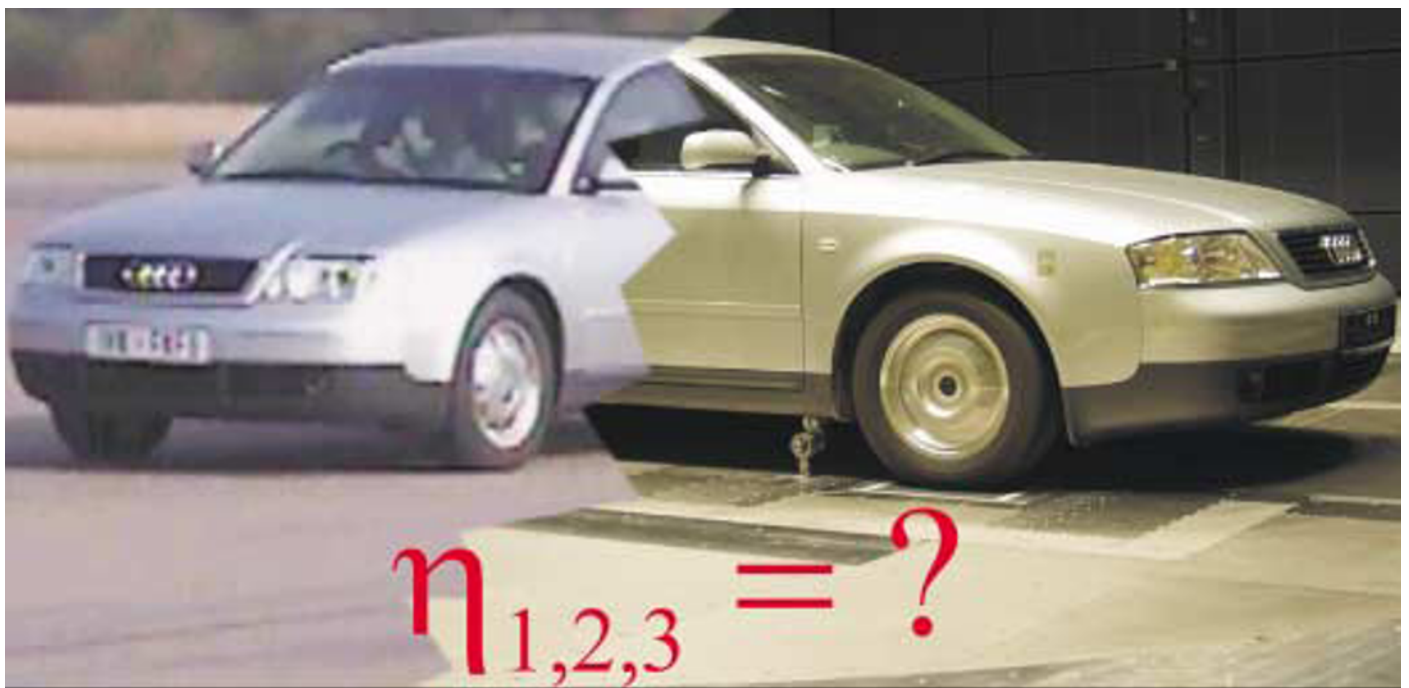


Fahrwiderstands- bestimmung im realen Fahrbetrieb



Am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart wird die theoretische und messtechnische Aufteilung des Fahrwiderstands in seine originären Anteile systematisch untersucht. Neben Prüfstandsmessungen ist auch die Erfassung der einzelnen Fahrwiderstände im realen Fahrbetrieb wichtig. Nur die genaue Kenntnis über die einzelnen Teilwiderstände und ihre separate messtechnische Erfassung erlaubt eine ursachenbezogene Optimierung des Gesamtfahrwiderstands und damit des Kraftstoffverbrauchs.

1 Einleitung

Die steigenden Rohölpreise und das zunehmende Umweltbewusstsein der Bevölkerung führen zu einer wachsenden Nachfrage nach Fahrzeugen mit geringem Kraftstoffverbrauch. Zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs werden daher große Anstrengungen unternommen. Neben kraftstoffsparenden Motoren ist die Entwicklung von optimierten Antriebskonzepten

und Karosserien von Bedeutung. Dabei ist die gezielte Optimierung anzustreben, zum Beispiel die Verringerung des Rollwiderstands oder eine Reduzierung der Triebstrangverluste. Diese Entwicklung kann nicht ausschließlich auf Prüfständen und in Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse müssen im realen Fahrversuch validiert und abgeglichen werden. Zur Einstellung von Prüfständen werden Daten benötigt, die im Fahrversuch

ermittelt werden. Für die Aussagekraft dieser Prüfstandsmessungen ist es wichtig, dass Fahrwiderstandsdaten frei von Störeinflüssen verwendet werden. Ein Beispiel für solche Prüfstandsmessungen sind Kraftstoffverbrauchsmessungen nach ECE-R15 [1].

Zur Bestimmung des Gesamt-Fahrwiderstands genügt es nicht, die Teilwiderstände einzelner Bauteile auf speziellen Prüfständen zu untersuchen, da es im Fahrzeug zu Wechselwirkungen zwischen den Teilwiderständen kommt. Der tatsächliche Anteil der Teilwiderstände am Gesamtwiderstand kann nur durch Gesamt-Fahrwiderstandsmessungen bestimmt werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Aufteilung des Fahrwiderstands in seine einzelnen Bestandteile. So können Optimierungspotenziale sichtbar gemacht werden. Durch die Optimierung der Messmethoden soll die Möglichkeit geschaffen werden, Prüfstandsmessungen mit reproduzierbaren Straßenmessungen zu vergleichen, um Korrelationen zwischen Prüfstand und Straße zu erkennen.

2 Ausrollmessungen

Ein gebräuchliches Messverfahren für Fahrwiderstandsuntersuchungen ist die Ausrollmessung. Dabei wird das Fahrzeug bis zum Erreichen der Anfangsgeschwindigkeit v_{Anf} beschleunigt, dann wird der Antriebsstrang vom Motor getrennt. Bei Fahrzeugen mit Schaltgetriebe wird das Getriebe in den Leerlauf geschaltet, bei Automatikgetrieben wird die Fahrstufe N eingelegt. Das Fahrzeug rollt frei bis zum Erreichen einer Endgeschwindigkeit v_{end} aus. Während dieses Ausrollvorgangs wird der Geschwindigkeitsverlauf $v_F(t)$ aufgezeichnet.

Zur Auswertung einer solchen Ausrollmessung wird die Bewegungsgleichung des Fahrzeugs herangezogen. Allgemein kann für ein Fahrzeug bei Geradeausfahrt die Zugkraft als Summe aus den Fahrwiderständen, der Beschleunigungswiderstandskraft und der Hangabtriebskraft dargestellt werden, siehe Gl.(1).

$$F_z = F_W + M_e \cdot \frac{dv_F}{dt} + M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad \text{Gl. (1)}$$

mit

M_e effektive Fahrzeugmasse, incl. Anteil der rotatorischen Massen
 v_F Fahrzeuggeschwindigkeit
 M statische Fahrzeugmasse
 g Erdbeschleunigung

Während einer Ausrollmessung ist die Zugkraft $F_z = 0$, da keine Verbindung zwischen Motor und Getriebe besteht. Um

auch die Hangabtriebskraft vernachlässigen zu können, müssen Ausrollmessungen auf einer absolut ebenen Fahrbahn durchgeführt werden. Die Fahrwiderstandskräfte sind somit proportional der Verzögerungskraft während der Messung. Teilt man die Fahrwiderstände in die Hauptbestandteile Luftwiderstand und mechanische Widerstände auf, so wird die Bewegungsgleichung für die Ausrollmessung zu:

$$-M_e \cdot \frac{dv_F}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_x \cdot c_w \cdot (v_F + v_{wx})^2 + F_M \quad \text{Gl. (2)}$$

mit

t Zeit
 ρ Luftdichte
 A_x Fahrzeug-Stirnfläche
 c_w Luftwiderstandsbeiwert
 v_{wx} Windgeschwindigkeitskomponente in Fahrtrichtung

In den mechanischen Widerständen F_M sind als maßgeblicher Anteil der Rollwiderstand sowie die Reibungsverluste in den Radlagern, der Bremse und im Antriebsstrang enthalten. Geht man davon aus, dass sich diese mechanischen Widerstände linear mit der Geschwindigkeit ändern und dass der Luftwiderstand ausschließlich Geschwindigkeitsanteile 2. Ordnung enthält, kann man den Geschwindigkeitsverlauf einer Ausrollmessung als Polynom 2. Ordnung darstellen.

$$-\frac{dv_F}{dt} = C_1 + C_2 \cdot v_F + C_3 \cdot v_F^2 \quad \text{Gl. (3)}$$

Die Konstanten C_1 und C_2 bilden den konstanten und linearen Teil der mechanischen Widerstände ab, C_3 den Luftwiderstandsanteil. Mit diesem Ansatz können der Luftwiderstand und die mechanischen Verluste bestimmt werden. Sind die Verluste im Antriebsstrang zuvor näher untersucht worden, kann direkt der Rollwiderstand errechnet werden.

Bei dieser Modellannahme wird davon ausgegangen, dass keinerlei äußere Einflüsse im Messergebnis enthalten sind. Die dafür benötigten idealen Randbedingungen sind nur selten anzutreffen. **Bild 1** zeigt, dass schon geringe Fahrbahneigungen und Windgeschwindigkeiten das Messergebnis beeinflussen. Das Bild zeigt zwei Ausrollmessungen, die in entgegengesetzter Fahrtrichtung durchgeführt wurden. Es ist erkennbar, dass die Messreihen vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich deutlich voneinander abweichen. Der Grund für diese Abweichung sind Wind- und Fahrbahneinflüsse. Ein üblicher Ansatz, diese Einflüsse zu eliminieren, ist die Bildung paarweiser Mittelwerte aus zwei

Die Autoren



Dipl.-Ing. Wolfgang Mayer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.



Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann ist Ordinarius für Kraftfahrwesen am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und Vorstandsmitglied der Stiftung Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).



Dipl.-math. Jens Neubeck ist Leiter des Bereichs Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.

Messreihen unterschiedlicher Fahrtrichtung. Diese Vorgehensweise ist auch in einigen Richtlinien zur Fahrwiderstandsbestimmung verankert [1, 2].

Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass durch diese Mittelwertbildung Fehler entstehen. Der geschwindigkeitsunabhängige Einfluss der Fahrbahneigung kann kompensiert werden, wenn exakt derselbe Streckenabschnitt entgegengesetzt befahren wird. Eine vergleichbare Kompensation ist beim geschwindigkeitsabhängigen Einfluss des Windes nicht möglich.

Bild 2 stellt die Anströmverhältnisse am Fahrzeug dar. Die Relation zwischen Windgeschwindigkeit v_W und Fahrzeuggeschwindigkeit v_F bestimmt die Größe der resultierenden Anströmgeschwindigkeit v_{res} und des resultierenden Anströmwinkels τ_{res} . Der Mittelwert der Luftwiderstandskraft F_{LW} wird durch die paarweise Mittelwertbildung der Geschwindigkeitsverläufe zu:

$$F_{LW} = \frac{\rho}{2} \cdot c_w(\tau_{res}) \cdot A_x \cdot \left[\frac{(v_F + v_{wx}) + (v_F - v_{wx})}{2} \right]^2 \quad \text{Gl. (4)}$$

Sind Windgeschwindigkeit und Windrichtung bekannt, wird der richtige Mittelwert der Luftwiderstandskraft zu:

$$F_{LW} = \frac{\rho}{2} \cdot c_w(\tau_{res}) \cdot A_x \cdot \left[\frac{(v_F + v_{wx})^2 + (v_F - v_{wx})^2}{2} \right] \quad \text{Gl. (5)}$$

2 Ausrollmessungen

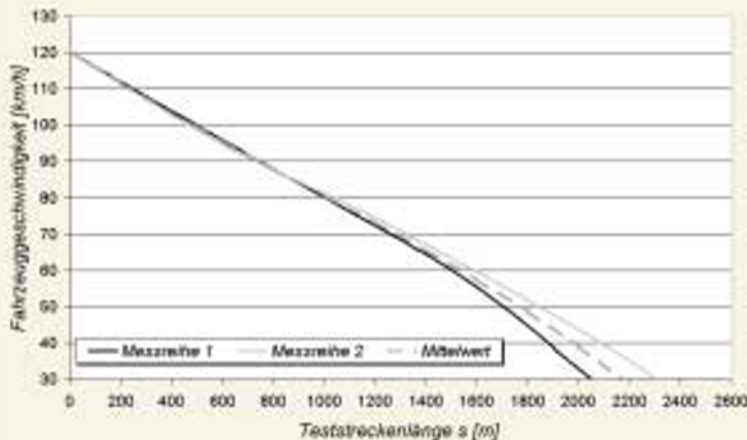


Bild 1: Gegenüberstellung zweier Messreihen aus entgegengesetzten Fahrtrichtungen

Figure 1: Comparison of two measurement runs from opposite driving directions

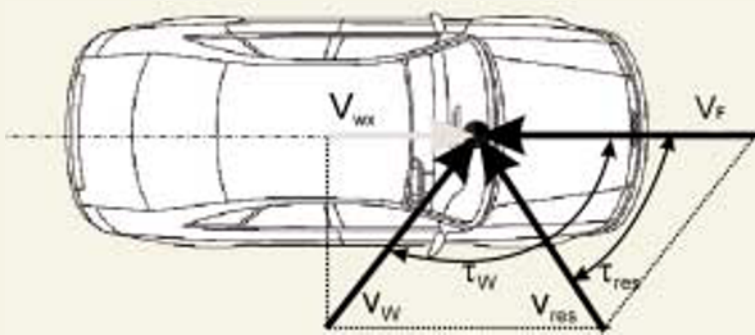


Bild 2: Anströmverhältnisse am Fahrzeug

Figure 2: Flow conditions at the vehicle

Nach Gl. (4) ergibt sich beispielsweise bei $v_{wx} = 10 \text{ km/h}$ und $v_F = 120 \text{ km/h}$ ein Fehler von 1 %. Bei gleichem v_{wx} und $v_F = 50 \text{ km/h}$ beträgt der Fehler 5 %.

3 Angewandtes Messverfahren

Bei der Ausrollmessung handelt es sich im Prinzip um ein Verfahren mit geringem messtechnischen Aufwand und einfacher Durchführbarkeit. Durch die Weiterentwicklung des Verfahrens wurde die Anfälligkeit der Ergebnisse auf äußere Einflüsse immer weiter reduziert. Dazu kommt bei heutigen Messungen immer mehr und immer aufwändigere Messtechnik zum Einsatz, um diese Störeinflüsse zu erfassen. Um optimale Ausrollmessungen in einem Geschwindigkeitsbereich von 120 bis 30 km/h durchführen zu können, wird eine ebene, wenig

befahrene Fahrbahn von mindestens 2,5 km Länge benötigt. Solche Fahrbahnen sind nur auf modernen Prüfgeländen vorhanden, was eine Durchführung erschwert.

Als Grundlage für die Ausrollmessungen am IVK dienten entsprechende Veröffentlichungen jüngerer Datums [3, 4, 5]. Gemessen wurde mit einem Audi A6 2,4 l mit Fünfgang-Schaltgetriebe. Es wurde angestrebt, jede der ausgeführten Messung einzeln auswerten zu können, um die systematischen Fehler der paarweisen Mittelwertbildung zu vermeiden. Dazu wurden die Störeinflüsse durch Wind und Fahrbahnprofil gemessen und heraus gerechnet. Damit sollte eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit erreicht werden. Zur Messung der Fahrzeuganströmung und des Fahrbahnprofils wurde das Fahrzeug mit spezieller Messtechnik ausgerüstet.

3.1 Messtechnische Ausrüstung

In Bild 3 sind die einzelnen messtechnischen Komponenten farbig angedeutet. Bei Auswahl und Einbau der Messtechnik wurde darauf geachtet, dass sie keinen Einfluss auf die Fahrzeugumströmung hat und so den Luftwiderstand nicht verändert. Die Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit während der Ausrollmessung erfolgt mit einem optischen Geschwindigkeitssensor (grün), der in der Reserveradmulde eingebaut ist.

Zur Bestimmung der resultierenden Fahrzeuganströmung wurde nicht die anemometerbasierte Methode, die in [3, 4, 5] beschrieben wird, eingesetzt. Bei dieser Methode wird am Fahrzeugbug eine lange Stange, die ein Flügelradanemometer trägt, befestigt. Mit diesem Anemometer wird Anströmwinkel τ_{res} und Anströmgeschwindigkeit v_{res} gemessen. Diese Anordnung hat den Nachteil, dass sie das Strömungsfeld vor dem Fahrzeug beeinflusst und somit auch den c_w -Wert verändert. Durch den Einbau von Drucksonden (gelb) an der Fahrzeugfront ist die Bestimmung der Fahrzeuganströmung möglich, ohne diese zu beeinflussen. Die Position der Sonden wurde in Windkanalmessungen optimiert, anschließend wurden die Sonden kalibriert.

Im Gegensatz zu [3, 4, 5] wurde auch das genaue Fahrbahnprofil mitgemessen. Die Bestimmung des Fahrbahnprofils erfolgt in zwei Schritten. Mit einer kreiselstabilisierten Plattform (rot), die nahe des Fahrzeugschwerpunkts im Fahrzeuginnenraum montiert ist, wird der Absolutwinkel α der Karosserie relativ zur Horizontalen bestimmt. Aus den Messwerten h_v und h_h der beiden Laser-Abstandssensoren (blau) lässt sich der Nickwinkel θ relativ zur Fahrbahn berechnen. Das Fahrbahnprofil der Teststrecke ergibt sich somit zu

$$\gamma = \alpha - \theta \quad \text{Gl. (6)}$$

3.2 Messergebnisse

Bild 4 zeigt eine Ausrollmessung und die dabei gemessene Fahrzeuganströmung. Die Anströmgeschwindigkeit liegt unter der Fahrzeuggeschwindigkeit, die Messung wurde also bei Rückenwind durchgeführt. Der Anströmwinkel steigt bei abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit immer weiter an, was darauf schließen lässt, dass es sich um seitlich auftretenden Rückenwind handelt.

Der Effekt des ansteigenden Anströmwinkels ist reproduzierbar für alle Ausrollmessungen, die bei seitlichem Wind durchgeführt werden. Dies lässt sich mit Hilfe von Bild 2 verdeutlichen. Ausrollmessungen werden bei geringen Windgeschwindigkeiten und möglichst konstantem Wind durchgeführt, das heißt v_W und τ_W schwan-

3.1 Messtechnische Ausrüstung

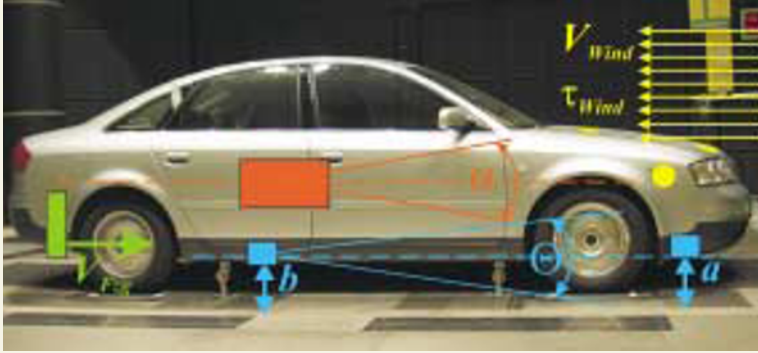


Bild 3: Messfahrzeug mit Messtechnik zur Bestimmung von Fahrzeuggeschwindigkeit, Anströmung und Fahrbahnprofil

Figure 3: Test vehicle with measurement equipment to measure speed, flow conditions and road profile

3.2 Messergebnisse

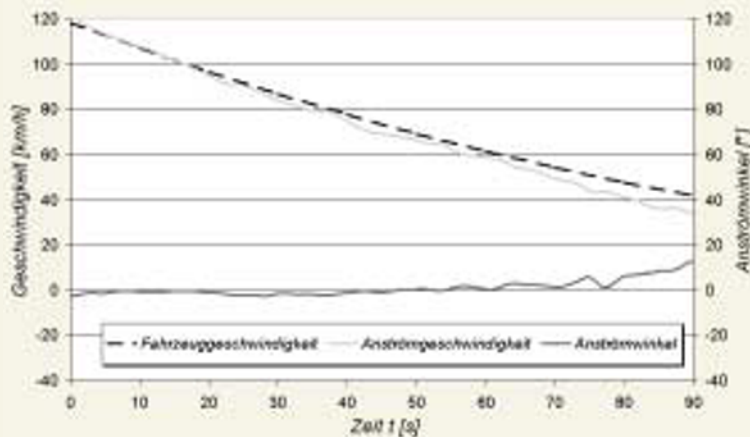


Bild 4: Ausrollmessung mit der dabei gemessenen Fahrzeuanströmung

Figure 4: Coast down run with measured flow conditions

ken nur in sehr geringem Maße während einer Messung. Mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit v_F nimmt der Einfluss des Windes zu und τ_{res} steigt, bis er im Stillstand gleich τ_W ist.

Mit dem gemessenen Verlauf der Windgeschwindigkeit lässt sich der Einfluss Δa_W des Windes auf die Gesamtverzögerung berechnen. Es können so Schwankungen des Windes und die daraus resultierenden Veränderungen der Anströmverhältnisse für jeden einzelnen Zeitpunkt t berechnet werden.

$$\Delta a_W = \frac{1}{M} (F_{LW}(\text{ohne Wind}) - F_{LW}(\text{mit Wind})) \quad \text{Gl. (7)}$$

$$\Delta a_W = \frac{1}{M} \left(\frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A_x \cdot v_F^2 - \frac{\rho}{2} \cdot c_w (\tau_{res}, v_{res}) \cdot A_x \cdot v_{res}^2 \right) \quad \text{Gl. (8)}$$

Die zweite wesentliche Einflussgröße auf das Messergebnis ist das Fahrbahnprofil. In **Bild 5** ist das berechnete Profil für die obige Messung dargestellt. Dieses Profil wurde nach Gl. (6) aus den Daten der Laser-Abstandssensoren und der kreiselstabilisierten Plattform ermittelt. Schwankungen der Fahrbahnsteigung werden in jedem einzelnen Punkt erfasst. Aus dem Verlauf des Fahrbahnwinkels lässt sich der Einfluss Δa_{FB} auf die Gesamtverzögerung berechnen.

$$\Delta a_{FB} = \frac{1}{M} (F_{St}) \quad \text{Gl. (9)}$$

$$\Delta a_{FB} = \frac{1}{M} (M \cdot g \cdot \sin \gamma) \quad \text{Gl. (10)}$$

Die genaue Bestimmung der Windkräfte und des Fahrbahnprofils bietet die Möglichkeit, in jeder einzelnen Messung die Störeinflüsse zu korrigieren. Darüber hin-

3.2 Messergebnisse

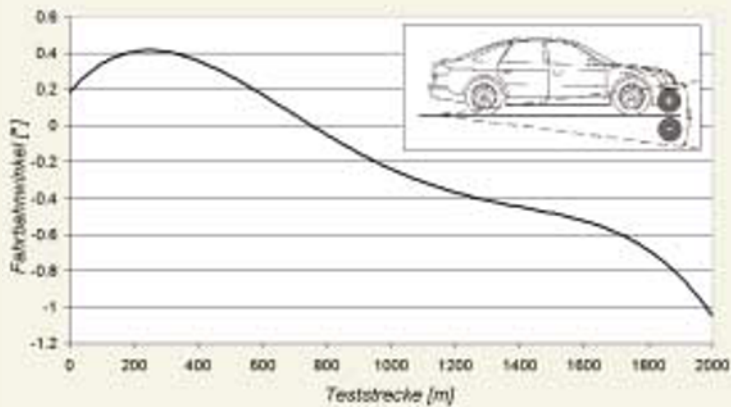


Bild 5: Fahrbahnprofil der Teststrecke
Figure 5: Road profile of the test track

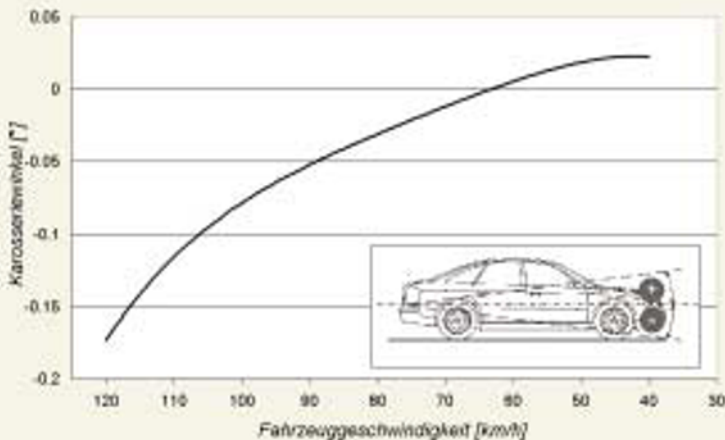


Bild 6: Nickwinkelveränderung während einer Ausrollmessung
Figure 6: Pitch angle during a coast down run

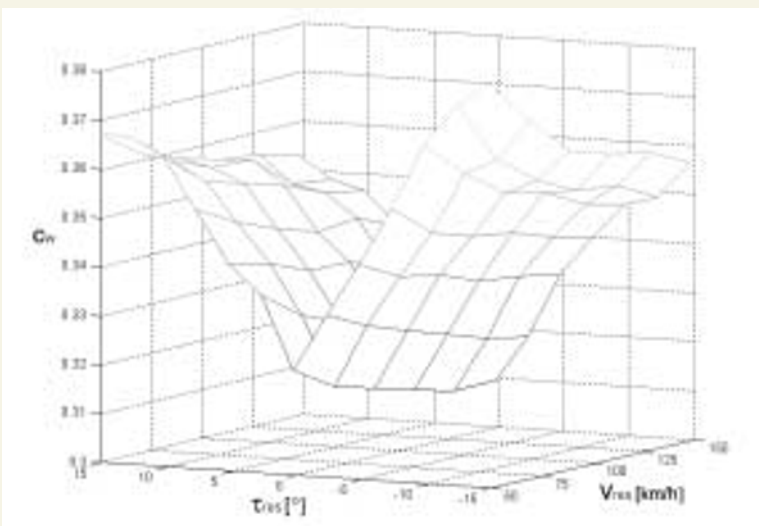


Bild 7: Das $c_w(\tau_{res}, v_{res})$ -Kennfeld
Figure 7: c_D -map

aus kann durch die Messmethode, mit der das Fahrbahnprofil ermittelt wird, der Nickwinkel der Karosserie bestimmt werden. **Bild 6** zeigt den Verlauf des Karosserienickwinkels relativ zur Fahrbahn während einer Ausrollmessung. Die Veränderung des Nickwinkels wird durch das aerodynamische Auftriebsverhalten der Karosserie und die Fahrzeugverzögerung verursacht. Dieser Verlauf ist für alle Ausrollmessungen, die mit dem Messfahrzeug durchgeführt wurden, reproduzierbar.

Zur Berechnung des Einflusses Δa_w auf die Fahrzeugverzögerung muss $c_w(\tau_{res}, v_{res})$ durch Windkanalmessungen bestimmt werden. In [4] und [5] wird davon ausgegangen, dass sich c_w lediglich in Abhängigkeit des Anströmwinkels τ_{res} , nicht aber in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v_{res} verändert.

Bei Messungen im 1:1-Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal des IVK wurde die Abhängigkeit des c_w -Werts – sowohl vom Anströmwinkel als auch von der Anströmgeschwindigkeit – untersucht. Bei jeder Anströmgeschwindigkeit wurde der Nickwinkel des Fahrzeugs entsprechend den gemessenen Werten aus der Ausrollmessung eingestellt. Die Befestigung des Fahrzeugs durch Schwellerstützen ermöglicht die Einstellung eines definierten Fahrzeugnickwinkels. Die Messungen wurden mit drehenden Rädern und Bodensimulation durch Fünfband-Technologie durchgeführt [6]. Die Ergebnisse dieser Windkanalmessungen sind in **Bild 7** dargestellt.

Deutlich erkennbar ist die Abhängigkeit des c_w -Wertes sowohl vom Anströmwinkel τ_{res} als auch von der Anströmgeschwindigkeit v_{res} . Zur korrekten Bestimmung des windbedingten Einflusses auf die Fahrzeugverzögerung muss ein dreidimensionales Modell des c_w -Werts zugrunde gelegt werden.

Kennt man Δa_w und Δa_{FB} , lässt sich der korrigierte Geschwindigkeitsverlauf der Ausrollmessung berechnen.

$$\left(-\frac{dv_F}{dt} \right)_{\text{korrigiert}} = -\frac{dv_F}{dt} + \Delta a_w + \Delta a_{FB} \quad \text{Gl. (11)}$$

Die Vorzeichen von Δa_w und Δa_{FB} sind davon abhängig, ob das Fahrzeug bei Rücken- oder Gegenwind fährt, beziehungsweise ob es bergauf oder bergab fährt. Zur Veranschaulichung der Einflüsse von Wind und Fahrbahn sind die Veränderungen, die sich aus der Korrektur mit Δa_w und Δa_{FB} ergeben, in **Bild 8** dargestellt. Insbesondere durch die Korrektur des Fahrbahneinflusses ergibt sich eine große Verschiebung des Verlaufs der Verzögerung. Der aus den zum Messzeitpunkt vorherr-

schenden Windverhältnissen resultierende Einfluss ist im Vergleich dazu gering.

Zur Berechnung von Luft- und Rollwiderstand wird der Ansatz aus Gl. (3) zugrunde gelegt. Als Basis für die Berechnungen der Luft- und Rollwiderstandswerte dient der korrigierte Verlauf $(-dv/dt)_{\text{korrigiert}}$.

Zum Vergleich von Straßen- und Prüfstandsmessung wird bei allen aus der Literatur bekannten Ansätzen ein Windkanalvergleichswert herangezogen. Dieser Wert wird bei einer Geschwindigkeit von $v = 140 \text{ km/h}$ und einem Anströmwinkel $\tau = 0^\circ$ gemessen. Bisher bieten nur wenige Windkanäle die Möglichkeit, mit drehenden Rädern und Laufbandtechnik zu messen. Die Messungen in [4] und [5] wurden im Windkanal mit stehenden Rädern und stehendem Boden durchgeführt und mit Straßenmessungen, die mit drehenden Rädern und bewegtem Boden durchgeführt wurden, verglichen.

Der Referenzwert für die am IVK durchgeführten Ausrollmessungen wurde aufgrund europäischer Standards bei $v = 140 \text{ km/h}$ und $\tau = 0^\circ$, allerdings mit drehenden Rädern und Bodensimulation be-

stimmt. Mit der beschriebenen Vorgehensweise und dem Ansatz nach Gl. (3) konnten so c_w -Werte ermittelt werden, die innerhalb eines Bereiches von $\pm 5 \%$ zum Referenzwert liegen. Ein einzelner c_w -Wert bildet die Vorgänge während einer Ausrollmessung aber nur sehr unvollständig ab. Die Anströmverhältnisse am Fahrzeug ändern sich während der gesamten Ausrollmessung, was zur Folge hat, dass sich auch der wirksame c_w -Wert fortwährend ändert. In **Bild 9** ist die Veränderung des wirksamen c_w -Werts während der Ausrollmessung aus Bild 4 dargestellt. Zur Veranschaulichung wurde der wirksame c_w -Wert mit Hilfe des Kennfeldes aus Bild 7 und den variierenden Anströmverhältnissen während der Messung berechnet.

Der Referenzwert für das Messfahrzeug beträgt $c_w = 0,308$. Bild 9 zeigt, dass dieser Wert während der Messung nicht wirksam ist. Der tatsächlich wirksame c_w -Wert liegt je nach Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen 1,5 % und 22 % über diesem Referenzwert. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Randbedingungen der Messungen. Die Referenzwertmessung erfolgt bei konstanten

Anströmverhältnissen, während die Straßenmessung bei wechselnden Anströmbedingungen durchgeführt wird.

Setzt man Ausrollmessungen in der beschriebenen Form zur Bestimmung aerodynamischer Kennwerte ein, wird ein komplexer dynamischer Vorgang, wie er bei der Straßenmessung herrscht, mit einem idealisierten stationären Zustand im Windkanal verglichen. Der Ansatz aus Gl. (3) ermöglicht die Bestimmung eines einzelnen Kennwerts, nicht aber des ganzen Kennfeldes, das während einer Messung wirksam ist. Die erzielbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ist dadurch eingeschränkt.

Das zeigten auch schon andere Untersuchungen [7]. Somit sind vergleichende Aussagen über die Wirkung aerodynamischer Maßnahmen im Windkanal und auf der Straße mit diesem Verfahren nur schwer möglich. Zur Einstellung von Rollenprüfständen wird der Fahrwiderstand in seiner Gesamtheit benötigt. Diese Daten können aus dem Ausrollversuch, nach Korrektur der äußeren Einflüsse, mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden.

3.2 Messergebnisse

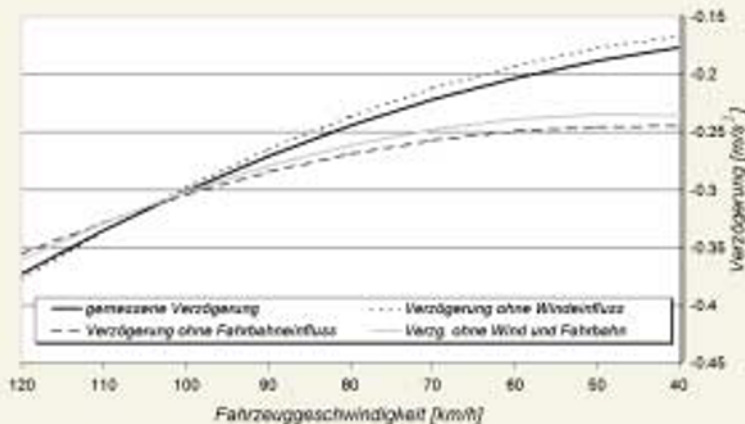


Bild 8: Fahrzeugverzögerung mit Korrektur von Wind und Fahrbahneinfluss
Figure 8: Vehicle retardation with correction of wind and road profile

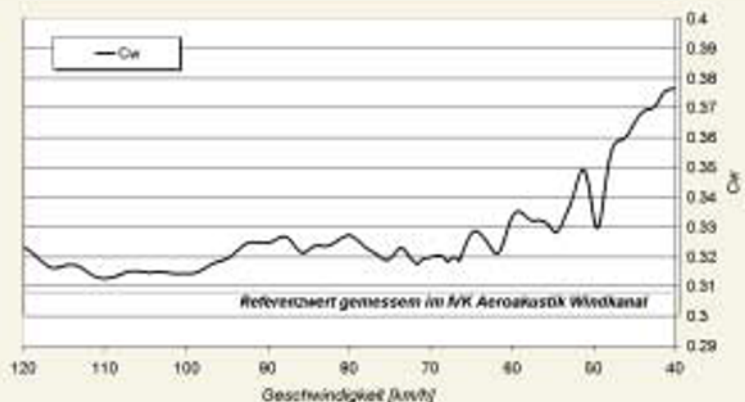


Bild 9: Wirksamer c_w -Wert während einer Ausrollmessung
Figure 9: Active c_D -value during a coast down measurement

4 Verbesserte Messmethode

Bei künftigen Fahrwiderstandsmessungen wird am IVK von Ausrollmessungen auf das Verfahren der Antriebsmomentmessung übergegangen. Dabei wird mit Momentenmessrädern das Antriebsmoment bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit gemessen und in die Gesamtwiderstandskraft F_{FW} umgerechnet. Für einen einzelnen Fahrzustand ist die Kräftesumme der Einzelanteile:

$$F_{FW} = F_{LW} + F_M + F_{St} + F_a \quad \text{Gl. (12)}$$

mit

F_{FW} Gesamtfahrwiderstandskraft
 F_{LW} Luftwiderstandskraft

F_M mechanische Widerstandskraft
 F_{St} Steigungswiderstandskraft
 F_a Beschleunigungswiderstandskraft

Die mechanischen Verluste werden bei diesem Verfahren getrennt bestimmt. Triebstrang- und Reibungsverluste in den Radlagern und Bremsen können einzeln in Prüfstandsmessungen ermittelt werden. Der Rollwiderstand wird mit einem am IVK entwickelten Rollwiderstands-Messanhänger gemessen. Dieser Messanhänger ermöglicht das Messen des Rollwiderstands auf realen Fahrbahnen [8]. Die Beschleunigungswiderstandskraft verschwindet, wenn bei der Messung die Fahrgeschwindigkeit exakt beibehalten werden kann. Treten bei der Messung Geschwindigkeits-

schwankungen auf, so müssen die entsprechenden Beschleunigungswiderstände berücksichtigt werden. Sind sämtliche Einzelanteile des Gesamtwiderstandes ermittelt, lässt sich aus Gl.(12) der Luftwiderstand des Fahrzeugs berechnen.

Dieses Messverfahren ermöglicht eine stationäre Straßenmessung, die im Windkanal reproduziert werden kann. Dadurch herrschen die gleichen, stationären Randbedingungen im Prüfstand und auf der Straße. Die konstante Fahrgeschwindigkeit hat den Vorteil, dass sich der aerodynamisch und beschleunigungsbedingte Nickwinkel und der resultierende Anströmwinkel nicht ändern. Da es sich um einen stationären Fahrzustand handelt, kann die Messdauer einer Momentenmessung deutlich kürzer gewählt werden als die Dauer einer Ausrollmessung. Dadurch werden die Einflüsse von Wind und wechselnder Fahrbahnneigung zusätzlich minimiert. Eine Messung dieser beiden Größen ist trotzdem unumgänglich, um eine möglichst große Messgenauigkeit zu erreichen.

Bei einer Fahrwiderstandsmessung werden Daten für Fahrzeuggeschwindigkeit, Anströmwinkel, Anströmgeschwindigkeit und Nickwinkel ermittelt. Mit diesen Daten kann der Fahrzustand des Fahrzeugs bei der Straßenmessung im Windkanal reproduziert werden. Ein Vergleich der Ergebnisse ist möglich, da zwei gleiche Fahrzustände miteinander verglichen werden.

Der im Fahrwiderstand enthaltene Rollwiderstand lässt sich mit dem Messanhänger auf der Teststrecke ermitteln, auf der auch die Momentenmessung durchgeführt wird. Damit ist sichergestellt, dass auch eventuelle Einflüsse des Fahrbahnbelags auf den Rollwiderstand erfasst werden. Bei der Rollwiderstandsmessung werden als Einstellparameter für Geschwindigkeit und Radlast die Daten aus der Fahrwiderstandsmessung verwendet. So kann auch dieser Fahrwiderstandsanteil exakt bestimmt werden.

5 Zusammenfassung

Die Ausrollmessung als ehemals einfaches Verfahren zur Fahrwiderstandsbestimmung auf realen Fahrbahnen wurde zur Steigerung der Genauigkeit und der Reproduzierbarkeit immer weiter optimiert. Sie entwickelte sich so zu einem komplexen Verfahren, das nur mit großem messtechnischen Aufwand und unter bestimmten Randbedingungen befriedigende Ergebnisse liefert.

Es konnte gezeigt werden, dass die Ausrollmessung ein dynamischer Vorgang ist, bei dem sich die zu bestimmenden Parameter permanent ändern. Dies hat zur Folge,

dass sich dieses Verfahren nur bedingt zum Vergleich mit stationären Prüfstandsmessungen eignet. Mit der Antriebsmomentmessung wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem bei der Straßen- und der Prüfstandsmessung die selben Randbedingungen geschaffen werden können. Die Potenziale, die dieses Verfahren zur Fahrwiderstandsbestimmung bietet, werden am IVK weiter untersucht.

Literaturhinweise

- [1] Economic Commission for Europe, ECE-Regelung 15, Anh. 4 Anl.3, Abgase aus Ottomotoren und best. Dieselmotoren. S. 46ff.
- [2] Road Load Measurement and Dynamometer Simulation using Coastdown Settings, SAE Surface Vehicle Recommended Practice J1263, Warrendale, PA Feb 96
- [3] Road Load Measurement using an Onboard Anemometry and Coastdown Techniques, SAE Surface Vehicle Recommended Practice J2263, Warrendale, PA Oct 96
- [4] Passmore, M.A.; leGood, G.M.; A detailed drag study using the coastdown method, SAE Paper 940420, Detroit Michigan 1994
- [5] Buckley, Frank T. Jr.; ABCD – An improved Coast Down Test and Analysis Method, SAE Paper 950626, SAE World Congress Detroit, Michigan, February 27-March 2, 1995
- [6] Michelbach A., Potthoff J., Wiedemann J., Die Laufband-Technik im IVK- Fahrzeugwindkanal, 4 Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart 2001, Expert Verlag
- [7] Wiedemann, J., The Influence of Ground Simulation and wheel Rotation on Aerodynamic Drag Optimization – Potential for Reducing Fuel Consumption, SAE Paper 960672, SAE World Congress Detroit, Michigan, February 26-29, 1996
- [8] Haken K.-L., Messung des Rollwiderstandes unter realen Bedingungen, 3. Stuttgarter Symposium, Stuttgart 1999, Expert Verlag

For an English version of this article,
see **ATZ worldwide**
For information on subscriptions,
just call us or send an email or fax.



ATZ

Vieweg Verlag, Postfach 1546, D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11/79 78-151 Fax 06 11/79 78-422
email: vieweg.service@bertelsmann.de