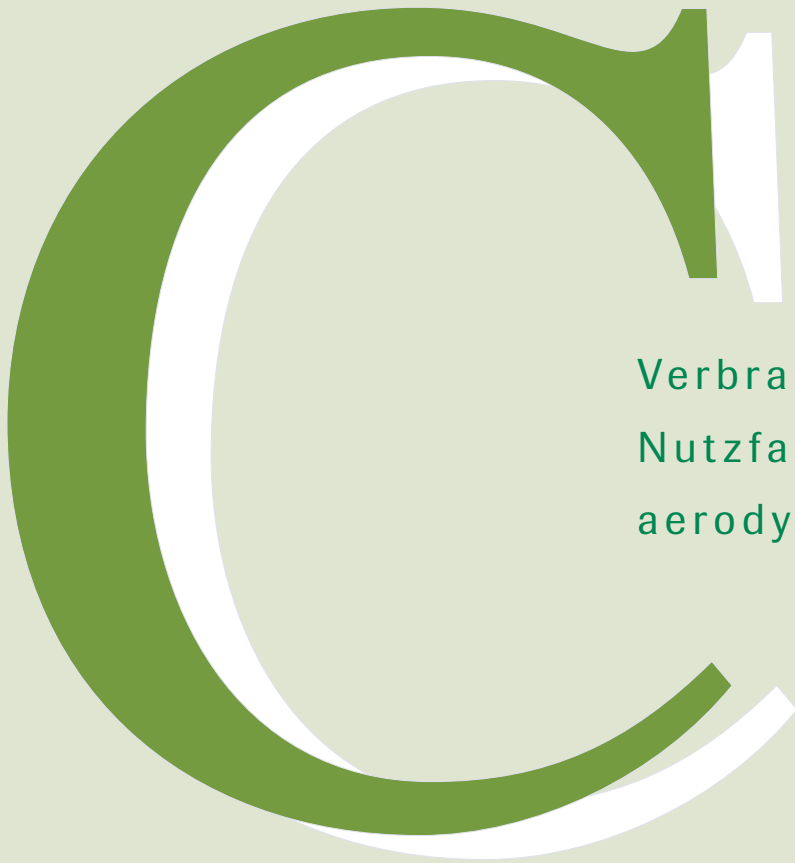


FAT 237



Verbrauchsreduktion an
Nutzfahrzeugkombinationen durch
aerodynamische Maßnahmen



Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen

Forschungsstelle:

FluiDyna GmbH

Autoren:

Antoine Devesa

Thomas Indinger

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturrecherche zur Nutzfahrzeugaerodynamik	3
2.1	Frontgestaltung	3
2.2	Längsgestaltung	5
2.3	Heckgestaltung	7
3	Ableitung des Referenzkörpers	11
3.1	Konstruktion des virtuellen Modells	11
3.1.1	Sattelzugmaschine	11
3.1.2	Design eines vereinfachten Kühlpakets	14
3.1.3	Auflieger	14
3.1.4	Bilder des virtuellen Referenzfahrzeugs	15
3.2	Modellbau	15
4	Analyse der aerodynamischen Merkmale des Referenzkörpers	23
4.1	Numerische Methoden	23
4.2	CFD-Ergebnisse	23
4.3	Numerischer Vergleich: stehende/drehende Räder	28
4.4	Windkanaluntersuchungen	28
4.4.1	Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl	29
4.4.2	Analyse unter schräger Anströmung	30
4.4.3	Zusätzliche Ergebnisse zur Referenzgeometrie	30
5	Analyse der aerodynamischen Optimierungspotentiale	33
5.1	Untersuchungen zur Frontgestaltung	33
5.1.1	Frontverlängerung 500mm	33
5.1.2	Kurzhauber Variante 500mm	38
5.1.3	„Soft Nose“ 500mm	41
5.1.4	Fazit zu den untersuchten Frontmaßnahmen	43
5.2	Untersuchungen zur Heckgestaltung	44
5.2.1	Heckklappen 400mm, 800mm and 1200mm	44
5.2.2	Untersuchungen zum Fahrschutz bei der Verwendung von Heckklappen	47
5.2.3	Fazit zu den untersuchten Heckmaßnahmen	50
5.3	Untersuchungen mit Dacheinzügen	51
5.3.1	Dacheinzüge mit Heckhöhe 3,5 und 3,0m	51
5.3.2	Fazit zu den untersuchten Dacheinzügen	52
5.4	Ergebnisse der kombinierten Front-/Heckuntersuchungen	56
5.4.1	Frontverlängerung mit Heckklappen	56
5.4.2	Kurzhauber mit Heckklappen	57
5.4.3	Dacheinzug mit 800mm-langen Heckklappen	57
6	Fazit und Empfehlungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches	59
	Literaturverzeichnis	62

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die numerischen und experimentellen Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen“. Zielsetzung des Projektes waren grundlegende Untersuchungen an einer generischen Nutzfahrzeugkonfiguration zur Verbesserung deren aerodynamischer Eigenschaften. Die Beauftragung erfolgte durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) im Verband der Automobilindustrie (VDA). Bearbeitungs- und damit Berichtszeitraum war 01.05.2010 bis 30.04.2011. Die Untersuchung wurde durch den Unterarbeitskreis (UA) „Nutzfahrzeugaerodynamik“ des Arbeitskreises 9 (AK 9) begleitet, der sich im Wesentlichen mit Studien zur Aerodynamik und Fahrdynamik von Fahrzeugen beschäftigt.

Die knapp werdenden Ressourcen und das zunehmende Transportaufkommen durch Nutzfahrzeuge beeinflussen die Entwicklung neuer Lkw-Generationen, die entsprechend sparsamer, umweltfreundlicher und wirtschaftlicher werden müssen. Die Aerodynamik gehört zu den Eigenschaften, die in den letzten Jahrzehnten zwar kontinuierlich verbessert wurde, dennoch bleiben sehr viele Potentiale unausgeschöpft. Die gesetzlichen Richtlinien der Europäischen Union 96/53/EG und 97/27/EG bestimmen jedoch ausführlich die kompletten Abmessungen, die bei der Konzeption eines Lastzuges nicht überschritten werden dürfen. Die Gesamtlänge des Lkw darf beispielsweise maximal $16,5m$ betragen und wird von der Richtlinie 96/53/EG definiert. Die Richtlinie 97/27/EG erlaubt genannte Ausnahmen, welche die vorgeschriebene Gesamtlänge des Fahrzeugs überschreiten dürfen, da sie bei deren Bestimmung nicht berücksichtigt werden. Diese sind beispielsweise Kennzeichenschilder, Wischer- und Wascheinrichtungen, Beleuchtungseinrichtungen, Luftansaugleitungen, usw.

Da die Ladekapazität möglichst groß und das Fahrerhaus möglichst bequem werden sollen, wird bislang der größte Teil des vorhandenen Volumens hinsichtlich der Fahrbarkeit und den Transportfunktionen optimiert, aber weniger zugunsten der Aerodynamik. Bereits kleine Lockerungen der aktuellen Gesetze, um allein die aerodynamischen Eigenschaften zu beeinflussen, könnten somit mehr Freiheit für kraftstoffsparende Maßnahmen schaffen.

Aus diesem Grund entschieden sich sechs Lkw-Hersteller und bedeutende Akteure im Nutzfahrzeugbereich, zusammen an diesem Thema im Rahmen dieses FAT-Projektes zu arbeiten:

- Sattelzugmaschine: Daimler, Iveco, MAN
- Auflieger: Kögel, Krone, Schmitz Cargobull

Die durchgeführte Studie sollte folgende Fragen beantworten können: welche zusätzliche Länge, Breite, Höhe gewährleisten eine erhebliche Luftwiderstands- bzw. Kraftstoffverbrauchsreduzierung mithilfe von optimierter Gestaltung/Design oder angebrachten aerodynamischen Anbauten? Während sich Höhe und Breite aufgrund der Infrastruktur (Brücken, Straßbreite, usw.) kaum anpassen lassen, könnten gezielte Änderungen in der Länge Freiraum für Optimierungen bieten. Wie groß wäre dann das Verbesserungspotential?

Um diese Fragen beantworten zu können, wurden mittels einer Literaturrecherche zur Aerodynamik der Nutzfahrzeuge zunächst Maßnahmen identifiziert, die hinsichtlich der Umsetzbarkeit und des Potentials vielversprechend sind. Sie sind im Kapitel 2 zusammengefasst und bilden die Grundlage für die vorgestellte numerische und experimentelle Arbeit. Die Literaturrecherche beschränkte sich auf passive Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung und ließ sich in Front-, Längs- oder Heckgestaltung unterteilen. Optimierungsmöglichkeiten durch „Active Control“ wurden aufgrund deren Mehrkosten, Gewicht oder Stromverbrauch ausgelassen.

Die angestrebten Untersuchungen zur Quantifizierung der aerodynamischen Potentiale konnten erst adäquat durchgeführt werden, als ein generisches Fahrzeug vorlag. Ein solches, für diese Studie repräsentatives Fahrzeug wurde mittels CAD (von engl. computer assisted design) konzipiert. Es beinhaltet die Merkmale der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Geometrien. Dieser Referenzlastzug wird im Kapitel 3 vorgestellt. Für die experimentellen Messungen baute eine Modellbaufirma diesen Körper im Maßstab 1 : 2,5 nach. Diese Geometrie stellte sowohl numerisch als auch experimentell die Grundform dar. Alle neu gestalteten Varianten mit aerodynamisch wirksamen Maßnahmen wurden mit ihr verglichen und das Potential zur Widerstandsreduzierung aufgezeigt.

Die Umströmung der Referenzgeometrie wurde anschließend numerisch simuliert und experimentell mit Kraftmessungen und Rauchlanzen untersucht. Die involvierten Strömungsmechanismen und die wesentlichen Erkenntnisse über die Modelleigenschaften enthält Kapitel 4. Dies diente als Grundlage für die weiteren Untersuchungen zur Front und Heckgestaltung (Kapitel 5), bei denen sowohl die gemessenen als auch die maximal zu erwartenden Potentiale berichtet werden.

Schließlich fassen die Autoren die Ergebnisse im Kapitel 6 zusammen und geben Empfehlungen zur Luftwiderstandsreduzierung durch aerodynamische Maßnahmen für die Lkw-Umströmung.

2 Literaturrecherche zur Nutzfahrzeugaerodynamik

Bei der Verbesserung der Umströmung von Lastzügen ist es erforderlich, das Fahrzeug stets als Ganzes zu betrachten [4]. Ist beispielsweise die Anströmung des Aufliegers nach der Kabinenumströmung kaum gestört, weil die Sattelzugmaschine bereits aerodynamisch optimiert ist, so treten dessen aerodynamische Eigenschaften stärker hervor. Daher muss zunächst im Frontbereich sichergestellt werden, dass die Strömung an den Ecken möglichst anliegend bleibt. Dann müssen die Verluste im Bereich des Chassis von Sattelzugmaschine und vor allem Auflieger, verursacht durch die Umströmung der stark zerklüfteten Geometrien, möglichst gering gehalten werden. Im Heckbereich gilt es dann, die durch die vorangegangenen Maßnahmen erhöhte Energie in der Strömung in einen möglichst großen Druckrückgewinn umzusetzen. Die Maßnahmen, mit welchen diese Anforderungen erfüllt werden können, werden im Folgenden vorgestellt.

2.1 Frontgestaltung

Entscheidend für die Frontgestaltung sind eine möglichst verlustarme Umströmung der Sattelzugmaschine und die tangentielle Anströmung der Längsflächen des Aufliegers. Verlustarm ist die Umströmung der Sattelzugmaschine dann, wenn die Strömung an den Stirnkanten nicht ablöst und auch weiterhin Strömungsablösungen verhindert werden. Eine wichtige Bedeutung kommt hierbei der Gestaltung der Stirnradien zu, bei denen ein gewisser Mindestradius r_{min} nicht unterschritten werden darf. So konnte beispielsweise bei der Entwicklung des VW LT 1 der C_w Wert allein durch die Optimierung der Stirnkantenradien um 14% gesenkt werden [5].

Der Radius r_{min} , welcher erforderlich ist, damit die Strömung anliegend bleibt, kann mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden [5]:

$$r_{min} \approx 1,3 \times 10^5 \frac{\nu}{U_\infty} \quad (2.1)$$

mit ν : kinematische Viskosität und U_∞ : Anströmgeschwindigkeit. Obwohl keine Einschätzungen zu einer Verbesserung, die allein aufgrund einer Vergrößerung der Frontradien erreicht werden kann, vorliegt, kündigte Scania in einer Studie über Soft-Nose Konfigurationen ein Potential in Kraftstoffeinsparung von 1,2% an, wenn die Stirnfläche um 1000mm verlängert wird (Abb. 2.1).

Für moderne Lkw führt diese Gleichung, bei einer aerodynamisch relevanten Fahrgeschwindigkeit von mindestens 60km/h, zu einem kritischen Mindestradius von $r \geq 117,5mm$. Da die Form der Fahrerhäuser moderner Sattelzugmaschinen aufgrund von Bauraumanforderungen nur kleine Radien zulässt, kommen seitlich und oberhalb der Fahrkabine Leitbleche bzw. aerodynamisch geformte Sonnenblenden zum Einsatz.

Stirnseitige Windleitbleche verhindern eine Strömungsablösung an den seitlichen Stirnkanten der Sattelzugmaschine unterhalb der Windschutzscheibe. Der Luftwiderstand des Lastzuges

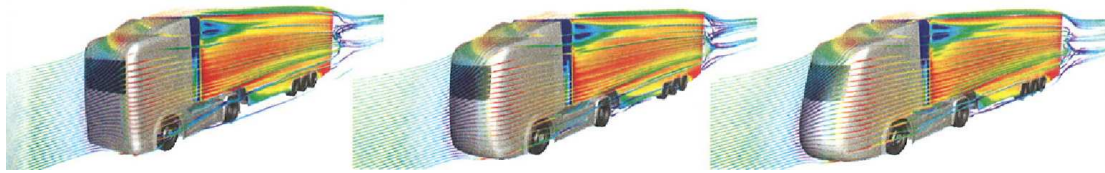


Abbildung 2.1: Soft-Nose Studie von Scania [12]

sinkt aufgrund dieser Maßnahme um 0,4% [13]¹. Gleichzeitig wird die Verschmutzung des Fahrerhauses im Türbereich und an den Seitenscheiben verringert.

Ähnlich wie die stirnseitigen Leitbleche verhindert auch eine unter aerodynamischen Gesichtspunkten geformte Sonnenblende das Ablösen der Strömung, hier aber an der oberen Stirnkante des Fahrerhauses. So wird die Anströmung des Dachspoilers deutlich verbessert, was zu einer Senkung des Luftwiderstandes um bis zu 4,75% [13] führt. Die Wirkung dieser Maßnahme ist jedoch stark von der Dachform und dem verwendeten Dachspoiler abhängig. Wird die gestalterische Freiheit, welche der Hersteller an dieser Stelle hat, für eine gute Verrundung genutzt, so sind Hilfsmittel für die Eckenströmung nicht erforderlich. Der Dachspoiler schafft einen möglichst verlustarmen Übergang von der Sattelzugmaschine zum Auflieger. Die mögliche Widerstandsersparnis liegt bei etwa 30% [6]. Die bestmögliche Wirkung ergibt sich, wenn die folgenden aerodynamischen Anforderungen erfüllt werden:

- Tangentiale Anströmung des Aufliegerdaches und der seitlichen Längsflächen im Einflussbereich,
- Vermeidung des Aufrollens von Längswirbeln an den seitlichen Stirnkanten,
- Möglichst „schonender“ Umgang mit der Grenzschicht durch glatte Übergänge und ausreichend große Radien.

Spaltverkleidungen erfüllen die Funktion des Dachspoilers an den Seiten der Sattelzugmaschine. Ziel ist die tangentielle Anströmung der seitlichen Längsflächen des Aufliegers sowie eine Verkleinerung des Spaltes zwischen Sattelzugmaschine und Auflieger. Zur quantitativen Wirkung konnten in der Literatur keine Werte gefunden werden. Der Spalt zwischen Sattelzugmaschine und Auflieger führt durch die entstehenden Wirbel und die Durchströmung zu einer Erhöhung des Luftwiderstandes, welche mit steigendem Schiebewinkel zunimmt. Hucho [6] beziffert diese Zunahme auf 15% - 65%. Dieser Anstieg resultiert im Wesentlichen aus der veränderten Anströmung des Aufliegers beziehungsweise der horizontalen Durchströmung des Spaltes bei Seitenwind. Die Abschirmung des Aufliegers durch die Sattelzugmaschine bei Schiebewinkel $\beta = 0^\circ$ wird durch die seitliche Anströmung zunehmend aufgehoben, wobei dieser Effekt nur wenig von der Spaltbreite abhängt (siehe [6], Abb. 11.23).

Eine weitere Verbesserung für die Anströmung des Aufliegers bringen Anbauten an der Stirnseite des Aufliegers. Sie können einerseits die Anströmung des Aufliegers verbessern und andererseits die Entstehung stark fluktuierender Wirbel zwischen Sattelzugmaschine und Auflieger verringern. Beides führt zu einer Senkung des Luftwiderstandes. Für den Wirbelstabilisator gibt Hucho [6] für den Einsatz ohne Dachspoiler eine Verringerung des Luftwiderstandes von 9% an; für einen wulstartigen Aufbau, welcher die Anströmung des Aufliegers verbessert, werden 30% angegeben.

¹ PART gibt die Ersparnis in $L/100km$ an. Für die Umrechnung wurde ein Anteil des Luftwiderstandes am Kraftstoffverbrauch von 40% angenommen.

Mit Dachspoiler ergibt sich für den wulstartigen Aufbau ein Wert von 5,25% und für den Wirbelstabilisator, abhängig von den Testbedingungen, zwischen 1,75% und 8,3% [13].

Neben der kantigen Form der Sattelzugmaschine und Geometriesprängen zwischen Sattelzugmaschine und Auflieger entstehen an den Außenspiegeln erhebliche Störungen, welche sich negativ auf den Luftwiderstand auswirken. An Experimentalfahrzeugen kommen immer wieder Kamerasysteme zum Einsatz, welche die Spiegel ersetzen sollen. Da der Gesetzgeber aber Spiegelflächen fordert, beschränken sich die Möglichkeiten auf die aerodynamische Optimierung der Spiegel. PART [13] gibt ein Optimierungspotenzial für den Luftwiderstand von 0,5% an. Neben der Anströmung der oberen und seitlichen Längsflächen des Aufliegers bietet die Anströmung von Unterboden und Chassis Möglichkeiten zur Widerstandsreduktion, auch wenn sich durch die Optimierung des Unterbodens deutlich größere Potentiale erschließen lassen.

2.2 Längsgestaltung

Bei der aerodynamischen Längsgestaltung von Lastzügen steht die möglichst verlustarme Umströmung des Fahrzeugchassis im Vordergrund. Neben der direkten Kraftwirkung durch den eigenen Luftwiderstand der zerklüfteten Geometrie im unteren Bereich verliert die fahrzeugnahe Strömung an Energie, wodurch der Druckrückgewinn am Fahrzeugheck verringert wird.

Um die nachteilige aerodynamische Wirkung der Chassisumströmung zu verringern, besteht zunächst die Möglichkeit, den Unterboden aerodynamisch zu gestalten. In einer Studie der TU Delft führte die Vollverkleidung des Unterbodens zu einer Senkung des Luftwiderstandes von 12%. Jedoch ist diese Maßnahme mit einem hohen Aufwand und Zusatzgewicht verbunden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Durchströmung unterhalb des Fahrzeuges zu verringern, indem an der Sattelzugmaschine eine nach unten verlängerte Spoilerlippe, genannt „Air dam“, installiert wird. Auf diese Weise wird weniger Luft unter das Fahrzeug geleitet und der Unterboden entsprechend langsamer angeströmt. Ist der Unterboden unverkleidet, so führt dies zu einer Senkung des Luftwiderstandes von 1% [13]. Bei einem vollverkleideten Unterboden ist diese Maßnahme nicht erforderlich und erhöht dort durch die vergrößerte Stirnfläche sogar den Luftwiderstand.

Alternativ zur Verkleidung des gesamten Unterbodens gibt es die Möglichkeit, den Luftstrom mit Hilfe von Leitblechen um die größten Hindernisse herum zu führen. Dabei gibt es zwei verschiedene Ansätze: Entweder wird die Luft unter dem Hindernis hindurch geführt, oder, wie schon bei der verlängerten Frontschürze, um das Fahrzeug herum. Bei der Luftführung unter dem Hindernis hindurch (siehe Abb. 2.2) sind nach Aussage von Airman Inc² etwa 12% Widerstandersparnis möglich. Zu der Luftführung nach außen wurde am Lawrence Livermore National Laboratory eine V-förmige Anordnung von Leitblechen untersucht. Abhängig vom Schiebewinkel kamen die Forscher auf eine Widerstandersparnis von 1,5 - 3% [13].

Seiten- oder Chassisverkleidungen an Sattelzugmaschine und Auflieger verhindern, dass die zerklüftete Geometrie des Chassis umströmt wird und bringen so besonders bei Seitenwind

² <http://www.airmaninc.com>



Abbildung 2.2: Airwedge der Firma Airman Inc., leitet die Luft unter den Trailerachsen hindurch; Quelle: Airman Inc.

eine Verringerung des Luftwiderstandes mit sich. Für den Einsatz im Alltag gibt das Unternehmen Ephicas zusammen mit der TU Delft eine Reduktion des C_w - Wertes von 8–9% an³. Neben der reinen aerodynamischen Wirkung bieten Seitenverkleidungen auch einen wirksamen Unterfahrschutz. Eine interessante Detaillösung liefern luftdurchlässige Schmutzfänger. Für Schmutzfänger mit einer Luftdurchlässigkeit von 75% gibt PART [13] eine Reduktion des Luftwiderstands um 3,5% an.

Neben den Anbaumaßnahmen bietet sich prinzipiell auch die Möglichkeit an, die gesamte Geometrie zu verändern. Die Variation des C_w mit der Fahrzeuglänge wurde anhand eines Quaders untersucht [11]. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Kennwert, nach einem Minimum von $C_w = 0,85$ bei einem Verhältnis von Länge zu Höhe beziehungsweise Breite von 1,6, asymptotisch einem Wert von $C_w = 0,95$ annähert. Für heutige Lastzüge mit einem Verhältnis von Länge zu Höhe von 4,125 bietet die einfache Variation der Gesamtlänge also keine Maßnahme zur Widerstandsreduktion.

Deutliche Einsparungen zeigen hingegen Untersuchungen am sogenannten Teardrop Trailer, einer Entwicklung von Don Bur⁴ aus Großbritannien. Es handelt sich dabei um einen Auflieger mit konvex gewölbtem Dach. Die erhebliche Reduktion des Luftwiderstandes von 41,75% [13] lässt sich auf die gleichzeitige Lösung zweier entscheidender Probleme bei der Umströmung von Aufliegern zurückführen.

Von der Seite betrachtet (siehe Abb. 2.3) gibt es zwei große Strömungsablösungen: an der Stirnkante des Aufliegers und am Heck. Durch die gewölbte Dachform wird zunächst die vordere Ablösung reduziert, da die Dachfläche nahezu tangential angeströmt wird. Die abfallende Dachlinie im Heckbereich lenkt die Strömung dann in den Nachlauf, wodurch dieser erheblich verkleinert wird. Es ergibt sich ein deutlich verbesserter Druckrückgewinn.

Um die Verwirbelungen zu reduzieren, die bei der Umströmung der unverkleideten Räder des Aufliegers entstehen, können Radkappen zum Einsatz kommen. Der US-amerikanische

³ http://www.ephicas.eu/wordpress/wp-content/uploads/test_report_ephicas_sidewing.pdf

⁴ http://www.donbur.co.uk/gb/products/aerodynamic_teardrop_trailer.shtml

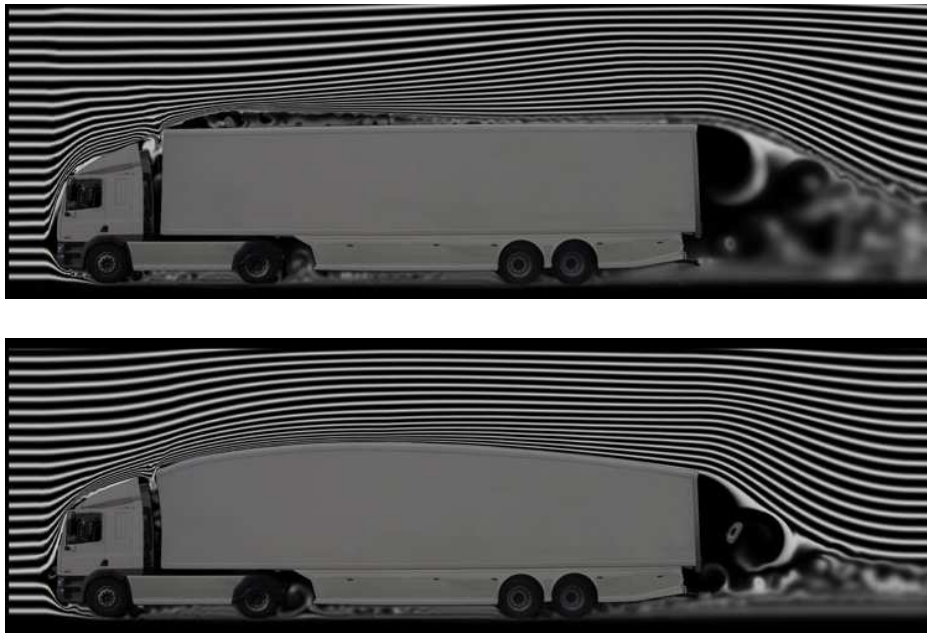


Abbildung 2.3: Stromlinien der Umströmung eines Lkw, Quelle: Don Bur. Oben: Standard Lkw; unten: TearDrop Design

Hersteller ATDynamics⁵ gibt für seine Radkappen eine Reduktion des Luftwiderstandes von 0,6 – 1,3% an.

2.3 Heckgestaltung

Für die Aerodynamikoptimierung moderner Lkw bietet ein Heckenzug ein großes Potenzial. Ziel dieses Anbauteils ist die Erhöhung des Heckbasisdruckes.

Hinter einem Lastzug bildet sich im Totwassergebiet ein fluktuierender Ringwirbel aus, gefolgt von einem im zeitlichen Mittel isotropen Nachlaufgebiet.

Die Steigerung des Heckbasisdruckes beruht nun auf zwei Prinzipien. Zum einen wird durch die heckseitige Verrundung die Strömung hinter das Fahrzeug gelenkt, was eine Verkleinerung des Totwassergebietes bewirkt. Zum anderen wird die Entfernung zwischen Ringwirbel und Heck vergrößert. Das Unterdruckgebiet, welches durch den Ringwirbel induziert wird, hat so einen kleineren Einfluss auf den Heckbasisdruck.

Für den Heckenzug existieren verschiedene Ansätze. An der TU Delft wird eine Variante mit der Bezeichnung „Boat-Tail“ untersucht (siehe Abb. 2.4). Die Ersparnis wird mit 8 – 9% angegeben. Hucho [6] gibt für einen Heckenzug, wie in Abb. 2.5 zu sehen, je nach Konfiguration eine Reduktion des Luftwiderstandes um bis zu 7,5% an.

Ergänzend zum Heckenzug oder auch allein verwendet bieten auch Wirbelgeneratoren (siehe Abb.2.6) eine Möglichkeit zur Widerstandsreduktion. Bei der Umströmung eines Lastzuges wird die das Fahrzeug umgebende Grenzschicht immer energieärmer. Zugleich gilt: Je weni-

⁵ <http://www.atdynamics.com>



Abbildung 2.4: Beispiel eines „Boat-Tail“ Einzugs (Quelle: TU Delft)



Abbildung 2.5: Heckeinzug am Renault Optifuel Lab, Quelle: Renault



Abbildung 2.6: Wirbelgeneratoren am Heck eines Lkw-Modells, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik an der TU Berlin

ger Energie in der Grenzschicht ist, desto geringer fällt der Druckrückgewinn aus. Diesem Problem kann durch den Einsatz von Wirbelgeneratoren begegnet werden.

Die durch Wirbelgeneratoren hervorgerufenen Längswirbel sorgen für einen deutlich verstärkten Impulsaustausch zwischen der wandnahen und wandfernen Strömung. Auf diese Weise wird die wandnahe Grenzschicht mit Energie angereichert, was zu einem verbesserten Druckrückgewinn führt. Für verschiedene Konfigurationen nennt PART [13] eine Senkung des Luftwiderstandes um etwa 5%.

Neben der Verwendung von Heckeinzügen oder Wirbelgeneratoren bieten auch in die Strömung ragende Leitschaufeln eine Widerstandersparnis. Der Dachspoiler der Firma System Drag Reduction aus Spanien wird an der heckseitigen Oberkante des Aufliegers montiert, wie in Abb. 2.7 zu sehen ist. Bei der Umströmung des Spoilers wird der Luftstrom vom Dach in das Nachlaufgebiet hinter dem Auflieger geführt, welches auf diese Weise verkleinert wird. Auf diese Weise wird der Heckbasisdruck erhöht, was wiederum den Luftwiderstand um 10 – 15% senkt [13]. Nachteilig bei derartigen Leitschaufeln ist aber, dass die Fahrzeugmaße in der Breite oder Höhe überschritten werden. Weil die Gesetzeslage hier aufgrund bestehender Brücken und Straßen deutlich strenger ist als bei der Längenüberschreitung, ist das hier vorgestellte System auf dem europäischen Festland nur für Fahrzeuge zugelassen, die zusammen mit dem SDR die Höhe von 4m nicht überschreiten.

Neben den vorgestellten passiven Maßnahmen ist speziell für die Heckumströmung in der Vergangenheit immer wieder auch der Einsatz von aktiven Strömungskontrollen erforscht worden. Bei der aktiven Strömungskontrolle wird üblicherweise der wandnahen Strömung Energie zugeführt. Die so angereicherte Grenzschicht löst bei einem Heckeinzug später ab, so dass größere Umlenkwinkel erreicht werden können. Auf diese Weise wird die Wirkung des passiven Heckeinzuges deutlich verstärkt, weshalb auch ein größerer Heckbasisdruck und somit eine effektivere Verringerung des Luftwiderstandes möglich werden. Die Aktuatoren sind über Schlitze realisiert, über welche Luft ausgeblasen und eingesaugt werden kann. Für ein System, welches von Robert Englar am Georgia Tech Research Institute entwickelt wurde, wird für die Senkung des Luftwiderstandes nach Abzug der benötigten Kompressorleistung mit etwa 20% angegeben [3].



Abbildung 2.7: Dachspoiler für Auflieger; Quelle: http://www.sdr-sys.com/ing/?page_id=9

Nachteilig sind bei aktiven Systemen der hohe technische Aufwand und die praxistaugliche Umsetzung zu sehen. So wird für das oben vorgestellte System ein Kompressor benötigt, welcher zusätzliches Gewicht, Wartungsaufwand und Mehrkosten bedeutet. Darüber hinaus ist nicht geklärt, wie der Transport des erforderlichen Luftmassenstroms zu den Aktuatoren ohne Verringerung des Ladevolumens umgesetzt werden kann.

3 Ableitung des Referenzkörpers

Aufgrund der großen Vielfältigkeit der bei den sechs involvierten Arbeitskreismitglieder repräsentativen Fahrzeugflotte, wurde vereinbart, ein generisches Fahrzeug als Grundkörper für diese Studie zu bauen. In den zwei folgenden Absätzen wird die Ableitung dieses Modells mithilfe von einer CAD (von engl. computer assisted design) Software erklärt und dessen Erscheinungsbild herausgestellt.

3.1 Konstruktion des virtuellen Modells

Die Mitglieder des Arbeitskreises haben der Firma Fluidyna GmbH Geometrien zur Verfügung gestellt. Diese enthalten Merkmale, die für die Fahrzeugflotte des jeweiligen Herstellers charakteristisch sind. Die einzelnen Geometrien wurden dann zu einem einzigen virtuellen Modell zusammengebaut, welches die erwähnten Merkmale aller Hersteller enthält und als Grundmodell für die gestrebten erodynamischen Untersuchungen verwendet werden sollte.

Es wurden drei Sattelzugmaschinen (Abb. 3.1) und drei Auflieger (Abb. 3.2) in Betracht gezogen.

Die Ableitung des Referenzmodells ist über folgende Etappen erfolgt:

3.1.1 Sattelzugmaschine

Für die Außenflächen der Sattelzugmaschine wurden gebietsweise Flächen der drei Herstellergeometrien gemittelt und anschließend „zusammengenäht“. Damit wurde eine repräsentative Außenhaut erzeugt, ohne dass einzelne Herstellereigenschaften wiedererkannt werden können.

Der Dachspoiler des Grundkörpers wurde so konzipiert, dass dessen Anstellwinkel einen tangentiellen Übergang zur Aufliegeroberkante erlaubt.



Abbildung 3.1: Die Geometrien der Sattelzugmaschinen. Links: Daimler; Mitte: Iveco; Rechts: MAN

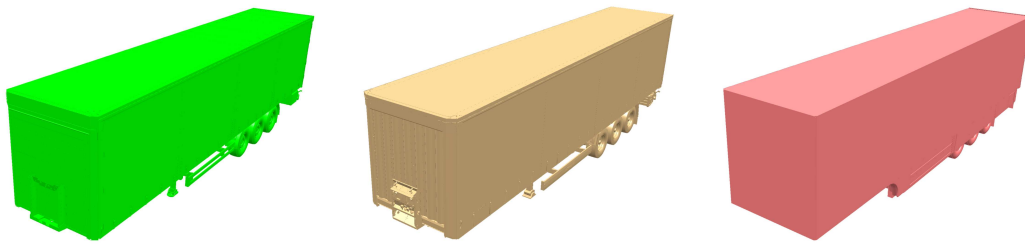


Abbildung 3.2: Die Geometrien der Auflieger. Links: Kögel; Mitte: Krone; Rechts: Schmitz

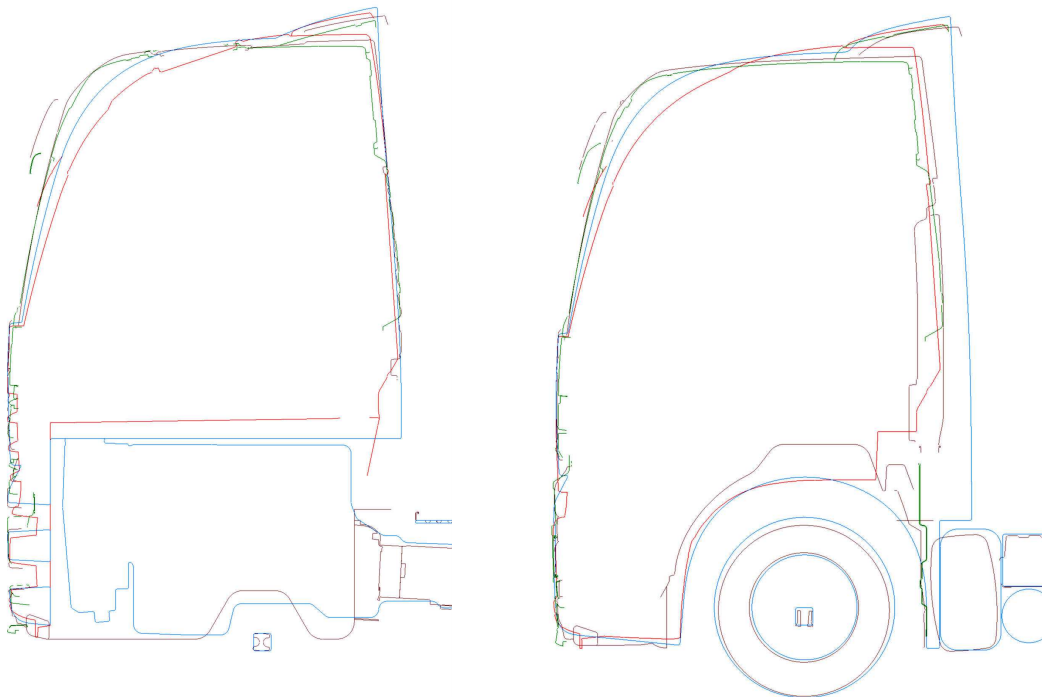


Abbildung 3.3: Schnitten in der Y -Achse. Links: Symmetrieebene; Rechts: $Y = 0,9m$, durch die Radmitte. Blau: Referenzfahrzeug; grün: Daimler; rot: Iveco; Braun: MAN

Es wurde aufgrund der Vereinfachung des Grundkörpers auf Sonnenblenden verzichtet, sowie auf Leitbleche und den dritten Spiegel. Hupen sowie andere zusätzliche Bauteile wurden ausgelassen.

Die Seitenspiegel wurden als die Extrusion des Querschnitts der Iveco Spiegel in der Länge erzeugt.

Ausgewählte Chassiskomponenten wie Ersatzrad, Antriebskomponenten, Tank wurden in Betracht gezogen, weil sie aufgrund ihrer Form und Größe einen bedeutenden Einfluss auf die Strömung haben.

Abb. 3.3 und 3.4 zeigen die Kontouren der drei Hestestellergeometrien und der Referenzkonfiguration. Das Kontour des Referenzfahrzeugs befindet sich systematisch im Bereich der drei Herstellergeometrie, was die Repräsentativität sowie die Objektivität gewährleistet.

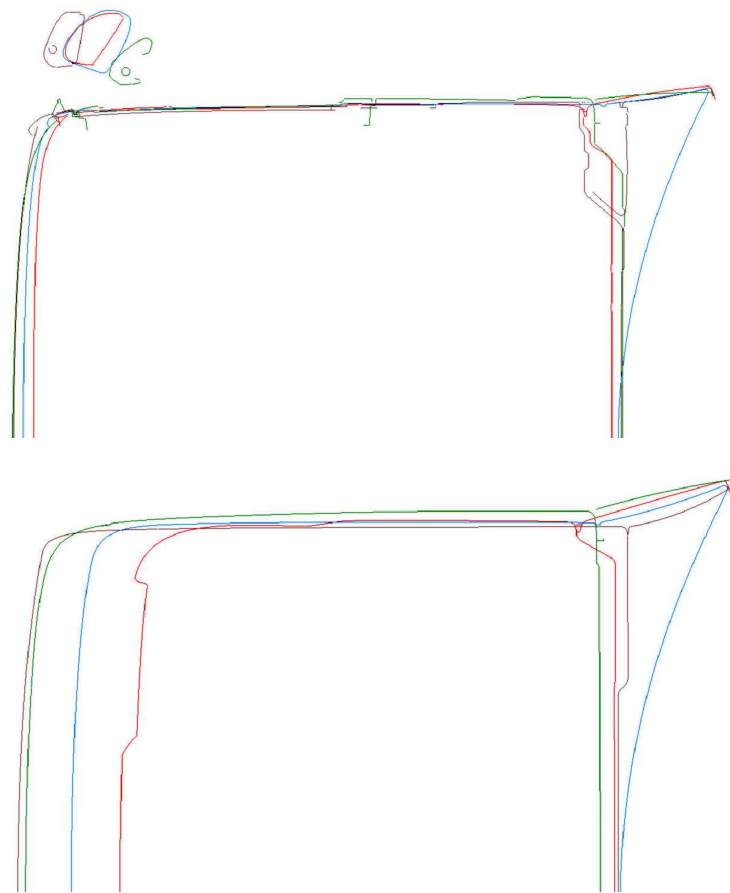


Abbildung 3.4: Schnitten in der Z-Achse (Höhe). Oben: $Z = 1m$; Unten: $Z = 2m$ Blau: Referenzfahrzeug; grün: Daimler; rot: Iveco; Braun: MAN

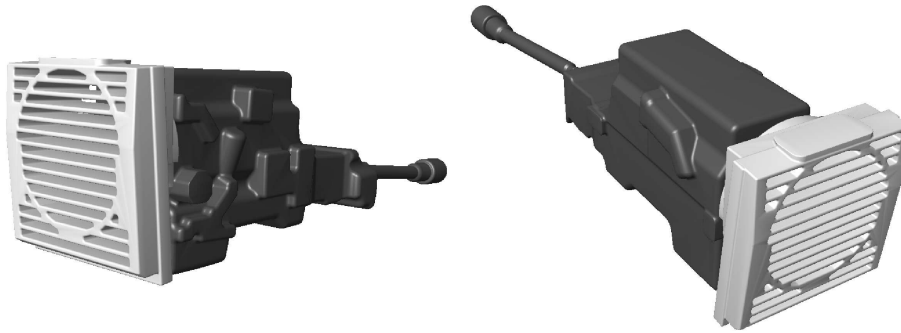


Abbildung 3.5: Vereinfachte Kühlpaket- und Motorblockgeometrie

3.1.2 Design eines vereinfachten Kühlpakets

Es wurde vereinbart, dass das generische Fahrzeug durchströmt sein sollte, um die Massenströme um die Sattelzugmaschine so realistisch wie möglich darzustellen. Dabei spielen nicht nur die Lufteinlässe eine wesentliche Rolle, sondern auch der Motor und das davor stehende Kühlpaket.

Um den Motor auch repräsentativ aber stark vereinfacht darzustellen, wurde ein von MAN zur Verfügung gestellter Motorblock umhüllt und als „black Box“ in den Motorraumbereich eingefügt.

Die Anwendung von porösen Medien sowohl numerisch als auch experimentell sollte vermieden werden, weshalb das Kühlpaket prismatisch entworfen und mit Schlitzfenstern versehen wurde, um einen realistischen Druckverlust erzeugen zu können. Das Kühlpaket wurde anschließend senkrecht, 20mm vor dem Motorblock eingebaut (Abb. 3.5).

3.1.3 Auflieger

Bei dem Auflieger fokussierte sich das Design auf den Unterboden, da der Ladekoffer eine ähnliche Geometrie bei allen Aufliegerherstellern zeigt. Tatsächlich wurden keine Kühlkoffer sondern lediglich klassische, $2,55\text{m}$ breite Ladekoffer betrachtet.

Der Aufliegerunterboden enthält hauptsächlich Längs- und Querträger, so wie zwei Ersatzräder. Ein vereinfachter Palettenkasten wurde eingebaut, dafür aber die Verkleidungen aller Arten (Seiten-, Unterbodenverkleidungen, etc) ausgelassen.

Sowohl die Achsenpositionen als auch die Geometrie der Stützen entstanden durch die Mittelung der drei verfügbaren Herstellergeometrien.

Um die Anströmung des Aufliegers realitätsnah zu gestalten wurden die seitlichen Vorderkanten mit 45° -Schrägen versehen, die die meisten zugelassenen Auflieger auch besitzen. Die zwei oberen Aufliegerseitenkanten wurden mit einem Radius von 25mm verrundet.

3.1.4 Bilder des virtuellen Referenzfahrzeugs

In diesem Absatz zeigen wir die Geometrie des Referenz-Lkw. Zuerst wird die Sattelzugmaschine auf der Abb. 3.6 dargestellt, dann das gesamte Fahrzeug (Abb. 3.7, 3.8 und 3.9). Abb. 3.10 zeigt zwei Darstellungen vom Lastzug mit Bernstein-Effekt.

3.2 Modellbau

Um experimentelle Untersuchungen durchführen zu können, benötigt man ein Prototypfahrzeug oder ein skaliertes Modell. Da Windkanalmessungen für einen Lkw in echter Größe kaum realisierbar sind (außer in seltenen dafür geeigneten Windkanälen), wurde vereinbart, ein Modell von der im vorigen Absatz abgebildeten Geometrie im Maßstab 1 : 2,5 zu bauen. Ein Mitglied des Arbeitskreises, MAN, stellte anschließend einen Modellaufleger den anderen Projektpartnern zur Verfügung.

Die in vorigen Absätzen beschriebene Sattelzugmaschinengeometrie wurde als 1 : 2,5 Modell nachgebaut. Auftragnehmer für den Modellbau war die Firma Frehner & Müller Modellbau GmbH.

Die Modellbaufirma wurde damit beauftragt, das Referenzmodell so zu realisieren, dass es mit unterschiedlichen Front- und Dachmodulen umgestaltet werden kann. Diese Module werden im Kapitel 4 vorgestellt.

Abb. 3.11 und 3.12 zeigen die Referenzgeometrie im Maßstab 1 : 2,5 und deren modulare Bauweise, am Tag der Windkanaluntersuchungen.

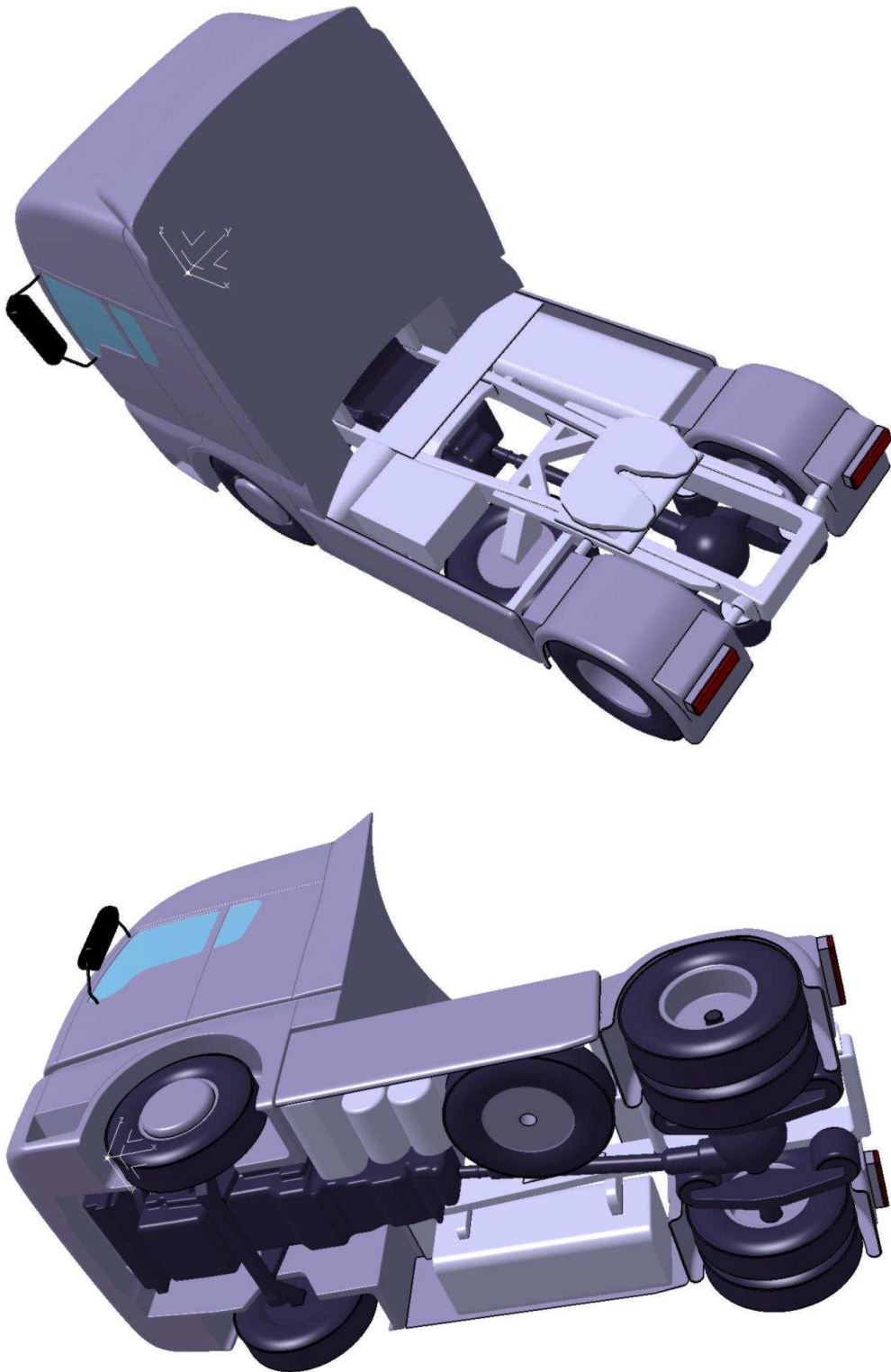


Abbildung 3.6: Schrägbilder des generischen Fahrzeuges



Abbildung 3.7: Vorderansicht der generischen Sattelzugmaschine und detaillierte Ansichten

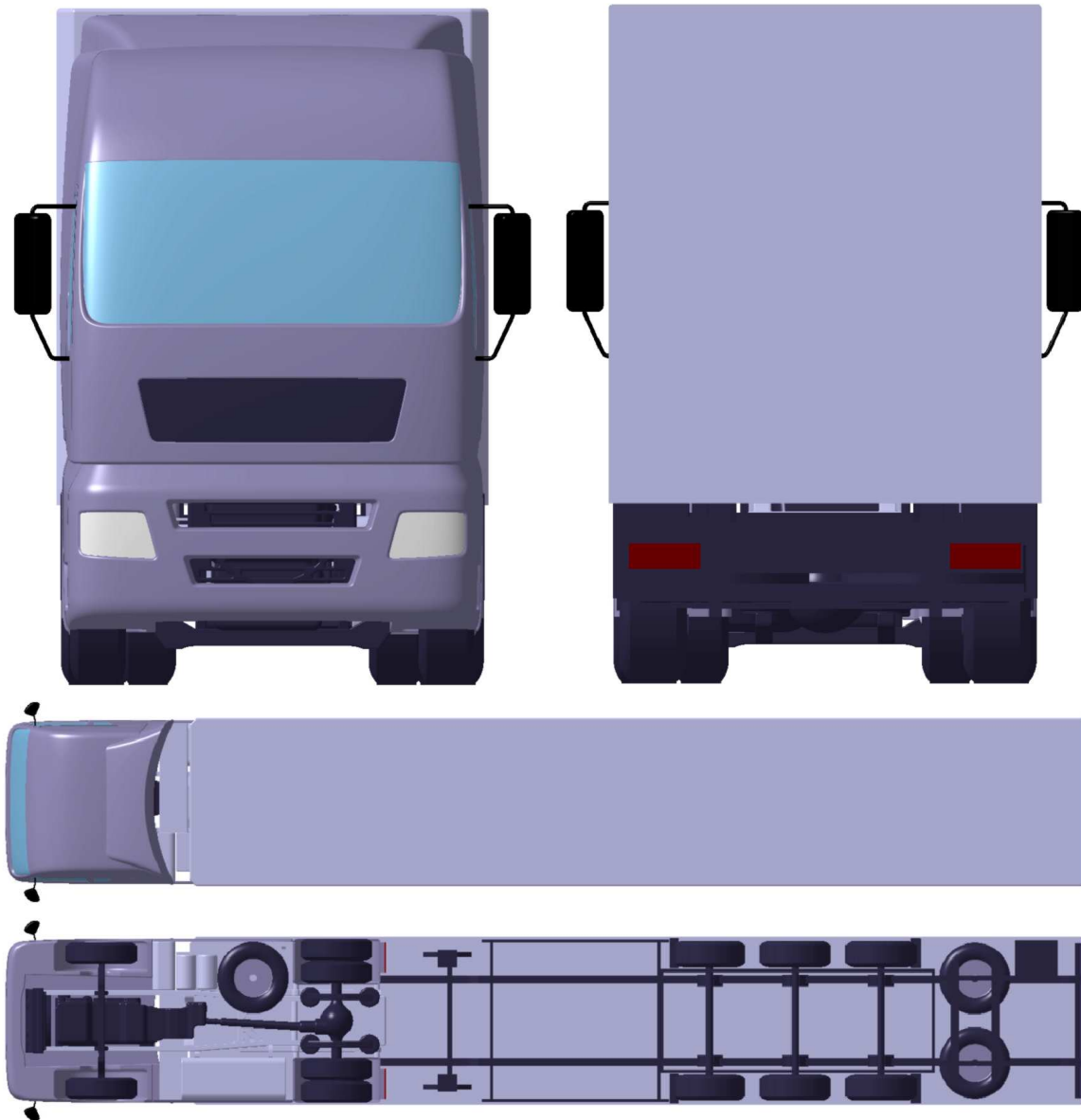


Abbildung 3.8: Orthogonale Ansichten des gesamten Referenz-Lkw

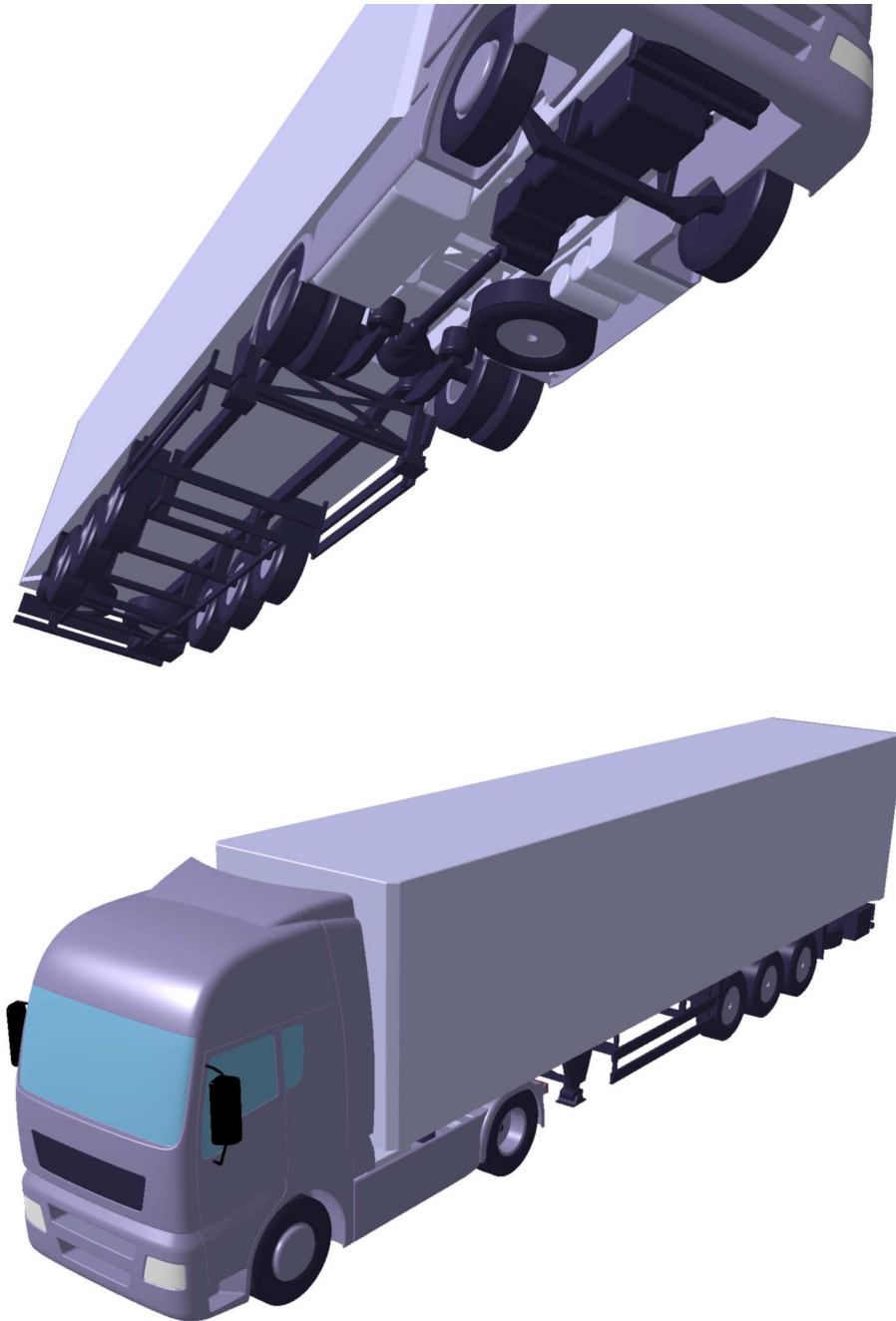


Abbildung 3.9: Schrägbilder des gesamten Referenz-Lkw

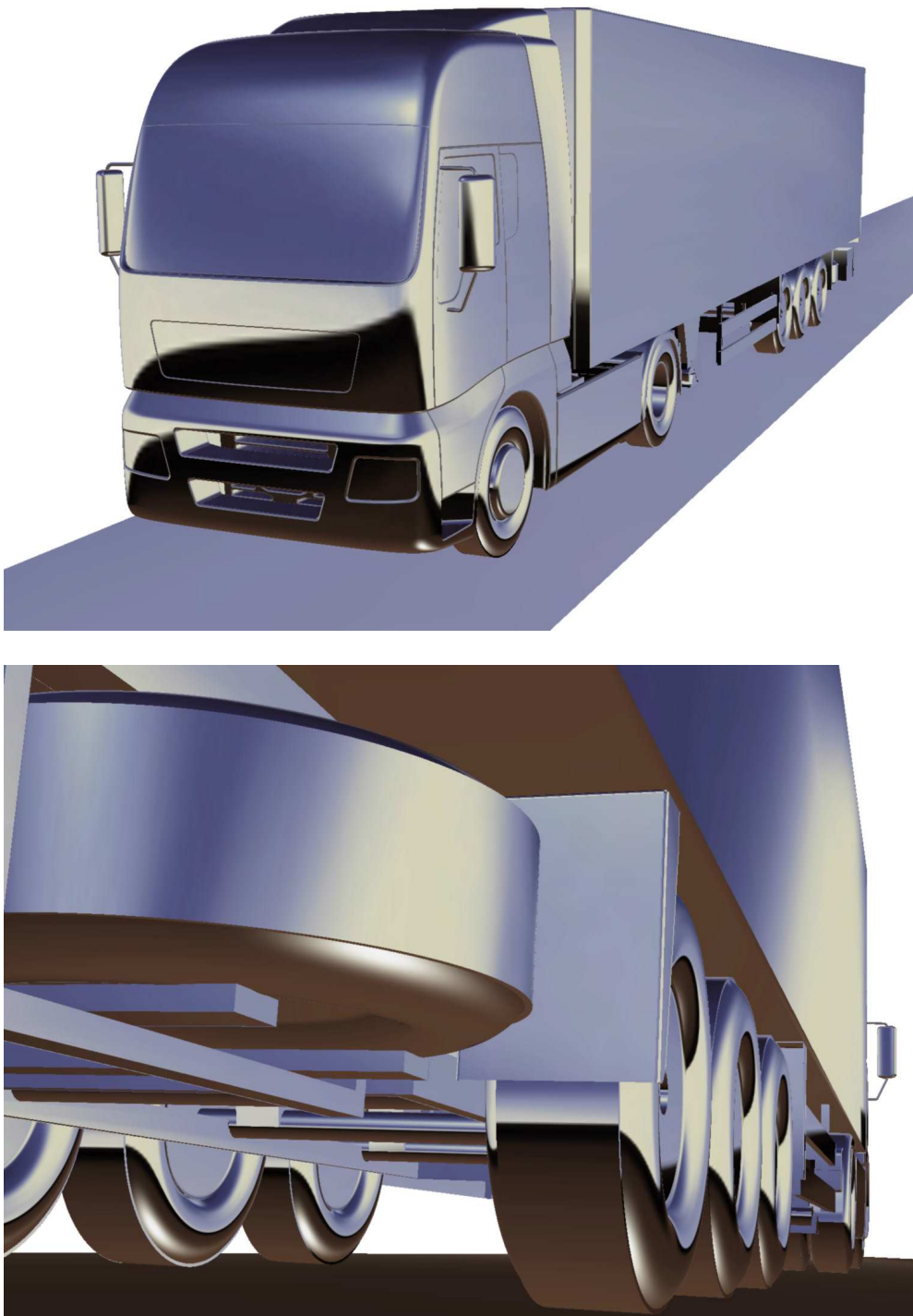


Abbildung 3.10: Fotorealistische Darstellungen des generischen Körpers



Abbildung 3.11: 1 : 2,5 skaliertes Windkanalmodell des generischen Fahrzeuges



Abbildung 3.12: Gesamtbild des Windkanalmodells

4 Analyse der aerodynamischen Merkmale des Referenzkörpers

In diesem Kapitel werden die mittels numerischer Simulation oder experimenteller Messungen gewonnenen Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Numerische Methoden

Für die numerischen Untersuchungen dieses Projekts wurde die lizenzfreie CFD-Software OpenFoam®¹ verwendet. OpenFoam® ist ein Strömungslöser, der die Gleichungen der Strömungsmechanik auf einem diskretisierten Rechengebiet lösen kann. Verschiedene Ansätze stellt OpenFoam® zur Verfügung, was die Diskretisierungsschemata, Turbulenzmodellierung, Randbedingungen usw. betrifft.

Im Rahmen dieses Projektes wurden ausschließlich stationäre Simulationen durchgeführt. Dabei handelt es sich um die numerische Lösung der zeitlich gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Die Turbulenz wurde mit dem sogenannten $k-\omega$ -SST Modell [8, 9] behandelt, welches im Bereich der Fahrzeugaerodynamik bereits seine Genauigkeit und Effizienz zeigen konnte [2, 10].

Um die notwendigen Rechengebiete zu erzeugen wurde Spider² verwendet. Spider ist ein hexahedra-dominiertes Netzgenerator. Er ermöglicht die Erzeugung von Grenzschichtzellen oder flexible Verfeinerungsalgorithmen, die für die Strömungssimulation notwendig sind. Um eine ausreichende Auflösung, besonders an den Lkw-Oberflächen, sicher zu stellen, wurden Rechendomänen mit über 45 Millionen Zellen generiert.

Die Analyse der Rechenergebnisse wurde mit der open-source Software Paraview³ durchgeführt.

4.2 CFD-Ergebnisse

Die im vorigen Absatz beschriebenen Methoden wurden für die numerische Simulation der Referenzgeometrie angewandt. Die Anströmgeschwindigkeit betrug 22m/s (80km/h); dies galt auch für die weiteren Simulationen. Die Räder wurden als stehend betrachtet. Der Boden hatte ebenfalls die Translationsgeschwindigkeit von 22m/s .

Die Druckverhältnisse um den Lkw herum sind hauptsächlich für den Luftwiderstand verantwortlich, da sie ein ausgedehntes Staugebiet an der Front des Fahrzeuges (siehe Abb. 4.1 und 4.2) und einen nahezu neutralen Druck am Heck, bzw. um den gesamten Auflieger erzeugen. Im Freiraum zwischen Fahrerhaus und Auflieger herrscht ein beinahe konstanter

¹ <http://www.openfoam.com>

² <http://www.meshing.at>

³ <http://www.paraview.org>

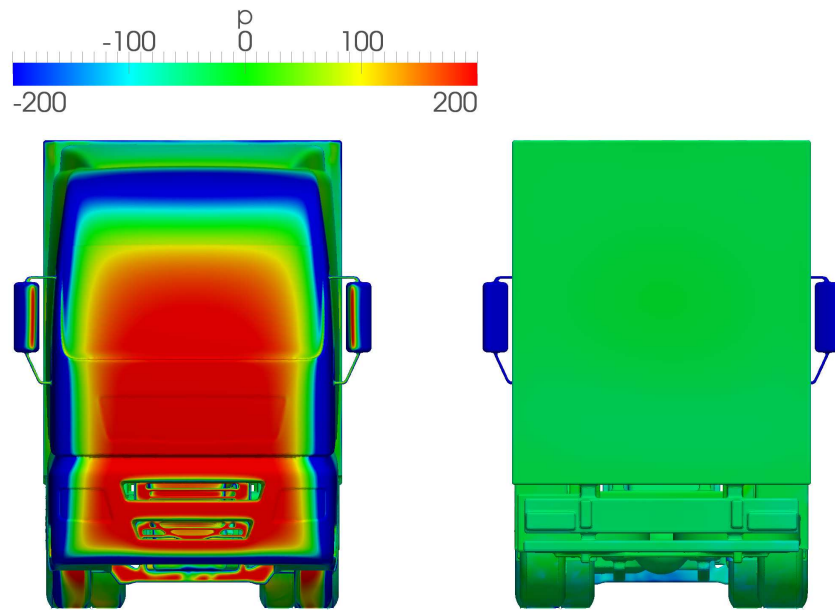


Abbildung 4.1: Druckverteilung an der Front und am Heck. $[p] = m^2/s^2$

Druck, was sich mit gegenseitigen (Schub / Zug) Effekten auf der Aufliegerstirnseite und Fahrerhausrückseite auswirkt.

Abb. 4.3 veranschaulicht die Strömungstopologie in der Symmetrieebene. Die Farbenskala stellt die Geschwindigkeit entlang der Strömungsrichtung und die Vektoren die Geschwindigkeitsrichtungen dar. Die Umströmung der Sattelzugmaschine zeigt keine bedeutenden Ablösungen am Dach. Am Heck bilden sich zwei starke Wirbel, einer ab der Oberkante, einer ab der Unterkante. Der obere Wirbel breitet sich wesentlich mehr aus als der Untere. Am Dach des Aufliegers befinden sich zwar keine Ablösungen, dafür wächst aber die Grenzschichtdicke entlang der Strömungsrichtung erheblich. Im unteren Bereich bilden sich wegen des zerklüfteten Unterbodens viele turbulente Strukturen.

Die Analyse der Strömungstopologie kurz vor der Heckfläche bringt wesentliche Erkenntnisse mit sich. Abb. 4.4 zeigt zwei gegenläufige Wirbel über dem Aufliegerdach. Diese Wirbel bilden sich weiter stromaufwärts und erstrecken sich in Längsrichtung, wobei sie gleichzeitig an Stärke zunehmen. Seitliche Wirbel bilden sich auch, die aus der durch die Spiegel verursachten Strömungsstörung entstehen.

Dies kann auch anhand der Abb. 4.5 erläutert werden. Durch den Einfluss der Wirbel über dem Aufliegerdach verdickt sich die Grenzschicht in der Nähe der Symmetrieebene. Der Nachlauf der Spiegel erzeugt die zwei bereits beschriebenen Seitenwirbel, die auch einen erheblichen Einfluss auf die Grenzschichtdicke haben. Durch die Kombination dieser Phänomene ergibt sich ein Grenzschichtprofil am Heck, das stark ungleichmäßig verteilt ist.

Der dimensionslose Druckbeiwert $c_{p_{tot}}$ erlaubt es, die Regionen zu zeigen, in denen kinetische Energie ab oder zunimmt. Dieser wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$c_{p_{tot}} = \frac{p_{tot} - p_{tot\infty}}{p_{tot\infty}} \quad (4.1)$$

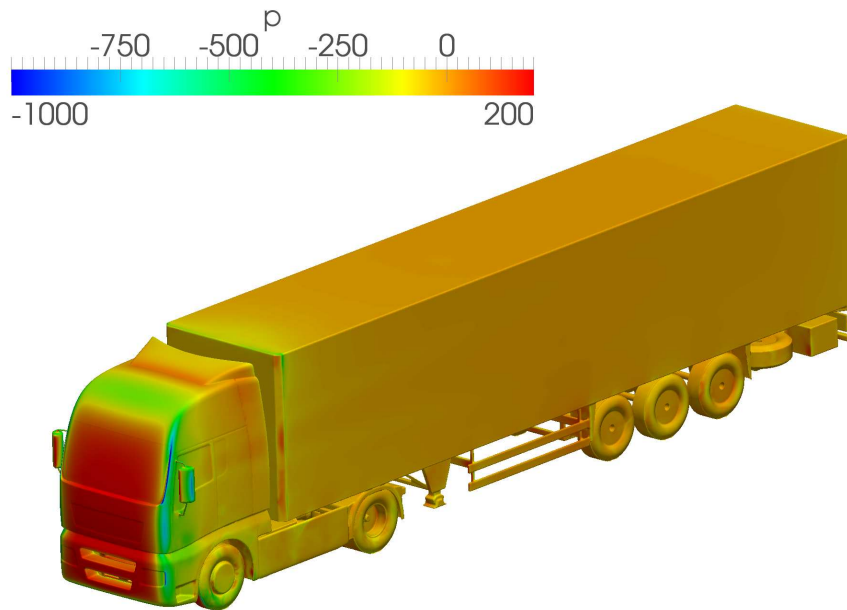


Abbildung 4.2: 3D-Darstellung der Druckverteilung auf der Lkw-Oberfläche. $[p] = m^2/s^2$

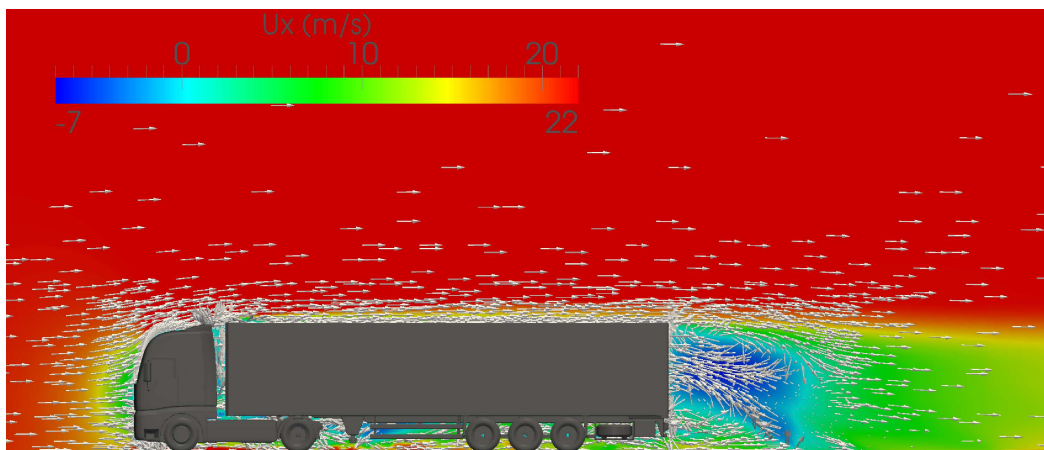


Abbildung 4.3: X-Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene $Y = 0m$

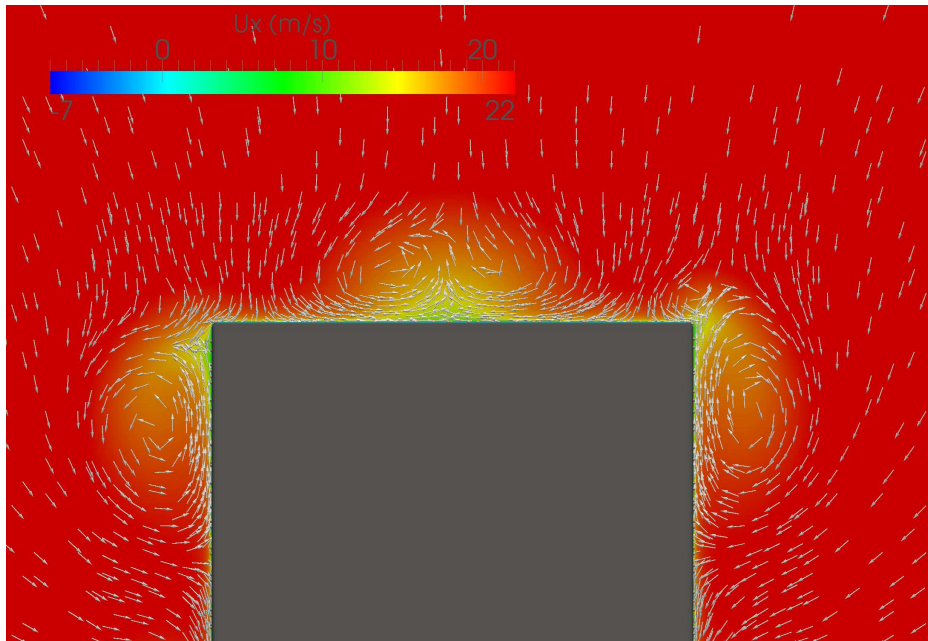


Abbildung 4.4: X-Geschwindigkeitsverteilung in der YZ -Ebene $X = 15.5m$

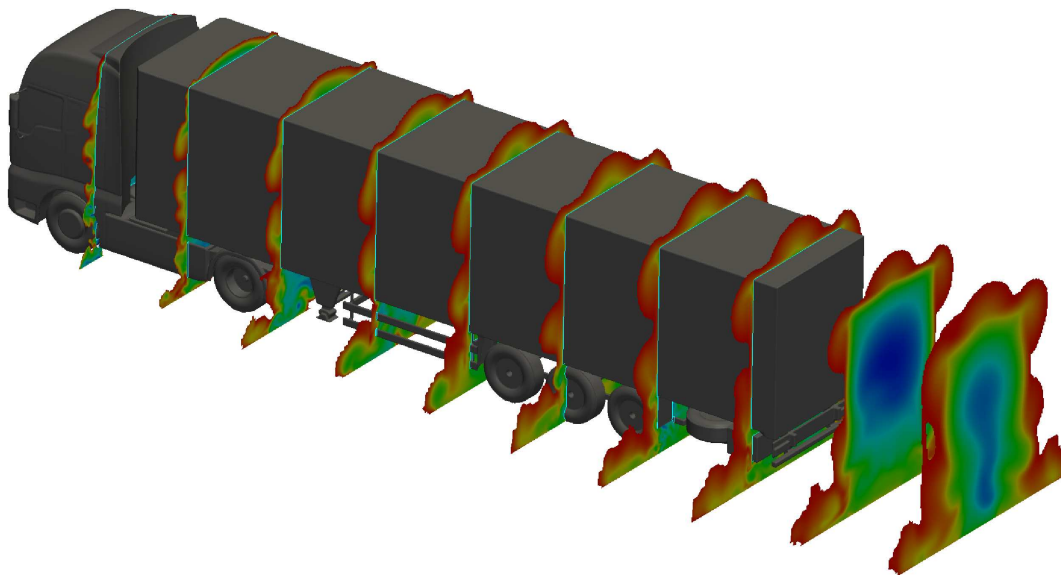


Abbildung 4.5: Darstellung der Grenzschichtdicke in verschiedenen YZ -Ebenen

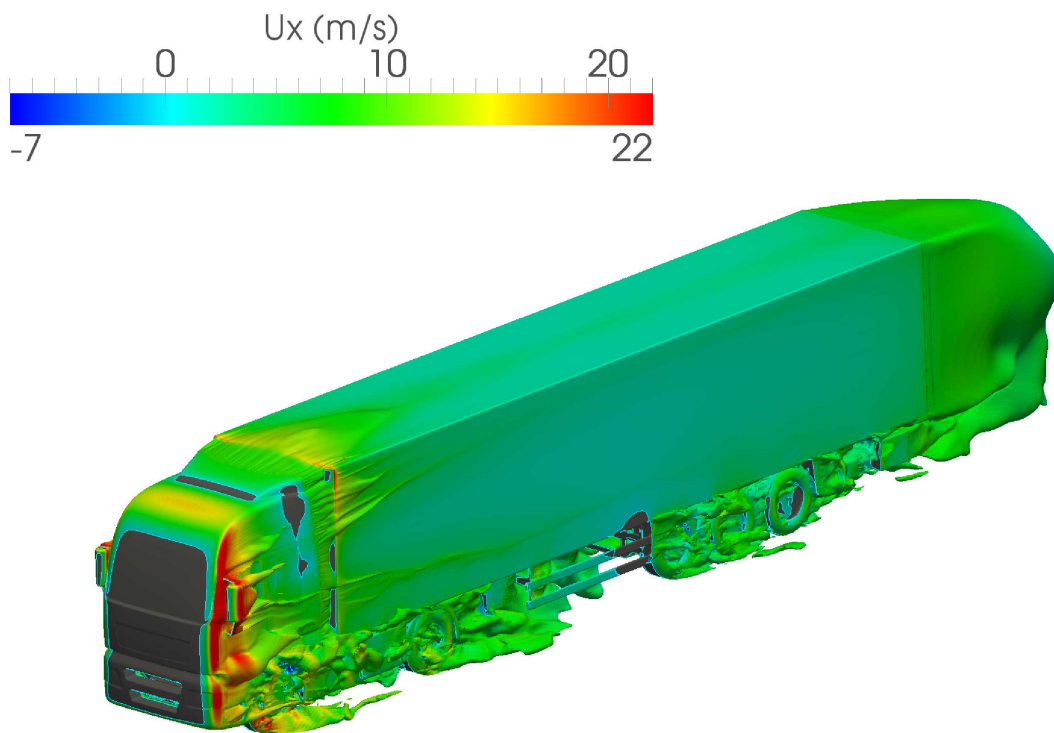


Abbildung 4.6: Isofläche von $c_{p_{tot}} = 0$: Gebiete verloreener Energie

p_{tot} ist die Summe von statischem und dynamischem Druck. Die Isofläche, die auf der Abb. 4.6 dargestellt ist, umhüllt die Gebiete, in denen die kinetische Energie verloren geht und dadurch Luftwiderstand verursacht wird.

Mit der Abb. 4.6 kann man die Spiegel und die Fuge zwischen Stoßfänger und Fahrerhaus als Ursache für Ablösungen identifizieren. Auch an der Vorderkante des Aufliegerdachs entsteht eine Ablösung. Die seitliche Umströmung der Sattelzugmaschine stellt sich als strömungsgünstig dar, da die Strömung an den Stellen kaum ablöst, an denen sie beschleunigt wird. Der Nachlauf der Vorderräder ist deutlich zu sehen.

Wirbel werden im CFD-Bereich häufig mithilfe des sogenannten Q -Kriteriums [7] dargestellt. Dies ist eine Einschätzung der Vortizität, ohne die Scherung zu betrachten, und wird durch Gl. 4.2 definiert.

$$Q = 0,5 \times (||\Omega||^2 - ||S||^2) \quad (4.2)$$

Die Abb. 4.7 zeigt eine relevante Q -Isofläche, bei der die stärksten Wirbel um das Fahrzeug zu erkennen sind. Es ist noch einmal zu beobachten, welche wichtige Rolle die Spiegel, die Fuge am Stoßfänger und die Vorderseiten der Vorderradhäuser spielen. In der Nähe des Unterbodens ist die Strömung stark turbulent. Die Drehgeschwindigkeiten der Wirbel über dem Aufliegerdach (im Bild 4.4 identifiziert) sind aber zu schwach, um dargestellt zu werden. Die Kanten seitlich und oberhalb des Aufliegers verursachen Wirbel, von etwas geringerer Intensität.

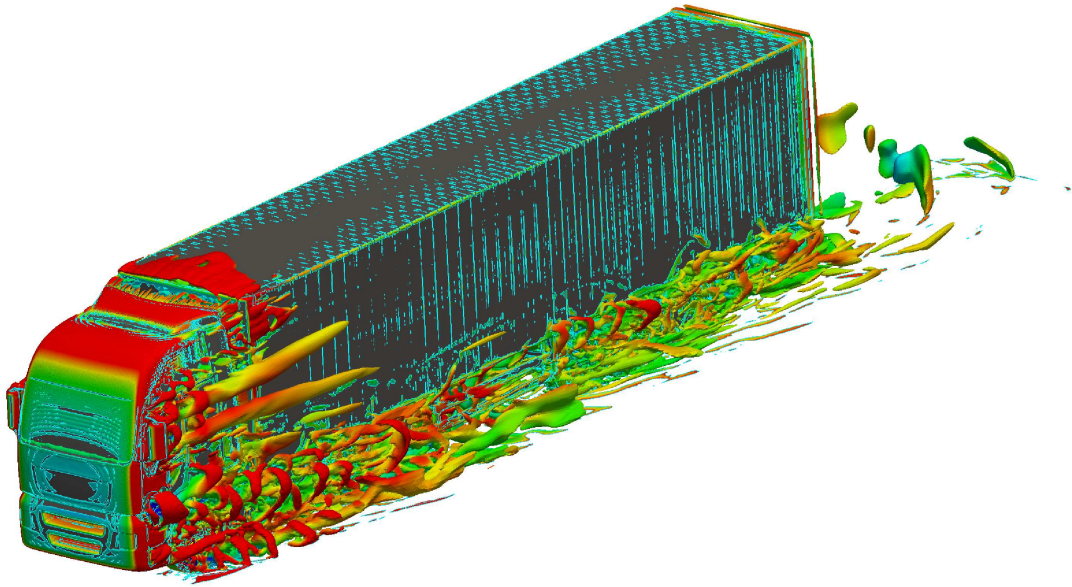


Abbildung 4.7: Darstellung der Wirbelstärke. Isofläche von $Q = 150s^{-2}$

4.3 Numerischer Vergleich: stehende/drehende Räder

Da alle Simulationen mit bewegtem Boden und aber mit stehenden Räder durchgeführt wurden, um zusätzlichen Rechenaufwand zu vermeiden, musste überprüft werden, ob die Drehung der Räder zu erheblichen Änderungen in der Fahrzeugumströmung führte.

Eine Vergleichssimulation unter Berücksichtigung der Drehung der Räder wurde durchgeführt. Aus dieser Simulation konnte festgestellt werden, dass:

- der Luftwiderstand kaum beeinflusst wurde (Unterschied von 0,003),
- die Strömungstopologie die selben Ablösungen und Verwirbelungen zeigte.

Daher wurde diese Rechenstrategie für sinnvoll gehalten und für die weiteren Simulationen verwendet, in der die Räder stehend blieben und der Boden sich mitbewegte.

4.4 Windkanaluntersuchungen

Das im Abschnitt 3.2 vorgestellte 1:2,5 Windkanalmodell wurde im Windkanal der Daimler AG, in Stuttgart, gemessen. Zur Kraftmessung diente eine 6-Punkten-Waage.

Die Untersuchungen mit Rauchlanze und Faden erlaubten es, die Ablösungen und Verwirbelungen um das Modell und in dessen Nachlauf zu identifizieren. Das in der Symmetrieebene positionierte 8-Rauchlanzen System zeigte eine leichte Ablösung am Aufliegerdach, kurz nach der Vorderkante (Abb. 4.8). Ab dem ersten Viertel des Aufliegers blieb die Strömung anliegend, dennoch so gestört, dass die wandnahe Strömung kurz vor dem Heck nicht tangentiell blieb. Diese Eigenschaft hatte sich auch in der numerischen Simulation herausgestellt, in der die Verdickung der Grenzschicht in der Symmetrieebene kurz vor dem Heck deutlich zu sehen war (siehe Abb. 4.5).



Abbildung 4.8: 8-Lanzen Rauchuntersuchung

Abb. 4.9 zeigt die anliegende Strömung an der Stirnseite der Sattelzugmaschine, wie sie schon in der Simulation analysiert wurde (siehe z.B. Abb. 4.6). Auch die seitliche Umströmung der Sattelzugmaschine im Windkanal blieb anliegend und bestätigte dadurch die numerischen Ergebnisse.

Die Untersuchungen mit Rauchlanze von bestimmten Fokuspunkten (wie Räder, Spiegel, Stoßfänger, Freiraum) sind auf den Bildern 4.10 zu sehen. Die experimentellen Rauchdarstellungen entsprechen erneut den numerischen Simulationen, wo die Stelle und Größe der Rezirkulationen auf eine vergleichbare Topologie wie in den CFD Ergebnissen hindeutet.

4.4.1 Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl

Für die im Abschnitt 4.2 vorgestellten numerischen Simulationen wurde eine virtuelle Fahrgeschwindigkeit von $\approx 80\text{km/h}$ (22m/s) verwendet. Um die Strömung bei gleichen Reynolds-Zahlen analysieren zu können, hätte für das Experiment aufgrund der Modellskalierung (1 : 2,5-Skala) eine Geschwindigkeit von $\approx 80\text{km/h} \times 2,5 \approx 200\text{km/h}$ eingestellt werden müssen. Somit wäre gewährleistet gewesen, dass vergleichbare aerodynamische Eigenschaften (Verwirbelungen, Totwassergebiete) in der Simulation und im Experiment hervortreten.

Vor den experimentellen Untersuchungen an der Referenzgeometrie wurde eine sogenannte Reynolds-Reihe durchgeführt, um feststellen zu können, in welchem Anströmgeschwindigkeitsbereich der Luftwiderstand sich nicht mehr ändert. Windkanalgeschwindigkeiten von 80km/h bis 200km/h wurden getestet. Die Luftwiderstandsbeiwerte (siehe Abb. 4.11) bilden ein Plateau ab der Fahrgeschwindigkeit $\approx 140\text{km/h}$.

Aufgrund dieser Erkenntnis, und obwohl das Lkw-Modell die höchste Windkanalgeschwindigkeit aushalten konnte, wurde entschieden, alle experimentellen Untersuchungen bei 160km/h durchzuführen, da sich diese Geschwindigkeit bereits in dem von der Reynolds-Zahl unabhängigen Untersuchungsbereich befindet. Damit wurden möglichen Vibrationen und kleine Schwankungen vermieden, die für das Auge unsichtbar sind aber die Ergebnisse hätten beeinflussen können.

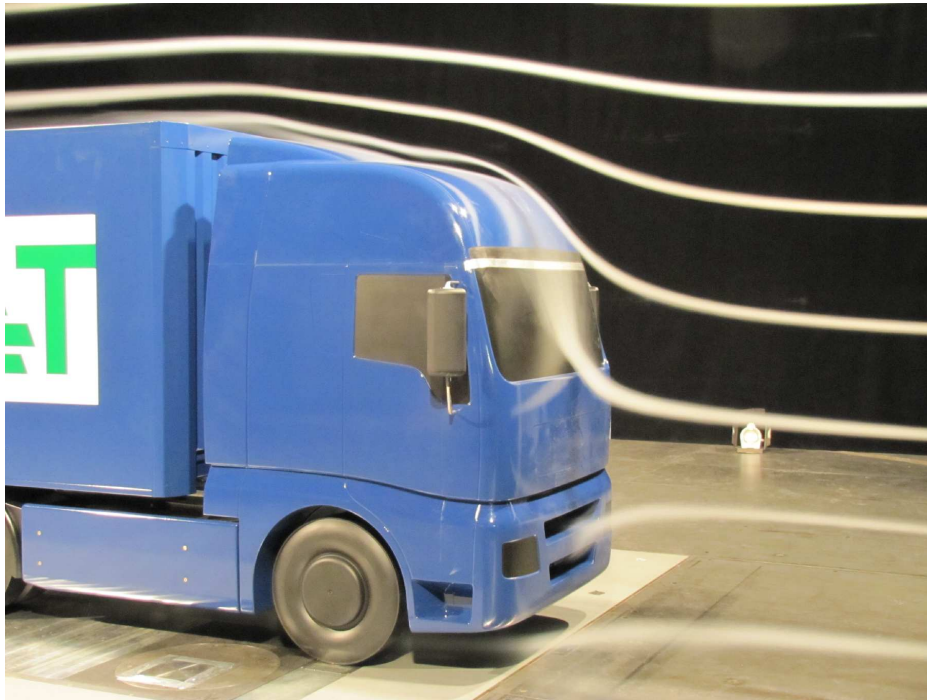


Abbildung 4.9: 8-Lanzen Rauchuntersuchung, Fokus auf der Sattelzugmaschine

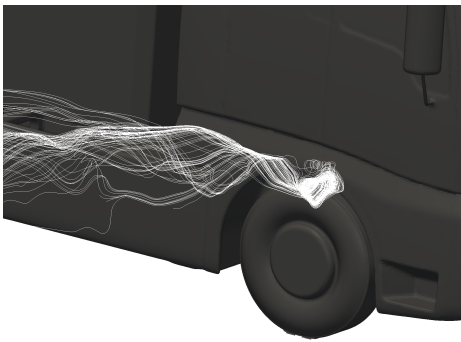
4.4.2 Analyse unter schräger Anströmung

Die Widerstandskräfte wurden auch unter variablem Schiebewinkel gemessen (siehe Abb. 4.12). Unter großem Schiebewinkel nimmt der Luftwiderstand bis zu 0,065 zu. Der stark unsymmetrische Unterboden erklärt die unsymmetrische Entwicklung der Widerstandsbeiwerte, je nach Seitenwindrichtung.

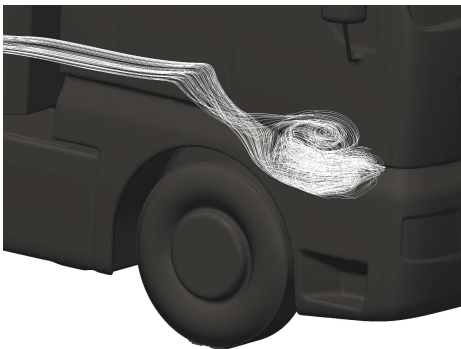
4.4.3 Zusätzliche Ergebnisse zur Referenzgeometrie

Auch ohne Spiegel wurde der Luftwiderstand experimentell untersucht. Diese Maßnahme sinkt den C_w um 0,017 gegenüber der Variante mit Spiegeln.

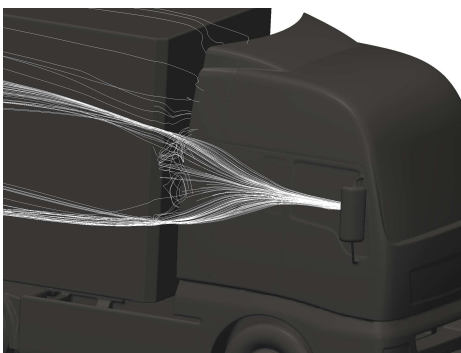
Mithilfe von Klebebänder wurden die zwei Lufteinlässe zugedeckt und die Durchströmung des Motorraumbereiches wurde dadurch drastisch reduziert. Das Ergebnis zeigt ein ΔC_w von 0,022.



(a) Nachlauf am Vorderrad



(b) Fuge zwischen Stoßfänger und Fahrerhaus



(c) Spiegel



(d) Freiraum

Abbildung 4.10: Topologievergleiche. Links: Simulation; rechts: Rauchuntersuchung

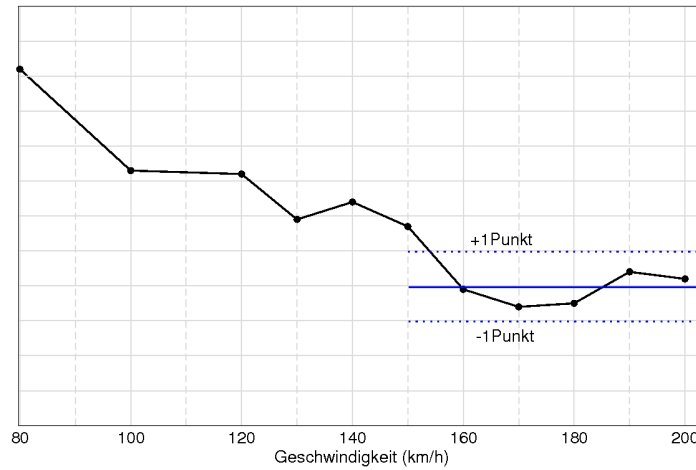


Abbildung 4.11: Reynolds-Reihe: Abhängigkeit der Luftwiderstandsbeiwerte von der Geschwindigkeit bzw. Reynolds Zahl

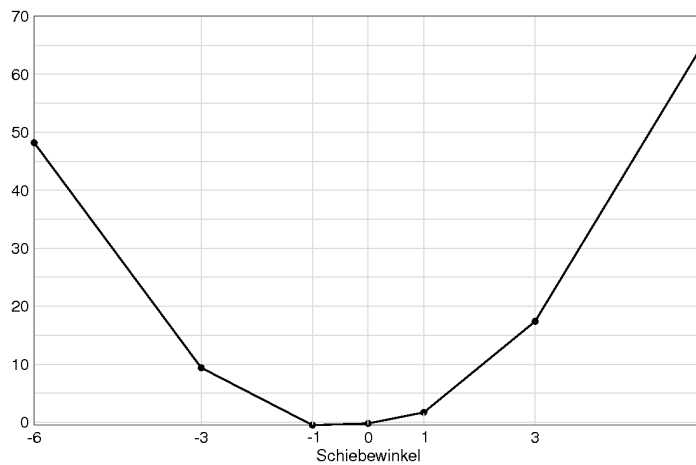


Abbildung 4.12: Einfluss des Schiebewinkels auf den Luftwiderstand. Hier wird das ΔC_w , in Punkteneinheit (1 Punkt=0,001), dargestellt

5 Analyse der aerodynamischen Optimierungspotentiale

In diesem Abschnitt werden alle Optimierungsmaßnahmen beschrieben, die im Rahmen dieses Projekts untersucht wurden, und deren Wirkung auf die Aerodynamik des im Kapitel 3 vorgestellten Referenzkörpers analysiert.

5.1 Untersuchungen zur Frontgestaltung

In diesem Abschnitt stellen wir die Maßnahmen vor, die die Frontgestaltung betreffen. Wie bereits im Kapitel 2 zur Literaturrecherche erläutert, beziehen sich diese Optimierungsvorschläge meist auf die Form des Fahrzeuges und nicht auf Anbauteile.

5.1.1 Frontverlängerung 500mm

5.1.1.1 Simulation

An der Stirnseite der Sattelzugmaschine wurde die Größe der seitlichen Kantenradien eingeschätzt. Diese befanden sich in einem Bereich von ca. 20 bis 150mm. Laut Gl. 2.1 werden die meisten Ablösungen vermieden, wenn diese Radien r bei einer Fahrgeschwindigkeit von $80\text{km/h} \approx 22\text{m/s}$ die folgende Bedingung erfüllen:

$$r < r_{min} \approx 1,3 \times 10^5 \frac{\nu}{U_\infty} \approx 88\text{mm} \quad (5.1)$$

Durch die Verlängerung der Stirnseite der Sattelzugmaschine um 500mm darf die Geometrie an der Seite so angepasst werden, dass die Radien zunehmen. Nach der geometrischen Änderung, die in der Abb. 5.1 dargestellt ist, wurden die Frontradien erneut approximiert. Diese befanden sich dann in einem Bereich von ca. 85 bis 800mm.

Die Verzerrung der generischen Geometrie wurde mit Exa PowerClay durchgeführt, einer Morphing Software. Bei dieser Optimierungsmaßnahme wurden die Spiegel auch mitverzerrt, damit sie sich nach wie vor an einer repräsentativen Stelle für den Fahrer befinden.

Die Simulation des geänderten Zustandes führte zu einem um 0,013 niedrigeren Luftwiderstand.

$$\Delta C_{w_{CFD}} = -0,013 \approx -2.8\%$$

Die Unterschiede im Luftwiderstand sind folgendermaßen zwischen den Lkw-Teilen verteilt:

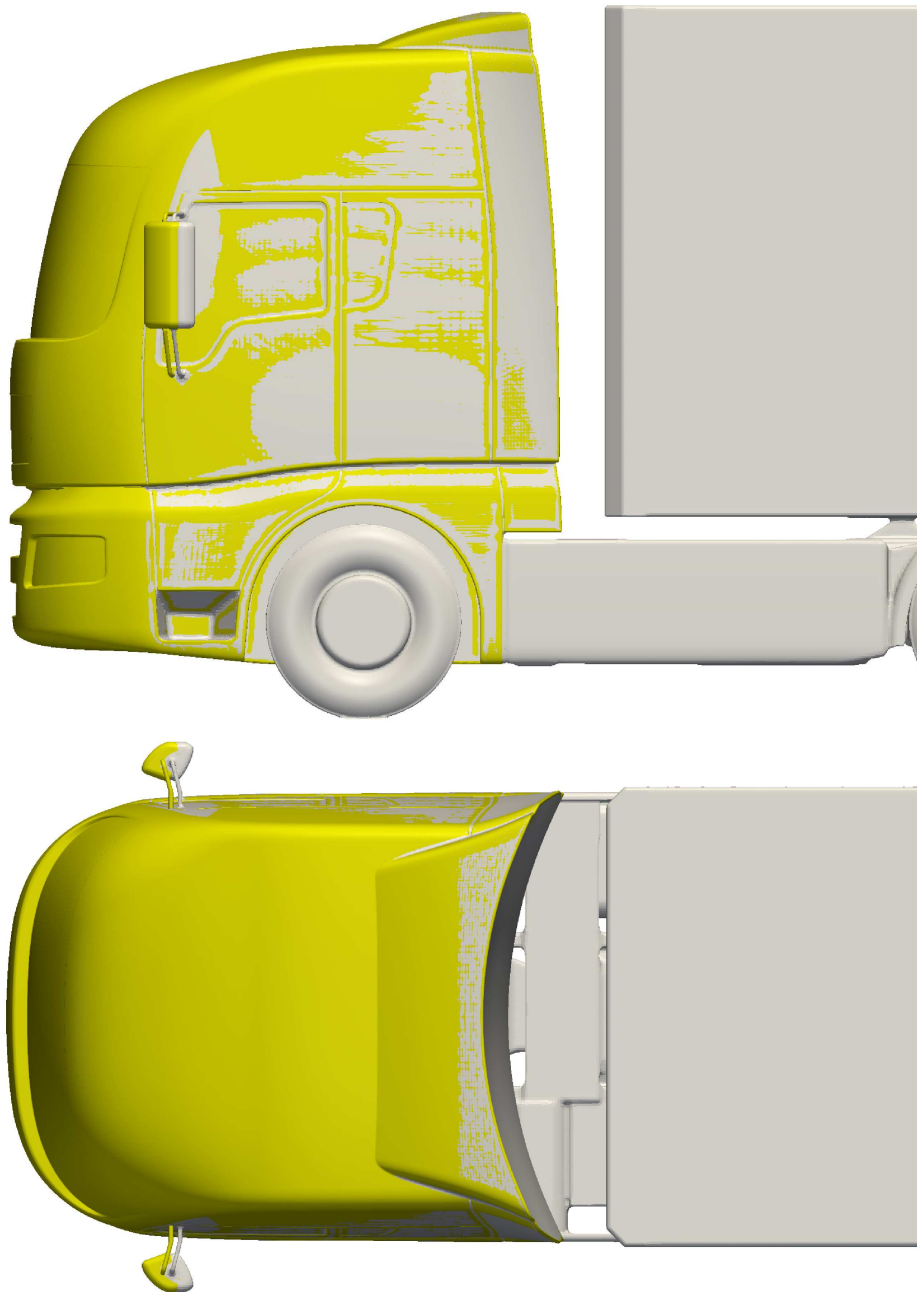


Abbildung 5.1: Geometrische Änderung an der Sattelzugmaschine durch die Verlängerung der gesamten Stirnseite. Oben: Seitenansicht ; Unten: Draufsicht

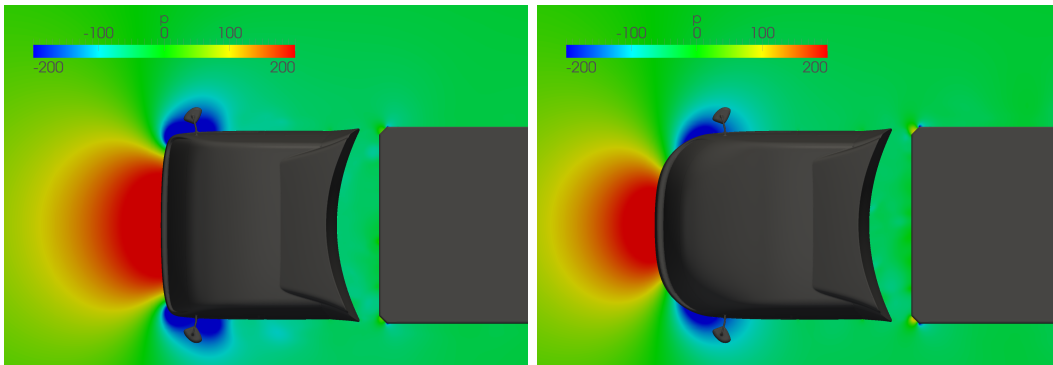


Abbildung 5.2: Druckverteilungen in XY-Ebene, in der Höhe $Z = 0m$. $[p] = m^2/s^2$

Sattelzugmaschine	$\Delta C_w = -0,044$
Auflieger	$\Delta C_w = +0,027$
Motor (inklusive Kühlpaket)	$\Delta C_w = +0,004$
<hr/>	
Gesamtes Fahrzeug	$\Delta C_w = -0,013$

Diese Verbesserung des Luftwiderstandes kann durch die Vergrößerung der Frontradien erklärt werden, die das Staudruckgebiet am Bug des Fahrzeugs, sowie die Unterdruckgebiete seitlich der Sattelzugmaschine reduzieren (siehe Abb. 5.2).

Wie im Abschnitt 4.2 für die Referenzgeometrie wurde hier der dimensionslose Druckbeiwert $c_{p_{tot}}$ berechnet (Gl. 4.1). Die Isofläche, die auf der Abb. 5.3 dargestellt wird, ist mit Abb. 4.6 zu vergleichen.

Bei der verlängerten Frontseite sind keine Ablösungen am Stoßfänger zu sehen. Die Farbskala der Isofläche zeigt auch, dass die Strömung an den Seiten der Sattelzugmaschine an Geschwindigkeit nicht so stark zunimmt, wie bei dem Referenzfahrzeug, was für die Umströmung der Sattelzugmaschine und des Aufliegers aerodynamisch günstiger ist.

5.1.1.2 Windkanalmessungen

Die entsprechenden Front- und Dachmodule wurden, basierend auf den neuen CAD-Daten, auch für das Windkanalmodell gebaut und im Windkanal untersucht. Ein Bild der umgebauten Konfiguration ist im Abb. 5.4 zu sehen.

Das Ergebnis für diese Konfiguration gegenüber der Referenzgeometrie wurde um 0,017, sprich 4.0%, besser.

$$\Delta C_{w_{WiKa}} = -0,017 \approx -4.0\%$$

5.1.1.3 Weitere Untersuchungen

Die Abhängigkeit des Luftwiderstandes vom Schiebewinkel wurde auch für diese Konfiguration untersucht. Die Ergebnisse Abb. 5.5 zeigen, wie im Referenzfall, einen starken, jedoch

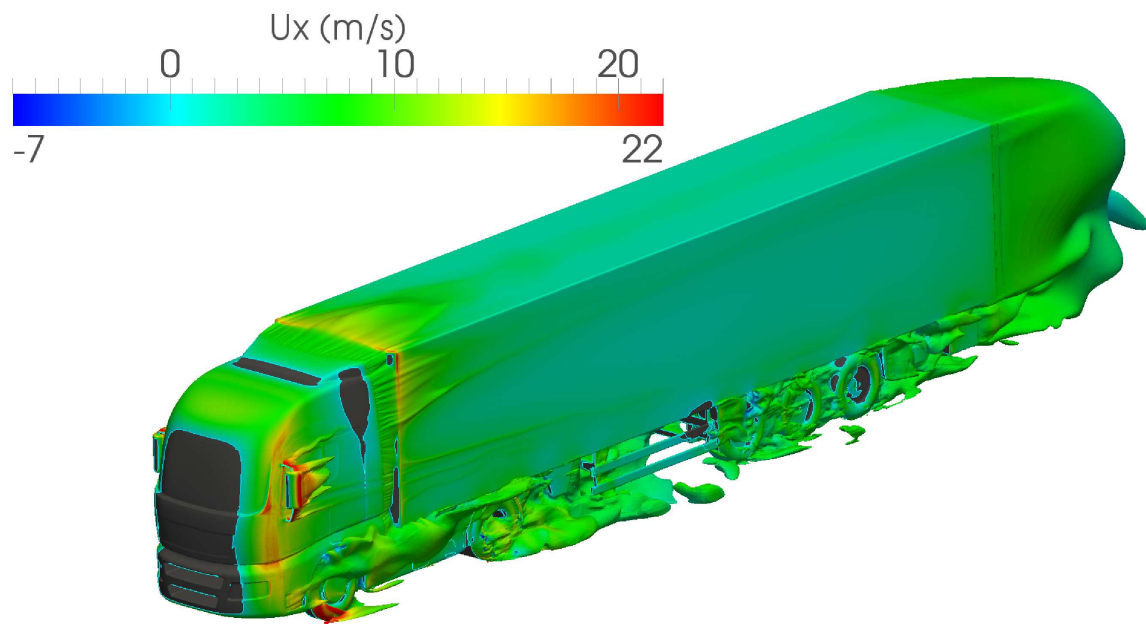


Abbildung 5.3: Isofläche von $c_{p_{tot}} = 0$: Gebiete verloreener Energie



Abbildung 5.4: Verlängerung der gesamten Stirnseite. Experimentelle Front- und Dachmodule

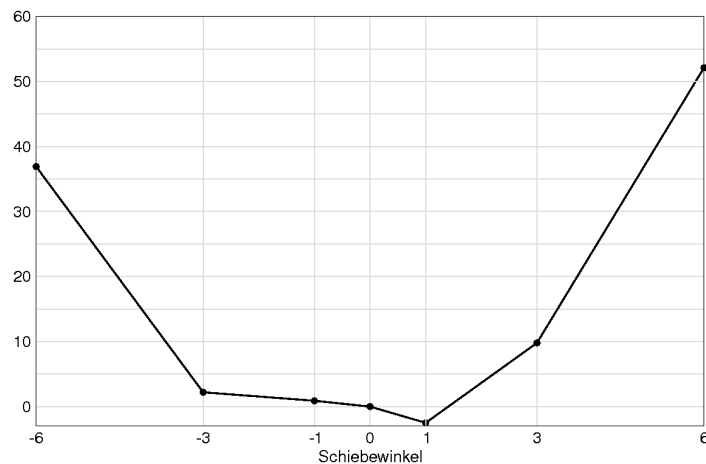


Abbildung 5.5: Einfluss des Schiebewinkels auf den Luftwiderstand. Hier wird der ΔC_w -Verlauf, in Punkteinheit (1 Punkt=0,001), dargestellt

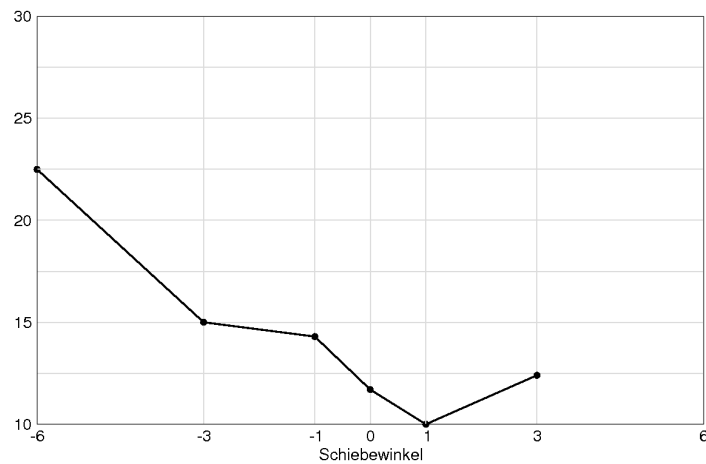


Abbildung 5.6: Einfluss der Freiraumabdeckung auf die Aerodynamik

unsymmetrische Anstieg des Luftwiderstandes, je nach Seitenwindrichtung. Dennoch sind die Variationen leicht schwächer im Vergleich zur Referenzgeometrie (ca. 0,010 besser bei den Schiebewinkeln -6° und 6°).

Ohne Spiegel wurde der Luftwiderstand auch untersucht. Dabei senkte sich der C_w -Wert um 0,042 gegenüber der Variante mit Spiegeln. Dieser bedeutende Unterschied ist dadurch zu erklären, dass die Spiegel der Frontverlängerung direkt angeströmt werden, wobei sie sich bei der Referenzgeometrie in Unterdruckgebieten befanden.

Mithilfe von Klebebänder wurden die Lufteinlässe vor dem Motor zugedeckt, was die Durchströmung des Motorraumbereiches drastisch reduzierte. Das Ergebnis zeigt ein ΔC_w von 0,022, wie bei der Referenzgeometrie.

Als weitere aerodynamische Maßnahme wird üblicherweise der Freiraum zwischen Fahrerhaus und Auflieger zugedeckt (siehe Abschnitt 2.1). Die Abdeckung des Spaltes gewährleistete unter idealer Anströmung einen um 0,012 verbesserten Luftwiderstand und wirkte noch vorteilhafter unter schräger Anströmung (siehe Abb. 5.6).

5.1.2 Kurzhauber Variante 500mm

5.1.2.1 Simulation

Eine sogenannte Kurzhaubengeometrie wurde generiert, auch mit dem Ziel, wie bei der gesamten Frontverlängerung, die Frontradien strömungsgünstiger zu gestalten. Abb. 5.7 veranschaulicht die erfolgten geometrischen Änderungen, die mit dem Morphingtool PowerClay durchgeführt wurden.

Die Simulation des geänderten Zustandes führte zu einem um 0,007 niedrigeren Luftwiderstand gegenüber dem Referenz-Lkw.

$$\Delta C_{w_{CFD}} = -0,007 \approx -1.5\%$$

Die Variationen in Luftwiderstand kann man nach Komponent einordnen:

Sattelzugmaschine	$\Delta C_w = -0,026$
Auflieger	$\Delta C_w = +0,016$
Motor (inklusive Kühlpaket)	$\Delta C_w = +0,003$
<hr/>	
Gesamtes Fahrzeug	$\Delta C_w = -0,007$

Die Frontradien wurden bei dieser Variante ausschließlich im unteren Bereich der Sattelzugmaschine verbessert. Dadurch werden Ablösungen am Stoßfänger verhindert. Die Verbesserung der Umströmung durch diese Maßnahme ist jedoch nicht so stark wie bei der Variante mit Fronverlängerung. Abb. 5.8 veranschaulicht, dass die Druckverteilung an der Front aber nur leicht im unteren Bereich verbessert werden konnte.

5.1.2.2 Windkanalmessungen

Für die Kurzhaubenvariante wurde ein Frontmodul gebaut und im Windkanal untersucht. Abb. 5.9 zeigt die umgebaute Konstruktion vor den Messungen.

Das Ergebnis für diese Konfiguration gegenüber der Referenzgeometrie wurde um 0,003, sprich 0.7%, besser.

$$\Delta C_{w_{WKa}} = -0,003 \approx -0.7\%$$

5.1.2.3 Weitere Untersuchungen

Die Kurzhaubenvariante ohne Spiegel wurde um 0,007 strömungsgünstiger gegenüber der Variante mit Spiegeln. Ein möglicher Grund dafür, dass der Unterschied verhältnismäßig gering ausfiel, war die ungünstige Druckverteilung an der Unterkante der Frontscheibe (Abb. 5.8 rechts). Seitlich an der Fahrerkabine, odrt, wo sich Außenspiegel befanden, entstanden ein ausgedehntes Unterdruckgebiet. Die Spiegel wurden nicht so stark und direkt angeströmt wie im Fall der Frontverlängerung. Ihr Einfluss auf den Luftwiderstand war dadurch geringer.

Die Abdeckung der Lufteinlässe vor dem Motor verbesserte den Luftwiderstand um 0,019. Dieser Wert bleibt in der Größenordnung des bereits bei der Referenzgeometrie gemessen C_w -Unterschieds.

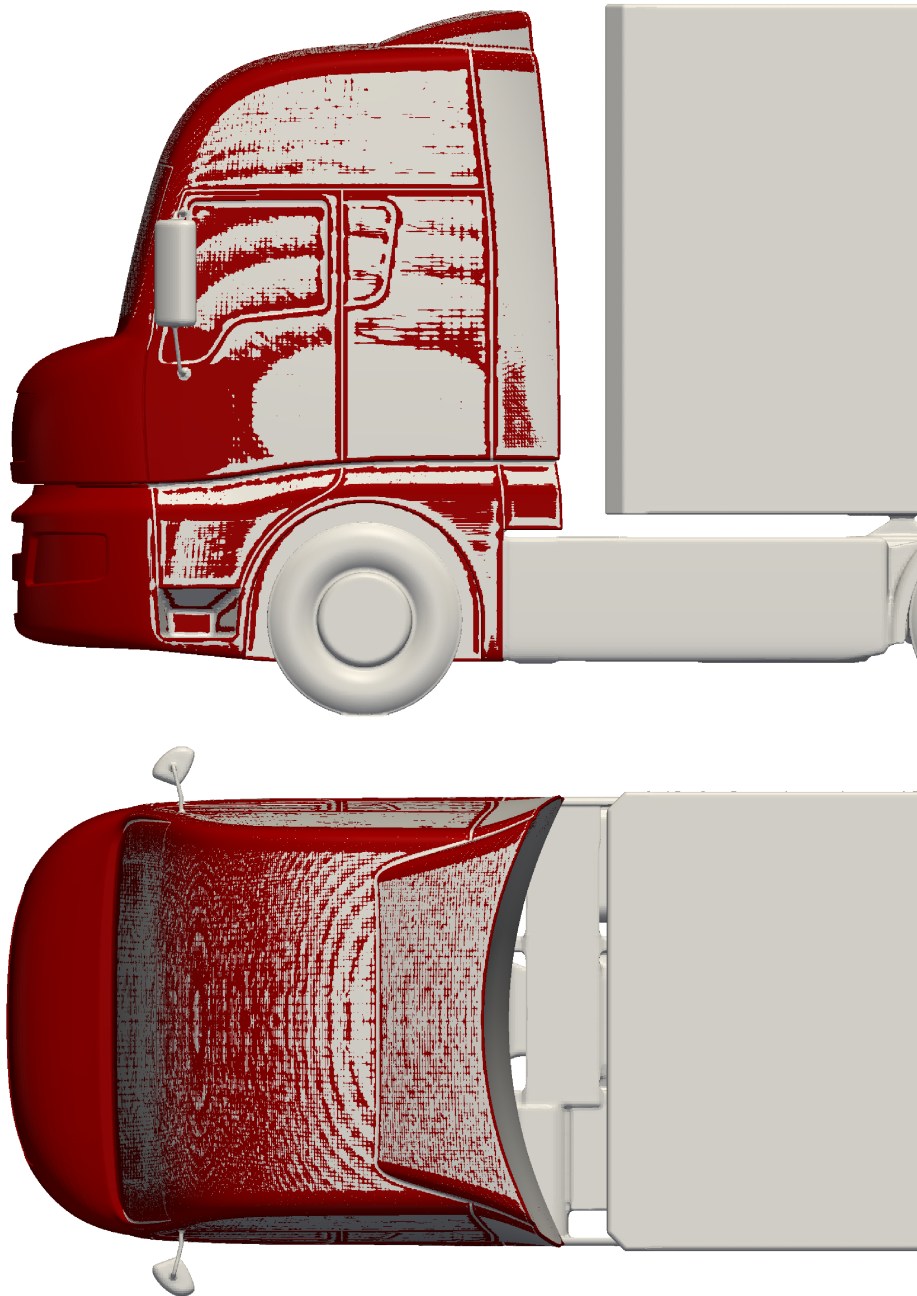


Abbildung 5.7: Geometrische Änderung an der Sattelzugmaschine durch die Verlängerung des Motorraumbereichs. Oben: Seitenansicht ; Unten: Draufsicht

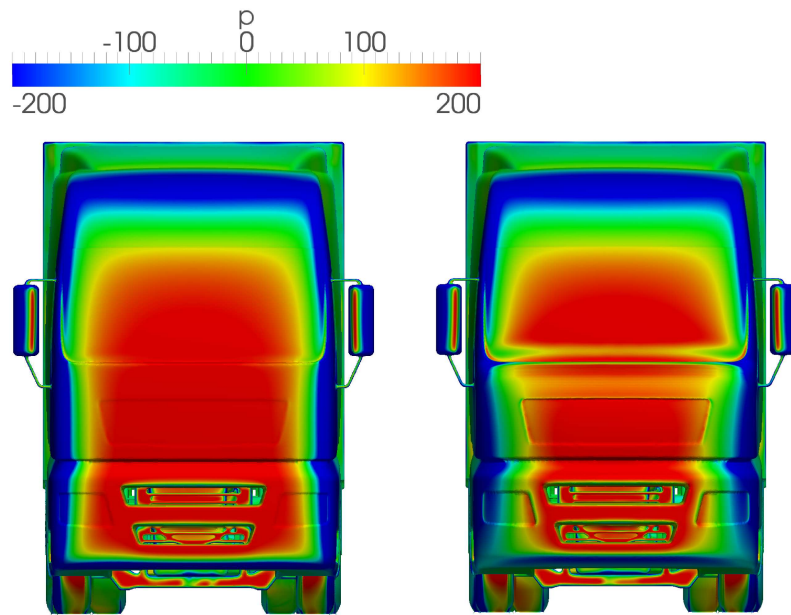


Abbildung 5.8: Druckverteilungen an der Front. Links: Referenzgeometrie ; Rechts: Kurzhauber.
 $[p] = \text{m}^2/\text{s}^2$



Abbildung 5.9: Kurzhauber. Experimentelles Frontmodule. Dach und Spiegel bleiben unverändert



Abbildung 5.10: Seitenansicht der Geometrien. Grau: Referenz, grün: Frontverlängerung, gelb: „Soft Nose“

5.1.3 „Soft Nose“ 500mm

Eine weitere Maßnahme inspirierte sich von der Mischung zwischen den bereits berichteten Änderungen und der Studie von Scania 2.1. Eine sogenannte „Soft Nose“ wurde mithilfe des Morphingtools PowerClay generiert. Abb. 5.10 veranschaulicht deren Geometrie.

Bei dieser Konfiguration wurden die Frontradien so vergrößert wie in dem Fall der gesamten Frontverlängerung. Dabei, wurde der obere Bereich nach innen hereingedrückt, um einen möglichst glatten Übergang zwischen dem Motorraumbereich und dem Dach zu gewährleisten. Die Eigenschaften des unteren Bereiches blieben sowie an dem Kurzhauber. Auch der Dachspoiler wurde in seiner ursprünglichen Form und Stelle unverändert gelassen. Die Schnitten in der Länge der Sattelzugmaschine (Abb. 5.11) zeigen diese eigenschaftlichen, verglichen mit den Kontouren der Referenzgeometrie und der Frontverlängerung.

Für diese Variante konnte kein Windkanal gebaut werden, weshalb lediglich numerische Ergebnisse hier berichtet werden. Der Luftwiderstand sank um 0,008 durch die verbesserten Frontradien und die runde Front im Bereich der Windschutzscheibe. Leider konnte nicht eine höhere Widerstandreduzierung erzielt werden, als bei der Frontverlängerung. Dennoch sind die Ergebnisse durch ähnliche Strömungsverbesserungen miteinander vergleichbar.

$$\Delta C_{wCFD} = -0,008 \approx -1,7\%$$

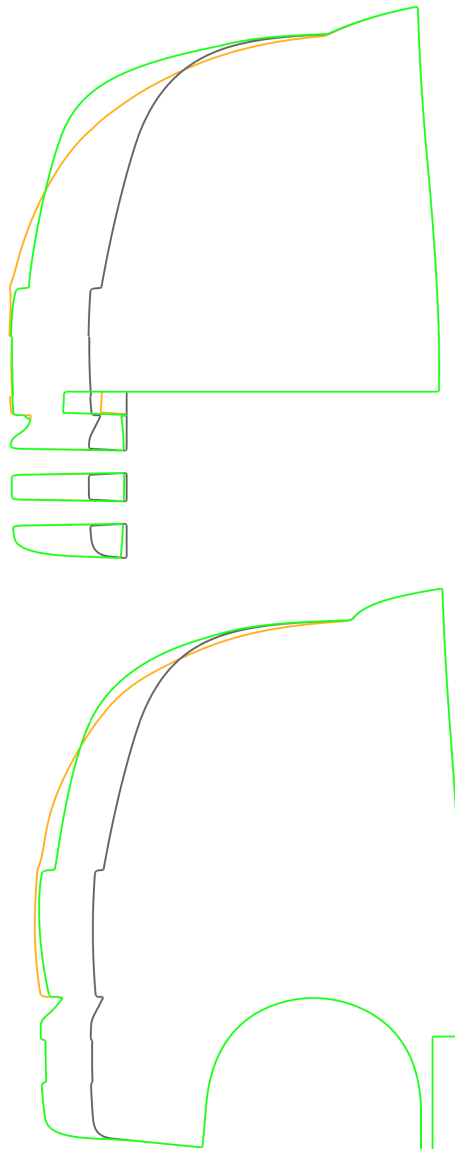


Abbildung 5.11: Schnitte in den Geometrien. Schwarz: Referenz, grün: Frontverlängerung, gelb: „Soft Nose“. Oben: Symmetrieebene, Unten: Schnitt durch die Radmitte

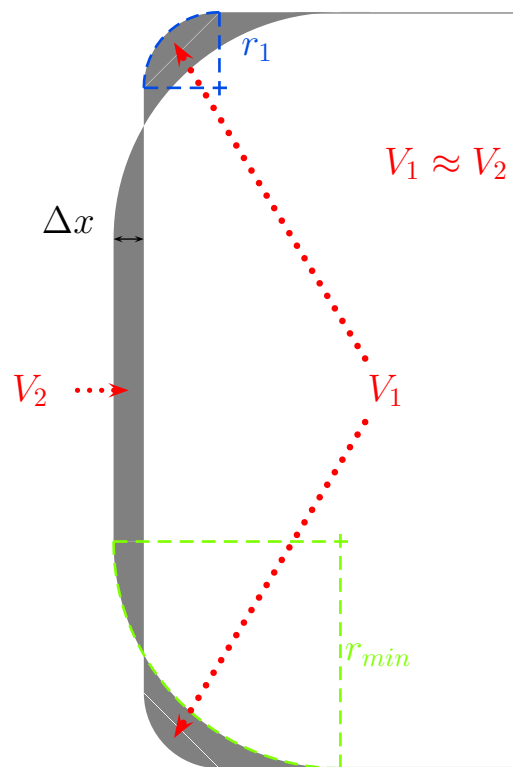


Abbildung 5.12: Skizze der Frontgeometrie in der Höhe: Volumenausgleich für die Vergrößerung der Frontradien durch eine Verlängerung der gesamten Front nach vorne

5.1.4 Fazit zu den untersuchten Frontmaßnahmen

Die Verbesserung der Aerodynamik durch eine optimierte Frontgestaltung (hauptsächlich durch die Vergrößerung der Frontradien) wiesen ein Potential zur Luftwiderstandsreduzierung von höchstens 4,0% auf.

Gl. 5.1 erlaubt es, einen für die Umströmung der Sattelzugmaschine kritischen Radius r_{min} einzuschätzen, der nicht unterschritten werden sollte, um mögliche Ablösungen zu verhindern. Die kleinsten Frontradien an der Referenzgeometrie wurden in einem Bereich von 20mm identifiziert. Um diese Radien bis zu dem Wert von r_{min} zu vergrößern, muss das Volumen der Fahrerkabine reduziert werden, was sich nachteilig erweisen würde für den Komfort und die Ergonomie des Fahrerplatzes. Um dies zu vermeiden, und die verlorenen Volumina (als V_1 gekennzeichnet im Bild 5.12) auszugleichen, könnte die Front um Δx verlängert werden. In unserem Fall lässt sich Δx auf einen Wert von ca. 16mm umrechnen.

Die Umsetzung dieser Verlängerung nach vorne hätte aber Konsequenzen hinsichtlich der Fahrerposition. Wenn die Seitenradien der Front vergrößert werden, beispielsweise von 50mm auf 100mm, werden die Seitenkanten um 50mm nach innen gedrückt. Um den Eckpunkt der Kopplungspedale in seiner ursprünglichen Position (ungefähr 50mm von der maximalen Breite, sowie 50mm von der Front) zu behalten, sollte der gesamte Fahrsitz mitsamt Pedalen um entsprechende 50mm nach hinten verschoben werden. Aufgrund des Platzmangels bedeutet dies eine Verschiebung nach vorne anstatt nach hinten. Insofern würde die Vergrößerung der Frontradien insgesamt eine Verlängerung um ca. 16mm + 50mm benötigen.

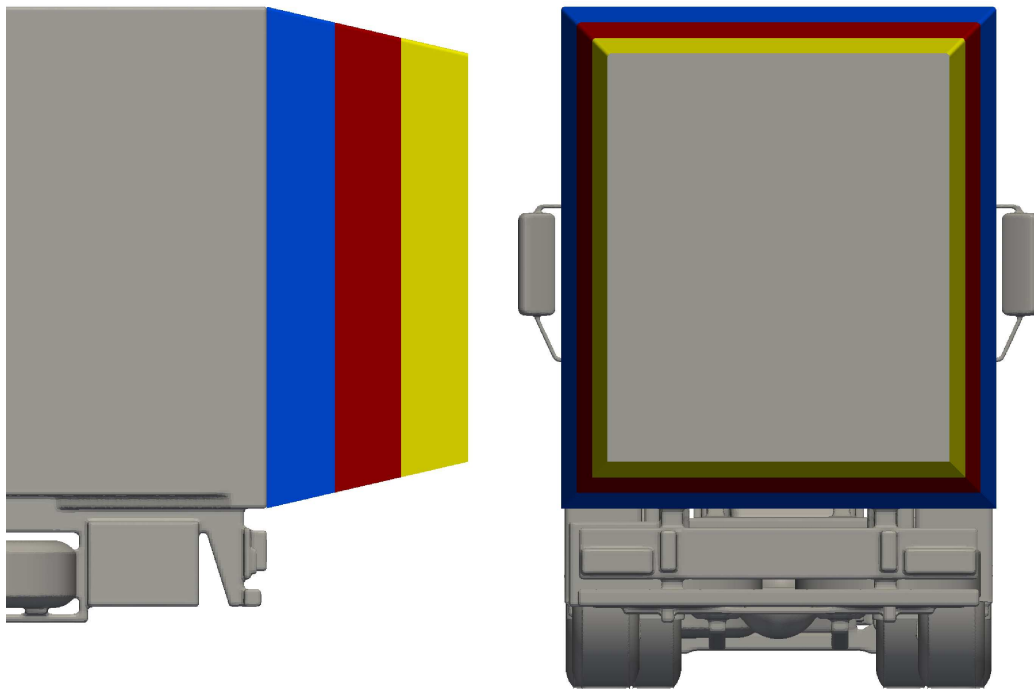


Abbildung 5.13: Boat-Tail Variationen 400mm (blau), 800mm (rot) und 1200mm (gelb). Links: Seitenansicht; Rechts: Rückansicht

5.2 Untersuchungen zur Heckgestaltung

Bei diesem Thema handelt es sich um aerodynamische Anbauten, nämlich Heckklappen, mit hoher Umsetzbarkeit und Wirksamkeit. Aber auch Dacheinzüge wurden mithilfe von CFD untersucht, die leider nicht im Windkanal getestet werden konnten.

5.2.1 Heckklappen 400mm, 800mm and 1200mm

5.2.1.1 Simulation

In der Literaturrecherche (Kap. 2) wurden bereits solche Heckklappen als besonders effektiv identifiziert. In dieser Studie wurden Heckklappen mit 13°-Anstellwinkel und 25mm Rundungen an den oberen Kanten untersucht. Drei Längen (siehe Abb. 5.13) wurden in Betracht gezogen, wobei der Winkel konstant bei 13° blieb.

Die Simulationen der Heckklappvarianten lieferten einen um bis zu knapp 10% reduzierten Luftwiderstand.

	Boat-Tail 400mm	Boat-Tail 800mm	Boat-Tail 1200mm
ΔC_{wCFD}	-0,044	-0,036	-0,039
ΔC_{wCFD} (%)	-9.4	-7.7	-8.3

Die Verbesserung der Aerodynamik bei den drei Konfigurationen lässt sich unterteilen wie in in folgender Tabelle gezeigt. Während der Luftwiderstand der Sattelzugmaschine leicht abnimmt, nimmt der C_w des Aufliegers drastisch ab. Der zusätzliche Widerstand, der von

den Klappen selbst verursacht wird, hält sich dennoch in Grenzen, so dass die Bilanz für eine deutlich verbesserte Aerodynamik spricht.

	Boat-Tail 400 mm	Boat-Tail 800 mm	Boat-Tail 1200 mm
Sattelzugmaschine	$\Delta C_w = -7$	$\Delta C_w = -12$	$\Delta C_w = -9$
Motor	$\Delta C_w = -1$	$\Delta C_w = 0$	$\Delta C_w = -1$
Auflieger	$\Delta C_w = -47$	$\Delta C_w = -43$	$\Delta C_w = -50$
Heckklappen	$\Delta C_w = +11$	$\Delta C_w = +19$	$\Delta C_w = +21$
Gesamtes Fahrzeug	$\Delta C_w = -44$	$\Delta C_w = -36$	$\Delta C_w = -39$

Die Unterschiede zwischen der Referenzkonfiguration und den mit Heckklappen versehenen Lkw kommen aufgrund des erhöhten Drucks auf der Heckfläche zustande (siehe Abb. 5.14). Erstaunlicherweise bleibt der dort herrschende Druck relativ unabhängig von der Länge der Klappen.

Die Strömungstopologie am Heck verändert sich so, dass der Nachlauf verkleinert wird, weil die Heckwirbel eine stärkere Strömung in Richtung Heckfläche bilden lässt, was den Druckrückgewinn wiederum erzeugt. Eine Darstellung der Heckwirbel unter Auswirkung von Heckklappen ist durch zwei-dimensionale Stromlinien auf dem Bild 5.15 zu sehen. Bei dem Referenzfall waren die zwei Heckwirbel von vergleichbarer Größe. Mit Heckklappen nimmt der obere Wirbel stark zu, während der untere Wirbel sich kaum noch bilden kann. Ein zusätzlicher Wirbel, weiter vom Heck, bildet sich im unteren Bereich. Der obere Wirbel führt dann mehr Luft in Richtung der Heckfläche, mit der bereits erwähnten positiven Wirkung auf die aerodynamischen Eigenschaften.

5.2.1.2 Windkanalmessungen

Die drei durch CFD untersuchten Heckklappenvariationen wurden für das Windkanalmodell aus Holz gebaut (siehe Abb. 5.16). Leider konnte der Anstellwinkel der Klappen nicht eingestellt werden, weshalb alle Klappen bei der selben 13°-Neigung wie in den Simulationen gemessen wurden.

Die Kraftmessungen für diese Geometrie ergaben folgende Unterschiede zur Referenzgeometrie:

	Boat-Tail 400mm	Boat-Tail 800mm	Boat-Tail 1200mm
$\Delta C_{w_{WiKa}}$	-0,033	-0,029	-0,028
$\Delta C_{w_{WiKa}}$ (%)	-7.7	-6.8	-6.5

Aus diesen Ergebnisse wird erneut die Genauigkeit der Simulation überprüft. Obwohl die Unterschiede in C_w in den numerischen Rechnungen leicht überschätzt werden, stimmen die Größenordnungen und Tendenzen überein.

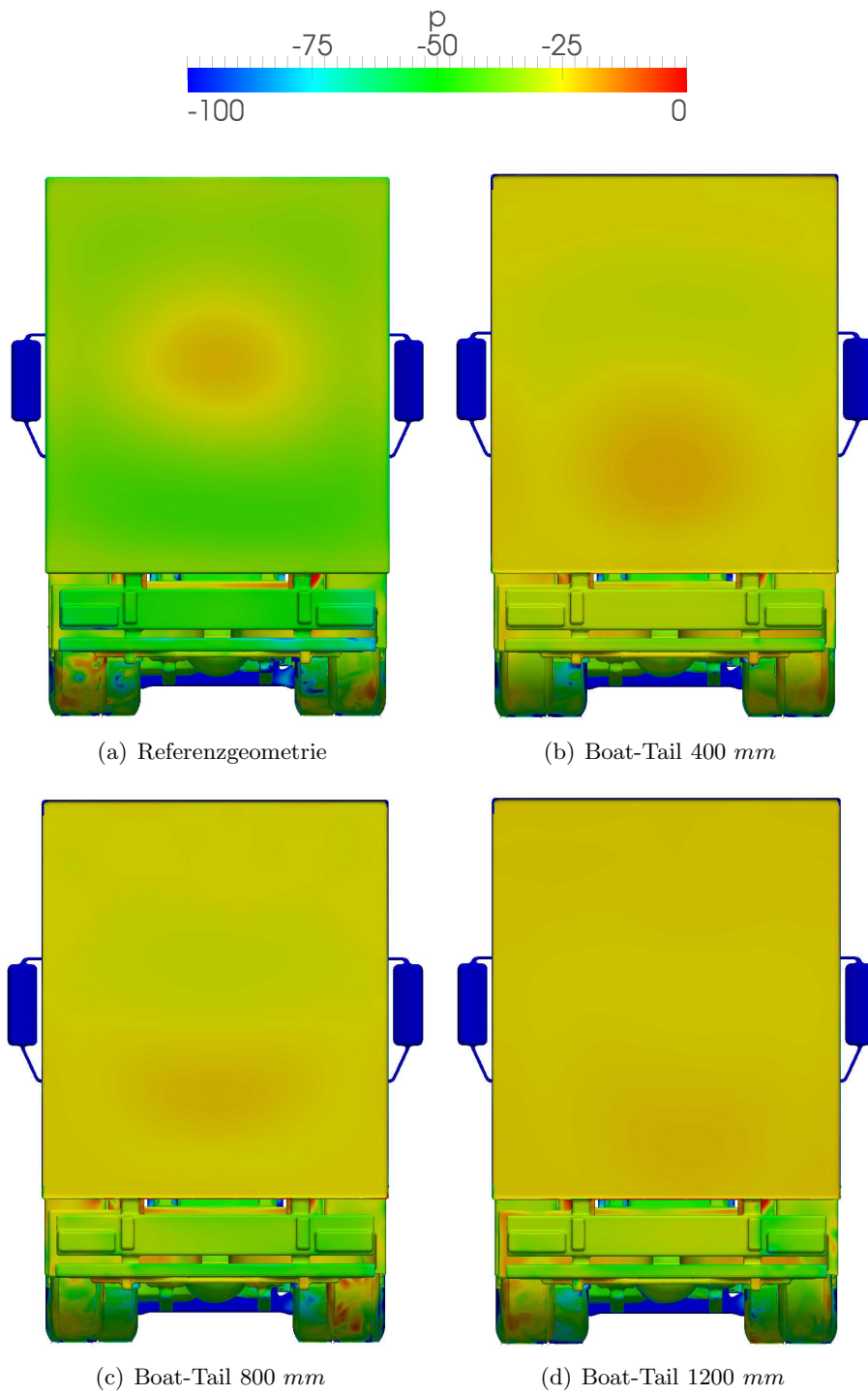


Abbildung 5.14: Druckverteilung auf der Heckfläche. $[p] = m^2/s^2$

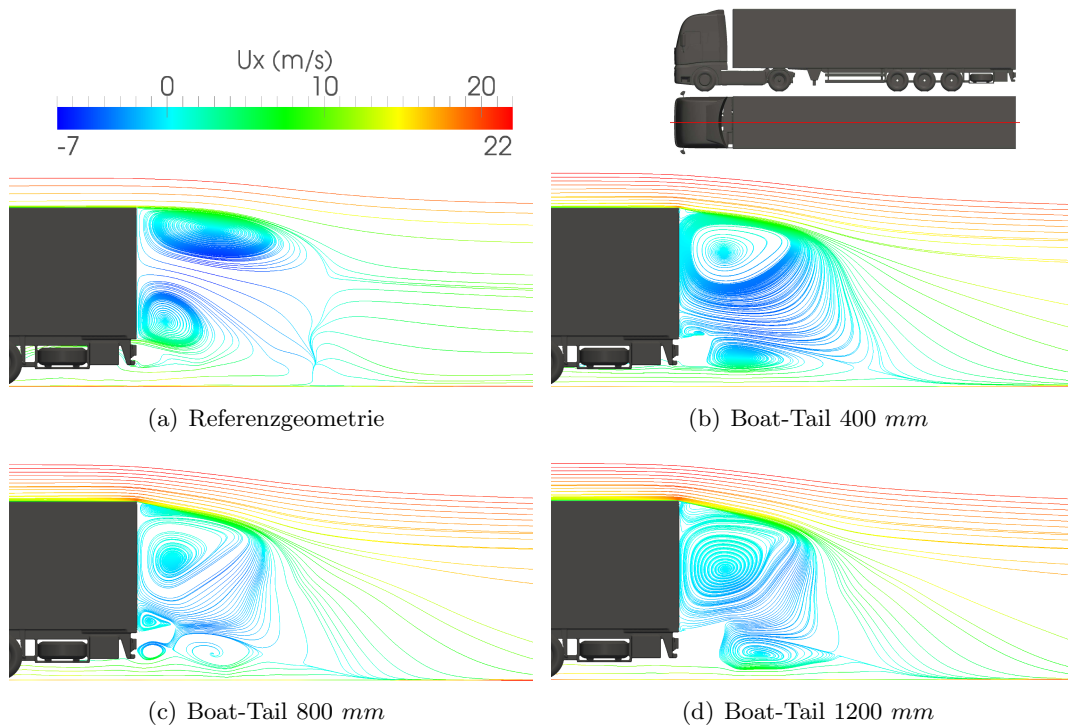


Abbildung 5.15: 2D-Stromlinien in der Symmetrieebene

Auch der Einfluss der Heckklappen unter schräger Anströmung wurde untersucht. Abb. 5.17 veranschaulicht den C_w -Unterschied zwischen der gemessenen Variante und der Referenzgeometrie unter den selben Anströmungsverhältnissen, jeweils für die drei Klappenlänge 400, 800 und 1200mm. Interessanterweise kann festgestellt werden, dass die kürzesten Klappen mit diesem 13° -Anstellwinkel das größte Verbesserungspotential aufweisen, sowohl unter idealer Anströmung als auch mit Seitenwind.

5.2.2 Untersuchungen zum Fahrschutz bei der Verwendung von Heckklappen

Heckklappen stellen ein großes Risiko bei dem Aufprallen eines Autos auf das Heck dar. Aus diesem Grund wurde experimentell untersucht, ob Drei-Klappensysteme den Luftwiderstand ähnlich stark absenken können, wie die bereits vorgestellten Vier-Klappensysteme. Abb. 5.18 zeigt die drei geänderten Varianten, die getestet wurden.

Die erste interessante Erkenntnis ist, dass die kürzesten Klappen (200mm) ein vergleichbares Verbesserungspotential ($\Delta C_w = 0,028$) aufweisen, wie die Vier-Klappensysteme mit einer viel längeren Ausbreitung (800 und 1200mm). Dabei bleibt diese 200mm-Klappenvariante weniger effizient als die Umsetzung vierer 400mm-Klappen.

Der Abbau der unteren Klappen bei den Längen 400mm und 1200mm wirkte sich auf die Aerodynamik negativ aus (+,0035 und +,0013). Diese spielt also eine nicht unerhebliche Rolle für den Druckrückgewinn am Heck.

Bei den zwei Untersuchungen von Drei-Klappensystemen, deren seitliche Klappen bei 0.6m in der Höhe geschnitten wurden (siehe Abb. 5.19), konnte festgestellt werden, dass das



(a) Boat-Tail 400 mm



(b) Boat-Tail 800 mm



(c) Boat-Tail 1200 mm

Abbildung 5.16: Im Windkanal untersuchte Heckklappenkonfigurationen

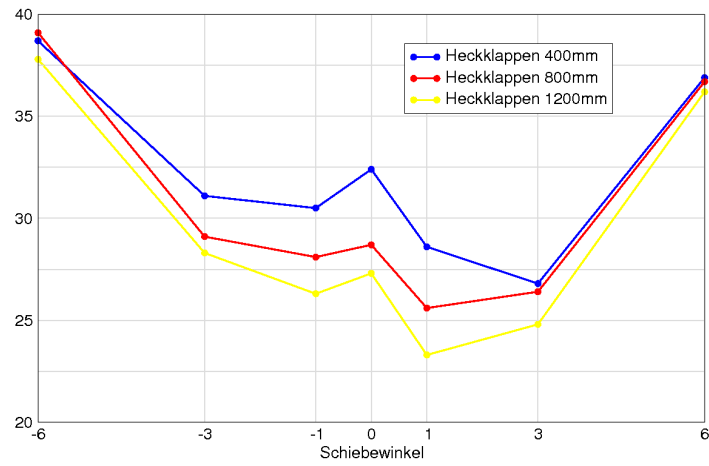


Abbildung 5.17: Effizienz der Heckklappen unter schräger Anströmung, in Punkteneinheit (1 Punkt=0,001). Blau: 400mm-Klappen ; Rot: 800mm, Gelb: 1200mm

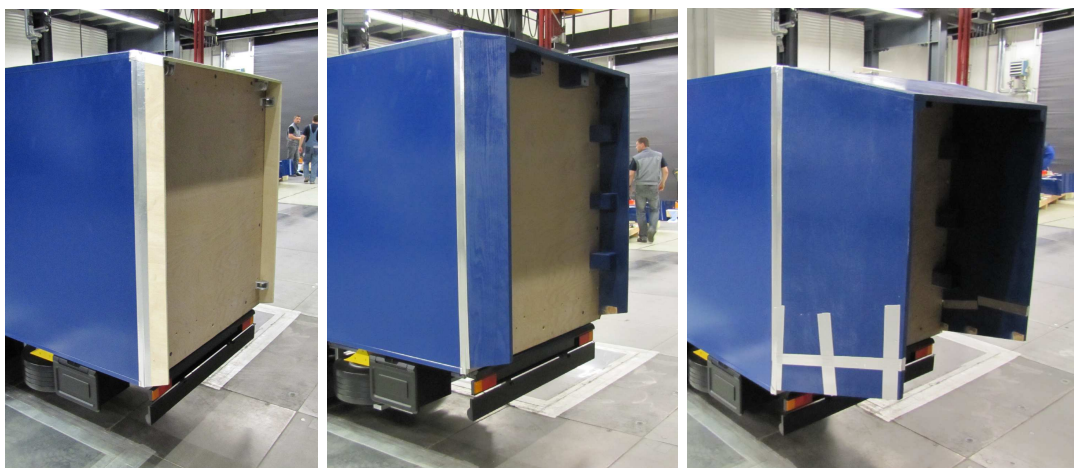


Abbildung 5.18: Obere und seitliche Heckklappen mit Länge 200mm, 400mm und 1200mm

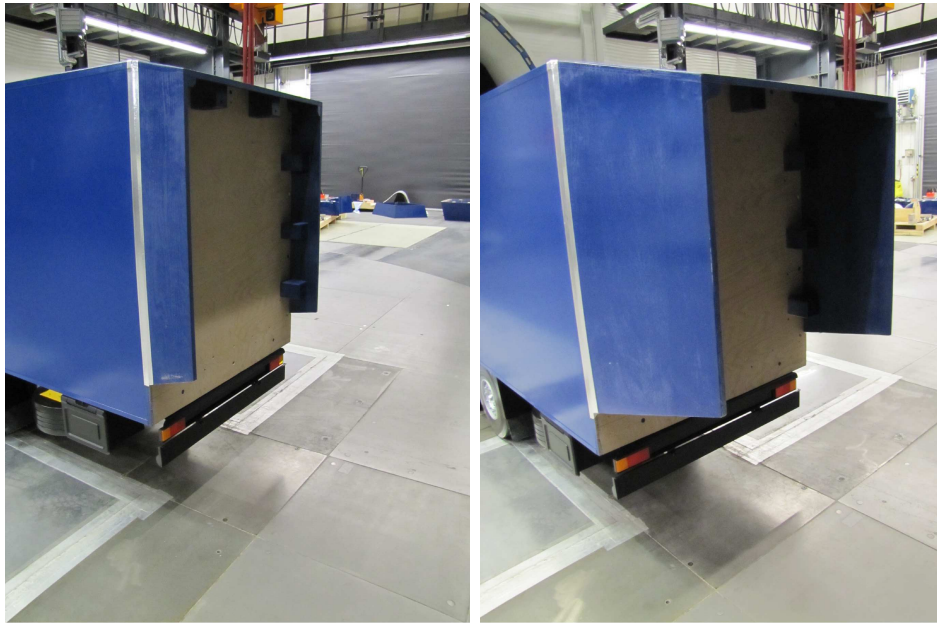


Abbildung 5.19: Obere und seitliche Heckklappen mit Länge 400mm und 1200mm. Bei Höhe 0,6m geschnitten (entspricht effektivem 1,5m Bodenabstand)

Optimierungspotential weiterhin besteht, ohne erhebliche Verluste in der Luftwiderstandseinsparung. Die Unterschiede mit den jeweiligen Drei-Klappensysteme betragen +3,7 und +2,3. Insgesamt brachten diese zwei Konfigurationen folgende Luftwiderstandsreduzierungen mit sich:

	3-Klappen Länge 400mm bei $h = 0,6m$ geschnitten	3-Klappen Länge 1200mm bei $h = 0,6m$ geschnitten
ΔC_{wWiKa}	-0,025	-0,024

5.2.3 Fazit zu den untersuchten Heckmaßnahmen

Bei der Heckgestaltung bringen viele Maßnahmen einen quantitativ erheblichen Vorteil. Die effizienteste Konfiguration kann den Luftwiderstand um bis zu 9,5% reduzieren (numerische Ergebnisse). Bei dieser Konfiguration ist ausschließlich eine Verlängerung nach hinten um 400mm notwendig. Längere Varianten wirken entweder gleich oder weniger effektiv. Auch die Analysen bei schräger Anströmung zeigten, dass die kürzesten getesteten Heckklappen immer am wirksamsten waren (Windkanaluntersuchungen).

In der Höhe geschnittene Heckklappen wurden auch experimentell untersucht. Diese 3-Klappen-Systeme gewährleisteten einen verbesserten Unterfahrschutz und bringen weiterhin bedeutende Potentiale zur Verbesserung der Aerodynamik mit sich. Die effizienteste Konfiguration sinkt den Luftwiderstand um 6,0%. Auch hier wiesen die kürzesten Klappen (400mm) das größte Potential auf.

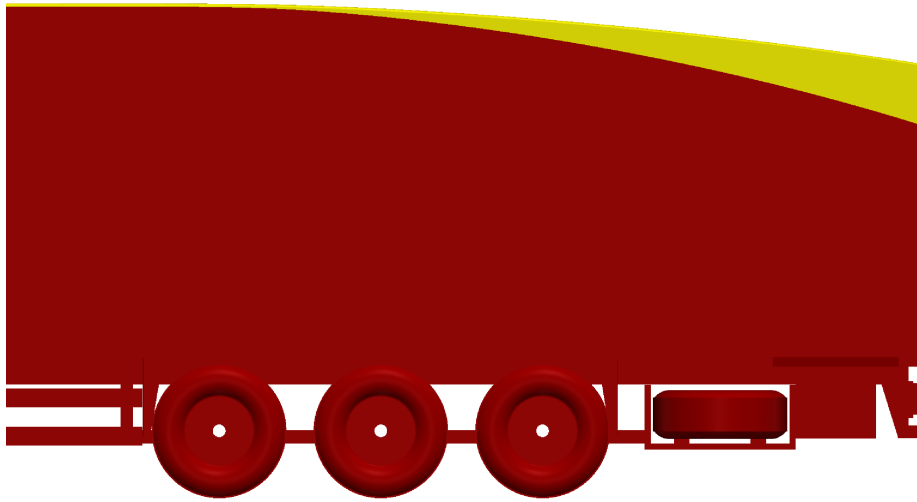


Abbildung 5.20: Geometrie der Dacheinzüge. Gelb: Heckhöhe 3,5m, rot: Heckhöhe 3,0m

5.3 Untersuchungen mit Dacheinzügen

5.3.1 Dacheinzüge mit Heckhöhe 3,5 und 3,0m

Von den Tear-Drops (siehe Abschnitt 2.2) inspiriert, wurden zwei Dachzeinzugsvarianten mithilfe von numerischen Simulationen untersucht. Die Rundung der konzipierten Dacheinzüge startete bei der ersten Aufliegerachse und lief glatt bis zu den Heckhöhen 3,5m und 3,0m (siehe Abb. 5.20).

Die Verbesserung dank dem Dacheinzug mit Heckhöhe 3,5m betrug 0,032. Mit einer stärkeren Rundung, bis zur Heckhöhe 3,0m nahm der Luftwiderstand um 0,015 weiter ab, um eine Verbesserung von 10% zu erreichen.

	Dacheinzug Heckhöhe 3,5m	Dacheinzug Heckhöhe 3,0m
ΔC_{wCFD}	-0,032	-0,047
ΔC_{wCFD} (%)	-6,8	-10,0

Die Strömungstopologie wurde durch die Heckeinzüge so verändert, dass der Nachlauf in beiden Fällen abnahm, da mehr Luft in die Richtung der Heckfläche geführt wurde. Dies wird dank den Isoflächen von $c_{ptot} = 0$ (Abb. 5.21) abgebildet. Die Länge des Nachlaufs reduzierte sich drastisch, verglichen mit der Referenzkonfiguration, und die obere und untere Wirbel verstärkten sich. Damit erhöhte sich der Druck auf der Heckfläche, was wiederum in einen erheblichen Druckrückgewinn umwandeln ließ.

In dem Raum, der durch die Dachrundung frei gelassen wurde, herrschte für die Strömung ein Unterdruck, wonach die seitliche Umströmung des Aufliegers geführt wird. Durch dieses Phänomen, das der Umströmung des sogenannten Ahmed Körpers [1] ähnelte, bildeten sich zwei zusätzliche Wirbel an den Seitenkanten des Aufliegers. Diese werden mithilfe des Q-Kriteriums veranschaulicht (siehe Abb. 5.22). Abb. 5.22 kann mit der selben Darstellung in dem Fall der Referenzgeometrie (Abb. 4.7) verglichen werden.

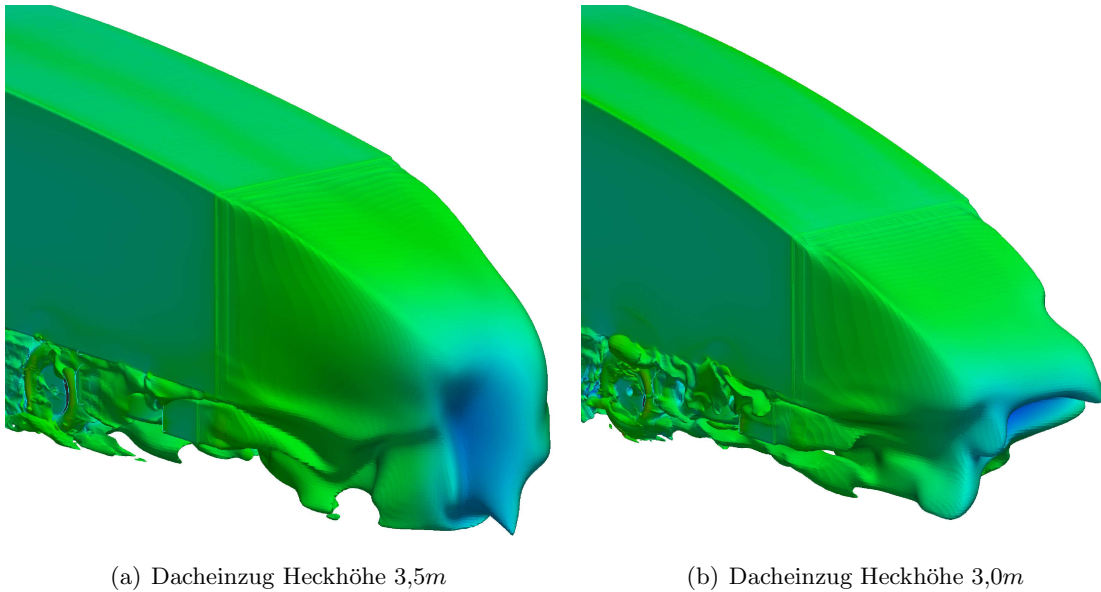


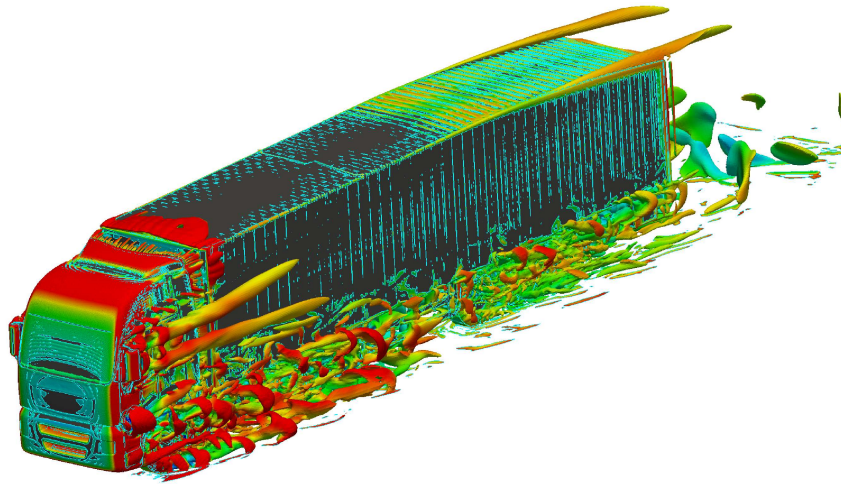
Abbildung 5.21: Isofläche von $c_{ptot} = 0$: Gebiete verloreener Energie

Aufgrund der veränderten Strömungstopologie am Heck und auf dem Aufliegerdach nahm die Grenzschicht an einigen Stellen so zu, dass noch stärkere Ungleichmäßigkeiten im Bereich des Hecks (siehe Abb. 5.23) zustande kamen. Diese könnten verkleinert werden, in dem die Seitenkanten des Aufliegers im Bereich des Dacheinzuges gerundet werden. Dadurch würden sich kleinere Seitenwirbel bilden. Leider würde dies eine noch begrenztere Ladekapazität bedeuten.

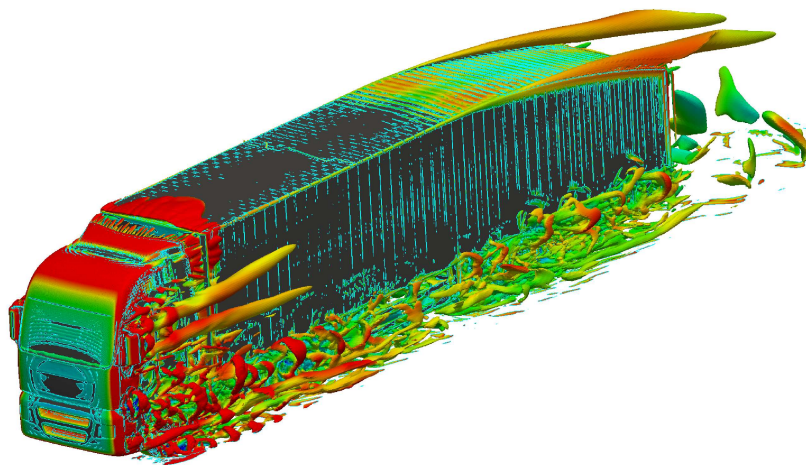
5.3.2 Fazit zu den untersuchten Dacheinzügen

Die zwei untersuchten Dacheinzugsvarianten konnten den Luftwiderstand stark reduzieren. Für die kleine Heckhöhe (3,0m) senkte der Widerstandsbeiwert um 10,0%. Zusätzliche 800mm-lange Heckklappen verbesserten die aerodynamischen Eigenschaften weiter ($\Delta C_w = -12,4\%$).

Leider haben diese Maßnahmen den Nachteil, die Ladekapazität zu senken und die Auf- und Entladefunktionen zu beeinträchtigen. Ein verlängerter Ladekoffer könnte das durch den Dacheinzug verlorene Volumen auszugleichen. Eine grobe Einschätzung der benötigten Verlängerung nach hinten (Δx) wird in Abb. 5.24 veranschaulicht. Der Ausgleich der Volumina V_1 und V_2 hängt von der Heckhöhe ab. In dem extremen Fall einer Heckhöhe von 3,0m ergibt dieser Ansatz eine Verlängerung von $\Delta x \approx 1m$.

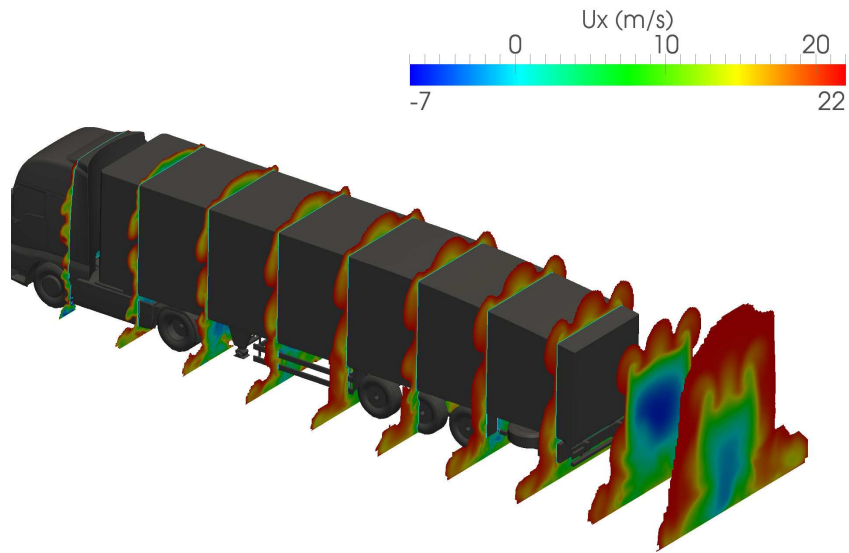


(a) Dacheinzug Heckhöhe 3,5m

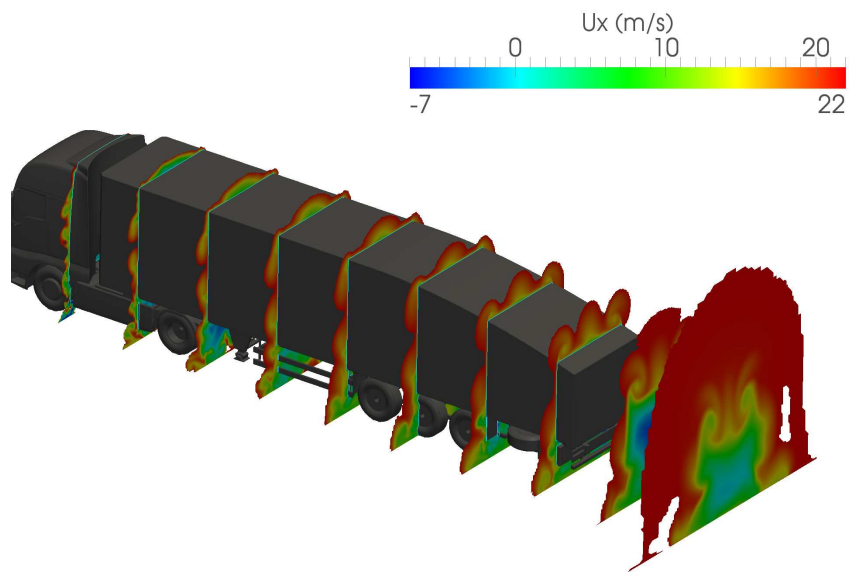


(b) Dacheinzug Heckhöhe 3,0m

Abbildung 5.22: Isofläche des Q-Kriteriums zur Darstellung der Wirbelstärke. $Q = 150 \text{ s}^{-2}$



(a) Dacheinzug Heckhöhe 3,5m



(b) Dacheinzug Heckhöhe 3,0m

Abbildung 5.23: Darstellung der Grenzschichtdicke in verschiedenen YZ-Ebenen

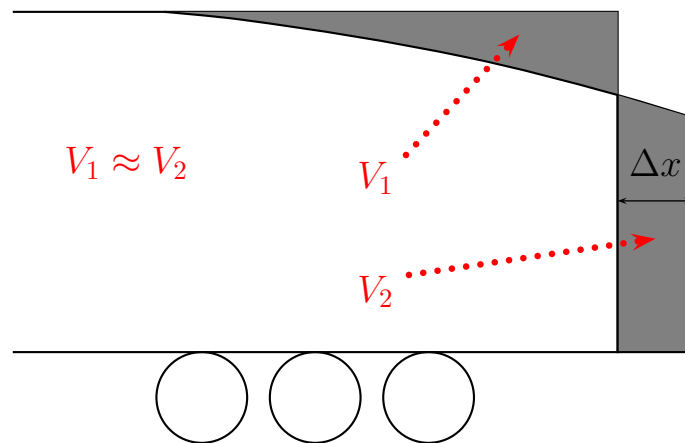


Abbildung 5.24: Volumenausgleich für einen Dacheinzug durch eine Verlängerung nach hinten



Abbildung 5.25: Beispiel einer Kombination Frontverlängerung / Heckklappen

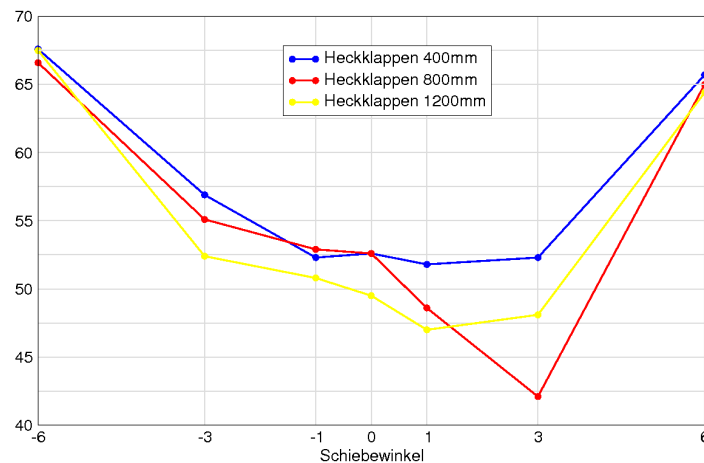


Abbildung 5.26: Effektivität der Heckklappen kombiniert mit der verlängerten Stirnseite, unter schrägen Anströmung. Blau: 400mm-Klappen ; Rot: 800mm, Gelb: 1200mm

5.4 Ergebnisse der kombinierten Front-/Heckuntersuchungen

Zusätzlich zu den Messungen von den einzelnen Optimierungsmaßnahmen wurden auch Kombinationen aus Front- und Heckänderungen untersucht. Diese werden in diesem Abschnitt präsentiert.

5.4.1 Frontverlängerung mit Heckklappen

Die im Abschnitt 5.1.1 vorgestellte Frontänderung (Verlängerung um 500mm) kombiniert mit der Umsetzung von den bereits analysierten Heckklappen mit Längen 400mm, 800mm und 1200mm (siehe Beispiel am Bild 5.25) ergaben im Windkanal die im Bild 5.26 dargestellten C_w -Unterschiede. Dabei wurden die Ergebnisse aus idealen sowie schrägen Anströmungen (Schiebewinkel von -6° bis 6°) eingetragen.

Bei jedem Schiebewinkel stellt die Abbildung den Luftwiderstandsersparnis dar, im Vergleich zum Referenzkörper unter derselben Anströmung.

Unter idealer Anströmung stellte sich die Kombination von dieser Frontmaßnahme mit den 400mm und 800mm-Klappen als effektivste Maßnahme der gesamten Studie. Der C_w -Unterschied betrug über 0,050 (0,053). Dies entsprach einer Luftwiderstandsreduzierung von 12,4%.

$$\Delta C_{w_{WiKa}} = -0,053 \approx -12,4\%$$



Abbildung 5.27: Beispiel einer Kombination Kurzhauber / Heckklappen

In diesem Zusammenhang brachten die längsten Heckklappen 1200mm einen leicht geringeren Vorteil (0,003 weniger).

Bei Seitenwind wiesen die gemessenen Kombinationen Verbesserungspotentiale von 0,042 bis 0,067 auf. Die Wirksamkeit der Maßnahme blieb, wie bereits im Abschnitt 4.4.2 besprochen, unsymmetrisch bezüglich des Schiebewinkels verteilt, was an der Konstruktion des Unterbodens lag.

Auch hier stellten sich die kürzesten Heckklappen als die wirksamsten Methoden heraus, und zwar unter allen getesteten Anströmungen. Dies bestätigt die Erkenntnis aus dem Abschnitt 5.2.1, dass die 400mm-Heckklappen an der Referenzgeometrie angebaut, den Luftwiderstand stärker reduzieren konnten, als die zwei längeren Varianten 800 und 1200mm.

5.4.2 Kurzhauber mit Heckklappen

Die Kombination von der Kurzhaubervariante aus dem Abschnitt 5.1.2 mit den Heckklappen (ein Beispiel ist im Bild 5.27 dargestellt) ergaben folgende Luftwiderstandsreduzierungen:

Kurzhauber, kombiniert mit:	Boat-Tail 400mm	Boat-Tail 800mm	Boat-Tail 1200mm
$\Delta C_{w_{WiKa}}$	-0,036	-0,038	-0,038
$\Delta C_{w_{WiKa}}$ (%)	-8,4	-8,9	-8,9

Bei den Kombinationen wurde nur eine ideale Anströmung (Schiebewinkel 0°) in Betracht gezogen. Die Tendenz wechselte hier, dass die kürzesten Klappen eine bedeutendere Wirksamkeit erwiesen. In der Tat waren die längsten Klappen am effektivsten, wenn sie mit der Kurzhaube an der Front kombiniert werden, während die kürzesten bei allen anderen Fällen das größte Potential aufwiesen, um den Widerstand zu senken.

5.4.3 Dacheinzug mit 800mm-langen Heckklappen

Der im Abschnitt 5.3 vorgestellte Dacheinzug mit Heckhöhe 3,0m wurde noch mit 800mm-langen Heckklappen versehen und numerisch gerechnet. Diese Konfiguration lieferte die besten Ergebnisse, die in CFD erreicht wurde. Die Luftwiderstandsreduzierung betrug 12,4%.

$$\Delta C_{w_{CFD}} = -0,058 \approx -12,4\%$$

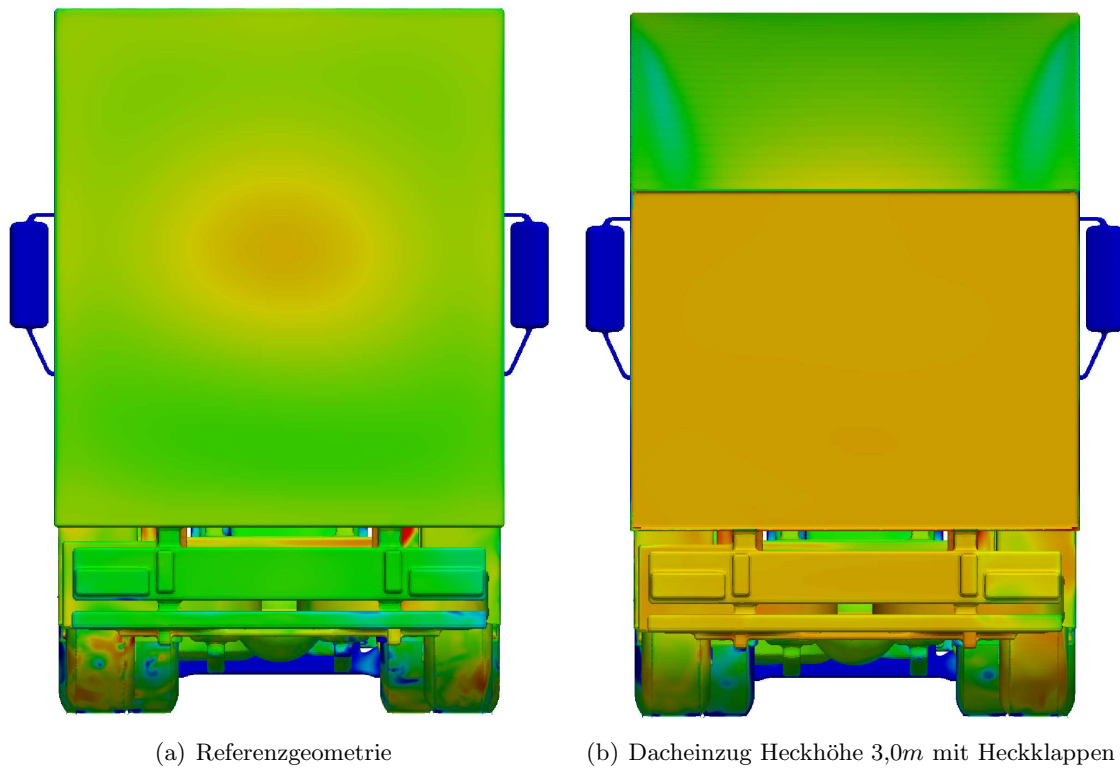


Abbildung 5.28: Druckverteilung am Heck

Bei dieser Variante kommen die selben Mechanismen ins Spiel, wie ohne Heckklappen (Abschnitt 5.3), um den Widerstand zu senken. Zusätzliche Klappen gewährleisten einen höheren Druckrückgewinn durch einen höheren Druck auf der Heckfläche, der beinahe konstant verteilt wird (siehe Abb. 5.28).

6 Fazit und Empfehlungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches

Die numerischen und experimentellen Hauptkenntnisse dieses Arbeitskreises sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst. Angegeben sind auch die Kraftstoffverbrauchsreduzierungen, die mit den untersuchten Maßnahmen erreicht werden könnten. Die Aussagen zur Verbrauchsreduzierung basieren auf den maximalen Potentialen zur Luftwiderstandssenkung (Max. ΔC_w), die den optimalen Widerstandsunterschied bei einer Maßnahme darstellen. Folgende Gleichung zur Einschätzung der Kraftstoffeinsparung ($\Delta DL / 100km$) wurde verwendet:

$$\Delta DL/100km = \Delta C_w/3,5 \quad (6.1)$$

Front: Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass die Verbesserungen der Aerodynamik allein durch eine optimierte Frontgestaltung (Vergrößerung der Frontradien, Kurzhauter, „Soft nose“) ein Potential zur Kraftstoffreduzierung von höchstens 1,3% aufweisen. Dieser Wert stellt eine Verbesserung des Verbrauches gegenüber aktuellen Lkw-Geometrien dar. Insofern diese Maßnahmen jedoch einen erheblichen technischen Aufwand bedeuten und damit teuer in der Umsetzung sind wird hier empfohlen, den Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Heckmaßnahmen zu legen. Dennoch konnte gefunden werden, dass **bereits eine Verlängerung zur Anpassung der Frontradien (66mm) nach vorne eine erhebliche Kraftstoffreduzierung von 1,3% bringen würde.**

Spiegel: Während die Spiegel bei dem Referenz-Lkw eine geringe Rolle für die Aerodynamik spielten, da sie sich in den seitlichen Unterdruckgebieten befinden, wurden sie bei der Umsetzung der Frontmaßnahmen direkt angeströmt und trugen bis zu ca. 10% zum Luftwiderstand bei. **Das Verzichten auf herkömmliche Spiegel und der Einsatz von Kameras anstattdessen könnten also den Kraftstoffverbrauch um zusätzliche 2,9% reduzieren.**

Heck: Bei der Heckgestaltung ermöglichen viele Maßnahmen einen quantitativ erheblichen Vorteil. Die effizienteste Konfiguration kann den Kraftstoffverbrauch um bis zu 2,7% reduzieren. Bei dieser Konfiguration (mit einem Anstellwinkel der Klappen von 13°) ist ausschließlich **eine Verlängerung nach hinten um 400mm notwendig.** Längere Varianten wirken entweder gleich oder weniger effektiv. Eine Optimierungsstudie für den Anstellwinkel könnte neue Erkenntnisse für die Gestaltung solcher Heckklappen liefern, beispielsweise dass eine noch kürzere Länge ermöglicht vergleichbare Verbrauchsreduzierungen.

Kombination Front/Heck: Die Kombination von Front- und Heckvariationen bietet ein sehr hohes Optimierungspotential. Mehr als 3,5% Kraftstoffverbrauch könnte mit der gemeinsamen Umsetzung einer Verlängerung von 500mm vorn und 400mm-langen Heckklappen erreicht werden. Obwohl die einzelnen Potentiale nicht summiert werden dürfen, erweist sich diese Kombination als sehr wirksam.

Dacheinzug: Die Untersuchungen am Aufliegerdach haben auch Erfolg gezeigt, in dem gezielte Dacheinzüge den Luftwiderstand bzw. Kraftstoffverbrauch drastisch reduzieren können. Mithilfe von Heckklappen verbessern sich die aerodynamischen Eigenschaften weiter. Insgesamt könnten ca. 3,9% Kraftstoff gespart werden. Ein verlängerter Ladekoffer könnte zusätzliche Ladekapazität mit sich bringen, um den Verlust durch den Dacheinzug auszugleichen. **Beispielsweise wäre eine Verlängerung des Ladekoffers um ca. 1m nötig, um das verlorene Volumen auszugleichen und den Kraftstoffverbrauch um knapp 4,0% zu senken.**

Daher wird empfohlen, die EU Richtlinien 96/53/EG und 97/27/EG anzupassen, wie folgt:

Richtlinie 96/53/EG: Änderung der Gesamtlänge, inklusiv Laderaumverlängerung

Front + 70mm ; Heck + 1000mm

Richtlinie 97/27/EG: aerodynamische Zubehörteile als weitere Ausnahmen deklarieren

Heck + 400mm

	$\Delta C_{w_{CFD}}$	$\Delta C_{w_{WiKa}}$	Max. ΔC_w	$\Delta DL / 100km$
Frontgestaltung				
Frontverlängerung 500 mm	-2,8%	-4,0%	-4,5%	-1,3%
Kurzhaube 500 mm	-1,5%	-0,7%	-2,0%	-0,6%
„Soft Nose“ 500 mm	-1,7%	-	-2,5%	-0,7%
Heckgestaltung				
Boat-Tail 400 mm (4 Kl.)	-9,4%	-7,7%	-9,5%	-2,7%
Boat-Tail 800 mm (4 Kl.)	-7,7%	-6,8%	-8,0%	-2,3%
Boat-Tail 1200 mm (4 Kl.)	-8,3%	-6,5%	-8,5%	-2,4%
Boat-Tail 200 mm (3 Kl.)	-	-6,7%	-7,0%	-2,0%
Boat-Tail 400 mm (3 Kl.)	-	-6,9%	-7,5%	-2,1%
Boat-Tail 1200 mm (3 Kl.)	-	-6,2%	-6,5%	-1,9%
Boat-Tail 400 mm (3 kurze Kl.)	-	-6,0%	-6,5%	-1,9%
Boat-Tail 1200 mm (3 kurze Kl.)	-	-5,6%	-6,0%	-1,7%
Kombinierte Front-/Heckgestaltung				
Frontverlängerung 500 mm mit 4 Kl. 400 mm	-	-12,4%	-12,5%	-3,6%
Frontverlängerung 500 mm mit 4 Kl. 800 mm	-	-12,4%	-12,5%	-3,6%
Frontverlängerung 500 mm mit 4 Kl. 1200 mm	-	-11,7%	-12,0%	-3,4%
Kurzhauber 500 mm mit 4 Kl. 400 mm	-	-8,4%	-9,0%	-2,6%
Kurzhauber 500 mm mit 4 Kl. 800 mm	-	-8,9%	-9,0%	-2,6%
Kurzhauber 500 mm mit 4 Kl. 1200 mm	-	-8,9%	-9,0%	-2,6%
Dacheinzüge				
Dacheinzug Heckhöhe: 3,5 m	-6,8%	-	-7,0%	-2,0%
Dacheinzug Heckhöhe: 3,0 m	-10,0%	-	-10,5%	-3,0%
Dacheinzug Heckhöhe: 3,0 m mit 4 Kl. 800 mm	-12,4%	-	-13,5%	-3,9%

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der experimentellen und numerischen Hauptergebnisse

Literaturverzeichnis

- [1] S.R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE-Paper 840300*, 1984. 51
- [2] J.E. Bardina, P.G. Huang, and T.J. Coakley. Turbulence modeling validation. *AIAA Journal*, 2121, 1997. 23
- [3] R.J. Englar. *Advanced Aerodynamic Devices to Improve the Performance, Economics, Handling and Safety of Heavy Vehicles*, 2001. 9
- [4] T. Frank. Parameterstudie an einem Fahrerhaus. Technical report, Daimler AG, 2001. 3
- [5] W.H. Hucho. *Aerodynamik der stumpfen Körper*. Vieweg+Teubner, 2002. 3
- [6] W.H. Hucho. *Aerodynamik des Automobils*. Vieweg+Teubner, 5 edition, 2005. 4, 7
- [7] J. Jeong and F. Hussain. On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.*, 285:69–94, 1995. 27
- [8] F.R. Menter. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Journal*, 2906, 1993. 23
- [9] F.R. Menter. Eddy viscosity transport equations and their relation to the $k-\epsilon$ model. Technical report, Ames Research Center, Moffett Field, California, 1994. 23
- [10] F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Nagano Hanjalic and Tummers, editors, *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*. Begell House, 2003. 23
- [11] H. Nakaguchi. Recent japanese research on three-dimensional bluff body flow relevant to road-vehicle aerodynamics. Technical report, 1978. 6
- [12] Studie Scania. Upfront advantages. *Commercial Motor*, 2009. <http://www.roadtransport.com>. 4
- [13] M.J.L. van Tooren. *Platform for Aerodynamic Road Transport*. PART 20, 2010. <http://www.part20.eu>. 4, 5, 6, 9

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2006)

Nr.	Titel	Preis / €
199	Anwendungspotentiale und Prozeßgrenzen der Klebtechnik für die Umformung von Doppel-lagenblechen, 2006	76,-
200	Thermisches Fügen für die stahlintensive Hybridbauweise im Fahrzeugleichtbau, 2006	76,-
201	Lufthygienische Beurteilung von Pkw-Innenraumfiltern, 2006	96,-
202	Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge, 2006	40,-
203	Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer, 2006	50,-
204	Innovative Nfz-Konzepte - Gesamtwirtschaftliche Effekte durch Einführung schwerer und langer Lkw, 2006	45,-
205	Technische Kompatibilität von innovativen Nutzfahrzeugkonzepten auf den kombinierten Verkehr Straße/Schiene sowie den Containerverkehr, 2006	50,-
206	Größenaufgelöste physikalische und chemische Bestimmung von elementarem und Organischem Kohlenstoff in Nanopartikeln, 2006	55,-
207	Erstellung einer VHDL-AMS-Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen, 2006	50,-
208	Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, 2006	50,-
209	Innovative Nfz-Konzepte - Akzeptanzuntersuchungen zur Einführung und zum Einsatz Innovativer Nutzfahrzeuge, 2007	40,-
210	Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit, 2007	50,-
211	FAT-Richtlinie Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashesimulation, 2007	40,-
212	Innovative Nfz-Konzepte - Wirtschaftlichkeitsanalyse EuroCombi, 2007	35,-
213	Störfestigkeit von Fahrzeugelektronik bezüglich ESD und Impulseinkopplung, 2007	40,-
214	Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahlschweißverbindungen aus Stahlfeinblechen des Karosseriebaus, 2007	40,-
215	Örtlich ertragbare Beanspruchungen bei Spannungskonzentrationen in Karosseriebauteilen aus hoch- und höherfesten Stählen, 2008	35,-
216	Auswirkung der Berücksichtigung lokaler Größen des E-Moduls im Hinblick auf die verbesserte Auslegung umgeformter Karosserieblechstrukturen aus Stahl, 2008	35,-
217	Aktueller Stand und Trends in der CFK-Berechnung im Fahrzeugbau, 2008	49,-
218	In-vitro-Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von an Dieselpartikel gebundenen polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Nitropyrenen, 2008	35,-
219	Bewertender Vergleich der aktuellen Empfehlungen zu den Luftqualitätsgrenzwerten NO ₂ + Evidenz-basierter Vergleich der epidemiologischen Studien 2002-2006 zu Gesundheitseffekten durch NO ₂ , 2008	40,-
220	Fahrdynamische Analyse innovativer Nfz-Konzepte (EuroCombi), 2008	49,-
221	Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens, 2009	40,-

222	Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw, 2009	35,-
223	Entwicklung einer Prüfspezifikation zur Charakterisierung von Luftfedern, 2009	35,-
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	35,-
225	CO ₂ -Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs - Abschätzung staubedingter CO ₂ -Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs, 2009	35,-
226	Modellbasierte Systementwicklung, 2009	50,-
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünobleche aus Stahl, 2010	40,-
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010	35,-
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010	40,-
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010	40,-
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011	kostenloser Download
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011	kostenloser Download
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011	kostenloser Download
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011	kostenloser Download
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011	kostenloser Download
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011	kostenloser Download
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011	kostenloser Download

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2011

VDA | Verband der
Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de