



Thomas Czerwinka, BSc.

**Verkleidbarkeit von Fahrwerken
für
Hochgeschwindigkeitszüge**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik
Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Alexander Prix
SIEMENS Mobility Werk Graz

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Der Trend in der Entwicklung von modernen Hochgeschwindigkeitszügen geht immer mehr in Richtung energieeffizienter Zugkonzepte. Ein Schritt zur Einsparung an Energie ist die Reduzierung des Fahrwiderstands. Da der Luftwiderstand bei Hochgeschwindigkeitszügen den größten Anteil am Fahrwiderstand hat, sind in diversen Vorstudien die Anteile der Komponenten am Luftwiderstand ermittelt worden. Es zeigte sich, dass die Fahrwerke mit fast einem Drittel am Luftwiderstand beteiligt sind. Diese Erkenntnis war der ausschlaggebende Grund für die vorliegende Arbeit. In dieser Arbeit mit dem Titel „Verkleidbarkeit von Fahrwerken für Hochgeschwindigkeitszüge“ wird die konstruktive Umsetzbarkeit einer aerodynamisch optimierten Verkleidung um und am Fahrwerk untersucht. Dabei stellt die entstehende Wärme während einer Vollbremsung aus der Höchstgeschwindigkeit ein Problem für die Vollverkleidung der Fahrwerke dar. Aufgrund der entstehenden „Stauwärme“ unter der Verkleidung könnte es zu einer Überhitzung von Bauteilen kommen und der Betrieb des Fahrzeugs kann nicht mehr sichergestellt werden. Einer der beiden Hauptaufgaben dieser Arbeit ist es, einen praxisnahen Feldversuch zur Ermittlung des Entwärmungsverhaltens von verkleideten Fahrwerken darzustellen. Die zweite Aufgabe beschäftigt sich mit der Machbarkeit einer aerodynamisch optimierten Unterbodenverkleidung am Fahrwerk. Dabei werden Konstruktionen realisierbarer Verkleidungsvarianten dargelegt und hinsichtlich des Luftwiderstands, des Gewichts und der Bahntauglichkeit bewertet. Anschließend wird die bevorzugte Unterbodenkonstruktion mittels ProE-Mechanica® vorausgelegt und optimiert. Zum Abschluss wird der Einfluss der Verkleidung bei der präventiven und korrektiven Instandhaltung betrachtet.

Abstract

The trend in the development of modern high-speed trains goes to energy-efficient train concepts. This thesis deals with the reduction of the energy consumption of modern high speed trains. One possibility of saving energy is to reduce the running resistance. The air resistance has the most influence on the running resistance. This was the reason for some preliminary studies which have shown that the bogie has a share of nearly thirty percent on the air resistance. This was the initial point for this master thesis with the title "technical feasibility for bogie fairings for high speed trains". In this thesis the technical feasibility of an aerodynamically optimized fairing is analyzed. One Problem of a covered bogie is the resulting heat because of the mechanical braking system. During a brake application from the maximum speed to standstill of the train several components in the cavity can achieve the critical temperature. Subsequently the safe operation of the train can no longer be ensured. One of the two main tasks in this thesis is the realization of a field test to analyze the behavior of covered bogies. The other task was to design an aerodynamic optimized fairing underneath the bogie. This task also includes the strength calculation of the fairing. At the end of this thesis the influence of bogie fairings on the preventive and corrective maintenance was analyzed.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1 Hochgeschwindigkeitszüge.....	5
1.2 Fahrwerke von Hochgeschwindigkeitszügen.....	7
1.3 Der Radsatz und die Räder.....	8
1.4 Die Radsatzführung/Das Radsatzlagergehäuse.....	9
1.5 Der Rahmen	10
1.6 Bremssystem im Fahrwerk.....	10
1.6.1 Klotzbremse	11
1.6.2 Wellenscheibenbremse	11
1.7 Dämpfer.....	12
2. Energetische Betrachtungen	14
2.1 Fahrwiderstände	14
2.2 Der Luftwiderstand W_L	15
2.3 Verkleidung der Fahrwerke	17
3. Aufgabenstellung	20
4. Entwärmungsversuch	21
4.1 Das Versuchskonzept/Wärmeeintrag.....	21
4.2 Der Prüfstand.....	24
4.2.1 Das Fahrwerk	24
4.2.2 Die Kavität	26
4.2.3 Das Brennergstell	28
4.3 Die Messtechnik	31

4.4	Die Versuchsdurchführung.....	32
4.5	Versuchsauswertung – Erkenntnisse aus dem Feldversuch	35
4.5.1	Auswertetool	35
4.5.2	Bremsscheibe	35
4.5.3	Radsatzwelle	36
4.5.4	Sekundärer Drehdämpfer	37
4.6	Fazit	38
5.	Anforderungen an die Verkleidung	40
5.1	Steinschlag/Schotterflug	40
5.2	Klimatische Anforderungen	42
5.3	Brandschutz.....	43
5.4	Hauptabmessungen.....	44
6.	Aerodynamische Unterbodenverkleidung	46
6.1	Die Form.....	46
6.2	Konstruktionshistorie.....	48
6.3	Unterbodenverkleidung in Integralbauweise.....	51
6.4	Unterbodenverkleidung in Differentialbauweise	54
6.5	Aufhängung der Frontbleche.....	55
6.6	Aufhängung der Mittel- und Seitenbleche	56
7.	Vorauslegung der Unterbodenverkleidung.....	58
7.1	Aerodynamische Lasten	58
7.2	Dynamische Belastungen	60
7.3	Belastungen aufgrund von Zwangsverformungen	60

7.4	Vorauslegung mit ProE Mechanica	61
7.4.1	Geometriaufbereitung	62
7.4.2	Definition der Einspannungsbedingungen	63
7.4.3	Definition der Lasten	64
7.4.4	Definition des Werkstoffs und Vernetzung	64
7.4.5	Berechnung und Ergebnisse	64
8.	Wartung und Instandhaltung	67
8.1	Konzept der Verkleidung.....	67
8.2	Alternative Befestigungsmethode der Frontbleche	68
9.	Zusammenfassung und Ausblick	70
9.1	Der Entwärmungsversuch.....	70
9.2	Konstruktion der Unterbodenverkleidung	71
9.3	Wartung und Instandhaltung	71
10.	Abbildungsverzeichnis	73
11.	Tabellenverzeichnis	76
12.	Literaturverzeichnis	77
13.	Anhang	79
13.1	Anforderungen und Einflüsse an eine Unterbodenverkleidung.....	79
13.2	MatLab Programmcode	80
13.2.1	Code zum Einlesen der Daten	80
13.2.2	Code für die Auswertung der Daten	81
13.2.3	Code für den Vergleich mit anderen Versuchen	81
13.3	Messsensoren am Prüfstand	83
13.4	Auszug aus der Brandschutznorm EN4545	84

13.5	Gewichtsbilanz Unterbodenverkleidung	86
13.6	Aerodynamische Lasten	87

1. Einleitung

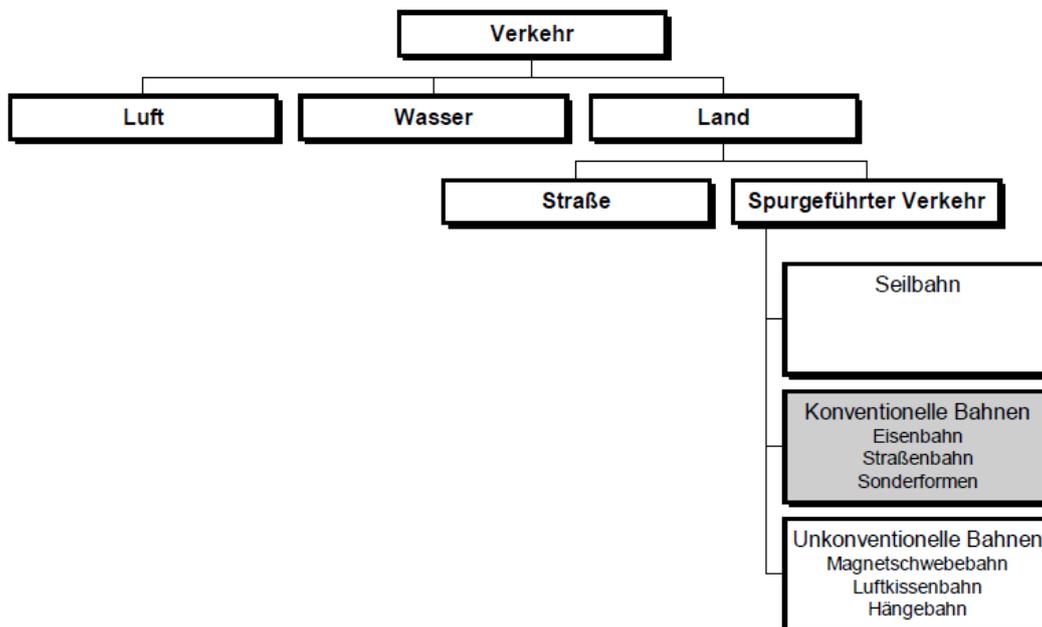


Abbildung 1 Einteilung der Verkehrsmittel (Haigermoser, 2002)

Schienenfahrzeuge sind Verkehrsmittel, welche laut Abbildung 1 unter der Kategorie des spurgeführten Verkehrs fallen. Dabei handelt es sich um Fahrzeuge, die auf einer oder mehreren Schienen fahren oder geführt werden. Fahrzeug und Schiene sind dabei ein eng aufeinander abgestimmtes System, üblicherweise als Rad-Schiene-System bezeichnet. (Wikipedia, 2016), (Haigermoser, 2002)

1.1 Hochgeschwindigkeitszüge

Unter Hochgeschwindigkeitszüge versteht man Züge, die eine Höchstgeschwindigkeit über 250km/h und schneller erreichen. Eingesetzt werden die Züge im Mittel- beziehungsweise Langstreckenverkehr zur Beförderung von Personen. Diese Fahrzeuge sind meist auf das Fahren mit hoher Geschwindigkeit ausgelegt und werden zur Verbindung zwischen Städten mit größeren Entfernungen eingesetzt. Um ein Gefühl für die Größenordnungen der typischen Kennwerte von Hochgeschwindigkeitszügen zu bekommen, sind in Tabelle 1 die Technischen Daten des Hochgeschwindigkeitszugs „Velaro“ (Abbildung 2) von SIEMENS dargestellt. (Haigermoser, 2002) (Schindler, 2014)



Abbildung 2: SIEMENS Velaro China (SIEMENS AG, 2008)

SIEMENS Velaro China	
Technische Daten:	
Anzahl Wagen:	16
Länge:	400m
Gesamtleistung:	18.400kW
Anzahl d. Achsen:	64
Max. Radsatzlast:	17.000kg
Höchstgeschwindigkeit:	350km/h

Tabelle 1: Technische Daten Velaro China

Moderne Hochgeschwindigkeitszüge sind meist als sogenannte Triebzüge ausgeführt. Darunter versteht man meist fix miteinander gekoppelte Wagen mit über den ganzen Zug verteilter Antriebsleistung. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die Konfiguration eines Hochgeschwindigkeitszugs, der als Triebzug ausgeführt ist. Der Vorteil von Triebzügen im Personenverkehr liegt zum einem darin, dass in jedem Wagen Personen untergebracht werden können. Bei herkömmlichen Wagen-Lokomotive Zügen, ergibt sich ein Raumnachteil da in der Lokomotive keine Personen befördert werden. Zum anderen können durch die notwendig hohen Achslasten der Lokomotive Einschränkungen im Betrieb auftreten. Zusätzlich ist die Schädigung der Infrastruktur (Gleis und Oberbau) bei partiell höheren Achslasten höher als bei gleichmäßig verteilten Achslasten. Die Nachteile des Triebzug Konzepts gegenüber herkömmlicher Lok-Waggon-Konfiguration sind einerseits die Nicht-

Erweiterbarkeit der Personenkapazitäten und andererseits die Systemkomponenten wie Transformatoren, Stromrichter, Nebenaggregate und Stromabnehmer über oder unter den Personenkabinen untergebracht werden müssen. (Haigermoser, 2002) (Schindler, 2014)

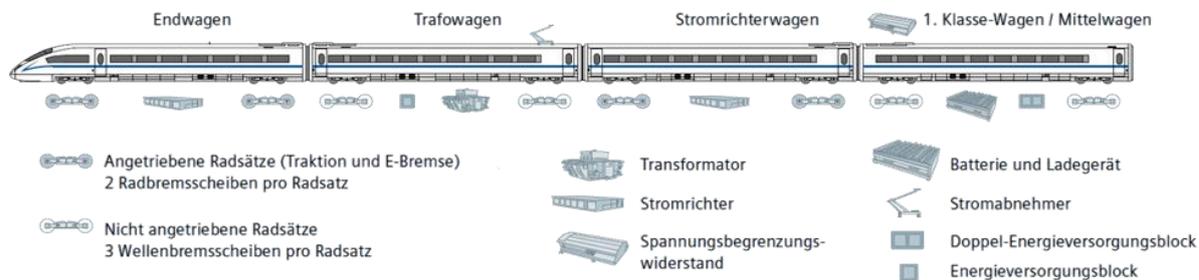


Abbildung 3: Übersicht Triebzug

Der erste Wagen eines Triebzugs, auch Endwagen genannt, ist meist mit einer aerodynamisch optimierten Bugnase sowie einem Führerstand zur Steuerung des Zugs ausgestattet. Die Wagen zwischen den Endwagen werden vorzugsweise nach den untergebrachten Komponenten benannt. Im Trafowagen sind Stromabnehmer und Transformator zur Konvertierung der elektrischen Energie in 3-Phasen Wechselstrom untergebracht. Im Stromrichterwagen ist der Stromrichter eingebaut. Bei der Montage von Nebenaggregate wie Klimaanlage, Druckluftversorgung, Batterie und Wasserversorgung erfolgt eine Verteilung über den ganzen Zug. Die Aufgabe der Abstützung, der Spurführung und des Antreibens beziehungsweise Bremsens eines Hochgeschwindigkeitszugs übernehmen die Fahrwerke. (Haigermoser, 2002) (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016) (Schindler, 2014)

1.2 Fahrwerke von Hochgeschwindigkeitszügen

Die Fahrwerke von Zügen sind, wie bereits erwähnt, für das Tragen, das Antreiben, das Bremsen und das Führen des Fahrzeugs auf den Schienen zuständig. Es wird zwischen einem Lauffahrwerk und einem Triebfahrwerk unterschieden.

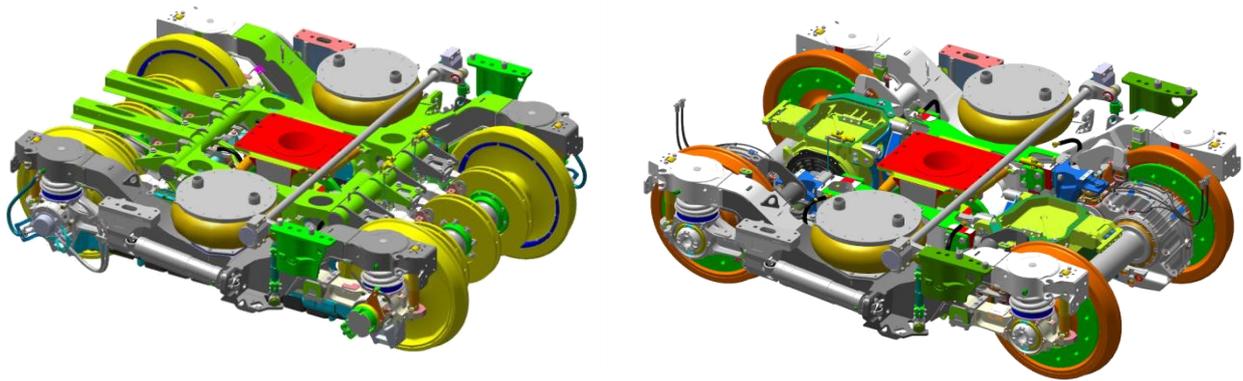


Abbildung 4: Fahrwerk SF500 – SIEMENS Velaro (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016)

Triebfahrwerke (Abbildung 4 rechts) sind für die Spurführung sowie die Übertragung der Antriebskräfte zuständig und somit mit dem Antriebsstrang (E-Motor und Getriebe) ausgestattet. Die Lauffahrwerke sind für die Aufnahme der Bremskomponenten zuständig. Je nach Position der Lager (außerhalb oder innerhalb der Radscheiben) unterscheidet man zwischen außen- und innengelagerten Fahrwerken (Abbildung 5).

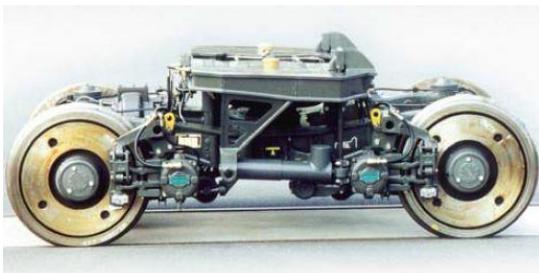


Abbildung 5: Vergleich Außen- und Innenlagerung eines Fahrwerks
(SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016) (Bombardier Inc., 2007)

Da sich diese Arbeit nahezu ausschließlich mit Fahrwerken und deren Verkleidung befasst, werden in Folge die wichtigsten Komponenten zum Verständnis in ihrer Funktion näher beschrieben.

1.3 Der Radsatz und die Räder

Der Radsatz besteht aus der Radsatzwelle mit den kraftschlüssig aufgedrückten Radscheiben. Auf der Radsatzwelle sind verschiedene Sitze für die Aufnahme von Bremscheiben, Antrieb oder Radsatzlager vorgesehen. (Haigermoser, 2002)

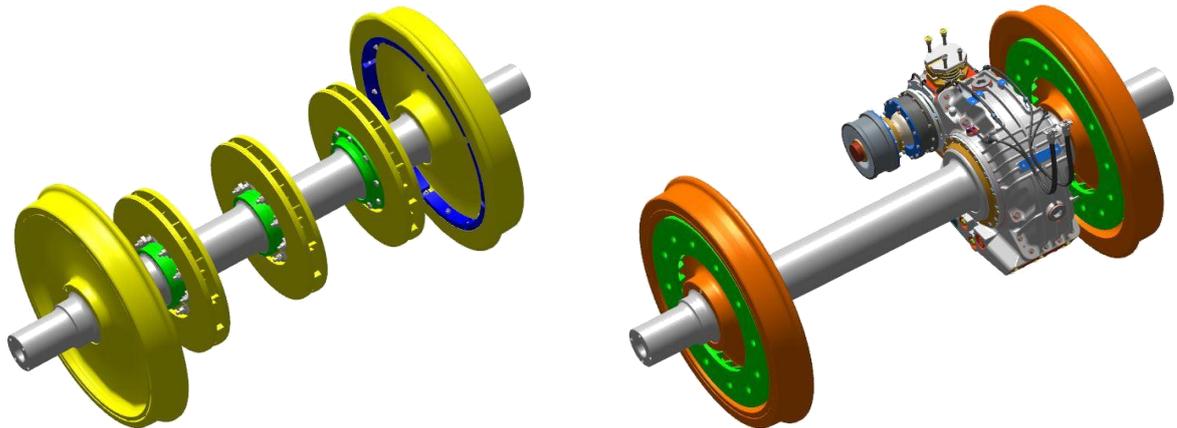


Abbildung 6: Radsatz SF500 (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016)

1.4 Die Radsatzführung/Das Radsatzlagergehäuse

Die Welle ist über die Radsatzlager im Lagergehäuse gelagert. Das Radsatzlagergehäuse ist mittels Gummimetallbuchsen (auch Radsatzführungsbuchse genannt) und der Primärfederung mit dem Rahmen verbunden. In diesem Fall ist das Radsatzlagergehäuse als Schwinge ausgeführt. Die Radsatzführung dreht sich um die Achse der Radsatzwelle. Dabei wird der Fußpunkt der Primärfeder beim Ein- und Ausfedern in Längsrichtung bewegt. Um die Primärfeder zu entlasten, wird die Bewegung von einem Gummielement aufgenommen. Die Steifigkeiten in horizontaler Ebene sind von der Steifigkeit der Radsatzführungsbuchse abhängig. (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016) (Haigermoser, 2002)

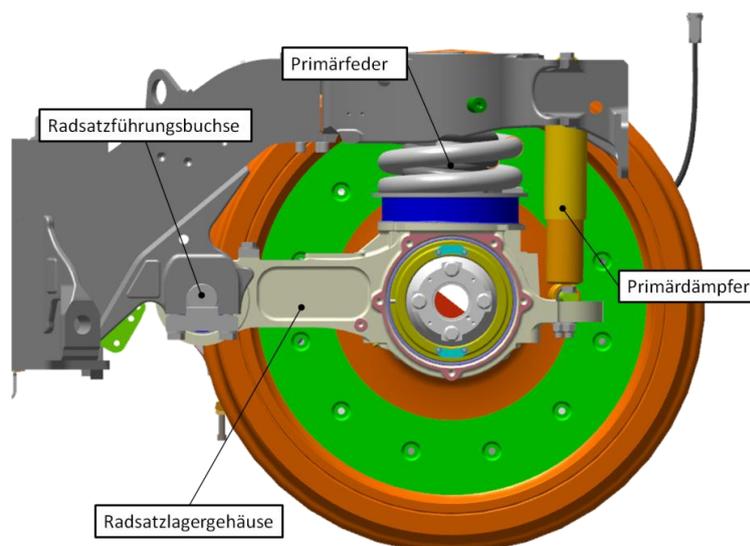


Abbildung 7: Radsatzführung

1.5 Der Rahmen

Der Rahmen ist die tragende Struktur des Fahrwerks an dem alle Komponenten miteinander verbunden sind. Die Form des Rahmens richtet sich nach dem benötigten Platz der erforderlichen Komponenten wie zum Beispiel der Antrieb, die Bremse, die Federung oder der Dämpfer. Als Rahmenform kommen meist H-Formen mit einer oder zwei Querverbindungen zum Einsatz. Der Rahmen setzt sich aus den beiden Längsträgern und den Querträgern zusammen. Der Wagenkasten stützt sich über die Sekundärfederstufe (meist als Luftfeder ausgeführt) am Rahmen ab. Der Radsatz wird über die Radsatzführung und der Primärfederstufe an den beiden Längsträgern befestigt.

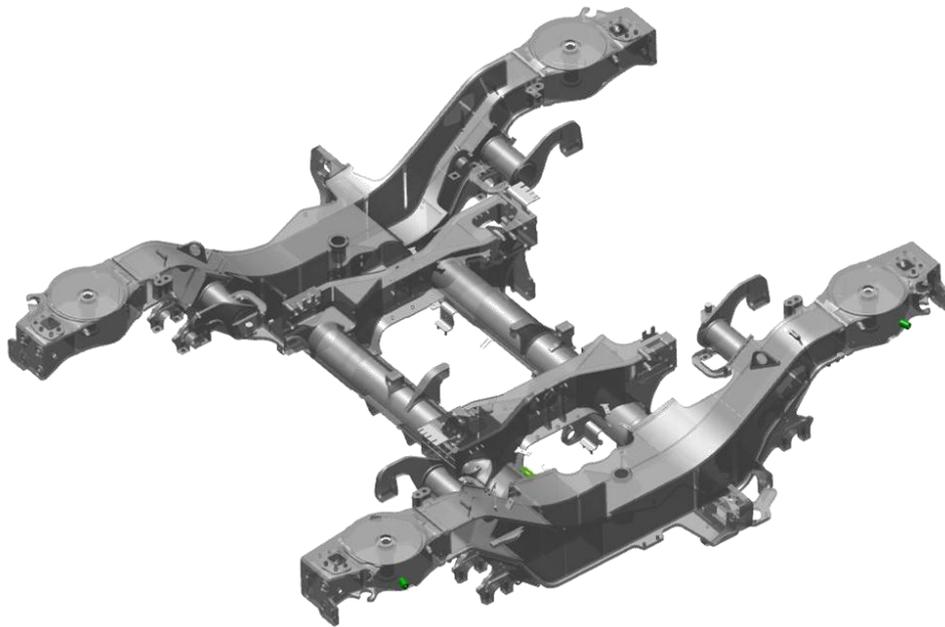


Abbildung 8: Rahmen SF500 (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016)

Moderne Rahmen werden aus Stahlblech oder Stahlblechprofilen miteinander verschweißt. Partiiell können aus Gründen der Festigkeit auch Stahlgussteile eingeschweißt werden. (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016) (Haigermoser, 2002)

1.6 Bremssystem im Fahrwerk

Laufdrehgestelle sind, wie zuvor erwähnt, mit der Bremsausrüstung ausgestattet. Aus Gründen der Sicherheit kommen an Schienenfahrzeugen mehrere Bremssysteme zum Einsatz. Man unterscheidet zwischen kraftschlussabhängige und kraftschlussunabhängige Bremsprinzipien. Bei den kraftschlussabhängigen Bremsen wird die Bremskraft über das Rad an die Schiene übertragen. Die kraftschlussunabhängigen Systeme übertragen die Bremskräfte unabhängig vom Rad-Schiene Kontakt. Als Beispiele für kraftschlussunabhängige

Bremssysteme kann die Magnetschienenbremse oder die Luftbremse angeführt werden. (Haigermoser, 2002), (Berger, 2014)

1.6.1 Klotzbremse

Die Klotzbremse ist eine kraftschlussabhängige Bremse. Sie ist die am meisten verbreitete Bremse. Güterwagen sind fast nur mit Klotzbremsen ausgestattet. Das ohnehin vorhandene Rad wird als Reibkörper und Wärmespeicher genutzt. Zusätzlich ist nur noch ein Aktuator mit Bremsklotz notwendig. Ein einfacher konstruktiver Aufbau zeichnet die Klotzbremse aus. Der große Nachteil von Klotzbremsen ist, dass das Rad schon durch den Rad-Schiene Kontakt hoch ausgelastet ist. Wird das Rad zusätzlich noch thermisch belastet, kann das zu Eigenspannungen und Rissen führen. Daher ist die Bremsleistung stark durch das Rad begrenzt. (Haigermoser, 2002) (Berger, 2014)

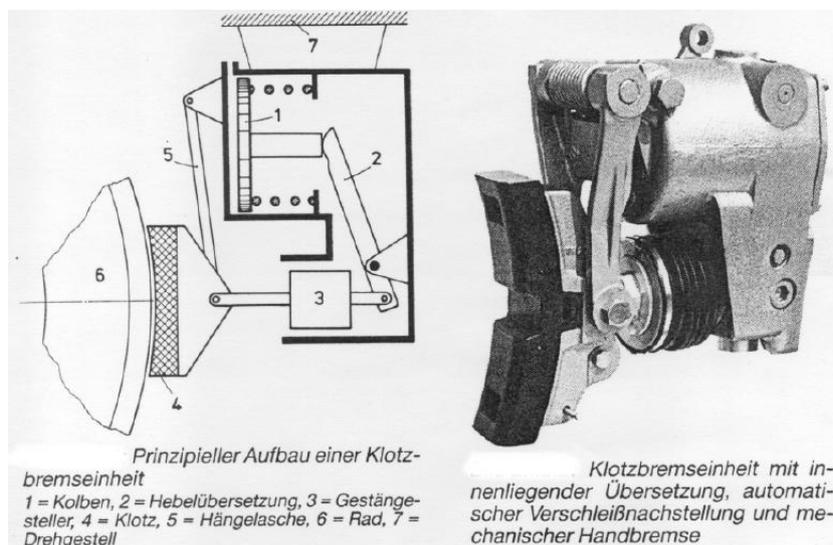


Abbildung 9: Klotzbremse
(Haigermoser, 2002)

1.6.2 Wellenscheibenbremse

Die Scheibenbremse gehört zur Gruppe der kraftschlussabhängigen Bremsen und hat sich aus folgenden Gründen im Hochgeschwindigkeitsverkehr gegenüber der einfachen Klotzbremse (Reibungsbremse direkt am Rad) durchgesetzt:

- Höhere Leistungsfähigkeit gegenüber der Klotzbremse
- Die Kosten für Wartung und Instandhaltung sind geringer
- Besserer Fahrkomfort (Halteruck kann reduziert werden, weniger Bremsgeräusche)
- Kleinere Anpresskräfte ermöglichen leichtere Bremskomponenten

Wie der Name schon verrät, sitzen die Wellenbremsscheiben auf der Radsatzwelle im Raum zwischen den Rädern. Die Scheiben bestehen aus zwei Reibringen, die durch Kühlrippen miteinander verbunden sind. (Haigermoser, 2002)

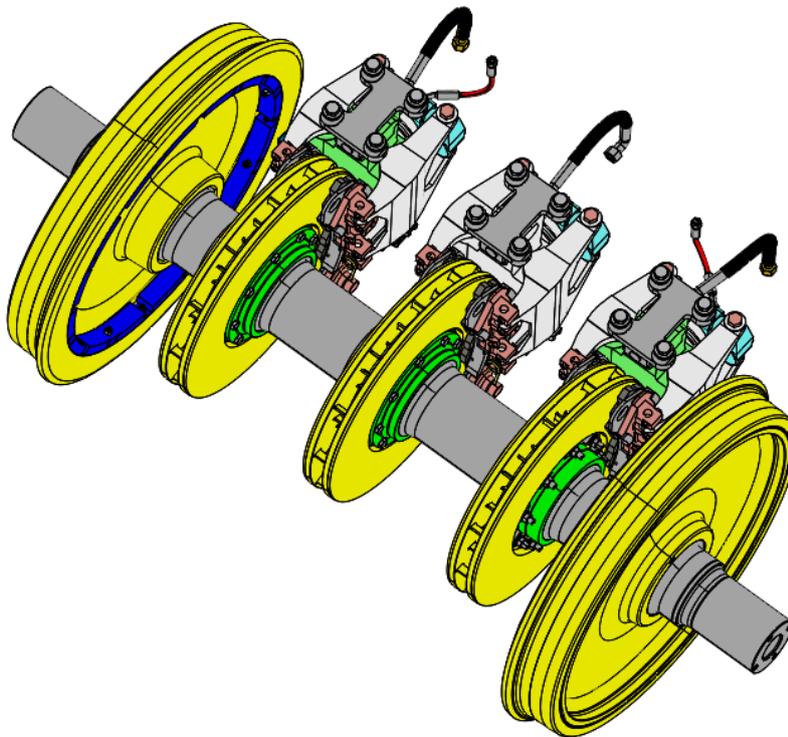


Abbildung 10: Wellenbremsscheiben Velaro D

Über ein Gestänge wird die Kraft vom Bremszylinder zu den Bremsbacken übertragen. Als Material für die Bremsbeläge kommen organische wie auch Sinterwerkstoffe zum Einsatz. Die Vorteile gegenüber der Klotzbremse sind die höheren Reibwerte. Dadurch können die Anpresskräfte gesenkt und die Strukturteile kleiner und somit leichter gebaut werden. Probleme beim Einsatz von Scheibenbremsen sind Nässeempfindlichkeit, Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit. (Haigermoser, 2002)

1.7 Dämpfer

Dämpfer werden zum Abbau von Schwingungen oder zur Beschränkung von Amplituden im Resonanzfall im Fahrwerk verwendet. Die Schwingungsenergie wird im Dämpfer durch Reibung (Flüssigkeitsreibung oder mechanische Reibung) in Wärme umgewandelt. Eingesetzt werden Dämpfer in der Primär- und Sekundärfederstufe zur Dämpfung der vertikalen Schwingungen und in horizontaler Richtung zwischen Wagenkasten und Fahrwerk zur Dämpfung der Drehschwingungen beim Sinuslauf. Aus Kostengründen werden bei Güterwagen mechanische Reibungsdämpfer verwendet. Bei Hochgeschwindigkeitszügen

kommen hauptsächlich hydraulische Dämpfer zum Einsatz. Als Beispiel eines Dämpfers ist in Abbildung 11 ein Hydraulischer Zweirohrdämpfer im Schnitt dargestellt. Die Dämpferkraft ist von der Kolbengeschwindigkeit abhängig. (Haigermoser, 2002)

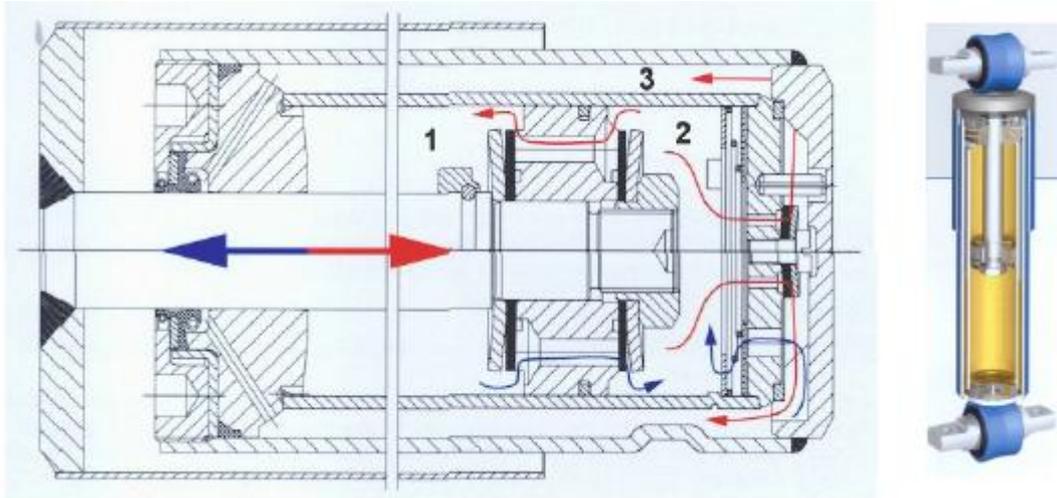


Abbildung 11: Hydraulischer Zweirohrdämpfer (Haigermoser, 2002)

2. Energetische Betrachtungen

Schienenfahrzeuge benötigen für den Transport von Personen Energie. Aufgrund des immer höher werdenden Transportaufkommens durch Globalisierung und Industrialisierung steigt die Nachfrage nach energieeffizienten Fahrzeugen an. Der Trend bei derzeitigen Ausschreibungen von Schienenfahrzeugen zeigt, dass das Merkmal „Energieverbrauch“ eine immer wichtigere Rolle spielt und bei den Bewertungen von Fahrzeugen eine höhere Gewichtung bekommt. Aus den genannten Aspekten können die Anforderungsprofile an zukünftige Schienenfahrzeuge abgeleitet werden:

- Bremssysteme, welche die Bremsenergie in das Stromnetz zurückspeisen können und dabei alle sicherheitsrelevanten Aspekte erfüllen.
- Neue Radsatzführungskonzepte, welche den Rollwiderstand in Kurven reduzieren
- Leichtbau

2.1 Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände von Schienenfahrzeugen setzen sich wie folgt zusammen:

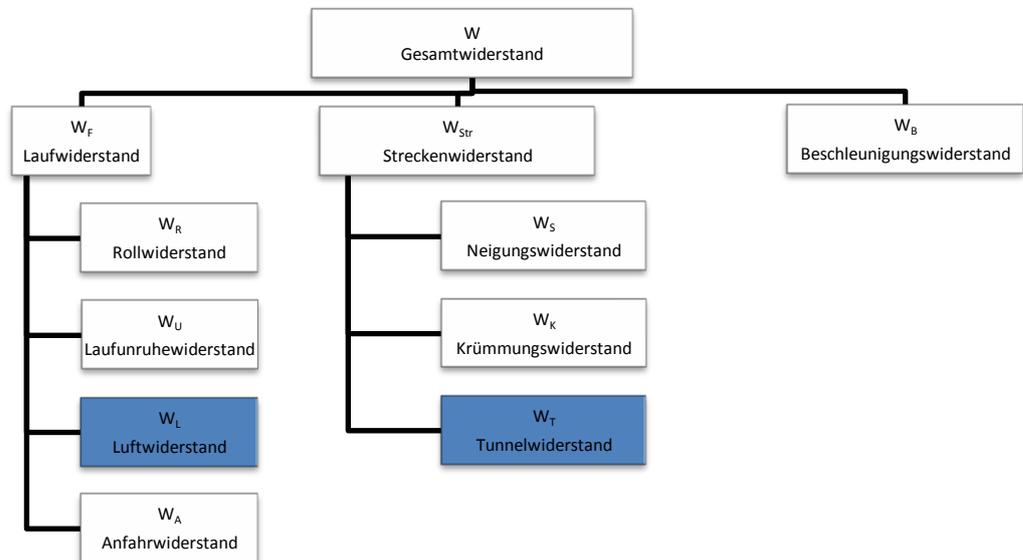


Abbildung 12: Übersicht der Widerstände (Haigermoser, 2002)

Da die Durchschnittsgeschwindigkeit bei Hochgeschwindigkeitszügen weit über 200km/h liegt, sind die aerodynamischen Widerstände, wie der Luftwiderstand oder der damit verbundene Tunnelwiderstand, dominierend.

2.2 Der Luftwiderstand W_L

$$W_L = c_W * p * A_P \quad [kN]$$

$$p = v_0^2 * \frac{1}{2} * \rho_L$$

Formel 1: Luftwiderstand und Ermittlung des Staudrucks

Der Luftwiderstand setzt sich aus zahlreichen Strömungsvorgängen zusammen. Diese können mit der Formel 1 beschrieben werden. Dabei ist A_P die Projektionsfläche des Zuges senkrecht zur Anströmgeschwindigkeit. Die Anströmgeschwindigkeit v_0 geht quadratisch in den Staudruck p ein. ρ_L ist die Dichte der Umgebungsluft. Mit der dimensionslosen Konstante c_W werden die Einflüsse von Bug und Heck sowie die Verluste durch Wandreibung berücksichtigt. Der Widerstandsbeiwert c_W ist zwar unabhängig von der Geschwindigkeit aber jedoch stark vom Anströmwinkel beeinflusst. Das bedeutet, dass der Luftwiderstand eines Fahrzeugs in Längsrichtung, eine Abhängigkeit vom Seitenwind hat. Der Widerstandsbeiwert wird durch Versuche oder CFD-Analysen (Computational Fluid Dynamics) bestimmt. Der c_W -Wert ist somit abhängig von der Form des Zuges und des Anströmwinkels. In Abbildung 13 sind die verschiedenen Effekte der aerodynamischen Widerstände dargestellt. (Dellmann, 2014) (Haigermoser, 2002)

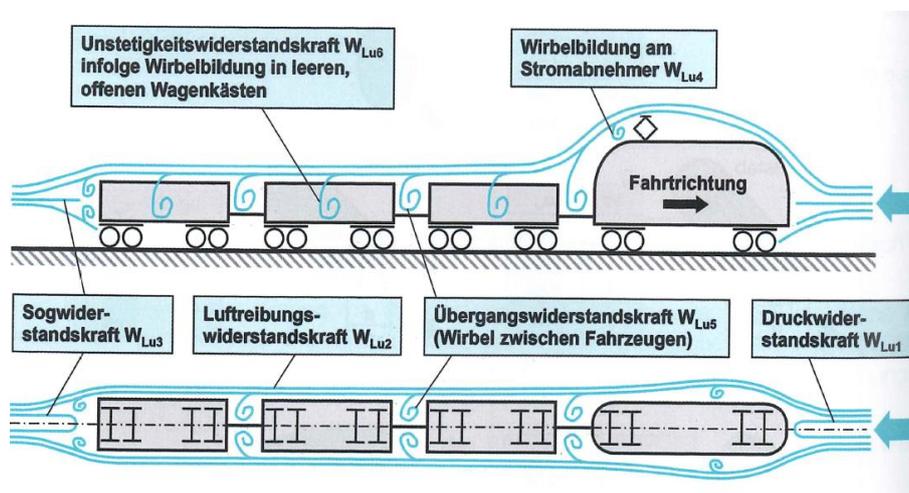


Abbildung 13: aerodynamische Widerstände (Dellmann, 2014)

Tabelle 2 zeigt verschiedene Werte für den c_W -Wert um die Größenordnung dieses Wertes abschätzen zu können.

c_W	Fahrzeug/Körper
0,2	Optimal gestaltetes Fahrzeug
0,21	Triebkopf Bahn
0,28	Sportwagen
0,3	PKW
0,5	Cabrio, offen
0,56	LKW
0,7	Motorrad unverkleidet
0,78	Mensch, stehend

Tabelle 2: c_W -Wert verschiedener Körper (Dellmann, 2014)

Für jeden Wagen eines Triebzuges kann der c_W -Wert ermittelt werden. Der c_W -Wert für den gesamten Zug wird über die Summe der c_W -Werte der Einzelwagen gebildet (Formel 2).

$$c_W = c_{WE} + c_{W1} + c_{W2} + c_{Wn} + c_{WE}$$

c_{WE}Luftwiderstandsbeiwert Endwagen

c_{wi}Luftwiderstandsbeiwert Wagen

Formel 2: Widerstandsbeiwert c_w

Die Abbildung 14 zeigt die Anteile der einzelnen Komponenten am Gesamtluftwiderstand. Den größten Anteil am Widerstand kann man der Wandreibung aufgrund der Länge des Zuges zurechnen. Den zweitgrößten Anteil am Gesamtluftwiderstand mit 28 % die Fahrwerke der Wagen. (Dellmann, 2014)

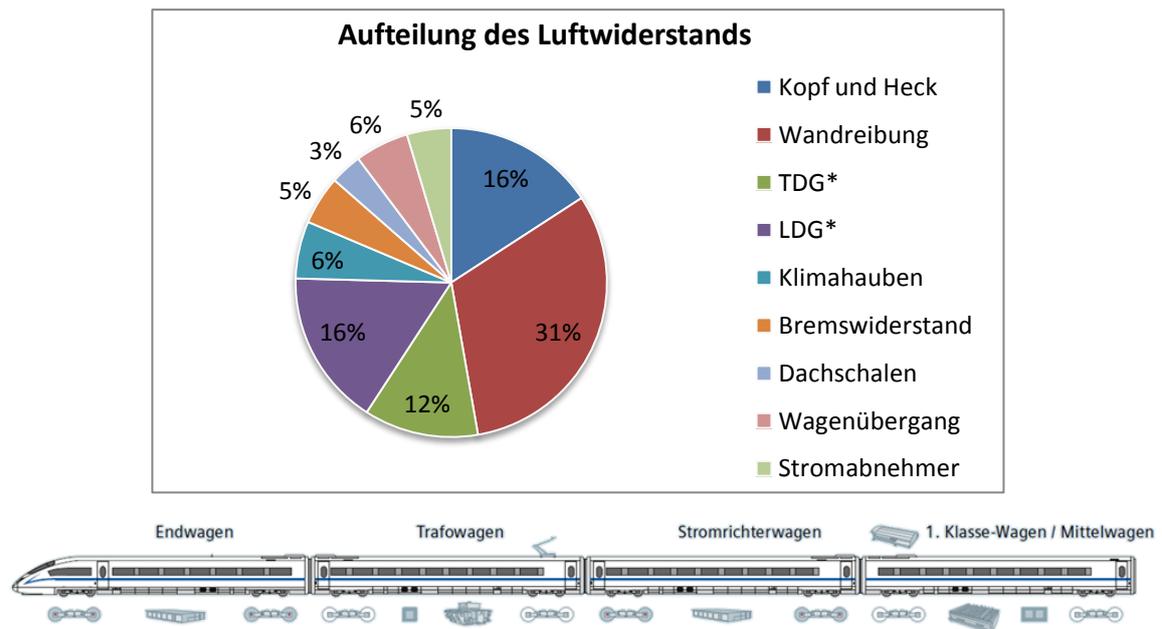


Abbildung 14: Aufteilung des Luftwiderstands (Dellmann, 2014)

Da die Fahrwerke bisher noch nie aerodynamisch optimiert wurden, stellt diese Komponente ein großes Potential zur Verringerung des Luftwiderstands dar.

2.3 Verkleidung der Fahrwerke

Zu Beginn der Arbeit wurde am derzeitigen Hochgeschwindigkeitszug der Firma SIEMENS eine Untersuchung durchgeführt, um festzustellen wie groß das Potenzial zur Verbesserung der Aerodynamik ist, wenn die Fahrwerke verkleidet werden würden. In erster Linie sollte das Fahrwerk ohne Berücksichtigung der konstruktiven Umsetzbarkeit als „optimal“ verkleidetes Fahrwerk modelliert und in einer CFD-Berechnung abgeschätzt werden. Am Modell verkleidete eine Hülle das Fahrwerk zur Gänze, sodass nur die Radscheiben aus der Verkleidung standen. In Folge wurde ein weiteres Modell erstellt indem eine realistische Verkleidung mit teilweise abgedichteten Spalten modelliert wurde. Die Ergebnisse der Voruntersuchung sind in Abbildung 15 dargestellt.

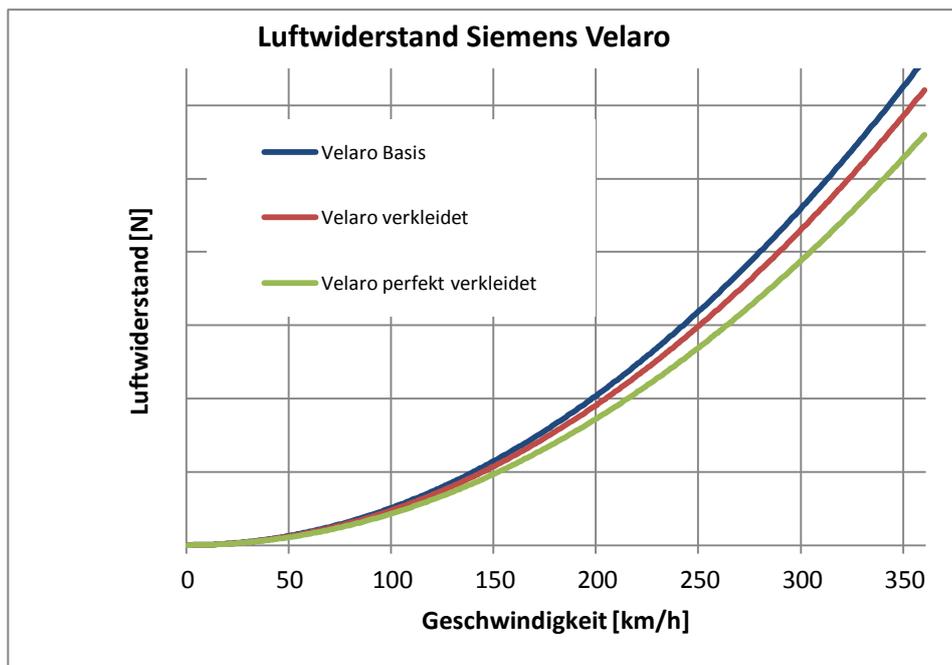


Abbildung 15: Einsparung Luftwiderstand

Das angeführte Diagramm beschreibt den Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Die grüne Linie stellt das optimal verkleidete Fahrwerk dar und zeigt eine Einsparung des Luftwiderstands von 10 %. Bei dem realen Modell, welches mittels der roten Linie veranschaulicht wird, liegt die Einsparung bei 7 % liegt. Dies kann bei einer Annahme von 10 Cent pro eingesparte Kilowattstunde an einer modernen Hochgeschwindigkeitsstrecke zu einer deutlichen Senkung der Betriebskosten führen.

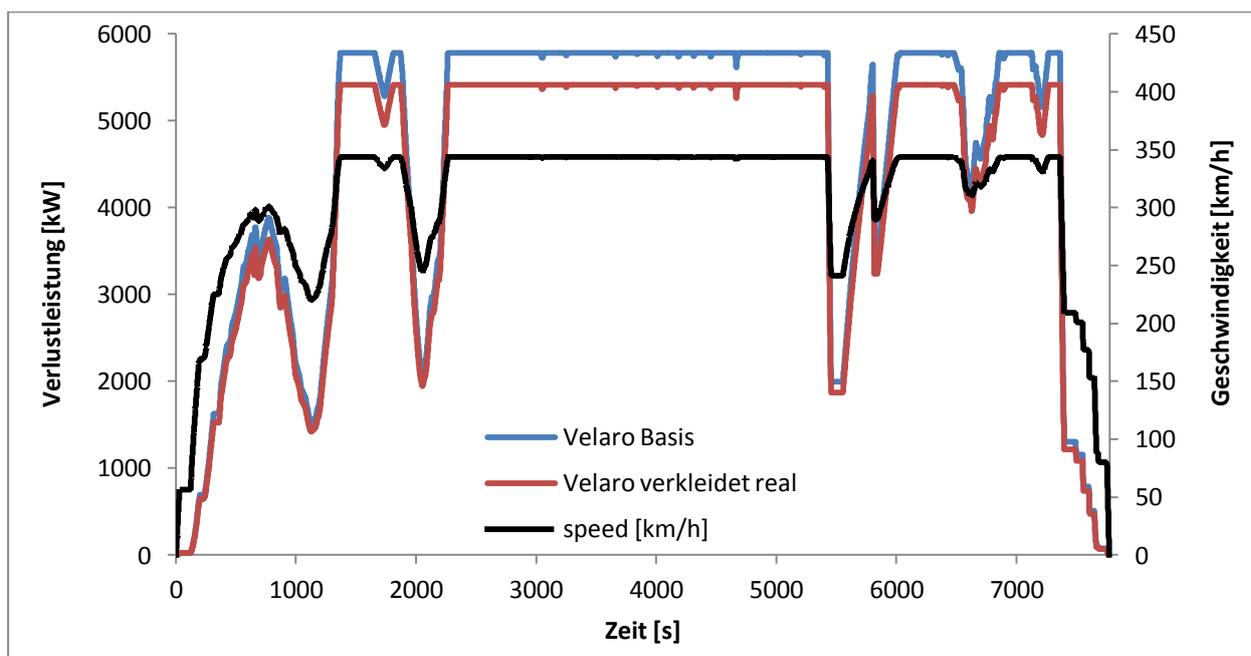


Abbildung 16: Energieeinsparung auf der Strecke

Als Referenz für diese Bewertung dient das Neubauprojekt California High Speed Rail. Das in Abbildung 16 dargestellte Fahrspiel von Los Angeles nach San Francisco ergibt für diese Verbindung eine Einsparung von 62 €/Fahrspiel. Durch Aufstellung der These, dass diese Strecke sechs Mal täglich für sieben Tage pro Woche befahren wird (Wartungsintervalle bereinigt), ergeben sich, bei einer geplanten Betriebszeit von 30 Jahren, Einsparungen der Betriebskosten in Höhe von 4,5 Millionen Euro pro Zug. (State of California, 2016)

3. Aufgabenstellung

Aus diesen zuvor dargelegten Erkenntnissen ist die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Verkleidbarkeit von Fahrwerken für Hochgeschwindigkeitszüge“ aufgebaut. Das Ziel ist es, die Möglichkeit einer Unterbodenverkleidung am Fahrwerk aus Sicht der Konstruktion zu prüfen.

Die Aufgabenstellung setzt sich aus folgenden Arbeitspaketen zusammen (die Ausarbeitung erfolgte in angeführter Reihenfolge):

1. Durchführung eines Versuchs zur Ermittlung des Verhaltens von verkleideten Laufdrehgestellen bei mechanischer Schnellbremsung von v_{\max} bis zum Stillstand. Dabei kommt es zu erheblichen Wärmeeinträgen in die verkleidete Kavität, wodurch Komponenten am Fahrwerk ausfallen können.
2. Ermittlung der Anforderungen an die Verkleidung.
3. Konstruktive Umsetzung der Verkleidung inklusive Berücksichtigung aller relevanten Normen und Rahmenbedingungen sowie eine Vorauslegung mittels ProE Mechanica.
4. Überlegungen zum Umgang mit verkleideten Fahrwerken bei der Wartung und Instandhaltung.

4. Entwärmungsversuch

Beim Entwärmungsversuch gilt es vor allem zwei Szenarien zu berücksichtigen: Kommt es bei einem Hochgeschwindigkeitszug zum Ausfall der gesamten elektrischen Bremsanlage, muss der Zug mit der Reibungsbremse zum Stillstand kommen. Ein weiteres Szenario ist wenn der Zug aus Höchstgeschwindigkeit aufgrund eines plötzlich auftretenden Rot Signals zum Stillstand kommen muss und die Bremsung rein mit der mechanischen Bremse erfolgt. Bleibt der Zug dann für einen längeren Zeitraum an diesem Signal stehen, kann sich das Fahrwerk aufgrund der Vollverkleidung aufheizen, da keine Durchströmung der Kavität (Innenraum des verkleideten Fahrwerks) erfolgt. Temperaturempfindliche Bauteile können sich dadurch über deren kritische Maximaltemperatur erwärmen, sodass ein sicherer Betrieb des Fahrzeugs nicht mehr garantiert werden beziehungsweise ein Totalausfall eines Bauteils eintreten kann. Um die Auswirkungen einer Stoppbremsung aus der Höchstgeschwindigkeit auf ein vollverkleidetes Fahrwerk zu ermitteln, wurde ein stationärer Entwärmungsversuch im SIEMENS Mobility Werk Graz durchgeführt. Ziel dieses Versuchs war es, ein „worst case“-Bremszenario so realitätsnah als möglich an einem Fahrwerk nachzubilden. Dabei sollten mögliche Temperaturunterschiede zwischen einem verkleideten und einem unverkleideten Fahrwerk aufgezeigt werden. Des Weiteren sollten die erreichten Maximaltemperaturen der kritischen Bauteile bei der Entwärmung ermittelt werden um eventuelle thermisch belastete Bauteile ausfindig zu machen.

4.1 Das Versuchskonzept/Wärmeeintrag

Mit dem für die vorliegende Arbeit durchgeführten Versuch wurde eine Vollbremsung aus 360 km/h bei einer Strecke mit Gefälle angenommen. Nach der erfolgten Bremsung aus der Höchstgeschwindigkeit war Voraussetzung, dass der Zug für längere Zeit stehen blieb und somit keine Kühlwirkung durch den Fahrtwind eintrat. Als Referenzfahrzeug für den Versuch wurde der aktuelle Hochgeschwindigkeitszug „Velaro“ der Firma Siemens herangezogen. Damit der Versuch realistisch umgesetzt werden konnte, war die Anforderung an diesen, dass die frei werdende Energiemenge in den Wellenbremsscheiben eingebracht werden musste. Die benötigte Wärmemenge wurde folgendermaßen ermittelt:

Wenn der Zug „Velaro“ mit einer Masse m von 500.000 kg aus der Höchstgeschwindigkeit bis zum Stillstand bremst, muss die gesamte kinetische Energie W_{kin} in Wärme umgewandelt werden.

$$W_{kin} = \frac{m * v^2}{2}$$

Formel 3: kinetische Energie

Daraus ergibt sich eine maximale Bremsenergie von 2500 MJ in alle Bremscheiben. Da der Zug als Achttweiler mit acht Laufdrehgestellen mit je sechs Wellenbremscheiben und acht Triebdrehgestellen mit je vier Radbremscheiben ausgestattet ist, ergibt sich ein Wärmeeintrag von 31,25 MJ pro Wellenbremscheibe. Der Einfluss von Fahrwiderständen wie Rollreibung und Luftwiderstand wurde in dieser Berechnung sowie im durchgeführten Versuch vernachlässigt.

Das Lauffahrwerk ist aufgrund der Anzahl von sechs Bremscheiben thermisch höher belastet, weshalb dieses als Versuchsfahrwerk eingesetzt wurde. Da das verwendete Fahrwerk um die y-Achse symmetrisch ist, genügte es eine Seite zu verkleiden und nur drei Bremscheiben zu erwärmen. Da es sich um einen einmaligen Versuch handelte, sollten die Einmalkosten so gering als möglich gehalten werden. Aus dieser Anforderung heraus ist die gesamte Messtechnik von einer externen Firma bereitgestellt und montiert worden. Durch Verwendung eines gebrauchten, ausgemusterten Fahrwerks, konnten auch hierfür Kosten eingespart werden. Nachdem die benötigte Energiemenge abgeschätzt wurde, stellte sich die Frage nach der Quelle die die Energie in die Bremscheiben einbringt.

Für die Aufheizung in relativ kurzer Zeit kamen zwei Heizkonzepte in Frage:

1. Induktive Erwärmung

Über drei Induktionsspulen wurden die Bremscheiben erwärmt. Ein Induktionsgenerator pro Spule wandelte die Energie um und stellte diese bereit. Die Aufheizung erfolgte in fahrbar montierten Isolierboxen, um diese nach dem Vorgang in kurzer Zeit zu entfernen und die Kavität montieren zu können.

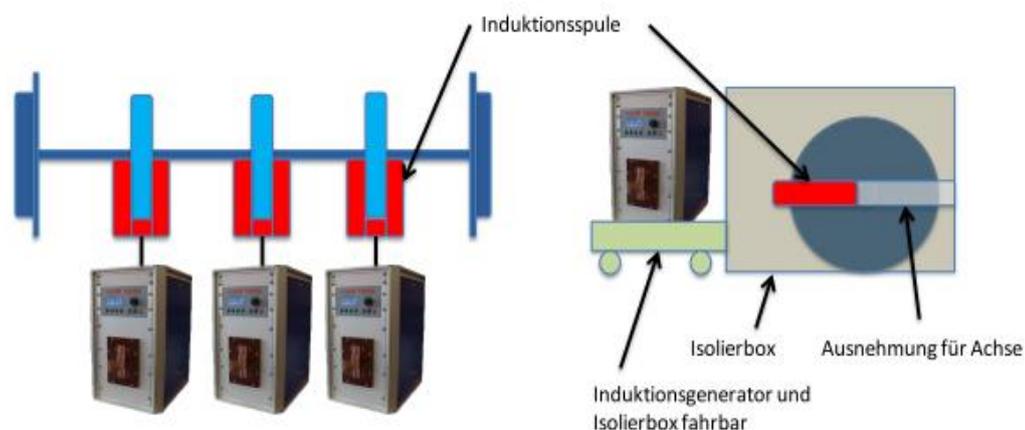


Abbildung 17: Konzept zur induktiven Erwärmung (SIEMENS Mobility, 2015)

Eigenschaften der induktiven Erwärmung:

- Definierte, wiederholbare Aufheizung
- Hoher Strombedarf → Probleme bei der Strombereitstellung
- Hohe Kosten in der Anschaffung (ca. 21.000 €)

2. Erwärmung mit Acetylenbrenner

Da die Kosten der induktiven Erwärmung sehr hoch sind, war die Aufgabe eine deutlich kostengünstigere Lösung zu finden. Nach Rücksprache mit der Firma Linde stellte sich die Aufheizung mit Acetylenbrennern als kostensparende Alternative heraus. Der Energieeintrag konnte nur schwer aus dem verbannten Gas ermittelt werden, dies spielte jedoch eine untergeordnete Rolle da der Versuch sowieso über die Temperatur der Bremsscheiben gesteuert wurde. Die Auslegung und Form der Brenner wurde von der Firma Linde durchgeführt. Es zeigte sich, dass ein Brenner pro Seite mit einer Breite entsprechend der Reibfläche ausreicht, um die Bremsscheibe auf die gewünschte Temperatur aufzuheizen. Für den Versuch erfolgte der Einsatz von sechs Brennern für die drei Bremsscheiben.



Abbildung 18: Erwärmung mit Acetylenbrenner

Nachdem die Aufheizmethode gewählt wurde, ist das Versuchskonzept festgelegt und im Detail geplant und ausgeführt worden. Im folgenden Unterkapitel wird der Prüfstand im Detail beschrieben.

4.2 Der Prüfstand

Der Prüfstand bestand aus drei Hauptbaugruppen:

- Das Fahrwerk, welches auf einer Konsole auskragend montiert wurde. Die zweite Baugruppe ist eine auf Schienen gelagerte, verfahrbare
- Die Kavität welche verfahrbar konstruiert wurde und als Verkleidung des Fahrwerks diente.
- Das Brennergestell, welches zum Handling der Schweißbrenner und deren Schlauchpakete eingesetzt wurde.

4.2.1 Das Fahrwerk

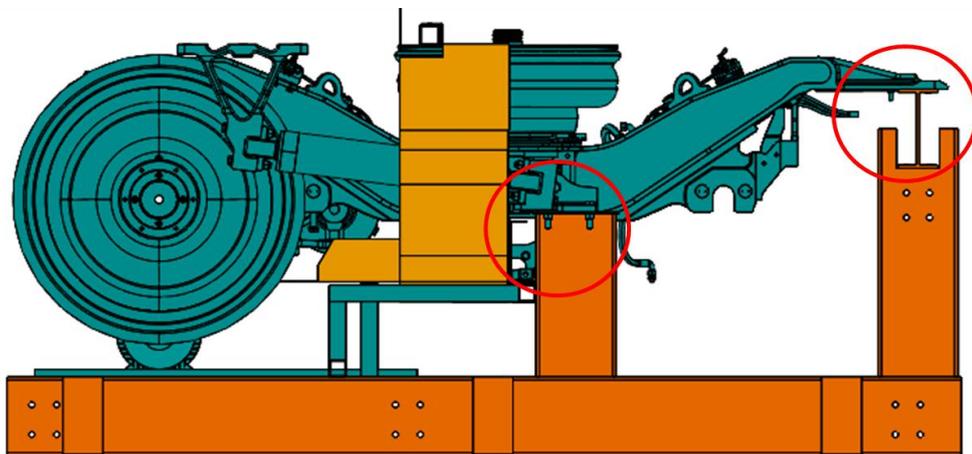


Abbildung 19: Fahrwerk mit Rahmen

Um die späteren Bedingungen so realitätsnah wie möglich zu gestalten, kam ein ausgemustertes Lauffahrwerk zum Einsatz. Als Basisfahrwerk wurde ein SF7000 Laufdrehgestell verwendet. Dabei handelt es sich um ein innengelagertes Fahrwerk, das in Triebzügen für den S-Bahn-Betrieb bis 160 km/h eingesetzt wird. Da dieses Fahrwerk aufgrund dessen Einsatzzwecks lediglich mit zwei Bremsscheiben ausgestattet ist, wurde die Radsatzwelle für den Versuch mit drei Wellenbremsscheiben für Hochgeschwindigkeitszüge adaptiert. Ein aufschweißen von Rohren an die bestehenden Presssitze erlaubte, nach mechanischer Bearbeitung, ein verschieben der Sitze nach außen. Zusätzlich mussten in der Mitte zwei Halbschalen aufgeschweißt werden, um die mittlere Bremsscheibe aufpressen zu können (Abbildung 20).

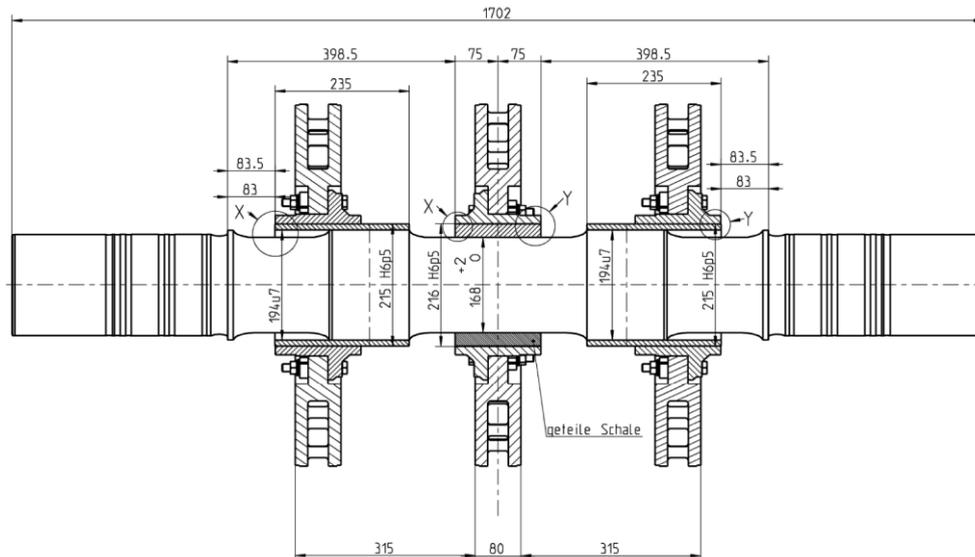


Abbildung 20: Anpassung der Radsatzwelle

Da das Fahrwerk SF7000 weitestgehend symmetrisch um die y-z-Mittenebene ist, konnte das Fahrwerk als Halbmodell verwendet werden (thermische Massen und Geometrie sind weitestgehend symmetrisch). Aufgrund dessen, dass sich die Radsatzwelle zur homogenen Erwärmung der Bremscheiben drehen muss, wurde das gesamte Fahrwerk auf einem Rahmen, der aus geschweißten Formrohren bestand, auskragend gelagert und an vier Punkten befestigt. Somit war der Laufradsatz frei über dem Boden aufgehängt. Mit einem Asynchron-Drehstrommotor, mit einem manuell einstellbaren Frequenzumrichter, erfolgte der Antrieb des Radsatzes. Die Kraftübertragung wurde mit einem Riementrieb umgesetzt. Da die Drehzahl beim Aufheizen meist sehr niedrig war, musste der Motor fremdbelüftet werden, um eine Überhitzung zu vermeiden (Abbildung 21).



Abbildung 21: Antrieb des Laufradsatzes

4.2.2 Die Kavität

Die Kavität wurde mit einer Konstruktion aus Stahlblechen nachgebildet (Abbildung 22). Die Form ergab sich aus dem theoretisch vorhandenen Bauraum und dem von der Infrastruktur vorgegebenen Freiraumprofil. Die Kavität wurde auf einem Rahmen montiert, der aus Profilrohren zusammengeschweißt war. Die gesamte Konstruktion lagerte mit Rollen auf Schienen, sodass die Kavität nach dem Aufheizvorgang rasch und möglichst genau an die vorgesehene Position geschoben und geschlossen werden konnte. Dies erlaubte den Energieverlust an die Umgebung gering zu halten. In der Mitte des Fahrwerks wurde die Kavität mit, am Fahrwerk montierten Blechen und Aluminiumklebebändern, dicht abgeschlossen. Da beim Versuch mehrere Konfigurationen der Verkleidung getestet wurden, war die Kavität teilweise austauschbar gestaltet worden. Die verschiedenen Konfigurationen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.



Abbildung 22: Die Kavität

Die drei zu prüfenden Konfigurationen waren: vollverkleidet, vollverkleidet mit Lüftungsschlitzen an den Seitenwänden und zum Abgleich eine unverkleidete Konfiguration wie sie derzeit bei Zügen des Typs Velaro zum Einsatz kommt.



Abbildung 23: Konfiguration unverkleidet

Bei der unverkleideten Konfiguration (Abbildung 23) bestand die Kavität lediglich aus der stirnseitigen Schottwand mit den oberen Seitenblechen und den darüber befestigten Blechen, die den Unterboden des Wagenkastens darstellen sollten.



Abbildung 24: Konfiguration vollverkleidet mit Lüftungsschlitzen

Bei der Vollverkleidung mit Lüftungsschlitzen (Abbildung 24) wurden die oberen Seitenbleche durch geschlitzte Seitenbleche ersetzt und die gesamte Fahrwerksseite vollständig geschlossen. Unter dem Fahrwerk befand sich ein Unterbodenblech mit Öffnungen für die Bremsscheiben. Die Vollverkleidung unterschied sich von der vorherigen Konfiguration lediglich durch die geschlossenen oberen Seitenbleche (Abbildung 25).



Abbildung 25: Konfiguration vollverkleidet

4.2.3 Das Brennergstell

Um die Wiederholgenauigkeit bei der Positionierung der Schweißbrenner zu erhöhen und diese so schnell als möglich durchführen zu können, waren die sechs Schweißbrenner an einem gelenkig gelagerten Gestell fix mit klemmbaren Verschlüssen montiert (Abbildung 26). Dieses Gestell wurde über U-Profile am Rahmen des Fahrwerks in Längsrichtung geführt.

Dies erlaubte die Brenner nach dem Aufheizvorgang schnell beiseitezuschieben und die Kavität an das Fahrwerk anzubringen.

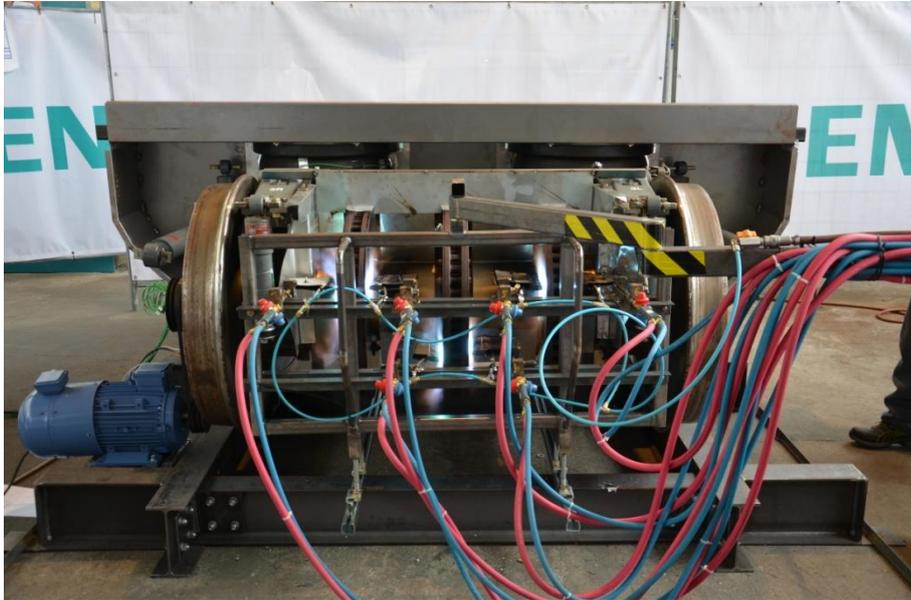


Abbildung 26: Brenner mit Gestell

Die Schweißbrenner waren Sonderanfertigungen der Firma Linde, welche diese anhand von dafür bereitgestellten 3D-CAD-Daten fertigte. Die Brennerdüse entsprach exakt der Breite der Bremsscheibe, um die Scheibe möglichst homogen erhitzen zu können. Bei den ersten Versuchen stellte sich heraus, dass sich die Brenner aufgrund des engen Raumes gegenseitig aufheizten, wodurch es zu Rückzündungen im vorderen Bereich der Brenner kam (Abbildung 27).



Abbildung 27: Rückzündung eines Schweißbrenners

Trat dies ein, war es kaum möglich den erhitzten Brenner neu zu zünden und der Versuch musste abgebrochen werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine Einrichtung zur Kühlung installiert. Zusätzlich eingebaute einfache Abschirmbleche und Isolierungen am Brenner verzögerten das Rückzünden lediglich um wenige Sekunden. Als optimalste Lösung stellte sich ein aktives Kühlsystem mit Luftkühlung heraus. Dazu wurden dünne Bleche um die Brenner gebogen und mit Druckluft durchströmt. In Abbildung 28 ist das Kühlkonzept dargestellt: Die Grafik zeigt einen blauen Schlauch, der die Druckluft zu einer selbst gebauten Druckluftlanze führt. Die Druckluftlanze bläst die Kaltluft anschließend direkt hinter der Brennerdüse zwischen den gebogenen Blechen ein.

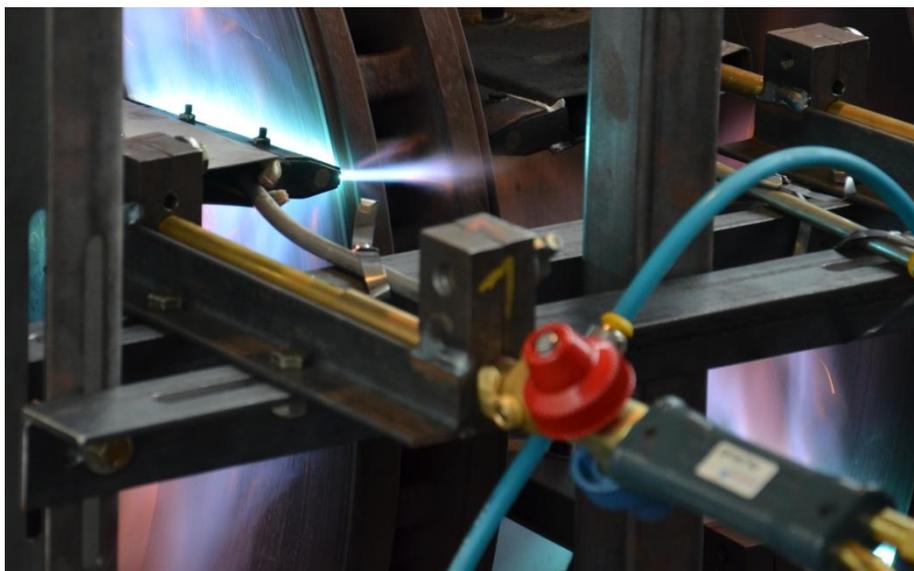


Abbildung 28: gekühlter Schweißbrenner

4.3 Die Messtechnik

Am Prüfstand wurden insgesamt 38 Temperatursensoren angebracht, um das Verhalten aller Komponenten in der Kavität darstellen zu können. Im Anhang befindet sich dazu eine Auflistung aller verwendeten Sensoren mit deren Typ und Eigenschaften. Wie bereits vorhergehend erwähnt handelt es sich um einen einmalig durchgeführten Versuch. Zur Kostenreduzierung stellte die Firma AVL die Messtechnik bereit und führte die Installation sowie die Inbetriebnahme durch. In Abbildung 29 sind die verwendeten Messstellen in einer Grafik dargestellt.

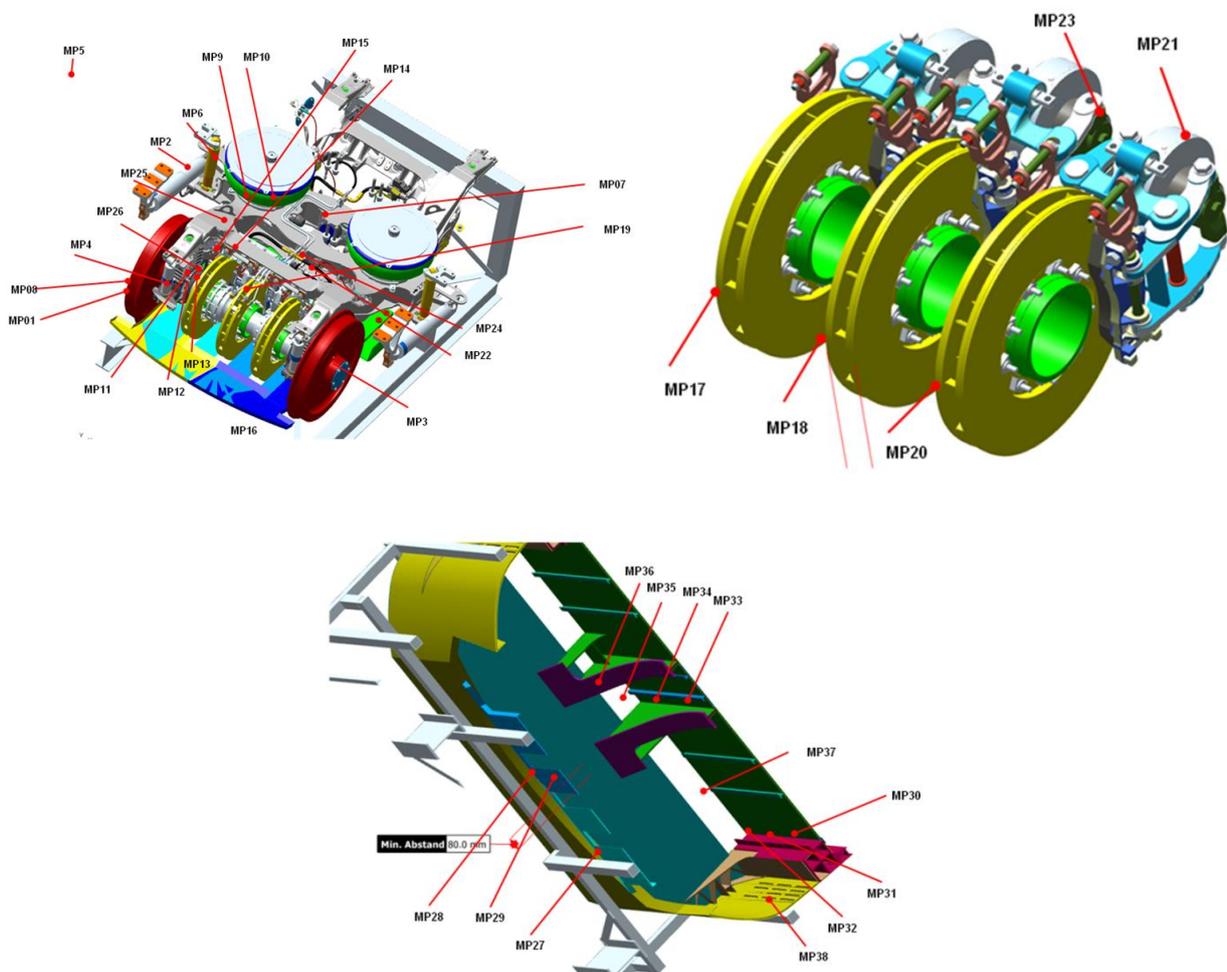


Abbildung 29: Messtellen am Prüfstand

Da sich der Radsatz beim Aufheizen drehte, überwachten drei berührungslose Infrarottemperatursensoren die Bremsscheibentemperatur. Kam es beim Aufheizen zu einer Rückzündung, wurde die Bremsscheibe aufgrund der unvollständigen Verbrennung des Gases verrußt. Das Messergebnis verfälschte sich an dieser Stelle durch die Änderung des

Emissionsgrads. Die restlichen Temperatursensoren am Radsatz waren während des Aufheizens vom Messverstärker abgesteckt und wurden erst nach dem Abschalten des Antriebs eingesteckt. Des Weiteren wurde eine Wärmebildkamera an der Innenseite der Schottwand zur Visualisierung des Wärmestroms installiert. Da sich die Kamera in der Kavität befand, musste diese mit einer Wasserkühlung ausgestattet werden (Abbildung 30).



Abbildung 30: Wärmebildkamera mit Wasserkühlung

4.4 Die Versuchsdurchführung

Nachdem der Aufbau des Prüfstands abgeschlossen war, erfolgte dessen Installation und Inbetriebnahme. Der Versuch fand aus Gründen der Sicherheit an einem überdachten Vorplatz am Werksgelände statt. Für die gesamte Durchführung des Versuchs wurden drei Arbeitswochen (15 Tage) eingeplant. Die genaue Zeitaufstellung ist in Tabelle 3 dargestellt.

Pos.	Tätigkeit	Dauer
1	Montage des Fahrwerks am Prüfstand	1
2	Aufbau des Prüfstands am Versuchsort	2
3	Installation der Messtechnik	1
4	Aufbau und Inbetriebnahme der Brenner inklusive Armaturen und Gasflaschen	3
5	Vorversuche und Kalibration der Messtechnik	3
6	Versuchsdurchführung	3
7	Demontage der Messtechnik	1
8	Abbau und Einlagerung des Prüfaufbaus	1
Gesamt [Tage]:		15

Tabelle 3: Zeitplan Entwärmungsversuch

Angesichts der Komplexität der durchzuführenden Arbeiten während des Versuchs war ein Personalaufwand von fünf Personen (inklusive Feuerwehrmann zur Überwachung der Sicherheit) und zwei Personen zur Vorbereitung eines erneuten Versuchsdurchlaufs erforderlich. Nachdem die Messtechnik kalibriert war und die Brenner mit gleichmäßig verteilter Wärmeleistung ohne Rückzündungen funktionierten, wurde mit den einzelnen Versuchsdurchläufen begonnen. Um diverse Einflüsse auf das Messergebnis ausschließen zu können, durchlief jede Konfiguration (Art der Verkleidung am Prüfstand) vier Entwärmungsversuche. Dabei erfolgte zweimal eine Erhitzung auf die maximale Bremsscheibentemperatur von 350 °C und zweimal auf 450 °C. Um die Versuche miteinander vergleichen zu können und den Einfluss der Umwelt so gering als möglich zu halten, wurden alle Versuche vom Prozess- und Zeitablauf gleich durchgeführt. Die Versuchszeiten eines Tages waren 09:00,10:30,13:00 und 14:30 Uhr.

Die Versuche gliederten sich in vier Phasen:

1. Vorbereitungsarbeiten

Ein Mitglied des Personals aktivierte und überprüfte die Messtechnik (Mess-PC, Messverstärker, usw.). Anschließend wurden die gasführenden Armaturen und Ventile geöffnet und zur Sicherheit wurde vor jedem Versuch eine Dichtheitsprüfung durchgeführt. Die Kavität war entsprechend positioniert, sodass diese nach der Aufheizphase sofort über das Fahrwerk geschoben werden konnte. Darauf folgte die Inbetriebnahme des Antriebs des Radsatzes mit einer Drehzahl von circa 30 U/min. Zum Abschluss wurde das Versuchsprotokoll ausgefüllt, um die Randbedingungen vor Ort dokumentieren.

2. Aufheizphase

Nachdem die Vorbereitungsarbeiten abgeschlossen waren, zündete geschultes Personal (Schweißer aus der Fertigung) die Schweißbrenner und positionierte diese zu den Bremsscheiben. Eine exakte Einstellung der Brennerposition relativ zur Bremsscheibe war von Relevanz da es bei zu geringem Abstand der Brenner zu Rückzündungen kam und bei zu weitem Abstand die Heizleistung zu gering war. Bei Vorversuchen stellte sich eine optimal Position von circa 15 mm Abstand heraus (Abbildung 31). Nachdem die Brenner positioniert und die Schutzbleche um die Bremsscheiben zur Abschirmung der Strahlungswärme an die umliegenden Bauteile eingehängt waren, folgte die Aufheizung bis zur maximalen Oberflächentemperatur von 350 °C beziehungsweise 450 °C.

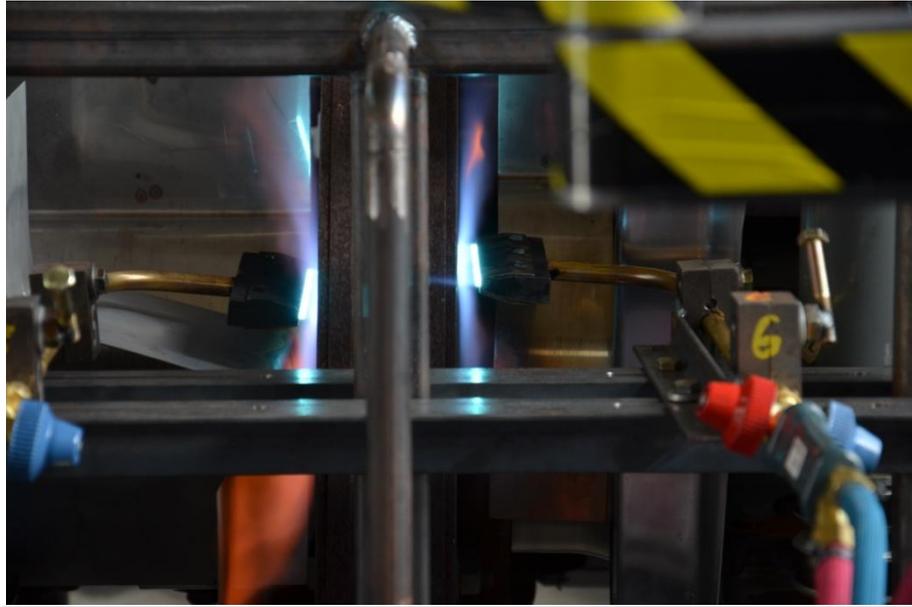


Abbildung 31: optimale Position der Schweißbrenner

3. Abkühlphase

Nach circa 16 Minuten war die gewünschte Oberflächentemperatur erreicht, die Brenner konnten abgeschaltet und mit dem Gestell beiseitegeschoben werden. Um die Zeit zum Aufschieben der Kavität gering zu halten, wurde zeitgleich der Antrieb abgeschaltet, die Temperatursensoren am Radsatz mit dem Messverstärker verbunden und die Schutzbleche entfernt. Danach wurde das Ventil für die Wasserkühlung der Wärmebildkamera geöffnet und die Kavität dicht über das aufgeheizte Fahrwerk geschoben. Zu diesem Zeitpunkt begann die tatsächliche Messung des Entwärmungsverhaltens vom Fahrwerk. Die Messung stoppte sobald die Oberflächentemperatur der Bremsscheiben unter 100 °C sank.

4. Nachbereitungsarbeiten

Nach Beendigung der Messung musste die Kavität wieder aufgeschoben werden, um diese für den nächsten Versuch vorzubereiten. Die Abkühlgeschwindigkeit des Fahrwerks erhöhte sich mittels Antrieb des Radsatzes mit einer Drehzahl von circa 150 U/min. Die Ventile der Schweißbrennerarmaturen wurden geschlossen und alle Leitungen druckfrei gemacht. Darauf folgten das Ausfüllen des Versuchsprotokolls sowie die Speicherung der Messungen. Die Messtechnik wurde stromlos gemacht und nach einer Abkühlzeit von circa 1,5 Stunden konnte der nächste Versuch durchgeführt werden.

4.5 Versuchsauswertung – Erkenntnisse aus dem Feldversuch

4.5.1 Auswertetool

Nachdem von jeder Konfiguration vier verwendbare (ohne Abbruch und Rückzündungen) Versuche durchgeführt und die Abbauarbeiten des Versuchs abgeschlossen waren, begann die Auswertung der Versuche. Die Messdaten lagen in Form von .xls-Files vor. Da von jeder Konfiguration vier Versuche stattfanden, welche jeweils 38 Messsignale erfassten, lagen 456 Datenreihen mit mehr als 6500 Einträgen vor. Auf Basis dieser Datenmenge wurde zur Auswertung dieser das Programm Matlab gewählt. Zur vereinfachten Datenverarbeitung programmierte der Verfasser der vorliegenden Arbeit ein Auswertetool, welches die einzelnen Versuche in Matlab einliest und diese mit anderen Sensorsignalen beziehungsweise Versuchen vergleicht. Da die Aufnahmezeiten der einzelnen Versuche variierten und die Aufheizzeiten voneinander abwichen, mussten die Signale in einem Punkt übereinandergelegt werden. Hierfür wurde die maximale Temperatur der mittleren Bremsscheibe, welche auch beim Versuch als Referenz zum Abschalten der Brenner diente, herangezogen. Das Auswertetool suchte im jeweiligen Versuch nach dem Zeitpunkt der maximalen Temperatur der Bremsscheibe und definierte diesen als Referenzpunkt um folgend mittels Überlagerung der Signale aus anderen Versuchen einen Vergleich durchführen zu können. Der Programmcode ist im Anhang beigefügt.

4.5.2 Bremsscheibe

Zur näheren Erläuterung des durchgeführten Versuchs folgt die Darstellung eines Diagramms (Abbildung 32) aus welchem der Temperaturverlauf der mittleren Bremsscheibe über die Zeit in Sekunden abgelesen werden kann. Die drei überlagernden Graphen stehen für die jeweilige Konfiguration der Kavität.

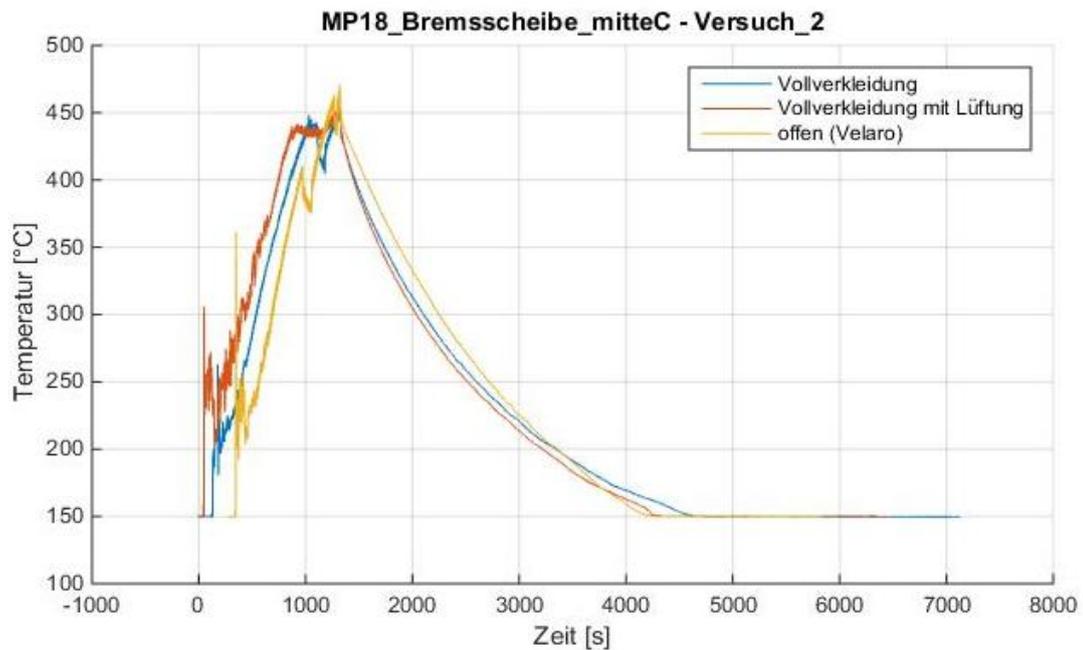


Abbildung 32: Temperaturverlauf - Mittlere Bremsscheibe

Zwischen dem Zeitpunkt 0 Sekunden und 1300 Sekunden wurde die Bremsscheibe beheizt. Die Grafik zeigt in diesem Bereich stark schwankende Werte an, welche auf die schwankende Flamme beziehungsweise dem Wärmestrom in Folge natürlicher Konvektion zurückzuführen sind. Nach Erreichen der Endtemperatur von 450 °C wurden die Brenner deaktiviert und die Kavität geschlossen. Es zeigt sich eine typische Abkühlkurve die mit einem Exponentialansatz angenähert werden kann. Der nicht stetige Übergang in eine horizontale Kurve ist auf die im Versuch eingesetzten Infrarotsensoren zurückzuführen. Aus Gründen der genutzten Hardware konnte die Temperatur erst ab 100 °C ermittelt werden. Sank die Temperatur unter 100 °C, lieferten die Sensoren lediglich ein konstantes Ausgangssignal. Dadurch konnte zwischen den verschiedenen Konfigurationen der Kavität kein Unterschied erfasst werden (siehe Abbildung 32).

4.5.3 Radsatzwelle

Der Sensor der Radsatzwelle war in der Hohlbohrung auf Höhe der mittleren Bremsscheibe installiert. Der grafisch dargestellte sprunghafte Anstieg der Temperatur kann darauf zurückgeführt werden, dass der Sensor erst nach dem Abschalten des Antriebs und dem Aufheizen mit dem Messverstärker verbunden wurde (Abbildung 33). Der Maximalwert verschiebt sich zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund der Wärmeleitung von der Bremsscheibe zur Welle. Zudem liegt ein deutlich flacherer Temperaturgradient vor, welcher auf die große thermische Masse (= Masse der Welle inklusive Räder mal der Wärmekapazität) zurückzuführen ist. Der gesamte Radsatz nimmt aufgrund der hohen materialbedingten

Wärmeleitfähigkeit einen Großteil der Wärmeenergie auf. Es liegt ein geringer Unterschied zwischen den Konfigurationen vor (wie in Abbildung 33 grafisch dargestellt).

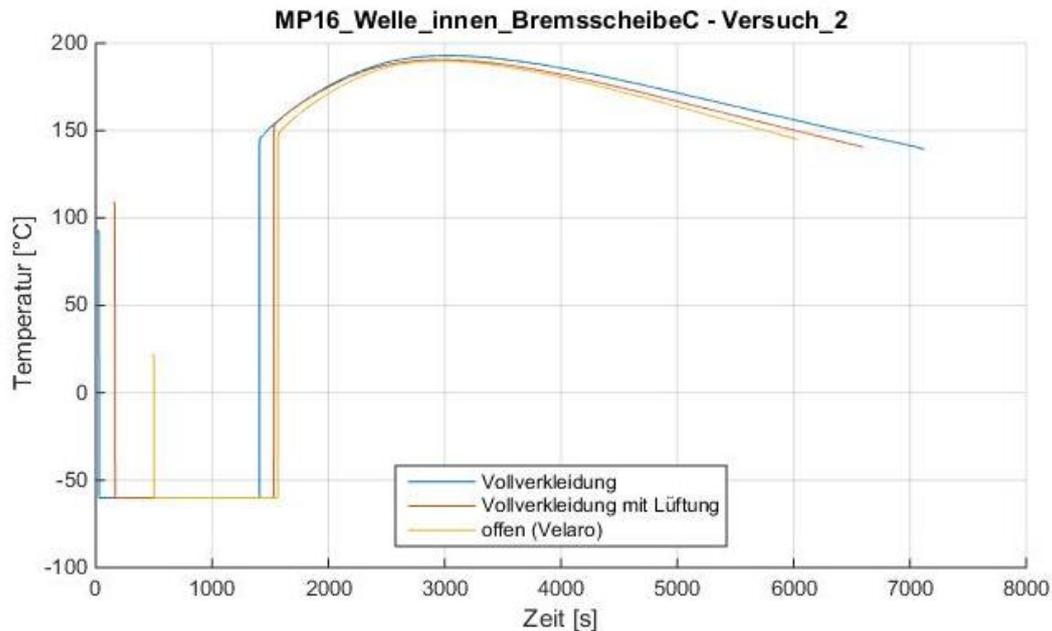


Abbildung 33: Temperaturverlauf- Bremsscheibe

4.5.4 Sekundärer Drehdämpfer

Beim sekundären Drehdämpfer ist ein steiler Anstieg der Temperatur erkennbar sobald die Kavität geschlossen wurde (Abbildung 34). Da der Dämpfer entfernt von der Wärmequelle lag und die Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Anbindung mittels Gummimetallelementen gering war, dominierte hierbei die Konvektion. Dies bedeutet, dass der Wärmeeintrag größtenteils über die erwärmte Umgebungsluft in der Kavität erfolgte. Die maximale Temperatur erreichte der Dämpfer wenige Sekunden vor dem Öffnen der Kavität. Bei der Vollverkleidung lag eine höhere Temperatur (circa 45 °C) vor, wobei auch diese nicht als gefährdend für die Funktion des Dämpfers einzustufen ist. Der in der Grafik ersichtliche Unterschied zwischen „Vollverkleidung“ und „Vollverkleidung mit Lüftungsschlitzen“ ergab sich aus der abweichenden Umgebungstemperatur (Abbildung 34). Die Konfiguration „Vollverkleidung mit Lüftungsschlitzen“ wurde an einem wesentlich kälteren Tag durchgeführt. Wenn das Ergebnis mit der Umgebungstemperatur abgeglichen wird, ist der Unterschied zur Konfiguration „Vollverkleidung“ nicht wesentlich.

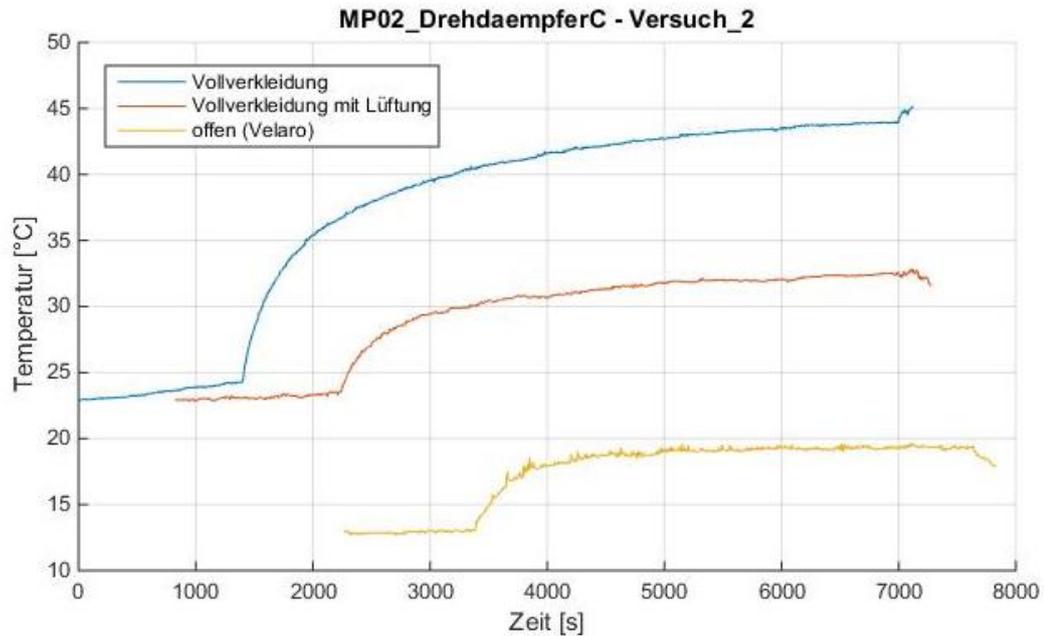


Abbildung 34: Temperaturverlauf – Drehdämpfer

Weitere kritische Bauteile wie Kabel oder Dämpfer zeigten dasselbe Verhalten wie der Drehdämpfer weswegen auf die Beschreibung weiterer Komponenten verzichtet wird.

4.6 Fazit

Aus dem durchgeführten Versuch lassen sich drei relevante Schlussfolgerungen ableiten:

1. Bauteile mit guter Wärmeleitung, nehmen einen Großteil der eingebrachten Wärme auf und speichern diese. Die folgende Wärmeabgabe erfolgt langsam was sich positiv auf die kritischen Bauteile auswirkt.
2. Kritische Bauteile wie Dämpfer und Kabel werden nahezu ausschließlich über die Umgebungsluft in der Kavität aufgeheizt. Die kritischen Bauteiltemperaturen sind weit von den gemessenen Bauteiltemperaturen entfernt.
3. Das wichtigste Fazit, welches aus dem Versuch gezogen werden kann, ist, dass die Konfigurationen mit Vollverkleidung (Vollverkleidung und Vollverkleidung mit Lüftungsschlitze) ähnliche Maximaltemperaturen erreichen wie die unverkleidete Konfiguration. Dies lässt schließen, dass sich die vollverkleideten Fahrwerke in der Praxis ähnlich zu den derzeit in Betrieb befindlichen Fahrwerken verhalten würden. Da es bei derzeitigen Fahrwerken keine dokumentierten Schwierigkeiten durch erhöhte Bauteiltemperaturen gibt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Vollverkleidung von Fahrwerken keine thermischen Probleme mit sich bringt.

Mittels Durchführung des beschriebenen Versuchs konnte der praktische Nachweis erbracht werden, dass verkleidete Fahrwerke aus thermischer Sicht einsetzbar sind. Die Messdaten zur Erstellung eines thermischen CFD-Modells wurden aufbereitet und anschließend an die Firma AVL übergeben. Das CFD-Modell (CFD=Computational Fluid Dynamics) wurde mit den Abkühlkurven des praktischen Versuchs abgeglichen. Mit dem erstellten CFD-Modell konnten zudem andere Betriebsszenarien mit Vollverkleidung nachsimuliert werden. Die Erkenntnisse der Simulationen deckten sich mit den zuvor gewonnenen Erkenntnissen aus dem Feldversuch.

5. Anforderungen an die Verkleidung

Da diverse theoretische sowie praktische Untersuchungen zur Verkleidbarkeit von Fahrwerken im Vorfeld durchgeführt wurden (siehe vorhergehende Kapitel), sollte in Folge eine entsprechende Verkleidung unter Beachtung aller Einflüsse konstruktiv umgesetzt werden. Da die seitliche Verkleidung der Fahrwerke im Aufgabenbereich des Wagenkastenbaus liegt, beinhaltet die vorliegende Arbeit die konstruktive Umsetzung der Unterbodenverkleidung eines Fahrwerks. Bevor mit der Konstruktion begonnen werden kann, müssen die Randbedingungen beziehungsweise die Anforderungen und Einflüsse an die Unterbodenverkleidung ermittelt werden. In Abbildung 35 sind mögliche Einflüsse auf die Verkleidung aufgelistet (im Anhang ist eine größere Darstellung der Grafik zu finden). Die angeführte Darstellung soll die Komplexität der Aufgabenstellung aufzeigen.

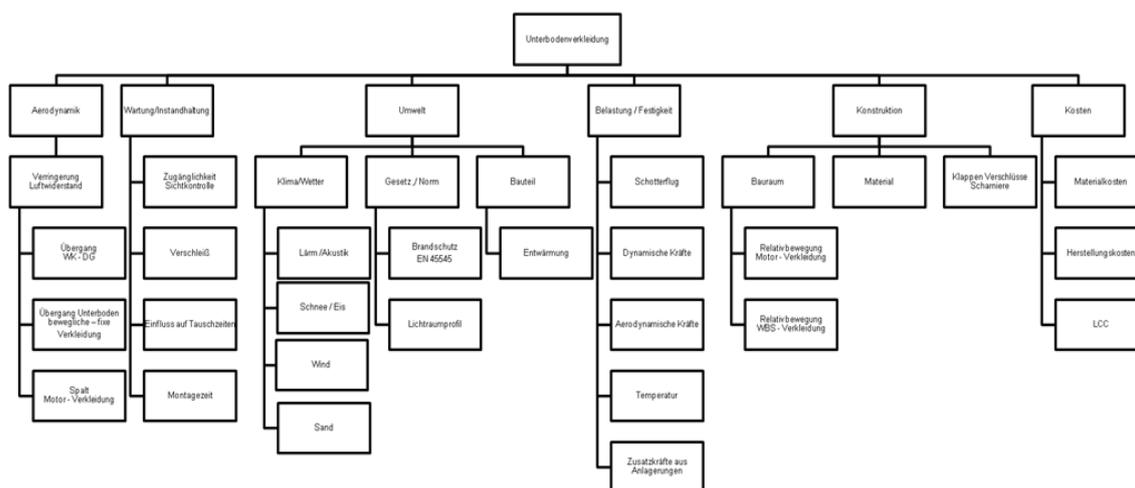


Abbildung 35: Einflüsse und Anforderungen

Es lässt sich ableiten, dass viele Faktoren in die Konstruktion der Unterbodenverkleidung eingehen. Einige davon wie zum Beispiel aerodynamische Kräfte oder Kosten sind Faktoren die auch in anderen Branchen (zum Beispiel Automobilbranche) zu finden sind. Jedoch gibt es einige Einflüsse, die für die Schienenfahrzeugbranche separat zu betrachten sind. Auf jene wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen.

5.1 Steinschlag/Schotterflug

Bei Fahrten mit Schienenfahrzeugen über 250 km/h tritt das Phänomen des Schotterflugs auf. Es handelt sich dabei um Steine, welche aus dem Schotterbett aufgrund der entstehenden Unterbodenströmung herausgerissen werden und am Zug beziehungsweise am Fahrwerk einschlagen. Der vom Fahrwerk abprallende Stein fliegt daraufhin ins Schotterbett zurück und

löst weitere Steine aus diesem heraus. In weiterer Folge wird eine Lawine an Schottersteinen ausgelöst die den Zug beschädigt. Jedoch tritt dieses Phänomen nur im Bereich der Fahrwerke und der Luftaustritte der Lüfter auf. Dies ist damit zu begründen, dass an diesen Stellen die Unterbodenströmung erheblich turbulenter ist als im Bereich der Wagenmitte, wo der Unterboden eine relativ glatte Oberfläche aufweist hat und die Strömung nur geringfügig gestört wird (Abbildung 36). (SIEMENS Mobility, 2015) (Raumfahrt, 2014)

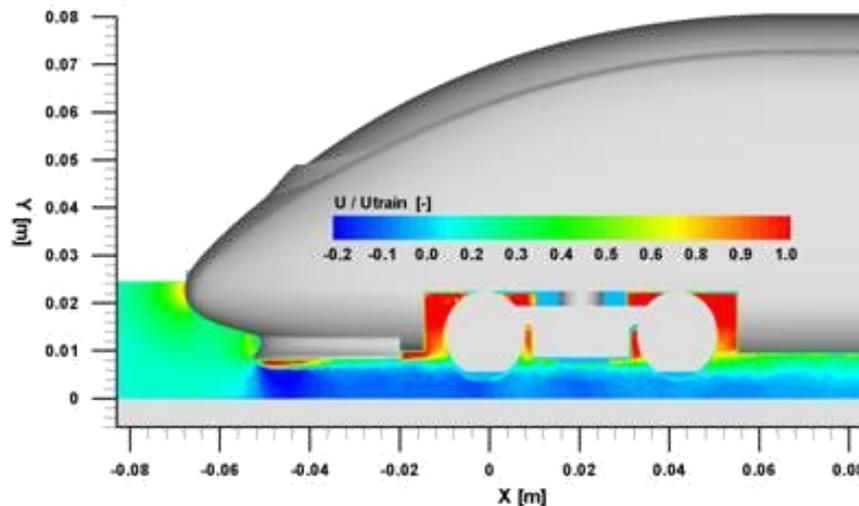


Abbildung 36: Strömungsfeld Unterboden

Vorwiegend tritt der Schotterflug auf Strecken mit einer hohen Bahnschotteroberkante auf (zum Beispiel spanische Hochgeschwindigkeitsstrecken). Ein derartiger Steinschlag kann am Zug, insbesondere am Fahrwerk, zu erheblichen Beschädigungen führen (Abbildung 37).



Abbildung 37: Schotterschäden am Velaro Eurostar

Der Energieinhalt eines Schottersteines kann mit der infolge angeführten Forme (Formel 4) abgeschätzt werden. Nach einer firmeninternen Spezifikation liegen die maximale Masse eines Schottersteines bei circa 250 g und die maximale Geschwindigkeit bei 300 km/h. Dies ergibt eine kinetische Energie von $E_{kin} = 870J$. Diese Energie tritt auf, wenn der Stein im rechten Winkel auf die Oberfläche auftrifft. Nach entsprechender Neigung der Fläche nimmt die Energie entsprechend einer Sinusfunktion ab. (SIEMENS AG, 2015)

$$E_{kin} = \frac{m * v^2}{2} * \sin \alpha$$

Formel 4: kinetische Energie Schotterflug

Vorhergehende CFD-Simulationen haben gezeigt, dass der Effekt des Schotterflugs bei einer aerodynamischen Unterbodenverkleidung minimiert beziehungsweise weitestgehend vermindert wird. Da es aber trotzdem zu einzelnen Einschlägen von Steinen, ausgelöst durch herabfallende Eisbrocken vom Fahrwerk, kommen kann, ist Voraussetzung, dass die Verkleidung einzelnen Einschlägen standhält, um diese nicht nach jedem Einschlag eines aufgewirbelten Fremdkörpers tauschen zu müssen. Die dafür benötigten Wandstärken für eine Unterbodenverkleidung sind in der firmeninternen Spezifikation für Schotterschutz (Firma SIEMENS) festgelegt. Durch eine vollflächige Unterbodenverkleidung wären alle weiteren Komponenten zum Beispiel die Radsatzwelle geschützt und müssen nicht mit zusätzlichen Schotterschutzeinrichtungen abgesichert werden. Dies hat zudem im Vergleich zu aktuellen Fahrwerkskonzepten Vorteile hinsichtlich Gewichtseinsparung und Kosten. Es ist in diesem Fall nicht erforderlich Radsatzwellen mit zusätzlich energieabsorbierenden Materialien zu beschichten. (SIEMENS AG, 2015)

5.2 Klimatische Anforderungen

Hochgeschwindigkeitszüge werden in nahezu allen Regionen der Welt eingesetzt. Dabei sind diese sämtlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Ein großes Problem stellt der Einsatz von Zügen in kalten Regionen mit großen Schneemengen dar. Im Betrieb lagert sich Schnee im Bereich des gesamten Fahrwerks an. Aus diesem Schnee kann sich infolge durch abwechselnde Wetterverhältnisse (tagsüber Tauwetter und nachts Temperaturen unter dem Gefrierpunkt) Eis entwickeln. Daraus kann sich eine Einschränkung der Freigängigkeit von Komponenten wie Federstufen oder Dämpfer ergeben. In weiterer Folge ist ein sicherer Betrieb nicht mehr gewährleistet. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich aufgrund der Vollverkleidung kein Eis am Fahrwerk anlegt. Versuche am russischen Hochgeschwindigkeitszug „Sapsan“ zeigten, dass sich Eis und Schnee in jedem noch so

kleinen bestehenden Spalt anlegt und dies nicht vermieden werden könne (Abbildung 38). Zukünftig sollten weitere Forschungsarbeiten über das Verhalten eines verkleideten Fahrwerks bei Betrieb im Winter durch den Bau einer Prototypenverkleidung getätigt werden, um eine generelle Aussage treffen zu können. (SIEMENS AG, 2015)



Abbildung 38: Eis am Velaro in Russland (SIEMENS AG, 2015)

5.3 Brandschutz

Hochgeschwindigkeitszüge müssen, aufgrund deren Einsatzes als Personentransportmittel, hohen Sicherheitsanforderungen und -standards entsprechen. Eine der Anforderungen an die Züge ist, das sichere Verhalten im Falle eines Brandes. Welche Bedingungen zur Sicherstellung des Brandschutzes für Schienenfahrzeuge erfüllt werden müssen, sind in der Brandschutznorm EN-45545 festgelegt. In dieser Norm werden die Komponenten in Klassen unterteilt. Die Einteilung erfolgt über den Einbauort im Zug und der exponierten Oberfläche sowie deren Masse (Abbildung 39). Ein Vergleich mit den Brandschutzbestimmungen im Automotive Bereich bzw. in der Luftfahrt zeigt, dass die einzuhaltende Norm wesentlich strengere Anforderungen an den Brandschutz unterliegt. Im Anhang sind die Einteilung der Klassen sowie die zu erfüllenden Tests mit den entsprechenden Grenzwerten dargestellt.

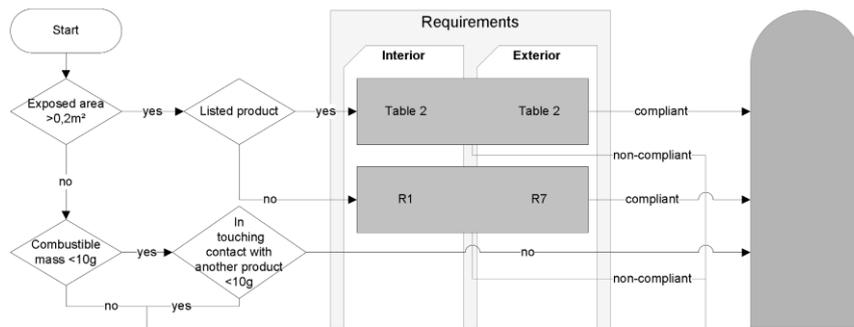


Abbildung 39: Klassifizierung der Komponenten

5.4 Hauptabmessungen

Die zulässige Größe eines Schienenfahrzeugs ist abhängig sowohl von dem Betreiber als auch den vorhandenen Gegebenheiten der Infrastruktur abhängig. Da es innerhalb des Betriebs zu keinen Kollisionen mit Schildern, Bahnsteigen oder Tunnelwänden kommen darf, legt der Betreiber den vorhandenen Raum für das Schienenfahrzeug fest (Abbildung 40). (Haigermoser, 2002)

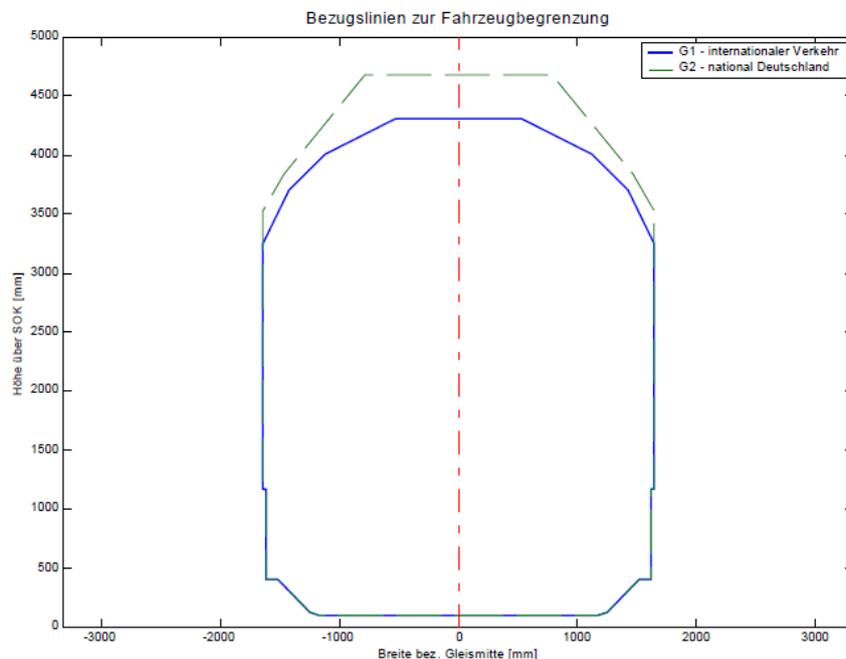


Abbildung 40: Lichtraumprofil

Dies geschieht über ein röhrenförmiges Profil entlang der Schienenrichtung. Das sogenannte „Lichtraumprofil“ definiert den maximalen Platzbedarf eines Schienenfahrzeugs inklusive aller Federwege, Querspiele, Stellungen des Radsatzes im Gleis sowie die Einschränkung des

Fahrzeuges aufgrund der Bogenkrümmung. Letzteres wird im folgenden Bild grafisch dargestellt (Abbildung 41). (Haigermoser, 2002) (Schindler, 2014)

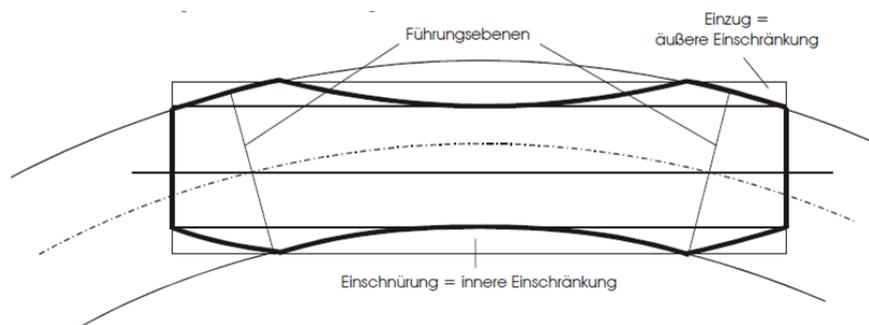


Abbildung 41: Einschränkung im Bogen

Die Grenzlinie der festen Anlagen (Lichtraum) bezieht sich auf die Gleismitte, folgt somit der Gleismittellinie. Das Fahrzeug wird in den beiden Führungsebenen entlang des Bogens geführt. Betrachtet man die Fahrzeugmitte, so verschiebt sich relativ zum Fahrzeug die fahrwegseitige Grenzlinie nach außen. Die zulässige Breite wird eingeschnürt (innere Einschränkung). Am Fahrzeugende beziehungsweise außerhalb der Führungsebene verschiebt sich die fahrwegseitige Grenzlinie nach innen. Das Fahrzeug muss am Ende eingezogen werden (äußere Einschränkung). Für den Fahrzeugunterboden müssen Kuppen und Wannen bei der Berechnung der Einschränkung berücksichtigt werden. (Haigermoser, 2002)

6. Aerodynamische Unterbodenverkleidung

Eine der Aufgaben dieser Arbeit war die konstruktive Umsetzung einer aerodynamischen Unterbodenverkleidung. Die Machbarkeit aus thermischer Sicht konnte mittels des Entwärmungsversuchs bestätigt (Kapitel 4), die Anforderung an die Verkleidung ermittelt (Kapitel 5) und daraufhin mit der Konstruktion einer Unterbodenverkleidung begonnen werden. Da die Verkleidung einen möglichst niedrigen Luftwiderstand erreichen sollte, war dieses Ziel nur in enger Abstimmung mit der aerodynamischen Abteilung der Firma SIEMENS umsetzbar. In den wöchentlichen Online- Live-Meetings wurden die Außenkontur sowie Konstruktionsdetails der Verkleidung mit der Aerodynamik abgestimmt.

6.1 Die Form

Damit der Luftwiderstand so weit als möglich reduziert werden kann, ist es von Relevanz das gesamte Fahrwerk am Boden zu verkleiden. Die Form der Verkleidung wird von oben durch die Fahrwerkskomponenten und von unten durch das Lichtraumprofil eingeschränkt, wodurch für die Verkleidung lediglich ein geringer Raum zu Verfügung steht. Abbildung 42 zeigt den vorhandenen Platz zwischen den Bauteilen des Fahrwerks und der Begrenzung zum Lichtraumprofil.

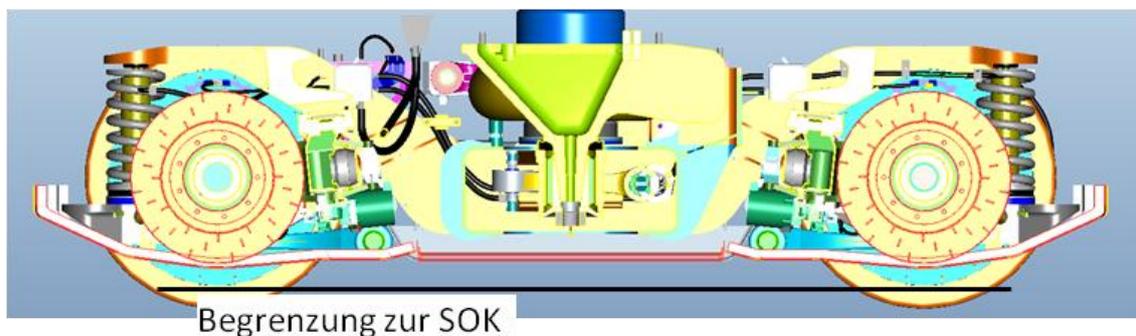


Abbildung 42: Begrenzung der Verkleidung

Dieser Zwischenraum muss aufgrund von Bauteiltoleranzen und Federwegen eingehalten werden. Der benötigte Abstand zur Schienenoberkante wird in Tabelle 4 dargestellt. Der Lichtraum ist in der Norm mit 80 mm von der Schienenoberkante festgelegt. Der Radverschleiß an einem Rad mit einem Durchmesser von 920 mm wird mit 30 mm im Radius abgeschätzt. Die Aufhängungselemente werden als Federelemente ausgeführt, wofür ein Federweg von ± 5 mm eingerechnet wird. Die Berechnung von Montage- und Fertigungstoleranzen erfolgt anhand ähnlicher Bauteile und wird mit 5 mm festgelegt. In Summe ergibt sich für den Freiraum ein Abstand von 120 mm nach unten zur

Schienenoberkante. Unter den Fahrwerksrahmen muss ein zusätzlicher Primärfederweg von 40 mm eingerechnet werden. Die Vermessung des vorhandenen Bauraums unter den Bremscheiben am Radsatz lässt erkennen, dass nach oben hin nicht der benötigte Platz von 160 mm zur Verfügung steht. Daraus folgt, dass keine durchgehende Verkleidung aus einem Bauteil umsetzbar ist.

Begrenzung zur SOK	
Lichtraum	80 mm
Radverschleiß	30 mm
Federweg	5 mm
Toleranzen	5 mm
Gesamt (Gesamt mit Primärfederweg)	120 mm (160mm)

Tabelle 4: Abstand zur Schienenoberkante

Nach Abzug der zuvor erwähnten Federwege und Toleranzen bleiben lediglich wenige Millimeter, um unter den Bremscheiben eine Verkleidung anzubringen. Dies ist der Grund, dass durchgehende Sandwichplatten oder Wabenkernplatten als Konstruktionslösung nicht einsetzbar sind.

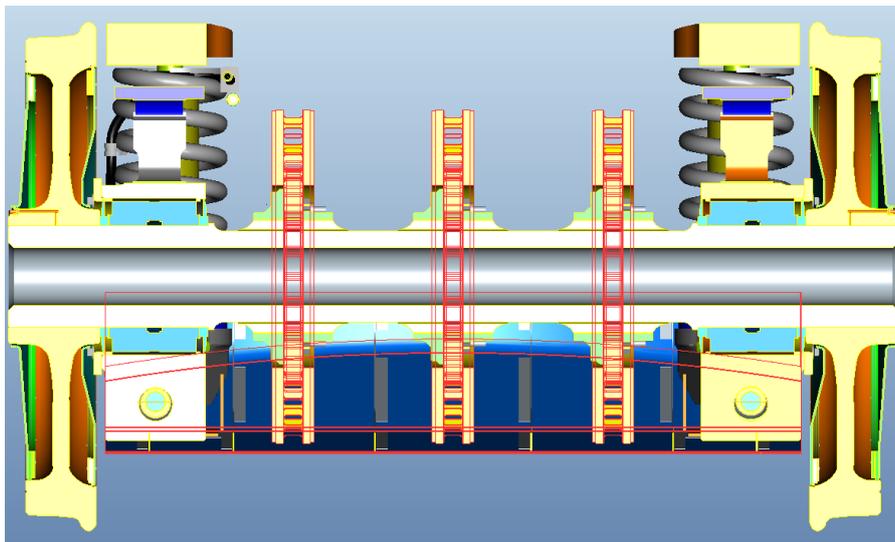


Abbildung 43: Abstand der Verkleidung zu den Bremscheiben

6.2 Konstruktionshistorie

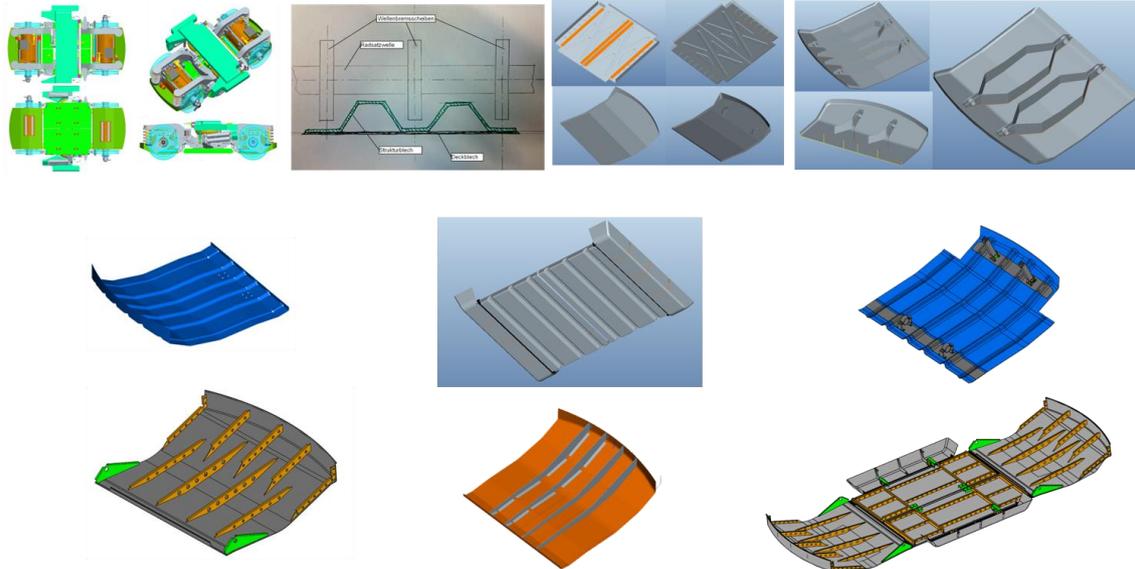


Abbildung 44: Konstruktionshistorie Unterbodenverkleidung

Nachdem die Form der Unterbodenverkleidung bis auf wenige Freiheitsgrade und Winkel durch den Bauraum definiert waren, folgte die Konstruktion der Verkleidung. Da bisher noch keine Unterbodenverkleidung am Fahrwerk umgesetzt wurde, waren einige Schleifen notwendig um eine realisierbare Konstruktion zu erstellen.

Abbildung 44 zeigt alle Konstruktionsvarianten in chronologischer Reihenfolge (von der ersten Idee bis zur einsetzbaren Variante welche sich aufgrund des Konzepts gegenüber den anderen durchsetzte).

Die gesamte Endkonstruktion der Verkleidung besteht aus drei Bauteilen:

1. **Frontbleche** (Abbildung 45, Position 1):
Die Frontbleche verkleiden den Radsatz sowie die Schwingen.
2. **Mittelbleche** (Abbildung 45, Position 2):
Die beiden eingesetzten Mittelbleche können in Längsrichtung geöffnet werden.
3. **Seitenbleche** (Abbildung 45, Position 3):
Die beiden Seitenbleche sind unter dem Langträger montiert und verkleiden den Rahmen auf der Seite sowie darüber hinaus.

Die Frontbleche sind infolge der sich ergebenden Relativbewegungen zwischen Rahmen und Radsatzführung beim Ein- und Ausfedern an den Schwingen montiert; die Mittelbleche sowie die Seitenbleche sind am Rahmen befestigt.

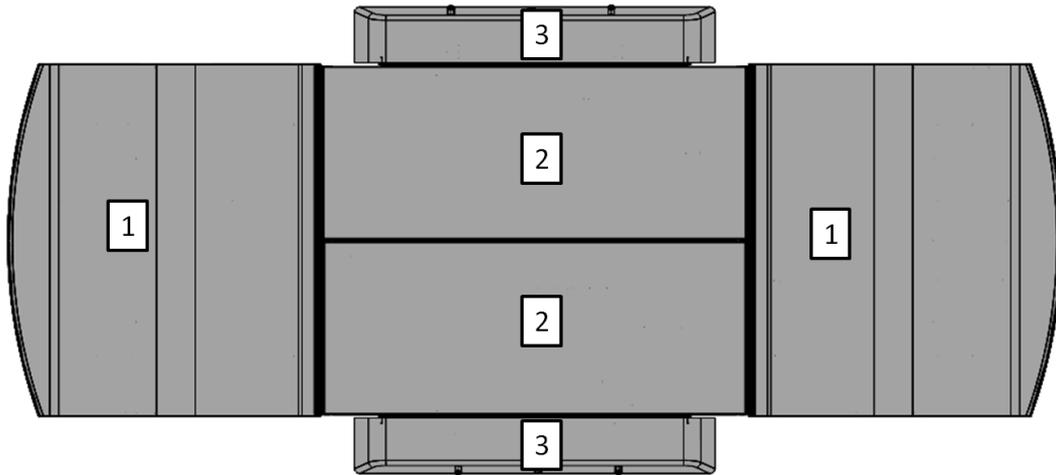


Abbildung 45: Unterbodenverkleidung – Komponenten

An den Frontblechen entsteht aufgrund des Übergangs zum wagenkastenseitigen Unterboden ein Radius von circa 1900 mm (Mittelpunkt befindet sich in Fahrwerkmitte). Diese Umsetzung erfolgt um sicherstellen zu können, dass die geöffneten Spalte zwischen Wagenkasten und Fahrwerk beim Ausdrehen einen konstanten Abstand beibehalten. Die Größe der beiden Spalte setzt sich aus der Summe aller gleichzeitig vorkommenden Relativbewegungen in Quer- und Längsrichtung zwischen Fahrwerk und Wagenkasten zusammen. Nach den ersten Berechnungsschleifen der Aerodynamik stellte sich heraus, dass dieses Konzept nur dann optimal ist, wenn die Spalte zwischen den Komponenten abgedichtet wird. Ohne Abdichtung wäre der Massendurchsatz in der Kavität zu groß (Werte können aufgrund von Firmeninteressen nicht veröffentlicht werden) und der Luftwiderstand würde sich nur wenig im Vergleich zu einem unverkleideten Unterboden verringern. Die Abdichtung zwischen den Mittel- und Seitenblechen kann mit einfachen Silikondichtstreifen, welche an der Verkleidung aufgeklebt werden, realisiert werden.

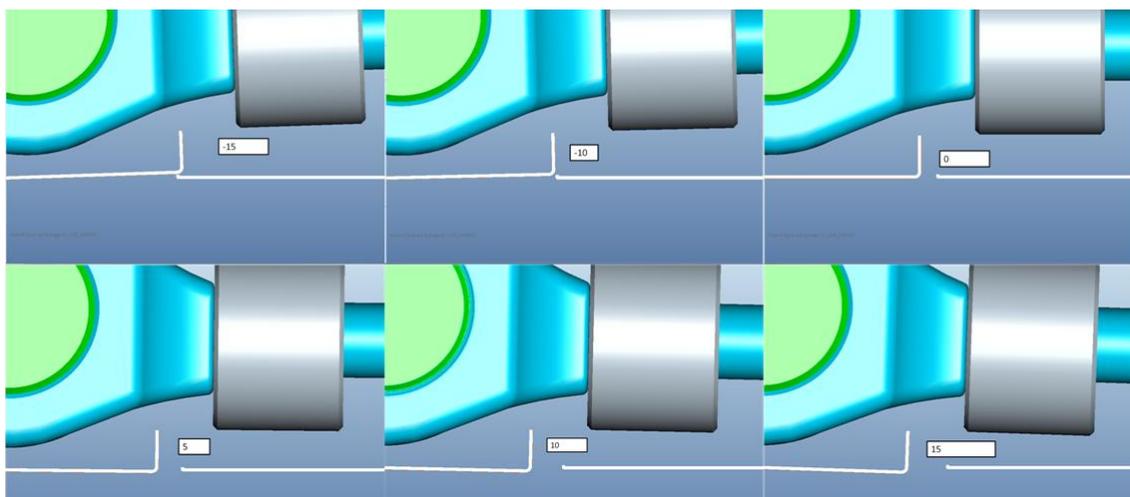


Abbildung 46: Relativbewegung – Dichtung

Zwischen den Front- und Mittelblechen gestaltet sich eine solche Umsetzung aufgrund der Relativbewegungen (Frontbleche bewegen sich mit den Schwingen) schwieriger. Die Bewegung kann als Drehung um die Achse des Radsatzes angesehen werden. Da die Mittelbleche am Rahmen befestigt werden, kommt es beim Ein- und Ausfedern des Fahrwerks zur Vergrößerung der Spalte. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Verkleidung erst ab einer gewissen Geschwindigkeit dicht sein muss, weshalb relevant ist diese nicht bei vollem Ein- oder Ausfedern abzudichten. Mittels MKS-Simulation konnte der für die Dichtung relevante Federweg von +/- 15 mm festgestellt werden (Abbildung 46).



Abbildung 47: Profildichtung mit elastischem Kern

Durch eine überlappende Profil-Silikondichtung mit einem elastischen Kunststoffkern, welche als Feder wirkt und den Spalt auch während dem Ein- und Ausfedern abdichtet, konnte hierfür eine umsetzbare und einsetzbare Lösung gefunden werden. Dabei wird die Profildichtung mit den Mittelblechen verklebt und an den Frontblechen durch den Kern angedrückt (Abbildung 47 – schwarzes Bauteil).

Nachdem das Verkleidungskonzept, die Abdichtung und die Form bestimmt waren, stellte sich die Frage nach der Bauweise beziehungsweise der Fertigbarkeit der Verkleidung. Es wurden

zwei Bauweisen untersucht und im Detail auskonstruiert. Da die Bauweisen von der Stückzahl abhängig sind, wurden hierfür realistische Annahmen getroffen.

Einheit	Stückzahl	Frontblech	Mittelblech	Seitenblech
Fahrwerk	1	2	2	2
Zug (Losgröße)	14	28	28	28
Züge/Jahr	10	280	280	280

Tabelle 5: Stückzahlen für die Konstruktion

Am Fahrwerk sind von jeder Komponente der Unterbodenverkleidung zwei Teile verbaut. Für die Berechnung gilt die Anzahl der Fahrwerke für einen Zug als kleinste Losgröße. Bei einem siebenteiligen Zug ergeben sich 14 Fahrwerke. Es müssen von jeder Komponente 28 Stück gefertigt werden. Erfahrungswerte lassen annehmen, dass 10 Züge/Jahr gefertigt werden, woraus sich eine Anzahl von 280 Stück/Komponente ergibt (Tabelle 5). Eine automatisierte Fertigung wie es im Automobilbau vorkommt, ist aufgrund der geringen Stückzahl nicht wirtschaftlich umsetzbar. Hinzu kommt, dass die Konstruktion, abhängig vom Fahrwerk, durch Öffnungen angepasst werden muss. Das erste Fahrwerk muss zum Beispiel mit Schienenräumer ausgestattet werden, welche aus der Verkleidung herausragen.

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die bevorzugten Bauweisen vorgestellt:

6.3 Unterbodenverkleidung in Integralbauweise

Bei der Integralbauweise erfolgt die Herstellung eines Produktes aus einem Teil. Die Struktur zur Versteifung der Unterbodenverkleidungsteile wird hierbei im Außenblech integriert (Abbildung 48). Ähnlich der Außenhaut eines alten Flugzeuges wurden Sicken in Längsrichtung im Bauteil integriert.

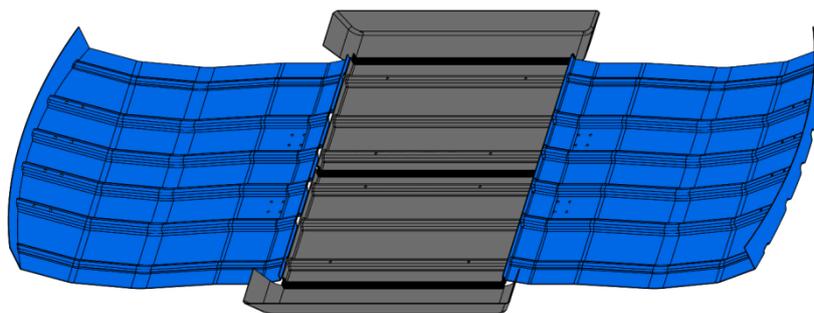


Abbildung 48: Unterbodenverkleidung – Integralbauweise

Abhängig vom Werkstoff wurde die Verkleidung in Integralbauweise bewertet:

1. Stahlblech oder Aluminiumblech

Die Form der Bleche kann mittels Tiefziehen gefertigt werden. Bei einer maximalen Stückzahl von 280 Blechen/Jahr stellte sich einer durchgeführten Abschätzung für die vorliegende Arbeit jedoch heraus, dass die Einmalkosten für ein Tiefziehwerkzeug zu hoch sind und diese Fertigungsmethode nicht rentabel ist.

2. Thermoplastische Verbundwerkstoffe (Organoblech)

Weiters können zur Herstellung der Bleche Verbundwerkstoffen aus Kunststoff eingesetzt werden. Als optimaler Werkstoff stellte sich hierfür Organoblech heraus. Dabei handelt es sich um faserverstärkte Kunststoffe wobei der Matrixwerkstoff ein thermoplastischer Kunststoff ist. Für den Faserwerkstoff werden Glasfasern eingesetzt. Die Lieferung des Rohteils erfolgt in ebenen Platten, welches infolge auf Umformtemperatur erwärmt und in Form gepresst wird. Die Werkzeugkosten für das Presswerkzeug sind etwa um den Faktor fünf geringer als diese beim Tiefziehen, weshalb diese Technik trotz geringer Stückzahl einsetzbar wäre. Der Vorteil des Werkstoffs ist die hohe Schlagzähigkeit, die bei Schotterflug von Vorteil ist sowie die geringe Dichte von circa $1,85 \text{ kg/dm}^3$. Problematisch hingegen ist, dass Verbundwerkstoffe aufgrund ihrer Brennbarkeit der thermoplastischen Matrix nicht die in Kapitel 5 erwähnte Brandschutznorm erfüllen. Nach Rücksprache mit mehreren Herstellern, stellte sich heraus, dass es derzeit keinen thermoplastischen Verbundwerkstoff gibt, der diese Norm erfüllt. Sollte in Zukunft ein Organoblech auf den Markt kommen, das die Norm erfüllt, lohnt es sich diese Konstruktion nochmal anzuschauen.

Ein weiterer Nachteil zeigt sich bei der aerodynamischen Bewertung der Verkleidung in Integralbauweise. Bei der CFD-Analyse wurde der Einfluss von Seitenwind auf den Luftwiderstand betrachtet. Die Statistik zeigt, dass davon ausgegangen werden kann, dass bei der Fahrt ein konstanter Seitenwind von 2 m/s herrscht. Dies führt zu einer Änderung der Anströmungsrichtung um circa $1,5^\circ$ (gemessen von der Längsachse des Zuges). Bei dieser Berechnung zeigte sich, dass eine Unterbodenverkleidung mit Sicken wesentlich schlechter abschneidet.

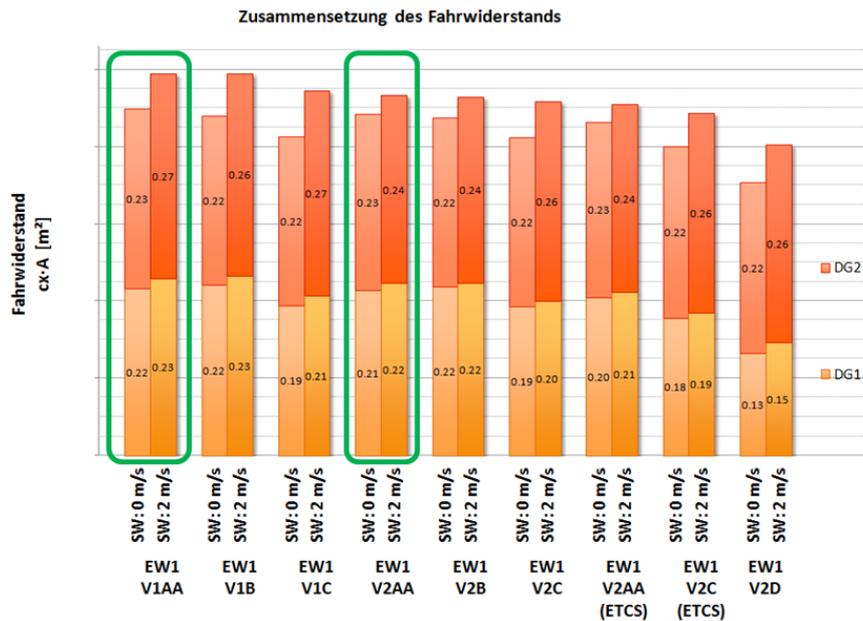


Abbildung 49: Luftwiderstand – Vergleich

In Abbildung 49 werden die beiden Außenkonturen miteinander verglichen. Die relevanten Varianten sind in grün eingerahmt. Die im Diagramm gezeigte Variante V1AA entspricht der verrippten Außenkontur. Die Variante V2AA entspricht der glatten Außenkontur. Die Grafik lässt ableiten, dass die Luftwiderstände bei 0 m/s Seitenwind nahezu identisch sind, jedoch der Luftwiderstand bei 2 m/s Seitenwind bei der Variante V1AA deutlich höher ist. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde die nachfolgend beschriebene Variante als bevorzugte ausgewählt.

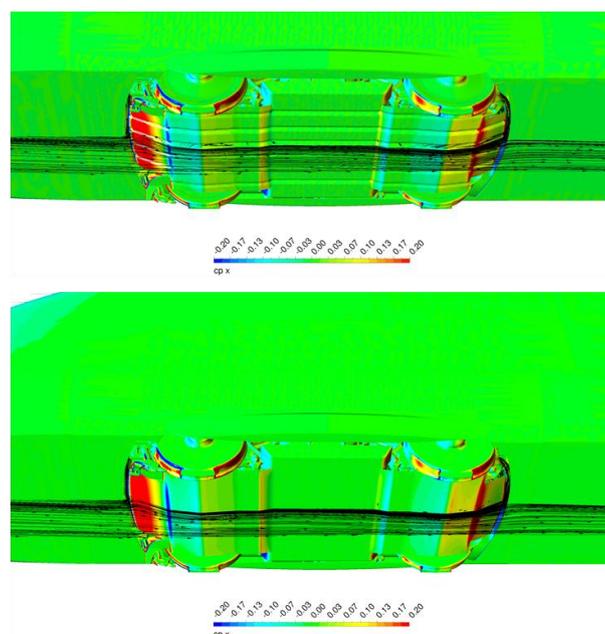


Abbildung 50: Vergleich der glatten Außenhaut mit der verrippten Außenhaut

6.4 Unterbodenverkleidung in Differentialbauweise

Bei der Differentialbauweise wird die Verkleidung aus mehreren Bauteilen zu einer Komponente zusammengefügt. Hierbei wird die glatte Außenhaut durch gebogene Bleche gefertigt. Die Struktur zur Steigerung der Steifigkeit wird mit aufgeschweißten Rippen in Längsrichtung realisiert. Beim Werkstoff handelt es sich um ein 2,5 mm Aluminiumblech. Die Wandstärke wird durch die Schotterschutzspezifikation vorgegeben (SIEMENS AG, 2015). Aufgrund des niedrigen Gewichts wird die Verkleidung in Aluminiumausführung gegenüber der Stahlausführung bevorzugt. Die gesamte Aluminiumverkleidung wiegt inklusive der in einem nachfolgenden Kapitel beschriebenen Aufhängungselemente circa 60 kg; wohingegen die Verkleidung aus Stahlblech circa 100 kg wiegt (Die genaue Gewichtsbilanz kann im Anhang nachgelesen werden). Die Außenhaut wird aus einer Blechtafel lasergeschnitten und anschließend in Form gebogen. Zusätzlich werden Schlitzte zur Positionierung der Versteifungsbleche in das Außenblech gelasert. Die Formung des vertikalen Außenblechs wird mittels Rollbiegen, worauf diese mit dem Außenblech verschweißt wird. Die Versteifungsbleche werden ebenfalls aus 2,5 mm Aluminiumblech lasergeschnitten und anschließend gebogen, damit die Steifigkeit um die Hochachse erhöht wird. Die Versteifungsbleche haben Nasen zur Positionierung am Außenblech. Abschließend werden alle Teile positioniert per Hand verschweißt und geschliffen (Abbildung 51).

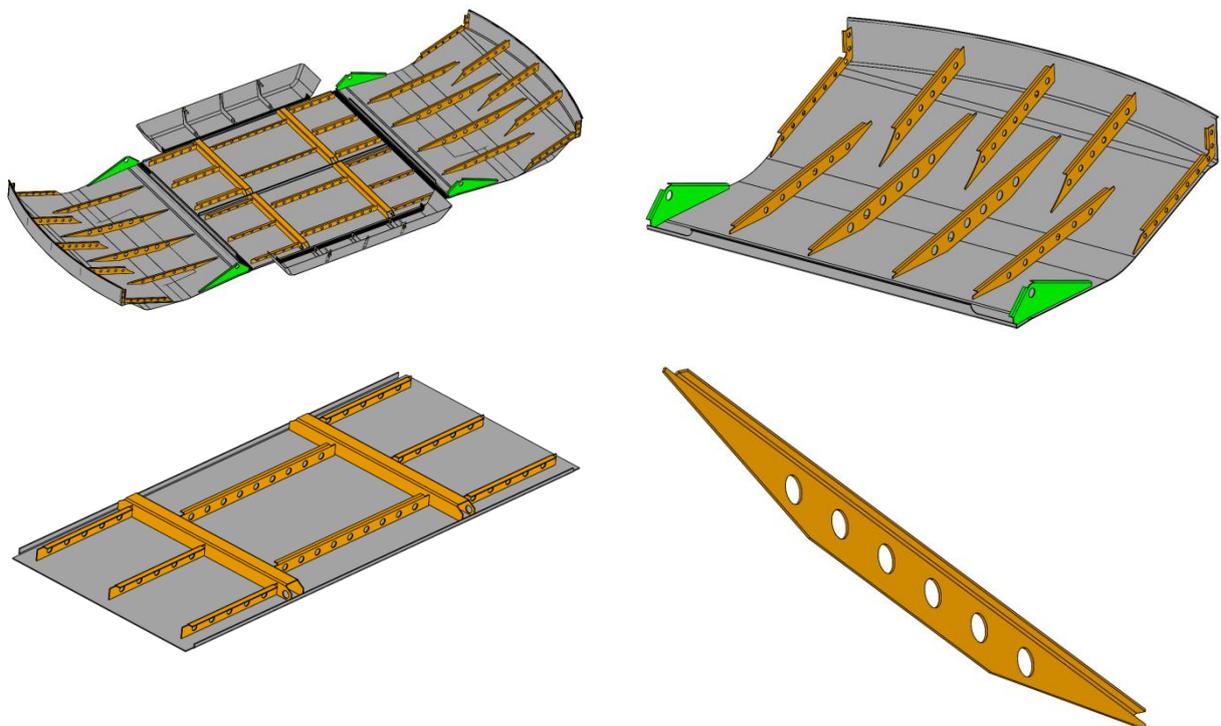


Abbildung 51: Unterbodenverkleidung in Differentialbauweise

6.5 Aufhängung der Frontbleche

Die Frontbleche werden an vier Punkten an den Schwingen aufgehängt. Der vordere Aufhängungspunkt lässt sich mit einem Gummimetallement realisieren. Zur Mitte des Fahrwerks wird die Verkleidung über eine Schraubenisolierung an der Stirnseite des primären Wankstabs verschraubt. Auf der rechten Seite ist die Verkleidung ebenfalls in dieser Form befestigt. Da es beim Wanken in der Primärstufe zu Relativbewegungen zwischen den beiden Schwingen kommt, müssen die beiden Gummimetallemente niedrige Steifigkeiten im Vergleich zur Bauteilsteifigkeit der Verkleidung aufweisen. Dies wird mit dem Element, welches in Abbildung 52 dargestellt ist, umgesetzt. Als Redundanz verfügt das Element über einen Notfang, wodurch die Verkleidung nicht verloren gehen kann, wenn die Elastomerschicht brechen sollte.

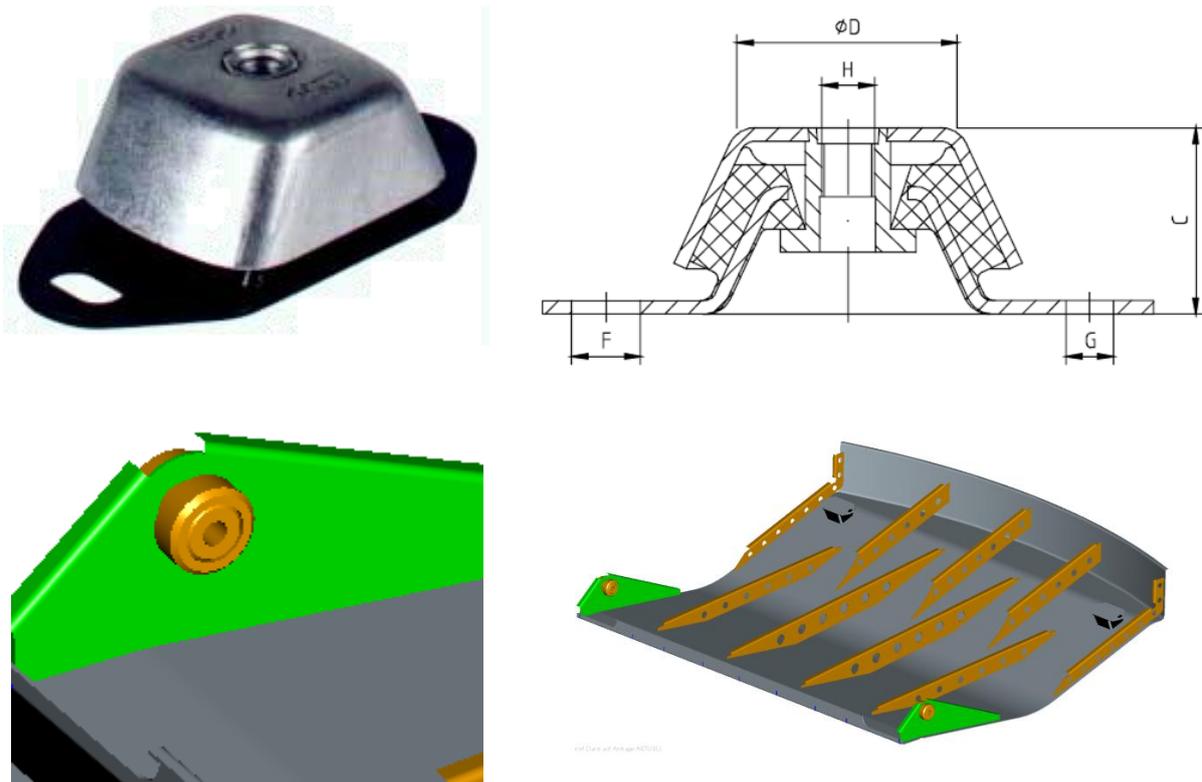


Abbildung 52: Aufhängung der Frontbleche

Schraubenisolierungen

Die Kombination von Puffer/Gegenpuffer ermöglicht eine gegen Ausreißen des Gummis gesicherte, vorgespannte Schraubenisolierung, zur körperschalldämmenden Befestigung von Antenträgern, Konsolen und in diesem Fall, Unterbodenverkleidungen.

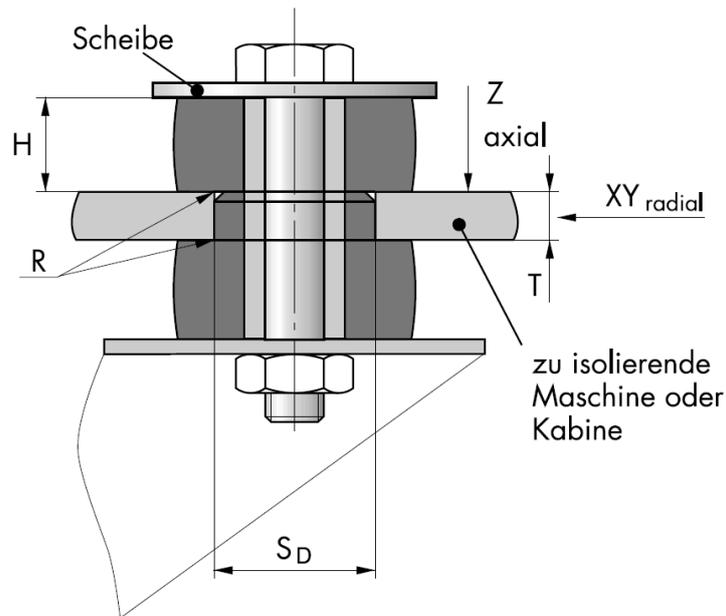


Abbildung 53: Schema einer Schraubenisolierung
(Schwab Schwingungstechnik AG, 2015)

Bei der Montage wird das Gummi-Metallteil direkt an das isolierende Bauteil angeschraubt; das reine Gummitteil ist mit einer Scheibe zu montieren (Abbildung 53). Es muss darauf geachtet werden, dass die Montagebohrung an beiden Seiten mit einem Radius versehen wird. So werden Schädigungen des Gummis im Betrieb bzw. während der Montage vermieden. (Schwab Schwingungstechnik AG, 2015)

6.6 Aufhängung der Mittel- und Seitenbleche

Die Mittelbleche werden jeweils über vier Schraubenisolierungen am Rahmen angebracht. Dabei entsteht durch zwei Schraubenisolierungen unter dem Langträger eine Drehachse. Die beiden anderen Schraubenisolierungen sind vertikal angebracht. Aufgrund der Anordnung in Längsrichtung können die Mittelbleche um diese Drehachse nach unten geklappt werden, nachdem die vertikalen Verschraubungen gelöst wurden (Abbildung 54).

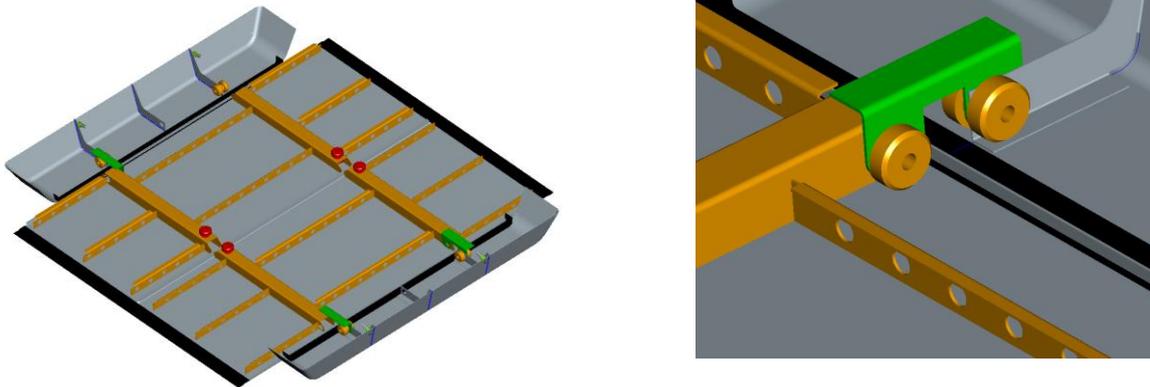


Abbildung 54: Aufhängung der Mittel- und Seitenbleche

Die Seitenbleche sind ähnlich befestigt. Über zwei in Längsrichtung liegende Schraubenisolierungen können die Seitenbleche nach unten geklappt werden. An der Außenseite werden die Seitenbleche im Gegensatz zu den Mittelblechen fix verschraubt. Aufgrund der geringen Masse und hohen Steifigkeit ist keine Schraubenisolierung notwendig (Abbildung 55).

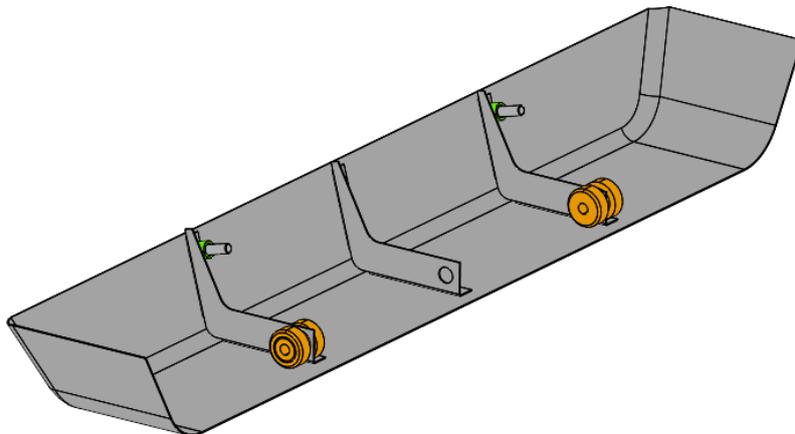


Abbildung 55: Seitenblech mit Aufhängungselementen

7. Vorauslegung der Unterbodenverkleidung

Nachdem das Konzept sowie der Werkstoff für die Verkleidung feststanden, war es notwendig die Konstruktion aus Sicht der Festigkeit zu optimieren und vorauszulegen. Diese Vorauslegung ist erforderlich um die Rechenloops bei der endgültigen Berechnung der Betriebsfestigkeit auf ein Minimum zu reduzieren. Hierzu wurde die Software ProE-Mechanica® herangezogen. Um mit der Berechnung zu können, mussten die an der Verkleidung auftretenden Belastungen festgelegt werden.

Wie nachfolgend beschrieben gibt es drei Arten von Belastungen:

7.1 Aerodynamische Lasten

Die Lastannahmen für die aerodynamischen Kräfte wurden von der aerodynamischen Abteilung der Firma SIEMENS erstellt. Es zeigt sich, dass die anliegenden Drücke hauptsächlich vom Winkel der Bleche abhängen und damit über den jeweiligen Bereich als konstant angenommen werden können. Die Berechnung der daraus resultierenden Kräfte erfolgt durch die Multiplikation mit der vorhandenen Fläche.

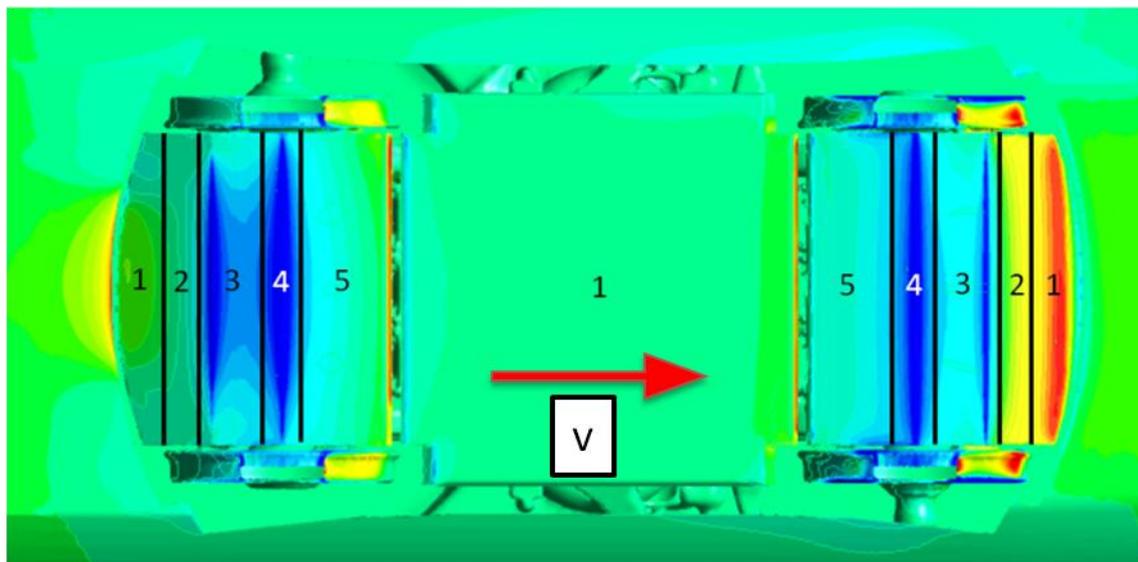


Abbildung 56: Druckverteilung Unterboden

In Abbildung 56 ist die Druckverteilung des Unterbodens von unten grafisch dargestellt. Die Fahrtrichtung für diesen skizzierten Fall ist nach rechts beziehungsweise kommt die Luftströmung von links. Es handelt sich um ein stationäres Strömungsfeld. Dies bedeutet, dass der vorhandene Druck über die Zeit nicht veränderlich ist. Die Druckverteilung ist rein von der Geschwindigkeit und der Geometrie des Fahrwerks inklusive der Verkleidung abhängig. Zusätzlich zur stationären Druckverteilung wurde eine instationäre Druckverteilung

überlagert. Der zusätzliche Effekt kann auf die Interaktion der äußeren Luftströmung mit dem Luftvolumen aufgrund der Undichtheit der Kavität zurückgeführt werden. Derselbe Effekt ist während einer Autofahrt mit geöffnetem Fenster beobachtbar. Da ein Schienenfahrzeug nicht mit konstanter Geschwindigkeit in einer Fahrtrichtung unterwegs ist, können Kollektive für die Drücke angenommen werden. Die Gesamtheit aller aerodynamischen Effekte ist eine Funktion der Geschwindigkeit zum Quadrat; die Erklärung der Kollektive erfolgt mittels Abbildung 57. Das Diagramm zeigt den Druckverlauf während der Fahrt eines Hochgeschwindigkeitszuges. Zuerst beschleunigt der Zug linear von 0 km/h auf die Höchstgeschwindigkeit von 360 km/h. Dabei steigt der Mitteldruck zum Quadrat mit der Geschwindigkeit bis zum Erreichen des Maximalwertes. Die Amplituden der instationär überlagerten Strömung steigen ebenso von 0 km/h bis 360 km/h mit dem Quadrat der Geschwindigkeit bis zum Erreichen der maximalen Amplitude. Nach einer Konstantfahrt bei Höchstgeschwindigkeit verringert der Zug die Geschwindigkeit bis zum Stillstand. Die Drücke nehmen wieder quadratisch mit der Geschwindigkeit ab. Wechselt der Zug die Fahrtrichtung, tritt derselbe Effekt ein. Jedoch ist die Strömungsrichtung umgekehrt und die Druckverteilung der Frontbleche dreht sich dementsprechend um. Die Druckverteilung am Mittelblech ist unabhängig von der Fahrtrichtung.

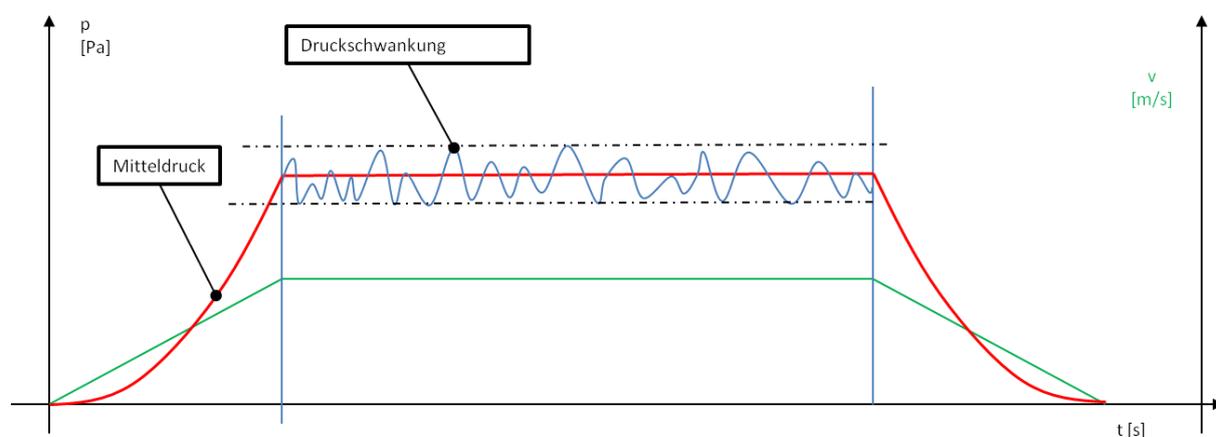


Abbildung 57: Schema - Drücke in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die Berechnungen der Aerodynamikabteilung zeigen, dass die aerodynamischen Lasten (Mitteldruck und Amplitude) unter einer Geschwindigkeit von 90 km/h (= 1/4 von v_{\max}) gering sind und vernachlässigt werden können. Die Auflistung der an der Unterbodenverkleidung vorkommenden Mitteldrücke mit deren Amplituden ist im Anhang zu finden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Geometrieänderungen an den Blechen aufgrund der Drücke keine wesentlichen Veränderungen in den Lastannahmen mit sich bringen.

7.2 Dynamische Belastungen

Aufgrund von Gleislageabweichungen wird das Fahrwerk über die Radsätze dynamisch angeregt. Diese Anregungen führen zu Schwingungen im Fahrwerk. Dabei können, je nach Einbauort und Art der Befestigung hohe Beschleunigungskräfte auftreten. In der Norm EN 13749 sind die für die Berechnungen zu verwendenden maximalen Beschleunigungswerte definiert. Da die Unterbodenverkleidung über Gummimetallelemente aufgehängt ist, kann die Verkleidung als primär gefedert angesehen werden. Die Tabelle 6 zeigt typische Werte für die auftretenden Beschleunigungen von primär gefederten Anbauten. Die Vorauslegung der Verkleidung wird mit den maximalen angegebenen Werten durchgeführt. Diese Annahme kann durch Rücksprache mit der Abteilung für Lastannahmen bestätigt werden. Dies lässt schließen, dass diese Werte für die Vorauslegung anwendbar sind. Bei der Berechnung der Betriebsfestigkeit durch die Berechnungsabteilung im Nachgang sind diese Annahmen zu ungenau. Hier können über Mehrkörpersimulationen und reale Messdaten exakte Lastkollektive ermittelt werden.

Richtung	Außergewöhnliche Beschleunigung	Dauernd wirkende Beschleunigung
Vertikal ^a	± 20 g	± 6 g
Quer ^a	± 10 g	± 5 g
Längs	± 3 g oder ± 5 g ^b	± 2,5 g

^a Die Tabellenwerte gelten für den Drehgestellrahmen auf der Höhe der Primärfederung. Sie können an der Drehgestellmitte bis zur Hälfte der Werte linear verringert werden und sollten außerhalb der Primärfederung zu höheren Werten extrapoliert werden.

^b Der zu nutzende Wert hängt vom Typ des Drehgestells und dessen Verwendung ab und sollte mit den Rangierfällen in Längsrichtung übereinstimmen (z. B. wie im Anhang C angegeben).

Tabelle 6: Beschleunigungen von Anbauten am Rahmen
(European Standard, 2011)

7.3 Belastungen aufgrund von Zwangsverformungen

Da die Aufhängung der Frontbleche nicht am selben Bauteil wie das Mittelblech realisierbar ist, können Relativbewegungen zwischen den Aufhängungspunkten beim Wanken in der Primärstufe auftreten. Es entstehen Zwangsverformungen in der Verkleidung.

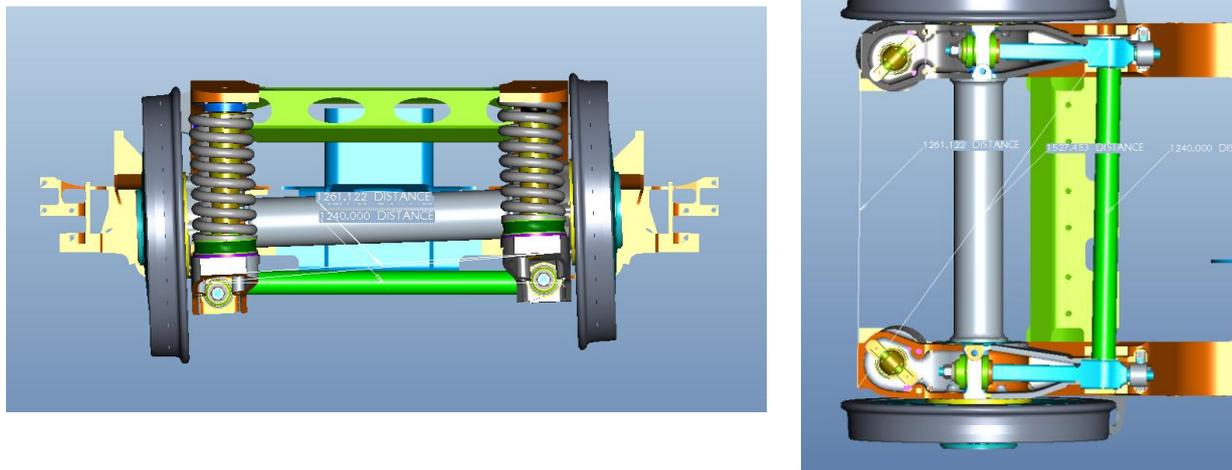


Abbildung 58: Relativbewegungen beim Wanken

Bei einem maximalen primären Wankwinkel von zwei Grad (typischer Wert für Primärfederungen) ergeben sich Längenänderung von maximal 7,5 mm diagonal zu den Aufhängungspunkten (Abbildung 58). Diese Verformung muss von der Verkleidung inklusive deren Aufhängungselement aufgenommen werden.

7.4 Vorauslegung mit ProE Mechanica

Das Tool MECHANICA ist eine bekannte und verbreitete Software von Parametric Technology Corporation (PTC). Heutzutage benutzt man die Funktionalität überwiegend in Verbindung mit Pro/ENGINEER, einem der weltweit führenden CAD-Programme (CAD=Computer Aided Design). Das war nicht immer so, da MECHANICA ursprünglich unabhängig von Pro/ENGINEER entwickelt und später in die CAD-Umgebung integriert wurde. Mit MECHANICA können verschiedene Aufgabenstellungen realisiert werden. Für die durchgeführte Vorauslegung wurde das Tool zur Berechnung der auftretenden Spannungen sowie zur Durchführung einer Modalanalyse verwendet.

MECHANICA basiert im Gegensatz zu h-Versionen auf der sogenannten p-Methode. Das Elementverhalten wird mit Polynomfunktionen höherer Ordnung approximiert. Dabei nimmt die Genauigkeit eines Elementes zu, zum einen durch mehr Freiheitsgrade in den Knoten und zum anderen durch die exaktere geometrische Randanpassung (Abbildung 59). (Kloninger, Einleitung, 2011)

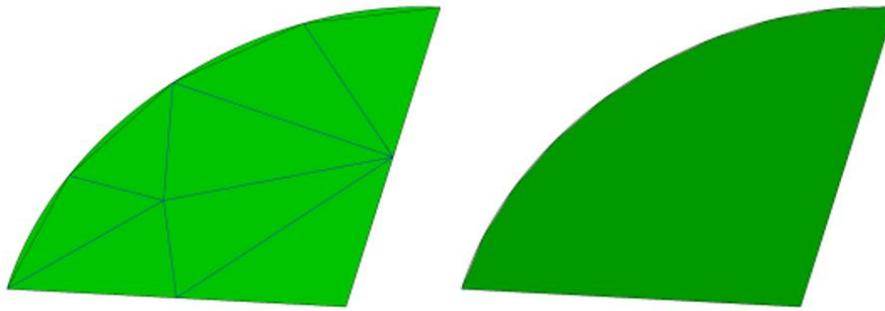


Abbildung 59: Vergleich: h-Methode / p-Methode

Der mathematische Hintergrund der p-Elemente ist bei dem einfachen Lösungsansatz hilfreich, wenn man voraussetzt, dass die Funktion Genauigkeit über die Anzahl der Freiheitsgrade gegen die exakte Lösung des FE-Modells monoton konvergiert. Somit kann die Ergebnissenauigkeit theoretisch allein durch die Erhöhung der Polynomgrade erreicht werden, das vernetzte Modell wird dabei nicht verändert.

Die analoge Vorgehensweise bei der h-Methode erfordert hingegen eine schrittweise höhere Diskretisierung, mit anderen Worten eine feinere Vernetzung. Die Netzverfeinerung sollte dann so lange erfolgen, bis das zuletzt berechnete Ergebnis keinen Unterschied mehr zur vorherigen Auswertung aufweist und damit gegen einen bestimmten Wert konvergiert. In der Praxis werden meistens aus Zeit und Kostengründen lediglich eins bis maximal zwei solche Iterationsschritte durchgeführt. (Kloninger, Methodik, 2011)

Die methodische Vorgehensweise bei FEM-Software Tools kann in folgende Schritte eingeteilt werden:

- Geometriaufbereitung in CAD: Vorarbeiten für die FE-Analyse
- Wechsel zum FEM-Programm: Direkt oder mittels einer Schnittstelle
- Bildung des FE-Modells: Preprozessor – intern oder extern
- Rechenlauf: Solver – intern oder extern
- Auswertung der Ergebnisse: Postprozessor – intern oder extern
- Plausibilitätskontrolle

7.4.1 Geometriaufbereitung

Um die spätere Modellerstellung zu vereinfachen, wird eine Schrumpfverpackung aus der Baugruppe erstellt. Dies bedeutet, dass aus einer Baugruppe, bestehend aus mehreren Komponenten, ein Volumenmodell erstellt wird (Für die Vorauslegung ist dies zulässig). Um nichtlineare Steifigkeitssprünge ausschließen zu können, werden die Ecken am Übergang von Verrippung zum Außenblech mit einem Radius von 1,5 mm versehen (Abbildung 60).

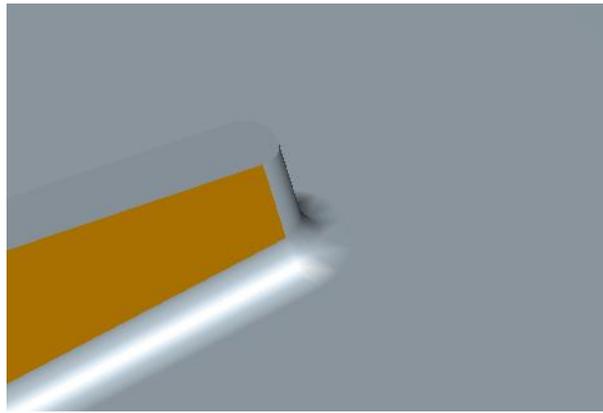


Abbildung 60: Radien am Übergang

7.4.2 Definition der Einspannungsbedingungen

Um eine vereinfachte, aber dennoch genaue Vorauslegung durchführen zu können, werden die Befestigungen über gewichtete Verbindungen und Federelemente nachgebaut. Bei der Anbindung der Verkleidung am Wankstab werden, bis auf die Drehung um die Schraubenachse, alle Freiheitsgrade gesperrt. Der Grund ist die relativ steife Anbindung der Schraubenisolierung. Für die Aufhängung im vorderen Bereich des Bleches erfolgt die Größenfestlegung von 80x80 mm für die Flächenbereiche am Blech. Dies entspricht der Auflagefläche des Gummimetallements. Darauf folgt, eine gewichtete Verbindung (die gesamte Fläche wird über Linien mit einem Punkt verbunden) des Flächenbereichs mit einem Federelement, welches der Steifigkeit des realen Elements entspricht. Das Federelement wird am anderen Ende fix eingespannt (Abbildung 61).

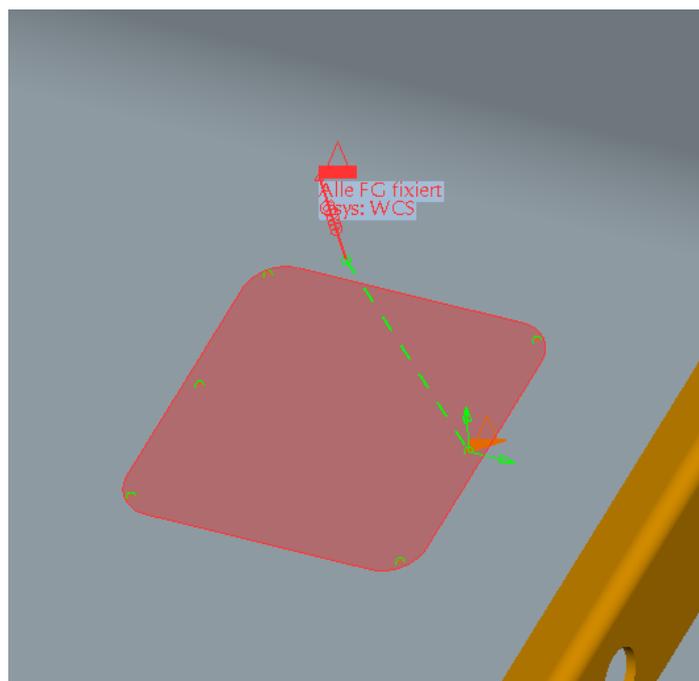


Abbildung 61: Randbedingung für das Gummimetallement

7.4.3 Definition der Lasten

Nach einigen vorangegangenen vereinfachten Vergleichsrechnungen in ProE Mechanical® stellte sich heraus, dass die Beschleunigungskräfte in z-Richtung die dominierenden Belastungen sind. Diese Belastung übertrifft die aerodynamischen Lasten und die Zwangsverformungen um Größenordnungen. Für die weitere Berechnung wird die Unterbodenverkleidung mit einer Beschleunigung von 200 m/s² beaufschlagt.

7.4.4 Definition des Werkstoffs und Vernetzung

Die Werkstoffeigenschaften für Aluminium werden aus einer Datenbank übernommen. Die Werte sind in Abbildung 62 ersichtlich. Das Blech wird automatisch mit einer maximalen Elementgröße von 15 mm vernetzt, wobei die Größe des Elements in den Bereichen mit Steifigkeitsprüngen (Übergang von Blech zur Verrippung) auf maximal 3 mm verringert wird. Die Anzahl der generierten Tetraederelemente beläuft sich auf 110.152. Zusätzlich kommen noch die zwei Federelemente hinzu.

Name	
AL_SI7MG03_T6	
Beschreibung	
Sandguss	
Dichte	2.6989e-06 kg/mm ³
Structural	
Symmetrie	Isotrop
Spannungs-Dehnungs-Reaktion	Linear
Querkontraktionszahl	0.35
Elastizitätsmodul	7e+07 kPa
Wärmeausdehnungskoeffizient	2.36e-06 /C
Mechanismendämpfung	sec/mm
Materialgrenzwerte	
Streckgrenze	kPa
Zugspannung	kPa
Druckspannung	kPa

Abbildung 62: Werkstoffkennwerte Aluminium

7.4.5 Berechnung und Ergebnisse

Nachdem die Randbedingungen definiert und das Modell vernetzt wurde, ist die Berechnung durchgeführt worden. Die Berechnung erfolgt über eine adaptive Mehrfachkonvergenz-Methode mit dem Polynomgrad 6. Ziel der Vorauslegung ist es, die Frontbleche so auszulegen, dass das Bauteil unter die zulässigen Spannungen von 50 N/mm² bleibt. Die zulässigen Spannungen kommen aus der Norm DIN 5513. Die dort zulässigen Spannungen

werden nach Rücksprache mit der Abteilung für Stahlbau mit einem Sicherheitsfaktor von 2,5 versehen. (Standard, 2007-08)

Werkstoff nach DIN EN 485-2	Zustands-hinweis	Festigkeitseigenschaften								Schweiß-verbinding	Allgemeine Hinweise	
		Nenn-dicke		Zugfestigkeit		0,2%-Dehn-grenze	Bruchdehnung		R _m MPa			R _{p0.2} MPa
		über	bis	min.	max.	R _{p0.2} MPa	A _{50mm} %	A %				
EN AW-5083-H111	weichgeglüht, gerichtet	0,2	0,5	275	350	125	11	-	270	125	Für Bedachung und Seilwände. Gut schweißbar mit SG-AlMg4,5MnZr und SG-AlMg4,5Mn. Festigkeitsabfall in der Wärmeinflusszone bei Zustand H22 beachten. Gute Korrosionsbeständigkeit und chemische Beständigkeit. Gutes Kaltumformvermögen im Zustand H111.	
		0,5	1,5	275	350	125	12	-				
		1,5	3,0	275	350	125	13	-				
		3,0	6,0	275	350	125	15	-				
		6,0	12,5	275	350	125	16	-				
		12,5	50,0	275	350	125	-	15				
EN AW-5083-H22	kaltverfestigt, rückgeglüht	0,2	0,5	305	380	215	5	-	270	125		
		0,5	1,5	305	380	215	6	-				
		1,5	3,0	305	380	215	7	-				
		3,0	6,0	305	380	215	8	-				
		6,0	12,5	305	380	215	10	-				
		12,5	40,0	305	380	215	-	9				

Abbildung 63: Dehngrenze bei der Schweißverbindung (Standard, 2007-08)

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Biegesteifigkeit um die y-Achse am hinteren Ende der Verkleidung zu gering ist. Die Verformungen betragen 4mm. Auf Basis dieser Erkenntnis wird das Frontblech am hinteren Ende um 40 mm nach oben gebogen. Die Versteifungsrippen werden so angepasst, dass der Übergang zum Bereich ohne Rippen möglichst linear verläuft und dadurch Steifigkeitssprünge weitestgehend vermieden werden.

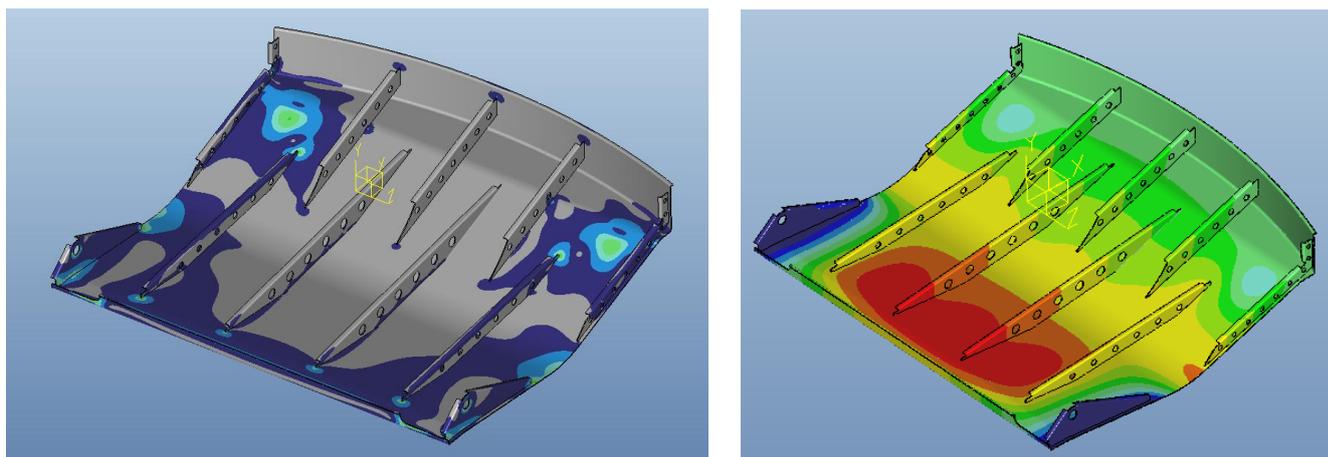


Abbildung 64: Endergebnisse aus der FEM-Berechnung (links: Spannungen / rechts: Verformungen)

Eine weitere Optimierung ist im Bereich der hinteren Anbindung notwendig gewesen. Hier muss das aufgeschweißte Blech am oberen Rand aufgebogen werden, um das Widerstandsmoment zu erhöhen. Nach mehreren Rechenloops stellten sich die in Abbildung

64 dargestellten Spannungen und Verformungen ein. Das linke Bild zeigt die homogene Spannungsverteilung am gesamten Blech. Die Darstellung ist so gewählt, dass die Farbskala alle Werte über 50 N/mm^2 rot einfärbt. Die hellgrünen Bereiche zeigen ein Spannungsniveau von 38 N/mm^2 bis 45 N/mm^2 . Die Auslastung in der Mitte des Frontblechs ist gering jedoch kann die Materialstärke aufgrund der geforderten Wandstärke für den Schotterschutz nicht verringert werden.

8. Wartung und Instandhaltung



Abbildung 65: Velaro Russland bei der Wartung im Depot (Prokonzept GmbH, 2015)

Schienenfahrzeuge müssen regelmäßig zur Inspektion, um auf Sicherheit und Funktionstüchtigkeit der Komponenten überprüft zu werden. Die derzeitigen Inspektionsintervalle sind bei circa 16.000 km (ein Drittel von 50.000 km) festgelegt. Diese regelmäßige Inspektion am Fahrwerk besteht aus einer Sichtkontrolle. Durchgeführt wird diese Inspektion in sogenannten Depots. Das sind große Hallen mit speziell für die Wartung von Zügen ausgerichteter Ausrüstung. Der Zug fährt zur Wartung auf ein meist aufgeständertes Gleis in das Depot (Abbildung 65).

Sollte das Fahrwerk nun komplett verkleidet sein, muss die Verkleidung vor der Inspektion soweit abmontiert werden, damit die zu kontrollierenden Teile ersichtlich sind. Dies führt zur Erhöhung der Inspektionszeit und Senkung der Verfügbarkeit des Zuges, wodurch in Folge eine Erhöhung der Betriebskosten eintritt. Die Verkleidung muss deshalb in kurzer Arbeitszeit geöffnet werden können. Somit werden einerseits die Anforderung einer schnellen Zugänglichkeit zum Fahrwerk und andererseits eine Ein-Mann-Bedienung beim Öffnen oder Entfernen an die Verkleidung gestellt.

8.1 Konzept der Verkleidung

Die Unterbodenverkleidung ist so ausgelegt, dass regelmäßige Inspektionen in kurzer Arbeitszeit erledigt werden können. Sobald der Zug im Depot zum Stillstand kommt, können die vertikale Befestigung der Mittelbleche gelöst werden. Anschließend lassen sich die

Mittelbleche um die Achse der horizontalen Verschraubung nach unten klappen. Die Öffnung ist ausreichend groß, um auch die Bremsausrüstung sowie den Radsatz inspizieren zu können (Abbildung 66).

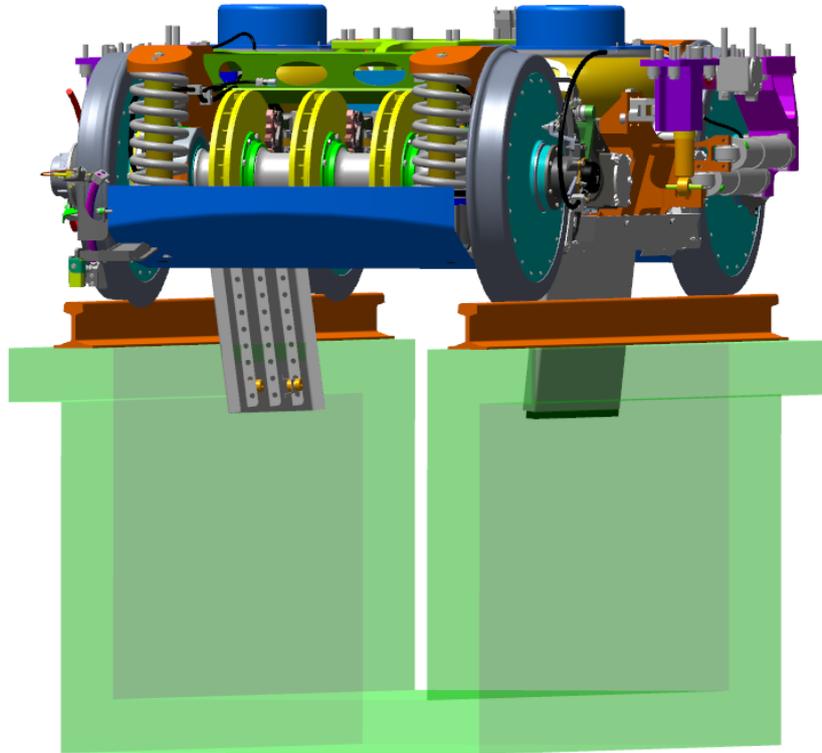


Abbildung 66: Fahrwerk im Depot auf Grubengleis

Sollte eine Komponente über den Unterboden ausgetauscht werden müssen, besteht die Möglichkeit das Frontblech mit jeweils vier Verschraubungen vom Fahrwerk zu demontieren. Die Anbindung mit nur vier Schrauben am Rahmen verringert die Tauschzeiten um bis zu 30 Minuten pro Fahrwerk im Vergleich zu einem Schotterschutzblech, welches derzeit am SIEMENS Velaro befestigt ist (Dieses Schotterschutzblech musste im Nachhinein installiert werden und ist mit über 15 Schrauben am Fahrwerk verbunden).

8.2 Alternative Befestigungsmethode der Frontbleche

Eine alternative Methode zur Befestigung der Frontbleche wäre über eine Anbindung mit Lenkern zum Rahmen realisierbar. Dabei werden anstatt der Gummimetallemente Lenker montiert, die mit dem Rahmen verbunden und drehbar gelagert sind (Abbildung 67). Der Vorteil zur bevorzugten Variante liegt in der schnellen Zugänglichkeit zum Fahrwerk. Der Grund, dass diese Befestigung nicht zum Einsatz kommt, ist zum Einen der benötigte

Freiraum vor und nach dem Fahrwerk und zum Anderen wird mehr Platz zwischen den Bremscheiben und der Verkleidung aufgrund der zusätzlichen Primärfederwege benötigt.

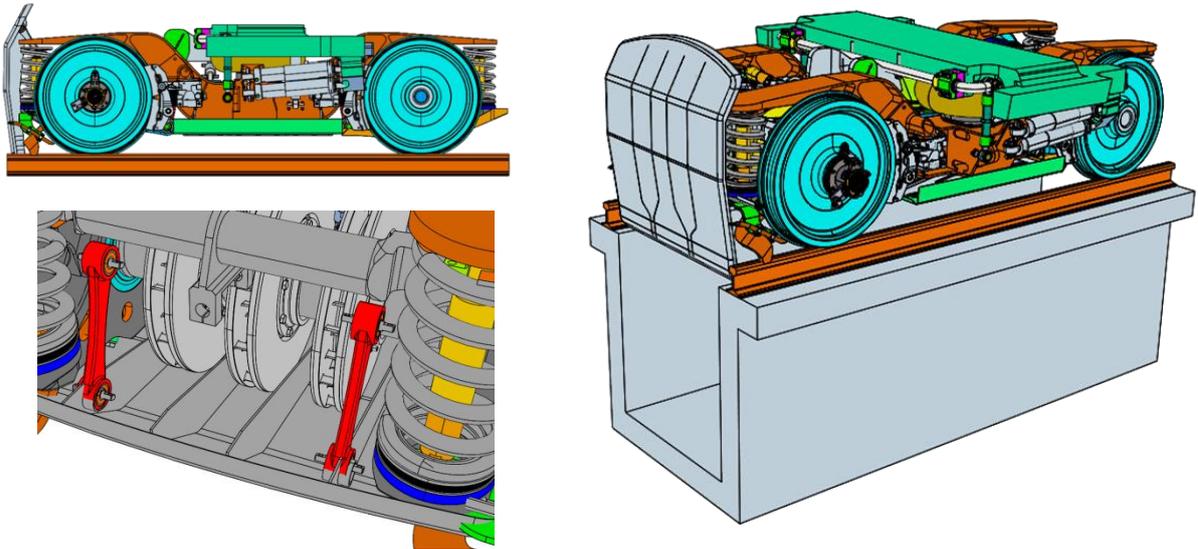


Abbildung 67: Aufklappmechanismus - Frontbleche

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Verkleidbarkeit von Fahrwerken liefern wichtige Erkenntnisse für einen möglichen Einsatz in zukünftigen Serienschienenfahrzeugen. Abschließend werden alle Ergebnisse in diesem Kapitel zusammengefasst und weitere Vorgehensweisen für die Umsetzung eines verkleideten Fahrwerks dargelegt.

9.1 Der Entwärmungsversuch

Die Durchführung des Versuchs zur Ermittlung des Verhaltens von verkleideten Fahrwerken bei Wärmezufuhr durch mechanisches Bremsen lieferte folgende Ergebnisse:

Bauteile, mit guter Wärmeleitung und hoher thermischer Masse, nehmen einen Großteil der eingebrachten Wärme auf und speichern diese. Dabei handelt es sich zum Großteil um Komponenten aus Stahl oder Aluminium, bei denen eine erhöhte Temperatur keine Auswirkung auf den Betrieb des Zuges hat. Aufgrund der Speicherung der Energie ist die thermische Belastung auf andere Bauteile geringer. Komponenten, bei denen eine erhöhte Temperatur negative Folgen für den Betrieb haben könnte, wie zum Beispiel Dämpfer, Kabelstränge oder Elastomerteile, werden über Konvektion oder Strahlung erwärmt. Die beim Versuch gemessenen Temperaturen liegen jedoch unter deren kritischen Bauteiltemperatur, trotz eines deutlich höheren Wärmeeintrags im Fahrwerk während des Experiments gegenüber einer realen Bremsung im Betrieb.

Die wichtigste Erkenntnis, welche aus dem Versuch gezogen werden kann, ist, dass die Konfigurationen mit Vollverkleidung (Vollverkleidung und Vollverkleidung mit Lüftungsschlitze) ähnliche Maximaltemperaturen erreichen wie die unverkleidete Konfiguration. Dies lässt schließen, dass sich die vollverkleideten Fahrwerke in der Praxis ähnlich zu den derzeit in Betrieb befindlichen Fahrwerken verhalten würden. Da es bei derzeitigen Fahrwerken keine dokumentierten Schwierigkeiten durch erhöhte Bauteiltemperaturen gibt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Vollverkleidung von Fahrwerken keine thermischen Probleme mit sich bringt.

Im durchgeführten Versuch ist der Sonderfall einer einmaligen Vollbremsung behandelt worden. Im Betrieb gibt es jedoch ein weiteres Bremsszenario aus dem thermische Überlastungen hervorgehen können. Dabei führt der Zug, aufgrund kurzer Haltestellenabstände auf der Strecke, mehrere Bremsungen hintereinander durch. Für diesen

Fall sollte ebenso das Entwärmungsverhalten ermittelt werden. Dabei können die aus dem Versuch erhaltenen Kennwerte als Input für eine CFD-Analyse verwendet werden.

9.2 Konstruktion der Unterbodenverkleidung

Die äußere Geometrie der Unterbodenverkleidung sollte aufgrund der Aerodynamik nach Möglichkeit glatt sein. Eine Verkleidung mit integrierten Sicken zur Versteifung, weist bei der Fahrt mit Seitenwind einen höheren Luftwiderstand auf. Aus diesem Grund ist die Konstruktion mit glatten Aluminiumblechen als Außenhaut und verschweißten Versteifungsblechen im Hintergrund als bevorzugte Variante ausgewählt worden. Die Wahl des Werkstoffs fiel aufgrund der geringen Dichte und den Brandschutzbestimmungen auf Aluminium. Sollte es in Zukunft faserverstärkte Kunststoffe geben, welche die Brandschutzbedingungen erfüllen, bringt eine Unterbodenverkleidung aus diesem Werkstoff bessere Eigenschaften hinsichtlich Schlagzähigkeit, Eigendämpfung und Gewicht mit sich.

Die durchgeführte Festigkeitsberechnung mit ProE Mechanica® stellt eine vereinfachte Vorauslegung zur Abschätzung der benötigten Versteifungen an den Blechen dar. Als nächster Schritt muss eine transiente Festigkeitsberechnung erfolgen. Dafür müssen die notwendigen Kennwerte, wie die Dämpfung durch Luftwiderstand, in einem weiteren Versuch ermittelt werden.

Das Anlagern von Schnee und Eis am Fahrwerk kann aufgrund der offenen Spalte zwischen Wagenkasten und Fahrwerk nicht vermieden werden. Dies wird durch weitere horizontale Flächen begünstigt. Wegen der großen Anzahl an einfließenden Parametern bei der Bildung von Eis und Schnee am Fahrwerk sind Testfahrten in einer winterlichen Umgebung unumgänglich.

Gibt es bei zukünftigen Fahrwerken davor und danach genügend Bauraum, könnte eine Aufhängung der Frontbleche über zwei drehbar gelagerte Lenker realisiert werden. In diesem Fall könnten die Frontbleche im Depot nach vorne geklappt und befestigt werden. Dadurch wäre eine erhebliche Reduktion des Zeitaufwands bei Reparaturarbeiten oder Sichtkontrollen am Fahrwerk möglich.

9.3 Wartung und Instandhaltung

Vollverkleidete Fahrwerke bringen einen Mehraufwand bei der präventiven und korrektiven Instandhaltung mit sich. Der Tausch von Komponenten oder die Sichtkontrolle am Fahrwerk kann erst nach dem Öffnen von Verkleidungsteilen durchgeführt werden. Der zusätzliche

Aufwand könnte durch den Einsatz von Klappmechanismen oder Kunststoffdeckeln in Grenzen gehalten werden.

Kommen an der Unterbodenverkleidung Klappen zum Einsatz muss darauf geachtet werden, dass diese nicht den Fluchtweg in der Inspektionsgrube blockieren. Kommt es zum Beispiel zum Bersten einer Luftfeder muss ein darunter stehender Monteur die Grube in kurzer Zeit verlassen können.

Die Sichtkontrolle des Fahrwerks auf Schäden durch Schotterflug kann deutlich einfacher durchgeführt werden. Da die Unterbodenverkleidung alle Komponenten am Fahrwerk verdeckt, sind eventuelle Beschädigungen aufgrund des Schotterflugs durch Dellen beziehungsweise Durchschläge erkennbar. Einzelne sicherheitsrelevante Bauteile müssen nicht mehr auf Schotterschäden untersucht werden, wenn die Verkleidung keine Schäden aufweist. Wird davon ausgegangen, dass eine Unterbodenverkleidung immer am Fahrwerk montiert ist, wären kostenintensive Schotterschutzmaßnahmen an einzelnen Komponenten wie zum Beispiel die Beschichtung der Radsatzwelle nicht mehr erforderlich.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einteilung der Verkehrsmittel (Haigermoser, 2002)	5
Abbildung 2: SIEMENS Velaro China (SIEMENS AG, 2008)	6
Abbildung 3: Übersicht Triebzug	7
Abbildung 4: Fahrwerk SF500 – SIEMENS Velaro (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016).....	8
Abbildung 5: Vergleich Außen- und Innenlagerung eines Fahrwerks (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016) (Bombardier Inc., 2007)	8
Abbildung 6: Radsatz SF500 (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016)	9
Abbildung 7: Radsatzführung	9
Abbildung 8: Rahmen SF500 (SIEMENS Mobility Werk Graz, 2016)	10
Abbildung 9: Klotzbremse (Haigermoser, 2002)	11
Abbildung 10: Wellenbremsscheiben Velaro D	12
Abbildung 11: Hydraulischer Zweirohrdämpfer (Haigermoser, 2002)	13
Abbildung 12: Übersicht der Widerstände (Haigermoser, 2002)	14
Abbildung 13: aerodynamische Widerstände (Dellmann, 2014).....	15
Abbildung 14: Aufteilung des Luftwiderstands (Dellmann, 2014)	17
Abbildung 15: Einsparung Luftwiderstand.....	18
Abbildung 16: Energieeinsparung auf der Strecke	18
Abbildung 17: Konzept zur induktiven Erwärmung (SIEMENS Mobility, 2015).....	22
Abbildung 18: Erwärmung mit Acetylenbrenner	23
Abbildung 19: Fahrwerk mit Rahmen.....	24
Abbildung 20: Anpassung der Radsatzwelle.....	25
Abbildung 21: Antrieb des Laufradsatzes	26
Abbildung 22: Die Kavität	27
Abbildung 23: Konfiguration unverkleidet.....	27
Abbildung 24: Konfiguration vollverkleidet mit Lüftungsschlitzen	28
Abbildung 25: Konfiguration vollverkleidet	28
Abbildung 26: Brenner mit Gestell	29

Abbildung 27: Rückzündung eines Schweißbrenners	30
Abbildung 28: gekühlter Schweißbrenner	30
Abbildung 29: Messstellen am Prüfstand.....	31
Abbildung 30: Wärmebildkamera mit Wasserkühlung.....	32
Abbildung 31: optimale Position der Schweißbrenner.....	34
Abbildung 32: Temperaturverlauf - Mittlere Bremsscheibe.....	36
Abbildung 33: Temperaturverlauf- Bremsscheibe	37
Abbildung 34: Temperaturverlauf – Drehdämpfer	38
Abbildung 35: Einflüsse und Anforderungen	40
Abbildung 36: Strömungsfeld Unterboden	41
Abbildung 37: Schotterschäden am Velaro Eurostar	41
Abbildung 38: Eis am Velaro in Russland (SIEMENS AG, 2015).....	43
Abbildung 39: Klassifizierung der Komponenten.....	44
Abbildung 40: Lichtraumprofil	44
Abbildung 41: Einschränkung im Bogen	45
Abbildung 42: Begrenzung der Verkleidung.....	46
Abbildung 43: Abstand der Verkleidung zu den Bremsscheiben.....	47
Abbildung 44: Konstruktionshistorie Unterbodenverkleidung	48
Abbildung 45: Unterbodenverkleidung – Komponenten	49
Abbildung 46: Relativbewegung – Dichtung	50
Abbildung 47: Profildichtung mit elastischem Kern	50
Abbildung 48: Unterbodenverkleidung – Integralbauweise	51
Abbildung 49: Luftwiderstand – Vergleich.....	53
Abbildung 50: Vergleich der glatten Außenhaut mit der verrippten Außenhaut	53
Abbildung 51: Unterbodenverkleidung in Differentialbauweise	54
Abbildung 52: Aufhängung der Frontbleche.....	55
Abbildung 53: Schema einer Schraubenisolierung (Schwab Schwingungstechnik AG, 2015).56	
Abbildung 54: Aufhängung der Mittel- und Seitenbleche	57

Abbildung 55: Seitenblech mit Aufhängungselementen	57
Abbildung 56: Druckverteilung Unterboden	58
Abbildung 57: Schema - Drücke in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	59
Abbildung 58: Relativbewegungen beim Wanken	61
Abbildung 59: Vergleich: h-Methode / p-Methode	62
Abbildung 60: Radien am Übergang.....	63
Abbildung 61: Randbedingung für das Gummimetallelement	63
Abbildung 62: Werkstoffkennwerte Aluminium.....	64
Abbildung 63: Dehngrenze bei der Schweißverbindung (Standard, 2007-08).....	65
Abbildung 64: Endergebnisse aus der FEM-Berechnung (links: Spannungen / rechts: Verformungen)	65
Abbildung 65: Velaro Russland bei der Wartung im Depot (Prokonzept GmbH, 2015)	67
Abbildung 66: Fahrwerk im Depot auf Grubengleis.....	68
Abbildung 67: Aufklappmechanismus - Frontbleche	69

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten Velaro China.....	6
Tabelle 2: cw-Wert verschiedener Körper (Dellmann, 2014).....	16
Tabelle 3: Zeitplan Entwärmungsversuch	32
Tabelle 4: Abstand zur Schienenoberkante	47
Tabelle 5: Stückzahlen für die Konstruktion	51
Tabelle 6: Beschleunigungen von Anbauten am Rahmen (European Standard, 2011).....	60

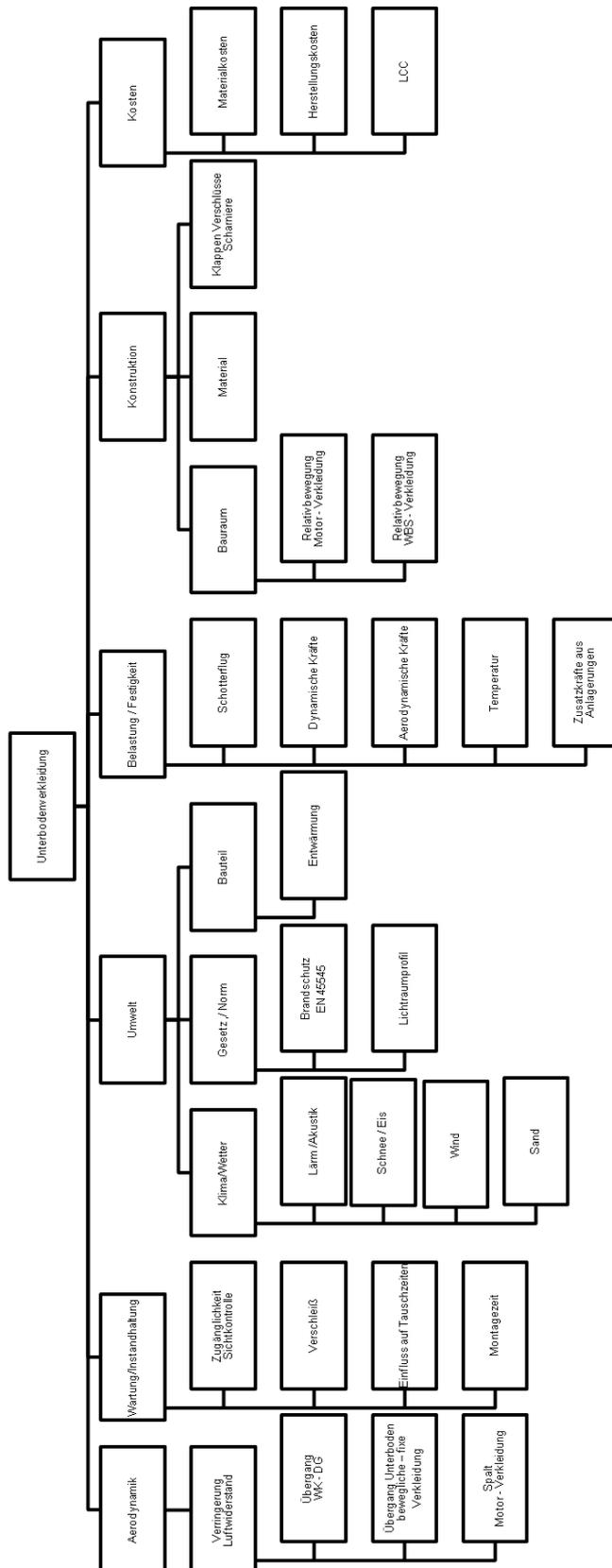
12. Literaturverzeichnis

- Berger, P. (2014). Bremse. In C. Schindler, *Handbuch Schienenfahrzeuge* (S. 420-435). Hamburg: DVV Media Group.
- Bombardier Inc. (2007). *FLEX Eco Bogies*. United Kingdom: Bombardier Inc.
- Dellmann, T. (2014). Fahrwiderstände. In C. Schindler, *Handbuch Schienenfahrzeuge* (S. 48-98). Hamburg: DVV Media Group.
- European Standard. (2011). *Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*. European Standard.
- Haigermoser, A. (2002). *Schienenfahrzeuge - Vorlesungsskriptum*. Graz: Technische Universität Graz - Institut für Leichtbau.
- Kloninger, P. (2011). Einleitung. In P. Kloninger, *Pro/MECHANICA® Verstehen Lernen* (S. 1). Springer Verlag.
- Kloninger, P. (2011). Methodik. In P. Kloninger, *Pro/MECHANICA® Verstehen Lernen*. Springer Verlag.
- Prokonzept GmbH. (-. - 2015). *Prokonzept*. Abgerufen am September 2015 von <http://www.proconsult-berlin.de/de/projekte>
- Raumfahrt, D. Z.-u. (2014). *DLR*. Abgerufen am 02. 05 2016 von http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-4702/7791_read-26404/
- Schindler, C. (2014). Fahrzeugarten und Zugkonfigurationen. In C. Schindler, *Handbuch Schienenfahrzeuge* (S. 183-207). Hamburg: DVV Media Group.
- Schwab Schwingungstechnik AG. (2015). *SCHRAUBENISOLIERUNGEN*.
- SIEMENS AG. (8. Juli 2008). *Siemens Global Website*. Von http://www.siemens.com/press/de/events/media_summit_2007/index.php abgerufen
- SIEMENS AG. (September 2015). Bilderdatenbank. Graz, Steiermark, Österreich.
- SIEMENS AG. (2015). *Spezifikation Schotterschutz*. Erlangen, Deutschland.
- SIEMENS Mobility. (2015). *Konzept Schotterschutz*. Erlangen.
- SIEMENS Mobility Werk Graz. (April 2016). SF500. Graz, Steiermark, Österreich.
- Standard, E. (2007-08). *Werkstoffe für Schienenfahrzeuge - Aluminium und Aluminiumlegierungen*. European Standard.
- State of California. (Mai 2016). *California High-Speed Rail Authority*. Von <http://www.hsr.ca.gov/> abgerufen

Wikipedia. (Mai 2016). *wikipedia*. Von www.wikipedia.at abgerufen

13. Anhang

13.1 Anforderungen und Einflüsse an eine Unterbodenverkleidung



13.2 MatLab Programmcode

13.2.1 Code zum Einlesen der Daten

```

% File zum laden und einlesen aller sich in diesem Ordner befindenden Excel files
%
%%
filenamen=dir('*.xls')
%
n=length(filenamen);

for i = 1:n
    filename=filenamen(i).name
    % [pathstr,name,ext] = fileparts(filename)
    % name='D:\users\z0037e7b\Documents\Diplomarbeit\MATLAB\VERSUCH\Messdaten\All_Files\'filename';
    %%
    %% Import data from spreadsheet
    % Script for importing data from the following spreadsheet:
    %
    % Workbook:
    % D:\users\z0037e7b\Documents\Diplomarbeit\MATLAB\VERSUCH\Messdaten\All_Files\01_Thermische_Vermessung_Drehgestell_15.10.2014.XLS
    % Worksheet: Sheet1
    %
    % To extend the code for use with different selected data or a different
    % spreadsheet, generate a function instead of a script.
    %
    % Auto-generated by MATLAB on 2015/06/18 13:35:06
    %% Import the data
    [r,~,raw] = xlsread(filename,'Sheet1','A2:AL7500');
    raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw) == '');
    %% Replace non-numeric cells with NaN
    R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) && ~islogical(x),raw); % Find non-numeric cells
    raw(R) = NaN; % Replace non-numeric cells
    %% Create output variable
    data = reshape([raw{:}],size(raw));

    %% Allocate imported array to column variable names
    Versuch(i).ts = data(:,1);
    Versuch(i).MP01_freiC = data(:,2);
    Versuch(i).MP02_DrehdaempferC = data(:,3);
    Versuch(i).MP03_Welle_innen_1_LagerC = data(:,4);
    Versuch(i).MP04_PrimaerdaempferC = data(:,5);
    Versuch(i).MP05_UmgebungstemperaturC = data(:,6);
    Versuch(i).MP06_SekundaerdaempferC = data(:,7);
    Versuch(i).MP07_freiC = data(:,8);
    Versuch(i).MP08_freiC = data(:,9);
    Versuch(i).MP09_Luftfederbalg_innenC = data(:,10);
    Versuch(i).MP10_Luftfederbalg_aussenC = data(:,11);
    Versuch(i).MP11_PrimaerfederC = data(:,12);
    Versuch(i).MP12_LagerdeckelC = data(:,13);
    Versuch(i).MP13_RadsatzlagergehauseC = data(:,14);
    Versuch(i).MP14_Quertraeger_untenC = data(:,15);
    Versuch(i).MP15_Quertraeger_vorneC = data(:,16);
    Versuch(i).MP16_Welle_innen_BremsscheibeC = data(:,17);
    Versuch(i).MP17_Bremsscheibe_linksC = data(:,18);
    Versuch(i).MP18_Bremsscheibe_mitteC = data(:,19);
    Versuch(i).MP19_freiC = data(:,20);
    Versuch(i).MP21_Bremsszylinder_rechtsC = data(:,21);
    Versuch(i).MP22_KabelfuehrungC = data(:,22);
    Versuch(i).MP23_BremsskolbenC = data(:,23);
    Versuch(i).MP24_KabelfuehrungC = data(:,24);
    Versuch(i).MP25_Laengstraeger_innenC = data(:,25);
    Versuch(i).MP26_RadsatzfuehrungsbuchseC = data(:,26);
    Versuch(i).MP27_Ausschnitt_BremsscheibeC = data(:,27);
    Versuch(i).MP28_Ausschnitt_BremsscheibeC = data(:,28);
    Versuch(i).MP29_Ausschnitt_BremsscheibeC = data(:,29);
    Versuch(i).MP30_Kabelfuehrung_WKC = data(:,30);
    Versuch(i).MP31_Kabelfuehrung_WKC = data(:,31);
    Versuch(i).MP32_Kabelfuehrung_WKC = data(:,32);
    Versuch(i).MP33_Kabelfuehrung_WKC = data(:,33);
    Versuch(i).MP34_Kabelfuehrung_WKC = data(:,34);
    Versuch(i).MP35_Kabelfuehrung_WKC = data(:,35);
    Versuch(i).MP36_TraegerC = data(:,36);
    Versuch(i).MP37_MP37_Lufttemperatur_2C = data(:,37);
    Versuch(i).MP38_Luftaustritt_LueftungsblechC = data(:,38);
    %% Clear temporary variables
    clearvars data raw R;
end

```

13.2.2 Code für die Auswertung der Daten

```

%% In diesem File werden die Daten aller Versuche Ausgewertet

% Einlesen der Daten aus allen Excel Files die in den jeweiligen vorhanden
% sind

%Datenimport;
sensors=fieldnames(Versuch);
ls=length(sensors)

%% Plotten aller Sensorsignale zur erstmaligen Auswertung

for (k=1:n)
    f=k-1
    for m=2:ls
        z=m+f*38;
        figure(z)
        hold on
        %subplot(5,8,m-1)
        plot(Versuch(k).ts,Versuch(k).(sensors{m}))
        grid on
        xlabel('Zeit [s]')
        ylabel(sensors(m),'interpreter','none')
        title(filnamen(k).name,'interpreter','none')

        print(figure(z),'-dpng')
    end
    % text=filnamen(k).name;
end

%% Schließen aller offenen Fenster
close all

```

13.2.3 Code für den Vergleich mit anderen Versuchen

```

%% Auswertung und Vergleich verschiedener Sensoren

% Tool zur Ermittlung der Startzeit sowie des Beginns der Abkühl

for (k=1:n) % Zeit bei maximaler Temperatur der mittleren Bremscheibe
    [value t_max]=max(Versuch(k).MP04_PrimaerdaempferC);
    Versuch(k).tmax=t_max;
end
figure

x=4; % Versuchsnummern : x ist immer als Referenzfunktion zu sehen
%auf die dann getriggert wird
y=5;
z=6;
|
dT_1=0 %Versuch(y).tmax-Versuch(x).tmax;
dT_2=0 %Versuch(z).tmax-Versuch(x).tmax;
subplot(2,2,1)
hold on
plot(Versuch(x).ts,Versuch(x).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(y).ts-dT_1,Versuch(y).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(z).ts-dT_2,Versuch(z).MP04_PrimaerdaempferC)
grid on
title('MP04_PrimaerdaempferC - Versuch_1','interpreter','none')
legend('Vollverkleidung','Vollverkleidung mit Lüftung','offen (Velaro)','location','south')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Temperatur [°C]')

```

```
x=10; % Versuchsnummern : x ist immer als Referenzfunktion zu sehen
      %auf die dann getriggert wird
y=11;
z=12;

dT_1=0 %Versuch(y).tmax-Versuch(x).tmax;
dT_2=0 %Versuch(z).tmax-Versuch(x).tmax;
subplot(2,2,2)
hold on
plot(Versuch(x).ts,Versuch(x).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(y).ts-dT_1,Versuch(y).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(z).ts-dT_2,Versuch(z).MP04_PrimaerdaempferC)
grid on
title('MP04_PrimaerdaempferC - Versuch_2','interpreter','none')
legend('Vollverkleidung','Vollverkleidung mit Lüftung','offen (Velaro)','location','south')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Temperatur [°C]')
```

```
x=16; % Versuchsnummern : x ist immer als Referenzfunktion zu sehen
      %auf die dann getriggert wird
y=17;
z=18;

dT_1=0 %Versuch(y).tmax-Versuch(x).tmax;
dT_2=0 %Versuch(z).tmax-Versuch(x).tmax;
subplot(2,2,3)
hold on
plot(Versuch(x).ts,Versuch(x).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(y).ts-dT_1,Versuch(y).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(z).ts-dT_2,Versuch(z).MP04_PrimaerdaempferC)
grid on
title('MP04_PrimaerdaempferC - Versuch_3','interpreter','none')
legend('Vollverkleidung','Vollverkleidung mit Lüftung','offen (Velaro)','location','south')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Temperatur [°C]')
```

```
x=20; % Versuchsnummern : x ist immer als Referenzfunktion zu sehen
      %auf die dann getriggert wird
y=21;
z=22;

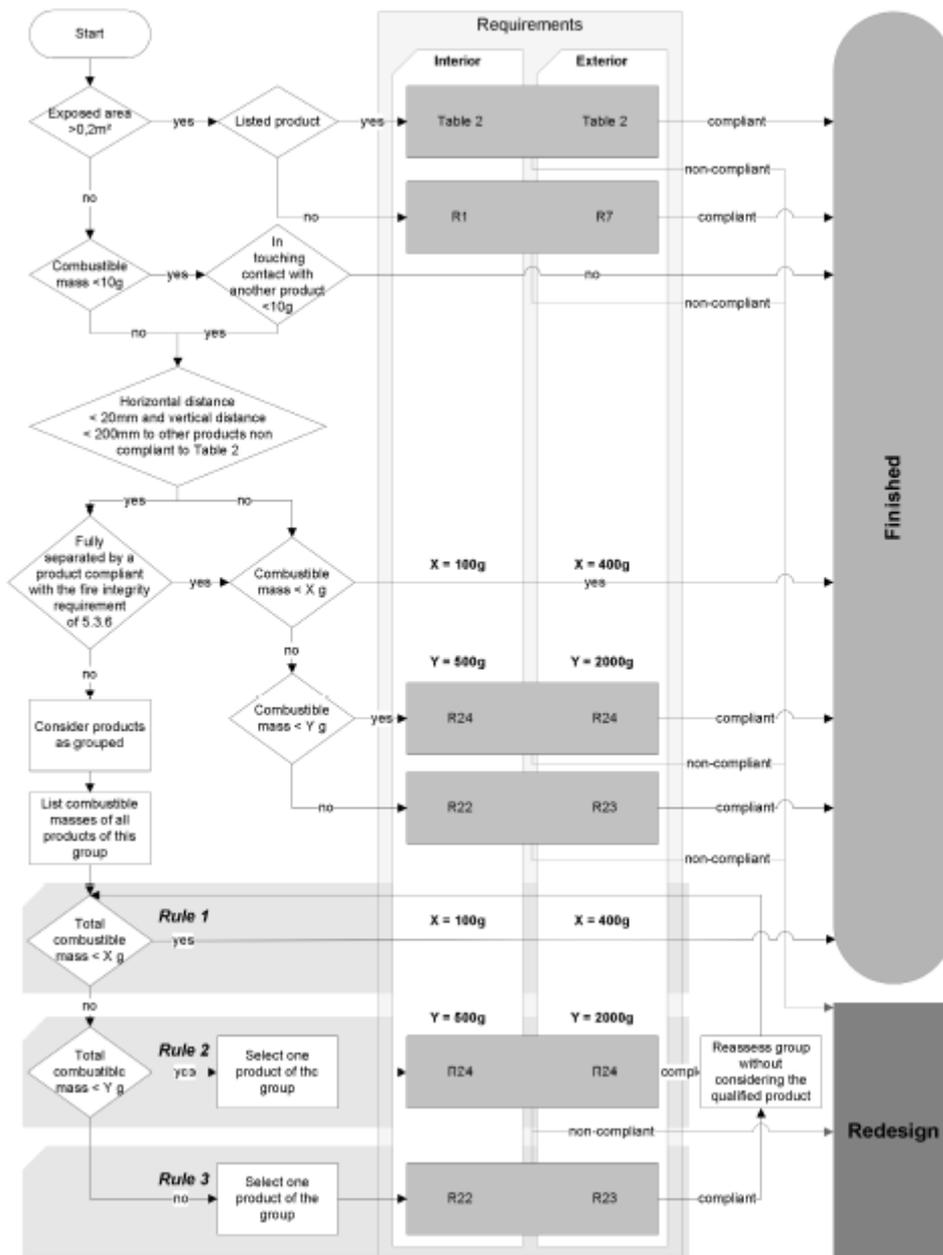
dT_1=0 %Versuch(y).tmax-Versuch(x).tmax;
dT_2=0 %Versuch(z).tmax-Versuch(x).tmax;
subplot(2,2,4)
hold on
plot(Versuch(x).ts,Versuch(x).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(y).ts-dT_1,Versuch(y).MP04_PrimaerdaempferC)
plot(Versuch(z).ts-dT_2,Versuch(z).MP04_PrimaerdaempferC)
grid on
title('MP04_PrimaerdaempferC - Versuch_4','interpreter','none')
legend('Vollverkleidung','Vollverkleidung mit Lüftung','offen (Velaro)','location','south')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Temperatur [°C]')
```

13.3 Messsensoren am Prüfstand

Messpunkt	Bauteil	Sensor	Messbereich	Position	Priorität
MP01	Drehdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP02	Drehdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	optional
MP03	Primärdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP04	Primärdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	optional
MP05	Sekundärdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP06	Sekundärdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	optional
MP07	Querdämpfer	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	optional
MP08	Luffederbalg	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP09	Luffederbalg	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP10	Notfeder	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP11	Primärfeder	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP12	Lagerdeckel	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP13	Lagerdeckel	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP14	Radsatzlagergehäuse	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP15	Radsatzlagergehäuse	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP16	Langträgerende	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP17	Bremsscheibe	Pyrometer	150-1000C°	fahrwerksfest	muss
MP18	Bremsscheibe	Pyrometer	150-1000C°	fahrwerksfest	muss
MP19	Bremsscheibe	Pyrometer	50-400C°	fahrwerksfest	optional
MP20	Bremsscheibe	Pyrometer	150-1000C°	fahrwerksfest	muss
MP21	Bremszylinder	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP22	Kabelführung	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP23	Kabelführung	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP24	Kabelführung	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP25	Kabelführung	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP26	Radsatzführungsbuchse	PT100	0-800C°	fahrwerksfest	muss
MP27	Ausschnitt Bremsscheibe	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	optional
MP28	Ausschnitt Bremsscheibe	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP29	Ausschnitt Bremsscheibe	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP30	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP31	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP32	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP33	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP34	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP35	Kabelführung WK	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss

MP36	Träger	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss
MP37	Kavität	Infrarotkamera	150-1000C°	tbd	muss
MP38	Belüftungsslitze	PT100	0-800C°	wagenkastenfest	muss

13.4 Auszug aus der Brandschutznorm EN4545



Requirement set (relevant product no.)	Test method reference	Parameter and unit	Maximum or Minimum	HL1	HL2	HL3
R5 (IN13)	T05 EN ISO 11925-2 30 s flame application	Flame spread mm	Maximum	150 (within 60 s)	150 (within 60 s)	150 (within 60 s)
	T03.02 ISO 5660-1: 25 kWm ⁻²	<i>MARHE</i> kWm ⁻²	Maximum	50	50	50
	T10.03 EN ISO 5659-2: 25 kWm ⁻²	<i>D_s</i> max. dimensionless	Maximum	300	250	200
	T11.02 EN ISO 5659-2: 25 kWm ⁻²	<i>CIT_G</i> dimensionless	Maximum	1,2	0,9	0,75
R6 (F1C; F1D)	T03.01 ISO 5660-1: 50 kWm ⁻²	<i>MARHE</i> kWm ⁻²	Maximum	90	90	60
	T10.01 EN ISO 5659-2: 50 kWm ⁻²	<i>D_s</i> (4) dimensionless	Maximum	600	300	150
	T10.02 EN ISO 5659-2: 50 kWm ⁻²	<i>VOF₄</i> min	Maximum	1 200	600	300
	T11.01 EN ISO 5659-2: 50 kWm ⁻²	<i>CIT_G</i> dimensionless	Maximum	1,2	0,9	0,75
R7 (IN6B; IN12C; EX1A; EX1C; EX3; EX4; EX5; EX6A; EX7; EX8; EL3C)	T02 ISO 5658-2	<i>CFE</i> kWm ⁻²	Minimum	20 _a	20 _a	20 _a
	T03.01 ISO 5660-1: 50 kWm ⁻²	<i>MARHE</i> kWm ⁻²	Maximum	a	90	60
	T10.04 EN ISO 5659-2: 50 kWm ⁻²	<i>D_s</i> max. dimensionless	Maximum	–	600	300
	T11.01 EN ISO 5659-2: 50 kWm ⁻²	<i>CIT_G</i> dimensionless	Maximum	–	1,8	1,5

13.5 Gewichtsbilanz Unterbodenverkleidung

Massenbilanz Verkleidung					
Komponente	Anzahl	Stahlblech 1,5mm		Alu Blech 2,5mm	
		Einzelgewicht	Gesamtgewicht t	Einzelgewicht t	Gesamtgewicht t
Frontbleche TDG	2	28,576	57,152	16,85057325	33,7011465
Stegblech 1	2	1,124	2,248	0,64433121	1,28866242
Stegblech 2	2	1,102	2,204	0,631719745	1,26343949
Stegblech 3	2	0,953	1,906	0,546305732	1,092611465
Trapezbleche	2	0,289	0,578	0,16566879	0,33133758
Schraubenisolierung	2	0,2	0,4	0,2	0,4
Gummimetallelement	2	0,35	0,7	0,35	0,7
Außenblech	1	20,54	20,54	11,77452229	11,77452229
Frontbleche LDG	2	32,288	64,576	18,97847134	37,95694268
Stegblech 1	2	1,124	2,248	0,64433121	1,28866242
Stegblech 2	2	1,102	2,204	0,631719745	1,26343949
Stegblech 3	2	0,953	1,906	0,546305732	1,092611465
Schraubenisolierung	2	0,2	0,4	0,2	0,4
Trapezbleche	2	0,289	0,578	0,16566879	0,33133758
Gummimetallelement	2	0,35	0,7	0,35	0,7
Außenblech	1	24,252	24,252	13,90242038	13,90242038
Seitenblech	2	5,8585	11,717	3,529076433	7,058152866
Stegblech	3	0,1435	0,4305	0,082261146	0,246783439
Außenblech	1	5,028	5,028	2,882292994	2,882292994
Schraubenisolierung	2	0,2	0,4	0,2	0,4
Mittelblech	2	11,431	22,862	6,894203822	13,78840764
Außenblech	1	9,254	9,254	5,304840764	5,304840764
Schraubenisolierung	4	0,2	0,8	0,2	0,8
Stegblech	3	0,459	1,377	0,263121019	0,789363057
Gesamt LDG	99,155			58,80350318	
Gesamt TDG	91,731			54,54770701	

13.6 Aerodynamische Lasten

vordere Verkleidung				Mittelwert	Druckschwankung
Lastfall	Position	pmax	pmin	pm	pA
Lastfall 1	Position 1	6450	5400	5925	525
	Position 2	3800	2750	3275	525
	Position 3	-950	-2000	-1475	525
	Position 4	-4150	-5150	-4650	500
	Position 5	-450	-1450	-950	500
Lastfall 2	Position 1	5450	5150	5300	150
	Position 2	2800	2500	2650	150
	Position 3	-1950	-2300	-2125	175
	Position 4	-5150	-5450	-5300	150
	Position 5	-1450	-1750	-1600	150

hintere Verkleidung					
Lastfall	Position	pmax	pmin	pm	pA
Lastfall 1	Position 1	200	-1050	-425	625
	Position 2	-350	-1550	-950	600
	Position 3	-1950	-3150	-2550	600
	Position 4	-4050	-5250	-4650	600
	Position 5	-350	-1600	-975	625
Lastfall 2	Position 1	550	-550	0	550
	Position 2	-400	-1500	-950	550
	Position 3	-1900	-3000	-2450	550
	Position 4	-3050	-4150	-3600	550
	Position 5	-200	-1300	-750	550

Mittelblech					
Lastfall	Position	pmax	pmin	pm	pA
Lastfall 1	Position 1	300	-1000	-350	650
Lastfall 2	Position 1	550	-1400	-425	975