

Messen und Messtechnik in Bus-Klimaanlagen

von M. Sonnekalb*

1. Einleitung

Busse sind in ihren Abmessungen deutlich größer als PKW. Das Bordnetz hat 24 VDC anstatt 12 VDC. Die einzusetzende Meßtechnik ist an diese Gegebenheiten anzupassen. Das Netzwerk der Meßleitungen wird größer. Andererseits bietet ein Bus mehr Einbauraum für die Meßtechnik.

Die Anforderungen an eine Busklimaanlage unterscheiden sich geringfügig zwischen Stadtlinien-, Überland- und Reisebus. Durch die häufigen Türöffnungen im Stadtlinienbetrieb sind die Anforderungen an die Solltemperaturen etwas geringer als beim Reisebus. Die Empfehlungen für den Kühlbetrieb nach VDV 236 [1] sehen eine Solltemperatur von 3 K unter der Außentemperatur für den Fahrgastraum eines Stadtlinienbusses vor und einen separat geregelten Bereich für den Fahrer. Beim Heizen müssen 18°C im Fahrgastraum und 18 bis 25°C für den Fahrerarbeitsplatz erreicht werden. Die Gütegemeinschaft Buskomfort (GBK) [2] empfiehlt für den Reisebus als Solltemperatur 25°C beim Kühlen und 20°C beim Heizen. Es soll im gesamten Innenraumbereich des Busses ein möglichst homogenes Temperaturfeld mit Toleranzen bis ± 2 K erreicht werden.

Diese Anforderungen spiegeln aber nicht die weltweiten Anforderungen wider. In tropischen Ländern kommen zusätzliche Anforderungen an die Entfeuchtungsleistung der Klimaanlage hinzu. Für sehr warme Klimata muß der Kondensator bzw. Gaskühler einer Busklimaanlage speziell dafür ausgelegt werden. Durch die erhöhten Temperaturdifferenzen zwischen Umgebung und Businnenraum und durch erhöhte Sonneneinstrahlung sind hierfür größere Kälteleistungen vorzusehen.

Bushersteller haben daher eigene Lastenhefte für die Bewertung der Busklimaanlage entwickelt.

2. Messungen im Fahrzeug

In Abbildung 1 ist ein typischer Reisebus mit einer Standard-Aufdachklimaanlage dargestellt. Die typische Länge ist 12 m. Der Motor mit dem unregelmäßigem Verdichter sitzt im Heck. Die Aufdachklimaanlage sitzt meist im mittleren Dachbereich und wird ergänzt durch einen zusätzlichen Fahrerplatzverdampfer. Da nicht genügend Heizleistung durch die Motorabwärme zur Verfügung steht, ist eine brennstoffbetriebene Zusatzheizung mit Umwälzpumpe für das Heizungssystem installiert. Die Heizungswärmetauscher sind verteilt im Bus und über Wasserleitungen verbunden. Die Kälteleistung der Klimaanlage wird im Fall der Aufdachklimaanlage über die Kältemittelverdampfer an die Zuluft im linken und rechten Luftkanal abgegeben. Der Luftkanal ist mit Auslassöffnungen und individuell einstellbaren Düsen bestückt, über die die abgekühlte Zuluft verteilt wird. Die Gestaltung des Luftkanals und der Austrittsöffnungen ist hierbei für eine homogene Temperaturverteilung entscheidend.

*Dr.-Ing. Michael Sonnekalb, Konvekta AG,
34613 Schwalmstadt, E-Mail: michaelsonnekalb@konvekta.com

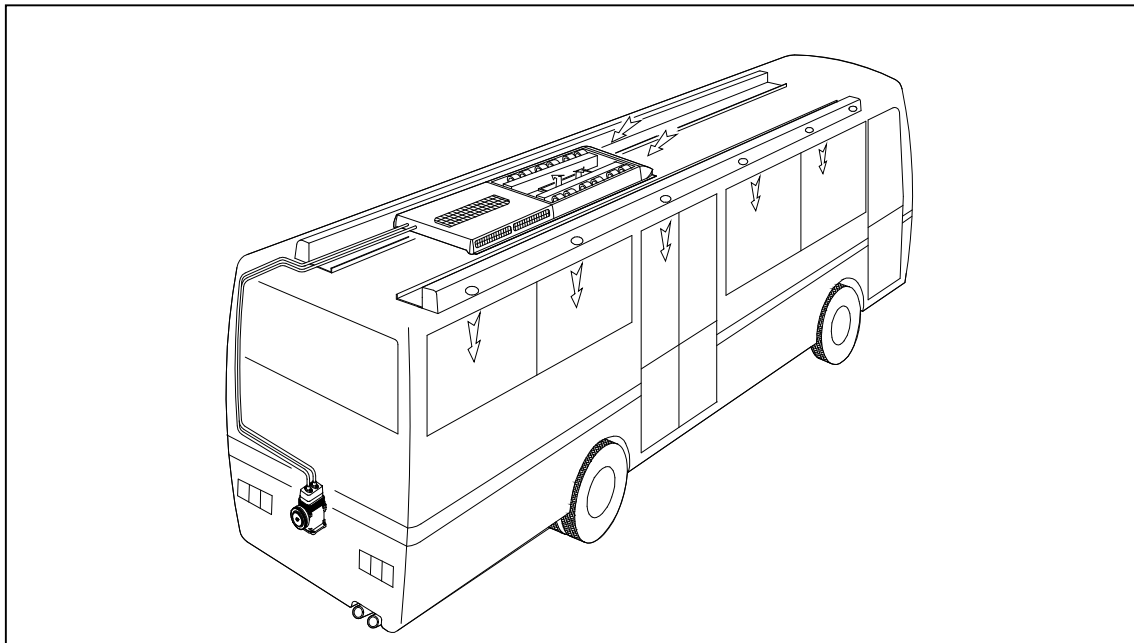


Abbildung 1: Standard-Aufdachklimaanlage auf 12m-Bus

Umgebungsbedingungen
Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit, Sonnenlast (5x)
Lufttemperaturen im Bus
je 4 in Längsrichtung links/rechts in Kopf- und Fußhöhe (16x)
an Decke und Türen (5x)
Umluftansaug (2x)
Kanalausblas (13x), davon 6 im Bereich Fahrer/Frontscheibe
ggf. Toilette und Fahrerschlafplatz (5x)
Wassertemperaturen
Ein- und Austritt je Wärmetauscher und Zusatzheizung (8x)
Kältemitteltemperaturen (8x)
Kältemitteldrücke (5x)
Luft Eintrittstemperatur am Kondensator (4x)
in Summe ca. 70 Meßstellen

Abbildung 2: Exemplarischer Meßstellenplan für einen Bus

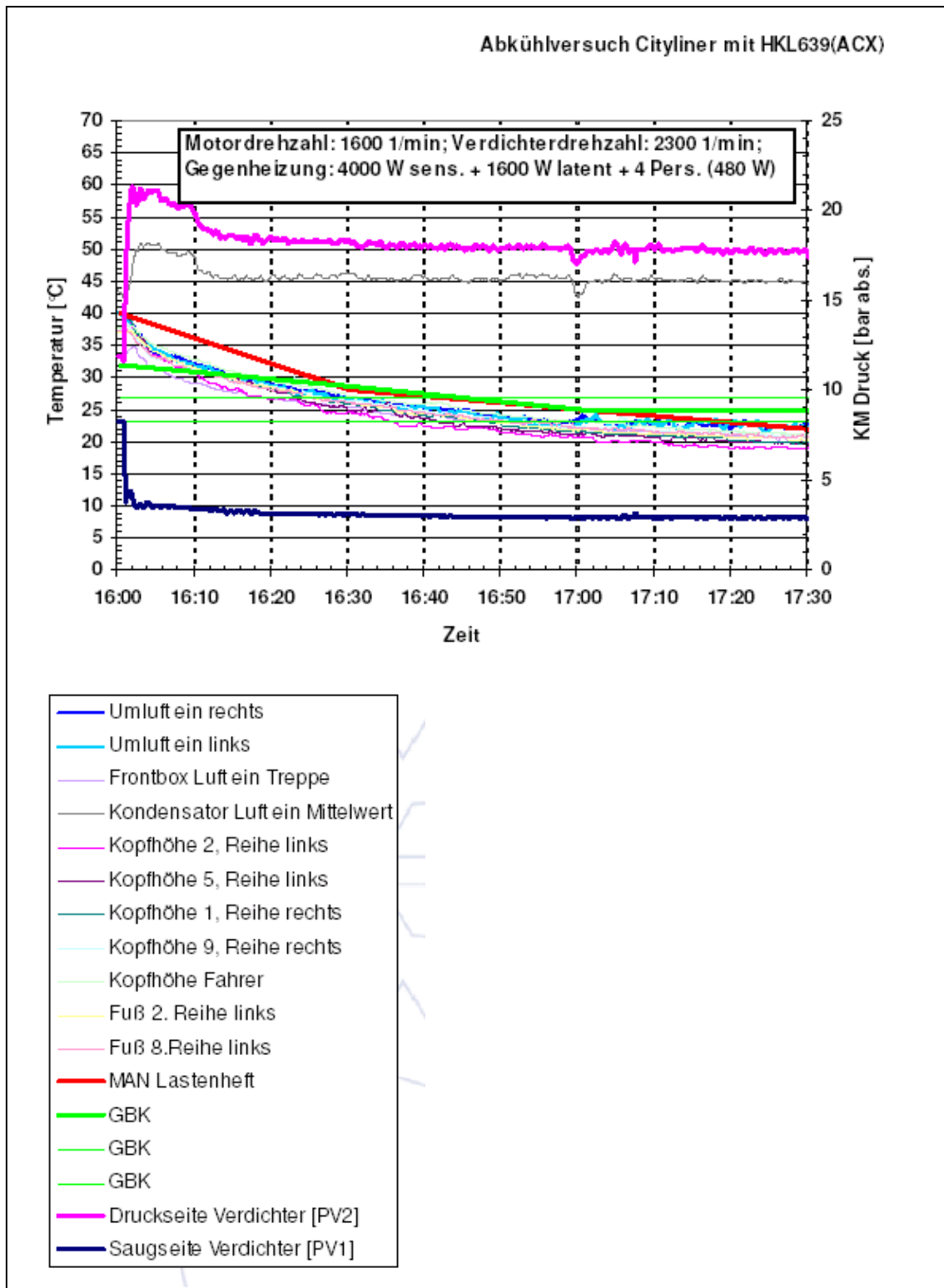


Abbildung 3: Abkühlversuch eines Busses in einer Klimakammer

Bei anderen Konzepten sind z.B. die Kältemittelverdampfer im Bus verteilt. Dies fördert die homogene Verteilung, erfordert aber ein umfangreicheres Netz an Kältemittelleitungen. Beim sog. Kaltwassersatz wird die Kälteleistung über eine Kompaktanlage mit Kältemittel-Wasser-Wärmetauscher im Heckbereich erzeugt und über Wasserleitungen an die im Bus verteilten Wasserwärmetauscher verteilt.

Eine Standardbusklimaanlage fördert einen Luftvolumenstrom von bis zu ca. 6000 m³/h und hat eine Nennkälteleistung von 20000 bis 30000 W. Je nach Einsatz und Bustyp (z.B. Doppeldecker und Gelenkbusse) sind auch andere z.T. größere Leistungen erforderlich.

In Abbildung 2 sind typische Meßgrößen für die Bewertung einer Busklimaanlage aufgelistet. Bei den Abkühl- bzw. Aufheizversuchen mit dem Bus sind 70 Meßstellen durchaus üblich. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den für den Fahrgast entscheidenden Lufttemperaturen. Ohne die Erfassung von Umgebungs- und Fahrbedingungen, den Kältemitteltemperaturen und -drücken bzw. den Wassertemperaturen lassen sich die gewonnenen Messungen aber nicht analysieren.

Schon wegen der Dimensionen gibt es nur sehr wenige Klimawindkanäle, die für Busse geeignet sind, z.B. Arsenal in Wien. Hier können Umgebungsbedingungen reproduzierbar eingestellt werden. Für Aufheizversuche sind winterliche Umgebungsbedingungen mit Temperaturen unter -20 °C erforderlich. Dafür sind ausreichende Kälteleistungen im Klimawindkanal vorzusehen. Für Abkühlversuche werden sommerliche Umgebungsbedingungen mit Temperaturen bis über 40°C benötigt. Bei der Einbringung zusätzlicher Lasten für Sonneneinstrahlung, Wärme- und Feuchteabgabe durch Personen ist darauf zu achten, daß diese möglichst gleich verteilt sind, da sie die Homogenität des Temperaturfelds beeinflussen.

In Abbildung 3 ist ein Abkühlversuch dargestellt. Die innere Wärme- und Feuchtelast war etwa 6000 W. Vorgabe aus dem Lastenheft des Buserstellers war eine Abkühlung von 40°C auf 28°C nach 30 Minuten und eine weitere Abkühlung auf 22°C nach weiteren 60 Minuten (rote Kurve). Die grüne Kurve zeigt zum Vergleich die Anforderungen nach GBK. Die aufgezeichneten Lufttemperaturen im Kopf- und Fußraum des Busses verteilt liegen unter den geforderten Werten. Die Streuung der Lufttemperaturen ist noch in den Toleranzen. Die Kältemitteldrücke (R134a) liegen bei etwa 3 bzw. 18 bar absolut, d.h. der Abschaltpunkt der Klimaanlage ist noch nicht erreicht. Die am Kondensator angesaugte Luft liegt im Mittel mit ca. 45°C etwas über der Umgebungstemperatur, was auf eine schlechte Luftführung in diesem Bereich deutet.

Ergänzt werden die unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführten Abkühlversuche im Klimawindkanal durch weitere Versuche im Fahrzeug unter realen Bedingungen. Dazu gehören Erprobungsfahrten für den Sommer- und Winterbetrieb. Hierbei ist die Meßtechnik auf die Versorgung über das Bordnetz angewiesen. Bei diesen realen Meßfahrten wird besonderes Augenmerk auf das Regelverhalten unter transienten Bedingungen gelegt.

In Abbildung 4 sind einige Daten einer Meßfahrt in Bad Hersfeld unter realen Einsatzbedingungen im Stadtlinienverkehr gezeigt. In Abbildung 5 sind die Daten für den Stadtlinienverkehr in Singapur dargestellt. Die Daten wurden mit Fernabfrage übers Telefon abgerufen. Es handelt sich bei beiden Diagrammen um Messungen von Prototyp-Busklimaanlagen mit R744. In Abbildung 4 ist nur ein Zeitausschnitt vom 11.6.1997 zwischen 14:30 und 15:00 zu sehen, während Abbildung 5 den Tagesgang vom 19.4.2005 in Singapur darstellt. Die Einschaltzeit der Busklimaanlage ist in Deutschland deutlich geringer als in Singapur. Die Drücke der CO₂-Anlage gingen an diesem Sommernachmittag nur bis zu 90 bar. Drücke und Druckdifferenz des unregulierten Verdichters variieren über der Drehzahl. Die Verdichterdrehzahl im Stadtlinienverkehr liegt zwischen 750 und 2800 1/min. In Abbildung 5 sieht man,

daß die Klimaanlage unter den Stadtlinienverkehrsbedingungen in Singapur nur selten länger abschaltet. In diesen Phasen, Nachtpause und Mittagspause, steigt der Stillstandsdruck entsprechend den hohen Umgebungstemperaturen bis über 70 bar an. Der Saugdruck variiert im Betrieb von 30 bis 40 bar, der Hochdruck je nach Außentemperatur von 80 bis 110 bar.

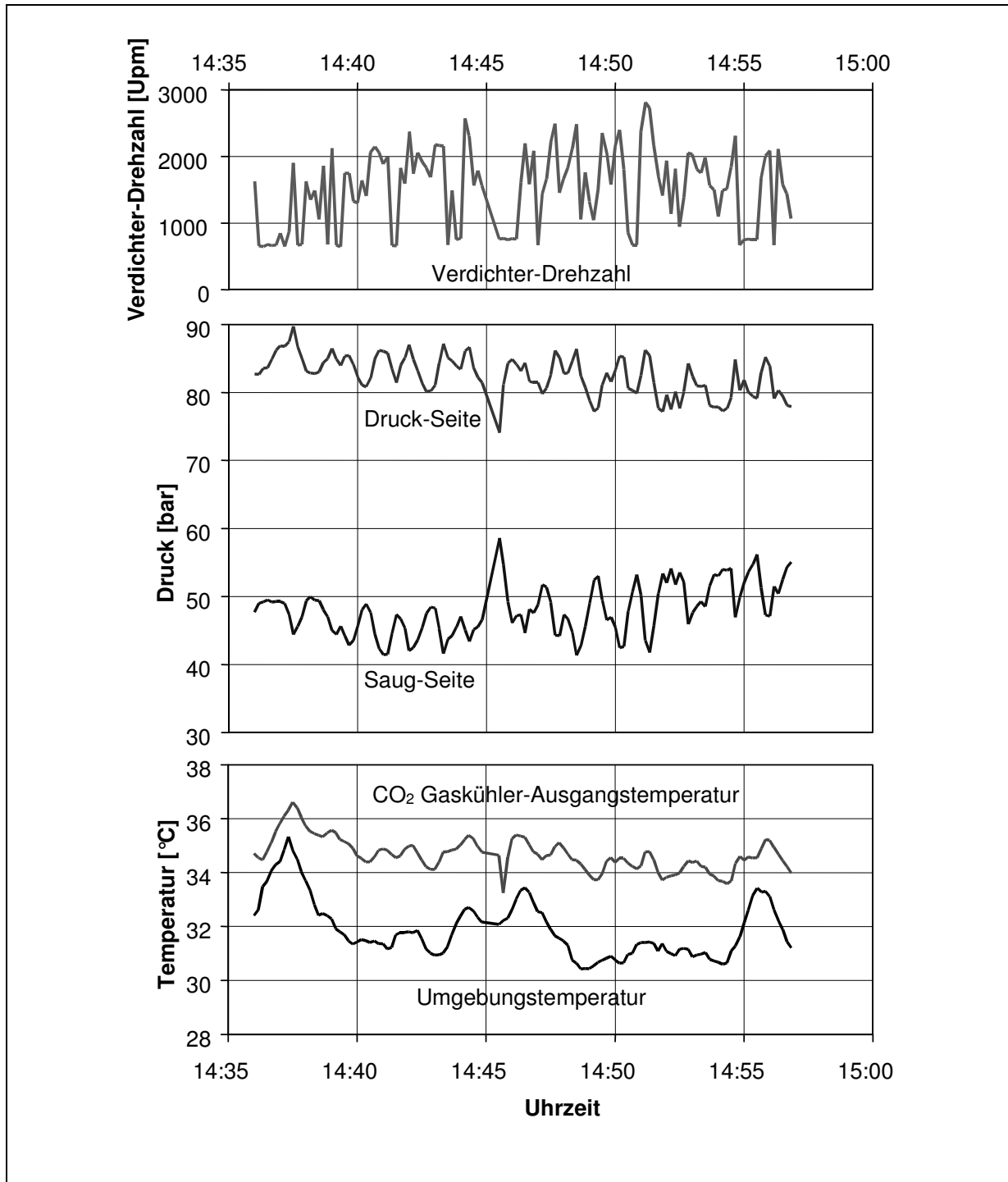


Abbildung 4: Messdaten vom Feldtest in Bad Hersfeld am 11. Juni 1997

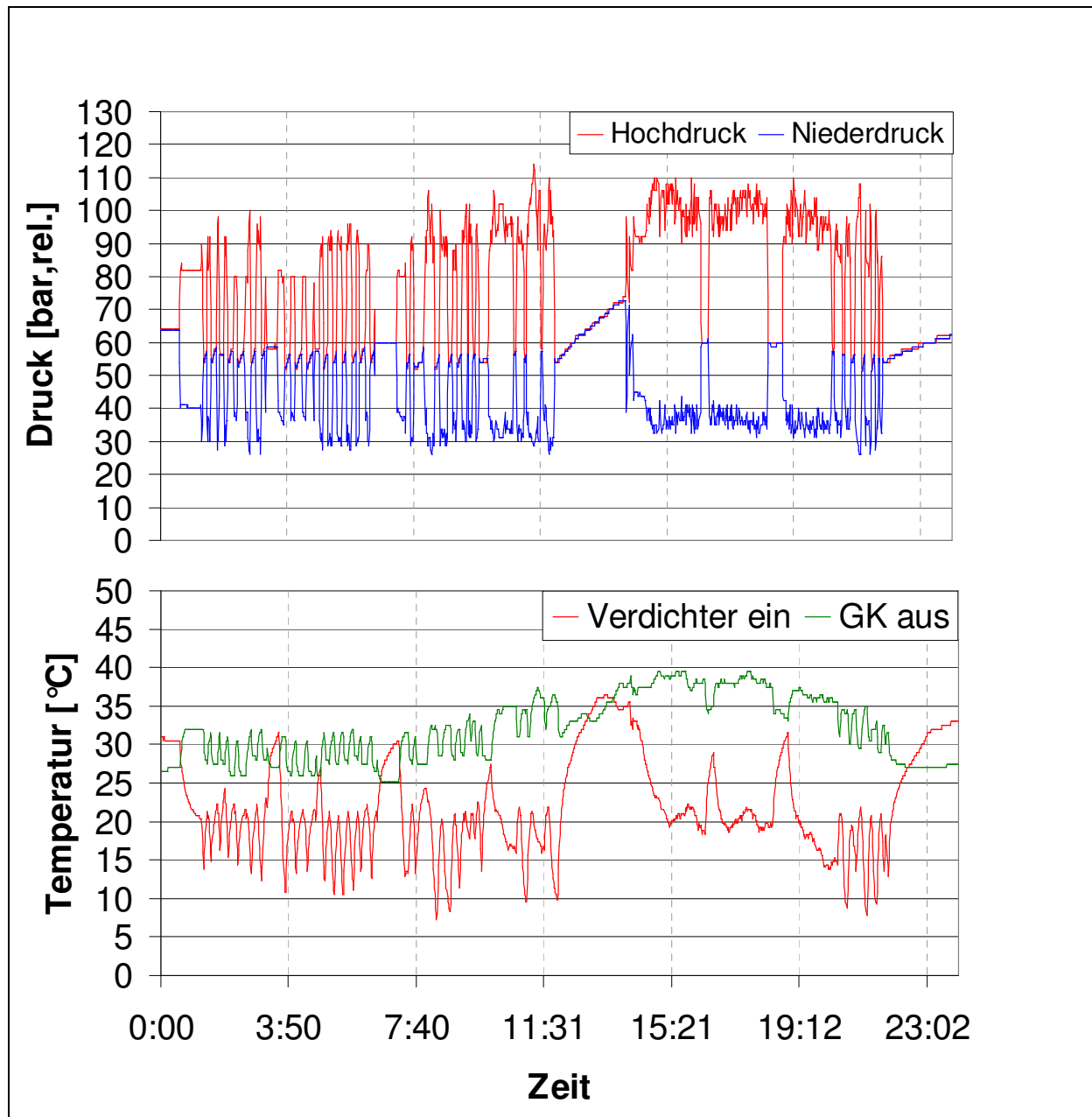


Abbildung 5: Messdaten vom Feldtest in Singapur am 19. April 2005

3. Optimierungsmessungen für die Luftverteilung

Wesentlich für eine homogene Temperaturverteilung im Bus ist die gleichmäßige Verteilung der von der Klimaanlage erzeugten Kälteleistung im gesamten Businnenraum. Wenn die entsprechenden Wärmetauscher nicht verteilt angeordnet sind, wie bei integrierten Splitsystemen, muß dies über die geförderten Luftmengen erfolgen. Je gleichmäßiger die Luftverteilung über den Luftkanal und dessen Austrittsöffnungen, umso gleichmäßiger wird auch die Kälteleistung verteilt.

Eine Möglichkeit, dies zu bewerten und Ansätze zur Luftkanaloptimierung zu finden, ist die Messung der Ausblasgeschwindigkeiten aus den Austrittsöffnungen. Die Messung mit dem

Flügelradanemometer erfordert Feingefühl und auch die Austrittsquerschnitte müssen gleich sein. Möglichst homogene Austrittsgeschwindigkeiten im ganzen Bus werden angestrebt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin den Luftüberdruck zu messen. Im Luftkanal selbst soll ein möglichst geringer Druckabfall zwischen der Einblasstelle des Verdampfers und den weit entfernten Heck- bzw. Frontbereichen auftreten.

Der Luftvolumenstrom selbst kann über die Messung mit einer Meßblende erfolgen. Diese ist aber oft schwer anzubringen, ohne die Luftführung zu stören. Man kann den Luftvolumenstrom und dessen Verteilung auch über Konzentrationsmessungen von einem sog. Tracer-Gas bestimmen. Dazu wird dieses Gas in den zu messenden Luftvolumenstrom eingebracht und die zeitliche Änderung der Gaskonzentrationen an den Austrittsöffnungen gemessen.

In Abbildung 6 sind die Möglichkeiten zur Messung des Luftverteilung zusammen aufgeführt.

- Messung der Ausblasgeschwindigkeiten mit Flügelrad
- Messung des Luftdrucks
- Messung des Luftvolumenstroms
 - a) mit Meßblende
 - b) mit Tracer-Gas

Abbildung 6: Meßmöglichkeiten zur Optimierung der Luftmengenverteilung

4. Messung der Anlagenleistung

Ob die geforderten Solltemperaturen im Businnenraum erreicht werden können, hängt wesentlich von der Anlagenleistung in dem betreffenden Betriebspunkt ab. Die vom Klimaanlagehersteller ausgelegte Kälteleistung kann separat vom Fahrzeug selbst auf Anlagenprüfständen nachgewiesen werden.

In Abbildung 7 ist ein Kalorimeterprüfstand zur Bestimmung der Kälteleistung dargestellt. Die zu messende Busklimaanlage wird auf einem isolierten Container, dem Kalorimeterprüfraum, aufgebaut. Dieser steht in einem klimatisierten Raum. In diesem Außenraum können die Umgebungsbedingungen eingestellt und konstant gehalten werden. Der Verdichter und der Kondensator bzw. Gaskühler sind in diesem klimatisierten Raum untergebracht. Der Kondensator steht mit diesem Raum im Luftaustausch. Der Verdampfer der Aufdachklimaanlage steht dagegen im Luftaustausch nur mit dem Kalorimeterraum, dem wärmegeprägten Innenraum. In diesem Innenraum sind auch sämtliche Zusatzverdampfer (z.B. Fahrerplatz) installiert. Aufgrund der guten Wärmedämmung des Kalorimeters kann die Wärmetransmission durch die Wände vernachlässigt werden. Im Innenraum befindet sich die elektrische Gegenheizung und die Befeuchtungsanlage. Damit wird die Lufttemperatur und Luftfeuchte auf den gewünschten Einstellwert geregelt. Mit der Leistung der Gegenheizung und des Luftbefeuchters können die sensible und latente Kälteleistung der Busklimaanlage bestimmt werden. Der

Verdichter wird über einen starken Elektromotor bei einer festen Drehzahl betrieben. Die Aufnahmeleistung kann dabei ebenfalls gemessen werden. Die Messung erfolgt bei stationären Bedingungen über mehrere Stunden.

Es können so die Netto- oder Nutzkälteleistungen von verschiedenen Anlagen reproduzierbar miteinander verglichen werden. Oft wird bereits im Lastenheft für eine Busklimaanlage eine bestimmte Anlagenleistung bei vorgegebenen Bedingungen gefordert. Eine gebräuchliche Testbedingung liegt bei 35°C Außentemperatur und 27°C Innentemperatur mit ca. 50% relativer Luftfeuchte. Bei einer reinen Umluftanlage können diese Bedingungen am Prüfstand direkt eingestellt werden. Ist ein Frischluftanteil für die Busklimaanlage angegeben, so müssen die Bedingungen im Kalorimeterraum durch Berechnung des Mischluftzustandes (Temperatur und Feuchte) zuvor bestimmt werden.

Diese direkte Messung der Klimaanlageleistung ist sehr genau, da sie direkt und nur von der Genauigkeit der Meßgeräte zur Erfassung elektrischer Leistungen (Gegenheizung, Befeuchter) abhängt.

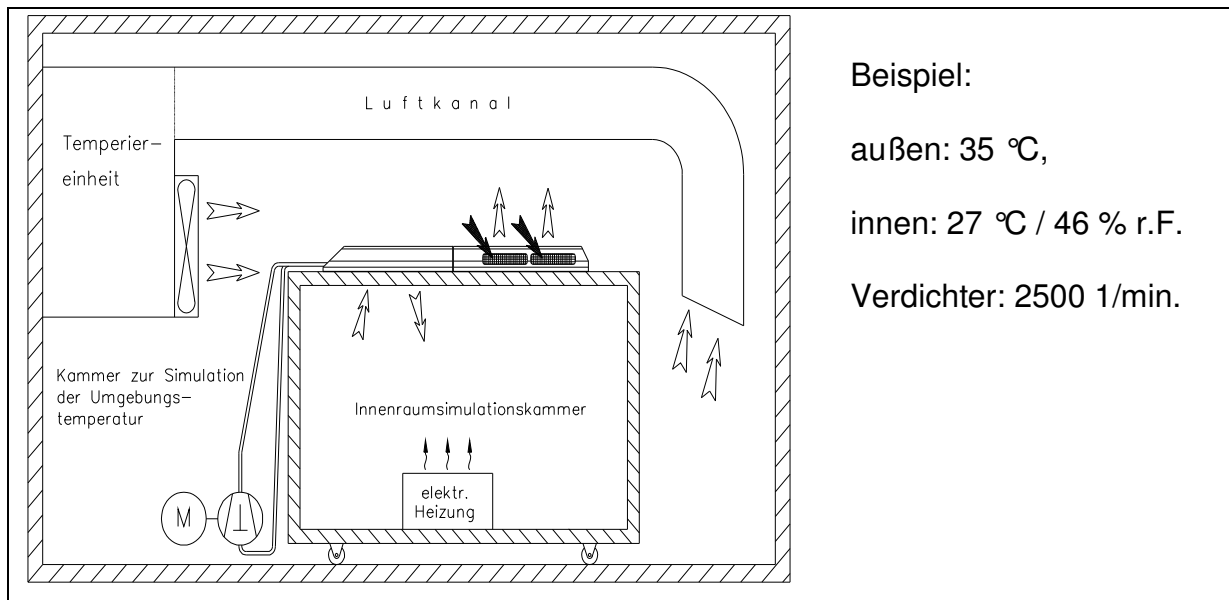


Abbildung 7: Kalorimeterprüfstand zur direkten Messung der Kälteleistung

Die Heizleistung der Busklimaanlage wird dagegen indirekt gemessen. Der Wasserdurchfluß wird z.B. über eine Messturbinen, gemessen. Mit den gemessenen Wassertemperaturen am Ein- und Austritt des Bauteils werden die Enthalpien berechnet. Die Dichte und Wärmekapazität sind abhängig von der Temperatur und dem Glykolanteil des Kühlwassers. Die Heizleistung ist dann

$$Q = \dot{m} * \Delta h = \dot{V} * \rho * c_p * \Delta T$$

Um den Durchfluß genau bestimmen zu können ist eine blasenfreie Strömung Voraussetzung.

Man kann diese Leistungsmessungen auch im Fahrzeug selbst durchführen. Hier kann man dann z.B. auch die zur Verfügung stehende Abwärme des Motors im Kühlwasser erfassen. Will man die Aufteilung der Gesamtleistung auf einzelne Wärmetauscher ermitteln, so müs-

sen bei jedem betrachteten Bauteil die Ein- und Austrittstemperaturen und der Durchfluß bekannt sein. Dies erfordert gerade bei einem Bus mit einem stark verzweigten Wasserkreislauf einen höheren Meßaufwand.

Das Durchflußmessgerät sollte so ausgewählt werden, daß ein möglicher Druckverlust nicht den Durchfluß merklich beeinflusst. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt umso höher sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Temperaturmessung. Bei einer Temperaturdifferenz von z.B. 10 K und einer Genauigkeit von jeweils $\pm 0,5$ K ist der Fehler bei der Leistungsberechnung allein hierdurch schon 10%!

Mit dem indirekten Verfahren läßt sich auch die Kälteleistung einer im Bus eingebauten Klimaanlage bestimmen. Beim Kaltwassersatz ist dies naheliegend. Bei anderen Busklimasystemen muß man zunächst den Kältemitteldurchfluß bestimmen. Mit der Temperatur und dem Druck am Austritt von Verdampfer und Kondensator bzw. Gaskühler kann man dann die Enthalpien des Kältemittels bestimmen.

In Abbildung 8 ist ein Durchflußmeßgerät nach dem Coriolis-Prinzip zu sehen. Beim Durchströmen der Meßschleife, die in Mikroschwingungen versetzt wird, kann mit Hilfe der Corioliskraft die Dichte und der Massenstrom gemessen werden. Die Corioliskraft ist eine Massenträgheitskraft, die auf bewegte Massen wirkt. Bei ruhendem Fluid schwingen beide Meßschleifenschenkel gleich. Über die Frequenz kann die in der Meßschleife enthaltene Fluidmasse berechnet werden. Wird die Meßschleife durchströmt bewirkt die Corioliskraft in den beiden Meßschenkeln unterschiedliche Auslenkungen, die zum Berechnen des Massenstroms direkt verwendet werden.

Abbildung 8 zeigt weiter ein Beispiel für eine CO₂-Busklimaanlage. Der Durchfluß beträgt 0,15 kg/s, der Hochdruck 11 MPa, der Niederdruck 3 MPa, die Gaskühleraustrittstemperatur 40 °C und die Verdampferaustrittstemperatur 10 °C. Damit läßt sich eine Enthalpiedifferenz am Verdampfer (isenthalpe Drosselung vorausgesetzt) von 153 kJ/kg. Die Bruttokälteleistung ist somit 22950 W. Um auf die Nettokälteleistung zu kommen, muß die Leistung der Verdampfergebläse von der Bruttokälteleistung noch abgezogen werden. Die Meßunsicherheit von $\pm 0,2\%$ bei der Durchflußmessung geht direkt in die Genauigkeit der Leistungsbestimmung ein. Die Meßunsicherheit der Druckmeßumformer ist im Beispiel 0,2% vom Skalenendwert (15 MPa), also $\pm 0,03$ MPa. Der Hochdruck hat einen Einfluß auf die Bestimmung der Verdampfer Eintrittsenthalpie von $\pm 0,2\%$. Der Niederdruck mit einem Fehler von $\pm 0,03$ MPa bewirkt einen Fehler bei der Berechnung der Verdampferaustrittsenthalpie von $\pm 0,3\%$. Die Meßunsicherheit von $\pm 0,5$ K bei der Verdampferaustrittstemperatur führt zu $\pm 0,4\%$ Fehler bei der Bestimmung der Verdampferaustrittsenthalpie. Die gleiche Meßunsicherheit bei der Gaskühleraustrittstemperatur führt dagegen zu einem Fehler von $\pm 1,4\%$ bei der Bestimmung der Verdampfer Eintrittstemperatur. In der Summe beträgt der Fehler in diesem Beispiel $\pm 2,5\%$.

Der Einfluß des Kältemittelöls auf die thermodynamischen Daten des Kältemittel-Öl-Gemisches sollten nicht unterschätzt werden. Das Öl im Kältemittel beeinflusst den Dampfdruck und die Dichte. Das Öl wird mitgefördert und vom Durchflußmeßgerät erfasst, dieser Anteil des Durchflusses dient aber nicht der Kälteleistung. Das im Öl gelöste unverdampfte Kältemittel am Verdampferaustritt ist ebenfalls nicht an der Kälteleistung der Busklimaanlage beteiligt. Ein hoher Ölanteil im Kältemittel kann so zu erheblichen Fehlern bei der indirekten Bestimmung der Kälteleistung führen.

Bei der Anlagenmessung werden insbesondere die Wassertemperaturen bzw. Kältemitteltemperaturen und Kältemitteldrücke und die Luftein- und -austrittstemperaturen an den Wärmetauschern gemessen.

Die genaueste Methode für die Bestimmung der Kälteleistung ist die Messung der Nettokälteleistung im Kalorimeterprüfstand.



Beispiel:

Durchfluß: 0,15 kg/s CO₂ ± 0,2% ± 0,2%

Hochdruck: 11 MPa ± 0,03 MPa ± 0,2%

Niederdruck: 3 MPa ± 0,03 MPa ± 0,3%

Gaskühleraustritt: 40 °C ± 0,5 °C ± 1,4%

Verdampferaustritt: 10 °C ± 0,5 °C ± 0,4%

Bestimmung der Enthalpien und
der Kälteleistung: ca. 23000 W ± 2,5%

Achtung: Ölanteil!

Messung von Dichte und Durchfluß nach Coriolis

Abbildung 8: Coriolis-Meßgerät zur indirekten Messung der Kälteleistung

5. Zusammenfassung

Die Anforderungen an eine Busklimaanlage sind z.B. in VDV 236 und Werksnormen der Bushersteller beschrieben. Die Messung der Lufttemperaturverteilung, der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeiten im Fahrzeug erfolgt in klimatisierten Fahrzeughallen bzw. im Klimawindkanal und zusätzlich im Fahrversuch. Die Anforderungen an den Klimawindkanal und die Messtechnik unterscheiden sich bei Bussen wegen der größeren Dimension dieser Fahrzeuge von denen für PKW. Um eine gute Lufttemperaturverteilung im Bus zu erzielen, muß die Klimaanlageleistung ausreichend groß sein und möglichst gut an den Fahrgast und den Fahrer herangeführt werden. Das Klima für den Fahrer kann separat eingestellt werden und wird besonders bewertet. Die Verteilung der Anlagenleistung im Fahrzeug erfolgt über Kältemittel- und Wasserkreisläufe und schließlich über Luftkanäle. Bei der Standard-Aufdachklimaanlage müssen die Luftkanäle ausreichend dimensioniert sein. Die Luftmengen und deren Verteilung kann über Messungen der Düsenausblasgeschwindigkeit, Luftdruckmessungen und Konzentrationsmessungen mit Tracer-Gas bewertet werden. Die Kälteleistung der Klimaanlage kann auf Kalorimeterprüfständen sehr genau ermittelt werden. Hierbei werden Lufttemperaturen und -feuchte vorgegeben und konstant gehalten. Die Nettokälteleistung der Klimaanlage wird über die elektrische Leistung der Gegenheizung und des Luftbefeuchters gemessen. Im Fahrzeug selbst kann die Anlagenleistung und die Verteilung auf einzelne Wärmetauscher durch Messung von Volumenstrom, Fluidtemperatur und -druck erfolgen. Für Kältemittel, z.B. R744, werden Durchflussmessgeräte nach dem Coriolisprinzip eingesetzt. Da die indirekte Bestimmung der Anlagenleistung über Durchfluss und Enthal-

pedifferenz erfolgt, hängt die Genauigkeit stark von der Genauigkeit der eingesetzten Messmittel insbesondere für die Fluidtemperatur ab.

6. Literatur

- [1] Verband Deutsche Verkehrsunternehmen (VDV) 236, W.-H.: Klimatisierung von Linienbussen. VDV-Schriften 236 (04/1996), Köln
- [2] Gütegemeinschaft Buskomfort e.V. (GBK): Güte- und Prüfbedingungen. (1996), Böblingen