

Bestimmung und Einstellung der Windgeschwindigkeit im Windkanal der Fa. Modine

Michael T. Ehlers, Peter Röser,
Modine Europe GmbH

1. Einleitung

Die wärmetechnischen Systeme eines Automobils tragen maßgeblich zur Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit, der Leistungsfähigkeit, der Sicherheit und des Komforts bei. Sie beeinflussen den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen. Das Thermomanagement von Motor, Getriebe, Abgasstrang, Elektronik und Innenraum muss zunehmend als ganzheitliche Aufgabenstellung angegangen werden. Die Variantenvielfalt nimmt zu, die Systeme werden komplexer und die Produktinnovationszyklen verkürzen sich ständig. Die Computersimulation der verschiedenen Kühl- und Heizfunktionen mit all ihren Wechselwirkungen und Rahmenbedingungen gehört zu den komplexesten Aufgabenstellungen im Fahrzeugbau.

Um dieser Marktanforderung zu entsprechen hat Modine mit einem Investitionsvolumen von 50 Millionen Euro das europäische TechCenter eingerichtet. Der Klimawindkanal ist integrierter Bestandteil des TechCenters und erweitert den Service und die Effizienz um die Dimension der Testmöglichkeit am Gesamtsystem „Automobil“ unter reproduzierbaren und realistischen Randbedingungen.

Den Entwicklungstrend von Einzelkomponenten zu Modulen und Systemen hat Modine nicht nur frühzeitig erkannt, sondern selbst stark vorangetrieben. Den ersten Klimawindkanal nahm Modine bereits 1941 in Betrieb, und er wird noch heute eingesetzt (Bild1).

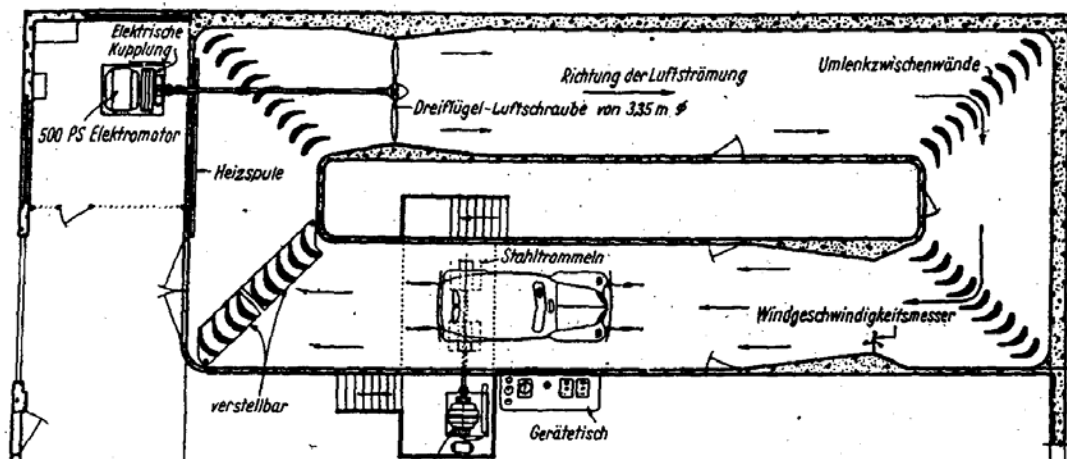


Bild1: First Modine Climatic Wind Tunnel of 1941 (Racine, Wisconsin, USA)

Der neue Klimawindkanal in Filderstadt-Bonlanden (Bild 2) dient der Entwicklung und Absicherung der eigenen Produkte, und darüber hinaus steht er auch externen Kunden zur Verfügung.



Bild 2: New Climatic Wind Tunnel of 2004 (Filderstadt-Bonlanden, Germany)
Weitere, moderne Klimawindkanäle von Modine befinden sich in den Entwicklungszentren in den USA (Bild 3) und in Korea (Bild 4).



Bild 3: Climatic Wind Tunnel USA

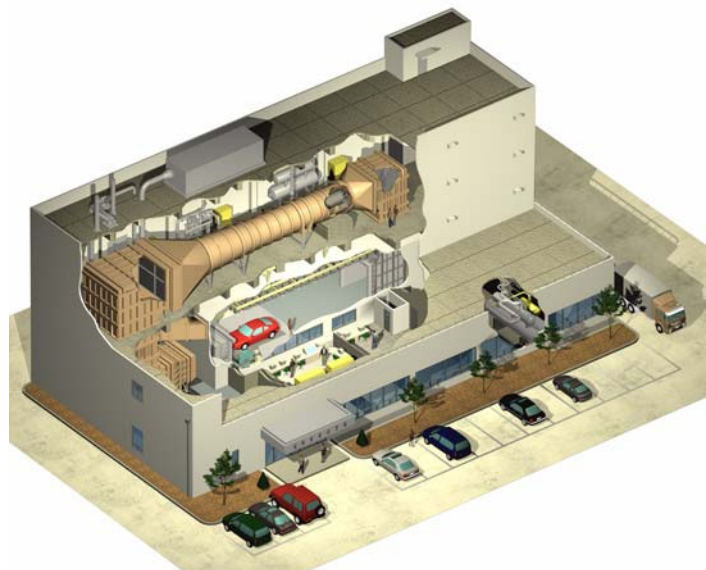


Bild 4: Climatic Wind Tunnel South Korea

2. Ansatz zur Simulation der Straßenfahrt

Mit einem Windkanal wird die Fahrt auf der Straße simuliert, aber nicht in jeder Hinsicht vollkommen reproduziert. Bei der Konzeption eines Kanals kommt es, wie bei jeder Simulation, darauf an, nur das abzubilden, was für den Vorgang wesentlich ist. Und das mit keinem größeren Aufwand, als unbedingt erforderlich. Nur so kommt man zu einer kostenoptimalen Versuchsanlage.

Bei einem Klimawindkanal ist natürlich zu aller erst das Klima darzustellen, und das wird von den Parametern Lufttemperatur, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung definiert. Ebenso ist die Umströmung des Fahrzeugs zu simulieren, denn sie ist mehrfach für den Wärmehaushalt maßgeblich: Die Fahrzeugumströmung bewirkt bzw. beeinflusst die Durchströmung des Motorraums, des Innenraums und aller im Kühlluftstrom angeordneten Wärmeübertrager. Sie ist für den Wärmeübergang an den Oberflächen des Fahrzeugs verantwortlich.

Aber man muss nicht immer sämtliche Parameter, mit denen sich die Fahrt auf der Straße beschreiben lässt, auf einmal darstellen. So darf man, um zwei Beispiele anzuführen, bei Versuchen zur Kühlung der Aggregate auf die Darstellung des Sonnenlichts verzichten, und bei Versuchen zum Nachweis der vorschriftsmäßigen Enteisung der Windschutzscheibe nach einem Kaltstart benötigt man keine Umströmung, die amtliche Überprüfung erfolgt ja im Stand.

3. Das Konzept

Bei näherer Betrachtung der verschiedenen wärmetechnischen Versuche zeigt sich, dass man sie bezüglich der darzustellenden Parameter in zwei Gruppen aufteilen kann:

- In der einen sind Wind, Temperatur und Feuchte abzubilden;
- In der andern sind es Temperatur, Feuchte und Sonnenlicht – und es wird nur so viel Fahrtwind benötigt, dass die Aggregate gekühlt werden.

Nach dieser Philosophie hat Modine ein Klimazentrum konzipiert, das in Bild 5 zu sehen ist:

- Ein bei positiven Temperaturen temperierbarer Windkanal (in Bildmitte), der jedoch so konstruiert ist, dass der Klimabereich erweitert werden kann: auf Temperaturen bis -20° und auf Sonnenlichtsimulation.
- Eine Klimakammer mit Fahrtwindgebläse (ganz rechts im Bild), in der Temperatur, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung dargestellt werden.



Bild 5: Schnittzeichnung des Windkanalgebäudes

Eine kompakte Anlage. Um Grundfläche zu sparen, ist der Windkanal senkrecht aufgestellt; die Hilfsaggregate sind gut zugänglich auf mehreren Etagen angeordnet. Kurze Wege; Werkstätten und Büroräume, alles ist in einem Gebäudekomplex untergebracht¹. Durch ein perfektes Zutrittskontrollsystem können die beiden Prüfanlagen bei voller Gewährleistung von Vertraulichkeit und Geheimhaltung von verschiedenen Kunden gleichzeitig benutzt werden.

4. Der Klimawindkanal

4.1 Luftführung

Als Luftführung kommt für einen Klimawindkanal nur die Göttinger Bauart in Betracht, der geschlossene Kreislauf. Folglich ist, wie in Bild 6 zu sehen, der Klimawindkanal von Modine nach diesem Prinzip ausgelegt. Seine wesentlichen Abmessungen und Leistungsdaten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

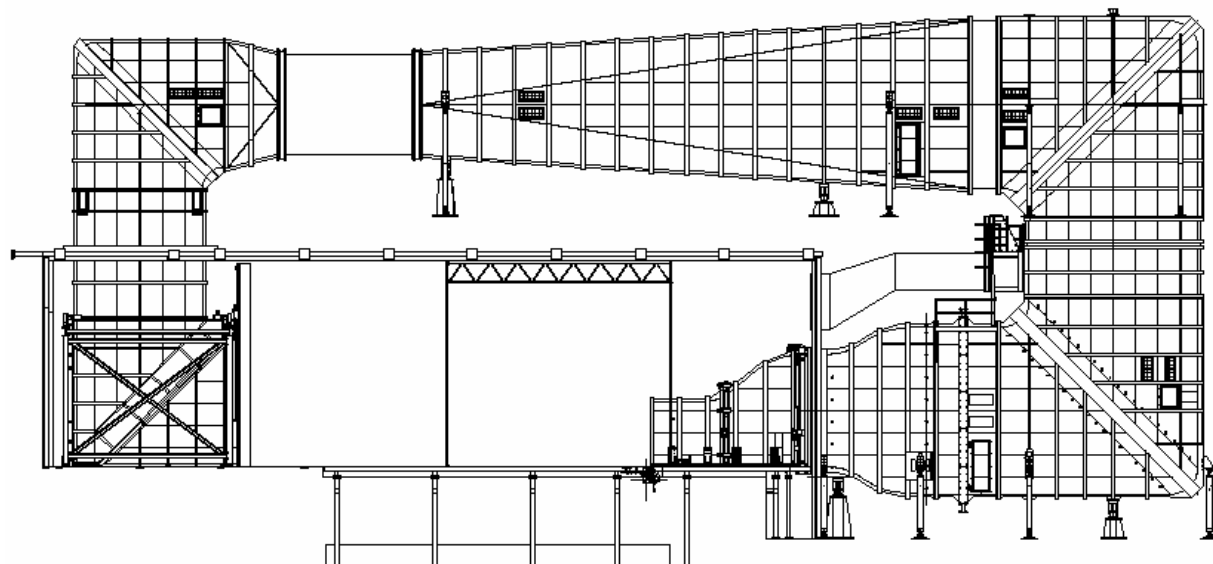


Bild 6: Windkanalkonstruktion, Luftführung

Tabelle 1: Klimawindkanal, Merkmale und Leistungsdaten

Strahlquerschnitt Pkw / Nfz	5,34 / 12 m ²
Länge der Messtrecke Pkw/Lkw/Bus	14,3/15,8/19,3m
Windgeschwindigkeit Pkw / Nfz	250 / 120 km/h
Antriebsleistung des Gebläses	1.300 kW
Temperaturbereich	20 bis 55° C, Option -20°C
Kühlerleistung des Windkanals	2.000 kW
relative Luftfeuchte	10 bis 90 %

Das Gebläse mit einem Durchmesser von 3,55 m und einer Leistung von 1.300 kW fördert die Luft über den langen Diffusor zum Wärmetauscher. Dort wird sie auf die

¹ Der Klimawindkanal wurde von Schreiber, Brand und Partner Ingenieurgesellschaft (SBI) nach dem Lastenheft der Modine Europe GmbH geplant und während der Bauphase betreut.

gewünschte Temperatur gebracht. Damit diese gleichmäßig über dem Querschnitt verteilt ist, wurden bei der Auslegung des Wärmetauschers zwei Maßnahmen getroffen:

- Mit 36 m² wurde dessen Stirnfläche sehr großzügig bemessen;
- er wurde aus drei horizontal angeordneten Segmenten zusammengesetzt, die auf der Flüssigkeitsseite jeweils in U-Führung durchströmt werden.

Die temperierte Luft gelangt über zwei beschauelte Umlenkecken in die große Vorkammer mit einem Querschnitt von 36 m², wo sie sich beruhigt. Ein dort angebrachtes Turbulenznetz sorgt für eine außerordentlich gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über dem gesamten Querschnitt. Beschleunigt in der Düse strömt die Luft mit bis zu 250 km/h in die Messtrecke, umströmt den Prüfling und wird vom Kollektor aufgefangen. Dessen quadratischer Querschnitt wurde mit 20 m² sehr weit gewählt, um eine stabile Strömung zu gewährleisten und den statischen Druck entlang der (leeren) Messtrecke konstant zu halten. Über zwei ebenfalls beschauelte Umlenkecken wird die Luft dem Gebläse zugeführt – womit der Kreislauf geschlossen ist. Die Beschauflung der unteren Umlenkecke ist mittig in zwei Hälften geteilt, die seitlich aus dem Luftstrom herausgefahren werden können und so die Zufahrt zur Messtrecke freigeben.

Die Düsenöffnung kann innerhalb weniger Sekunden mit einer aus 2 Flügeln bestehenden Klappe geschlossen werden. Gleichzeitig öffnet ein Bypass-Kanal, der die Luft oberhalb der Düse ins Plenum leitet. Damit können instationäre Betriebszustände wie Heißstopp oder Stop-and-go mit hoher Dynamik simuliert werden und eine Anströmung des Prüflings bei Stillstand wird zuverlässig vermieden.

Zwei Bauelemente dieses Kreislaufs sind es, die für den Betrieb des Windkanals, d.h. für sein Einsatzspektrum und die Betriebskosten, maßgeblich sind: die Düse und die Messtrecke:

4.2 Die Düse

Der Strahlquerschnitt und die erreichbare Windgeschwindigkeit sind die maßgeblichen Kenngrößen eines Windkanals. Sie bestimmen

- die Abmessungen des ganzen Kanals und damit das zu investierende Kapital, sowie
- die Antriebs- und die Wärmeleistung und damit vor allem die laufenden Betriebskosten.

Der Strahlquerschnitt soll folglich nicht größer sein, als unbedingt erforderlich, aber natürlich groß genug, um eine möglichst wirklichkeitsnahe Umströmung des Prüflings zu erzeugen. Wiederholt durchgeführte Vergleichsmessungen haben ergeben, dass man in einem Klimawindkanal ein im Vergleich zu einem Aerodynamikkanal großes Versperrungsverhältnis zulassen kann. Dabei ist das Versperrungsverhältnis φ definiert als das Verhältnis der Stirnfläche des Prüflings, $A_{\text{Prüfling}}$, zur Austrittsfläche der Düse, $A_{\text{Düse}}$, also $\varphi = A_{\text{Prüfling}} / A_{\text{Düse}}$.

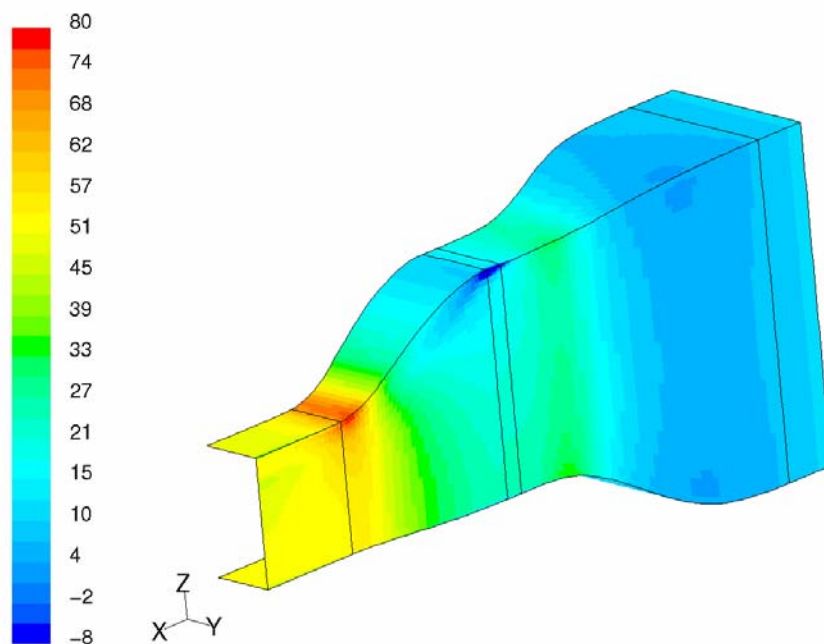
Ein Wert von $\varphi = 0,3$ bis $0,4$ hat sich für einen Klimawindkanal als ausreichend erwiesen. Es hat sich gezeigt, dass damit die Umströmung des Vorderwagens recht gut und die der Kabine ausreichend mit derjenigen auf der Straße – oder in einem großen Windkanal – übereinstimmt. Der Austrittsquerschnitt der Düse des Kanals von Modine wurde zu $A_{\text{Düse}} = 5,3 \text{ m}^2$ festgelegt. Für einen Pkw mit einer Stirnfläche

von $A_{\text{Prüfling}} = 2,0 \text{ m}^2$ ergibt sich damit eine Versperrung von $\varphi = 0,38$; sie liegt genau in dem oben angegebenen Bereich.

Für Nutzfahrzeuge ist ein Austrittsquerschnitt von $5,3 \text{ m}^2$ natürlich viel zu klein. Um auch Schwerlastwagen und Reisebusse untersuchen zu können, kann ein Düsenquerschnitt von 12 m^2 als ausreichend angesehen werden. Um diese beiden stark unterschiedlichen Düsenquerschnitte in ein und demselben Kanal zu realisieren, wurde der Klimawindkanal von Modine mit einer „Tandemdüse“ ausgerüstet. Sie ist in Bild 7 skizziert. Diese Düse ist aus zwei Teilen aufgebaut; genauer: sie ist aus zwei hinter einander angeordneten Düsen zusammengesetzt.

Steht ein Pkw in der Messtrecke, so werden beide Düsen hintereinander geschaltet. Bei einem Austrittsquerschnitt von $5,3 \text{ m}^2$ werden in der Spitze 250 km/h erreicht. Wird ein Nutzfahrzeug untersucht, so wird der zweite Teil der Düse seitlich aus dem Kanal herausgefahren, und der Luftstrom wird mit zwei von der Seite hereinklappbaren ebenen Wänden geführt. Mit der ersten Teildüse lässt sich bei deren Querschnitt von 12 m^2 eine Windgeschwindigkeit von 120 km/h erreichen. Mehr als für Busse verlangt.

Der große Vorteil der Tandemdüse besteht darin, dass der Windkanalstrahl bei beiden Austrittsquerschnitten nicht nur in der Höhe an die Fahrzeugart angepasst wird, sondern auch in der Breite. Dadurch wird sowohl für Pkw als auch für Lkw der Strahlquerschnitt an die Fahrzeugabmessungen angepasst, sodass weder bei der Qualität der Umströmung noch bei der erreichbaren Windgeschwindigkeit Abstriche in Kauf genommen werden müssen. Der Düsenumbau benötigt weniger als 30 Minuten.



wird, sondern auch in der Breite. Dadurch wird sowohl für Pkw als auch für Lkw der Strahlquerschnitt an die Fahrzeugabmessungen angepasst, sodass weder bei der Qualität der Umströmung noch bei der erreichbaren Windgeschwindigkeit Abstriche in Kauf genommen werden müssen. Der Düsenumbau benötigt weniger als 30 Minuten.

Bild 7: Tandemdüse (CFD-Modell, x: Luftgeschwindigkeit in m/s)

4.3 Die Messstrecke

Die Messstrecke des Klimawindkanals von Modine ist offen, und sie ist von einem großvolumigen Raum umgeben, dem Plenum. Das heißt, dass der Luftstrom an seinen Rändern frei ist und nicht durch Wände geführt wird. Diese Anordnung bietet den großen Vorteil, dass die Messstrecke gut zugänglich und von allen Seiten einsehbar ist. Bei der Dimensionierung des Plenums wurde ausreichend Platz vorgehalten, um später Lampen für die Simulation des Sonnenlichts einbauen zu können. Das dafür nötige Traggerüst ist bereits vorhanden. Der typische Prüfaufbau mit Pkw und Lkw ist in den Bildern 8 und 9 zu erkennen.



Bild 8: Aufbau eines PKW



Bild 9: Aufbau eines LKW

Wird der Kanal mit der 12 m²-Düse für Nutzfahrzeuge und ohne Düsenverlängerung betrieben, ergibt sich mit 19,3 m eine besonders große Messstreckenlänge. Sie macht es möglich, im Klimawindkanal von Modine auch große Busse zu untersuchen. Wobei es sich als vorteilhaft erwiesen hat, die Strömung im vorderen Bereich des Busses durch einen „Mantel“ zu führen, wie in Bild 10 zu erkennen.



Bild 10: Bus im Windkanalplenum mit zusätzlicher Luftführung im Frontbereich

4.4 Der Rollenprüfstand

Die Messtrecke ist mit einem Allrad-Rollenprüfstand ausgerüstet; seine Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Durchmesser der Rollen beträgt 2 m. Beide Dynamometer sind per Knopfdruck - ggfs. mitsamt dem Prüfling - in Längsrichtung verschiebbar; ihr Radstand kann zwischen 2,3 und 6,9 m eingestellt werden. Sie sind nicht nur für Pkw, sondern auch für Nutzfahrzeuge ausgelegt und verfügen über jeweils 2 separate Kraftmessvorrichtungen für verschiedene Messbereiche. Die maximale Umfangsgeschwindigkeit gleicht mit 250 km/h der maximalen Windgeschwindigkeit.

Außer stationären Betriebspunkten mit konstanter Zugkraft- oder Geschwindigkeit können auch komplexe Zyklen gefahren und Ausrollversuche durchgeführt werden. Dabei kann die reale Straßenfahrt oder ein externer Rollenprüfstand simuliert werden. Die Prüflinge werden aus dem eigenen Tank gefahren.

Tabelle 2: Daten des Allrad-Rollenprüfstands im Dauerbetrieb

Dynamometer	Antriebs-/Bremsleistung	Umfangsgeschwindigkeit	max. Zugkraft
vorn	300 kW ab 83 km/h	250 km/h	13 kN
hinten	450 kW ab 62 km/h,	250 km/h	26 kN

Um Pkw auf den Rollen möglichst ohne Beeinträchtigung der Fahrzeugumströmung fesseln zu können, wurde ein spezieller Nabenaufsatz² für die Befestigung entwickelt; er ist in den Bildern 11 und 12 zu sehen.



Bild 11: PKW mit Radnabenfesselung

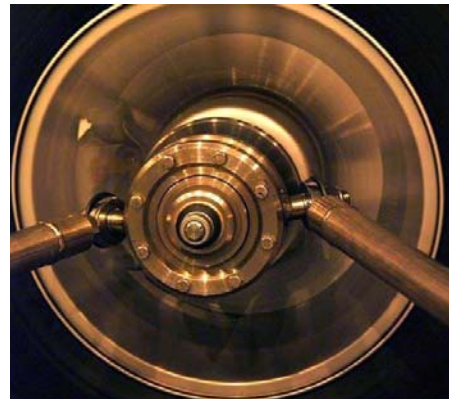


Bild 12: Detail

² Die Entwicklung wurde von der AVL, Graz ausgeführt.

5 Kalibrierung der Düsen

Bei der Abnahme des Kanals wurde die Geschwindigkeitsverteilung $u(y,z)$ mit einem Messbalken (Bild 14) mit Staudrucksonden punktweise über dem Strahlquerschnitt in der leeren Messtrecke gemessen. Sowohl für die große als auch für die kleine Düse (Iso-Diagramm, Bild 13) ergibt sich eine sehr gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung.

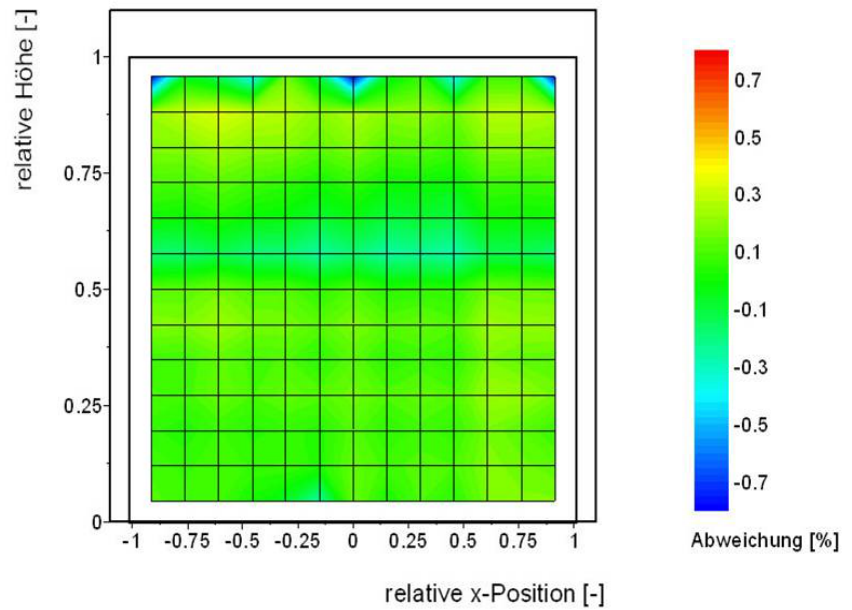


Bild13: Geschwindigkeitsverteilung 1.5m hinter der Düsenmündung; kleine Düse (5,3m²) bei 100 km/h: Standardabweichung: < 0,3 %



Bild 14: Kalibriereinrichtung mit Staudrucksonden und Temperatursensoren

Die Messung der Geschwindigkeitsverteilung diene zugleich der Kalibrierung der beiden Düsen. Als Einstellgröße für die Strahlgeschwindigkeit wird die Druckdifferenz Δp_P zwischen Vorkammer und Plenum gewählt; der Kanal wird also nach der so genannten Plenumsmethode gefahren. Der statische Druck in der Vorkammer, p_v , wird über eine Ringleitung erfasst, der statische Druck p_∞ im Plenum - er ist gleich dem Atmosphärendruck - mit einer so genannten Druckdose, die die Messtelle vor Sekundärströmungen schützt.

Die in der Vorkammer vorhandene Strömungsgeschwindigkeit sowie Strömungsverluste zwischen Vorkammer und Düsenaustritt werden mit dem Düsenfaktor k zur Korrektur der gemessenen Druckdifferenz berücksichtigt.

$$k = \left(\frac{\rho}{2} * v^2 \right) / (p_v - p_\infty) \quad \rho \dots \text{Dichte der Luft}$$

In Bild 15 ist der Düsenfaktor k für die Kalibrierung der Pkw-Düse nach der Plenumsmethode über der gemessenen Druckdifferenz aufgetragen.

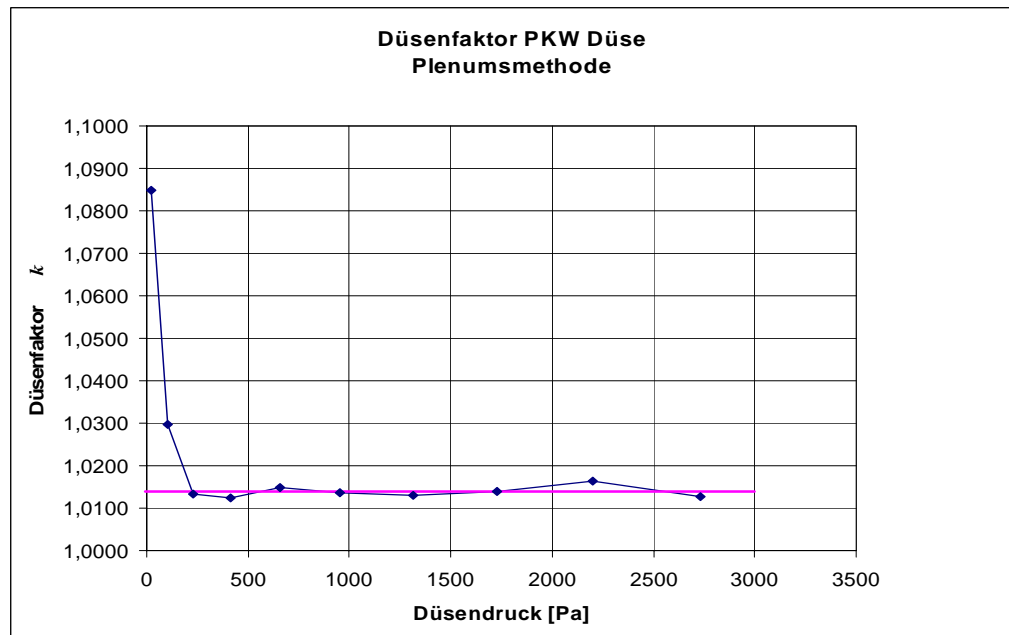


Bild 15: Düsenfaktor für die 5.3 m²-Düse für das leere Plenum

6. Einstellung der Windgeschwindigkeit

Befindet sich ein Fahrzeug in der Messtrecke, so sind bei der Einstellung der Windgeschwindigkeit folgende Phänomene zu berücksichtigen:

1. Einmal wird die zuvor beschriebene Messung der Windgeschwindigkeit dadurch gestört, dass sich das Fahrzeug auch stromaufwärts bemerkbar macht, bis in die Düse hinein; dadurch verändert sich der Düsenfaktor. Ein Effekt, der vom Abstand zwischen Düse und Prüfling abhängig ist. Dieser Einfluss wird durch die Verwendung der Plenumsmethode zur Einstellung der Geschwindigkeit verringert.

2. In der Düse können sich die Stromlinien vor dem Fahrzeug nicht so weit ausdehnen, wie in freier Umströmung, denn sie werden dort von den Wänden geführt. Das bewirkt, dass die effektive Anströmgeschwindigkeit größer als die eingestellte ist und zwar umso mehr, je kleiner der Abstand zwischen Fahrzeug und Düse ist.

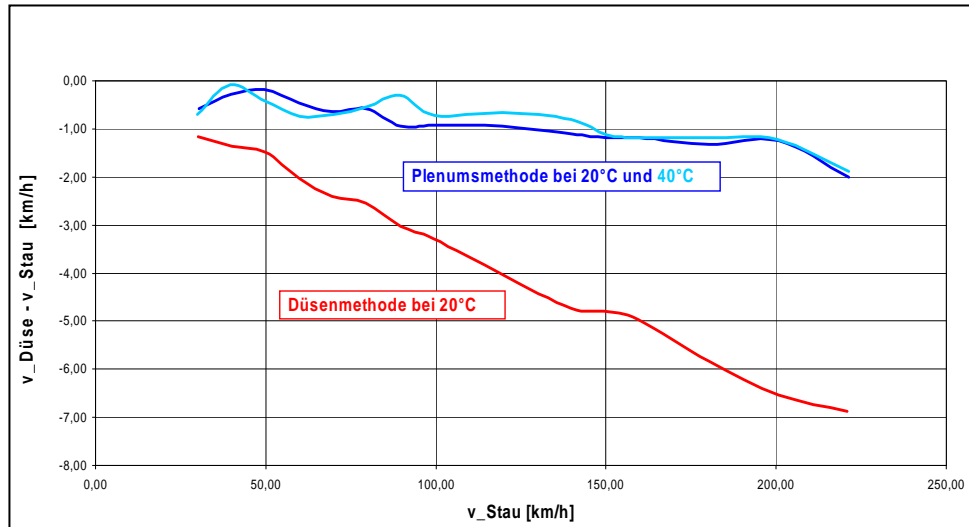


Bild 16: Wirkung eines Fahrzeuges auf die Windgeschwindigkeit; 5.3 m²-Düse, AUDI A3

Die Rückwirkungen der Windgeschwindigkeit auf die Messergebnisse im Fahrzeug sind nicht zu vernachlässigen.

So zeigen sich in allen Betriebspunkten bei denen die Durchströmung des Kühlers vorrangig durch den Staudruck bestimmt wird, erhebliche Abweichungen, die man nicht unberücksichtigt lassen kann.

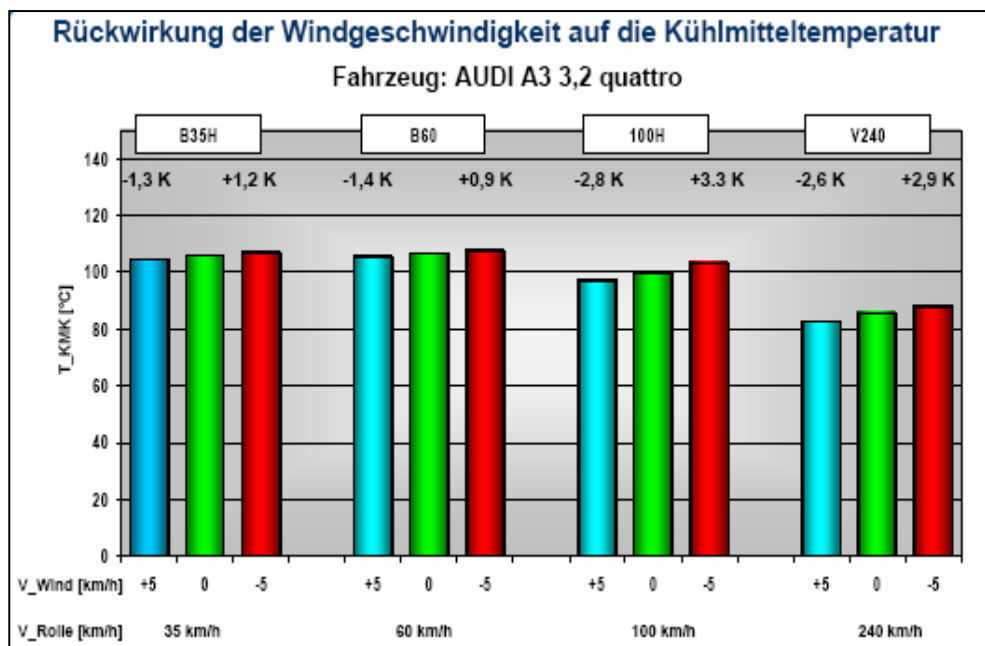


Bild 17: Rückwirkung der Windgeschwindigkeit auf die Fahrzeugmessergebnisse ; 5.3 m²-Düse, AUDI A3

Die einzustellende, effektive Anströmgeschwindigkeit ist diejenige, für die sich im Staupunkt der Druckbeiwert $c_p = 1$ ergibt. Der zugehörige Gesamtdruck kann mit einem Pitotrohr in der Strömung vor dem Fahrzeug gegenüber Plenumsdruck gemessen werden. Aus der Messung für eine einzige Geschwindigkeit lässt sich für die gegebene Prüfanordnung (Fahrzeugkontur, Düsenabstand etc.) ein konstanter Korrekturfaktor für verschiedene Geschwindigkeiten oder ein korrigierter Düsenfaktor berechnen. Die Lage des Staupunkts zur fehlerfreien Positionierung des Pitotrohrs kann mit einer Rauchsonde bestimmt werden.

Dazu wurde die in Bild 18 gezeigte Vorrichtung gebaut. Durch Verfahren der Rauchsonde über den Linearantrieb kann der Staupunkt eindeutig bestimmt werden.

Durch diese Methode ist sichergestellt, dass keine Modifikationen am Prüfobjekt vorgenommen werden müssen um den Korrekturfaktor zu bestimmen.

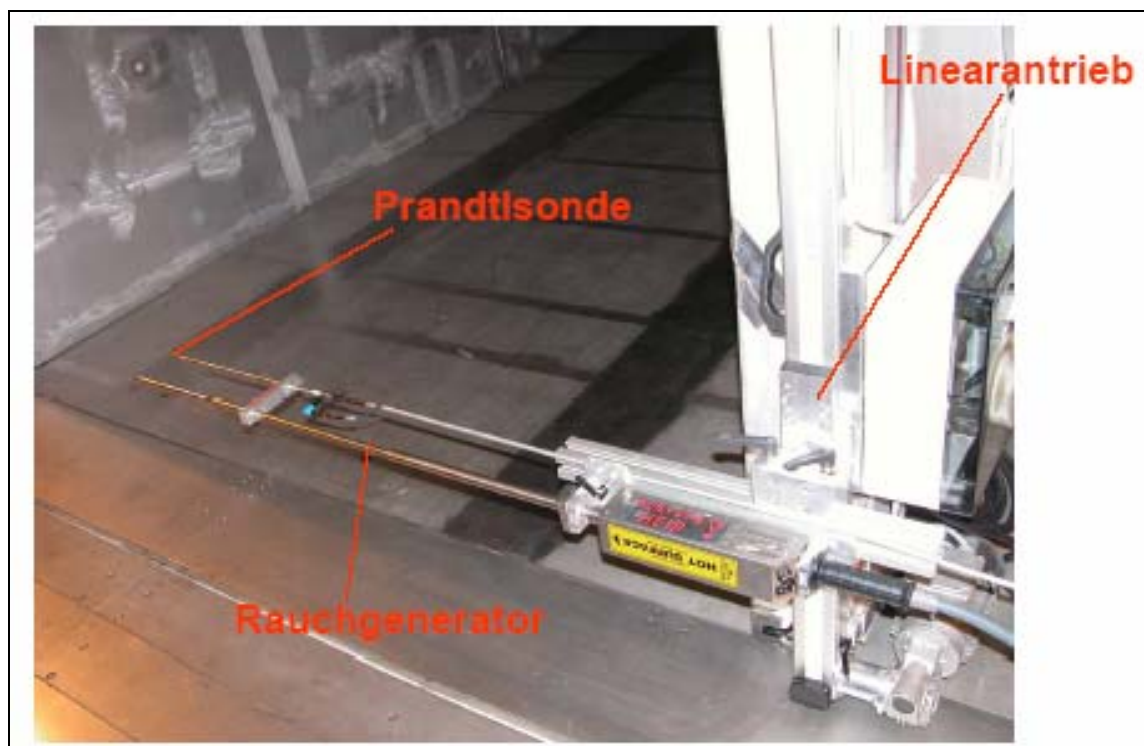


Bild 18: Vorrichtung zur Bestimmung des Staupunktes und Messung des Gesamtdruckes

Die folgende Bildsequenz veranschaulicht die Funktion der Einrichtung.

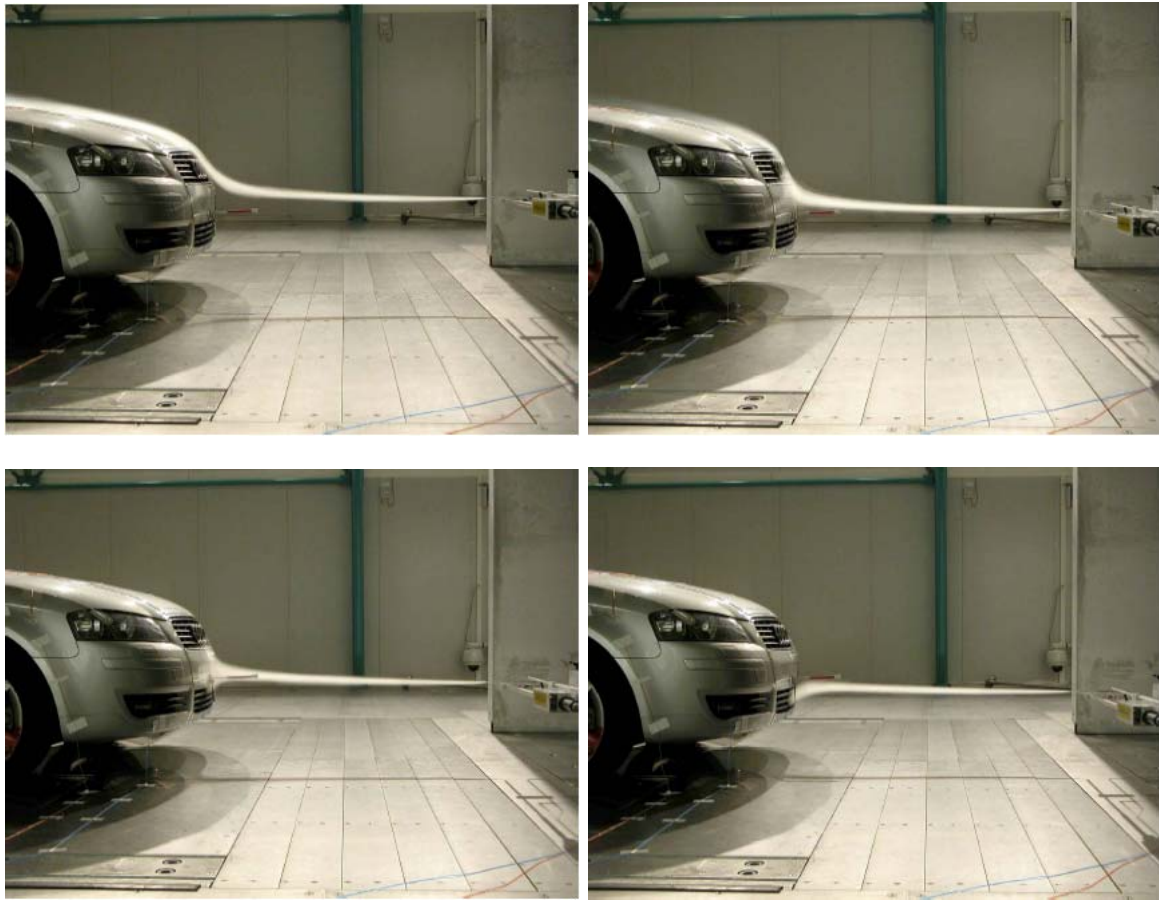


Bild 19: Bestimmung des Staupunktes

Nach der Bestimmung des fahrzeugspezifischen Korrekturfaktors wird die Messeinrichtung wieder abgebaut, so dass eine ungestörte Anströmung des Fahrzeuges gewährleistet ist.

Führt man die Messungen mit dieser zusätzlichen Korrektur durch, können die Abweichungen in der Anströmgeschwindigkeit unter 0,5 km/h gehalten werden (Bild 20).

Vergleichsbasis bei allen Messungen ist der Staudruck im Fahrzeugstauunkt.

Das Resultat rechtfertigt den Aufwand, zumal der sich durch die Vorrichtung in Grenzen hält.

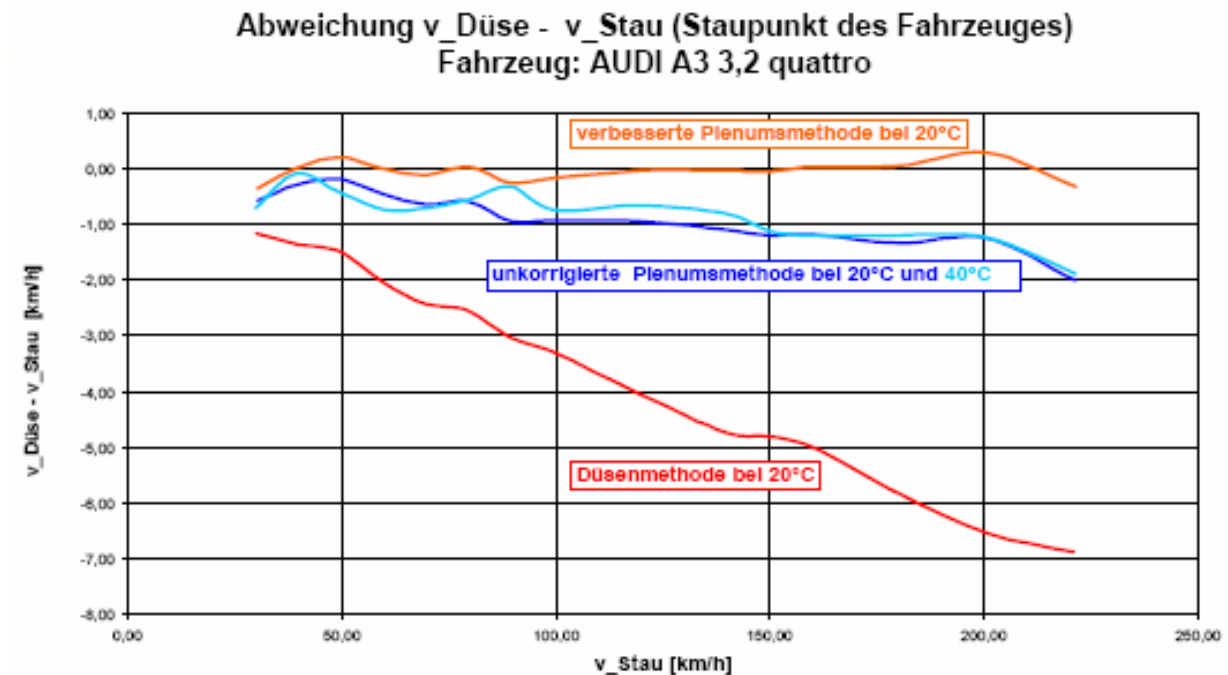


Bild 20: Verbesserungspotential gegenüber der unkorrigierten Plenums- und Düsenmethode

7. Schlußfolgerung

Für Klimawindkanäle, die mit relativ großer Versperrung durch die Prüfobjekte betrieben werden, erscheint die Düsenmethode ungünstig. Der Düsenfaktor wird so beeinflusst, dass immer eine zu niedrige Geschwindigkeit gemessen wird, was zur Folge hat, dass die eingeregelt Windgeschwindigkeit deutlich zu hoch ist. Die Konsequenzen auf die Messergebnisse sind entsprechend.

Die Plenumsmethode stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber der Düsenmethode dar und verhält sich wesentlich unempfindlicher gegenüber Störungen durch ein Fahrzeug.

Durch das gezeigte Verfahren können die Ergebnisse noch weiter verbessert werden. Dieses Verfahren ist im Prinzip für beide Messmethoden anwendbar. Die verlässlichere Ausgangsbasis ist aber die Plenumsmethode.

8. Literatur

Mercker, E.; Wiedemann, J.: On the Correction of Interference Effects in Open Jet Wind Tunnels. SAE-Paper 960671, Detroit, 1996

Rae&Pope: Low Speed calibration of wind tunnels

Nijhof B.C. & Wickern G. Reference static and dynamic pressures in automotive wind tunnels, 2003

Hucho, W.H.: Aerodynamik des Automobils. 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 2005

Röser P. & Ehlers M. & Zurek D.: Leistungsspektrum im Modine Windkanal und Bewertung von Messergebnissen, 2005