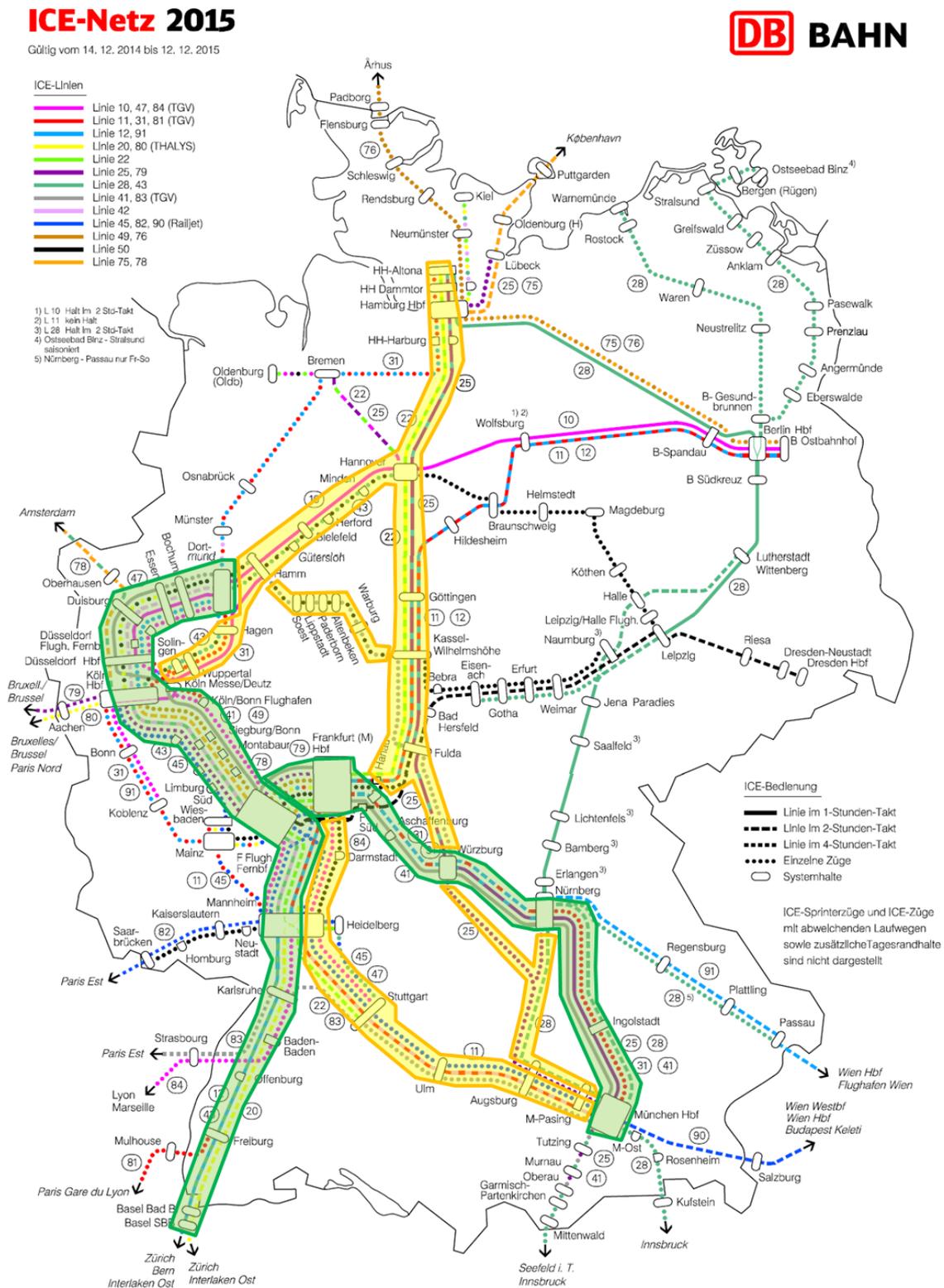
In Abbildung 47 ist das Netz der ICE-Flotte des Jahres 2015 grafisch dargestellt. Die in gelber und grüner Farbe hervorgehobenen Strecken stellen die Hauptstrecken des Tz 301 dar. Die Strecken München – Köln/Dortmund und Dortmund – Basel (grüne Farbe) wurden oft befahren und die gelb gekennzeichneten Strecken wie München – Dortmund über Stuttgart oder Kassel und die Strecken nach Hamburg weniger häufig. Zusätzlich dazu gab es einzelne Fahrten auf anderen Streckenabschnitten, die hier nicht farbig gekennzeichnet wurden.

Um eine erste Einordnung der Fahrleistung des Tz 301 zu geben: Der Zug ist während des ersten Messabschnittes im Zeitraum vom 01.05.2015 bis zum 30.05.2016 insgesamt 3.890,8 Stunden und dabei 445.503 km gefahren. Dies ergibt durchschnittlich 9,8 Stunden Fahrt pro Kalendertag.

Die Funktion der Sensorik, der Datenübertragung und -erfassung wurde regelmäßig kontrolliert und bei Ausfällen schnellstmöglich wiederhergestellt (s. Kapitel 2.2.2). Weiterhin wurden Anpassungen, Erweiterungen und Verbesserungen der Messtechnik vorgenommen (s. Kapitel 2.2.3). Die Ausfälle der Datenaufzeichnung durch Probleme an der Messtechnik oder durch anderweitige Einflüsse werden in Abschnitt 2.2.2 dargestellt.

In Abschnitt 2.2.1 wird die Vorgehensweise bei der Datenaufzeichnung und -weiterleitung näher beschrieben. Die Verarbeitung und Auswertung der Daten werden ausführlich in AP 4 in Abschnitt 2.3 erläutert.

Abbildung 47: ICE-Netz 2015



Die meistbefahrenen Strecken (München – Köln/Dortmund und Dortmund – Basel) sind grün und die weniger häufig befahrenen Strecken (bspw. München – Dortmund über Stuttgart oder Kassel und Strecken nach Hamburg) gelb eingefärbt. Vereinzelt Fahrten auf anderen Streckenabschnitten, wurden hier nicht farblich gekennzeichnet. Quelle: eigene Darstellung, DB Systemtechnik

2.2.1 Datenaufzeichnung und -verarbeitung

Wie bereits weiter oben angesprochen bestand die Gesamtheit der aufzuzeichnenden Datenmenge aus verschiedenen Datenquellen. Im Detail waren dies zum einen die Daten, die im Rahmen der Regelung des KKGs anfielen und jeweils im Klimarechner (BK3) des Gerätes gespeichert wurden. Weiterhin wurden Daten verwendet, die am Feldbus des Zuges (MVB) verfügbar waren. Schließlich wurden zusätzliche Sensoren und Messeinrichtungen im KKG Nr. 4 und in den Wagen TW7 und TW2 verbaut.

Auf diese Weise konnten alle klimarelevanten Daten, die über den MVB übertragen werden, von der Messausrüstung ausgelesen und gespeichert werden. Dies geschah im Zehntausendstakt. Zusätzlich dazu wurden die im Klimarechner vorhandenen Werte aufgezeichnet – ebenfalls alle zehn Sekunden pro Halbzug. Dabei wurden insgesamt ca. 4.500 Messwerte (Rohdaten) pro Zehntausendstakt erhoben. Das ergibt bei einer sechsstündigen Fahrt also eine Gesamtmenge von ca. 9,7 Mio. Messwerten als Rohdaten. Diese Datenmenge wurde später im AP 4 ausgewertet.

Die vom MVB Gateway, dem BK3 und den zusätzlichen Sensoren gesammelten Daten und Informationen wurden auf einem weiteren Messrechner zusammengetragen, mit eindeutigen Zeitstempeln versehen und in Logfiles lokal gespeichert. Anschließend erfolgte eine stündliche Übertragung pro Halbzug per GSM-USB-Modem und über das Mobilfunknetz zu stationären Geräten beim Auftragnehmer LVF. Dort wurden die Daten anschließend weiter verarbeitet (s. Kapitel 2.1.5).

Dafür erfolgten eine regelmäßige Voranalyse der Rohdaten und die Dokumentation der Messungen sowie gleichzeitig eine Erfassung der Instandhaltungsdaten (präventive und korrektive Maßnahmen) in Zusammenarbeit mit dem Betreiber.

In Summe sind so im Zeitraum von Juli 2015 bis Dezember 2017 ca. 60 Gigabyte an Rohdaten für beide Halbzüge angefallen, welche es dann im AP 4 (siehe Kapitel 2.3.1) zu analysieren galt. Jedoch waren für die Verarbeitung und Aufbereitung dieser Daten auch Anpassungen der Server bei LVF notwendig, damit ein reibungsloser Betrieb der Datenbank gewährleistet werden konnte. Dies wurde im Rahmen dieses AP begonnen und schließlich im AP 4 erfolgreich abgeschlossen und implementiert.

Durch die regelmäßige Beobachtung der Klimaanlage war jederzeit eine Fehlerbehebung des Messaufbaus realisierbar und eine dauerhafte Einsatzbereitschaft der Messinstrumentierung sichergestellt.

Abschließend wird es notwendig, die gesamte Messtechnik aus dem Zug der Deutschen Bahn wieder zu entfernen. Dieser Rückbau ist im Zuge eines längeren Aufenthaltes für das Redesign im Werk Nürnberg ab November 2018 geplant.

Mit dem Ende der Aufzeichnung aller Messwerte über den geplanten Zeitraum, dem Rückbau der Messinstrumentierung und der Erstellung eines Abschlussberichtes wird AP 2 abgeschlossen.

2.2.2 Reparaturen der Messtechnik

Im Verlauf der Arbeitspakete AP 1 und AP 2 kam es im Zeitraum Ende 2015 bis Frühjahr 2016 zu Beschädigungen der Messtechnik. Diese Schäden führten in der Folge zu einem teilweisen Verlust der aufgezeichneten Daten. Details dazu sind im AP 2 ausführlich dargestellt.

Die jeweiligen Reparaturen wurden so zügig wie möglich durchgeführt. Die Reparaturen und die möglichen Ursachen für die Schäden werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.2.2.1 Reparatur der Solarsensoren am 20. April 2016

Das Sensorkabel an einer der beiden Solarzellen wurde beschädigt (Abbildung 48), vermutlich durch ein Verkanten des Flachbandkabels beim mehrfachen Öffnen und Schließen des Deckels des KKG (TW7). Es war kein grundlegendes Problem, dass dadurch nur noch ein Solarsensor Messwerte für die Aufzeichnung der Sonneneinstrahlung lieferte, denn bereits durch Labormessungen war nachgewiesen worden (s. Abschnitt 2.1.4), dass die Richtungsabhängigkeit der Sensoren das Messergebnis nur geringfügig verändert.

Allerdings ist die Genauigkeit der Aussagen größer, wenn auf beiden Zugseiten ein Sensor zur Verfügung steht, außerdem musste die Redundanz der Messung gesichert werden. Es wurde daher eine weitere Solarzelle gefertigt und im Rahmen der Fristarbeiten am Tz 301 im April 2016 am Zug installiert.

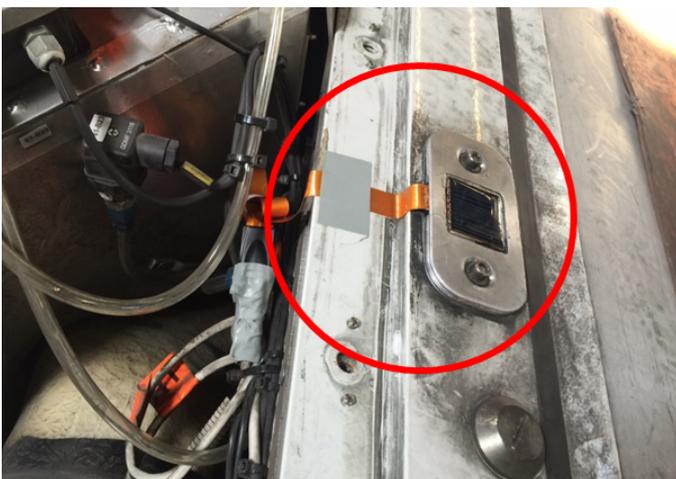
Abbildung 48: Defekte Solarzelle (Kabelbruch) am Klimagerät des ICE 3 Wagens TW7



Defekte Solarzelle (Kabelbruch) am Klimagerät des ICE 3 Wagens TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Abbildung 49 zeigt die installierte Solarzelle mit der Fixierung der Kabel, die ein weiteres Verkanten des Kabels beim Öffnen und Schließen des Deckels verhindert.

Abbildung 49: Einbau der neuen Solarzelle im ICE 3 Wagen TW7 mit zusätzlicher Fixierung des Kabels



Einbau der neuen Solarzelle am Klimagerät des ICE 3 Wagens TW7 mit zusätzlicher Fixierung des Kabels. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.2.2.2 Reparatur der Besetzungszählung am 23. Juni 2016

Im Zeitraum der Fristarbeiten am Tz 301 im April 2016 kam es zu einer unbeabsichtigten Beschädigung der Sensoren der Besetzungszählung (DILAX) im TW7 vermutlich im ICE-Werk in München. Die Ursache für die Beschädigung konnte nicht aufgeklärt werden. Vermutlich wurden auch Fristarbeiten an den Türen innerhalb der Waggons durchgeführt, was möglicherweise eine Demontage der Deckenplatte notwendig machte. Dabei könnte es eventuell zu dieser unbeabsichtigten Beschädigung gekommen sein.

Dabei wurden zwei der vier Sensoren (zwei pro Tür bzw. Wagenende) durch Abbrechen der Anschlussstecker gänzlich unbrauchbar (siehe dazu Abbildung 50 und Abbildung 51). Auch wurde ein Verbindungskabel entfernt und ein weiteres geringfügig beschädigt. Dadurch stehen für den Zeitraum Ende April bis Mitte Juni 2016 keine Messwerte der Besetzungszählung zur Verfügung.

Zur Vorbereitung einer Reparatur musste zuerst ein Termin gefunden werden, um festzustellen, welche Teile des Systems beschädigt sind. Dazu mussten die Deckenelemente entfernt und die Kabel überprüft werden. Dies geschah Anfang Mai 2016 im Rahmen einer Service-Arbeit an einem KKG.

Daraufhin wurden zwei neue Sensoren und ein neues Verbindungskabel zwischen zwei Sensoren bei der Firma DILAX bestellt. Die Lieferfrist betrug dabei ca. vier Wochen.

Abbildung 50: Beschädigung am Sensorkabel des DILAX-Sensors zur Besetzungszählung



Beschädigung am Sensorkabel des DILAX-Sensors zur Besetzungszählung. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

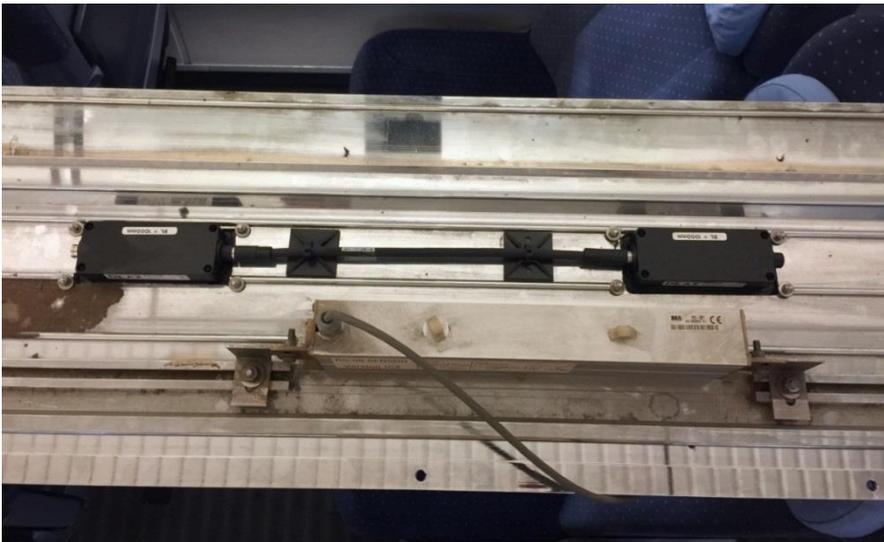
Abbildung 51: Beschädigungen der DILAX-Sensoren zur Besetzungszählung



Beschädigungen der DILAX-Sensoren zur Besetzungszählung. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Nach dem Eintreffen der neuen Sensoren und Kabel wurde ein Termin mit der DB vereinbart, um die Reparatur vorzunehmen. Liebherr ersetzte vor Ort im ICE-Werk München die beiden fehlerhaften Sensoren und das fehlende Kabel (siehe Abbildung 52). Bei der Reparatur wurde festgestellt, dass ein weiteres Kabel leicht beschädigt war. Dieses verlief über die komplette Wagenlänge und war nicht ohne großen Aufwand zu ersetzen. Da die Kontakte jedoch nicht nennenswert beschädigt waren, konnten die Sensordaten wieder einwandfrei aufgezeichnet werden.

Abbildung 52: Zwei neue Sensoren zur Besetzungszählung und ein neues Verbindungskabel im eingebauten Zustand



Zwei neue Sensoren zur Besetzungszählung und ein neues Verbindungskabel im eingebauten Zustand. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Um dieses Problem bei weiteren Arbeiten an den Türen zu vermeiden, wurde eine weitere Anweisung an die Wartungsteams der DB durch die DB Systemtechnik verfasst, die auf die zusätzliche Messtechnik und die notwendige Sorgfalt beim Umgang damit hinwies.

2.2.3 Modifikationen und Ergänzungen der Messtechnik

Im Verlauf des Vorhabens wurden während des Einsatzes im ICE 3 Tz 301 einige Veränderungen an der Messtechnik notwendig, um die Erfassung und Aufzeichnung der Daten zu stabilisieren. Diese werden im Folgenden erläutert.

2.2.3.1 Austausch der UMTS-Router am 20. April 2016

Im Rahmen einer Fristarbeit der Deutschen Bahn am Tz 301 im April 2016 hatte die DB Bedenken hinsichtlich der verbauten Router bzw. Sendeantennen im Hinblick auf deren elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Aus diesem Grund war es notwendig, neue Router zu finden, die besonders hohe EMV-Anforderungen erfüllen. Zusätzlich mussten die Positionen der Sendeantennen verändert werden, um eine mögliche Gefährdung dieser sensiblen Bauteile ausschließen zu können.

Schließlich fiel die Wahl auf einen 3G/UMTS-Router der Marke PEPWAVE. Dabei handelt es sich um das Modell MAX BR1 (siehe Abbildung 53). Dieser erfüllt alle notwendigen Normen und hat außerdem noch den Vorteil, dass die Kommunikation über Ethernet mit dem Klimarechner erfolgt und somit der USB-Hub überflüssig wurde, da die vorher verwendeten USB-Modems nicht mehr verwendet werden konnten.

Der neue Router war auch deshalb vorteilhaft, weil durch die neue Verkabelung der USB-Verteiler (USB-Hub) überflüssig wurde. Der USB-Hub war zunächst jeweils im TW2 und TW7 zur Kommunikation der USB-Schnittstellen zum Klimarechner (BK3) notwendig. Aus ungeklärten Gründen kam es jedoch immer wieder zu Kommunikationsproblemen zwischen dem USB-Hub und der im BK3 befindlichen Linux-Karte. Dies führte z.B. dazu, dass das GPS-Signal (Position und Geschwindigkeit des Zuges) fehlte oder keine Funkübertragung möglich war, da auch die Modems per USB angeschlossen waren. Die daraus resultierenden Unterbrechungen sind in AP 2 dargestellt. Ohne USB-Hub entfielen die auf Kommunikationsproblemen beruhenden Unterbrechungen.

Ein weiterer Vorteil dieser neuen Router ist die Möglichkeit, im Bedarfsfall zwei SIM-Karten verschiedener Provider verwenden zu können, um so bei mangelhafter Abdeckung des einen Netzbetreibers vollautomatisch auf den zweiten Betreiber wechseln zu können. Entlang der üblichen Strecken des Tz 301 war die Abdeckung durch einen Provider jedoch ausreichend für die Kommunikation mit der Messtechnik, so dass diese Option nicht genutzt wurde.

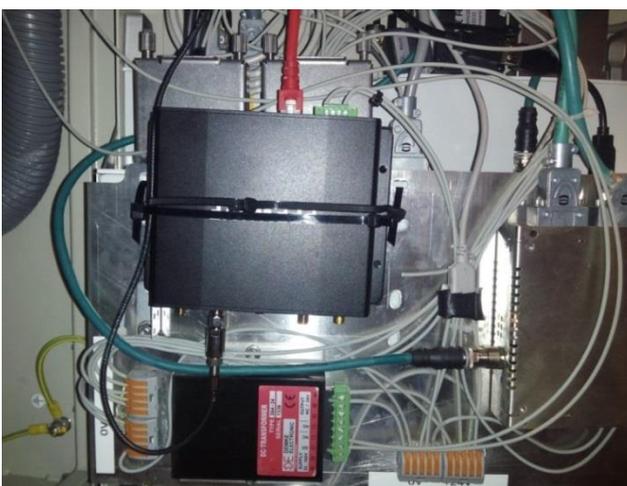
Abbildung 53: 3G/UTMS-Router PEPWAVE MAX BR1



3G/UTMS-Router PEPWAVE MAX BR1. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Im Zeitraum dieser Fristarbeiten wurden diese neuen Router (Modems) eingebaut und die dazugehörigen neuen Antennen besser positioniert.

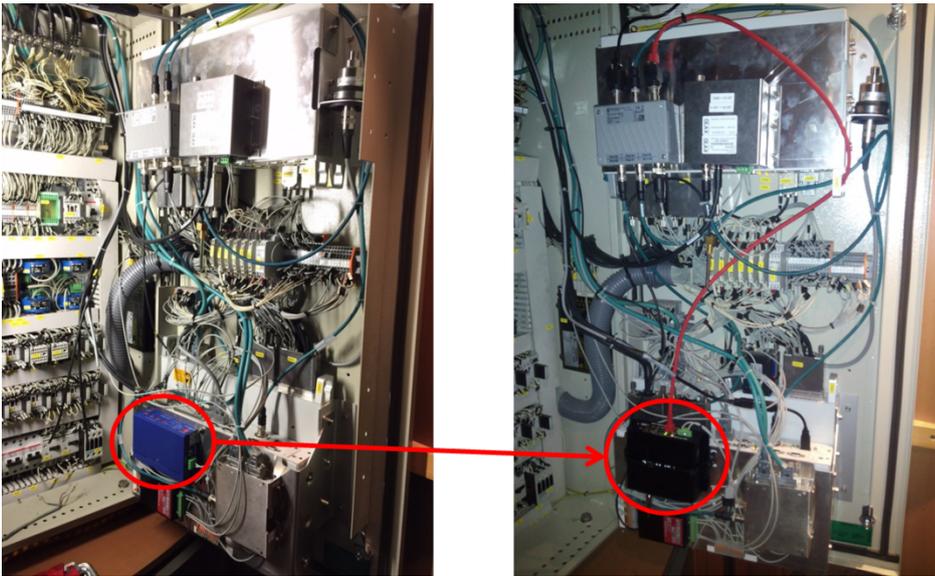
Abbildung 54: Router im eingebauten Zustand



Router im eingebauten Zustand im Schaltschrank des TW7. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Der freie Bauraum im Schaltschrank war, wie bereits erwähnt, extrem begrenzt. Durch den Wegfall des USB-Hubs konnte der Router auf dem frei gewordenen Platz im Schaltschrank eingebaut werden (Abbildung 55).

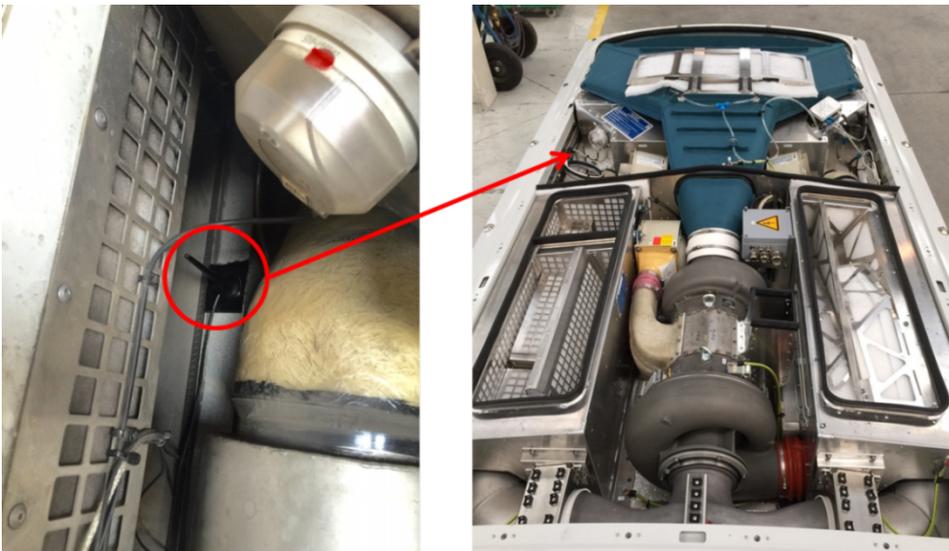
Abbildung 55: Einbau des neuen Routers (schwarz) und Entfall des USB-Hubs (blau)



Einbau des neuen Routers (schwarz) und Entfall des USB-Hubs (blau). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

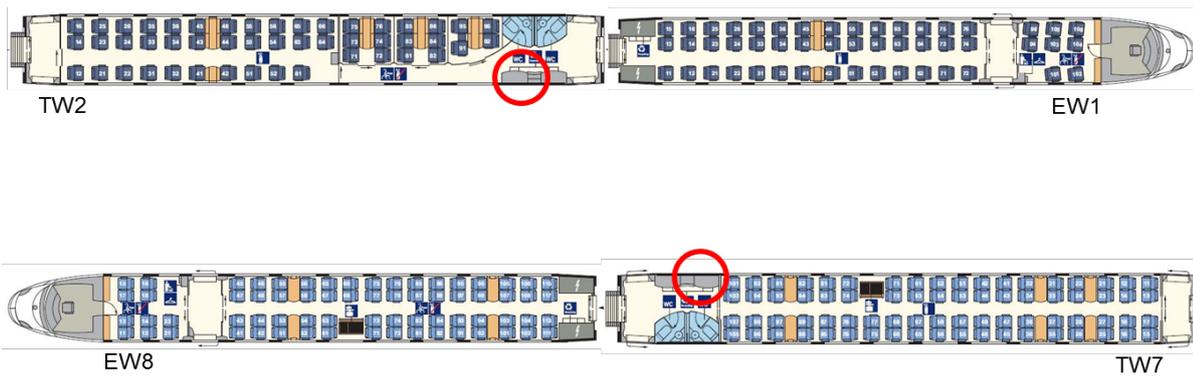
Auf den folgenden Bildern (Abbildung 56 und Abbildung 57) ist der Einbau der neuen Antennen zu sehen. Die vorhergehenden Antennen befanden sich in der Nähe des Schaltschranks und damit in der Nähe der Türsteuerung und der Bremsenkontrolle des Zuges. Die neuen Antennen wurden direkt im Kompaktklimagerät (KKG) installiert und sind damit quasi auf dem Dach des Zuges. Da der Deckel des KKG und die seitliche Öffnung des Frischluftgitters aus Kunststoff bestehen, ist eine störungsfreie Signalübertragung ermöglicht.

Abbildung 56: Einbau der neuen Mobilfunkantennen im Kompaktklimagerät im ICE 3, Wagen TW2



Einbau der neuen Mobilfunkantennen im Kompaktklimagerät im ICE 3, Wagen TW2.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

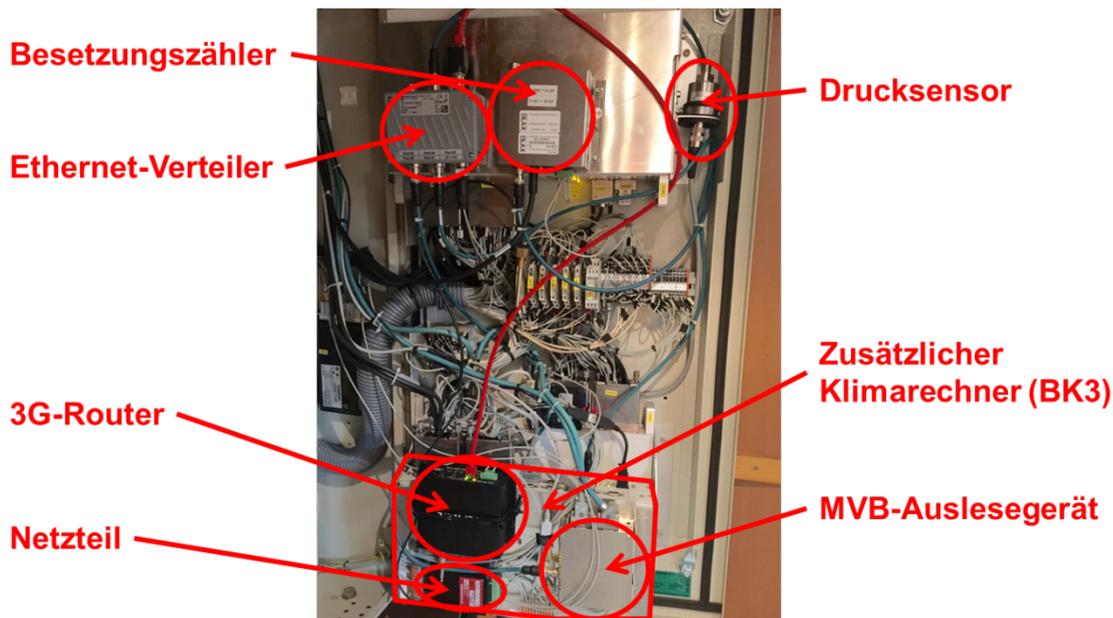
Abbildung 57: Lage der neuen Mobilfunkantennen im Zug (auf Höhe der Frischluftgitter)



Lage der neuen Mobilfunkantennen im Zug (auf Höhe der Frischluftgitter)

Abbildung 58 zeigt den Schaltschrank des ICE 3 Wagens TW7 in der Konfiguration, die sich aus den ersten Anpassungen ergab. Eine weitere Änderung wurde durch die Modifikationen zur Datensicherheit nötig, sie sind in Abschnitt 2.2.3.3 näher beschrieben.

Abbildung 58: Gesamtübersicht des modifizierten Schaltschranks im ICE 3 Wagen TW7 nach den ersten Anpassungen



Gesamtübersicht des modifizierten Schaltschranks im ICE 3 Wagen TW7 nach den ersten Anpassungen.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.2.3.2 Einbau eines zweiten GPS-Empfängers am 20. April 2016

Im Rahmen der Fristarbeiten im April 2016 war der Zugang zum Dach des ICE 3, Tz 301 möglich. Dadurch konnte ein weiterer GPS-Empfänger im Wagen TW2 eingebaut werden. Damit wurde eine Redundanz bei der Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung des Zuges erreicht.

2.2.3.3 Verbesserung der Datenaufzeichnung und -sicherung im Oktober 2016

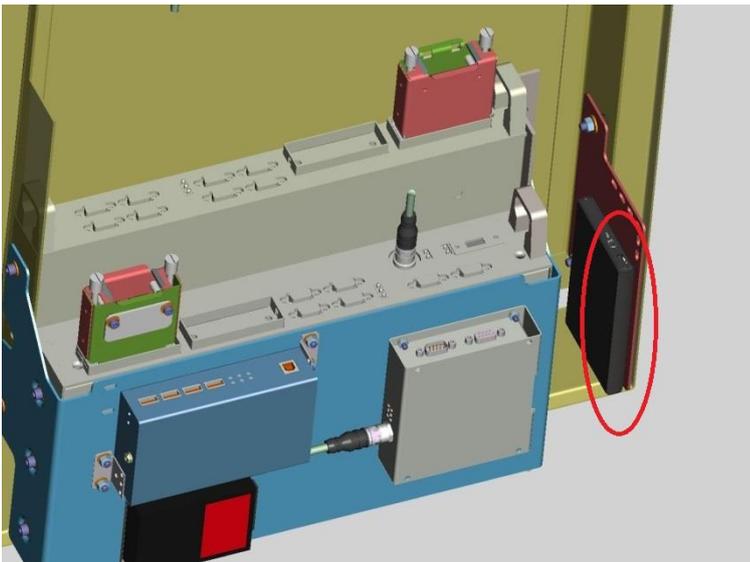
Im August 2016 kam es durch einen Kommunikationsfehler zwischen dem Klimarechner (BK3) und dem Datenerfassungsserver zu einer zweiwöchigen Lücke in den Aufzeichnungen der Messwerte. Die Details dazu sind Abschnitt 2.2.2 zu entnehmen.

Es wurde eine Anpassung der Software vorgenommen, um Datenlücken zukünftig zu vermeiden. Um weitere Probleme mit der Übertragung der Daten per Funk (3G) auszuschließen, wurde Ende Oktober 2016 eine Ergänzung bzw. Anpassung der Hardware vorgenommen.

Diese Anpassung umfasste die Installation eines weiteren Rechners, eines Raspberry Pi, der die Aufgabe hatte, jede vom BK3 erzeugte Datenaufzeichnung zu kopieren und ergänzend zur Übermittlung per Funk auf einem lokalen Speicher im Schaltschrank zu sichern. Dieser Speicher war ein 512GB SSD (Solid State Drive). Exemplarisch zeigt die Abbildung 59 die Einbauuntersuchung zur Platzierung des SSD im Schaltschrank.

Durch diesen Umbau sollte ein totaler Datenverlust bei einer Unterbrechung der Funkstrecke vermieden werden. In diesem Fall war es dann möglich, die Daten direkt am Zug zu kopieren und der Auswertung in AP 4 zuzuführen.

Abbildung 59: Einbauuntersuchung SSD-Speicher im Schaltschrank



Einbauuntersuchung SSD-Speicher im Schaltschrank. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

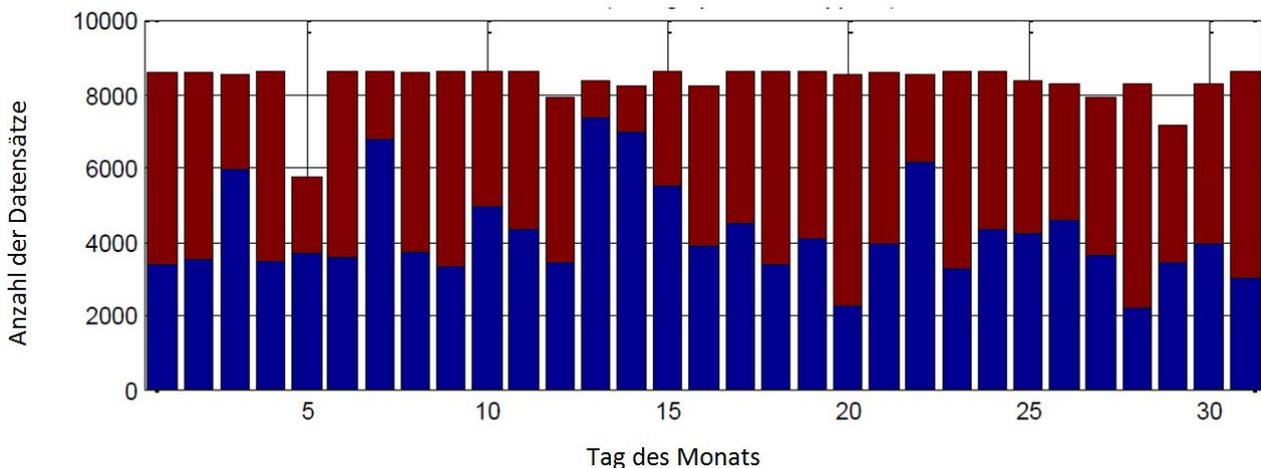
2.2.4 Verfügbarkeit der Datenaufzeichnung

Betriebsbedingt kam es am ICE 3 zu Ausfällen und anderen Stillstandszeiten des Zuges, die zu Fehlzeiten in der Aufzeichnung der Messwerte führten.

Zur Erläuterung der Fehlzeiten der Datenaufzeichnung wurde die Menge der aufgezeichneten Datensätze in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit analysiert. Die Daten wurden alle 10 Sekunden erfasst. Auf den nachfolgenden Grafiken stehen die blauen Balken für die Anzahl an Datensätzen, die im Stillstand aufgezeichnet wurden und die roten Balken für diejenigen Datensätze, die in Fahrt (Geschwindigkeit $v > 0$ km/h) aufgezeichnet wurden. Die Summe beider ergibt die Anzahl an Datensätzen pro Tag.

Das erste Diagramm (Abbildung 60) zeigt exemplarisch eine Auswertung vom Oktober 2015. Dabei sieht man die Anzahl der Datensätze pro Tag in Fahrt als roten Balken und die Anzahl der Datensätze pro Tag im Stand als blaue Balken. Die Abszissenachse (x-Achse) stellt die Kalendertage des Monats Oktober 2015 dar, die Ordinatenachse (y-Achse) die Anzahl der aufgezeichneten Datensätze. Grundsätzlich wurde alle 10 Sekunden ein Datensatz erfasst. Der dargestellte Monat Oktober 2015 zeigt die typische Verteilung von Fahrt- und Standzeiten des Zuges (Tz301). Dies deckt sich auch mit den Angaben der Deutschen Bahn.

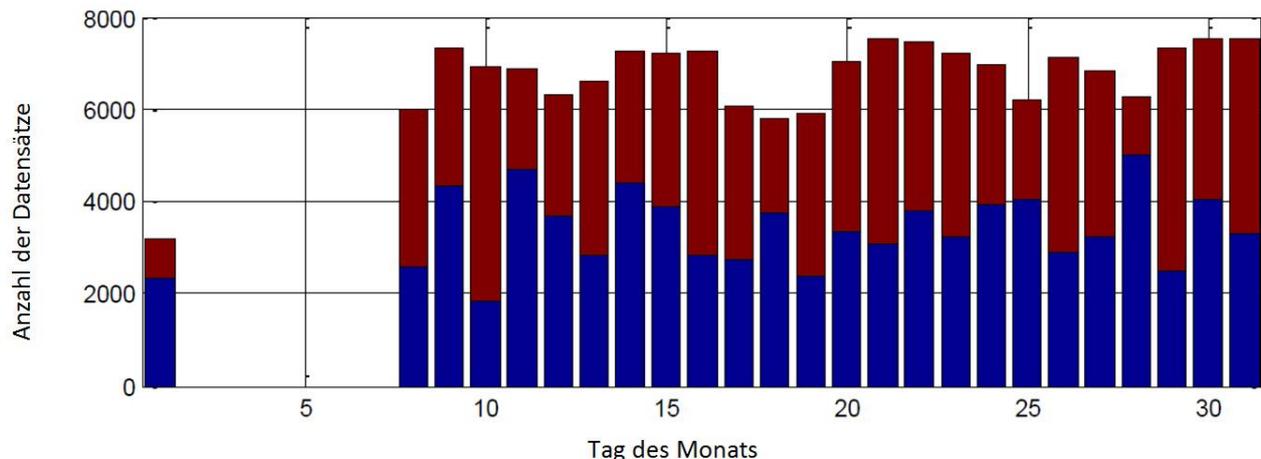
Abbildung 60: Exemplarische Auswertung der Datenaufzeichnung für Oktober 2015



Exemplarische Auswertung der Datenaufzeichnung für alle Tage im Oktober 2015, roter Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag in Fahrt, blaue Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag im Stand. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Im Diagramm Abbildung 61 ist der Datenausfall im März 2016 durch fehlerhafte Kommunikation zwischen elektronischen Bauteilen am Fehlen der Balken gut zu erkennen. Die auf den USB-Verteiler (USB-Hub) zurückzuführenden Ausfälle konnten durch den Wechsel der UMTS-Router (Modems) im April 2016 beseitigt werden (siehe Kap. 2.1.5.1).

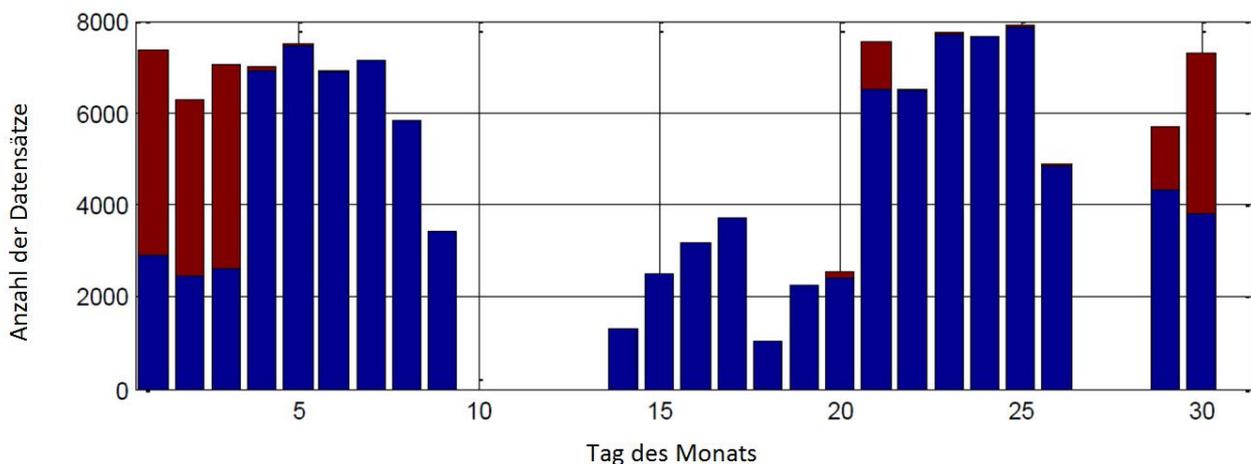
Abbildung 61: Datenaufzeichnung für März 2016 mit Datenlücke durch fehlerhafte Kommunikation zwischen elektronischen Bauteilen



Datenaufzeichnung für alle Tage im März 2016 mit Datenlücke von 6 Tagen durch fehlerhafte Kommunikation elektronischer Bauteile, roter Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag in Fahrt, blaue Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag im Stand. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Das Diagramm Abbildung 62 zeigt einen Stillstand vom 4. bis 28. April 2016. Dieser war auf eine Fristarbeit, d.h. eine regelmäßig vorgeschriebene Prüfung und Instandhaltung des ICE 3, Tz301 durch die Deutsche Bahn, zurückzuführen. Diese Fristarbeiten sind für den ordnungsgemäßen Betrieb des Zuges notwendig und werden bei allen anderen ICE 3 der Flotte der Deutschen Bahn ebenfalls durchgeführt, d.h. sie stellen keinen besonderen Ausfall dar. In dieser Zeit konnten natürlich keine projektrelevanten Messdaten der Klimaanlage erhoben werden. Die Stillstandszeit wurde von LVF für Reparaturen und Modifikationen der Messtechnik sinnvoll genutzt (siehe dazu AP 1).

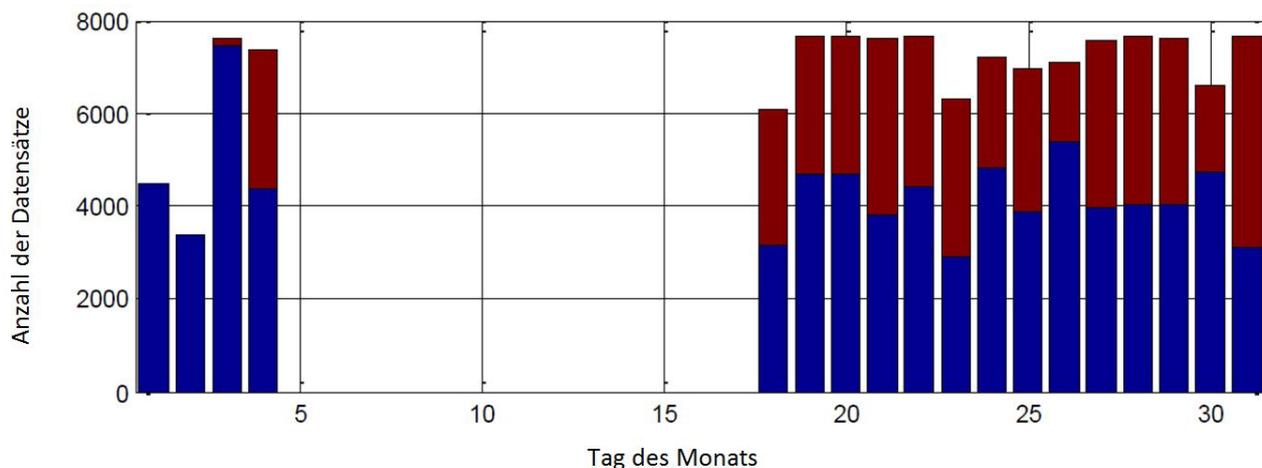
Abbildung 62: Datenlücke im April 2016 durch Fristarbeiten am Zug



Datenlücke im April 2016 durch Fristarbeiten am Zug, roter Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag in Fahrt, blaue Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag im Stand. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Das Diagramm Abbildung 63 zeigt einen Ausfall, der auf einen Kommunikationsfehler zwischen dem eingebauten Klimarechner (BK3) und dem Datenerfassungs-Server zurückzuführen ist. Der BK3 war dadurch nicht mehr in der Lage, die stündlichen Datenaufzeichnungen an den Server zu senden und speicherte diese lediglich. Als die Speicherkapazität des BK3 erreicht wurde, wurden die vorhandenen Daten mit neuen Datensätzen überschrieben. Dies wurde erst nach ca. zwei Wochen bemerkt. Die Ursache dieses Fehlers konnte nicht gänzlich geklärt werden. Um solche Störungen bei der Datenaufzeichnung zu vermeiden, wurde eine Software-Anpassung vorgenommen.

Abbildung 63: Datenlücke im August 2016 durch fehlerhafte Serverkommunikation



Datenlücke im August 2016 durch fehlerhafte Serverkommunikation, roter Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag in Fahrt, blaue Balken: Anzahl der Datensätze pro Tag im Stand. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Um weitere Störungen zukünftig zu vermeiden, wurde die Messtechnik umgebaut und ein Zusatzrechner (Raspberry Pi) mit angeschlossenem Speicher (SSD) einbezogen, um über eine zusätzliche lokale Kopie aller Messwerte in Ergänzung zu den durch Funk übermittelten Daten zu verfügen (siehe Kap. 2.1.5.1). Damit konnte die Datensicherheit langfristig gewährleistet werden.

Aus Abbildung 60 und Abbildung 61 ist abzulesen, dass ca. 50% der erfassten Datensätze pro Tag auf den Fahrbetrieb entfallen (rote Balken), während die restlichen ca. 50% auf Stillstand (z.B. Abstellung des Zuges oder Werkstattaufenthalt) entfallen (blaue Balken).

Die Aufzeichnung der Messwerte, mit Ausnahme der beschriebenen Probleme bzw. Ausfälle, lief seit April 2016 fehlerfrei. Mit den vorgenommenen Modifizierungen konnte eine sicherere Datenbereitstellung und -speicherung erreicht werden.

2.2.5 Organisatorisches

Seit April 2016 war der Zug auch nach außen hin als Projekt des UBA zu erkennen. Insgesamt wurden vier Aufkleber (Abbildung 64) - je zwei pro Zugseite - angebracht, um auf das Projekt hinzuweisen.

Abbildung 64: Aufkleber zum Projekt am Tz301 „Freiburg im Breisgau“



Aufkleber zum Projekt am Tz301 „Freiburg im Breisgau“ Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3 Auswertung des Messprogramms (AP 4)

Ziel des Arbeitspaketes AP 4 war die detaillierte Auswertung und Analyse des Energieverbrauchs der Klimageräte und ein Vergleich zwischen der luftgestützten Klimaanlage (Air-Cycle Anlage, ACS) und einer Anlage nach dem Kaldampfprozess (Vapour Cycle Anlage, VCS). Basis sind die in der Felddatenerfassung (AP 2) gewonnenen Daten und die in AP 3 ermittelten Daten (siehe Abschnitt 2.4).

Da es kein genormtes Verfahren zum Vergleich des Energieverbrauchs gibt, wurde in einem ersten Schritt ein Verfahren ausgewählt. Als Ergebnis wird der Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge ausführlich dargestellt und quantitativ verglichen.

Nach der Auswertung der Messdaten folgte die Analyse der Lebenszykluskosten (LCC) bzw. die wirtschaftliche Gesamtkostenbetrachtung (Total Cost of Ownership, TCO). Ziel dieser Auswertung sind Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einer Anlage über den gesamten Betrachtungszeitraum. Dabei wurden Messdaten und Instandhaltungsdaten, die in Zusammenarbeit mit der DB erfasst wurden, berücksichtigt. Diese Gesamtanalyse (LCC / TCO) kann eine Aussage zu allen Kosten von der Fertigung bis zur Entsorgung der Klimaanlage treffen und ermöglicht eine wirtschaftlich-ökonomische Bewertung einer Anlage im Vergleich zu anderen.

Zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse wurde das in diesem Vorhaben generierte Auswertewerkzeug (Software, Abschnitt 2.3.1) verwendet. Die gewonnenen Ergebnisse wurden wissenschaftlich aufbereitet und gegenübergestellt.

2.3.1 Erstellung der Auswertungs-Software

Es wurde eine projektspezifische Auswertesoftware entwickelt. Die Implementierung erfolgte in erster Linie in Matlab. Die Auswertesoftware ist grundsätzlich modular aufgebaut. Je nach Anwendungsfall können Programmmodule kombiniert, bei Bedarf angepasst und gegebenenfalls in ein Framework (Programmiergerüst) zur automatischen Batch-Datenverarbeitung eingefügt werden. Erstellt wurden Module unter anderem für folgende Aspekte:

- ▶ Zugriff auf die Datenbank der Messdaten
- ▶ Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfs
- ▶ Berechnung von Luftzuständen sowie von luftseitigen Heiz- und Kälteleistungen
- ▶ Import von Daten aus anderen Datenquellen (Wetterdaten von DWD, Messdaten von DB, etc.)
- ▶ Anbindung einer Modelica/Dymola Simulation für Zwecke der Validierung
- ▶ Klassifikation von Daten, um ein Modell für den elektrischen Leistungsbedarf abzuleiten
- ▶ Ableitung von Klassenhäufigkeiten zur Gewichtung für den Jahresenergiebedarf
- ▶ Berechnung des Jahresenergiebedarfs für verschiedene HLK-Systeme

In Abschnitt 2.3.2 wird eine Auswertung des Leistungs- und Energiebedarfs anhand einer exemplarischen Zugfahrt für die Air-Cycle Anlage des ICE 3 beschrieben und es wird der COP (Coefficient of Performance) der Anlage ermittelt. Des Weiteren werden zur Validierung Ergebnisse der Felddatenauswertung Berechnungsergebnissen aus einem entsprechenden Simulationsmodell gegenübergestellt. Die Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren bzw. die Berechnung von Luftzuständen an den Schnittstellen des HLK-Geräts kann für zukünftige Untersuchungen eine Basis für ein Anlagenmodell bilden.

Im Abschnitt 2.3.3 liegt der Fokus auf dem Vergleich verschiedener HLK-Konzepte. Wesentliche Teile aus Abschnitt 2.3.2 werden für diesen Vergleich benötigt.

2.3.2 Betrachtungen zu Leistungs- und Energiebedarf der Air-Cycle Anlage des ICE 3

In diesem Abschnitt wird eine Analyse ausgewählter Daten der Air-Cycle Anlage des ICE 3 aus Sicht der Leistungsaufnahme und des Energiebedarfs dargestellt. Diese Auswertung ist zunächst unabhängig von einem Vergleich mit einem anderen Klimagerät.

Ziel der durchgeführten Betrachtungen war die Ermittlung folgender Leistungen/Energien:

- ▶ Elektrischer Leistungs- und Energiebedarf im Heiz- und Kühlbetrieb (Leistung: P_{el})
- ▶ Luftseitig eingebrachte Heizleistung/Heizenergie und der Luft entzogene Kühlleistung/Kühlenergie (Leistung: \dot{Q}_0)

Daraus kann die Effizienz im Sinne der Leistungszahl COP (Coefficient of Performance) berechnet werden:

$$COP = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \quad (1)$$

Die konkreten Betrachtungen wurden an dieser Stelle anhand der Daten von einzelnen Zugfahrten durchgeführt. Dadurch ergab sich die Möglichkeit einer intuitiven Interpretierbarkeit und Überprüfbarkeit der Ergebnisse (u.a. Plausibilitätsprüfung in Expertenrunden). In einem zukünftigen Schritt können die Betrachtungen über Zugfahrten hinaus ausgedehnt werden.

Der Fokus für diese Betrachtungen wurde auf den Wagen TW7 gelegt, da dieser Wagen mit der umfangreichsten Messtechnik ausgestattet ist und damit eine umfassende Betrachtung ermöglicht wird. Der TW7 ist einer der Wagen mit der höchsten erforderlichen Kältelast im Designpunkt.

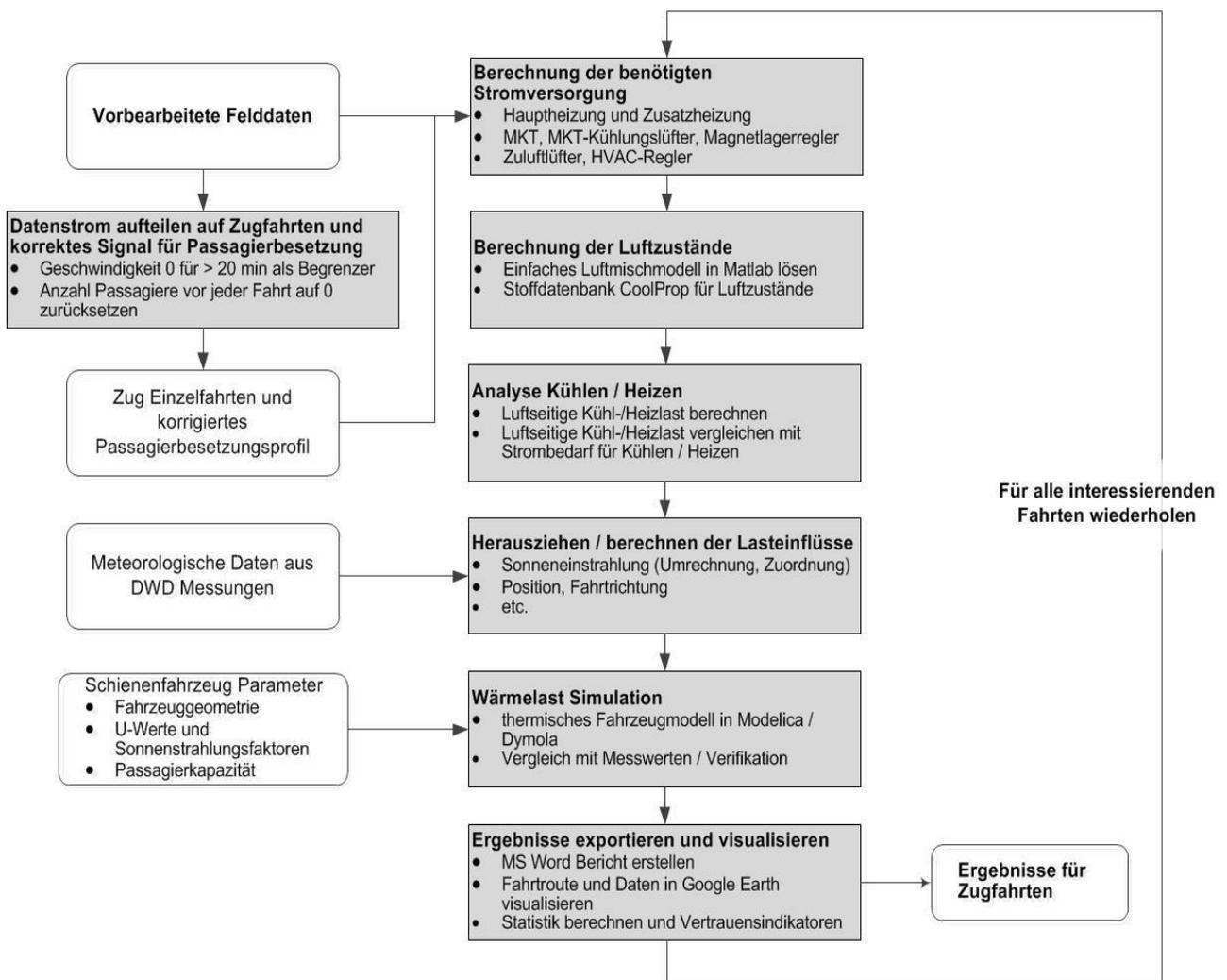
2.3.2.1 Methodik

Für die Automatisierung der Verarbeitung der beträchtlichen Datenmengen wurden projektspezifische Softwaretools entwickelt. Die Implementierung erfolgte in Python und in Matlab. Zusätzlich wurden für einen Teilbereich mit dem Fokus auf Plausibilitätsprüfung und Validierung die Simulationsumgebung Dymola und Liebherr-interne Simulationsmodelle eingesetzt.

Abbildung 65 zeigt eine Übersicht über den Ablauf der zugfahrtenbasierten Datenverarbeitung. Details werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Über die im Projekt entwickelte Auswertesoftware wurde die elektrische Leistungsaufnahme des HLK-Gerätes sowie die luftseitige Heiz- oder Kühlleistung, basierend auf Luftzuständen an verschiedenen relevanten Positionen im Luftpfad, ermittelt. Die Einflussfaktoren auf die Heiz- oder Kühllast wurden aus den Rohdaten extrahiert. Als zusätzlicher Schritt, dargestellt in Abbildung 65 durch das Rechteck mit gestrichelter Begrenzungslinie, wurde ein Abgleich mit einem thermischen Simulationsmodell des Wagens vorgenommen. Die Ergebnisse wurden als Diagramme exportiert und in Google Earth visualisiert.

Abbildung 65: Übersicht über den implementierten Ablauf zur zugfahrtenbasierten Datenverarbeitung



U-Werte=Wärmedurchgangskoeffizienten; DWD=Deutscher Wetterdienst; MKT=Motorisierte Kühlturbine.

Rechtecke mit abgerundeten Ecken repräsentieren Eingangs-/Ausgangs-Daten, Rechtecke mit grauer Schattierung Verarbeitungsschritte. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3.2.2 Überblick über vorhandene Messsignale als Grundlage der Untersuchungen und Messdatenverarbeitung

Über die Felddatenerfassung wurden auf Zugebene (Halbzug 1 und 2) ca. 4500 Variablen bei einer Abtastrate von ca. 0,1 Hz (d.h. alle 10 Sekunden) erfasst. Für den TW7 – einen Großraumwagen der zweiten Klasse (siehe Abbildung 14)– wurde der umfangreichste Satz an Messdaten erfasst.

Im Folgenden sind die für den TW7 erfassten Signale nach Gruppen geordnet zusammengefasst:

- ▶ Signale von Sensoren, die standardmäßig im HLK-System installiert sind (Temperatur an verschiedenen Stellen des Luftpfades, CO₂-Konzentration im Wagen, etc.)
- ▶ HLK-Regler-Daten (Soll-Temperatur, Lüfter Geschwindigkeiten, Position der Klappen, etc.)
- ▶ GPS-Position sowie Fahrtrichtung und Fahrgeschwindigkeit*
- ▶ Sonnenstrahlung aus zwei Photovoltaik Sensoren am Dach*
- ▶ Personenbelegung über Fahrgastzählsystem*
- ▶ Relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft und der Umluft sowie Luftdruck*
- ▶ Stromverbrauch verschiedener Geräte*
- ▶ Betriebsparameter vom Haupt-Steuerbus des Zuges

Die mit Stern (*) gekennzeichneten Signale sind durch zusätzlich installierte Messtechnik am TW7 erfasst worden.

2.3.2.3 Aufbereitung von Messsignalen

Im Zuge der Auswertungen zeigten sich in den vorhandenen Messdaten verschiedene Unsicherheiten, Fehler und Lücken. Grundsätzlich ist damit bei einer Felddatenerfassung zu rechnen. Konkrete Gründe für teilweise Unsicherheiten, Fehler und Lücken in den Messsignalen lagen in diesem Projekt im Wesentlichen in den folgenden Aspekten (siehe auch Abschnitte 2.1.5. und 2.1.6):

- ▶ allgemeine Messabweichung und nicht unmittelbar quantifizierbare Störeinflüsse auf die zu messende Größe
- ▶ Probleme mit Hard- oder Software der Messdatenerfassung (z.B. Überlauf des Wertebereichs)
- ▶ Zeitweiser Ausfall einzelner Sensoren (z.B. Ausfall einer von zwei Photovoltaik-Zellen wegen Beschädigung der Anschlussleitung, Ausfall der Besetzungszählung nach Beschädigung der Sensoren auf einer Wagenseite im Rahmen einer Zugrevision)
- ▶ Zeitweiser Ausfall der Datenfernübertragung bzw. zeitweise Deaktivierung der Datenfernübertragung wegen Bedenken seitens der DB hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)

Um auf der Basis der erfassten Signale die angestrebten Auswertungen bestmöglich durchführen zu können, war ein großer Aufwand bei der Signalverarbeitung nötig.

Wenn Unsicherheiten oder Fehler in Signalen erkannt werden können, kann grundsätzlich eine der folgenden Maßnahmen getroffen werden:

- ▶ Ignorieren der Unsicherheit, wenn nur geringe Effekte auf die Endergebnisse zu erwarten sind
- ▶ Geeignete Korrektur des Signals
- ▶ Ersetzen des Signals durch Daten einer entsprechenden anderen Messung
- ▶ Verwerfen des gesamten Zeitbereichs, wenn eine Korrektur bzw. ein Ersetzen des Signals nicht plausibel möglich ist.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Unsicherheiten oder Fehler mit vertretbarem Aufwand erkannt oder korrigiert werden können. Je nach Aufgabenstellung und Methodik der Auswertung werden verschiedene Signale gleichzeitig benötigt. Daher kann es vorkommen, dass bei zeitweisem Nichtvorhandensein eines erforderlichen Signals der entsprechende Zeitbereich ausgeklammert werden muss.

Für die in diesem Abschnitt beschriebenen Betrachtungen zum Leistungs- und Energiebedarf erfolgte unter anderem folgende Aufbereitung der Signale:

1. Verwerfen von Signalwerten, die außerhalb einer für die jeweilige Variable sinnvollen Bandbreite liegen.
2. Identifikation und Verwerfen von Ausreißern
3. Interpolation fehlender oder verworfener Datenpunkte
4. Glättung der Signale über gleitenden Mittelwert (wenn erforderlich)
5. Abtastratenkonvertierung der Signale für gleichmäßigen Zeitstempel und ggf. reduzierte Abtastrate (wenn erforderlich).

2.3.2.4 Signal der Passagierbesetzung in TW7

Für die Passagierbesetzung werden Zählimpulse für Eingang und Ausgang zur absoluten Anzahl der Personen im Wagen aufsummiert. Im Lauf der Zeit können sich Fehlzählungen (z.B. Koffer als Person gezählt) aufsummieren. Für ein möglichst vertrauenswürdiges Signal der absoluten Personenanzahl im Zug war daher ein automatisiertes Zurücksetzen des Zählers erforderlich. Hier wurde der Datenstrom auf Basis des Signals der Fahrgeschwindigkeit und einer Mindestdauer des Stillstandes in Zugfahrten unterteilt. Zu Beginn einer so festgelegten Zugfahrt wurde in der Auswertung der Besetzungszähler auf null zurückgesetzt. In einem nachgelagerten Schritt wurde das berechnete Besetzungssignal überprüft (Anzahl der Passagiere am Ende der Fahrt, negative Passagierbesetzung im Wagen) und entsprechend korrigiert oder verworfen. Die weitere Betrachtung konnte nun über die identifizierten Zugfahrten oder über den gesamten Datenstrom erfolgen.

2.3.2.5 Signal der Sonnenstrahlung in W/m^2 und Abbildung von DWD Daten

Wie in Abschnitt 2.1.3.4. beschrieben, waren zwei einfache Photovoltaik-Zellen am Wagendach etwa in einer Horizontalebene implementiert. Damit sind die Photovoltaik-Zellen als redundant anzusehen. Das ursprüngliche Ziel war es, grundlegende Aussagen über die Sonneneinstrahlung (z.B. in 3 Stufen) zu ermöglichen. Es wurden Labormessungen mit einer Photovoltaik-Zelle und einem Sternpyranometer unter verschiedenen Bedingungen vorgenommen. Basierend auf den Messergebnissen konnte eine Korrelation abgeleitet werden, die eine näherungsweise Abbildung der gemessenen Spannung in Volt auf die Sonneneinstrahlung in W/m^2 ermöglicht. Dadurch konnte eine Betrachtung der Sonneneinstrahlung in höherer Qualität als ursprünglich angedacht realisiert werden.

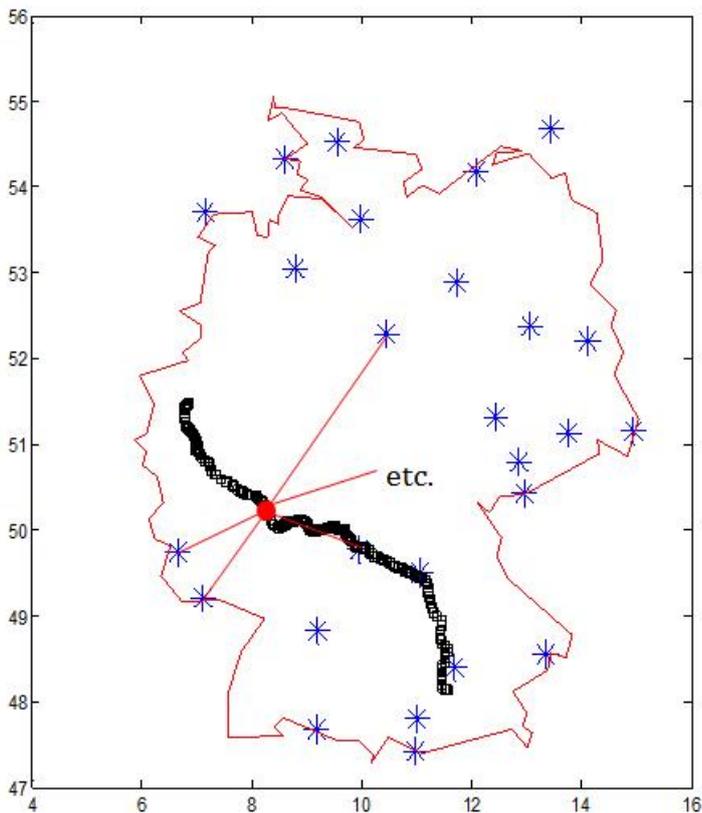
Die über die Photovoltaik-Zellen erfasste Sonneneinstrahlung repräsentiert die gesamte Strahlung I_{total} (oder I_g), d.h. die Summe aus direkter (richtungsabhängiger) I_{dir} und diffuser (nicht richtungsabhängiger) Strahlung I_{dif} .

Für bestimmte Betrachtungen ist es nötig, den Strahlungswert für die direkte Strahlung separat zu kennen. Insbesondere benötigt man diese direkte richtungsabhängige Strahlungskomponente in Verbindung mit der Strahlungsrichtung und der Orientierung von Fensterflächen eines Zugwagens um die durch Fenster in den Wagen eingebrachte Wärme infolge direkter Sonnenstrahlung ermitteln zu können.

Für die Aufteilung der Strahlungsarten wurde auf zusätzliche stationäre Messdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD), aus (Deutscher Wetterdienst, Climate Data Center, 2017) zurückgegriffen.

Konkret wurde über das Auswerteprogramm die nächstgelegene Messstation des DWD zur aktuellen Position des Zuges als Referenz für das Verhältnis I_{dir}/I_{total} zu einem gegebenen Zeitpunkt herangezogen. Es wurde angenommen, dass dieses Verhältnis I_{dir}/I_{total} auch für die aktuelle Position des Zuges gültig ist. Effekte wie Bewölkung konnten hier nicht unmittelbar abgebildet werden. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 66 visualisiert.

Abbildung 66: Schematische Darstellung der Abbildung von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes auf den Ort des Zuges



Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden für die Aufteilung der gemessenen Gesamtsonnenstrahlung in den direkten und diffusen Anteil herangezogen. Die Karte zeigt Messstationen des DWD in Deutschland sowie eine Position des Zuges auf einer konkreten Zugfahrt. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3.2.6 Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme

Tabelle 5 zeigt die Formeln zur Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme der einzelnen Verbraucher des Klimageräts. ‚MCRUN‘ ist eine Betriebsvariable der Turbomaschine MKT. Variablen mit einem vorangestellten ‘U’ repräsentieren Spannungswerte, Variablen mit ‘I’ Stromwerte. Die angegebenen Korrelationen wurden zum Teil durch Laboruntersuchungen identifiziert.

Für den Heizfall werden die elektrischen Leistungen der Heizregister direkt der Luft zugeführt.

Tabelle 5: Grundlegende Formeln zur Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme

Subsystem / Funktion	Berechnungsformel
Heizen	
Grundheizer	$P_{el, \text{Hauptheizer}} = U \cdot I_H$
Nachheizer, Einstiegsraumheizer	$P_{el, \text{Nebenheizer}} = \frac{440}{\sqrt{3}} \cdot (I_{NH1} + I_{NH2} + I_{NH3})$
Kühlen	
MKT	$P_{el, \text{MKT}} = (-0.0007 \cdot MCRUN^2 + 0.5163 \cdot MCRUN + 1.0582) \cdot 1000$; wenn $MCRUN > 0$ $P_{el, \text{MKT}} = 0$; wenn $MCRUN = 0$
MKT Lüfter	$P_{el, \text{MKT-Lüfter}} = 760$; wenn $MCRUN > 0$ $P_{el, \text{MKT-Lüfter}} = 0$; wenn $MCRUN = 0$
Betrieb allgemein	
Zulüfter 1 & 2	$P_{el, \text{Zulüfter}} = (I_{\text{Zulüfter}} \cdot U)$
Magnetlagerregler für MKT	$P_{el, \text{MagLag}} = \left(50 + \left(\frac{MCRUN}{100}\right) \cdot 300\right)$
HLK-Regler	$P_{el, \text{Regler}} = 50$

Für Strom und Spannung gelten jeweils SI-Einheiten, die Einheit für Leistung ist Watt

2.3.2.7 Luftseitig eingebrachte Heizleistung und entzogene Kühlleistung

Abbildung 67 zeigt schematisch den Luftpfad des HLK-Systems mit den Hauptkomponenten. Das Rechteck mit der Beschriftung ‚Loads‘ repräsentiert den Fahrgastraum. Dargestellt sind mehrere Messstellen für Temperatur T , relative Luftfeuchtigkeit φ und Volumenstrom \dot{V} der Luft, sowie für die Passagierbesetzung pax , die gesamte Sonnenstrahlung I_g und die gemessene elektrische Leistungsaufnahme P_{el} .

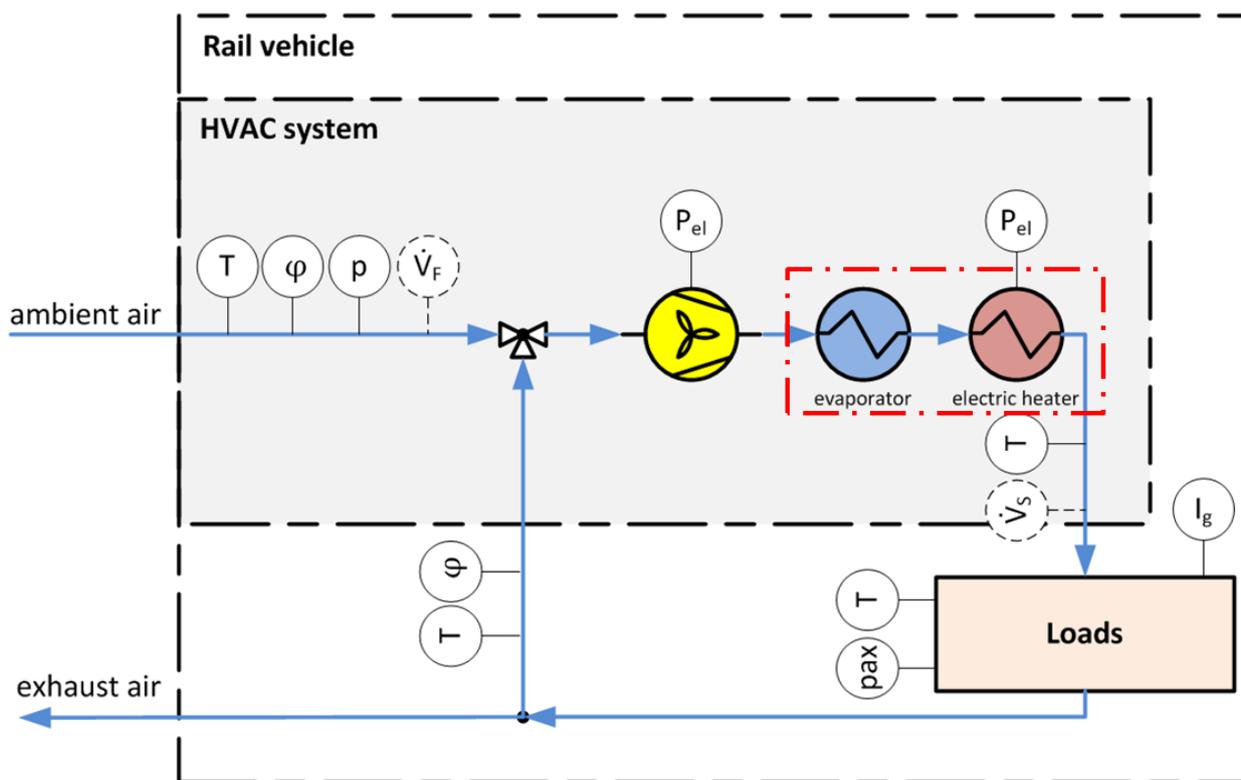
Die der Luft zugeführte Heizleistung bezieht sich auf das Heizregister im HLK-Gerät. Die der Luft entzogene Kühlleistung bezieht sich auf die Leistung am Verdampfer des HLK-Gerätes. Im Fall von Air-Cycle Anlagen erfolgt die Abkühlung der Luft nicht über einen Verdampfer wie bei einem konventionellen Klimagerät, sondern über einen Luft-Luft-Wärmetauscher. In Abbildung 67 ist die Systemgrenze strichpunktiert in roter Farbe dargestellt.

Die luftseitige Leistung \dot{Q}_0 wurde gemäß Gleichung (1) ermittelt. $h_{\text{supplyAir}}$ ist hier die spezifische Enthalpie der Zuluft in den Wagen, $\dot{m}_{\text{supplyAir}}$ repräsentiert den zugehörigen Massenstrom. h_{mixedAir} ist die spezifische Enthalpie der Luft nach dem Zuluft-Lüfter, $\dot{m}_{\text{mixedAir}}$ der zugehörige Massenstrom. Ein positives Vorzeichen von \dot{Q}_0 bezeichnet eine Leistung am Heizregister (Heizleistung), ein negatives Vorzeichen eine Leistung am Verdampfer (Kühlleistung).

$$\dot{Q}_0 = h_{\text{supplyAir}} \cdot \dot{m}_{\text{supplyAir}} - h_{\text{mixedAir}} \cdot \dot{m}_{\text{mixedAir}} \quad (2)$$

Zur Berechnung der Luftzustände wurde die Stoffdatenbank CoolProp (LINK: www.coolprop.org, Version 5.1.2 (Bell, et al., 2014)) herangezogen. Für die relative Luftfeuchtigkeit der Zuluft nach den Wärmetauschern ist keine Messstelle vorhanden. Für den Kühlfall musste die relative Luftfeuchtigkeit der Zuluft daher abgeschätzt werden. Die Massenströme wurden aus den entsprechenden Volumenströmen abgeleitet. Da keine unmittelbare Messung der Volumenströme im Betrieb erfolgte, weil der Einbau der entsprechenden Messtechnik nicht möglich war, wurden Daten, die im Rahmen der Typprüfung am Zug gemessen wurden, herangezogen. Informationen zu den Klappenstellungen wurden einbezogen und Dichteunterschiede wurden entsprechend berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass sich die Volumenströme bei Fahrt im Vergleich zu den Messungen bei Stillstand geringfügig unterscheiden können, was i. W. auf andere Druckverhältnisse an der Ansaugung zurückgeführt werden kann.

Abbildung 67: Schematische Darstellung des Luftpfades im HLK-System mit integrierten Komponenten und relevanten Messstellen



Rail vehicle = Wagen; HVAC system = Klimagerät; ambient air = Umgebungsluft; exhaust air = Abluft; Loads = Lasten; evaporator = Verdampfer (bzw. bei Air-Cycle: Luft-Luft-Wärmetauscher); electric heater = elektrisches Heizregister.

Schematische Darstellung des Luftpfades im HLK-System mit integrierten Komponenten und relevanten Messstellen
 Die Sensoren für Volumenströme wurden mit unterbrochener Linie umrandet um anzudeuten, dass die Volumenströme nicht im Feldeinsatz gemessen wurden, sondern von verfügbaren Labormessungen und Prozessdaten abgeleitet wurden. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3.2.8 Ergebnisse aus der Betrachtung beispielhafter Zugfahrten aus dem Sommer- und Winterbetrieb

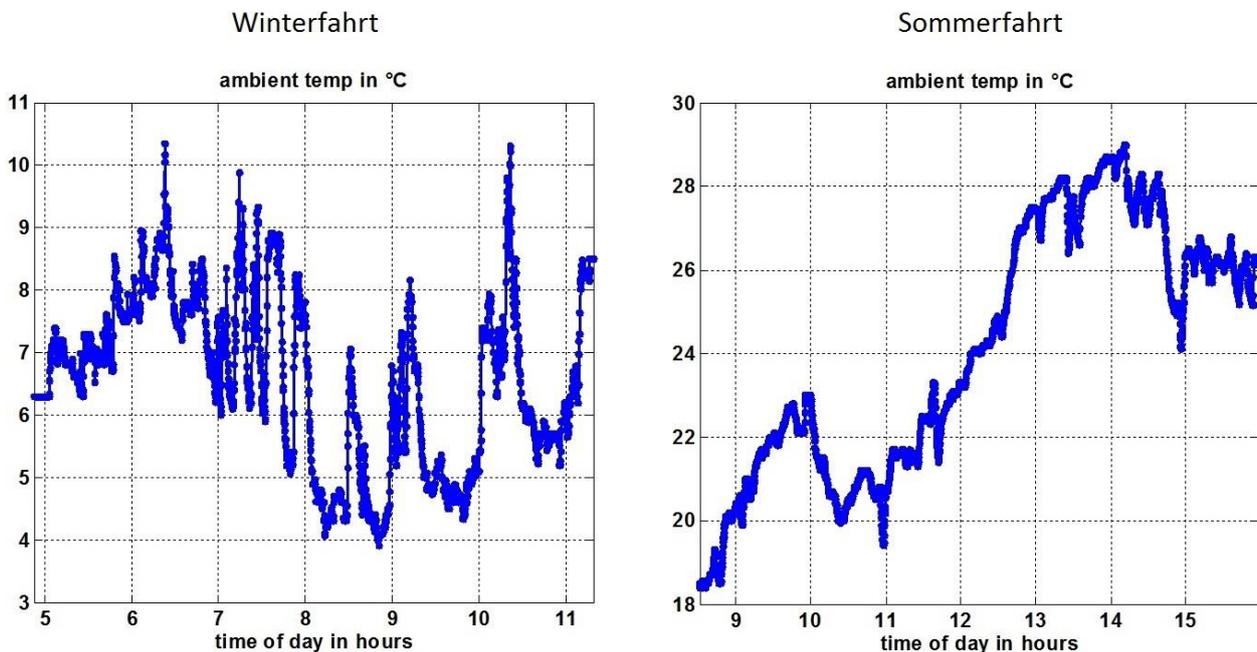
Die entwickelte Methodik wurde beispielhaft auf je eine Zugfahrt des Sommer- und des Winterbetriebes angewandt.

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der beiden betrachteten Zugfahrten. Es wurde bei der Auswahl darauf Wert gelegt, sowohl Zugfahrten bei relativ niedrigen als auch bei relativ hohen Außentemperaturen zu betrachten. Abbildung 68 zeigt die Temperaturverläufe jeweils über die gesamte Zugfahrt. Es werden relativ starke Temperaturschwankungen erkennbar. In einem Expertenworkshop wurden diese als denkbar bzw. plausibel bewertet.

Tabelle 6: Übersicht über die beispielhaft betrachteten Zugfahrten im Winter und im Sommer

Jahreszeit	Winter	Sommer
Start der Zugfahrt - Datum	12.02.2016	06.06.2016
Start der Zugfahrt - Uhrzeit	05:03	08:31
Dauer der Zugfahrt	6,4 h	7,5 h
Außentemperatur - Mittel	6,5°C	24,1°C
Außentemperatur - Minimum	3,9°C	29,0°C

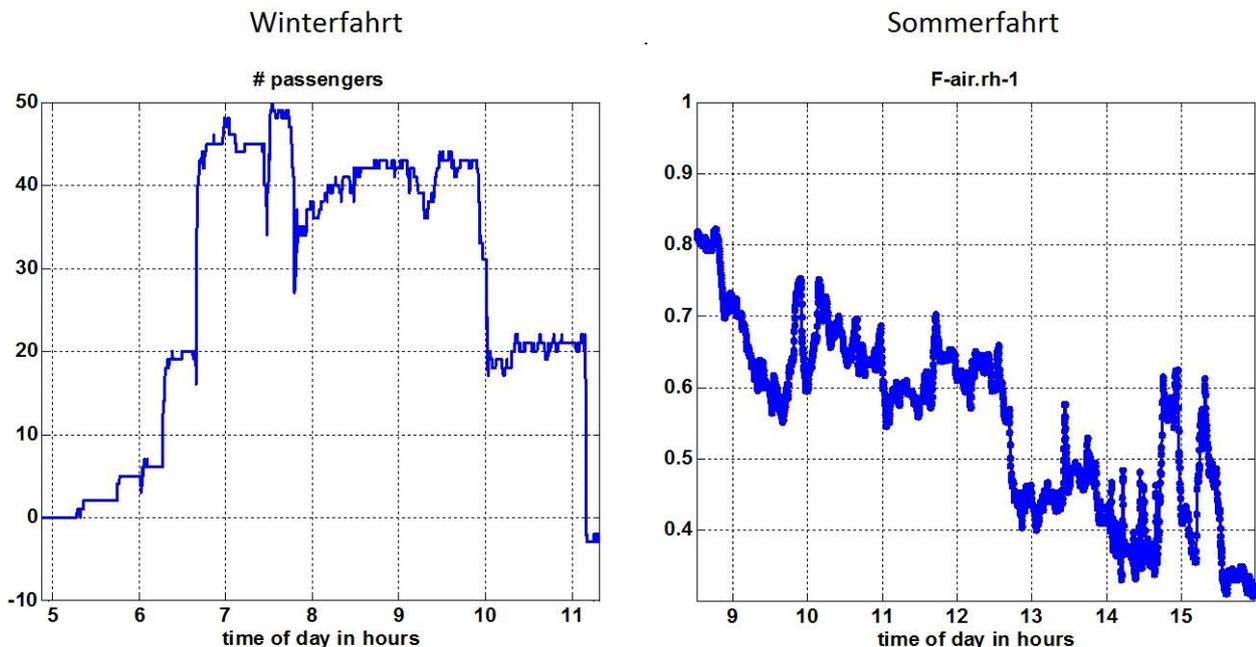
Abbildung 68: Temperaturverläufe der Außentemperatur für die Winterfahrt (links) und die Sommerfahrt (rechts)



ambient temp = Temperatur der Umgebungsluft; time of day in hours = Zeit über den Tag in Stunden.
Die y-Achse zeigt jeweils die Außentemperatur in °C. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 69 zeigt links für die Winterfahrt das Signal der Passagierbesetzung und rechts für die Sommerfahrt das Signal der relativen Luftfeuchtigkeit der Außenluft.

Abbildung 69: Passagieranzahl der Winterfahrt (links), relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft bei der Sommerfahrt (rechts)

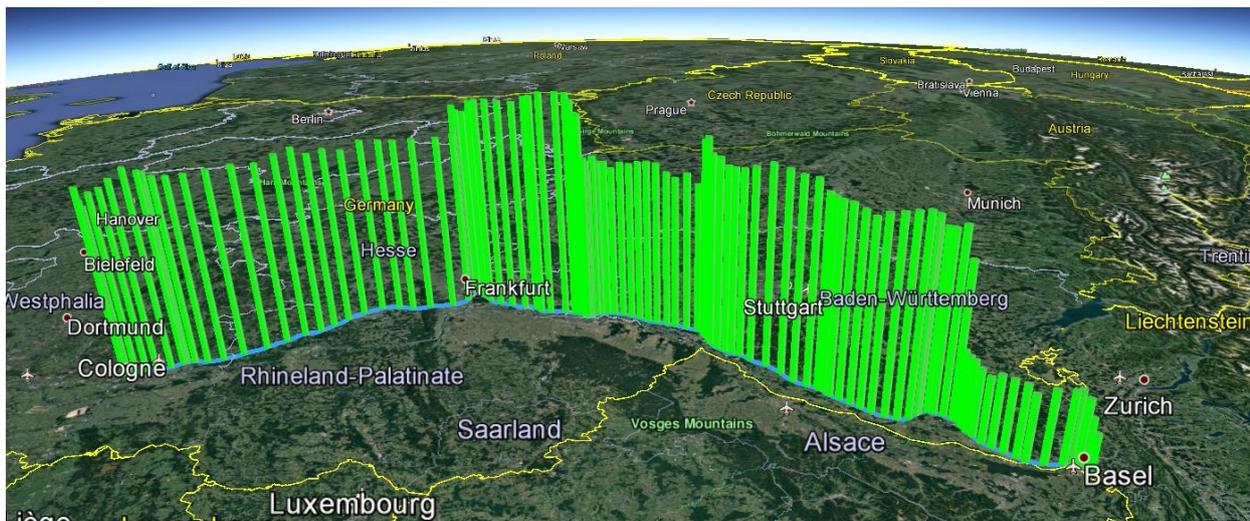


time of day in hours = Zeit über den Tag in Stunden.

Im linken Diagramm ist auf der y-Achse die Passagieranzahl aufgetragen. Im rechten Diagramm ist auf der y-Achse die relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft aufgetragen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Zur Visualisierung von ort- und zeitabhängigen Daten wurde Google Earth herangezogen. An sich können beliebige Signale zur Analyse und Kontrolle in ein entsprechendes Datenformat konvertiert werden und in Google Earth geladen werden. Als Beispiel ist in Abbildung 70 die Passagierbesetzung für die konkrete Fahrt am 7. Juni 2016 über dem Streckenverlauf gezeigt. Stationen entlang des Streckenverlaufs sind Köln Hbf, Siegburg/Bonn, Frankfurt(M) Flughafen Fernbf, Mannheim Hbf, Karlsruhe Hbf, Offenburg, Freiburg(Breisgau) Hbf, Basel Bad Bf, Basel SBB.

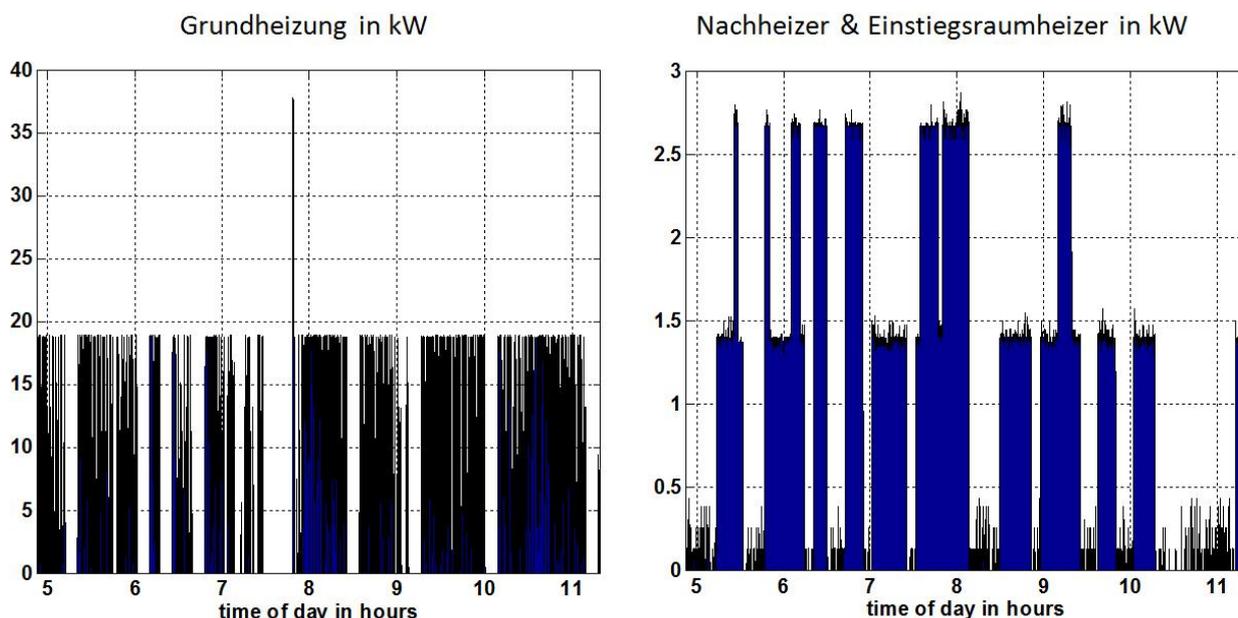
Abbildung 70: Beispielhafte Visualisierung des Streckenverlaufes mit Darstellung der ermittelten Passagierbesetzung



Beispielhafte Visualisierung des Streckenverlaufes mit Darstellung der ermittelten Passagierbesetzung. Fahrt mit Startzeit 07.06.2016, 12:55 Uhr. Darstellung in Google Earth. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die elektrischen Leistungsaufnahmen über der Zeit für die Grundheizung, die Nachheizer und die Einstiegsraumheizer bei der Winterfahrt zeigt Abbildung 71. Die Heizregister werden in Stufen getaktet angesteuert. Die Taktung der Heizregister ist in den Diagrammen aufgrund der komprimierten Zeitachse kaum sichtbar.

Abbildung 71: Elektrisch eingebrachte Heizleistungen bei exemplarischer Winterfahrt



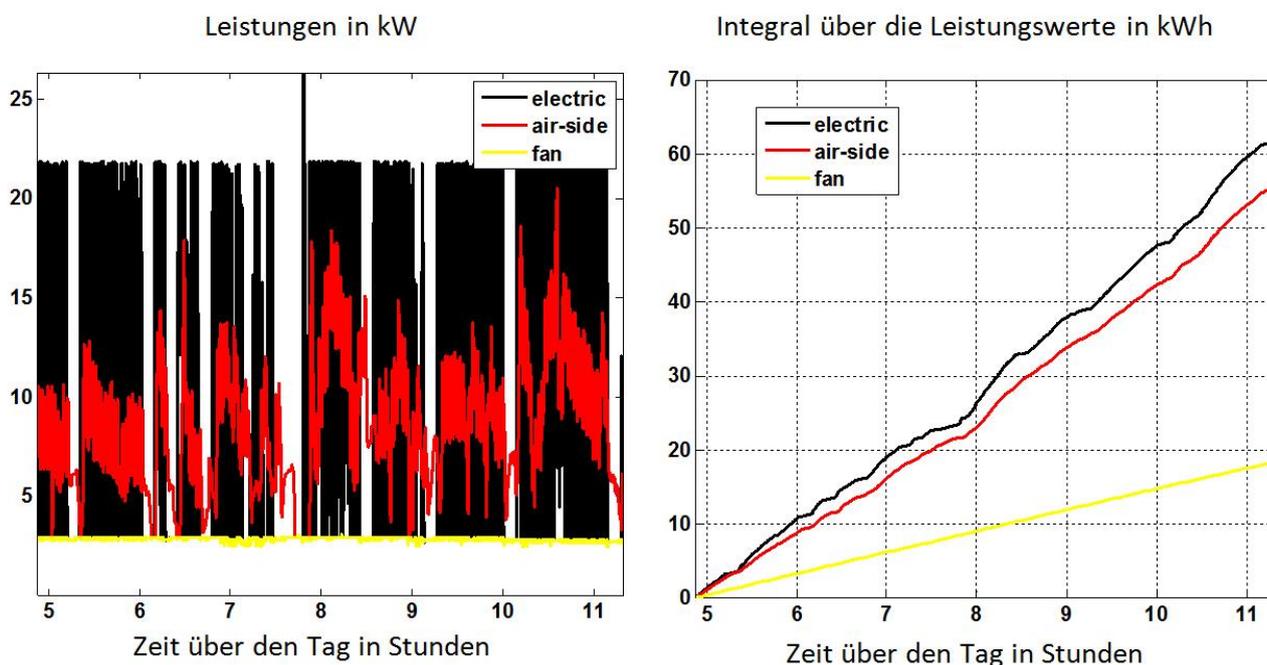
time of day in hours = Zeit über den Tage in Stunden. Die y-Achsen zeigen elektrische Heizleistungen in kW. Die Eigenabwärme der Lüfter ist nicht enthalten. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Weil elektrische Heizregister für die Heizung verwendet werden, ist der $COP_{\text{Heizregister}}$ im realen Fall nahezu 1. Damit ist ein unmittelbarer Vergleich der elektrisch eingebrachten Leistung mit der luftseitig ermittelten Leistung möglich. Abbildung 72 visualisiert den Vergleich.

Abbildung 72, rechts zeigt das Integral der Leistungswerte über der Zeit. Eine leichte Abweichung zwischen der Kurve für die elektrische und die luftseitige Energieeinbringung ist erkennbar. Zum Endzeitpunkt beträgt die Abweichung der Heizenergie für die beiden Ermittlungsvarianten bei der beispielhaften Zugfahrt ca. 10%. Umgelegt auf die durchschnittliche Abweichung der Leistung entspricht diese Abweichung weniger als 3% der installierten Heizleistung. Diese relativ geringe Abweichung ist ein positives Ergebnis im Sinne der Verifikation und Validierung der gesamten Methodik.

Die gesamte elektrische Leistungsaufnahme (inklusive Lüfter, Regler, etc.) des HLK-Gerätes für die betrachtete Winterfahrt wurde gemäß den Formeln in Abschnitt 2.3.2.6 ermittelt und über die 6,4 h der Zugfahrt zur Energieaufnahme integriert. Die mittlere elektrische Leistung lag bei rund 10,2 kW, die gesamte Energieaufnahme bei 69,3 kWh.

Abbildung 72: Vergleich von elektrisch eingebrachter Leistung am Hauptheizregister (schwarz) mit der luftseitig ermittelten Leistung (rot) über der Tageszeit in Stunden



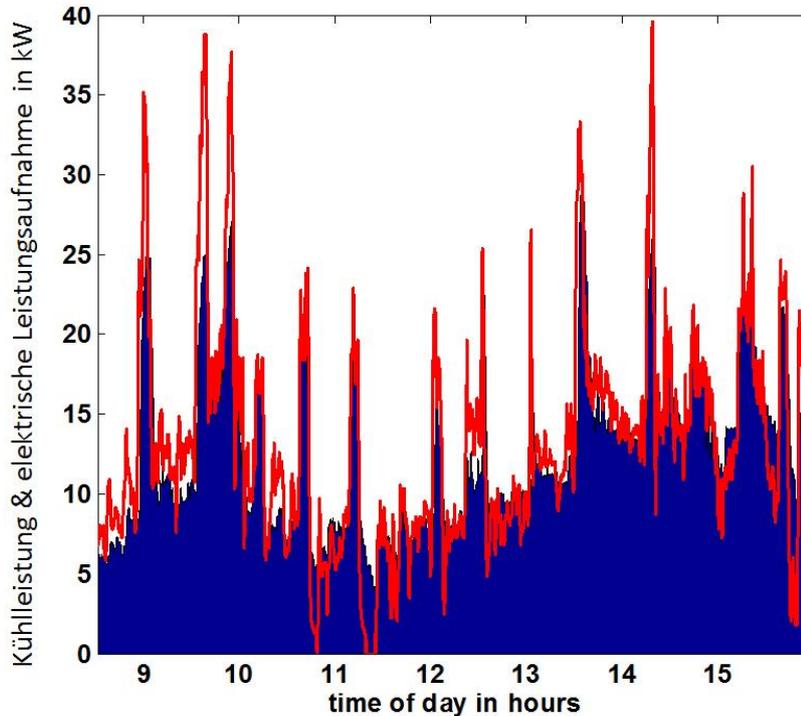
Die y-Achse im linken Diagramm zeigt Leistungen in kW. Die y-Achse im rechten Diagramm zeigt Energien in kWh.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Für die Kühlleistung bei der Sommerfahrt zeigt Abbildung 73 die Gegenüberstellung der elektrischen Leistungsaufnahme der Turbomaschine (rot) zur luftseitig ermittelten Kälteleistung (blau).

Im Gegensatz zum Heizfall ist der COP im Kühlfall nicht konstant und nicht von vornherein weitgehend bekannt. Der COP_{MKT} (Kälteleistung über elektrischer Leistungsaufnahme der Turbomaschine MKT) kann aus den Messdaten ermittelt werden. Es ergab sich für die betrachtete Zugfahrt ein mittlerer $COP_{MKT} = 0,96$. Dieser Wert wurde in einer Expertenrunde als realistisch bewertet. Es sei in diesem Zusammenhang nochmals auf die relativ hohen Außentemperaturen bei der gewählten Zugfahrt hingewiesen. Diese stellen einen eher ungünstigen Betriebspunkt mit relativ niedrigem COP der ACS-HLK-Anlage dar. Im Jahresverlauf sind hohe Außentemperaturen aber relativ selten, so dass die ACS-HLK-Anlage meistens deutlich bessere COP-Werte aufweist.

Analog zum Vorgehen bei der Winterfahrt wurde für die betrachtete Sommerfahrt die gesamte elektrische Leistungsaufnahme und Energieaufnahme (inklusive Lüfter, Regler, etc.) des HLK-Gerätes gemäß den Formeln in Abschnitt 2.3.2.6 ermittelt. Es ergab sich für die 7,5 h Sommerfahrt eine mittlere elektrische Leistungsaufnahme von ca. 16 kW und eine gesamte Energieaufnahme von 119,7 kWh.

Abbildung 73: Kälteleistung und elektrische Leistungsaufnahme in kW



time of day in hours = Zeit über den Tage in Stunden. Gegenüberstellung der elektrischen Leistungsaufnahme der Turbomaschine (rot) versus der luftseitig ermittelten Kälteleistung (blau). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Zur Validierung und Verifikation wurde ein Abgleich von Messergebnissen mit einem thermischen Simulationsmodell in Modelica/Dymola durchgeführt. Da eine detaillierte Beschreibung des zugehörigen Simulationsmodells für den Wagen, des Vorgehens und der Ergebnisse für diesen Bericht nicht unmittelbar relevant sind, wird an dieser Stelle auf (Luger, Virtual development and optimization of HVAC systems in rail vehicles, 2017) verwiesen. Für die betrachteten Zugfahrten zeigten sich ausreichend gute Übereinstimmungen zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen. Damit konnte gezeigt werden, dass relevante Messsignale konsistent und valide sind.

2.3.3 Vergleich verschiedener HLK-Systeme in Bezug auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf

2.3.3.1 Einleitung und Motivation

In diesem Abschnitt werden die Rahmenbedingungen und die Methodik des Vergleichs verschiedener HLK-Systeme in Bezug auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf beschrieben. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 2.4.1 dargestellt und diskutiert.

Der elektrische Leistungsbedarf ist hinsichtlich der erforderlichen Anschlussleistung bzw. der Dimensionierung des Bordnetzumrichters relevant.

Der elektrische Energiebedarf über einen bestimmten Betrachtungshorizont (beispielsweise über ein Jahr mit repräsentativen Betriebsbedingungen) ist ein wesentlicher Faktor in einer wirtschaftlichen und ökonomischen Bewertung eines HLK-Systems: Der Energiebedarf schlägt sich in den Betriebskosten (Energiekosten) nieder und in Umweltbelastungen und Emissionen für die Energiebereitstellung, die je nach dem zur Anwendung kommenden Energiemix unterschiedlich hoch sein können.

Im Schienenpersonentransport benötigen typische HLK-Systeme bis zu 30% des Gesamtenergieverbrauches (Schmitt & Berlitz, 2014). Eine Verringerung des Energieverbrauchs stellt daher einen wichtigen Hebel zur Verringerung der Betriebskosten und der Umweltbelastung dar.

2.3.3.2 Einflussfaktoren auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf

Abbildung 74 zeigt schematisch ein Personenschienenfahrzeug mit Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungs-System (HLK-System) sowie die wichtigsten Einflussfaktoren auf die thermischen Lasten, die durch das HLK-System kompensiert werden müssen. Alle diese Faktoren beeinflussen den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf.

Die Umgebungstemperatur verursacht im Kühlmodus Wärmeströme in den Wagen und im Heizbetrieb Wärmeströme aus dem Wagen, d.h. Wärmeverluste. Die Wärmelast infolge der Sonneneinstrahlung wird beeinflusst durch die sich verändernde Sonnenbestrahlung der Fahrzeugseitenwände und Fenster abhängig von der Orientierung der Bahnstrecke zur Sonne. Wechsel zwischen der Fahrt an der Oberfläche und in einem Tunnel bewirken abrupte Änderungen der Einstrahlung, sie müssen insbesondere für U-Bahnlinien in Betracht gezogen werden.

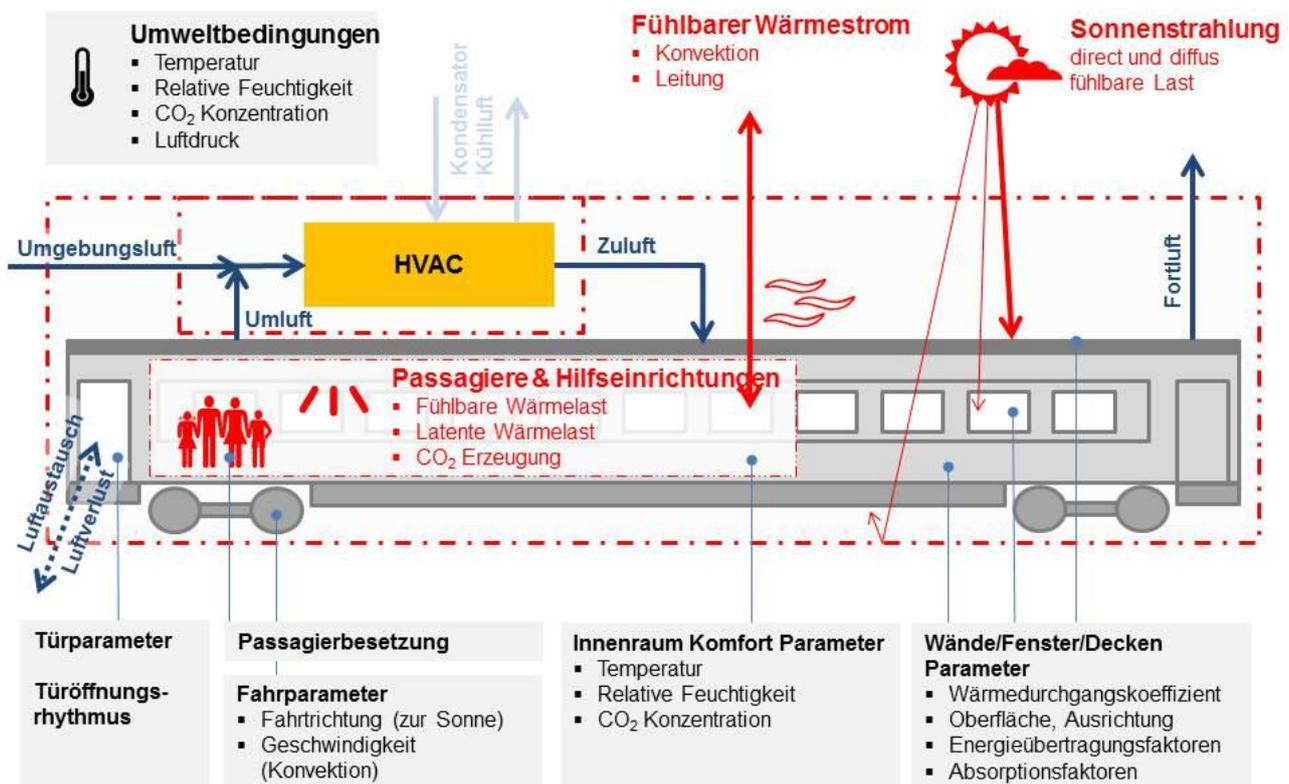
Bei der Türöffnung an den Stationen strömt Umgebungsluft ein und gegebenenfalls ändert sich die Personenbelegung schnell. Passagiere verursachen sensible und latente Wärmelasten und erfordern einen bestimmten Volumenstrom an Frischluftzufuhr, um die CO₂-Produktion durch den menschlichen Stoffwechsel zu kompensieren. Der Einfluss der Wärmeübertragung durch Wärmeströmung (Konvektion) an der Fahrzeugaußenhaut und die Auswirkungen der Sonnenstrahlung variieren in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, weil der äußere Wärmeübergangskoeffizient von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist.

Auch die gewählten Komfortparameter bzw. Regelgrößen wie Innenraumtemperatur, Innenraumluftfeuchtigkeit, Toleranzen und Ausregelzeiten haben einen Einfluss auf den Leistungs- und Energiebedarf eines HLK-Systems.

Der Betriebsmodus bzw. das Betriebsprofil beeinflusst die Leistungs- und Energieaufnahme eines Bahn-HLK-Systems. Bei unterschiedlichen Betriebsmodi: Komfortbetrieb einschließlich des Passagierbetriebs, Parkbetrieb zum Halten einer bestimmten Temperatur oder Vorkonditionierung gibt es unterschiedliche Anforderungen, Regelgrößen und unterschiedliche zusätzliche Einflüsse, wie insbesondere die Passagieranzahl.

Neben den bereits genannten Faktoren beeinflussen technische Aspekte des HLK-Systems wie Kältemittel, Wahl der Komponenten und Auslegung die elektrische Leistungs- und Energieaufnahme.

Abbildung 74: Schema eines Personenschienenfahrzeuges mit HLK-System sowie Lasten und Einflussfaktoren



Typische Luftströme werden durch blaue Pfeile gekennzeichnet. (Luger, Kallinovsky, & Rieberer, Identification of representative operating conditions of HVAC systems in passenger rail vehicles based on sampling virtual train trips, 2016), Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3.3.3 Primärer, sekundärer und gesamter Leistungs-/Energiebedarf

Der gesamte Leistungs-/Energiebedarf eines HLK-Systems ist die Summe aus dem primären Energiebedarf und dem sekundären Energiebedarf. Der primäre Bedarf wird unmittelbar vom HLK-System für Heizen, Kühlen, Entfeuchten, Luftbewegung, Klappenantriebe und Stellorgane, etc. hervorgerufen. Für die hier betrachteten HLK-Systeme wird der primäre Bedarf über elektrischen Strom gedeckt. Der sekundäre Leistungs-/Energiebedarf bezieht sich auf den Traktionsleistungsbedarf/Traktionsenergiebedarf infolge der Masse des HLK-Systems einerseits und den Impulswiderstand der vom HLK-System angesaugten Luft andererseits. Der sekundäre Energiebedarf ist über den Fahrzeugantrieb zu decken.

Basierend auf Modellrechnungen für verschiedene Anlagenkonfigurationen für einen Hochgeschwindigkeitszug in Deutschland gemäß (Aigner, 2007), zeigten (Morgenstern & Ebinger, 2008) Durchschnittswerte: Der gesamte Jahresenergiebedarf setzt sich demnach zu 51% aus dem Eigenverbrauch

Heizen (primärer Bedarf), zu 22% aus dem Eigenverbrauch Kühlen (primärer Bedarf), zu 22% aus Bedarf für die Luftansaugung (Impulswiderstand, sekundärer Bedarf) und zu 5% auf die Traktion infolge der Anlagenmasse (sekundärer Bedarf) zusammen. Es wird also deutlich, dass der sekundäre Energiebedarf einen durchaus nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf hat.

„Der Impulswiderstand wird verursacht durch die Beschleunigung der in die Lüftungsaggregate eingesaugten Luft, die auf die Fahrgeschwindigkeit des Zuges beschleunigt werden muss“, (Deutsche Bahn AG, Verringerung des Impulswiderstandes des ICE 3 Option durch den Einsatz des offenen Unterdrucksystems, 2001). Anders betrachtet bremst die zunächst noch ruhende Luft den Zug ab, wenn die Luft angesaugt wird. Um die Abbremsung zu überwinden, muss eine entsprechend höhere Traktionsleistung aufgebracht werden. Die Berechnung wird in Abschnitt 2.3.3.6.

2.3.3.4 HLK-Systeme für den Vergleich

Im Folgenden werden die Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungs-Systeme (HLK-Systeme) beschrieben, die für einen Vergleich herangezogen wurden. Die Einzelheiten der diskutierten Systeme 1 bis 6 sind weiter unten in diesem Abschnitt beschrieben.

In (Meister, 2012) wurde ein Vergleich einer Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3) gemäß (Vergleichssystem 1) mit einer Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Gegenheizen (ICE-T) gemäß (Vergleichssystem 2) durchgeführt. Der aktuelle Vergleich lehnt sich an das Vorgehen von (Meister, 2012) an, erweitert diesen Vergleich aber, wie an späterer Stelle ausführlich beschrieben wird.

Der Vergleich im vorliegenden Projekt schließt folgende HLK-Anlagen ein:

- ▶ Vergleichssystem 1: Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3)
- ▶ Vergleichssystem 2: Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Gegenheizen (ICE-T)
- ▶ Vergleichssystem 6: Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess (neue Architektur, Simulation)
- ▶ Vergleichssystem 3: Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und gedachtem Bypass (basierend auf ICE-T).

Da für eine R134a-Anlage mit Bypass (Vergleichssystem 3) keine Messdaten aus umfangreichen Felddatenerfassungen vorliegen, ist hier nur eine eingeschränkte Vergleichbarkeit gegeben. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

3 handelt es sich um weiterentwickelte optimierte HLK-Anlagen mit Luft oder R134a als Kältemittel. In dieser Studie erfolgt ein Vergleich zwischen je einer Air-Cycle Anlage und einer Kaltdampfanlage, die aktuell auf Zügen installierte Anlagen sind, sowie für weiterentwickelte und verbesserte Anlagen beider Techniken. Vergleichssystem 1 und Vergleichssystem 2 sind in Zügen installiert. Bei Vergleichssystem 6 und Vergleichssystem

Während für die Vergleichssysteme 1 und 2 Felddaten für den Vergleich zur Verfügung standen, war dies für die Vergleichssysteme 6 und 3 nicht der Fall. Anstelle von Felddaten wurden für den Vergleich für die Vergleichssysteme 6 und 3 relevante Größen auf Basis von Annahmen und Modellen abgeleitet oder berechnet. Eine unmittelbare Gegenüberstellung der errechneten Ergebnisse für Vergleichssystem 6 und 3 zu den Ergebnissen aus tatsächlichen Messungen für Vergleichssystem 1 und 2 wäre nicht korrekt und gegebenenfalls irreführend. Daher werden die Ergebnisse in den Ergebnisdiagrammen klar voneinander getrennt dargestellt.

Bei den hier verglichenen HLK-Systemen besteht technisch gesehen kein Unterschied beim Heizbetrieb: In allen Anlagen werden konventionelle elektrische Widerstandsheizungen eingesetzt. Eine Wärmepumpenschaltung ist in keinem der betrachteten HLK-Systeme vorhanden, wäre grundsätzlich

aber für die Vergleichssysteme 2, 3 und 6 technisch möglich. Im Vergleich werden daher die Unterschiede im Kühlbetrieb der Vergleichssysteme aufgezeigt.

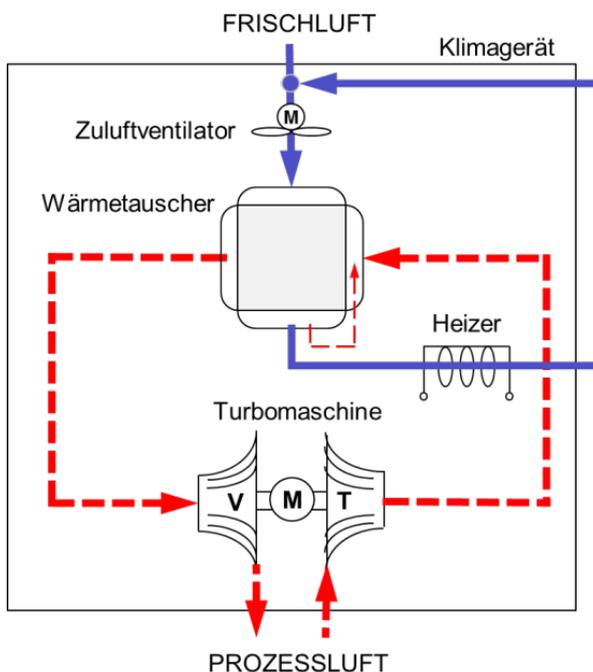
Wie im Abschnitt zum Vergleichssystem 4 beschrieben, wurden umfangreiche Überlegungen zum Vergleich mit weiteren konventionellen HLK-Systemen angestellt. Die jeweiligen Rahmenbedingungen und die unzureichende Datenverfügbarkeit ermöglichten jedoch keine praktische Umsetzung. Im Kontext eines aktuell laufenden Forschungsprojektes gibt der Abschnitt zu Vergleichssystem 5 einen Ausblick auf einen für die Zukunft angedachten Vergleich mit einer Kaltdampfanlage mit dem natürlichen Kältemittel R744.

Vergleichssystem 1: Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3)

Im ICE 3 ist eine Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (offener Prozessluftkreis) installiert, siehe Abbildung 75. Die sogenannte Prozessluft wird aus der Umgebung angesaugt, über die Turbine bei Vollast auf ca. 0,5 bar entspannt und dadurch abgekühlt sowie über einen Luft-Luft Wärmeübertrager geführt. Im Wärmeübertrager wird Wärme von der Zuluft (die später dem Wagen zugeführt wird) auf die kühle Prozessluft übertragen, wodurch sich die Zuluft abkühlt und die Prozessluft erwärmt. Dann wird die Prozessluft auf Umgebungsdruck verdichtet und an die Umgebung abgeführt.

Turbine und Verdichter sitzen auf einer mechanischen Welle und werden von einem Elektromotor angetrieben. Durch die genaue Drehzahlregelbarkeit des verwendeten Synchronmotors kann die Kälteleistung der Air-Cycle Anlage stufenlos reguliert werden. Zusätzliche Vorrichtungen zur Regulierung der Kälteleistung (z.B. ein Bypass oder ein Heizregister zum Gegenheizen) sind daher in dieser Anlage nicht erforderlich.

Abbildung 75: Schema der betrachteten Air-Cycle Anlage mit dem offenen Prozessluftkreis (Vergleichssystem 1)



Schema der betrachteten Air-Cycle Anlage mit dem offenen Prozessluftkreis wie er beim ICE 3 implementiert ist.

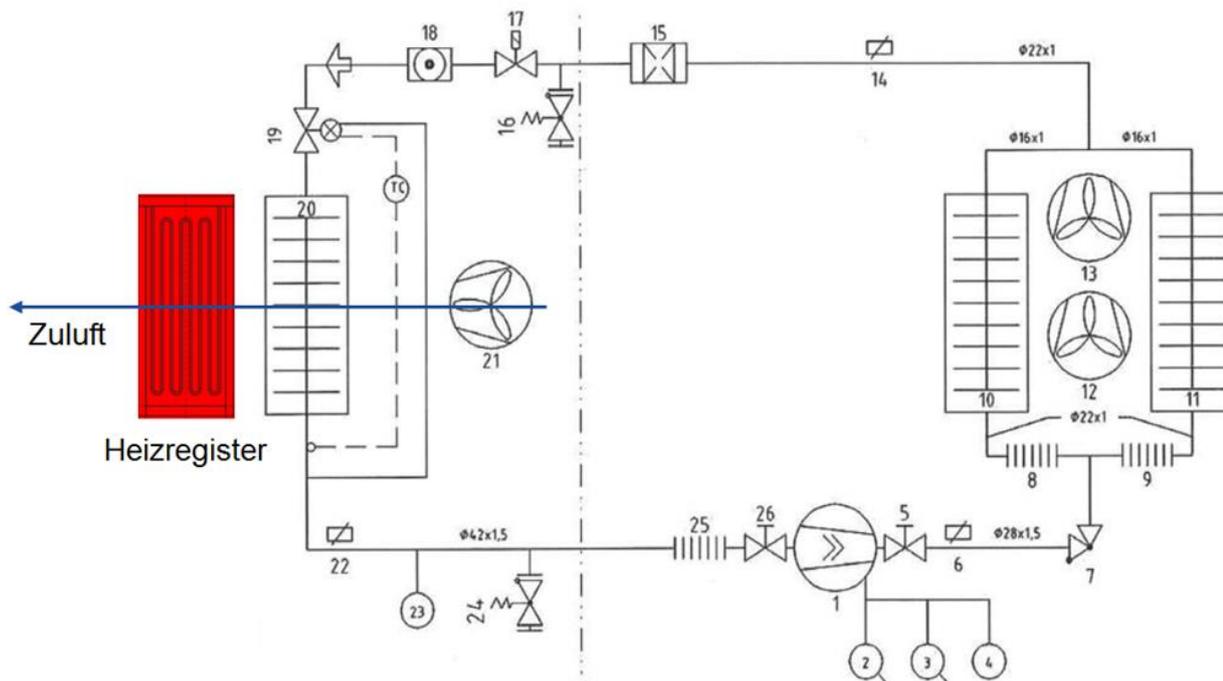
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleichssystem 2: Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und Gegenheizung für den niedrigen Teillastbereich (ICE-T)

Der im ICE-T implementierte Kältekreis ist schematisch in Abbildung 76 dargestellt. Es handelt sich um eine Kaltdampfanlage mit dem Kältemittel R134a. Dieses treibhauswirksame Kältemittel mit einem GWP (Global Warming Potential) von 1430 ist vom Phase down der EU F-Gas-Verordnung Nr. 517/2014 betroffen und wird in den nächsten Jahren zunehmend schwerer verfügbar und wesentlich teurer werden.

Die ICE-T Anlage verfügt über einen drehzahlgeregelten Schraubenverdichter zur Regelung der Kälteleistung. Die an sich energieeffiziente Drehzahlregelung ist jedoch wegen technischer Einschränkungen (insbesondere Ölrückführung) nur bis zu einer bestimmten minimalen Drehzahl möglich. Ist die erzielte Kälteleistung bei der minimalen Drehzahl höher als die erforderliche Kälteleistung, wird in dieser Anlage die zu stark abgekühlte Luft über ein elektrisches Heizregister wieder erwärmt. Es liegt auf der Hand, dass dieses Konzept der Leistungsregelung für den niedrigen Teillastbereich heutigen Forderungen nach hoher Energieeffizienz nicht mehr entspricht. Da das Gegenheizen zur Leistungsregelung heute nicht mehr dem Stand der Technik entspricht, wird es in aktuellen Lastenheften oftmals explizit ausgeschlossen.

Abbildung 76: Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und Gegenheizen für den niedrigen Teillastbereich (Vergleichssystem 2)



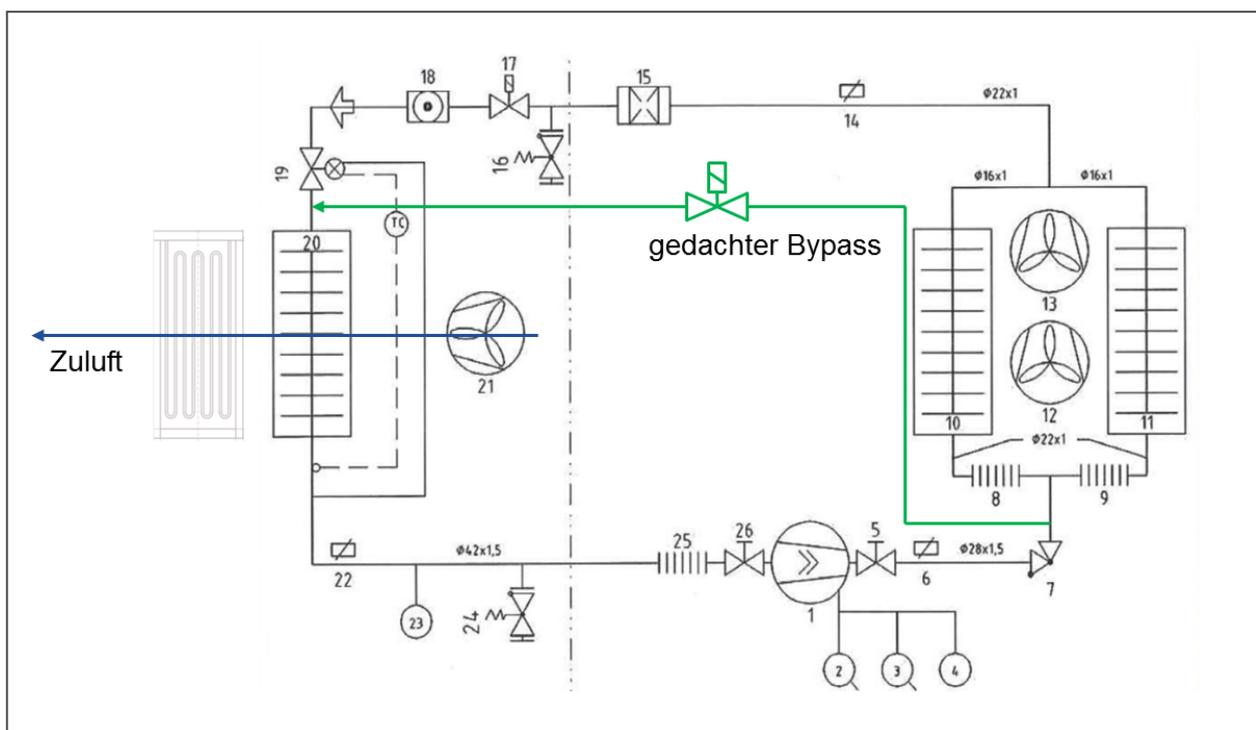
1 - Kältemittelverdichter, 10 & 11 - Wärmetauscher (Verflüssiger), 12 & 13 - Verflüssigerlüfter, 19 - Expansionsventil, 20 - Wärmetauscher (Verdampfer), 21 - Zuluftlüfter.

Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und Gegenheizen für den niedrigen Teillastbereich wie beim ICE-T verwendet. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleichssystem 3: Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und gedachtem Bypass für den niedrigen Teillastbereich

Das HLK-System entspricht im Wesentlichen jenem von Vergleichssystem 2: Als Kältemittel kommt das treibhauswirksame R134a zur Anwendung. Der Kältekreis der Anlage verfügt über einen drehzahlregulierten Schraubenverdichter. Die Kälteleistung kann über die elektronische Drehzahlregelung kontinuierlich zwischen Maximaldrehzahl und Minimaldrehzahl reguliert werden. Für eine Reduktion der Kälteleistung unterhalb der Minimaldrehzahl des Verdichters wird nun anstelle des Gegenheizens wie in Vergleichssystem 1 eine konventionelle Bypass-Schaltung verwendet. Bei annähernd konstanter Leistungsaufnahme des Verdichters (Betrieb auf minimaler Drehzahl) wird die Kälteleistung durch den Bypass weiter abgesenkt, wodurch der COP der Anlage zunehmend schlechter wird. Es wird aber im Gegensatz zum ursprünglichen Fall keine zusätzliche Heizleistung zugeführt, die zu einem deutlich schlechteren COP führen würde.

Abbildung 77: Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und gedachtem Bypass für den niedrigen Teillastbereich (Vergleichssystem 3)



1 - Kältemittelverdichter, 10 & 11 - Wärmetauscher (Verflüssiger), 12 & 13 - Verflüssigerlüfter, 19 - Expansionsventil, 20 - Wärmetauscher (Verdampfer), 21 - Zuluftlüfter.

Schema der Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und gedachtem Bypass für den niedrigen Teillastbereich (Vergleichssystem 3). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleichssystem 4: Moderne Kaltdampfanlagen, die für einen Vergleich erwogen wurde

Um zu prüfen, inwieweit Vergleiche mit weiteren und modernen Kaltdampfanlagen möglich sind, wurden verschiedene Projekte der DB bzw. von LVF auf Eignung untersucht.

ICE-4 der DB

Der ICE-4 verfügt über eine moderne zweikreisige Anlage mit dem Kältemittel R134a und einer Kälteleistung von 44 kW. Zur Leistungsregelung kommt kein frequenz geregelter Verdichter zum Einsatz.

Zu ICE-4 gibt es zu einigen stationären Punkten Messwerte aus dem Klimawindkanal des RTA in Wien. Die Messergebnisse wurden unter Annahme gewisser Gewichtungsfaktoren auf einen Jahresverbrauch hochgerechnet. Messdaten aus dem tatsächlichen Feldbetrieb wie bei ICE 3 und ICE-T stehen jedoch aktuell nicht zur Verfügung. Der Zug wurde erst im Dezember 2017 in Betrieb genommen. Eine ausreichend umfangreiche Felddatenerfassung nach dem Vorbild von ICE 3 war daher in der verbleibenden Laufzeit des UBA-Projektes für ICE-4 nicht möglich. Ein auf Felddaten basierender Vergleich des ICE 3 (Air-Cycle Anlage) mit dem ICE-4 (Kaltdampfanlage) konnte daher hier nicht erfolgen.

Als mögliche Lösung wurde angedacht, einen Vergleich von unter Laborbedingungen im Klimawindkanal gemessenen Daten des ICE-4 mit Felddaten des ICE 3 durchzuführen. Die sehr geringe Anzahl an Messpunkten im Klimawindkanal ist dazu aber nicht ausreichend. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Messung im Klimawindkanal unter stationären Bedingungen erfolgt, während im Feldbetrieb dynamische Schwankungen diverser Einflussfaktoren auftreten. Diese Aspekte stehen einem fairen und belastbaren Vergleich entgegen.

Zug Velaro der Deutschen Bahn (DB)

Für den Hochgeschwindigkeitszug Velaro der DB, der auf dem ICE 3 basiert, läuft ein Felddatenerfassungsprogramm, das allerdings den Fokus auf vorausschauender Instandhaltung (predictive maintenance) und nicht auf Betrachtungen zum Energiebedarf hat.

Für den Velaro werden im Feldbetrieb Klimadaten und Prozessdaten (Klappenstellungen, etc.) erfasst. Eine Messung der Leistungsaufnahme erfolgt hier nicht. Sie wäre aber von zentralem Interesse für den Vergleich verschiedener Anlagen. Außerdem werden Felddaten nicht kontinuierlich abgeholt. Die vorhandenen Daten des Velaro sind damit für einen Vergleich mit dem ICE 3 ungeeignet.

Zug Railjet der Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)

Der Fernreisezug Railjet der ÖBB ist mit einer Kaltdampfanlage (Kältemittel R134a) in zweikreisiger Ausführung ausgestattet. Die Kälteleistungsregelung erfolgt über Zylinderaushebung des Verdichters und einen Bypass für den niedrigen Teillastbereich. Aktuell liegen zu dieser Anlage keine Felddaten vor. Felddaten zu diesem Zug werden ab dem ersten Quartal 2018 erfasst (siehe auch Ausführungen zum Vergleichssystem 5). Die Qualität der erfassten Messdaten wird im Wesentlichen der Qualität der Messdaten im vorliegenden Projekt entsprechen. In die Konzeptionierung des Felddatenerfassungsprogrammes für den Railjet konnten Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt eingebracht werden.

Vergleichssystem 5: Kaltdampfanlage mit dem Kältemittel CO₂ (R744) für einen möglichen zukünftigen Vergleich

In Projekt eco2jet, gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG, arbeitet LVF in einem Konsortium an einem HLK-System mit dem natürlichen Kältemittel CO₂ (R744). In einem ersten Schritt soll ein Demonstrator auf einem Reisezug (Railjet) der ÖBB implementiert werden, in einem zweiten Schritt ein seriennahes Gerät. Für beide Geräte sowie für eine Referenzanlage mit dem konventionellen Kältemittel R134a nach dem Stand der Technik sollen Felddaten nach dem Vorbild des UBA-Projektes erfasst werden.

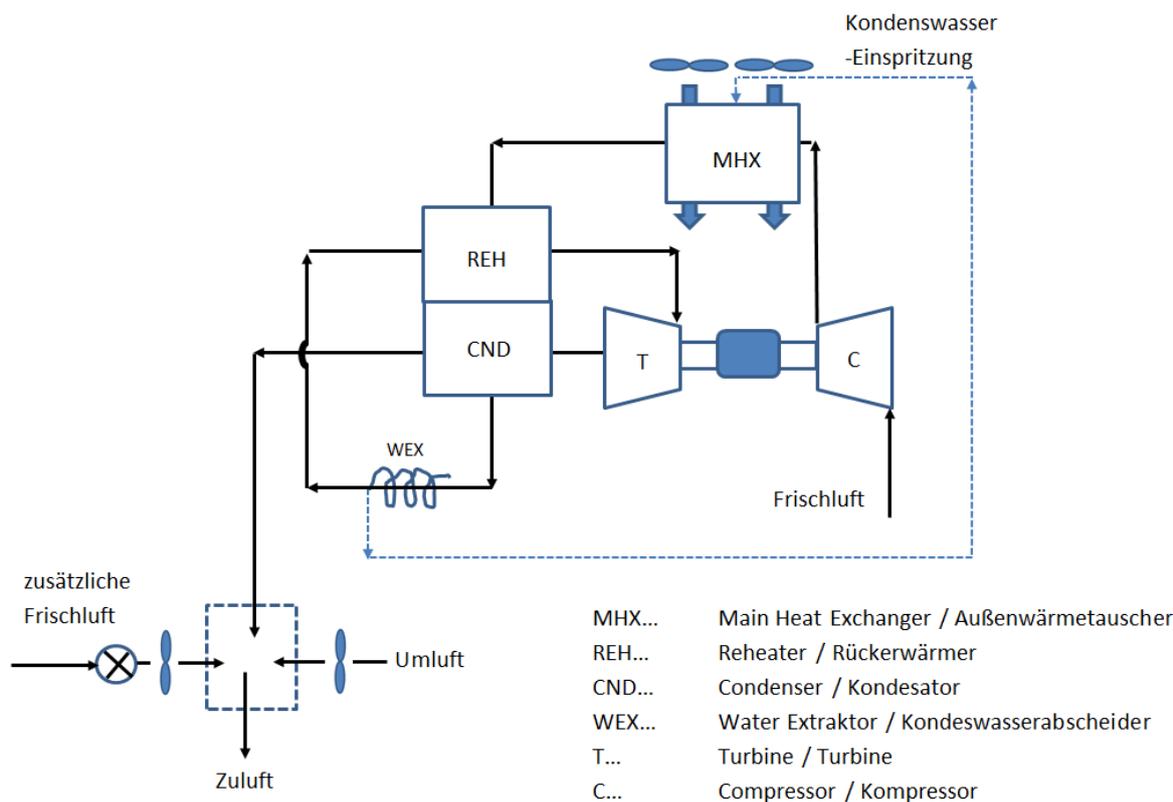
Diese Daten könnten in Zukunft einen weiterführenden Vergleich verschiedener Techniken bzw. Anlagen mit unterschiedlichen Kältemittel ermöglichen. Daten, Methoden und Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt stellen hierfür eine wichtige Basis dar.

Vergleichssystem 6: Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess

Analog zur modernen Kaltdampfanlage (VCS-Anlage), die als Vergleichssystem 3 betrachtet wurde, gibt es auch eine moderne Air-Cycle Anlage. Die dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess ist in Abbildung 78 schematisch dargestellt.

Beim Air-Cycle System mit Überdruckprozess wird aus der Umgebung angesaugte Luft zunächst auf Überdruck komprimiert und dadurch erwärmt. Wärme wird über einen Außenraum-Wärmeübertrager an die Umgebung abgeführt. In der anschließenden Expansion auf Umgebungsdruck wird die Luft abgekühlt und nach der Mischung mit Umluft aus dem Fahrgastraum als Zuluft direkt dem Fahrgastraum zugeführt.

Abbildung 78: Schema der Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess



Schema der Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.3.3.5 Datenbasis

Für die Vergleichsmöglichkeiten sind die verfügbaren Daten entscheidend. Primäres Ziel in diesem Projekt ist der Vergleich basierend auf im regulären Betrieb gemessenen Daten (Felddaten). Im Sinne eines sachgerechten Vergleiches wurde davon Abstand genommen, Felddaten eines Systems mit rein berechneten Simulationsdaten eines anderen Systems zu vergleichen. Die Daten wurden, soweit möglich und sinnvoll, auf Plausibilität geprüft. Als nicht plausible befundene Daten wurden verworfen.

Die Datenbasis bei Vergleichssystem 1 (Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess, ICE 3) ist deutlich umfangreicher als es für den im Folgenden beschriebenen Vergleich einer Kaltdampfanlage mit einer Air-Cycle Anlage an sich erforderlich wäre. Die umfangreiche Datenbasis bei ICE 3 liefert jedoch eine wertvolle Basis für weiterführende Vergleiche in zukünftigen Untersuchungen. Zu Beginn des Projektes war weder bekannt, wie umfangreich die verfügbaren Daten aus der ICE-T Messung sein würden, noch ob Vergleiche mit anderen konventionellen Anlagen möglich sein würden. Auch aus diesem Grund war es sinnvoll, die sehr zeitaufwändige Messdatenerfassung am ICE 3 hinsichtlich der erfassten Signale möglichst umfangreich zu gestalten.

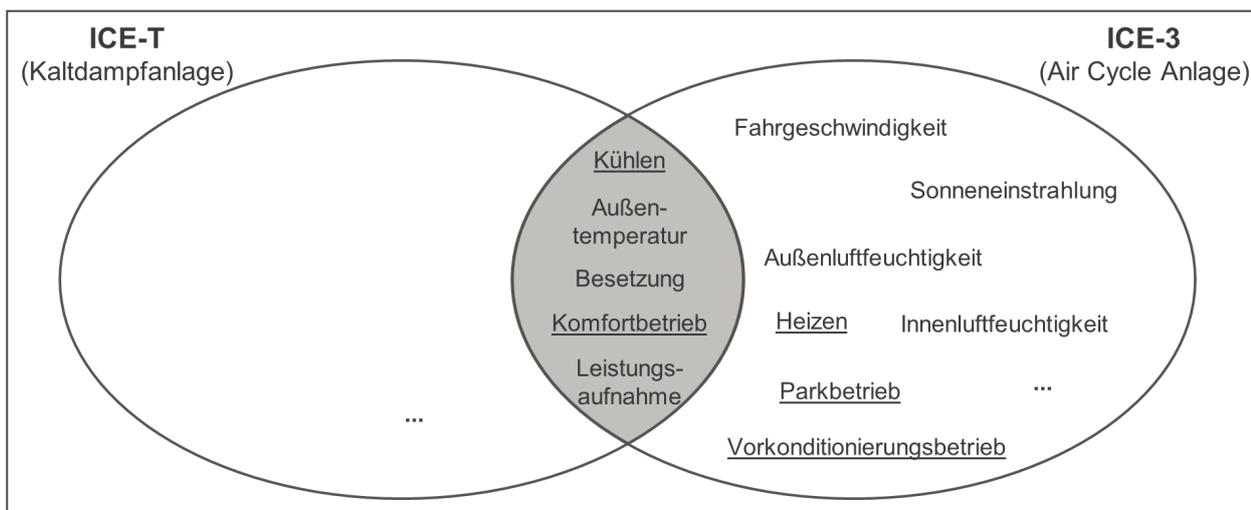
Es wurde geprüft, inwieweit fehlende Daten für den ICE-T aus vorhandenen Informationen abgeleitet bzw. aus der Einbindung weiterer Datenquellen, beispielsweise den Wetterdaten des DWD, rekonstruiert werden können. Beispielsweise hätte man die fehlende Information der Sonneneinstrahlung über den Zeitstempel der Messdaten (Zeit im Jahr, Zeit über den Tag) schätzen können. Sämtliche theoretisch möglichen Vorgehensweisen wären jedoch mit Modellannahmen verbunden und mit erheblichen Unsicherheiten behaftet gewesen. Die effektive Qualität der Vergleichsergebnisse wäre damit nicht wesentlich verbessert worden. Aus diesem Grund wurde von der Rekonstruktion von Daten zu weiteren Einflussfaktoren Abstand genommen.

Zudem ist zur Berücksichtigung einer höheren Anzahl betrachteter Einflussfaktoren, d.h. einer höheren Dimensionalität, eine höhere Anzahl an Messpunkten (Samples) nötig. Bei ICE-T liegen relativ wenig gültige Datenpunkte vor, sodass die Dimensionalität kaum über 2 erhöht werden kann. Dieser Aspekt wird in Zusammenhang mit der Klasseneinteilung in Abschnitt 2.3.3.5 deutlich.

Schnittmenge der Datenbasis für den Vergleich

Abbildung 79 zeigt schematisch in Form eines Mengendiagramms die für Vergleichssystem 2 (ICE-T) und Vergleichssystem 1 (ICE 3) verfügbaren Daten. Die Daten zu ICE-T stammen von einem früheren Messprogramm der DB. Die Daten zu ICE 3 wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes erfasst. Das Diagramm legt den Fokus auf Messsignale und Betriebsmodi mit Relevanz für den Vergleich der HLK-Systeme in Bezug auf Leistungs- und Energiebedarf. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass ein sachgerechter Vergleich nur für die Schnittmenge aus den beiden Messprogrammen möglich ist. Offensichtlich sind die Einschränkungen im Wesentlichen auf die eingeschränkte Datenverfügbarkeit bei ICE-T zurückzuführen.

Abbildung 79: Datenbasis für ICE-T (Kaltdampfanlage) und ICE 3 (Air-Cycle Anlage)



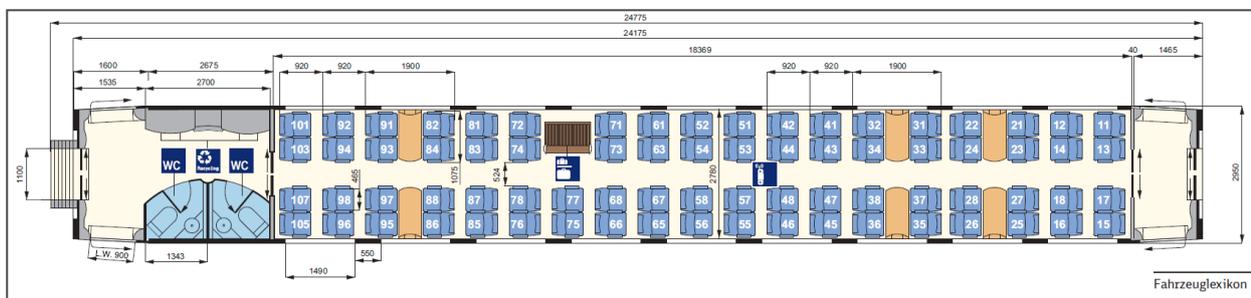
Datenbasis für ICE-T (Kaltdampfanlage) und ICE 3 (Air-Cycle Anlage). Schematische Darstellung von ausgewählten Messsignalen und Betriebsmodi mit Relevanz für den Vergleich der HLK-Systeme. Die Elemente in der Schnittmenge werden für den Vergleich herangezogen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

In die Schnittmenge fallen die Außentemperatur sowie die Besetzung als Einflussfaktoren auf die elektrische Leistungsaufnahme. Nicht berücksichtigt werden können Einflussfaktoren wie die Fahrgeschwindigkeit oder die Sonneneinstrahlung. (Vergleiche hierzu Abschnitt 2.3.3.2 zu Einflussfaktoren auf den elektrischen Leistungs- und Energiebedarf.) Der Vergleich bezieht sich auf den Komfortbetrieb, der den Passagierbetrieb einschließt. Für den Parkbetrieb bzw. Vorkonditionierung bei ICE-T stehen Daten nicht in entsprechendem Umfang zur Verfügung. Bei ICE-T gibt es darüber hinaus keine ausreichende Menge bzw. keine verlässlichen Messdaten zum Heizbetrieb.

Daten für Vergleichssystem 1 – Air-Cycle System mit Unterdruckprozess im ICE 3

Im Rahmen dieses Projektes am ICE 3 wurden über einen langen Zeitraum von ca. 2 Jahren in großem Umfang Felddaten erfasst. In Abbildung 80 wird nochmals der Grundriss des betrachteten Wagens mit 74 Sitzplätzen dargestellt.

Abbildung 80: Untersucher ICE 3 Mittelwagen



Untersucher ICE 3 Mittelwagen ICE 3, Baureihe 403, 2. Serie (DB-Wagengattung Bpmz 403.6). Quelle: (Deutsche Bahn AG, Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016, 2017)

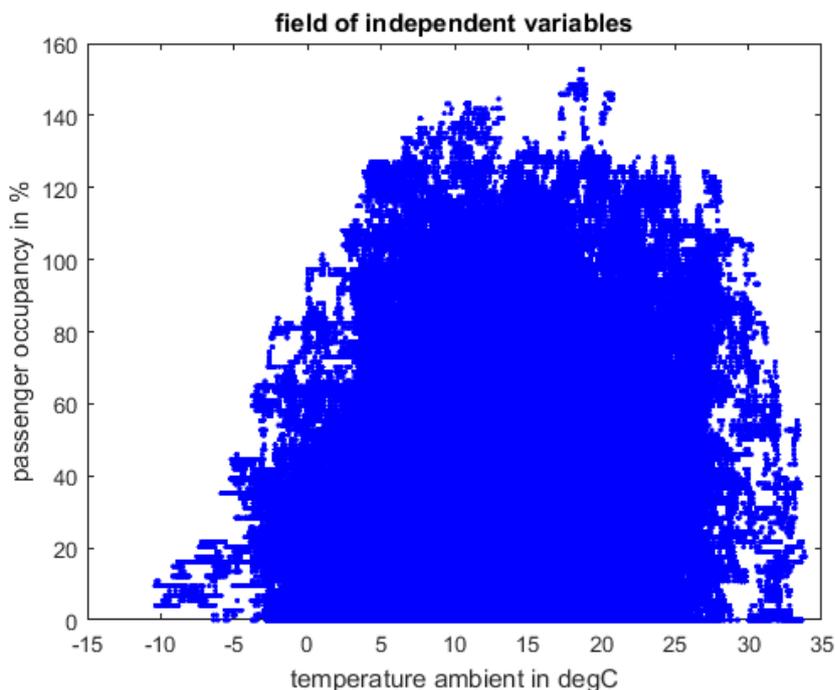
Abhängig von den verfügbaren Daten des ICE-T wurde der Komfortbetrieb der Klimaanlage und damit insbesondere der Passagierbetrieb betrachtet.

Grundsätzlich wurde wie folgt vorgegangen:

- ▶ Monatsweises Durchlaufen des Geschwindigkeitssignals und Detektion von Stillstandsphasen von mindestens 20 Minuten Länge. Der Betrachtung wurde zugrunde gelegt, dass eine Zugfahrt typischerweise mit einer Stillstandsphase von mindestens 20 Minuten Länge beginnt.
- ▶ Verwerfen von Zugfahrten, die eine längere Fahrzeit als 24 h bzw. kürzere Fahrzeit als 0.8 h aufweisen. Damit wurden kurze Rangierfahrten bzw. Störungen/Unterbrechungen bei der Datenaufzeichnung von der weiteren Betrachtung ausgeklammert.
- ▶ Aufsummieren der Zählerstände der vier Sensoren für die Besetzungszählung.
- ▶ Verwerfen von Zugfahrten mit nicht plausiblen Passagierverläufen. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.3.2.4.
- ▶ Berechnen der elektrischen Leistungsaufnahme gemäß Abschnitt 2.3.2.6. für die plausiblen Zugfahrten, siehe auch Beispiele in Abschnitt 2.3.2.8.

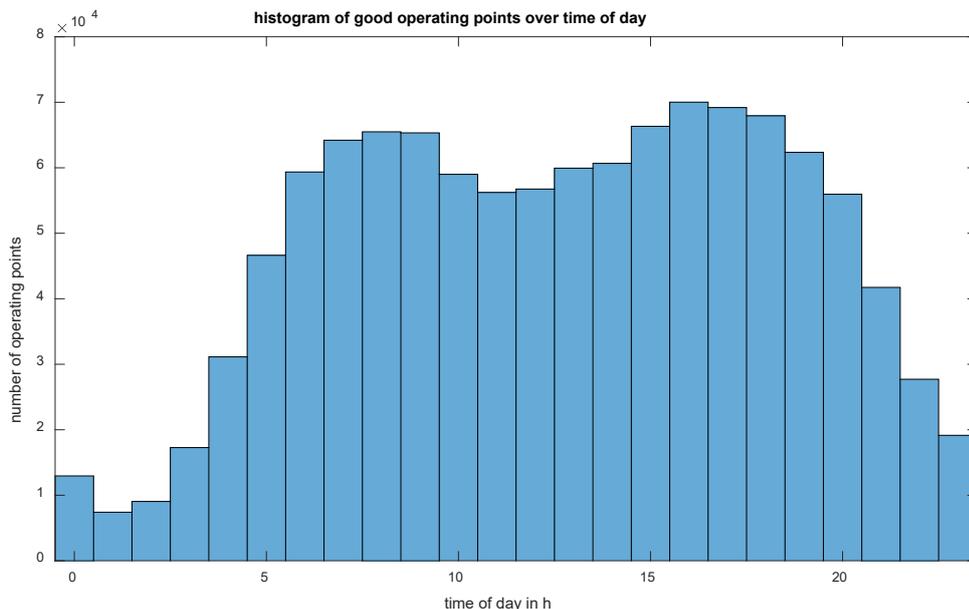
Abbildung 81 zeigt die Punktwolke der schließlich weiterverwendeten Messdaten aufgetragen über den Variablen Außentemperatur und Passagierbesetzung, die später als Modelleingangsvariablen verwendet wurden. Das Histogramm in Abbildung 82 zeigt, wie viele gültige Betriebspunkte den jeweiligen Stunden eines Tages zugeordnet sind. Es wird unmittelbar sichtbar und ist nachvollziehbar, dass es deutlich weniger gültige Zugfahrten, und damit weniger Betriebspunkte, während der Nachtstunden im Vergleich zu den Tagstunden gibt.

Abbildung 81: Punktwolke der gültigen Datenpunkte der Messungen am ICE 3



field of independent variables = Feld der unabhängigen Variablen; temperature ambient in degC = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 82: Anzahl der Betriebspunkte aus gültigen Zugfahrten dargestellt pro Stunde für einen 24-Stunden-Tag

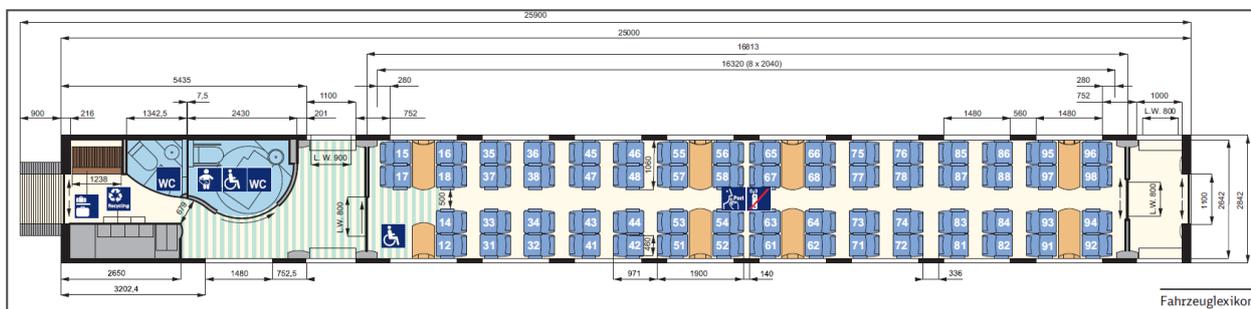


time of day in h = Tageszeit in Stunden; number of operating points = Anzahl der Betriebspunkte.
 Histogram of good (valid) operating points over time of day = Histogramm der gültigen Betriebspunkte über den Stunden eines Tages. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Daten für Vergleichssystem 2 – Kaltdampfanlage mit drehzahlregeltem Verdichter und Gegenheizer im ICE-T

Daten zur Kaltdampfanlage in ICE-T (Vergleichssystem 2) wurden seitens der DB für zwei Fahrzeuge (TZ1168 und TZ1177) während einer ca. einjährigen Felddatenerfassung (August 2008 bis August 2009 bzw. September 2009) aufgenommen. Informationen zur Felddatenerfassung können (Meister, 2012) entnommen werden. Abbildung 83 zeigt den Grundriss des für die Untersuchung herangezogenen ICE-T Mittelwagens, der mit 62 Sitzplätzen ausgestattet ist.

Abbildung 83: Untersucher ICE-T Mittelwagen



Untersucher ICE-T Mittelwagen ICE-T, Baureihe 411, 1. Serie (DB-Wagengattung Bpmbz 411.6). Quelle: (Deutsche Bahn AG, Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016, 2017)

Die elektrische Leistungsaufnahme für den Verdichter wurde während des Feldbetriebs über ein Leistungsmessgerät, das in der Zuleitung zwischen dem Drehrichter Kälte und dem Verdichter installiert war, gemessen. Die elektrische Leistungsaufnahme der Lüfter (Zuluft und Kondensator) und der Heizregister wurde über das Einschaltsignal und die jeweilige Nennleistung ermittelt.

In ICE-T wurde für die Besetzung des untersuchten Wagens keine unmittelbare Messung wie ICE 3 vorgenommen. Es ist möglich, mittels eines Modells für die CO₂-Bilanz eines mit Personen besetzten Wagens eine Besetzung abzuleiten. Eingang in ein solches Modell finden der vom Klimaregler erfasste CO₂-Gehalt der Raumluft sowie der von der Regelung eingestellte Außenluftvolumenstrom. (Meister, 2012) spricht in diesem Zusammenhang von einer nicht übermäßig genauen Näherungsmethode. Wegen der eingeschränkten Genauigkeit der Besetzungsdaten werden in der nachfolgenden Klasseneinteilung nicht mehr als drei Besetzungsklassen definiert. Im vorliegenden Projekt wurde das Modell für die CO₂-Bilanz eines mit Personen besetzten Wagens in stationärer Form implementiert und die Besetzung damit abgeleitet.

Gleichung (3) zeigt die Formel zur Ermittlung der Anzahl der Passagiere: \dot{V}_{Zuluft} bezeichnet die Außenluftzufuhr in m³/h, $C_{CO_2,Wagen}$ bezeichnet den CO₂-Gehalt im Wagen in ppm gemäß Sensormessung, $C_{CO_2,außen}$ bezeichnet den CO₂-Gehalt der Umgebungsluft in ppm (400 ppm gemäß (DIN EN 13129:2016-12)) und $\dot{V}_{CO_2,per\ person}$ ist die pro Person emittierte Menge CO₂ in l/h (17,5 l/h gemäß (DIN EN 13129:2016-12)).

$$Anzahl_Passagiere = \frac{\dot{V}_{Zuluft} \cdot (C_{CO_2,Wagen} - C_{CO_2,außen})}{3600 \cdot 10^6} \cdot \frac{3600 \cdot 10^3}{\dot{V}_{CO_2,per\ person}} \quad (3)$$

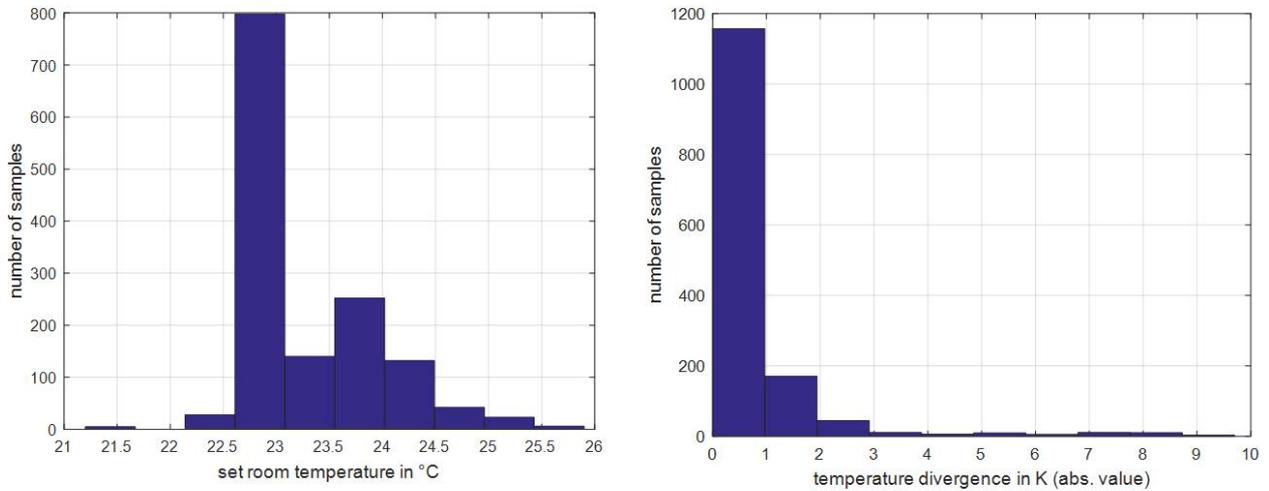
Die Daten wurden von der DB an Liebherr für den Vergleich im Rahmen des UBA-Projektes übermittelt. Abstimmungen zwischen Liebherr und der DB erfolgten, um sicherzustellen, dass das gleiche Verständnis zur Interpretation der Daten besteht. Die Daten zur Leistungsaufnahme wurden seitens der DB bereits aufbereitet. Insbesondere wurden bereits verschiedene Datenquellen zusammengeführt und eine Mittelung der Signalwerte in Stundenschritten vorgenommen. Die Rohdaten waren nur zum Teil verfügbar. Daher konnten die Auswertungen nicht direkt auf die Rohdaten aufsetzen.

Schlussendlich umfasste die Datenbasis folgende Signale: elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters, elektrische Leistungsaufnahme von Heizregistern, elektrische Leistungsaufnahme der Kondensator- und Zuluft-Lüfter, Raumtemperatur Sollwert, Raumtemperatur mittlerer Istwert, Differenz zwischen Raumtemperatur Sollwert und Istwert, Außentemperatur, Drehzahlvorgabe für den Verdichter sowie die abgeleitete Passagierbesetzung.

Für die beiden Wagen der Teilzüge TZ1168 und TZ1177 standen nach einer Filterung auf gültige Werte etwas mehr als 1400 Datensätze (Zeitstempel) für den Vergleich zur Verfügung.

Es stellte sich nun die Frage, welchen Betriebsmodus (Parkbetrieb, Vorheizen/Vorkühlen, Komfortbetrieb) die verbleibenden Daten beschreiben. Wenn sich Passagiere im Wagen befinden, läuft die Anlage im Komfortbetrieb. Die Betrachtung der Solltemperatur sowie der Abweichungen zwischen Soll- und Isttemperatur (Absolutwert) in Abbildung 84 legt nahe, dass der Großteil der Datensätze (Samples) den Komfortbetrieb beschreibt. Nur bei wenigen Samples kommt es zu einer größeren Temperaturabweichung von >2.5 K. Diese Samples wurden verworfen.

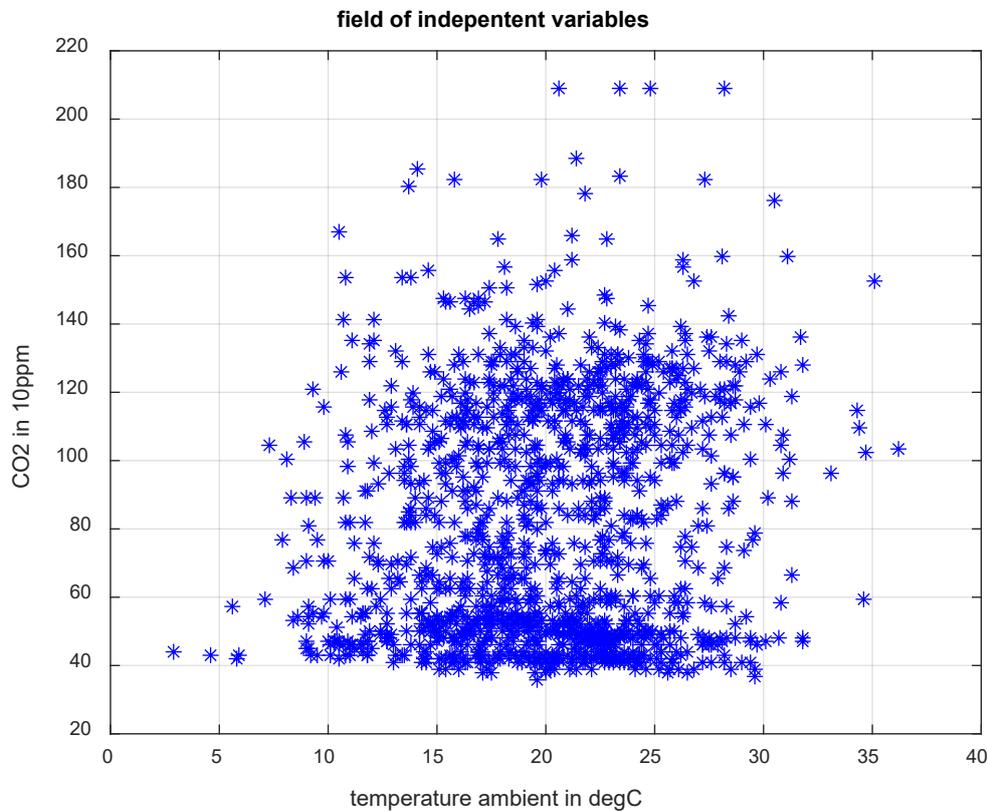
Abbildung 84: Solltemperatur (links) sowie Differenz zwischen Soll- und Isttemperatur für ICE-T (Absolutwert) rechts



Im linken Diagramm ist die Solltemperatur auf der x-Achse aufgetragen. Im rechten Diagramm ist die der Betrag der Differenz zwischen Soll- und Isttemperatur aufgetragen. Die y-Achse zeigt jeweils die Anzahl der Datensätze. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr.

Abbildung 85 veranschaulicht in einer Punktwolke die für den Anlagenvergleich gültigen Datenpunkte.

Abbildung 85: Punktwolke der gültigen Datenpunkte aus ICE-T Daten



field of independent variables = Feld der unabhängigen Variablen; temperature ambient in degC = Temperatur der Umgebungsluft in °C; CO₂ in 10ppm = CO₂-Konzentration in 10 ppm. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Da kaum bzw. keine Daten zu niedrigen Umgebungstemperaturen vorlagen, war keine unmittelbare Aussage zur Leistungsaufnahme im Heizbetrieb möglich. Um dennoch einen Vergleich hinsichtlich des Jahresenergiebedarfs (Kühlen und Heizen) machen zu können, wurden Daten für den Heizbetrieb für ICE-T auf geeignete Weise aus den am ICE 3 erfassten Felddaten für den Heizbetrieb abgeleitet. Diese Vorgehensweise ist gerechtfertigt, weil – wie in Abschnitt 2.3.3.4 beschrieben – zwischen den hier verglichenen Anlagen bzw. zwischen ICE 3 und ICE-T keine technischen Unterschiede in Bezug auf den Heizbetrieb bestehen.

Die ständige Leistungsaufnahme für den Magnetlager-Regler bei der Air-Cycle Anlage in ICE 3 wurde beim ICE 3 auch für den Heizbetrieb berücksichtigt, bei ICE-T aber ausgeklammert, weil es bei ICE-T keine magnetisch aktiv gelagerte Turbomaschine gibt. Dementsprechend ergibt sich für den Leistungs- und Energiebedarf bei der Kaltdampfanlage (ICE-T) ein geringer Vorteil gegenüber der Air-Cycle Anlage (ICE 3).

Daten für Vergleichssystem 3 – Kaltdampfanlage (R134a) mit drehzahlregelbarem Verdichter und gedachtem Bypass für den niedrigen Teillastbereich

Messdaten einer R134a-Anlage mit Bypass waren nicht unmittelbar verfügbar. Die Betrachtung erfolgte daher rein rechnerisch basierend auf Messdaten aus ICE-T. Konkret wurde die Heizleistung für das Gegenheizen nicht zum Leistungsbedarf des Verdichters addiert.

Es ist anzumerken, dass ein kältemittelseitiger Bypass in einer realen Anlage zu einem veränderten Betriebspunkt des Verdichters führt, wodurch sich eine etwas andere elektrische Leistungsaufnahme für den Verdichter ergibt als in der vorliegenden Betrachtung vereinfachend angenommen wurde. Der Aufwand, die Veränderung des Betriebspunktes in die verfügbaren Daten einzubeziehen, wäre unverhältnismäßig gewesen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Vereinfachung auf eine brauchbare Näherung im Rahmen der allgemeinen Genauigkeit führt.

Daten für Vergleichssystem 6 – neuartige Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess

Für die neuartige Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess stehen aktuell keine Messdaten zur Verfügung. Für den Vergleich wurde daher auf Ergebnisse numerischer Simulation zurückgegriffen. Dazu wurde die Architektur in der Liebherr-internen Simulationssoftware EOLE abgebildet. Die Simulationssoftware hat sich in jahrelangem Einsatz bei Liebherr in diversen Forschungs- und Kundenprojekten bewährt. Das Modell für die Turbomaschine basiert auf Kennlinienfeldern. Ebenso wurden für diverse Wärmetauscher Kennlinienfelder zugrunde gelegt. Modelleingänge waren Temperatur, Feuchtigkeit und Massenstrom der Außenluft (Frischlufte), die Temperatur und Feuchtigkeit der Umluft sowie die Temperatur und der Massenstrom der Zuluft. Modellausgang war die elektrische Leistungsaufnahme der Turbomaschine. Die elektrische Leistungsaufnahme weiterer Komponenten (z.B. HLK-Regler) wurde entsprechend addiert.

Für den Vergleich der neuen Air-Cycle Anlage mit den anderen HLK-Anlagen war es erforderlich, für jede Klasse, gemäß der im folgenden Abschnitt 2.3.3.6 beschriebenen Klasseneinteilung, einen Wert für die elektrische Leistungsaufnahme zu ermitteln. Im ersten Schritt wurde dazu mit der Simulationssoftware für einen Betriebspunkt pro Klasse die elektrische Leistungsaufnahme berechnet. Dieser Betriebspunkt pro Klasse wurde wie folgt identifiziert: Für den ICE 3 wurden die oben genannten EingangsvARIABLEN in das Modell sowie die luftseitige Heizleistung bzw. Kälteleistung \dot{Q}_0 gemäß Abschnitt 2.3.2.7, basierend auf Messdaten zu jedem Zeitstempel der entsprechenden Messdaten, ermittelt. Im zweiten Schritt wurde die Klasseneinteilung, im Wesentlichen wie in Abschnitt 2.3.3.6 beschrieben, vorgenommen. Für jede Klasse wurde dann der Mittelwert der luftseitigen Heizleistungen und Kälteleistungen der der Klasse zugeordneten Betriebspunkte berechnet. Aus einer Klasse wurde für die weitere Berechnung jener Betriebspunkt herangezogen, dessen Heizleistung bzw. Kälteleistung

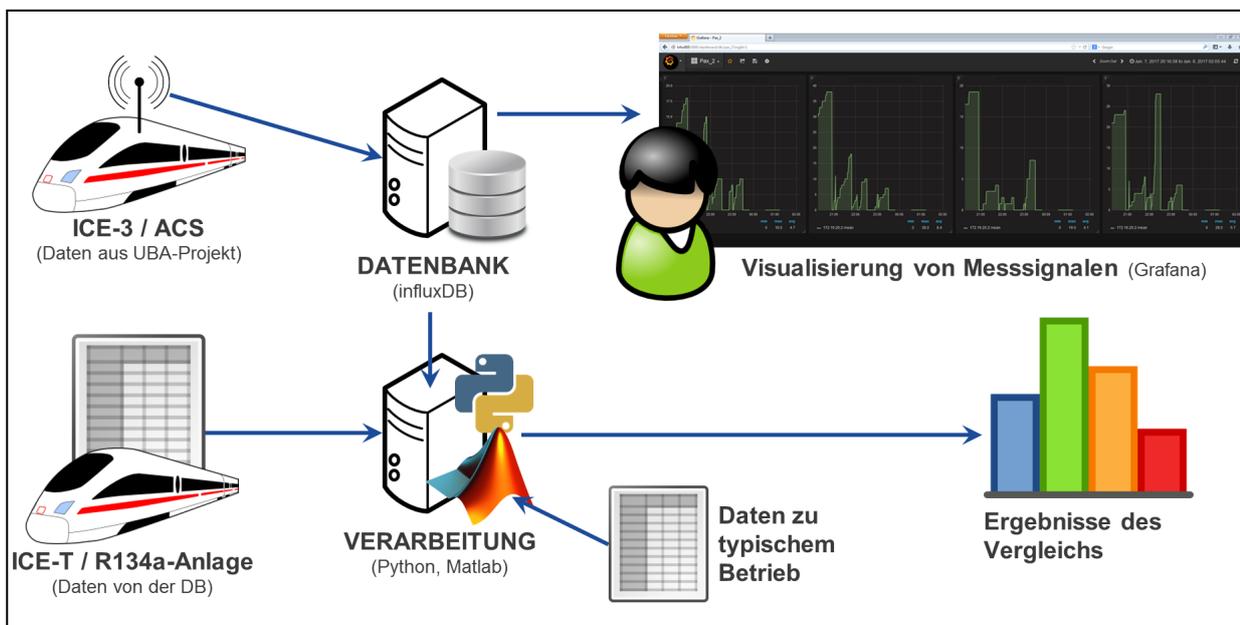
vom Mittelwert der Heizleistung bzw. Kälteleistung die geringste Abweichung aufwies. Mit dem Betriebspunkt waren auch sämtliche Eingangsvariablen in das EOLE-Modell gegeben.

2.3.3.6 Methodik des Vergleichs

Grundsätzliche Vorgehensweise und Systemgrenzen

Abbildung 86 beschreibt schematisch den Datenfluss im Rahmen des Anlagenvergleichs auf der Basis von Felddaten (Vergleichssystem 1 und 2): Im Projekt wurden spezifisch entwickelte Auswertungs- und Berechnungsprogramme verwendet, die insbesondere in die Softwareumgebung Matlab von TheMathWorks ausprogrammiert wurden. Diese Auswertungs- und Berechnungsprogramme greifen über die aufgesetzte Datenbank influxDB auf Felddaten des ICE 3 und außerdem auf Dateien von der DB mit Felddaten des ICE-T zu. Basierend auf zusätzlichen Informationen und Daten zum typischen Betrieb können schließlich die Ergebnisse des Vergleichs generiert werden. Die Verarbeitung der ermittelten Leistungsaufnahmen für die Vergleichssysteme 3 und 6 erfolgte auf sehr ähnliche Weise.

Abbildung 86: Schematische Darstellung zum Anlagenvergleich in Bezug auf den Leistungs- und Energiebedarf der Air-Cycle Anlage (ACS) des ICE 3 und der R134a-Kaltdampfanlage des ICE-T



Schematische Darstellung zum Anlagenvergleich in Bezug auf den Leistungs- und Energiebedarf der Air-Cycle Anlage (ACS) des ICE 3 und der R134a- Kaltdampfanlage des ICE-T. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Zu den Systemgrenzen: Die hier angestellten Betrachtungen zum Leistungs- und Energiebedarf beziehen sich auf die HLK-Anlage inklusive Verdichter bzw. Turbomaschine, Heizregister, Zuluft-Lüfter, Magnetventile, Stellmotoren für Klappenantriebe und Regler. Der Leistungs- und Energiebedarf der Fortluft-Lüfter wurde nicht berücksichtigt, weil diese Lüfter nicht in den HLK-Anlagen verbaut sind und technikunabhängig, d.h. sowohl bei ICE-T als auch bei ICE 3, zum Einsatz kommen. Da die Technologie aber einen Einfluss auf den sekundären Energiebedarf infolge des Impulswiderstandes (abhängig von angesaugter Luftmenge) hat, wurde der sekundäre Energiebedarf in die Betrachtung eingeschlossen.

Der Vergleich bezieht sich auf einen Wagen. Für den ICE 3 wurde der Wagen TW7 herangezogen, weil dieser Wagen mit der umfangreichsten Messtechnik ausgestattet war, insbesondere wurde im TW7 die Sensorik zur Passagierzählung verbaut. Zudem ist der TW7 für die Auslegung des HLK-Systems für

den gesamten Zug entscheidend. Da die gewählten Wagen von ICE 3 und ICE-T eine unterschiedliche Sitzplatzanzahl haben, wurde – wie von (Meister, 2012) vorgeschlagen und durchgeführt – eine Normierung der Leistungs- und Energiebedarfs auf einen Sitzplatz durchgeführt, um einen Vergleich zu ermöglichen. (Meister, 2012) wies darauf hin, dass auch andere Normierungen denkbar wären, z.B. in Bezug auf die Auslegungskälteleistung. Das Verhältnis dieser Größen entspricht laut (Meister, 2012) aber „nahezu exakt dem Verhältnis der Sitzplatzanzahl, sodass sich hier keine unterschiedlichen Tendenzen beim Vergleich der Klimaanlage beider Baureihen ergeben hätten“.

Die Datenverarbeitung für den Vergleich erfolgte in folgenden Schritten, die im Anschluss näher beschrieben werden.

Der grundlegende Ansatz wurde in dieser Form im Wesentlichen von (Meister, 2012) vorgeschlagen.

- ▶ Schritt 1: Klasseneinteilung der elektrischen Leistungsaufnahme
→ Modell der elektrischen Leistungsaufnahmen verschiedener HLK-Systeme
- ▶ Schritt 2: Gewichtung und Summierung der Klassen
→ mittlere elektrische Leistungsaufnahme der HLK-Systeme
- ▶ Schritt 3: Skalierung auf typische Anzahl von Betriebsstunden/Jahr (6570 h/Jahr)
→ elektrischer Energiebedarf pro Jahr der HLK-Systeme

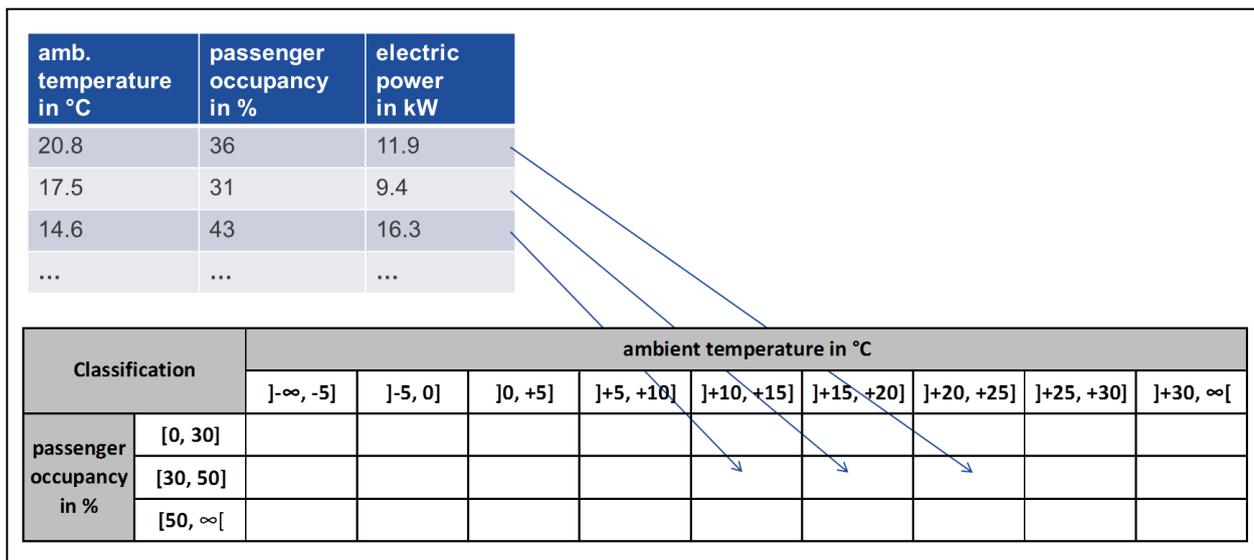
Wegen der eingeschränkten Verfügbarkeit von Daten vom ICE-T konnten Einflussfaktoren wie Sonneneinstrahlung und Fahrgeschwindigkeit im Anlagenmodell (Klasseneinteilung) nicht explizit als Modelleingangsvariablen berücksichtigt werden. Daher, aber auch wegen allgemeiner Messunsicherheiten, ist von gewissen Unsicherheiten in den Ergebnissen auszugehen. Da die relevanten Einflussfaktoren nicht unmittelbar quantifizierbar sind, ist eine quantitative Angabe der (Mess-) Unsicherheit nicht möglich. (Meister, 2012) weist auf diesen Aspekt ebenfalls hin.

Modellierung über Klasseneinteilung der elektrischen Leistungsaufnahme (Schritt 1)

Wie bereits in (Meister, 2012) bzw. wie seitens der DB in diesem Projekt vorgeschlagen wurde, wurde eine zweidimensionale Klasseneinteilung der elektrischen Leistungsaufnahme vorgenommen, d.h. die Leistungsaufnahme wurde über zwei unabhängige Variablen – Außentemperatur und Passagierbesetzung – ausgedrückt.

Abbildung 87 zeigt das Schema der Klasseneinteilung der punktwisen Messdaten. Aus Sicht von Lieberr und der DB werden hier wesentliche Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Bahn-HLK-Systems und damit auf dessen elektrische Leistungsaufnahme nicht explizit berücksichtigt. Dazu zählen die Sonneneinstrahlung (direkte und diffuse Strahlung sowie Sonnenstand in Relation zur Wagenausrichtung) und die Fahrgeschwindigkeit des Zuges (Einfluss auf die Wärmeströmung (Konvektion) an der Wagenhülle), vergleiche Abschnitt 2.3.3.2. Wie in Abschnitt 2.3.3.5 dargelegt ist, stehen aber Daten zu zusätzlichen Einflussfaktoren für den Vergleich nicht zur Verfügung. Die Methodik der Klasseneinteilung entspricht damit dem hier Bestmöglichen.

Abbildung 87: Schematische Darstellung der Klasseneinteilung der punktwisen Messdaten



ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %; electric power in kW = elektrischer Leistungsbedarf in kW; Classification = Klasseneinteilung. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 88, Abbildung 89 und Abbildung 90 zeigen Ergebnisse der Klasseneinteilung für den Kühlbetrieb bzw. Heizbetrieb für ICE 3 bzw. ICE-T in Form von Histogrammen für die einzelnen Klassen. Für den Heizbetrieb für ICE-T sind die Histogramme nicht dargestellt, da sie im Wesentlichen denen des ICE 3 entsprechen. Die x-Achse der Histogramme repräsentiert die elektrische Leistung in kW, die y-Achse die Anzahl an Datenpunkten. Es ist unmittelbar erkennbar, dass die Werte der elektrischen Leistungsaufnahme innerhalb einer Klasse einen sehr weiten Bereich umfassen.

Ähnliche Auswertungen im Rahmen des vorliegenden Projektes auf Seiten der DB zeigten ebenfalls große Standardabweichungen innerhalb einzelner Klassen. Ein wesentlicher Grund dafür liegt darin, dass nur zwei und nicht alle Einflussfaktoren auf die elektrische Leistungsaufnahme in der Klasseneinteilung berücksichtigt werden können. (Vergleiche hierzu Abschnitt 2.3.3.5.) Dadurch werden beispielsweise ein Datenpunkt mit einer Temperatur von 24°C, 40% Passagierbesetzung und keiner solaren Strahlung (Nachtfahrt) und ein Datenpunkt mit 24°C, 40% Passagierbesetzung und sehr hoher solarer Strahlung durch die Fenster (Tagfahrt mit entsprechender Ausrichtung des Wagens in Relation zur Sonne) in derselben Klasse abgebildet. Die beiden Datenpunkte gehen aber mit deutlich unterschiedlichen Kühlleistungen und damit elektrischen Leistungsaufnahmen einher, wodurch sich eine große Bandbreite in der Klasse ergibt.

Die drei Abbildungen zeigen auch die Anzahl der Punkte je Klasse. Mit abnehmenden Außentemperaturen nimmt die Anzahl der Kühlpunkte ab, während umgekehrt die Anzahl der Heizpunkte zunimmt. Es ist auch erkennbar, dass die Anzahl an Datenpunkten für ICE-T deutlich geringer ist als für ICE 3. Die Anzahl von Datenpunkten innerhalb einer Klasse hängt mit der Breite einer Klasse zusammen.

Nach der Einteilung der Messwerte in die Klassen erfolgt eine Aggregation der Werte innerhalb der einzelnen Klassen. Konkret wird für jede Klasse ein geeigneter Mittelwert über die der jeweiligen Klasse zugeordneten elektrischen Leistungsaufnahme gebildet, sodass schließlich jede Klasse mit einem Wert assoziiert ist. Für die Mittelwertbildung kann unter anderem der Mean (arithmetisches Mittel) oder der Median (das 0,5 Quantil) herangezogen werden. Auch eine Mischform aus Mean und Median ist denkbar. Der Median zeichnet sich durch hohe Robustheit im Falle von Ausreißern in den zugrundeliegenden Daten aus, der gemeinhin häufig angewendete Mean wird durch Ausreißer stärker

verzerrt. Die angewandte Mittelwertbildung hat grundsätzlich einen Einfluss auf das Endergebnis des Vergleichs. Es wurden Berechnungen für beide Varianten ausgeführt.

Schlussendlich wurde befunden, dass der arithmetische Mittelwert (Mean) im vorliegenden Fall ein geeigneter Mittelwert ist. Für die Verwendung des Mean kann argumentiert werden, dass die Daten innerhalb einer Zelle keine Ausreißer im eigentlichen Sinn enthalten (sollten). Die breite Streuung der Daten liegt in nicht unmittelbar berücksichtigten Einflussfaktoren wie der Sonneneinstrahlung. Echte Ausreißer bzw. offensichtlich falsche Werte wurden mit großer Sorgfalt vor der Mittelwertbildung verworfen. Der Mean wurde auch bei (Meister, 2012) verwendet.

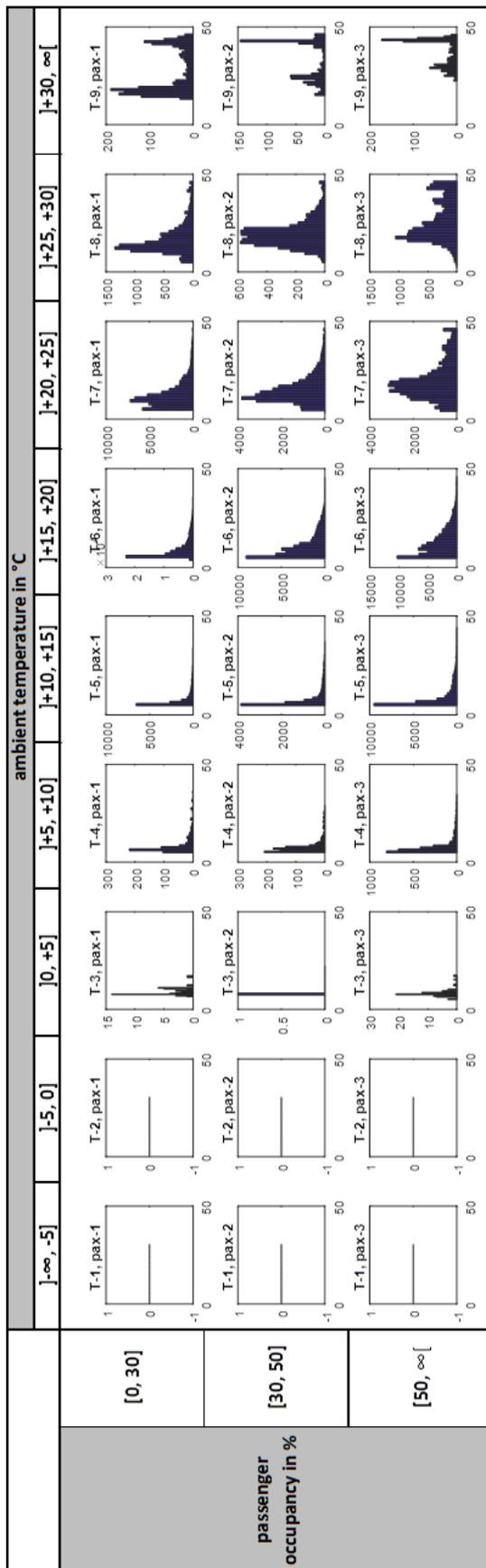
Weitere Parameter in der Klasseneinteilung beziehen sich auf die Klassendefinitionen der einzelnen Variablen an sich: Grenzen der Klassen, Anzahl der Klassen, Breite der Klassen (äquidistant oder unterschiedlich). Die gewählte Breite der einzelnen Klassen wirkt sich auf die Auflösung und auf die Anzahl der Datenpunkte pro Klasse aus. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Klasseneinteilungen betrachtet.

Im Folgenden wird für die Außentemperatur in °C eine Klasseneinteilung mit den Klassengrenzen {kleiner -5, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, größer 30} verwendet. Damit ergeben sich 9 Klassen. Für die Passagierbesetzung in % wurden 3 unterschiedlich breiten Klassen mit den Klassengrenzen bei {0, 30, 50, größer 50} verwendet, vergleiche Abbildung 87.

Die Klasseneinteilung für die Passagierbesetzung erfolgte in Abstimmung mit der DB analog zu (Meister, 2012). Die Klassengrenzen für die Außentemperatur in °C wurde bei (Meister, 2012) mit {15, 20, 25, größer 25} festgelegt, es gab also nur 3 Klassen. Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Klasseneinteilung für die Außentemperatur zwischen der Studie von Meister und der vorliegenden Studie ist, dass bei Meister die niedrigste betrachtete Temperatur 15°C war. Der starke Teillastbereich und darunter der Heizbetrieb wurden bei Meister daher nicht mitbetrachtet.

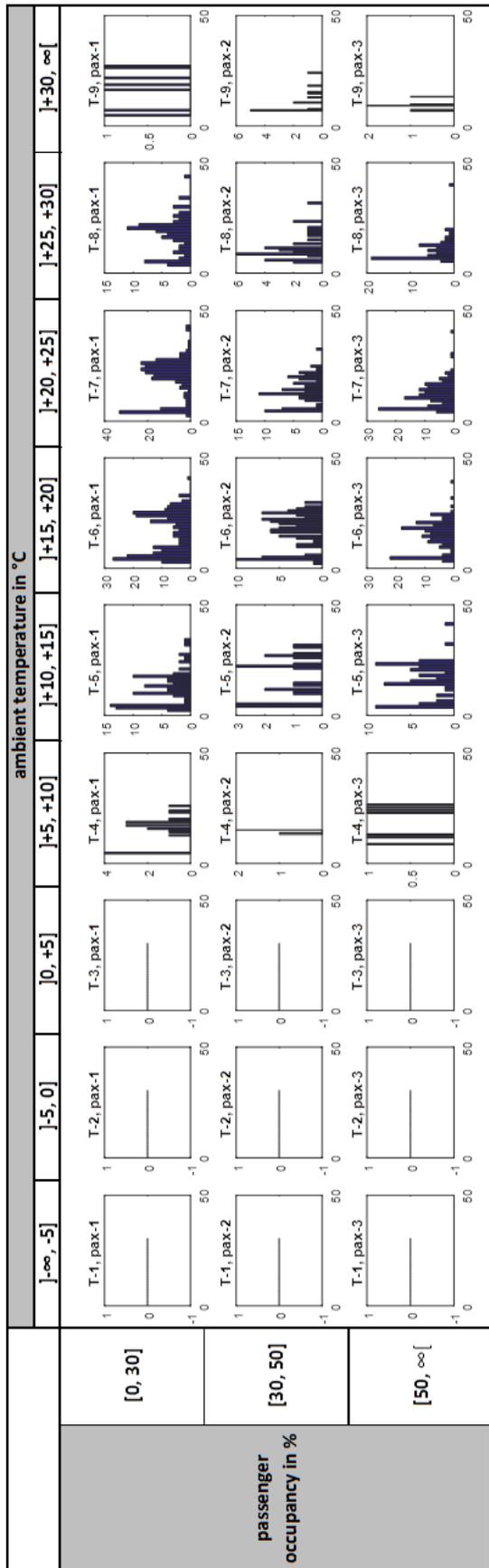
In Abbildung 91 sind die Anzahl der Datenpunkte, der Mittelwert (Mean) sowie die Standardabweichung je Klasse für den Kühlbetrieb von ICE 3 und ICE-T zusammengefasst. Analog zeigt Abbildung 92 Anzahl der Datenpunkte, Mittelwert (Mean) sowie die Standardabweichung je Klasse für den Heizbetrieb von ICE 3. Die Mittelwerte (Mean) werden in der Auswertung weiterverwendet.

Abbildung 88: Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3, Kühlen



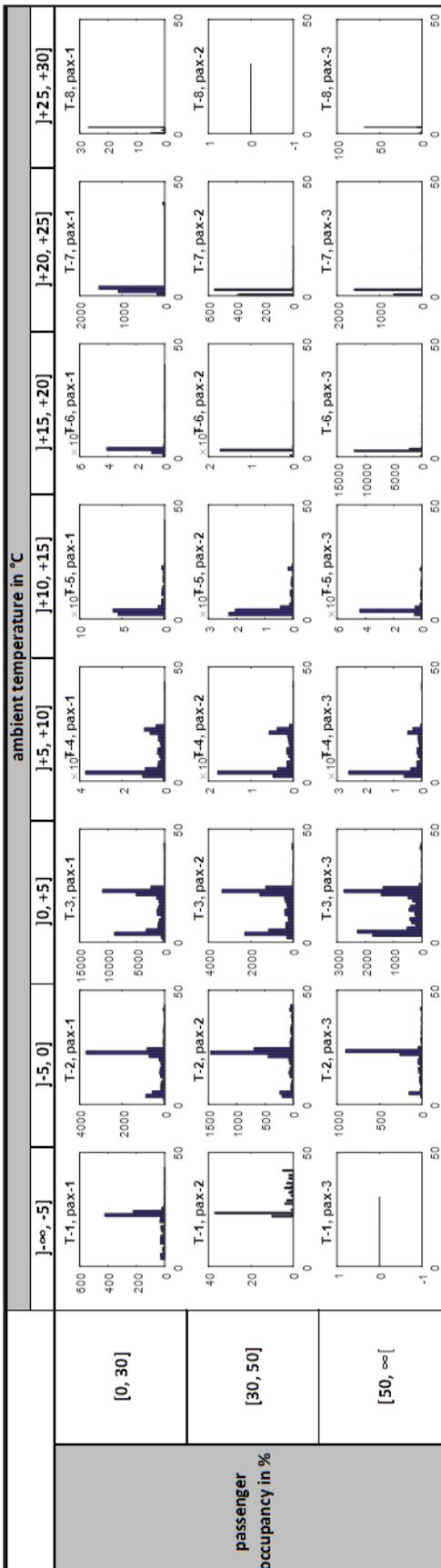
Klasseneinteilung ICE 3, Kühlen: Die Histogramme zeigen elektrische Leistungen in kW für verschiedene einer Klasse zugeordneten Messpunkte.
 ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 89: Klasseneinteilung der Messwerte für ICE-T mit Gegenheizten, Kühlen



Klasseneinteilung ICE-T mit Gegenheizten, Kühlen Die Histogramme zeigen elektrische Leistungen in kW für verschiedene einer Klasse zugeordneten Messpunkte. ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 90: Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3, Heizen



Klasseneinteilung ICE 3, Heizen: Die Histogramme zeigen elektrische Leistungen in kW für verschiedene einer Klasse zugeordnete Messpunkte.
 ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 91: Ergebnisse der Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3 und ICE-T für Kühlbetrieb

ICE 3

Samples		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0	0	49	645	13732	65808	51951	9543	1586
	[30, 50]	0	0	1	889	9277	41227	28586	5904	618
	[50, ∞[	0	0	84	2690	24162	65206	37787	11216	948

Mean		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.00	0.00	9.30	8.87	7.64	9.19	12.40	16.59	26.04
	[30, 50]	0.00	0.00	7.83	7.91	8.28	10.76	14.81	19.41	32.35
	[50, ∞[	0.00	0.00	8.30	7.95	8.93	12.76	19.43	26.08	36.80

Standarddeviation		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.00	0.00	2.18	5.13	4.43	5.15	6.53	7.66	11.02
	[30, 50]	0.00	0.00	0.00	3.83	5.28	6.00	6.78	6.57	10.06
	[50, ∞[	0.00	0.00	2.04	4.21	5.59	6.96	9.24	10.11	7.05

ICE-T

Samples		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0	0	0	20	98	227	236	77	7
	[30, 50]	0	0	0	4	23	98	85	33	13
	[50, ∞[	0	0	0	7	63	145	141	62	7

Mean		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.00	0.00	0.00	15.63	11.90	15.54	19.22	17.60	17.32
	[30, 50]	0.00	0.00	0.00	14.40	16.62	16.60	13.75	12.33	11.53
	[50, ∞[	0.00	0.00	0.00	19.05	15.87	14.79	11.82	10.60	9.36

Standarddeviation		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.00	0.00	0.00	6.52	7.57	9.29	9.10	8.36	8.83
	[30, 50]	0.00	0.00	0.00	1.02	9.65	7.81	6.19	6.24	5.48
	[50, ∞[	0.00	0.00	0.00	7.66	8.02	6.88	5.74	5.39	2.14

Samples = Anzahl der Datensätze; Mean = arithmetischer Mittelwert; Standarddeviation = Standardabweichung; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 92: Ergebnisse der Klasseneinteilung der Messwerte für ICE 3 für Heizbetrieb

Samples		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	984	9130	42947	104559	152058	53834	2863	38	0
	[30, 50]	77	4037	13559	48785	57556	18496	966	0	0
	[50, ∞[	0	1768	13758	58085	61148	14721	2273	84	0

Mean		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	20.58	18.61	15.02	9.91	5.19	3.32	3.22	2.14	0.00
	[30, 50]	27.34	21.12	15.61	10.18	5.06	2.97	1.90	0.00	0.00
	[50, ∞[	(27.34)	20.34	14.67	8.70	4.33	2.99	2.06	2.54	0.00

Standarddeviation		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	6.22	8.34	8.73	8.03	4.99	3.01	4.42	1.08	0.00
	[30, 50]	6.48	8.13	8.69	8.11	5.00	1.46	2.12	0.00	0.00
	[50, ∞[	0.00	6.98	8.71	7.57	3.94	1.29	1.55	0.74	0.00

Samples = Anzahl der Datensätze; Mean = arithmetischer Mittelwert; Standarddeviation = Standardabweichung; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Modellierung über künstliche neuronale Netze

Als Alternative zu einer Klasseneinteilung wie sie in Schritt 1 beschrieben ist, wurde auf Basis der Daten von ICE-T mit einem Modell in Form eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN) experimentiert.

KNN zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, komplexe, nichtlineare und multivariate Zusammenhänge durch Training mit Eingangs-Ausgangs-Datensätzen zu „erlernen“. KNN können als Blackbox-Modelle verwendet werden, ohne dass man analytische Kenntnisse über das System benötigt.

KNN mit unterschiedlicher Neuronenanzahl wurden mit Temperaturwerten und Werten der Passagierbesetzung für ICE-T als Eingang und der elektrischen Leistungsaufnahme als Ausgang trainiert. In der anschließenden Validierung anhand eines für das Training nicht verwendeten Validierungsdatensatzes aus den ICE-T Daten zeigten sich gravierende Abweichungen zwischen dem Modell-Ausgang und den entsprechenden Messwerten. Wegen der unbefriedigenden Validierungsergebnisse wurde dieser Ansatz nicht mehr weiter verfolgt.

Es ist stark zu vermuten, dass die unbefriedigenden Validierungsergebnisse des KNN-Modells, zumindest zu einem wesentlichen Teil, darauf zurückzuführen sind, dass wesentliche Einflussfaktoren für die elektrische Leistungsaufnahme über die beiden Eingangsvariablen Temperatur und Passagierbesetzung nicht ausgedrückt werden können. Die Trainingsdaten enthalten eine Varianz, die über die beiden Eingangsvariablen nicht ausreichend beschrieben wird. Dieses Problem tritt aber auch bei der „Modellierungsstrategie“ über die Klassifizierung auf. In diesem Kontext sei zu den weiteren Einflussfaktoren auf Abschnitt 2.3.3.2 hingewiesen.

Auswertung der Modelle basierend auf der Klasseneinteilung mit Gewichtungsmatrizen (Schritt 2)

Nachdem in Schritt 1 für die verschiedenen HLK-Systeme Modelle zum elektrischen Leistungsbedarf in Abhängigkeit von wichtigen betrieblichen Einflussfaktoren (Außentemperatur und Passagierbesetzung) in Form einer Klassifizierung entwickelt wurden (Matrix **Leistungsbedarf**), erfolgt in Schritt 2 eine Auswertung der Modelle. Die Gewichtung beschreibt, wie häufig eine Klasse und der ihr zugeordnete Wert des elektrischen Leistungsbedarfs auftritt.

Für die Gewichtung werden zwei Matrizen abgeleitet und herangezogen:

- a) Matrix für Kühl-/Heizanteil (**Betriebsanteil**_{Kühlen} bzw. **Betriebsanteil**_{Heizen})
- b) Matrix **Klassenhäufigkeit** für Verteilung der Modelleingangsparameter Temperatur und Passagierbesetzung

Die Matrix **Klassenhäufigkeit** für die Verteilung der Modelleingangsparameter Temperatur und Passagierbesetzung wurde einerseits unter Verwendung statistischer Daten für drei Referenzstädte in Deutschland und andererseits unter Verwendung von Daten aus der vorliegenden Felddatenerfassung ermittelt. In den folgenden Abschnitten werden die Matrizen bzw. deren Ermittlung im Detail beschrieben.

Der einer Klasse zugeordnete Leistungswert aus der Klasseneinteilung wird anhand beider Gewichtungsmatrizen gewichtet. Anders ausgedrückt erfolgt eine elementweise Multiplikation des Leistungswertes mit den zugeordneten Gewichtungsfaktoren aus der Gewichtungsmatrix für den Kühl- und Heizanteil und der Gewichtungsmatrix für die Verteilung der Modelleingangsparameter. Anschließend werden die so gewichteten Leistungswerte der einzelnen Klassen summiert, es ergibt sich ein Skalar. Das Ergebnis entspricht der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme des HLK-Systems für den Heizbetrieb über ein Jahr (bei Verwendung der Gewichtungsmatrix **Betriebsanteil**_{Heizen} bzw. für den Kühlbetrieb bei Verwendung der Gewichtungsmatrix **Betriebsanteil**_{Kühlen}). Die Summe aus mittlerer elektrischer Leistungsaufnahme für Heizen bzw. Kühlen ergibt den gewichteten mittleren Gesamtleistungsbedarf. Der Lüftungsbetrieb wird nicht separat betrachtet, sondern dem Heizbetrieb zugeschlagen. Die Turbomaschine läuft im Lüftungsbetrieb nicht.

Die nachstehende Gleichung (4) beschreibt die Berechnung des mittleren elektrischen Leistungsbedarfs $\tilde{P}_{\text{el, Kühlen, System } s}$ eines konkreten HLK-Systems s für den Kühlbetrieb. Die Berechnung für den Heizbetrieb erfolgt analog. In der Gleichung steht ‚TK‘ für Temperaturklasse und ‚BK‘ für Besetzungs-klasse, wobei über die Indizes i bzw. j die Klassen durchlaufen werden.

$$\begin{aligned} & \tilde{P}_{\text{el, Kühlen, System } s} \\ &= \sum_{\text{alle TK}} \sum_{\text{alle BK}} \left(\text{Leistungsbedarf}_{\text{Kühlen, System } s, \text{TK } i, \text{BK } j} \right. \\ & \quad \cdot \text{Betriebsanteil}_{\text{Kühlen-TK } i, \text{BK } j} \cdot \text{Klassenhäufigkeit}_{\text{TK } i, \text{BK } j} \left. \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Matrix für die Betriebsmodi Kühlen und Heizen

Für die Betriebsmodi Kühlen und Heizen wurde je ein Modell (eine Klasseneinteilung) aus den Messdaten abgeleitet wie in Abschnitt 2.3.3.6 gezeigt. Es stellt sich nun die Frage, wo – in Abhängigkeit von den Modelleingangsvariablen Außentemperatur und Passagierbesetzung – welches Modell gilt. Abbildung 93 zeigt exemplarisch die Gewichtungsmatrix für den Kühlanteil. Es ist unmittelbar zu erkennen, dass bei sehr hohen Außentemperaturen ausschließlich Kühlbedarf und damit kein Heizbedarf besteht, während die Situation bei sehr niedrigen Außentemperaturen umgekehrt ist. Für Klassen moderater Temperaturen ergibt sich in Abhängigkeit weiterer und in der Klasseneinteilung nicht berücksichtigter Einflussfaktoren (beispielsweise die Sonneneinstrahlung) ein Kühlbedarf oder ein Heizbedarf. Im in der Abbildung 93 dargestellten Beispiel liegt etwa in der Temperaturklasse]+15, +20] bei mittlerer Besetzung der Kühlbedarf bei ca. 70% der Zeit im Komfortbetrieb. Die Differenz auf 100% entspricht dem prozentualen zeitlichen Anteil für den Heizbetrieb.

Abbildung 93: Gewichtungsmatrix für den Kühlanteil

Cooling share		ambient temperature in °C								
		] -∞, -5]	] -5, 0]	] 0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	8.4%	55.5%	94.3%	99.9%	100.0%
	[30, 50]	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	14.0%	69.8%	95.9%	99.9%	100.0%
	[50, ∞[	0.0%	0.0%	0.7%	4.4%	28.8%	82.9%	93.9%	99.3%	100.0%

Cooling share = Kühlanteil; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die Gewichtungsmatrizen für den Heiz- bzw. Kühlanteil wurden folgendermaßen abgeleitet: Im Rahmen der Felddatenerfassung bei ICE 3 wurden Heiz- und Kühlbetrieb erfasst. Die Punkte für die beiden Betriebsarten wurden separat einer Klasseneinteilung unterzogen. Für jede Klasse ergab sich damit eine Anzahl an Messpunkten des Kühlbetriebs bzw. des Heizbetriebs. Die Summe der Messpunkte einer Klasse (Heizbetrieb plus Kühlbetrieb) entspricht 100%. Die Anteile für Heizen bzw. Kühlen konnten nun leicht berechnet und in Gewichtungsmatrizen für die beiden Betriebsfälle zusammengefasst werden.

Die beschriebene Vorgehensweise basiert auf der Annahme, dass Fehler in der Messtechnik im Mittel von der Jahreszeit unabhängig sind, es also über die Dauer des Messprogrammes zu keinen Verzerrungen zwischen Heiz- und Kühlbetrieb gekommen ist. Um diese Annahme zu untermauern wurde eine Methodik zum monatsweisen Auffüllen fehlerhafter Messpunkte entwickelt und angewendet. Das Ergebnis über diese aufgefüllten Messpunkte wich nur unwesentlich von den direkt ermittelten Ergebnissen ab, sodass die Annahme bestätigt wurde.

Für ICE-T gibt es keine ausreichenden Informationen zum Heizbetrieb. Es wurden daher Informationen aus der ICE 3 Felddatenerfassung auf ICE-T übertragen. Damit wurden auch die Gewichtungsmatrizen für den Kühl- bzw. Heizanteil übertragen. Da es keine den Heizbetrieb betreffenden technischen Unterschiede zwischen den beiden HLK-Systemen gibt, ist dieser Ansatz brauchbar, um überhaupt Vergleichsaussagen für moderate und niedrige Temperaturen treffen zu können.

(Meister, 2012) verwendet derartige Matrizen für einen Kühl-/Heizanteil nicht. Die untere Temperaturgrenze in (Meister, 2012) lag bei 15°C. Tatsächlich legt Meister den Fokus seiner Untersuchung lediglich auf den Kühlbetrieb. Solange der Kühlanteil bei nahe 100% liegt, es also nicht zu einer Überlappung aus Kühlbetrieb und Heizbetrieb kommt, kann tatsächlich auf die explizite Betrachtung des Kühlanteils verzichtet werden. Wenn die Auswertung aber auch niedrigere Temperaturen (von z.B. 10°C bis 15°C) einschließen soll, bei welchen sehr sowohl neben dem Kühlbetrieb mit einer nicht vernachlässigbaren Wahrscheinlichkeit Heizbetrieb auftritt, ist die explizite Betrachtung des Kühlanteils bzw. Heizanteils notwendig.

Gerade bei niedrigeren Temperaturen von z.B. 10°C bis 15°C (also bei starkem Teillastbetrieb) zeigt sich der Vorteil der ACS-Anlage mit ihrem guten Teillastverhalten. Für eine faire Betrachtung sollten also niedrigere Temperaturen einbezogen werden. Darüber hinaus ist die Betrachtung niedrigerer Temperaturen für den Heizbetrieb erforderlich.

Matrix für Verteilung der Modelleingangsparameter Temperatur und Passagierbesetzung aus statistischen Daten

Für die Gewichtung der Klassen bedarf es der Kenntnis der Verteilung der Temperatur sowie der Passagierbesetzung.

Abbildung 94: Referenzstädte für meteorologische Daten [Google Maps]



Referenzstädte für meteorologische Daten, Quelle: Google Maps

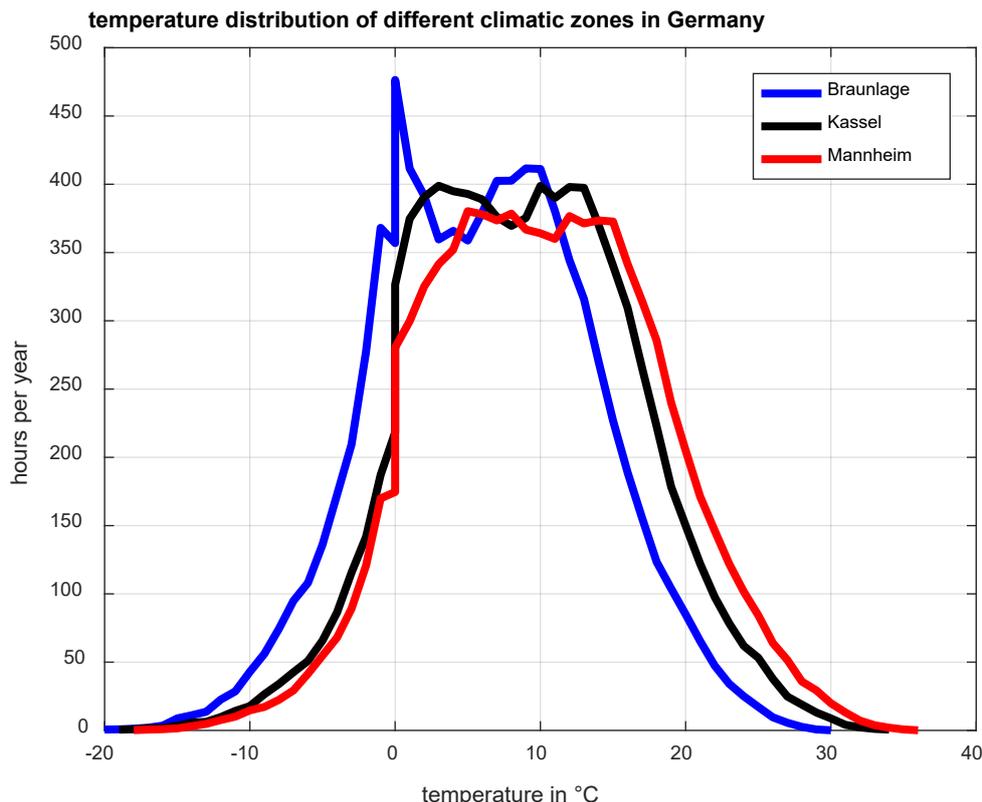
Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur:

Die Häufigkeitsverteilung der Außentemperaturen wurde für drei Referenzstädte abgeleitet, wobei für die vorliegende Studie seitens der DB Braunlage (kühl), Kassel (moderat) und Mannheim (warm) vorgeschlagen wurden. Abbildung 94 zeigt die Referenzstädte auf einer Karte aus Google Maps.

Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur – Daten aus DIN 4710: 2003-01

Zur Ableitung der Matrix für Verteilung der Modelleingangsparameter wurde in (Meister, 2012) auf meteorologische Daten aus der (DIN 4710:2003-01) zurückgegriffen. Abbildung 95 zeigt die Temperaturverteilung aus der DIN 4710 für die drei ausgewählten Referenzstädte Braunlage (kühl), Kassel (moderat) und Mannheim (warm).

Abbildung 95: Temperaturverteilungen drei verschiedener Klimazonen in Deutschland im Vergleich (Daten aus DIN 4710, Betrachtung 24-Stunden-Tage)



temperature distribution of different climate zones in Germany = Temperaturverteilung verschiedener Klimazonen in Deutschland; temperature in °C = Temperatur in °C; hours per year = Stunden pro Jahr.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

In den verwendeten Daten der DIN 4710 wird in 1 K-Schritten (z.B. für Kassel von -19°C bis 34°C) die Anzahl an Stunden angegeben, für die die entsprechende Temperatur in einem durchschnittlichen Jahr auftritt. Die Stundensumme entspricht einem vollen Jahr (365*24 h). Damit werden Temperaturen für verschiedene Tag- und Nachtzeiten gleichwertig gewichtet abgebildet. Es ist mit den Daten der Norm nicht möglich, Temperaturen den Tageszeiten zuzuordnen.

Im Vergleich im Rahmen dieses Projektes werden verschiedene HLK-Systeme im Komfortbetrieb (und damit vorwiegend im Passagierbetrieb) betrachtet. Grund dafür ist die eingeschränkte Datenverfügbarkeit wie in Abschnitt 2.3.3.5. beschrieben.

In der Praxis findet in einem Flottenverband eine größere Anzahl von Zugfahrten am Tag als in der Nacht statt, sodass Komfortbetrieb in den Nachtstunden von z.B. 00:00 Uhr bis 04:00 Uhr sehr eingeschränkt auftritt. Eine gleiche Gewichtung von Tag und Nacht hinsichtlich der Temperaturverteilung gibt die Wirklichkeit der Zugbetriebszeiten daher nur grob wieder. Die Verwendung der Daten aus der

DIN 4710 führt zu einer gewissen Verzerrung zu niedrigeren Temperaturen: Tendenziell kühlere Nachttemperaturen ziehen den Kühlleistungsbedarf nach unten bzw. den Heizleistungsbedarf nach oben. Im energetischen Vergleich zwischen ICE-T und ICE 3 ist ein niedriger Kühlleistungsbedarf, d.h. stärkerer Teillastbetrieb, für ICE-T tendenziell nachteiliger als für ICE 3. Damit würde die Betrachtung in diesem Aspekt den ICE 3 tendenziell bevorzugen. Da es keinen technischen Unterschied zwischen ICE-T und ICE 3 hinsichtlich der Heizung gibt, würden sich die Verzerrungen im Heizbedarf auf beide Züge gleich auswirken.

In der aktuellen DIN 4710:2003-01 sind für die drei Referenzstädte Temperaturmessungen aus dem Zeitraum 1961 bis 1990 zugrunde gelegt. Damit sind die Daten im Mittel (1975) mehr als 40 Jahre alt. Die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen der letzten Jahre wird in den Daten daher nicht berücksichtigt. Dadurch ergäbe sich aus der Verwendung der Daten aus der DIN 4710 wiederum eine gewisse Begünstigung des ACS-Systems gegenüber VCS.

Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur – Daten aus Testreferenzjahren (TRY)

Um die unterschiedliche Verteilung des Komfortbetriebs über den Tag entsprechend berücksichtigen zu können, wurde in dieser Studie für meteorologische Daten anstelle der (DIN 4710:2003-01) auf sogenannte Testreferenzjahren (TRY) des DWD zurückgegriffen (Deutscher Wetterdienst, Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, 2014).

Bei Testreferenzjahren handelt es sich um stündliche meteorologische Daten in Form eines repräsentativen Jahres für eine bestimmte geografische Region. Ein solches repräsentatives meteorologisches Jahr wird typischerweise aus tatsächlichen Messungen über etwa 20 bis 30 Jahre abgeleitet. Die Form der Daten ermöglicht es, wie für die vorliegende Anwendung erforderlich, gezielt Temperaturmessungen aus Nachtstunden (z.B. zwischen 00:00 Uhr und 04:00) auszublenden.

Verwendet wurden in dieser Studie TRY 2011 vom Deutschen Wetterdienst. Die Datenbasis für die betrachteten Referenzstädte stammt aus einem Bezugszeitraum von 1988-2007 womit die Datenbasis mit durchschnittlich 20 Jahren deutlich jünger/aktueller ist als die Datenbasis der DIN 4710:2003-01. Die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen der letzten Jahre kommt in den Testreferenzjahren besser zum Ausdruck.

Verteilung der Besetzung:

Zur Besetzung wurden seitens der DB Daten aus dem „ReisendenErfassungssystem“ GRIPS Baustein 1 Fernverkehr (Deutsche Bahn AG, Daten zur Passagierbesetzung aus dem Reisenden-Erfassungssystem, 2008) zur Verfügung gestellt. Die Daten beschreiben die durchschnittliche Auslastung je Zug im Tagesgang für das Linienprodukt ICE-T. Konkret liegt eine Matrix mit stündlicher Auslastung in Prozent über eine volle Woche (24*7 Datenpunkte) vor. Der Auswertzeitraum war 01.01.2008-31.12.2008. Anhand der Daten konnte die Häufigkeit für die Passagierklassen abgeleitet werden. Die Betriebszeit der Anlage im Komfortbetrieb wurde für die Besetzungsverteilung konsistent zur Temperaturverteilung – wie oben beschrieben – berücksichtigt. So wurden Besetzungsdaten aus dem Zeitraum von z.B. 00:00 Uhr bis 04:00 Uhr ausgeklammert um nicht eine realitätsferne Verzerrung zu niedrigen Besetzungen zu erhalten.

Darstellung der abgeleiteten Gewichtungsmatrizen:

Die Zusammenführung der Temperaturverteilung und der Besetzungsverteilung unter Annahme statistischer Unabhängigkeit zwischen diesen beiden Variablen ergibt die Gewichtungsmatrizen als Basis für die Auswertung der Modelle (Klasseneinteilung). Abbildung 96, Abbildung 97, Abbildung 98 zeigen die Gewichtungsmatrix unter Berücksichtigung typischer Einsatzzeiten eines Bahn HLK-Systems im Komfortbetrieb unter Verwendung von Testreferenzjahren für Braunlage (kühl), Kassel (moderat) und Mannheim (warm). Im Vergleich der Gewichtungsmatrizen wird eine Verschiebung zu höheren Temperaturen von Braunlage nach Mannheim klar erkennbar.

Abbildung 96: Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Braunlage (kühl)

Class weighting for Braunlage 04:00 to 24:00		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	1,0%	4,2%	5,4%	5,9%	5,1%	3,0%	0,9%	0,1%	0,0%
	[30, 50]	1,5%	6,4%	8,1%	8,9%	7,6%	4,5%	1,4%	0,2%	0,0%
	[50, ∞[	1,4%	5,9%	7,5%	8,3%	7,1%	4,2%	1,3%	0,2%	0,0%

Class weighting = Klassengewichtung; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Werte bezogen auf typische Einsatzzeiten (04:00 bis 24:00 Uhr) im Komfortbetrieb. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 97: Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Kassel (moderat)

Class weighting for Kassel 04:00 to 24:00		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0,3%	2,4%	5,1%	5,6%	5,8%	4,0%	2,0%	0,5%	0,1%
	[30, 50]	0,4%	3,6%	7,7%	8,3%	8,6%	6,0%	2,9%	0,8%	0,1%
	[50, ∞[	0,4%	3,4%	7,1%	7,7%	8,0%	5,5%	2,7%	0,8%	0,1%

Class weighting = Klassengewichtung; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Werte bezogen auf typische Einsatzzeiten (04:00 bis 24:00 Uhr) im Komfortbetrieb. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 98: Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf einem Testreferenzjahr für Mannheim (warm)

Class weighting for Mannheim 04:00 to 24:00		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0.2%	1.8%	3.7%	5.4%	5.6%	4.8%	2.8%	1.1%	0.2%
	[30, 50]	0.4%	2.7%	5.5%	8.2%	8.4%	7.2%	4.2%	1.7%	0.3%
	[50, ∞[	0.3%	2.5%	5.1%	7.5%	7.8%	6.7%	3.9%	1.5%	0.3%

Class weighting = Klassengewichtung; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Werte bezogen auf typische Einsatzzeiten (04:00 bis 24:00 Uhr) im Komfortbetrieb. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Matrix für Verteilung der Modelleingangsparameter Temperatur und Passagierbesetzung aus Daten der Felddatenerfassung zu ICE 3

Für die Gewichtung der Klassen bedarf es der Kenntnis der Verteilung der Temperatur sowie der Passagierbesetzung. Im Unterschied zur Vorgangsweise oben muss hier nicht auf statistische Daten zur Außentemperatur (etwa aus entsprechenden Normen oder Testreferenzjahren) bzw. zur Passagierbesetzung zurückgegriffen werden. Stattdessen wird in diesem Abschnitt die Gewichtungsmatrix aus Daten der Felddatenerfassung zu ICE 3 im vorliegenden Projekt abgeleitet. Mit der Verwendung dieser Gewichtungsmatrix werden für die zu vergleichenden HLK-Systeme rechnerisch, soweit in dieser Betrachtung möglich, Bedingungen zugrunde gelegt, als wären die zu vergleichenden HLK-Systeme während des Zeitraums der Felddatenerfassung am selben Zug im Einsatz gewesen. Die Betriebspunkte aus der Felddatenerfassung sind jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht repräsentativ für einen langjährigen Einsatz von Zügen auf verschiedenen Strecken. Im Rahmen der Felddatenerfassung könnten beispielsweise zufälligerweise besonders heiße Sommer in Kombination mit besonders milden Wintern aufgetreten sein oder der betrachtete Zug könnte vorzugsweise auf einer Strecke mit besonders hoher oder besonders niedriger Passagierauslastung betrieben worden sein.

Um die Häufigkeiten der gemessenen Temperaturen und Passagierbesetzungen möglichst korrekt abzubilden, wurden in den Daten teilweise vorhandene Lücken, zum Beispiel wegen Wartungen, entsprechend aufgefüllt. Dies wurde über einen zufallsbasierten Replikationsprozess monatsweise für alle Monate eines Jahres durchgeführt. Konkret lief das Verfahren folgendermaßen ab: Als Soll-Anzahl für die Messdaten-Samples (Zeitstempel) wurde die Anzahl des Monats mit der höchsten Anzahl an Messdaten-Samples festgelegt. Dann wurde für jeden Kalendermonat separat die Lücke zwischen der tatsächlich erfassten Anzahl an Messdaten-Samples und der Soll-Anzahl aufgefüllt, indem zufällig die Anzahl an aufzufüllenden Samples aus der Menge der tatsächlich erfassten Messdaten-Samples des Monats gezogen und dem Monat zugeordnet wurden.

Die aus den Felddaten abgeleitete Gewichtungsmatrix wird in Abbildung 99 gezeigt.

Abbildung 99: Gewichtungsmatrix für Verteilung der Modelleingangsparameter basierend auf den erfassten Felddaten im ICE 3

Distribution from field data of current project		ambient temperature in °C								
		]-∞, -5]	]-5, 0]	]0, +5]	] +5, +10]	] +10, +15]	] +15, +20]	] +20, +25]	] +25, +30]	] +30, ∞[
passenger occupancy in %	[0, 30]	0,1%	0,7%	3,7%	9,7%	14,8%	12,2%	7,0%	1,4%	0,3%
	[30, 50]	0,0%	0,3%	1,2%	4,7%	5,8%	5,3%	3,8%	0,8%	0,2%
	[50, ∞[	0,0%	0,1%	1,2%	5,5%	7,5%	7,3%	4,3%	1,7%	0,3%

Distribution from field data of current project = Verteilung basierend auf Felddaten des aktuellen Projekts; ambient temperature in °C = Temperatur der Umgebungsluft in °C; passenger occupancy in % = Passagierbesetzung in %. Verwendet wurden die erfassten Felddaten im Komfortbetrieb. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleich der Temperaturverteilung im Messzeitraum mit einem repräsentativen Jahr

Hinsichtlich der Gewichtungsmatrizen für die Verteilung der Modelleingangsparameter stellt sich die Frage, ob im Zeitraum der Felddatenerfassung die Temperaturverteilung der Außentemperatur dem langjährigen Durchschnitt entsprach, oder ob es sich um besonders warme oder kalte Jahre gehandelt hat.

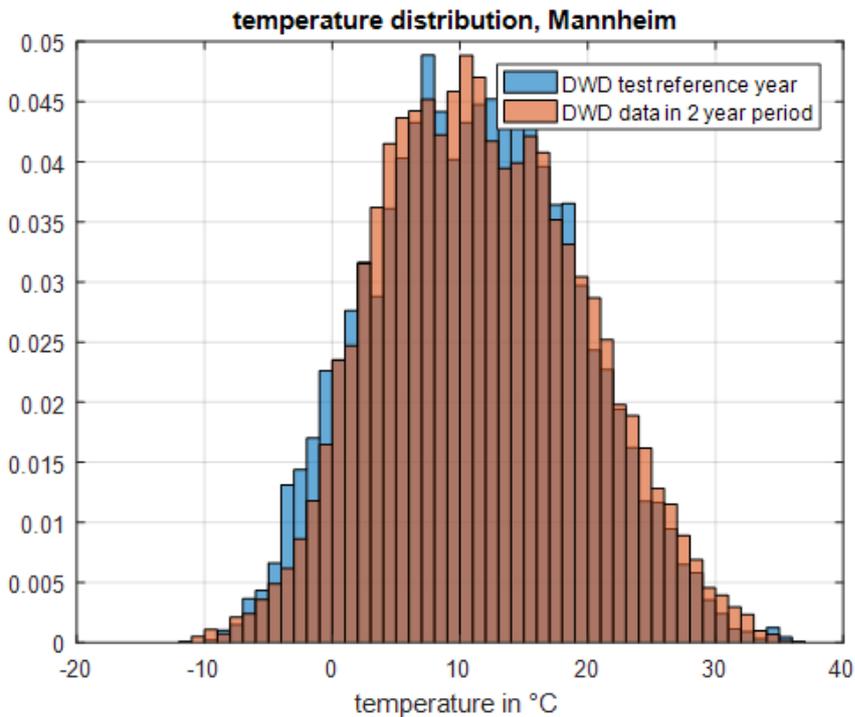
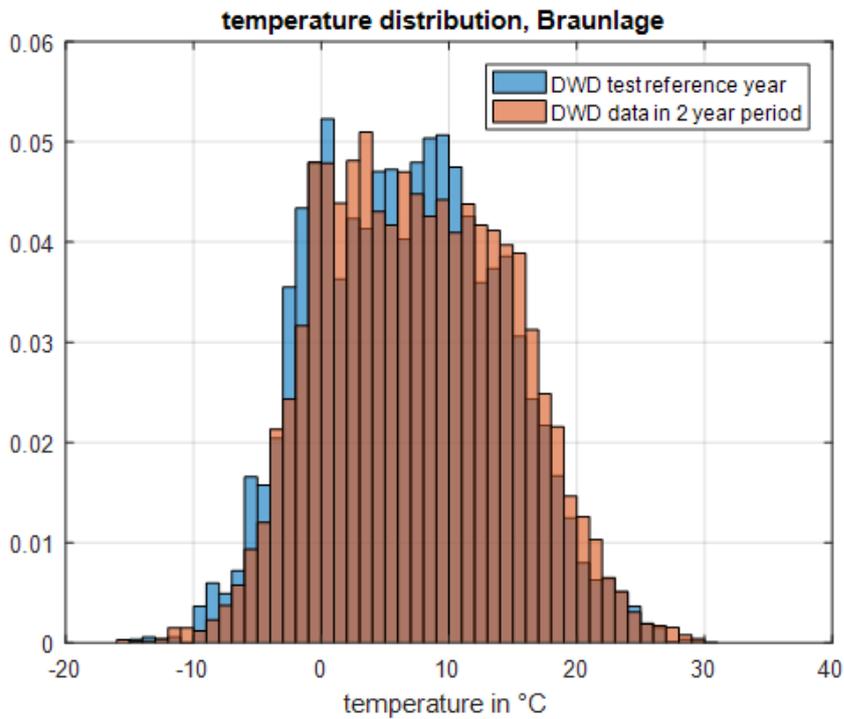
Zur Beantwortung dieser Frage wurden Daten des Deutschen Wetterdienstes für die Referenzstädte Braunlage und Mannheim näher betrachtet. Für Kassel standen keine aktuellen Daten zur Verfügung.

- ▶ Temperaturhäufigkeiten aus Original-Messdaten des DWD (ungefiltert, d.h. volle 24 Stunden pro Tag) für die Referenzstädte Braunlage und Mannheim und für einen Zeitbereich von 2 Jahren vom 01.11.2015 bis 31.10.2017, der innerhalb des Zeitbereichs der Felddatenerfassung im vorliegenden Projekt lag; Datenquelle: (Deutscher Wetterdienst, Climate Data Center, 2017)
- ▶ Temperaturhäufigkeiten aus den Testreferenzjahren für die Referenzstädte Braunlage und Mannheim; Datenquelle: (Deutscher Wetterdienst, Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, 2014)

Die Temperaturhäufigkeiten sind in den Histogrammen in Abbildung 100 dargestellt. Man kann aus den überlagerten Histogrammen deutlich erkennen, dass der orange Bereich zu den betrachteten zwei Jahren etwas weiter rechts und damit bei höheren Temperaturen liegt. Die Überlagerung aus dem blauen und dem orangenen Histogramm ist in brauner Farbe dargestellt. Die statistischen Daten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Hinsichtlich der Temperaturverteilung unterscheidet sich der betrachtete Zeitraum der Felddatenerfassung also von Testreferenzjahren (repräsentative Jahre). Im betrachteten Zeitraum war es wärmer.

Abbildung 100: Temperaturverteilungen aus Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Städte Braunlage und Mannheim im Vergleich mit den DWD-Daten für die 2-Jahres-Messperiode am ICE 3 2016/2017



temperature distribution = Temperaturverteilung; temperature = Temperatur; DWD test reference year = DWD Testreferenzjahr; DWD data in 2 year period = DWD. Daten aus 2-Jahres Periode. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Tabelle 7: Temperaturverteilungen des Testreferenzjahres im Vergleich mit der Verteilung der 2-Jahres-Messperiode

Datenquelle	Arithm. Mittel [°C]	Quantil [°C]				
		0%	25%	50%	75%	100%
Braunlage (kühl)						
Testreferenzjahr	6,7	-14,8	0,8	6,7	12	29,2
2 Messjahre	7,5	-15,3	1,8	7,2	13,1	30,3
Mannheim (warm)						
Testreferenzjahr	11,1	-9,3	5,4	11,1	16,7	36,3
2 Messjahre	11,7	-11,2	5,8	11,2	17,3	35,3

Temperaturverteilungen des Testreferenzjahres im Vergleich mit der Verteilung der 2-Jahres-Messperiode, Temperaturwerte in Grad Celsius. Q_0 = Quantil 0%.

Ableitung des Energiebedarfs für die Betriebsstunden im Komfortbetrieb (Schritt 3)

Nachdem der mittlere elektrische Leistungsbedarf über ein Jahr abgeleitet wurde, wird nun der elektrische Energiebedarf berechnet. Dazu wird der mittlere elektrische Leistungsbedarf mit der Anzahl der Betriebsstunden im Komfortbetrieb – für den Komfortbetrieb gilt das aufgestellte Modell mittels Klasseneinteilung – multipliziert.

Wesentlich ist es, in diesem Schritt eine realitätsnahe bzw. repräsentative Anzahl an Betriebsstunden heranzuziehen, um aussagekräftige absolute Zahlen zum Jahresenergiebedarf ableiten zu können. Grundsätzlich kann für die Anzahl der Betriebsstunden auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen werden. Hier wurde auf Informationen aus dem Lastenheft zum HLK-Systems eines vergleichbaren Zuges vom Betreiber DB zurückgegriffen: Als durchschnittliche Betriebsstunden pro Tag werden 18 Stunden angegeben. Für die Berechnung in diesem Projekt werden für den Jahresenergiebedarf über 365 Tage 6570 Stunden zugrunde gelegt.

Berechnung des Impulswiderstandes für den sekundären Energiebedarf

In dieser Arbeit wurde gemäß der nachfolgenden Gleichung (5) ein analytischer Ansatz gewählt um den Impulswiderstand zu berechnen.

$$W_{\text{Impulswiderstand}} = \dot{m} \cdot v^2 \cdot t \quad (5)$$

- \dot{m} ... angesaugter Luftmassenstrom je Klasse und Anlage
- v ... Fahrgeschwindigkeit des Zuges
- t ... Betriebsstunden

Die Fahrgeschwindigkeit des Zuges wurde als quadratischer Mittelwert (root mean square) basierend auf den in diesem Projekt erfassten Felddaten abgeleitet. Es ergab sich damit eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $v = 133$ km/h für die weitere Rechnung. Diese mittlere Geschwindigkeit beinhaltet Stehzeiten (z.B. Stationsaufenthalte) im Rahmen der Zugfahrten. Die Betriebsstunden entsprechen den 6570 Stunden aus der Berechnung des primären Energiebedarfs.

Der angesaugte Luftmassenstrom wurde für jede Anlage und jede Klasse der Klasseneinteilung ermittelt. Der Luftmassenstrom setzt sich dabei, je nach Anlage, aus folgenden Komponenten zusammen:

- ▶ Der Frischluftmassenstrom (Frischluftversorgung der Passagiere) wurde gemäß der implementierten Regelungsstrategie für jede Temperaturklasse und Besetzungsstufe bestimmt. Die Frischluftversorgung wird anhand der CO₂-Konzentration im Wagen besetzungsabhängig geregelt. Hinsichtlich des Frischluftmassenstroms gibt es keine Unterschiede zwischen den betrachteten Anlagen. Der Frischluftmassenstrom ist gemäß zugrundeliegender Norm abhängig von der Außentemperatur sowie abhängig von der Passagierbesetzung.
- ▶ Für die Air-Cycle-Anlage mit Unterdruckprozess (Vergleichssystem 1) wurde aus Messdaten im Versuch eine Abbildung der Turbinendrehzahl auf den Prozessluftmassenstrom abgeleitet. Über die Zuordnung von Turbinendrehzahlen auf Klassen der Klasseneinteilung konnte schließlich jeder Klasse ein Prozessluftmassenstrom zugeordnet werden. Weiter wurde der Massenstrom für die Kühlung der Turbomaschine eingerechnet.
- ▶ Für die Air-Cycle-Anlage mit Überdruckprozess (Vergleichssystem 6) wurde der Frischluftmassenstrom in Abhängigkeit von der erforderlichen Kälteleistung bei hoher Temperaturklasse und hoher Besetzungsstufe noch erhöht, um minimale Temperaturen an der Zuluftschnittstelle nicht zu unterschreiten. Außerdem war bei dieser Anlage der Luftmassenstrom zur Kühlung (entspricht einem Kondensatorluftmassenstrom) zu berücksichtigen.
- ▶ Für die Kaltdampfanlagen (Vergleichssysteme 2 und 3) wurde der Kondensatorluftstrom entsprechend der bei ICE-T implementierten Regelung in Abhängigkeit der über den Kondensator abzuführenden Wärme und der Umgebungstemperatur in zwei Stufen geregelt.
- ▶ Für die optimierte Kaltdampfanlage mit Bypass wurde gegenüber der Kaltdampfanlage mit Gegenheizen angenommen, dass - im Sinne einer Systemoptimierung - für niedrige Umgebungstemperaturen der Kondensatorlüfter nicht auf kleinster Stufe laufen muss, sondern im Fahrbetrieb des Zuges gänzlich ausgeschaltet werden kann.

Die klassenweisen Luftmassenströme wurden schließlich anhand der Gewichtungsmatrizen in Analogie zur Ermittlung des Leistungs-/Energiebedarfs gewichtet und aufsummiert. Dementsprechend ist der sekundäre Energiebedarf von den Einsatzbedingungen (Temperaturverteilung, Passagierverteilung) und der Anlage abhängig.

Berücksichtigung von Wirkungsgraden für Bordnetz und Traktion

Um den primären und sekundären Energiebedarf unmittelbar vergleichen bzw. zum gesamten Energiebedarf addieren zu können, ist es zunächst erforderlich, sämtliche Bedarfe auf denselben Punkt zu beziehen. Für die Betrachtung der Betriebskosten infolge der Energiekosten ist es sinnvoll, sämtliche Bedarfe auf den Pantographen, also die Stromeinspeisung in den Zug, zu beziehen.

Die oben betrachteten primären Energiebedarfe aus der Felddatenmessung bzw. der Simulation beziehen sich auf die Geräteschnittstelle. Für das Bordnetz (Umrichter, etc.) zwischen Geräteschnittstelle und Pantographen wurde ein Wirkungsgrad von 0,925 angesetzt. Der sekundäre Energiebedarf ist durch den Fahrzeugantrieb zu decken. Für die gesamte Wirkungsgradkette vom Pantographen bis zur Traktion wurde 0,870 angesetzt. Die Wirkungsgrade stimmen mit jenen in der Untersuchung von (Aigner, 2007) überein.

2.3.3.7 Zusammenfassung der Unterschiede zwischen den Auswertungen in diesem Projekt und der Arbeit von Meister (Meister, 2012)

Die wichtigsten Unterschiede zwischen der Auswertung in (Meister, 2012) und der Auswertung in Bezug auf den Leistungs- und Energiebedarf wie sie im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurde sind nachfolgend zusammengefasst.

► **Betrachtung des Kühl- und Heizbetriebs**

Während in (Meister, 2012) der Fokus auf dem Kühlbetrieb lag, in dem sich die betrachteten Anlagen technisch unterscheiden, wurde in diesem Projekt sowohl der Kühlbetrieb als auch der Heizbetrieb betrachtet. Darüber hinaus war die Betrachtung des Kühlbetriebs in (Meister, 2012) auf eine minimale Temperatur von 15°C beschränkt. In diesem Projekt gab es keine untere Temperaturbeschränkung, wodurch auch der Kühlbetrieb bei niedrigeren Temperaturen berücksichtigt werden konnte.

► **Anlagen/Techniken im Vergleich**

In (Meister, 2012) wurde die Air-Cycle Anlage verglichen mit einer Kaltdampfanlage mit einer Teillastregelung mittels Gegenheizen. Gegenheizen zur Leistungsregelung entspricht heute nicht mehr dem Stand der Technik. Auch im Bereich der Air-Cycle Anlage wurden Weiterentwicklungen vorgenommen. Daher wurde in diesem Projekt zusätzlich ein Vergleich zwischen einer weiterentwickelten und verbesserten Air-Cycle Anlage und einer verbesserten Kaltdampfanlage vorgenommen.

► **Betriebsmodus – Komfortbetrieb**

In (Meister, 2012) findet sich kein klarer Hinweis auf den betrachteten Betriebsmodus der Anlage (Komfortbetrieb, Vorkonditionierung, Abstellbetrieb). Die Skalierung auf 24*365 Betriebsstunden pro Jahr legt nahe, dass davon ausgegangen wurde, dass die Daten verschiedene Betriebsmodi abbilden. Die Betrachtung der zugrundeliegenden Daten zu ICE-T im Rahmen der aktuellen Arbeit zeigte, dass die Daten in erster Linie den Komfortbetrieb abbilden. Dementsprechend wurde der Vergleich in dieser Arbeit explizit für Komfortbetrieb durchgeführt. Komfortbetrieb stellt in erster Linie Passagierbetrieb dar. Dies wurde in der Definition der Klassen-Gewichtungsmatrix sowie in der Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr berücksichtigt.

► **Datenbasis für meteorologische Daten**

Während in (Meister, 2012) auf meteorologische Daten aus der DIN 4710 zurückgegriffen wurde, verwendet diese Arbeit Testreferenzjahre, um entsprechend berücksichtigen zu können, dass Komfortbetrieb in den Nachtstunden seltener ist. Die Daten aus der (DIN 4710:2003-01) und die Testreferenzjahre (Deutscher Wetterdienst, Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, 2014) unterscheiden sich in ihrer Form, der dahinterliegenden Generierung sowie der zugrundeliegenden Messdatenbasis. Die Testreferenzjahre sind deutlich aktueller und bilden damit die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen der letzten Jahre tendenziell besser ab.

► **Datenbasis zur Air-Cycle Anlage**

Die Datenbasis zur Air-Cycle Anlage aus dem Feldbetrieb unterscheidet sich zwischen (Meister, 2012) und diesem Projekt insbesondere hinsichtlich der Messdauer, der Anzahl der Variablen und der darauf angepassten Verarbeitung.

► **Vergleich anhand von Betriebsbedingungen aus der aktuelle Felddatenerfassung**

Der Vergleich verschiedener HLK-Anlagen erfolgte nicht nur wie bei (Meister, 2012) anhand von statistischen Daten zur Temperatur- und Passagierbesetzung, sondern auch anhand der in der aktuellen Felddatenerfassung konkret vorgefundenen Verteilung der Temperatur und Passagierbesetzung. Es wird der Vergleich also auch anhand eines ganz konkreten Zuges durchgeführt.

► **Betrachtung des sekundären Energiebedarfs infolge des Impulswiderstandes angesaugter Luft**

Bei (Meister, 2012) erfolgte keine Betrachtung des sekundären Energiebedarfs. Da der Impulswiderstand aber gemäß (Morgenstern & Ebinger, 2008) einen durchschnittlichen Anteil von 22% am Jahres-Gesamtenergiebedarf der Klimatisierung eines Hochgeschwindigkeitszug in Deutschland hat, wurde dieser sekundäre Energiebedarf in der vorliegenden Arbeit mitbetrachtet. Die Betrachtung basierte auf einem analytischen Ansatz.

Insbesondere wegen der vorab genannten Unterschiede weichen die Ergebnisse in (Meister, 2012) und die Ergebnisse aus diesem Projekt voneinander ab. Im vorliegenden Projekt wurde, im Unterschied zur Studie von (Meister, 2012), auch eine umfassende Analyse der Wirtschaftlichkeit verschiedener HLK-Systeme durchgeführt.

2.3.4 Vergleich verschiedener HLK-Systeme in Bezug auf den Wartungsaufwand

Für die Gesamtanalyse der LCC-Kosten werden Daten im Zeitraum 2012-2014 herangezogen. Grundlage sind die im SAP-basierten Instandhaltungssystem der DB vorhandenen Daten. Dieses beinhaltet die an den Fahrzeugen durchgeführten Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten. Grundsätzliche kommen folgende Baureihen, die mit Kaltdampfanlagen ausgestattet sind als Vergleich zur luftgestützten Klimaanlage im ICE 3 2.BS in Betracht: Velaro D (BR 407), ICE 4 (BR 412) und ICE-T (BR 411).

Der Velaro D wurde erst 2014 in Dienst gestellt, hat daher nur eine sehr geringe Betriebseinsatzdauer. Zudem sind Gewährleistungsreparaturen nicht im SAP-Instandhaltungssystem erfasst.

Der ICE-4 wurde erst 2017 in den Dienst gestellt. Der Probetrieb im Jahr 2016 ist nicht zur Auswertung geeignet. Zudem gibt es für beide Fahrzeuge keine Messungen hinsichtlich des Energieverbrauchs bzw. des Duty Cycle (Schmitt et al., 2015). Aus diesen Gründen wurde ein Vergleich hinsichtlich LCC/TCO mit diesen Fahrzeugen verworfen.

Der ICE-T hat eine zum ICE 3 vergleichbare Betriebseinsatzdauer und es wurden Messungen des Energieverbrauchs durchgeführt. Daher wird Kaltdampfanlage im ICE-T mit der luftgestützten Anlage im ICE 3 verglichen.

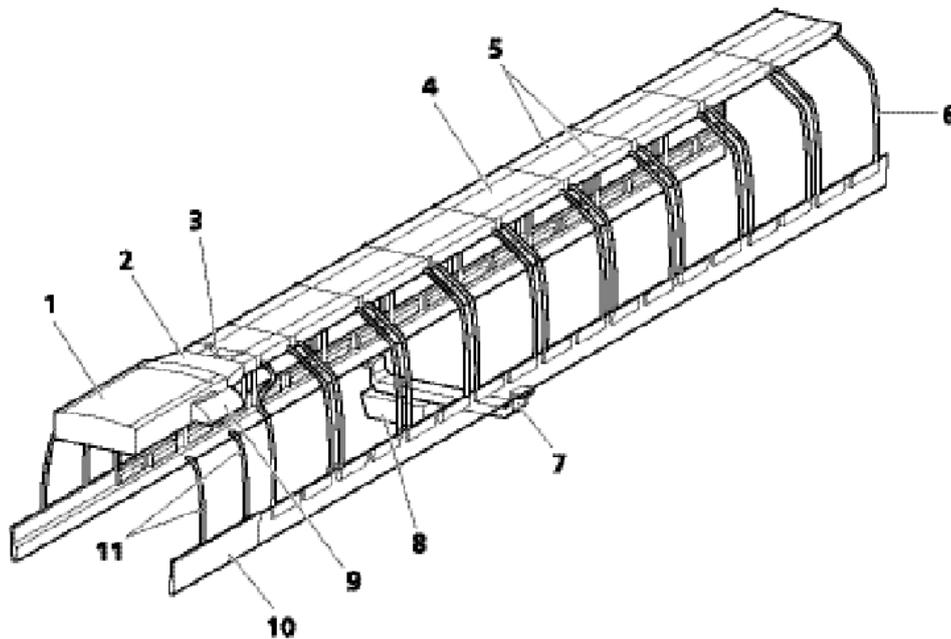
Die aus SAP exportierten Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten für die betrachteten Fahrzeuge ICE 3 und ICE-T wurden in Abstimmung zwischen DB Systemtechnik und Liebherr hinsichtlich klimarelevanter Einträge gefiltert. Diese bilden die Basis für die in Kapitel 2.4.2.

2.3.4.1 Umfang der Instandhaltungstätigkeiten bei Klimasystem ICE 3

Das Klimatisierung-System besteht aus mehreren Baugruppen, die über das gesamte Fahrzeug verteilt sind. Das Herzstück bildet das Klimakompaktgerät (KKG).

Die Kühlung bzw. der Hauptteil der Heizwärme wird über das Kanalsystem Abbildung 101 eingebracht. Im Kanalsystem sind Motorklappen installiert, die für die optimale Verteilung der kalten bzw. warmen Luft sorgen. Zur Erhöhung des Fahrgast-Komforts ist im Kanalsystem ein Schalldämpfer integriert. Zum Ausregeln einzelner Abteile befinden sich zusätzliche elektrische Kanalheizer im Kanalsystem. Im Einstiegsbereich und im WC sind Konvektionsheizer installiert.

Abbildung 101: Aufbau Klimasystem ICE 3



- | | | | |
|---|-------------------------------|----|--|
| 1 | Kompaktklimagerät (KKG) | 7 | Fortluftquerkanal |
| 2 | Zuluftschalldämpfer | 8 | Fortluftgerät |
| 3 | Zuluftumstellklappe kalt/warm | 9 | Mischluftkasten mit Wetterschutzgitter |
| 4 | Zuluftkanal Kaltluft | 10 | Fortluftlängskanal |
| 5 | Zuluftkanal Warmluft | 11 | Fortluftabsaugkanäle im Einstiegsbereich, WC und Schaltschrank |
| 6 | Stichkanäle für warme Zuluft | | |

Aufbau Klimasystem ICE 3. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

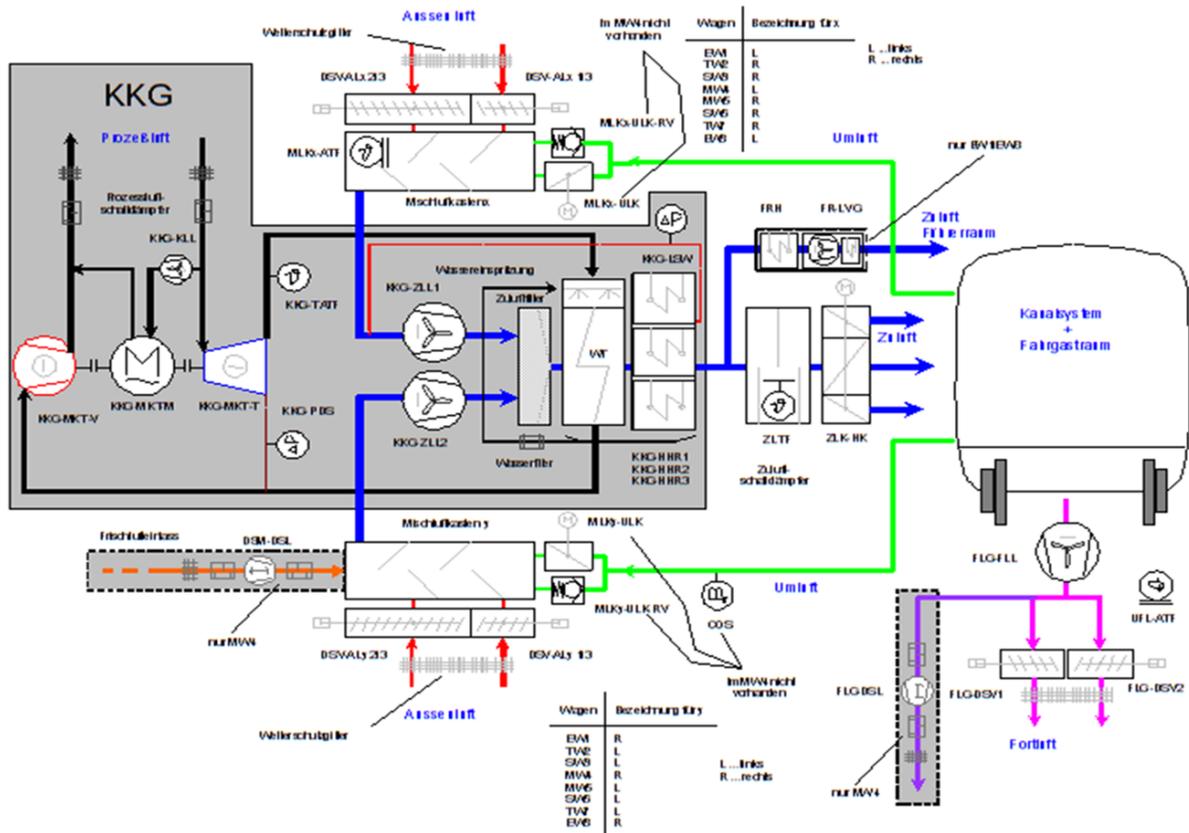
Zur Ableitung der Fortluft wird ein Fortluftgerät verwendet, das unter dem Wagenkasten montiert ist.

Da der Zug mit einem passiven Druckschutzsystem ausgestattet ist, müssen sowohl an Fortluft- als auch an der Frischluftöffnung Druckschutzklappen vorgesehen werden.

Bei der Frischluft befinden sich diese Druckschutzklappen in den Mischluftkästen, die beidseits am Klimakompaktgerät montiert sind.

Wie aus Abbildung 101 ersichtlich ist, ist eine Vielzahl von Komponenten an der Klimatisierung beteiligt. Abgesehen vom Klimakompaktgerät (KKG) sind diese Komponenten spezifisch für das Fahrzeug und nicht an eine Klimatechnik gebunden. So findet Druckschutz nur bei Hochgeschwindigkeitszügen Verwendung, das Kanalsystem ist je nach Fahrzeugtyp unterschiedlich und nicht alle Eisenbahnfahrzeuge verfügen über ein eigenes Fortluftgerät.

Abbildung 102: Schema Klimasystem ICE 3

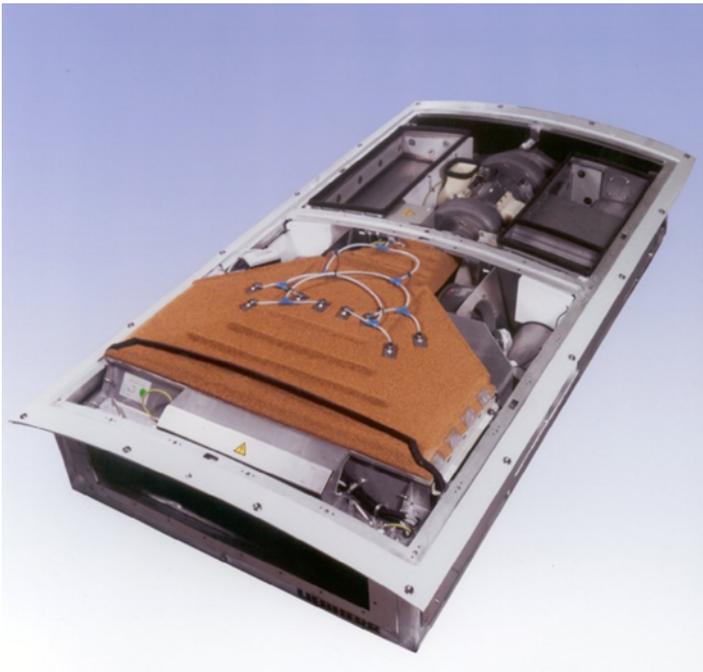


Schema Klimasystem ICE 3, grau hinterlegt sind die Komponenten des Kompaktklimagerätes (KKG). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Da ein wesentlicher Teil der Instandhaltungsarbeiten am Klimasystem nur vom Aufbau und Art des Fahrzeuges abhängt, wurden die nicht unmittelbar mit der Klimaanlage selbst in Verbindung stehenden Wartungstätigkeiten nicht berücksichtigt. Somit wurden nur jene Wartungskosten berücksichtigt, die entweder mit dem Klimakompaktgerät (KKG, grau hinterlegt in Abbildung 102) bzw. mit der Steuerung der Klimaanlage in funktionaler Verbindung stehen. Steuerung und KKG stellen zusammen eine Funktionseinheit dar, die in verschiedenen Fahrzeugkonstellationen zum Einsatz kommen können.

Abbildung 103 zeigt das KKG der 2. Bauserie des ICE 3, auf das sich die erhobenen Instandhaltungsaufwände beziehen. Insgesamt sind davon 104 Geräte in 13 Zügen verbaut.

Abbildung 103: Kompaktklimakompaktgerät ICE 3, 2. Bauserie



Kompaktklimakompaktgerät ICE3, 2. Bauserie. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Die betreffenden Hauptbaugruppen sind:

- ▶ Prozesskreis: Motorisierte Kühlturbine (MKT), Wärmtauscher, Kondenswasser Einspritzung, Dichtungen
- ▶ Lüfter: Zuluft und MKT-Kühlluft
- ▶ Elektrische Heizung: Hauptheizregister, Thermostate
- ▶ Elektrik- und Elektronik: HVAC Controller, Schalt- und Regelkomponenten, Magnetlagerkontroller

Unterschiede, die aus der Fahrzeugart, Betriebsgeschwindigkeit, Montageart, speziellen Gegebenheiten oder Anforderungen aus der Fahrzeugkonstruktion resultieren, sind im Vergleich ausgeblendet. Das betrifft KKG Deckel und Schrauben, Tragrahmen und Dichtungen.

2.3.4.2 Umfang der betrachteten Instandhaltungstätigkeiten bei ICE-T

Bei ICE-T wurden Daten vom Mittelwagengerät (Abbildung 15) der 59 Züge der Baureihe 411 analysiert. Insgesamt handelt es sich um 295 Wagen. Die Endwagen eignen sich nicht zum direkten Vergleich, da diese mit Splitgeräten ausgeführt sind, deren Kältekreis sowohl Fahrerstand als auch Fahrgastraum versorgt.

Die betreffenden Hauptbaugruppen sind:

- ▶ Kälteteil: Drehzahl geregelter Schraubenkompressor, Kondensatoren, Kondensatorlüfter, Kältekreis kleinkomponenten
- ▶ Luftbehandlungsteil: Zuluft Ventilator, Verdampfer mit Expansionsventil
- ▶ Elektrische Heizung: Hauptheizregister, Thermostate
- ▶ Elektrik- und Elektronik: HVAC Controller, Schalt- und Regelkomponenten

KKG Deckel und Schrauben, Tragrahmen und Dichtungen sind wie bei ICE 3 nicht berücksichtigt.

2.3.4.3 Erhobene Instandhaltungsdaten bei ICE 3 und ICE-T im Kostenvergleich

Im Betrachtungszeitraum gab es außerordentliche Instandhaltungstätigkeiten, die auf die Lebenszeit der Anlage aufzurechnen sind. Bei der ICE-T Anlage war dies eine planmäßige Rollkur an den Schraubenverdichtern, die einmal in der Lebenszeit von 30 Jahren erfolgt. Bei ICE 3 kommt hier eine außerplanmäßige Überholung des Wärmetauscher-Headers zu tragen, der auf Grund unzureichend haltbaren Isolier-Werkstoffes notwendig geworden war. Da heute langlebige Isolierwerkstoffe zur Verfügung stehen, kommt bei einer Air-Cycle Anlage nach Stand der Technik ein solcher Austausch des Isolierwerkstoffes nicht mehr zu tragen, die Position wurde daher herausgerechnet.

ICE 3 hat eine um den Faktor 1,37 höhere jährliche Laufleistung als ICE-T. Es wurde angenommen, dass dies keinen Einfluss auf den Wartungsaufwand hat. Ebenso wurde angenommen, dass ICE 3 und ICE-T etwa die gleiche jährliche Betriebszeit haben, daher ist ebenfalls keine relevante Auswirkung auf den Unterschied hinsichtlich der Wartungskosten zu erwarten.

Das Ziel ist eine Gegenüberstellung leistungsgleicher Systeme, als Bezugsgröße für die Darstellung wurde eine Kälteleistung von 33 kW (Nennkälteleistung ICE 3) gewählt. Da ICE-T über nur 30 kW Kälteleistung verfügt, wurden die Instandhaltungskosten für die Funktion Kühlen/Lüften bei ICE-T mit 10% Aufschlag versehen. Das Ergebnis ist in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Gegenüberstellung der jährlichen Wartungskosten von ICE-T und ICE 3

Analyse der DB Instandhaltungsdaten	ICE-T Baureihe 411 (Mittelwagen)	ICE 3 2.BS
Kühlen/Lüften	3.402 €	3.852 €
Heizsystem	443 €	556 €
Vergleichskosten Funktion Kühlen/Heizen/Lüften	3.845 €	4.408 €

Jährliche Wartungskosten von ICE-T und ICE 3

2.4 Vergleich mit anderen Klimaanlagen (AP 3)

In diesem Arbeitspaket wird die Air-Cycle Anlage (ACS = Air-Cycle System) mit herkömmlichen Kaldampfanlagen (VCS = Vapour Cycle System) verglichen hinsichtlich des Leistungs- und Energiebedarfs auf der Basis der Messwerte und hinsichtlich zusätzlicher Informationen zu Lebenszykluskosten (LCC bzw. TCO). Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt und diskutiert.

In diesem Arbeitspaket liegt der Schwerpunkt auf der Standardisierung und Anwendung der gewonnenen Betriebsdaten auf eine Referenzanlage (Vergleichsfahrzeug). Dies erfordert die Auswahl eines Fahrzeuges.

In AP 3 wurden diese Betriebs- und Umgebungsdaten gesichtet, standardisiert, in gemäß AP 1 gewählte Klassen eingeteilt und vorverarbeitet, um sie für den nachfolgenden Schritt, den Vergleich mit der luftgestützten Klimaanlage, aufzubereiten. Ergänzend dazu erfolgte auch für den ICE-T, analog zum AP 2, eine Erfassung und Aufbereitung der Instandhaltungsdaten (präventive und korrektive Maßnahmen).

Mit der vollständigen Erhebung und Vorverarbeitung aller zum Vergleich der Systeme notwendigen Daten wurde das AP 3 abgeschlossen. Weiterhin war das zweite Projekttreffen Bestandteil des AP 3.

2.4.1 Vergleich des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfs verschiedener HLK-Systeme

2.4.1.1 Vergleich des primären Leistungsbedarfs gemäß Klasseneinteilung

Vergleich des Leistungsbedarfs der Air-Cycle Anlage (ACS) im ICE 3 (Vergleichssystem 1) mit der Kaldampfanlage (VCS) im ICE-T (Vergleichssystem 2)

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen den primären elektrischen Leistungsbedarf für Kühlen und Heizen für Vergleichssystem 1 und 2, d.h. für die Systeme, für die Felddaten vorhanden waren. Es wird hierzu die Klasseneinteilung des elektrischen Leistungsbedarfs über den Variablen Außentemperatur und Passagierbesetzung als Modell gemäß Abschnitt 2.3.3.6 zugrunde gelegt. Als Aggregierungsfunktion für die Leistungswerte in den einzelnen Klassen wurde, wie oben erläutert, der arithmetische Mittelwert (Mean) verwendet. Um einen Vergleich zwischen Wagen mit unterschiedlicher Passagierkapazität zu ermöglichen, wurden die Leistungswerte auf einen Sitzplatz normiert. Die Werte der Leistungsaufnahme beziehen sich auf die Geräteschnittstelle, beinhalten also keine Wirkungsgrade des Bordnetzes bis zum Pantographen.

Wie aus den Plots grundsätzlich ersichtlich ist, hat die Passagierbesetzung einen weitaus geringeren Einfluss auf die elektrische Leistungsaufnahme als die Außentemperatur.

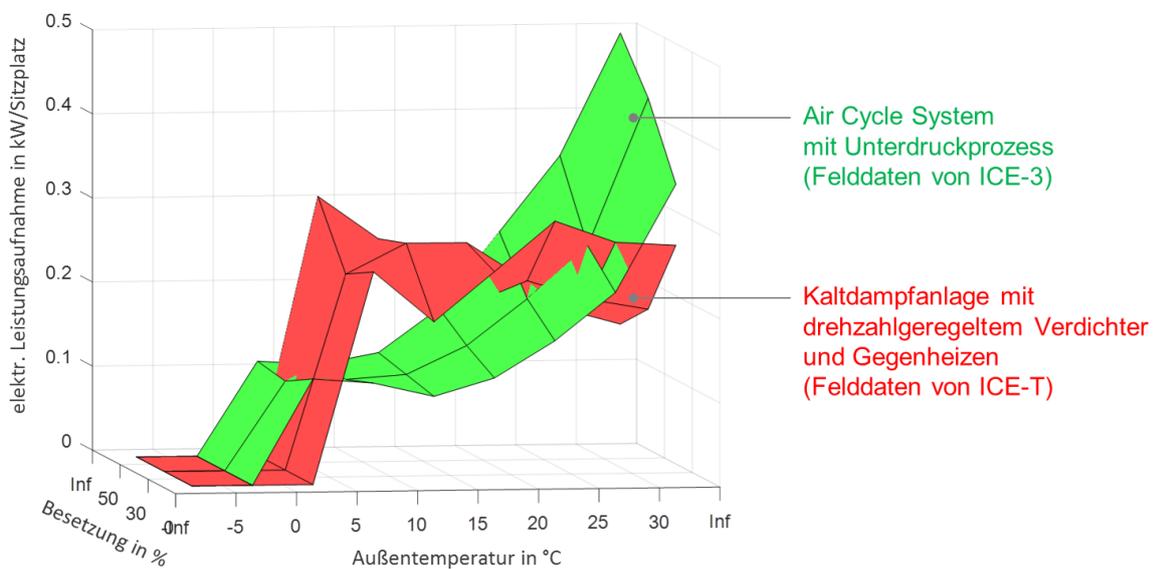
Klare Unterschiede zwischen den betrachteten Anlagen zeigen sich im Kühlbetrieb. Bei sehr hohen Außentemperaturen im Bereich von 35°C liegt die elektrische Leistungsaufnahme der Air-Cycle Anlage deutlich über der Leistungsaufnahmen der Kaldampfanlage. Dies entspricht der Erwartung basierend auf theoretischen physikalischen Überlegungen zu den jeweiligen Kreisprozessen.

Für niedrigere Temperaturen im Bereich von z.B. 10°C oder 15°C ist die Air-Cycle Anlage jedoch deutlich effizienter als die betrachtete Kaldampfanlage. In diesem Bereich zeigt sich der Vorteil einer energieeffizienten Teillastregelbarkeit. Es wird aus der Abbildung unmittelbar erkennbar, dass die Teillastregelung mit elektrischem Gegenheizen im Teillastbereich, in dem der Verdichter nicht mehr weiter drehzahlreduziert werden kann, eine sehr ineffiziente, weil leistungsaufwändige Strategie darstellt.

Die Kernfrage an dieser Stelle ist, welche Temperaturbereiche bzw. konkreter, welche Klassen aus Temperatur und Passagierbesetzung im tatsächlichen Betrieb mit welcher Häufigkeit auftreten und welcher Jahresenergiebedarf sich für die Air-Cycle Anlage und die Kaltdampfanlage ergibt. Diese Frage wird in Abschnitt 2.4.1.2 behandelt.

Im Heizbetrieb liegt die elektrische Leistungsaufnahme der Air-Cycle Anlage nur geringfügig über der Leistungsaufnahme der betrachteten Kaltdampfanlage. In der Abbildung ist der Unterschied nicht erkennbar. Der Unterschied zwischen der Air-Cycle Anlage und der Kaltdampfanlage ist darin begründet, dass bei der Air-Cycle Anlage der betrachteten Generation die Turbine ständig, unabhängig von Kühl- oder Heizbetrieb, über aktive Magnetlager in einer Schwebeposition gehalten wird, um die Turbine vor potentiell lebensdauerverkürzenden Vibrationen und Stößen zu schützen.

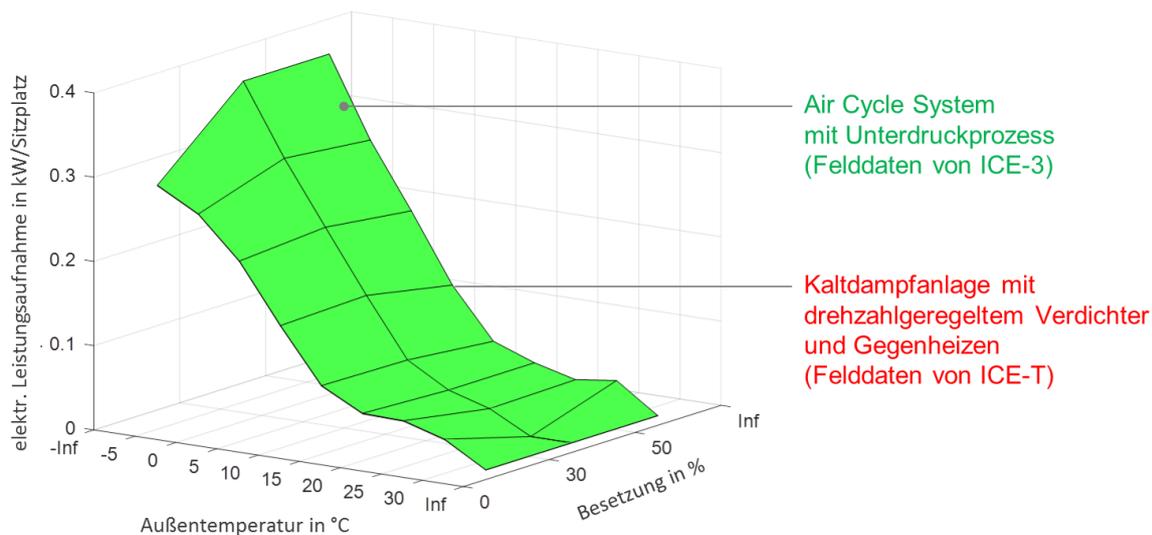
Abbildung 104: Primärer Leistungsbedarf für Kühlen, Vergleich für Anlagen mit tatsächlichen Messdaten



Leistungsbedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. ohne Wirkungsgrade des Bordnetzes.

Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 105: Primärer Leistungsbedarf für Heizen, Vergleich für Anlagen mit tatsächlichen Messdaten



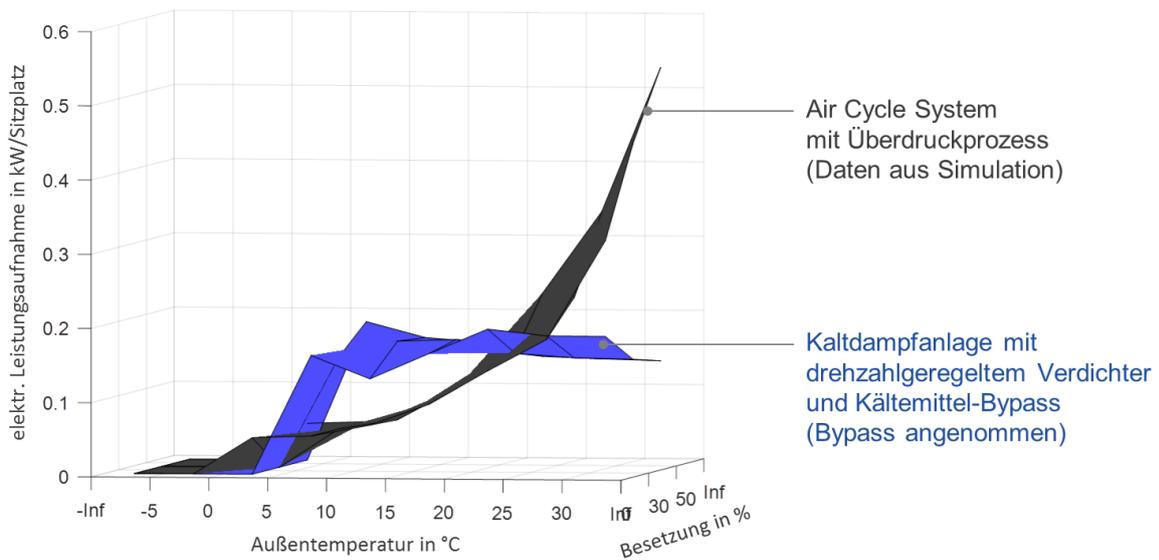
Die Fläche für die Kaltdampfanlage liegt geringfügig unter der grünen Fläche für das Air-Cycle System und ist durch die grüne Fläche verdeckt. Leistungsbedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. ohne Wirkungsgrade des Bordnetzes.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleich des Leistungsbedarfs der Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation (Vergleichssystem 6) mit der Kaltdampfanlage (VCS) gemäß ICE-T jedoch mit angenommenem Bypass statt Gegenheizen (Vergleichssystem 3)

Hierbei handelt es sich um eine weiterentwickelte VCS- bzw. ACS-Anlage, wobei keine unmittelbaren Felddaten als Vergleichsbasis verfügbar waren. Wegen der unterschiedlichen Datenbasis erfolgt daher auch die Ergebnisdiskussion für die Vergleichssysteme 1 und 2 separat von der für die Vergleichssysteme 3 und 6.

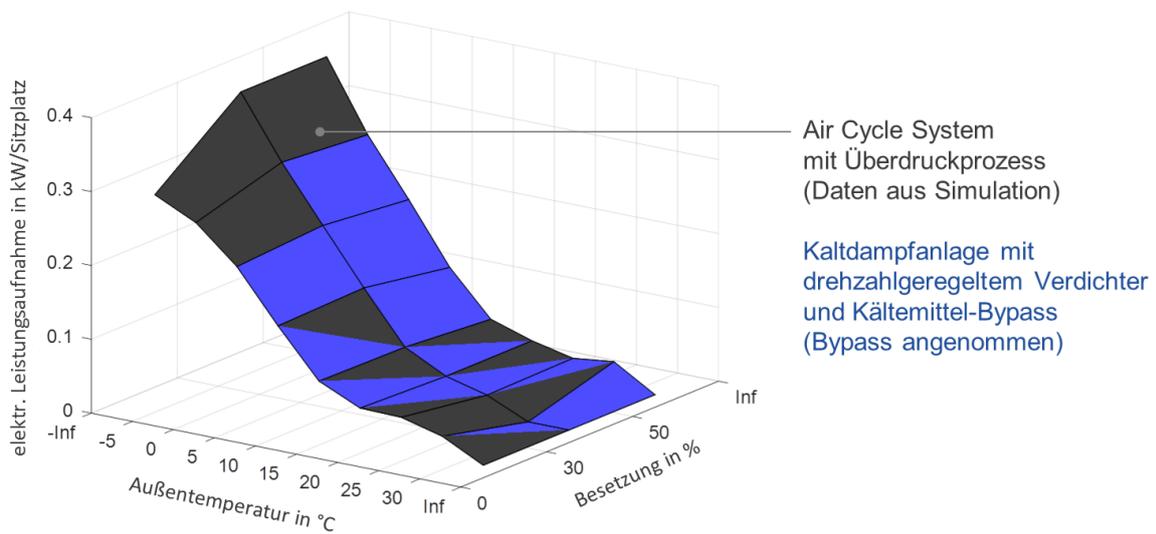
Abbildung 106 und Abbildung 107 zeigen in Analogie zum vorherigen Abschnitt für die Vergleichssysteme 1 und 2 den primären elektrischen Leistungsbedarf für Kühlen bzw. Heizen für die Vergleichssysteme 3 und 6. Die Werte der hier dargestellten Leistungsaufnahme beziehen sich auf die Geräteschnittstelle, beinhalten also keine Wirkungsgrade des Bordnetzes bis zum Pantographen. Qualitativ stellt sich der Vergleich der weiterentwickelten ACS- und VCS-Anlagen ähnlich dar wie der Vergleich der in den Zügen installierten Vergleichsanlagen 1 und 2, die im vorherigen Abschnitt diskutiert wurden. Unterschiede zwischen der weiterentwickelten ACS- und VCS-Anlage zeigen sich im Kühlbetrieb, während die Leistungsaufnahmen der beiden Anlagen für den Heizbetrieb gleich sind. Für die weiterentwickelte ACS-Anlage entfällt die Leistungsaufnahme für den Magnetlagerregler. Klar ersichtlich ist in Abbildung 106 wiederum der Effizienzvorteil der ACS-Anlage im Teillastbereich und der Vorteil der VCS-Anlage im hohen Lastbereich.

Abbildung 106: Primärer Leistungsbedarf für Kühlen, Vergleich für Anlagen mit Daten aus Modellen/Berechnung



Leistungsbedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. ohne Wirkungsgrade des Bordnetzes.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 107: Primärer Leistungsbedarf für Heizen, Vergleich für Anlagen mit Daten aus Modellen/Berechnung



Die beiden Flächen fallen zusammen. Leistungsbedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. ohne Wirkungsgrade des Bordnetzes. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.4.1.2 Vergleich des Jahresenergiebedarfs

Die absoluten Zahlen zum elektrischen Energiebedarf stellen die Basis für Aussagen zu den Energiekosten als wesentlichen Teil der Life Cycle Kosten (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) sowie für Aussagen zur Umweltauswirkung (insbesondere CO₂-Emission in Abhängigkeit vom verwendeten Strom-Mix) dar.

Der jeweils ausgewiesene Energiebedarf bezieht sich gemäß Abschnitt 2.3.3.6 auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr. Diese Anzahl an Betriebsstunden entspricht 18 Stunden pro Tag für 365 Tage im Jahr.

Für die Klassengewichtung wurde gemäß Abschnitt 2.3.3.6 (Schritt 2) vorgegangen. Für die Temperaturverteilung wurde auf die Testreferenzjahre für Braunlage, Kassel und Mannheim zurückgegriffen und eine Einsatzzeit im Komfortbetrieb von 04:00 bis 24:00 Uhr zugrunde gelegt. Darüber hinaus wurde die Klassengewichtung aus den Häufigkeiten in den Felddaten betrachtet. Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

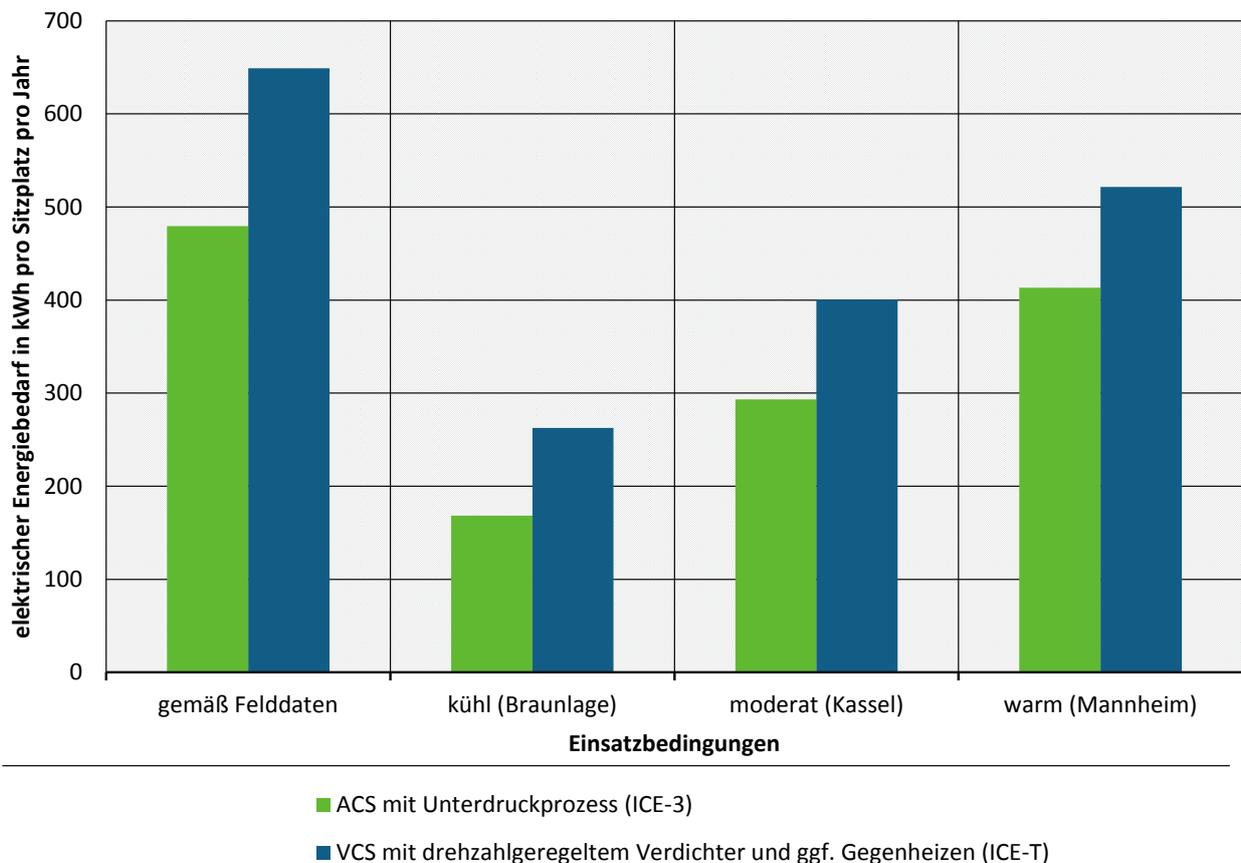
Vergleich des Energiebedarfs der Air-Cycle Anlage (ACS) im ICE 3 (Vergleichssystem 1) mit der Kaltdampfanlage (VCS) im ICE-T (Vergleichssystem 2)

Abbildung 108, Abbildung 109, Abbildung 110 und Tabelle 9 zeigen den gesamten primären Energiebedarf für Kühlen, für Heizen sowie für Kühlen und Heizen für die messtechnisch betrachteten HLK-Systeme (Vergleichssysteme 1 und 2). Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinatenachsen (y-Achsen) in den Diagrammen. Der angegebene Energiebedarf bezieht sich jeweils auf die Geräteschnittstelle des HLK-Geräts. Wirkungsgrade für das Bordnetz bis zum Pantographen sind daher nicht enthalten. Tabelle 9 fasst die Vergleichsergebnisse zusammen.

Der technische Unterschied zwischen den Anlagen liegt im Kühlbetrieb und ist in Abbildung 108 deutlich erkennbar. Das Energieeinsparpotenzial durch ACS, wie beim ICE 3 im Feldeinsatz gemessen, im Vergleich zu VCS mit einem drehzahlgeregeltem Verdichter und Gegenheizen für den unteren Teillastbereich, wie bei ICE-T im Feldeinsatz gemessen, ist abhängig von den Einsatzbedingungen (Temperaturverteilung und Passagierverteilung) und damit von der Klimazone. Für den Kühlbetrieb zeigte die Auswertung ein Einsparpotenzial im Kühlbetrieb von 21% für die betrachtete warme Klimazone (Mannheim) und bis zu 36% für die betrachtete kühle Klimazone (Braunlage).

Wie in Abschnitt 2.3.3.6 gezeigt wurde, war die Temperaturverteilung während des Messzeitraumes im Vergleich zur Temperaturverteilung aus den repräsentativen Jahren (Testreferenzjahren) zu höheren Temperaturen verschoben. Die tendenziell höheren Umgebungstemperaturen zeigen sich in Abbildung 108 durch den höheren Kühl-Jahresenergiebedarf für die Einsatzbedingungen „gemäß Felddaten“ verglichen mit den Einsatzbedingungen „kühl (Braunlage)“, „Kassel (moderat)“ und „warm (Mannheim)“. Betroffen sind grundsätzlich beide Anlagen, ACS und VCS. Für Einsatzbedingungen „gemäß Felddaten“ hat die ACS verglichen mit der VCS einen rund 26% niedrigeren Energiebedarf. Im Heizbetrieb führen die höheren Umgebungstemperaturen für die Einsatzbedingungen „gemäß Felddaten“ zu einer niedrigeren Energieaufnahme verglichen mit den übrigen Einsatzbedingungen.

Abbildung 108: Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfzanlage VCS (ICE-T) im Vergleich



Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess (gem. Implementierung im ICE 3) und die Kaltdampfzanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und ggf. Gegenheizen (gem. Implementierung im ICE-T) (Datenbasis: Felddaten); Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr. Energiebedarf ist bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Wie in Abbildung 109 zu erkennen ist, zeigen sich im Heizbetrieb kaum Unterschiede aufgrund des Einsatzes der gleichen Heiztechnik in den betrachteten Anlagen. Die ICE 3 Air-Cycle Anlage hat aufgrund der dauerhaften Aktivierung der Magnetlager einen geringfügig erhöhten Verbrauch (1% oder weniger).

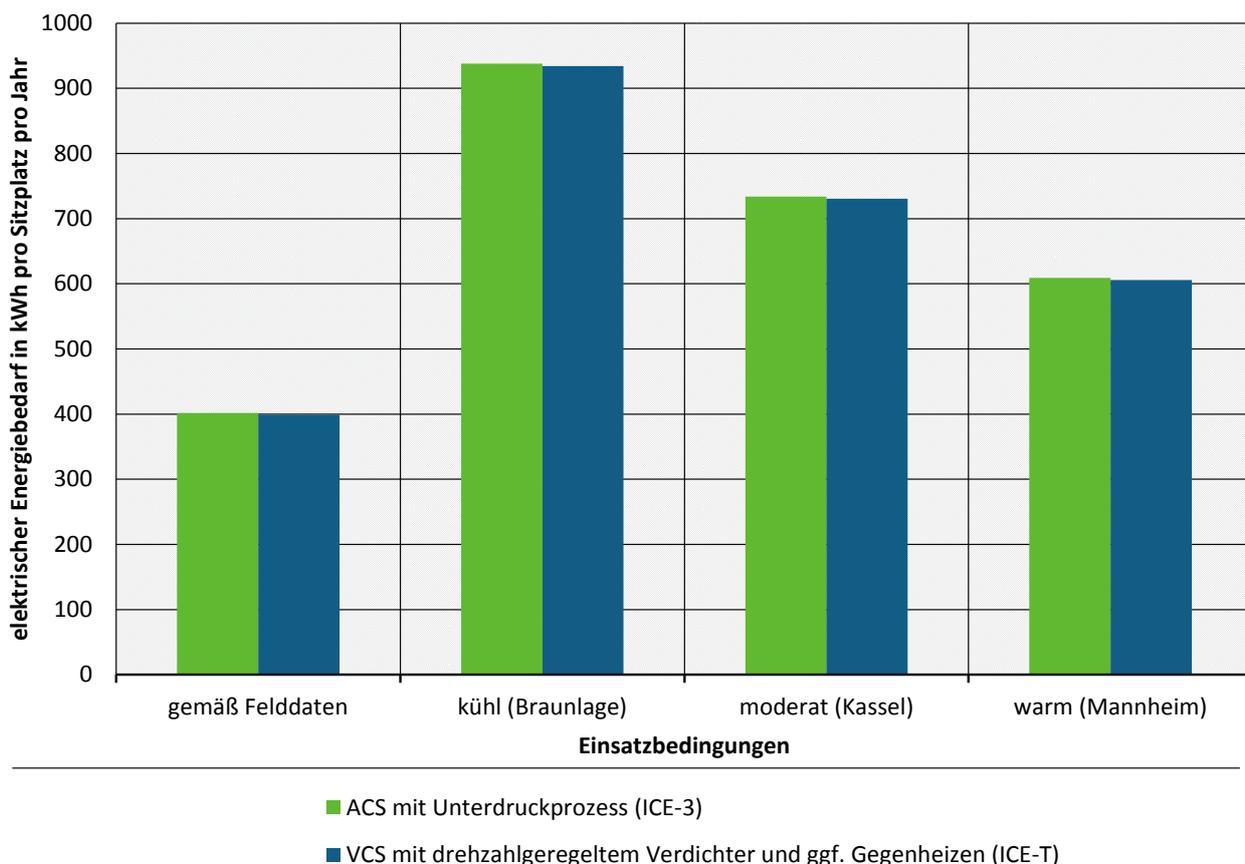
Betrachtet man den Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb und Heizbetrieb in Summe, zeigen sich für ACS Einsparungen von 9% (Kassel und Mannheim, Testreferenzjahre) bis zu 16% (Einsatzbedingungen gemäß Felddaten) gegenüber VCS. Das höhere Einsparpotenzial für die Einsatzbedingungen gemäß Felddaten erklärt sich damit, dass bei der gefundenen Temperaturverteilung der Heizanteil im Vergleich zum Kühlanteil geringer ausfällt als bei den übrigen Einsatzbedingungen. Die Vorteile der ACS im Kühlbetrieb wirken sich daher auf das Gesamtergebnis stärker aus.

Wie in Abschnitt 1.4.3 zusammengefasst, wurde von (Meister, 2012) eine sehr ähnliche Untersuchung durchgeführt. Allerdings sind die Rahmenbedingungen für die Studie von Meister und die vorliegende Studie unterschiedlich, vergleiche hierzu Abschnitt 2.3.3.7. Dementsprechend weisen auch die Ergebnisse der beiden Untersuchungen Unterschiede auf. Die absoluten Zahlen zum Jahresenergiebedarf unterscheiden sich insbesondere wegen unterschiedlicher zugrunde gelegter Betriebsstunden, unter-

schiedlicher Verteilungen der Modelleingangsparameter (Gewichtungsmatrizen) und einer unterschiedlichen untere Grenztemperatur für die Betrachtung des Kühlbetriebs in der Klasseneinteilung.

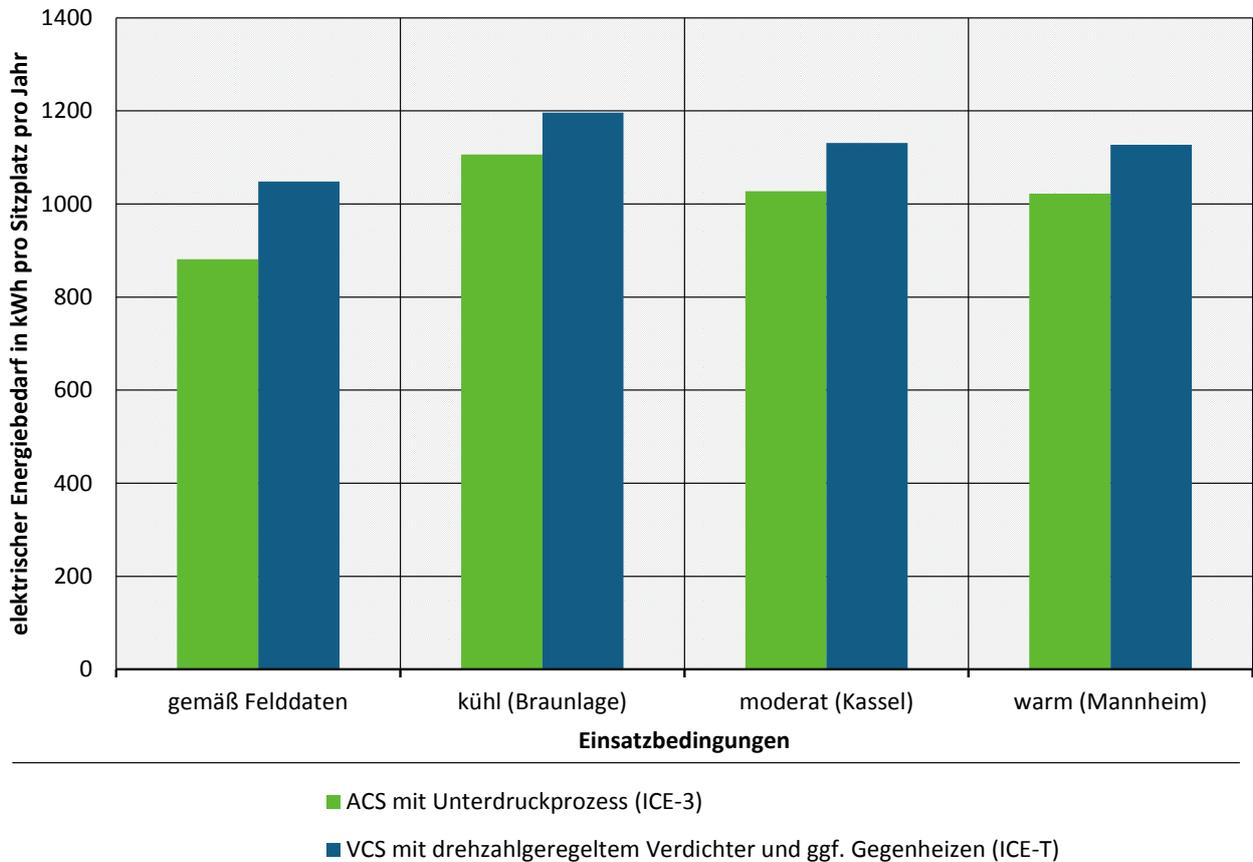
Der relative Vergleich des Jahresenergiebedarfs für den Kühlbetrieb der betrachteten Anlagen lieferte für die beiden Untersuchungen sehr ähnliche Ergebnisse mit nur wenigen Prozentpunkten Unterschied. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Ergebnisse für den Jahresenergiebedarf in der vorliegenden Studie in einer plausiblen Größenordnung liegen.

Abbildung 109: Primärer Jahresenergiebedarf im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich



Jahresenergiebedarf im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess (gem. Implementierung im ICE 3) und die Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und ggf. Gegenheizen (gem. Implementierung im ICE-T) (Datenbasis: Felddaten); Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfort-betrieb pro Jahr; Energiebedarf ist bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 110: Summe des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich



Summe des Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess (gem. Implementierung im ICE 3) und die Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und ggf. Gegenheizen (gem. Implementierung im ICE-T) (Datenbasis: Felddaten); Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf ist bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Tabelle 9: Vergleich des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit der Kaltdampfananlage (ICE-T)

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_UntDP ICE 3 | Messung kWh / (Sitzplatz x Jahr)	VCS_f/U_GH ICE-T | Messung kWh / (Sitzplatz x Jahr)	absolut ACS_UntDP - VCS_f/U_GH kWh / (Sitzplatz x Jahr)	relativ ACS_UntDP / VCS_f/U_GH
Kühlen				
gemäß Felddaten	479,5	649,0	-169,5	74%
kühl (Braunlage)	168,4	262,5	-94,1	64%
moderat (Kassel)	293,4	400,5	-107,2	73%
warm (Mannheim)	413,2	521,5	-108,3	79%
Heizen				
gemäß Felddaten	401,8	399,1	2,7	101%
kühl (Braunlage)	937,8	934,1	3,7	100%
moderat (Kassel)	733,9	730,6	3,3	100%
warm (Mannheim)	608,8	605,9	3,0	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	881,3	1048,1	-166,9	84%
kühl (Braunlage)	1106,2	1196,6	-90,3	92%
moderat (Kassel)	1027,3	1131,1	-103,8	91%
warm (Mannheim)	1022,0	1127,4	-105,3	91%

ACS_UntDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess

VCS_f/U_GH: Kaltdampfananlage (VCS) mit drehzahlregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen

Vergleich des Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ACS) im ICE 3 mit der Kaltdampfananlage (VCS) im ICE-T
Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen

Tabelle 10 fasst die Vergleichsergebnisse für die sekundären Energiebedarfe infolge des Impulswiderstandes der angesaugten Luft für die Vergleichssysteme 1 und 2 zusammen. Abbildung 111 zeigt den sekundären Jahresenergiebedarf für Heizen und Kühlen in Summe. Die angegebenen Energiebedarfe beziehen sich hier, im Gegensatz zu den oben dargestellten primären Energiebedarfen, nicht auf die Geräteschnittstelle, sondern bereits auf den Pantographen. Damit sind die Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz enthalten.

Tabelle 10: Vergleich des sekundären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit der Kaldampfanlage (ICE-T)

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_UntDP ICE 3 | Messung kWh / (Sitzplatz · Jahr)	VCS_f/U_GH ICE-T | Messung kWh / (Sitzplatz · Jahr)	absolut ACS_UntDP - VCS_f/U_GH kWh / (Sitzplatz · Jahr)	relativ ACS_UntDP / VCS_f/U_GH %
Kühlen				
gemäß Felddaten	54,7	131,6	-76,9	42%
kühl (Braunlage)	22,1	50,8	-28,7	44%
moderat (Kassel)	34,6	82,4	-47,7	42%
warm (Mannheim)	45,8	112,0	-66,2	41%
Heizen				
gemäß Felddaten	24,3	24,2	0,1	100%
kühl (Braunlage)	36,5	36,4	0,1	100%
moderat (Kassel)	32,4	32,4	0,1	100%
warm (Mannheim)	28,8	28,8	0,1	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	79,0	155,8	-76,8	51%
kühl (Braunlage)	58,6	87,2	-28,6	67%
moderat (Kassel)	67,1	114,7	-47,7	58%
warm (Mannheim)	74,6	140,8	-66,1	53%

ACS_UntDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess

VCS_f/U_GH: Kaldampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen

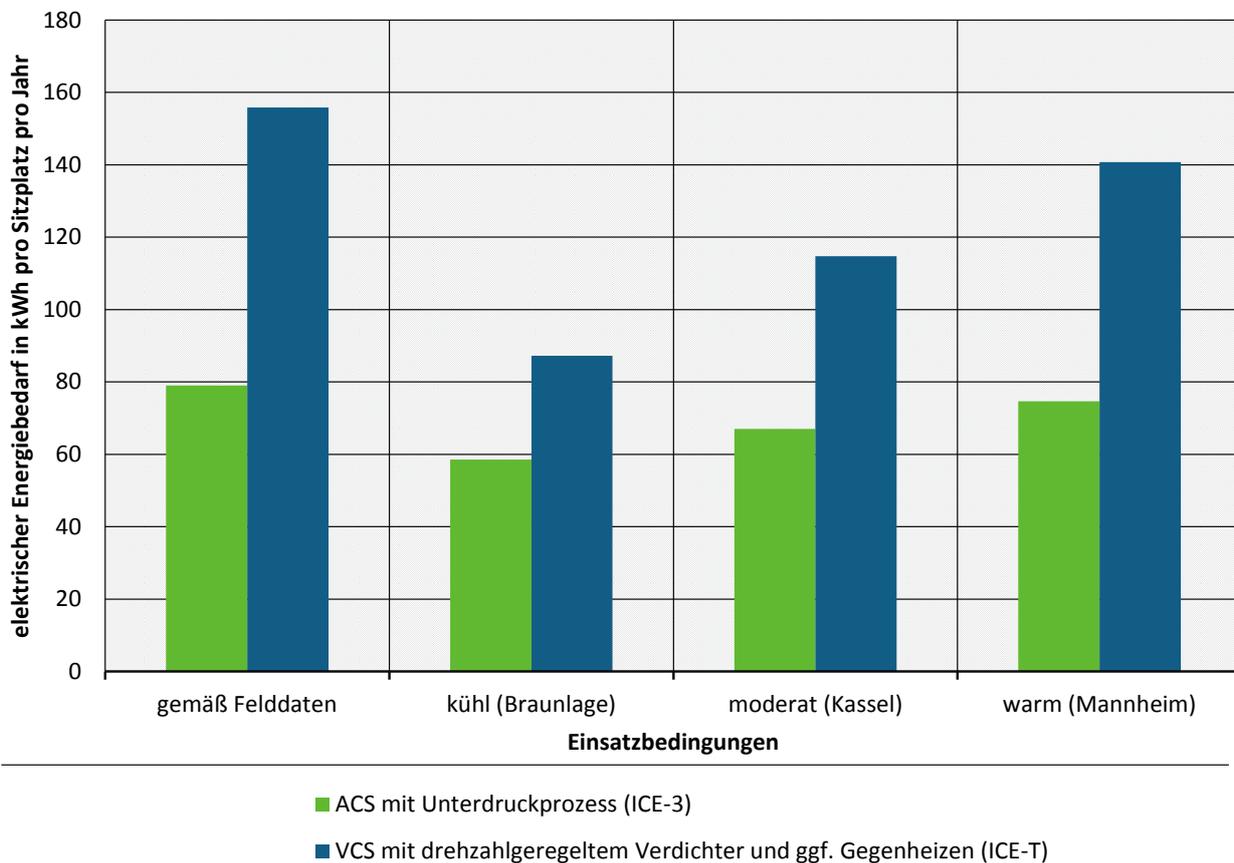
Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrad für Traktion und Bordnetz

Während es zwischen den betrachteten Anlagen keinen Unterschied hinsichtlich der erforderlichen Frischluftmenge für den Fahrgastraum gibt – die Frischluftregelung in beiden Anlagen ist besetzungsabhängig (Regelung des CO₂-Gehalts im Fahrgastraum) –, ist der erforderliche anzusaugende Luftmassenstrom zur Kühlung bei der Air-Cycle Anlage (Vergleichssystem 1; Prozessluftmassenstrom) deutlich geringer als bei der Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 2; Kondensatorluftmassenstrom). Wie aus Tabelle 10 (Spalte zum relativen Vergleich) unmittelbar ersichtlich ist, ermöglicht daher die Air-Cycle-Technologie (Vergleichssystem 1) im Kühlbetrieb eine beachtliche Reduktion des sekundären Energiebedarfs von über 50% gegenüber der Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 2).

Im Heizbetrieb besteht kein Unterschied bezüglich des anzusaugenden Luftmassenstroms zwischen den Technologien, weil im Heizbetrieb lediglich der für alle Anlagen gleiche Frischluftbedarf der Passagiere gedeckt werden muss. Im Heizbetrieb entfällt der hohe Luftmassenstrom für Kondensatorluft bzw. Prozessluft vollständig, weil es für die betrachteten Anlagen keinen Wärmepumpenbetrieb gibt.

Abbildung 111: Sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich



ACS gem. Implementierung in ICE 3 versus VCS gem. Implementierung in ICE-T (Datenbasis: Felddaten);
 Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;
 Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrad für Traktion und Bordnetz.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Tabelle 11 fasst die Ergebnisse für die Summe aus primärem und sekundärem Energiebedarf für die Vergleichssysteme 1 und 2 zusammen. Abbildung 112 zeigt die Summe aus primärem und sekundärem Energiebedarf für Heizen und Kühlen in Summe. Die angegebenen Energiebedarfe beziehen sich hier nicht auf die Geräteschnittstelle, sondern auf den Pantographen. Damit sind die Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz für den primären und sekundären Energiebedarf enthalten.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der primäre Energiebedarf für die Vergleichssysteme 1 und 2 aus Felddaten abgeleitet wurde, während zur Berechnung des sekundären Energiebedarfs infolge des Impulswiderstandes ein analytischer Ansatz gewählt wurde.

Für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde die Summe des primären und sekundären Jahresenergiebedarfs herangezogen.

Tabelle 11: Vergleich der Summe des primären und sekundären Jahresenergiebedarfs der Air-Cycle Anlage (ICE 3) mit dem der Kaltdampfanlage (ICE-T)

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_UntDP ICE 3 | Messung kWh / (Sitzplatz · Jahr)	VCS_f/U_GH ICE-T | Messung kWh / (Sitzplatz · Jahr)	absolut ACS_UntDP - VCS_f/U_GH kWh / (Sitzplatz · Jahr)	relativ ACS_UntDP / VCS_f/U_GH %
Kühlen				
gemäß Felddaten	573,1	833,3	-260,1	69%
kühl (Braunlage)	204,2	334,6	-130,4	61%
moderat (Kassel)	351,8	515,4	-163,6	68%
warm (Mannheim)	492,5	675,8	-183,3	73%
Heizen				
gemäß Felddaten	458,6	455,7	2,9	101%
kühl (Braunlage)	1050,3	1046,2	4,1	100%
moderat (Kassel)	825,8	822,2	3,7	100%
warm (Mannheim)	687,0	683,8	3,3	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	1031,8	1289,0	-257,2	80%
kühl (Braunlage)	1254,5	1380,8	-126,3	91%
moderat (Kassel)	1177,6	1337,6	-159,9	88%
warm (Mannheim)	1179,5	1359,5	-180,0	87%

ACS_UntDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Unterdruckprozess

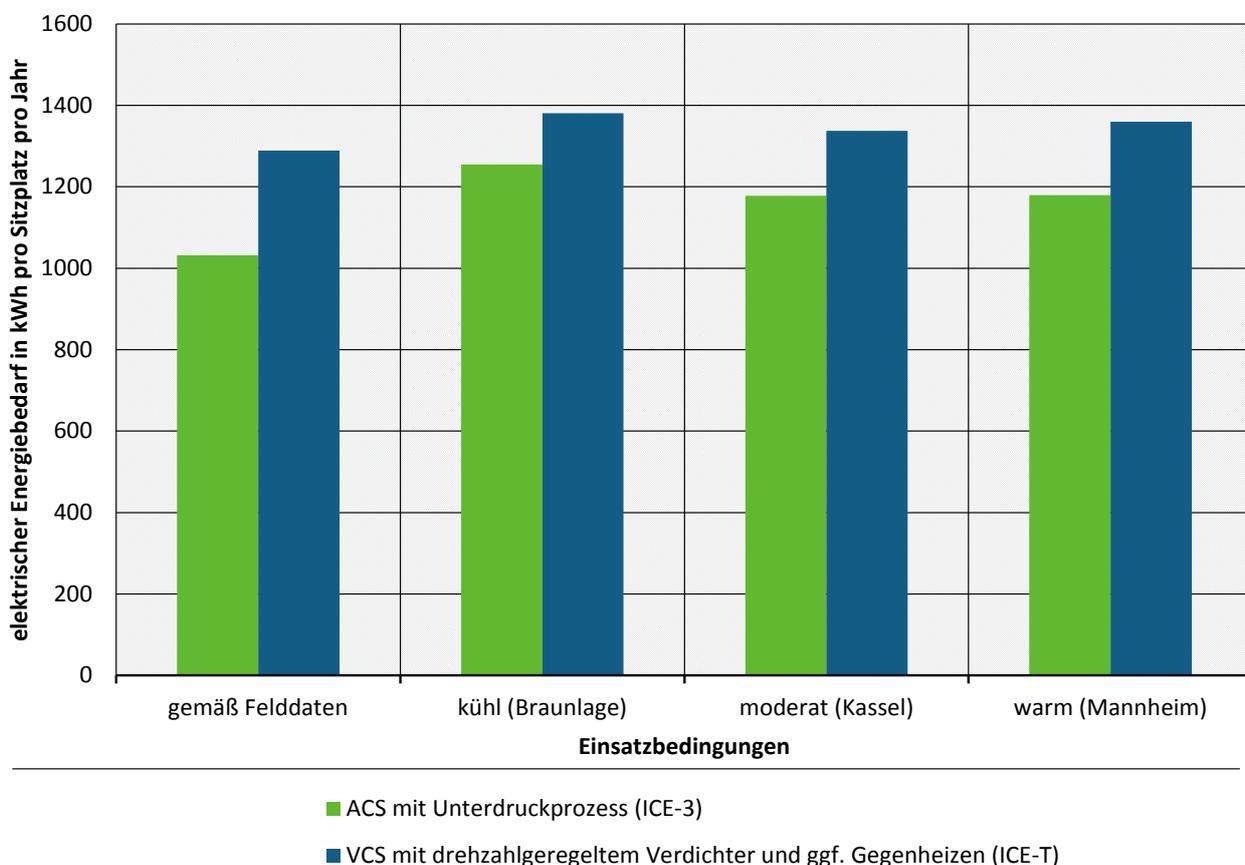
VCS_f/U_GH: Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen

Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz

Vergleicht man Tabelle 9 (primärer Energiebedarf) und Tabelle 11 (Summe primärer und sekundärer Energiebedarf), wird deutlich, dass sich ein weiterer Energieeffizienz-Vorteil für das Vergleichssystem 1 (Air-Cycle Anlage) gegenüber Vergleichssystem 2 (Kaltdampfanlage) durch den geringen sekundären Energiebedarf ergibt: Je nach Einsatzbedingungen kann für die Air-Cycle Anlage (Vergleichssystem 1) in der Gesamtbetrachtung mit sekundärem Energiebedarf für Kühl- und Heizbetrieb in Summe eine Einsparung von 9% bis 20% gegenüber der betrachteten Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 2) erreicht werden (vgl. Tabelle 11, letzte Zeile). Für den Kühlbetrieb alleine betrachtet liegt die Einsparung für die Air-Cycle Anlage im Bereich von 27% bis 39% gegenüber der Kaltdampfanlage (vgl. Tabelle 11, 1. Zeile).

Abbildung 112: Summe von primärem und sekundärem Jahresenergiebedarf für die Air-Cycle Anlage ACS (ICE 3) und die Kaltdampfanlage VCS (ICE-T) im Vergleich



ACS gem. Implementierung in ICE 3 versus VCS gem. Implementierung in ICE-T (Datenbasis: Felddaten);
 Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;
 Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleich der Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation (Vergleichssystem 6) mit der Kaltdampfanlage (VCS) gemäß ICE-T, jedoch mit angenommenem Bypass statt Gegenheizen (Vergleichssystem 3)

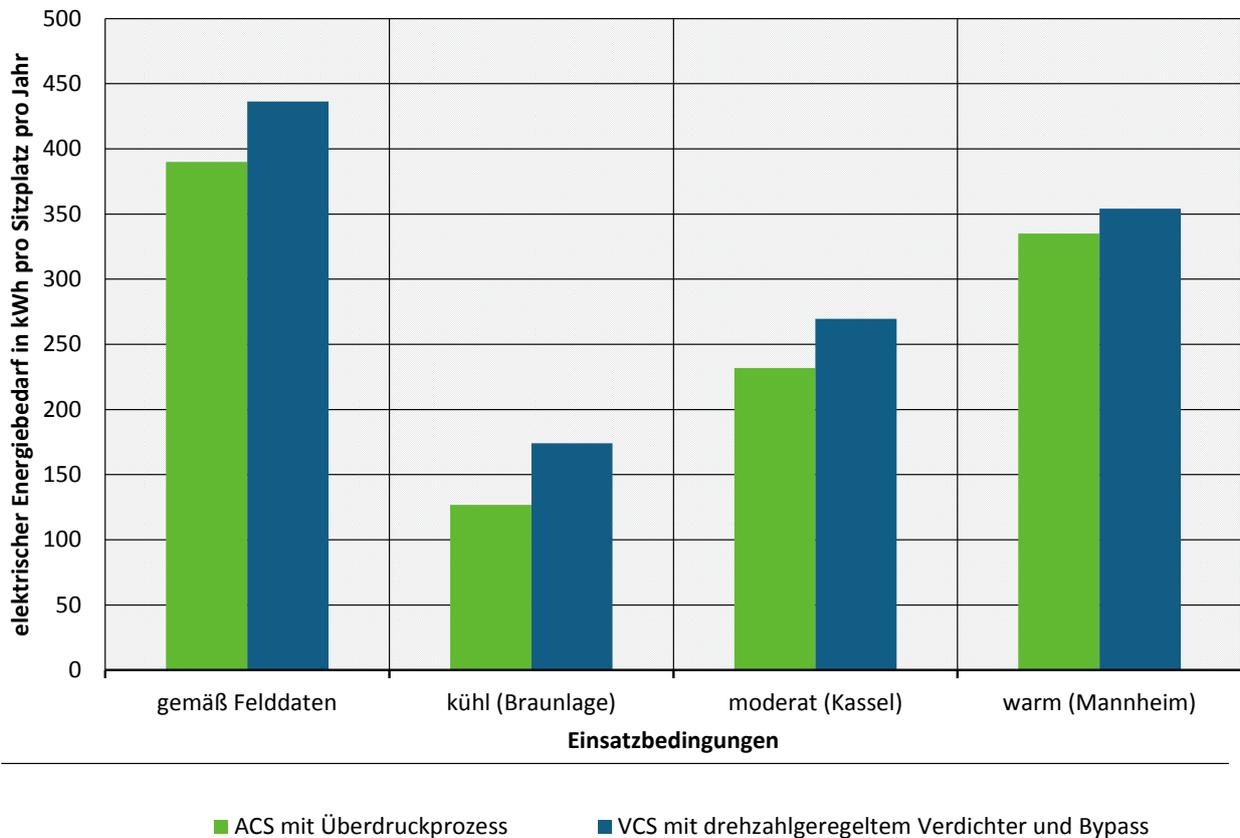
Abbildung 113, Abbildung 114, Abbildung 115 und Tabelle 12 zeigen den primären Energiebedarf für Kühlen, für Heizen sowie für Kühlen und Heizen aufsummiert für die basierend auf Simulation/Berechnung betrachteten HLK-Systeme (Vergleichssysteme 6 und 3). Zu beachten ist die jeweils angepasste und damit unterschiedliche Skalierung der Ordinatenachsen (y-Achse) in den Diagrammen. Die angegebenen Energiebedarfe beziehen sich jeweils auf die Geräteschnittstelle des HLK-Gerätes. Wirkungsgrade für das Bordnetz bis zum Pantographen sind daher nicht enthalten. Tabelle 12 fasst die Vergleichsergebnisse zusammen.

Der technische Unterschied zwischen den Anlagen liegt auch hier wieder im Kühlbetrieb. Im Vergleich der ACS-Anlage zur VCS-Anlage zeigte die Auswertung ein Einsparpotenzial von 5% für die betrachtete warme Klimazone (Mannheim) bis zu 27% für die betrachtete kühle Klimazone (Braunlage). Für die Einsatzbedingungen gemäß Felddaten zeigte sich für die ACS ein Einsparpotenzial von 11%, wobei die zu höheren Temperaturen verschobene Temperaturverteilung während des Messzeitraumes im Vergleich zur Temperaturverteilung aus den repräsentativen Jahren (Testreferenzjahren) bei der Bewertung zu beachten ist.

Wie in Abbildung 114 zum Energiebedarf im Heizbetrieb zu erkennen ist, zeigen sich im Heizbetrieb keine Unterschiede, weil es bei der weiterentwickelten/optimierten ACS-Anlage keine dauerhaft aktivierten Magnetlager mehr gibt.

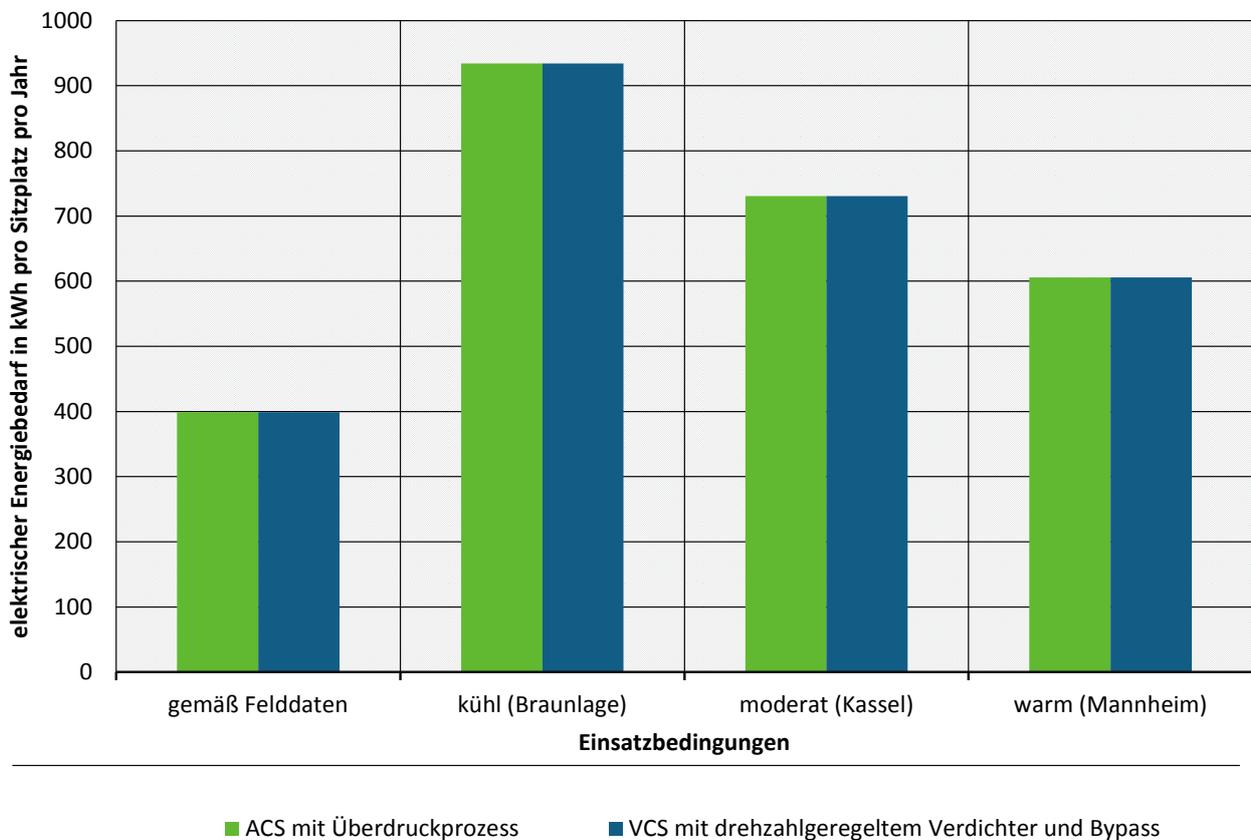
Betrachtet man den primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb und im Heizbetrieb in Summe, zeigen sich für die Air-Cycle Anlage Einsparungen von 2% (Mannheim, Testreferenzjahre) bis 6% (Einsatzbedingungen gemäß Felddaten) gegenüber der verbesserten Kaltdampfanlage.

Abbildung 113: Primärer Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich



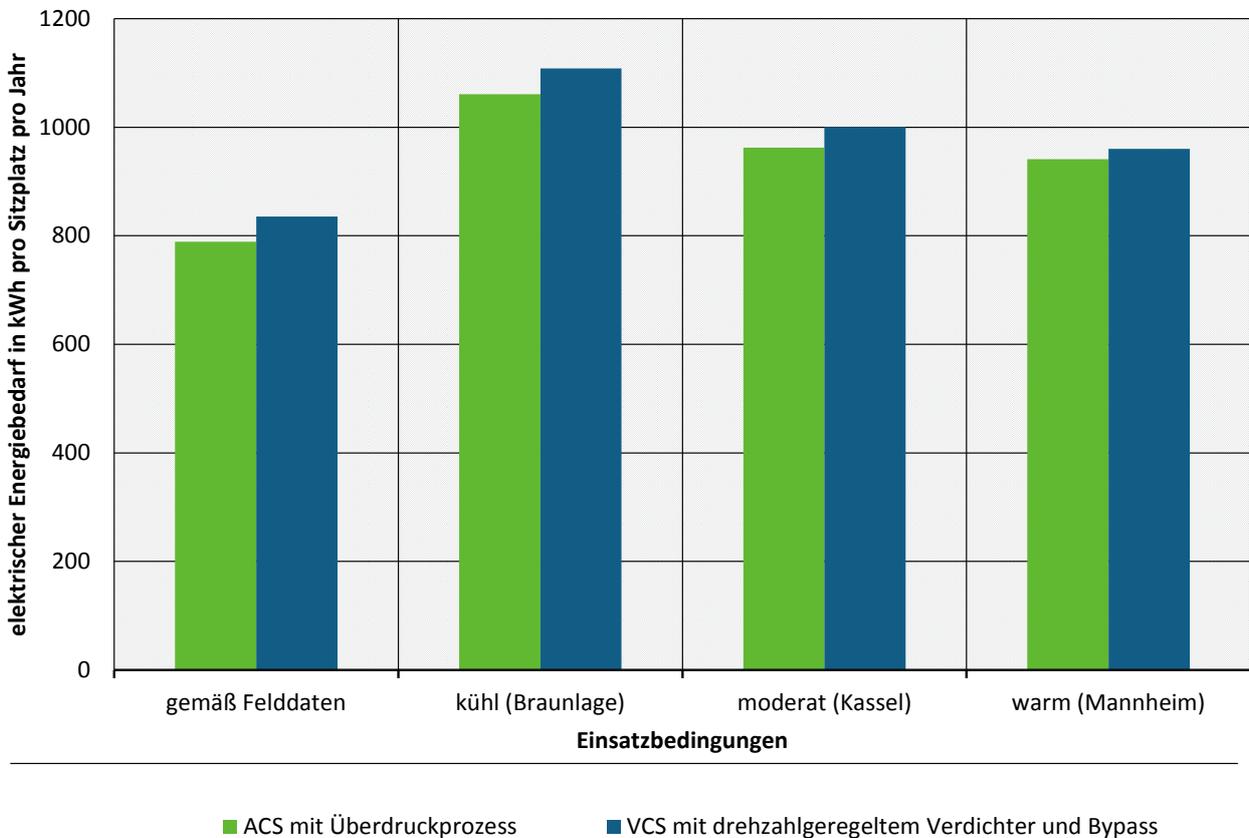
Vergleich des Jahresenergiebedarfs im Kühlbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter (VCS) gemäß ICE-T und mit angenommenen Kältemittel-Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 114: Primärer Jahresenergiebedarf im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich



Vergleich des Jahresenergiebedarfs im Heizbetrieb für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter (VCS) gemäß ICE-T und mit angenommenen Kältemittel-Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Abbildung 115: Summe des primären Jahresenergiebedarfs für Kühlen und Heizen für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich



Vergleich des gesamten Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess aus Simulation mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter (VCS) gemäß ICE-T und mit angenommenen Kältemittel-Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf ist bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Tabelle 12: Vergleich des primären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_ÜbDP Simulation kWh / (Sitzplatz x Jahr)	VCS_f/U_BP Bypass: Annahme kWh / (Sitzplatz x Jahr)	absolut ACS_ÜbDP - VCS_f/U_BP kWh / (Sitzplatz x Jahr)	relativ ACS_ÜbDP / VCS_f/U_BP
Kühlen				
gemäß Felddaten	389,9	436,3	-46,4	89%
kühl (Braunlage)	126,8	174,1	-47,4	73%
moderat (Kassel)	231,9	269,5	-37,7	86%
warm (Mannheim)	335,0	354,1	-19,1	95%
Heizen				
gemäß Felddaten	399,1	399,1	0,0	100%
kühl (Braunlage)	934,1	934,1	0,0	100%
moderat (Kassel)	730,6	730,6	0,0	100%
warm (Mannheim)	605,9	605,9	0,0	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	789,0	835,5	-46,4	94%
kühl (Braunlage)	1060,8	1108,2	-47,4	96%
moderat (Kassel)	962,5	1000,1	-37,7	96%
warm (Mannheim)	940,9	959,9	-19,1	98%

ACS_ÜbDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess

VCS_f/U_BP: Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

Vergleich des Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der versus Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass.

Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Geräteschnittstelle, d.h. exklusive Wirkungsgrad des Bordnetzes bis zum Pantographen.

Tabelle 13 fasst die Vergleichsergebnisse für die sekundären Energiebedarfe infolge des Impulswiderstandes der angesaugten Luft für die Vergleichssysteme 6 und 3 zusammen. Abbildung 116 zeigt den sekundären Jahresenergiebedarf für Heizen und Kühlen in Summe. Die angegebenen Energiebedarfe beziehen sich hier, im Gegensatz zu den oben dargestellten primären Energiebedarfen, nicht auf die Geräteschnittstelle, sondern bereits auf den Pantographen. Damit sind die Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz enthalten.

Tabelle 13: Vergleich des sekundären Jahresenergiebedarfs für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_ÜbDP Simulation kWh / (Sitzplatz · Jahr)	VCS_f/U_BP Bypass: Annah- me kWh / (Sitzplatz · Jahr)	absolut ACS_ÜbDP - VCS_f/U_BP kWh / (Sitzplatz · Jahr)	relativ ACS_ÜbDP / VCS_f/U_BP %
Kühlen				
gemäß Felddaten	71,4	130,5	-59,1	55%
kühl (Braunlage)	29,1	49,2	-20,1	59%
moderat (Kassel)	45,1	80,8	-35,7	56%
warm (Mannheim)	59,3	110,5	-51,2	54%
Heizen				
gemäß Felddaten	24,3	24,2	0,1	100%
kühl (Braunlage)	36,5	36,4	0,1	100%
moderat (Kassel)	32,4	32,4	0,1	100%
warm (Mannheim)	28,8	28,8	0,1	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	95,7	154,8	-59,1	62%
kühl (Braunlage)	65,6	85,6	-20,0	77%
moderat (Kassel)	77,5	113,2	-35,6	69%
warm (Mannheim)	88,1	139,3	-51,1	63%

ACS_ÜbDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess

VCS_f/U_BP: Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

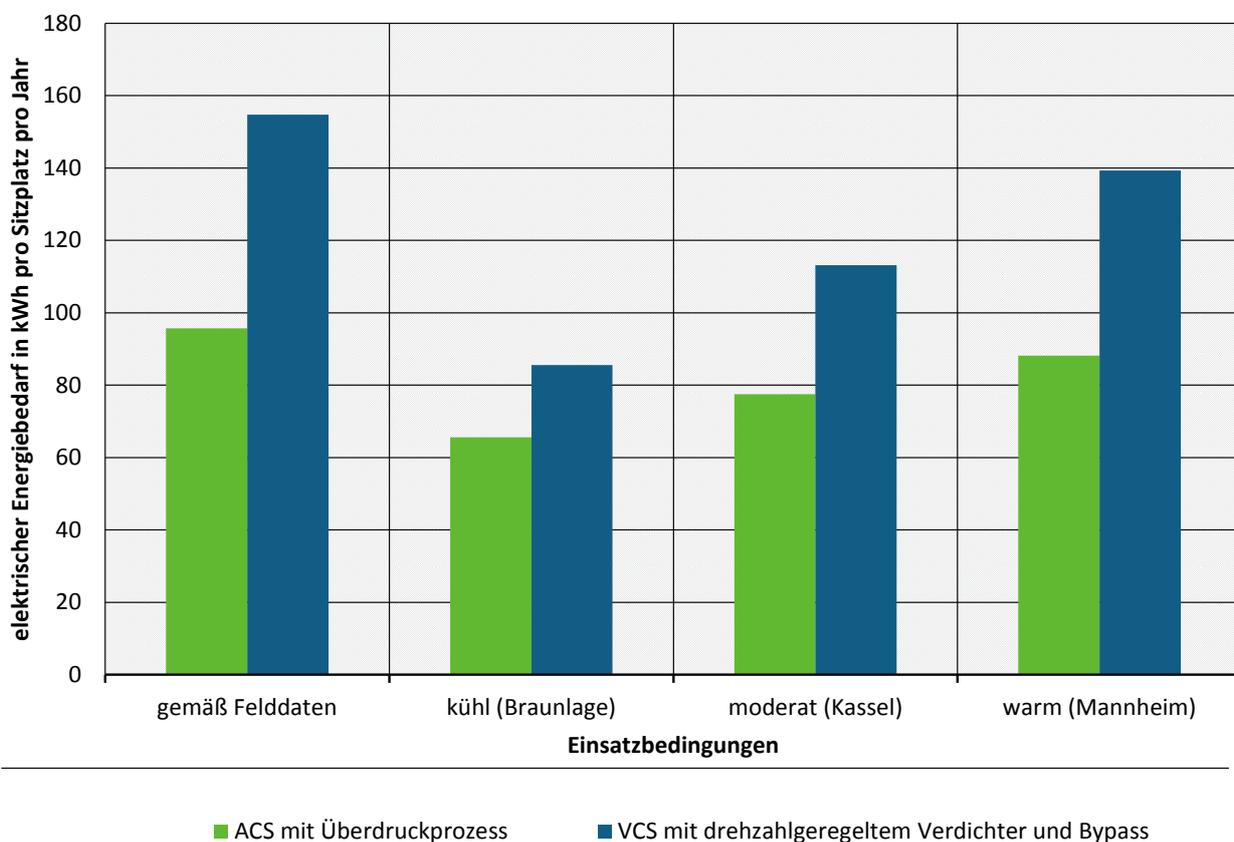
Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrad für Traktion und Bordnetz.

Während es zwischen den betrachteten Anlagen keinen Unterschied hinsichtlich der erforderlichen Frischluftmenge für den Fahrgastraum gibt – die Frischluftregelung in beiden Anlagen ist besetzungsabhängig (Regelung des CO₂-Gehalts im Fahrgastraum) – ist der erforderliche anzusaugende Luftmassenstrom zur Kühlung bei der Air-Cycle Anlage (Vergleichssystem 6) deutlich geringer als bei der Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 3). Wie aus Tabelle 13 (Spalte zum relativen Vergleich) unmittelbar ersichtlich ist, ermöglicht daher die Air-Cycle Technik (Vergleichssystem 6) im Kühlbetrieb eine beachtliche Reduktion des sekundären Energiebedarfs von über 40% gegenüber der Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 3).

Im Heizbetrieb besteht kein Unterschied bezüglich des anzusaugenden Luftmassenstroms zwischen den Techniken, weil im Heizbetrieb lediglich der für alle Anlagen gleiche Frischluftbedarf der Passagiere gedeckt werden muss.

Abbildung 116: Sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich



ACS mit Überdruckprozess aus Simulation versus VCS gem. ICE-T, jedoch mit gedachtem Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrad für Traktion und Bordnetz.
Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Tabelle 14 fasst die Vergleichsergebnisse für die Summe aus primärem und sekundärem Energiebedarf für die Vergleichssysteme 6 und 3 zusammen. Abbildung 117 zeigt die Summe aus primärem und sekundärem Energiebedarf für Heizen und Kühlen. Der jeweils angegebene Energiebedarf bezieht sich hier nicht auf die Geräteschnittstelle, sondern auf den Pantographen. Damit sind die Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz für den primären und sekundären Energiebedarf enthalten.

Die Ergebnisse für primären und sekundären Jahresenergiebedarf in Summe wurden für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen.

Tabelle 14: Vergleich des primären und sekundären Jahresenergiebedarfs in Summe für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess mit der Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

Einsatzbedingungen	Energiebedarf im Komfortbetrieb		Vergleich	
	ACS_ÜbDP Simulation kWh / (Sitzplatz · Jahr)	VCS_f/U_BP Bypass: Annahme kWh / (Sitzplatz · Jahr)	absolut ACS_ÜbDP - VCS_f/U_BP kWh / (Sitzplatz · Jahr)	relativ ACS_ÜbDP / VCS_f/U_BP %
Kühlen				
gemäß Felddaten	492,9	602,3	-109,3	82%
kühl (Braunlage)	166,2	237,5	-71,3	70%
moderat (Kassel)	295,8	372,2	-76,4	79%
warm (Mannheim)	421,5	493,3	-71,8	79%
Heizen				
gemäß Felddaten	455,8	455,7	0,1	100%
kühl (Braunlage)	1046,3	1046,2	0,1	100%
moderat (Kassel)	822,2	822,2	0,1	100%
warm (Mannheim)	683,8	683,8	0,1	100%
gesamt				
gemäß Felddaten	948,7	1058,0	-109,3	90%
kühl (Braunlage)	1212,4	1283,7	-71,2	94%
moderat (Kassel)	1118,0	1194,4	-76,3	94%
warm (Mannheim)	1105,3	1177,1	-71,8	94%

ACS_ÜbDP: Air-Cycle Anlage (ACS) mit Überdruckprozess

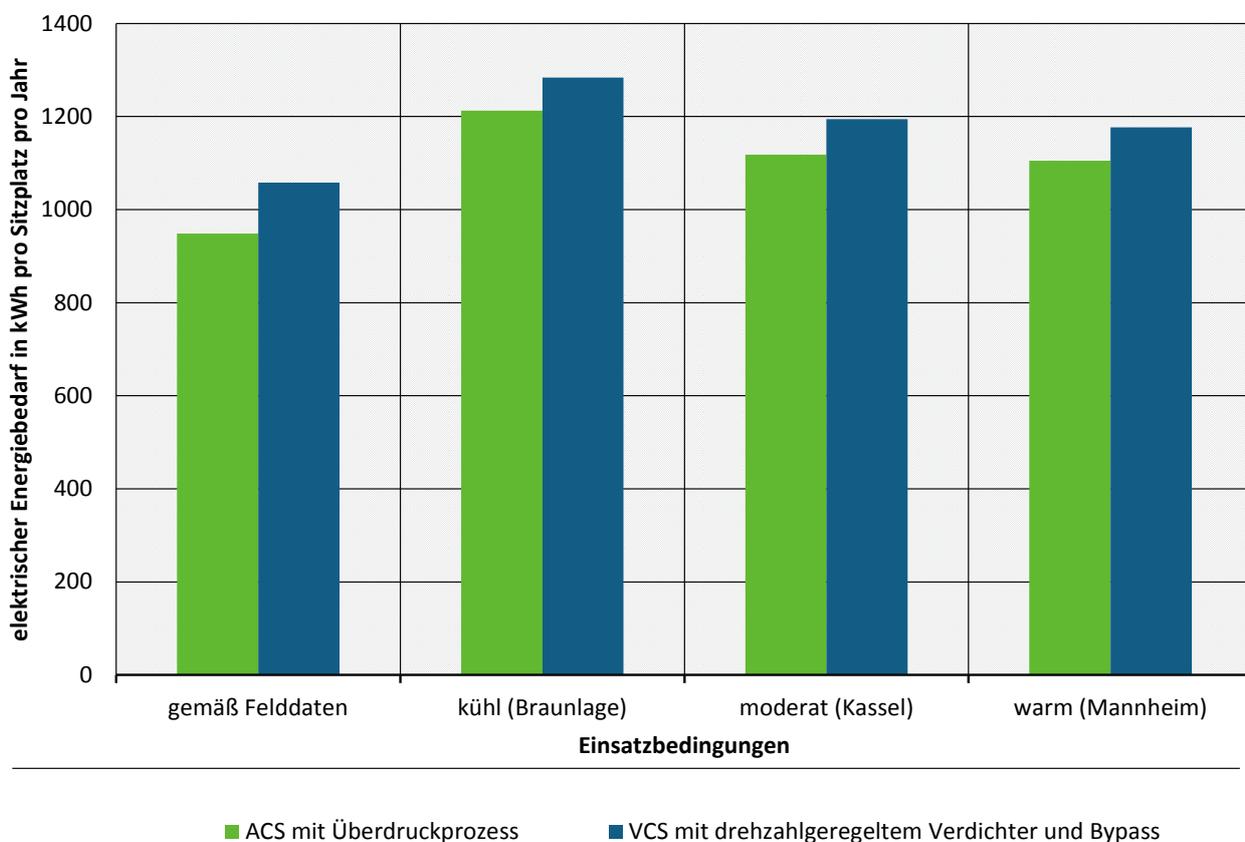
VCS_f/U_BP: Kaltdampfanlage (VCS) mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass

Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr;

Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz

Beim Vergleich von Tabelle 12 (primärer Energiebedarf) mit Tabelle 14 (Summe primärer und sekundärer Energiebedarf) wird deutlich, dass sich ein weiterer Energieeffizienz-Vorteil für Air-Cycle Anlage (Vergleichssystem 6) gegenüber der Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 3) ergibt: In Summe zeigt sich, je nach Einsatzbedingungen, für die verbesserte Air-Cycle Anlage (Vergleichssystem 6) eine Einsparung von 6% bis 10% gegenüber der betrachteten Kaltdampfanlage (Vergleichssystem 3) für Kühlbetrieb und Heizbetrieb in Summe (vgl. Tabelle 14, letzte Zeile). Für den Kühlbetrieb alleine betrachtet, beträgt die Einsparung bei der optimierten Air-Cycle-Anlage 15% bis 30% gegenüber der optimierten Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Bypass (vgl. Tabelle 14, 1. Zeile).

Abbildung 117: Primärer und sekundärer Jahresenergiebedarf gesamt für die Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess und die Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass im Vergleich



ACS mit Überdruckprozess aus Simulation versus VCS gem. ICE-T, jedoch mit gedachtem Bypass statt Gegenheizen; Energiebedarf bezogen auf 6570 Betriebsstunden im Komfortbetrieb pro Jahr; Energiebedarf bezogen auf Pantographen, d.h. inklusive Wirkungsgrade für Traktion und Bordnetz.
 Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.4.2 Gesamtanalyse der Lebenszykluskosten -LCC und Gesamtbetriebskosten -TCO

2.4.2.1 Aufbau des Werkzeugs zur Kostenanalyse - Cost Assessment Tool (CAT)

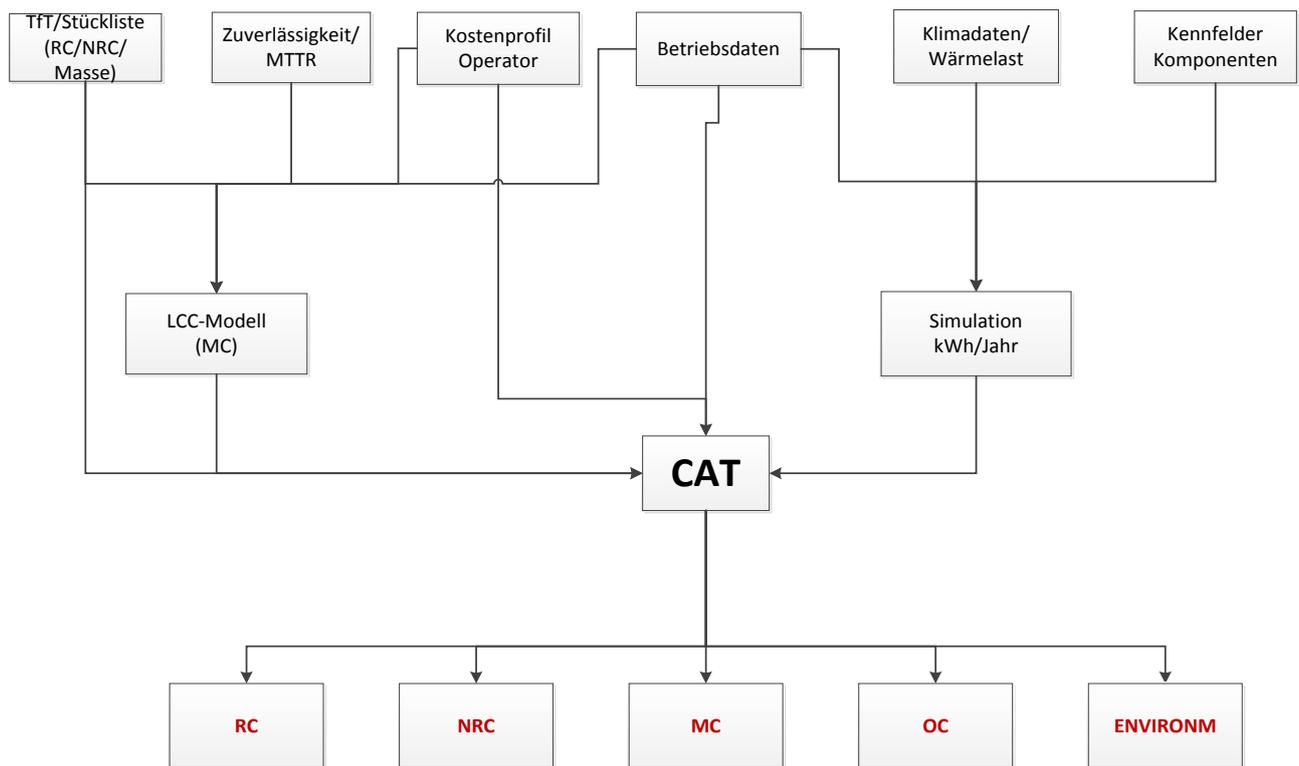
Für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungssysteme (HLK-Systeme) wurde eine umfangreiche Kostenanalyse durchgeführt. Dafür wurde ein Werkzeug verwendet, das in der Luftfahrt entwickelt wurde. Das Cost Assessment Tool (CAT) ermöglicht es, die beim Flugbetreiber auftretenden Kosten verschiedener Ausrüstungskonfigurationen miteinander zu vergleichen. Ergebnis der Betrachtung sind dabei die in der Lebenszeit des Fluggeräts anfallenden Kosten (Total Cost of Ownership) pro Flugstunde, die die Ausrüstung verursachte.

Beim Anwendungsfall für den Bahnbetrieb erfolgte die Darstellung der Kosten mit der Basis Euro pro Jahr je HLK-System (das heißt pro Wagen) bezogen auf die Lebenszeit des Eisenbahnfahrzeuges. Es können sowohl bestehende Systeme als auch zukünftige Entwicklungen miteinander verglichen werden.

Zur Generierung der Ergebnisse werden verschiedene Werkzeuge vernetzt. Die Struktur der Kostenberechnung ist in Abbildung 118 dargestellt. Die Eingangsdaten kommen aus der Kostenplanung (Teil für Teil Kostenplanung (TfT) bzw. Stückliste, daraus werden die Herstellungskosten und die Gerätemassen ermittelt. Auf Basis der Stücklisten werden im Lebenszykluskosten (LCC) Tool mit Zuverlässigkeitsdaten der Komponenten (MTTR- mean time to repair) und den Angaben des Betreibers zu Betriebsweise und Instandhaltung die Wartungskosten ermittelt.

Die Anlagensimulation greift auf die Kennfelder der Komponenten zurück und errechnet, entsprechend dem Betriebsprofil des Fahrzeuges und der Klimadaten, eine Prognose zum Energiebedarf.

Abbildung 118: Aufbau des Kostenanalysewerkzeugs -Cost Assessment Tool (CAT)



Aufbau Kostenanalysewerkzeug CAT – Cost Assessment Tool; MTTR – mean time to repair - mittlere Reparaturzeit; Tft - Teil für Teil Kostenplanung; LCC- Life cycle cost – Lebenszykluskosten, weitere Abkürzungen im Text.

Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Als Ergebnis erhält man für jede betrachtete Anlagenversion eine Aufteilung verschiedener Kostenarten auf Basis jährlicher Kosten pro HLK-Anlage:

- ▶ RC - Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten
- ▶ NRC- Non Recurring Cost / Einmalkosten (Entwicklungskosten, Engineering, Prototypenfertigung, Tests)
- ▶ MC - Maintenance Cost / Instandhaltungskosten
- ▶ OC - Operating Cost / Energiekosten
- ▶ Environm / Umweltkosten (CO₂ Steuer, Umrüstung auf umweltfreundliche Kältemittel)
- ▶ CAT Index / Summe aller Kosten pro Jahr.

Grundsätzlich kann mit dem Tool auch eine dynamische Analyse durchgeführt werden. Durch Vorgabe von Indizes für kalkulatorische Zinsen oder Preissteigerungsindizes, allgemein oder separat für Energie und Umweltkosten, können dynamische Entwicklungen untersucht werden. Im vorliegenden Projekt wurde dieser Punkt neutral betrachtet (d.h. kalkulatorische Zinsen, Entwicklung des Eigenkapitals des Operators, Inflation, Energiepreis- und Umweltkostenprogression = 0).

2.4.2.2 Konkreter Vergleich der HLK-Systeme

Ein wesentlicher Punkt des Vergleichs ist, dass für die Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungssysteme (HLK-Systeme) identische Betriebsbedingungen simuliert werden. Deshalb werden alle Anlagen vergleichend auf ein Referenzfahrzeug bezogen, dieses ist der TW7 des ICE 3 Triebzugs 301 aus der Felddatenanalyse.

Im ersten Schritt (Vergleich A) wurden die beiden bekannten und seit vielen Jahren in Betrieb stehenden Anlagen verglichen bzw. auf das Referenzfahrzeug projiziert (Vergleichssysteme gemäß Kapitel 2.3.3.4):

- ▶ ICE-T Kaltdampfanlage mit dem Kältemittel R134a mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen (entspricht Vergleichssystem 2)
- ▶ ICE 3 2.BS - Luftgestütztes HLK-System mit Prozessführung im Unterdruck Air-Cycle Anlage (entspricht Vergleichssystem 1)

Der zweite Schritt (Vergleich B) zeigt ein Zukunftsszenario. Hier wurden ersichtliche Verbesserungspotentiale und die luftgestützte Anlagentechnik der nächsten Generation gegenübergestellt:

- ▶ Konzept der ICE-T Anlage, Energie optimiert (entspricht Vergleichssystem 3)
- ▶ Konzept der ICE 3 Anlage, wartungsoptimiert (entspricht Vergleichssystem 2, im Wartungskostenmodell wurden mögliche Verbesserungen berücksichtigt, die in der Analyse der Wartungsdaten ersichtlich wurden)
- ▶ Luftgestützte Anlage der nächsten Generation, offener Überdruckkreis (entspricht Vergleichssystem 6, Kap. 2.3.3.4)

Abbildung 119: Übersicht zum Systemvergleich mit dem Cost Assessment Tool (CAT)

CAT Vergleich					
Version	Vergleich A		Vergleich B		
Kältemittel	R134a	Luft	Luft	R134a	Luft
HVAC Geräte-Version	ICE T	ICE3.2 (Unterdrucksystem)	Unterdrucksystem state of the art	ICE T ohne Gegenheizen	Next Generation ACS: offenes Überdrucksystem
Regelung	Drehzahl geregelter Schraubenverdichter, 2 Kondensatorlüfter leistungsabhängig geschaltet, elektrisches Gegenheizen	Drehzahl geregelte Kühlturbine	Drehzahl geregelte Kühlturbine	Drehzahl geregelter Schraubenverdichter, 2 Kondensatorlüfter leistungsabhängig geschaltet, Heißgasbypass	Drehzahl geregelte Kühlturbine
Gewähltes Referenzfahrzeug	ICE3, Triebzug 301 - TW7, 74 Sitzplätze				

Übersicht zum Systemvergleich mit dem Cost Assessment Tool (CAT). Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.4.2.3 Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

NRC- Non Recurring Cost / Einmalkosten

Die Entwicklungskosten wurden egalisiert, um einen fairen Vergleich von altbewährter und Zukunftstechnologie zu gewährleisten, da die Entwicklungskosten für eine neue Klimatechnik nicht nur auf eine einzige Produktionsserie oder einen Wagentyp umzuschlagen sind. Es wurde angenommen, dass sich die Einmalkosten (NRC) für alle Systeme langfristig in einer Größenordnung von 1.000.000 € pro HLK-System und Fahrzeugtyp bewegen. Das vorliegende CAT Modell hat eine Seriengröße von 500 Wagen als Basis, auf die sich die angegebenen Einmalkosten verteilen.

RC- Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten

Hier sind Richtpreise für die Beschaffungskosten (RC) für das Referenzfahrzeug angegeben, wie sie heute am Markt zu erwarten sind:

- ▶ RC Kaltdampfanlage: 40.000 € (ohne Kältemittelbypass)
- ▶ RC Kaltdampfanlage: 41.000 € (mit Kältemittelbypass)
- ▶ RC ACS Unterdruckprozess anlog ICE 3 2.BS: 65.000 €
- ▶ RC ACS Überdruckkreis, „ACS next Generation“: 55.000 €

Die Herstellkosten für luftgestützte Systeme sind etwas höher als für Kaltdampfanlagen, wobei Potentiale zur Kostenverringerung durch Stückzahleffekte nicht ausgewiesen sind. Bei steigender Nachfrage nach luftgestützter Klimatechnik und erhöhter Auflage von entsprechenden Komponenten ist mit einer Verringerung der Stückkosten zu rechnen.

OC- Operating Cost / Energiekosten

Die Grundlagen für die Ermittlung des Energieverbrauchs sind in Kap. 2.4.1.2 dargestellt. Tabelle 15 zeigt das Gesamtergebnis für Kühlbetrieb und Heizbetrieb als Mittelwert aus den 3 Klimazonen Braunschweig, Kassel, Mannheim (Daten des Testreferenzjahres (TRY)) bezogen auf die 74 Sitzplätze des Referenzfahrzeugs. Der Energiebedarf ist bezogen auf den Pantographen, d.h. inklusive der Verluste von Bordnetz und Traktionsmotor.

Tabelle 15: Jahresenergiebedarf für das Cost Assessment Tool (CAT) bezogen auf das Referenzfahrzeug auf Basis der Felddaten

Einsatzbedingungen Anlage	Energiebedarf im Komfortbetrieb			
	Felddaten		Modelle/ Simulation	
	ACS_UntDP ICE 3 Messung MWh / Jahr	VCS_f/U_GH ICE-T Messung MWh / Jahr	ACS_ÜbDP Simulation MWh / Jahr	VCS_f/U_BP Bypass: An- nahme MWh / Jahr
primärer Energiebedarf	84,1	92,1	79,0	81,8
sekundärer Energiebedarf	4,9	8,5	5,7	8,3
Summe	89,1	100,6	84,7	90,2

ACS_UntDP: ACS mit Unterdruckprozess = Konzept ICE 3 2.BS

VCS_f/U_GH: VCS mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen = Konzept ICE-T

ACS_ÜbDP: ACS mit Überdruckprozess = Konzept „ACS next Generation“

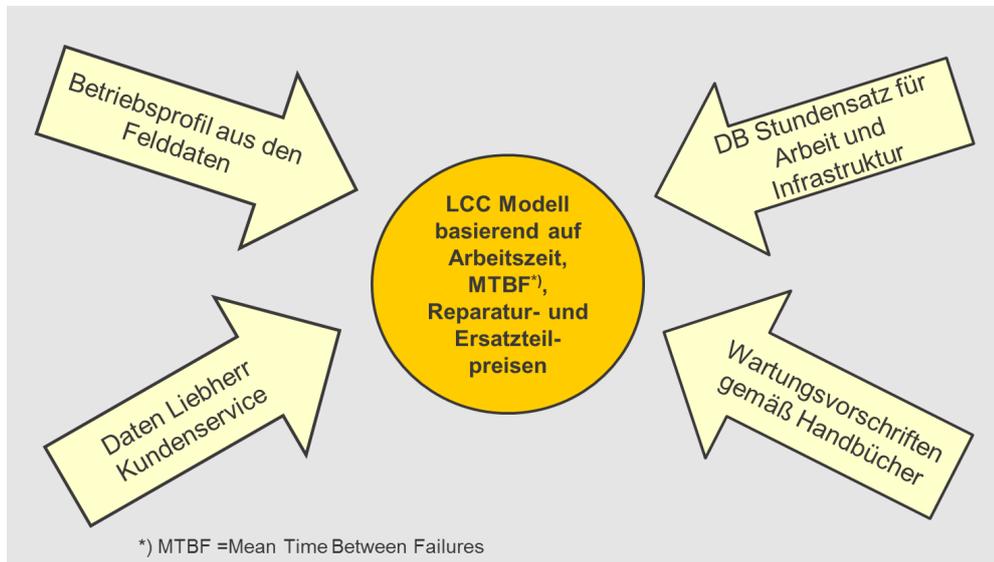
VCS_f/U_BP: VCS mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass = Konzept ICE-T mit Bypass

Die Energiekosten für primären Energieverbrauch (Betrieb HLK-Anlage) und sekundären Energieverbrauch (Fahrtwiderstand durch Luftaustausch mit Umgebung) wurden nach einem Stromtarif von 11,59 Euro Cent/kWh berechnet.

MC – Maintenance Cost / Wartungskosten

Als Basis zur Ermittlung der Wartungskosten dient ein Modell, das anhand von Felddaten, von Angaben vom Betreiber und der Datenbasis vom Liebherr Kundenservice die korrektiven und präventiven Wartungskosten für das Referenzfahrzeug ausweist.

Abbildung 120: Datenbasis für das Modell für die Lebenszykluskosten (LCC)



Datenbasis für das Lebenszykluskosten-Modell, MTBF -Mean Time Between Failures - mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen für reparierbare Einheiten. Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Felddatenerfassung

- ▶ Betriebsstunden in Kühlen und Heizen für das Referenzfahrzeug

Betreiberangaben

- ▶ Stundensatz 90€/h für Arbeit und Infrastruktur

Liebherr Kundenservice

- ▶ Anzahl und Preis der Reparaturen, Anzahl und Preis der Ersatzteillieferungen

Wartungsvorschriften

- ▶ Präventive Wartung gemäß Anlagenhandbuch

Für das Air-Cycle System Überdruckkreis, kurz „ACS next Generation“ im Vergleich B liegen naturgemäß noch keine Daten von Kundenservice oder Wartungshandbuch vor, daher wurden für analoge Komponenten Daten von den anderen Systemen übernommen oder Modellwerte gemäß Herstellerangaben herangezogen.

Tabelle 16: Vergleich A - Instandhaltungskosten für die Klimasysteme ICE-T und ICE 3 2. Bauserie im Referenzfahrzeug gemäß Berechnung im Cost Assessment Tool (CAT)

LCC Modell Liebherr		
Kosten	ICE-T	ICE 3 2.BS
Kühlen/Lüften	3.790 €	4.030 €
Heizsystem	400 €	450 €
CAT Vergleichskosten Funktion Kühlen/Heizen/Lüften	4.190 €	4.480 €

ICE-T: Konzept ICE-T mit Gegenheizen

ICE 3 2.BS: Konzept ICE 3, 2. Bauserie

Tabelle 17: Vergleich B - Instandhaltungskosten für drei optimierte Klimasysteme im Referenzfahrzeug gemäß Berechnung im Cost Assessment Tool (CAT)

LCC Modell Liebherr			
Kosten	ICE 3 Opt	ICE-T bp	ACS NG
Kühlen/Lüften	3.200 €	3.820 €	3.250 €
Heizsystem	450 €	370 €	450 €
CAT Vergleichskosten Funktion Kühlen/Heizen/Lüften	3.650 €	4.190 €	3.700 €

ICE 3 Opt: Konzept ICE 3, 2. Bauserie, wartungsoptimiert

ICE-T bp: wie Konzept ICE-T aber zusätzlich mit Kältemittel-Bypass zur Leistungsregelung

ACS NG: Luftgestützte Anlage der nächsten Generation, offener Überdruckkreis

Bei der Kaltdampfanlage zeigen sich Unterschiede zwischen der Version mit elektrischem Gegenheizen und der Version mit Heißgasbypass. Diese beruhen auf dem unterschiedlichen korrektiven Wartungsaufwänden für Heizsystem und Kältekreis, die sich jedoch kompensieren. Daher zeigt das Modell in Summe gleiche Gesamtbeträge bei den Wartungskosten für beide Versionen (Tabelle 17).

ENVIRONM – Umweltkosten Kaltdampfanlage

Im Vergleich A (Rückblick) wurden die Umweltkosten für den ICE-T auf Basis der Kältemittelleckagen errechnet. Sie setzen sich aus den Emissionskosten in Euro / CO₂-Äquivalent aus Kältemittelleckagen und Kosten für das Auffüllen von Kältemittel zusammen.

- ▶ Gesamtfüllmenge des Kältemittels: 9 kg R134a
- ▶ Treibhauspotenzial (GWP) von R134a: 1430
- ▶ Leckage: 5% pro Jahr
- ▶ Kältemittelpreis: 36 €/kg R134a
- ▶ Emissionskostenbewertung der Kältemittelleckagen: 4,55 € / t CO₂-Äquivalent*)

Im Vergleich B (Zukunftsszenario) wurde der Umstieg auf ein Drop-In Kältemittel nach 5 Jahren Betrieb angenommen. Das niedrige Treibhauspotenzial (GWP) von Ersatz-Kältemitteln beruht auf ihrer geringen Lebensdauer, d.h. sie werden in der Atmosphäre relativ schnell abgebaut. Für das gewählte Ersatz-Kältemittel R513A wird daher eine begrenzte Haltbarkeit angenommen, so dass auf Grund der hohen Betriebsstunden im Eisenbahnbereich die Kältemittelfüllung alle 2 Jahre gewechselt werden muss.

- ▶ Gesamtfüllmenge des Kältemittels: 9 kg R134a
- ▶ Nach 5 Jahren Umstieg auf Kältemittel R513A (Mischung aus R134a und R1234yf)
- ▶ Drop-In-Kältemittel, d.h. einfacher Kältemittlersatz ohne Umbaukosten an der HLK-Anlage notwendig
- ▶ Treibhauspotenzial (GWP) von R513A: 547
- ▶ Leckage: 5% pro Jahr
- ▶ Alle 2 Jahre kompletter Wechsel des Kältemittels
- ▶ Kältemittelpreis: 50 €/kg R513A
- ▶ Emissionskostenbewertung der Kältemittelleckagen: 4,55 € / t CO₂-Äquivalent*)

*) Emissionshandel gemäß europäischem Auktionsmarkt (European Energy Exchange AG, 2016)

Umweltkosten Kaltluftanlage

Da die Emissionskosten aus der Stromerzeugung bereits im Strompreis enthalten sind, ist der Wert für die Umweltkosten der Kaltluftanlage mit 0 € angesetzt.

2.4.2.4 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Vergleich A – Rückblick

Wie im Kapitel 2.4.2.2 beschrieben, werden 2 erprobte Systeme verglichen:

- ▶ ICE-T - Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Möglichkeit zum Gegenheizen
- ▶ ICE 3 2.BS - Luftgestütztes HLK-System mit Prozessführung im Unterdruck

Tabelle 18 und Abbildung 121 zeigen die Kosten pro Jahr und HLK-System aufgeteilt in die entsprechenden Einzelpositionen. Es zeigt sich deutlich, dass die Einmalkosten (NRC) und die Umweltkosten eine untergeordnete Rolle spielen und kaum ins Gewicht fallen. Der größte Anteil der Kosten entfällt auf den Energieverbrauch. Bei der Kaltluftanlage ergeben sich hier Vorteile, die jedoch wieder von den höheren laufenden Beschaffungskosten (RC) egalisiert werden. Die Wartungskosten beider Systeme sind etwa gleich. Der CAT-Index, also die Summe der Kostenanteile, liegt bei beiden System in der gleichen Größenordnung, wobei das Kaltluftsystem einen kleinen Kostenvorteil von rund 200 €/Jahr zeigt.

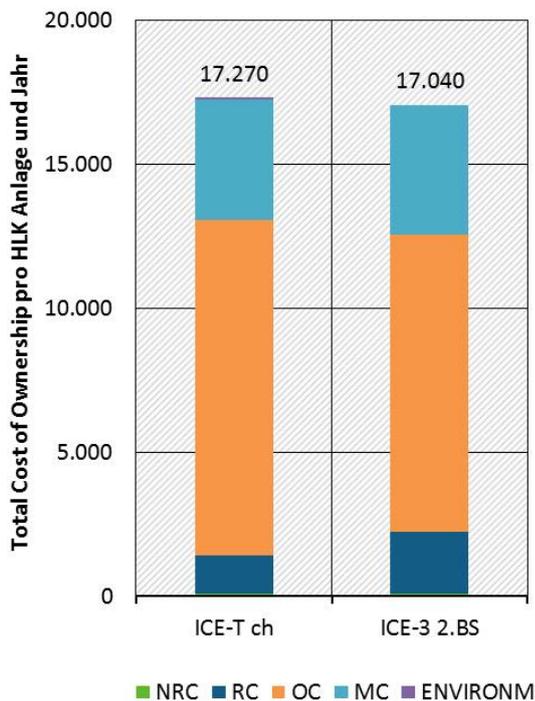
Tabelle 18: Vergleich A: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) – im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index

Vergleich A: Kostenanalyse im Cost Assessment Tool (CAT)		
Kostenart	ICE-T	ICE 3 2.BS
CAT-Index (Gesamtkosten/Jahr/HLK-Anlage)	17.270 €	17.040 €
ENVIRONM - Umweltkosten	20 €	0 €
MC - Maintenance Cost / Wartungskosten	4.190 €	4.480 €
OC - Operating Cost / Energiekosten	11.660 €	10.330 €
RC - Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten	1.330 €	2.170 €
NRC - Non Recurring Cost / Einmalkosten	70 €	70 €

ICE-T: Konzept ICE-T Kaltdampfanlage R134a mit Gegenheizen

ICE 3 2.BS: Konzept ICE 3, 2. Bauserie Air-Cycle Anlage

Abbildung 121: Vergleich A: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index



ICE-T: Konzept ICE-T Kaltdampfanlage mit Gegenheizen; ICE 3 2.BS: Konzept ICE 3, 2. Bauserie Air-Cycle Anlage;
 NRC - Non Recurring Cost / Einmalkosten; RC - Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten; OC - Operating Cost /
 Energiekosten; MC - Maintenance Cost / Wartungskosten; ENVIRONM – Umweltkosten.

Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

Vergleich B – Zukunftsszenario

Im Zukunftsszenario (Vergleich B) wurden optimierte Systeme miteinander verglichen, wie man sie heute für das Referenzfahrzeug gem. 2.4.2.2 designen würde:

- ▶ ICE 3 Opt – Air-Cycle Anlage: Luftgestützte HLK-Anlage mit Prozessführung im Unterdruck, wartungsoptimiert (vergl. Kap 2.4.2.3)
- ▶ ICE-T bp - Kaltdampfanlage R134a mit drehzahlgeregeltem Verdichter mit Heißgasbypass, ohne elektrisches Gegenheizen
- ▶ ACS NG – Air-Cycle Anlage: Luftgestützte HLK-Anlage mit Prozessführung im Überdruck (ACS next Generation)

Tabelle 19 und Abbildung 122 zeigen die Einzelergebnisse der jährlichen Kosten. Im Gegensatz zum Vergleich A fallen im Zukunftsszenario die Umweltkosten mehr ins Gewicht. Die Kaltdampfanlage ist nun energieoptimiert, d.h. ihr Energieverbrauch entspricht dem der Kaltluftanlage im Unterdruckprozess. Diese Verbesserung wird aber zum Teil durch die erhöhten Umweltkosten wieder kompensiert. Der größte Anteil der Kosten entfällt aber nach wie vor auf den Energieverbrauch.

Bei der Kaltluftanlage der nächsten Generation sind Verbesserungen gegenüber heutigen Kaltluftsystemen bei den Beschaffungskosten und bei der Energieaufnahme zu erwarten, wodurch sich ein Kostenvorteil von rund 1000 €/Jahr gegenüber Kaltdampfsystemen nach dem Stand der Technik ergibt.

Tabelle 19: Vergleich B: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index

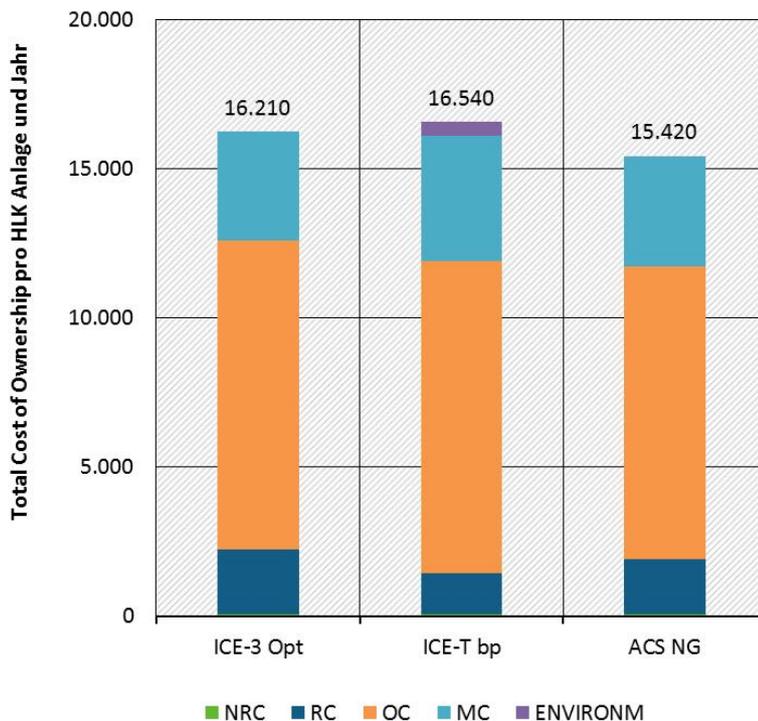
Vergleich B: Kostenanalyse im Cost Assessment Tool (CAT)			
Kostenart	ICE 3 Opt	ICE-T bp	ACS NG
CAT-Index (Gesamtkosten/Jahr/HLK-Anlage)	16.210 €	16.540 €	15.420 €
ENVIRONM - Umweltkosten	0 €	470 €	0 €
MC - Maintenance Cost / Wartungskosten	3.650 €	4.190 €	3.700 €
OC - Operating Cost / Energiekosten	10.330 €	10.450 €	9.820 €
RC - Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten	2.170 €	1.370 €	1.830 €
NRC - Non Recurring Cost / Einmalkosten	70 €	70 €	70 €

ICE 3 Opt: Konzept ICE 3, 2. Bauserie, wartungsoptimiert

ICE-T bp: wie Konzept ICE-T aber zusätzlich mit Kältemittel-Bypass zur Leistungsregelung

ACS NG: Luftgestützte Anlage der nächsten Generation, offener Überdruckkreis

Abbildung 122: Vergleich B: Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership) - im Cost Assessment Tool (CAT) ermittelter Index



ICE 3 Opt: Konzept ICE 3, 2. Bauserie, wartungsoptimiert

ICE-T bp: wie Konzept ICE-T aber zusätzlich mit Kältemittel-Bypass zur Leistungsregelung

ACS NG: Luftgestützte Anlage der nächsten Generation, offener Überdruckkreis

NRC - Non Recurring Cost / Einmalkosten; RC - Recurring Cost / Laufende Beschaffungskosten; OC - Operating Cost / Energiekosten; MC - Maintenance Cost / Wartungskosten; ENVIRONM – Umweltkosten.

Quelle: eigene Darstellung, Liebherr

2.4.3 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

2.4.3.1 Ergebnisse zum Leistungs- und Energiebedarf

Die gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf den Komfortbetrieb von Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungsanlagen (HLK-Anlagen) über 6570 Betriebsstunden pro Jahr, wobei der Komfortbetrieb den Passagierbetrieb umfasst. Die zugrunde gelegten Einsatzbedingungen (Gewichtungsmatrizen), insbesondere die Verteilung der Außentemperatur, beeinflussen das Ergebnis. Wenn man annimmt, dass ein Zug in den Klimazonen kühl (Braunlage), moderat (Kassel) und warm (Mannheim) gleich häufig betrieben wird, ergibt sich im Mittel für den primären Jahresenergiebedarf im Kühlbetrieb eine Einsparung von 28% für eine Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess (ICE 3) im Vergleich zu einer Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und der Möglichkeit zum Gegenheizen für den niedrigen Teillastbereich (ICE-T).

Analog ergibt sich eine Einsparung von 16% für die weiterentwickelte Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess (Simulation) im Vergleich zu einer Kaltdampfanlage mit drehzahlgeregeltem Verdichter und Kältemittel-Bypass (Bypass rechnerisch angenommen).

Es zeigte sich also hinsichtlich des Jahresenergiebedarfs für den Kühlbetrieb ein klarer Vorteil der Air-Cycle Technik.

Im Heizbetrieb gibt es keine relevanten technischen Unterschiede zwischen der Air-Cycle Anlage und der Kaltdampfanlage. Je nach Verhältnis des Jahresenergiebedarfs für Heizbetrieb und Kühlbetrieb wirkt sich die Einsparung im Kühlbetrieb unterschiedlich stark auf den Gesamtjahresenergiebedarf aus.

Basierend auf einem analytischen Ansatz wurde in dieser Studie auch der sekundäre Leistungs- und Energiebedarf infolge der vom HLK-System angesaugten Luft betrachtet. Dieser sekundäre Leistungsbedarf ist vom Traktionsmotor aufzubringen. Der sekundäre Energiebedarf liegt – je nach HLK-System und Einsatzbedingungen – bei 5% bis 15% bezogen auf den Jahres-Gesamtenergiebedarf (primär und sekundär) für Heizen und Kühlen in Summe bzw. bei 9% bis 22% bezogen auf den Jahres-Gesamtenergiebedarf (primär und sekundär) für Kühlen. Demnach liegt der sekundäre Energiebedarf in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung.

Der Unterschied zwischen den HLK-Systemen zeigt sich im Kühlbetrieb, wo die Air-Cycle Anlagen verglichen mit der Kaltdampfanlage jeweils nur eine deutlich geringere Luftmenge zur Kühlung benötigen. Im Kühlbetrieb ergeben sich dadurch für den Vergleich der in Bahnfahrzeugen implementierten Systeme bei der Air-Cycle Anlage Einsparungen für den sekundären Energiebedarf von mehr als 50%. Analog ergeben sich für die in der Simulation betrachteten Air-Cycle Anlage Einsparungen von 23% bis 38%. Der geringere sekundäre Energiebedarf ist ein weiterer Vorteil der Air-Cycle Technologie.

In absoluten Zahlen ergibt sich im Mittel über die drei betrachteten Klimazonen Braunlage, Kassel und Mannheim für die Air-Cycle Anlage mit Unterdruckprozess insgesamt eine Energieeinsparung (primärer und sekundärer Energiebedarf für Heizen und Kühlen) von 11,50 MWh/Jahr gegenüber der Kaltdampfanlage mit Drehzahlregelung und Gegenheizen im niedrigen Teillastbereich, bezogen auf einen Wagen gemäß dem TW7 des ICE 3 (74 Personen) und 6750 Stunden im Komfortbetrieb. Die analog berechnete Einsparung im Vergleich der Air-Cycle Anlage mit Überdruckprozess gegenüber der Kaltdampfanlage mit Drehzahlregelung und angenommenem Bypass liegt bei ca. 5,41 MWh/Jahr.

Die Größenordnung dieser Energieeinsparungen kann man wie folgt veranschaulichen: Mit der durch die Air-Cycle Technologie pro Jahr und pro Wagen eingesparten Energie (5,41 MWh bzw. 11,50 MWh) könnte man mit einem Elektrofahrzeug⁵ 1,1 bzw. 2,3 Mal die Erde am Äquator umrunden. Praktischer ausgedrückt könnte der Jahres-Strombedarf für 3 bzw. 6,5 Elektro-Pkw⁶ oder der Jahresstrombedarf von 1,6 bzw. 3,3 Haushalten⁷ in Deutschland abgedeckt werden. Diese Vergleiche zeigen, dass die eingesparte Energie durch die Air-Cycle-Technologie pro Wagen und Jahr in einer durchaus nennenswerten Größenordnung liegen.

2.4.3.2 Fazit zur Wirtschaftlichkeit

Luftgestützte Bahnklimasysteme sind heute schon eine erfolgreich erprobte, umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative zu herkömmlichen Kaltdampfsystemen mit fluorierten Kältemitteln. Bei den verglichenen Heizungs-, Lüftungs-, Klimatisierungssystemen (HLK-Systemen), die sich seit vielen Jahren im Regelbetrieb befinden, zeigt sich, dass die bewährte umweltfreundliche luftgestützte Klimatisierungstechnik wirtschaftlich mindestens gleichwertig ist. Werden das im Rahmen dieses Projektes ermittelte, realisierbare Optimierungspotenzial und neue Entwicklungen genutzt, so zeichnet sich ein wirtschaftlicher Vorteil der luftgestützten Systeme ab.

⁵ Z.B. VW e-Golf: Stromverbrauch: 12,7 kWh/100 km, kombiniert, Motorisierung 100 kW (Volkswagen, 2017)

⁶ Für die durchschnittliche Fahrleistung eines Pkw in Deutschland: 14015 km/Jahr (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017)

⁷ Anzahl der Haushalte in Deutschland in 2012: 39.707.000

(Umwelt Bundesamt, Bevölkerungsentwicklung und Struktur privater Haushalte, 2017)

Stromverbrauch Haushalte in Deutschland in 2012: 137 TWh/Jahr (Umwelt Bundesamt, Stromverbrauch, 2017)

Die höheren Investitionskosten der luftgestützten Klimatechnik werden durch niedrigere Betriebskosten kompensiert.

Generell spielen die Investitionskosten gemessen an den Energie- und Wartungskosten eine untergeordnete Rolle, sie betragen jährlich etwa 10% bei herkömmlichen Kaldampfsystemen und etwa 14% bei luftgestützten Systemen.

Im Rahmen der Studie wurde zusätzliches Verbesserungspotenzial bei der Wartung der bestehenden Anlage ICE 3 2. BS identifiziert, dessen Umsetzung eine deutliche Kosteneinsparung erwarten lässt.

Die Potentiale der luftgestützten Klimatisierungstechnik sind noch bei weitem nicht ausgeschöpft, es besteht eine sehr positive Perspektive zur luftgestützten Klimatisierung von Eisenbahnfahrzeugen mit der Weiterentwicklung der Architektur.

2.5 Fachgespräch und Veröffentlichung (AP 5)

Am 25. Januar 2018 erfolgte die fachöffentliche Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse des Projektes im Rahmen eines von LVF mit Unterstützung des UBA und der DB organisierten Fachgespräches im Presse- und Besucherzentrum des Bundespresseamtes in Berlin. In Abbildung 123 ist das Programm des Fachgespräches dargestellt.

Ziele dieses Fachgespräches waren die Darstellung der Messungen, der Messwertanalyse, der Ergebnisse zu Leistungs- und Energiebedarf und zu den Lebenszykluskosten und der weiteren im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und eine inhaltliche Diskussion zu den wissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Aspekten mit dem interessierten Fachpublikum.

Die Vorträge des Fachgespräches wurden auf der UBA Website veröffentlicht⁸.

⁸ LINK UBA- Website : <https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/fachgespraech-klimatisierung-von-zuegen>, 12.07.2018

Abbildung 123: Programm des Fachgespräches zum Klimaanlageprojekt am 25. Januar 2018 in Berlin

09:30	<i>Eintreffen und Begrüßungskaffee</i>
10:00	Begrüßung Jochen Flasbarth - Staatssekretär im Umweltministerium / BMUB Dr. Thomas Holzmann - Vizepräsident des Umweltbundesamtes / UBA Projektpartner - Liebherr - Dirk Junghans / Geschäftsführung Liebherr - DB Systemtechnik GmbH - Nils Dube / Leiter Business Line Engineering
10:50	Inhalt und Durchführung des Forschungsprojektes Maik Wollweber / Liebherr
11:20	<i>Kaffeepause</i>
11:35	Projektanteil der DB Systemtechnik Dr. Peter Claus / DB Systemtechnik GmbH
12:05	Analyse und Systemvergleich anhand der Leistungsaufnahme Dr. Christian Luger / Liebherr
12:50	<i>Mittagspause</i>
13:35	Systemvergleich anhand der Wirtschaftlichkeit Roland Friedrich / Liebherr
14:15	Ausblick Air-Cycle-Technologie Reinhard Aigner / Liebherr
14:30	Diskussion der Ergebnisse
ca. 16:00	<i>Ende der Veranstaltung</i>

Programm des Fachgespräches zum Klimaanlageprojekt am 25. Januar 2018 in Berlin,
Quelle: UBA

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die vorliegende Messung an einem Zug und einer Klimaanlage und die anschließende aufwendige Auswertung der Daten ist erstmalig in dieser ausführlichen Form erfolgt. Das Projekt zeigt darüber hinaus zum ersten Mal eine Analyse der Lebenszykluskosten von Zugklimaanlagen. Zur aufgrund des weltweiten Ausstieges aus den fluorierten Treibhausgasen notwendigen Umstellung auf klimafreundliche Zugklimatisierung liefern die Ergebnisse des Projektes entscheidende Erkenntnisse und Basisdaten zur Bewertung von Klimatechniken für Züge.

2.7 Verwertbarkeit der Ergebnisse

2.7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Für LVF und die DB liegt das große Potenzial dieses Vorhabens in der Darstellung der Wirtschaftlichkeit einer luftgestützten Klimaanlage (ACS) im Vergleich zu einer herkömmlichen Kaltdampfanlage (VCS). Dies gibt Herstellern von Klimaanlagen, die natürliche Kältemittel verwenden, ein deutlich höheres Gewicht, wenn sie sich für solche Systeme und für zukünftige Ausschreibungen aussprechen.

Zusätzlich zur Darstellung der Energieeffizienz wurde in diesem Projekt die Wirtschaftlichkeit erläutert und nachgewiesen. Damit gibt es gute Argumente für eine Ausweitung des Einsatzes luftgestützter Klimaanlage in Schienenfahrzeugen.

Dieses Vorhaben dient zudem der Erhöhung des Verständnisses über die Faktoren des Energieverbrauchs und der Wirtschaftlichkeit sowie der Akzeptanz von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln im Allgemeinen und der Air-Cycle Anlagen im Speziellen seitens der Zughersteller und Betreiber.

2.7.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Die durch die Messungen gewonnen Erkenntnisse des Gesamtprojektes werden in weiteren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben die Verbesserung und Weiterentwicklung von Klimaanlage und insbesondere der Air-Cycle Technik unterstützen und damit weitere Potentiale zur Senkung des Energieverbrauchs und der Gesamtkosten des Betriebes (Total Cost of Ownership – TCO) aufdecken.

2.7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Zum aktuellen Zeitpunkt ist kein Anschlussprojekt zur Forschung und Entwicklung (F&E) geplant, das sich mit der Erfassung von Felddaten befasst. Jedoch werden die gewonnen Erkenntnisse in sämtliche F&E-Projekte beim Auftragnehmer LVF einfließen, um weiter an der Effizienz der Bahnklimatisierung zu arbeiten und andererseits auch kommerzielle Anreize für die Verwendung von natürlichen Kältemitteln auf Seiten der Zughersteller und der Betreiber zu schaffen.

Langfristig soll durch solche und ähnliche Vorhaben der Wechsel von klimaschädlichen Kältemitteln hin zu klimaneutralen Kältemitteln und -anlagen vorangetrieben werden.

2.8 Fortschritte bei anderen Stellen

Weitere Projekte zur Zugklimatisierung sind mittlerweile begonnen worden, siehe Hinweis in Abschnitt 2.3.3.3 zu Vergleichssystem 3.

2.9 Veröffentlichungen

Die Vorträge des Fachgespräches vom 25. Januar 2018 wurden auf der UBA Website veröffentlicht.

Fachgespräch Klimatisierung von Zügen mit Kaltluftklimaanlagen: Wollweber M.: Inhalt und Durchführung des Forschungsprojektes; Claus, P., Kretschmann, K.-P.: Felddatenanalyse ICE 3 Tz 301 - Projektanteil der DB Systemtechnik; Luger C.: Vergleich des elektrischen Energiebedarfs von Bahn-Klimaanlagen mit den Kältemitteln Luft und R134a; Friedrich R., Krawanja A.: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Bahn-Klimaanlagen mit den Kältemitteln R729 (Luft) und R134a; Aigner R.: Ausblick Air Cycle Technologie. Umweltbundesamt. Berlin 2018. LINK: <https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/fachgespraech-klimatisierung-von-zuegen>.

Die Ergebnisse des gesamten Projektes wurden im Jahr 2018 in der Bahn-Fachzeitschrift ZEVrail in zwei Artikeln publiziert:

- Luger C., Krawanja A., Aigner R., Claus P.: Vergleich des Jahresenergiebedarfs von Bahn-HLK-Systemen mit den Kältemitteln Luft und R134a, ZEVrail 142 (2018) 08, 308-314.
- Krawanja A., Luger C., Aigner R., Claus P.: Vergleich der Gesamtbetriebskosten von Bahn-HLK-Systemen mit den Kältemitteln Luft und R134a, ZEVrail 142 (2018) 09, 378-384.

3 Quellenverzeichnis

- Aigner, R. (2007). Synthetic and Natural Refrigerants for Rail HVAC units and their impact on the Annual Energy consumption. RTA International Workshop.
- Luger C., Krawanja, A., Aigner R., Claus, P. (2018): Vergleich des Jahresenergiebedarfs von Bahn-HLK-Systemen mit den Kältemitteln Luft und R134a ZEVrail, Jg 142 (8) S.308-314, 2018.
- Bell, Wronski, Jorrit, Quoilin, Sylvain, Lemort, & Vincent. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. Industrial Engineering Chemistry Research, 53(6), S. 2498-2508.
- Claus, P. (2016). Liebherr-Transportation Systems und Deutsche Bahn AG führen Felddatenanalyse an luftgestützter Klimaanlage durch. ZEVrail, Jg. 140, S. 396-397, 2016.
- Deutsche Bahn AG. (2008). Daten zur Passagierbesetzung aus dem Reisenden-Erfassungssystem. nicht veröffentlicht.
- Deutsche Bahn AG. (08. 05 2017). Fahrzeuglexikon für den Fernverkehr 2016. Abgerufen am 01.09.2017 von http://download-data.deutschebahn.com/static/datasets/fahrzeuglexikon/Fahrzeuglexikon_2017.pdf.
- Deutscher Wetterdienst. (2014). Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse.
- Deutscher Wetterdienst. (2017). Climate Data Center. Von LINK <https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdcftp/cdcftp.html> abgerufen.
- DIN 4710:2003-01. (2003). Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland.
- DIN EN 13129:2016-12. (2016). Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen.
- European Energy Exchange AG. (2016). market data environmental markets. Abgerufen am 22. 07.2016 von LINK <https://www.eex.com/en/market-data/emission-allowances/spot-market>.
- EU (2014). Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluoridierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Amtsblatt der Europäischen Union. Bd. L 150/195, 20.05.2014.
- Krawanja, A., Luger C., Aigner, R., Claus, P. (2018): Vergleich der Gesamtbetriebskosten von Bahn-HLK-Systemen mit den Kältemitteln Luft und R134a. ZEVrail, Jg. 142 (9) S.378-384, 2018.
- Luger, C. (2017). Virtual development and optimization of HVAC systems in rail vehicles. Dissertation: Technische Universität Graz.
- Luger, C., Kallinovsky, J., & Rieberer, R. (2016). Identification of representative operating conditions of HVAC systems in passenger rail vehicles based on sampling virtual train trips. Advanced Engineering Informatics, S. 157-167.
- Meister, M. (2012). Vergleichende betriebliche Messungen zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Klimaanlage mit Luft und R134a als Kältemittel. ZEVrail Jg 136 (10), S. 402-409, 2012.
- Morgenstern, J., & Ebinger, I. (2008). Anforderungen an zukünftige Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge. EI-Eisenbahningenieur, 12, S. 24-31, 2008.
- Schmitt M., & Berlitz T. (2014). Energie-Verbrauchszyklus zur Bestimmung der Energie-Effizienz von Schienenfahrzeug-Klimaanlagen. ZEVrail Jg. 138, S. 190-194, 2014.
- Schmitt M., Berlitz T., David Ch., Danzer P.(2015). Anwendung des DB-Energie-Verbrauchszyklus DC2013 für Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen. ZEVrail Jg. 139 (6-7), S.2-8 , 2015.