

AUTOREN



DIPL.-ING. FELIX WITTMETIER

ist Leiter der Gruppe Numerische Methoden am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).



DIPL.-ING. NILS WIDDECKE

ist Bereichsleiter Fahrzeugaerodynamik und Thermomanagement 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.



DIPL.-ING. NORBERT LINDENER

ist Leiter der Abteilung Entwicklung Aerodynamik/Aeroakustik und des Windkanalzentriums bei der Audi AG in Ingolstadt.

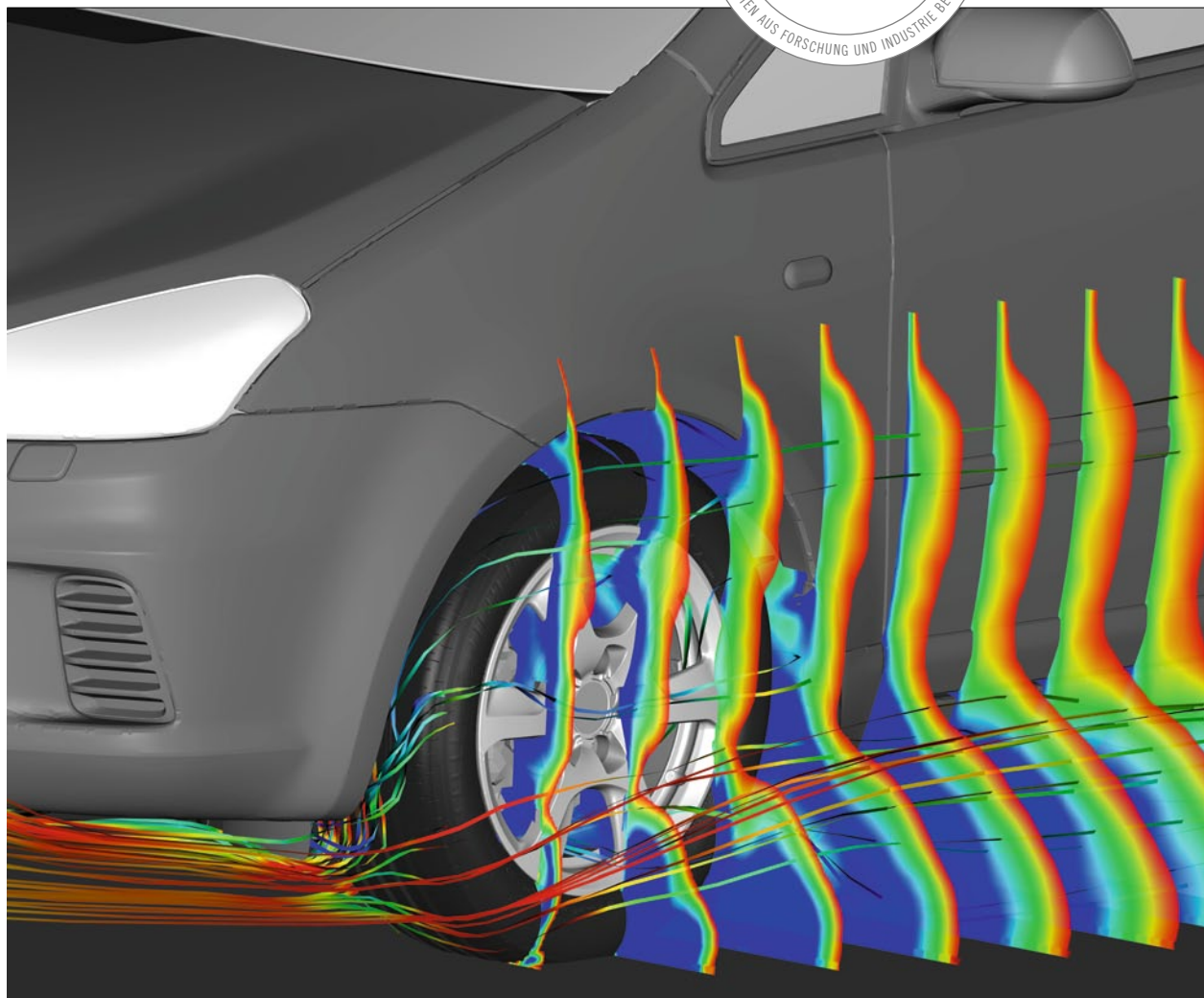


DIPL.-ING. RENE ARMBRUSTER

ist akademischer Mitarbeiter am KIT in Karlsruhe.

REIFENENTWICKLUNG UNTER AERODYNAMISCHEN ASPEKTEN

Im Rahmen eines Forschungsprojekts untersuchte der Arbeitskreis 6 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) Möglichkeiten, wie der Luftwiderstand heutiger Pkw-Serienreifen reduziert werden kann. Dabei zeigte sich, dass vor allem die Form der Reifenschulter sowie die Gestaltung der äußeren Seitenwand einen wichtigen Einfluss auf den Luftwiderstand des Reifens haben und dass sich dieser Einfluss in großen Teilen unabhängig vom Fahrzeug darstellt.



1	EINLEITUNG
2	EINFLÜSSE ÄUSSERER PARAMETER AUF DIE AERODYNAMIK DES REIFENS
3	AUSGANGSSITUATION
4	ERGEBNISSE
5	ZUSAMMENFASSUNG

1 EINLEITUNG

Der Luftwiderstand eines Pkws wird mit einem Anteil von bis zu 25 % durch die Reifen und Felgen im Radhaus bestimmt [1]. Dabei wird der Widerstand des Reifens durch die – weitgehend unveränderbare – Reifenform in Verbindung mit der durch die Fahrzeuggeometrie beeinflussten Anströmrichtung [2] bestimmt. Trotz dieser Einschränkung hat sich die FAT das Ziel gesetzt, den vom Reifen verursachten Luftwiderstandsanteil durch aerodynamische Optimierung zu verringern, um so einen möglichst fahrzeugunabhängigen Beitrag zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionsminderung zu leisten.

Das Ziel des Forschungsvorhabens „aerodynamisch optimierter Reifen“ bestand darin, Auslegungskriterien für Pkw-Reifen zu definieren, die die Entwicklung von Reifen ermöglichen, die im Vergleich zu aktuell verfügbaren Reifen einen deutlich reduzierten Luftwiderstand bei ansonsten unveränderten Eigenschaften aufweisen.

Um den Einfluss einzelner Geometrieparameter auf das aerodynamische Verhalten des Reifens gezielt untersuchen zu können, standen – neben den Simulationsmöglichkeiten, die die Strömungsberechnung (CFD) bietet – für experimentelle Untersuchungen im Windkanal verschiedene Serienreifen, aber auch speziell angefertigte Reifen von Michelin, zur Verfügung. Das aerodynamische Verhalten dieser Reifen wurde an verschiedenen Serienfahrzeugen in den Windkanälen von Audi, BMW und der Universität Stuttgart, unter Einsatz von Bodensimulationstechnik ermittelt. Details zu den Windkanälen sind in [3, 4, 5] verfügbar. Die CFD-Simulationen erfolgten mit Exa PowerFlow unter Einbeziehung der Raddrehung [6]. Messungen zur Abhängigkeit der Reifenkontur von Betriebsparametern des Reifens wurden am Innentrommelprüfstand des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt [7].

2 EINFLÜSSE ÄUSSERER PARAMETER AUF DIE AERODYNAMIK DES REIFENS

Um ein aussagefähiges und reproduzierbares Ergebnis zu erhalten, muss sichergestellt sein, dass das Messergebnis nicht durch zufällige äußere Einwirkungen beeinflusst wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter aufgezeigt und ihr Einfluss auf die Aerodynamik des Reifens dargestellt.

2.1 REIFENINNENDRUCK

Der Überdruck im Reifen stellt sicher, dass der Reifen die auf ihn wirkende Radlast tragen und so das Fahrzeug sicher auf der Straße halten kann. Durch die Radlast nehmen im Latschbereich der statische Radius ab und die Aufstandsweite zu. Die Stärke dieser Verformung wird wesentlich durch den Reifeninnendruck beeinflusst. Eine Verformung, die durch eine erhöhte Radlast hervorgerufen wird, kann durch erhöhten Reifeninnendruck praktisch wieder kompensiert werden, sodass die Geometrie im Bereich der Reifenaufstandsfläche in beiden Lastfällen nahezu identisch ist.

Die Variation des Reifeninnendruckes bietet damit auch die Möglichkeit, die aerodynamischen Eigenschaften des Reifens zu beeinflussen. Ausgehend von 2,5 bar führt eine Änderung des Reifeninnendruckes um ± 1 bar bei den untersuchten Reifen am Gesamtfahrzeug zu einer Änderung des Luftwiderstandsbeiwerts von circa $\Delta c_w = \pm 0,003$. Bei den im Nachfolgenden gezeigten Messungen wurde deshalb darauf geachtet, dass der Reifeninnendruck konstant auf 2,3 bar eingestellt war.

2.2 REIFENTEMPERATUR

Beim Abrollen wird der Reifen ständig verformt, was durch die Hysterese der Gummimischung zu einem Wärmeeintrag im Reifen und damit zu einer Temperaturerhöhung führt. Dabei kann der Reifen in guter Näherung als isochores System betrachtet werden [8]. Damit steigt bei steigender Temperatur auch der Druck im Reifen.

Es konnte durch verschiedene Messungen jedoch gezeigt werden, dass die thermisch bedingten Reifengeometrieänderungen so gering sind, dass sie keine Auswirkung auf die aerodynamischen Beiwerte zur Folge haben. Daher spielt der Temperatureinfluss bei den hier vorgestellten Untersuchungen keine Rolle.

2.3 REIFENBREITE

Aufgrund der aerodynamisch wenig günstigen Reifenform kommt der Reifenbreite ein besonderer Einfluss auf den Luftwiderstand zu. Der ETRTO-Standard [9], in dem die zulässigen Abmaße der Reifen für Europa festgelegt sind, gibt für jede Reifengröße ein relativ breites Toleranzband vor. Im Fall der untersuchten Reifengröße 205/55 R16 ist durch die ETRTO ein Unterschied in der Breite von bis zu 18 mm und im Außendurchmesser von bis zu 12 mm zulässig. Zusätzlich sind für jede Reifengröße verschiedene Felgenmaulweiten zugelassen: Für die Reifengröße 205/55 R16 sind beispielsweise Felgenmaulweiten von 5,5 bis 7,5" möglich. Dies kann dazu führen, dass Reifen des gleichen Typs und der gleichen Reifengröße deutlich unterschiedliche Abmessungen aufweisen. Vor allem Unterschiede in der Reifenbreite konnten als wichtige Einflussgröße für die Aerodynamik identifiziert werden. Auf sie wird später detaillierter eingegangen.

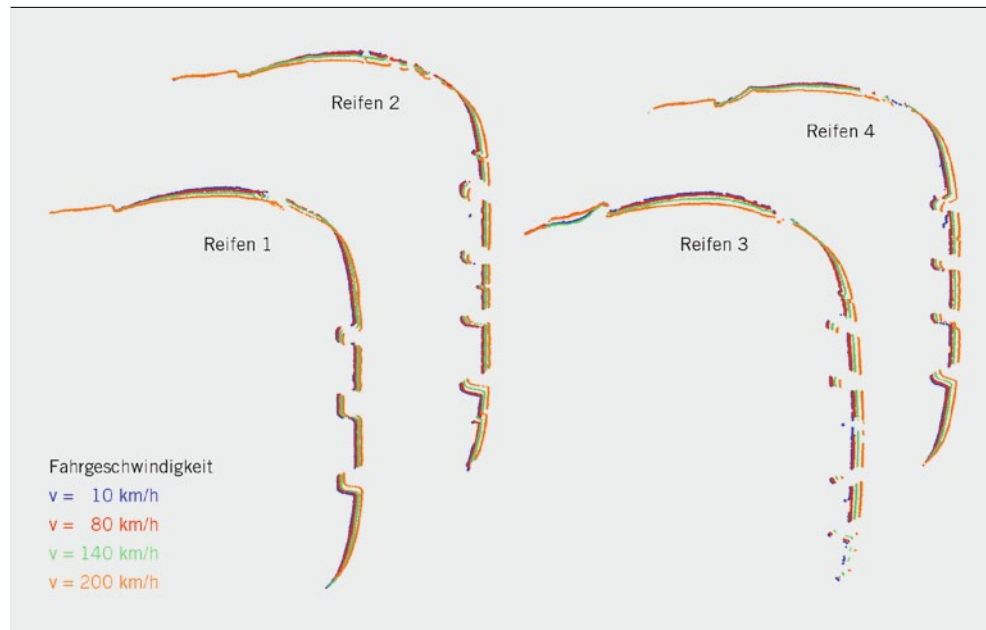
2.4 FAHRGESCHWINDIGKEIT

Durch die Rotation ändert sich, wie in **1** dargestellt, je nach Geschwindigkeit die Geometrie des Reifens. Messungen am Innentrommelprüfstand haben jedoch ergeben, dass diese Änderungen für alle Reifen in einer ähnlichen Größenordnung sind, daher kann dies vernachlässigt werden, solange alle Messungen bei der gleichen Geschwindigkeit durchgeführt werden.

3 AUSGANGSSITUATION

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die aerodynamischen Eigenschaften heutiger Serienreifen. Dabei wird auch diskutiert, ob sich die aerodynamischen Reifeneigenschaften unabhängig vom Fahrzeug darstellen lassen, oder ob das Wechselspiel zwischen Fahrzeug- und Reifengeometrie die aerodynamischen Eigenschaften des Reifens so beeinflusst, dass für jedes Fahrzeug ein speziell optimierter Reifen notwendig ist. Dazu wurden sieben Reifen unterschiedlicher Hersteller auf Fahrzeugen verschiedener Klassen (Limousine, Kombi, SUV, Kompaktvan und Sportwagen) montiert und in den genannten Windkanälen mit drehenden Rädern gemessen. Vom FAT-Arbeitskreis AK6 wurde für diese Untersuchungen die Reifengröße 205/55 R16 ausge-

1 Gemessene Geometrie verschiedener Reifen bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten



wählt, die zurzeit die meistverkaufte Reifendimension darstellt. Um die Fahrzeuge möglichst im Serienzustand messen zu können, wurden die Testfahrzeuge so ausgewählt, dass sie – soweit möglich – diese Reifengröße als Basisbereifung aufweisen. In der Kategorie der Sportwagen musste allerdings an der Hinterachse von der Basisbereifung deutlich abgewichen werden. Um den Einfluss von Toleranzen an den Reifen zu minimieren, wurden jeweils dieselben Reifen auf denselben Felgen gemessen. Dazu wurden die Aufnahmen der Fahrzeuge entsprechend modifiziert, sodass über Distanzscheiben und durch eine spezielle Messfelge jeweils die serienmäßige Einpresstiefe der Räder realisiert werden konnte.

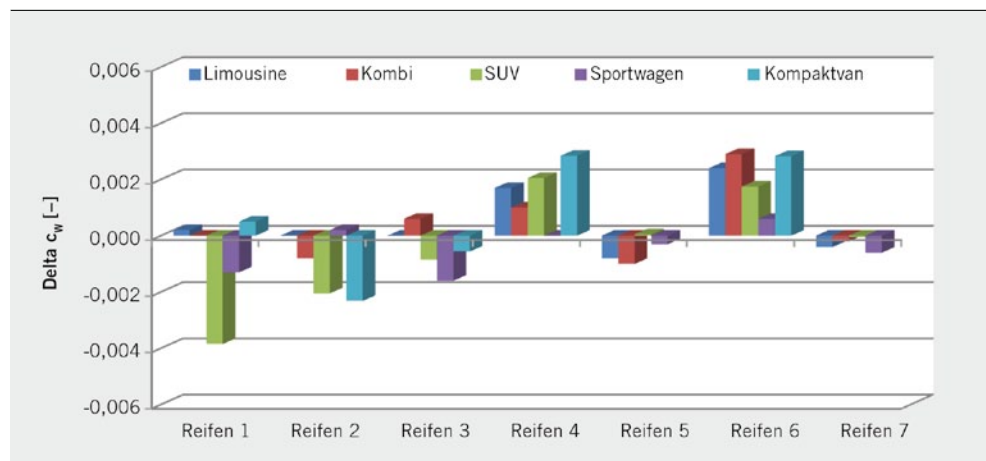
In 2 sind die Ergebnisse der Messungen aus dem Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart dargestellt. Als Referenz wurde jeweils der Median aller Messergebnisse eines Fahrzeugs verwendet, sodass die Ergebnisse der Fahrzeuge miteinander verglichen werden können und dabei nicht durch einen eventuellen Ausreißer bei einem Reifen verschoben werden. Alle untersuchten

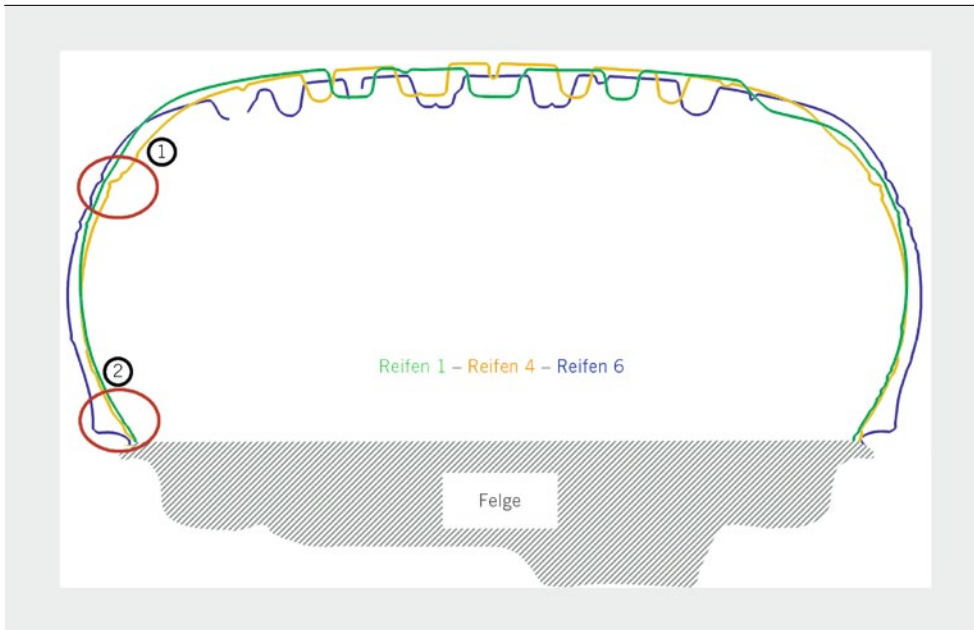
Reifen sind Sommerreifen verschiedener Premiumhersteller in der Größe 205/55 R16. Reifen 1 ist ein Michelin Energy Saver, der aufgrund seiner guten aerodynamischen Eigenschaften im späteren Projektverlauf als Referenz herangezogen wurde.

Es wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den untersuchten Reifen nicht besonders groß sind und dass aktuelle Serienreifen namhafter Hersteller auf einem ähnlichen Stand sind, was die aerodynamischen Eigenschaften ihrer Produkte betrifft. Die Reifen 1 bis 3 haben dabei eine geringfügig bessere Tendenz als der Durchschnitt, die Reifen 4 und 6 liegen hingegen am oberen Ende der Skala und heben sich von den übrigen Reifen deutlich messbar ab. Zur Erklärung des erhöhten Luftwiderstandsbeiwerts ist in 3 ein Schnitt durch die Reifen 1, 4 und 6 dargestellt.

Während Reifen 1 eine gleichmäßige Außenkontur aufweist, ist vor allem bei Reifen 4 eine stark ausgeprägte umlaufende Kante im Bereich 1 unterhalb der Reifenschulter zu erkennen. Diese führt dazu, dass die Strömung an der Kante ablässt und damit der Luftwiderstand dieses Reifens erhöht wird. Im Vergleich zu den

2 Benchmarkergebnisse: Luftwiderstandsbeiwerte verschiedener Fahrzeuge mit unterschiedlichen Reifen





③ Schnittdarstellung verschiedener Serienreifen, Unterschiede im Schulterbereich (1) und am Übergang zur Felge (2)

anderen beiden Reifen ist Reifen 6 insgesamt breiter und hat zusätzlich – als einziger Reifen im Benchmark – eine Felgeschutzkante (Bereich 2). Diese beiden Merkmale führen dazu, dass der Luftwiderstandsbeiwert von Reifen 6 im Vergleich zu den anderen Reifen erhöht ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Fahrzeuge auf die Aerodynamik des Reifens insgesamt gering ist und die Tendenzen sowie auch die Größenordnungen der Unterschiede zwischen den Reifen an den meisten Fahrzeugen übereinstimmend sind. Lediglich beim SUV und beim Kompaktvan sind die Unterschiede zwischen den Reifen im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen teilweise größer, was vor allem beim SUV auf die deutlich größere Standhöhe zurückzuführen ist, die dazu führt, dass ein größerer Teil des Reifens frei angeströmt wird.

4 ERGEBNISSE

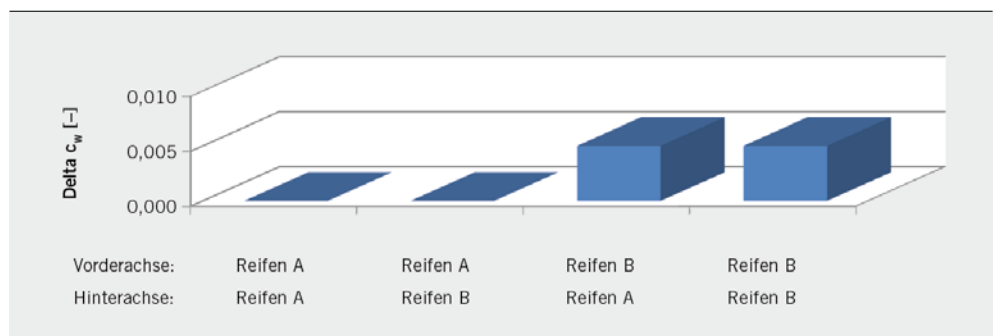
Im Folgenden wird zunächst der Einfluss verschiedener Reifenparameter auf den Luftwiderstand anhand von Messungen mit Prototypenreifen im Windkanal und durch CFD-Simulationen untersucht. Durch CFD können über quantitative Aussagen hinaus auch detaillierte Informationen über das gesamte Strömungsfeld im Bereich

der Räder – und somit ein tieferes Verständnis über die widerstandsbeeinflussenden Wirkmechanismen – gewonnen werden. Aus diesen Erkenntnissen kann eine Empfehlung hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften abgeleitet werden, die ein luftwiderstandsoptimierter Reifen aufweisen sollte. Bei der Umsetzung muss jedoch der mögliche Zielkonflikt zwischen den erwünschten unterschiedlichen Reifeneigenschaften beachtet und abgewogen werden, sodass sichergestellt ist, dass durch eine verbesserte Reifen-Aerodynamik beispielsweise der Rollwiderstand nicht negativ beeinflusst wird.

Zunächst zeigte es sich, dass die aerodynamischen Unterschiede, die zwischen verschiedenen Reifen vorhanden sind, sich fast ausschließlich an der Vorderachse auswirken. Die Fahrzeug-Hinterräder liegen typischerweise im Nachlaufgebiet der Vorderäder und sind deshalb von der direkten Anströmung abgeschirmt.

④ zeigt dazu Ergebnisse entsprechender Messungen. Im Referenzfall ist Reifen A auf beiden Achsen montiert. Bei der zweiten Messung ist Reifen B nur auf der Hinterachse montiert, was zu keinem messbaren Unterschied des Luftwiderstandsbeiwerts führt. Werden anschließend die Reifen zwischen Vorder- und Hinterachse getauscht, so steigt der Luftwiderstandsbeiwert deutlich an. Er ändert sich selbst dann nicht mehr, wenn auch auf der Hinterachse Reifen B montiert wird.

④ Einfluss der Reifen an der Vorder- und Hinterachse auf den Luftwiderstand des Fahrzeugs

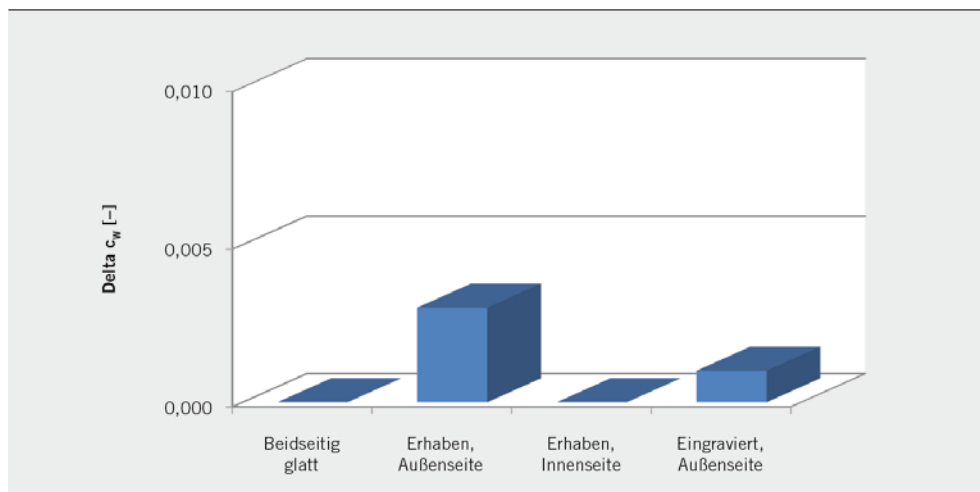


Im Folgenden soll auf den aerodynamischen Einfluss verschiedener Reifen-Oberflächenmerkmale eingegangen werden. Zuerst wird der Einfluss der Beschriftung auf der äußeren Seitenwand betrachtet. Dafür wurden verschiedene Reifen untersucht, die sich lediglich in der Gestaltung der Seitenwandbeschriftung unterscheiden. Neben einem Reifen, der eine komplett glatte Seitenwand aufweist, wurde eine Variante gefertigt, bei der die Beschriftung gegenüber der Seitenwand erhaben ist, sowie eine Variante, bei der die gleiche Beschriftung in die Seitenwand eingraviert ist. Die Messergebnisse in 5 zeigen, dass eine auf der äußeren Seitenwand erhabene Beschriftung den Luftwiderstand im Vergleich zu einem Reifen ohne Beschriftung deutlich erhöht. Die gleiche Beschriftung auf der Innenseite hat hingegen keinen Einfluss auf den Luftwiderstand. Bei der Variante mit in der Seitenwand eingraviertem Beschriftung wurde im Vergleich zum Reifen ohne Beschriftung ebenfalls nur eine sehr geringe Luftwiderstandszunahme gemessen.

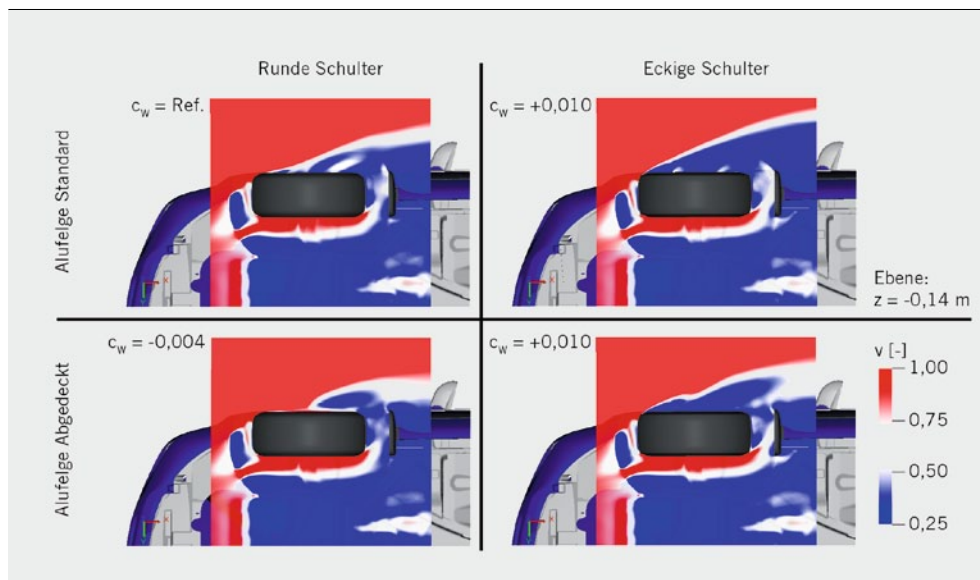
Eine zweite Geometrie-eigenschaft, die sich ebenfalls deutlich auf die Aerodynamik des Reifens auswirkt, stellt die Form der Reifenschulter dar. Dafür wird auf zwei Extrembeispiele eingegangen, die bei den Messungen auffielen. Dies ist zum einen ein Reifen, der an

der Schulter eine deutlich ausgeprägte Ecke aufweist, und zum anderen ein Reifen, dessen Schulter eine nahezu ideale Rundung aufweist. Messungen und Simulationen mit diesen beiden Reifen haben gezeigt, dass der Widerstand des Reifens mit eckiger Schulter deutlich über dem mit runder Schulter liegt. Die Kontur der äußeren Reifenschulter konnte so als wichtiger Geometrieparameter identifiziert werden, der einen großen Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften des Reifens hat. Durch die typische Fahrzeugform werden insbesondere die Vorderräder bei gerader Anströmung des Fahrzeugs schräg angeströmt, wie von [2] gezeigt wurde. Dabei ist der Strömungswinkel am Rad jeweils nach außen gerichtet. Weist die Schulter an der Außenseite nun eine Ecke oder Kante auf, so löst dort die Strömung ab und es entsteht neben dem Reifen ein ausgeprägtes Nachlaufgebiet, 6 (rechts). Ein aerodynamisch optimierter Reifen muss deshalb in der Lage sein, die Strömung möglichst verlustarm um die Schulter zu leiten, was nur durch eine entsprechend gerundete Schulter erreicht werden kann, 6 (links).

An dieser Stelle soll nun auf den Zusammenhang zwischen Reifen und Felge eingegangen werden. In 6 ist ein Vergleich zwischen vier CFD-Simulationen dargestellt, bei denen die Strömung um

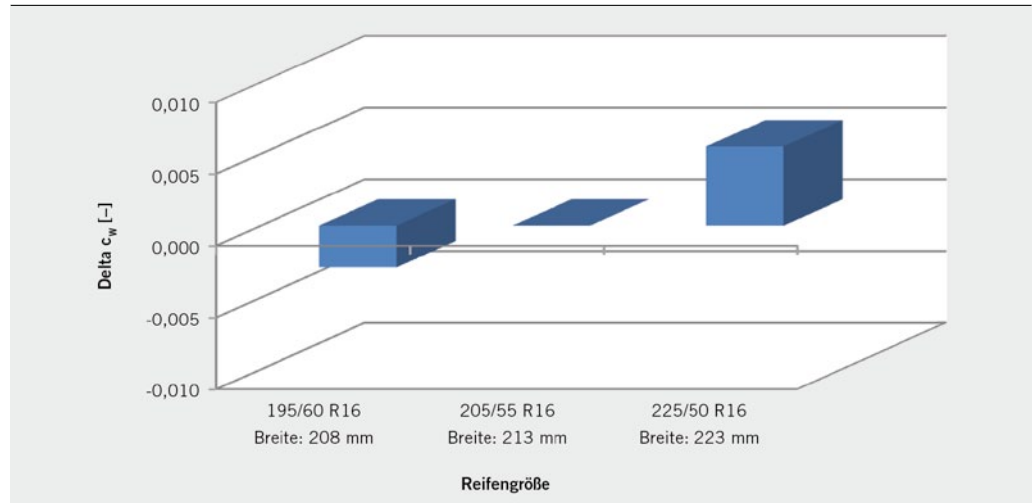


5 Einfluss der Seitenwandbeschriftung des Reifens auf den Luftwiderstand eines Fahrzeugs



6 Umströmung des Reifens bei unterschiedlichen Felgen und verschiedenen Varianten der Reifenschulter

7 Einfluss der Reifenbreite auf den Luftwiderstand des Fahrzeugs



Reifen mit unterschiedlichen Schulterformen zunächst auf einer Sechs-Speichen-Alufelge und anschließend auf einer komplett abgedeckten Felge berechnet wurde. Es ist jeweils das Strömungsfeld um das linke Vorderrad in einer Ebene 0,14 m unterhalb des Radmittelpunkts dargestellt.

Während sich beim Reifen mit runder Schulter das Strömungsfeld durch Abdecken der Felge deutlich ändert, weist das Strömungsfeld beim Reifen mit eckiger Schulter bei beiden Varianten nur sehr geringe Unterschiede auf. Dies wird auch beim Luftwiderstand deutlich. Bei der Variante mit runder Schulter reduziert die Felgenabdeckung den Luftwiderstandsbeiwert um $\Delta c_w = 0,004$, bei der eckigen Schulter ändert sich der Luftwiderstand durch die Abdeckung dagegen nicht. Der Grund dafür liegt darin, dass an der eckigen Schulter die Strömung unmittelbar ablöst, sodass die Felge vollständig im Ablösegebiet liegt und die Felgegeometrie deshalb keinen aerodynamischen Einfluss mehr hat. Dies macht deutlich, dass es bei einem Reifen mit optimierten aerodynamischen Eigenschaften besonders wichtig ist, dass auch die Felge entsprechend optimiert wird, da nur so das bestmögliche Ergebnis erreicht werden kann.

Der Einfluss der Reifenbreite auf die Aerodynamik wurde bereits eingangs kurz erwähnt; er soll nun genauer betrachtet werden. Dazu werden drei Reifen unterschiedlicher Breite aber mit gleichem

Durchmesser verglichen: Als Referenzreifen dient wieder ein Reifen der Dimension 205/55 R16. Als Vergleichsreifen werden Reifen mit geringerer Breite (195/60 R16) sowie Reifen mit größerer Breite (225/50 R16) herangezogen. Alle Reifen waren auf der gleichen Felge mit einer Felgenmaulweite von 6,5" montiert. Nominell besteht zwischen den Reifen damit ein Breitenunterschied von 10 beziehungsweise 20 mm. Auf der Felge montiert unterscheiden sich die Reifen in der Breite jedoch nur noch um 5 beziehungsweise 10 mm. Dennoch ist zwischen den Reifen ein deutlicher Unterschied im Luftwiderstand feststellbar, wie in 7 zu erkennen ist.

Um die aerodynamischen Eigenschaften eines aktuellen Serienreifens zu verbessern, lassen sich aus den erzielten Untersuchungsergebnissen die in 8 zusammengefassten Empfehlungen ableiten. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich durch die empfohlenen Maßnahmen auch die Ausgewogenheit zwischen den Reifeneigenschaften ändern kann.

Deshalb wurden diese Maßnahmen eingehend auf ihre Realisierbarkeit sowie mögliche Auswirkungen auf andere Reifeneigenschaften hin geprüft. Basierend auf dem Reifen Energy Saver von Michelin wurde ein Reifen entworfen und gefertigt, der über eine optimierte Aerodynamik bei ansonsten gleichen Reifeneigenschaften verfügt. Dabei wurden vor allem die Seitenwand des Reifens sowie das Profil neu gestaltet, 9.

Markttrends in der Klebtechnik

Springer Vieweg

Handbuch Klebtechnik 2012
300 Seiten. Broschiert. Euro 25,90
ISBN 978-3-658-00401-9

Jetzt bestellen unter www.adhaesion.com



8 Allgemeine Empfehlungen für einen aerodynamisch optimierten Reifen

Der Luftwiderstand des Fahrzeugs konnte mit den optimierten Reifen im Vergleich zum Ausgangsreifen um $\Delta c_w = 0,003$ gesenkt werden. Dies kann insbesondere deshalb als sehr gutes Ergebnis gewertet werden, da der Michelin Energy Saver im Vergleich zu den anderen Serienreifen bereits über sehr gute aerodynamische Eigenschaften verfügt. Wird ein Fahrzeug mit den optimierten Reifen ausgestattet, so kann im NEFZ bis zu 0,02 l/100 km und bei Konstantfahrt mit 120 km/h sogar bis zu 0,05 l/100 km Kraftstoff eingespart werden. Dies bedeutet eine Reduktion des CO₂ Ausstoßes von 0,53 g CO₂/100 km beziehungsweise 1,3 g CO₂/100 km.



9 Optimierter Reifen auf Basis des Michelin Energy Saver

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des hier vorgestellten FAT-Forschungsvorhabens wurden Möglichkeiten untersucht, wie der Luftwiderstand heutiger Pkw-Serienreifen reduziert werden kann. Dabei konnte gezeigt werden, dass vor allem die Form der Reifenschulter sowie die Gestaltung der äußeren Seitenwand einen wichtigen Einfluss auf den Luftwiderstand des Reifens haben und dass sich dieser Einfluss in großen Teilen unabhängig vom Fahrzeug darstellt. Deshalb kann ein Reifen mit verbesserter Aerodynamik insbesondere auch schon bei Bestandsfahrzeugen einen wichtigen Beitrag zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung leisten. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, muss der Reifen jedoch in seiner Umgebung betrachtet und zusammen mit der Felge abgestimmt und optimiert werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Wickern, G.; Zwicker, K.; Pfadenhauer, M.: Rotating Wheels – Their Impact on Wind Tunnel Test Techniques and on Vehicle Drag Results. SAE Technical Paper 970133, 1997
- [2] Wiedemann, J.: The Influence of Ground Simulation and Wheel Rotation on Aerodynamic Drag Optimization – Potential for Reducing Fuel Consumption. SAE Technical Paper 960672, 1996
- [3] Wickern, G.; Lindener, N.: The Audi Aeroacoustic Wind Tunnel: Final Design and First Operational Experience. SAE Technical Paper 2000-01-0868, 2000
- [4] Duell, E.; Kharazi, A.; Müller, S.; Ebeling, W.; Mercker, E.: The BMW AVZ Wind Tunnel Center. SAE Technical Paper 2010-01-0118, 2010
- [5] Wiedemann, J.; Potthoff, J.: The New 5-Belt Road Simulation System in the IVK Wind Tunnels – Design and First Results. SAE Technical Paper 2003-01-0429, 2003
- [6] Schütz, T.: Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart, Expert Verlag, 2009
- [7] Armbruster, R.; Greif, F.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F.: Erfassen der Laufflächenkontur von Pkw-Reifen bei hohen Geschwindigkeiten. In: Jamal, R.; Heinze, R. (Hrsg.): Virtuelle Instrumente in der Praxis. München: VDE-Verlag, 2010
- [8] Leister, G.: Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [9] European Tyre and Rim Technical Organisation (E.T.R.T.O.): Standards Manual, Brüssel, 2009



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now: springervieweg-service@springer.com