



1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In der Fahrzeugentwicklung spielt die Aerodynamik eine wichtige Rolle hinsichtlich der Optimierung der Fahrzeugform unter Berücksichtigung günstiger Beiwerte. In letzter Zeit besitzen die Anforderungen an den Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen in der Automobilindustrie einen hohen Stellenwert. Aufgrund der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wird das Energiemanagement des Fahrzeugs besonders wichtig, da man in der Entwicklungsphase die Energieverluste so viel wie möglich absenken soll. Ein entscheidender Faktor ist dabei der aerodynamische Widerstand des Fahrzeugs.

Die Fahrzeuge werden in Windkanälen in allgemein idealen Bedingungen untersucht, bei denen der Anströmwinkel $\beta = 0^\circ$ angenommen wird. Aber in der Realität werden die Fahrzeuge bei Straßenfahrt unter kleinen Schräganströmwinkeln aufgrund des natürlichen Windes und anderer Störungen, wie z.B. vorausfahrende Fahrzeuge, ausgesetzt, die die oben genannten aerodynamischen Parameter beeinflussen.

1.2 Aufgabenstellung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht der Einfluss der im Windkanal untersuchten Varianten an Mercedes-Benz-Fahrzeugen (CLS- und B- Klasse) unterschiedlicher Heckformen auf den wichtigen aerodynamischen Beiwerte bei einer speziell festgelegten Winkelreihe, die zwischen 0° und 5° liegt.

Dabei soll zuerst die Häufigkeit kleiner Anströmwinkel im realen Fahrzeugbetrieb ermittelt werden. Eine Bestandsaufnahme der Sensitivität heutiger Mercedes-Benz-Fahrzeuge unter Seitenwind soll bei der Fahrzeugklassifizierung nach Anströmwinkel und Karosserieform berücksichtigt werden. Mit festgelegtem Anströmwinkelbereich sollen dann die ermittelten Karosserieparameter von Anbauteilen wie z.B. Räder, Rad- und Heckspoiler und Einflussparameter hinsichtlich Kühlluftmanagements wie z.B. Kühlluftmenge, Interaktion der Kühlluftausströmung und Unterbodenströmung untersucht werden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse soll ein kleines Messprogramm für alle Typbetreuer der Mercedes-Benz-Fahrzeuge aufgrund der ermittelten Varianten erstellt werden.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist, die unter Seitenwind niedrige oder hohe Sensibilität leistende Karosserieparameter an 1:1- und 1:4- Modellen festzustellen und deren



Einflüsse bezüglich unterschiedlicher Heckformen zu analysieren. Durch neu gewonnene Erkenntnisse können für zukünftige Kraftfahrzeuge Maßnahmen abgeleitet werden, mit denen die Seitenwindempfindlichkeit verbessert werden kann.



2 Stand der Technik

2.1 Seitenwinduntersuchungen

In diesem Unterkapitel werden einige der ehemaligen Untersuchungen über Seitenwind chronologisch aufgelistet.

In der vorhandenen Literatur über Seitenwindeinflüsse ist die Forschung von Hansen und Schlör (1939) [9] als eine der ersten Untersuchungen zu finden. Die Kraftmessung erfolgte in Gestalt einer Dreikomponentenmessung, bei den zwei Fahrzeugformen in der Weise, dass die Längskraft und Seitenkraft zerlegt in Richtung der Vorder- und Hinterachse, bei denen andere Formen, in dem die Längskraft in zwei Punkten rechts und links von der Vorder- bzw. Hinterachse und Seitenkraft in Richtung der beiden Achsen gemessen wurden. Der Schiebewinkel β wurde bis zu 30° ausgedehnt, da in einzelnen Windstößen solche Winkel bei den Fahrgeschwindigkeiten 50 bis 80 km/h auftreten können.

In den Versuchen wurde es beobachtet, dass sich die Seitenkräfte infolge Seitenwind beim fahrenden Kraftwagen in einer seitlichen Verformung der Reifen und damit einer Versetzung des Wagens quer zur Fahrtrichtung äußern.

Jedes Fahrzeug erfährt bei Einwirkung von Seitenkräften ein abdrehendes Moment um die durch den Wagenschwerpunkt gedachte Hochachse. Die Luftkraftmessungen ergeben, dass die am Vorderteil des Kraftwagens angreifende Luftkraft wesentlich größer als die am Heckteil ist.

Buchheim, Maretzke und Piatek (1985) [17] haben bei der Auswertung des Giermomentes und Seitenkräfte des untersuchten Fahrzeugs gefolgert, dass:

- die Seitenkraft im Rahmen von Seitenwindstabilität nicht so wichtig wie das Giermoment ist,
- ein Two-Box-Typ-Fahrzeug (Vollheck) ein besseres Verhalten als ein Fließ- oder Stufenheckfahrzeug hat.

Gilhaus und Renn (1986) [18] haben eine detaillierte Untersuchung von dem Einfluss der Designaspekten auf die Kräfte und Momente durchgeführt. Die wesentlichen Reduktionen des Giermomentes waren mit Hilfe von unten aufgezählten Maßnahmen möglich:

- Absenkung des vorderen Abschrümblechs
- Abrundung des Dachs und vorderer Kotflügel
- Abrundung der A-Säule



Die prinzipiellen Faktoren für Seitenwindcharakteristik werden von Mullarkey (1990) [3] in drei Kategorien identifiziert. Laut ihm wird die aerodynamische Charakteristik von:

- a) der Körperform,
- b) den Eigenschaften der mechanischen Komponenten inklusiv Reifen, Federung und Lenkgeometrie,
- c) dem Merkmal der Fahrzeugstruktur, die von den grundlegenden Größen wie Schwerpunkt, Trägheitsmoment und Radstand gekennzeichnet wird

bestimmt.

Die Messungen von Mullarkey an einem stumpfen Körper namens Davis-Model mit verschiedenen Heckscheibenneigungswinkel (10° , 20° , 30° , 40°) haben gezeigt, dass bei der Variante mit Neigungswinkel von 30° ein ziemlich hoher Luftwiderstandsbeiwert auftritt. Beim Schiebewinkel von $\beta=16^\circ$ bleibt die Strömung überwiegend fest im Frontbereich, der maßgebend für lineare Seitenkraft und Giermomentgradienten ist.

Laut Cairns (1994) [4] werden die Seitenwindeigenschaften der Fahrzeuge normalerweise in zwei Größen beschrieben; Seitenkraft und Giermoment. Die Seitenkraft orientiert sich nach dem Differenz der Drücke auf der Luv- und Leeseite des Fahrzeugs. Die hohen Geschwindigkeiten rundherum die Leeseite erzeugen ein Unterdruckgebiet. Dieser Unterdruck kann auch am Heck gesehen werden. Das unausgewogene Druckgleichgewicht zwischen Front und Heck führt zu einem Giermoment, der das Fahrzeug um die Hochachse dreht.

Er hat ein Fahrzeug mit vier Verschiedenen Heckvarianten (eckiges und abgerundetes Fließheck, Stufenheck und Vollheck-Kombi) unter den Schiebewinkeln $\beta=0^\circ$, 15° , 20° und 30° untersucht. Dabei wurde gesehen, dass sich die Seitenkraft schnell entwickelt, vor allem entlang des Fahrzeugs beim Seitenwindeintritt.

Chadwick (1999) [5] behauptet, dass die Vektoren der aerodynamischen Kräfte und des Windangriffspunktes eine Funktion in Abhängigkeit der aerodynamischen Form sind. In seinen Untersuchungen sieht er, dass die Größen der Momente von der Position des Schwerpunktes liegen, die durch die Eigenschaften der Fahrzeugdynamik und Reifenverhalten bestimmt werden. Er identifiziert die folgenden Fahrzeugreaktionen auf der Autobahn bei Seitenwind:

- <2,5 m/s → Schwimmen über der Spur
- 10 m/s → Luftwirbeleinflüsse merkbar, Kurskorrekturen notwendig
- >15 m/s → Gefahr, dass Fahrzeug völlig aus der Spur abkommt



Von ihm wurden noch ein Paar Punkte festgestellt, an welchen Stellen ein Fahrzeug bei Seitenwind Vorteile haben kann. Dies sind:

- Reduzierter vorderer Überhang
- Tieferer Frontspoiler
- Reduzierter Lufteinlass
- Größere Abrundung der Kotflügelkanten
- Abrundung der A-Säule
- Abgerundeter Vorderbau
- Größere Abrundungen in der Planform

Es ist leicht zu merken, dass es bei den SUV's eine größere Bodenfreiheit und gleichzeitig auch eine höhere Dachlinie gibt, die den aerodynamischen Rollmoment vergrößert. Die Stabilität der SUV's ist dadurch zum Teil kompensiert. Denn sie werden für Off-Road-Bedingungen konstruiert; besitzen ein robustes Design und sind relativ massive Fahrzeuge.

Das aerodynamische Verhalten eines SUV's ist total anders als ein konventioneller Personenkraftwagen. Der Grund dieses Unterschieds liegt in der Formdifferenz der Fahrzeugklassen:

- Größerer Lateralfäche am Heck
- Größere Bodenfreiheit
- Stumpfe Vorderseite für Off-Road-Look

Bei der aerodynamischen Entwicklung des Audi A2 wurde von Dietz (2000) [13] festgestellt, dass sich die aerodynamischen Beiwerte bei der Schräganströmung gleicher Weise wie bei anderen Vollheckfahrzeugen verändern. Wie bei diesen nehmen Giermoment und Seitenkraft mit dem Schräganströmwinkel annähernd linear zu. Es wurde auch festgestellt, dass bei kleinen Schiebewinkeln der Widerstand nur unwesentlich zunimmt und sich der Anstieg des Widerstandes bei größeren Schiebewinkeln auf den Verbrauch nicht merklich auswirkt.

Howell (2010) [14] hat an seinem stumpfen Windsor-Modell mit verschiedenen Heckscheibenneigungswinkeln (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25°) die Auftriebsbeiwerte beobachtet. Die Hinterachsauftriebskoeffizient besitzt bei hohen Winkeln ungefähr den zehnfachen Wert des vorderen. Die Änderung des Auftriebskoeffizienten ist bei allen Winkelvariationen bis 20° fast ähnlich.

Ein Versuch von Landström, Walker und Löfdahl (2010) [16] bei Schiebewinkeln $-20^\circ < \beta < 20^\circ$ mit Grenzschichtabsaugung zeigt, dass sich der Widerstand mit steigendem Schiebewinkel vergrößert, wenn die aktive Bodensimulation verwendet wird. Dabei wurden ähnliche Versuchskonfigurationen von Cogotti (1999) benutzt;



nämlich die aktive/passive Bodensimulation mit offenen/geschlossenen Rädern und offener/geschlossener Kühlluftführung.

Castejon et. al. (2011) [22] hat den SAE-Körper mit verschiedenen Heckneigungs- und Diffusorwinkeln unter Schräganströmung von 0° bis 21° jeweils mit 3° -Verschiebung untersucht. Dabei werden der Luftwiderstand und der Auftrieb berücksichtigt. Es wurde beobachtet, dass der Luftwiderstand bei Diffusorwinkel von 10° im Vergleich zu Diffusorwinkel von 6° mit zunehmendem Schiebewinkel besser wirkt. Beim Auftrieb hat der Versuchskörper mit Diffusorwinkel von 10° ein besseres Verhalten als die andere Variante.

Auch bei den Eisenbahnen ist die Schräganströmung zu betrachten. Dabei soll man beachten, dass die Luftkräfte und – momente nicht nur von der Form des Fahrzeugs abhängen sondern auch von einer Reihe anderer Parameter, wie Höhe und Form des Damms, Form des Brückendecks, Profil der Bodengrenzschicht, Spektrum der Turbulenz. Über dieses Thema haben Mackrodt (1978) [11], Cooper (1979) [7] und Copley (1987) [15] einige Versuche durchgeführt.

2.2 Aerodynamische Formgebung eines Kraftfahrzeugs

In konventionellen parametrischen Untersuchungen der Fahrzeugaerodynamik wird die Fahrzeugform mittels CAD konstruiert; die Gitternetze werden generiert und die CFD- Berechnungen werden durchgeführt. Natürlicherweise braucht man für diese Phasen lange Zeit. Da die Gesamtform und deren Proportionen eines Fahrzeugs auf die Aerodynamik einen großen Einfluss haben, ist es wichtig festzustellen, dass die Themen der Gesamtform einen Prioritätsrang haben.

Im Bereich der zukünftigen elektrischen Fahrzeuge nimmt die aerodynamische Eigenschaft nach dem Fahrzeuggewicht die zweitwichtigste Stelle. Aus diesem Grund soll die Optimierung der Aerodynamik mit Gewicht zusammen berücksichtigt werden.

Ishihara et.al (2011) [21] berichtet, dass das Packagekonzept der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu aktuellen konventionellen Fahrzeugen bezüglich Aerodynamik vorteilhafter sei. Die Komponenten wie z.B.: Abgasleitung, Abgasdämpfer und Kraftstofftank verhindern meistens die Reduktion des Luftwiderstandes. Da diese Bauteile bei den Elektrofahrzeugen fehlen, kann der Unterboden besser optimiert werden. Die Elektromotoren haben im Vergleich zu Verbrennungsmotoren einen wesentlich geringen Bauraum, der das Package des Fahrzeugs besser gestalten lässt. Aus diesem Grund gewinnt man mehr Freiheit für aerodynamische Optimierungen.

Aerodynamische Formgebung der Fahrzeuge konzentriert sich nicht nur in strömungsmechanischen Eigenschaften, sondern Interieur-Maßkonzept und Ergonomie sind dabei auch beteiligt. Hier werden die folgenden Punkte berücksichtigt (**Abbildung 2.1**):

- Vordere und hintere Sichtwinkel
- Visuelle Hindernisse der Säulen
- Kopffreiheiten für Passagiere

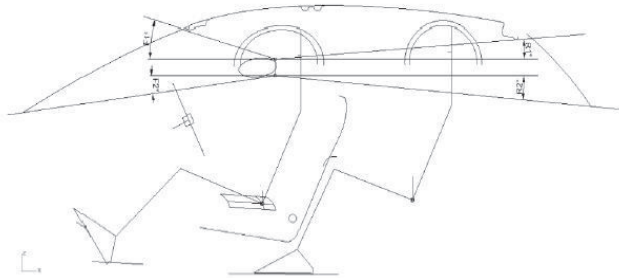


Abbildung 2.1: Maßkonzeptdarstellung eines Pkw's [31]

Diese aufgezählten Punkte sind die von Formoptimierung am meisten beeinflussten Parameter. Zum Beispiel werden die Pedale oder Lenkradposition bei der aerodynamischen Optimierung nicht berührt und deshalb die von denen abhängigen Maße werden auch nicht verändert.

Eine voraussichtliche Z-Maß-Änderung der Windschutzscheibe oder Dachlinie beeinflusst einerseits die Sichtwinkel bzw. Kopffreiheit und andererseits die Druckverteilung und Strömungsablösungen.

Demnächst werden Einflüsse einiger wichtigen Maßnahmen kurz beschrieben:

Außenspiegel:

Neben vielen Optimierungsmaßnahmen haben die Außenspiegelgeometrien eine wichtige Wirkung. Es wird angenommen, dass der Widerstandsanteil der äußeren Spiegel etwa 2-5% beträgt. Aus diesem Grund legt man heutzutage auf die Gestaltung der Außenspiegel im Design-Bereich einen größeren Wert. Da gleichzeitig die Strömung im Bereich der A-Säule stark beschleunigt wird, ist eine aerodynamische Optimierung des Außenspiegels besonders wichtig. Die besondere Herausforderung bei der Formoptimierung des Außenspiegels besteht darin, die unterschiedlichen Eigenschaftsanforderungen hinsichtlich der gesetzlich vorgeschriebenen Spiegelglasgröße, der Aerodynamik, der Aeroakustik, des Designs



und der Schmutzfreihaltung von Spiegelglas und Seitenscheibe zu einem gemeinsamen Bestwert führen.

Es ist wichtig, die der Strömung zugewandten Flächen des Spiegels so zu gestalten, dass keine großvolumigen Ablösungen entstehen. Zum anderen müssen die Ränder des Spiegels so angestellt werden, dass das Totwassergebiet hinter dem Spiegel möglichst klein wird. Um auch bei Fahrten im Regen ein sauberes Spiegelglas zu gewährleisten, werden die auf das Spiegelgehäuse auftreffenden Wassertropfen an der Gehäuseunterseite durch eine Abweiskante nach außen abgeleitet. Von dort abgeworfene und von der Strömung mitgenommene Wassertropfen landen nicht mehr im Sichtfeld auf der Seitenscheibe.

Radhaus:

Im Frontbereich hat der vordere Überhang einen wichtigen Einfluss auf die Radhausströmung. Aus aerodynamischer Sicht verkürzt sich mit dem Überhang allerdings auch die überströmte Anlaufstrecke vor den Vorderrädern, was in der Folge zu höheren Verlusten bei der Umströmung der Vorderräder führt. Ebenso ist auf Grund der bei SAV's und SUV's groß ausgeschnittenen Radhäuser mit einer Erhöhung des Luftwiderstandes zu rechnen [8]. Eine möglichst fahrtrichtungsparallele Anströmung der Vorderräder führt zu den geringsten Verlusten bei der Radumströmung.

Kühlluft:

Der Anteil der Motorraumdurchströmung am aerodynamischen Gesamtwiderstand kann in ungünstigen Fällen bis zu 15% betragen [23]. Ursache hierfür sind die Leckagen, Reibungs- und Impulsverluste bei der Durchströmung des Motorraums sowie die Wechselwirkung der aus dem Motorraum austretenden Luft mit der Fahrzeugumströmung.

Ein optimales Ziel wäre, den Luftvolumenstrom möglichst verlustfrei durch den Motorraum zu führen, über den Getriebetunnel abströmen lassen und so ideal wie möglich in die Unterbodenströmung einzuleiten.

Ein weiteres Thema ist die Sicherstellung der Bremskühlung. Der Kühlluftbedarf hängt von der Größe der verbauten Bremse und damit von der Motorisierung des Fahrzeugs ab. Die Luftzufuhr erfolgt einerseits gezielt über Bremsluftschächte, die die Luftströmung durch die Frontschürze direkt auf die Bremsen leiten, andererseits erfolgt eine Kühlung durch Zuströmung von unten in die Radhäuser.



Die Zuströmung an die Bremsen aus dem Bereich unter dem Fahrzeug wird von den Rädern beeinflusst. Sie sind so optimiert, dass bei Sicherstellung der benötigten Kühlung gleichzeitig der bestmögliche Widerstandsbeiwert erreicht wird.

Heck:

Eine Verbreiterung im Heckbereich bzw. Verbreiterung der Spurweiten wirkt sich aerodynamisch negativ aus, da sie das Nachlaufgebiet der Heckabströmung aufweitet, das wiederum einen Teil zum Gesamtluftwiderstand beiträgt. Bei z.B. SUV's ist meistens die Frage, ob der Laderaum im Bereich der D-Säule verbreitert, oder die D-Säule zur Verbesserung der Strukturdynamik verstärkt werden kann. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass solche Erweiterungen die Stirnfläche vergrößern und damit unmittelbar den Verbrauch erhöhen [24].

Bei den aktuellen oberer Mittelklasse-Fahrzeugen ist heutzutage ein wichtiges Detail zu sehen: Heckleuchtenabrisskante. Durch die Einbringung einer Abrisskante auf Heckleuchte wird erzielt, die Strömung an einer bestimmten Position ablösen zu lassen. Das Ablösen der Strömung führt zu einem Druckanstieg im Nachlaufgebiet des Fahrzeugs, was wiederum eine Reduzierung des Luftwiderstandes zur Folge hat.

Spoiler:

Der größte Anteil des Heckauftriebs liegt an den zwei großen Verwirbelungen im Heckbereich. Um den Hinterachsauftrieb zu reduzieren sollen diese Wirbel minimiert werden. Um die erwünschte Dachlinie zu behalten und die Voraussetzungen für das beste Fahrverhalten zu erfüllen kann das Fahrzeug mit einem adaptiven Heckspoiler ausgestattet werden. Der Spoiler ist im hinteren Bereich des Deckels platziert und manche neue Spoilervarianten lassen sich ab einer bestimmten Geschwindigkeit öffnen. D.h., das Strömungsverhalten am Heck kann mit einem adaptiven Teil bei einer bestimmten Geschwindigkeit verändert werden, um die aerodynamischen Eigenschaften zu verbessern [19].

Mit Hilfe dieser Maßnahme kann festgestellt werden, dass sich die vorher erwähnten zwei Wirbel verkleinert haben und der Totwasserbereich reduziert wird. Die resultierenden niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten auf der Heckscheibe erzeugen einen höheren Druck. Dieser Druckgewinn reduziert insbesondere den Auftrieb und erhöht den Abtrieb der Heckachse. Die Auftriebsreduktion führt gleichzeitig zur signifikanten Widerstandsabnahme.

Unterboden:

Das Entwicklungsziel bei der Unterbodengestaltung ist es, die Fahrzeugunterseite weitgehend glatt und somit strömungsgünstig zu gestalten. Die Kühlung von



temperaturkritischen Bauteilen kann durch Luftführungen mit integrierten NACA-Düsen umgesetzt werden, die eine effektive Kühlung bei geringer Erhöhung des Luftwiderstands ermöglichen [25].

Vor den Vorderrädern bis zur Mitte der Innenseite der Radhausschale können Radspoiler positioniert werden, die zum einen die Aufgabe haben, die Strömungsverluste durch Radhaus und Rad zu vermindern und zum anderen, Spritzwasser von der Vorderradbremse fernzuhalten.

2.3 Grundlagen der Strömungsmechanik unter Schräganströmung

In diesem Abschnitt werden die für die Schräganströmung notwendigen Grundlagen wie folgt erklärt:

- Definition des Seitenwinds
- Definition des Fahrzeugkoordinatensystems
- Strömungsvorgänge unter Schräganströmwinkel
- Aerodynamische Kräfte, Momente und deren Beiwerte

2.3.1 Definition des Seitenwinds

Während der Fahrt wird das Fahrzeug, wie in **Abbildung 2.2** schematisch dargestellt, angeströmt. Dabei ergibt sich die resultierende Geschwindigkeit v_{res} und der Anströmwinkel β durch vektorielle Addition der Fahrgeschwindigkeit v_{Fahr} und der Windgeschwindigkeit v_{Wind} . Aufgrund der seitlichen Anströmung entsteht eine Seitenkraft F_S im Druckpunkt DP. Dieser Punkt ist der momentenfreie Bezugspunkt, an dem die resultierenden Luftkräfte angreifen. Darauf wirkende Seitenkraft kann wie folgt formuliert werden:

$$F_S = \frac{\rho}{2} \cdot c_s \cdot A \cdot v_{\text{res}}^2 \quad (2.1)$$

Sie ist definiert als mit der Dichte der Luft, dem Seitenkraftbeiwert und der Stirnfläche des Fahrzeugs. Das Giermoment um die Hochachse z entsteht mit dem halben Radstand.