



Holger Großmann
Christof Böttcher

Pkw-Klimatisierung

Physikalische Grundlagen und
technische Umsetzung

3. Auflage

VDI

 Springer Vieweg

VDI-Buch

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/3482>

Holger Großmann · Christof Böttcher

Pkw-Klimatisierung

Physikalische Grundlagen und technische
Umsetzung

3., überarbeitete, ergänzte und erweiterte Auflage

Holger Großmann
Karlsruhe, Deutschland

Christof Böttcher
Wolfsburg, Deutschland

ISSN 2512-5281

ISSN 2512-529X (electronic)

VDI-Buch

ISBN 978-3-662-59615-9

ISBN 978-3-662-59616-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59616-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 2013, 2020, korrigierte Publikation 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur dritten Auflage

Herr Dr.-Ing. Christof Böttcher (Volkswagen AG) hat seit den Anfängen dieser Schrift mitgewirkt (2008) und unterstützt nun die dritte Auflage als Co-Autor. Weiterhin hat er den Abschnitt Hochvolt-Wärmeübertrager geschrieben.

In dieser Schrift werden die Bezeichnungen „Pkw-Klimatisierung“ und „Klimaanlagen“ verwendet, wohl wissend, dass diese technisch nach DIN 1946-1 nicht korrekt sind.¹ Diese Begriffe werden im Sprachgebrauch für Raumluftechnische Anlagen von Pkw neben „Heating Ventilation Air Conditioning“ (HVAC) verwendet.

Die 3. Auflage wurde überarbeitet, ergänzt und erweitert. Dies betrifft u. a.:

- Abschn. 2.6 Körpernahes Heizen und Kühlen,
- Abschn. 4.6.1 Instationäre Aufheizung des Fahrgastraums,
- Abschn. 4.6.2 Instationäre Kühlung des Fahrgastraums,
- Abschn. 6.1.5 Wärmestromdichte eines Pkw-Dachs bei Sonneneinstrahlung,
- Abschn. 10.4 Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft des Entlüftungssystems,
- Abschn. 13.3.3 Verbrauch einer HVAC im Jahresmittel für BEV,
- Abschn. 13.4 Auswertung des Verbrauchs von Plug-in-Hybriden,
- Abschn. 13.5 Instationäre Aufheizung des Fahrgastraums eines BEV,
- Abschn. 13.6 Hochvolt-Wärmeübertrager: Anordnungen, Heiztechnologien und Regelung,
- Abschn. 13.7 Bedarfsgerechte Lüftung mit Heizungen in BEV,
- Abschn. 14.5 Anhang E: Luftaustausch der Karosserie mit der Umgebung,
- Abschn. 14.6 Anhang F: Mittlere Lufttemperatur im Fahrgastraum für den stationären Betrieb nach DIN 1946-3: 2006–2007 und mathematische Ableitungen,
- Abschn. 14.7 Anhang G: Auswertung des Verbrauchs einer HVAC im Jahresmittel für BEV,

¹Eine Klimaanlage hat nach DIN 1946-1 folgende thermodynamische Luftbehandlungsfunktionen: Heizen, Kühlen, Entfeuchten und Befeuchten. Eine gezielte Befeuchtung ist bei der Klimatisierung von Pkws nicht vorhanden.

- Abschn. 14.8 Anhang H: Taupunkt- und Kühlgrenztemperatur sowie scheinbare Temperatur des Himmels,
- Abschn. 14.9 Gewöhnliche Differenzialgleichungen.

Die neuesten deutschen (DIN), europäischen (EN) und internationalen Normanpassungen (ISO) für die Bezeichnungen konnten nach wie vor nicht vollständig umgesetzt werden, da viele Begriffe in der deutschsprachigen Fachwelt der Automobilindustrie unverständlich sind oder zu Verwechslungen führen können. Daher werden hauptsächlich die bisherigen Standards nach der DIN 1304 (Stand März 1994) verwendet.

Die angegebenen Methoden und mathematischen Formulierungen sollen das Verständnis der oftmals komplexen Zusammenhänge erleichtern und einfache Abschätzungen ermöglichen. Diese erheben keinen Anspruch auf die Berücksichtigung sämtlicher Parameter sowie deren Interferenzen und Genauigkeiten. Dafür gibt es in den Entwicklungsabteilungen Rechner mit aufwendigen Programmen, den sogenannten „Tools“, die nicht Jedermann kostenlos zur Verfügung stehen.

Die Idee, über physikalische Grundlagen der Pkw-Klimatisierung zu berichten, stammt u. a. von Kollegen und Kolleginnen der Audi AG und des Arbeitskreises 5 „Klimatisierung“ der FAT (Forschungsvereinigung der Automobiltechnik e. V. im VDA). Maßgeblich wurde die Arbeit an früheren Auflagen dieses Buchs von den Herren Dr.-Ing. Klaus Straßer (Audi AG) und Prof. Dr.-Ing. Johannes Reichelt (Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik GmbH) unterstützt. Ihnen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ich danke auch herzlich der Familie Böttcher und meiner Familie für ihr Verständnis, dass diese Schrift aktualisiert werden konnte sowie Frau Elisabeth Lange und Herrn Markus Braun mit ihrem Team vom Springer-Verlag für die stets gute Zusammenarbeit.

Holger Großmann

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
1.1	Historie	1
1.2	Weltweite Klimate	3
1.2.1	Lufttemperatur, Wasserdampfgehalt und Sonnenstrahlung	3
1.2.2	Luftdruck	5
1.2.3	Regen	6
1.3	Vorschriften, Normen und Richtlinien	8
	Literatur	11
2	Klimaphysiologie	13
2.1	Abgrenzung zur Klimatisierung von Gebäuden	13
2.2	Thermodynamisches System „Mensch-Fahrgastraum“	15
2.3	Bewertungen	15
2.3.1	Behaglichkeitsmodell nach P. O. Fanger	15
2.3.2	Einfluss der Sonneneinstrahlung	18
2.3.3	Einfluss der Wasserdampf- und Schweißabgabe	19
2.3.4	Maximal zulässiger Wasserdampfgehalt der Luft	23
2.3.5	Kontakttemperatur	24
2.4	Messungen in einem Pkw	25
2.4.1	Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Regelung einer Klimaanlage	25
2.4.2	Einfluss der Temperatur auf die Herzfrequenz.	25
2.5	Klimamess-Puppen	27
2.6	Körpernahes Heizen und Kühlen	29
2.6.1	Winterbetrieb	29
2.6.2	Sommerbetrieb	30
2.7	Beispiele	31
	Literatur	33



PRODUKT BETREUUNG VOM KONZEPT BIS ZUR UMSETZUNG.

**ERLEBEN SIE HAUTNAH, WOHIN DIE REISE
IHRER IDEE GEHT.**

Sie wollen die Mobilität von morgen gestalten? Bei uns als einem der führenden Systementwickler und -lieferanten der globalen Automobilindustrie können und dürfen Sie eindrucksvolle Produkte entwickeln. Und das mit gesamtheitlicher Verantwortung vom ersten Entwurf bis zur Marktreife. Wir sind beständig auf Zukunftskurs und fördern Karrieren mit Bewegungsfreiheit. Denn nur durch den Schwung im Inneren eines jeden Talents kommen Ideen in Bewegung. Ohne Halten. Ohne Bremsen.

MAKE YOUR MOVE.

 **Eberspächer**

www.eberspaecher-karriere.de

3	Luftstrom durch den Fahrgastraum	35
3.1	Zu- und Abluftöffnungen	36
3.2	Gebläsekennlinien	38
3.2.1	Gebläsetypen	39
3.2.2	Kennlinien eines Radialgebläses	40
3.2.3	Differenz des Schalldrucks	47
3.2.4	Beispiele	48
3.3	Durchströmung der Komponenten	53
3.3.1	Abhängigkeit von der Reynolds Zahl	54
3.3.2	Rohrreibungszahlen aus der Literatur	56
3.3.3	Umrechnung der Messergebnisse auf eine andere Luftdichte und Viskosität	57
3.3.4	Beispiele	58
3.4	Ermittlung des Belüftungsstroms	60
3.4.1	Messmethoden	60
3.4.2	Abluftlinien	62
3.4.3	Belüftungsstrom	62
3.5	Luftaustausch der Karosserie mit der Umgebung	62
3.5.1	Gemessene Leckagelinien (Druckverlustlinien)	63
3.5.2	Dimensionslose Darstellung	65
3.5.3	Anwendungen der dimensionslosen Leckagelinie	66
3.5.4	Ableitung der Leckzu- und Abluftströme	66
3.5.5	Ergebnisse	69
3.5.6	Beispiele	70
	Literatur	70
4	Wärmestrom durch den Fahrgastraum	73
4.1	Definition der mittleren Innenraumlufttemperatur	73
4.2	Wärmebilanz	74
4.2.1	Winterbetrieb	74
4.2.2	Sommerbetrieb	75
4.3	Ansätze zur Abschätzung der Ablufttemperatur	75
4.3.1	Methode nach Frank	76
4.3.2	Methode nach Nitz und Hucho	76
4.4	Mittlere Innenraumlufttemperatur	76
4.5	Wärmedurchgang der Karosserie	77
4.5.1	Ermittlung der Wärmedurchgangszahl	78
4.6	Abbildungen zur instationären Aufheizung und Abkühlung des Fahrgastraums mit einer HVAC	82
4.6.1	Instationäre Aufheizung	82
4.6.2	Instationäre Abkühlung	86
	Literatur	87

5	Winterbetrieb	89
5.1	Messergebnisse an einer Heizung im Klimawindkanal	90
5.1.1	Instationäre Aufheizung im Außenluftbetrieb	90
5.1.2	Stationäre Aufheizung im Außen- und Umluftbetrieb	90
5.2	Erforderliche stationäre Heizleistung	92
5.2.1	Außenluftbetrieb	92
5.2.2	Umluftbetrieb	93
5.2.3	Beispiele	93
5.3	Wärmebilanz am Motor	94
5.3.1	Instationärer Betrieb	96
5.3.2	Stationärer Betrieb	96
5.4	Zusatzheizungen	97
5.4.1	Elektrische Zusatzheizung	97
5.4.2	Wärmepumpe mit dem Kältemittel R744 (CO ₂)	98
5.4.3	Standheizung	99
5.4.4	Wärmespeicher	100
5.4.5	Elektrische Vorerwärmung des Kühlmittels	100
5.4.6	Nutzung der Motor-Restwärme, Speicherheizung	100
5.5	Scheibenbeschlag	100
5.5.1	Vorschriften	102
5.5.2	Strömungswalze an der Schalttafel	103
5.5.3	Coanda-Effekt an der Schalttafel	103
5.6	Elektrisch beheizte Scheiben	104
5.6.1	Strömungs- und Temperaturfelder	105
5.6.2	Verschiedene Anordnungen	105
	Literatur	110
6	Sommerbetrieb	113
6.1	Sonneneinstrahlung	113
6.1.1	Tagesgang der Sonne	113
6.1.2	Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung zur Sonne	119
6.1.3	Eigenschaften verschiedener Gläser	123
6.1.4	Einfluss der Farben auf die Aufheizung lackierter Bleche in der Sonne	130
6.1.5	Wärmestromdichte eines Pkw-Dachs	134
6.2	Aufheizung geparkter Pkw in der Sonne	136
6.2.1	Treibhauseffekt	136
6.3	Aufheizung der Luft an der Motorhaube und im Belüftungssystem ...	139
6.3.1	Versuche auf der Straße	139
6.3.2	Versuche im Klimawindkanal	140

6.3.3	Sonderversuche	142
6.3.4	Analysen.....	142
6.3.5	Aufheizung an der Motorhaube.....	143
6.3.6	Beispiele.....	146
6.4	Vergleich eines weißen und schwarzen Pkw ohne Kälteanlage im Klimawindkanal	148
6.4.1	Aufheizung der geparkten Pkw	148
6.4.2	Abkühlung	148
6.5	Messungen an einer Kälteanlage in einem Klimawindkanal im Außen- und im Umluftbetrieb.....	150
6.5.1	Instationäre Abkühlung im Umluftbetrieb.....	150
6.5.2	Stationäre Abkühlung im Außen- und Umluftbetrieb	150
6.6	Erforderliche stationäre Verdampferleistung	152
6.6.1	Umluftbetrieb	152
6.6.2	Außenluftbetrieb	153
6.6.3	Beispiele.....	154
6.7	Standbelüftung mit Solartechnik	157
6.8	Entstehung von Scheibenbeschlag im Sommer.....	159
	Literatur.....	159
7	Stofftransport	161
7.1	Wasserabscheidung	161
7.1.1	Lufttrittssystem und Wasserkasten	161
7.1.2	Verdampfer.....	162
7.1.3	Speicherung von Wasser im Verdampfer	163
7.1.4	Kondensation an Bauteilen	164
7.2	Filterung.....	164
7.3	Wasserdampf im Fahrgastraum	165
7.4	Gaskonzentration im Fahrgastraum	166
7.4.1	Stationäre Gaskonzentration	166
7.4.2	Instationäre Gaskonzentration im Fahrgastraum	167
7.5	Praktische Grenzwerte einer Kältemittelfüllung	170
	Literatur.....	171
8	Wärmeübertrager.....	173
8.1	Theoretische Wärmeströme verschiedener Wärmeübertrager.....	174
8.2	Kennlinien eines Heizungswärmeübertragers	179
8.2.1	Wärmestromfelder	179
8.2.2	Druckverlustlinien	186
8.3	Kennlinien eines Verdampfers	196
8.3.1	Gemessene Enthalpieströme	197
8.3.2	Druckverlustlinien, luftseitig	198

8.3.3	Luftseitige Wärmebilanz, sensible und latente Wärme	200
8.3.4	Ableitungen des Enthalpiestroms.	202
	Literatur.	208
9	Kältemittelkreislauf	211
9.1	Kompressionskälteanlage mit R134a.	212
9.2	Kompressionskälteanlage mit R744.	216
9.3	Kompressionskälteanlage mit R1234yf.	219
	Literatur.	219
10	Komforterhöhung und Energieersparnis	221
10.1	Karosserie	221
10.1.1	Geometrie und Ausführung der Scheiben	221
10.1.2	Wärmedämmung der Karosserie	222
10.1.3	Farbe der Lackierung	223
10.1.4	Wärmekapazitäten im Fahrgastraum	223
10.1.5	Lage und Ausführung der Luftansaugung	224
10.1.6	Solartechnik	224
10.2	Klimagerät	225
10.2.1	Regelung des Außenluft- und Umluftbetriebs	225
10.2.2	Regelung der Lufttemperatur mit dem Saugdruck.	227
10.2.3	Einsatz eines Wasserabsperrentils bei luftseitig geregelten Klimageräten	228
10.3	Kältemittelkreislauf	229
10.3.1	Drosselorgane.	229
10.3.2	Innerer Wärmeübertrager.	230
10.3.3	Geregelte Luftmassenströme durch den Kondensator	230
10.3.4	Ölabscheider.	231
10.4	Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft des Entlüftungssystems	232
	Literatur.	234
11	Prüfstände	237
11.1	Klimawindkanäle	237
11.1.1	Aufgaben	238
11.1.2	Beschreibung	240
11.2	Prüfstand für Komponenten der Heizung, Lüftung und Klimaanlage.	241
11.2.1	Aufgaben	244
11.2.2	Beschreibung	244
11.2.3	Auswertung der Messungen.	246
11.3	Prüfstand für komplette Kältemittel-Kreisläufe.	258
11.3.1	Aufgaben	258
11.3.2	Beschreibung	259

11.4	Prüfstand zur Messung der Luftströme durch den Fahrgastraum	260
11.4.1	Aufgaben	262
11.4.2	Beschreibung	262
11.4.3	Typische Versuche	263
11.5	Berechnungsanlage mit schwenkbarer Hebebühne	264
11.5.1	Aufgaben	264
11.5.2	Beschreibung	264
11.5.3	Prüfvorschriften	265
	Literatur.	265
12	Straßenversuche	267
12.1	Messungen der Temperaturen im Fahrgastraum	268
12.2	Messung luftseitiger Differenzdrücke	269
12.2.1	Anwendung eines Prandtl-Rohres	269
12.2.2	Anwendung eines kalibrierten Bezugspunktes an der Karosserie	271
	Literatur.	272
13	Elektrisch betriebene Pkw	273
13.1	Antriebsarten	273
13.2	Reichweiten	274
13.2.1	Auswertung von Pressemitteilungen und Angaben aus der Literatur	274
13.3	Einfluss der Klimatisierung auf die Reichweite.	274
13.3.1	Berechnung mit der spezifischen Reichweite	274
13.3.2	Berechnung mit der spezifischen Energie	278
13.3.3	Verbrauch einer HVAC im Jahresmittel eines BEV.	279
13.4	Auswertung des Verbrauchs von Plug-in-Hybriden.	280
13.5	Instationäre Aufheizung des Fahrgastraums eines BEV	282
13.5.1	Aufheizung des Fahrgastraums mit Hochvolt-Wärmeübertragern	282
13.5.2	Abschätzung des Wärmeverlusts durch Wärmespeicherung	284
13.5.3	Hinweise.	285
13.6	Hochvolt-Wärmeübertrager: Anordnungen, Heiztechnologien und Regelung	286
13.6.1	Anordnungen von Hochvolt-Wärmeübertragern	286
13.6.2	Heiztechnologien	287
13.6.3	Steuerung und Regelung	291
13.7	Bedarfsgerechte Lüftung mit Heizungen in BEV	293
13.8	Besonderheiten bei der Auslegung einer Klimaanlage	295
13.9	Technische Potenziale	297
	Literatur.	300

14	Anhang A bis I	303
14.1	Anhang A: Diagramme	303
14.1.1	Mollier-h, x-Diagramm für feuchte Luft	303
14.1.2	Äthylenglykol-Wassermischungen: Dichte, spez. Wärmekapazität, Viskosität und Prandtl-Zahlen	304
14.1.3	Ig p, h-Diagramm des Kältemittels R134a	308
14.1.4	Ig p, h-Diagramm des Kältemittels R744	309
14.2	Anhang B: Häufig verwendete Formeln	310
14.2.1	Strömungsmechanik	310
14.2.2	Wärmeübertragung	311
14.2.3	Mechanik	313
14.2.4	Mathematik	314
14.2.5	Umrechnung angelsächsischer Einheiten in SI-Einheiten	314
14.3	Anhang C: Darstellung der Kennlinien mit empirischen Formeln	315
14.3.1	Theoretische Grundlagen	315
14.3.2	Beispiele	317
14.4	Anhang D: Approximation des Wärmestromfelds eines Heizungswärmeübertragers	323
14.4.1	Modell: $k \cdot A = \dot{Q}_{100}/100$	325
14.4.2	Modell: Gegenstromwärmeübertrager	327
14.4.3	Modell: Kreuzstromwärmeübertrager	330
14.5	Anhang E: Luftaustausch der Karosserie mit der Umgebung, Lösung der Integrale und Bestimmung der Streuung aus Messungen	330
14.5.1	Lösungen der Integrale	331
14.5.2	Bestimmung der Streuung aus gemessenen Leckagelinien	334
14.6	Anhang F: Mittlere Lufttemperatur im Fahrgastraum für den stationären Betrieb	335
14.6.1	Arithmetisches Mittel nach DIN 1946-3: 2006–2007	335
14.6.2	Ableitung für den Außenluftbetrieb ohne Wärmequellen im Fahrgastraum	336
14.6.3	Ableitung für den Außenluftbetrieb mit Wärmequellen im Fahrgastraum	340
14.7	Anhang G: Auswertung des Verbrauchs einer HVAC für BEV im Jahresmittel	342
14.7.1	Ansätze: Verteilung nach Gauß, Kennlinien der HVAC	342
14.7.2	Numerische Methode	344
14.7.3	Analytische Methode	345
14.7.4	Beispiel	346
14.7.5	Hinweise zur Integration	346

14.8	Anhang H: Spezielle Temperaturen	348
14.8.1	Taupunkttemperatur	348
14.8.2	Kühlgrenztemperatur, Nasstemperatur.	349
14.8.3	Scheinbare Temperatur des Himmels.	350
14.9	Anhang I: Gewöhnliche Differenzialgleichungen für die instationäre Aufheizung und Abkühlung im Fahrgastraum	351
14.9.1	Instationäre Aufheizung.	352
14.9.2	Instationäre Abkühlung	357
	Literatur.	359
	Erratum zu: Pkw-Klimatisierung	E1
	Stichwortverzeichnis.	361



THESEUS-FE ist eine unverzichtbare Stütze geworden bei der Optimierung der Fahrzeug-Innenraumklimatisierung und bei der Vorhersage des thermischen Komforts der Insassen. Gerade bei Elektrofahrzeugen ist die thermische Simulation von immenser Bedeutung, um den Energieaufwand für die Innenraumklimatisierung zu Gunsten der Reichweite zu reduzieren.

THESEUS-FE bildet den Maßstab für die thermische Komfortsimulation und wird von den weltweit führenden Automobilherstellern eingesetzt.

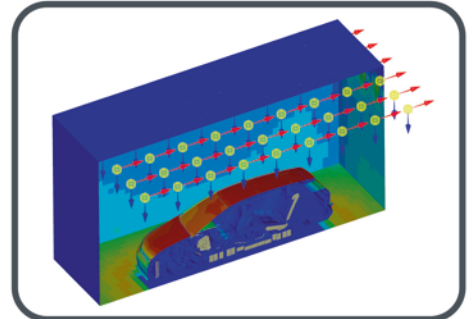
Enthalten sind zahlreiche etablierte Modelle der Thermoregulation und des Insassenkomforts (Fiala-Manikin, Äquivalenttemperatur, ISO 14505, Zhang, PMV und PPD).

THESEUS-FE bietet umfangreiche Modelle für die Modellierung solarer und thermischer Strahlung. Solarstrahlung durch Scheiben kann mehrlagig und wellenlängenabhängig simuliert werden.

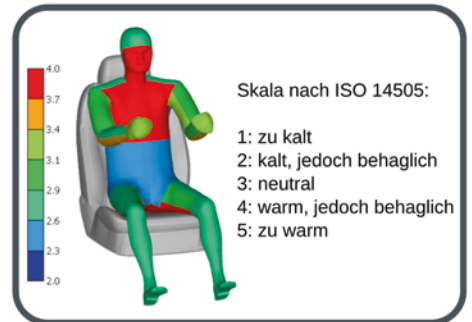
Der Modellierungsaufwand wird durch die enthaltene umfassende Materialdatenbank erheblich reduziert.

Wir bieten Ihnen:

- Schulungen direkt vor Ort
- Unterstützung bei der Modellerstellung
- akademische Lizenzen für Forschung und Lehre



Simulation einer Klimakammer



Skala nach ISO 14505:

- 1: zu kalt
- 2: kalt, jedoch behaglich
- 3: neutral
- 4: warm, jedoch behaglich
- 5: zu warm

Komfortsimulation

Die P+Z Engineering GmbH ist Ihr zuverlässiger Partner mit jahrzehntelanger Expertise in der Simulation auf den Gebieten Klimatisierung, Komfort und CFD. Wir bieten individuellen Support beim Einsatz von THESEUS-FE in Ihren Projekten. Darüber hinaus unterstützen wir Sie in der Simulation, Konstruktion und Messung im gesamten Automotive-Bereich. Kontaktieren Sie uns!

Die Module der Software THESEUS-FE im Überblick:



Übersicht

1. Grundlagen

In drei Kapiteln wird über die Historie, weltweite Klimate und Regelwerke (Vorschriften, Normen und Richtlinien) berichtet. Die geschichtliche Entwicklung wird skizziert und auf wesentliche Meilensteine eingegangen. Normen, Richtlinien und Literaturstellen werden zusammengestellt, die für die Auslegung einer Klimaanlage und einer Heizung unentbehrlich sind. In einem Beispiel wird der Einfluss der Lufttemperatur und der Feuchte verschiedener Standorte auf die erforderliche Verdampferleistung gezeigt. Die Umrechnung des Luftdrucks auf eine andere Höhe wird mit einem Beispiel belegt. Es werden auch verschiedene Regenarten beschrieben. Zulassungsrelevante und wichtige Normen wurden zusammengestellt, die wiederum Querverweise enthalten.

2. Klimaphysiologie

In dieser Abhandlung werden die Unterschiede zwischen der Klimatisierung von Gebäuden und Pkw beschrieben. Zur Bewertung des Komforts wird das Modell nach Fanger erklärt, durch die direkte Sonneneinstrahlung erweitert und das Prinzip durch Diagramme veranschaulicht. Für Pkw ohne Klimaanlage (AC) ist bei sommerlichen Bedingungen die Schweißbildung der Insassen erheblich. Daher wird auf den Stofftransport des Schweißes und dessen Speicherung in der Kleidung und im Sitz hingewiesen. Messungen in einem Pkw zeigen bei Sonneneinstrahlung, dass beim Einsatz einer AC primär die Lufttemperatur in den Düsen abgesenkt und sekundär die Gebläsestufe nur geringfügig angehoben wird. Gezeigt wird die Herzfrequenz mit und ohne AC vs. Zeit nach dem Einsteigen in einem von der Sonne aufgeheizten Pkw. Ohne Klimaanlage steigt die Herzfrequenz kontinuierlich an. Mit AC sinkt die Herzfrequenz, bis nach etwa 20 min nahezu die Ruhfrequenz erreicht wird. Weiterhin wird auf den Einsatz

von Klima-Messpuppen und Möglichkeiten zum körpernahen Heizen und Kühlen hingewiesen.

3. Luftstrom durch den Fahrgastraum

Die Luft, die durch den Fahrgastraum strömt, ist das wichtigste Transportmedium für die erforderliche Wärme- und Stoffübertragung. Dabei wird die Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage mit Außenluft und nur in Sonderfällen mit Umluft betrieben. In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen den Anordnungen der Zu- und Abluftöffnungen, dem Gebläse, den Luftführungen bzw. durchströmten Komponenten, dem Entlüftungssystem und der Karosserie aufgezeigt. Es wird z. B. gezeigt, wie ein gemessenes Kennfeld eines Gebläses auf einen anderen Gebläsemotor umgerechnet werden kann. Zur Ermittlung des Luftstroms durch den Fahrgastraum wird die Innendruckmethode am Beispiel eines Pkw der B-Klasse angewendet. Die Druckverlustlinien der Karosserie (Leckagelinien) werden analysiert, dimensionslos dargestellt und theoretisch abgeleitet. Beispiele aus der Praxis ergänzen die zusammengestellten Grundlagen.

4. Wärmestrom durch den Fahrgastraum

Die mittlere Innenraumlufttemperatur wird nach DIN 1946-3:2006 definiert. Für den Winter- und Sommerbetrieb werden vereinfachte Wärmebilanzen aufgestellt. Im Außenluftbetrieb ist die Ablufttemperatur unbekannt. Daher wird diese mit verschiedenen Ansätzen abgeschätzt. So werden Gleichungen für die mittlere Innenraumlufttemperatur erhalten. Der Wärmedurchgang einer Karosserie wird meistens experimentell ermittelt und als Erfahrungswert verwendet. Dieser beträgt etwa 60 W/K bei einem Volumen des Fahrgastraums von 2,5 m³. Es wird über verschiedene Methoden berichtet, um den Einfluss der Scheiben zu analysieren. Beispiele aus der Praxis ergänzen die zusammengestellten Grundlagen. Gezeigt werden typische Abb. zur instationären Aufheizung und Abkühlung des Fahrgastraums. Bei Pkw mit Verbrennungsmotor ist die Aufheizung wegen der großen Wärmekapazität des Motors träge. Die Heizleistung wird mit Öffnen des Thermostaten (Vorlauftemperatur ca. 90 °C) begrenzt. Die instationäre Aufheizung hat im Umluftbetrieb keine Vorteile gegenüber dem Außenluftbetrieb. Batteriebetriebene Pkw (BEV) heizen bei identischer Primärenergie schneller auf als Pkw mit Verbrennungsmotor. Die Aufheizung ist bei BEV im Umluftbetrieb effizienter als im Außenluftbetrieb. Ein in der Sonne aufgeheizter Pkw wird effizient mit der Kälteanlage im Umluftbetrieb gekühlt.

5. Winterbetrieb

Es werden Messergebnisse von Versuchen gezeigt, die in einem Klimawindkanal bei einer Außenlufttemperatur von -20 °C durchgeführt wurden. Im Umluftbetrieb beträgt die erforderliche Heizleistung etwa 50 % von der im Außenluftbetrieb, jedoch beschlagen und vereisen die Scheiben auf der Innenseite. Eine vereinfachte Wärmebilanz am Verbrennungsmotor verdeutlicht das Defizit an Heizleistung bei verbrauchsoptimierten Ausführungen. Die Wirkungsweise verschiedener Zusatzheizungen wird beschrieben. Für die Entfeuchtung und Enteisung der Scheiben gibt es Vorschriften, die erfüllt werden müssen (FMVSS 103, EWG 78/317, ADR 15). Vom Luftstrom aus den Düsen der Scheibenentfeuchtung kann partikelbelastete Luft aus dem Fahrgastraum angesaugt werden. Die Partikel wirken als Keime für die Bildung von Kondensat an der Scheibe, das insbesondere bei Gegenlicht zu Sichtbehinderungen führt. Beim Coanda-Effekt legt sich die Luft an der Hutze der Schalttafel an und strömt nicht zur Scheibe. Für verschiedene Anordnungen von elektrisch beheizten Scheiben wurden dazugehörige Formeln zusammengestellt. Beispiele aus der Praxis ergänzen die zusammengestellten Grundlagen.

6. Sommerbetrieb

Die Sonneneinstrahlung in einen Pkw wird mit dem Tagesgang der Sonne, der geometrischen Anordnung der Scheiben und der Ausrichtung beschrieben. Die Transmission der einzelnen Scheiben wird berücksichtigt. Die Lackierung der Karosserie absorbiert Sonnenstrahlung. Der Einfluss der Farben wird mit Messungen und einer Wärmebilanz belegt. Abgeschätzt wird die Wärmestromdichte eines Pkw-Dachs bei Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten der Außenströmung und der Strahlungstemperatur der Umgebung. Der Treibhauseffekt von geparkten Pkw in der Sonne und die Aufheizung der Luft an der Motorhaube werden theoretisch erklärt und mit Versuchen bestätigt. Es wird über Messungen in einem Klimawindkanal mit und ohne Einsatz einer Klimaanlage berichtet. Mit einfachen Ansätzen wird die erforderliche Verdampferleistung (Kälteleistung) abgeschätzt. Eine Standbelüftung mit Solartechnik verbessert den Einstiegskomfort. Schließlich wird über die Entstehung von Scheibenbeschlag berichtet. Beispiele aus der Praxis ergänzen die zusammengestellten Grundlagen.

7. Stofftransport

Eintretender Regen in das Belüftungssystem und Kondensat am Verdampfer müssen bei allen Betriebsbedingungen vollständig abgeführt werden. Auch ist die Speicherung von Wasser im Verdampfer zu minimieren und die Kondensation an Bauteilen im Fahrgastraum zu vermeiden. Wasser bzw. Wasserdampf im Fahrgastraum begünstigen den

Scheibenbeschlag und das Wachstum von Mikroorganismen. Nach der Richtlinie VDI 6032 sind Partikel vor dem Verdampfer mit einem Filter abzuscheiden. Filter sind in einem trockenen Bereich anzuordnen, da sich auf der Zuluftseite bei hoher Feuchtigkeit ein Substrat (Nährboden) für Schimmelpilze bilden kann. Für die Gaskonzentration im Fahrgastraum, die z. B. durch ausgeatmetes Kohlenstoffdioxid hervorgerufen wird, können die MAK-Werte als Anhalt herangezogen werden. Für die maximale Kältemittelfüllung, die plötzlich in einen Raum einströmen würde, gibt es praktische Grenzwerte für Maschinenräume.

8. Wärmeübertrager

Es werden theoretische Betriebscharakteristika von Wärmeübertragern (WT) aus der Literatur zusammengestellt. Damit wird der Zusammenhang zu vereinfachten Formeln, die in der Praxis üblich sind, und zu verwendeten Begriffen, z. B. ETD (Eintritts-Temperatur-Differenz), k' und \dot{Q}_{100} , hergestellt. Die theoretischen Gleichungen bilden die Grundlage für Interpolationen und Analysen eines WT. Es werden gemessene Wärmestromkennfelder und Druckverlustlinien von einem Heizungswärmeübertrager (HWT) und einem Verdampfer gezeigt. Diese Kennfelder werden so, wie in der Praxis üblich, dargestellt. Beschrieben werden ferner Interpolationen von Wärmestromkennfeldern, die Abhängigkeit des Wärmestromkennfelds und der Druckdifferenz eines HWT von den Stoffgrößen auf der Flüssigkeitsseite sowie die luftseitige Wärmebilanz eines Verdampfers. Die Analysen und Beschreibungen werden mit Beispielen ergänzt.

9. Kältemittel-Kreislauf

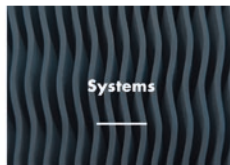
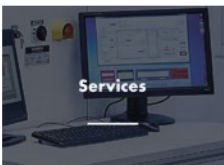
Es werden die theoretischen Kreisprozesse einer Kompressionskälteanlage mit den Kältemitteln R134a und R744 (Kohlenstoffdioxid) dargestellt. Letzterer wird als überkritisch bezeichnet, da der Hochdruck meistens oberhalb des kritischen Drucks liegt. Dieser ist bis zu 10-mal höher als bei einer R134a-Anlage. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen kann der Hochdruck wie bei herkömmlichen Anlagen unterhalb des kritischen Drucks sein. Aus der Literatur werden Verfahren zusammengestellt, um eine optimale Leistungszahl (COP: Coefficient of Performance) mit einer R744-Kälteanlage zu erzielen. Die Leistungszahlen einer R744- und R134a-Kälteanlage sind etwa gleich. Auf die Vor- und Nachteile von R1234yf wird hingewiesen.

10. Komforterrhöhung und Energieersparnis

Potenziale zur Komforterrhöhung und Energieersparnis lassen sich physikalisch ableiten. Diese sind den Ingenieuren der Pkw-Klimatisierung meistens bekannt. Die eigentliche



OBRIST Engineering is an Austrian technology company with 20 years of experience in the development of thermal management components and systems, waste heat recovery systems and including automotive powertrains. We have extended our technological lead in mobile applications based on the natural refrigerant R744.

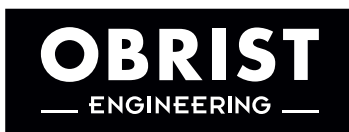


Do you want to work in an international company that has made a name for itself through its extraordinary development skills, supporting services and innovative products?

Our team is searching for the following:
Project Leaders and Designers (Creo/CATIA)
Simulation & Calculation Engineers (GT-Suite/Matlab)
Testing Engineerings and Refrigerant Technicians

We are an owner-managed, innovative and quickly growing company based in Lustenau, Austria on beautiful Lake Constance!

Exciting tasks for determined individuals await you. Join us!



OBRIST Engineering GmbH
z.Hd. Gerda Obrist
Rheinstrasse 26-27
6890 Lustenau, Österreich

+43 5577 623 70 89 ✉ g.obrist@obrist.at 🌐 www.obrist.at

Schwierigkeit ist die Umsetzung der Maßnahmen, da der Pkw maßgeblich durch das Design und die Kosten geprägt wird. Wegen der aktuellen Vorgaben der Europäischen Union zum CO₂-Ausstoß werden wirksame und kostengünstige Lösungen gesucht und bei Eignung verwirklicht. Mit der konsequenten Regelung des Klimagerätes und des Kältemittel- und Kühlmittelkreises kann ein breites Potenzial erschlossen werden (Thermomanagement). Eine günstigere Anordnung der Luftansaugung oder eine nach physikalischen Gesichtspunkten ausgewählte Geometrie der Verglasung tangieren jedoch das Erscheinungsbild des Pkw und treffen kaum den jeweiligen Zeitgeschmack. Über Verbesserungen, z. B. einem zusätzlichen Wärmeübertrager im Kältekreis (Innerer Wärmeübertrager), wird berichtet. Mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) können im Winter insgesamt bis 55 % Wärme aus der Abluft des Entlüftungssystems übertragen werden. Aus der Leckluft der Karosserie kann keine Wärme zurückgewonnen werden. Im Kurzstreckenverkehr sind WRG wegen der thermodynamischen Trägheit nicht effizient. Weiterhin kann der Wärmeübertrager im Entlüftungssystem bei niedrigen Umgebungstemperaturen vereisen.

11. Prüfstände

Einige Prüfstände der Audi AG und deren Spezifikationen sowie Aufgaben werden beschrieben. Diese sind ein Klimawindkanal (Bj. 2007) und eine Klimakammer (Bj. 1971). Für einen Prüfstand zur Messung der Heizung, Lüftung und Klimaanlage werden Hinweise zur Auswertung von Messungen gegeben. Dies betrifft insbesondere die Ermittlung von Massen- und Wärmeströmen an Heizungswärmeübertragern und Verdampfern. Hierzu werden Beispiele aus der Praxis genannt. Ein Prüfstand für komplette Kältemittel-Kreisläufe mit alternativen Kältemitteln ist ähnlich aufgebaut und wurde erweitert. Mit einem sehr einfachen Prüfstand können mit der Innendruckmethode die Luftmassenströme durch den Fahrgastraum ermittelt werden. Die Möglichkeiten der Innendruckmethode werden dargestellt. Eine Berechnungsanlage mit einer schwenkbaren Hebebühne wird gezeigt und die Prüfvorschriften werden genannt.

12. Straßenversuche

Mit heutigen Klimawindkanälen können die physikalischen Größen an Pkw sehr genau und reproduzierbar gemessen werden. Doch werden nicht sämtliche Randbedingungen, die in der Natur vorkommen, hinreichend genau simuliert. Hierzu gehören z. B. der Tagesgang der Sonne, wechselnde Temperaturen und Luftfeuchten der Außenluft etc. Daher sind Versuche auf der Straße, vorzugsweise in einem abgesicherten Prüfgelände, erforderlich. Die Messung der Temperaturen im Fahrgastraum wird beschrieben. Für den Vergleich verschiedener Pkw werden die Messungen synchron durchgeführt. Vorteilhaft ist es, wenn ein genau vermessenes Fahrzeug als Referenz immer mitgemessen wird.

Die Anordnung der Messstellen und die Bewertung der Messergebnisse erfolgt nach DIN 1946-3:2006. Zur Messung luftseitiger Druckdifferenzen wird ein Prandtl-Rohr verwendet, das vorzugsweise oberhalb des Fahrzeugdachs im hinteren Bereich angeordnet ist. Anstelle des Prandtl-Rohrs kann ein kalibrierter Bezugspunkt an der Karosserie verwendet werden.

13. Elektrisch betriebene Pkw

Verschiedene Antriebskonzepte elektrisch betriebener Pkw werden zusammengestellt. Angaben zur maximalen Reichweite und der installierten Batteriekapazität werden nach Pressemitteilungen und der Literatur ausgewertet. Es besteht näherungsweise ein linearer Zusammenhang. Die spezifische Reichweite beträgt etwa 6,6 km/kWh und der spezifische Verbrauch ca. 15 kWh/100 km ohne Klimatisierung und sonstige Verbraucher. Es wird der Einfluss der Klimatisierung auf die Reichweite abgeschätzt. Diese wird im Sommer- und insbesondere im Winterbetrieb erheblich reduziert. Der Mehrverbrauch beträgt in Deutschland im Jahresmittel ca. 3,8 kWh/100 km. Der scheinbar niedrige Verbrauch von Plug-in-Hybriden wird mit Beispielen belegt. Die instationäre Aufheizung des Fahrgastraums von BEV ist mit Hochvolt-WT effizienter als bei Pkw mit Verbrennungsmotoren. Von Hochvolt-Wärmeübertragern werden Anordnungen, Heiztechnologien und Regelungen beschrieben. Diskutiert werden eine bedarfsgerechte Lüftung mit Heizungen in BEV und Besonderheiten bei der Auslegung einer HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning). In Tabellen werden einige passive und aktive Maßnahmen für den Sommer- und Winterbetrieb genannt, mit welchen die Reichweitenreduktion minimiert werden kann. Optimale Ergebnisse können nur durch Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht werden.

14. Anhang A bis I

Im Anhang sind Diagramme für feuchte Luft, Äthylenglykol-Wassermischungen sowie Kältemittel R134a und R744 zusammengestellt.

Dort findet man auch häufig verwendete Formeln. Zur Darstellung der Kennlinien mit empirischen Formeln werden die Abgleichmethode, die Summe der kleinsten Fehlerquadrate und die Interpolation verwendet. Damit werden die Kennlinien verschiedener Komponenten mit Beispielen abgebildet, aber auch die Grenzen bei der Anwendung aufgezeigt. Das Wärmestromfeld eines Heizungswärmeübertragers kann hinreichend genau approximiert werden. Grundlage sind die Annahme eines theoretischen Wärmeübertragers und die Ermittlung einer Funktion des Wärmedurchgangs. Beispiele aus der Praxis zeigen solche Auswertungen und den Vergleich zwischen der Messung und der Approximation. Die Interpolation innerhalb des gemessenen Bereichs ist zufriedenstellend. Teilweise kann auch mit der notwendigen Vorsicht extrapoliert werden.

Mit theoretischen Ableitungen des Luftaustauschs durch die Karosserie wurden Parameterintegrale erhalten. Die Integrale werden umgeformt, in Reihen entwickelt und mit Hilfe von Gammafunktionen und den Symmetrieeigenschaften, welche zwischen dem Leckzu- und abluftstrom bestehen, gelöst.

Die mittlere Lufttemperatur im Fahrgastraum wird für den stationären Betrieb als arithmetisches Mittel nach DIN 1946-3: 2006–2007 dargestellt und diskutiert. Diese wird für den Außenluftbetrieb mathematisch abgeleitet. Physikalisch besteht eine Analogie zur stationären Abkühlung eines Fluids in einem Rohr. Es wird gezeigt, welchen Einfluss Wärmequellen auf den Temperaturverlauf im Rohr bzw. Fahrgastraum haben.

Es wird eine mathematische Methode zur Ermittlung des Mehrverbrauchs einer HVAC im Jahresmittel (kWh/100 km) beschrieben. Verwendet werden Kennlinien der HVAC und die Häufigkeit der Umgebungstemperaturen, der r. F. und Sonneneinstrahlung. Die Auswertung geschieht numerisch und analytisch.

Zur Ermittlung der Taupunkt- und Kühlgrenz- bzw. Nasstemperatur werden Beispiele herangezogen. Weiterhin wird über scheinbare Temperaturen des Himmels in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur mit der r. F. als Parameter bei sternklaren, wolkenlosen berichtet.

Bei den Auswertungen von Wärmebilanzen instationärer (von der Zeit abhängiger) Vorgänge können Differenzialgleichungen (DGL) hilfreich sein. Diese sind meistens sehr kompliziert und nur aufwendig oder überhaupt nicht lösbar. Es werden Lösungswege und Ergebnisse gewöhnlicher DGL angegeben.

Nomenklatur

Formelzeichen

A	[m ²]	Fläche
A_S	[-]	Absorptionsvermögen der Sonneneinstrahlung
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
b	[J/(m ² · K · s ^{0,5})]	Wärmeeindringzahl
C	[L/100 km]	Consumption, Kraftstoffverbrauch
C_S	[W/(m ² · K ⁴)]	Konstante der Wärmestrahlung
c_p	[J/(kg · K)]	spezifische isobare Wärmekapazität
c_p	[-]	Druckbeiwert der Außenströmung
c_I	[-]	dimensionsloser Innenraumdruck
D, d	[m]	Durchmesser
dB	[-]	Schalldruck
E	[J, kWh]	Energie
e	[J/m], [kWh/(100 km)]	spezifische Energie
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	örtliche Fallbeschleunigung
H	[-]	Häufigkeit
H	[J]	Enthalpie
\dot{H}	[W]	Enthalpiestrom
\dot{H}_{sen}	[W]	sensibler Wärmestrom
\dot{H}_{lat}	[W]	latenter Wärmestrom
H_u	[J/kg]	spezifischer Brennwert, unterer Heizwert
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
h	[m]	Höhe
\dot{h}	[W/kg]	spezifischer Enthalpiestrom
I	[A]	elektrische Stromaufnahme
I	[W/m ²]	solare Bestrahlungsstärke, Sonnenintensität
k	[-]	Exponent

k	[W/(m ² · K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
L	[°]	geografische Länge
L_p	[dB]	Schalldruck
l	[m]	Länge
l	[-]	dimensionsloser Luftstrom
M	[Nm]	Drehmoment
m	[kg]	Masse
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
\dot{m}_A	[kg/s]	Abluftstrom
\dot{m}_B	[kg/s]	Belüftungsstrom
$\dot{m}_{L,ab}$	[kg/s]	Leckabluftstrom
$\dot{m}_{L,zu}$	[kg/s]	Leckzuluftstrom
\dot{m}_W	[kg/s]	Wassermassenstrom
n	[s ⁻¹]	Drehzahl
Nu	[-]	Nußelt-Zahl
P	[W]	Leistung
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
p	[Pa]	Druck
p_{amb}	[Pa]	Umgebender Atmosphärendruck
Q	[J]	Wärme, Wärmemenge
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
\dot{Q}_{100}	[W]	Wärmestrom mit ETD = 100 K
\dot{Q}_0	[W]	Verdampferleistung
q	[Pa]	Staudruck
q_0	[kJ/kg]	massenstrombezogene Kälteleistung
q_c	[kJ/kg]	massenstrombezogene Verflüssigerleistung
q_S	[W/m ²]	Sonnenstrahlung
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
R_B	[J/kg · K]	spezielle Gaskonstante des Stoffes B
R	[m ² · K/W]	Wärmeleitwiderstand
Re	[-]	Reynolds-Zahl
r	[J/kg]	spezifische Verdampfungswärme
S	[kJ/K]	Summe scheinbarer Wärmekapazitäten
s	[s]	Weg
T	[K]	thermodynamische Temperatur
t	[s]	Zeit
U	[V]	elektrische Spannung
u	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
v	[m ³ /kg]	spezifisches Volumen
W	[W/K]	Wärmekapazitätsstrom

W	[J], [N · m], [W · s]	Arbeit, Energie
w	[m/s]	Geschwindigkeit
w	[kJ/kg]	massenstrombezogene Leistungsaufnahme des Verdichters
x	[kg/kg]	Wassergehalt
z	[-]	Anzahl der Tage ab dem 1. Januar
z	[m]	Höhe über dem Meeresspiegel

Griechische Bezeichnungen

α	[W/(m ² · K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α_s	[-]	Absorptionsgrad der Sonneneinstrahlung
α	[°]	Azimut der Flächennormalen
β	[°]	Anstellwinkel einer Fläche zur Horizontalen
β	[-]	Exponent
γ	[°]	Elevation, Sonnenhöhe
Δ		Differenz
δ	[°]	Deklination, Neigung der Erde
δ	[m]	Dicke
ε	[-]	Emissionsgrad
ε	[-]	Leistungszahl, COP
ζ	[-]	Druckverlustzahl
η	[-]	Wirkungsgrad
η	[Pa · s]	dynamische Viskosität
η	[°]	Einfallswinkel
Θ	[-]	dimensionslose Temperatur
ϑ	[°C]	Celsius-Temperatur
κ	[-]	Leistungszahl, NTU
λ	[W/(m · K)]	Wärmeleitfähigkeit
λ	[-]	Rohrreibungs-Zahl
λ	[m]	Wellenlänge
μ	[-]	Mittelpunkt einer Normalverteilung
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ν	[-]	Durchmesser Verhältnis
ξ	[-]	Druckverlustzahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ	[-]	Reflexionsgrad
σ	[-]	Streuung der Normalverteilung
τ	[-]	Transmissionsgrad
τ	[-]	Verhältnis der Wärmekapazitätsströme

Φ	[-]	Effektivität, Betriebscharakteristik
φ	[-], [%]	relative Feuchte
φ	[°]	geografische Breite
φ	[-]	Lieferziffer
ψ	[-]	Druckziffer
ψ	[°]	Azimut der Sonne
ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
ω	[°]	Stundenwinkel der Sonne

Bezeichnungen

\dot{Q}_{100}	Wärmestrom bezogen auf eine Eintritts-Temperatur-Differenz von 100 K
ETD	Eintritts-Temperatur-Differenz

Abkürzungen

AC	Air Conditioning (Klimaanlage, ohne Luftbefeuchtung)
BEV	Battery Electric Vehicle
COP	Coefficient of Performance
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
FGR	Fahrgastraum
GND	Ground, über Grund
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
HV	Hochvolt
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
HWT	Heizungswärmeübertrager
MEZ	Mitteuropäische Zeit
MESZ	Mitteuropäische Sommerzeit
MOZ	Mittlere Ortszeit
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NN	Normal Null
NTU	Number of heat transfer Units, Leistungszahl
ODP	Ozon Depletion Potenzial, Ozonabbaupotenzial
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMV	Predicted Mean Vote (mittlerer Wärmebeurteilungs-Index)
PTC	Positive Temperature Coefficient
R134a	Kältemittel 1,1,1,2-Tetrafluorethan
R744	Kältemittel Kohlenstoffdioxid

r. F.	relative Feuchte
SAD	Schiebe-Ausstelldach
StVO	Straßenverkehrsordnung
SUV	Sport Utility Vehicle
UTC	Universal Time Coordinated (Greenwich-Zeit)
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WRG	Wärmerückgewinnung
WOZ	Wahre Ortszeit
WT	Wärmeübertrager
ZGL	Zeitgleichung

Mathematische Symbole: *Logische Symbole*

π	Ludolfsche Zahl; $\pi = 3,14159\dots$
e	Eulersche Zahl; $e = 2,71828\dots$
$n!$	Fakultät
$\sum_{i=1}^n a_i$	Summe
\vec{V}	Vektor

Funktionen

e^x	Exponentialfunktion oder $\exp x$
$\ln x$	natürlicher Logarithmus (zur Basis e)
$\log_{10} x, \lg x$	Logarithmus zur Basis 10
x^α	allgemeine Exponentialfunktion
$\sin x, \cos x$	Sinus von x und Kosinus von x
$\arcsin x, \arccos x$	Arkussinus von x und Arkuskosinus von x
$\sinh x$	Sinus hyperbolicus
Γx	Gammafunktion von x
r^2	Bestimmtheitsmaß
$\operatorname{sgn} x$	Signum von x , Vorzeichen von x
$\int_a^b f(x) dx$	Integral der Funktion $f(x)$ im Intervall $[a, b]$
$\Phi [-]$	Wahrscheinlichkeitsintegral
$\varphi [-]$	Wahrscheinlichkeitsdichte