

Entwurf eines Kombiprüfzyklus für Schienenfahrzeuge

Moderne Klimaanlage müssen enormen Anforderungen genügen. Dies erfordert die Verwendung klimaneutraler Kältemittel, eine deutliche Reduktion beim Energieverbrauch, aber auch unter Extrembedingungen dürfen die Geräte nicht versagen. Zur Validation dieser Anforderungen sind unterschiedlichste Prüfzyklen erforderlich, die zusammengefasst in einem Kombiprüfzyklus bestehende und künftige Anlagen weiter verbessern und untereinander vergleichbar machen.



1. Einleitung

Der Bedarf das Kältemittel R134a zu ersetzen, Probleme mit aktuellen Klimaanlage am Rand ihrer Auslegung sowie nötige Effizienzsteigerungen, erfordern Tests an bestehenden und neuen Klimaanlage des Schienenverkehrs. Darum wurde im Frühjahr 2020 bei der DB-Systemtechnik in München der Laborteststand zur Untersuchung, Diagnose und Entwicklungsbegleitung von Klimaanlage LUDEK eröffnet. Der LUDEK ergänzt auf Anlagenebene das Prüflabor MEiKE (Mindener Einrichtung für die klimatische Untersuchung an Eisenbahnfahrzeugen), mit welchem Bahnklimasysteme integriert in einem Referenz Wagen auf Zugebene untersucht werden. Für eine valide Prüfung der Klimageräte sollen Prüfzyklen definiert werden, welche die verschiedenen Aspekte im ‚Leben‘ einer Klimaanlage abdecken. Im Folgenden werden die technisch, physikalischen Zusammenhänge aufgezeigt die beim Erstellen eines umfassenden Kombiprüfzyklus für Klimaanlage im Schienenverkehr Verwendung finden. Als Startpunkt wurde eine generische Kältdampfklimaanlage genutzt und die thermodynamischen Beziehungen zwischen den im System genutzten Komponenten analysiert. Technische Details lehnen sich an die Klimaanlage des ICE2 an. Der theoretischen Analyse folgt die Vorstellung von Versuchen, welche verschiedene Aspekte eines künftigen Kombiprüfzyklus, wie den Leistungsnachweis im Betriebspunkt, Stresstests oder Störfälle abdecken.

2. Kombiprüfzyklus für Bahnklimageräte

Klimaanlagen unterliegen im Betriebsalltag diversen Anforderungen in Bezug auf Effizienz und Zuverlässigkeit. Zur Bestimmung des Energieverbrauchs muss der erbrachten Kühlleistung die benutzte elektrische Leistung gegenüber gestellt werden. Dabei gilt es alle dabei beteiligten Komponenten zu berücksichtigen. Bei den oft genutzten Kältdampfanlagen muss neben der Leistung des Verdichters z. B. auch der Energiebedarf der den Wärmetauschern vorgeschalteten Lüfter berücksichtigt werden, zumal diese potent ausgelegt sind, da das Klimagerät auch bei stehendem Zug funktionieren muss. Am Beispiel eines Klimageräts auf Basis des Kältdampfprozesses wird im Folgenden auf die verschiedenen Aspekte zur Prüfung von Zuverlässigkeit, Effizienz und Nachhaltigkeit einer Klimaanlage genauer eingegangen. Wichtige zu bestimmende Parameter zur Prüfung sind:

- Wärmeübergang an Kondensator/Verdampfer
- Druckverlust an den Wärmetauschern
- Regelfähigkeit
- Tests unter extremen Betriebsbedingungen
- Prädiktive Schadensdetektion durch Messdaten

Die notwendigen Voraussetzungen zum Betrieb der Klimaanlage werden am LUDEK einem Prüfstand für Klimageräte der DB-Systemtechnik bereitgestellt. Hier



Axel Dannhauer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

axel.dannhauer@dlr.de



Dr. Peter Claus

Leiter Komponentenerprobung Aerodynamik und Klimatechnik DB Systemtechnik GmbH, München

peter.claus@deutschebahn.com



Dr. rer. nat. Daniel Schmeling

Gruppenleiter Fahrzeugklimatisierung, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

daniel.schmeling@dlr.de

werden die notwendigen Luftmengen sowie Kühl- und Heizleistungen bereitgestellt, die für den Betrieb der Klimageräte notwendig sind und flankierend notwendige Daten zur Prüfung der Anlage erfasst. In die Luftversorgung zu integrierende Komponenten sind bei Kältdampfanlagen der Kondensator und Verdampfer. Komponenten des Klimageräts, die nicht dem Luftstrom ausgesetzt sind, werden von der Steuerung des Prüflings überwacht. Ergänzende Sensoren können jedoch in der Datenerfassung des LUDEK ergänzt werden.

der in den Luftkanälen des LUDEK aufgezeichneten Messdaten können so Rückschlüsse auf etwaige Störungen gezogen werden, bzw. durch die nachfolgend beschriebenen Tests im Vorfeld vermieden werden.

5. Kombiprüfzyklus für Bahnklimaanlagen

Im Folgenden werden Prüfzyklen vorgestellt, die als Teil eines Kombiprüfzyklus Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Schadenslage eines Prüflings zulassen.

5.1. Leistungsnachweis im Betriebspunkt

Die addierten Anschlussleistungen werden bei diesem Test mit der Differenz der Enthalpien an Kondensator und Verdampfer verglichen. Die Zuströmung zum Verdampfer entspricht dabei dem Mischluftzustand, bei dem ein Teil der Frischluft durch recirkulierte Luft des Fahrgastraums ergänzt wird. Der Kondensator wird im Fahrbetrieb nur von Außenluft umströmt. Der Betriebspunkt eines ICE2 Klimageräts ist exemplarisch in nachfolgender Tabelle 2 aufgelistet.

Beiträge der Ventilatoren zum Energieverbrauch des Klimageräts können durch Vergleich der Anschlussleistung zum generierten Volumenstrom bestimmt werden.

Verschmutzte/beschädigte Kühllamellen der Wärmetauscher verursachen zudem einen Impulsverlust in der Strömung, der mit Drucksonden im Nachlauf des Geräts aufgespürt werden kann.

5.2. Stresstest: Klimaversuch bei maximaler Außentemperatur

Im Sommer unterliegen die Klimaanlagen extremen Anforderungen und es gilt zu prüfen, ob die Anlage bei Vorgabe extremer Kühlanforderung:

- hoher Volumenstrom
- niedrige Temperaturanforderung
- heiße, feuchte Außenluft

die geforderte Kühlleistung ohne Schwankungen und Störungen erbringen kann. Hohe Außentemperaturen reduzieren dabei am Kondensator den Wärmeübergang (Baehr & Stephan, 1994). Der resultierende Anstieg der Verflüssigungstemperatur wird von der Klimaanlage erst durch Erhöhung der Ventilator Drehzahl erwidert und dann durch Anheben des Drucks im Kältemittel ergänzt, was zum Anstieg der Verdichterleistung führt (Arbeitsgemeinschaft ICE2 (Siemens, AEG), 1998). Zu hohe Temperaturen können sogar zu Störungen führen, wenn z.B. der Phasen-

wechsel nicht mehr gewährleistet ist. Am Verdampfer wird der Wärmeübergang erhöht sein, aufgrund der energetischen Dominanz des Phasenwechsels, setzt der Massenstrom des Kältemittels der möglichen Temperaturanforderung aber eine Grenze. Wird das Klimagerät derart belastet, müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Funktioniert die Anlage ohne Störung?
- Wird die Kühlleistung erbracht?
- Energiebedarf des Klimageräts?
- Benötigte Betriebsparameter?
- Druckverluste an den Wärmetauschern?
- Erreichbare Temperaturdifferenzen an den Wärmetauschern?

Die für den Stresstest nötigen Randbedingungen können der DIN EN 13129:2016-12 entnommen werden, wobei der Kondensator mit Außenluft und der Verdampfer mit Mischluft angeströmt wird (Tabelle 3).

5.3. DB Energie-Verbrauchszyklus (DC2013)

Mit der oben skizzierten Methodik werden für sechs repräsentative Betriebsfälle Messungen durchgeführt, welche die im Jahresverlauf auftretenden Belastungen abbilden. Der Zyklusverbrauch eines Jahres in der Klimazone II (Deutschland) kann auf Basis des DC2013 reproduzierbar bestimmt werden (Tabelle 4).

Die rechte Spalte entspricht der Häufigkeit des Betriebspunkts im Jahresverlauf. Die Randbedingungen resultieren aus den thermischen Lasten von Strahlung, Besetzung und Konvektion und können der DIN EN 13129 entnommen werden. Der Strahlungsanteil kann mit einem Referenzwagen und der bestrahlten Oberfläche bestimmt werden (Hans Dieter Baehr, 1994),

$$L_{\text{Strahlung}} = \dot{Q}_{\text{Strahlung}} \cdot A_{\text{projiziert}}$$

Die Konvektion kann aus Betriebsdaten oder Simulationen erhoben werden. Die von Passagieren generierte Wärme kann gemäß DIN EN 13129/Abbildung J.1: 24,5°C wie folgt berechnet werden:

$$L_{\text{PAX}} = \text{MAX}_{\text{PAX}} \cdot \text{Besetzung} [\%] \cdot 75\text{W}$$

Die relevanten Wärmeströme sind in Bild 2 zusammengefasst.

Die kumulierten Wärmemengen werden am LUDEK den Luftströmen als Heizleistung zugeführt und müssen entsprechend der sechs im Jahresverlauf auftretenden Betriebspunkte ermittelt werden.

Zuluftmenge (Mischluft):	Volumenstrom:	3000 +15%/-5%	m³/h
Außenluftzustand:	Temperatur:	25,0	°C
	Luftfeuchtigkeit:	50,0	%
Mischluftzustand:	Temperatur:	19,0	°C
	Luftfeuchtigkeit:	72,0	%
Zuluftzustand(Kabine):	Temperatur:	12,9	°C
	Luftfeuchtigkeit:	95,0	%

Tabelle 2: Betriebspunkt eines ICE2 Klimageräts

Zuluftmenge:	Volumenstrom:	3000	m³/h
Außenluftzustand:	Temperatur:	35,0	°C/40°C ¹⁾
	Luftfeuchtigkeit:	50,0	%
Mischluftzustand:	Temperatur:	27,0	°C
	Luftfeuchtigkeit:	50,0	%
Zuluftzustand:	Temperatur:	15,0	°C
	Luftfeuchtigkeit:	70,0	%

Tabelle 3: Randbedingungen des Streßtests nach DIN EN 13129:2016-12

Messpunkt [Nr.]	Außen-temperatur [°C]	Außenluft-feuchte [%]	T _{ic} [°C]	Strahlung [W/m²]	Besetzung [%]	Koeffizient [h]
1	-5	82	22	146	20	1396
2	0	85	22	85	50	1182
3	10	82	22	136	100	1563
4	15	75	22	219	50	1083
5	25	45	23	496	50	864
6	35	41	27	555	100	138

Tabelle 4: Im Jahresverlauf auftretende Randbedingungen in der Klimazone II (DC2013)

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020

Die Außenluftbedingungen entsprechen dabei den Anströmbedingungen des Kondensators, wogegen der Verdampfer mit Mischluft umströmt wird.

Für die Auswertung der sechs Messpunkte müssen zur Ermittlung des Zyklusverbrauchs im Anschluss nur die zugehörigen Koeffizienten multipliziert werden.

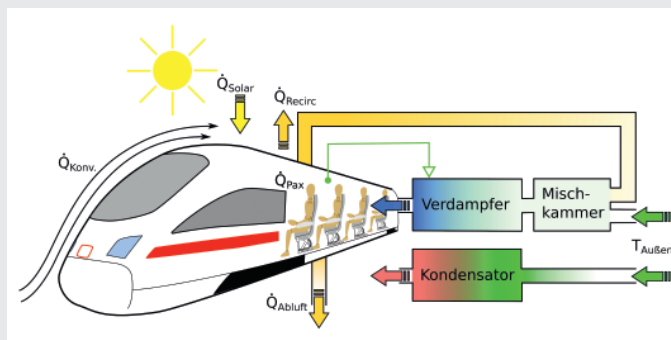
5.4. Prädiktive Zustandsanalyse des Klimagerätes (ICE2)

Mittels Parameterstudien kann der Zustand eines Klimageräts bestimmt werden und der Ausfall von Komponenten im Vorfeld vermieden, bzw. rechtzeitig eine Wartung ausgeführt werden. Vom Auslieferungszustand abweichende Druckverluste an den Wärmetauschern können z.B. auf eine Verschmutzung hinweisen. Eine notwendige Reinigung kann hier auf Basis von Kennlinien erfolgen, die den generierten Volumenstrom in Relation zur Anschlussleistung der Lüfter aufzeigen. Bei Analyse des Verschmutzungsgrades kommt erschwerend hinzu, dass bei benetzter Oberfläche (z.B. Öl) der Wärmetransfer zwar reduziert ist, eine optische Prüfung aber oftmals keine Hinweise liefert. Für die prädiktive Instandhaltung lassen sich die folgend skizzierten Zusammenhänge nutzen. Bei reduziertem Wärmeübergang am Kondensator wird ohne Regelung die Austrittstemperatur am Kondensator steigen. Eine Störung erfolgt, wenn die zur Unterkühlung eingestellte Temperatur ‚aufgebraucht‘ und der Phasenwechsel nicht mehr vollständig ist. Eine Regelung wird den Kältemittelmassenstrom reduzieren. Ein reduzierter Massenstrom bzw. Anstieg der Verflüssigungstemperatur wird also auf ein Problem mit dem Wärmeübergang am Kondensator hinweisen. Ursache können defekte Lüfter, kaputte oder verschmutzte Zuleitungen sein. Die Fehlerdetektion sollte entsprechend ihres Aufwandes erfolgen:

1. Lüfterdrehzahl prüfen
2. Totaldruck/Volumenstrom vor dem Verdampfer prüfen
3. Oberfläche am Kondensator prüfen

Der Verdampfer ist durch die Beziehung von Überhitzung und Kältemittelmassenstrom überwachbar. Die Regelung schließt das Expansionsventil, sobald der Wärmeübergang gestört ist. Ein Abgleich mit der Kälteanforderung oder Verdichterleistung zeigt, ob eine Störung am Verdampfer oder System vorliegt. Hierbei muss berücksichtigt werden ob die Anlage über einen ByPass oder

2: Auftretende Wärmeströme bei der DC2013



sonstige Regelungen verfügt. Die Steuerung wird in manchen Temperatur- und Druckbereichen z.B. versuchen mit Ventilen oder Anpassung der Verdichterdrehzahl die Verflüssigungstemperatur konstant zu halten. Eine entsprechende Prüfung sollte den dafür notwendigen Aufwand berücksichtigen und im Ablauf analog zum Vorgehen am Kondensator erfolgen. Im Fall eines Schraubenverdichters kann ein Schaden an einem steigenden Leakagestrom erkannt werden. Mechanische Abnutzung der Grenzflächen, generiert ein zunehmendes Schadvolumen, welches das maximale Druckverhältnis limitiert. Durch ein weiter zunehmendes Schadvolumen wird nicht nur das Druckverhältnis reduziert, sondern auch die Förderleistung. Im Betrieb würde ein solcher Schaden dadurch bemerkt werden, dass zum Erzielen des Förderdrucks die dafür notwendige Antriebsleistung oberhalb des nominellen Wertes liegt und die Kältemitteltemperatur signifikant größere Werte als bei adiabater Kompression annimmt.

6. Zusammenfassung

Für die Entwicklung eines Kombiprüfzyklus für Klimaanlage von Schienenfahrzeugen wurden mehrere Prüfzyklen vorgeschlagen, welche die technischen Randbedingungen eines Klimageräts auf Basis des Kaldampfprozesses berücksichtigen. Die Prüfungen erfolgten dabei unter besonderer Berücksichtigung des neuen Klimageräteprüfstands der DB Systemtechnik LUDEK. Durch Betrachtung der energetischen und technischen Zusammenhänge der einzelnen Komponenten und Parameter auf ihre Auswirkungen auf die Kälteleistung konnten systemische Zusammenhänge herausgearbeitet werden, die letztendlich zu den vorgestellten Prüfzyklen führten. Daraus kann ein Kombiprüfzyklus entwickelt wer-

den, welcher die einzelnen Prüfzyklen zusammenfasst. Somit können künftig Prüflinge (Klimaanlagen) an einem geeigneten Prüfstand standardisiert bezüglich aller relevanter Untersuchungsfelder vermessen und geprüft werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde finanziell von der Dr. Hermann und Ellen Klaproth Stiftung gefördert.

Literatur

[1] Arbeitsgemeinschaft ICE2 (Siemens, AEG). (1998). Softwaredokumentation und Beschreibung der Klimaanlage ICE2 Version 3.2.
 [2] Becker, E. (1985). Technische Thermodynamik. Stuttgart: Teubner.
 [3] Cube, H. v. (1981). Lehrbuch der Kältetechnik. Karlsruhe: C.F. Müller.
 [4] Baehr, H. D., & Stephan, K. (1994). Wärme- und Stoffübertragung. Berlin: Springer.
 [5] Zimmer, A. (1999). Thermodynamik & Kältetechnik Formelsammlung. Darmstadt: Hochschule Darmstadt.

Summary

Design of a combined test cycle for rail vehicles

To meet current requirements, modern air conditioning system have to fulfill considerable demands. This, however, requires the use of climate-neutral refrigerants, a significant reduction in energy consumption but also under extreme conditions, the devices must not fail. To validate these requirements, the different test cycles are required, which, combined in a test cycle, further improve existing and future systems and make them comparable.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020