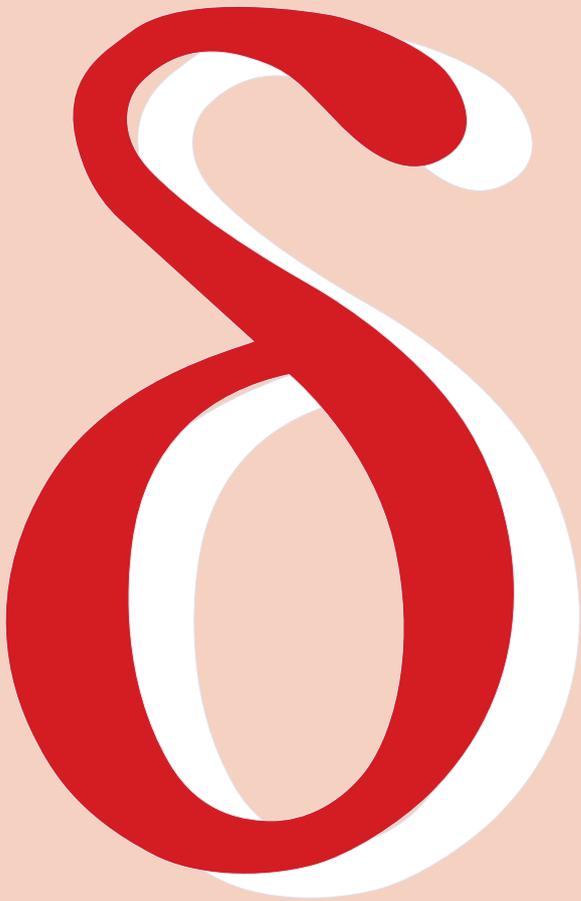
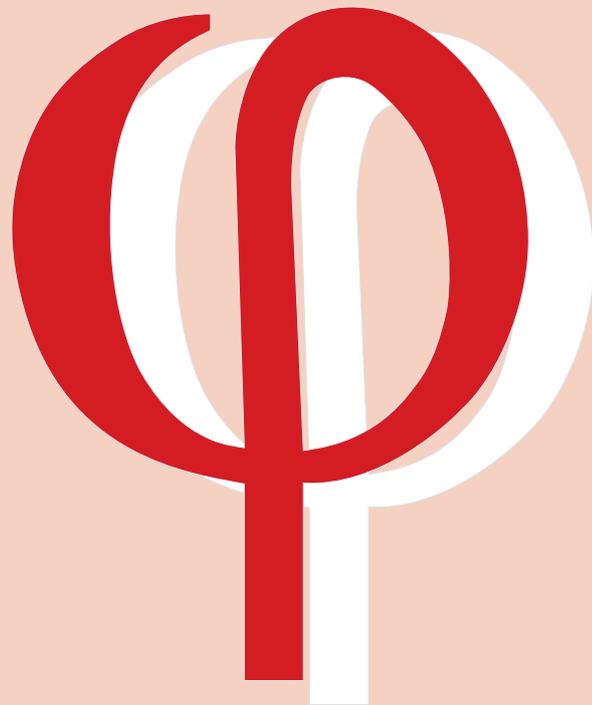


# FAT 241



Aerodynamik von schweren  
Nutzfahrzeugen  
-Stand des Wissens-



# **Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen**

- Stand des Wissens -

**Diese Studie wurde im  
FAT-UAK 9 'Aerodynamik von Nutzfahrzeugen'  
unter maßgeblicher Federführung von  
Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Frank, Daimler AG, Stuttgart  
erarbeitet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Glossar .....</b>	<b>III</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Fahrzeugtechnik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kraftstoffverbrauch .....	3
2.2 Fahrwiderstände.....	4
2.2.1 Rollwiderstand .....	4
2.2.2 Luftwiderstand .....	5
2.3 Einfluss der Fahrwiderstände auf den Kraftstoffverbrauch .....	9
<b>3 Nutzfahrzeuge.....</b>	<b>10</b>
3.1 Fahrzeugtypen.....	10
3.2 Motoranordnung .....	11
3.3 Gesetzliche Bestimmungen .....	11
3.4 Fahrzeugbeschreibung.....	13
<b>4 Aerodynamik der Nutzfahrzeuge.....</b>	<b>14</b>
4.1 Historische Entwicklung.....	14
4.2 Strömungs- und Druckverhältnisse.....	15
4.3 Entwicklungsinstrumente .....	18
4.3.1 Analytische und numerische Strömungsberechnung.....	18
4.3.2 Experimente .....	19
<b>5 Fokussierung spezieller Bereiche am Nutzfahrzeug.....</b>	<b>23</b>
5.1 Fahrerhaus .....	25
5.1.1 Grundform .....	26

5.1.2 Fahrerhausradien .....	29
5.1.3 Gestaltung der A-Säule und der Außenspiegel .....	30
5.1.4 Fahrerhaushöhe .....	31
5.1.5 Zubehörbauteile .....	34
5.1.6 Fahrerhausrückseite .....	35
5.2 Fahrgestell.....	41
5.2.1 Kühlluftmanagement.....	41
5.2.2 Frontschürzenverlängerung .....	43
5.2.3 Unterbodenverkleidung.....	43
5.2.4 Felgenabdeckung .....	45
5.2.5 Schmutzfänger .....	46
5.2.6 Fahrgestellseitenverkleidung .....	47
5.2.7 Fahrgestellabdeckung .....	47
5.3 Auflieger .....	49
5.3.1 Trennplatte .....	50
5.3.2 Wirbelfalle.....	51
5.3.3 Radien und Verkleidung .....	52
5.3.4 Luftkegel.....	53
5.3.5 Fahrgestellrelevante Verkleidungen .....	54
5.3.6 Maßnahmen am Heck .....	63
5.3.7 Maßnahmen im unteren Heckbereich.....	71
5.3.8 Maßnahmen am Aufliegerdach.....	73
5.4 Gesamtzug.....	75
5.5 Zukünftige Entwicklungen.....	79
5.6 Abschlussbewertung .....	81
<b>6 Fazit .....</b>	<b>86</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>88</b>

## **Glossar**

EXT-92	Konzeptfahrzeug der Daimler AG.
Navier-Stokes-Gleichung	Grundgleichung der Strömungsmechanik für newtonsche Flüssigkeiten und Gase.
Lattice-Boltzmann-Gleichung	Gleichung zur Beschreibung von Strömungen auf Basis von molekulardynamischer Vorgänge.

## Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

bzw.	beziehungsweise
CFD	<b>C</b> omputational <b>F</b> luid <b>D</b> ynamics, numerische Strömungsberechnung
DOE	US <b>D</b> eartment of <b>E</b> nergy
EU	<b>E</b> uropäische <b>U</b> nion
EKK	<b>E</b> ndkanten <b>k</b> lappen
Fzg.	Fahrzeug
Geschw.	Geschwindigkeit
Lkw	<b>L</b> astkraft <b>w</b> agen
LLK	<b>L</b> uftleit <b>k</b> örper
Nfz	<b>N</b> utz <b>f</b> ahrzeug
Nr.	Nummer
NRC	<b>N</b> ational <b>R</b> esearch <b>C</b> ouncil of Canada
SDR	<b>S</b> ystem <b>D</b> rag <b>R</b> eduction
TMA	<b>T</b> ruck <b>M</b> anufacturers <b>A</b> ssociation
UFD	<b>U</b> ndercarriage <b>F</b> low <b>D</b> evice
USA	<b>U</b> nited <b>S</b> tates of <b>A</b> merica
Vgl.	Vergleich
vgl.	vergleiche
Vollverkl.	Vollverkleidung

## Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[m <sup>2</sup> ]	Fahrzeugstirnfläche
A <sub>x</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Oberfläche des umströmten Flügels
a	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
b <sub>e</sub>	[g/kWh]	spezifischer Kraftstoffverbrauch
B <sub>s</sub>	[l/km]	Streckenverbrauch

$c_T$	[-]	Tangentialkraftbeiwert
$c_W$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
$\overline{c_W}$	[-]	windgemittelter Luftwiderstandskoeffizient
D	[-]	Dachform
d	[m]	Durchmesser
$F_{LWD}$	[N]	Druckwiderstandskraft
$F_{LWR}$	[N]	Reibungswiderstandskraft
$F_R$	[N]	Rollwiderstandskraft des Reifens
$f_R$	[-]	Rollwiderstandsbeiwert des Reifens
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Aufbauhöhe
L	[m]	charakteristische Länge (z.B. beim NFZ: $L = \sqrt{A}$ mit A: Fahrzeugstirnfläche)
$L_s$	[m]	Länge der Seitenverkleidung
$L_v$	[m]	Länge der Verlängerungsfläche
$L_{opt.}$	[m]	optimale Länge der Verlängerungsfläche
$Ma_\infty$	[-]	Mach-Zahl
m	[kg]	Fahrzeugmasse
n	[-]	Anzahl der Verlängerungsflächen
$P_a$	[kW]	Beschleunigungsleistung
$P_e$	[kW]	fahrzeugseitig erforderte Leistung (effektive Motorleistung)
$P_{LW}$	[kW]	Luftwiderstandsleistung
$P_R$	[kW]	Rollwiderstandsleistung
$P_S$	[kW]	Schlupfverlustleistung
$P_{St}$	[kW]	Steigleistung
$P_{vt}$	[kW]	Triebstrangverlustleistung
$p_x$	[Pa]	Druck
r	[m]	Eckkantenradius
Re	[-]	Reynoldszahl
s	[m]	Freiraumlänge
u	[km/h]	Anströmgeschwindigkeit
$u_\infty$	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit

$v_{\infty}$	[km/h]	Anströmgeschwindigkeit
$v_F$	[km/h]	Fahrzeuggeschwindigkeit

## Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\beta$	[°]	Winkel der Schräganströmung
$\gamma$	[°]	Windschutzscheibenanstellwinkel
$\delta$	[°]	Keilwinkel
$\varepsilon$	[°]	Einstellwinkel der Verlängerungsfläche
$\varepsilon_{opt.}$	[°]	optimaler Einstellwinkel der Verlängerungsfläche
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematische Zähigkeit
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$\rho_{kr}$	[kg/l]	Kraftstoffdichte
$\varphi$	[°]	Winkel

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prognose des Transportaufkommens im Jahr 2025.....	1
Abb. 1.2: Entwicklung der Erdölpreise [3].....	2
Abb. 2.1: Fahrwiderstandsdiagramm [5].....	4
Abb. 2.2: Auftretende Widerstandskräfte [7].....	5
Abb. 2.3: $c_w$ -Werte verschiedener Kraftfahrzeugtypen [6] .....	6
Abb. 2.4: Fahrzeugumströmung [9] .....	7
Abb. 2.5: Änderung des $c_w$ -Wertes unter Schräganströmung [6] .....	8
Abb. 2.6: Fahrwiderstandsanteile am Kraftstoffverbrauch [8] .....	9
Abb. 3.1: Fahrzeugtypen [6] .....	10
Abb. 3.2: Motoranordnungen [6].....	11
Abb. 3.3: Nomenklatur Nutzfahrzeug.....	13
Abb. 4.1: Spannungsfeld der Nutzfahrzeugaerodynamik [15].....	15
Abb. 4.2: Stumpfer Körper (a) und Umströmung des Körpers (b) [16].....	15
Abb. 4.3: Druckverteilung am Nfz (schematische Darstellung) [10].....	17
Abb. 4.4: Umströmung eines Nfz (schematische Darstellung) [10].....	17
Abb. 4.5: Einfluss der Reynoldszahl auf den $c_w$ -Wert [8] .....	21
Abb. 5.1: Luftwiderstandsentwicklung entlang eines Sattelzugs [6].....	23
Abb. 5.2: Dominierende Luftwiderstandsbereiche [6] .....	24
Abb. 5.3: Zugmaschinen-Grundformen .....	26
Abb. 5.4: Einfluss der Fahrerhausformgebung [8] .....	27
Abb. 5.5: Gestaltungsparameter der Fahrerhausgrundform [21] .....	27
Abb. 5.6: Fahrerhaus Parameterstudie [57].....	28
Abb. 5.7: Vermeidung der Strömungsablösung durch .....	29
Abb. 5.8: Luftleitdüse [22].....	30
Abb. 5.9: Außenspiegel [6,24] .....	31
Abb. 5.10: Aufbauhöhe $h$ über dem Fahrerhaus.....	31
Abb. 5.11: Frontale Anströmung eines Nutzfahrzeugs [8] .....	32
Abb. 5.12: Windleitschild .....	32
Abb. 5.13: Windleitkörper .....	33
Abb. 5.14: Luftwiderstandsverbesserungen aufgrund von Windleitteilen [8].....	33
Abb. 5.15: Sonnenblende [25] .....	34

Abb. 5.16: Scheinwerfer und Signalhörner [26] .....	34
Abb. 5.17: Freiraumlänge s .....	35
Abb. 5.18: Luftwiderstand über Freiraumlänge s/d [15] .....	36
Abb. 5.19: Endkantenklappen.....	36
Abb. 5.20: Endkantenklappen im Vergleich zu geschlossenem Freiraum [28] .....	37
Abb. 5.21: Ergebnis aus Modellversuch zur Endkantenklappeneinstellung [27].....	38
Abb. 5.22: Endkantenklappenverhalten unter Schräganströmung [29].....	39
Abb. 5.23: Freiraum-Lufteinblasung an der Zugmaschine .....	40
Abb. 5.24: Deturbulatorfolie an der Zugmaschine [31] .....	40
Abb. 5.25: Skizze des Fahrgestells .....	41
Abb. 5.26: Kühlluftmanagement [57] .....	42
Abb. 5.27: Frontschürzenverlängerung [32].....	43
Abb. 5.28: Unterbodenkonfigurationen der Modellmessung [33] .....	44
Abb. 5.29: Auswirkung einer Unterbodenverkleidung [33] .....	44
Abb. 5.30: Felgenabdeckung [24,58] .....	45
Abb. 5.31: Schmutzfänger [35] .....	46
Abb. 5.32: Fahrgestellseitenverkleidung [10].....	47
Abb. 5.33: Skizze einer Fahrgestellabdeckung.....	48
Abb. 5.34: Fahrgestellabdeckungen im Modellversuch [33] .....	48
Abb. 5.35: Auswirkung einer Fahrgestellabdeckung [33].....	49
Abb. 5.36: Relevante Bereiche am Nutzfahrzeugaufleger .....	50
Abb. 5.37: Trennplatte .....	51
Abb. 5.38: Wirbelfalle .....	51
Abb. 5.39: Wirkung der Wirbelfalle [37] .....	52
Abb. 5.40: Frontverkleidung [39].....	53
Abb. 5.41: Luftkegel [36].....	54
Abb. 5.42: Radverkleidung [40] .....	55
Abb. 5.43: Achsaggregatabdeckung und Funktionsweise des Luftleitkeils [40,41] ...	55
Abb. 5.44: Seitenverkleidung am Aufleger.....	56
Abb. 5.45: Aufleger mit Seitenverkleidung unter Schräganströmung [11].....	57
Abb. 5.46: Seitenverkleidungsanordnungen (parallel, u-förmig, v-förmig) [42] .....	58
Abb. 5.47: Modellversuche mit Seitenverkleidungen [44] .....	59

Abb. 5.48: CFD-Berechnung einer Aufliegerumströmung [6].....	61
Abb. 5.49: Vollverkleidung des Aufliegerunterbaus [28] .....	62
Abb. 5.50: Entstehung des Totwasserbereichs [15] .....	63
Abb. 5.51: Maßnahmen zur Senkung des Basiswiderstandes [16].....	64
Abb. 5.52: Heckeinzugsvarianten [8] .....	64
Abb. 5.53: Parameter am Heckeinzug [42] .....	65
Abb. 5.54: CFD-Berechnung eines Heckeinzugs [6] .....	66
Abb. 5.55: Heckeinzug unter Schräganströmung [11] .....	67
Abb. 5.56: System Drag Reduction [48].....	69
Abb. 5.57: Wirbelerzeuger [15,58] .....	69
Abb. 5.58: Abgerundete Ecken am Heck, Prinzip tangentialer Ausblasung [50].....	71
Abb. 5.59: Undercarriage Flow Device (UFD) [15] .....	72
Abb. 5.60: Magnus Rotoren am Aufliegerdach .....	73
Abb. 5.61: Dacheinzug [24] .....	73
Abb. 5.62: Aufliegervergleich [52] .....	74
Abb. 5.63: Gesamtluftwiderstand eines Sattelzuges [57] .....	76
Abb. 5.64: Ergebnisse einer Modellmessung [54,55] .....	78
Abb. 5.65: Anbauteile Konfiguration am Haubenfahrzeug [53] .....	79
Abb. 5.66: Sattelzugmaschine mit Crash nose [19] .....	80
Abb. 5.67: Konzeptfahrzeug Delphin-Studie [20] .....	81
Abb. 5.68: Nutzfahrzeug der nahen Zukunft .....	85

## Tabellenverzeichnis

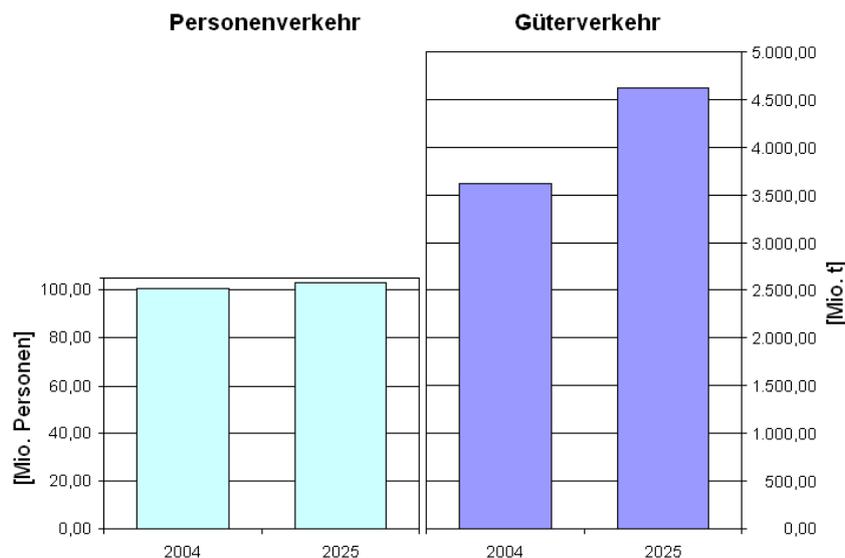
Tab. 3.1: Zulassungsbestimmungen der EU und der USA im Vergleich .....	12
Tab. 5.1: Versuchsergebnisse der Seitenverkleidungsversuche .....	59
Tab. 5.2: Änderung des gemittelten $c_w$ -Werts durch Seitenverkleidungen .....	61
Tab. 5.3: Versuchsergebnisse der Vollverkleidung.....	62
Tab. 5.4: Vergleich von geraden und gekrümmten Verlängerungsflächen .....	65
Tab. 5.5: Optimaler Einstellwinkel der Verlängerungsflächen am Heck .....	66
Tab. 5.6: $c_w$ -Wert Veränderung mittels Heckeinzug .....	67
Tab. 5.7: Ergebnisse Gesamtfahrzeugkonfigurationen.....	77
Tab. 5.8: Übersicht der Anbauteile .....	82

# 1 Einführung

„Ohne Energieeinsatz ist Mobilität nicht möglich. ... Der Einsatz von begrenzt verfügbaren Ressourcen sowie der Ausstoß von Abgasemissionen für den Transport von Personen und Gütern müssen nachhaltig reduziert werden.“, so Ch. Huß, Vorsitzender der VDI-Gesellschaft „Fahrzeug- und Verkehrstechnik“ (FVT), 2010 [1].

Aber nicht nur um die Mobilität langfristig sicherzustellen, sondern auch die Umwelt durch das Handeln der Menschen nur in geringst möglichem Umfang zu belasten, muss der Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs nachhaltig gesenkt werden.

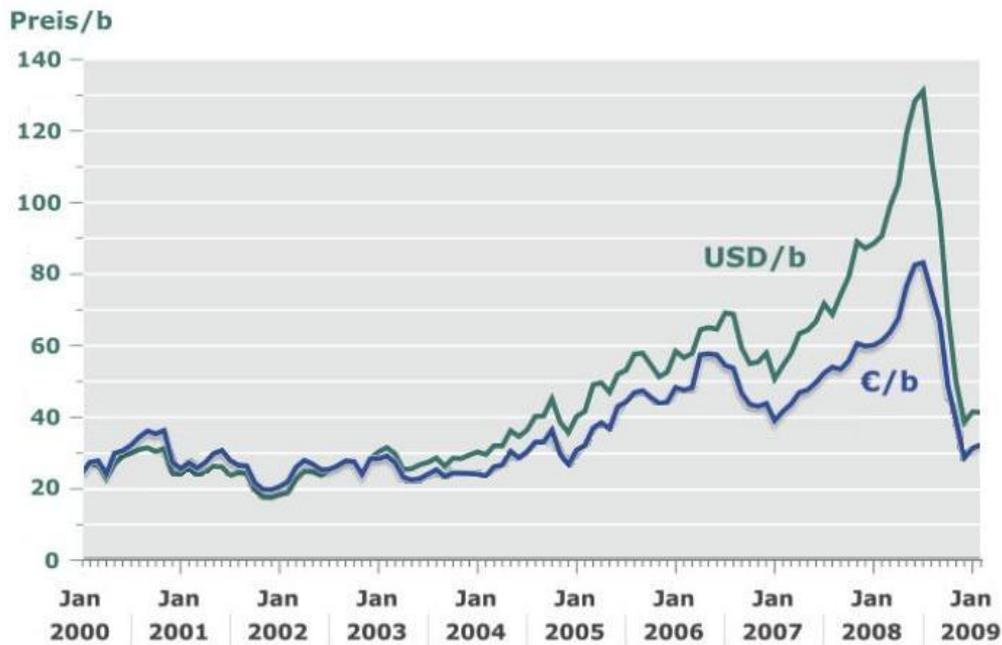
Prognosen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zeigen (s. [Abb. 1.1](#)), dass in Deutschland bis zum Jahr 2025 verglichen mit 2004 das Transportaufkommen im Personenverkehr um 2,8% und im Güterverkehr um 28% steigen wird. [2]



**Abb. 1.1: Prognose des Transportaufkommens im Jahr 2025**

Damit eine derartige Entwicklung möglich ist, werden nicht nur entsprechende Energieressourcen benötigt, sondern die benötigte Energie muss auch bezahlbar bleiben. Ein Blick auf die Entwicklung des Erdölpreises des letzten Jahrzehnts (s. [Abb. 1.2](#)) zeigt seinen progressiven Anstieg, bis er von der Weltwirtschaftskrise 2008/2009 abrupt unterbrochen wurde. Jedoch zeigt die Entwicklung der beiden letzten Jahre, dass der Ölpreis mit Wiederbelebung der Weltmärkte bereits wieder in den Bereich

des ehemaligen Maximums angestiegen ist. Demzufolge wird es zunehmend wichtiger, den Kraftstoffverbrauch gerade von Nutzfahrzeugen weiterhin nachhaltig zu senken, um sie auch in Zukunft noch wirtschaftlich betreiben zu können.



**Abb. 1.2: Entwicklung der Erdölpreise [3]**

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Nutzfahrzeugaerodynamik auf Basis der einschlägigen Literatur aufzuarbeiten und potenzielle Verbesserungsmaßnahmen zu bewerten, da der Luftwiderstand ein entscheidender Stellhebel zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs gerade bei Fernverkehrsfahrzeugen mit einer jährlichen Kilometerleistung von durchschnittlich 150 Tkm [4] ist.

## 2 Grundlagen der Fahrzeugtechnik

In den folgenden Abschnitten werden der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs, die bei dessen Betrieb auftretenden Fahrwiderstände und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch diskutiert.

### 2.1 Kraftstoffverbrauch

Mit Hilfe des Streckenverbrauchs  $B_S$  können Aussagen über den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs gemacht werden [5]:

$$B_S = \frac{\text{Kraftstoffvolumen}}{\text{Strecke}} = \frac{b_e \cdot P_e}{\rho_{Kr} \cdot v_F} \quad [\text{l/km}] \quad (2.1)$$

$b_e$  spezifischer Kraftstoffverbrauch

$P_e$  fahrzeugseitig geforderte Leistung  $P_e = P_{vt} + P_S + P_R + P_{LW} + P_{St} + P_a$

$P_{vt}$  Triebstrangverlustleistung

$P_S$  Schlupfverlustleistung

$P_R$  Rollwiderstandsleistung der Reifen

$P_{LW}$  Luftwiderstandsleistung

$P_{St}$  Steigleistung

$P_a$  Beschleunigungsleistung

$\rho_{Kr}$  Kraftstoffdichte

$v_F$  Fahrzeuggeschwindigkeit

Um den Kraftstoffverbrauch (s. Gl. (2.1)) eines Fahrzeugs zu reduzieren, können grundsätzlich zwei Wege beschritten werden. Zum einen kann mittels einer Verbesserung der Effizienz des Motors und Triebstrangs, z. B. durch Reduzierung der inneren Verluste ( $P_{vt}$ ), der Wirkungsgrad erhöht werden, so dass weniger Kraftstoff zur Bereitstellung der geforderten mechanischen Energie benötigt wird. Zum anderen kann durch die Reduktion der äußeren Fahrwiderstände ( $P_R + P_{LW} + P_{St} + P_a$ ) der Kraftstoffbedarf gesenkt werden ( $P_S$  vernachlässigbar klein).

## 2.2 Fahrwiderstände

Beim Betreiben eines Fahrzeugs können Roll-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand als Fahrwiderstände auftreten [5]. Bei einer idealisierten Konstantfahrt in der Ebene reduzieren sich die Fahrwiderstände auf Roll- und Luftwiderstände (s. Abb. 2.1). Diese können bei der Konstruktion eines Fahrzeugs gezielt beeinflusst werden und stehen daher hier im Fokus.

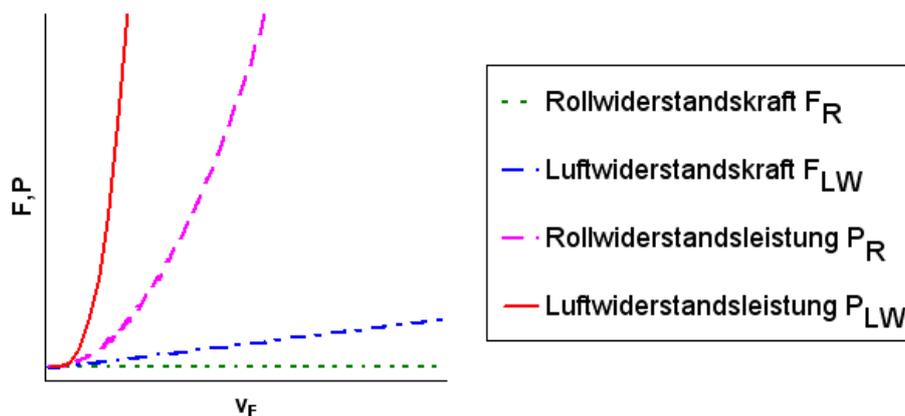


Abb. 2.1: Fahrwiderstandsdiagramm [5]

### 2.2.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand eines Fahrzeuges, im englischen als „mechanical drag“ bezeichnet, beinhaltet prinzipiell die mechanischen Triebstrangverluste nach der Kupplung, z. B. durch Lagerreibungen in den Getrieben, und den dominanten Rollwiderstand des Reifens. Durch das Abrollen eines Reifens auf der Fahrbahn entsteht die Reifenrollwiderstandskraft  $F_R$ , welche in erster Näherung in Gl. (2.2) definiert ist [5]:

$$F_R = m \cdot g \cdot f_R \quad (2.2)$$

m	Masse des Fahrzeuges	
g	Erdbeschleunigung,	diese kann als konstant angenommen werden, $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
$f_R$	Rollwiderstandsbeiwert	in erster Näherung abhängig vom verwendeten Reifen, seinem Innendruck und den Temperaturverhältnissen

## 2.2.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand entsteht durch Druck- und Reibungswiderstände, die bei der Umströmung des Fahrzeugs auftreten [7].

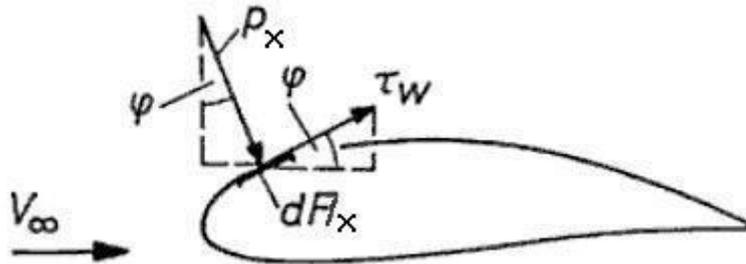


Abb. 2.2: Auftretende Widerstandskräfte [7]

Bei der Umströmung eines stumpfen Körpers (s. Abb. 2.2) kommt es zu Druckunterschieden aufgrund von Ablösungen. Es bildet sich somit eine Druckverteilung am Körper aus, die sich vom Umgebungsdruck unterscheidet. Daraus resultiert eine Widerstandskraft, die sich durch Integration des Druckes  $p_x$  über der Oberfläche  $A$  des Körpers zur Druckwiderstandskraft  $F_{LWD}$  berechnen lässt:

$$F_{LWD} = \int p_x \cdot \sin\varphi \cdot dA_x \quad (2.3)$$

„Bei einem umströmten Körper (s. Abb. 2.2) wird bei Vorliegen eines Geschwindigkeitsgradienten an der Wand infolge der molekularen Zähigkeit an jeder Stelle eine Schubspannung  $\tau_w$  vom strömenden Medium auf die Wand übertragen“ [8]. Es ergibt sich daraus durch Summation der resultierenden Kraftkomponenten in Strömungsrichtung der Reibungswiderstand  $F_{LWR}$ :

$$F_{LWR} = \int \tau_w \cdot \cos\varphi \cdot dA_x \quad (2.4)$$

Bei Kraftfahrzeugen überwiegt der Anteil des Druckwiderstandes im Verhältnis von ca. 85% Druckwiderstand zu ca. 15% Reibungswiderstand [7].

Die Luftwiderstandskraft  $F_{LW}$  resultiert aus Druck- und Reibungswiderstand [5]:

$$F_{LW} = F_{LWD} + F_{LWR} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_w \quad (2.5)$$

$\rho$  Dichte der Luft, abhängig vom barometrischen Druck, der Temperatur der Luft und in geringem Umfang von der Luftfeuchtigkeit. Diese Einflüsse führen im Winter zu einem erhöhten Fahrwiderstand [6].

v Fahrzeug-  
geschwindigkeit, geht quadratisch ein und stellt daher den  
dominanten Anteil des Luftwiderstandes dar.

$$v = v_{\text{Fahrzeug}} - v_{\text{Wind}} \text{ (bei Mitwind)}$$

$$v = v_{\text{Fahrzeug}} + v_{\text{Wind}} \text{ (bei Gegenwind)}$$

A Fahrzeugstirnfläche

$c_w$  Luftwiderstands-

beiwert beschreibt die „aerodynamische Formgüte“ [7].

Um Fahrzeugumströmungen vergleichbar zu machen, werden keine Kräfte- und Momentenvergleiche an den Fahrzeugen vorgenommen, sondern es wird diese dimensionslose Kenngröße herangezogen mit:

$$c_w = \frac{F_{LW}}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (2.6)$$

Anm.: Der Zusammenhang gilt nur bei einem Anströmwinkel von  $\beta = 0^\circ$ .

In Abbildung 2.3 sind einige Kraftfahrzeugtypen mit Ihren  $c_w$ -Werten abgebildet.

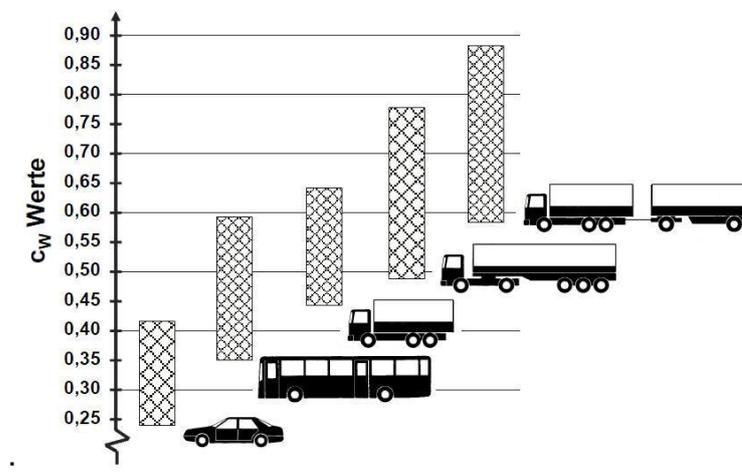
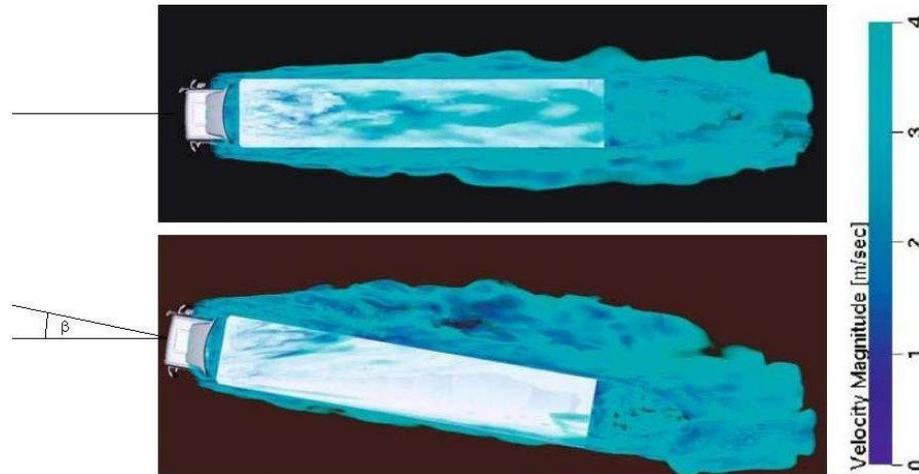


Abb. 2.3:  $c_w$ -Werte verschiedener Kraftfahrzeugtypen [6]

Der Anströmwinkel  $\beta = 0^\circ$  stellt einen Idealwert dar. In der Realität ist ein Fahrzeug jedoch nicht nur dem idealen Fahrtwind (Windstille) [8], sondern auch äußeren Windeinflüssen ausgesetzt. Diese verändern die Umströmungsverhältnisse (s. Abb. 2.4).



**Abb. 2.4: Fahrzeugumströmung [9]**

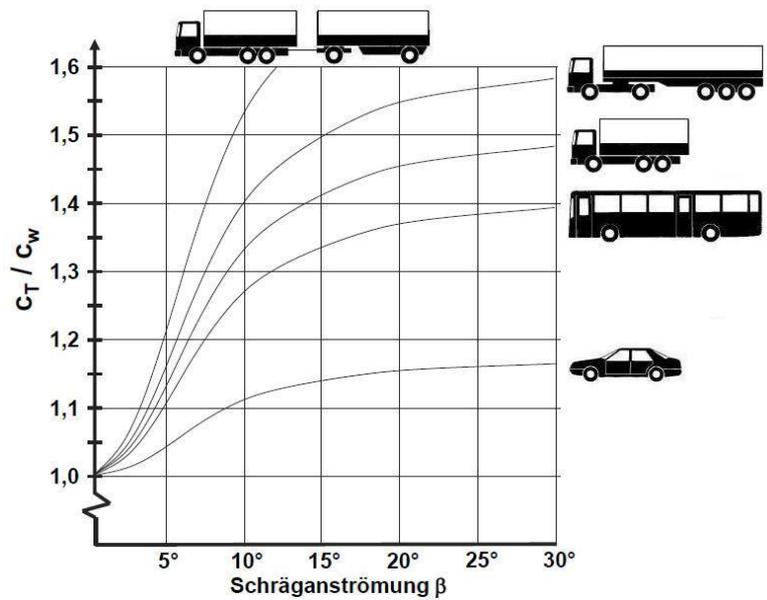
(oben:  $\beta = 0^\circ$ , unten:  $\beta \neq 0$ )

Es wurde daher ein sogenannter Tangentialkraftbeiwert  $c_T$  für  $\beta \neq 0^\circ$  eingeführt, der die Umströmungsgüte bei realen Bedingungen widerspiegeln soll [7]:

$$c_T = \frac{F_{LT}}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (2.7)$$

$F_{LT}$  Tangentialkraft

Aus Abb. 2.5 wird die Veränderung des  $c_w$ -Wertes unter Schräganströmung mit dem Schiebewinkel  $\beta$ , welcher von topographischen und meteorologischen Bedingungen abhängig ist, ersichtlich. Je nach Standort und sich ändernden Wetterverhältnissen kann dieser somit variieren. Laut [8] kann davon ausgegangen werden, dass bei Nutzfahrzeugen in der Realität Winkel von  $\beta < 14^\circ$  auftraten.

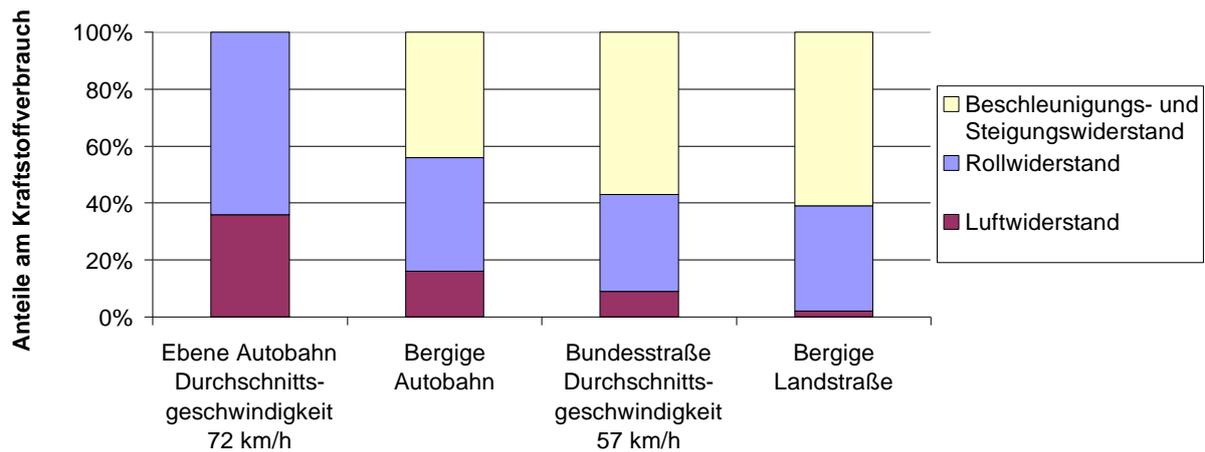


**Abb. 2.5: Änderung des  $c_w$ -Wertes unter Schräganströmung [6]**

Da der  $c_w$ -Wert stark von den Wetterbedingungen abhängt, wurde zusätzlich der „windgemittelte Luftwiderstandskoeffizient  $\overline{c_w}$ “ eingeführt. Eine einheitliche Definition dieser Größe besteht nicht. Jedoch beschreibt sie den  $c_w$ -Wert eines Fahrzeugs unter Einbezug von zeitlich gemittelten Windeinflüssen und ermöglicht so eine Beschreibung der Effektivität eines Bauteils unter realen Windverhältnissen. Die Kenngröße ist von der Fahrzeuggeschwindigkeit, den Wetter- und Anströmverhältnissen abhängig, wodurch ihre Vergleichbarkeit nur eingeschränkt möglich ist. Jedoch lässt sich mit ihr eine Abschätzung der Wirkung von Anbauteilen unter realen Bedingungen durchführen [10].

## 2.3 Einfluss der Fahrwiderstände auf den Kraftstoffverbrauch

Zur Veranschaulichung der Fahrwiderstände sind in der folgenden Abbildung (s. [Abb. 2.6](#)) Fahrwiderstandsanteile am Kraftstoffverbrauch eines beladenen 40t-Sattelzuges dargestellt.



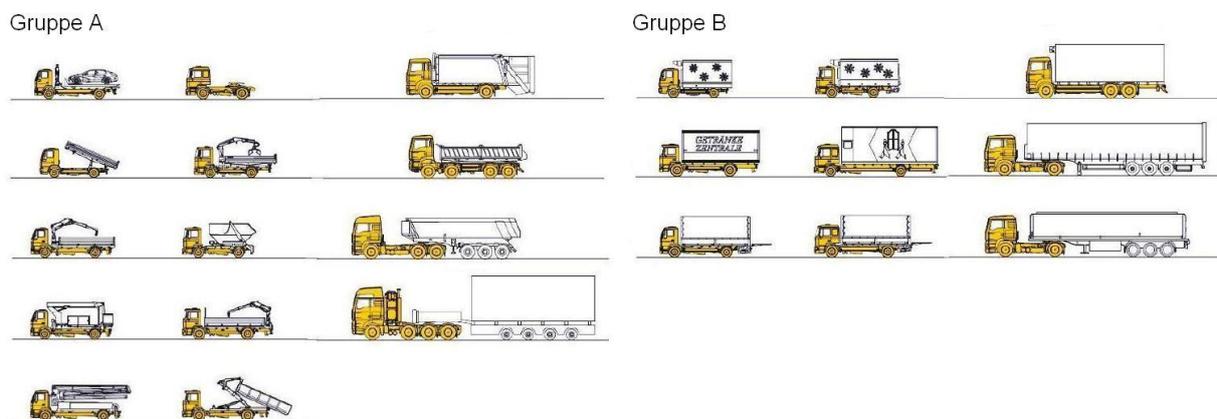
**Abb. 2.6: Fahrwiderstandsanteile am Kraftstoffverbrauch [8]**

Wie [Abb. 2.6](#) zu entnehmen ist, entfallen bei der Fahrt des dem Diagramm zugrunde liegenden Sattelzuges auf ebener Autobahn mit 72 km/h mehr als 35% der Fahrwiderstände auf den Luftwiderstand. Dies birgt ein enormes Potenzial, durch aerodynamische Verbesserungsmaßnahmen Kraftstoff einzusparen und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren.

### 3 Nutzfahrzeuge

Ein „Nutzfahrzeug als Lastkraftwagen oder Lastzug hat die Aufgabe, eine Nutzlast mit möglichst geringem Aufwand über kürzere oder längere Strecken von Haus zu Haus zu transportieren“ [6]. Dabei steht die Funktionalität eines solchen Fahrzeugs an oberster Stelle, wodurch sich eine Vielzahl an Typen von Nutzfahrzeugen ergibt.

#### 3.1 Fahrzeugtypen



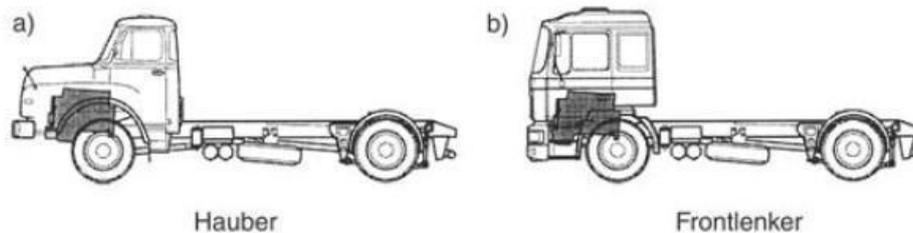
**Abb. 3.1: Fahrzeugtypen [6]**

In der obigen Abbildung (s. Abb. 3.1) sind die abgebildeten Fahrzeuge in zwei Gruppen unterteilt:

Während es sich bei Gruppe A um Fahrzeuge handelt, die überwiegend auf kurzen Strecken im Einsatz sind (Baustellenfahrzeuge und Fahrzeuge für Sondereinsätze), befinden sich in Gruppe B Fahrzeuge mit Kofferaufbauten und großen Ladevolumen, die im Stadt-, Überland- und Fernverkehr eingesetzt werden. Eine aerodynamische Optimierung der Gruppe-A-Fahrzeuge verspricht nur einen geringen Erfolg bei der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Verbesserungen an Gruppe-B-Fahrzeugen jedoch sind aufgrund der relativ hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten und ihrer ebenfalls hohen jährlichen Kilometerlaufleistung sehr aussichtsreich.

## 3.2 Motoranordnung

Es haben sich zwei Motoranordnungen bei Nutzfahrzeugen durchgesetzt:



**Abb. 3.2: Motoranordnungen [6]**

Zum einen das Haubenfahrzeug (s. Abb. 3.2, a)), bei welchem sich der Motor vor der Vorderachse befindet. Daraus ergibt sich eine geringe Geräusentwicklung im Fahrerhaus und Schutz für den Fahrer. Ein Hauber besitzt ferner einen sehr guten Geradeauslauf und Richtungsstabilität aufgrund des langen Radstands. Auch Wartungsarbeiten können sehr einfach durchgeführt werden, da der Motor optimal zugänglich ist. Nachteilig wirkt sich die große Länge der Zugmaschine aus, da die Länge des Gesamtfahrzeugs (mit Auflieger) in manchen Ländern begrenzt und damit die Ladelänge eingeschränkt ist. Haubenfahrzeuge sind in den USA und dem Mittleren Osten weit verbreitet und kommen darüber hinaus in anderen Regionen vereinzelt als Baustellenfahrzeuge vor.

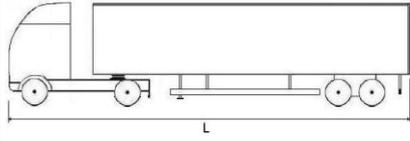
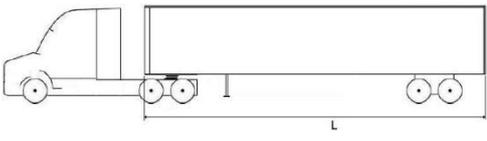
Zum anderen das Frontlenkerfahrzeug (s. Abb. 3.2, b)), bei dem der Motor unterhalb des Fahrerhauses angeordnet ist. Dadurch kann eine maximale Ladelänge gesetzeskonform dargestellt werden. Weitere Vorteile sind die gute Sicht für den Fahrer vor das Fahrzeug auf die Straße und ein kleinerer Wendekreis. Nachteilig sind höhere Motorgeräusche ohne entsprechende Kapselmaßnahmen, ein notwendiger Kippmechanismus des Fahrerhauses, um die Zugänglichkeit zum Motors zu ermöglichen, und höhere leiterartige Einstiege in die Kabine.

## 3.3 Gesetzliche Bestimmungen

Weltweit existieren unterschiedliche Gesetzesvorgaben zur Zulassung von Fahrzeugen. In den einzelnen Ländern sind daher verschiedenartige Vorschriften für die

Konzeption eines Nutzfahrzeugs maßgebend. Im Folgenden werden gesetzliche Bestimmungen der Europäischen Union (EU) [12,13] und den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) [14] vergleichend gegenübergestellt.

**Tab. 3.1: Zulassungsbestimmungen der EU und der USA im Vergleich**

		EU	USA
			
Länge (L)	[m (ft)]	16,50	14,64 (48) **
Höhe	[m (ft)]	4,00	4,15-4,45 (13,6-14,6) ***
Breite	[m (in)]	2,55 *	2,59 (102,36)
max. Geschw.	[km/h (mph)]	80 (50)	89-120 (55-75) ****

Angaben nach 96-53-EG [12] und 2002/7/EG [13]

\* Kühlfahrzeuge 2,60m

Angaben nach U.S. Department of Transportation [14]

\*\* Es wird nur die Aufliegerlänge gemessen, siehe Skizze

\*\*\* Kein staatenweites Gesetz vorhanden, Höhen variieren

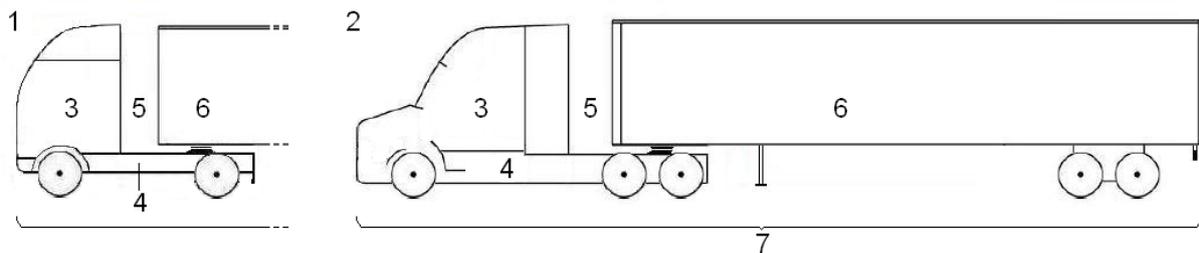
\*\*\*\* Variiert von Staat zu Staat

Wie aus Tab. 3.1 hervorgeht, bestehen grundlegende Unterschiede in der Gesetzgebung für Nutzfahrzeuge zwischen dem europäischen Raum und den Vereinigten Staaten. Dies beginnt bereits bei der Längenmessung des Nutzfahrzeugs. Während in der EU zur Längenbestimmung das gesamte Fahrzeug erfasst wird, wird in den USA nur die Länge des Aufliegers vorgegeben. Auch die gesetzlich erlaubten Höhen- und Breitenabmessungen sowie die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten sind unterschiedlich. In den meisten europäischen Ländern ist eine maximale Höhe von 4,0 m erlaubt, in den Staaten der USA variiert die Höhenbeschränkung zwischen 4,15 m und 4,45 m. Außerdem werden Fahrzeuge in der EU mit einer maximalen Breite von 2,55 m zugelassen (Ausnahme: Kühlfahrzeuge 2,60 m), wogegen in den USA 2,59 m zulässig sind. Darüber hinaus gibt es auch Unterschiede bei der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Während in der EU Nutzfahrzeuge ab 3,5 t zGG nur

80 km/h fahren dürfen, ist es Nutzfahrzeugen in einigen Staaten der USA erlaubt, bis zu 120 km/h schnell zu fahren.

### 3.4 Fahrzeugbeschreibung

Zur Veranschaulichung eines Nutzfahrzeugaufbaus ist dieser in der folgenden Abbildung skizziert (s. Abb. 3.3).



Nr.	Deutsche Bezeichnung	Englische Bezeichnung
1	Frontlenkerfahrzeug	cab over engine
2	Haubenfahrzeug	conventional
3	Fahrerhaus	cabin
4	Fahrgestell	chassis
5	Freiraum	gap
6	Auflieger	trailer (semi-trailer)
7	Sattelzug	tractor / trailer (comb.)

**Abb. 3.3: Nomenklatur Nutzfahrzeug**

Wie bereits in Kap. 3.2 dargestellt, ergeben sich aus unterschiedlichen Motoranordnungen verschiedene Zugmaschinenkonzepte. Diese lassen sich jeweils in die Bereiche „Fahrerhaus“ (Nr. 3) und „Fahrgestell“ (Nr. 4) unterteilen. Durch das Aufsatteln eines Aufliegers (Nr. 6) entsteht zwischen dem Fahrerhaus und dem Auflieger ein Bereich, der als Freiraum (Nr. 5) bezeichnet wird. Die Zugmaschine und der Auflieger bilden zusammen den Sattelzug (Nr. 7).

## **4 Aerodynamik der Nutzfahrzeuge**

Im Folgenden wird die Aerodynamik der Nutzfahrzeuge betrachtet. Dabei wird auf die historische Entwicklung, charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse sowie Entwicklungsinstrumente eingegangen.

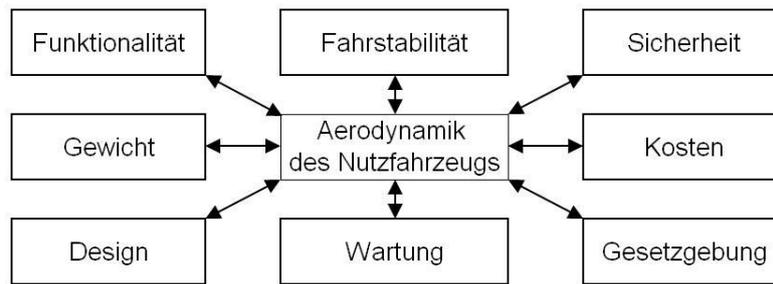
### **4.1 Historische Entwicklung**

Mit dem Beginn des Autobahnbaus in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts eröffnete sich die Möglichkeit, den Personen- und Güterverkehr von der Schiene auf die Straße zu verlagern. Dadurch rückte das Thema Nutzfahrzeugaerodynamik in das Interesse der Ingenieure. Untersuchungen zu Bugradien und später auch Dachspoilern wurden angestellt. Während sich Veränderungen am Fahrzeug über Jahrzehnte hinweg gering hielten, verstärkte sich die Arbeit zur Verbesserung der Aerodynamik von Nutzfahrzeugen im Zuge der Ölkrise der 1970er Jahre. Um Kraftstoff einzusparen, wurde die Fahrerhausform optimiert und mit Hilfe von Anbauteilen, wie Dachspoilern und Luftleitdüsen, sowie abgerundeten Ecken am Auflieger die aerodynamischen Eigenschaften stark verbessert. Diese Entwicklungen stellten Veränderungen am Fahrzeug dar, welche die Umströmung verbesserten, ohne die Grundform des stumpfen Körpers aufzugeben. Dadurch wurde die Funktionalität und Wartungszugänglichkeit der Fahrzeuge nicht negativ beeinflusst und führte daher zu einer schnellen Verbreitung [6,8,11].

Heutzutage unterliegt das Transportwesen in Folge von steigenden Kraftstoffpreisen, Erhöhung von Steuern (Ökosteuer) und der Einführung der Lkw-Maut einer zunehmenden Kostenbelastung. Die Wirtschaftlichkeit rückt daher weiter in den Fokus, um auf dem hart umkämpften Markt des Transportwesens konkurrenzfähig zu bleiben [6].

Unbeachtet von der Transportwirtschaft wurde die Verbesserung der Aerodynamik von Nutzfahrzeugen im Bereich der Forschung weiter vorangetrieben. Die sogenannte „zweite Generation“ [15] von aerodynamischen Verbesserungsmaßnahmen stellt eine Reihe von Konzepten dar, die das Potenzial haben, den Luftwiderstand eines Nutzfahrzeugs weiter zu senken.

Dabei treten jedoch Schwierigkeiten aufgrund unterschiedlicher Anforderungsbe-  
reiche auf (s. Abb. 4.1).



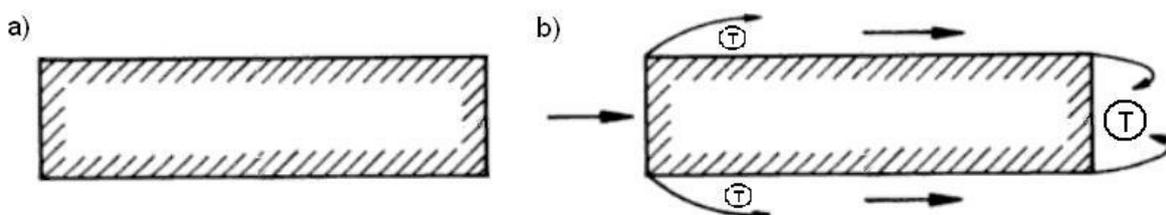
**Abb. 4.1: Spannungsfeld der Nutzfahrzeugaerodynamik [15]**

Abb. 4.1 veranschaulicht, wie die Nutzfahrzeugaerodynamik von vielen Faktoren [15] beeinflusst wird. Wie bereits in Kapitel 3 aufgeführt, spielt die Funktionalität des Fahrzeugs eine sehr wichtige Rolle. Während Gewicht, Design und Wartung sowie Fahrstabilität, Sicherheit und Kosten einschränkende Variablen darstellen, macht die Gesetzgebung feste Vorgaben, die sich nur langfristig verändern lassen (s. Kap. 3.3). All dies stellt Randbedingungen dar, weshalb aerodynamische Maßnahmen trotz vorhandenem Potenzial zur Reduktion des Luftwiderstands und damit zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bisher noch nicht auf den Markt vorgedrungen sind.

## 4.2 Strömungs- und Druckverhältnisse

Am Nutzfahrzeug liegen charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse vor, welche insbesondere auf dessen Formgebung gründen. Die Grundform eines Nutzfahrzeugs kann als stumpfer Körper angesehen werden. Dieser zeichnet sich durch eine stumpfe Front und ein abruptes Abschließen aus.

Zu Beginn wird ein Körper in 2D (s. Abb. 4.2, a) betrachtet:



**Abb. 4.2: Stumpfer Körper (a) und Umströmung des Körpers (b) [16]**

„Die Strömung um stumpfe Körper wird von Ablösungen geprägt; das Fluid kann an bestimmten Stellen der Körperkontur nicht folgen und löst von ihr ab“ [16]. Dies zeigt Abb. 4.2, b):

Die Strömung trifft frontal auf die stumpfe Vorderseite und wird dann zur Seite abgelenkt. An den scharfen Körperkanten kann die Strömung dem Körpverlauf nicht folgen und reißt dort ab. Dadurch bilden sich Gebiete aus, „in denen das Fluid verwirbelt und anscheinend völlig ungeordnet ist“ [16]. Diese werden Totwassergebiete (T) genannt. Stromabwärts kommt es zum Wiederanliegen der Strömung am Körper, bis sie erneut an der scharfen Hinterkante ablöst und sich ein weiterer Totwasserbereich ausbildet.

Totwassergebiete sind Bereiche in Strömungsfeldern, in denen Zähigkeitseffekte dominieren. Dies äußert sich in Mischungsentensiven, instationären Wirbelstrukturen, die oft auch periodisch und instabil sind. Diese Wirbelformationen rufen eine hohe Dissipation hervor, welche zu einem Unterdruck führen können, der zu einer Erhöhung des Strömungswiderstandes des Körpers beiträgt [16].

Die Erkenntnisse der Umströmung eines stumpfen Körpers können auf die Umströmung eines NFZ übertragen werden. Daraus ergibt sich (s. Abb. 4.3) ein Staudruck an der Front des Nutzfahrzeugs, sowie ein Totwassergebiet am Heck des Fahrzeugs, in dem ein Unterdruck bezüglich des Umgebungsdrucks herrscht. Beides wirkt sich negativ auf den Luftwiderstand aus.

Mit zunehmendem Detaillierungsgrad stellt sich das Nfz als Vereinigung von mehreren stumpfen Körpern dar (s. Abb. 4.4). Wenn diese umströmt werden, interagieren die Strömungsanteile der einzelnen Körper miteinander und können sich sowohl vorteilhaft als auch nachteilig auf die Gesamtumströmung auswirken. Bei der Überlagerung der einzelnen Teilströme liegt ein nichtlineares Verhalten vor, weshalb ein Betrachten des Gesamtkörpers zur Studie der Strömungs- und Druckverhältnisse notwendig ist, um eine präzise Aussage treffen zu können.

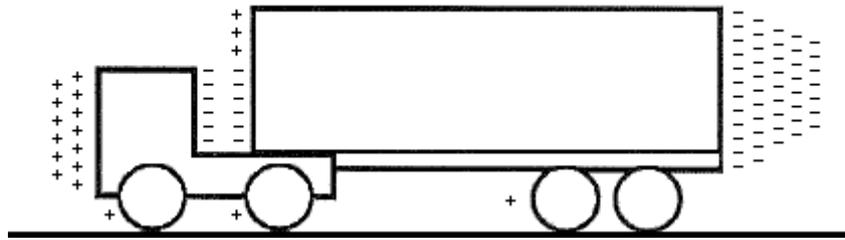


Abb. 4.3: Druckverteilung am Nfz (schematische Darstellung) [10]

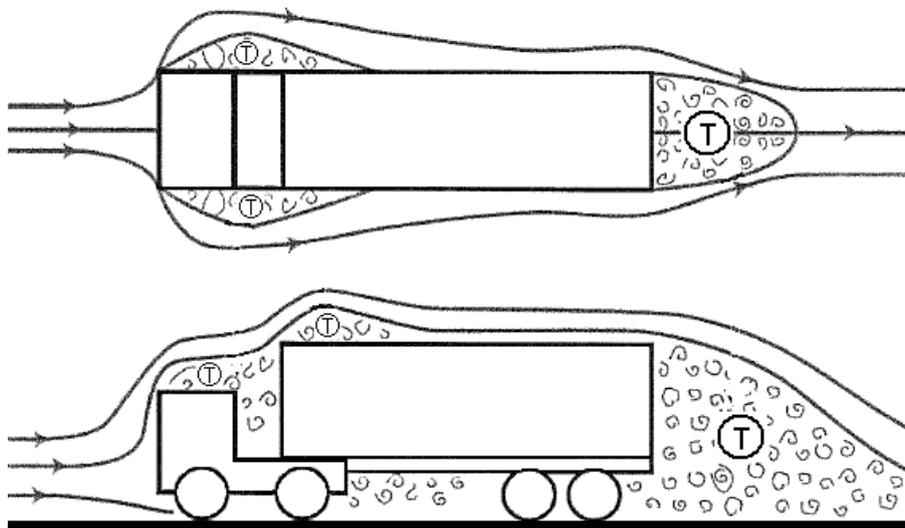


Abb. 4.4: Umströmung eines Nfz (schematische Darstellung) [10]

Der beim Umströmen des Fahrzeugs hervorgerufene Luftwiderstand setzt sich aus dem Druck- und Reibungswiderstand (s. Kap. 2.2.2) zusammen. Eine weitere Form der Unterteilung des Luftwiderstandes ist die Zerlegung in Teilwiderstände. Sie können unterschieden werden in:

- Formwiderstand      Dieser beschreibt den „Widerstand des glatte Grundkörpers ohne Anbauteile und Oberflächen-gliederung bei Null-Auftrieb“ [7].
- Induzierter Widerstand      Hierdurch wird die „Folge der drei-dimensionalen Umströmung des mit Auftrieb oder Abtrieb behaf-teten Körpers unter Aufbau eines Randwirbel-systems“ [7] verstanden.

- **Kühlluftwiderstand**      Stellt den inneren Widerstand dar, der die Durchströmung des Motorraums, Fahrgastraums sowie die Bremsendurchströmung beinhaltet. Dieser wird durch Impuls- und Reibungsverluste hervorgerufen [8].
- **Rauigkeitswiderstand**      Unter idealen Anströmbedingungen besitzen Anbauteile und die Oberflächengliederung einen Eigenwiderstand, welcher Rauigkeitswiderstand genannt wird.
- **Interferenzwiderstand**      Bei diesem Widerstand handelt es sich um einen Widerstandsanteil, der durch die gegenseitige Beeinflussung von Anbauteilen und dem Grundkörper hervorgerufen wird.

Es ergibt sich daraus eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Strömungs- und Druckverhältnisse eines Nutzfahrzeugs zu beeinflussen und so dessen Luftwiderstand zu senken.

## **4.3 Entwicklungsinstrumente**

In der Aerodynamikentwicklung gibt es grundsätzlich drei unterschiedliche Herangehensweisen zur Untersuchung von Strömungen: Analytische und numerische Methoden sowie Experimente [7]. Während bei analytischen Methoden nur eine ideale Umströmung von einfachen Körpern zu bewältigen ist, können mit numerischen Methoden Umströmungen von komplizierten Körpern simuliert werden. Bei Experimenten ist eine Untersuchung eines Modells in verschiedenen Maßstäben bis hin zum 1:1 Fahrzeug möglich, um die Umströmung des Fahrzeugs zu analysieren.

### **4.3.1 Analytische und numerische Strömungsberechnung**

„Analytische Methoden liefern schnelle und geschlossene Lösungen“ [7], jedoch erfordern sie starke Vereinfachungen der Randbedingungen. Dadurch resultieren nur eingeschränkt präzise Ergebnisse.

Die Numerische Strömungsberechnung (CFD) ist ein Verfahren, um strömungsmechanische Aufgaben mit Hilfe einer computerbasierten Simulation zu lösen.

Seinen Ursprung hat diese Methode in der Luft- und Raumfahrttechnik. Durch stetig wachsende Rechenkapazitäten bei gleichzeitig abnehmenden Kosten rückt diese Entwicklungsmethode zunehmend in die Entwicklung von Fahrzeugen vor [17]. Eine 3D-Strömungssimulation kann Aufschluss über Strömungen liefern, die mit Hilfe von Messtechnik nicht oder nur sehr aufwendig zu erfassen sind (z.B. Erfassung gesamter Strömungsfelder). Dadurch wird das Verständnis von komplexen Strömungsvorgängen erleichtert [7]. Weiter kann ein CFD-Verfahren kürzere Entwicklungszeiten ermöglichen, bietet eine hohe Flexibilität und verursacht häufig geringere Kosten als eine experimentelle Untersuchung [8]. All den Vorzügen steht jedoch entgegen, dass die der Simulation zugrunde liegenden Gleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen, Lattice-Boltzmann-Gleichung) nur näherungsweise gelöst werden können, da der Berechnungsaufwand zur exakten Lösung dieser Gleichungen zu aufwändig ist. Diese näherungsweise Lösung führt Fehler und somit Ungenauigkeit in den Ergebnissen mit sich [17].

### **4.3.2 Experimente**

Mittels einer Straßenmessung kann ein Fahrzeug unter realen Bedingungen getestet werden, denen es später im Straßenverkehr ausgesetzt ist. Eine solche Messung unterliegt einer Reihe von äußeren Einflüssen. Das Fahrverhalten des Fahrers, die Topographie sowie das Verkehrsgeschehen und insbesondere die Wetterverhältnisse (Wind/Feuchtigkeit/Lufttemperatur) [7] bestimmen ein weites Feld variierender Randbedingungen, die einen Vergleich von Versuchsfahrten auf der Straße sehr erschweren.

Um reproduzierbare und witterungsunabhängige Messbedingungen zu erhalten, können 1:1 Windkanalmessungen eingesetzt werden [8]. Aerodynamische Optimierungen und Veränderungen können im Windkanal im Detail vorgenommen und so das Fahrzeug schrittweise verbessert werden. Das Wiegen von Kräften zur Bestimmung des Luftwiderstands ist im 1:1 Windkanal einfach durchzuführen. Messungen von Druck und Geschwindigkeiten über große Flächen hinweg sind jedoch aufwendig und teuer. Ebenfalls zeit- und kostspielig ist die 1:1 Modellerstellung, sofern noch keine Prototypen zur Verfügung stehen. Abweichungen im Vergleich zur realen Fahrzeugumströmung ergeben sich aufgrund der „windkanalspezifischen Bodengrenzschicht“ [7], welche die Messergebnisse beeinflusst. Weitere Schwierigkeiten berei-

ten die Abmessungen der Nutzfahrzeuge. Aufgrund dieser werden Nutzfahrzeuge in „konventionellen Windkanälen“ [7] nur mit stehenden Rädern und nichtbewegtem Boden vermessen werden. Darüber hinaus bedingen die mächtige Stirnfläche (Ver-sperrung) sowie die große Länge (Messstreckenabmessung) des Gesamtfahrzeugs große Windkanalabmessungen [8]. Weltweit gibt es nur vereinzelt Windkanäle, in denen Messungen eines gesamten Sattelzugs vorgenommen werden können (z.B. Deutsch Niederländischer Windkanal (DNW), Niederlande)) [6].

Da die Durchführung von 1:1 Windkanalmessungen sehr kostenintensiv ist, werden Untersuchungen an Modellen in verkleinertem Maßstab vorgenommen. Diese werden in einem Modellwindkanal durchgeführt. Um korrekte Ergebnisse, welche die aerodynamischen Eigenschaften der Großausführung widerspiegeln, zu erhalten, muss geometrische Ähnlichkeit gewährleistet sein. Dies ist der Fall, wenn sämtliche geometrische Details an Modell und Großausführung identisch sind und die Reynolds-zahlen für Modell und Originalausführung übereinstimmen [8].

Die Reynoldszahl (Re-Zahl) ist eine dimensionslose Kennzahl und ist definiert als:

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} = \frac{u * L}{\nu} \quad (4.1)$$

u Anströmgeschwindigkeit

L charakteristische Länge (z.B. beim Nfz:  $L = \sqrt{A}$  mit A: Fahrzeugstirnfläche)

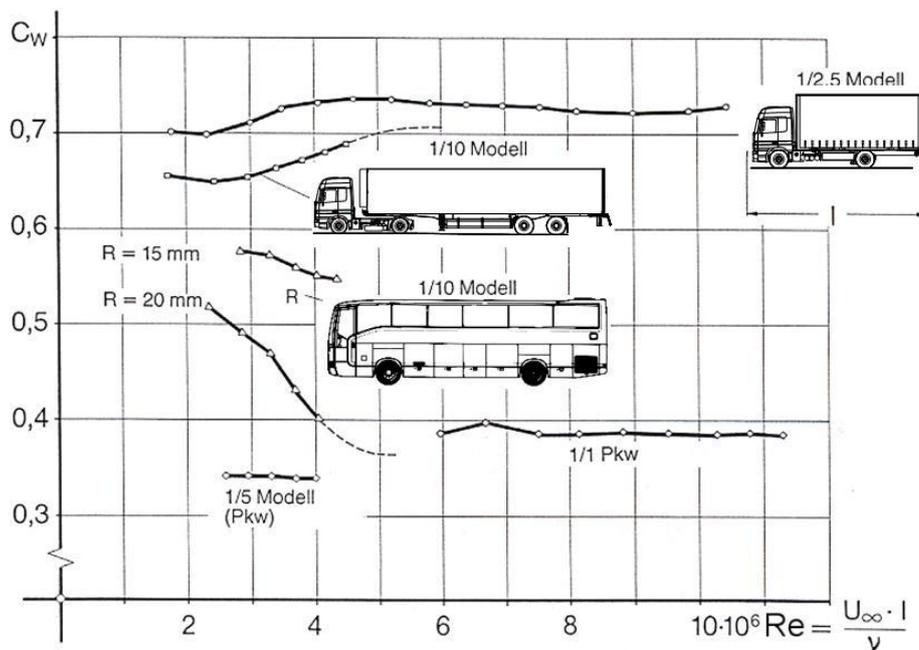
$\nu$  kinematische Zähigkeit

Bei der Veränderung der Größe (charakteristische Länge L) des angeströmten Fahrzeugs muss zur Erlangung gleicher Re-Zahlen (s. Gl. (4.1)) die Anströmgeschwindigkeit u angepasst werden. Bei einer Reduktion der Fahrzeuggröße ist daher eine Geschwindigkeitserhöhung im selben Maße notwendig.

Um zum Beispiel einen Versuch im Maßstab 1:4 durchzuführen, wird eine Anströmgeschwindigkeit im Modellwindkanal von  $u = 290$  km/h benötigt, welches einer Fahrgeschwindigkeit von 72 km/h am realen Fahrzeug entspricht [6]. Diese Werte offenbaren, welcher enormer Aufwand für einen Aerodynamikmodellversuch aufgebracht werden muss. Dieser erstreckt sich nicht nur über den Betrieb des Modellwindkanals,

sondern beginnt bereits bei der Erstellung eines Modells mit höchstem Detaillierungsgrad, das den enormen Belastungen während des Versuches standhalten muss.

Da fertigungsbedingt ein identischer Detaillierungsgrad am Modell nicht zu realisieren ist, kommt es zu Ungenauigkeiten in der Modellmessung. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Realisierung der identischen Re-Zahl, welche gleiche Strömungsverhältnisse gewährleistet, für Modell und Großausführung dar. Dies ist dringend erforderlich, da, wie Versuche gezeigt haben, der  $c_W$ -Wert eines Fahrzeugs stark von der Re-Zahl abhängig ist (s. Abb. 4.5).



**Abb. 4.5: Einfluss der Reynoldszahl auf den  $c_W$ -Wert [8]**

Darüber hinaus muss die Mach-Zahl berücksichtigt werden [8]. Diese stellt ebenfalls eine dimensionslose Kennzahl dar, die Einfluss auf den  $c_W$ -Wert eines Modells im Windkanal hat.

$$Ma_\infty = \frac{u_\infty}{a} \quad (4.2)$$

u Anströmgeschwindigkeit

a Schallgeschwindigkeit

Dabei ist zu beachten, dass „die Faustregel, dass bis  $Ma_\infty = 0,3$  die Kompressibilität der Luft vernachlässigt werden kann“ [8], für Fahrzeuge nicht ohne weiteres übernommen werden darf. Denn aufgrund „der Völligkeit und wegen starken Krümmungen der Kontur treten an Fahrzeugen örtlich hohe Übergeschwindigkeiten auf“ [8]. Diese führen zu einem Widerstandsanstieg aufgrund der Kompressibilität. Hucho empfiehlt daher  $Ma_\infty = 0,2$  nicht zu überschreiten und die Anströmgeschwindigkeit auf circa  $u_\infty = 70$  [m/s] zu begrenzen.

Weitere Hindernisse einer Modellkanalmessung stellen die endliche Messstrecke, Versperrungseffekte und die nur bedingt mögliche Fahrbahnsimulation dar.

Allen Schwierigkeiten zum Trotz stellen Modellwindkanalversuche eine wichtige Komponente in der Nutzfahrzeugentwicklung dar, da diese in einem frühen Entwicklungsstadium durchgeführt werden können [6]. Die verwendeten Modelle und Versuchseinrichtungen geringerer Abmaße liefern zudem qualitative Voruntersuchungen, die kostengünstig zu erlangen sind [8].

## 5 Fokussierung spezieller Bereiche am Nutzfahrzeug

In diesem Kapitel werden zunächst die Bereiche vorgestellt, die einen Einfluss auf den Luftwiderstand eines Nutzfahrzeugs haben. Im Anschluss daran werden Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

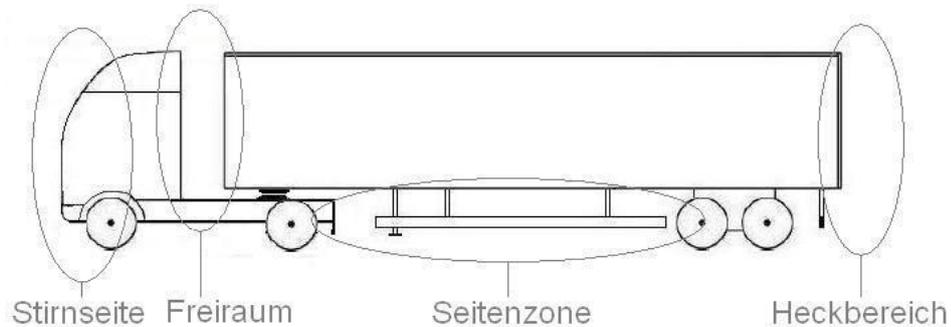
Mit Hilfe von CFD-Berechnungen oder Windkanalmessungen können die Strömungs- und Druckverhältnisse am Fahrzeug ermittelt und so Zonen gefunden werden, die besonderen Einfluss auf den Luftwiderstand des Nutzfahrzeugs haben [6].



**Abb. 5.1: Luftwiderstandsentwicklung entlang eines Sattelzugs [6]**

In [Abb. 5.1](#) ist die Entwicklung des Luftwiderstandes entlang der Fahrzeuglängsachse eines Sattelzuges kumulativ aufgetragen. Daraus wird ersichtlich, dass der an der Front herrschende Staudruck (s. Kap. 4.2) einen Anstieg im Luftwiderstand hervorruft. Eine Reduktion dessen führt die im Anschluss am Dach anliegende Strömung herbei. Der darauf folgende Freiraum zwischen der Zugmaschine und dem Auflieger hat einen sehr hohen Einfluss auf die Luftwiderstandskräfte am Fahrzeug. Da an der Rückwand der Zugmaschine ein Unterdruck herrscht, steigt der Luftwiderstand stark an. Jedoch liegt auch an der Vorderseite des Aufliegers ein Unterdruck vor, wodurch die zuvor hervorgerufene Widerstandszunahme kompensiert werden kann. Aufgrund eines zerklüfteten Unterbaus schließt sich im weiteren Verlauf des Aufliegers eine stetige Zunahme des Luftwiderstandes an. Durch den stumpfen Abschluss des Hecks wird auch hier ein sehr großer Anteil des Luftwiderstandes erzeugt [6].

Größtes Potenzial zur Verbesserung der Nutzfahrzeugaerodynamik bieten die Stirnseite der Zugmaschine, der Freiraum zwischen Fahrerhaus und Stirnwand des Sattelauflegers sowie der Seiten- und Heckbereich des Auflegers (s. [Abb. 5.2](#)).



**Abb. 5.2: Dominierende Luftwiderstandsbereiche [6]**

Laut [15] ergibt sich bei realen Windverhältnissen eine Verteilung der Luftwiderstände von Zugmaschine zu Auflieger im Verhältnis von 40% zu 60%. Dies bestätigt, dass nicht nur ein Augenmerk auf die Sattelzugmaschinen gelegt werden muss, sondern auch der Auflieger eine enorme Auswirkung auf den Luftwiderstand des Gesamtzuges hat.

Während in Europa nur vereinzelt Veröffentlichungen zum Thema Nutzfahrzeugaerodynamik vorhanden sind, gibt es eine Vielzahl von Versuchsergebnissen aus Nordamerika. Insbesondere das US Department of Energy (DOE) und das National Research Council of Canada (NRC) vergeben Forschungsgelder zur Untersuchung der Nutzfahrzeugaerodynamik. Dabei befassen sich die Untersuchungen, die auf CFD-Berechnungen, Windkanal- und Straßenverkehrsversuchen basieren, hauptsächlich mit Fernverkehrsfahrzeugen in Form von Sattelzügen, da dort das größte Reduzierungspotenzial (s. Kap. 1) vorhanden ist.

Aufgrund der vorhandenen experimentellen Daten beschränkt sich diese Arbeit auf Sattelzüge. Da nicht ausreichend Messungen zur Verfügung stehen, um repräsentative Vergleiche von Solo-Lastkraftwagen und Gliederzügen anstellen zu können, werden diese nicht behandelt. Hierfür wird auf weiterführende Literatur [18] verwiesen.

Die Versuche zur Nfz-Aerodynamik wurden von verschiedenen Institutionen, an verschiedenen Orten und mit unterschiedlichen Fahrzeugen durchgeführt. Daher unterliegen sie unterschiedlichen Randbedingungen, weshalb sich ein Vergleich der Messergebnisse schwierig gestaltet. Es kann daher nur eine näherungsweise Bewertung erfolgen. Die erzielten Verbesserungen sind auf das verwendete Basisfahrzeug bezogen und können bei der Umsetzung der Maßnahmen zu abweichenden Ergebnissen führen, da deren Auswirkungen vom Fahrzeug, deren Anbringung sowie ihrer Verwendung abhängen.

Zum Vergleich werden Änderungen im  $c_w$ -Wert aufgeführt. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Bilanzierung der Auswirkungen der Optimierungsmaßnahmen auf Basis der Reduktion des Kraftstoffbedarfs. Dies birgt jedoch aufgrund unterschiedlicher Fahrzeuge, Motorisierungen, Fahrer etc., weitere Unsicherheitsfaktoren, die die Vergleichbarkeit der zur Verfügung stehenden Daten weiter erschweren.

In den folgenden Kapiteln wird die Optimierung eines Frontlenkerfahrzeugs in vier Abschnitten behandelt. Die Bereiche Fahrerhaus, Fahrgestell und Auflieger werden zuerst getrennt voneinander und anschließend als Gesamtfahrzeugkonfiguration betrachtet. Innerhalb der Abschnitte werden zuerst die Grundlagen und Entwicklungen aufgezeigt, die bereits weit verbreitet im Nutzfahrzeugbereich eingesetzt werden. Es folgen darauf, unter Einbindung von Ergebnissen aus veröffentlichten Studien, Ansätze von Entwicklungen, die weiteres Potenzial zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften eines Nfz bieten.

Die Abhandlung der Theorie wird auf Basis eines Frontlenkerfahrzeugs durchgeführt.

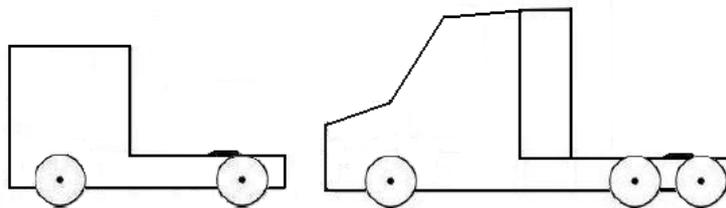
Da es nicht ausreichend Veröffentlichungen auf Basis von Frontlenkerfahrzeugen gibt, werden Ergebnisse aus Studien, die sich zum Teil auf Haubenfahrzeuge stützen, mit einbezogen und im Folgenden mit „(H)“ gekennzeichnet.

## **5.1 Fahrerhaus**

In diesem Kapitel wird der Bereich des Fahrerhauses betrachtet. Dieser prägt maßgeblich den vorderen Bereich des Fahrzeugs und hat daher einen großen Einfluss auf dessen Aerodynamik.

### 5.1.1 Grundform

Beim Vergleich der Grundform einer Frontlenker-Sattelzugmaschine mit der eines Haubenfahrzeugs (s. Abb. 5.3) werden grundlegende Unterschiede ersichtlich. Während es sich bei der Frontlenkerkabine um eine prismenförmige Grundform handelt, weist der Hauber eine keilförmige Grundform auf. Diese wirkt sich strömungsgünstig aus, weshalb das Haubenfahrzeug dem Frontlenker im Vergleich der  $c_W$ -Werte mit  $\square c_W = 0,05$  [19] überlegen ist. Dieser Umstand ist zu beachten, wenn Messergebnisse unterschiedlicher Zugmaschinenbauformen vorliegen.



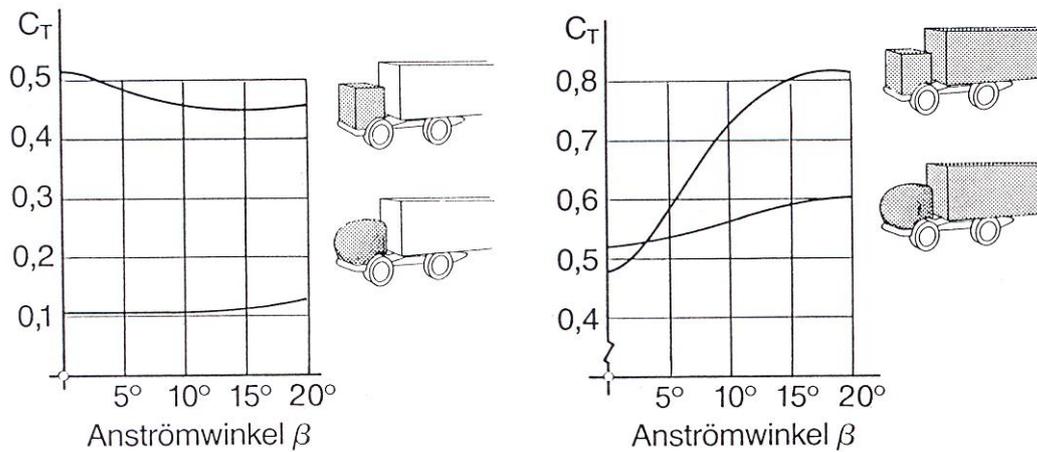
**Abb. 5.3: Zugmaschinen-Grundformen**

Da die Gesamtlänge eines Fahrzeugs festgeschrieben ist (s. Kap. 3.3) und eine maximale Ladelänge erlangt werden soll, steht beim Frontlenker nur ein sehr begrenzter Bauraum zur Gestaltung des Fahrerhauses zur Verfügung. Laut [20] sind es nur ca. 2,30 m Länge auf denen eine Fahrerhauskabine den funktionellen, design-technischen sowie auch aerodynamischen Ansprüchen gerecht werden muss. Eine detaillierte Optimierung der Kabine ist daher unabdingbar.

Wie oben aufgeführt (s. Kap. 4.2) stellt ein Nutzfahrzeug in der Grundform einen stumpfen Körper mit scharfen Kanten und einer großen Stirnfläche dar. Um das Umströmungsverhalten und damit den Luftwiderstand zu verbessern, muss die Front des Fahrzeugs „rund“ gestaltet werden. Die Wirkung einer rund gestalteten Fahrerhausform wird aus Abb. 5.4 ersichtlich.

Das Fahrerhaus allein betrachtet (s. Abb. 5.4, links) bewirkt die runde Gestaltung des Fahrerhauses eine erhebliche Reduzierung des  $c_T$ -Wertes. Unter Einbezug des Aufbaus des Nutzfahrzeugs (s. Abb. 5.4, rechts), nähern sich die  $c_T$ -Werte bei gerader Anströmung einander an. Unter Einfluss des Anströmwinkels  $\beta$  zeigt sich jedoch weiterhin eine bedeutende Verbesserung. Aus diesen Schaubildern wird ersichtlich, dass die Gestaltung der Front einen sehr großen Einfluss auf den Luftwiderstand

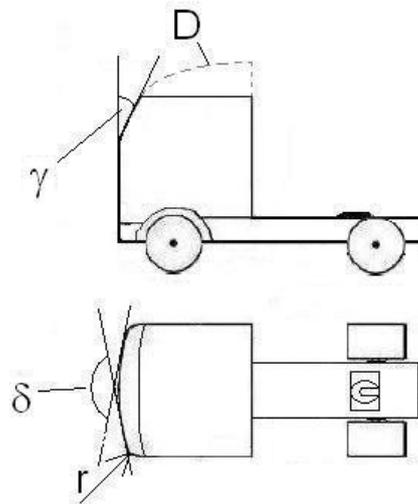
eines NFZ hat. Sie zeigt indirekt auch, dass der Luftwiderstand umso kleiner ist, je geringer der Staudruck gehalten wird [6].



**Abb. 5.4: Einfluss der Fahrerhausformgebung [8]**

Aufgrund von funktionalen Aspekten ist ein „kugelförmiges“ Fahrerhaus jedoch nicht zu verwirklichen. Daher wird versucht, die prismenförmige Grundgestalt der Fahrerhauskabine mit folgenden Parametern den Ansprüchen (s. Kap. 4.1) entsprechend zu formen (s. Abb. 5.5) [21]:

- Dachform  $D$
- Windschutzscheibenanstellwinkel  $\gamma$
- Keilwinkel  $\delta$
- Eckkantenradius  $r$



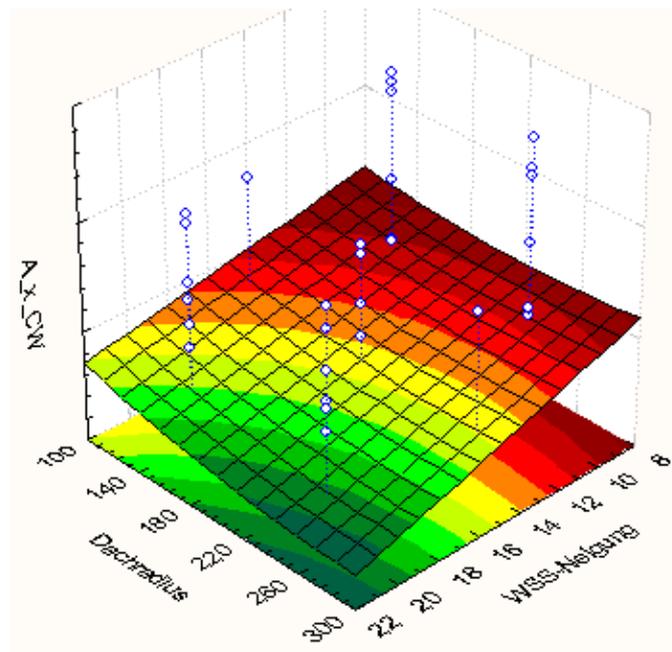
**Abb. 5.5: Gestaltungsparameter der Fahrerhausgrundform [21]**

Darüber hinaus sind die Gesamthöhe, die Fahrerhausbreite und der Dachvorderkantenradius wichtige Parameter, die die aerodynamische Güte eines Lkw-Fahrer-

hauses beeinflussen. Bisherige Untersuchungen während der Entwicklung einer neuen Fahrzeuggeneration zeigen, dass eine einzelne Betrachtung eines Parameters nicht zu der angestrebten Reduzierung des Luftwiderstandes führt. Um die Wechselwirkung der einzelnen Parameter zueinander aufzuzeigen, wurden Untersuchungen an einem maßstabsgerechten Modell im Windkanal durchgeführt.

Die Auswertung dieser Parameterstudie zeigt deutlich, dass die verschiedenen Parameter im Zusammenspiel betrachtet werden müssen. Wie aus Abb. 5.6 ersichtlich, ist der Einfluss eines Parameters auf den Luftwiderstand vom Wert des anderen Parameters abhängig.

Betrachtet man den Verlauf des Wertes für den Luftwiderstand bei einer Windschutzscheibenneigung von  $10^\circ$ , zeigt sich, dass mit einer Vergrößerung des Dachvorderkantenradius über ca. 200 mm keine weitere Optimierung möglich ist. Der positive Effekt eines größeren Dachvorderkantenradius ergibt sich erst wieder bei steigendem Neigungswinkel für die Windschutzscheibe. Für den Entwickler bedeutet dies, dass die Werte der einzelnen Parameter aufeinander abgestimmt werden müssen. Es ergibt sich dadurch aber auch die Chance, vorgegebene, für den Luftwiderstand nicht optimale Parameter durch die Anpassung anderer Parameter auszugleichen.



**Abb. 5.6: Fahrerhaus Parameterstudie [57]**

Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, den Luftwiderstand einer Zugmaschine durch Anbauteile und Detailoptimierungen zu verbessern. Diese werden im Folgenden aufgezeigt.

### 5.1.2 Fahrerhausradien

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, stellen Eckradien an der Fahrerhauskabine eine wichtige Komponente der Optimierung dar. Das Ablösen der das Fahrerhaus umströmenden Luft an den vorderen Fahrerhausecken wird durch entsprechende Eckradien vermieden. Bei Geschwindigkeiten um 80 km/h ist laut [10] die Anbringung eines Radius von 75 mm ausreichend. Durch die Unterbindung von Ablösungen kann der  $c_w$ -Wert (nur Zugmaschine, ohne Auflieger betrachtet) damit von 1,15 auf 0,6 abgesenkt werden [10].

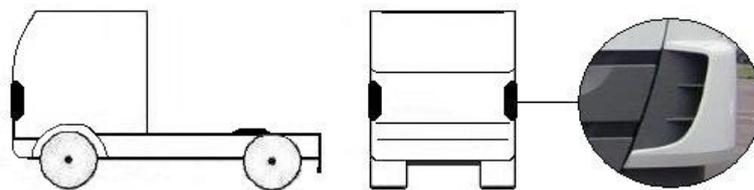


**Abb. 5.7: Vermeidung der Strömungsablösung durch vergrößerte Frontradien [58]**

Eine weitere Möglichkeit, ein Ablösen der Strömung an den Kanten zu unterbinden, bieten an den Ecken angebrachte Luftleitdüsen (s. [Abb. 5.8](#)). Diese Düsen werden an den Außenkanten des Fahrerhauses unterhalb der Windschutzscheibe angebracht und leiten die Luftströmung um die Fahrerhausecken. Konstruktiv sollte eine derartige Luftleitdüse ebenfalls einen Mindestradius von 75 mm an der Außen-

seite aufweisen. Dadurch kann eine Verringerung des  $\overline{c_w}$ -Wertes um weitere 0,02 [10] herbeigeführt werden.

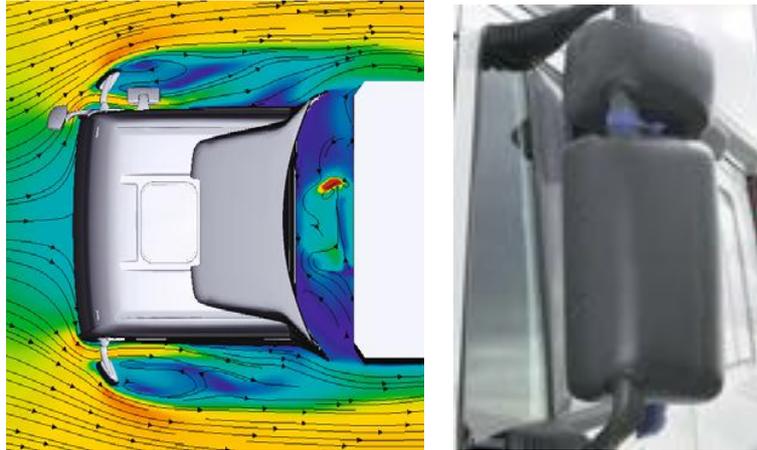
Darüber hinaus kann durch die Anbringung derartiger Düsen die Strömung an der Seite des Fahrzeugs gezielt beeinflusst werden, um so eine Verschmutzung der Seitenwand zu verringern. Dies hat sowohl sicherheits- als auch komfortrelevante Vorteile. Die Sicht durch die Seitenscheibe und auf den Seitenspiegel kann dadurch sichergestellt sowie Verschmutzungen im Einstiegsbereich des Fahrers können vermieden werden [6].



**Abb. 5.8: Luftleitdüse [22]**

### 5.1.3 Gestaltung der A-Säule und der Außenspiegel

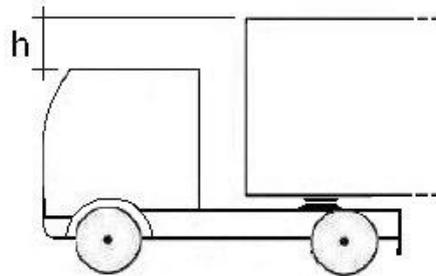
Das Anbringen von Spiegeln (s. Abb. 5.9) an Kraftfahrzeugen ist gesetzlich vorgeschrieben [23]. Da die Spiegel die Umströmung des Fahrzeugs stören, stellen diese zusammen in Verbindung mit der A-Säule einen weiteren Bereich möglicher aerodynamischer Optimierung dar. Ziel ist es, das Spiegelgehäuse möglichst klein und strömungsgünstig zu gestalten, damit der Staudruck und das Nachlaufgebiet hinter dem Spiegel so klein wie möglich ausfällt [6]. Bei geschickter Anbringung und Formgebung übernehmen die Spiegel eine Leitfunktion der Strömung an der Fahrzeugseitenwand und bewirken dadurch eine Verbesserung des Luftwiderstands [20]. Es kann durch gezielte Formgebung eine  $\overline{c_w}$ -Wertreduktion von 0.01 erreicht werden [10].



**Abb. 5.9: Außenspiegel [6,24]**

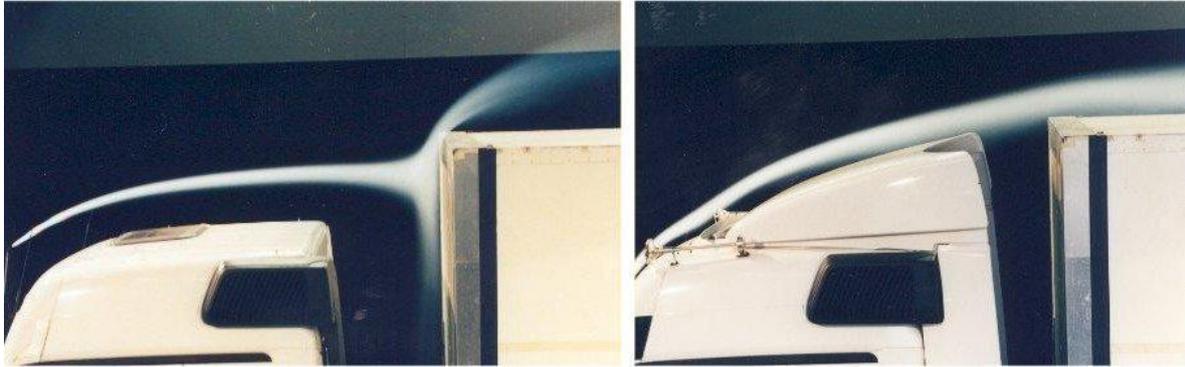
### 5.1.4 Fahrerhaushöhe

Einen weiteren Punkt stellen die Fahrerhausabmessungen im Vergleich zu den Abmaßen des Aufliegers dar (s. Abb. 5.10). Um eine optimale Umströmung des Zugmaschinen-Auflieger-Gespans zu gewährleisten, sollte das Fahrerhaus die gleiche Höhe wie der Auflieger vorweisen ( $h \rightarrow 0$ ).



**Abb. 5.10: Aufbauhöhe  $h$  über dem Fahrerhaus**

Dies kann zum einen durch ein entsprechend hohes Kabinendach des Fahrzeugs gewährleistet oder durch Anbauteile erreicht werden.

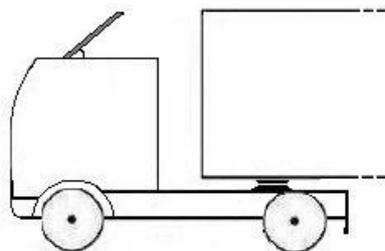


**Abb. 5.11: Frontale Anströmung eines Nutzfahrzeugs [8]**

(links: ohne Windleitkörper, rechts: mit Windleitkörper)

Mittels Windabweisern auf dem Dach des Fahrerhauses kann eine frontale Anströmung der Aufliegervorderseite (s. Abb. 5.11, links) vermieden werden. Durch einen so optimierten Übergang (s. Abb. 5.11, rechts) zwischen den vorderen Dachkanten des Fahrerhauses und des Aufliegers kann sowohl frontale Anströmung als auch Ablösung verhindert und damit der Luftwiderstand gesenkt werden [10].

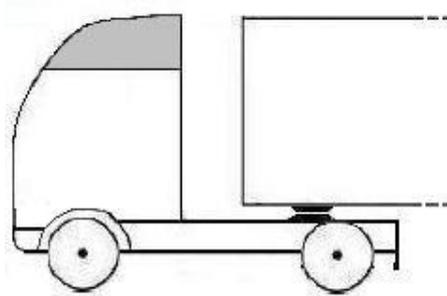
Derartige Anbauteile gibt es in verschiedenen Ausführungen. Das Windleitschild bzw. der Windleitkörper sind die verbreitetsten..



**Abb. 5.12: Windleitschild**

Das Windleitschild ist ein plattenförmiger Körper, der auf dem Dach schräg angebracht wird (s. Abb. 5.12). Es zeichnet sich durch eine einfache Anbringung und Handhabung aus. Flexibel kann der Anstellwinkel und somit seine Höhe optimal je nach Bedarf eingestellt werden. Dies ist von großem Vorteil, wenn häufig die Aufliegerhöhe wechselt oder Fahrten ohne Auflieger durchgeführt werden. Dadurch kann

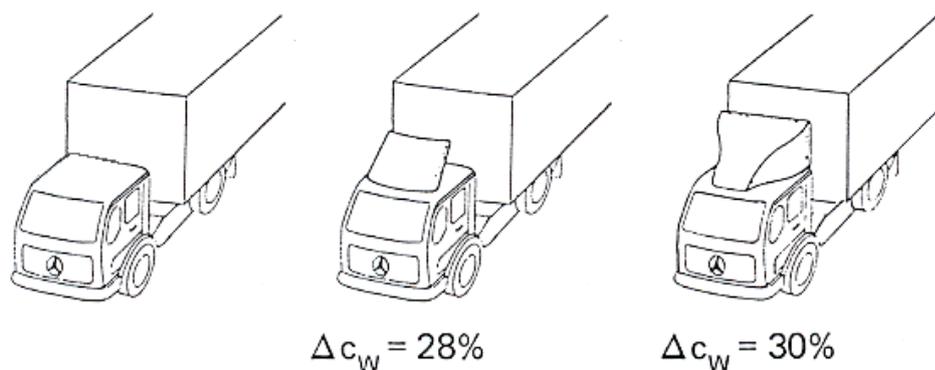
mit einfachen Mitteln eine große Wirkung auf den Luftwiderstand des Fahrzeugs erreicht werden. Verminderte Wirkung hat das Windleitschild allerdings bei Seitenwind.



**Abb. 5.13: Windleitkörper**

Hierfür stellt ein dreidimensional gestalteter Windleitkörper eine optimale Lösung dar (s. [Abb. 5.13](#)). Dieser wird sowohl auf die Zugmaschine als auch auf den Auflieger angepasst und leitet somit die umströmende Luft optimal vom Fahrerhaus auf den Auflieger über (s. [Abb. 5.11](#), rechts) und kann auch bei Seitenwind seine volle Wirkung entfalten. Lediglich bei der Justierung hat der Windleitkörper Nachteile, da er nur eingeschränkt verstellbar und somit nur bei relativ konstanten Aufliegeraufbauhöhen sinnvoll einzusetzen ist [24].

In [Abb. 5.14](#) sind die erzielbaren Verbesserungen des  $c_w$ -Wertes eines Sattelzugs unter Einfluss eines Dachwindleitteils abgebildet.



**Abb. 5.14: Luftwiderstandsverbesserungen aufgrund von Windleitteilen [8]**

### 5.1.5 Zubehöranbauteile

Nutzfahrzeuge weisen einen hohen Individualisierungsgrad auf. So bringen viele Fahrer Sonderausstattung, wie Sonnenblenden, Lichter und Signalhörner, an der Fahrzeugfront und dem Dach an [6]. Dies beeinflusst die Umströmung des Fahrzeugs.



**Abb. 5.15: Sonnenblende [25]**

Sonnenblenden (s. [Abb. 5.15](#)) haben die Funktion, den Fahrer vor störender Sonneneinstrahlung zu schützen. Sie können darüber hinaus durch ihre Formgebung eine Leitfunktion aufweisen und so eine Reduzierung des Luftwiderstandes herbeiführen. Eine Verwendung in Verbindung mit einem Windleitkörper ist sinnvoll und kann laut [10] damit zu einer Senkung des  $\overline{c_w}$ -Werts von 0,11 führen.

Das Anbringen von Scheinwerfern und Signalhörnern (s. [Abb. 5.16](#)), an der Front und dem Dach des Fahrzeugs führt zu einer Erhöhung der Rauigkeit. Dies kann sowohl die Umströmung als auch die Kühlluftdurchströmung des Fahrzeugs behindern

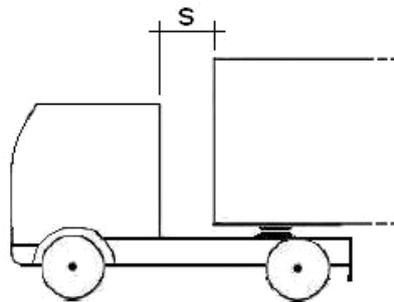


**Abb. 5.16: Scheinwerfer und Signalhörner [26]**

und sich so auf dieses negativ auswirken. Eine Verschlechterung des  $\overline{c_w}$ -Wertes um 0,005 ist möglich [10].

### 5.1.6 Fahrerhausrückseite

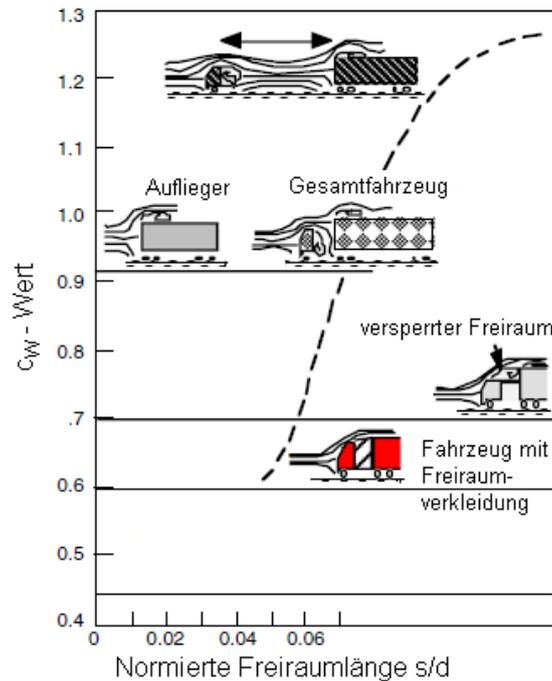
Im Freiraum zwischen Fahrerhaus und Auflieger (s. Abb. 5.17) entstehen bei der Umströmung des Fahrzeugs Verwirbelungen, die den Luftwiderstand erhöhen (s. Kap. 4.2). Um eine Verbesserung des Luftwiderstandes herbeizuführen, ist das Ziel, diese Verwirbelungen zu minimieren.



**Abb. 5.17: Freiraumlänge s**

Dies kann durch eine Minimierung der Freiraumlänge  $s$  erfolgen. Ein Freiraum ist grundsätzlich erforderlich, damit der Auflieger ausreichend Bewegungsfreiheit bei Kurvenfahrt und auf nicht ebener Fahrbahn hat. Eine Reduktion der Freiraumlänge wirkt sich jedoch nicht nur auf den Luftwiderstand positiv aus, sondern auch auf die Fahrstabilität bei Seitenwind [10].

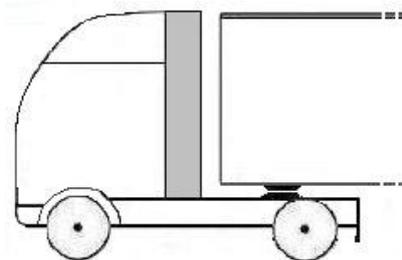
Untersuchungen haben gezeigt, dass der Freiraum einen großen Einfluss auf den Luftwiderstand hat.



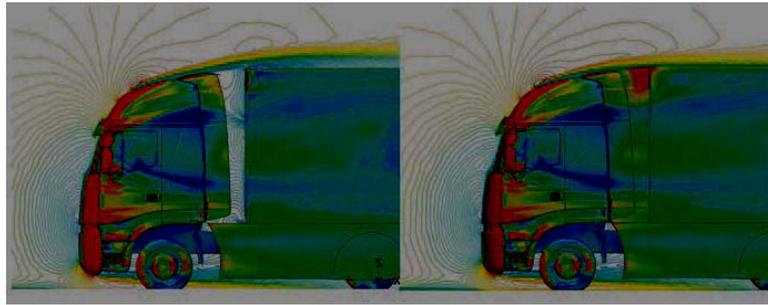
**Abb. 5.18: Luftwiderstand über Freiraumlänge  $s/d$  [15]**

Abb. 5.18 zeigt den  $c_w$ -Wert in Abhängigkeit der normierten Freiraumlänge  $s/d$  (mit charakteristischer Länge  $d$ , basierend auf der Stirnfläche  $A$ ). Anhand der stark ansteigenden Kurve wird der große Einfluss des Freiraumes auf den Luftwiderstand eines NFZ ersichtlich und eröffnet das Potenzial an möglicher Verbesserung.

Eine weitere Methode, den Freiraumbereich zu optimieren, stellt das Anbringen von Endkantenklappen (EKK) (s. Abb. 5.19) dar. Diese schirmen den Freiraum seitlich ab und verhindern so das Einströmen der Luft. Durch das Vorbeileiten reduzieren sich die Verwirbelungen und der Druckverlust innerhalb des Freiraumes. Dies wirkt sich insbesondere bei Schräganströmung aus [27]. Ziel ist es, den Freiraum möglichst weit abzudecken, dabei darf es jedoch nicht zur Kollision der Endkantenklappen mit dem Auflieger kommen.



**Abb. 5.19: Endkantenklappen**



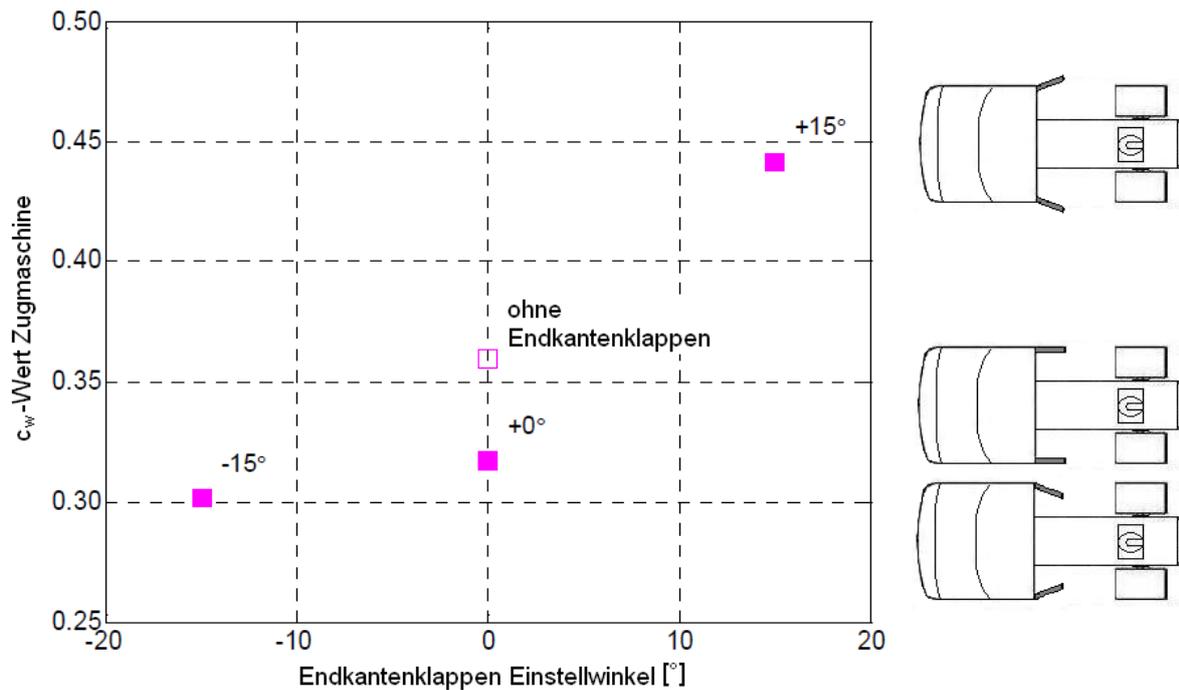
**Abb. 5.20: Endkantenklappen im Vergleich zu geschlossenem Freiraum [28]**

Weitgehendes Schließen des Freiraumes (s. [Abb. 5.20](#)), kann durch elastische Gummielemente realisiert [28] und somit eine maximale Wirkung erreicht werden. Endkantenklappen sind sehr gut mit Dachwindleitteilen kombinierbar und tragen auch zur Verbesserung der Fahrstabilität bei. In zahlreichen Versuchen wurde die Wirkung von Endkantenklappen auf den Sattelzug ermittelt. Die meisten Ergebnisse der Hersteller wurden jedoch nicht veröffentlicht [27]. Es folgen Ergebnisse aus Versuchen, die den Einfluss der Endkantenklappen aufzeigen.

Anhand eines vereinfachten Modells, das keine geometrische Details, wie Stoßfänger, Seitenspiegel und Räder, enthielt, sondern nur die Grundform eines Frontlenkerfahrzeugs aufwies, wurden Untersuchungen zum Einstellwinkel der Endkantenklappen angestellt [27]. Folgende Ergebnisse konnten ermittelt werden:

Bei idealer Anströmung ( $\beta = 0^\circ$ ) ergab sich ein optimaler Einstellwinkel von  $0^\circ$  bei vorhandenem Auflieger. Dies lässt sich anschaulich nachvollziehen, da ein Einstellwinkel von größer als  $0^\circ$  die Stirnfläche des Fahrzeugs und somit den Luftwiderstand erhöht.

Wenn kein Auflieger angekuppelt ist, kann mit einem Einstellwinkel von  $-15^\circ$  der geringste Luftwiderstand erreicht werden (s. [Abb. 5.21](#)). Es zeigt sich eine Verbesserung des Luftwiderstandes von 5% im Vergleich zu der  $0^\circ$  Position und eine Verbesserung von  $c_w$  um 18% im Vergleich ohne Endkantenklappen. Darüber hinaus können die Endkantenklappen durch eine nach außen gestellte Position ( $+15^\circ$ ) zum Bremsen des Fahrzeugs eingesetzt werden.



**Abb. 5.21: Ergebnis aus Modellversuch zur Endkantenklappeneinstellung [27]**

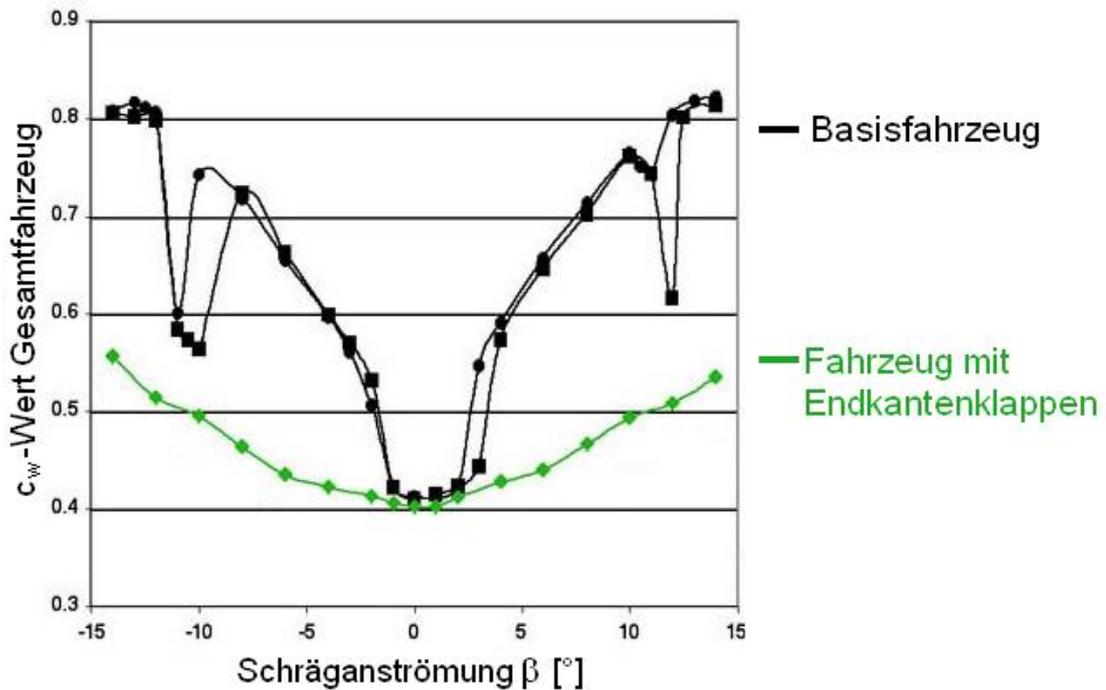
(ohne Auflieger; negativer Winkel: EKK-Stellung nach innen,  
positiver Winkel: EKK-Stellung nach außen)

Ein weiterer Modellwindkanalversuch [29] gibt Hinweise auf das Potenzial von Endkantenklappen. Im Modellmaßstab 1:8 wurde ein Haubenfahrzeug bei  $Re = 6 \cdot 10^6$  (entspricht  $v_{\text{real}} = 130 \text{ km/h}$ ) gemessen.

Es zeigt sich (s. [Abb. 5.22](#)) der große Einfluss der Endkantenklappen bei großer Schräganströmung  $\beta$ . Während bei idealer Anströmung nur eine geringe Verbesserung durch die Anbringung der Endkantenklappen zustande kommt, wirken sich diese bei großem Winkel  $\beta$  erheblich aus und senken den  $c_w$ -Wert um bis zu 70% [29].

Weitere Untersuchungen im Maßstab 1:1 [9] weisen eine Verbesserung des  $c_w$ -Wertes durch Anbringen von Endkantenklappen von 0,04 bis 0,08 (H) auf. Äquivalente Werte von  $\Delta \overline{c_w} = -0,04$  werden von [10] angegeben.

Es gibt weitere Anbaulösungen, mit denen eine Optimierung des Freiraumes vorgenommen werden kann. Da diese eine Veränderung der Aufliegervorderseite darstellen, werden sie im Kap. 5.3 behandelt.

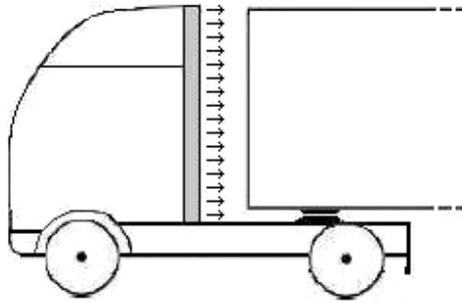


**Abb. 5.22: Endkantenklappenverhalten unter Schräganströmung [29]**

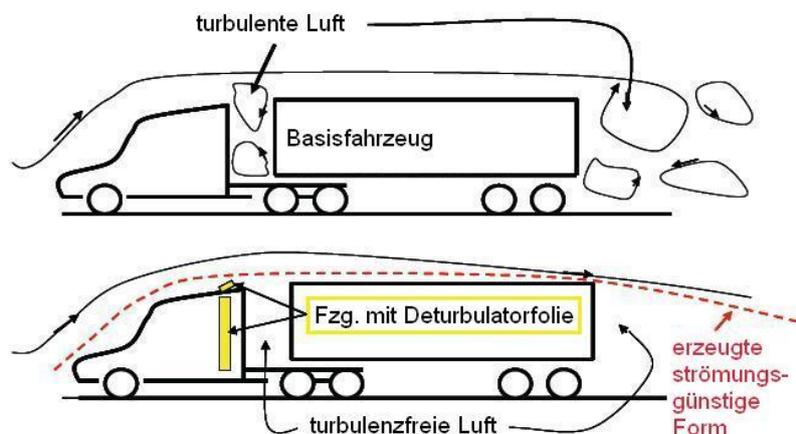
Weitere Ideen vom Fahrerhaus ausgehend, den Beitrag des Freiraumes am Luftwiderstand zu senken, stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung und werden daher hier nur kurz skizziert: Die Freiraum-Lufteinblasung und die Deturbulatorfolie.

Bei der Freiraum-Lufteinblasung handelt es sich um ein Konzept, bei dem ein Luftstrom vom Fahrerhaus aus über eine große Fläche in den Freiraum eingespeist wird (s. [Abb. 5.23](#)). Dies hindert zum einen Luft am Durchströmen des Freiraums und hebt darüber hinaus den Druck hinter dem Fahrerhaus relativ zum Druck an der Auflieger-vorderseite, was zu einer Absenkung des Luftwiderstands führt. Untersuchungen haben ergeben [30], dass die Lufteinblasung einen größeren Effekt auf die  $c_w$ -Wertsenkung hat als die Anbringung von Endkantenklappen.

Zur endgültigen Bewertung des Konzepts muss jedoch beachtet werden, dass beim Betrieb Energie benötigt wird, um die Luft einzuspeisen. Des Weiteren ist noch unklar, ob ein derartiges System kostengünstig entwickelt, gefertigt, und mit niedrigen Wartungskosten betrieben werden kann. Erst nach Klärung dieser Fragen kann eine präzise Bewertung und Leistungsabschätzung im Vergleich zu den Endkantenklappen und anderen Freiraumlösungen erfolgen.



**Abb. 5.23: Freiraum-Lufteinblasung an der Zugmaschine**



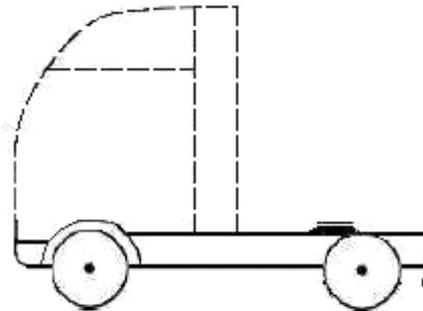
**Abb. 5.24: Deturbulatorfolie an der Zugmaschine [31]**

Einer der Gründe für ein nur zögerliches Durchsetzen aerodynamischer Entwicklungen der „zweiten Generation“ stellt die Funktionalitätseinschränkung aufgrund von zusätzlichen Anbauteilen dar. Um diesem Nachteil zu entgehen, wurde das „Deturbulator tape“ entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine spezielle, patentierte Folie, die es ermöglicht, Nutzfahrzeuge stromlinienförmiger zu gestalten und so den Luftwiderstand zu reduzieren. Die Anbringung der Folie erfolgt, je nach Form des Fahrerhauses, an den Fahrerhausecken. Mittels ihrer nachgiebigen Oberfläche ermöglicht sie das Abschwächen von Turbulenzen und führt so eine Reduzierung des Luftwiderstandes in Ablösungsgebieten, wie zum Beispiel im Freiraum oder dem Heck des Aufliegers, herbei. Während kleine Strömungswirbel schnell aufgelöst und dissipiert werden, ermöglicht die Folie großen Wirbelstrukturen über sie hinwegzurollen und eine Art Luftblase um das Fahrzeug zu bilden (s. [Abb. 5.24](#)). Dies generiert eine strömungsgünstige Form des Gesamtfahrzeugs [31] und führt so einen geringeren Luftwiderstand mit sich.

Wie in diesem Kapitel dargestellt wurde, gibt es zahlreiche Möglichkeiten, das Fahrerhaus eines Nutzfahrzeugs aerodynamisch zu optimieren. Ein weiterer Bereich möglicher Optimierung stellt das Fahrgestell dar. Auf dieses wird im Folgenden Kapitel eingegangen.

## 5.2 Fahrgestell

Der Schwerpunkt aerodynamischer Bemühungen an der Zugmaschine fokussierte sich in den Anfangsjahren auf das Fahrerhaus. In den letzten Jahrzehnten wurden auch Potenziale zur Optimierung des Fahrgestells (s. Abb. 5.25) erkannt und Bereiche zu dessen Verbesserung gefunden.



**Abb. 5.25: Skizze des Fahrgestells**

Es werden im Folgenden Maßnahmen zur Senkung des Luftwiderstandanteils des Fahrgestells vorgestellt.

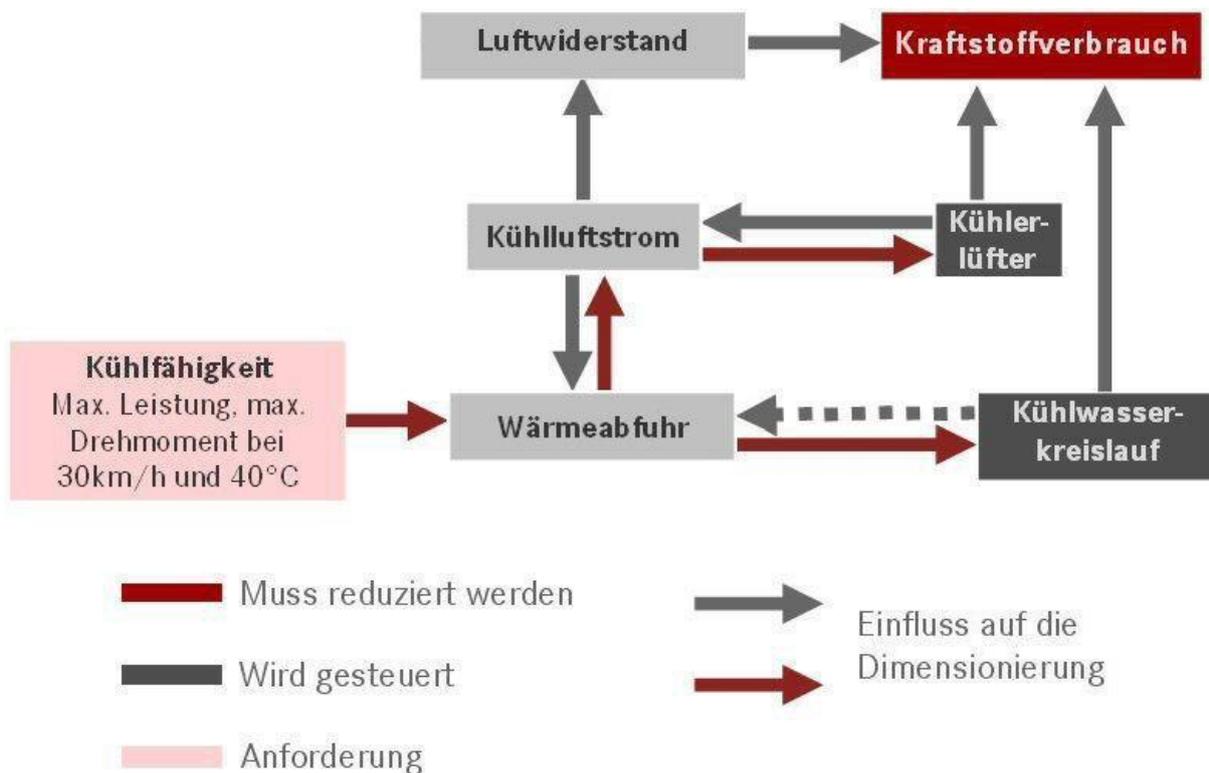
### 5.2.1 Kühlluftmanagement

In der Fahrzeugaerodynamik spielt nicht nur die Umströmung des Fahrzeugs eine Rolle, sondern auch die Durchströmung. Diese ist zur Kühlung des Motors und dessen Aggregate, den Bremsen sowie zur Klimatisierung des Innenraumes notwendig [8].

Eine Komponente der Fahrzeugdurchströmung stellt die Kühlerdurchströmung dar.

Mit der Kühlerdurchströmung wird der Luftstrom durch die verschiedenen Kühler eines Lkw bezeichnet. Üblicherweise besitzt ein modernes Fahrzeug drei unterschiedliche Kühler - den Kühlmittelkühler, den Ladeluftkühler und den Kondensator

der Klimaanlage -, die als Block im Vorderwagen verbaut sind. Für eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauches auf ein Minimum ist es notwendig, neben dem Kühlerlüfter und der Wasserpumpe des Kühlwasserkreislaufs auch den Luftstrom durch das Kühlerpaket zu optimieren (s. Abb. 5.26).

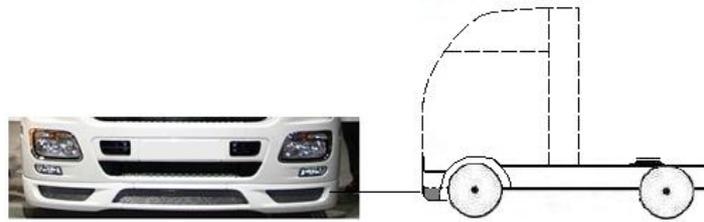


**Abb. 5.26: Kühlluftmanagement [57]**

Die Motorraumdurchströmung dient vor allem dazu, die warme Luft aus dem Bereich unter dem Fahrerhaus und neben den Motoraggregaten zu entfernen, um einen schädlichen Anstieg der Bauteiltemperaturen im Motorraum zu vermeiden.

Im Zuge der Optimierung der Fahrzeuge und der Verbesserung des Thermomanagements werden bei den Fahrzeugherstellern ausgiebig Untersuchungen zur Fahrzeugdurchströmung durchgeführt. Diese werden jedoch nicht in Form von öffentlicher Literatur herausgegeben, weshalb nicht näher auf dieses Thema eingegangen werden kann.

## 5.2.2 Frontschürzenverlängerung



**Abb. 5.27: Frontschürzenverlängerung [32]**

Mit dem Absenken bzw. dem nach unten Verlängern des Stoßfängers eines Nutzfahrzeugs (s. [Abb. 5.27](#)) kann erreicht werden, dass ein Teil der unterströmenden Luft gezwungen wird, zur Seite oder nach oben abzufließen. Durch den verminderten Luftstrom unterhalb des Fahrzeugs kann weniger Luft durch den rauen Unterbodenbereich strömen, was zu einer Reduzierung des Luftwiderstandes führt.

Diese Veränderung des Fahrzeugs führt jedoch zu einer Vergrößerung der Stirnfläche. Daher ist eine derartige Maßnahme nur sinnvoll, wenn ein zerklüfteter Unterboden vorhanden ist. Liegt ein glatter Unterboden vor, kann es zur Aufhebung der positiven Effekte kommen [24].

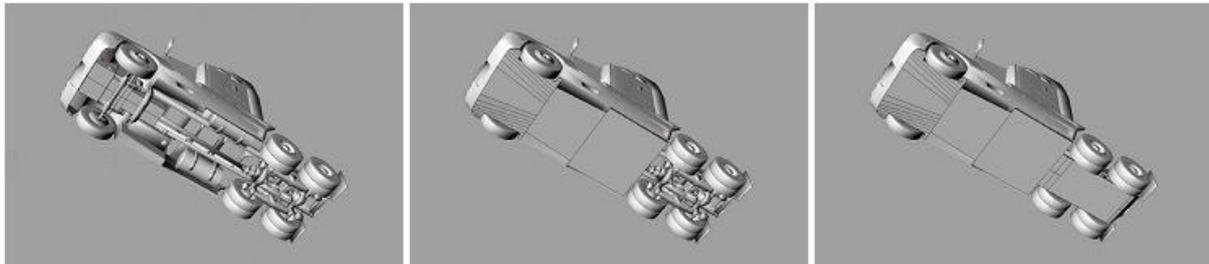
Eine gute Wirkung zeigt die Frontschürzenverlängerung bei frontaler Anströmung, welche laut [10] bei Seitenwind abnimmt. Die Auswirkung auf den  $c_w$ -Wert durch eine derartige Veränderung des Stoßfängers beziffert sich auf  $\Delta \overline{c_w} = -0,02$  [10].

## 5.2.3 Unterbodenverkleidung

Wie im vorherigen Abschnitt aufgeführt, trägt der raue Unterboden zur Generierung des Luftwiderstandes eines Nutzfahrzeugs bei. Daraus ergibt sich das Ziel, den Unterboden möglichst strömungsgünstig zu formen, um so dessen Widerstand zu reduzieren. Eine Optimierung dessen erweist sich als vorteilhaft, da nur auf technische Aspekte geachtet werden muss (z.B. Kühlluftführung verschiedener Aggregate) und kaum Randbedingungen durch das Design des Fahrzeugs gestellt sind, da die Maßnahmen zur Optimierung nicht das Erscheinungsbild dessen verändern.

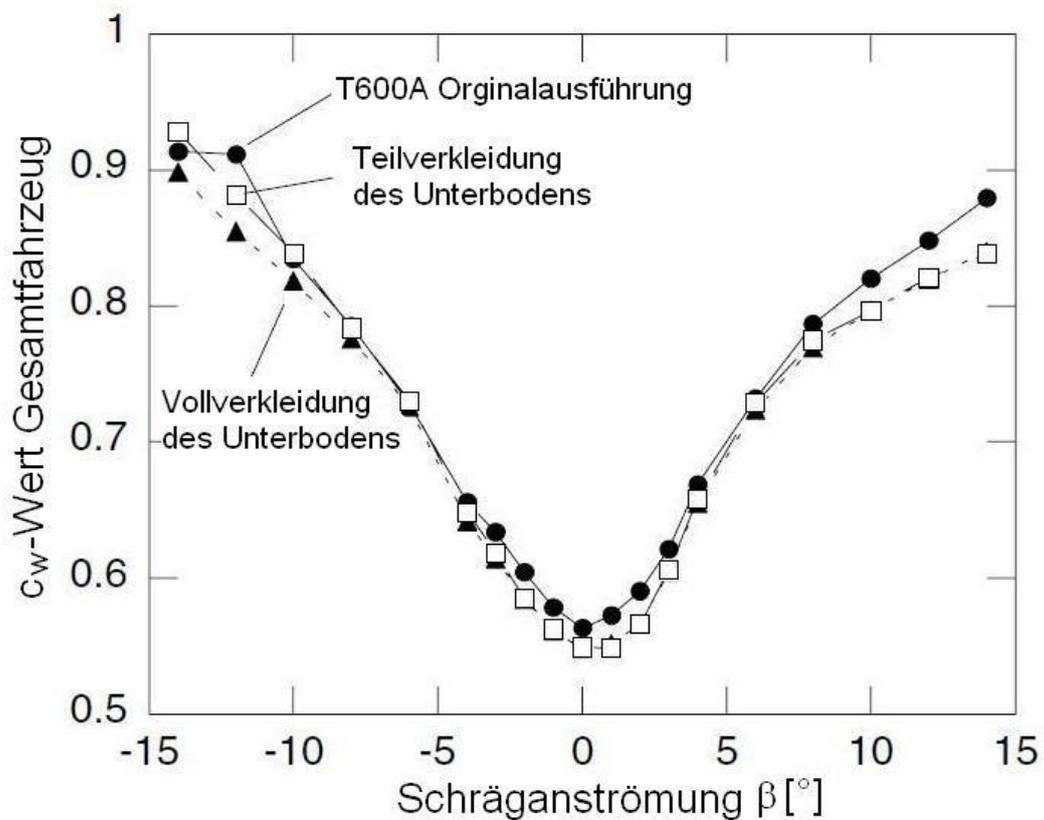
Zur Ermittlung möglicher Maßnahmen am Unterboden wurden Versuche in einem Modellwindkanal durchgeführt [33]. Anhand eines 1:20 Modells mit detailgetreuem

Unterboden und Durchströmung wurden Messungen mit verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Um die Verwirbelungen am Unterboden zu unterbinden, wurden ebene Platten an der Unterseite des Fahrzeugs mit unterschiedlichem Verkleidungsgrad (s. Abb. 5.28), angebracht.



**Abb. 5.28: Unterbodenkonfigurationen der Modellmessung [33]**

(Originalausführung, teilverkleidet, vollverkleidet)



**Abb. 5.29: Auswirkung einer Unterbodenverkleidung [33]**

Folgende Ergebnisse konnten ermittelt werden (s. Abb. 5.29):

- Im Bereich des Anströmwinkels von  $\beta = \pm 5^\circ$  konnten Verbesserungen bei Teilverkleidung von  $\Delta \overline{c_w} = 0.015$  (H) und bei Vollverkleidung von  $\Delta \overline{c_w} = 0,018$  (H) ermittelt werden.
- Laut [6] hat eine Unterbodenverkleidung einen reduzierenden Effekt auf den Luftwiderstand. Jedoch fällt die dadurch erzielbare Verbesserung derart klein aus, dass die mit der Realisierung verbundenen Nachteile, wie zusätzliche Befestigungseinrichtungen, Schmutz auf der Verkleidung und eine erschwerte Kühlung des Motors, überwiegen würden.

Ein weiterer Bereich des Fahrgestells eines Nutzfahrzeugs, der einer Optimierung bedarf, sind die Räder und Radhäuser.

#### 5.2.4 Felgenabdeckung



**Abb. 5.30: Felgenabdeckung [24,58]**

Eine schon heute zur Verfügung stehende Möglichkeit, den Bereich der Räder zu verbessern, ist deren Umströmung zu beeinflussen. Dies kann durch Anbringung von Felgenabdeckungen (s. Abb. 5.30) erfolgen. Dabei werden die Felgen an den Außenseiten mit einer Scheibe abgedeckt und so ein Interagieren der umströmenden Luft mit den Felgen unterbunden. Eine derartige Maßnahme lässt sich einfach realisieren, wohingegen sich die Kühlung der Bremsen nachteilig darstellt.

Durch die Verwendung derartiger Abdeckungen lassen sich Verwirbelungen reduzieren und damit der Luftwiderstand senken. Felgenabdeckungen an der Außenseite

eines Rades haben laut [34] einen vernachlässigbar kleinen Effekt. Dies wurde jedoch mit stehenden Rädern ermittelt, der Einfluss der Radrotation ist unbekannt.

Aufgrund der Ausmaße eines Nutzfahrzeugs gestaltet es sich schwierig, Windkanalmessungen mit drehenden Rädern durchzuführen. Daher ist dieses Thema nur spärlich erforscht. Die Ermittlung des Einflusses der drehenden Reifen stellt eine zukünftige Aufgabe dar, um auch diesen Bereich gezielt optimieren zu können.

### 5.2.5 Schmutzfänger

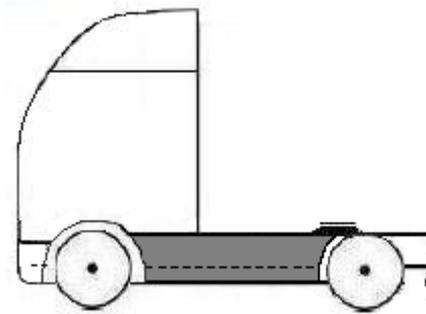
Es kann darüber hinaus eine Optimierung des Schmutzfängers vorgenommen werden. Herkömmliche Schmutzfänger stellen eine luftundurchlässige Abschirmung dar, wodurch sie eine Angriffsfläche für die strömende Luft bieten und so maßgeblich zum Luftwiderstand beitragen. Entwicklungen, wie in [Abb. 5.31](#) abgebildet, reduzieren diesen Beitrag. Durch eine Perforierung des Schmutzfängers wird eine Durchströmung von 75% der Luft ermöglicht. Angaben über die Verbesserung des  $c_w$ -Werts liegen nicht vor, der Hersteller gibt jedoch eine Spritverbrauchsreduzierung von 3,5% an.



**Abb. 5.31: Schmutzfänger [35]**

Die Veränderung des Durchströmungsverhaltens des Schmutzfängers unter Einfluss von Schmutz und dessen Reinigung ist offen.

## 5.2.6 Fahrgestellseitenverkleidung



**Abb. 5.32: Fahrgestellseitenverkleidung [10]**

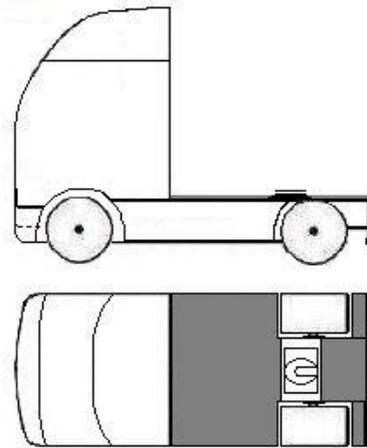
Ein weiterer Ansatz, die Seite eines NFZ-Fahrgestells zu optimieren, stellt das Anbringen von Seitenverkleidungen (s. [Abb. 5.32](#)) dar. Sie schirmen den Raum zwischen den Vorder- und Hinterrädern der Zugmaschine seitlich ab. Dadurch wird erreicht, dass die umströmende Luft vorbeigeleitet wird, was insbesondere bei Seitenwind von Vorteil ist. Durch das Verhindern des Eindringens der Luft in den Zwischenraum und unter das Fahrzeug kann der  $c_w$ -Wert gesenkt werden [10].

Des Weiteren wirken sich derartige Seitenverkleidungen positiv auf die Sicherheit aus. Sie wird durch die Eindämmung von Spritzwasser- und Sprühneblerzeugung erhöht. So werden die Eigen- und Fremdverschmutzung vermindert. Ferner wird das Risiko, dass bei Unfällen Zweiradfahrer oder Fußgänger unter das Fahrzeug geraten, gesenkt. Des Weiteren lässt sich die Geräuschentwicklung des Fahrzeugs absenken. Nachteilig wirkt sich die erschwerte Zugänglichkeit des Fahrzeugs für Wartungsarbeiten und Reparaturen aus.

Durch die Anbringung von seitlichen Verkleidungen kann bei idealer Anströmung eine Reduktion von  $\Delta \overline{c_w} = 0,04$  (H) erreicht werden [10].

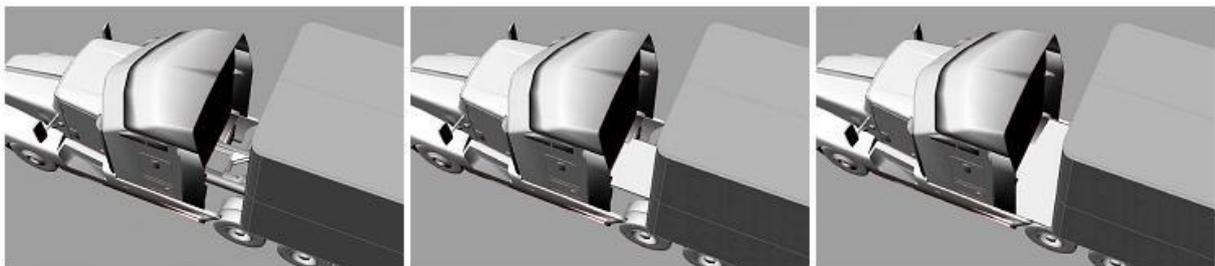
## 5.2.7 Fahrgestellabdeckung

Eine weitere Methode, das Fahrgestell einer Zugmaschine aerodynamisch zu optimieren, lässt sich durch die Abdeckung des Fahrgestells hinter dem Fahrerhaus mit Hilfe einer Platte realisieren (s. [Abb. 5.33](#)). Dies ist insbesondere bei großen Freiräumen sinnvoll, da bei diesen die Gefahr besteht, dass Luft von unten in den Freiraum einströmt und sich nachteilig auf die Aerodynamik auswirkt [24].



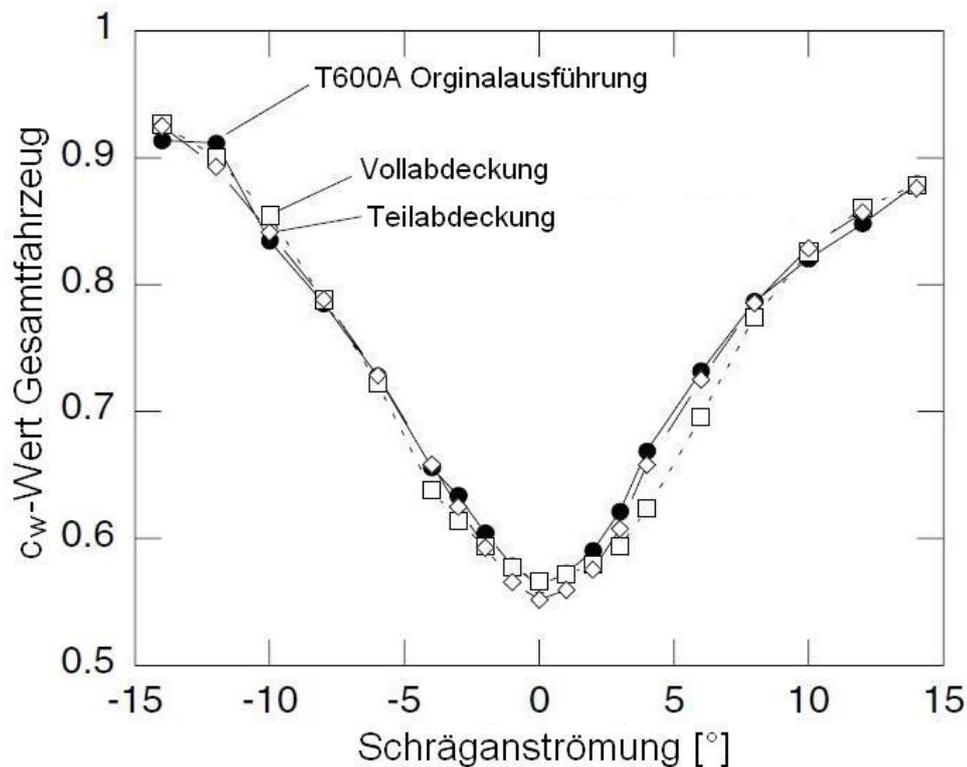
**Abb. 5.33: Skizze einer Fahrgestellabdeckung**

Die Hersteller derartiger Anbauteile, wie [36], machen keine Angaben zur Reduzierung des Luftwiderstandes des Fahrzeugs unter Verwendung eines derartigen Anbauteils. Jedoch wurden Versuche in einem Modellwindkanal [33] durchgeführt, um die Wirkung einer solchen Fahrgestellabdeckung zu ermitteln. Anhand eines Haubenfahrzeugs im Maßstab 1:20 wurden verschiedene Aufbauvarianten gemessen: Originalausführung, Teilabdeckung, Vollabdeckung (s. [Abb. 5.34](#)).



**Abb. 5.34: Fahrgestellabdeckungen im Modellversuch [33]**

(Originalausführung, Teilabdeckung, Vollabdeckung)



**Abb. 5.35: Auswirkung einer Fahrgestellabdeckung [33]**

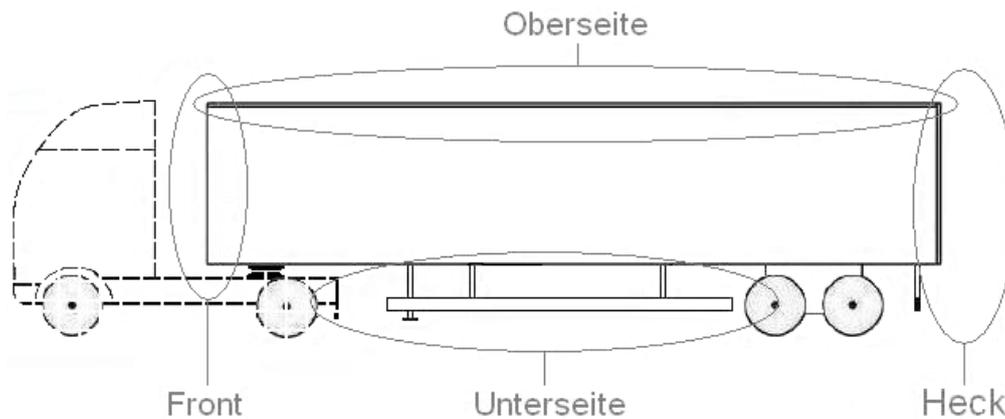
Die Versuche haben gezeigt, dass eine horizontale Fahrgestellabdeckung eine verbessernde Wirkung auf den  $c_w$ -Wert des Fahrzeugs hat. Wie im obigen Schaubild (Abb. 5.35) abgebildet, ist eine Verbesserung im Bereich von  $\pm 5^\circ$  möglich. Während die Teilabdeckung laut Versuchergebnis bei kleinen Winkeln ( $\pm 2^\circ$ ) eine bessere Wirkung ergab, erwies sich die vollverkleidete Variante bei größeren Anströmwindeln als besser. In der Gesamtbilanz ergaben sich folgende Ergebniswerte (teilverkleidet / vollverkleidet):  $\Delta \overline{c_w} = 0,011$  (H) bzw.  $0,021$  (H) [33].

### 5.3 Auflieger

Eine wesentliche Anforderung an das Nutzfahrzeug im Transportwesen ist, innerhalb der gesetzlich erlaubten Abmessungen ein maximales Ladevolumen zu erreichen. Dies wird mit Hilfe eines rechtwinkligen Volumenauflegers [6] realisiert. Daraus ergibt sich ein stumpfer Körper (s. Kap. 4.2), der an der Front von Ablösungen und am Heck durch ein Totwassergebiet geprägt ist.

In Kap. 5 wurde bereits aufgezeigt, dass ein großer Teil des Luftwiderstandes des Sattelzugfahrzeugs durch den Auflieger hervorgerufen wird. Dieser Einfluss und das

damit verbundene Potenzial, den Luftwiderstand zu reduzieren, erzeugt ein großes Interesse und Bemühungen, den Auflieger zu optimieren.



**Abb. 5.36: Relevante Bereiche am Nutzfahrzeugauftrieger**

Im Folgenden werden aerodynamische Optimierungsmaßnahmen und Veränderungen am Auflieger bereichsweise aufgezeigt: Front, Unterseite, Heck, Oberseite (s. [Abb. 5.36](#)).

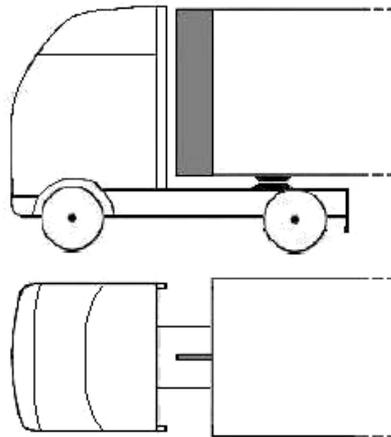
Die Front des Auftriegers grenzt an den Freiraum, welcher bereits im Kap. 5.1.6 Fahrerhausrückseite behandelt wurde. Möglichkeiten im Bereich des Freiraumes, die Erzeugung von Verwirbelungen und damit den Einfluss auf den Luftwiderstand zu reduzieren, bieten auch Veränderungen und Anbaumaßnahmen an der Front des Auftriegers.

Ziel ist es, den Freiraum möglichst weit zu schließen, um ein Durchströmen der Luft bzw. ein Anströmen der Aufliegerfront zu vermeiden. Dazu wurden verschiedene Maßnahmen entwickelt:

### **5.3.1 Trennplatte**

Bei einer Trennplatte (Splitter Plate) handelt es sich um eine Platte, die vertikal in der Mitte der Frontfläche des Auftriegers angebracht wird und so den Freiraum in zwei Teile aufteilt (s. [Abb. 5.37](#)). Dadurch wird die Durchströmung der Luft vermindert und Verwirbelungen eingeschränkt. Laut [29] erreicht eine derartige Trennplatte eine ähnliche Wirkung wie die Endkantenklappen. Jedoch entstehen durch die Aufteilung des Raumes in zwei Bereiche zwei Wirbel, die zu verminderten Seitenkräften auf das

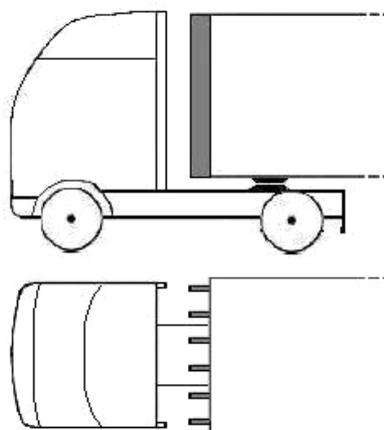
Fahrzeug führen und so die Seitenstabilität verbessern [10]. Trennplatten stellen eine mögliche Erweiterung dar, wenn es nicht möglich ist, ausreichend lange Endkantenklappen anzubringen. Es kann dann eine Kombination von kurzen Endkantenklappen mit einer Trennplatte realisiert werden.



**Abb. 5.37: Trennplatte**

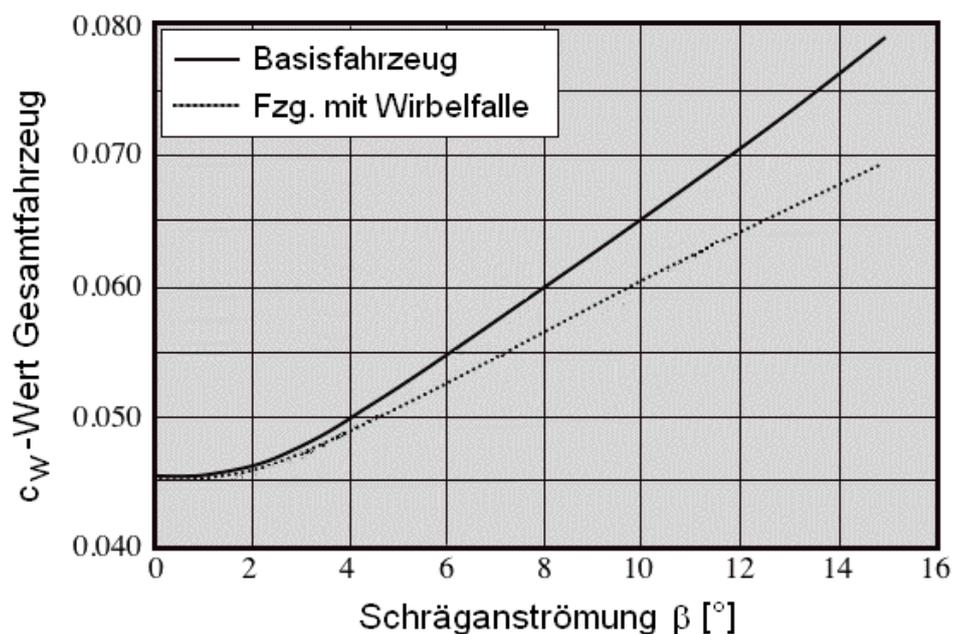
Simulationen und Modellversuche zeigten eine vergleichbare Wirkung der Trennplatte zu Endkantenklappen [29]. In [10] wird eine  $c_w$ -Wertverbesserung von  $\overline{c_w} = 0.04$  angegeben.

### 5.3.2 Wirbelfalle



**Abb. 5.38: Wirbelfalle**

Eine weitere Alternative, den Bereich des Freiraumes zu optimieren, stellt eine Wirbelfalle (Vortex trap) dar (s. [Abb. 5.38](#)). Bei Schräganströmung erzeugt die durchströmende Luft ausgeprägte Turbulenzen im Freiraum. Daher werden vertikale Platten in gleichem Abstand zueinander rechtwinklig nach vorne zeigend an der Front des Auflegers angebracht. An deren scharfen Vorderkanten löst die Strömung ab und es bilden sich Wirbel, die in den Plattenzwischenräumen eingefangen werden [37]. Mittels der Wirbel wird ein Unterdruck an der Vorderseite des Auflegers erzeugt, wodurch dessen Luftwiderstand gesenkt wird.



**Abb. 5.39: Wirkung der Wirbelfalle [37]**

Die Wirbelfalle weist nur eine geringe Verbesserung bei idealer Anströmung auf (s. [Abb. 5.39](#)), jedoch zeigt sie einen wirkungsvollen Effekt mit zunehmender Schräganströmung. Laut [38] kann eine Luftwiderstandsreduzierung um 20% erreicht werden.

### 5.3.3 Radien und Verkleidung

Eine weitere wichtige Maßnahme zur Verbesserung der Auflegerfront stellt das Vermeiden von scharfen Ecken am Aufleger dar, da diese das Ablösen der Strömung hervorrufen. Standard-Kofferaufbauten haben Ecken mit einem Radius von 20 mm. Untersuchungen [24] haben ergeben, dass die Vorderkanten eines Auf-

liegers einen Mindestradius von 150 mm und die Seitenkanten mindestens 60 mm aufweisen sollten. Um somit eine Verbesserung der Umströmung herbeizuführen, können entweder die Radien vergrößert werden, was eine Reduzierung des Ladevolumens zur Folge hat, oder es können Verkleidungen an der Vorderseite des Aufliegers (s. Abb 5.40) angebracht werden. Dies ermöglicht eine anliegende Strömung und unterdrückt die Totwasserbildung am Übergang zu den Seiten und der Oberseite des Aufliegers. Darüber hinaus trägt es zur Freiraumversperrung bei [24].



**Abb. 5.40: Frontverkleidung [39]**

Ein derartiges Anbauteil weist bei allen Windverhältnissen eine gute Wirkung auf und kann mit anderen Maßnahmen kombiniert werden. Laut [10] ist eine Wirkung von  $\Delta \overline{c_w} = -0.12 (H)$  erzielbar.

### **5.3.4 Luftkegel**

Ein Luftkegel (Aircone) stellt ein konvexes Anbauteil (s. Abb. 5.41) dar, das an der Front des Aufliegers angebracht wird und eine vergleichbare Wirkung wie ein Windleitkörper auf dem Dach des Fahrerhauses aufweist. Eine Verwendung in Kombination mit einem Dachwindleitteil bringt daher keine Verbesserung mit sich und erweist sich nicht als sinnvoll [24].



**Abb. 5.41: Luftkegel [36]**

Zum Einsatz kann solch eine Maßnahme dann kommen, wenn die Zugmaschine häufig ohne Auflieger fährt und daher kein Windleitteil auf dem Fahrerhausdach montiert ist.

### **5.3.5 Fahrgestellrelevante Verkleidungen**

Die Unterseite des Aufliegers stellt bei vielen Sattelzügen einen freien, ungenutzten Raum dar, der von der umströmenden Luft durchdrungen werden kann und aufgrund einer hohen Rauigkeit merklich zum Luftwiderstand beiträgt. Eine Reduzierung dieses Luftwiderstandsanteils kann durch die Anbringung von Anbauteilen erzielt werden. Es wurden eine Reihe verschiedener Unterbodenanbaumaßnahmen zur Optimierung eines Aufliegers entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Sie alle haben zum Ziel, den Luftwiderstand des Aufliegers durch Abschirmen der Luft bzw. gezielter Luftführung im Unterboden- und Fahrgestellbereich zu verringern.

#### **5.3.5.1 Radverkleidung**

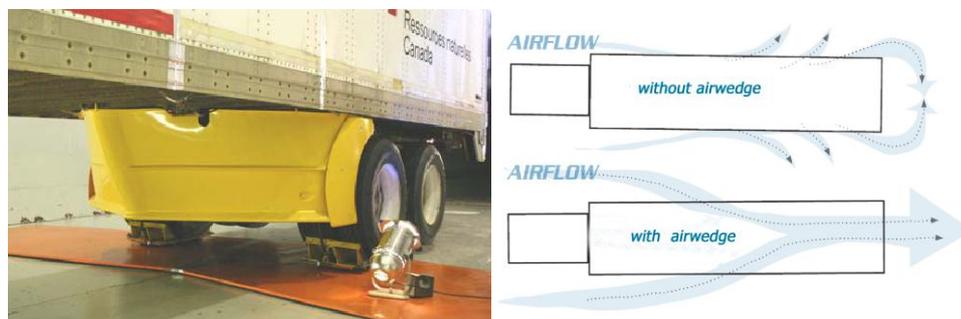
Eine minimale Veränderung der Aufliegerunterseite stellt die Anbringung einer Radverkleidung (s. [Abb. 5.42](#)) dar. Dadurch werden die Räder von der strömenden Luft abgeschirmt und es entstehen weniger Turbulenzen mit der Folge einer reduzierten Luftwiderstandsentwicklung. In einem Versuch wurde der Einfluss einer derartigen Verkleidung mit einem  $\Delta \overline{c_w} = -0,0078$  (H) ermittelt [40].



**Abb. 5.42: Radverkleidung [40]**

### 5.3.5.2 Achsaggregatabdeckung

Mit Hilfe einer Verkleidung des Fahrgestells (s. Abb. 5.43, links) kann erreicht werden, dass die Luft um das Fahrgestell gezielt herumgeleitet wird und so nicht mit dem rauen Fahrgestell interferiert. Daraus folgt eine Reduzierung der Wirbelbildung und eine Senkung des Luftwiderstands. Laut [40] kann mit einer Abschirmung des Fahrgestells eine  $c_W$ -Wertverbesserung von  $\Delta = 0,0145$  (H) erreicht werden.

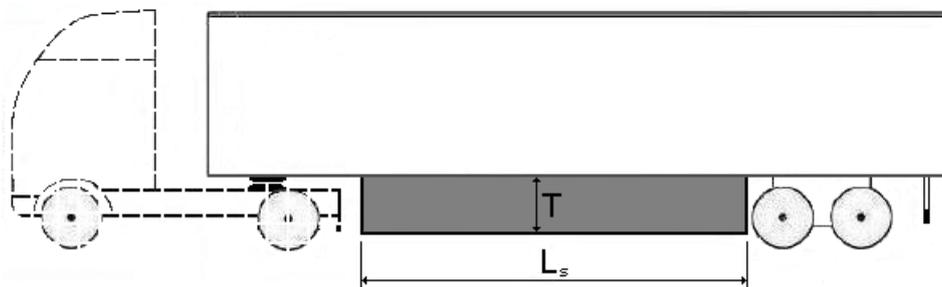


**Abb. 5.43: Achsaggregatabdeckung und Funktionsweise des Luftleitkeils [40,41]**

Eine Weiterentwicklung einer derartigen Fahrgestellabdeckung stellt der Luftleitkeil (Airwedge) [41] dar. Bei diesem System wird zum einen das Fahrgestell von der Strömung abgeschirmt und zum anderen gezielt Luft durch Kanalisierung zwischen dem Aufliegerunterboden und dem Fahrgestell beschleunigt. Die beschleunigte Luft wird dann in das Totwassergebiet hinter dem stumpfen Heck des Fahrzeugs eingeleitet (s. Abb. 5.43, rechts). Dies führt zu einer Minimierung dieses Gebiets und reduziert so den Luftwiderstand. Die Wirksamkeit des Luftleitkeils wurde bisher noch nicht in einem repräsentativen Test überprüft [24].

### 5.3.5.3 Seitenverkleidung

Eine Seitenverkleidung am Auflieger (s. [Abb. 5.44](#)), besteht aus einer dünnen Platte, welche die Seitenfläche in Richtung Boden erweitert [11]. Sie bildet so eine Abschirmung des Raumes unterhalb des Aufliegers, der zwischen dem Ende der Zugmaschine und dem Achsaggregat des Aufliegers besteht. Dies führt zu einer Minimierung des Luftstroms unter den Auflieger und so durch geringere Wirbelbildung unter und neben dem Fahrzeug zu einem Absenken des Luftwiderstands sowie zur Erhöhung der Fahrstabilität des Fahrzeugs insbesondere bei Seitenwind [24].

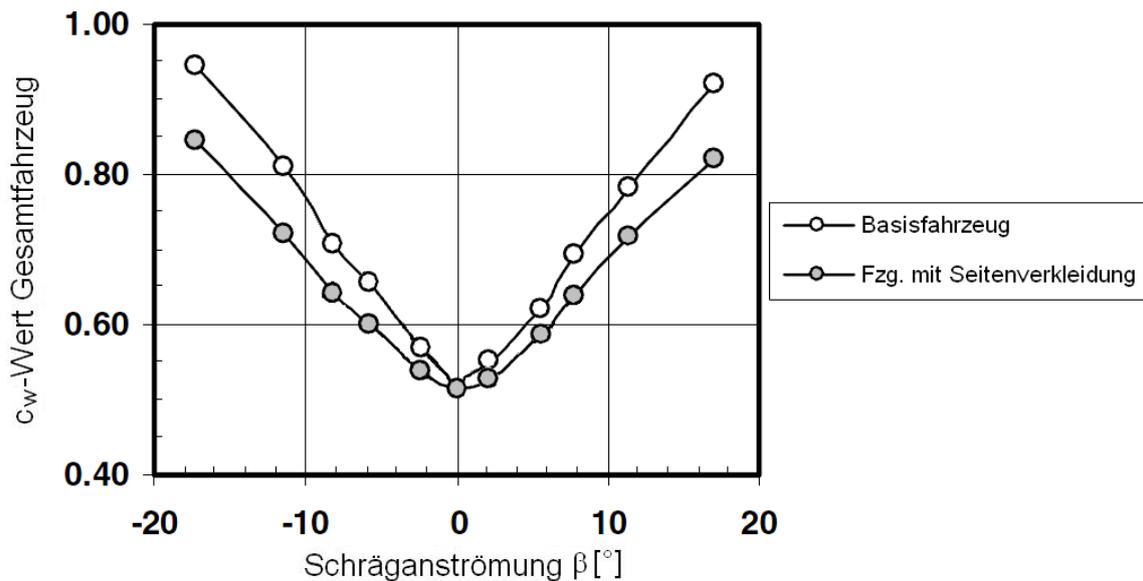


**Abb. 5.44: Seitenverkleidung am Auflieger**

Weiter zeichnen sich Seitenverkleidungen am Auflieger durch folgende Eigenschaften aus: Verbesserung der Sicherheit für Fußgänger, Rad- und Kraftradfahrer sowie Minderung der Spritzwasser- und Geräuschbildung [6].

In Experimenten wurden Seitenverkleidungen und deren Verhalten unter Veränderung verschiedener Parameter untersucht:

Die Wirksamkeit der Seitenverkleidungen unterliegt dem Einfluss der Schräganströmung. Während die Seitenverkleidung bei idealer Anströmung nur geringfügig zur Reduktion des Luftwiderstands beiträgt, erhöht sich ihre Wirkung mit zunehmender Schräganströmung  $\beta$  (s. [Abb. 5.45](#)) [15].



**Abb. 5.45: Auflieger mit Seitenverkleidung unter Schräganströmung [11]**

Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Tiefe der Seitenverkleidung haben ergeben, dass je näher sich diese am Boden befindet desto höher ist ihre reduzierende Wirkung auf den Luftwiderstand. Dies konnte sowohl anhand eines Modells im Maßstab 1:8 [42] als auch bei Versuchen auf Basis eines 1:1 Fahrzeugs [40] ermittelt werden. Eine Grenze stellt sich jedoch bei der Umsetzung dieser Maßnahme dar: Je tiefer die Schürze ausgelegt wird, umso weniger Bodenfreiheit steht zur Verfügung. Dies führt, wie Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz zeigen [43], zu häufigen Beschädigungen und verursacht daher Reparaturkosten.

Ein weiteres Experiment hat den Längeneinfluss ( $L_s$ ) der Seitenverkleidung untersucht. Dabei konnte ermittelt werden, dass die Länge eine untergeordnete Rolle spielt, da der größte Wirkungsanteil aus der Reduktion des Luftwiderstandes im Bereich des Fahrgestells hervorgeht [40].

Die Seitenverkleidungen lassen sich in unterschiedlichen Formen und Ausführungen am Auflieger anbringen. Dazu wurden Studien durchgeführt, um eine optimale Anordnung der Seitenverkleidung zu finden.

In einem 1:8 Modellversuch der Truck Manufacturers Association (TMA) und dem U.S. Department of Energy (DOE) [42] wurden verschiedene Anordnungen der Seitenverkleidung (s. [Abb. 5.46](#)) untersucht.

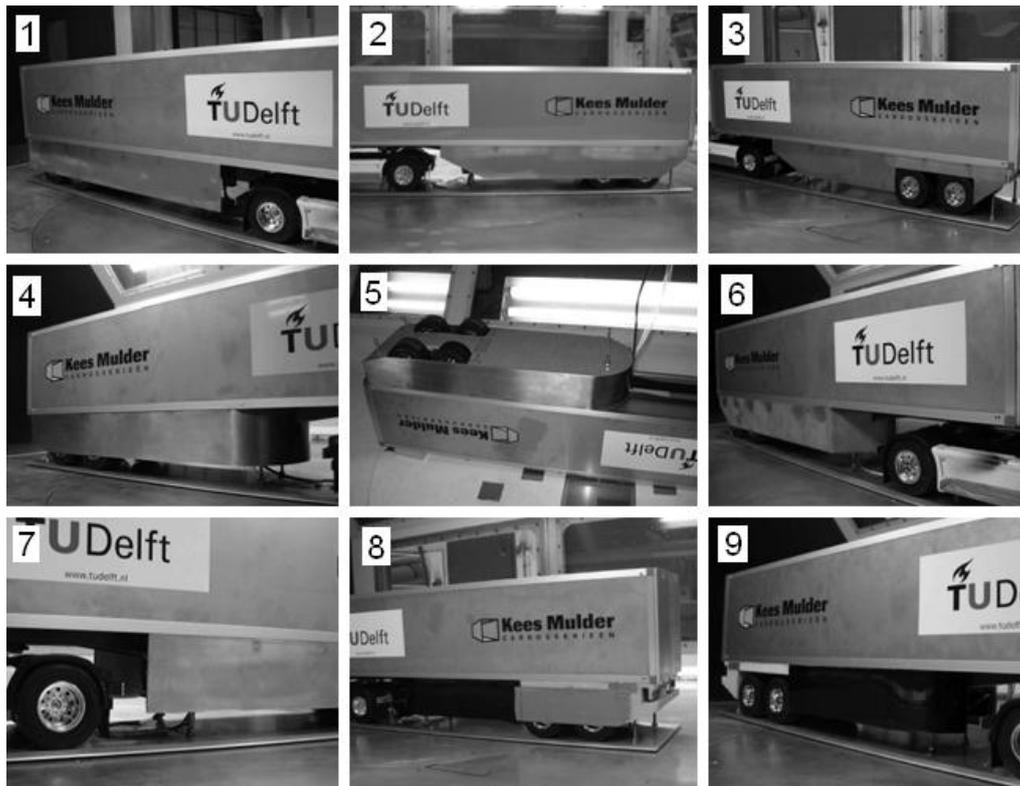


**Abb. 5.46: Seitenverkleidungsanordnungen (parallel, u-förmig, v-förmig) [42]**

Dabei wurde herausgefunden, dass die parallele Anordnung die beste Lösung zur Luftwiderstandssenkung des Aufliegers ist.

Weitere Versuche zum Einfluss von Seitenverkleidungen auf den Luftwiderstandsanteil eines Aufliegers wurden an der TU Delft durchgeführt [44]. Anhand eines 1:14 Sattelzugmodells mit vereinfachter Zugmaschinenform erfolgten Windkanalmessungen verschiedener Konfigurationen (s. [Abb. 5.47](#)).

In [Tab. 5.1](#) sind die Ergebnisse aus den Versuchen der TU Delft aufgeführt. Die Anbringung von Seitenverkleidungen in Standardausführung (Nr. 1) führten zu einer Reduzierung des  $c_T$ -Werts um  $\Delta c_T = -0,049$ . Eine Abschrägung der Vorder- und Hinterkanten der Verkleidung (Nr. 2) verbesserte den Wert weiter. Weitere Varianten untersuchten ein Schließen der Seitenverkleidungen mit einer U-Form. Sie wurden mit und ohne Bodenabdeckung vermessen (Nr. 4 und Nr. 5). Wie den Messwerten entnommen werden kann, erzeugte die Anbringung des u-förmigen Abschlusses vergleichbare Werte wie die abgeschrägte Seitenverkleidung (Nr. 2). Das Hinzufügen einer Bodenabdeckung (Nr. 5) wirkte sich nachteilig aus. Darüber hinaus wurde der u-förmige Abschluss durch eine spitz zulaufende Version (Nr. 6) ausgetauscht, was jedoch zu keiner weiteren Verbesserung führte, da nahezu gleiche Messwerte wie in Nr. 4 ermittelt wurden. Das beste Ergebnis konnte mit einer modifizierten Seitenverkleidung erreicht werden. Diese hinten abgeschrägte Verkleidung behielt ihren geraden vorderen Abschluss und wurde an dessen Innenseite mit einem Flügelprofil



**Abb. 5.47: Modellversuche mit Seitenverkleidungen [44]**

**Tab. 5.1: Versuchsergebnisse der Seitenverkleidungsversuche**

Nr.	Bauteilbeschreibung		$\Delta c_T$	$\beta$ [°]
1	Standard Seitenverkleidung	Räder abgedeckt	-0,049	0
2	Abgeschrägte Seitenverkleidung	Räder abgedeckt	-0,058	0
3	„ „	Räder nicht abgedeckt	-0,040	0
4	geschl. Seitenverkleidung mit Halbkreisabschluss ohne Bodenabdeckung	Räder abgedeckt	-0,055	0
5	geschl. Seitenverkleidung mit Halbkreisabschluss mit Bodenabdeckung	Räder abgedeckt	geringere Wirkung wie (4)	0
6	geschl. Seitenverkleidung mit spitzem Abschluss	Räder abgedeckt	nahezu gleiche Wirkung wie (4)	0
7	Standard Seitenverkleidung, hinten abgeschrägt, vorne modifiziert	Räder abgedeckt	-0,061	0

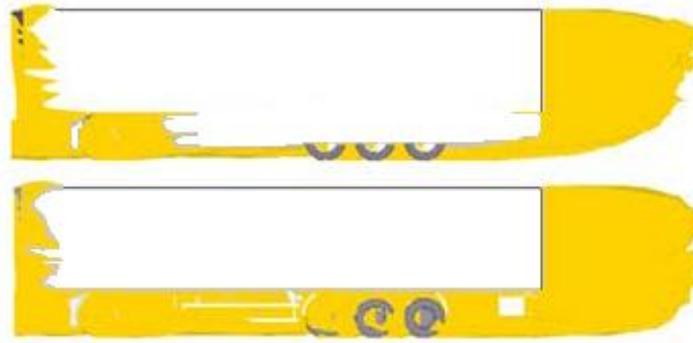
versehen. Die hierbei entstandene Ausführung erzeugte eine  $c_T$ -Wert Reduktion von  $c_T = 0,061$ . Aufgrund seiner enormen Wirkung wurde diese modifizierte Version zum Patent angemeldet und als Produkt verwirklicht [45].

Aus den obigen Messergebnissen (s. Tab. 5.1) wird die Wirkung einer Abschirmung der Reifen am Auflieger ersichtlich. So hat sich der Luftwiderstand von Nr. 3 zu Nr. 4 um 4% verschlechtert. Es zeigt sich, dass die Verkleidung der Reifen im Bezug auf die Reduktion des Luftwiderstandes wirkungsvoll ist.

Tab. 5.1 zeigt nur  $c_T$ -Werte bei idealer Anströmung. Wie der Quelle [46] entnommen werden kann, verhielten sich die Messwerte mit zunehmender Schräganströmung unter dem Winkel  $\beta$  nahezu konstant. Dies steht im Kontrast zur oben aufgeführten Abhängigkeit der Seitenverkleidung von der Schräganströmung (s. Abb. 5.45). Des Weiteren wurde bei den Messungen kein detailgetreues Modell einer Zugmaschine verwendet. Durch die vereinfachte Form kann somit kein der Realität entsprechendes Umströmungsfeld erzeugt werden. Daher geben die aufgeführten  $c_T$ -Werte nicht die in der Realität erzielbaren Werte wieder, lassen jedoch Rückschlüsse auf die Eigenschaften und das Verhalten der Anbauteile im Großformat ziehen.

Für den praktischen Einsatz können die Seitenverkleidungen zusätzlich mit Boxen versehen werden, die als Stauraum dienen. Wie Ergebnisse laut [42] gezeigt haben, verbessert eine Kombination von Seitenverkleidung und Stauboxen die Wirkung zusätzlich. Dieses Ergebnis steht im Kontrast zu dem im Modellversuch der TU Delft ermittelten Ergebnis Nr. 5 und sollte daher weiter verfolgt werden.

Abschließend können die Seitenverkleidungen folgendermaßen bewertet werden: Wie einleitend beschrieben wurde, kann mit Hilfe von Seitenverkleidungen der Luftstrom unter dem Auflieger vermindert und so zu einer Reduzierung der Wirbelbildung beigetragen werden. Dies wird durch die folgende CFD-Berechnung veranschaulicht:



**Abb. 5.48: CFD-Berechnung einer Aufliegerumströmung [6]**

(oben: mit Seitenverkleidung, unten: ohne Seitenverkleidung)

Darüber hinaus bestätigen Ergebnisse aus Versuchen im Maßstab 1:1 die vorteilhafte Wirkung von Seitenverkleidungen am Auflieger (s. Tab. 5.2):

**Tab. 5.2: Änderung des gemittelten  $c_w$ -Werts durch Seitenverkleidungen**

Messwert		Bedingungen	Quelle
$\overline{c_w}$	-0,0300	Fahrzeug unter europäischen Betriebsbedingungen	[10]
$\overline{c_w}$	-0,0376	Fahrzeug (H) bei 96 km/h (60 mi/h) im Windkanal	[40]
$\overline{c_w}$	-0,0421	Fahrzeug (H) bei 105 km/h (65 mi/h) im Windkanal	[11]

Unter Vergleich dieser Ergebnisse stellt sich eine Wirksamkeit von  $\overline{c_w} = -0,03$  unter realen Betriebsbedingungen als erzielbar dar.

### 5.3.5.4 Vollverkleidung

Mit einer Vollverkleidung eines Aufliegerunterbaus (s. Abb. 5.49) werden vergleichbare Ziele verfolgt wie mit den zuvor behandelten Seitenverkleidungen. Eine Reduktion des Luftwiderstandes soll einerseits durch Versperrung des Raumes, darüber hinaus jedoch auch durch gezielte Luftführung unterhalb des Aufliegers erreicht werden. Die Luft durchströmt drei Bereiche der Verkleidung: Zu Beginn wird sie nach dem Eintritt an der Aufliegerstütze und den Palettenboxen vorbeigeleitet, anschließend in einer Düse im Bereich des Fahrgestells beschleunigt und schließlich mittels eines Diffusors am Ende des Aufliegers in den Totwasserbereich des Hecks eingeleitet. In der Theorie führt dies zu einer Verminderung des Totwasserbereichs und damit einhergehend zu einer Reduktion des Luftwiderstandes [24].



**Abb. 5.49: Vollverkleidung des Aufliegerunterbaus [28]**

In Versuchen wurde der Einfluss auf den Luftwiderstand ermittelt. Die erzielten Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle (s. Tab. 5.3) dargestellt:

**Tab. 5.3: Versuchsergebnisse der Vollverkleidung**

Nr.	Bauteilbeschreibung		$\Delta c_T$	$\beta$ [°]
8	Vollverkleidung	Räder abgedeckt und Diffusor	-0,030	0
9	Vollverkleidung	Räder nicht abgedeckt und Diffusor	-0,017	0

(Versuchsbedingungen äquivalent zu Tab. 5.1)

Im Vergleich der Versuchsergebnisse der Seiten- (s. Tab. 5.1) und Vollverkleidung (s. Tab. 5.3), schneidet die Seitenverkleidung besser ab. Da jedoch nur ein Ergebnis aus einer (Modell-)Messung zu Grunde liegt, konnten die Ergebnisse nicht mit an-

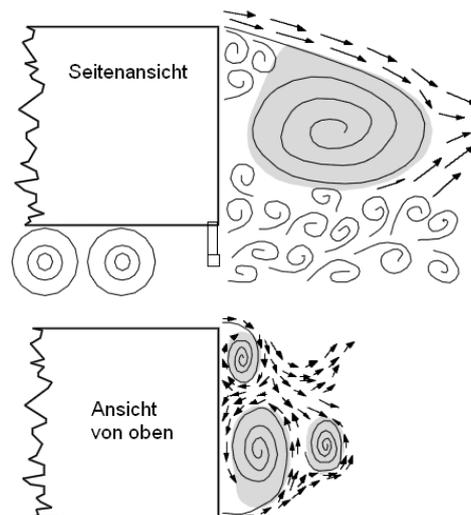
deren verglichen werden, um so eine repräsentative Aussage über die Auswirkung am Realfahrzeug herbeizuführen.

### 5.3.6 Maßnahmen am Heck

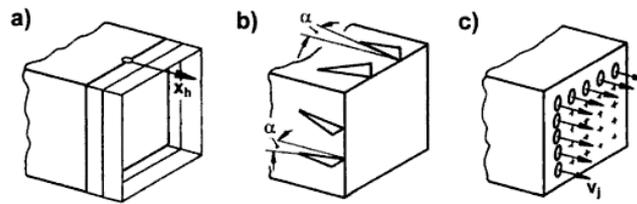
Wie oben (s. Kap. 5) gezeigt wurde, wird am Heck des Sattelauflegers ein großer Teil des Luftwiderstandes erzeugt. Dieser Bereich bietet daher ein großes Potenzial, diesen Widerstand zu senken.

Eine Reduzierung des Luftwiderstandes kann erreicht werden, indem der Totwasserbereich am Heck (s. Abb. 5.50) durch gezielte Maßnahmen vermindert und so der Druck in diesem Gebiet angehoben wird [16].

In Abb. 5.51 sind verschiedene Maßnahmen abgebildet, die den Basiswiderstand eines stumpfen Körpers reduzieren. Neben dem Anbringen von Platten (a)) oder von Flügeln, die eine Wirbelbildung erzeugen (b)), kann der Unterdruck durch aktives Ausblasen von Luft (c)) reduziert werden.



**Abb. 5.50: Entstehung des Totwasserbereichs [15]**



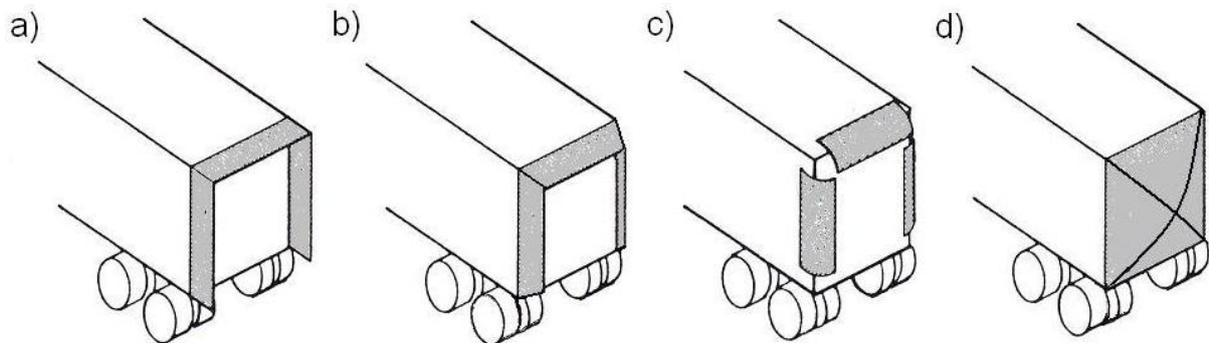
**Abb. 5.51: Maßnahmen zur Senkung des Basiswiderstandes [16]**

Im Folgenden werden Maßnahmen vorgestellt, die zur Reduktion des Luftwiderstandsbeitrages des Hecks entwickelt wurden.

### 5.3.6.1 Heckeinzug

Mittels eines Heckeinzugs kann erreicht werden, dass die den Auflieger umströmende Luft hinter dem Auflieger nach innen geführt und so eine Anhebung des Basisdrucks erzeugt wird.

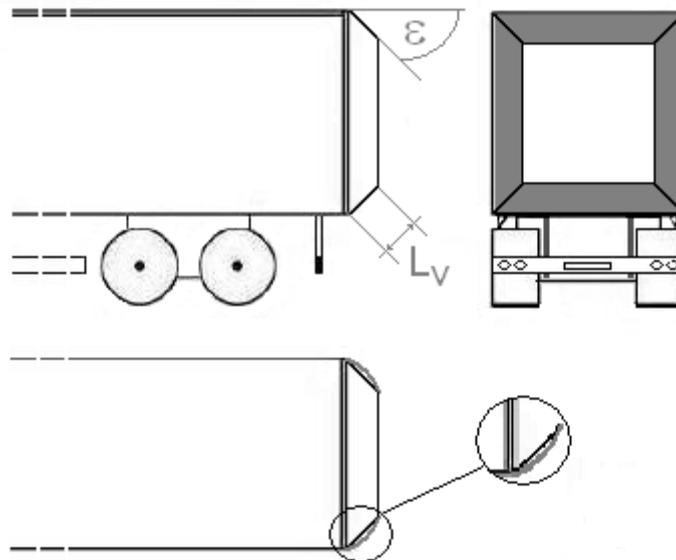
Zur Umsetzung gibt es verschiedene Ausführungsmöglichkeiten:



**Abb. 5.52: Heckeinzugsvarianten [8]**

- a) Verlängerungsflächen, mit gerader Anbringung
- b) Verlängerungsflächen, mit schräger Anbringung
- c) Umlenkschaufeln
- d) Heck-Vollverkleidung

Der Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung liegt auf den Verlängerungsflächen mit Schräganstellung (s. Abb. 5.52, b)). Dazu wurde eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt, um deren Eigenschaften und optimale Ausführung zu ermitteln.



**Abb. 5.53: Parameter am Heckeinzug [42]**

Folgende Parameter definieren den Heckeinzug (s. Abb. 5.53): Form, Länge ( $L_v$ ), Winkel ( $\varepsilon$ ) und Anzahl ( $n$ ) der Verlängerungsflächen.

Die Form der Verlängerungsflächen wurden in einem Modellversuch (Maßstab: 1:8) [42] untersucht. Im Vergleich standen gerade und gekrümmte Flächen. Das Ergebnis erbrachte vergleichbare Werte mit einer minimalen Überlegenheit der geraden Flächen im Bereich eines Winkels  $\varepsilon$  von  $12,5^\circ$  (s. Tab. 5.4).

**Tab. 5.4: Vergleich von geraden und gekrümmten Verlängerungsflächen**

Winkel $\varepsilon$ [°]	$\Delta c_w$ [%]	
	gerade	gekrümmt
5	-6	-7
12,5	-9	-8

Bei der Festlegung der Länge (L) ist es laut [46] nicht wirkungsvoll, Flächen von mehr als 25% der Aufliegerbreite anzubringen. In [11] wurden Ergebnisse zur Untersuchung der optimalen Länge mit  $L_{opt.} = 0,51 \text{ m}$  (20 in) angegeben. Die optimale Stellung der Verlängerungsflächen unter dem Winkel ( $\varepsilon$ ) wurde in weiteren Versuchen untersucht (s. Tab. 5.5):

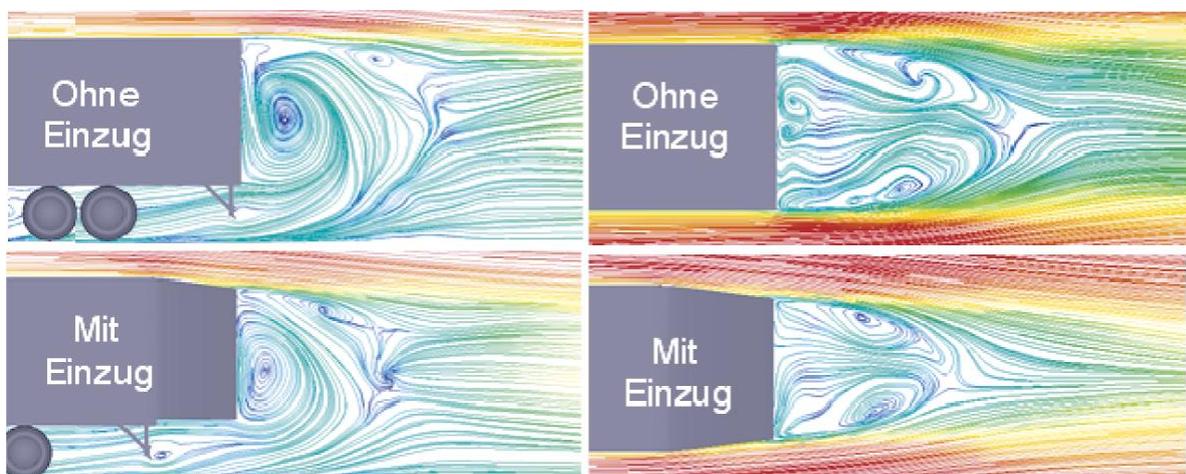
**Tab. 5.5: Optimaler Einstellwinkel der Verlängerungsflächen am Heck**

Versuchsbeschreibung	Winkel $\varepsilon_{opt.}$ [°]	Quelle
1:1 Windkanalversuch (H)	15	[11]
1:1 Straßenversuch (H)	15	[46]
1:1 Straßenversuch (H)	13	[29]

Es ergibt sich im Vergleich ein optimaler Winkel von ca.  $14^\circ$  nach innen.

Darüber hinaus wurde in [11] die Winkelstellung  $\varepsilon = 0^\circ$  untersucht und dabei keine verbessernde Wirkung bezüglich des Luftwiderstandes festgestellt. Dies zeigt, dass eine derartige Anbringung der Verlängerungsflächen (s. Abb. 5.52, a) die Luft nicht ausreichend nach innen führen kann.

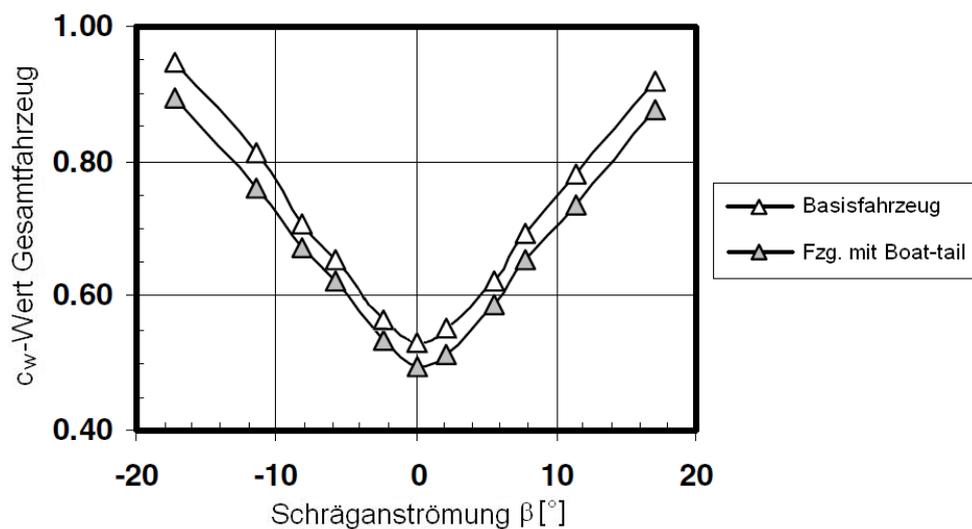
Die Wirkung eines Heckeinzugs wird anhand einer CFD-Simulation anschaulich:



**Abb. 5.54: CFD-Berechnung eines Heckeinzugs [6]**

Wie in Abb. 5.54 gezeigt, wird die Luft unter Einsatz eines Heckenzugs hinter dem Auflieger enger zusammengeführt. Dadurch verkleinert sich das Totwassergebiet und die widerstandserzeugende Wirbelbildung wird reduziert.

Mittels eines 1:1 Windkanalversuchs wurde das Verhalten des Heckenzugs unter Schrägeinströmung ermittelt. Das Ergebnis (s. Abb. 5.55) zeigt, dass der Heckenzug eine geringe Schräganströmungsempfindlichkeit aufweist und so im gesamten Anströmbereich nahezu gleiche Wirkung bietet.



**Abb. 5.55: Heckenzug unter Schräganströmung [11]**

**Tab. 5.6: c<sub>w</sub>-Wert Veränderung mittels Heckenzug**

Nr.	Versuch	Platten n	Vollverkl.	Länge L [m]	Winkel ε [°]	Geschw. v [km/h]	Messwert	Quelle
1	1:1 Windkanal (H)	3		0,61	13	89	$\Delta c_w = -0,054$	[47]
2		3		0,61	13	105	$\Delta c_w = -0,052$	
3	1:1 Windkanal (H)	3		k.A.	k.A.	96	$\overline{\Delta c_w} = -0,051$	[40]
4			x				$\overline{\Delta c_w} = -0,044$	
5	1:1 Windkanal (H)	3		0,51	15	96	$\overline{\Delta c_w} = -0,034$	[11]
6		4		0,51	15	96	$\overline{\Delta c_w} = -0,038$	

Die Untersuchung der luftwiderstandsreduzierenden Wirkung wurde in weiteren Versuchen durchgeführt (s. Tab. 5.6).

Abschließend lässt sich die ideale Anbringung eines Heckeinzuges folgendermaßen zusammenfassen:

Form: gerade Flächen

Länge ( $L_v$ ): ca. 0,5 - 0,6m

Winkel ( $\varepsilon$ ): ca. 14°

Anzahl (n): 3 – 4

Eine Verbesserung des Luftwiderstandsbeiwertes  $\overline{\Delta c_w} = 0,035-0,05$  kann, wie Tab. 5.6 zeigt, in Verbindung mit einem Haubenfahrzeug erreicht werden. Wird ein Frontlenkerfahrzeug verwendet, kann eine geringere Wirkung eintreten.

Darüber hinaus bringt die Verwendung eines Heckeinzugs die Reduzierung von Spritzwasserverwirbelungen hinter dem Auflieger mit sich, wodurch die Sicherheit der nachfolgenden Fahrzeuge erhöht wird.

Problematisch ist derzeit, dass die Maximalabmessungen der Fahrzeuge gesetzlich vorgeschrieben sind. Eine Realisierung eines Heckeinzugs unter diesen Rahmenbedingungen bringt daher Einbußen des Ladevolumens mit sich. Weiter kann die Anbringung eines Heckeinzuges die Zugänglichkeit des Laderaums beeinträchtigen. Dies sollte bei der Entwicklung und Konstruktion berücksichtigt werden.

### **5.3.6.2 Umlenkschaufeln**

Wie in Abb. 5.52, c) aufgeführt, kann mit Hilfe von Umlenkschaufeln auch erreicht werden, dass die Luft hinter dem Heck des Aufliegers zusammengeführt wird. Umlenkschaufeln sind gebogene Flächen, die nicht direkt am Auflieger ansetzen, so dass Luft zwischen den Flächen und dem Auflieger gezielt kanalisiert werden kann und diese dann durch die gebogene Flächenform bzw. einer Anstellung in den Bereich des Totwassergebiets geleitet wird. Dadurch wird der Druck im Totwassergebiet angehoben.

Laut Hucho [8] konnte eine positive Wirkung im Dreidimensionalen nicht erzielt werden. „Der zusätzliche Widerstand der Umlenkschaufeln war offensichtlich größer als

die Erhöhung des Druckes auf der Heckfläche“ [8]. Nichtsdestotrotz gibt es Produkte auf dem Markt, wie das „System Drag Reduction“ (SDR), bei denen das Konzept der Umlenkschaufeln aufgegriffen wurde (s. [Abb. 5.56](#)). Der Hersteller [48] gibt dafür eine Verbrauchsreduzierung von 4-6% an.



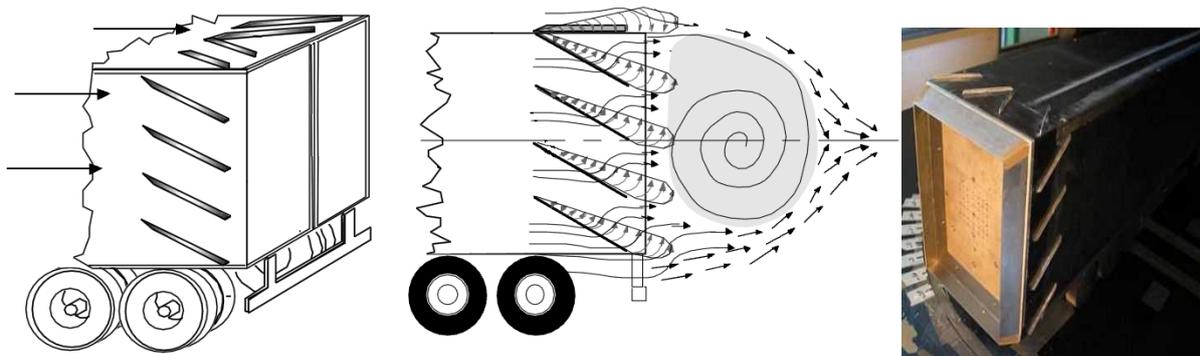
**Abb. 5.56: System Drag Reduction [48]**

### 5.3.6.3 Heck-Vollverkleidung

Mittels einer Vollverkleidung (s. [Abb. 5.52, d](#)) wird versucht, das Heck stromlinienförmiger zu gestalten. Die Luft wird möglichst weit zusammengeführt, um so eine Ausbildung des Totwassers zu vermeiden.

In einem Versuch [40] wurde die Wirkung eines Boat-tails auf den  $c_w$ -Wert untersucht. Es konnte eine Verbesserung des  $c_w$ -Wertes ermittelt werden ( $\Delta \overline{c_w} = 0,044$ ; s. [Tab. 5.6](#), Nr. 4). Jedoch schnitt die vollständig geschlossene Ausführung im Vergleich zum Standardheckeinzug nicht überlegen ab.

### 5.3.6.4 Wirbelerzeuger



**Abb. 5.57: Wirbelerzeuger [15,58]**

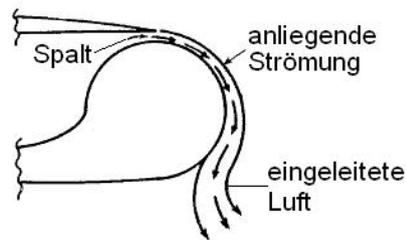
Wie in Abb. 5.52, b) bereits als mögliche Optimierungsmaßnahme aufgeführt, können Flügel am Auflieger angebracht werden. Diese an den Seiten und dem Dach des Aufliegers positioniert, erzeugen beim Überströmen der Luft Längswirbel (s. Abb. 5.57), welche die Scherschicht zwischen der strömenden Luft und dem Totwasserbereich aufbrechen. Dadurch wird eine Bildung von großen Wirbeln erschwert und so der Basisdruck angehoben [16]. Eine derartige Maßnahme lässt sich mit geringem Aufwand und kostengünstig umsetzen [24].

Bei einem 1:1 Windkanalversuch mit einem Haubenfahrzeug konnte eine verbessernde Wirkung nicht festgestellt werden. Die  $c_w$ -Wertänderung belief sich auf  $\Delta \overline{c_w} = +0,0195$  [40]. Weitere Quellen [15,38] geben jedoch eine mögliche Reduzierung des Luftwiderstandes an.

### **5.3.6.5 Luftausblasung**

Wie von Hucho [16] als grundlegende Möglichkeit der Luftwiderstandsreduzierung aufgezeigt (s. Abb. 5.51, c)), kann durch aktives Ausblasen von Luft der Widerstand am Heck eines Aufliegers reduziert werden.

Die Technologie der Luftausblasung hat bereits Potenzial in der Luftfahrt gezeigt und wurde daher zur Reduzierung des Luftwiderstandes auf das Nutzfahrzeug übertragen. In [49] wird ein derartiges System vorgestellt. Am Heck des Aufliegers werden Verkleidungen zur Abrundung der Ecken angebracht (s. Abb. 5.58). Über Spalte wird tangential Luft ausgeblasen. Diese Luft strömt entlang der abgerundeten Verkleidung und folgt dieser hinter das Heck. Die Umgebungsluft wird durch das nach Innenströmen der ausgeblasenen Luft ebenfalls mit nach innen gezogen und löst daher nicht am Ende des Aufliegers ab. Durch das Einleiten der Umgebungsluft in den Totwasserbereich, wird der dort vorherrschende Druck angehoben und der Luftwiderstand des Aufliegers gesenkt.



**Abb. 5.58: Abgerundete Ecken am Heck, Prinzip tangentialer Ausblasung [50]**

Versuche haben gezeigt, dass diese Technologie einen reduzierenden Einfluss auf den Luftwiderstand eines Aufliegers hat. Eine Reduktion von 30% konnte laut [50] erreicht werden. Gesetzliche Bestimmungen und die Komplexität des Aufbaus ermöglichen eine Realisierung dieses Systems für den praktischen Einsatz derzeit allerdings nicht.

### **5.3.7 Maßnahmen im unteren Heckbereich**

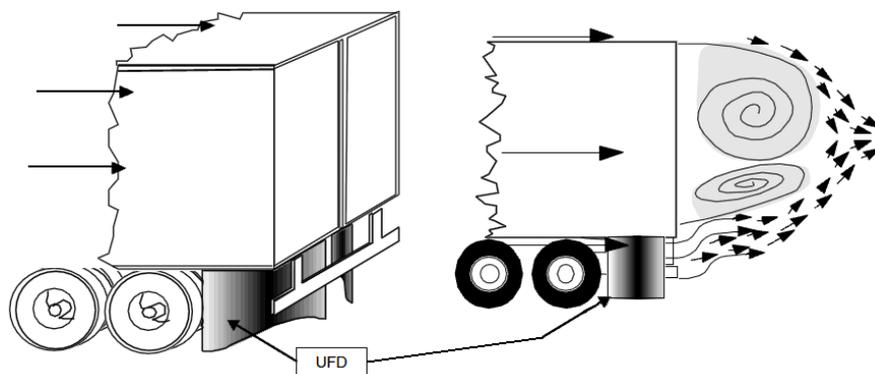
Im unteren Bereich des Hecks können darüber hinaus Optimierungen vorgenommen werden. Bei einem Modellversuch [4] wurde der Einfluss einer Versperrung der Durchströmung in diesem Bereich des Aufliegerhecks betrachtet. Dabei konnte eine enorme Erhöhung des Luftwiderstandes ermittelt werden. Durch das Verblocken erhöhte sich der  $c_T$ -Wert um  $\Delta c_T = 0,102$ . Dieser Wert macht deutlich, dass auch dem Bereich hinter dem Fahrgestell des Aufliegers besondere Beachtung geschenkt werden muss, um das Gesamtfahrzeug zu einem aerodynamisch optimalen Objekt zu formen.

#### **5.3.7.1 Schmutzfänger**

Wie bei der Betrachtung des Fahrgestells (s. Kap. 5.2.5) bereits aufgezeigt wurde, tragen Schmutzfänger zur Erzeugung von Luftwiderstand bei, da an ihnen unter Anströmung ein hoher Druck an der Vorderseite und ein niedriger an der Rückseite vorliegen und sie damit zusätzlichen Druckwiderstand erzeugen. Ihre Funktion ist es, die Verschmutzung nach hinten zu reduzieren, jedoch erhöhen sie gleichzeitig die seitliche Verschmutzung.

Eine mögliche Verbesserung des Bereichs hinter dem Fahrgestell des Aufliegers und ein gleichzeitiger Ersatz für die Schmutzfänger zeigt sich in Form eines „Undercarriage Flow Device“ (UFD) (s. [Abb. 5.59](#)) [15].

Bei einem UFD wird die unter dem Fahrzeug strömende Luft nicht wie bei einem Schmutzfänger geblockt und seitlich verdrängt, sondern kanalisiert, durch eine verengende Form beschleunigt und gezielt in den Totwasserbereich eingeleitet. Es wird dort dadurch die Wirbelstruktur verändert und Energie hinzugefügt. Es bildet sich ein von der Luft geformtes, stabiles, verjüngtes Nachlaufgebiet aus. Dadurch wird der Druck hinter dem Auflieger erhöht und der Widerstand des Fahrzeugs vermindert.



**Abb. 5.59: Undercarriage Flow Device (UFD) [15]**

Bei einem Straßenlangzeittest [15] konnte unter Verwendung des UFD eine Reduzierung des Luftwiderstands festgestellt und dadurch eine Kraftstoffverbrauchsreduzierung von 0,8 – 3,3% erzielt werden. In [38] wird eine mögliche Luftwiderstandsreduzierung von 10% angegeben.

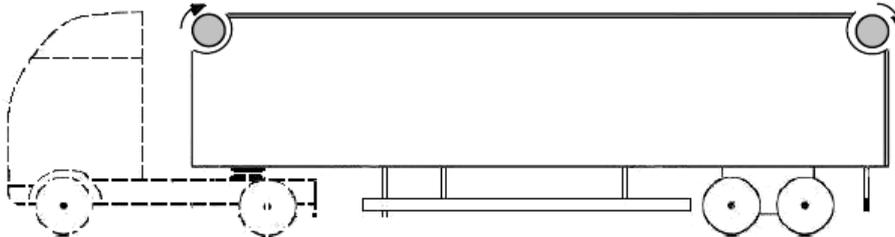
### **5.3.7.2 Unterfahrschutz**

Gesetzlich ist das Anbringen eines Unterfahrschutzes am Heck eines Aufliegers vorgeschrieben [51]. Es empfiehlt sich bei dessen Gestaltung aerodynamische Gesichtspunkte mit einzubeziehen und so zur Vermeidung der Verblockung des unteren Heckbereichs beizutragen. Durch eine strömungsgünstige Profilgebung des Unterfahrschutzes und der Schaffung eines Bereiches, in dem die Luft zwischen dem Unterfahrschutz und der Aufliegerunterseite hindurchströmen kann, ist dieses gewährleistet.

### 5.3.8 Maßnahmen am Aufliegerdach

An der Oberseite des Aufliegers können ebenfalls die Aerodynamik verbessernde Maßnahmen vorgenommen werden, die im folgenden vorgestellt werden.

#### 5.3.8.1 Magnus Rotoren



**Abb. 5.60: Magnus Rotoren am Aufliegerdach**

Mit Hilfe von Magnus Rotoren (s. [Abb. 5.60](#)) ist es möglich, eine Strömung um eine Ecke zu führen, indem diese durch Rotation der überströmenden Luft Energie zuführen. Derartige Rotoren können an der Oberseite des Aufliegers angebracht werden. An der oberen Vorderkante des Aufliegers kann dadurch die Strömung zum Anliegen gebracht und am Heck ein Ablösen dieser unterbunden werden [24]. Als Folge daraus kann eine verminderte Wirbel- und Luftwiderstandsbildung erzielt werden. Eine Luftwiderstandsreduzierung von 20% ist laut [38] realisierbar.

#### 5.3.8.2 Dacheinzug

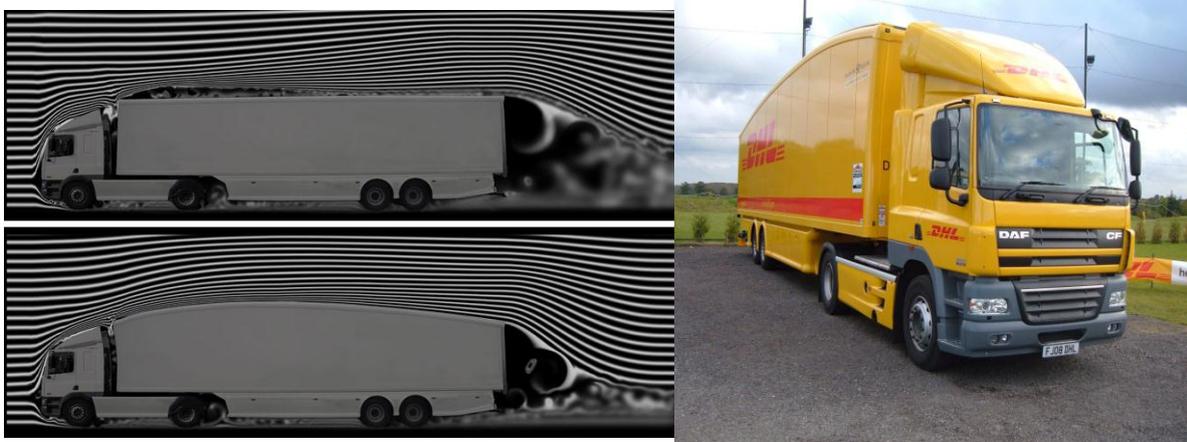


**Abb. 5.61: Dacheinzug [24]**

Durch das Einziehen des Daches am Heck des Aufliegers (s. [Abb. 5.61](#)) kann eine Reduzierung der Heckfläche und damit des Basisdruckes erzielt werden. Idealerweise erfolgt das Einziehen über eine möglichst lange Strecke mit einem maximalen Winkel von  $12^\circ$  [24], damit ein Ablösen der Strömung unterbunden wird.

Dem nachteiligen Effekt eines Laderaumverlustes durch diese Maßnahme steht eine Senkung des  $c_W$ -Wertes von  $\Delta \overline{c_W} = 0,02$  [10] positiv gegenüber.

### 5.3.8.3 Teardrop-Design



(oberes Bild: Standardauflieger; unteres Bild: Teardrop-Design)

**Abb. 5.62: Aufliegervergleich [52]**

Der Formwiderstand (s. Kap. 4.2) hat den größten Einfluss auf den Luftwiderstand. So weist ein Tropfen einen viel geringeren Luftwiderstand als ein quaderförmiger Körper auf. Das Prinzip eines Wassertropfens wurde bei dem Entwurf eines neuen Aufliegerdesigns aufgegriffen (s. [Abb. 5.62](#)). Aus dem quaderförmigen Grundkörper wurde ein Auflieger mit speziellem Dachverlauf entwickelt. Dabei hoben die Konstrukteure die Dachkontur auf 4,5 m an und erreichten dadurch, dass es nicht zu Ablösungen an der oberen Vorderkante des Aufliegers kommt und die umströmende Luft durch gezieltes Absenken des Daches den Totwasserbereich am Heck reduziert.

Durch Erhöhung des Dachverlaufs konnten Einbußen im Laderaum umgangen und zusätzlich 10% Ladevolumen hinzugewonnen werden. Trotz einer Anhebung des Daches und einer damit einhergehenden Vergrößerung der Stirnfläche  $A$ , kann eine

enorme Einsparung an Kraftstoff, durch einen sehr guten  $c_w$ -Wert, erreicht werden. Herstellerangaben zufolge kann durch die Verwendung eines derartigen Aufliegers eine durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsreduzierung von über 11% erreicht werden (Don-Bur) [52].

Allerdings schränken gesetzliche Höhenbestimmungen den Einsatz derartiger Auflieger stark ein. Ein Einsatz innerhalb Europas ist derzeit nur in England zulässig.

## 5.4 Gesamtzug

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Nutzfahrzeug anhand der einzelnen Bereiche Fahrerhaus, Fahrgestell und Auflieger abgehandelt. Es folgt die Betrachtung des Gesamtfahrzeugs.

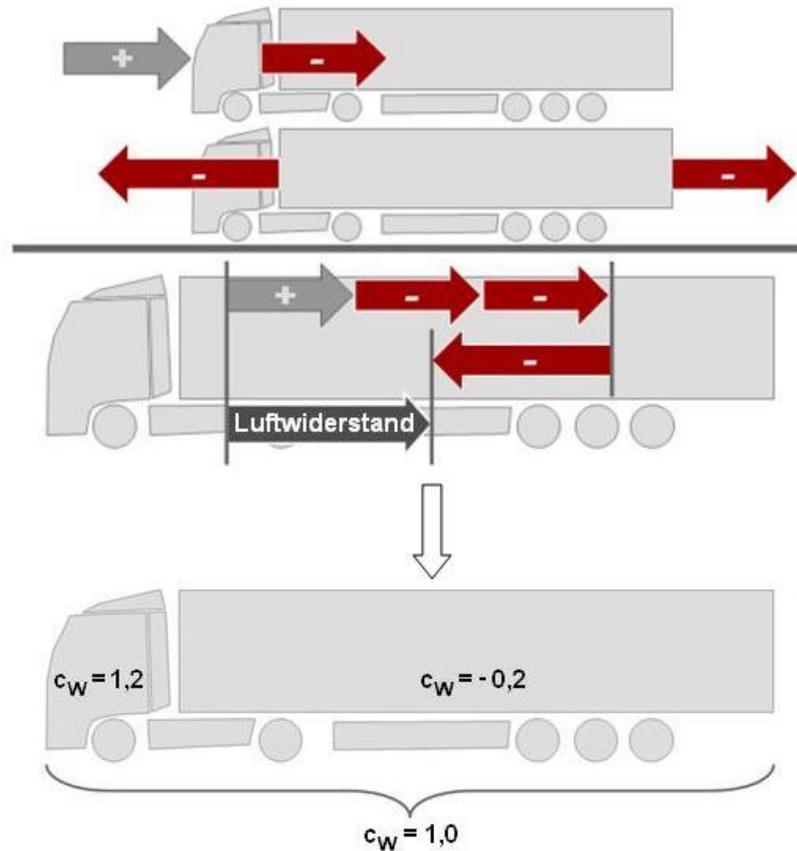
Die Nutzfahrzeughersteller haben in den vergangenen Jahrzehnten die aerodynamische Optimierung der Zugmaschinen weit vorangetrieben und damit ein hohes Niveau erreicht. Gleichzeitig verbesserten die Hersteller von Aufliegern und Nutzfahrzeugaufbauten die aerodynamischen Eigenschaften ihrer Produkte. Um jedoch ein aerodynamisch optimales Produkt zu erzielen, muss das Gesamtfahrzeug betrachtet und somit die Zugmaschine und der Auflieger aufeinander abgestimmt werden.

Da die Aerodynamik ein nichtlineares Verhalten aufweist, kann der Luftwiderstand eines Fahrzeugs nicht aus der Summe der Einzelwiderstände von Zugmaschine und der Auflieger ermittelt werden. Dies gründet darauf, dass sie sich gegenseitig abschirmen und so ihre Umströmung gegenseitig beeinflussen.

Verschiedene Windkanalversuche und CFD-Berechnungen haben gezeigt, dass der Gesamtluftwiderstand eines modernen Sattelzuges geringer ist als der Einzelwiderstand der Zugmaschine (s. [Abb. 5.63](#)). Den Grund dafür stellen die unterschiedlichen Druckverteilungen an der Stirnfläche und dem Heck der Einzelfahrzeuge dar.

Derartiges Interferieren stellt sich auch bei der Anbringung von Anbauteilen ein. Daher kann der Luftwiderstandskoeffizient  $c_w$  unter Einfluss von Anbauteilen nicht ermittelt werden, indem der  $c_w$ -Wert des Basisfahrzeugs um die luftwiderstandsreduzierenden  $c_w$ -Werte der Anbauteile vermindert wird. Es ist somit unabdingbar, die Komponenten in Verbindung mit dem Fahrzeug zu messen, um den  $c_w$ -Wert der Ge-

samtkonfiguration zu erhalten. Erst dadurch wird eine qualitative Bewertung der Aerodynamik des Gesamtfahrzeugs möglich.



**Abb. 5.63: Gesamtluftwiderstand eines Sattelzuges [57]**

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Vielzahl an Möglichkeiten und Anbauteilen zur aerodynamischen Optimierung des Fahrzeugs vorgestellt. Es muss jedoch eine gezielte Auswahl getroffen werden. Eine aussichtsreiche Erweiterung eines Haubenfahrzeugs bzw. eines Frontlenkerfahrzeugs mit Windleitkörpern stellt das Anbringen von Endkantenklappen, Seitenverkleidungen und eines Heckinzugs dar [47]. Diese verbessern unterschiedliche Bereiche am Fahrzeug und ergänzen sich so, ohne ihre Wirkung gegenseitig aufzuheben. Die Auswirkung einer solchen Konfiguration wurde mittels Windkanaluntersuchungen ermittelt.

Anhand eines 1:1 Haubenfahrzeugs [47] wurde der Einfluss der einzelnen Anbauteile bei zwei Geschwindigkeiten gemessen und dabei ihre  $\overline{c_W}$ -Werte ermittelt. Zusätzlich wurden alle Anbauteile am Fahrzeug angebracht und eine Gesamtreduktion des  $\overline{c_W}$ -

Werts bestimmt. Wie Tab. 5.7 entnommen werden kann, stellt die Summe der erreichten Einzelwerte nicht den tatsächlich erzielten Endwert dar. Dieser Sachverhalt zeigt anschaulich die oben angesprochene Nichtlinearität. Durch die Anbringung der drei Anbauteile konnte eine Verbesserung des  $\overline{c_w}$ -Werts von 0,136 herbeigeführt werden, was einer prozentualen Verbesserung von 23% dieses Fahrzeugs entspricht.

**Tab. 5.7: Ergebnisse Gesamtfahrzeugkonfigurationen**

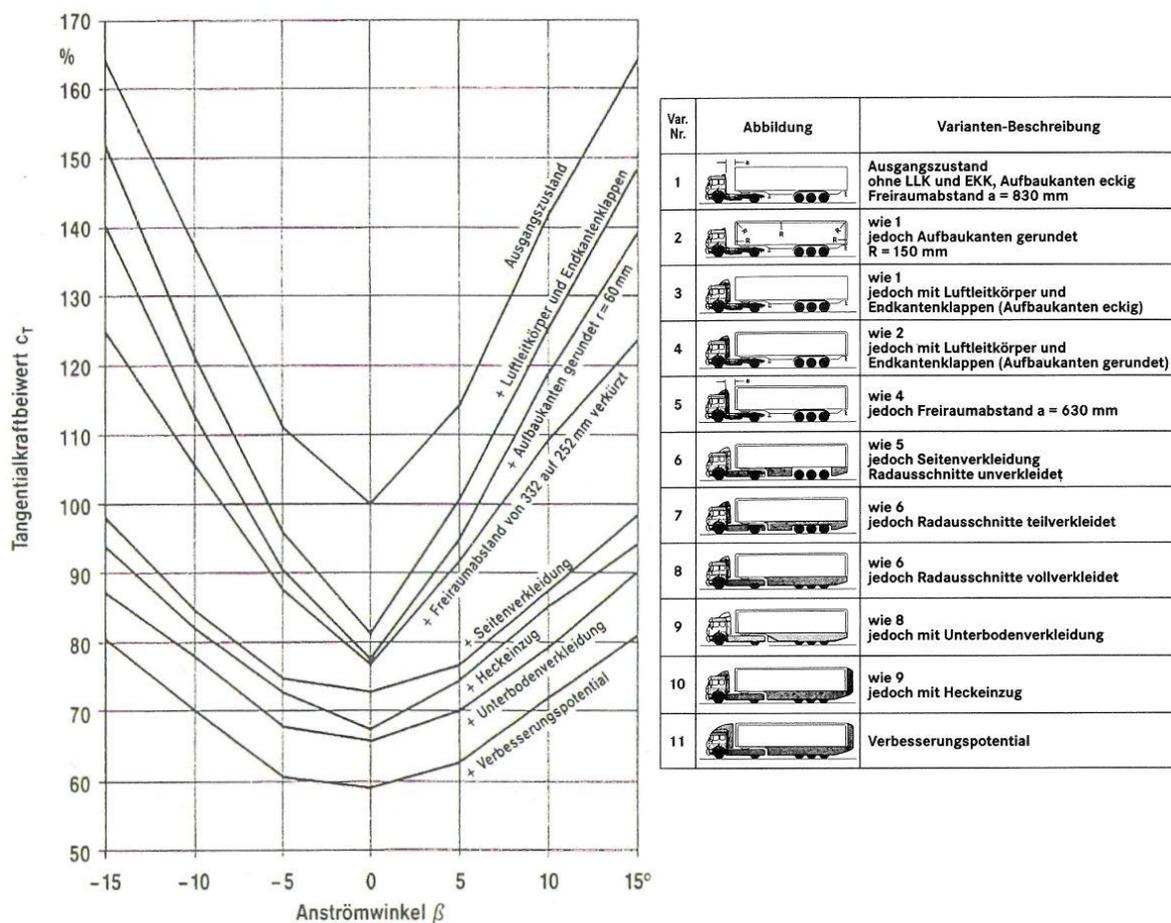
Quelle:	[47]		[40]	[53]	
	1:1 Windkanal (H)		1:1 Windkanal (H)	1:4 Modell (H)	
	$\overline{c_w}$		$\overline{c_w}$	$\overline{c_w}$	
Geschwindigkeit:	89km/h	107km/h	107km/h	89km/h	107km/h
Basisfahrzeug:	0,716	0,695	k.A.	0,554	0,534
$\Delta$ Werte:					
Endkantenklappen	0,077	0,073	k.A.	0,039	0,031
Seitenverkleidung	0,057	0,052	k.A.	0,110	0,097
Heckeinzug	0,054	0,052	k.A.	0,057	0,049
$\Delta$ Gesamt	0,136	0,128	0,111	0,185	0,167
Prozentsatz [%]	23	23		33,4	31,3
Endwert:	0,580	0,567		0,369	0,367

Eine Senkung des  $\overline{c_w}$ -Werts in ähnlicher Größenordnung konnte bei einem weiteren Versuch in [40] bestätigt werden. Durch das Anbringen von Endkantenklappen, Seitenverkleidungen und eines Heckeinzugs war eine Reduzierung des Luftwiderstandes von  $\overline{c_w} = 0,111$  möglich.

Mit [54] wurde bereits im Jahr 1991 ein Artikel veröffentlicht, der anhand von Versuchsergebnissen zeigt, wie stark die Fahrwiderstände bei Sattelzügen reduziert

werden können. Auf Basis eines detailgetreuen 1:2,5 Frontlenker-Sattelzugmodells wurden im Modellwindkanal verschiedene Anbauteile an das Modell angebracht und deren Auswirkung schrittweise ermittelt.

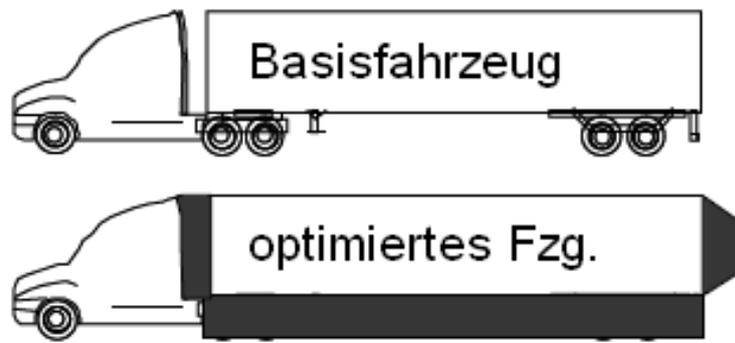
In Abb. 5.64 sind die Ergebnisse der 1:2,5 Modellmessung aufgetragen. Die prozentuale Tangentialkraftbeiwertänderung  $c_T$  ( $\beta = 0^\circ \triangleq c_W$ ) ist über dem Anströmwinkel  $\beta$  dargestellt und gibt Aufschluss über die Änderung des Tangentialkraftbeiwerts unter dem Einfluss von Optimierungsmaßnahmen. Das Schaubild zeigt übersichtlich die Wirkung zahlreicher aerodynamischer Optimierungsmaßnahmen, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden. So wird zum Beispiel deutlich, dass der Windleitkörper (hier: Luftleitkörper (LLK)) bei idealer Anströmung seine größte Wirkung aufweist und bei Schräganströmung die Seitenverkleidung zunehmend seine Wirkung entfaltet. Darüber hinaus gibt es Aufschluss darüber, welches Potenzial derartige Maßnahmen haben. Durch die optimierte Umsetzung der einzelnen Konzepte konnte der  $c_T$ -Wert über 40% gesenkt werden.



**Abb. 5.64: Ergebnisse einer Modellmessung [54,55]**

Eine aktuelle Studie [53] hatte ebenfalls zum Ziel das maximal umsetzbare Potenzial einer aerodynamischen Optimierung eines Nutzfahrzeugs zu ermitteln. Dafür wurde ein vereinfachtes 1:4 Modell eines Haubenfahrzeugs herangezogen und der Einfluss der einzelnen Anbauteile (s. Abb. 5.65) ermittelt. Die erzielten  $\overline{c_w}$ -Werte sind ebenfalls in Tab. 5.7 vorzufinden.

Anhand dieses Modellversuchs wurden die Grenzen der luftwiderstands-reduzierenden Maßnahmen aufgezeigt: Eine Reduktion des  $\overline{c_w}$ -Wert von über 30% und ein  $\overline{c_w}$ -Endwert von unter 0,4 konnten erreicht werden.



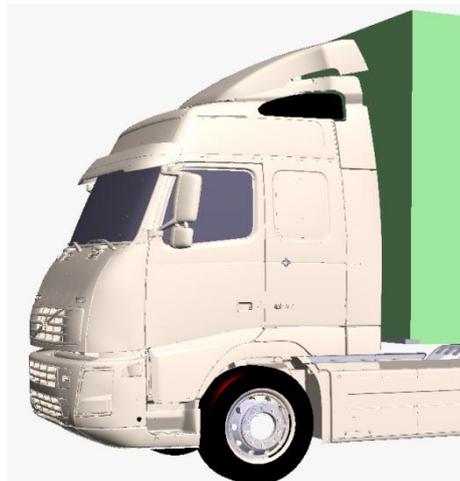
**Abb. 5.65: Anbauteile Konfiguration am Haubenfahrzeug [53]**

Die Modellversuche haben gezeigt, dass erhebliches Potenzial zur weiteren Reduzierung des Luftwiderstandes der Fahrzeuge vorhanden ist. Eine Reduktion von 30% scheint erreichbar. Am 1:1 Frontlenkerfahrzeug ist eine Verbesserung von 20% denkbar, da (s. Tab. 5.7) mit einem Haubenfahrzeug bereits eine Verbesserung des  $c_w$ -Werts von 23% erreicht wurde. Diese Werte zeigen, dass allein durch die Verwendung von technisch einfach umzusetzenden Maßnahmen eine enorme Verbesserung der Aerodynamik der Nutzfahrzeuge erreicht werden kann.

## 5.5 Zukünftige Entwicklungen

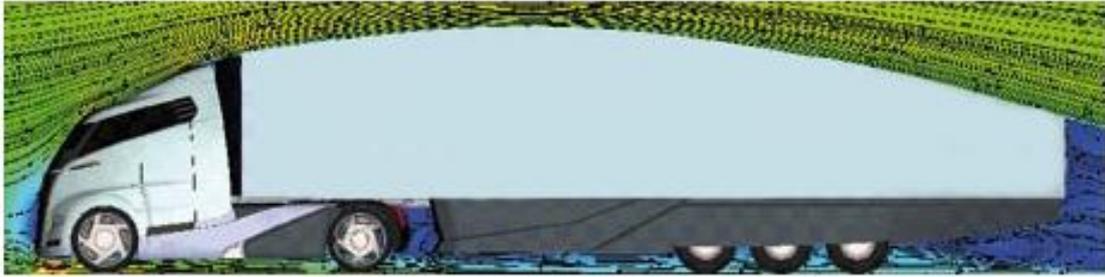
Für zukünftige Generationen der Nutzfahrzeuge wurden neue Konzepte entwickelt, um das Nutzfahrzeug weiter zu optimieren. In Studien und anhand von Konzeptfahrzeugen wurden bereits Ideen aufgezeigt:

Zur Optimierung der Formgebung des Fahrerhauses kann dessen stumpfe Form aufgegeben und keilförmiger gestaltet werden. Dies kann mittels einer Erweiterung des Fahrerhauses um eine „Crash nose“ [19] erreicht werden (s. [Abb. 5.66](#)). Dabei handelt es sich um einen verformbaren Körper, der die Front des Fahrzeugs abrundet und darüber hinaus als zusätzliche Knautschzone dient, welche Energie bei einem Aufprall absorbiert und so Verletzungsrisiken senkt. Weiter kann die Umströmung des Fahrerhauses verbessert werden, indem die Außenspiegel durch Kameras ersetzt werden. Dies ermöglicht nicht nur der Luft ein ungestörtes Umströmen des Fahrerhauses, sondern trägt auch durch die Erweiterung des Sichtfeldes des Fahrers positiv zur Fahrsicherheit bei [24].



**Abb. 5.66: Sattelzugmaschine mit Crash nose [19]**

Eine Studie zur Gesamtfahrzeugformgebung wurde im Jahr 2008 in Form eines Konzeptfahrzeugs von MAN vorgestellt. Dafür wurde die quaderförmige Grundform des Fahrzeugs modifiziert und die äußere Form „an der Strömungstopologie eines Delphins orientiert“ [20]. Durch die Anhebung des Daches, sowie die Verlängerung des Aufliegers wurde eine strömungsgünstige Form erzeugt (s. [Abb. 5.67](#)). Somit konnte ein  $c_W$ -Wert von  $c_W = 0,3$  erzielt werden.



**Abb. 5.67: Konzeptfahrzeug Delphin-Studie [20]**

Über die passiven Lösungen hinaus gibt es Ideen für aktive Systeme, die es ermöglichen, das Fahrzeug während der Fahrt aktiv zu verändern. Bei einer Fahrt in der Ebene bei hohen Geschwindigkeiten (z.B. Autobahnfahrt) kann das Fahrzeug abgesenkt oder durch Heranziehen des Aufliegers der Freiraum verringert werden, wie bereits im Jahr 1992 in einer Studie (EXT-92) von Mercedes Benz vorgestellt wurde [19]. Darüber hinaus gibt es Entwürfe zu aufblasbaren Anbauteilen, mit denen der Freiraum bzw. das Heck des Aufliegers je nach Bedarf adaptiert werden kann (IVECO) [28]. Wie andere Konzepte zeigen, kann auch durch aktives Ausblasen von Luft der Luftwiderstand des Fahrzeugs gesenkt werden (s. Kap. 5.1.6 und Kap. 5.3.13).

Es zeigt sich, dass zahlreiche Ideen zur weiteren Verbesserung der Nutzfahrzeug-aerodynamik vorhanden sind. Diese wirken sich nicht nur positiv auf die Aerodynamik aus, sondern können auch zur Erhöhung der Fahrsicherheit beitragen.

## **5.6 Abschlussbewertung**

Wie in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt wurde, gibt es eine große Anzahl an Möglichkeiten, die Aerodynamik eines Sattelzuges zu optimieren. Daher ist es notwendig, die vorhandenen Maßnahmen zu vergleichen, um eine sinnvolle Auswahl treffen zu können.

Aus zahlreichen veröffentlichten Experimenten wurden die Effekte der Optimierungsmaßnahmen zusammengetragen. Die Versuche wurden mit verschiedenen Randbedingungen (verschiedene Fahrzeuge, Messumgebung, etc.) durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse ist daher eine Herausforderung. Auch bei der Publizierung der Ergebnisse gibt es keine einheitliche Form, was zu Ergebnisangaben von  $\Delta c_W$ -Werten, gemittelten  $\Delta c_W$ -Werten oder auch nur einer prozentualen Verbesse-

nung ohne Angabe des Ausgangswertes des  $c_w$ -Wertes führt. Darüber hinaus fehlt meistens eine Fehlerabschätzung der erzielten Ergebnisse. Diese Umstände machen einen direkten Vergleich der Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen auf den Luftwiderstand nicht möglich.

Anhand der Tab. 5.8 soll dennoch eine Übersicht über die vorhandenen Maßnahmen gegeben werden. Diese veranschaulicht zum einen den Status der Maßnahmen, ob sie bereits im Einsatz sind, eine Verwendung in Aussicht steht oder sie sich derzeit noch in der Konzeptphase befinden. Zum anderen gibt sie Aufschluss über Gründe, die einer derzeitigen Umsetzung der Maßnahmen im Wege stehen.

**Tab. 5.8: Übersicht der Anbauteile**

Status	Nr.	Optimierungsmaßnahme	Anbringungsort			Gründe erschwerter Umsetzung
			Fahrerhaus	Fahrwerk	Auflieger	
Stand der Technik:	01	Radien am Fahrerhaus	x			-
	02	Luftleitdüse	x			-
	03	Optimierte Außenspiegel	x			-
	04	Windleitblech bzw. -körper	x			-
	05	Sonnenblende	x			-
	06	Endkantenklappen	x			-
	07	Frontschürzenverlängerung		x		-
	08	Fahrgestellseitenverkleidung		x		-
	09	Radien an der Aufliegerfront			x	-
	10	Radverkleidung (am Auflieger)			x	-
Aussichtsreiche Maßnahmen:	11	Unterbodenverkleidung		x		Effektivität unklar
	12	Felgenabdeckung		x	x	Effektivität unklar
	13	Schmutzfänger		x	x	Effektivität unklar
	14	Fahrgestellabdeckung		x		Konstruktion (Mehrkosten)
	15	Trennplatte			x	-
	16	Wirbelfalle			x	-
	17	Aufliegerfrontverkleidung			x	-
	18	Luftkegel			x	-
	19	Auflieger-Fahrgestellabdeckung			x	Konstruktion (Mehrkosten)
	20	Seitenverkleidung			x	Konstruktion (Mehrkosten)
	21	Vollverkleidung			x	Konstruktion (Mehrkosten)
	22	Heckeinzug			x	Gesetz (Längenüberschreitung)
	23	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)			x	Gesetz (Längenüberschreitung)
	24	Umlenkschaufeln			x	Gesetz (Längenüberschreitung)
	25	Wirbelerzeuger			x	Effektivität unklar
	26	Magnus Rotor			x	Effektivität unklar
	27	Dacheinzug			x	Konstruktion (Ladevolumenred.)
	28	Teardrop-Design			x	Gesetz (Längenüberschreitung)
Potentielle Konzepte:	29	Strömungsgünstige Gesamtform	x	x	x	Gesetz (Längenüberschreitung)
	30	Crash nose	x			Gesetz (Längenüberschreitung)
	31	Kameras	x			Gesetz
	32	Deturbulatorfolie	x			Effektivität unklar
	33	Aktive Systeme	x	x	x	Effektivität unklar

Die Maßnahmen Nr. 1 - 10 spiegeln den derzeitigen Stand der Technik wider. Es handelt sich hierbei um Lösungen, die sich bereits auf dem Markt etabliert haben. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, betreffen nahezu alle diese Maßnahmen den

Bereich des Fahrerhauses. Dies zeigt die Bestrebungen der Fahrzeughersteller, ihre Produkte aerodynamisch optimal zu gestalten.

Es folgt ein Abschnitt (Nr. 11 - 28) mit aussichtsreichen Maßnahmen, die sich hauptsächlich auf den Auflieger beziehen. Die aufgeführten Lösungen beeinflussen verschiedene Bereiche und werden daher getrennt voneinander bewertet.

Nr. 11 - 14 sind Maßnahmen, die technisch realisierbar sind und den Bereich des Fahrgestells verbessern. Diese haben sich noch nicht durchgesetzt, da den anfallenden Anschaffungs- und Instandhaltungskosten derzeit ein zu geringer positiver Effekt auf die Aerodynamik gegenübersteht.

Die unter Nr. 15 und Nr. 16 aufgeführten Punkte können alternativ zu Endkantenklappen zur Verbesserung der Aerodynamik im Bereich des Freiraumes eingesetzt werden. Ihre Umsetzung ist möglich, eine Überlegenheit gegenüber von Endkantenklappen hingegen ist nicht nachgewiesen. Im Falle eines großen Freiraumes kann Nr. 17 zum Einsatz kommen. Im europäischen Raum sind die Freiräume jedoch auf ein Minimum reduziert, so dass eine derartige Maßnahme nicht notwendig ist. Einen weiteren Spezialfall deckt Nr. 18 ab. Diese macht nur Sinn, wenn kein Windleitkörper an der Zugmaschine vorhanden ist.

Die Optimierung der Unterseite des Aufliegers kann mittels der unter Nr. 19 - 21 aufgeführten Anbauteile erfolgen. Dabei schneidet Nr. 20 besser als Nr. 19 ab. Die Verwendung von Nr. 20 bringt große Vorteile mit sich. Zum einen reduziert sie den Luftwiderstand erheblich und trägt gleichzeitig zur Erhöhung der Sicherheit bei. Eine ähnliche Wirkung birgt Nr. 21. Trotz des erforderlichen höheren technischen Aufwandes und obwohl ihre Überlegenheit nicht auf Basis von veröffentlichten Unterlagen nachgewiesen werden konnte, sollte diese Maßnahme weiter untersucht werden, da sie Potenzial birgt.

Am Heck des Aufliegers kann mit den folgenden Maßnahmen (Nr. 22 – 25) eine Reduzierung des Luftwiderstandes vorgenommen werden. Experimente haben ergeben, dass Nr. 22 eine große reduzierende Wirkung auf den Luftwiderstand hat und den Maßnahmen Nr. 23 und Nr. 24 überlegen ist. Alle haben die Gemeinsamkeit, dass eine Umsetzung gesetzliche Bestimmungen verletzt und diese daher derzeit nicht zu realisieren sind. Die Wirkung der unter Nr. 25 aufgeführten Maßnahme ist in ihrer Wirkung umstritten.

Die Komponenten Nr. 26 – 28 optimieren die Oberseite des Auflegers. Nr. 26 ist mit einem hohen technischen Aufwand verbunden und reduziert darüber hinaus, wie Nr. 27, den verfügbaren Laderaum. Nr. 28 stellt ein Produkt mit einem hohen Potenzial der Luftwiderstandsreduzierung dar. Seinen enormen Einfluss auf den Luftwiderstand hat sich bereits im Praxiseinsatz in England gezeigt. Innerhalb des Europäischen Festlandes jedoch übersteigt es die gesetzlich vorgeschriebenen Maximalabmessungen und eine Verwendung ist daher nicht zulässig.

Die letzte Gruppe (Nr. 29 – 33) bilden potentielle Konzepte für die Zukunft. Das Ziel der Nutzfahrzeugoptimierung stellt eine strömungsgünstige Gesamtform (Nr. 29) dar. Diese ist mit einem hohen Entwicklungsaufwand verbunden und kann nur in Verbindung mit der Lockerung der gesetzlich bestimmten Gesamtabmessungen verwirklicht werden. Technisch einfacher zu realisierende Maßnahmen sind Nr. 30 und Nr. 31. Diese tragen gleichzeitig positiv zur Sicherheit bei. Eine Verwirklichung wird derzeit ebenfalls gesetzlich unterbunden. Nr. 32 und Nr. 33 sind Maßnahmen, deren Effektivität weiter geklärt werden muss.

In der Tab. 5.8 sind darüber hinaus Gründe aufgeführt, die ein Durchsetzen der Maßnahmen erschweren. Diese werden im Folgenden näher erläutert:

Bei der Entwicklung bzw. Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen muss deren Gesamtwirkungsgrad betrachtet werden, damit eine Aussage über deren Effektivität gemacht werden kann. Dabei sind das erhöhte Gewicht, damit verbundene Nutzlasteinbußen, der Energiebedarf bei aktiven Systemen sowie die Kosten für Anschaffung, Wartung und Reparaturen der Maßnahmen einzubeziehen. Die daraus entstehenden Mindererlöse bzw. Kosten müssen durch die erzielbaren Kraftstoffeinsparungen kompensiert werden können..

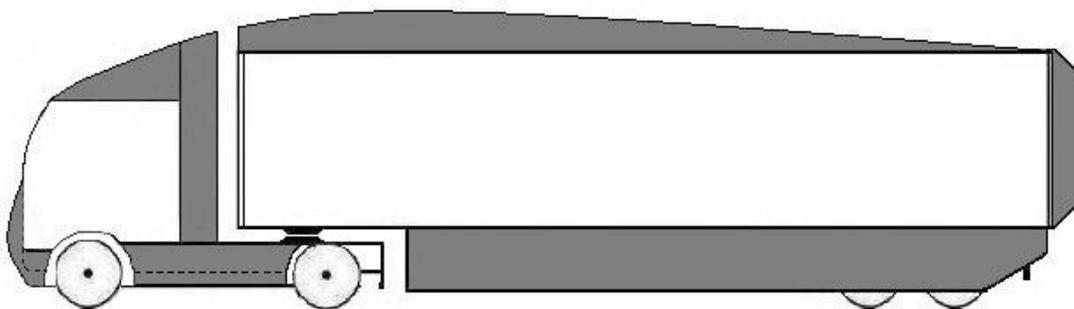
Weiter sind die Konstruktion und der Einfluss auf die Funktionalität zu beachten. Die potentiellen Maßnahmen dürfen nicht nur in der Theorie gute Werte liefern, sondern müssen sich auch im praktischen Einsatz bewähren. Dazu zählt auch, dass Be- und Entladevorgänge nicht behindert werden dürfen und es dabei auch zu keinen Beschädigungen am Anbauteil kommen darf. Eine funktional optimale Ausführung auf der einen Seite und die Bereitschaft der Kunden, die Mehrkosten zu tragen, auf der anderen Seite sind daher notwendig.

Darüber hinaus spielt das Gesetz eine tragende Rolle bei der Verwirklichung luftwiderstandsreduzierender Komponenten am Nutzfahrzeug. Eine Reihe von Maß-

nahmen bedingt einer Formänderung am Fahrzeug. Wird diese zum Nachteil des Ladevolumens durchgeführt, werden in der Summe mehr Nutzfahrzeuge nötig sein, um die zu transportierenden Waren an ihren Zielort zu bringen. Dies hat eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens zur Folge und trägt dadurch nicht nachhaltig zur Entlastung der Ökologie bei. Daher ist eine Änderung der maximal zulässigen Maße der Nutzfahrzeuge notwendig, um weitere Optimierungen der Fahrzeuge zu ermöglichen.

Als vorteilhafte Erweiterung des Fahrzeugs (auf dem Stand der Technik) erweisen sich Nr. 20 und Nr. 22. Dabei handelt es sich um technisch einfach zu realisierende passive Anbauteile, mit deren reduzierender Wirkung auf den Luftwiderstand und somit der Kraftstoffverbrauchsreduzierung sich die entstehenden Anschaffungskosten schnell amortisieren [56] und auch nachhaltig zu einer Kostenentlastung führen. Synergieeffekte stellen sich durch die Steigerung der Sicherheit und der Minderung der Geräuschbildung ein. Darüber hinaus bieten sich Nr. 28 und Nr. 30 als potentielle Ergänzung an.

Aus dieser Kombination von Anbauteilen ergibt sich ein Nutzfahrzeugkonzept, das in naher Zukunft realisierbar wäre und enormes Potenzial zur Senkung des Luftwiderstandes birgt (s. [Abb. 5.68](#)):



**Abb. 5.68: Nutzfahrzeug der nahen Zukunft**

Eine Reihe der in dieser Arbeit vorgestellten Maßnahmen können auch zur Verbesserung der Aerodynamik von Gliederzügen und Solofahrzeugen verwendet werden. Diese weisen, wie die Sattelzüge, eine stumpfe Körperform auf und bieten daher Einsparpotenzial. Insbesondere auf die im Überlandverkehr eingesetzten Fahrzeuge sollten die Konzepte übertragen werden.

## 6 Fazit

In dieser Arbeit wurden die Grundlagen der Nutzfahrzeugaerodynamik aus der Literatur aufgearbeitet und Verbesserungsmaßnahmen dargestellt. Dies erfolgte basierend auf der Unterteilung in die Bereiche „Fahrerhaus“, „Fahrgestell“, „Auflieger“ und „Gesamtzug“. Diskutierte Ergebnisse wurden ausschließlich Veröffentlichungen entnommen. Dabei dienten CFD-Simulationsergebnisse nicht nur zur Visualisierung von Strömungsfeldern, sondern wie auch die Ergebnisse aus Modellversuchen zur Abschätzung von Verbesserungspotenzialen und 1:1 Experimente zur Ermittlung realitätsnaher Ergebnisse. Beim Vergleich der Messergebnisse ist Vorsicht geboten, da dieser nur unter identischen Randbedingungen vorgenommen werden darf.

Aus der Fülle der möglichen Verbesserungsmaßnahmen zur aerodynamischen Optimierung eines Nutzfahrzeugs muss eine Auswahl getroffen werden. Wichtig für die Auswahl der Maßnahmen ist nicht nur die Reduktion des Luftwiderstandes zu achten, der theoretisch erreicht werden kann, sondern auch mit zu bedenken, ob sich die Maßnahmen in der Praxis umsetzen lassen. Durch die Anschaffung, Instandhaltung sowie durch das Gewicht der Anbauteile und die dadurch hervorgerufenen Nutzlasteinbußen entstehen Kosten bzw. Erlösminderungen, die durch die Senkung des Kraftstoffverbrauchs in realistischen Zeiträumen kompensiert werden müssen.

An einem Sattelzug, dessen Sattelzugmaschine bereits mit Dachwindleitkörper und Endkantenklappen ausgerüstet ist, erweisen sich zusätzlich angebrachte Seitenverkleidungen an gesamten Zug und ein Heckeinzug am Auflieger als wirkungsvolle Maßnahmen, die auch realisierbar sind. Eine Crash nose und ein Teardrop-Design versprechen weiteres Potenzial. Derzeit geltende gesetzliche Bestimmungen zu Maßen und Gewichten schränken eine Umsetzung dieser Maßnahmen zur Verbesserung der Sattelzugaerodynamik jedoch ein.

Modellversuche geben Hinweise, dass es möglich ist, den Luftwiderstand eines Sattelzuges um über 30% weiter zu reduzieren. Basierend auf Untersuchungen im Maßstab 1:1 ist die Senkung des Luftwiderstandes eines Frontlenkerfahrzeugs um 20% denkbar. Damit einhergehend ergeben sich zusätzlich Synergieeffekte: So tragen Seitenverkleidungen zur Erhöhung der Sicherheit bei und leisten zusätzlich einen Beitrag zur Entlastung der Umwelt durch ihre geräuschkindernde Wirkung.

Es zeigt sich in der Arbeit, dass auch bei Nutzfahrzeugen sehr viele realisierbare Ansatzpunkte zur Verbesserung der vorhanden sind. Jedoch müssen von verschiedenen Seiten die Voraussetzungen geschaffen werden, um diese in Serienfahrzeugen zu verwirklichen:

- Die Fahrzeug- und Aufliegerhersteller müssen enger zusammenarbeiten, um gemeinsam ein ganzheitlich optimiertes Produkt zu entwickeln.
- Die Kunden müssen bereit sein, höhere Anschaffungskosten in Kauf zu nehmen, um ein Produkt zu erhalten, das zur Nachhaltigkeit beiträgt und gleichzeitig eine langfristige Kostenentlastung ermöglicht.
- Der Gesetzgeber muss die geltenden Richtlinien zu Abmaßen und Gewichten dahingehend verändern, dass die vorhandenen Potenziale in Bezug auf eine Reduktion des Luftwiderstands eines Lastzuges umgesetzt werden können.

Nur so kann letztlich ein Beitrag zu einem ökologischerem und ökonomischerem Gütertransport erzielt werden.



- [15] Wood, R.; Bauer, S.: Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks. SAE Paper, 2003-01-3377, SAE International, 2003.
- [16] Hucho, W.-H.: Aerodynamik der stumpfen Körper. Vieweg Braunschweig /Wiesbaden, 2002, 1. Auflage, ISBN: 3-528-06870-1.
- [17] Versteeg H. K.; Malalasekera W.: An introduction to Computational Fluid Dynamics. Pearson Education Limited Essex, England, 2007. ISBN: 978-0-13-127498-3.
- [18] Göhring, E.; Krämer, W.: Auswirkung aerodynamischer Maßnahmen auf Kraftstoffverbrauch und Fahrleistung moderner Nutzfahrzeuge – Teil 3. ATZ 4-88 (1986), Springer Automotive Media, Wiesbaden.
- [19] Hjelm, L.; Bergqvist, B.: European Truck Aerodynamics – A Comparison Between Conventional and CoE Truck Aerodynamics and a Look into Future Trends and Possibilities. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85069-4.
- [20] Kopp, S.; Schönherr, S.; Koos, H.: Design und Aerodynamik bei Nutzfahrzeugen. ATZ 07-08 | 2009, Springer Automotive Media, Wiesbaden.
- [21] Hjelm L.; Bergqvist B.: European Truck Aerodynamics – A Comparison Between Conventional and CoE Truck Aerodynamics and a Look into Future Trends and Possibilities. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses and Trains. Springer Berlin/Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-85069-4.
- [22] <http://www.lanicektransport.cz/img/s/6B03678.jpg>.
- [23] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO): § 56 – Spiegel und andere Einrichtungen für indirekte Sicht. Stand: 29.04.2009.
- [24] Van Tooren, M.: Platform for Aerodynamic Road Transport; Quelle: [www.part20.eu/en](http://www.part20.eu/en).
- [25] [http://lkwlastic.com/db\\_images/13\\_1.jpg](http://lkwlastic.com/db_images/13_1.jpg).
- [26] [http://lkwlastic.com/db\\_images/24\\_1.jpg](http://lkwlastic.com/db_images/24_1.jpg).
- [27] Radovich, Ch.A.: Wind Tunnel Test of Cab Extender Incidence on Heavy Truck Aerodynamics. SAE Paper, 2005-01-3527, SAE International, 2005.

- [28] Iveco S.p.A.: IVECO Transport Concept. Iveco, Torino. IST.082112-May 2008.
- [29] McCallen, R. u.w.: DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag Through Joint Experiments and Computations. SAE Paper, 2005-01-3511, SAE International, 2005.
- [30] Browand, F.; McCallen, R.; Ross, J.: Investigation of Tractor Base Bleeding for Heavy Vehicle Aerodynamic Drag Reduction. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85069-4.
- [31] Sinha, S.K.: Improving Fuel Efficiency of Tractor Trailer Trucks with Deturbulator Aero-Drag Reduction. SAE Paper, 2008-01-2602, SAE International, 2008.
- [32] [http://www.hadel.net/autos/assets/2006/lkw/lkw\\_mercedes\\_spacemax2006\\_01.jpg](http://www.hadel.net/autos/assets/2006/lkw/lkw_mercedes_spacemax2006_01.jpg).
- [33] Storms, B.L.; Ross J.C.: Aerodynamic Drag Reduction of the Underbody of a Class-8 Tractor-Trailer. SAE Paper, 2006-01-3532, SAE International, 2006.
- [34] Browand, F.; McCallen, R.; Ross, J.: Summary of Full-Scale Wind Tunnel Tests of Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85069-4.
- [35] Eco-Flaps: [www.ecoflaps.com](http://www.ecoflaps.com).
- [36] VEAP Shield United:<http://www.veap.nl>.
- [37] Wood, R. M.: Operationally Practical & Aerodynamically-Robust Heavy Truck Trailer Drag Reduction Technology. SAE Paper, 2008-01-2603, SAE International, 2008.
- [38] Wood. R.: Impact of Advanced Aerodynamic Technology on Transportation Energy Consumption. SAE Paper, 2004-01-1306, SAE International, 2004.
- [39] Schoon, R.: On-Road Evaluation of Devices to Reduce Heavy Truck Aerodynamic Drag. SAE Paper, 2007-01-4294, SAE International, 2007.
- [40] Leuschen, J.; Cooper, K.R.: Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. SAE Paper, 2006-01-3456, SAE International, 2006.

- [41] Airman Inc.: <http://www.airmansystems.com>.
- [42] Schoon, R.; Pan, F.P.: Practical Devices for Heavy Truck Aerodynamic Drag Reduction. SAE Paper, 2007-01-1781, SAE International, 2007.
- [43] Ortega, J.; Salari, K.: Investigation of a Trailer Underbody Fairing for Heavy Vehicle Aerodynamic Drag Reduction. SAE Paper, 2008-01-2601, SAE International, 2008.
- [44] Van Raemdonck, G.; van Tooren, M.: Design of an Aerodynamic Aid for the Underbody of a Trailer within a Tractor-Trailer Combination. BBAA VI: International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 20.-24.07.2008, Milano, Italy.
- [45] Ephicas: <http://www.ephicas.eu>.
- [46] Browand, F.; Radovich, Ch.; Boivin, M.: Fuel Savings by Means of Flaps Attached to the Base of a Trailer: Field Test Results. SAE Paper, 2005-01-1016, SAE International, 2005.
- [47] Cooper, K.R.; Leuschen, J.: Model and Full-Scale Wind Tunnel Tests of Second-Generation Aerodynamic Fuel Saving Devices for Tractor-Trailers. SAE Paper, 2005-01-3512, SAE International, 2005.
- [48] Systems Drag Reduction, S.L.: <http://www.sdr-sys.com>.
- [49] Englar, R.: Drag Reduction, Safety Enhancement, and Performance Improvement for Heavy Vehicles and SUVs Using Advanced Pneumatic Aerodynamic Technology. SAE Paper, 2003-01-3378, SAE International, 2003.
- [50] Englar, R.: Improved Pneumatic Aerodynamics for Drag Reduction, Fuel Economy, Safety and Stability Increase for Heavy Vehicles. SAE Paper, 2005-01-3627, SAE International, 2005.
- [51] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO): § 32b - Unterfahrschutz. Stand: 01.07.2010.
- [52] Don-Bur: <http://www.donbur.co.uk>.
- [53] Landmann, D.; Wood, R.; Seay, W.; Bledsoe, J.: Understanding Practical Limits to Heavy Truck Drag Reduction. SAE Paper, 2009-01-2890, SAE International, 2009.

- [54] Göhring, E.; Krämer, W.: Fahrwiderstandsreduzierende Maßnahmen zur weiteren Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Sattelzügen – Teil 1. Automobiltechnische Zeitung (ATZ), Ausgabe 93, 1991.
- [55] Göhring, E.; Krämer, W.: Fahrwiderstandsreduzierende Maßnahmen zur weiteren Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Sattelzügen – Teil 3. Automobiltechnische Zeitung (ATZ), Ausgabe 94, 1992.
- [56] VDA - Bereich Technik und Umwelt: Das Nutzfahrzeug – umweltfreundlich und effizient. Verband der Automobilindustrie, 2. Auflage, Frankfurt am Main.
- [57] Frank, T.: Mercedes Benz – LKW Entwicklung. Stuttgart, Daimler AG.
- [58] ATZ-online: <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/9495/Renault-Trucks-zeigt-13-Prozent-weniger-Verbrauch-durch-Optimierung-moeglich.html>

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2006)

Nr.	Titel
199	Anwendungspotentiale und Prozeßgrenzen der Klebtechnik für die Umformung von Doppellagenblechen, 2006
200	Thermisches Fügen für die stahlintensive Hybridbauweise im Fahrzeugleichtbau, 2006
201	Lufthygienische Beurteilung von Pkw-Innenraumfiltern, 2006
202	Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge, 2006
203	Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer, 2006
204	Innovative Nfz-Konzepte - Gesamtwirtschaftliche Effekte durch Einführung schwerer und langer Lkw, 2006
205	Technische Kompatibilität von innovativen Nutzfahrzeugkonzepten auf den kombinierten Verkehr Straße/Schiene sowie den Containerverkehr, 2006
206	Größenaufgelöste physikalische und chemische Bestimmung von elementarem und organischem Kohlenstoff in Nanopartikeln, 2006
207	Erstellung einer VHDL-AMS-Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen, 2006
208	Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, 2006
209	Innovative Nfz-Konzepte - Akzeptanzuntersuchungen zur Einführung und zum Einsatz innovativer Nutzfahrzeuge, 2007
210	Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit, 2007
211	FAT-Richtlinie Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation, 2007
212	Innovative Nfz-Konzepte - Wirtschaftlichkeitsanalyse EuroCombi, 2007
213	Störfestigkeit von Fahrzeugelektronik bezüglich ESD und Impulseinkopplung, 2007
214	Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahlschweißverbindungen aus Stahlblechen des Karosseriebaus, 2007
215	Örtlich ertragbare Beanspruchungen bei Spannungskonzentrationen in Karosseriebauteilen aus hoch- und höherfesten Stählen, 2008
216	Auswirkung der Berücksichtigung lokaler Größen des E-Moduls im Hinblick auf die verbesserte Auslegung umgeformter Karosserieblechstrukturen aus Stahl, 2008
217	Aktueller Stand und Trends in der CFK-Berechnung im Fahrzeugbau, 2008
218	In-vitro-Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von an Dieselpartikel gebundenen polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Nitropyrenen, 2008
219	Bewertender Vergleich der aktuellen Empfehlungen zu den Luftqualitätsgrenzwerten NO <sub>2</sub> , Evidenzbasierter Vergleich der epidemiologischen Studien 2002-2006 zu Gesundheitseffekten durch NO <sub>2</sub> , 2008
220	Fahrdynamische Analyse innovativer Nfz-Konzepte (EuroCombi), 2008
221	Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens, 2009
222	Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw, 2009
223	Entwicklung einer Prüfspezifikation zur Charakterisierung von Luftfedern, 2009

- 224 Klimatische Daten und Pkw-Nutzung - Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien, 2009
- 225 CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs - Abschätzung staubedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs, 2009
- 226 Modellbasierte Systementwicklung, 2009
- 227 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
- 228 Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
- 229 Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
- 230 Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
- 231 Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
- 232 Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
- 233 Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
- 234 Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
- 235 Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
- 236 Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
- 237 Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
- 238 Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
- 239 Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
- 240 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
- 241 Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2012

**VDA**

Verband der  
Automobilindustrie

**FAT**

Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)