

# Autonomer Güterverkehr auf der Straße

Konzeption eines autonomen  
Lastkraftwagens für den  
Güterverkehr

Dokumentation

# Bachelorarbeit

von Benjamin Plehn  
Matr. Nr. 3000757

Kontakt:  
Breitscheidstraße 48  
39114 Magdeburg  
benni.plehn@gmail.com

Zeitraum:  
Wintersemester 2023/24  
01.11.2023 - 03.02.2024

Studiengang: Industrial Design  
Fachbereich IWID  
Ingenieurwissenschaften  
und Industriedesign  
Hochschule Magdeburg-Stendal

Erstprüfer:  
Prof. Jan Bäse  
Institut für Industrial Design  
Hochschule Magdeburg-Stendal



Zweitprüfer:  
Robert Hahn  
Deutsches Luft und  
Raumfahrtzentrum





# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, 03.02.24

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B Plehn', written in a cursive style.

---

(Benjamin Plehn)

# Anmerkung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit, wird im Text dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass jedoch immer alle Geschlechteridentitäten angesprochen werden.

# Vorwort

In meinem Bachelorstudium habe ich mich für das technische Industriedesign begeistern können, wobei die Themenwahl zudem Aspekte aus dem Automobil-Design beinhaltet. Das Projekt ermöglichte einen informativen Einblick in neue Designaspekte und Methoden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Familie, Freunden und Kommilitonen bedanken für die Unterstützung und Inspiration. Ein besonderer Dank geht an Prof. Jan Bäse und Robert Hahn, die mich tatkräftig in dem Projekt als Betreuer unterstützt haben. Zudem möchte ich Dr. Florian Bühs danken für den informativen Austausch mit Siemens Mobility.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Motivation</b>	7	<b>Antriebsstrang Analyse</b>	21	Luftstromklappen	62
<b>Zielsetzung</b>	8	Treibstoffart	21	Flächenanalyse	63
<b>Recherche</b>	9	Fazit	26	<b>Sensoren</b>	66
<b>Logistik</b>	9	<b>CAD Vorlagen</b>	27	GPS	66
Güterverkehr auf der Straße	9	Zugmaschine Chassis	27	Kameras	66
Zukünftige Entwicklungen	9	Anhänger	28	Ultraschall	68
<b>Lastkraftwagen</b>	10	Motor	29	Radar	70
Fahrerproblematik	10	Batterie	30	LIDAR	72
Autonome Fahrzeuge	11	<b>Lademöglichkeiten</b>	32	<b>Beleuchtung</b>	74
Marktanalyse	15	Ladestation	32	<b>Mensch-Maschine Interaktion</b>	78
<b>Lastenheft</b>	17	Dynamisches Laden	33	Ladestation	78
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	17	<b>Steuerungselektronik</b>	35	Wartung & Reparatur	80
<b>Technischer Aufbau</b>	18	<b>Frontverkleidung</b>	36	<b>Details</b>	82
<b>Package-Layout</b>	18	<b>Verkehrsteilnehmer-Sicherheit</b>	36	<b>Farbkonzept</b>	83
Layout 1	18	Volvo Verkehrs-		<b>Anhänger</b>	84
Layout 2	19	Sicherheitsanalyse	36	<b>Visualisierung</b>	85
Layout 3	20	Straßenbahnnorm	40	<b>Zusammenfassung</b>	89
		Vollverkleidung	45	Fazit	89
		<b>CAD</b>	47	Ausblick	90
		StVZO	47	Innovative Materialien	90
		Aufbau	47	<b>Appendix</b>	94
		Erster Entwurf	48		
		Zweiter Entwurf	49		
		CFD-Analyse 1. & 2. Entwurf	50		
		CFD-Analyse 2. Entwurf	53		

# Motivation

Die Künstliche Intelligenz hat sich in zahlreichen Gesellschaftsbereichen etabliert und ist aus unserem Alltag nicht mehr fortzudenken. Im Bereich der Automobilindustrie werden bereits erste Pilotprojekte zum autonomen Fahren von diversen Unternehmen durchgeführt. Die Vorteile von autonomen Fahrzeugen sind nicht nur im Personenverkehr, sondern auch zunehmend im Güterverkehr von Bedeutung.

In unserer globalisierten Welt bildet der stetig wachsende Güterverkehr in Europa, der vorrangig auf der Straße per LKW, aber auch per Zug und Flugzeug abgewickelt wird, eine der tragenden Säulen des Transportwesens und der Wirtschaft. Allerdings sieht sich der Bereich des Straßengüterverkehrs mit einem Mangel an Fahrern konfrontiert, was auf die mangelnde Attraktivität des Berufs des Fernfahrers und den daraus resultierenden Mangel an Nachwuchskräften zurückzuführen ist.

Autonome Fahrzeuge bieten neben theoretisch ununterbrochenen Fahrzeugauslastungen, einer deutlichen Reduzierung der Betriebskosten und Co2-Emissionen viele Vorteile in der kompetitiven Branche des Güterverkehrs. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wird im weiteren Verlauf ein Konzept für einen autonomen Lastkraftwagen entwickelt, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf die Optimierung von Sicherheitsaspekten und der Frontverkleidung gelegt wird.

# Zielsetzung

Die fortschreitende Integration von Künstlicher Intelligenz in autonome Fahrzeuge unterstreicht die Notwendigkeit von Fahrzeugen, die von Anfang an für den autonomen Betrieb konzipiert sind. Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Das Institut für Fahrzeugkonzepte (FK) des DLR genießt internationale Anerkennung für die Gestaltung zukünftiger Straßen- und Schienenfahrzeuge. Diese Fahrzeuge ermöglichen eine umweltfreundliche Mobilität, die gleichzeitig kosteneffizient und benutzerfreundlich ist.<sup>1</sup>

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines in sich schlüssigen Designs für ein Fahrzeugkonzept im Bereich des Schwerlast-Güterverkehrs, das speziell auf den autonomen Betrieb ohne Fahrer ausgerichtet ist.

# Logistik

## Güterverkehr auf der Straße

Im Jahr 2022 belief sich der Gütertransport mit inländischen LKW laut dem Statistischen Bundesamt auf 3,1 Milliarden Tonnen <sup>2</sup>. Im Logistiksektor stellen Lastkraftwagen in Deutschland das am häufigsten genutzte Landverkehrsmittel dar. Der Anteil von LKW an der gesamten im Güterverkehr erbrachten Transportleistung lag im Jahr 2022 bei rund 72,1 Prozent <sup>3</sup>.

In den USA, der größten Volkswirtschaft, werden ebenfalls 70 Prozent des gesamten Güterverkehrs durch LKW transportiert. Die Bedeutung einer reibungslosen Logistik wird dadurch deutlich, dass bei einem Wegfall der LKW die Vorräte und Reserven der wichtigsten Geschäfte für die Grundversorgung, wie zum Beispiel Supermärkte und Tankstellen, laut Experten innerhalb von wenigen Tagen zur Neige gehen würden <sup>4</sup>.

Die Einsatzmöglichkeiten von autonomen LKW lassen sich in Fahrten auf abgeschlossenen Betriebshöfen, Hub-to-Hub-Verkehr, bei dem hauptsächlich auf der Autobahn von einem Logistikzentrum zum nächsten gefahren wird, und die Last-Mile-Logistik zum Endkunden kategorisieren, insbesondere auf Landstraßen und innerorts, wo die Situationen mit den meisten Herausforderungen auftreten <sup>5</sup>.

## Zukünftige Entwicklungen

Der Güterverkehr stellt eine wichtige Voraussetzung für unsere Wirtschaft dar. Mit der fortschreitenden Globalisierung verlängern sich die Transportwege und das Verkehrsaufkommen nimmt zu <sup>2</sup>.

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass die Transportleistung im Straßengüterverkehr im Jahr 2000 noch bei etwa 346 Milliarden Tonnenkilometern lag, während sie im Jahr 2021 fast 506 Milliarden Tonnenkilometer betrug <sup>3</sup>.

Dies deutet auf einen signifikanten Zuwachs in der Zukunft hin, was die Bedeutung von Lastkraftwagen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, erhöht, um die EU-Ziele zur CO<sub>2</sub>-neutralen Gestaltung des Gütertransports zu erfüllen.

# Lastkraftwagen

## Fahrerproblematik

Die Spitzenverbände der deutschen Bus- und Güterkraftverkehrsbranchen äußern ernsthafte Bedenken hinsichtlich eines gravierenden Mangels an Fahrpersonal und fordern umgehende Gegenmaßnahmen<sup>6</sup>.

Aktuell fehlen laut dem Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) sowie dem Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer (BDO) schätzungsweise 60.000 bis 80.000 Berufskraftfahrer<sup>6</sup>.

Die Ursache hierfür liegt in der Tatsache, dass jährlich etwa 30.000 LKW-Fahrer altersbedingt ausscheiden und nur durch etwa 15.000 neue Fahrer ersetzt werden. Dies führt dazu, dass sich der Fahrermangel jährlich um etwa 15.000 fehlende LKW-Fahrer verschärft<sup>7</sup>.

Der wirtschaftliche Schaden ist enorm. 32 identifizierte Auswirkungen des Fahrermangels führten im Jahr 2022 zu einer Kostensteigerung von schätzungsweise 3 % im Logistiksektor. Dies resultierte allein im vergangenen Jahr in einer zusätzlichen Belastung für die deutsche Wirtschaft von rund 10 Milliarden Euro<sup>8</sup>.

In der gesamten Europäischen Union fehlten im Jahr 2021 laut der Financial Times 400.000 Schwerlastfahrer<sup>9</sup>.

In den USA zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, mit 61.000 fehlenden Fahrern im Jahr 2019 und einer prognostizierten Zahl von 160.000 im Jahr 2028, laut der American Trucking Association, die die mangelnde Attraktivität des Berufs hervorhebt<sup>10</sup>.

Erste Lösungsansätze mit autonomen Fahrzeugen sehen vor, menschliche Fahrer für lokale, kürzere Fahrten und das Be- und Entladen beizubehalten, während autonome Fahrzeuge Langstrecken auf dem Highway übernehmen, wo weniger unvorhersehbare Verkehrsteilnehmer und Situationen auftreten<sup>11</sup>.



# Autonome Fahrzeuge

## SAE-Level 1-5

**SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™**  
 Learn more here: [sae.org/standards/content/j3016\\_202104](http://sae.org/standards/content/j3016_202104)

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0*	SAE LEVEL 1*	SAE LEVEL 2**	SAE LEVEL 3**	SAE LEVEL 4**	SAE LEVEL 5**
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatic emergency braking</li> <li>• blind spot warning</li> <li>• lane departure warning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering OR</li> <li>• adaptive cruise control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering AND</li> <li>• adaptive cruise control at the same time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traffic jam chauffeur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• local driverless taxi</li> <li>• pedals/steering wheel may or may not be installed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions</li> </ul>

Copyright © 2021 SAE International.

Abbildung 1: SAE Levels of Driving Automation<sup>2</sup>

Die Society of Automotive Engineers (SAE) International definiert die Stufen des autonomen Fahrens von Level 0 bis Level 5, wobei sich der Einfluss der Künstlichen Intelligenz mit jeder Stufe erhöht.

Auf Stufe 0 gibt es einfache Warnungen und kurzzeitige Assistenzsysteme, wie zum Beispiel automatische Notfallsbremsungen oder Warnungen im Seitenspiegel für Verkehrsteilnehmer im toten Winkel.

Level 2 und 3 beinhalten aktive Lenk- und Bremsaktionen für die Spurhalteassistenten und Geschwindigkeitsregelung. Bei Level 3 ist es dem Fahrer erlaubt, in bestimmten Situationen das Fahrzeug nicht führen zu müssen, allerdings muss das Lenkrad wieder übernommen werden, wenn das Fahrzeug dies anfordert.

Fahrzeuge auf Level 4 können ohne Fahrer im Fahrersitz operieren, vorausgesetzt die Umgebung erfüllt die notwendigen Bedingungen.

Dies unterscheidet sie von Fahrzeugen auf Level 5, die unter allen Bedingungen und überall autonom fahren können<sup>13</sup>.

In Deutschland trat am 1. Juni 2022 die Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebsverordnung, kurz AFGBV, in Kraft. Diese erlaubt den Betrieb von Kraftfahrzeugen mit SAE-Level 4<sup>14</sup>.

Das LKW-Konzept ist ausgelegt auf SAE Level 4 und 5, wodurch eine Fahrerkabine überflüssig wird.

# Autonome Fahrzeuge

## Fahrzeugauslastung

In den Vereinigten Staaten darf ein Fernfahrer laut der Federal Motor Carrier Safety Administration maximal 11 Stunden fahren und insgesamt 14 Stunden am Stück arbeiten, nachdem die Arbeit begonnen hat. Danach muss eine Ruhepause von mindestens 10 Stunden eingelegt werden. In Europa ist eine maximale Fahrzeit von 9 Stunden pro Tag und maximal 90 Stunden innerhalb von 2 Wochen erlaubt<sup>9</sup>.

Ein bedeutender Vorteil von autonomen Fahrzeugen ist der theoretisch kontinuierliche Betrieb rund um die Uhr. In der Zukunft werden menschliche Eingriffe lediglich für Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie für das Be- und Entladen der Fracht benötigt<sup>9</sup>. Das Aufladen oder Tanken, sowie die Fahrt wird voraussichtlich durch künstliche Intelligenz übernommen.

Ein Fallbeispiel ist das Startup TuSimple, das in Zusammenarbeit mit dem United States Postal Service demonstriert hat, dass selbstfahrende LKW wiederholt früher als im Zeitplan vorgesehen an ihren Zielen angekommen sind, was auf weniger menschliche Eingriffe und Verzögerungen zurückzuführen ist<sup>4</sup>.

# Autonome Fahrzeuge

## Reduzierung der CO2-Emissionen

In Zeiten des Klimawandels spielen die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs eine entscheidende Rolle. Der Güterverkehr auf der Straße ist global für 53 % der Emissionen des gesamten Logistiksektors verantwortlich. Sollten die aktuellen Trends anhalten, könnte dieser Anteil bis 2050 auf 56 % ansteigen<sup>15</sup>.

In ganz Europa trägt die Straßenfracht zu 15 % aller CO2-Emissionen bei, wobei 70 % dieser Emissionen durch mittlere und schwere LKW verursacht werden<sup>16</sup>.

Um das Klimaziel von 1,5°C zu erreichen, sind allein bis 2030 120.000 emissionsfreie LKW auf den Straßen erforderlich<sup>16</sup>.

Ein Logistik-Konzept ohne CO2-Emissionen scheint unter den Umständen mehr als nötig zu sein.

## Reduzierung der Betriebskosten

Neben der Reduzierung von CO2-Emissionen können durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge die Betriebskosten und die sogenannten Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) von Langstrecken-LKWs um mehr als 30% gesenkt werden. Die Einsparungen der Betriebskosten resultieren aus der Reduzierung von Fahrergehältern und geringere Kraftstoffkosten durch eine effizientere Fahrweise<sup>9</sup>.

# Autonome Fahrzeuge

## Fazit

Erste Pilotprojekte, wie zum Beispiel von MAN, haben nach 35.000 Testkilometern gezeigt, dass der Gütertransport mit digital vernetzten autonomen LKW auf deutschen Straßen sicher und zuverlässig durchgeführt werden kann und problemlos in die täglichen Abläufe integriert werden kann <sup>17</sup>.

Autonome LKW der SAE Level 4 sind besonders gut für Autobahnen geeignet, da die Umgebung weniger spontane Situationen und unvorhersehbare Hindernisse aufweist, wie beispielsweise Fahrradfahrer, Fußgänger und Kinder, die die KI belasten könnten <sup>9</sup>.

Angesichts der wachsenden Nachfrage durch den Onlinehandel und des Fahrermangels lässt sich spekulieren, dass intelligente LKW als erste autonome Fahrzeuge in großem Maßstab auf öffentlichen Straßen eingesetzt werden könnten <sup>4</sup>.

Es ist unwahrscheinlich, dass menschliche LKW-Fahrer in naher Zukunft vollständig durch KI ersetzt werden.

Allerdings könnten lang andauernde Autobahnfahrten, die nicht mehr von Menschen bedient werden müssen, sondern nur noch sogenannte Last-Mile-Fahrten vom Transport-Hub zum Empfänger, es den Fahrern ermöglichen, mehr Freizeit zu Hause zu verbringen, was wiederum die Attraktivität des Berufs verbessern könnte <sup>9</sup>.

Zukunftsfähige Konzepte für autonome emissionsfreie LKW überzeugen durch ihre Vorteile für Mensch und Umwelt und sind angesichts des wachsenden Marktes für autonome Fahrzeuge von großer Bedeutung.

Dieser Markt belief sich im Jahr 2021 auf 24 Milliarden Dollar und wird voraussichtlich bis zum Jahr 2026 auf 62 Milliarden Dollar ansteigen <sup>18</sup>.

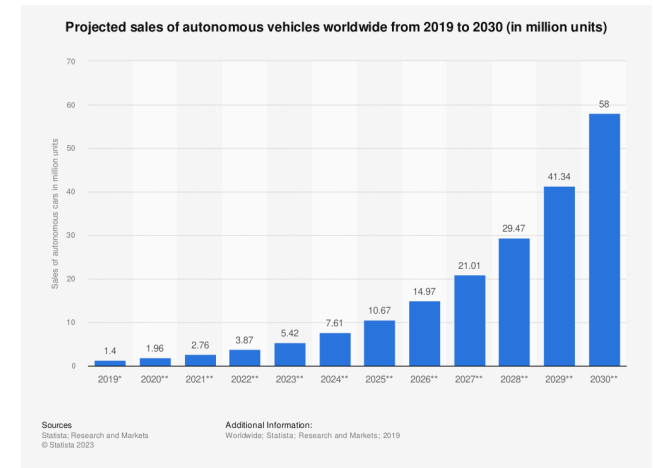


Abbildung 2: Statista erwartete Verkaufszahlen autonomer Fahrzeuge bis 2030<sup>9</sup>

Eine Studie von Statista schätzt, dass der Verkauf von Fahrzeugen mit mindestens SAE Level 3 von 1,4 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2019 auf 58 Millionen im Jahr 2030 ansteigen wird.

# Marktanalyse

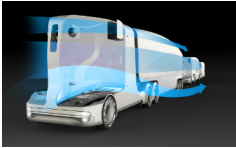


Abbildung 3: Truck Konzept von Zoltan Major<sup>TM</sup>



Abbildung 4: Volvo Truck von Joseph Chataigner<sup>TM</sup>



Abbildung 10: Hyundai Trailer Drone<sup>TM</sup>



Abbildung 6: Volvo BLÅTAND Konzept von Jason Høi<sup>TM</sup>



Abbildung 17: Einride Truck<sup>TM</sup>



Abbildung 11: GM Surus Autonomous Truck<sup>TM</sup>



Abbildung 9: Hyundai Trailer Drone<sup>TM</sup>



Abbildung 5: Mercedes Benz Euro-X Konzept von Muyeon Cho<sup>TM</sup>



Abbildung 7: U-Shift von dem DLR<sup>TM</sup>



Abbildung 13: Autonomous Truck Konzept von Jakub Kowalczyk<sup>TM</sup>



Abbildung 12: Autonomous Truck Konzept von Art Lebedev<sup>TM</sup>



Abbildung 18: Volvo Vera<sup>TM</sup>



Abbildung 16: Quantum Levitate von Michael Bedel<sup>TM</sup>



Abbildung 14: Mobility-Design von Prof. Dipl.-Des. Manfred Wagner<sup>TM</sup>

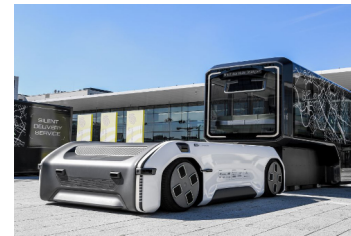


Abbildung 8: U-Shift von dem DLR<sup>TM</sup>



Abbildung 15: Autonomous Truck Concept von Che Broadnax<sup>TM</sup>

# Marktanalyse

Auf dem Moodboard sind verschiedene Konzepte für autonome LKW dargestellt, darunter auch einige Prototypen wie der Volvo Vera, der U-Shift vom DLR, die Hyundai Trailer Drone und der LKW von Einride. Besonders interessant sind die unterschiedlichen Designs der Zugmaschinen und die Nutzung des zusätzlichen Raums, der durch den Wegfall der Fahrerkabine entsteht.

# Lastenheft

## Rechtliche Vorgaben

Die Anforderungen an das Konzept wurden aus dem Kick-Off-Vortrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt abgeleitet. Das Konzept soll einen Schwerlasttransport der Fahrzeugklasse N3 behandeln, der aus einer Sattelzug-Kombination mit einem Gewicht von 40 Tonnen besteht<sup>5</sup>.

Das Fahrzeug sollte in der Lage sein, Tagesstrecken von 800 km zu bewältigen<sup>5</sup>.

Bei der Art des Antriebsstrangs stehen zwei Optionen zur Verfügung: das Batterieelektrische Prinzip, kurz BEV (Battery Electric Vehicle), oder ein brennstoffzellenelektrisches Konzept mit einem 350 oder 700 Bar Drucktanksystem, kurz FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)<sup>5</sup>.

Die Analyse und Bewertung der verschiedenen Antriebsarten erfolgt im Rahmen des technischen Aufbaus. Darüber hinaus soll die Nutzung des Freiraums untersucht werden, beispielsweise für eine Vergrößerung des Laderaums oder eine Verkürzung der Gesamtfahrzeuglänge.

Die Richtlinien der Straßenverkehrsordnung für die Fahrzeugklasse N3, einschließlich der Gesamtlänge, Höhe und Breite sowie der spezifischen Maße für den Anhänger und die Zugmaschine, werden im Abschnitt „CAD“ an den einzelnen Komponenten dargelegt.

# Technischer Aufbau

## Layout 1

Das erste Layout der Raumnutzung positioniert den Antriebsstrang unter dem Anhänger und schließt frontal geschlossen ab.

Diese Anordnung hat folgende Vor- und Nachteile:

- + Kleiner Wendekreis
- + Platz für Treibstoffspeicher und Komponenten
- + Effizienteres Platooning durch geringere Lücke zu dem vorderen Fahrzeug
- Höherer Luftwiderstand
- Kein traditioneller Trailer möglich, was zu höheren Kosten führt



Abbildung 19: Package Anordnung <sup>134</sup>



# Technischer Aufbau

## Layout 2

Das zweite Layout zur Raumnutzung besitzt eine flache Zugmaschine, die unter dem Anhänger nach vorne herausragt. Diese Anordnung bietet folgende Vor- und Nachteile:

- + Geringeres Gewicht
- + Kostengünstiger
- Höherer Luftwiderstand
- Unnötig hohe Länge

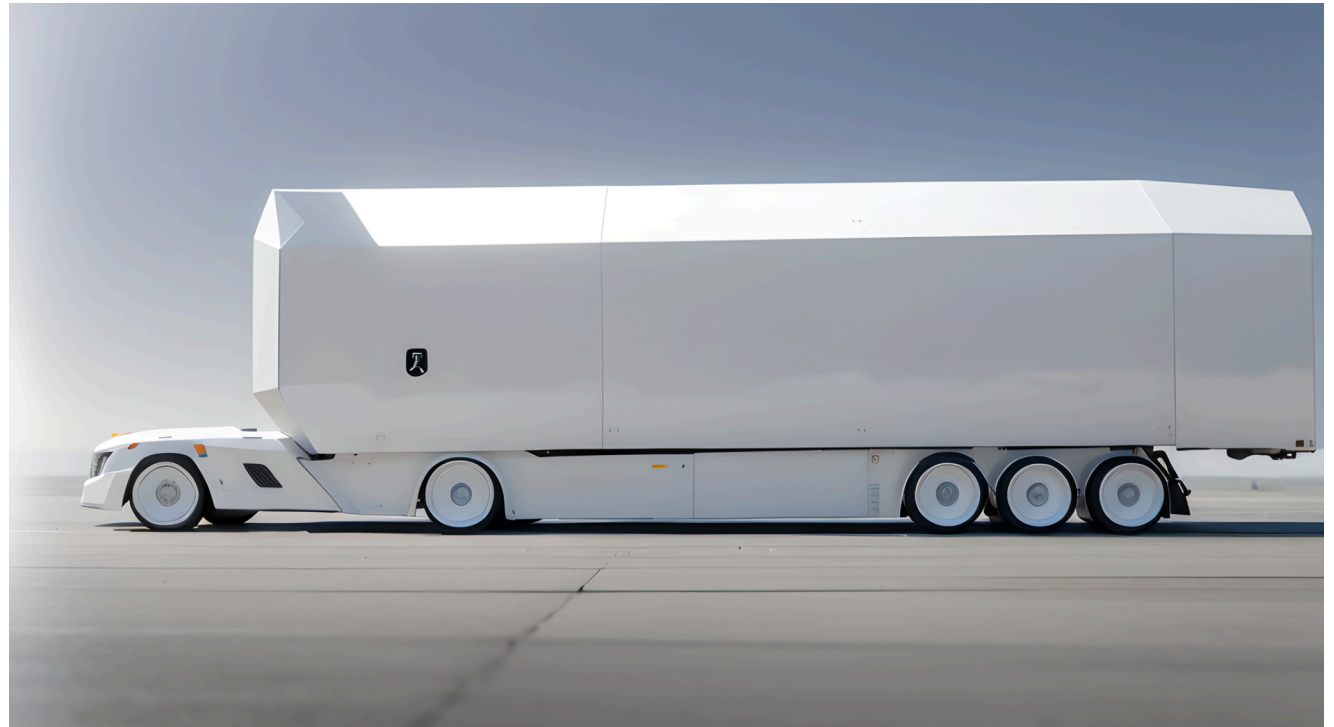


Abbildung 20: Package Anordnung 2<sup>34</sup>

# Technischer Aufbau

## Layout 3

Das dritte Layout der Raumnutzung nutzt den eröffneten Raum der Fahrerkabine. Diese Anordnung hat folgende Vor- und Nachteile:

- + Mehr Raum für Treibstoffspeicherung
- + Aerodynamische Konstruktion
- + Möglichkeit für dynamisches Laden von Siemens (elektrifizierte Schiene) auf dem Dach
- + Potenziell hoch gelegene Sensoren/Kameras
- Länge des LKW
- Höheres Gewicht
- Höhere Kosten



Abbildung 21: Package Anordnung 3<sup>4</sup>

# Treibstoffart Wasserstoff

In der folgenden Analyse wurden Wasserstoff und die Batterie als Antriebsarten bewertet. Zunächst wird in der Tabelle der aktuelle Markt für LKW mit Brennstoffzellen und Wasserstoff (FCEV) als Treibstoff dargestellt:



Abbildung 22: FAUN Citypower<sup>25</sup>



Abbildung 23: Hyundai Xcient Fuel Cell Truck<sup>26</sup>



Abbildung 24: HYZON HyMax-250/450<sup>27</sup>



Abbildung 25: Iveco Heavy Duty FCEV<sup>28</sup>

## FAUN Citypower

## Hyundai Xcient Fuel Cell

## HYZON HyMax-250/450

## Iveco Heavy Duty FCEV

Leistung Brennstoffzelle (kW)	90	180	120	90 kW
Tankgröße (kg)	32	31	15 – 50	70 kg
Tankzeit (H <sub>2</sub> )	ca. 30 min	ca. 8 bis 20 Minuten	8 – 15 min	15 Minuten
Batteriekapazität (kWh)	85	72	140	-
Speicherart	Druckspeicher 700 bar	-	Druckspeicher 350 bar	Druckspeicher 700 bar
Elektrische Reichweite (km)	500	400	400	800 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	140	350	450: 550 (nom. 450 kW)	400 kW
Max. Drehmoment (Nm)	Nicht angegeben	2,237	250: 3400, 450: 3500	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	85	85	85	-
H <sub>2</sub> -Verbrauch (kombiniert)	Nicht angegeben	-	250: 9.37 kg/100 km, 450: 10.7	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	16	-	kg/100 km	44 Tonnen
Zuladung	9 t	-	40 (4×2), 42 (6×2)	3 Tonnen
Verfügbarkeit	Ende 2023	Kleinserie	Serie	Kleinserie

# Treibstoffart Wasserstoff

In den Tabellen sind die wichtigsten Eigenschaften und Daten der LKW zusammengefasst.

Der QUANTRON QHM FCEV hat in der Kategorie Reichweite überzeugt und wird als Beispiel für den aktuellen Stand der praxistauglichen FCEV-LKW herangezogen



Abbildung 26: Kenworth FCEV Truck<sup>39</sup>



Abbildung 27: Mercedes GenH2<sup>40</sup>



Abbildung 28: QUANTRON QHM FCEV<sup>41</sup>



Abbildung 29: Volvo FCEV Truck<sup>42</sup>

## Kenworth Toyota Paccar T680 FCEV Truck

Leistung Brennstoffzelle (kW)	310 kW (dual motor assembly)
Tankgröße (kg)	58.8 kg
Tankzeit (H2)	-
Batteriekapazität (kWh)	-
Speicherart	Wasserstoff
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 724 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	310 kW
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	112 km/h
H2-Verbrauch (kombiniert)	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	37,2 t
Zuladung	-
Verfügbarkeit	Verfügbar

## Mercedes GenH2

Leistung Brennstoffzelle (kW)	300 kW (2x 150 kW)
Tankgröße (kg)	80 kg (2x 40 kg)
Tankzeit (H2)	-
Batteriekapazität (kWh)	70 kWh
Speicherart	Flüssiger Wasserstoff
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 1.000 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	2x 230 kW
Max. Drehmoment (Nm)	2x 1.577 Nm
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
H2-Verbrauch (kombiniert)	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	40 Tonnen
Zuladung	25 Tonnen
Verfügbarkeit	Kundentests

## QUANTRON QHM FCEV

Leistung Brennstoffzelle (kW)	1 x 120 oder 2 x 120
Tankgröße (kg)	54 für 700 km 116 für 1400
Tankzeit (H2)	<40 Minuten für 1400 km
Batteriekapazität (kWh)	118
Speicherart	Druckspeicher 700 bar
Elektrische Reichweite (km)	Simuliert bis zu 700 oder 1400
Max. Leistung E-Motor (kW)	550
Max. Drehmoment (Nm)	40.000
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	90
H2-Verbrauch (kombiniert)	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	44-60t
Zuladung	-
Verfügbarkeit	Verfügbar

## Volvo FCEV Truck

Leistung Brennstoffzelle (kW)	300 kW (2x 150 kW)
Tankgröße (kg)	-
Tankzeit (H2)	Weniger als 15 Minuten
Batteriekapazität (kWh)	-
Speicherart	Wasserstoff
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 1.000 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	-
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
H2-Verbrauch (kombiniert)	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	65 Tonnen
Zuladung	-
Verfügbarkeit	Kundentests

# Treibstoffart Batterie

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften und Daten der LKW zusammengefasst. Es folgt in der Tabelle eine Auswahl an LKW mit Batterien (BEV) als Treibstoffspeicher:



Abbildung 30: Daimler Mercedes BEV Truck<sup>43</sup>



Abbildung 31: Iveco Heavy Duty BEV<sup>44</sup>



Abbildung 32: MAN BEV eTG<sup>45</sup>



Abbildung 33: Nikola BEV<sup>46</sup>

## Daimler Mercedes BEV Truck

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	Bis zu 400 kW <sup>2</sup>
Ladezeit (Minuten)	ca. 70 Minuten
Batteriekapazität (kWh)	448 kWh
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 400 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	Bis zu 400 kW
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	Bis zu 40 t
Zuladung	-
Verfügbarkeit	-

## Iveco Heavy Duty BEV

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	-
Ladezeit (Minuten)	90 Minuten für 80% @350 kW
Batteriekapazität (kWh)	Bis zu 738 kWh
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 500 Kilometer
Max. Leistung E-Motor (kW)	480 kW
Max. Drehmoment (Nm)	1,800 Nm
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	44 Tonnen
Zuladung	-
Verfügbarkeit	-

## MAN BEV Truck

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	-
Ladezeit (Minuten)	45 Minuten für 350 km
Batteriekapazität (kWh)	Bis zu 480 kWh
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 400 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	-
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	44 t
Zuladung	18,8 t 6x2 Chassis
Verfügbarkeit	2024

## Nikola TreBEV Truck

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	-
Ladezeit (Minuten)	90 Minuten für 80% bei 350 kW
Batteriekapazität (kWh)	Bis zu 733 kWh
Elektrische Reichweite (km)	530 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	645 PS
Max. Drehmoment (Nm)	Über 33K ft-lb
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	120 km/h
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	37,2 Tonnen
Zuladung	-
Verfügbarkeit	-



# Treibstoffart Batterie

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften und Daten der LKWs zusammengefasst.

Der Tesla Semi BEV hat in den meisten Kategorien überzeugt und wird als Beispiel für den aktuellen Stand der praxistauglichen BEV-LKW herangezogen.



Abbildung 34: Renault T/C E-Tech<sup>47</sup>



Abbildung 35: Scania BEV Truck<sup>48</sup>



Abbildung 36: Tesla Semi BEV Truck<sup>49</sup>



Abbildung 37: Volvo BEV Trucks<sup>50</sup>

## Renault T/C E-Tech

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	Bis zu 490 kW
Ladezeit (Minuten)	2,5 Stunden 250 kW
Batteriekapazität (kWh)	Von 360 bis 540 kWh
Elektrische Reichweite (km)	300 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	Bis zu 490 kW
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	Bis zu 44 t
Zuladung	-
Verfügbarkeit	2023

## Scania BEV Truck

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	450 kW
Ladezeit (Minuten)	100 Minuten bei 300 kWh-Version
Batteriekapazität (kWh)	468 kWh
Elektrische Reichweite (km)	370 km 40 t 260 km 64t
Max. Leistung E-Motor (kW)	450 kW
Max. Drehmoment (Nm)	2200 Nm
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	64 t
Zuladung	-
Verfügbarkeit	-

## Tesla Semi BEV Truck

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Sattelschlepper
Leistung Batterie (kW)	-
Ladezeit (Minuten)	70% in 30 Minuten
Batteriekapazität (kWh)	850 kWh
Elektrische Reichweite (km)	804 Kilometer
Max. Leistung E-Motor (kW)	-
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	Weniger als 2 kWh pro Meile
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	37,2 Tonnen
Zuladung	-
Verfügbarkeit	Auslieferung

## Volvo FH Electric

Antriebsart	Elektrisch
Fahrzeugklasse	Schwerlast-Lkw
Leistung Batterie (kW)	Bis zu 490 kW
Ladezeit (Minuten)	2,5 bei (250 kW)
Batteriekapazität (kWh)	180-540 kWh, 2-6 Batterien
Elektrische Reichweite (km)	Bis zu 300 km
Max. Leistung E-Motor (kW)	490 kW (666 PS) Dauerleistung
Max. Drehmoment (Nm)	-
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	-
kWh-Verbrauch pro Meile	-
Zulässiges Gesamtgewicht (t)	Bis zu 44 Tonnen
Zuladung	-
Verfügbarkeit	-

# Vergleich Batterie & Wasserstoff

Der Treibstoffverbrauch pro kWh wurde auf der Grundlage des Energiegehalts von Wasserstoff berechnet, der bei 33 kWh pro 1 kg (komprimierter) Wasserstoff liegt <sup>53</sup>. Der aktuelle Preis für Wasserstoff beträgt 11,00 EUR/kg <sup>54</sup>, somit kostet 1 kWh in Wasserstoff 3 Euro. Der reguläre Strompreis liegt derzeit (Stand: 01.01.2024) bei 44,17 ct/kWh <sup>55</sup>.

Im Punkt Ladeinfrastruktur befanden sich zum Stichtag 30.12.2023 <sup>43</sup> Wasserstofftankstellen in der Realisierung und 165 waren bereits eröffnet <sup>54</sup>. Dem gegenüber stehen 56.480 Ladesäulen und 97.495 Ladepunkte in Deutschland für Elektrofahrzeuge <sup>56</sup>.

Antrieb  
 Fahrzeugklasse  
 Ladezeit  
 Batteriekapazität / Tankgröße  
 Reichweite  
 Treibstoffverbrauch  
 max. Gesamtgewicht  
 Treibstoffkosten  
 Ladeinfrastruktur



Abbildung 38: Tesla Semi BEV<sup>61</sup>

## Tesla Semi BEV Truck

BEV  
 Sattelschlepper 6x4  
 70 % in 30 Minuten (18,67 km / Minute)  
 850 kWh  
 804 km  
 1,7 kWh / Meile 0,94 kWh / km  
 37,2 Tonnen  
 31,89 ct / kWh  
 97 495 Ladepunkte 53 978 Ladesäulen  
 70-90 %



Abbildung 39: QUANTRON QHM FCEV<sup>62</sup>

## QUANTRON QHM FCEV

FCEV  
 Sattelschlepper 6x4  
 <40 Minuten (35 km / Minute)  
 122 kg  
 1400 km (simuliert)  
 0,087 kg / km 2,87 kWh / km  
 44 Tonnen  
 11 EUR / kg & 3 EUR / kWh  
 164 in Deutschland eröffnet, 61 in Realisierung  
 25-35 %

Treibstoffart Vergleich

**Antriebsstrang Analyse**

# Treibstoff-Fazit

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass der aktuelle Stand der BEV-Technik des Tesla Semi in den Kategorien Ladezeit, Treibstoffverbrauch in kWh, Treibstoffkosten, Ladeinfrastruktur und Effizienz deutlich besser abschneidet als die FCEV-Technik des Quantron QHM. Die entscheidenden Faktoren sind die Effizienz der Wasserstoffherstellung und der Brennstoffzelle, die zu höheren Treibstoffpreisen und einem erhöhten Verbrauch führen. Eine Studie von VW bestätigt diese Ergebnisse und den Gesamtwirkungsgrad in Abb. 41.

Dies soll nicht Wasserstoff als nachhaltige Energiequelle ausschließen, sondern viel mehr auf die spezifischen Hindernisse hinweisen, die in der Zukunft überwunden werden müssen, da Wasserstoff beispielsweise durch das geringere Gesamtgewicht der Komponenten in der Luftfahrt von Bedeutung sein könnte.

Für dieses Konzept eines LKW wird jedoch mit dem BEV-Antriebsstrang weiter gearbeitet.

## Wasserstoff und E-Antrieb

Die Wirkungsgrade im Vergleich bei Nutzung von Öko-Strom



Abbildung 40



# CAD-Vorlagen

## Zugmaschine-Chassis



Abbildung 41: Audi Truck<sup>34</sup>



Abbildung 43: Audi Truck Chassis<sup>34</sup>

Für die Sattelzugmaschine wurde die Rad-Konfiguration 4x2 mit zwei Antriebsrädern und zwei Lenkrädern gewählt. Laut der StVZO § 34 für Achslast und Gesamtgewicht <sup>58</sup>, sind in dieser Rad-Konfiguration bei zweiachsigem Kraftfahrzeug mit dreiachsigem Sattelanhänger, das einen Container mit einer maximalen Gesamtlänge von bis zu 45 Fuß befördert, 42,00 Tonnen <sup>58</sup> Gesamtgewicht erlaubt. Dies fällt in den gewünschten Anforderungsbereich des Fahrzeugkonzepts.

Die 6x2-Radanordnung für bis zu 44 Tonnen Gesamtgewicht wurde nicht verwendet. Das Ziel war eine kompakte Variante der Zugmaschine zu entwerfen. Als Vorlage für das CAD (Computer Aided Design)-Modell wurde das folgende 3D-Modell verwendet:



Abbildung 42: Audi Truck<sup>69</sup>

# CAD-Vorlagen

## Anhänger



Abbildung 44: 40-Fuß-Standardcontainer<sup>62</sup>

Mehr als 90% des Welthandels wird über den Seeweg abgewickelt <sup>60</sup>, wobei 70% aller Stückgüter in Standardcontainern transportiert werden <sup>61</sup>. Diese Container haben die Maße 10, 20 und 40 Fuß, wobei die 40-Fuß-Container am häufigsten verwendet werden.

Aufgrund ihrer weit verbreiteten Nutzung wurden die 40-Fuß-Container als Frachtformat für das Design des autonomen LKW ausgewählt.

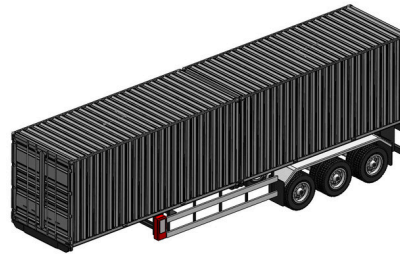


Abbildung 45: 40 Fuß Containeranhänger<sup>63</sup>



Abbildung 46: 40 Fuß Containeranhänger<sup>64</sup>

Die Maße des 40-Fuß-Standardcontainers sind wie folgt: Länge: 12192 mm, Breite: 2440 mm, Höhe: 2590 mm <sup>62</sup>.

Für die CAD-Vorlage wurde das folgende Modell verwendet, das entweder einen 40-Fuß-Container oder zwei 20-Fuß-Standardcontainer aufnehmen kann:



Abbildung 47: 40 Fuß Containeranhänger<sup>64</sup>

# CAD-Vorlagen

## Motor

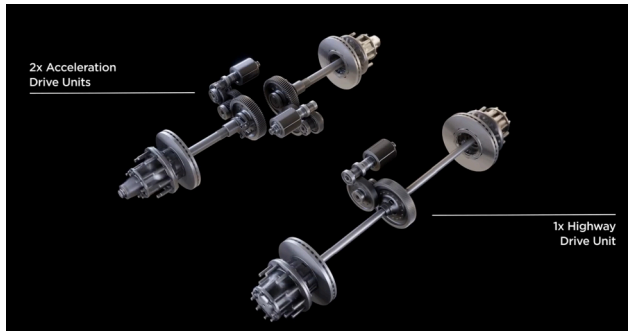


Abbildung 48: Tesla Semi Motor Layout<sup>65</sup>

Der Tesla Semi Truck ist mit drei Motoren ausgestattet, die auf der Basis des Tesla Plaid Model S und X entwickelt wurden <sup>64</sup>. Die Radanordnung ist 6x4, wobei ein Motor auf der ersten Achse für den normalen Betrieb zuständig ist und zwei weitere Motoren auf der hintersten Achse für die Beschleunigung sorgen.

Motor

CAD Vorlagen



Abbildung 49: Tesla Semi Motor <sup>166</sup>



Abbildung 50: Tesla Semi Motor <sup>266</sup>

Das folgende CAD-Modell in Abb. 51 wurde für den Motor verwendet:

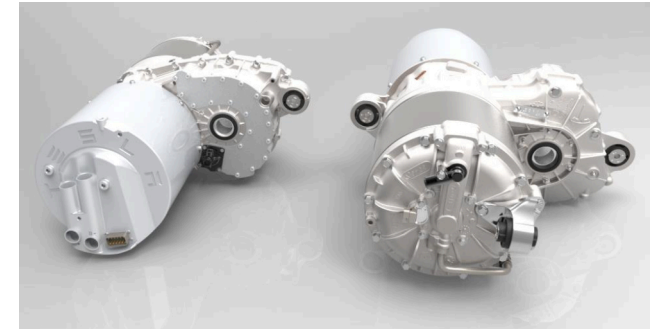


Abbildung 51: Tesla Plaid Motor<sup>67</sup>

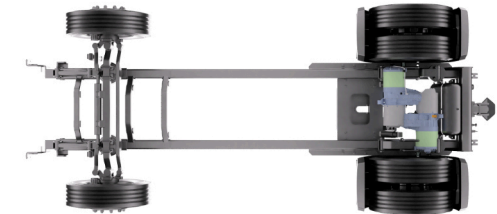


Abbildung 52: Tesla Plaid Motor Layout<sup>34</sup>

Die Anzahl der Antriebsmotoren wurde bei dem Tesla Semi Truck untersucht und für die 4x2 Konfiguration wurden pro Hinterrad je ein Elektromotor zwischen die Radaufhängungen platziert.<sup>65</sup>

# CAD-Vorlagen

## Batterie



Abbildung 53: Tesla Semi Batteriepack<sup>66</sup>

Der Tesla Semi Truck wurde als Referenzpunkt für die Batterietechnologie herangezogen. Basierend auf einer Reichweite von 500 Meilen (entspricht 804 km) und einem Verbrauch von 1,7 kWh pro Meile <sup>68</sup>, wurde die Kapazität der Batterie auf 850 kWh berechnet.



Abbildung 54: Tesla Battery Cell<sup>70</sup>

Die Batteriezelle des Typs 4680 im Tesla Semi hat eine Kapazität von 96-99 Wh und wiegt 355 g pro Zelle <sup>69</sup>. Daher werden mindestens 8855 dieser Zellen benötigt, um eine Gesamtkapazität von 850 kWh zu erreichen.

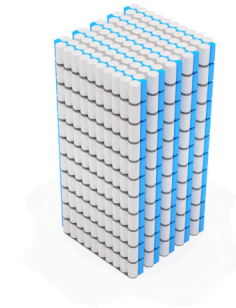


Abbildung 55: 100 kWh Batterie-Modul<sup>74</sup>

Das Batteriepack berücksichtigt eine Reserve von 100 kWh und besteht aus 9 Modulen mit je 1100 Zellen. Diese Konfiguration ermöglicht eine Gesamtkapazität von 950 bis 980 kWh und eine Gesamtmasse von 3.514 kg für 9900 Zellen.

# CAD-Vorlagen

## Batterie-Dimensionen



Abbildung 56: 100 kWh Modul-Gehäuse<sup>34</sup>

Zwischen den Batteriereihen ist ein blauer Kühlkanal integriert. Elektrische Kontakte befinden sich sowohl auf als auch unter den Reihen. Die Batterien sind in einem Gehäuse untergebracht, wobei ein 100 kWh Modul die Maße 1023 x 543 x 512 mm inklusive des Gehäuses aufweist.

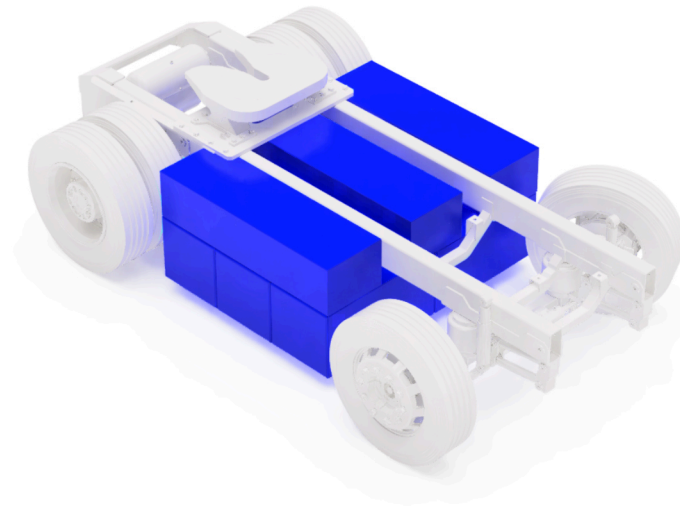


Abbildung 57: 950 kWh Batterie-Module<sup>34</sup>

Die neun Module der 950 kWh Batterie sind strategisch im Chassis und zwischen den Stahlträgern platziert.



# Lademöglichkeiten

## Ladestation



Abbildung 58: Mahle induktives Laden<sup>71</sup>

Die konventionelle Ladetechnik, die eine elektrische Verbindung über ein Kabel und eine Ladestation nutzt, ist derzeit die am häufigsten verwendete Methode zum Aufladen von Elektrofahrzeugen. Alternative Methoden wie das induktive Laden in Abb. 58, das ein kontaktloses Laden ermöglicht, sollen kurz erwähnt werden.

Lademöglichkeiten

**CAD Vorlagen**



Abbildung 59: E-Auto Ladevorgang<sup>72</sup>

Laut dem Hersteller Mahle liegt der Wirkungsgrad dieser Methode bei 92 Prozent, was etwas niedriger ist als beim Laden mit einem Kabel<sup>71</sup>.

Aufgrund der weiten Verbreitung von Ladestationen und dem höheren Wirkungsgrad von Kabeln wurde für dieses Design die

konventionelle Aufladung mittels Kabel gewählt. Details zur genauen Positionierung in der Frontverkleidung und zur Interaktion mit der Ladestation werden im Kapitel zur Mensch-Maschine-Interaktion erläutert.

# Lademöglichkeiten

## Siemens Dynamisches Laden



Abbildung 61: Siemens Dynamisches Laden<sup>73</sup>

Siemens hat in Partnerschaft mit dem LKW-Hersteller Scania das dynamische Laden von LKW auf Autobahnen entwickelt. Diese fortschrittliche Technologie nutzt Oberleitungen, ähnlich wie sie in Fernzügen zum Einsatz kommen und wird im Konzept als optionales Feature eingeplant.

Lademöglichkeiten

CAD Vorlagen



Abbildung 60: e-Highway von Siemens<sup>73</sup>

Siemens Mobility beschreibt die Technologie, wie folgt: „Mit der Infrastruktur für dynamisches Laden vereint Siemens die Effizienz elektrifizierter Bahnstrecken mit der Flexibilität von Lkws zu einer innovativen Güterverkehrslösung: effizient, ökonomisch und umweltschonend.“<sup>73</sup>

# Lademöglichkeiten

## Siemens Dynamisches Laden



Abbildung 61: Siemens Dynamisches Laden<sup>73</sup>

Die Komponenten, darunter der Stromabnehmer, der Umwandler und die übrigen elektronischen Bauteile, wurden in Abbildung 61 untersucht und mittels CAD nachgebaut. Im ersten Entwurf wird der Unterbau von der darüber liegenden Mechanik getrennt.



Abbildung 60: e-Highway von Siemens<sup>73</sup>

Zudem wird der ausklappbare Arm des Stromabnehmers durch eine Hebebühnen-Mechanik ersetzt, um eine kompaktere Bauweise zu ermöglichen.

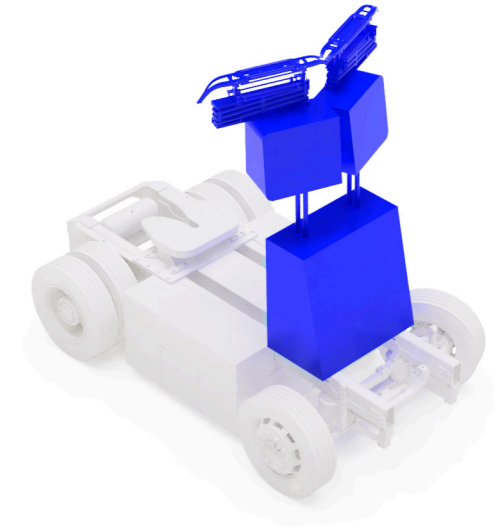


Abbildung 60: e-Highway von Siemens<sup>73</sup>

Der erste Entwurf war in erster Linie dazu gedacht, einen allgemeinen Überblick über die Platzverhältnisse der verschiedenen Komponenten zu geben. Die fortlaufende Entwicklung und das Design der Komponenten, einschließlich des Stromabnehmers, werden im entsprechenden Kapitel im Abschnitt „Frontverkleidung“ detailliert behandelt.



# Steuerungselektronik

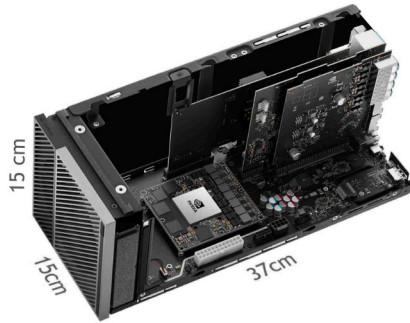


Abbildung 65: DRIVE AGX Orin DevKit<sup>77</sup>

Als Zentralcomputer wurde der Nvidia AGX Orin <sup>76</sup> gewählt mit den Maßen 15 x 15 x 37 cm.

Der Nvidia DRIVE AGX ist ein leistungsstarkes System, das SAE Level 2+ bis 5 unterstützt. Es ist mit einer Vielzahl von Sensoren kompatibel, um eine umfassende Umgebungserfassung zu ermöglichen.



Abbildung 66: DRIVE AGX Orin DevKit Gehäuse<sup>77</sup>

Dazu gehören 12 Außenkameras, 3 Innenkameras, 9 Außen-Radarsensoren, 1 Innenradarsensor, 12 Ultraschallsensoren, 1 Front-LIDAR-Sensor und 1 zusätzlicher Heck-LIDAR-Sensor für Redundanz <sup>78</sup>. Es ist anzumerken, dass die tatsächliche Anzahl der Sensoren im Konzept teilweise überschritten wird um eine nahtlose Überwachung der Umgebung zu gewährleisten.

# Frontverkleidung

Volvo Verkehrs-Sicherheitsanalyse



## Volvo Verkehrs-Sicherheitsanalyse

Die Volvo Verkehrs-Sicherheitsanalyse ist eine umfassende Studie, die von der Abteilung für Unfallanalyse des Automobilkonzerns Volvo Trucks durchgeführt wird. Seit 1969 analysiert das Team die häufigsten Unfälle mit Lastkraftwagen. Insgesamt wurden mehr als 1700 Unfälle analysiert. Aus dieser Analyse haben sich sechs Hauptkategorien von Unfällen herauskristallisiert <sup>79</sup>:

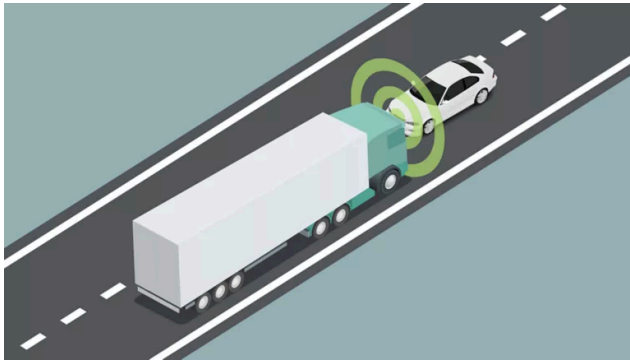


Abbildung 68: Unfallart 1 Frontalkollision<sup>79</sup>

Die Frontalkollision mit einem Auto ist tatsächlich der häufigste Unfalltyp, der zu schweren bis tödlichen Verletzungen für die Insassen des Autos führt. Die Hauptursachen für solche Unfälle sind in der Regel überhöhte Geschwindigkeit, Unaufmerksamkeit oder eine Fehleinschätzung beim Überholmanöver <sup>79</sup>.

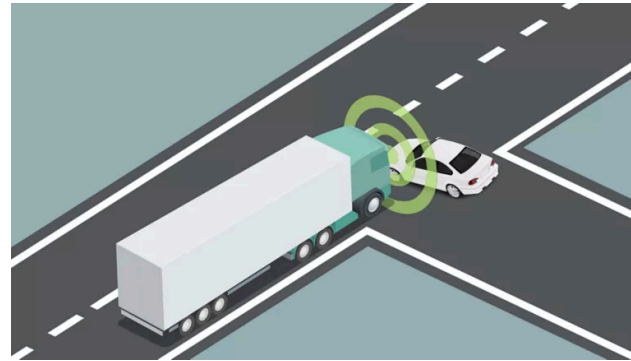


Abbildung 69: Unfallart 2 Abbiegung mit Auto<sup>79</sup>

Die zweithäufigste Unfallart ist die Kollision eines LKWs mit einem Auto in einer Abbiegesituation. Diese Art von Unfällen wird oft durch das Versäumnis des Abbremsens oder die Vorfahrt zu gewähren verursacht <sup>79</sup>.



Abbildung 70: Unfallart 2 Abbiegung mit Auto<sup>79</sup>

Die dritte Kategorie von Unfällen beinhaltet Situationen, in denen Fußgänger, Radfahrer oder Mopedfahrer vor einem schnell fahrenden LKW die Straße überqueren, insbesondere in städtischen Gebieten. Die Hauptursachen für diese Art von Unfällen sind Unachtsamkeit, eingeschränkte Sicht oder eine Fehleinschätzung der Geschwindigkeit des herannahenden Fahrzeugs <sup>79</sup>.

## Volvo Verkehrs-Sicherheitsanalyse



Abbildung 71: Unfallart 4 Abbiegung mit Radfahrer<sup>79</sup>

Die vierte Kategorie von Unfällen betrifft Situationen, in denen ein LKW abbiegt und mit Radfahrern oder Motorradfahrern kollidiert. In diesen Fällen haben beide Parteien grünes Licht und vertrauen oft darauf, ohne ausreichend zu schauen. Eine häufige Ursache für diese Art von Unfällen ist die eingeschränkte Sicht des LKW-Fahrers auf den Radfahrer oder Motorradfahrer<sup>79</sup>.



Abbildung 72: Unfallart 5 Verlassen der Fahrbahn<sup>79</sup>

Die fünfte Kategorie von Unfällen bezieht sich auf Situationen, in denen ein Fahrzeug die Spur oder Fahrbahn verlässt. Häufige Ursachen für solche Unfälle sind Fahrerunachtsamkeit, Müdigkeit oder ein Ausweichmanöver. Umweltbedingungen im Winter, wie rutschige Straßen oder Glätte, können diese Art von Unfällen begünstigen<sup>79</sup>.

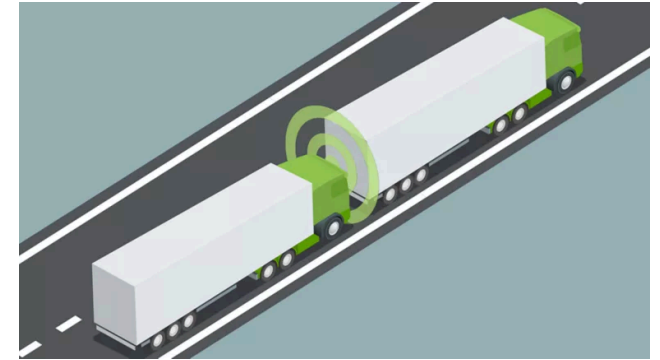


Abbildung 73: Unfallart 6 Kollision mit vorausfahrendem LKW<sup>79</sup>

Die sechste Kategorie von Unfällen bezieht sich auf Kollisionen mit einem vorausfahrenden LKW, die meist schwere bis tödliche Folgen haben. Die Hauptursachen für diese Art von Unfällen sind mangelnde Aufmerksamkeit, unzureichender Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug oder ungünstige Umweltbedingungen<sup>79</sup>.



## Volvo Verkehrs-Sicherheitsanalyse



Abbildung 74: Unfallart 4 Abbiegung mit Radfahrer<sup>79</sup>

Die vierte Unfallart, die Abbiegung mit einem Radfahrer, ist mit einem Anteil von 20% vertreten. Diese Erkenntnis hat den Grundsatz für das Design der Frontverkleidung maßgeblich beeinflusst, wobei der Schwerpunkt auf der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer liegt.



Abbildung 75: Radfahrer-Unfallsituation<sup>79</sup>

In Abbildung 72 sind die ausgelenkten Räder dargestellt, die in einer Unfallsituation eine Gefahr für Rad- und Motorradfahrer darstellen können. Eine erste Überlegung zur Verbesserung der Sicherheit besteht darin, das Überrollen von Verkehrsteilnehmern durch eine vollständige Verkleidung der Räder, auch im ausgelenkten Zustand, physisch zu verhindern.

Zusätzlich könnte eine geringe Bodenfreiheit der Frontverkleidung dazu beitragen, dass keine Objekte unter die Räder gelangen können. Diese Maßnahmen könnten dazu beitragen, die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer zu erhöhen.

# Frontverkleidung

## Straßenbahnnorm für das Design der Front



Abbildung 76: Technischer Leitfaden Straßenbahnnorm<sup>80</sup>

Der „Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés” (STRMTG) hat in Zusammenarbeit mit dem französischen Verkehrsministerium einen technischen Leitfaden für das Design der Frontverkleidung von Straßenbahnen erstellt. Dieser Leitfaden wurde teilweise auf das Design der Frontverkleidung von LKW angewendet.

Straßenbahnnorm  
**Frontverkleidung**

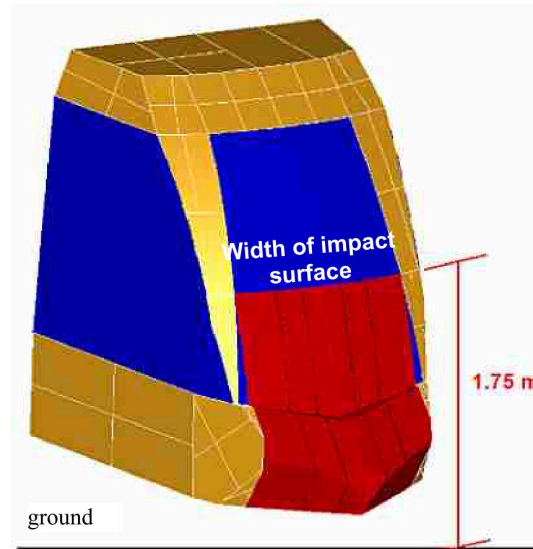


Illustration 1: Impact Surface

Abbildung 77: Kollisionsfläche<sup>80</sup>

Das Design der Frontverkleidung fällt unter die Kategorie der passiven Maßnahmen, die darauf abzielen, die Schwere von Verletzungen bei Unfällen zu minimieren. Im Gegensatz dazu zielen aktive Maßnahmen darauf ab, Unfälle zu verhindern<sup>80</sup>.

In einer Unfallsituation, bei der es zu einer seitlichen Kollision mit einer Straßenbahn kommt, wurden in der Studie zwei Teilnehmer identifiziert: ein 6-jähriges Kind mit einer Größe von 1,10 m und ein mittelgroßer Erwachsener mit einer Größe von 1,75 m<sup>80</sup>. Die Kollisionsfläche auf der Frontverkleidung beträgt 1,75 x 1,75 m, gemessen vom Boden aus und zentriert auf der Frontverkleidung<sup>80</sup>.

# Straßenbahnnorm für das Design der Frontverkleidung

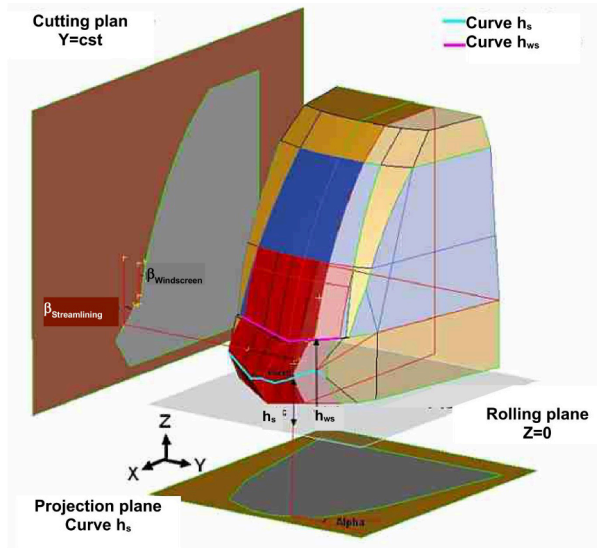


Abbildung 78: Front End Maße und Winkel<sup>80</sup>

Die Geschwindigkeit der Straßenbahn zum Zeitpunkt des Aufpralls beträgt 20 km/h<sup>80</sup>. Diese Geschwindigkeit führt in der Regel nicht zu tödlichen Unfällen<sup>80</sup>. Ein wichtiger Faktor für die Erstellung der späteren Designvorgaben ist das Head Injury Criterion (HIC). In den Simulationen darf der HIC-Wert den Wert 1000 nicht überschreiten<sup>80</sup>.

Die genauen Strecken und Winkel, die bei der Straßenbahnnorm

## Frontverkleidung

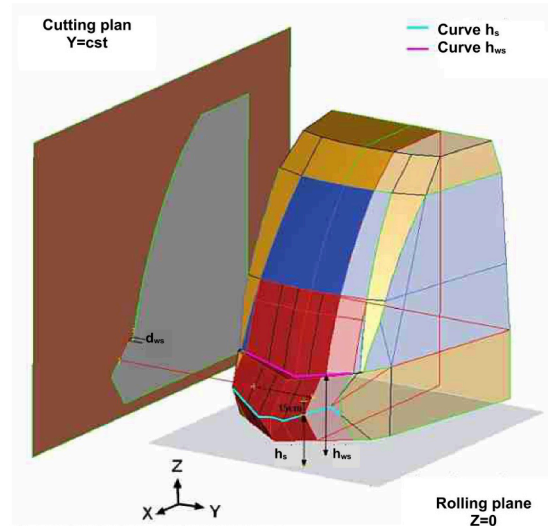


Illustration 2: Geometric parameters

Abbildung 79: Front End Maße und Winkel<sup>80</sup>

Gestaltung der Frontverkleidung berücksichtigt werden müssen, sind in den Abbildungen 78 & 79 dargestellt.

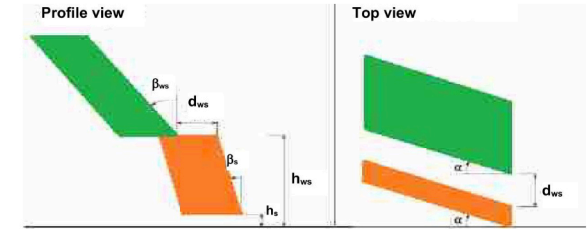


Illustration 3: Impact surface modelling

Abbildung 80: Windschutzscheibe-Verkleidung Aufbau<sup>80</sup>

Die verschiedenen Parameter, die im Design der Frontverkleidung berücksichtigt werden, sind wie folgt definiert:

- $h(S)$  ist der Abstand vom Boden zu der Mittelkante der Spitze<sup>80</sup>
- $h(WS)$  ist der Abstand vom Boden zu der Unterkante der Windschutzscheibe<sup>80</sup>
- $\alpha$  ist der Winkel der Windschutzscheiben-Verkleidung in der horizontalen Ebene<sup>80</sup>
- $\beta(\text{streamlining})$  ist der Winkel der Nasenoberfläche gemessen zu der senkrechten Ebene<sup>80</sup>
- $d(WS)$  ist der Abstand zwischen der Unterkante der Windschutzscheibe und der Oberkante der Frontverkleidung<sup>80</sup>
- $\beta(\text{windscreen})$  ist der Winkel der Windschutzscheibe gemessen zu der senkrechten Ebene<sup>80</sup>

## Straßenbahnnorm für das Design der Frontverkleidung

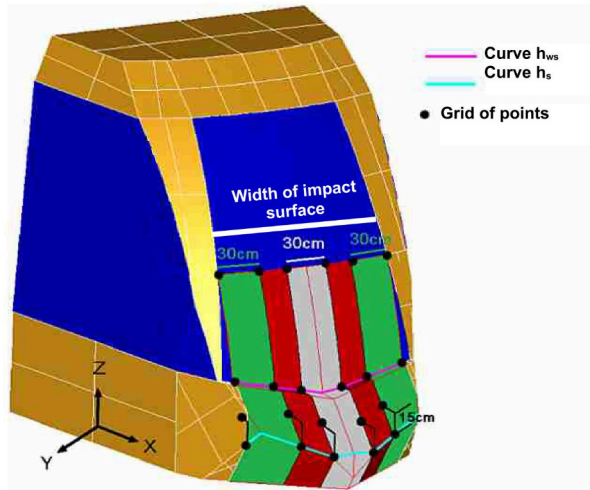


Illustration 4: Identification of specific points

Abbildung 81: Frontflächen-Bereiche<sup>80</sup>

Um das Ziel der Minimierung von Verletzungen zu erreichen, insbesondere von Kopfverletzungen, ist es entscheidend, die Bewegung von Schulter und Torso so schnell wie möglich zu stoppen. Gleichzeitig sollte die Rotation des Rumpfes begrenzt werden. Diese Maßnahmen können dazu beitragen, die Schwere der Verletzungen bei einem Unfall zu reduzieren<sup>80</sup>.

HIC < 1000	$d_{ws} < 10 \text{ cm}$	$10 \text{ cm} \leq d_{ws} < 20 \text{ cm}$	$d_{ws} \geq 20 \text{ cm}$
$h_{ws} < 1.05 \text{ m}$	$0^\circ \leq \beta_{\text{windscreen}} \leq 30^\circ$	$0^\circ \leq \beta_{\text{windscreen}} \leq 15^\circ$ or $\beta_{\text{streamlining}} \geq 15^\circ$ and $\beta_{\text{windscreen}} \geq 30^\circ$	prohibited
$1.05 \text{ m} \leq h_{ws} < 1.15 \text{ m}$	$\beta_{\text{streamlining}} \leq 30^\circ$	$15^\circ \leq \beta_{\text{streamlining}} \leq 30^\circ$ and $\beta_{\text{windscreen}} \geq 15^\circ$	prohibited
$1.15 \text{ m} \leq h_{ws} \leq 1.2 \text{ m}$			$0^\circ \leq \beta_{\text{streamlining}} \leq 30^\circ$ and $\beta_{\text{windscreen}} \geq 15^\circ$
$h_{ws} > 1.2 \text{ m}$	$0^\circ \leq \beta_{\text{streamlining}} \leq 30^\circ$ and $\beta_{\text{windscreen}} \geq 15^\circ$ Or $0^\circ \leq \beta_{\text{streamlining}} \leq 15^\circ$	$0^\circ \leq \beta_{\text{streamlining}} \leq 30^\circ$ and $\beta_{\text{windscreen}} \geq 15^\circ$	All geometries suit

Abbildung 82: Wertetabelle<sup>80</sup>

Das gewünschte Verhalten des Körpers ist die Ablenkung zur Seite, anstatt nach oben und eine Verhinderung des Überfahrens. Nach vorne geneigte und senkrechte Windschutzscheiben sind verboten, um Passanten nicht unter die Räder, sondern vielmehr zur Seite abzulenken. Aus demselben Grund sollte ein Neigungswinkel von mehr als  $30^\circ$  bei allen Flächen vorherrschen, die mindestens 30 cm hinter der Kollisionsfläche

sitzen<sup>80</sup> (dem grünen Bereich in Abbildung 81).

$h(S)$ , der Abstand vom Boden zur Mittelkante der Spitze, darf nicht über 35 cm liegen, da andernfalls, im Falle einer Kollision, Passanten oberhalb der Kniehöhe getroffen werden<sup>80</sup>. Die Frontverkleidung sollte keine scharfen Kanten aufweisen, um das Verletzungsrisiko zu minimieren<sup>80</sup>.



## Straßenbahnnorm für das Design der Frontverkleidung

EP 3 670 289 B1

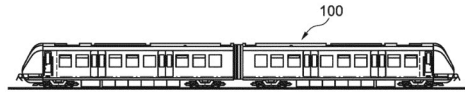


Fig. 1

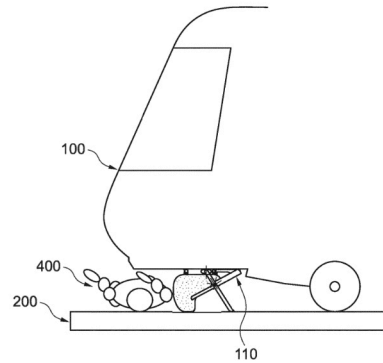


Fig. 2

Abbildung 83: Patent Persönliche Schutzvorrichtung von Alstom Transportation<sup>80</sup>

Als optionales Feature soll der aktive Mechanismus "Pedestrian anti-crush mechanism", kurz DAEP zur Verbesserung des Passantenschutzes erwähnt werden. Das Prinzip ist vergleichbar mit einem statischen Kuhfänger, wie er bei älteren Zügen zu finden ist, oder einem aktiven "Body Catcher", der aktiviert wird, um das

Überfahren von Passanten zu verhindern<sup>80</sup>. In der Abbildung 83 ist das Patent von Alstom Transportation Germany zu diesem Mechanismus zu sehen:

## Zusammenfassung

Für das Design des autonomen LKW's sind folgende Punkte von Bedeutung:

- Unterhalb von 1,75 m dürfen auf der Frontverkleidung keine scharfen Kanten und keine flachen senkrechten Windschutzscheiben vorhanden sein
- Die vorderste Kante an der Spitze der Frontverkleidung darf nicht über der Kniehöhe von 35 cm liegen und 30 cm dahinter sollten alle Flächen einen Neigungswinkel  $\alpha$  von mehr als  $30^\circ$  besitzen
- Die vertikale Steigung der frontalen Fläche  $\beta$  (stream-lining) sollte kleiner gleich  $30^\circ$  betragen

# Frontverkleidung

## Vollverkleidung

Die Idee, eine Vollverkleidung hauptsächlich zur Erhöhung der Sicherheit für Passanten einzusetzen, wurde durch die Recherche über bereits existierende Konzepte bestärkt. Ein prominentes Beispiel ist das Concept Auto RSQ von Audi aus dem Jahr 2004. Dieses Fahrzeug zeichnet sich durch sein monolithisches Design aus, indem die Räder unter dem Chassis verborgen sind.



Abbildung 85: Audi Rsq Concept 2004 Seitenansicht<sup>82</sup>



Abbildung 84: Audi Rsq Concept 2004<sup>82</sup>



Abbildung 86: Audi Rsq Concept 2004 Radkasten<sup>82</sup>



Abbildung 87: Audi Rsq Concept 2004 Rückansicht<sup>82</sup>

Vollverkleidung

Frontverkleidung

## Vollverkleidung

In der Auswahl an LKW sind bei Modellen wie dem Mercedes Gen H2, dem Tesla Semi und anderen innovativen Konzepten, einschließlich dem TUM Truck der Zukunft, die Räder des Anhängers sowie die hinteren Räder der Zugmaschine verkleidet. Dies geschieht vermutlich hauptsächlich zur Verbesserung der Aerodynamik.

Der Ansatz sowohl die Vorder-, als auch Hinterräder komplett von außen zu verkleiden, hat hauptsächlich sicherheitstechnische Gründe für Passanten, wobei auch die aerodynamischen und gestalterischen Vorteile nicht außer Acht gelassen werden.



Abbildung 88: Mercedes Gen H2<sup>83</sup>



Abbildung 89: Tesla Semi Seitenverkleidung<sup>84</sup>



Abbildung 90: TUM Truck der Zukunft<sup>85</sup>

Vollverkleidung

**Frontverkleidung**

# CAD

## Straßenverkehrs-Zulassungs- Ordnung StVZO

Beim Aufbau des 3D-Modells in CAD sind die folgenden Maße gemäß der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) zu beachten:

- Die Bodenfreiheit (d.h., der Abstand zwischen dem tiefsten Punkt der Karosserie und der Fahrbahn) muss laut dem Merkblatt des TÜV Süd Österreich mindestens **11 cm** betragen <sup>86</sup>.
- Gemäß § 32 der StVZO, der die Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen regelt, wird die maximale Breite auf **2,55 m** festgelegt <sup>58</sup>.
- Die höchstzulässige Höhe darf **4,00 m** nicht überschreiten. <sup>58</sup>
- Die höchstzulässige Länge darf 12,00 m nicht überschreiten <sup>58</sup>.

Eine Ausnahme gilt für Sattelkraftfahrzeuge. Wenn die höchstzulässigen Teillängen des Sattelanhängers von dem Zugsattelzapfen bis zur hinteren Begrenzung 12,00 m und der vorderer Überhangradius 2,04 m nicht überschritten werden, ist eine Länge von **16,50 m** erlaubt <sup>58</sup>.

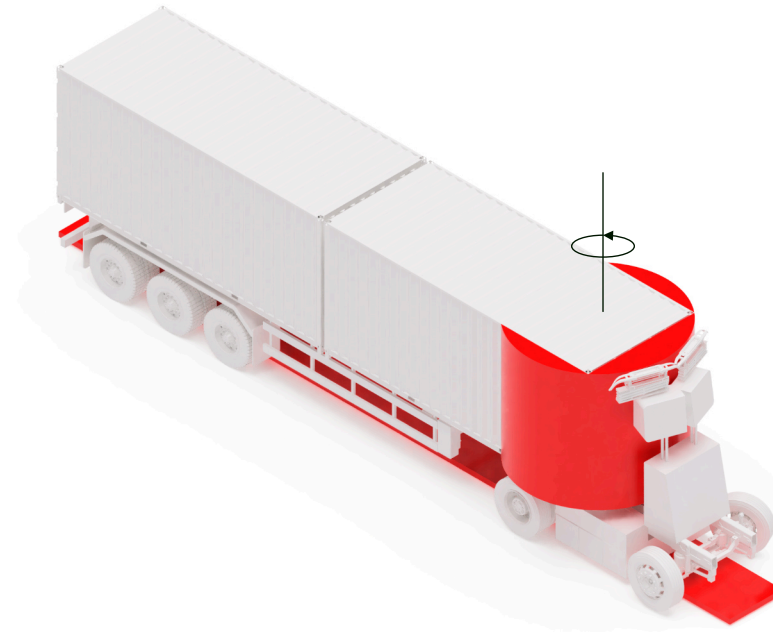


Abbildung 91: Blockierte Auslenkungsbereiche<sup>34</sup>

In Abbildung 91 wurde die Bodenfreiheit als roter Körper dargestellt, der eine Höhe von 11 cm aufweist und sich zwischen den Rädern befindet. Bei Auslenkbewegungen um die Sattelkupplung herum nimmt der Anhänger die in Abbildung 91 gekennzeichneten roten Bereiche ein.

# CAD

## Erster Entwurf

In Abbildung 94 ist der erste Entwurf der Frontverkleidung gemäß den Vorgaben der Straßenbahnnorm dargestellt. Der zugrunde liegende Gedanke besteht darin, dass die äußerste Fläche der Räder in derselben Ebene wie die Seitenfläche der Verkleidung liegt. Eine Knautschzone von 500 mm von dem vorderen Ende der Stahlträger bis zu der Spitze der Frontverkleidung wurde eingeplant.

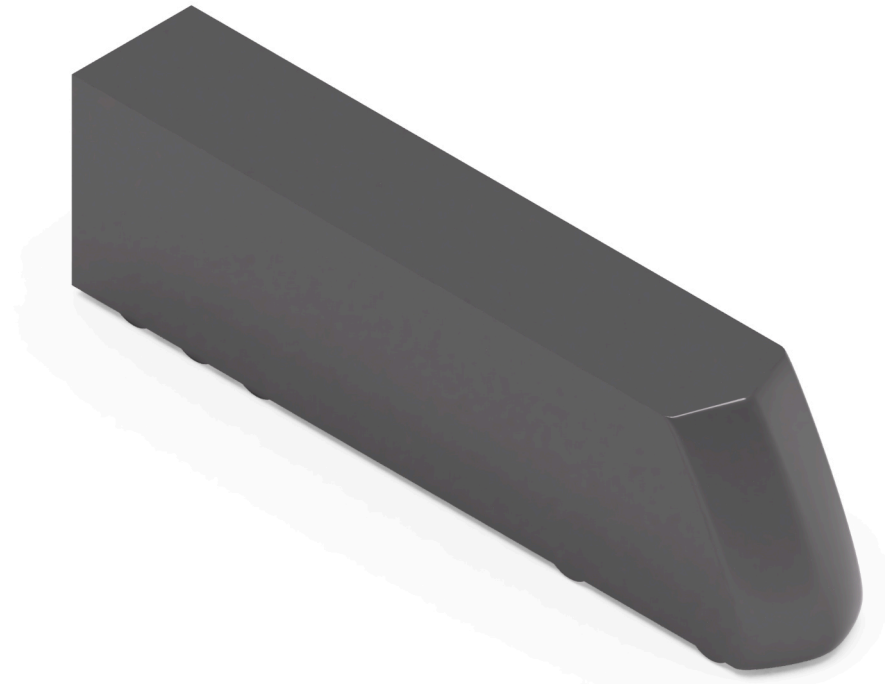


Abbildung 94: Erster Entwurf Übersicht<sup>34</sup>



Erster Entwurf  
CAD Aufbau

Abbildung 92: Erster Entwurf Package<sup>34</sup>



Abbildung 93: Erster Entwurf Package Vogelperspektive<sup>34</sup>



Abbildung 95: Erster Entwurf Vogelperspektive<sup>34</sup>

# CAD

## Zweiter Entwurf

In Abbildung 97 ist der zweite Entwurf der Frontverkleidung dargestellt. Im Unterschied zum ersten Entwurf verjüngt sich die Seitenfläche der Frontverkleidung nach innen, was der "Wrap-Around"-Methodik im Automobil design ähnelt. Die Radflächen verlaufen tangential in den Grundkörper der Verkleidung über.

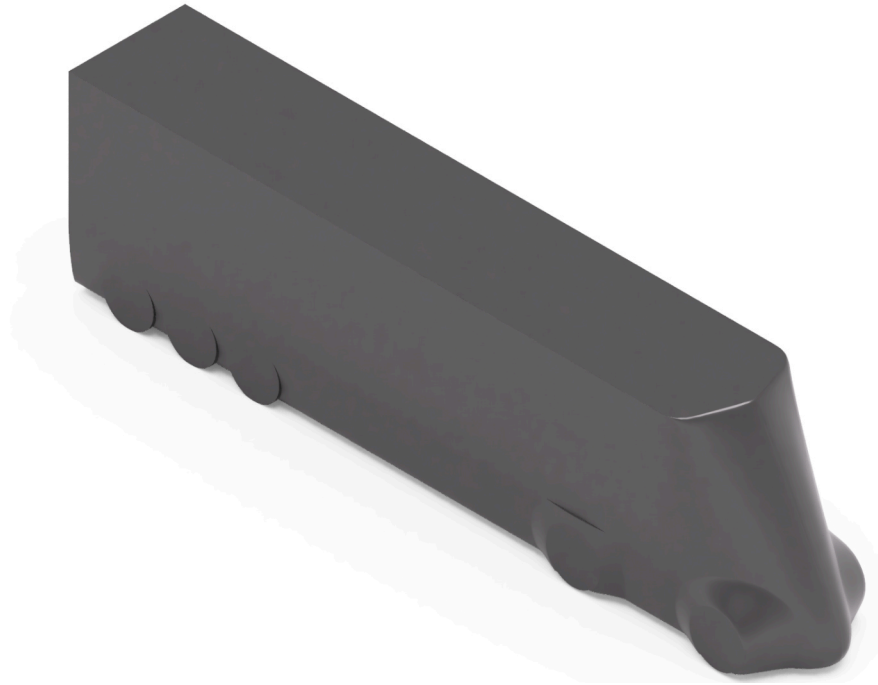


Abbildung 98: Zweiter Entwurf Übersicht<sup>34</sup>



Abbildung 96: Zweiter Entwurf Package<sup>34</sup>



Abbildung 97: Zweiter Entwurf Package Vogelperspektive<sup>34</sup>

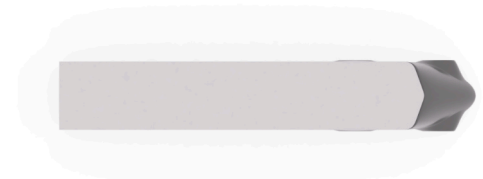


Abbildung 99: Zweiter Entwurf Vogelperspektive<sup>34</sup>



# CFD-Analyse

## Erster Entwurf

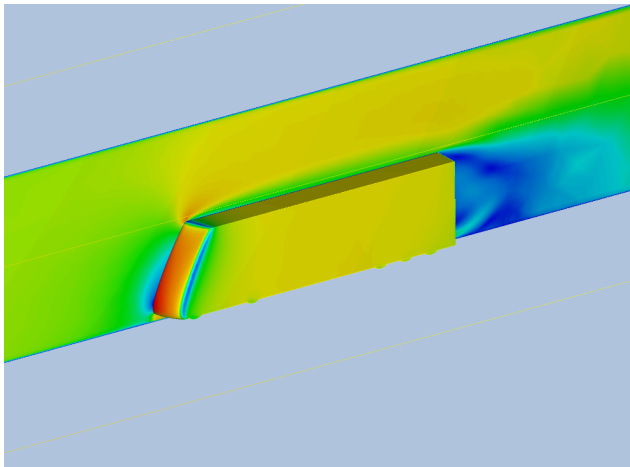


Abbildung 100: Erster Entwurf CFD Übersicht<sup>34</sup>

Die beiden Designansätze V4 und V5 wurden mittels Autodesk Computational Fluid Design, kurz CFD, in einem digitalen Windkanal analysiert. Dabei wurde der jeweilige C(W) Luftwiderstandswert berechnet, um die Formen miteinander zu vergleichen. Die Geschwindigkeit der Simulation betrug 80 km/h und die Anzahl der Elemente in der Simulation belief sich auf 1,4 Millionen.

Erster Entwurf

**CFD Analyse**

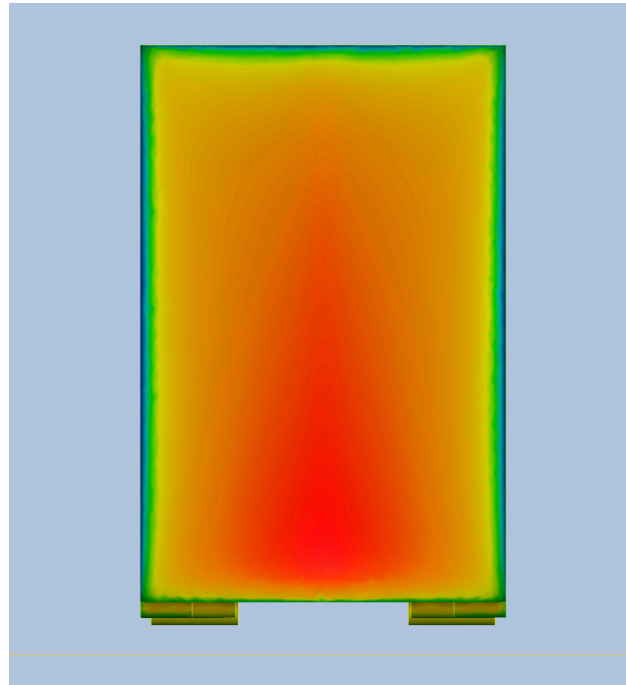


Abbildung 101: Erster Entwurf CFD Frontansicht<sup>34</sup>

In Abbildung 100 wurde die Frontverkleidung und der Anhänger als vereinfachter Körper in einer CFD-Simulation analysiert. Der Körper visualisiert den statischen Druck, wobei hoher Druck in Rot und niedriger Druck in Blau angezeigt wird. Die Querschnittsebene zeigt die Luftgeschwindigkeit an, wobei schnellere Strömungen in Gelb-Grün und langsamere in Blau dargestellt sind.

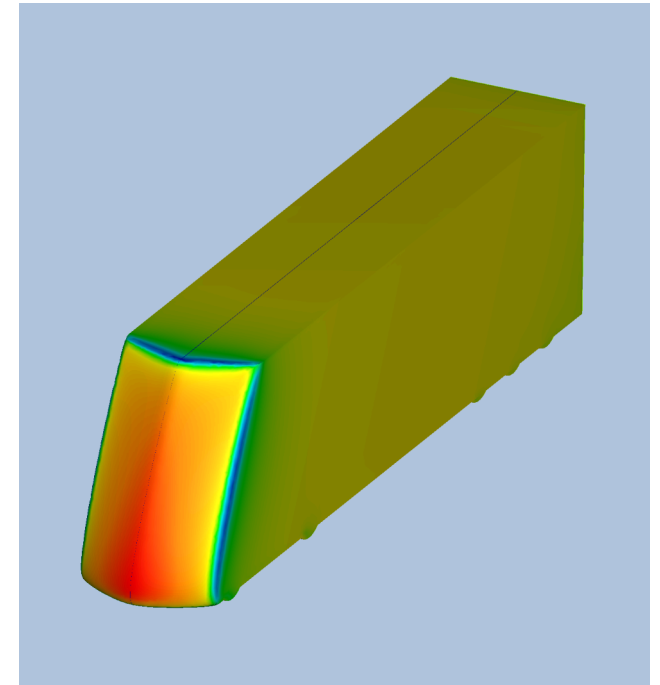


Abbildung 102: Erster Entwurf CFD statischer Druck<sup>34</sup>

Besonders interessant ist die Strömungsablösung auf der Dachfläche des Körpers in Abbildung 100, die durch die grüne, langsame Luftschicht sichtbar wird. Dies führt im Betrieb auf Langstrecken zu einem höheren Kraftstoffverbrauch.

# CFD-Analyse

## Zweiter Entwurf

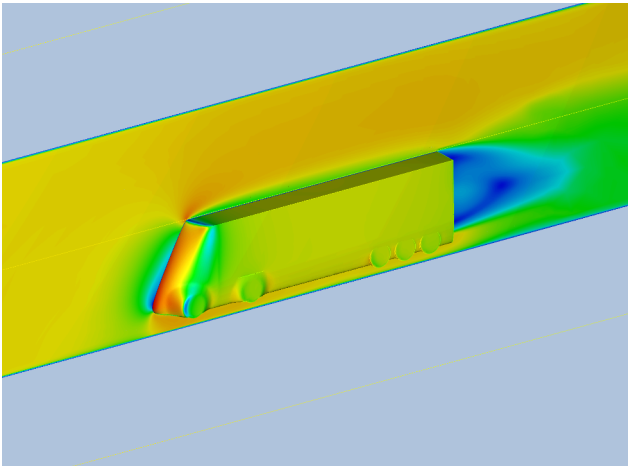


Abbildung 103: Zweiter Entwurf CFD Übersicht<sup>34</sup>

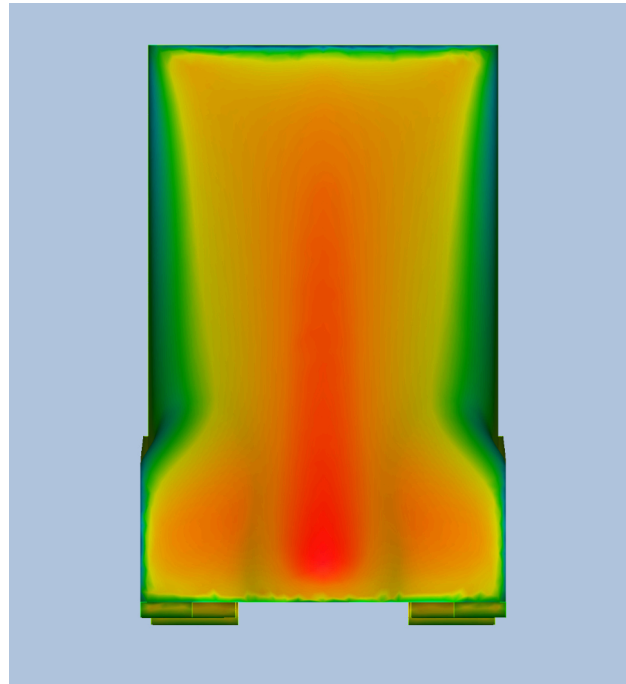


Abbildung 104: Zweiter Entwurf CFD Frontansicht<sup>34</sup>

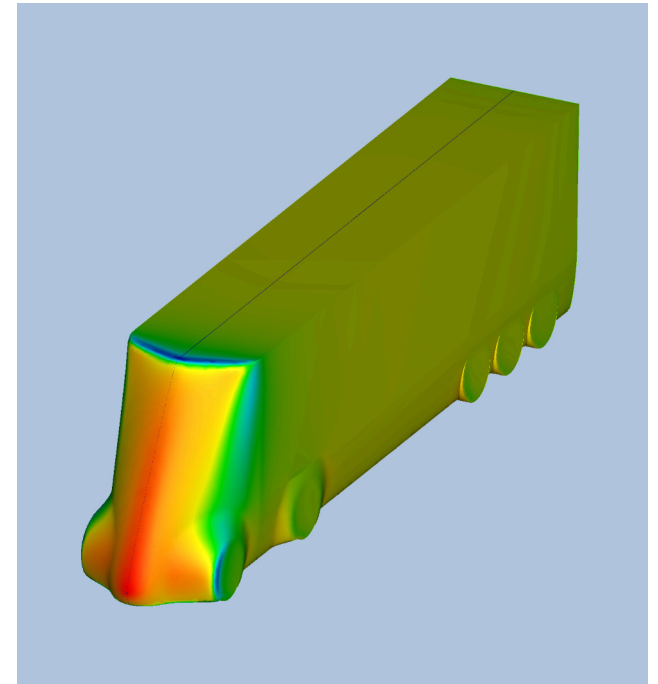


Abbildung 105: Zweiter Entwurf CFD statischer Druck<sup>34</sup>

Die Dachfläche in Abb. 103 zeigt ebenfalls eine Strömungsablösung. Diese wird durch eine grüne, langsame Luftschicht verursacht und ist auf eine scharfe Oberkante zurückzuführen.

# C(W)-Wert

## Erster & Zweiter Entwurf

Der C(W)-Wert wurde mit der folgenden Formel berechnet.

$$C_D = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}$$

Abbildung 106: Formel für Luftwiderstandsbeiwert<sup>87</sup>

- $C_D$  auf englisch und auf deutsch der C(W) ist der Luftwiderstandsbeiwert ohne Einheit,
- $F_D$  ist die Kraft in Flussrichtung in Newtons,
- $\rho$  ist die Dichte der Flüssigkeit, hier Luft mit 1,2041 kg/m<sup>3</sup> bei Raumtemperatur,
- $v$  ist die Luftgeschwindigkeit in m/s,
- $A$  ist die frontale Stirnfläche in m<sup>2</sup> <sup>87</sup>.



Abbildung 107: Erster Entwurf Seitenansicht<sup>34</sup>

Entwurf 1 besitzt eine Stirnfläche von 10,13 m<sup>2</sup>, womit sich der Luftwiderstandsbeiwert  $C(W) = 0,7339$  ergibt.



Abbildung 108: Zweiter Entwurf Seitenansicht<sup>34</sup>

Entwurf 2 besitzt eine Stirnfläche von 9,82 m<sup>2</sup>, womit ein C(W)-Wert von 0,6352 errechnet wurde.

Die Entscheidung Entwurf 2 weiterzuentwickeln, wurde durch den signifikanten Unterschied zu Entwurf 1 bestärkt. Dabei deutet ein niedrigerer C(W)-Wert auf eine bessere Aerodynamik hin.



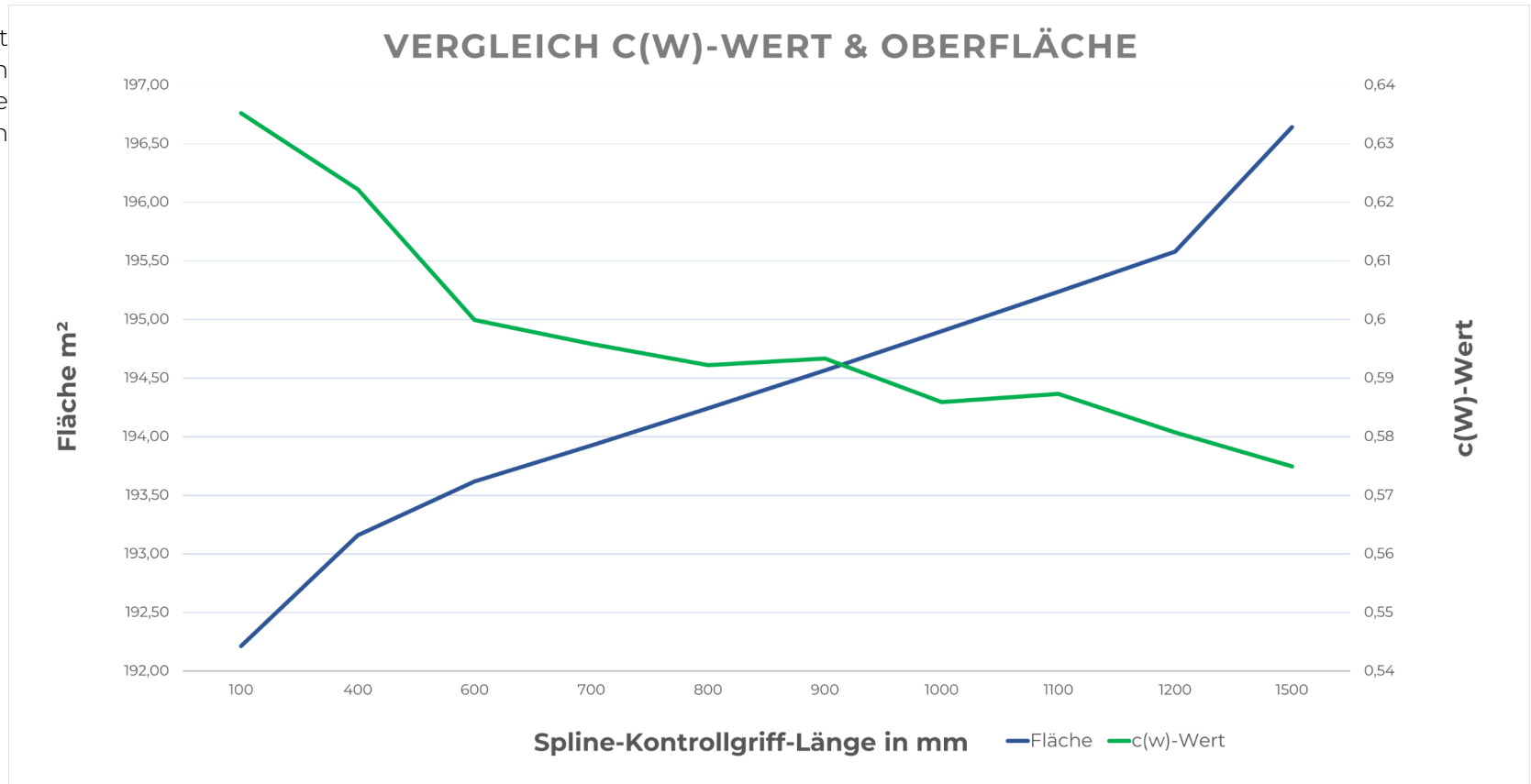
# CFD-Analyse

## Zweiter Entwurf Iteration 1 bis 10

Im Diagramm (Abb. 110) ist der C(W)-Wert in Grün dargestellt. Die Oberfläche der jeweiligen Körper ist in Blau dargestellt.

Der Verlauf des C(W)-Werts empfiehlt, eine Form zu wählen ab 600 mm Grifflänge, da der Graph ab dem Punkt bis 800 mm einen besonders niedrigen C(W)-Wert aufweist im Vergleich zu dem restlichen Verlauf, der annähernd linear ist.

Unter dem Aspekt, für die Frontverkleidung möglichst wenig Material zu verwenden, wurde die Gesamtfläche des Körpers in m<sup>2</sup> untersucht. Der Verlauf ist annähernd linear, sodass keine Varianten besonders herausstechen.



# CFD-Analyse

## Zweiter Entwurf Iteration 1 bis 10

Iteration 4, die eine Spline-Grifflänge von 700 mm aufweist, wurde ausgewählt. Diese Form ist ein guter Kompromiss zwischen einer Reduzierung des C(W)-Wertes und einer angemessenen Größe der Frontverkleidung.

Iteration 1 100 mm	Iteration 2 400 mm	Iteration 3 600 mm	Iteration 4 700 mm	Iteration 5 800 mm	Iteration 6 900 mm	Iteration 7 1000 mm	Iteration 8 1100 mm	Iteration 9 1200 mm	Iteration 10 1500 mm
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------

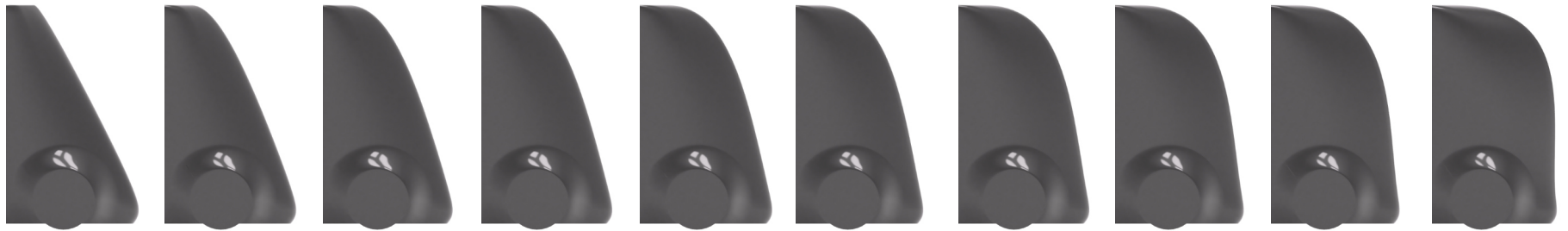


Abbildung 112: Profilsichten Übersicht Iteration 1-10.png<sup>34</sup>

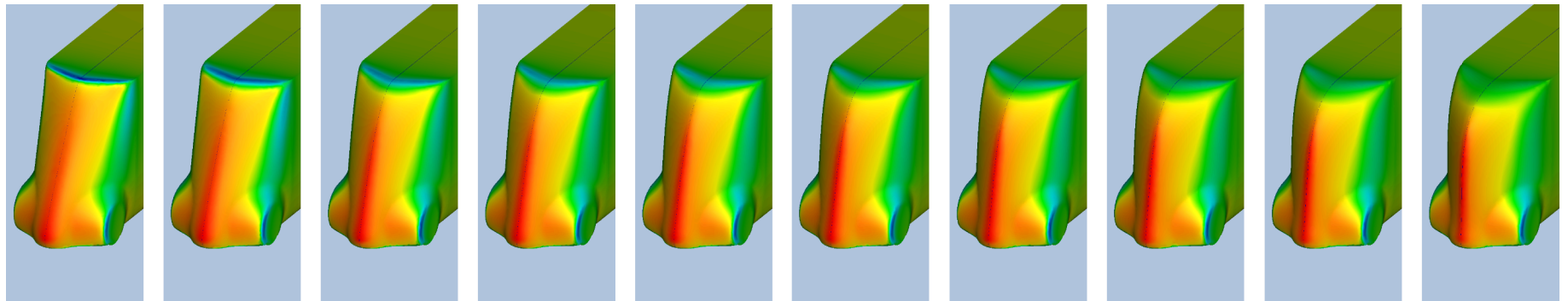


Abbildung 113: CFD Übersicht Iterationen 1-10.png<sup>34</sup>

# CFD-Analyse

## Zweiter Entwurf Iteration 9 und 11 mit verschiedenen Radkanten

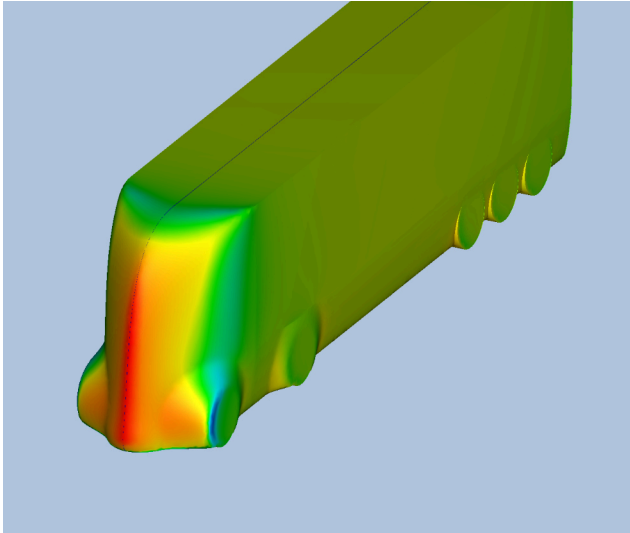


Abbildung 114: Iteration 9 CFD Radkanten-Vergleich mit 0,5 Tangentialgewichtung<sup>34</sup>

In Abbildung 114 ist an der vorderen Radkante ein kleines Unterdruckgebiet in Blau zu erkennen.

Die Untersuchungen der Iterationen 9 und 11 zielen darauf ab, zu ermitteln, ob eine weniger scharfe Radkante zu einer verbesserten Aerodynamik führt.

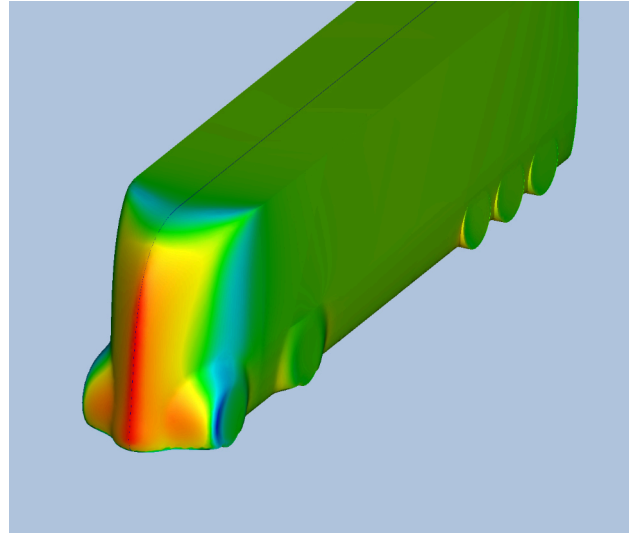


Abbildung 115: Iteration 11 CFD Radkanten-Vergleich mit 1,0 Tangentialgewichtung<sup>34</sup>

Bei Iteration 9 beträgt der Faktor, der die Tangentialität von der senkrechten Radfläche zur Körperform bestimmt, 0,5, während er bei Iteration 11 1,0 beträgt.

Iteration 9 weist einen  $C(W)$ -Wert von 0,6478 auf und Iteration 11 einen  $C(W)$ -Wert von 0,6651. Diese Werte deuten darauf hin, dass die weniger

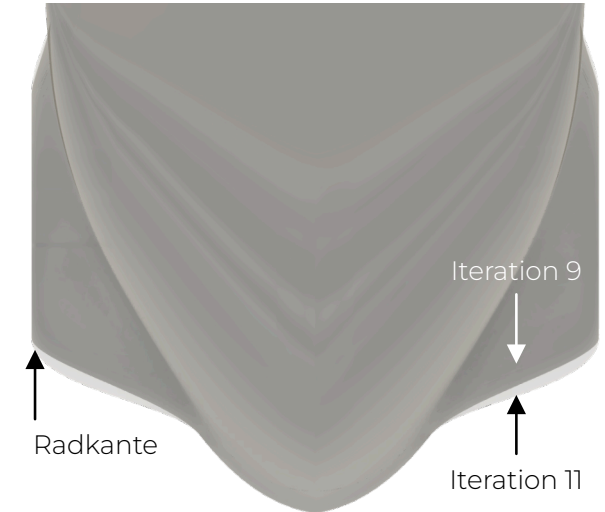


Abbildung 116: Radkanten-Vergleich von Iteration 9 innen & 11 außen<sup>34</sup>

scharfe Kante einen größeren Winkel erzeugt, auf den die Luft trifft, was zu einem höheren Luftwiderstand führt.

In Abb. 115 sind die beiden Varianten übereinander gelegt und die ungünstigere Aerodynamik sichtbar.



# CFD-Analyse

## Dritter Entwurf mit aktualisierten Stromabnehmer

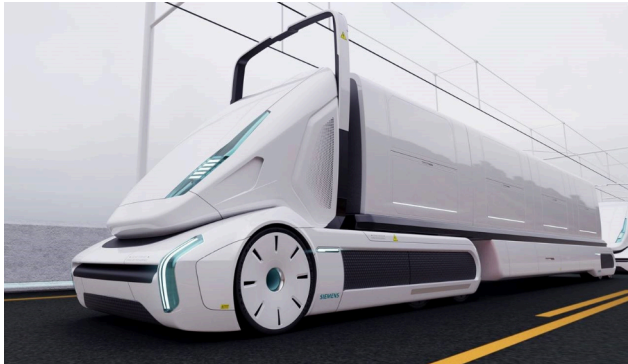


Abbildung 117: Future eHighway Siemens Konzeptstudie<sup>88</sup>

Nach einem Gesprächs mit Dr. Florian Bühs, Head of R&D eHighway bei Siemens Mobility, wurde mir freundlicherweise eine Designstudie zu dem Stromabnehmer für das dynamische Laden der LKW zur Verfügung gestellt in Abb. 117.

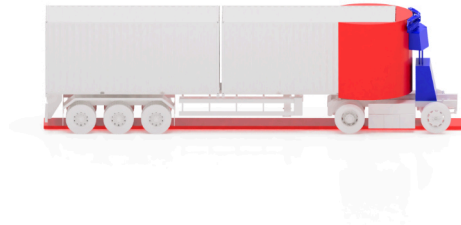


Abbildung 118: Iteration 4 mit Komponenten des Stromabnehmers in Blau<sup>34</sup>

Dieses Konzept führte zu einer detaillierteren Untersuchung des Stromabnehmers, der in Abbildung 117 im ausgefahrenen Zustand dargestellt ist. Im Vergleich zum bisherigen Stromabnehmer in Abbildung 118, der eine Hebebühnen-Mechanik aufweist, wurde ein neues Konzept entwickelt.



Abbildung 119: Iteration 12 mit Komponenten des Stromabnehmers in Blau<sup>34</sup>

Die neue Variante ist teilweise über dem Auslenkungsraum des Anhängers (in Rot dargestellt) in Abbildung 119 positioniert, um Platz zu sparen.

# CFD-Analyse

## Dritter Entwurf mit aktualisiertem Stromabnehmer

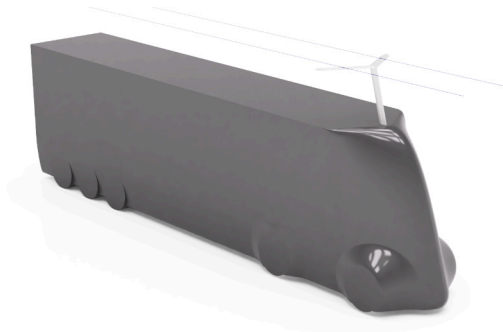


Abbildung 120: Stromabnehmer ausgefahren<sup>34</sup>

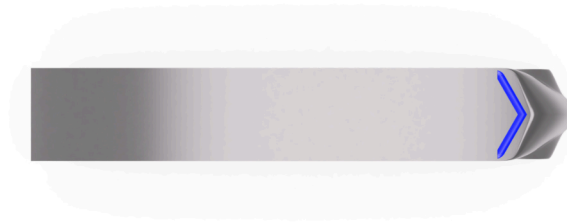


Abbildung 121: Vogelperspektive der Iteration 4 mit Stromabnehmers in Blau<sup>34</sup>



Abbildung 122: Vogelperspektive der Iteration 12 mit Stromabnehmers in Blau<sup>34</sup>

Nach dem neuen Design des Stromabnehmers änderte sich die Dachfläche, die in Abbildung 120 dargestellt ist, zu der Form, die in Abbildung 121 zu sehen ist. Dies führte zur Durchführung einer zweiten CFD-Analysereihe von Iteration 12 bis 16.

# CFD-Analyse

Dritter Entwurf Iteration 12 bis 16

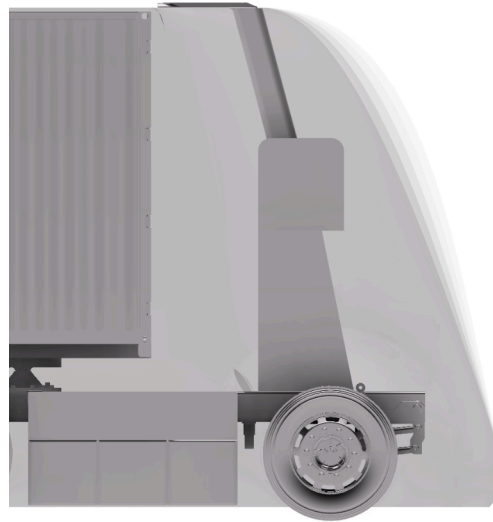


Abbildung 123: Iteration 12 bis 16<sup>3d</sup>

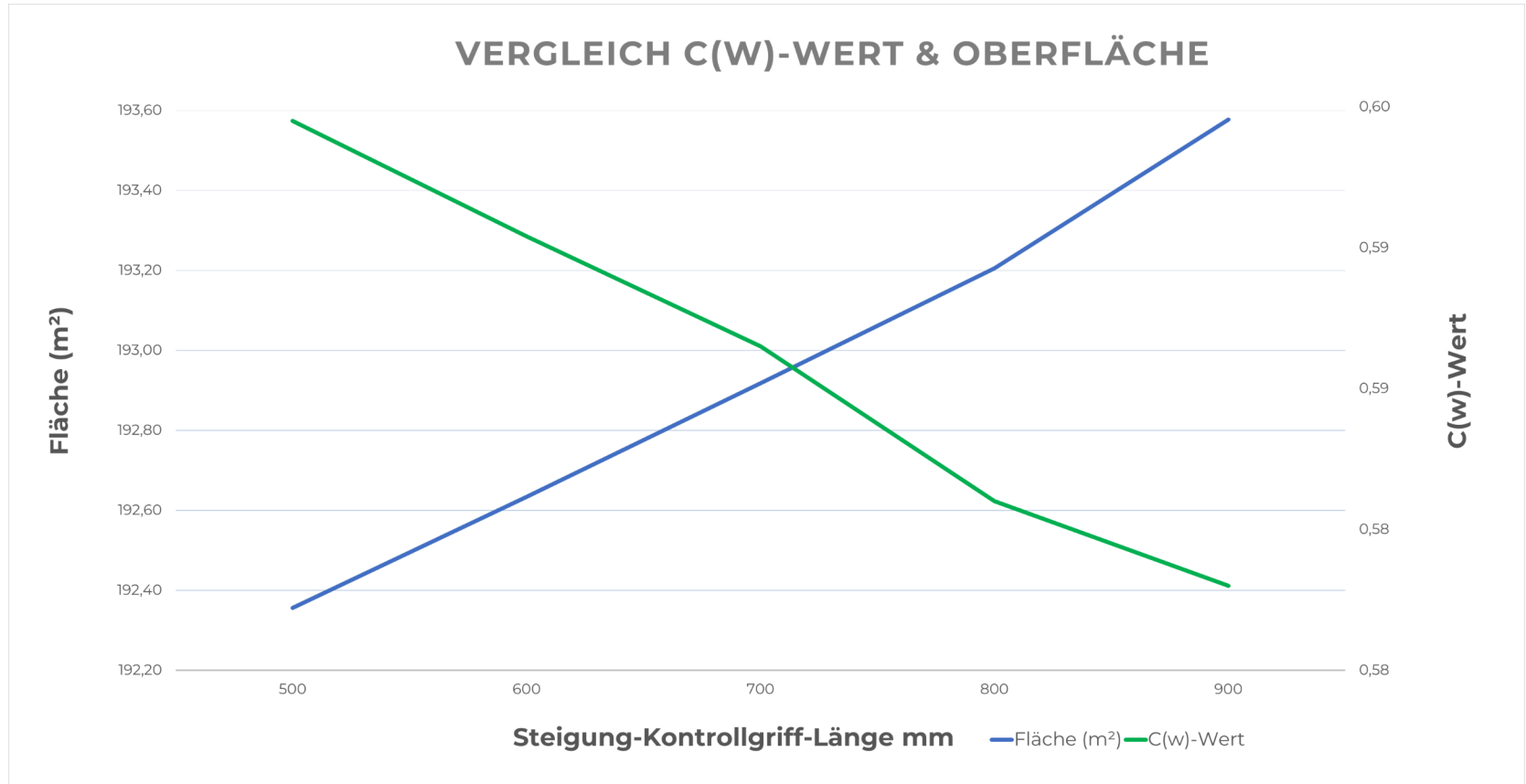
Die Varianten 12 bis 16 unterscheiden sich in der Länge des Griffs am Spline-Kontrollpunkt, die in 100-mm-Schritten von 500 mm bis 900 mm variiert.

# CFD-Analyse

## Dritter Entwurf Iteration 12 bis 16

Die Analyse des Luftwiderstands zielte darauf ab, den Verlauf des C(W)-Graphen (Abb.136) auf mögliche "Täler" zu untersuchen, die besonders aerodynamische Formen repräsentieren.

Es stellte sich jedoch heraus, dass der Verlauf annähernd linear ist, sodass keine spezielle Variante oder Länge des Spline-Kontrollgriffs als besonders effizient identifiziert werden konnte.



# CFD-Analyse

## Dritter Entwurf Iteration 12 bis 16

Für die weitere Entwicklung wurde die Variante 18 mit einer Spline-Kontrollgriffänge von 700 mm weiter verwendet.

Iteration 12 500 mm	Iteration 13 600 mm	Iteration 14 700 mm	Iteration 15 800 mm	Iteration 16 900 mm
------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

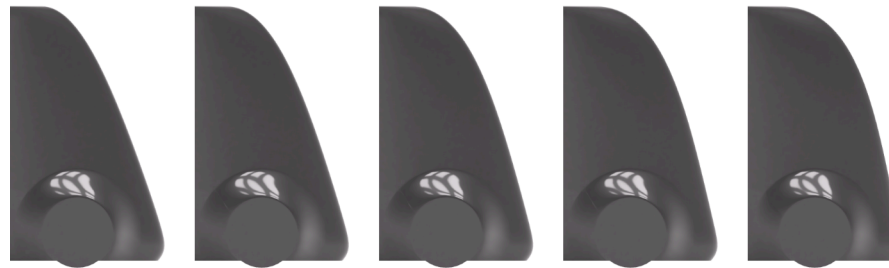


Abbildung 125: Profilsichten Übersicht Iteration 12 - 16<sup>34</sup>

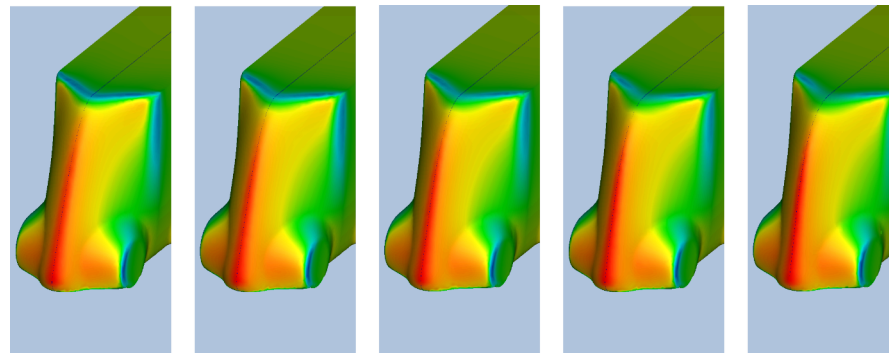


Abbildung 126: CFD Übersicht Iterationen 12 - 16<sup>34</sup>

# CAD

## Luftstromklappen

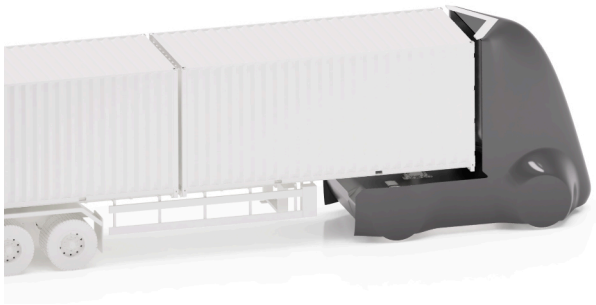


Abbildung 127: Spalt zwischen Zugmaschine und Anhänger<sup>34</sup>

Die Spalten zwischen dem Anhänger und der Zugmaschine stellen eine Quelle für Luftwiderstand und Strömungsablösung dar <sup>89</sup>.

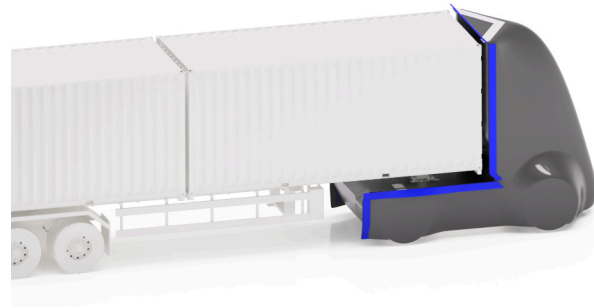


Abbildung 128: Luftstromklappen eingefahren<sup>34</sup>

Ausfahrbare Luftklappen wurden zwischen das Chassis der Zugmaschine und dem Anhänger positioniert. Das Ziel dieser Maßnahme war es, die Strömungsablösung und den Druckwiderstand weiter zu reduzieren und somit Kraftstoffeinsparungen im Langstreckenbetrieb zu erzielen.

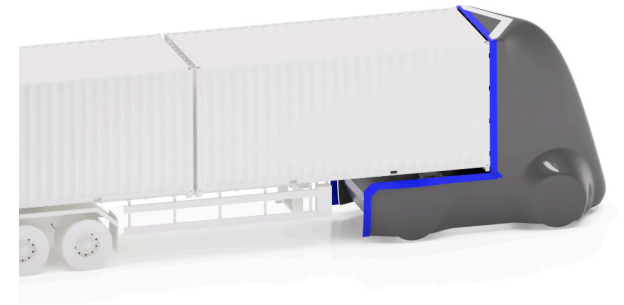


Abbildung 129: Luftstromklappen ausgefahren<sup>34</sup>

Aus demselben Grund wurde die Seitenverkleidung nach hinten erweitert.

# Flächenanalyse

## Dritter & Vierter Entwurf



Abbildung 130: Dritter Entwurf Oberfläche<sup>34</sup>

Der dritte Entwurf weist zwischen den Flächen des Kotflügels und der Karosserie einen sichtbaren Übergang auf.

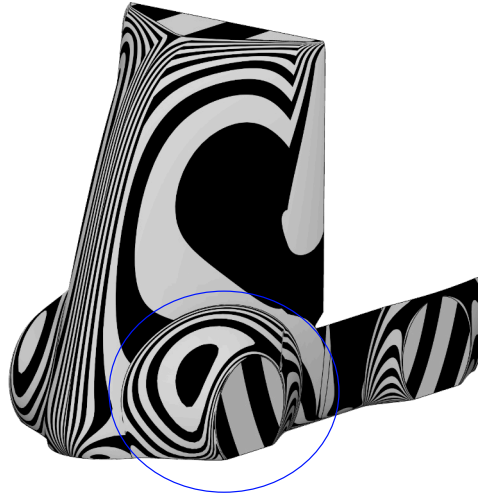


Abbildung 131: Dritter Entwurf Zebrastrifen<sup>34</sup>

In Abb. 130 ist eine Zebrastrifen-Ansicht zu sehen, die den Übergang der Flächen zueinander und die Krümmung anzeigt, wobei die hohe Anzahl der Streifen im markierten Bereich eine hohe Krümmung anzeigt. Dies führt zu einem höheren Luftwiderstand.

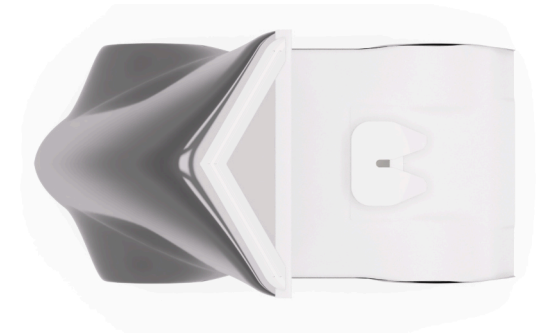


Abbildung 132: Dritter Entwurf Vogelperspektive<sup>34</sup>



# Flächenanalyse

## Dritter & Vierter Entwurf



Abbildung 133: Vierter Entwurf Oberfläche<sup>34</sup>

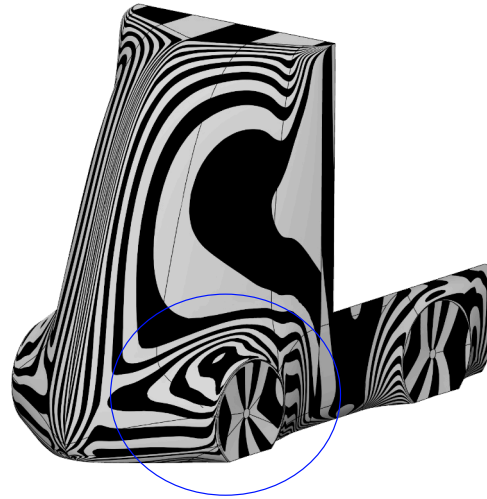


Abbildung 134: Vierter Entwurf Zebrastrifen<sup>34</sup>

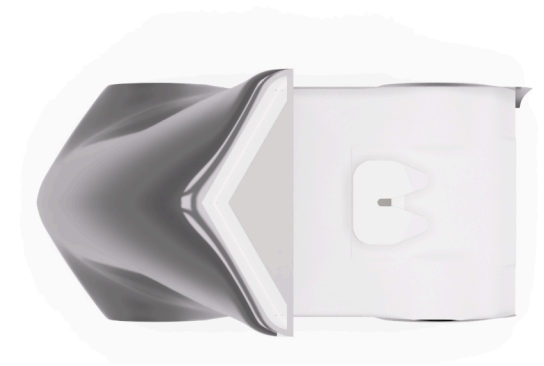


Abbildung 135: Vierter Entwurf Vogelperspektive<sup>34</sup>

Aus diesem Grund wurde die Fläche im vierten Entwurf neu aufgebaut mit einem weicheren Übergang und einer geringeren Krümmung, die in Abb. 134 anhand der gleichmäßigeren Zebrastrifen in dem markierten Bereich zu sehen ist.

# Flächenanalyse

## Dritter & Vierter Entwurf



Abbildung 136: Dritter Entwurf Formanalyse<sup>34</sup>



Abbildung 137: Vierter Entwurf Formanalyse<sup>34</sup>

Der dritte Entwurf in Abb. 136 zeigt im Vergleich zu dem vierten Entwurf in Abb. 137 die Form im markierten Bereich, welcher einen weicheren Übergang eine aerodynamisch günstigere Form annimmt.

# Sensoren

## GPS & Kameras

Die folgenden Sensortypen wurden für den Betrieb auf SAE Level 4-5 ausgewählt und entsprechend positioniert.

Die Platzierung der Sensoren beträgt 50 cm über dem Boden.



Abbildung 140: BOSCH Multifunktionskamera<sup>92</sup>



Abbildung 139: BOSCH Kameraköpfe<sup>91</sup>



Abbildung 138: BOSCH Bewegungs- und Positionssensor<sup>90</sup>

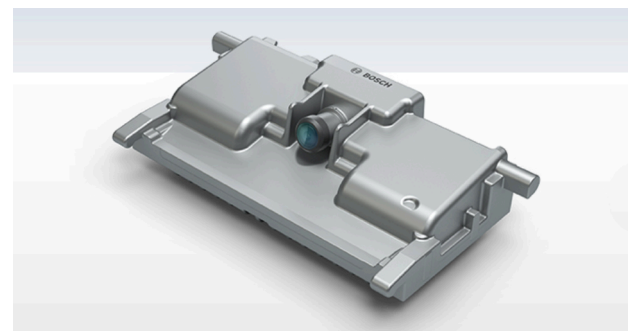


Abbildung 141: BOSCH Multifunktionskamera<sup>93</sup>



Abbildung 142: BOSCH Nahbereichskamera<sup>94</sup>

# Sensoren

## GPS & Kameras



Abbildung 143: Kamera Sensoren Übersicht Front<sup>34</sup>



Abbildung 144: Kamera Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

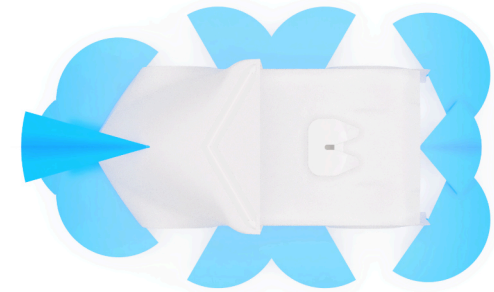


Abbildung 145: Kamera Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

Die Sichtfelder der Sensoren in horizontaler Ebene und falls vorhanden in vertikaler Ebene wurden im CAD-Modell dargestellt.

1 Front- und 1 Heckkamera, sowie 4 Kameras auf jeder Seite und eine Telekamera erlauben eine nahtlose 360° Überwachung.

# Sensoren

## Ultraschall

24 Ultraschallsensoren wurden platziert für eine nahtlose Objekterkennung im Nahbereich, der auf der nächsten Folie zu sehen ist.



Abbildung 146: BOSCH Ultraschallsensor<sup>25</sup>

# Sensoren

## Ultraschall

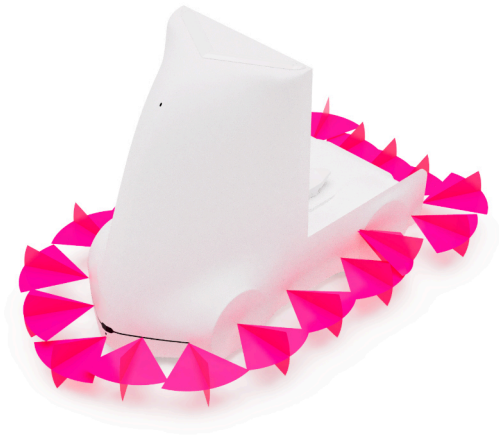


Abbildung 147: Ultraschall Sensoren Übersicht Front<sup>34</sup>



Abbildung 148: Ultraschall Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

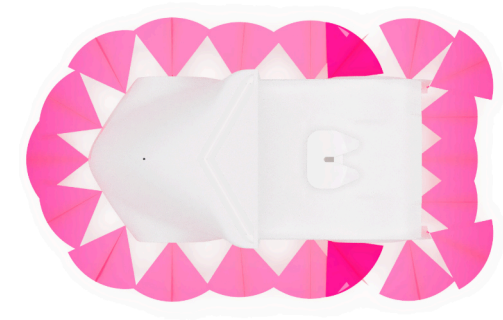


Abbildung 149: Ultraschall Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

Die Ultraschallsensoren über den hinteren Radkästen wurden höher als 50 cm und schräg von dem Chassis ausstrahlend angebracht, da die Hinterräder sehr nah hinter der Verkleidung sitzen und der Ultraschallsensor nicht dazwischen platziert werden kann.

# Sensoren

## Radar

1 Front- und Rückradar und 3 Radarsensoren auf jeder Seite sind hinter der Karosserie angebracht.



Abbildung 150: BOSCH Front-Radarsensor<sup>97</sup>



Abbildung 151: BOSCH Front-Radarsensor<sup>97</sup>



Abbildung 152: BOSCH Front-Radarsensor für LKW<sup>98</sup>



Abbildung 153: BOSCH Seiten-Radarsensor für LKW<sup>99</sup>



# Sensoren

## Radar

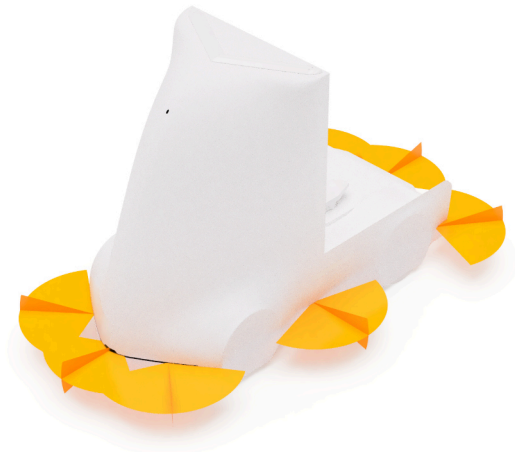


Abbildung 154: Radar Sensoren Übersicht Front<sup>34</sup>

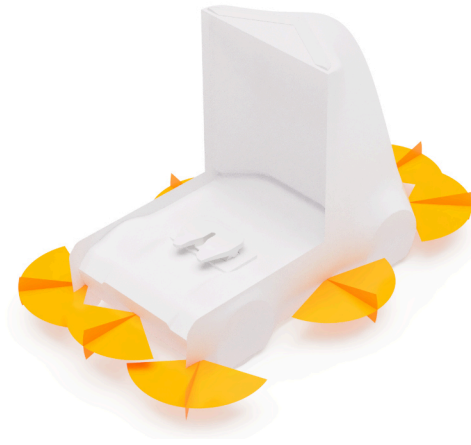


Abbildung 155: Radar Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

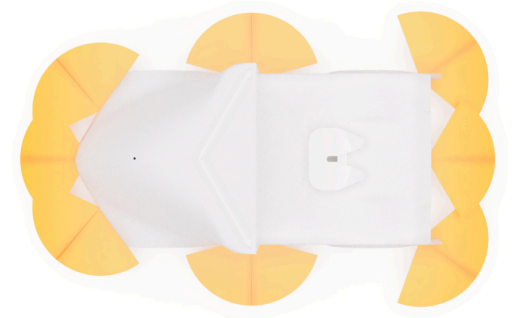


Abbildung 156: Radar Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

Die Radarsensoren sind hinter der Verkleidung ebenfalls auf 50 cm Höhe positioniert.

# Sensoren

## LIDAR

LIDAR Sensoren messen mittels Laserimpulsen Geschwindigkeiten und Abstände.

2 Ouster-LIDAR Sensoren wurden an den Dachkanten oben im Chassis platziert für eine Abdeckung der Seiten und Front. An der Front wurde 1 Ouster-LIDAR für mittlere Distanzen platziert. Am Heck befindet sich zudem 1 Velodyne -LIDAR für kurze Distanzen.



Abbildung 157: Ouster LIDAR<sup>100</sup>



Abbildung 158: Velodyne LIDAR<sup>01</sup>

# Sensoren

## LIDAR



Abbildung 159: LIDAR Sensoren Übersicht Front<sup>34</sup>



Abbildung 160: LIDAR Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

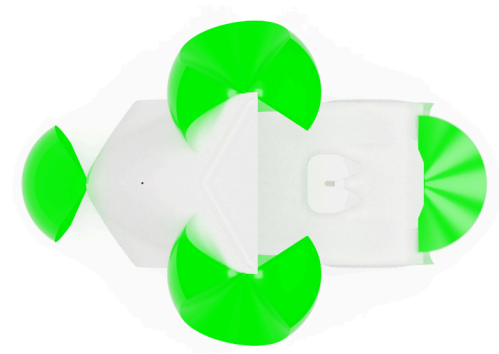


Abbildung 161: LIDAR Sensoren Übersicht Heck<sup>34</sup>

# Beleuchtung

Folgende Scheinwerfer und Lichter des Herstellers Hella wurden verwendet:



Abbildung 162: Hella-Bi-LED-Abblend- und Fernscheinwerfer SlimLine<sup>102</sup>



Abbildung 163: LED-Heckleuchte Ringmodul 112 mm<sup>102</sup>



Abbildung 164: LED-Nebelscheinwerfer L 4060<sup>102</sup>



Abbildung 165: Tag, Position, Blink-LED-Kombinationsleuchte LEDayFlex III<sup>102</sup>



Abbildung 166: LED-Zusatzbremsleuchte LongLED 64<sup>102</sup>



Abbildung 167: LED-Zusatzfernscheinwerfer LED Light Bar 470 PO<sup>102</sup>

# Beleuchtung



Abbildung 168: LED-Seitenmarkierungsleuchte SHAPELINE<sup>102</sup>



Abbildung 169: LED-Heckleuchte 66 mm<sup>102</sup>



Abbildung 170: Rückstrahler SHAPELINE<sup>102</sup>

# Beleuchtung



Abbildung 171: Projektionsmodul<sup>102</sup>



Abbildung 172: Projektion Fußgängerüberweg<sup>102</sup>

Mit dem Projektionsmodul ist es möglich Bilder sowohl auf die Straße, als auch auf die Karosserieteile zu projizieren, wie beispielsweise die folgende Abbildung für die Interaktion mit Passanten bei einem Fußgängerübergang.

# Beleuchtung



Abbildung 173: Scheinwerfer Layout<sup>34</sup>



Abbildung 174: Scheinwerfer Layout Heckansicht<sup>34</sup>



Abbildung 175: Signalprojektion auf die Karosserie<sup>34</sup>

Ein Beamer sitzt im obersten Karosserieteil unter der Telekamera und projiziert nach vorne auf die Straße, zwei Beamer sitzen je am äußersten Ende der Kotflügel und projizieren auf die beiden Seitenflächen, wobei die Spiegel in der Abbildung 175 das Bild auf der gewünschten Fläche reflektieren.

Der vierte Beamer sitzt im Heck-Panel und projiziert Signale hinter dem Fahrzeug auf die Straße.



# Mensch Maschine Interaktion

## Ladestation

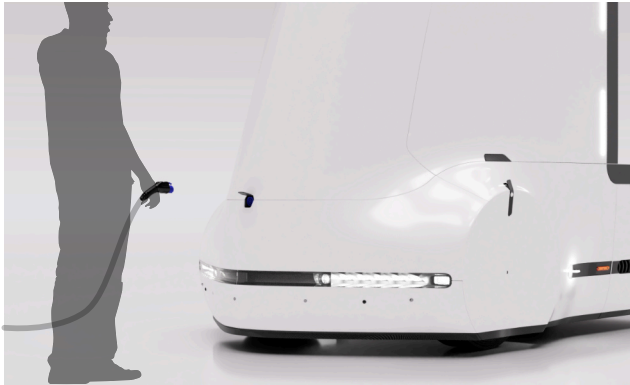


Abbildung 176: Ladevorgang mit Tankdeckel geöffnet<sup>34</sup>

Das erste Szenario beinhaltet das Aufladen des LKW durch eine Person falls keine Ladestation vorhanden ist, die ein autonomes Laden ermöglicht. Vergleichbar mit dem Ablauf während des normalen Tankens eines nicht elektrischen PKW, führt die Person das Ladekabel der Wallbox oder Ladestation zu dem

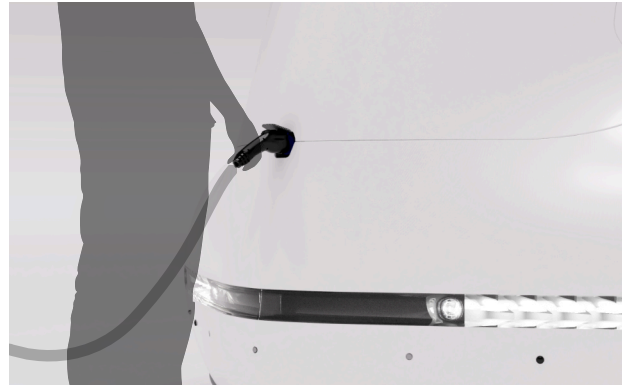


Abbildung 177: Ladekontakt hergestellt<sup>34</sup>

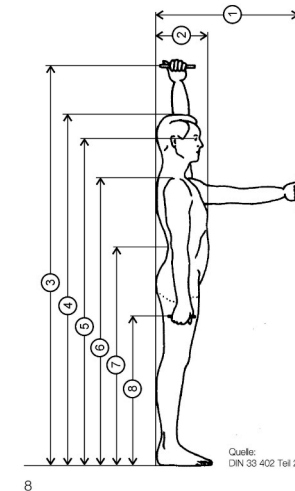
Tankdeckel hin, der sich auf einer Höhe von einem Meter über der Fahrbahn befindet. Diese Höhe wurde gewählt da die Ellenbogenhöhe bei einem angewinkelten Arm 102 cm bei der durchschnittlichen Frau und 110 cm bei dem durchschnittlichen Mann beträgt und 100 cm ergonomisch angenehm erreichbar ist.

Abmessungen in cm	Perzentile*					
	männlich			weiblich		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
1. Reichweite nach vorn	68,5	74,0	81,5	62,5	69,0	75,0
2. Körperlänge	26,0	28,5	38,0	24,5	29,0	34,5
3. Reichweite nach oben beidarmig	197,5	207,5	220,5	184,0	194,5	202,5
4. Körperhöhe	165,0	175,0	185,5	153,5	162,5	172,0
5. Augenhöhe	153,0	163,0	173,5	143,0	151,5	160,5
6. Schulterhöhe	134,5	145,0	155,0	126,0	134,5	142,5
7. Ellenbogenhöhe u. d. Standfläche	102,5	110,0	117,5	96,0	102,0	108,0
8. Höhe d. Hand über der Standfläche	73,0	76,5	82,5	67,0	71,5	76,0
9. Hüftbreite stehend	34,0	36,0	38,5	34,0	36,5	40,0
10. Schulterbreite	44,0	48,0	52,5	39,5	43,5	48,5

\* Das 5. Perzentil repräsentiert Körpermaße „klein“, 5 % aller Werte liegen unter diesem Grenzwert; das 50. Perzentil repräsentiert Körpermaße „mittelgroß“, je 50 % aller Werte liegen über und unter diesem Wert; das 95. Perzentil repräsentiert Körpermaße „groß“, 5 % aller Werte liegen über diesem Grenzwert. S. Seite 16.

Abbildung 179: Ellenbogenhöhe für Tankdeckelposition<sup>33</sup>

**Körpermaße von in Deutschland wohnenden Erwachsenen** (gemittelte Werte für die Altersgruppen der 18- bis 65-jährigen)



Quelle: DIN 33 402 Teil 2

8

Abbildung 178: Körpermaße<sup>33</sup>

# Mensch Maschine Interaktion

## Autonomes Laden



Abbildung 180: Autonomes Laden Ausrichtung<sup>34</sup>

Das zweite Szenario beinhaltet eine modifizierte Ladestation, die ein autonomes Laden ermöglicht. Der LKW fährt frontal langsam auf die Ladestation zu und öffnet den Ladedeckel.



Abbildung 181: Autonomes Aufladen<sup>34</sup>

Die Ladestation fährt einen ausfahrbaren Arm aus und richtet den Ladestecker auf die Ladebuchse des LKW aus. Der LKW bleibt stehen sobald ein erfolgreicher Kontakt hergestellt wurde.



Abbildung 182: Autonomes Laden Abschluss<sup>34</sup>

Nach einem erfolgreichen Ladevorgang wird die Verbindung freigegeben und der Arm der Ladestation fährt sich wieder ein und der Tankdeckel schließt sich automatisch.

# Mensch Maschine Interaktion

## Wartung



Abbildung 183: Öffnung des seitlichen Karosserieelements<sup>34</sup>

Das seitliche Karosserieelement im Aufbau in der folgenden Abbildung lässt sich durch ein Gelenk wie eine Tür zur Seite schwenken und ermöglicht den Zugang zu den Komponenten des dynamischen Ladens.

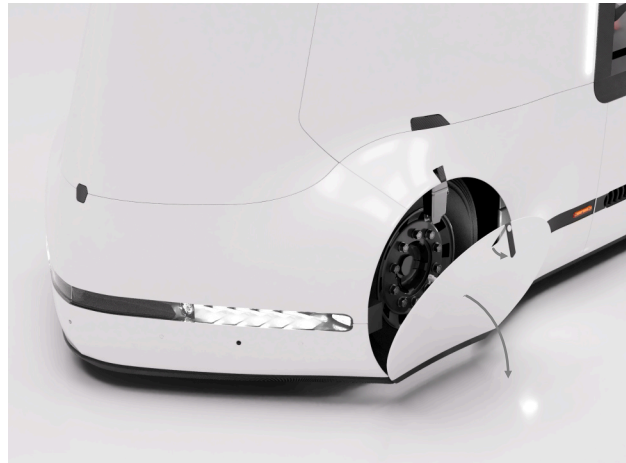


Abbildung 184: Öffnung der Radkappe<sup>34</sup>

Die vordere Radkappe auf jeder Seite besitzt einen Griff für die Wartung der Vorderreifen.



Abbildung 185: Wartungsklappe<sup>34</sup>

Die Wartungsklappe in der obigen Abbildung ermöglicht einen einfachen Zugang zu den Batteriemodulen, wie in der obigen Abbildung zu sehen.

# Mensch Maschine Interaktion

## Wartung

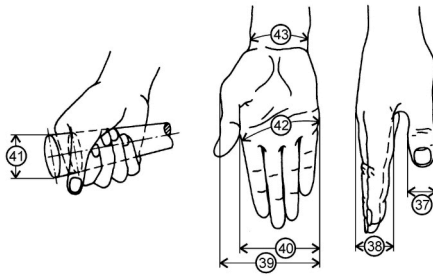


Abbildung 186: Handmaße<sup>103</sup>

Abmessungen in cm	Perzentile*					
	männlich			weiblich		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
30. Kleinfingerlänge	5,7	6,4	7,2	5,1	5,9	6,6
31. Ringfingerlänge	7,2	8,0	8,7	6,5	7,3	8,1
32. Mittelfingerlänge	7,6	8,4	9,3	7,1	7,7	8,6
33. Zeigefingerlänge	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,7
34. Daumenlänge	5,9	6,8	7,5	5,3	6,0	6,9
35. Handflächenlänge	10,4	11,1	12,1	9,2	10,0	10,8
36. Handlänge	17,5	18,9	20,7	16,2	17,7	19,3
37. Daumenbreite	2,0	2,2	2,4	1,6	2,0	2,2
38. Handdicke	2,4	3,0	3,1	2,1	2,6	3,2
39. Handbreite m. Daumen	9,8	10,7	11,7	8,2	9,0	9,9
40. Handbreite	8,0	8,7	9,4	7,0	7,7	8,4
41. Griffumfang der Hand	12,0	13,5	15,5	11,0	13,0	15,5
42. Handumfang	19,5	21,0	23,0	17,5	19,5	21,0
43. Handgelenkumfang	16,0	17,5	19,0	15,0	16,5	18,0

51

37 am Gelenk gemessen

nach DIN 33402, Teil 2

Abbildung 187: Handbreite<sup>103</sup>

Die Griffe an der Wartungsklappe und dem Karosserieteils sind unter der Beachtung der Handbreite von 10,7 cm bei Männern und 9 cm bei Frauen mit 15 cm breiten und 5 cm hohen Griffelementen versehen worden.

# Details

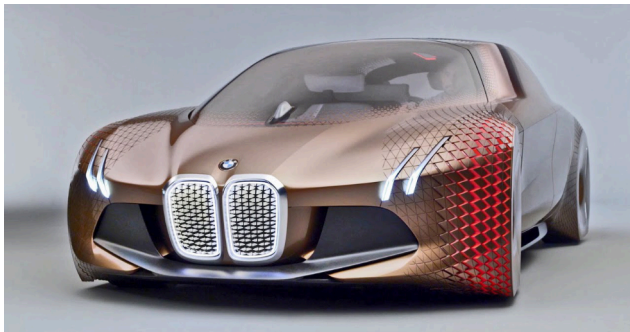


Abbildung 188: BMW Vision Next 100<sup>34</sup>

Im Aufbau der Vollverkleidung wurde eine Möglichkeit gesucht die Räder des LKW bei einer Auslenkung ebenfalls zu verkleiden, vergleichbar in der obigen Abbildung mit dem BMW Vision Next 100. Die vielen Ringe, deren Seiten markant in orange zu sehen sind und die Verkleidung ausmachen, wurden für das LKW-Konzept als zu umständlich bewertet.



Abbildung 189: Auslenkung des Vorderrads<sup>34</sup>

Eine andere Lösung die Vollverkleidung beizubehalten ist das Verschieben der Fronträder nach innen. Im CAD-Modell schaffte eine Verschiebung um 12,5 cm nach innen den gewünschten Raum, wodurch die Räder beim Auslenken nicht mehr durch die Karosserie hervortreten.



Abbildung 190: Lüftungsöffnung<sup>34</sup>

Der jetzige Abstand der Reifen an den Vorderräder beträgt 2152 mm.

Die Lüftungsöffnung wurde an der Seite in das schwarze Sensor- und Lichtelement integriert.

# Farbkonzept



Abbildung 191: Farbelement an der Front<sup>34</sup>

Die Primärfarbe der Karosserie ist Weiß, um die Projektionen der Beamermodule kontrastreich darzustellen. Die inneren Elemente und die Rückseite der Zugmaschine sind in Schwarz gehalten, um den Formverlauf der weißen Karosserie zu betonen.



Abbildung 192: Farbkonzept Heckansicht<sup>34</sup>

Ein Schutzblech am unteren Rand der bildet einen schwarzen Akzent, welcher sich an den Luftstromklappen fortsetzt.



Abbildung 193: Farbelement an der Seite<sup>34</sup>

Die Scheinwerfer und Sensoren an der Front und an der Seite sind teilweise in schwarzen Gestaltungselementen eingefasst.

# Anhänger

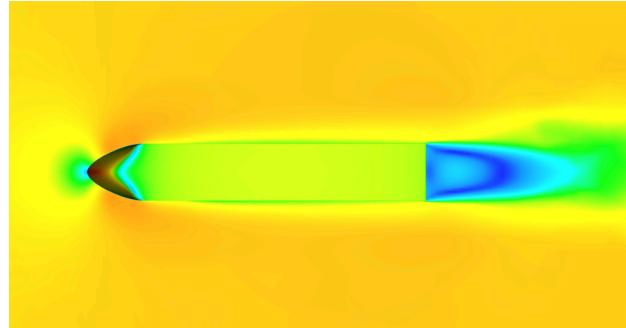


Abbildung 194: Anhänger CFD-Analyse Seitenansicht<sup>34</sup>

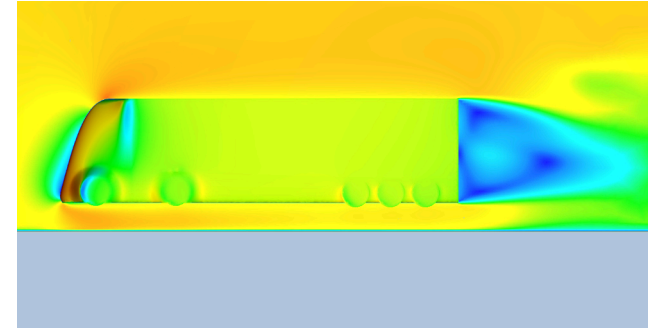


Abbildung 195: Anhänger CFD-Analyse Vogelperspektive<sup>34</sup>

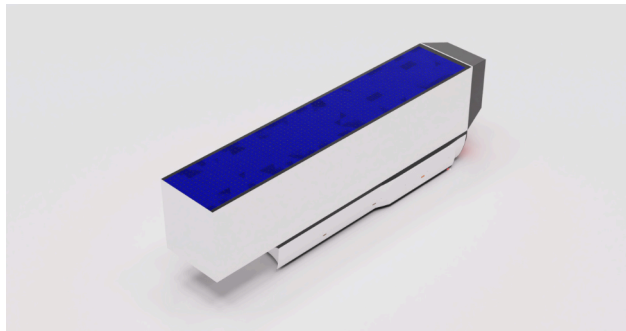


Abbildung 196: Anhänger Übersicht<sup>34</sup>



Abbildung 197: Anhänger Seitenansicht<sup>34</sup>

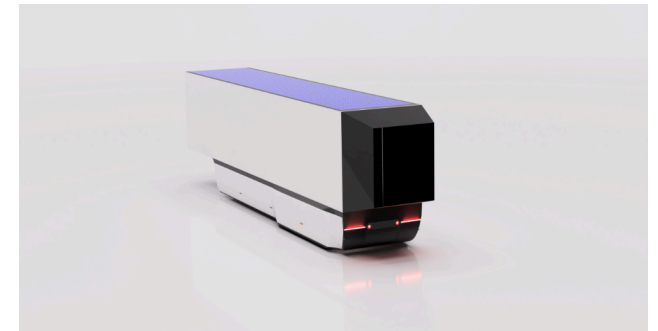


Abbildung 198: Anhänger Heckansicht<sup>34</sup>

Das Konzept der Vollverkleidung für eine bessere Passanten Sicherheit wurde auch für den Anhänger angewandt. Das Gleiche gilt für die Beleuchtungselemente am Heck der Zugmaschine, die für den Anhänger übernommen wurden.

Die CFD-Analyse der Zugmaschine stellt zudem einen Leitfaden für die Aerodynamikflächen am Heck des Trailers, vor allem welche Neigung diese besitzen.

Das Dach des Containers bietet Platz für Solarzellen für die Erzeugung von regenerativem Strom.



# Visualisierung

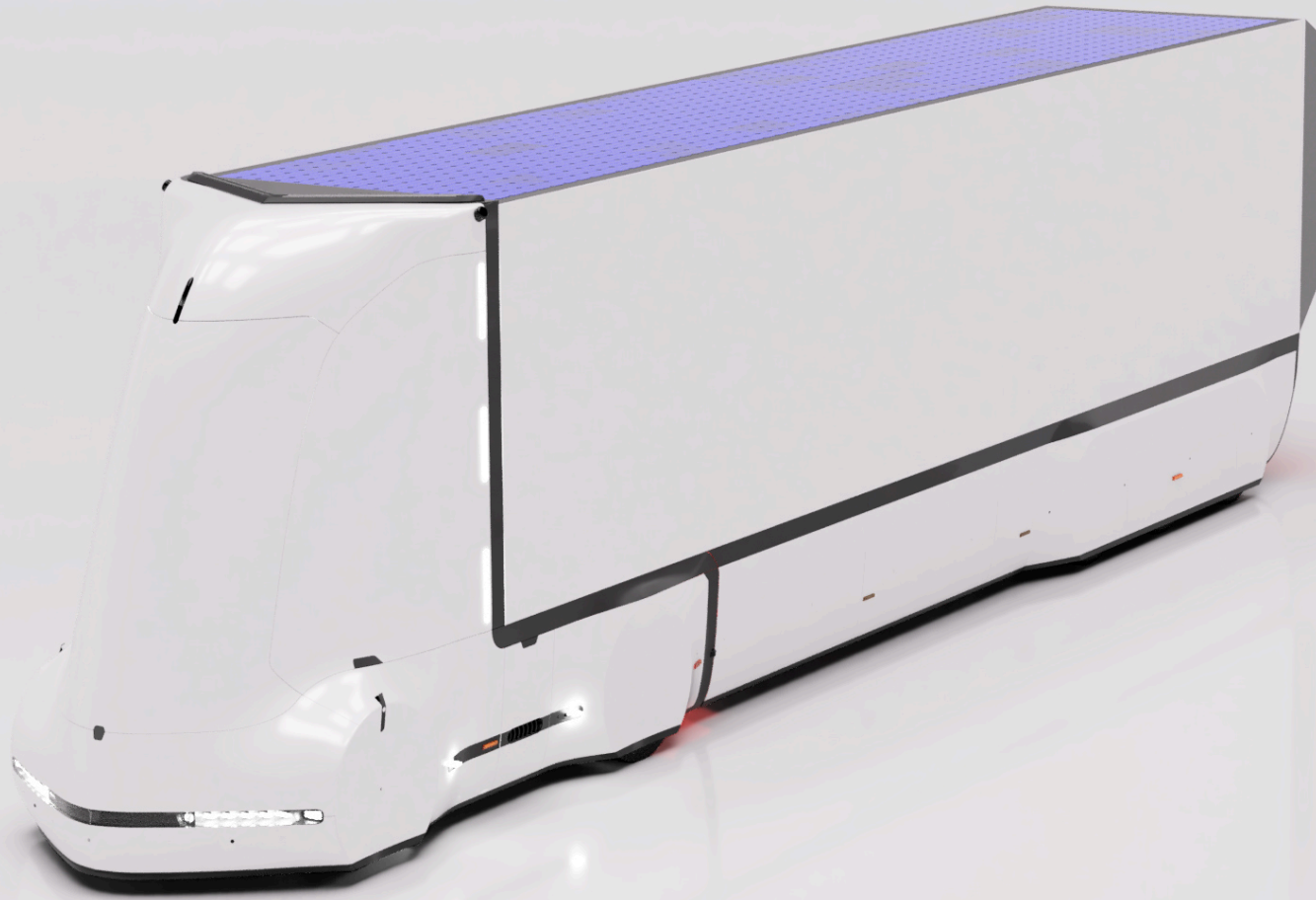
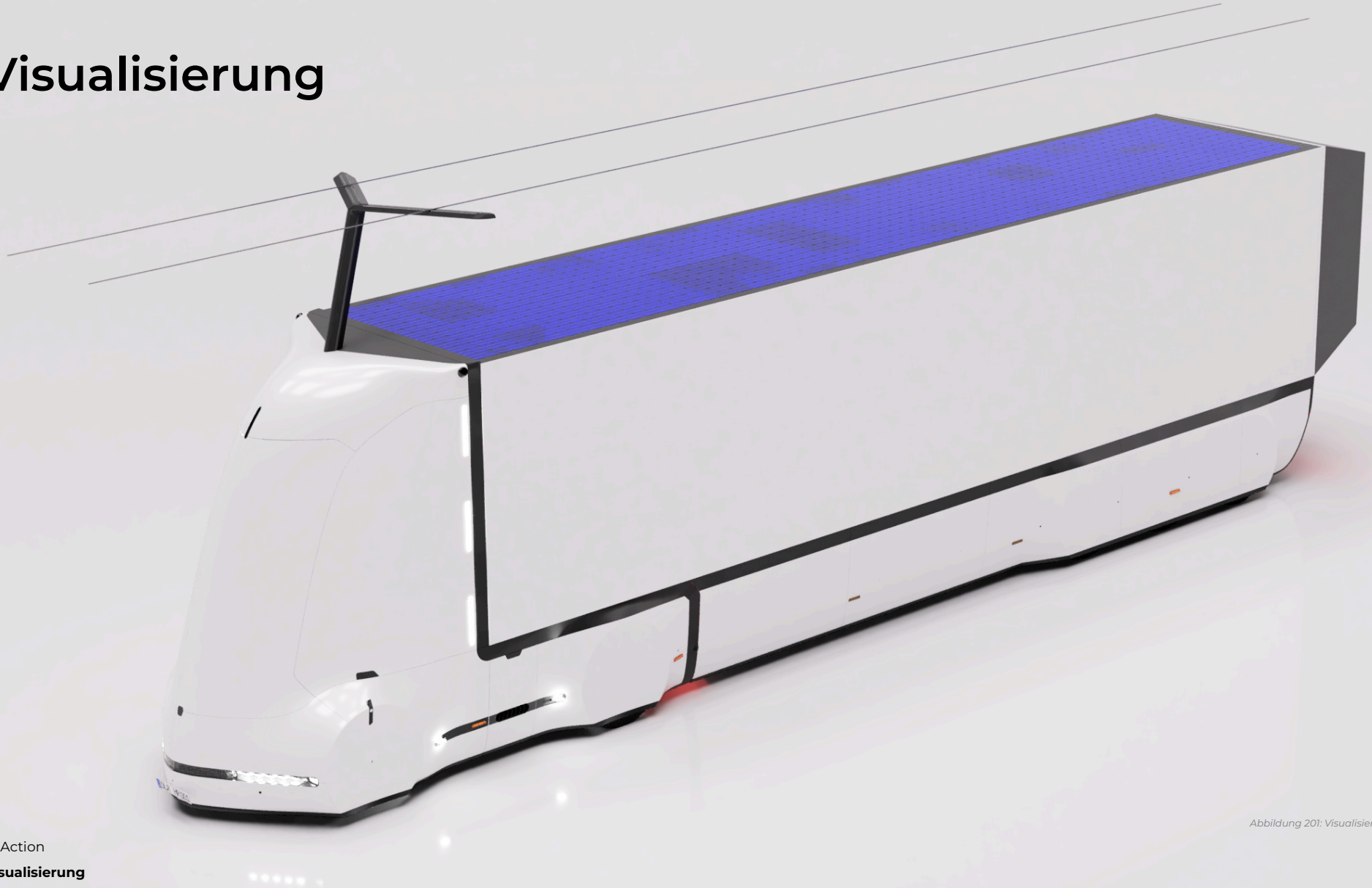


Abbildung 199: Visualisierung<sup>34</sup>



Abbildung 200: Kennzeichen<sup>34</sup>

# Visualisierung





# Visualisierung



# Zusammenfassung

## Fazit

Automotive Design umfasst komplexe Themenbereiche, die in dem Projekt behandelt wurden, wie Aerodynamik, Passanten-Sicherheit und autonomes Fahren und doch gibt es noch viele Bereiche in denen Designlösungen von Bedeutung sind, vor allem wie spezifisch die Interaktion von Verkehrsteilnehmern mit autonomen Fahrzeugen erfolgt.

Diese Arbeit behandelte Grundkonzepte für Sicherheit und Aerodynamik, wodurch im Bereich der Beleuchtung eine zukünftige Designanalyse möglich ist.

# Zusammenfassung

## Ausblick

Innovative Materialien und Fertigungsmethoden, wie additive Verfahren eröffnen besonders in der Formsprache und der Gestaltung eines Fahrzeugs neue Möglichkeiten für das Design und die Optimierung von Gewicht und Aerodynamik. Speziell für ein LKW-Konzept wäre es interessant die Karosserie mithilfe des 3D-Drucks zu konzipieren und experimentelle Formen auszuprobieren.

# Appendix

## Literaturverzeichnis

- 1 DLR - Institut für Fahrzeugkonzepte - Institut. <https://www.dlr.de/fk/desktopdefault.aspx/tabid-2827/>, Zugriff: 13.12.2023.
- 2 Statistisches Bundesamt. Güterverkehr. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/_inhalt.html), Zugriff: 15.12.2023.
- 3 Statista. Modal-Split - Güterverkehr von Lkw bis 2026 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/>, Zugriff: 15.12.2023.
- 4 Burke K. What Is an Autonomous Truck? | NVIDIA Blog. <https://blogs.nvidia.com/blog/what-is-autonomous-truck/>, Zugriff: 16.12.2023.
- 5 1 DLR-HDRT-Semesterprojekt Magdeburg.
- 6 Deutscher Bundestag. Deutscher Bundestag - Experten: Es fehlen bis zu 80.000 Lkw- und Busfahrer. <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw39-pa-verkehr-berufskraftfahrer-909058>, Zugriff: 15.12.2023.
- 7 LOCAL Id. 2023-Gemeinsames-Positionspapier-zur-Reform-der-Berufskraftfahrer-Ausbildung.
- 8 ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure. So groß ist der Fahrermangel wirklich. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/logistikfuerunternehmen/transportlogistik/so-gross-ist-der-fahrermangel-wirklich/>, Zugriff: 15.12.2023.
- 9 Collie B, Decker J, Fishman J, Wegscheider AK, Wiesinger M, Sridhara R. Mapping the Future of Autonomous Trucking. BCG Global 2022.
- 10 The Journalist's Resource. 5 studies for journalists covering the truck driver shortage. <https://journalistsresource.org/home/truck-driver-shortage/>, Zugriff: 15.12.2023.
- 11 Zarif R. Autonomous trucks lead the way. Deloitte 2021.
- 12 SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>, Zugriff: 15.12.2023.
- 13 SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>, Zugriff: 26.12.2023.
- 14 Gesetzgebung zum autonomen Fahren. [https://www.kba.de/DE/Themen/Marktueberwachung/Produktpruefungen/AutomatisiertesAutonomesFahren/Gesetzgebung/gesetzgebung\\_autonomes\\_fahren\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Themen/Marktueberwachung/Produktpruefungen/AutomatisiertesAutonomesFahren/Gesetzgebung/gesetzgebung_autonomes_fahren_node.html), Zugriff: 26.12.2023.
- 15 Road freight global pathways report. McKinsey & Company 2022.
- 16 pathways-to-faster-adoption-of-zero-emission-trucks-2021.
- 17 Man. MAN's full commitment to autonomous trucks | MAN Truck & Bus. <https://www.man.eu/corporate/en/experience/mans-full-commitment-to-autonomous-trucks-120256.html>, Zugriff: 16.12.2023.
- 18 [Nachname nicht vorhanden] {. Autonomous vehicles worldwide - statistics & facts. Statista 2022.
- 19 Statista. Projected sales of autonomous vehicles worldwide | Statista. <https://www.statista.com/statistics/1230733/projected-sales-autonomous-vehicles-worldwide/>, Zugriff: 15.12.2023.
- 20 Behance. Autonomous Truck Concept. <https://www.behance.net/gallery/35364121/Autonomous-Truck-Concept>, Zugriff: 29.12.2023.
- 21 Behance. BA THESIS // Volvo Autonomous Truck. <https://www.behance.net/gallery/83295175/BA-THESIS-Volvo-Autonomous-Truck>, Zugriff: 29.12.2023.
- 22 Behance. Mercedes Benz Euro-X. <https://www.behance.net/gallery/58930775/Mercedes-Benz-Euro-X>, Zugriff: 29.12.2023.
- 23 Behance. Volvo Truck 'BLATAND'. <https://www.behance.net/gallery/89878683/Volvo-Truck-BLATAND>, Zugriff: 29.12.2023.
- 24 DLR Verkehr. U-Shift | DLR Verkehr. <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/u-shift>, Zugriff: 29.12.2023.
- 25 Dot R. Red Dot Design Award: Trailer Drone. <https://www.red-dot.org/de/project/trailer-drone-60118>, Zugriff: 29.12.2023.
- 26 GM Surus Autonomer Truck.
- 27 Gruzovikus. <https://www.artlebedev.com/gruzovikus/>, Zugriff: 29.12.2023.
- 28 Jakub Kowalczyk. Battlefield 2042 - Autonomous Truck. <https://jakubkowalczyk.artstation.com/projects/148G0G>, Zugriff: 29.12.2023.
- 29 Mobility-Design – Wagner. <https://wagner.design.fh-aachen.de/projekte/mobility-design/>, Zugriff: 29.12.2023.
- 30 Pinterest. How The Cars Of Logan Grappled With The Very Real Future | Truck design, Trucks, Vehicles. <https://www.pinterest.de/pin/481463016406897213/>, Zugriff: 29.12.2023.
- 31 Pinterest. The Future Looks Quantum Clean! - Yanko Design | Truck design, Design, Futuristic cars. <https://www.pinterest.co.kr/pin/241013017539289331/>, Zugriff: 29.12.2023.
- 32 Zwick D. Autonome Lkw: Einride, Bosch und Daimler planen den „Geister“-Truck. WELT 2022.
- 33 Vera. <https://www.volvo Trucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/autonome-lkw/vera.html>, Zugriff: 29.12.2023.



# Appendix

## Literaturverzeichnis

- 34 Benjamin Plehn. Eigenerstellung.
- 35 Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. FAUN Citypower - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/faun-citypower/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 36 Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Hyundai Xcient Fuel Cell (2021) - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/hyundai-xcient-fuel-cell/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 37 Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. HYZON HyMax-250/450 - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/hyzon-hymax-250-450/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 38 IVECO produziert und vermarktet batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene schwere Nutzfahrzeuge unter der eigenen Marke. <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/Pages/-iveco-produziert-batterieelektrische-und-brennstoffzellenbetriebene-schwere-nutzfahrzeuge-unter-der-eigenen-marke.aspx>, Zugriff: 30.12.2023.
- 39 Kenworth Trucks. Kenworth Trucks. <https://www.kenworth.com/trucks/t680-fcev/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 40 Daimler Truck AG. Daimler Truck zeigt Praxistauglichkeit von Wasserstoff-Lkw im Rahmen der IAA Transportation 2022. <https://www.daimlertruck.com/newsroom/pressemitteilung/daimler-truck-zeigt-praxistauglichkeit-von-wasserstoff-lkw-im-rahmen-der-iaa-transportation-2022-52043855#prevId=52043887>, Zugriff: 30.12.2023.
- 41 Moore A. Quantron has a hydrogen fuel cell truck with a massive range of 930 miles. <https://www.hydrogenfuelnews.com/hydrogen-fuel-cell-truck-quantron/8555292/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 42 Volvo Trucks showcases new zero-emissions truck. <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/jun/volvo-trucks-showcases-new-zero-emissions-truck.html>, Zugriff: 30.12.2023.
- 43 eMobilität: Der eActros und seine Services. [https://www.mercedes-benz-trucks.com/de\\_DE/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html](https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html), Zugriff: 30.12.2023.
- 44 IVECO to produce and market its Heavy-Duty Battery EV and Heavy-Duty Fuel Cell EV under its own brand - IVECO Australia. <https://www.iveco.com.au/press-release/iveco-to-produce-and-market-its-heavy-duty-battery-ev-and-heavy-duty-fuel-cell-ev-under-its-own-brand>, Zugriff: 30.12.2023.
- 45 & MT, SE B. MAN eTGX | MAN DE. <https://www.man.eu/de/de/lkw/alle-modelle/der-man-tgx/der-man-etgx/uebersicht.html>, Zugriff: 30.12.2023.
- 46 Nikola Corporation. Nikola Battery-Electric Vehicle. <https://nikolamotor.com/the-nikola-tre-bev-reinventing-short-haul-transportation/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 47 Hoffmann J. Neue E-Tech-Lkw, neues Logo 2022.
- 48 Scania Group. Electric trucks - a complete solution. <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html>, Zugriff: 30.12.2023.
- 49 Tesla. Semi | Tesla. <https://www.tesla.com/semi>, Zugriff: 30.12.2023.
- 50 Electric trucks | Volvo Trucks. <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/renewable-fuels/electric-trucks.html>, Zugriff: 30.12.2023.
- 51 Super Dispatch. Tesla's Semi is Here: Are All-Electric Trucks the Future of Car Hauling? <https://superdispatch.com/blog/teslas-semi-is-here-are-all-electric-trucks-the-future-of-car-hauling/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 52 Quantron. QUANTRON QHM FCEV für den emissionsfreien Transport. <https://www.quantron.net/q-truck/q-heavy/qhm-fcev/>, Zugriff: 30.12.2023.
- 53 2020\_DIHK\_Broschüre\_Wasserstoff\_A4\_final.indd.
- 54 H2.LIVE. Wasserstoff tanken in Deutschland & Europa - H2.LIVE. <https://h2.live/tankstellen/>, Zugriff: 01.01.2024.
- 55 BdeW. BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2023. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, Zugriff: 01.01.2024.
- 56 Statista. Themenseite: Ladeinfrastruktur für Elektroautos. <https://de.statista.com/themen/8348/ladeinfrastruktur-fuer-elektroautos/#topicOverview>, Zugriff: 30.12.2023.
- 57 Volkswagen Newsroom. Batterie oder Brennstoffzelle, das ist hier die Frage. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/batterie-oder-brennstoffzelle-das-ist-hier-die-frage-5868>, Zugriff: 30.12.2023.
- 58 § 32 StVZO - Einzelnorm. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/\\_32.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/_32.html), Zugriff: 05.01.2024.
- 59 Audi Truck | 3D CAD Model Library | GrabCAD. <https://grabcad.com/library/audi-truck-2>, Zugriff: 02.01.2024.
- 60 Ocean Transport. <https://www.maersk.com/transportation-services/ocean-transport>, Zugriff: 02.01.2024.
- 61 LKW FAHRER GESUCHT. Containertrucking - Container

# Appendix

## Literaturverzeichnis

Transport: So funktioniert der weltweite Güterverkehr. <https://lkw-fahrer-gesucht.com/fernfahrer-magazin/31/container-transport-im-kombinierten-gueterverkehr.html#Prozente>, Zugriff: 02.01.2024.

- 62 MC Containers. Einen 12 m Container mieten | MC Containers. <https://mccontainers.de/Produkt/40-lagercontainer-2/#dimensions>, Zugriff: 02.01.2024.
- 63 Remorque Porte-Conteneurs (Container) | 3D CAD Model Library | GrabCAD. <https://grabcad.com/library/remorque-porte-conteneurs-container-1>, Zugriff: 02.01.2024.
- 64 Knecht, Uli Baumann,uba,Gregor Hebermehl,Thomas Harloff,Jochen. Tesla Semi BEV-Truck: Drei Plaid-Motoren und 1.000-Volt-Architektur. <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/tesla-semi-truck-2022-daten-fotos-marktstart-elektro-lkw-reichweite/>, Zugriff: 02.01.2024.
- 65 Tesla auf X: „Semi has a tri-motor system & carbon-sleeved rotors just like Plaid. 1 unit for efficiency, 2 acceleration units for torque <https://t.co/MDn4cj0jzO>“ / X. <https://twitter.com/Tesla/status/1598489087752933377>, Zugriff: 02.01.2024.
- 66 InsideEVs Deutschland. Tesla Semi: Technik-Bilder zeigen Akkupakete und Antrieb. <https://insideevs.de/news/629147/tesla-semi-technische-zeichnungen-akkus/>, Zugriff: 02.01.2024.
- 67 Tesla Rear Drive Unit | 3D CAD Model Library | GrabCAD. <https://grabcad.com/library/tesla-rear-drive-unit-1>, Zugriff:

02.01.2024.

- 68 PepsiCo cites consumption of 1.1 kWh/km for Tesla Semi | electrive.com. <https://www.electrive.com/2023/08/15/pepsico-cites-consumption-of-1-1-kwh-km-for-tesla-semi/>, Zugriff: 02.01.2024.
- 69 InsideEVs. Tesla's 4680-Type Battery Cell Teardown: Specs Revealed. <https://insideevs.com/news/598656/tesla-4680-battery-cell-specs/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 70 Reitberger S. Super-Akkus sollen E-Autos revolutionieren: Das ist wirklich an der Technik dran. [https://efahrer.chip.de/news/super-akkus-sollen-e-autos-revolutionieren-das-ist-wirklich-an-der-technik-dran\\_107961](https://efahrer.chip.de/news/super-akkus-sollen-e-autos-revolutionieren-das-ist-wirklich-an-der-technik-dran_107961), Zugriff: 02.01.2024.
- 71 Sp-x. Induktives Laden: Mahle arbeitet am Abschied vom Kabel - Electrified. <https://www.electrifiedmagazin.de/elektro/induktives-laden/14484/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 72 e-auto-laden-waehrend-des-einkauf-2-400-neue-ladepunkte-vorm-supermarkt-6480.jpg (1200x545). [https://www.vau-max.de/thumbs/img/News/80/64/00/p/p\\_full/e-auto-laden-waehrend-des-einkauf-2-400-neue-ladepunkte-vorm-supermarkt-6480.jpg](https://www.vau-max.de/thumbs/img/News/80/64/00/p/p_full/e-auto-laden-waehrend-des-einkauf-2-400-neue-ladepunkte-vorm-supermarkt-6480.jpg), Zugriff: 03.01.2024.
- 73 Siemens Mobility Global. eHighway. <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/strasse/ehighway.html>, Zugriff: 03.01.2024.
- 74 bild\_scania\_lkw\_2\_3.jpg (1024x485), Zugriff: 03.01.2024.
- 75 32216280-oberleitung-lkw-iaa-transportation-2qxSSIFs170.jpg (768x432), Zugriff: 03.01.2024.
- 76 DRIVE AGX Orin Getting Started Information.
- 77 nvidia-drive-platform-for-developers.
- 78 NVIDIA. NVIDIA Drive Hardware for Self-Driving Cars. <https://www.nvidia.com/en-us/self-driving-cars/hardware/>, Zugriff: 16.12.2023.

- 79 Safety research. <https://www.volvotrucks.com/en-en/about-us/who-we-are/our-values/safety/safety-research.html>, Zugriff: 04.01.2024.
- 80 EN\_CT\_TW\_Guide\_Bout\_avant\_V2\_Signe.pdf.
- 81 EP3670289B1 - Persönliche Schutzvorrichtung zur Befestigung an der Unterseite eines Schienenfahrzeugs - Google Patents. [https://patents.google.com/patent/EP3670289B1/de?q=\(B61F19%2f06\)](https://patents.google.com/patent/EP3670289B1/de?q=(B61F19%2f06)), Zugriff: 09.01.2024.
- 82 Motor1.com. Bilder: Audi RSQ Concept (2004) | Motor1.com. <https://de.motor1.com/photos/811616/audi-rsq-concept-2004/>, Zugriff: 04.01.2024.
- 83 Daimler Truck AG. Daimler Truck zeigt Praxistauglichkeit von Wasserstoff-Lkw im Rahmen der IAA Transportation 2022. <https://www.daimlertruck.com/newsroom/pressemitteilung/daimler-truck-zeigt-praxistauglichkeit-von-wasserstoff-lkw-im-rahmen-der-iaa-transportation-2022-52043855?modal=asset-modal-uid-2493>, Zugriff: 04.01.2024.
- 84 stern.de. 500 Kilometer in 30 Minuten: Schnellladestation soll Elektro-Lkw mit Solarenergie versorgen. <https://www.stern.de/auto/e-mobilitaet/usa--schnellladestation-soll-elektro-lkw-mit-solarenergie-versorgen-30778954.html>, Zugriff: 04.01.2024.
- 85 Redaktion VW. Ein Truck für die Zukunft - VWI Verband Deutscher Wirtschaftsingenieure e.V. <https://vwi.org/2018/09/ein-truck-fuer-die-zukunft/>, Zugriff: 04.01.2024.
- 86 co2. tuvsudnderungen-an-fahrzeugen-gem-33-kfg-tirol.
- 87 Calculating the Coefficient of Drag - Urbee Example. <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/2P7gnfKohR8Rz8LWmu0UvG.html>, Zugriff: 06.01.2024.
- 88 Siemens Mobility Global.
- 89 Aerodynamische Verbesserungen. <https://www.volvotrucks.com>

Literaturverzeichnis

# Appendix

## Literaturverzeichnis

- de/de-de/innovationen/kraftstoff-effizienz/hintergrundwissen/neue-aerodynamische-verbesserung-um-kraftstoff-zu-sparen.html, Zugriff: 07.01.2024.
- 90 Bewegungs- und Positionssensor. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/bewegungs-und-positionssensor/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 91 Kameraköpfe. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/kamera/kamerakoepfe/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 92 Multifunktionskamera Generation 3 für schwere Nutzfahrzeuge. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/kamera/multifunktionskamera-generation-3-lkw/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 93 Multifunktionskamera. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/kamera/multifunktionskamera/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 94 Nahbereichskamera. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/kamera/nahbereichskamera/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 95 Ultraschallsensor. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/ultraschallsensor/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 96 Eck-Radarsensor. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/eck-radarsensor/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 97 Front-Radarsensor. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/front-radarsensor/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 98 Front-Radarsensor für schwere Nutzfahrzeuge. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/front-radarsensor-lkw/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 99 Seiten-Radarsensor für schwere Nutzfahrzeuge. <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/seiten-radarsensor-lkw/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 100 Ouster | Dataspeed. <https://www.dataspeedinc.com/ouster/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 101 Velodyne Lidar. Velodyne LiDAR Launches VLS-128™, The World's Highest Resolution LiDAR for Autonomous Vehicles | Velodyne Lidar. <https://velodynelidar.com/press-release/velodyne-lidar-launches-vls-128-the-worlds-highest-resolution-lidar-for-autonomous-vehicles/>, Zugriff: 03.01.2024.
- 102 Bi-LED-Abblend- und Fernscheinwerfer SlimLine | HELLA. <https://www.hella.com/soe/de/Kundensegmente/Truck-1864/#products>, Zugriff: 01.02.2024.
- 103 W. Lange/A. Windel. Kleine Ergonomische Datensammlung.
- 104 maxresdefault.jpg (1280×720), Zugriff: 13.01.2024.
- .

Literaturverzeichnis

# Appendix

## Abbildungsverzeichnis

·	Abbildung 1: SAE Levels of Driving Automation <sup>12</sup>	11	·	Abbildung 26: Kenworth FCEV Truck <sup>39</sup>	22	·	Abbildung 57: 950 kWh Batterie Module <sup>34</sup>	31
·	Abbildung 2: Statista erwartete Verkaufszahlen autonomer Fahrzeuge bis 2030 <sup>9</sup>	14	·	Abbildung 27: Mercedes GenH2 <sup>40</sup>	22	·	Abbildung 58: Mahle induktives Laden <sup>71</sup>	32
·	Abbildung 3: Autonomous Truck Konzept von Zoltan Major <sup>20</sup>	15	·	Abbildung 28: QUANTRON QHM FCEV <sup>41</sup>	22	·	Abbildung 59: E-Auto Ladevorgang <sup>72</sup>	32
·	Abbildung 4: Volvo Autonomous Truck von Joseph Chaigner <sup>21</sup>	15	·	Abbildung 29: Volvo FCEV Truck <sup>42</sup>	22	·	Abbildung 60: e-Highway von Siemens <sup>73</sup>	33
·	Abbildung 5: Mercedes Benz Euro-X Konzept von Muyeon Cho <sup>22</sup>	15	·	Abbildung 30: Daimler Mercedes BEV Truck <sup>43</sup>	23	·	Abbildung 61: Siemens Oberleitung Dynamisches Laden <sup>73</sup>	33
·	Abbildung 6: Volvo BLATAND Konzept von Jason HA <sup>23</sup>	15	·	Abbildung 31: Iveco Heavy Duty BEV <sup>44</sup>	23	·	Abbildung 62: Dynamisches Laden Scania LKW <sup>74</sup>	34
·	Abbildung 7: U-Shift von dem DLR <sup>24</sup>	15	·	Abbildung 32: MAN BEV eTGX <sup>45</sup>	23	·	Abbildung 63: RWTH Aachen University Dynamisches Laden Prototyp <sup>75</sup>	34
·	Abbildung 8: U-Shift von dem DLR <sup>24</sup>	15	·	Abbildung 33: Nikola BEV <sup>46</sup>	23	·	Abbildung 64: Stromabnehmer Komponenten Entwurf 1 <sup>34</sup>	34
·	Abbildung 9: Hyundai Trailer Drone <sup>25</sup>	15	·	Abbildung 34: Renault T/C E-Tech <sup>47</sup>	24	·	Abbildung 65: DRIVE AGX Orin DevKit <sup>77</sup>	35
·	Abbildung 10: Hyundai Trailer Drone <sup>25</sup>	15	·	Abbildung 35: Scania BEV Truck <sup>48</sup>	24	·	Abbildung 66: DRIVE AGX Orin DevKit Gehäuse <sup>77</sup>	35
·	Abbildung 11: GM Surus Autonomous Truck <sup>26</sup>	15	·	Abbildung 36: Tesla Semi BEV Truck <sup>49</sup>	24	·	Abbildung 67: Volvo Safety Research <sup>79</sup>	36
·	Abbildung 12: Autonomous Truck Konzept von Art Lebedev <sup>27</sup>	15	·	Abbildung 37: Volvo BEV Trucks <sup>50</sup>	24	·	Abbildung 68: Unfallart 1 Frontalkollision <sup>79</sup>	37
·	Abbildung 13: Autonomous Truck Konzept von Jakub Kowalczyk <sup>28</sup>	15	·	Abbildung 38: Tesla Semi BEV <sup>51</sup>	25	·	Abbildung 69: Unfallart 2 Abbiegung mit Auto <sup>79</sup>	37
·	Abbildung 14: Mobility-Design von Prof. Dipl.-Des. Manfred Wagner <sup>29</sup>	15	·	Abbildung 39: QUANTRON QHM FCEV <sup>52</sup>	25	·	Abbildung 70: Unfallart 3 Fußgängerüberquerung <sup>79</sup>	37
·	Abbildung 15: Autonomous Truck Concept von Che Broadnax <sup>30</sup>	15	·	Abbildung 40: Volkswagen Analyse BEV vs FCEV <sup>57</sup>	26	·	Abbildung 71: Unfallart 4 Abbiegung mit Radfahrer <sup>79</sup>	38
·	Abbildung 16: Quantum Levitate von Michael Bedell <sup>31</sup>	15	·	Abbildung 41: Audi Truck <sup>34</sup>	27	·	Abbildung 72: Unfallart 5 Verlassen der Fahrbahn <sup>79</sup>	38
·	Abbildung 17: Einride Truck <sup>32</sup>	15	·	Abbildung 42: Audi Truck <sup>39</sup>	27	·	Abbildung 73: Unfallart 6 Kollision mit vorausfahrendem LKW <sup>79</sup>	38
·	Abbildung 18: Volvo Vera <sup>33</sup>	15	·	Abbildung 43: Audi Truck Chassis <sup>34</sup>	27	·	Abbildung 74: Unfallart 4 Abbiegung mit Radfahrer <sup>79</sup>	39
·	Abbildung 19: Package Anordnung 1 <sup>34</sup>	18	·	Abbildung 44: 40 Fuß Standardcontainer <sup>62</sup>	28	·	Abbildung 75: Radfahrer-Unfallsituation <sup>79</sup>	39
·	Abbildung 20: Package Anordnung 2 <sup>34</sup>	19	·	Abbildung 45: 40 Fuß Container Anhänger <sup>63</sup>	28	·	Abbildung 76: Technischer Leitfaden Straßenbahnnorm <sup>80</sup>	40
·	Abbildung 21: Package Anordnung 3 <sup>34</sup>	20	·	Abbildung 46: 40 Fuß Container Anhänger <sup>34</sup>	28	·	Abbildung 77: Kollisionsfläche <sup>80</sup>	40
·	Abbildung 22: FAUN Citypower <sup>35</sup>	21	·	Abbildung 47: 40 Fuß Container Anhänger <sup>34</sup>	28	·	Abbildung 78: Front End Maße und Winkel <sup>80</sup>	41
·	Abbildung 23: Hyundai Xcient Fuel Cell Truck <sup>36</sup>	21	·	Abbildung 48: Tesla Semi Motor Layout <sup>65</sup>	29	·	Abbildung 79: Front End Maße und Winkel <sup>80</sup>	41
·	Abbildung 24: HYZON HyMax-250/450 <sup>37</sup>	21	·	Abbildung 49: Tesla Semi Motor 1 <sup>66</sup>	29	·	Abbildung 80: Windschutzscheibe-Verkleidung Aufbau <sup>80</sup>	41
·	Abbildung 25: Iveco Heavy Duty FCEV <sup>38</sup>	21	·	Abbildung 50: Tesla Semi Motor 2 <sup>66</sup>	29	·	Abbildung 81: Frontflächen-Bereiche <sup>80</sup>	42
			·	Abbildung 51: Tesla Plaid Motor <sup>67</sup>	29	·	Abbildung 82: Wertetabelle <sup>80</sup>	42
			·	Abbildung 52: Tesla Plaid Motor Layout <sup>34</sup>	29	·	Abbildung 83: Patent Persönliche Schutzvorrichtung von Alstom Transportation <sup>81</sup>	43
			·	Abbildung 53: Tesla Semi Batteriepack <sup>66</sup>	30	·	Abbildung 84: Audi Rsq Concept 2004 <sup>82</sup>	45
			·	Abbildung 54: Tesla Battery Cell <sup>70</sup>	30	·	Abbildung 85: Audi Rsq Concept 2004 Seitenansicht <sup>82</sup>	45
			·	Abbildung 55: 100 kWh Batterie Modul <sup>34</sup>	31			
			·	Abbildung 56: 100 kWh Modul Gehäuse <sup>34</sup>	31			

Abbildungsverzeichnis

# Appendix

## Abbildungsverzeichnis

·	Abbildung 86: Audi Rsq Concept 2004 Radkasten <sup>82</sup>	45	·	Abbildung 109: Iteration 1 mit 100 mm Spline-Kontrollgriff-Länge <sup>34</sup>	53	·	Abbildung 134: Vierter Entwurf Zebrastreifen <sup>34</sup>	64
·	Abbildung 87: Audi Rsq Concept 2004 Rückansicht <sup>82</sup>	45	·	Abbildung 110: Iteration 1 bis 10 Profilansicht <sup>34</sup>	53	·	Abbildung 135: Vierter Entwurf Vogelperspektive <sup>34</sup>	64
·	Abbildung 88: Mercedes Gen H2 <sup>83</sup>	46	·	Abbildung 111: Vergleich c(w)-Wert & Körperfläche Iteration 1 - 10 <sup>34</sup>	54	·	Abbildung 136: Dritter Entwurf Formanalyse <sup>34</sup>	65
·	Abbildung 89: Tesla Semi Seitenverkleidung <sup>84</sup>	46	·	Abbildung 112: Profilansichten Übersicht Iteration 1-10.png <sup>34</sup>	55	·	Abbildung 137: Vierter Entwurf Formanalyse <sup>34</sup>	65
·	Abbildung 90: TUM Truck der Zukunft <sup>85</sup>	46	·	Abbildung 113: CFD Übersicht Iterationen 1-10.png <sup>34</sup>	55	·	Abbildung 138: BOSCH Bewegungs- und Positionssensor <sup>90</sup>	66
·	Abbildung 91: Blockierte Auslenkungsbereiche <sup>34</sup>	47	·	Abbildung 114: V9 Iteration 9 CFD Radkanten-Vergleich mit Tangentialgewichtung <sup>34</sup>	0,5	56	Abbildung 139: BOSCH Kameraköpfe <sup>91</sup>	66
·	Abbildung 92: Erster Entwurf Package <sup>34</sup>	48	·	Abbildung 115: V11 1200 Iteration 13 CFD Radkanten-Vergleich mit Tangentialgewichtung <sup>34</sup>	1,0	56	Abbildung 140: BOSCH Multifunktionskamera <sup>92</sup>	66
·	Abbildung 93: Erster Entwurf Package Vogelperspektive <sup>34</sup>	48	·	Abbildung 116: Radkanten-Vergleich von Iteration 9 & 11 <sup>34</sup>	56	·	Abbildung 141: BOSCH Multifunktionskamera <sup>93</sup>	66
·	Abbildung 94: Erster Entwurf Übersicht <sup>34</sup>	48	·	Abbildung 117: Future eHighway Siemens Konzeptstudie <sup>88</sup>	57	·	Abbildung 142: BOSCH Nahbereichskamera <sup>94</sup>	66
·	Abbildung 95: Erster Entwurf Vogelperspektive <sup>34</sup>	48	·	Abbildung 118: Iteration 4 mit Komponenten des Stromabnehmers in Blau <sup>34</sup>	57	·	Abbildung 143: Kamera Sensoren Übersicht Front <sup>34</sup>	67
·	Abbildung 96: Zweiter Entwurf Package <sup>34</sup>	49	·	Abbildung 119: Iteration 12 mit Komponenten des Stromabnehmers in Blau <sup>34</sup>	57	·	Abbildung 144: Kamera Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	67
·	Abbildung 97: Zweiter Entwurf Package Vogelperspektive <sup>34</sup>	49	·	Abbildung 120: Stromabnehmer ausgefahren <sup>34</sup>	58	·	Abbildung 145: Kamera Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	67
·	Abbildung 98: Zweiter Entwurf Übersicht <sup>34</sup>	49	·	Abbildung 121: Vogelperspektive der Iteration 4 mit Stromabnehmers in Blau <sup>34</sup>	58	·	Abbildung 146: BOSCH Ultraschallsensor <sup>95</sup>	68
·	Abbildung 99: Zweiter Entwurf Vogelperspektive <sup>34</sup>	49	·	Abbildung 122: Vogelperspektive der Iteration 12 mit Stromabnehmers in Blau <sup>34</sup>	58	·	Abbildung 147: Ultraschall Sensoren Übersicht Front <sup>34</sup>	69
·	Abbildung 100: Erster Entwurf CFD Übersicht <sup>34</sup>	50	·	Abbildung 123: Iteration 12 bis 16 <sup>34</sup>	59	·	Abbildung 148: Ultraschall Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	69
·	Abbildung 101: Erster Entwurf CFD Frontansicht <sup>34</sup>	50	·	Abbildung 124: Vergleich c(w)-Wert & Körperfläche Iteration 12 - 16 <sup>34</sup>	60	·	Abbildung 149: Ultraschall Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	69
·	Abbildung 102: Erster Entwurf CFD statischer Druck <sup>34</sup>	50	·	Abbildung 125: Profilansichten Übersicht Iteration 12 - 16 <sup>34</sup>	61	·	Abbildung 150: BOSCH Eck-Radarsensor <sup>96</sup>	70
·	Abbildung 103: Zweiter Entwurf CFD Übersicht <sup>34</sup>	51	·	Abbildung 126: CFD Übersicht Iterationen 12 - 16 <sup>34</sup>	61	·	Abbildung 151: BOSCH Front-Radarsensor <sup>97</sup>	70
·	Abbildung 104: Zweiter Entwurf CFD Frontansicht <sup>34</sup>	51	·	Abbildung 127: Zugmaschine-Anhänger Spalt <sup>34</sup>	62	·	Abbildung 152: BOSCH Front-Radarsensor für LKW <sup>98</sup>	70
·	Abbildung 105: Zweiter Entwurf CFD statischer Druck <sup>34</sup>	51	·	Abbildung 128: Luftstromklappen eingefahren <sup>34</sup>	62	·	Abbildung 153: BOSCH Seiten-Radarsensor für LKW <sup>99</sup>	70
·	Abbildung 106: Formel für Luftwiderstandsbeiwert <sup>87</sup>	52	·	Abbildung 129: Luftstromklappen Ausgefahren <sup>34</sup>	62	·	Abbildung 154: Radar Sensoren Übersicht Front <sup>34</sup>	71
·	Abbildung 107: Erster Entwurf Seitenansicht <sup>34</sup>	52	·	Abbildung 130: Dritter Entwurf Oberfläche <sup>34</sup>	63	·	Abbildung 155: Radar Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	71
·	Abbildung 108: Zweiter Entwurf Seitenansicht <sup>34</sup>	52	·	Abbildung 131: Dritter Entwurf Zebrastreifen <sup>34</sup>	63	·	Abbildung 156: Radar Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	71
			·	Abbildung 132: Dritter Entwurf Vogelperspektive <sup>34</sup>	63	·	Abbildung 157: Ouster LIDAR <sup>100</sup>	72
			·	Abbildung 133: Vierter Entwurf Oberfläche <sup>34</sup>	64	·	Abbildung 158: Velodyne LIDAR <sup>101</sup>	72
						·	Abbildung 159: LIDAR Sensoren Übersicht Front <sup>34</sup>	73
						·	Abbildung 160: LIDAR Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	73
						·	Abbildung 161: LIDAR Sensoren Übersicht Heck <sup>34</sup>	73
						·	Abbildung 162: Hella-Bi-LED-Abblend- und Fernscheinwerfer SlimLine <sup>102</sup>	74
						·	Abbildung 163: LED-Heckleuchte Ringmodul 112 mm <sup>102</sup>	74

# Appendix

## Abbildungsverzeichnis

·	Abbildung 164: LED-Nebelscheinwerfer L 4060 <sup>102</sup>	74	·	Abbildung 185: Wartungsklappe <sup>34</sup>	80
·	Abbildung 165: Tag,Position,Blink-LED-Kombinationsleuchte LEDayFlex III <sup>102</sup>	74	·	Abbildung 186: Handmaße <sup>103</sup>	81
·	Abbildung 166: LED-Zusatzbremsleuchte LongLED 64 <sup>102</sup>	74	·	Abbildung 187: Handbreite <sup>103</sup>	81
·	Abbildung 167: LED-Zusatzfärscheinwerfer LED Light Bar 470 PO <sup>102</sup>	74	·	Abbildung 188: BMW Vision Next 100 <sup>104</sup>	82
·	Abbildung 168: LED-Seitenmarkierungsleuchte SHAPELINE <sup>102</sup>	75	·	Abbildung 189: Auslenkung des Vorderrads <sup>34</sup>	82
·	Abbildung 169: LED-Heckleuchte 66 mm <sup>102</sup>	75	·	Abbildung 190: Lüftungsöffnung <sup>34</sup>	82
·	Abbildung 170: Rückstrahler SHAPELINE <sup>102</sup>	75	·	Abbildung 191: Farbelement an der Front <sup>34</sup>	83
·	Abbildung 171: Projektionsmodul <sup>102</sup>	76	·	Abbildung 192: Farbkonzept Heckansicht <sup>34</sup>	83
·	Abbildung 172: Projektion Fußgängerüberweg <sup>102</sup>	76	·	Abbildung 193: Farbelement an der Seite <sup>34</sup>	83
·	Abbildung 173: Scheinwerfer Layout <sup>34</sup>	77	·	Abbildung 194: Anhänger CFD-Analyse Seitenansicht <sup>34</sup>	84
·	Abbildung 174: Scheinwerfer Layout Heckansicht <sup>34</sup>	77	·	Abbildung 195: Anhänger CFD-Analyse Vogelperspektive <sup>34</sup>	84
·	Abbildung 175: Signalprojektion auf die Karosserie <sup>34</sup>	77	·	Abbildung 196: Anhänger Übersicht <sup>34</sup>	84
·	Abbildung 176: Ladevorgang mit Tankdeckel geöffnet <sup>34</sup>	78	·	Abbildung 197: Anhänger Seitenansicht <sup>34</sup>	84
·	Abbildung 177: Ladekontakt hergestellt <sup>34</sup>	78	·	Abbildung 198: Anhänger Heckansicht <sup>34</sup>	84
·	Abbildung 178: Körpermaße <sup>103</sup>	78	·	Abbildung 199: Visualisierung <sup>34</sup>	85
·	Abbildung 179: Ellenbogenhöhe für Tankdeckelposition <sup>103</sup>	78	·	Abbildung 200: Kennzeichen <sup>34</sup>	86
·	Abbildung 180: Autonomes Laden Ausrichtung <sup>34</sup>	79	·	Abbildung 201: Visualisierung in Action <sup>34</sup>	87
·	Abbildung 181: Autonomes Aufladen <sup>34</sup>	79	·	Abbildung 202: Betrieb auf der Landstraße <sup>34</sup>	88
·	Abbildung 182: Autonomes Laden Ausrichtung <sup>34</sup>	79	·	Abbildung 203: Fahrt auf der Landstraße in der Abenddämmerung <sup>34</sup>	98
·	Abbildung 183: Öffnung des seitlichen Karosserieelements <sup>34</sup>	80			
·	Abbildung 184: Öffnung der Radkappe <sup>34</sup>	80			

Abbildungsverzeichnis



DLR

h<sup>2</sup>  
Hydrogen Energy Research Center

DLR HR001