

2 Stand der Technik

Luftgefüllte Gummireifen entwickelten sich bereits kurz nach ihrer Markteinführung gegen Ende des 19. Jahrhunderts durch ihre Vorteile im Komfort, der Haftung und in ihren Fahreigenschaften zum allgemeinen Standard für Automobile [43]. Seit dieser Zeit wurde der Reifen, wie auch das Kraftfahrzeug, beständig weiterentwickelt und an die Bedürfnisse der Kunden angepasst. Beispiele dafür sind die im Durchschnitt stetig wachsende Reifenbreite, das sinkende Querschnittsverhältnis sowie das veränderte Profil, wie es in **Bild 2.1** dargestellt ist.

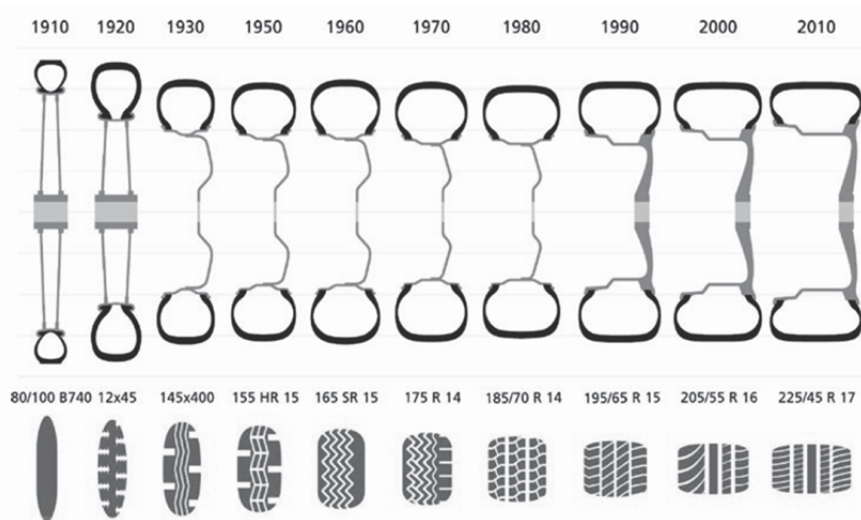


Bild 2.1: Durchschnittliche Entwicklung der Reifendimensionen und des Reifenprofils in den letzten 100 Jahren [8, 71].

2.1 Aufbau eines Pkw-Reifens

Moderne Pkw-Reifen werden fast ausschließlich in Radialbauweise gefertigt. Der prinzipielle Aufbau eines Radialreifens ist in **Bild 2.2** dargestellt. Über einer luftdichten Innenschicht aus Gummi liegen die Karkasse sowie der Gürtel des Reifens, die das tragende Gerüst des Reifens bilden. Darüber wird eine weitere Gummischicht für das Seitengummi sowie die Lauffläche platziert. Die Zusammensetzung der Laufflächen-Gummischicht hat dabei große Auswirkungen auf

die Eigenschaften des Reifens, wie zum Beispiel den Rollwiderstand oder die Haftung [43, 44].

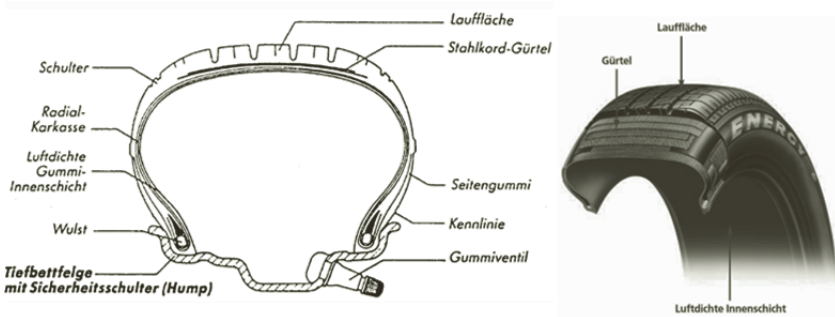


Bild 2.2: Aufbau eines Pkw-Radialreifens [44, 85].

Die Profilierung der Lauffläche und die Beschriftung der Seitenwand entstehen erst beim sogenannten „Backen“ des Reifens. In diesem letzten Schritt der Reifenproduktion wird der Reifenrohling dazu in einer Stahl-Backform unter Druck auf bis zu 200°C erhitzt, was die einzelnen Rohbestandteile des Reifens unlösbar miteinander verbindet (Vulkanisation). Die Backform enthält eine Negativform der gewünschten Profilierung und der Seitenwand, die sich auf das Gummi überträgt.

2.2 Reifengröße und Toleranzen

Die Form eines Reifens lässt sich vereinfacht als Torus beschreiben, dessen Größe über drei Maße definiert ist: die Querschnittsbreite (S) – gemessen ohne Beschriftung, Scheuerleisten oder Ähnliches –, die Querschnittshöhe (H) und Nenndurchmesser der Felge (d). In **Bild 2.3** sind unter anderem diese Größen dargestellt.

Üblicherweise wird die Höhe des Reifens jedoch nicht durch die Querschnittshöhe angegeben, sondern es wird das Höhen-Breiten-Verhältnis verwendet, das zusätzlich die Querschnittsform des Reifens charakterisiert. Unabhängig

von der Reifengröße ist damit direkt ersichtlich, ob es sich eher um einen Ballon- oder eher um einen Niederquerschnittsreifen handelt.

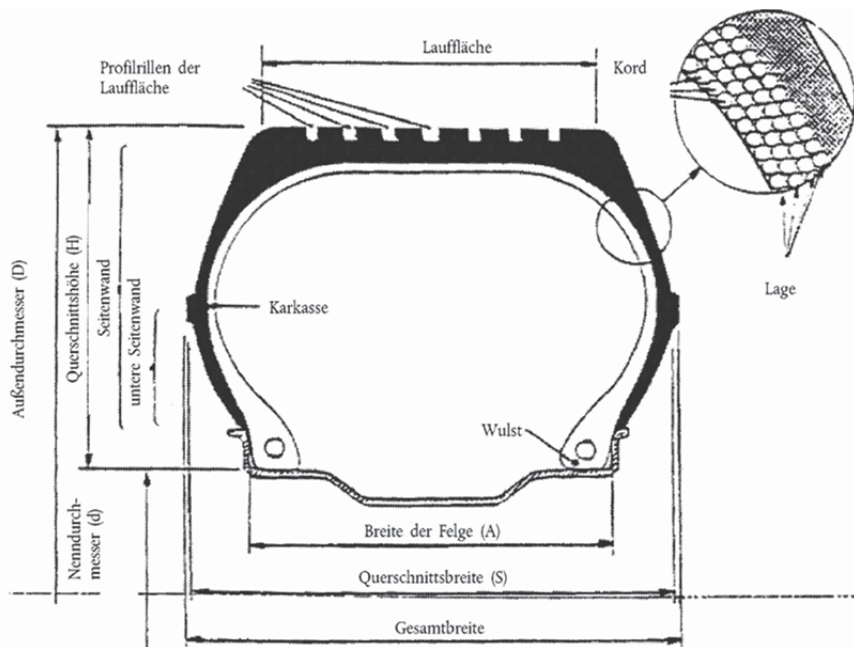


Bild 2.3: Erläuternde Abbildung Reifenmaße [13].

Die Reifengröße muss, neben anderen Angaben, auf der Reifenseitenwand dauerhaft angebracht sein [13]. Dafür wurde vom Gesetzgeber eine „technische Zone“ als Kreisring am inneren Rand der Reifenseitenwand definiert, in der die vorgeschriebenen Daten aufgeführt sein müssen. Die Größe und Position der technischen Zone ist in **Bild 2.4** gelb eingefärbt. Für die Angabe der Querschnittsbreite und des Höhen-Breiten-Verhältnisses werden dabei festgelegte Schrittweiten verwendet (10 mm bzw. 5%). Oberhalb der technischen Zone liegt der Bereich der „kommerziellen Zone“, der vom Reifenhersteller frei gestaltet werden kann. Neben der Marke und dem Reifentyp wird hier häufig die Reifengröße nochmals in großer Schriftgröße angebracht. Weitere Details zur Reifenbeschriftung sind beispielsweise in [3] oder [1] zu finden.

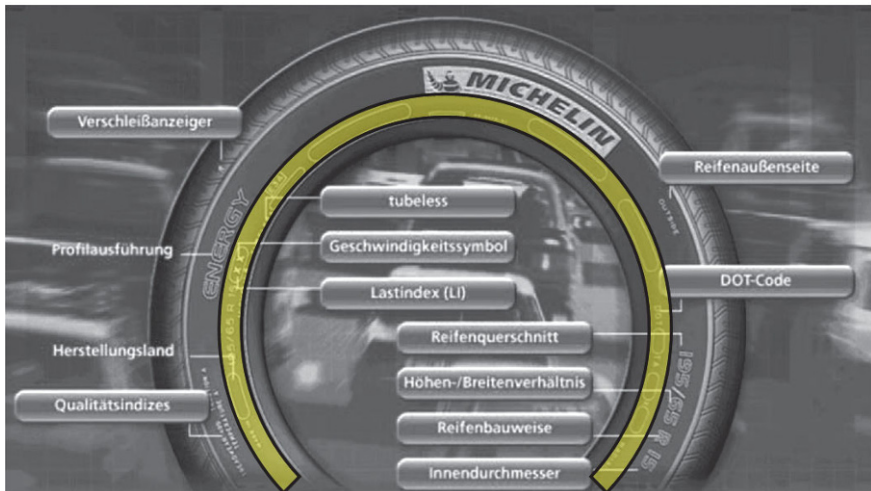


Bild 2.4: Gesetzlich vorgeschriebene Merkmale eines Pkw-Reifens [36].

Abhängig von der Reifengröße sind für die Abmaße des Reifens unterschiedlich große Toleranzfelder vorgeschrieben, die in den ETRTO-Normen definiert sind [15]. Diese Toleranzfelder sind dabei jedoch recht weit gefasst und so kann es vorkommen, dass derselbe Reifen in zwei verschiedenen Reifengrößen verkauft werden könnte (vgl. **Bild 2.5**).

Für einen Reifen der Größe 205/55 R16 schreibt die ETRTO-Norm eine Breite zwischen 205 mm und 223 mm und einen Durchmesser von 626 mm bis 642 mm vor. Verschiedene Fahrzeughersteller schränken diese Toleranzen bei ihren Erstausrüsterreifen deutlich ein, wobei die Einschränkungen meist im oberen Bereich der Norm angesiedelt sind. Dies vereinfacht zum einen den Einsatz von Systemen, die raddrehzahlabhängige Größen verwenden (ESP, Tachometer), zum anderen muss in Bezug auf die Freigängigkeit des Reifens kein zusätzlicher Raum vorgehalten werden, was aus Designgründen sonst häufig kritisiert wird [36]. Nach Herstellervorgaben gefertigte Reifen werden zudem im Aftermarket an den Kunden verkauft. Diese Reifen sind speziell gekennzeichnet, zum Beispiel durch einen Stern für Reifen, die nach BMW-Vorgaben gefertigt wurden oder durch die Bezeichnung MO, die für „Mercedes Original“ steht. Für den Kunden ist diese Zuordnung jedoch nicht bindend, da beispielsweise ein MO-Reifen auch auf jedem anderen Fahrzeug montiert werden kann.

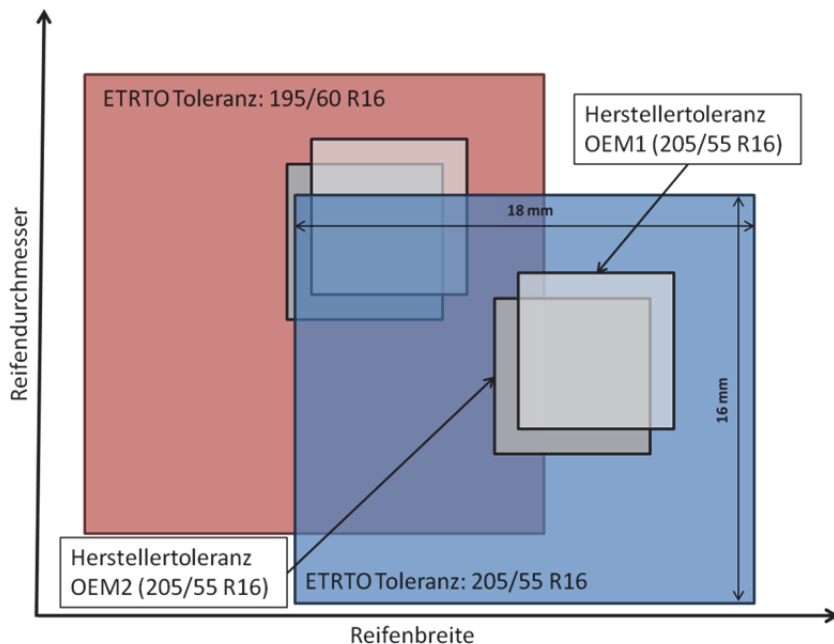


Bild 2.5: Reifentoleranzen nach ETRTO-Standard [15] und deren Einschränkung durch unterschiedliche Automobilhersteller.

Dass die Reifentoleranzen auch einen großen Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften eines Reifens haben können, wird in den folgenden Kapiteln noch detailliert dargestellt.

2.3 Entwicklungsziele am Reifen

Bei der Entwicklung eines Reifens müssen verschiedene Eigenschaften berücksichtigt werden. Dabei sind viele der Eigenschaften voneinander abhängig und es ergeben sich Zielkonflikte bei der Auslegung der Reifen. Bei der Gestaltung müssen daher immer wieder Kompromisse eingegangen werden, die sich je nach Einsatzgebiet des Reifens unterscheiden. In **Bild 2.6** sind typische Zielwerte für Sommer-, Allwetter- und Winterreifen verschiedener Kategorien dargestellt. Dies entspricht jedoch lediglich einer sehr kleinen Auswahl an Entwicklungskriterien. Bei der Entwicklung eines Reifens werden häufig mehr als 50 verschiedene Kriterien herangezogen, die einen Reifen charakterisieren.

Dementsprechend ist die richtige Abstimmung zwischen diesen Kriterien für einen bestimmten Reifen auch mit großem Aufwand verbunden.



Bild 2.6: Unterschiedliche Zielwerte für Sommer-, Allwetter- und Winterreifen [36] (RR = Rollwiderstand, HS = Hochgeschwindigkeitsfestigkeit).

Ein typischer Zielkonflikt in der Reifenentwicklung ist der Zusammenhang zwischen Nasshaftung und Rollwiderstand. Je besser der Reifen auf der Straße haftet, desto mehr Energie muss aufgebracht werden, um die Haftung des Reifens zu überwinden, was sich in einem höheren Rollwiderstand widerspiegelt.

Auch für diese Arbeit dürfen die Zielkonflikte am Reifen nicht außer Acht gelassen werden. Wenn durch eine aerodynamische Optimierung des Reifens der Luftwiderstand reduziert wird und dabei aber beispielsweise der Rollwiderstand stark ansteigt, so führt der Einsatz dieses Reifens beim Kunden letztendlich trotz verbesserter Aerodynamik zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Aus diesem Grund werden am Ende der aerodynamischen Entwicklung in dieser Arbeit auch die nicht-aerodynamischen Eigenschaften des Reifens betrachtet.

2.4 Die Umströmung drehender Räder

In der Aerodynamikforschung war bereits früh bekannt, dass die Räder einen großen Anteil am Luftwiderstand des Fahrzeugs haben. Schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde daher versucht, den Einfluss der Räder – vor allem durch den Einsatz von Radhausverkleidungen – zu reduzieren [27, 30, 55]. Da der Einsatz dieser jedoch mit einigen Nachteilen verbunden ist (z.B. hohe Kosten und erhöhter Aufwand beim Reifenwechsel), wurden Radhausverkleidungen nur selten an Serienfahrzeugen eingesetzt und blieben häufig im Forschungsstadium.

2.4.1 Untersuchungen am isolierten Einzelrad

Die ersten Studien, die gezielt die Umströmung der Räder betrachteten, wurden Ende der 60er und in den 70er Jahren veröffentlicht [16, 17, 49, 75]. Diese Untersuchungen haben gemein, dass zunächst die Effekte freistehender Räder im Fokus standen. Weiterhin wurden für alle Untersuchungen zunächst Reifen aus dem Rennsport – vorwiegend aus der Formel 1 – eingesetzt.

Hierbei gelang es zum ersten Mal, die Unterschiede zwischen stehenden und drehenden Rädern darzustellen, wobei sich die Untersuchungen aufgrund der noch begrenzten technischen Möglichkeiten vor allem auf den 2D-Mittelschnitt des Rades konzentrierten. Das Rad wurde dabei entweder mit geringem Abstand zum stehenden Boden rotiert oder aber auch bereits durch ein Laufband angetrieben.

Vor allem Fackrell und Harvey konnten mit ihren Untersuchungen [17] zeigen, dass durch die Rotation des Rades dessen Umströmung stark beeinflusst wird. Der Ablösepunkt der Strömung wird durch die Rotation des Reifens stromaufwärts, also nach vorne verschoben, da sich die Radoberfläche in der oberen Hälfte entgegen der Hauptströmungsrichtung bewegt und dabei Luft nach vorne fördert. Der Ablösepunkt auf der Oberfläche verschwindet und es bildet sich ein freier Staupunkt oberhalb der Reifenoberfläche. Moore [48], Rott [62] und Sears [72] beschrieben dieses Phänomen unabhängig voneinander zum ersten Mal, weshalb dies als MRS-Singularität bezeichnet wird. Durch die Drehung wandert der Staupunkt abhängig von der Raddrehzahl nach unten in Richtung Boden.

Ein weiteres, von Fackrell und Harvey entdecktes Phänomen, das durch die Rotation des Rades hervorgerufen wird, ist das sogenannte „Jetting“ [17]. Durch die in Hauptströmungsrichtung gerichtete Bewegung der unteren Radhälfte trifft die Luft, die von der Lauffläche mitgenommen wird, auf die Luft, die vom Laufband auf dem Boden mitbewegt wird. Dies führt zu einem starken Anstieg des Drucks vor dem Kontaktpunkt zwischen Reifen und Boden, wobei der Druckbeiwert auf bis zu $c_p = 2$ ansteigt. Die Luft muss schlagartig ausweichen und wird zu beiden Seiten des Reifens herausgepresst.

Hinsichtlich der aerodynamischen Beiwerte unterscheiden sich die Ergebnisse der verschiedenen Studien aus den 70er Jahren zum Teil deutlich, da zum einen unterschiedliche Räder verwendet wurden, und zum anderen auch die Rahmenbedingungen verschieden waren. So wurden beispielsweise die Räder zum Teil mit einem Luftspalt über stehendem Boden gedreht, teilweise hatten sie durch den Einsatz eines Laufbands Bodenkontakt. Zudem fanden die Untersuchungen jeweils bei unterschiedlichen Reynoldszahlen statt. Alle Studien konnten jedoch bereits zeigen, dass durch die Rotation sowohl der Luftwiderstand, als auch der Auftrieb des Rades gesenkt wird.

1983 untersuchte Cogotti [10] an einem vereinfachten Pkw-Rad der Größe 145 SR 10 den Einfluss des drehenden Rades über stehendem Boden bei variablem Bodenabstand. Er konnte zeigen, dass die Umströmung des Rades sowie die aerodynamischen Beiwerte stark beeinflusst werden, sobald zwischen Boden und Rad auch nur ein geringer Spalt vorhanden ist. Cogotti folgerte daraus, dass die Untersuchung drehender Räder nur sinnvoll ist, wenn die Strömung zwischen Rad und Boden unterbunden wird. Ein Laufband zum Antrieb der Räder stand ihm zu dieser Zeit jedoch nicht zur Verfügung.

Cogotti konnte weiterhin bereits zeigen, dass der Widerstand des stehenden Rades stark ansteigt, wenn es nicht direkt von vorne, sondern unter einem Winkel angeströmt wird. Eine Untersuchung der Schräganströmung bei drehendem Rad war für ihn jedoch nicht möglich, da durch den gewählten Versuchsaufbau des drehenden Rades bereits bei gerader Anströmung Interferenzen zwischen Antriebsmotor und Rad auftraten, die den Anströmwinkel des Rades beeinflussen.

In umfangreichen experimentellen Untersuchungen betrachtete Schiefer [66] das freistehende Rad im Windkanal. Er verglich dabei unter anderem das stehende Rad, das drehende Rad über stehendem Boden, wie es unter anderem Cogotti [10] verwendet hatte, und das drehende Rad bei bewegtem Boden miteinander. Eine der Schlussfolgerungen seiner Arbeit lautet ebenfalls, dass die Strömung am Rad nur korrekt dargestellt werden kann, wenn das Rad auf einem Laufband abrollt und weitergehende Maßnahmen zur Eliminierung der Grenzschicht getroffen werden.

Mit fortschreitender Entwicklung wurde es möglich, das drehende Rad auch mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation zu untersuchen. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, das Strömungsfeld um das Rad im Detail zu analysieren und die Wirkungsweise der Raddrehung besser zu verstehen. Einen wichtigen Beitrag dazu lieferte Wäschle [93] im Jahre 2006. Mit Hilfe der von ihm entwickelten und validierten Simulationsmethodik war es ihm möglich, die Strömungsstruktur am freistehenden Rad detailliert zu beschreiben. **Bild 2.7** zeigt dazu die Wirbelsysteme am stehenden und drehenden Rad.

Die Wäschles Ergebnisse zeigen, dass der Widerstand am freistehenden Rad vor allem durch den Radnachlauf-Hufeisenwirbel bestimmt wird (vgl. Bild 2.7, Nr.1). Durch die Raddrehung kommt es im Vergleich zum stehenden Rad zur Förderung energiereicher Luft in den Radnachlauf, was zu einem erhöhten Basisdruck und damit zu einem reduzierten Widerstand führt. Die Widerstandsreduktion infolge der Raddrehung wird von Wäschle mit circa 15% angegeben. Weiterhin wird auch der Auftrieb des Rades infolge der Rotation verringert.

Weitere Untersuchungen zum freistehenden Rad sind unter anderem in folgenden Veröffentlichungen zu finden: [2, 28, 38, 39, 52, 63, 68, 74, 92].

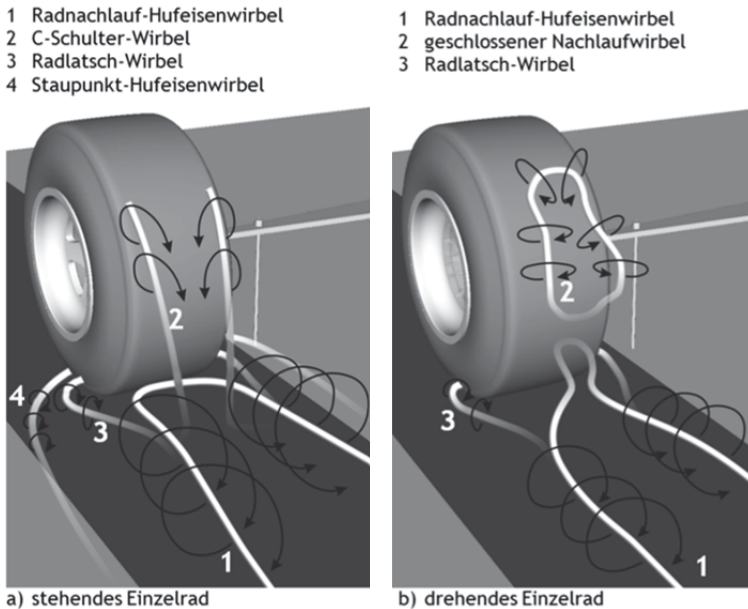


Bild 2.7: Wirbelsysteme am stehenden und drehenden Einzelrad [93].

2.4.2 Der Einfluss drehender Räder am Fahrzeug

Aufbauend auf die Untersuchungen am isolierten Einzelrad rückte in den 90er Jahren auch die Umströmung des drehenden Rades am Fahrzeug immer mehr in den Fokus der Forschung.

Wickern untersuchte 1991 den Einfluss drehender Räder an einem allradgetriebenen Fahrzeug, das über Stützen leicht vom Boden angehoben wurde [80]. Die Ergebnisse ließen bereits vermuten, dass vor allem die Rotation der Hinteräder eines Fahrzeugs einen großen Einfluss auf dessen Luftwiderstandsbeiwert hat.

1992 stellten Mercker und Berneburg [40], aufbauend auf den bis dahin veröffentlichten Ergebnissen, eine theoretische Beschreibung der dreidimensionalen Strömung um das drehende Einzelrad und das drehende Rad am Fahrzeug auf. Sie konnten dabei auch bereits auf erste Ergebnisse zugreifen, die sie an einem Fahrzeug im natürlichen Maßstab im DNW-Windkanal mit breitem Laufband erzielten [41, 42]. Hier wird zum ersten Mal der Einfluss der Reifenschulter als wichtiger Parameter für die Umströmung des Reifens genannt, wenn auch nur in einer theoretischen Betrachtung des freistehenden, symmetrisch angeströmten

Rades. Dabei wird zwischen Reifen mit scharfkantiger und gerundeter Schulter unterschieden: Die scharfkantige Schulter führt zu Strömungsablösungen und damit zu einem verbreiterten Nachlaufgebiet, während an der gerundeten Schulter die Strömung anliegen bleibt und das Nachlaufgebiet damit deutlich verkleinert wird.

Für die Beschreibung der Radumströmung am Fahrzeug nahmen Mercker und Berneburg weiterhin an, dass sich die Strömung am Fahrzeugrad in zwei Anteile aufteilen lässt. Der obere Teil des Rades, der innerhalb des Radhauses liegt, wird dabei hauptsächlich durch die im Radhaus vorherrschende Strömung beeinflusst, die sich bei stehendem und drehendem Rad nur geringfügig unterscheidet. Am unteren Teil hingegen kommt es zu deutlichen Unterschieden aufgrund der Raddrehung, die sich unter anderem auf das Jetting zurückführen lassen.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis aus der Arbeit von Mercker und Berneburg ist der Einfluss der Schrāganströmung auf die aerodynamischen Eigenschaften der drehenden Räder. Sie konnten feststellen, dass die aerodynamischen Beiwerte drehender Räder stark auf unterschiedliche Zuströmwinkel reagieren, was vor allem an den Vorderrädern von großer Bedeutung ist, da sich hier durch die Verdrängungswirkung des Fahrzeugs eine Schrāganströmung der Räder ausbildet. Bereits von König-Fachsenfeld hatte sehr früh auf diese Schrāganströmung hingewiesen [29], und sie konnte beispielsweise von Wickern et al. [82, 95] und von Wiedemann und Settgast [83] sowie von Wiedemann [87] messtechnisch nachgewiesen werden.

Wickern et al. konnten zeigen, dass der Widerstand des Rades umso mehr ansteigt, je größer der Anströmwinkel ist. Messungen an verschiedenen Fahrzeugen ergaben dabei einen konstanten Anströmwinkel von circa 15° an den Vorderrädern, während der Winkel an den Hinterrädern deutlich geringer ausfiel. Neuere Untersuchungen zeigten, dass Anströmwinkel von bis zu 30° möglich sind [24] und dieser vor allem von der Länge des Überhangs bestimmt wird. Der Widerstandsanstieg bei zunehmender Schrāganströmung konnte von Pfadenhauer in [53] hauptsächlich auf die Ablösung der Strömung an der leeseitigen Schulter zurückgeführt werden, wie sie von Mercker und Berneburg bereits an der scharfkantigen Schulter beschrieben wurde. Pfadenhauer lieferte zusätzlich erstmals einen Hinweis darauf, dass bei Anströmwinkeln größer als 11° eine „Widerstandsumkehr“ erfolgt, d. h., ab dort ist der Widerstand des drehenden Rades nicht mehr kleiner sondern größer als der Widerstand des stehenden Rades.

Wiedemann konnte mit seinen Untersuchungen [87] zusätzlich zeigen, dass der Anströmwinkel der Vorderräder auch durch die Art der Kühlluftführung beeinflusst wird. So reduziert sich bei geschlossenen Kühlluftöffnungen der

Ein Beitrag zur aerodynamischen Optimierung von Pkw
Reifen

Wittmeier, F.

2014, XX, 108 S. 67 Abb., 15 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-08806-4