

7. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium, 26.01.2006:
Windkanäle und Klimakammern bei Automobil-Zulieferunternehmen zur
Untersuchung von Kfz-Klimaanlagen – Planer, Hersteller und Betreiber

Vortrag von Dr. M. Herrmann und L. Hannusch, Behr GmbH & Co.

**Simulationsmöglichkeiten in den Klimawindkanälen von BEHR;
ein Vergleich zwischen Straße und Windkanal**

Abstract

Mit ihren modernen Klimawindkanälen in Stuttgart und Troy, Michigan, ist die Fa. Behr in der Lage, das komplette Mess-Spektrum im Bereich Fahrzeugklimatisierung abzudecken. Komplett Klimasysteme oder deren Komponenten können exakt und reproduzierbar auf Leistungsfähigkeit sowie Regelungsverhalten hin getestet werden.

Wie im Folgenden gezeigt wird, können Straßentests im Klimawindkanal exakt nachgebildet werden. Dazu werden die wichtigen Einflussparameter und ihre benötigte Simulationsgenauigkeit ermittelt und das Testverfahren festgelegt.

1. Beschreibung des Klimawindkanals in Stuttgart (KWK)

Der Klimawindkanal der Firma Behr in Stuttgart (KWK) ging 2001 als weltweit modernster und leistungsfähigster Klimawindkanal in Betrieb. Er wurde mit dem Ziel gebaut, alle auftretenden fahrdynamischen und klimatischen Bedingungen auf der Straße in nie gekannter Genauigkeit zu reproduzieren.

Mit ihm können, im Gegensatz zu herkömmlichen Kanälen, nicht nur konstante Versuchsbedingungen eingestellt werden, sondern auch hochdynamische Vorgänge wie Temperatur- und Feuchtewechsel, Sonnenstandsänderungen oder sogar plötzliche, vollständige Abschattungen der Solarstrahlung realisiert werden. Damit können die Klimasysteme aller Fahrzeugtypen, deren Einzelkomponenten sowie die dazugehörigen Regelalgorithmen optimiert und aufeinander abgestimmt werden.

Des Weiteren können Kühlleistungsmessungen bis zu einem hohen Teillastbereich durchgeführt werden. Bei einer maximalen Windgeschwindigkeit von 130km/h und mit der Option, Volllast-Messungen für die Motorkühlung in einem speziell dafür ausgelegten Kanal in Stuttgart durchzuführen, konnten zudem anspruchsvolle Forderungen nach Strömungsqualität, Dynamik und Geräuschentwicklung umgesetzt werden. Details zu Konzeption, Bauart und Abnahmemessungen findet man in [1]; die Akustik wird in [2] genauer beschrieben. Einen Querschnitt der Anlage zeigt **Bild 1**.

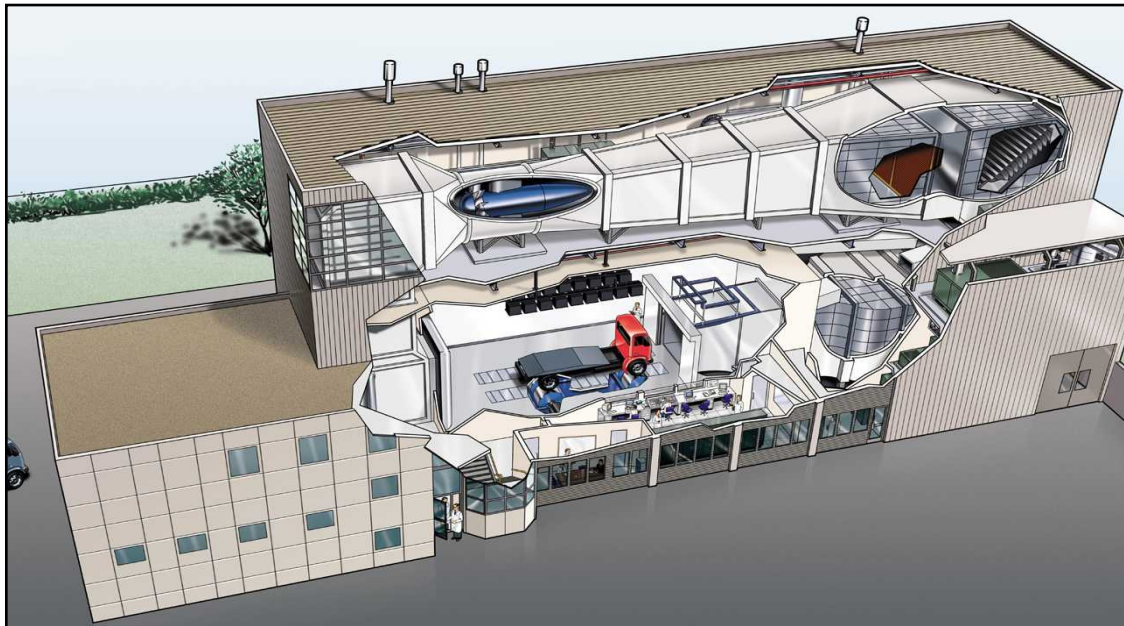


Bild 1: Querschnitt des KWK in Stuttgart

Der 2004 eröffnete Kanal in Troy (TWT) deckt zusätzlich den gesamten Bereich der Messungen für die Entwicklung in der Motorkühlung ab und unterscheidet sich nur in den Leistungsdaten der Windgeschwindigkeit und Rollenlast (**Tabelle 1**). Die weitere Beschreibung bezieht sich daher auf den KWK in Stuttgart.

	KWK Stuttgart	TWT Troy
Temperaturbereiche	-30 bis +50 °C im Windkanal -40 bis +50°C im Vortemperiererraum	-30 bis +50 °C im Windkanal -40 bis +50°C im Vortemperiererraum
Feuchtigkeitsbereich	5% bis 95%r.F.	5% bis 95%r.F.
Solarium	350 bis 1.200W/m ² Intensität	350 bis 1.200W/m ² Intensität
Hintergrundgeräusch	< 70dB(A) bei 50km/h	< 65dB(A) bei 50km/h
Max. Fahrzeuggröße (l x b x h)	10 x 2,65 x 5m	10 x 2,6 x 4,35m
max. Windgeschwindigkeiten	Pkw 130km/h bei 6m ² Düse Van 100km/h bei 8m ² Düse Lkw 80 km/h bei 10 m ² Düse	Pkw 200km/h bei 6m ² Düse Van 160km/h bei 8m ² Düse Lkw 120 km/h bei 10 m ² Düse
Bremsleistung Allrad- Rollenprüfstand	150kW/Achse	300kW/Achse

Tabelle 1: Daten der Behr-Klimawindkanäle in Stuttgart und Troy

Die Temperatur kann im Klimawindkanal von -30°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ mit einer Genauigkeit von weniger als $0,5\text{K}$ eingestellt, die Luftfeuchtigkeit ab einer Temperatur von 5°C von 5-95% relativer Feuchte mit einer Genauigkeit von 1% geregelt werden. In weniger als zwei Stunden lässt sich die Messstrecke von $+50^{\circ}\text{C}$ auf -20°C abkühlen. Der integrierte Rollenprüfstand verfügt über zwei im Boden verfahrbare Rollenpaare für Achsabstände bis zu 7,7m und kann sämtliche Antriebsarten (Vorder-, Hinter-, Allradantrieb) aufnehmen. Die mit 6t belastbaren Rollen können jeweils bis zu 150kW Motorleistung abbremesen oder 100 kW beschleunigen und sorgen zudem für eine optimale Unterbodenströmung des Fahrzeuges. Somit können vom Kleinst-Pkw bis zum schweren Lkw alle Fahrzeugtypen gemessen werden (**Bild 2**).



Bild 2: Lkw bei 10m^2 -Düse

Durch ein flexibles Düsenoberteil kann die für die verschiedenen Fahrzeugtypen jeweils optimale Düsengröße (6, 8 oder 10m^2) eingestellt werden. So werden realistische Druckverhältnisse um das Fahrzeug und eine hohe Gleichförmigkeit der Strömung ($\pm 0,5\%$) erreicht. Die patentierte Temperaturregelung und der optimale Aufbau des Klimawindkanals führen zu einer exzellenten Temperaturverteilung und –konstanz ($\pm 0,5\text{K}$).

Beim Bau wurde außerdem konsequent auf einen besonders niedrigen Schallpegel in der Messkammer geachtet, um akustische Messungen im Fahrzeuginnenraum zu ermöglichen.

Herausragend ist auch das Solarium. Durch einen aufwändigen Verfahrmehanismus, welcher die 4 unabhängigen Lampenbänke bis auf Brusthöhe herabsenken kann, können beliebige Einstrahlwinkel sowie ganze Tagesverläufe der Sonne realistisch nachgefahren werden. Die Bestrahlungsstärke kann dabei stufenlos bis $1200\text{W}/\text{m}^2$ gesteigert werden.

Wolkenklappen für diffuses Licht und Tunnelklappen für plötzliche Abschattungen fordern jede Klimaregelung heraus und bieten somit ein Höchstmaß an Realitätsnähe (**Bild 3**).



Bild 3: Solarium

Eine vollautomatisierte Kanalsteuerung sowie die Möglichkeit, alle Klimaparameter (Temperatur, Feuchte, Strahlung etc.) mit Hilfe vorprogrammierter Zyklen zu verändern, schaffen außerdem die Möglichkeit, Langzeitversuche unter härtesten Umweltbedingungen zu fahren.



Bild 4: Fahrroboter

Ein Fahrroboter (**Bild 4**), der völlig selbstständig kuppelt, schaltet und Gas gibt, ersetzt den menschlichen Fahrer und fährt Fahrzyklen genau vergleichbar nach, z.B. für Kraftstoffverbrauchsmessungen.

Zudem können Rollenprüfstand, Fahrroboter und Gebläse gekoppelt werden und damit hochdynamische Versuchsfahrten mit starken Beschleunigungen nachgestellt werden.

Mit Hilfe des thermischen Dummys „MARCO“ (**M**ethod to **A**ssess thermal **C**omfort) wird der thermische Komfort im Fahrzeug-Innenraum physiologisch korrekt erfasst und bildet das Feedback für Optimierungen [3], [4]. Seine Messdaten können direkt mit aus der CFD ermittelten Komfortdaten eines „virtuellen Dummys“ verglichen werden.

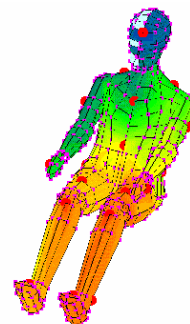
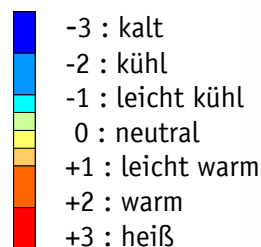


Bild 5: Marco

Der Klimawindkanal von Behr in Stuttgart-Feuerbach und sein Zwillingskanal in Troy, Michigan sind somit leistungsfähige und in ihren umfassenden Simulationsmöglichkeiten herausragende Testeinrichtungen für die Fahrzeugklimatisierung.

2. Direkter Vergleich der Straßenmessung zur Simulation im KWK

Als ein Beispiel für die Simulationmöglichkeiten der Klimawindkanäle bei Behr wird hier ein direkter Vergleich zwischen einer Straßenmessung und der anschließenden Simulation im Klimawindkanal gezeigt. Es werden zwei Fälle, eine Abkühlmessung und eine Aufheizmessung, nachgestellt.

2.1 Fahrzeugausrüstung und Testverfahren

Das Fahrzeug wird mit mobiler Messdatenerfassung (Quasar) und Messstellen am Fahrzeug ausgerüstet (**Tabelle 2**). Bei der Messung im Windkanal werden zusätzlich die Windkanaldaten aufgenommen.

Fahrzeugausrüstung	
Temperaturen (Thermoelemente Typ K)	Motoröl Heizkörpereintritt und –austritt Kühleintritt und –austritt Ausströmer Kabine: Kopf- und Fußraum, Sitzbeschlag
Drehzahlen	Motor-, Kompressor- und Lüfterdrehzahl
Zusatzrüstung bei der Straßenerprobung	GPS: Geschwindigkeit, Position, Höhe → Straßensteigung Lufttemperatur und –feuchte Prandtlrohr (Unterschied Fahr- zu Luftgeschwindigkeit)
Zusätzliche Daten aus der Klimawindkanalsteuerung	Lufttemperatur und –feuchte Luftgeschwindigkeit und Rollengeschwindigkeit

Tabelle 2: Fahrzeugausrüstung

2.2 Versuchsbedingungen und Testverfahren

Tabelle 3 zeigt die Außenbedingungen und Einstellungen der Klimaanlage für die Straßenfahrten.

	Abkühlmessung	Aufheizmessung
Bedingungen bei der Straßenfahrt		
Lufttemperatur	25 °C	1 °C
relative Luftfeuchte	35%	75%
Einstellungen der Klimaanlage		
Gebälse	max.	max.
Solltemperatur	min.	min.
Luftverteilung	face-level	Defrost + Fußraum
Frischluf / Umluft	Umluft	Frischluf

Tabelle 3: Versuchsbedingungen

Im Windkanal werden Außentemperatur und –feuchte durch Mittelwerte dargestellt; die Windgeschwindigkeit wird an die Rollengeschwindigkeit gekoppelt. Das Fahrprofil mit Fahrgeschwindigkeit, Gangwahl und Steigungssimulation wird durch den Fahrroboter nachgefahren. Mit Vorgabe der Drehzahl und des Ganges werden die Geschwindigkeiten mit einer Toleranz von 3% dargestellt. Die Straßensteigung wird nur für den Fall der Aufheizmessung simuliert.

Zur korrekten Wiedergabe der Sonneneinstrahlung einer Versuchsfahrt sind der Sonnenstand, auch bezüglich der Fahrtrichtung, und die Intensität der Einstrahlung zu berücksichtigen. Der Sonnenstand in Abhängigkeit von Kalendertag, Tageszeit und geographischer Position kann zum Beispiel bei www.gcstudio.com, die Stärke der Strahlung auf verschieden orientierte Fahrzeugflächen mit dem Programm CESORA (Calculation of Effective Solar Radiation; Atlas Material Testing Technology) ermittelt werden. Eine Beispielberechnung zeigt **Bild 6**.

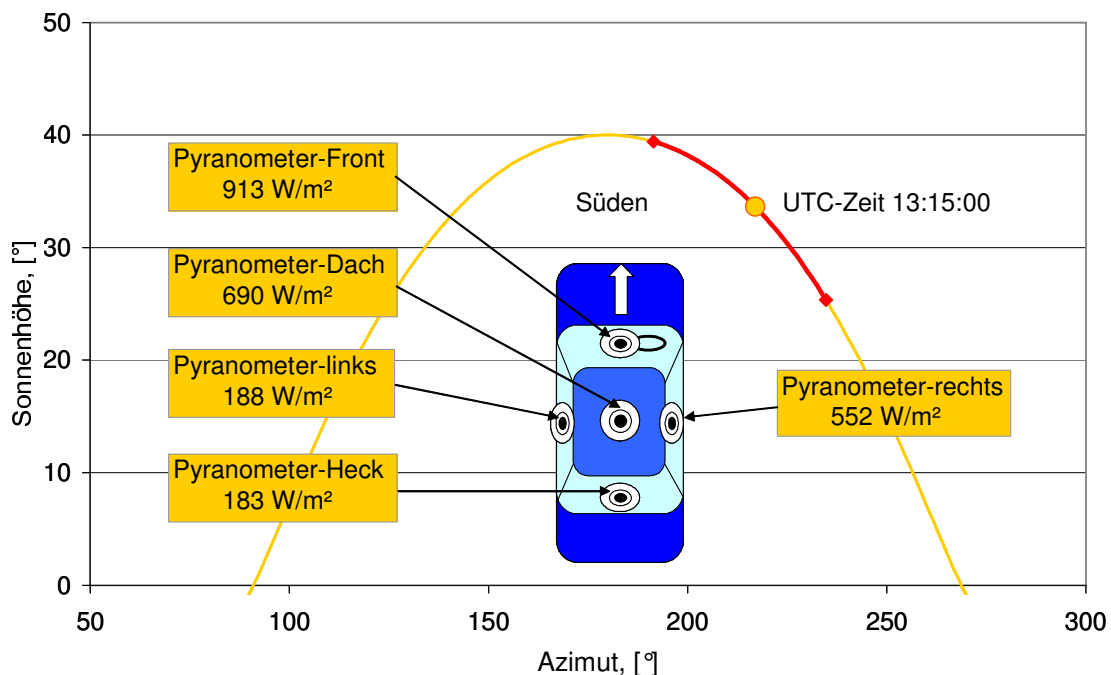


Bild 6: Beispiel für die Berechnung der Einstrahlstärken der Sonne auf verschiedene Fahrzeugflächen mit CESORA

Die Sonnenlast wird dann im Windkanal durch Umschalten zwischen über Zeit und Fahrtrichtung/Sonnenstand gemittelten Profilen dargestellt. Zunächst wurden Abschattungen durch Wolken sehr genau nachgestellt; für den simulierten Abkühlungsfall wurde bestimmt, dass die Darstellung der mittleren Intensität mit sechs Profilen ausreicht (**Bild 7**).

2.3 Ergebnisse der Abkühlmessung

Bild 8 zeigt den Vergleich des Temperaturverlaufs „Kopfhöhe vorne“. Bei der Straßenfahrt wurde das Fahrzeug auf einem Parkplatz über längere Zeit bei niedriger Windgeschwindigkeit von der Sonne aufgeheizt. In der Windkanalmessung wurde diese Zeit verkürzt, indem zunächst eine höhere Sonnenintensität eingestellt wurde. Für das Ergebnis der eigentlichen Messphase (Abkühlung) ist nur wichtig, dass die Startwerte der Temperatur des Innenraums, aber auch der Fahrzeugstruktur (Kontrolle an der Sitzschiene) übereinstimmen.

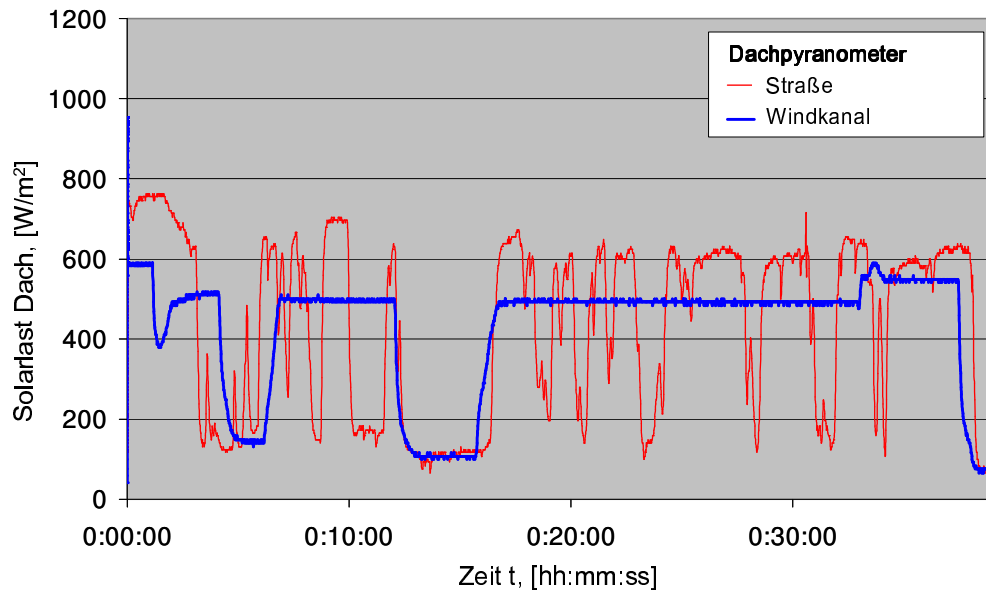


Bild 7: Simulation der Sonneneinstrahlung auf der Straße durch 6 Profile mit 10 Profilwechseln; Sonnenhöhe, -azimut und Fahrtrichtung werden berücksichtigt.

Im Temperaturverlauf bei der Straßenfahrt ist nach ca. 1h30 das Absinken der Temperatur beim Einsteigen zu beobachten; vor Versuchsbeginn muss daher noch 15 Minuten gewartet werden. Bei der Messung mit Fahrroboter muss dies nicht beachtet werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wird dann während der Abkühlphase eine hervorragende Übereinstimmung der Innenraumtemperaturen in der Windkanalsimulation mit der Straßenfahrt erreicht (0,5K).

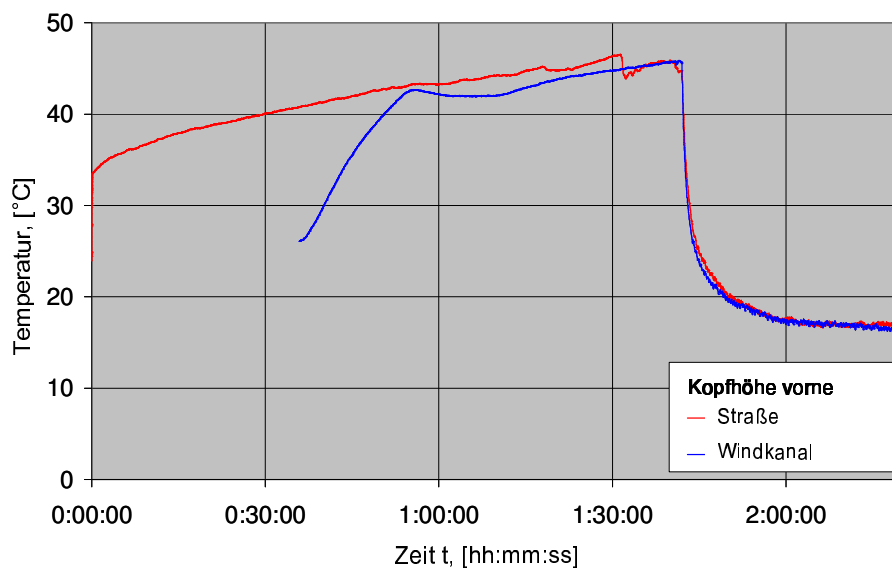


Bild 8: Abkühlungsversuch: Temperaturverlauf Kopfhöhe vorne

2.4 Ergebnisse der Aufheizmessung

Für die Aufheizung des Fahrzeugs ist die Belastung des Motors mit entscheidend, da sie den Wärmeeintrag ins Kühlwasser und damit die verfügbare Heizleistung bestimmt. Daher muss die Straßensteigung in der Anfangsphase genau nachgestellt werden. Eine Abweichung von 1% in der Steigung verursacht hier Änderungen der Kühlwassertemperatur von mehreren Kelvin. Außerdem sind die Anfangstemperaturen im Kühl- und Heizkreislauf genau einzuhalten. Dieser Versuch wurde in der Stellung Frischluft gefahren, daher muss die Außentemperatur sehr genau simuliert werden; sie wurde hier auf 0,5K reproduziert.

Bild 9 zeigt den Vergleich des Temperaturverlaufs am Eintritt des Heizkörpers. Der schnellere Anstieg nach ca. 20 Minuten ist auf das Streckenprofil zurückzuführen (Übergang von Gefälle zu Steigung).

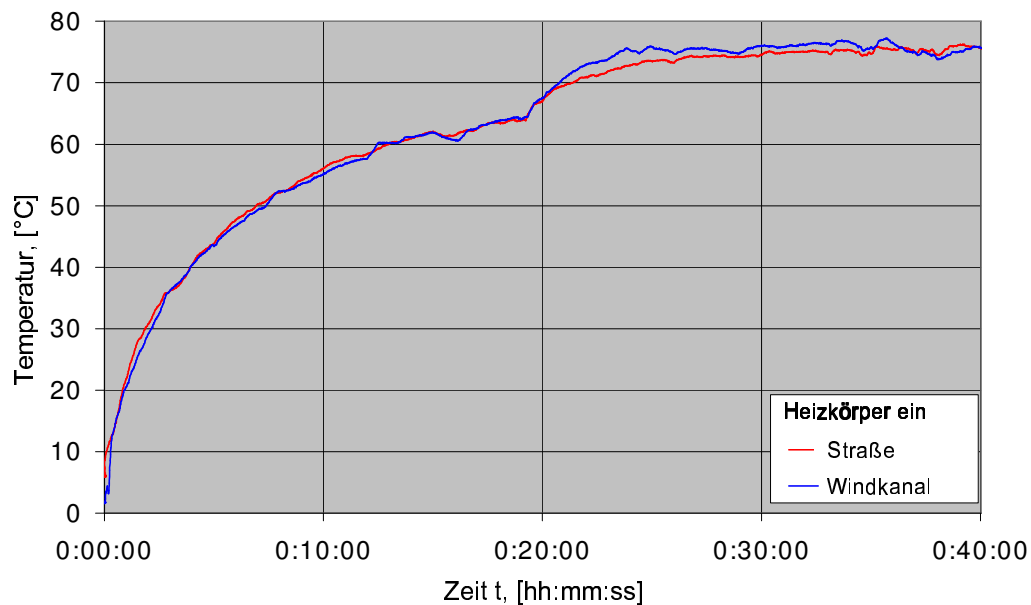


Bild 9: Aufheizversuch: Temperaturverlauf Heizkörpereintritt

Die Temperatur im Kopfraum vorne zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (**Bild 10**).

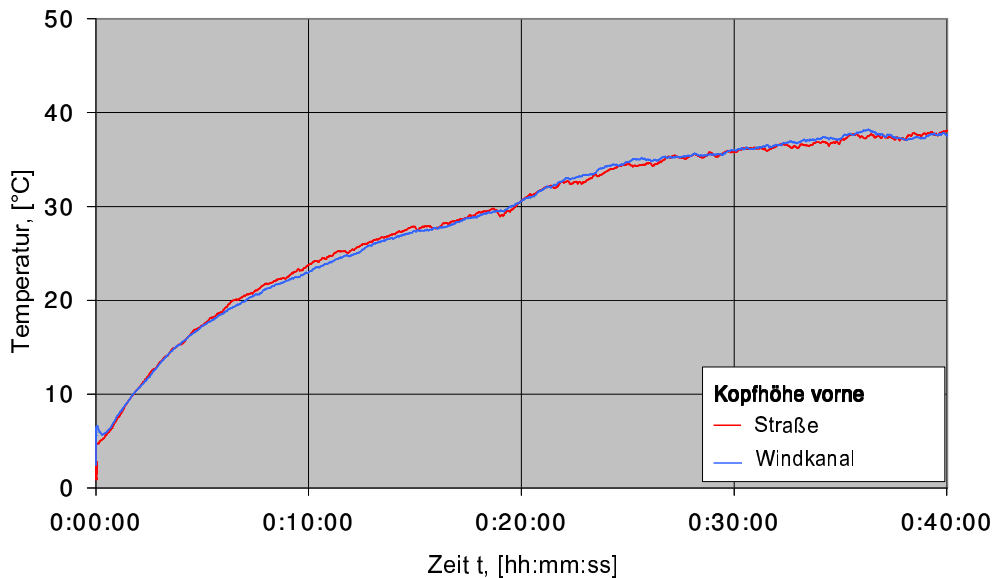


Bild 10: Aufheizversuch: Temperaturverlauf Kopfhöhe vorne

Bild 11 zeigt eine gute Übereinstimmung für den Fußraum vorne rechts; links –auf der Fahrerseite– zeigen sich größere Abweichungen. Wie genauere Untersuchungen ergaben, hängt hier das Ergebnis der Straßenmessung empfindlich von der Fuß- und Beinposition des Fahrers ab. Der Beifahrersitz war bei beiden Messungen nicht besetzt, daher stimmen hier die Messwerte (Fußraum vorne rechts) gut überein. Auf der Fahrerseite wird die Luftströmung im Fußraum vorne stark durch den Unterschied Fahrerbeine zu Robotergestänge beeinflusst. Im Fußraum hinten (**Bild 12**) wirken sich diese Einflüsse nicht aus, die Ergebnisse stimmen wieder gut überein.

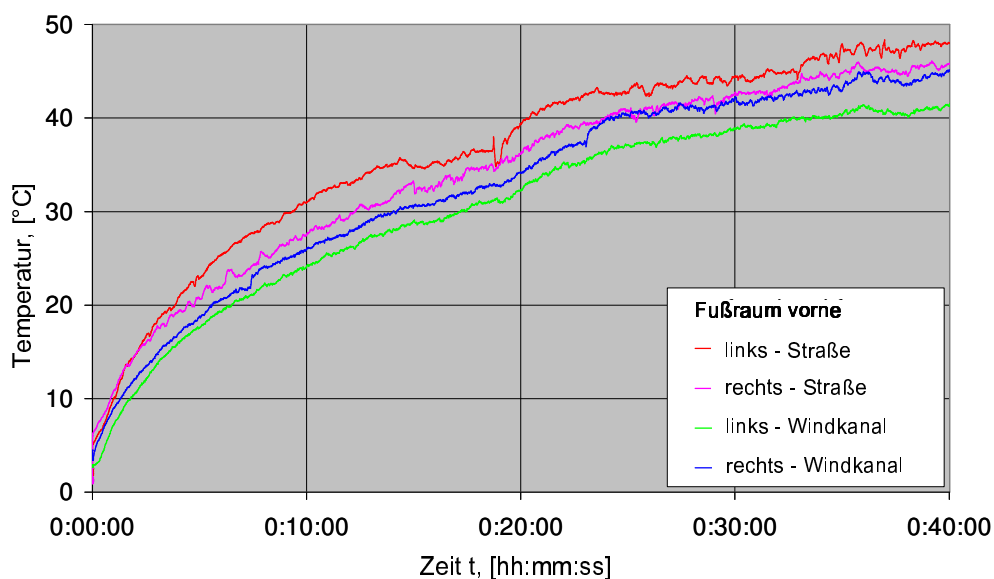


Bild 11: Aufheizversuch: Temperaturverlauf Fußraum vorne

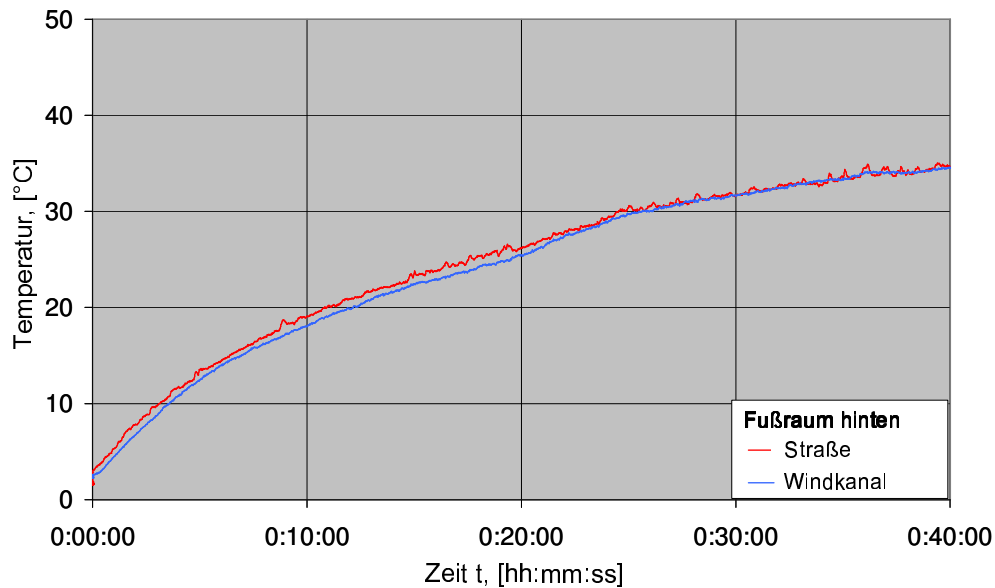


Bild 12: Aufheizversuch: Temperaturverlauf Fußraum hinten

3 Zusammenfassung

Die Klimawindkanäle der Firma Behr decken das gesamte Spektrum der Leistungs- und Regelungsmessung in der Fahrzeugklimatisierung sowie einen Großteil der Kühlleistungsmessung ab. Durch die geeignete Kombination der zur Verfügung stehenden Simulationseinrichtungen wie Rollenprüfstand, Solarium und Fahrroboter können die im Feld relevanten Fahrbedingungen und Klimaeinflüsse auf ein Fahrzeug exakt nachgebildet werden. Durch umfangreiche Vergleichsmessungen zwischen Straße und Klimawindkanal wurden Einflussparameter und Randbedingungen sowie Testvorschriften gefunden, die den Ingenieuren von Behr bei der Entwicklung Maßstäbe setzender Klimaanlage als Entwicklungsgrundlage dienen.

4 Literaturhinweise

- [1] Klemens Schmiederer und Rudolf Riedel: „Der neue Klimawindkanal von Behr“; ATZ 11/2001, S. 1048-1056.
- [2] Michael Paul und Rudolf Riedel: „Akustik im neuen Behr Klimawindkanal“; in Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren - Automotive and Engine Technology 4. Internationales Stuttgarter Symposium. Bargende, M.; Wiedemann, J. (Hrsg.); 2001; Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag
- [3] Bureau, C.; Kampf, H.; Taxis-Reischl, B; Traebert, A.; Mayer, E.; Schwab, A.: Marco – Behr’s Method to Assess Thermal Comfort in: VTMS 6 Institute of Mechanical Engineering (ImechE); paper C599/051/2003(2003), UK.
- [4] Wolfram Kühnel und Marcus Weinbrenner: „Klimatisierung: Komfortbewertung mit realem und virtuellem Dummy“; Automotive Engineering Partners 6/2004, S. 44-47.