



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria

**STADLER**

**Diplomarbeit**

# **Optimierung der Wagenkastenbauweise mit offenen Aluminiumprofilen bei Schienenfahrzeugen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs (Dipl.-  
Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und  
Betriebswissenschaften, von

**Michael PRASCHINGER**

Mat.Nr.: 01150899

unter der Leitung von

Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Starlinger  
Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik

Brno, März 2022

### *Eidesstattliche Erklärung*

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

---

*Stadt und Datum*

---

*Unterschrift*

# Deutsche Kurzfassung

Ziel der Arbeit ist die Beurteilung der Verwendung von offenen Aluminiumprofilen im Boden eines Personenzugwagens. Die offenen Profile bedeuten gegenüber einer herkömmlichen Konstruktion des Bodens mit geschlossenen Profilen eine Gewichtsreduktion von ca. 20%. Die Vorteile und Nachteile der offenen Profile werden beurteilt und Optimierung vorgeschlagen.

Es wird ein FE-Modell des Bodens mit offenen Profilen anhand eines kürzlich produzierten Wagenkastens erstellt. Diese Konstruktionsvariante wird strukturell beurteilt. Die Beurteilung erfolgt mithilfe der normativ definierten Lastfälle nach EN 12663-1 in Bereichen Statik, Ermüdung, Steifigkeit und Stabilität. Schwachstellen der Konstruktion werden in der Ermüdungsanalyse in den Anbindungsstellen der Querträger entdeckt.

Die Optimierungsvarianten konzentrieren sich auf die Verbesserung der Konstruktion. Alle Varianten erfüllen an den Stellen mit hohen Auslastung die normativen Anforderungen der EN 12663-1. Die maximale Auslastung liegt bei 89% bei der kritischen Ermüdung.

Empfehlenswerte Varianten sind:

- Variante A - Verstärkte Wandstärke des Querträgers bzw.
- Variante F: Kombination der Variante A mit optimierter Wandstärke der offenen Profile.

Bei der letztgenannten Variante wird ein Gewichtsersparnis gegenüber der Variante mit geschlossenen Profilen von 175kg erzielt.

Bei der Bewertung der Varianten wird Fokus auf die Gewichtsoptimierung gelegt. Die Kosten der Varianten oder die Umsetzbarkeit werden in der Zusammenfassung diskutiert.

## English Abstract

The goal of this thesis is to verify the application of aluminium extrusions with open cross section in the floor design of a railway car body. The extrusions with open cross section result in a 20% weight reduction in comparison with commonly used extrusions with closed cross section. Therefore, the advantages and disadvantages of the open cross section extrusions will be evaluated, and the optimization proposed.

At first, a Finite-Element model of the floor with open cross section extrusions will be created and evaluated. This model is based on a recently built railway car body. The evaluation is done based on static, fatigue, stiffness, and stability load cases defined according to the current standards. The weak spots were discovered at the connection between the transversal floor supports and the longitudinal girders.

The design optimization is therefore focused on improving the weak weld and in general saving weight. All the variants have passed the requirements by the standards with a maximum fatigue utilization at 89%.

Recommended variants are:

- Variant A – thicker transversal floor supports and
- Variant F – Variant A in combination with reduced wall thickness of the extrusions with open cross section.

The Variant F results in savings up to 175kg in comparison with the original solution with closed cross section extrusions. The cost and feasibility are discussed in the summary.

# Danksagung

Herzlichen Dank an alle, die mich beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben. Ein Dank geht an meinen Betreuer Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Starlinger, der mich bei der Auswahl der Arbeit unterstützt hat, und an Dipl.-Ing Andreas Gmür für die Betreuung seitens der Firma Stadler. Große Rolle beim Schreiben dieser Arbeit haben auch die Kollegen von der Abteilung Berechnung und Versuche der Firma Stadler gespielt. Danke für die großartige Unterstützung.

Der größte Dank geht an meine Mutter Iva die mich beim Studium immer unterstützt hat. Ein weiterer Dank geht an meine Freundin Aneta, die mich immer motiviert hat.

Nicht zu vergessen ist auch mein guter Freund Daniel Wachholbinger, der mich vom Anfang meines Studiums begleitet und unterstützt hat und mir auch während des Schreibens hilfreiche Tipps gegeben hat.

## Quellenverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, “DIN EN 12663-1:2015-03-00,” *Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, 2015.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, “DIN EN 15663.”
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, “DIN EN 15085-3.”
- [4] DVS - Deutsches Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., “DVS 1608,” *Gestaltung und Festigkeitsbewertung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau*. DVS - Deutsches Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., 2011.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, “DIN EN 15227:2020,” *Bahnanwendungen - Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, 2020.
- [6] J. Janicki, H. Reinhard, and M. Rüffer, *Schienenfahrzeugtechnik*. Bahn Fachverlag GmbH, 2020.
- [7] F. Ostermann, *Anwendungstechnologie Aluminium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-662-43807-7.
- [8] Nitin S. Gokhale, Sanjay S. Deshpande, Sanjeev V. Bedekar, and Anand N. Thite, *Practical Finite Element Analysis*. 2008.
- [9] “Abaqus user manual.” <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-shlthick.htm> (accessed Nov. 13, 2021).
- [10] Johannes Wiedemann, *Leichtbau, Elemente und Konstruktion*. 2006.
- [11] Bernd Klein, *FEM, Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 2014.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptbaugruppen eines Schienenfahrzeugwagenkastens	1
Abbildung 2: Boden mit offenen Profilen	2
Abbildung 3: Boden mit offenen Profilen, Detail	2
Abbildung 4: Ablauf der Arbeit	3
Abbildung 5: Stranggepresste geschlossene Aluminiumprofile für den Boden [6]	8
Abbildung 6: Zusammenbau des Wagenkastens aus verschiedenen stranggepressten Al- Profilen [6]	9
Abbildung 7: Schweißbadsicherung an einem Stranggepressten Profil aus Aluminium [7]	11
Abbildung 8 Position des Auswertepunktes; Stumpfnaht (li.), Kehlnaht (re.)	13
Abbildung 9: Darstellung der Section points an einem Schalenelement [9]	14
Abbildung 10: Offene x geschlossene Profile, Vergleich Masse/m <sup>2</sup>	21
Abbildung 11: Kraft-Weg Diagramm der Nachbeulanalyse	30
Abbildung 12: Überlastete Elemente der Y-Naht	33
Abbildung 13: Querträger mit der überlasteten Y-Naht (lila) als FE-Modell	33
Abbildung 14: Darstellung der Geometrie des Querträgers	34
Abbildung 15: Übersicht der FE-Modell- und Optimierungsvarianten	36
Abbildung 16: Profil des Querträgers	36
Abbildung 17: Entlastungskerbe am Querträger, Variante B	37
Abbildung 18: Querträger mit seitlich angeschweißten Rippen – Variante D	39
Abbildung 19: Verstärkungsprofil auf der Unterseite des Bodens, Variante G2	41
Abbildung 20: Gewichtswergleich der Varianten gegenüber v2	43
Abbildung 21: Effekt der Entlastungskerbe, statische Beanspruchung	45
Abbildung 22: Auswirkung des Verstärkungsprofils auf das Beulverhalten	49
Abbildung 23: Ermüdungsbelastung, Vergleich der Modellierung grob x fein, Variante B	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Lastfälle der Modellversionen v0 und v1	18
Tabelle 2: Vergleich der Modellierungsmethoden v0 x v1	19
Tabelle 3: Differenz Masse/m <sup>2</sup>	21
Tabelle 4: Größe des FE-Modells v1	22
Tabelle 5: Koordinatensystem	22
Tabelle 6: Randbedingungen	23
Tabelle 7: Lasten	23
Tabelle 8: Massen	24
Tabelle 9: Passagiermassen	24
Tabelle 10: Berücksichtigte Lastfälle	24
Tabelle 11: Ergebnisse der statischen Analyse der Version v2	27
Tabelle 12: Maximale Durchbiegung – Vergleich v1 vs v2	27
Tabelle 13: Überlastete Elemente LF_E2	28
Tabelle 14: Erste Eigenfrequenzen der Wagenkasten v1 und v2	29
Tabelle 15: Maximal erreichte Werte bei der Nachbeulanalyse	30
Tabelle 16: Zusammenfassung und Vergleich der durchgeführten Berechnungen der Version v2	32
Tabelle 17: Spannungen und Auslastung der Y-Naht, Varianten v2, A und B	44
Tabelle 18: Variante E vs. v2 – Vergleich der Spannungen	46
Tabelle 19: Vergleich maximale Durchbiegung, alle Varianten	47
Tabelle 20: Vergleich der Torsionssteifigkeit	47
Tabelle 21: Auslastung der Elemente bei der Ermüdungsanalyse	49
Anhang:	
Tabelle A 1: Auswahl der relevanten Lastfällen, ausführlich	51
Tabelle A 2: Vollständige Auswertung der statischen Lastfälle, Varianten v2, A, B, F, G	54
Tabelle A 3: Maximale Durchbiegung in Z-Richtung, Varianten A, B, F, G	55



## Abkürzungsverzeichnis

Diff.	Differenz
FE	Finite-Elemente
GP	Geschlossene Profile
LF	Lastfall
li.	links
OP	Offene Profile
QT	Querträger
re.	rechts
u.Ä.	und Ähnliches
WK	Wagenkasten

## Inhaltsverzeichnis

Deutsche Kurzfassung	II
English Abstract	III
Danksagung	IV
Quellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Inhaltsverzeichnis	IX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung	1
1.2 Lösungsweg / Methoden	3
1.3 Vorstellung des Unternehmens	4
1.4 Eingesetzte Software	4
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Normen - Beschreibung, Vergleich der Versionen	5
2.1.1 DIN EN 12663-1: Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen	5
2.1.2 DIN EN 15663: Fahrzeugreferenzmassen	6
2.1.3 DIN EN 15085-3: Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen	6
2.1.4 DVS 1608: Gestaltung und Festigkeitsberechnung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen	7
2.1.5 DIN EN 15227: Anforderungen an die Kollisionssicherheit	7
2.2 Grundlagen Schienenfahrzeuge, Meterspur	7
2.3 Kastenbauweise	8
2.3.1 Materialien	9
Michael Praschinger	Diplomarbeit
	IX

2.3.2	Schweißen von Aluminium	10
2.4	Verwendete Leichtbaumethoden	11
2.5	Analysen	11
2.5.1	Statische Festigkeitsanalyse	12
2.5.2	Ermüdungsanalyse	12
2.5.3	Stabilitätsanalyse	14
2.5.4	Eigenfrequenzanalyse	15
2.5.5	Nachbeulanalyse	16
3	Ausgangskonstruktionen	17
3.1	Variante v0	17
3.2	Variante v1	17
3.3	Vergleich der Modellierungsmethoden	18
4	Analyse des Wagenkastens - Istzustand	21
4.1	Gewichtspotenzial der offenen Profile	21
4.2	FE-Modell	22
4.3	Berücksichtigte Lastfälle	24
4.4	Auswertung	25
4.4.1	Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse	26
4.4.2	Statische Lastfälle	26
4.4.3	Ermüdungsanalyse	28
4.4.4	Stabilitätsanalyse	28
4.4.5	Eigenfrequenzanalyse	29
4.4.6	Nachbeulanalyse	29
4.4.7	Kollisionsanalyse	31
4.5	Zusammenfassung der Ist-Variante	32
5	Optimierung der Bauweise	35

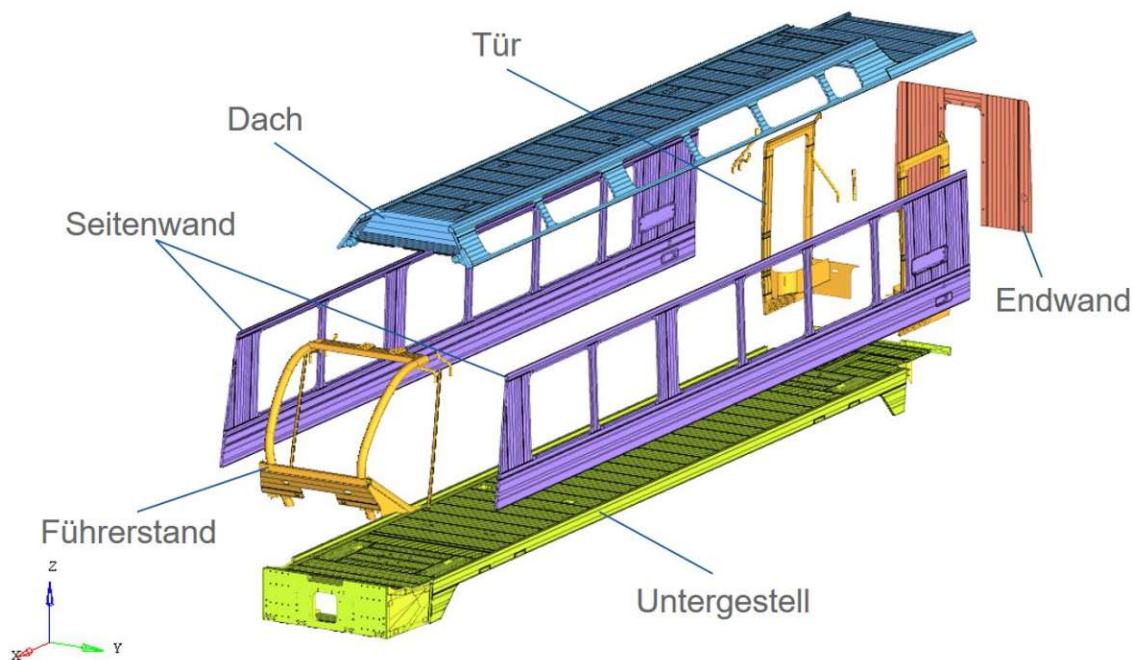
5.1	Optimierungsvarianten	35
5.1.1	Variante A – Verdickung des Profils/ der Y-Schweißnaht	36
5.1.2	Variante B – Entlastungskerbe am Querträger	37
5.1.3	Variante C – Änderung der Nahtart	38
5.1.4	Variante D – Änderung des Querträgerprofils	38
5.1.5	Variante E – Rippen	39
5.1.6	Variante F – Optimierte offene Profile	40
5.1.7	Variante G – Optimierte geschlossene Profile	40
6	Auswertung – Vergleich der optimierten Varianten	42
6.1	Übersicht	42
6.2	Gewichtvergleich der Varianten	43
6.3	Vergleich statische Berechnung	44
6.4	Vergleich Steifigkeit	46
6.5	Vergleich Beulen	48
6.6	Vergleich Ermüdung	49
6.7	Zusammenfassung der Berechnungen	51
7	Zusammenfassung der Arbeit und Empfehlungen	52
8	Anhang	51

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

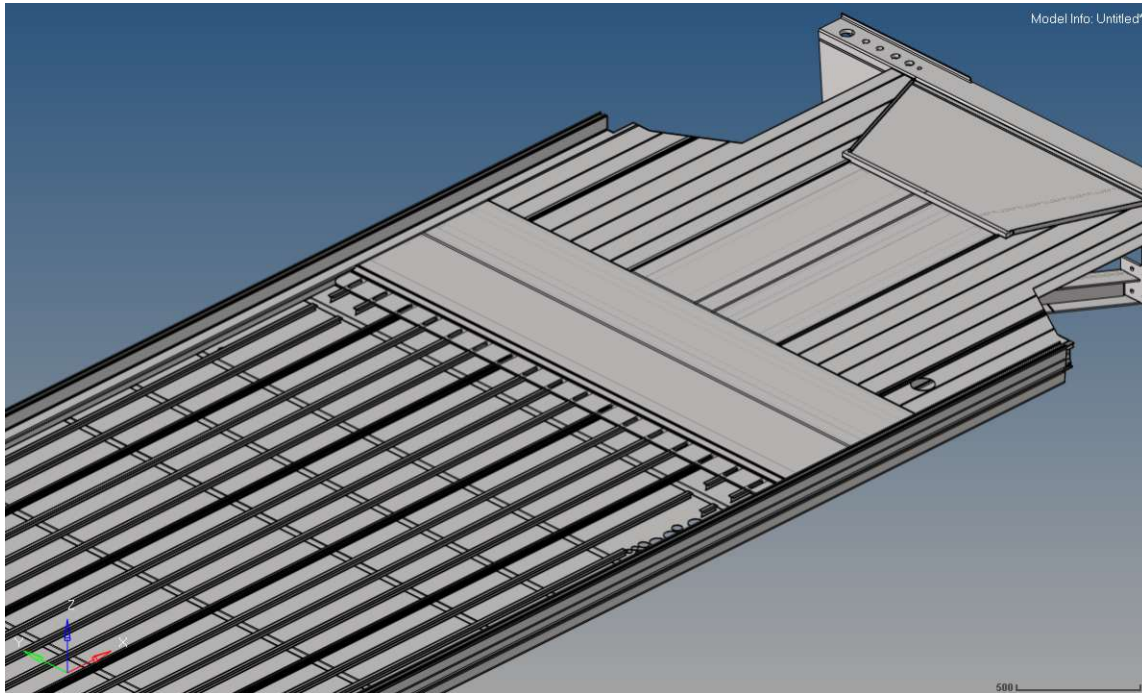
Für Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen ist die Integralbauweise mit Aluminium-Hohlkammerprofilen international weit verbreitet. Die Firma Stadler hat diese Bauweise in den letzten 20 Jahren für fast alle Produktbereiche weiterentwickelt. In früheren Jahren kam eine gemischte Bauweise mit Hohlkammerprofilen und sogenannten offenen Profilen zum Einsatz. Die Verwendung offener Profile im Kastenbau wurde trotz Leichtbaupotential auf Grund von Schwierigkeiten bei der Nachweisführung aufgegeben. Eine grundsätzliche Schwachstelle der offenen Profile zeigt sich im Bereich der Anbindungsstellen. Im Marktsegment der Meterspurbahnen mit den Fahrzeugkategorien P-III und P-IV gemäß EN 12663-1 [1] sind die Herausforderungen bezüglich des Leichtbaus sehr groß - ein Einsatz offener Profile wird deshalb wieder in Betracht gezogen.

Folgende Abbildung zeigt die Hauptbaugruppen eines Wagenkastens. Für diese Arbeit sind Elemente der Bodenkonstruktion, die sich in der Baugruppe „Untergestell“ befinden, relevant.

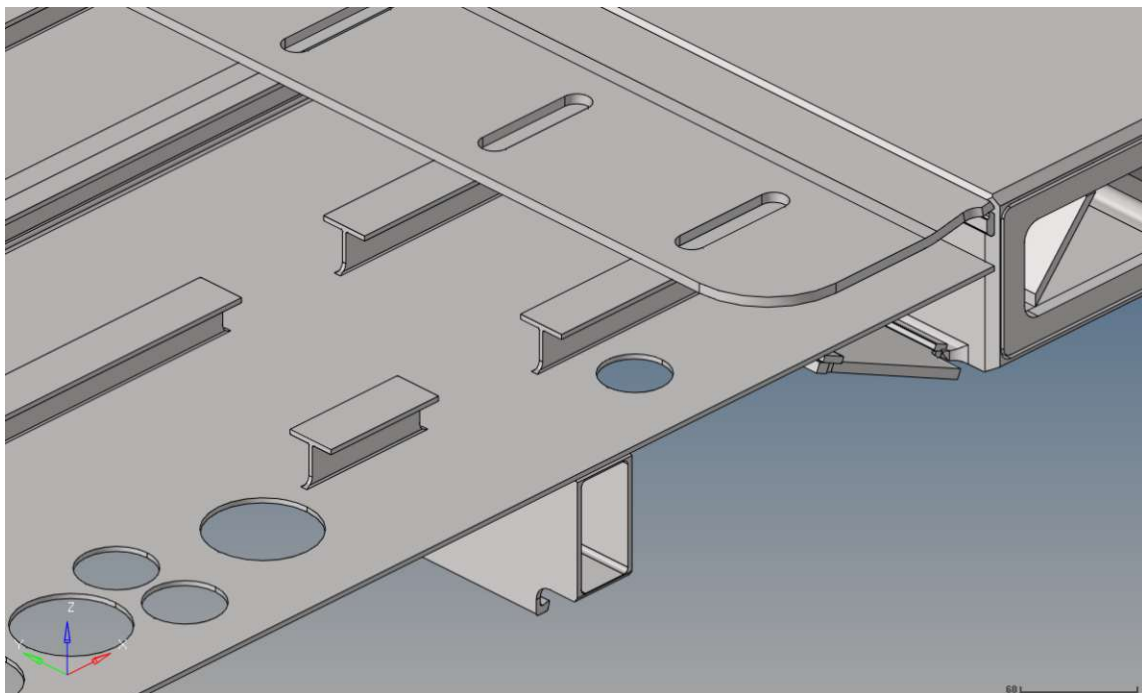


**Abbildung 1: Hauptbaugruppen eines Schienenfahrzeugwagenkastens (copyright: Stadler Rheintal AG)**

Diese Arbeit setzt sich mit der Möglichkeit der Wiedereinführung der offenen Profile für das Segment der meterspurigen Schienenfahrzeuge auseinander. Es wird eine Untersuchung und Optimierung der Bauweise mit Fokus auf das Gewicht des Bodens unter Einhaltung der Festigkeitsanforderungen durchgeführt.

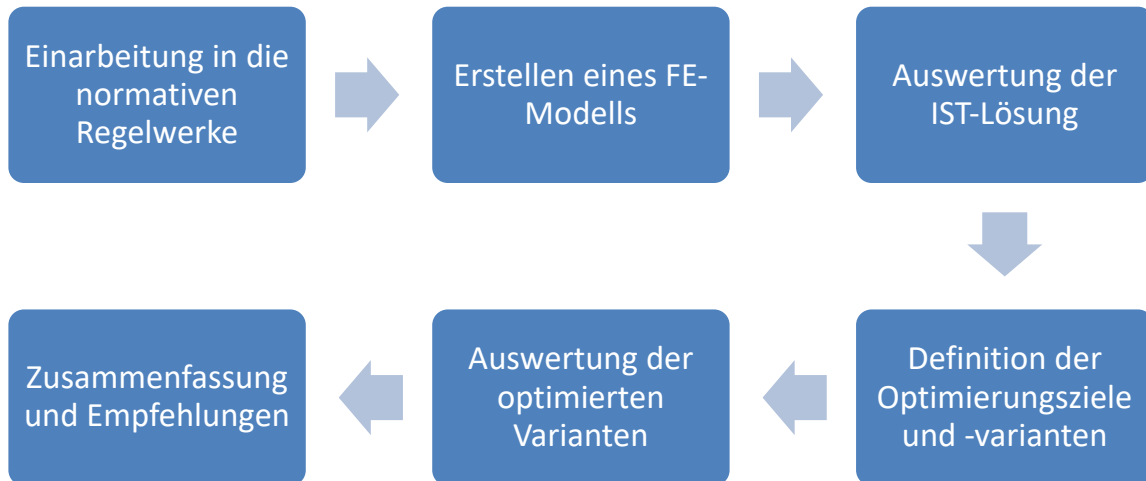


**Abbildung 2: Boden mit offenen Profilen**



**Abbildung 3: Boden mit offenen Profilen, Detail**

## 1.2 Lösungsweg / Methoden



**Abbildung 4: Ablauf der Arbeit**

Erste Voraussetzung ist die Einarbeitung in die relevanten Normen und Regelwerke. Diese bilden die Grundlage für Wagenkastenkonstruktion, Auslegungslastfälle und die Festigkeitsbewertung. Bei dem Studium der bisherigen Bauweisen und Nachweise wird die praktische Anwendung der gewonnenen Kenntnisse betrachtet und nachvollzogen. Nächster Schritt ist die Erstellung eines FE-Modells. Die Variante des Bodens mit offenen Profilen gemäß früherer Bauweise wird auf ein aktuelles Wagenkasten-FE-Modell übertragen. Dann werden FE-Simulationen in den Bereichen Statik, Ermüdung, Steifigkeit und Stabilität durchgeführt. Es folgt die Plausibilitätsprüfung der Berechnungen, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse und Festlegung der Optimierungsziele.

Als Erstes wird die Erfüllung der Festigkeitsanforderungen geprüft. Die Ergebnisse und Erkenntnisse werden zusammengefasst und Stärken sowie Schwächen der Bauweise definiert. Anhand der Schwächen werden die Optimierungsansätze ausgearbeitet. Simulationen der Optimierungsvarianten werden durchgeführt, ausgewertet und nach verschiedenen Kriterien verglichen. Es folgt erneut eine Zusammenfassung der Erkenntnisse und eine Empfehlung der günstigsten Variante.

## 1.3 Vorstellung des Unternehmens

Die Diplomarbeit wird in direkter Zusammenarbeit mit der Firma Stadler Rail durchgeführt. Stadler ist ein Produzent von Schienenfahrzeugen mit Hauptsitz in Bussnang, Schweiz. Die Wagenkastenentwicklungen und -berechnungen werden am Standort St. Margrethen durchgeführt. Mit über 12 000 Mitarbeitern gilt die Firma, die sich hauptsächlich mit der Produktion von Schienenfahrzeugen für den urbanen Verkehr, Vollbahnen, Lokomotiven oder Reisezug- und Güterwagen beschäftigt, als Spezialist für die Tailor-Made Schienenfahrzeuge. Zu den Tailor-made oder maßgeschneiderten Züge gehören auch die Wagenkästen, auf denen diese Arbeit basiert.

## 1.4 Eingesetzte Software

- ◆ Altair HyperWorks 2017
  - HyperMesh - Preprocessing
  - HyperView - Postprocessing
- ◆ DS Simulia Abaqus 6.14 - Solver



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Normen - Beschreibung, Vergleich der Versionen

Die Normen stellen die Grundlage der Wagenkastenkonstruktion dar. Auf eine detaillierte Beschreibung wird hier allerdings verzichtet, es werden nur die für die Diplomarbeit relevanten Abschnitte beschrieben. Folgende Zusammenfassung der wichtigsten Merkmale der Normen soll dazu dienen, eine Vorstellung über den Umfang der normativen Regelwerke, die die Wagenkastenkonstruktion betreffen, zu gewinnen. Vorgehensweise und Anwendung der Normen werden in Kapitel 2.5. beschrieben.

#### 2.1.1 DIN EN 12663-1: Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen

Diese Norm stellt die Basis für die Konstruktion der Wagenkästen unter Aufrechterhaltung der notwendigen Sicherheit dar. Die Norm ist für Lokomotiven, Güter- und Personenzüge gültig.

Diese Europäische Norm definiert unter anderem:

- Koordinatensystem des Wagenkastens
- Kategorien der Schienenfahrzeuge – verschiedene Festigkeitsanforderungen
- Mindestanforderungen an die Festigkeit
- Anwendung der Werkstoffdaten
- Belastungsanforderungen an die Konstruktion
- Prinzipien der Validierung der Konstruktion durch Berechnung und Prüfung

In der Norm findet man auch die Definition der Wagenkasten: „Tragende Hauptstruktur oberhalb der Fahrwerke, einschließlich aller Komponenten, die an dieser Struktur befestigt sind und direkt zu ihrer Festigkeit, Steifigkeit und Stabilität beitragen.“ [1]

Die Norm enthält nur Anforderungen an die Festigkeit jedoch keine konkreten Werte. Diese werden durch weitere Regelwerke definiert. Allerdings wird definiert, dass die Wagenkästen „der maximalen Belastung entsprechend den Betriebsanforderungen standhalten und die

geforderte Lebensdauer unter normalen Betriebsbedingungen mit angemessener Überlebenswahrscheinlichkeit erreichen müssen.“ [1]

Nach diesem Regelwerk werden alle später erwähnten Lastfälle definiert und ausgewertet.

### **2.1.2 DIN EN 15663: Fahrzeugreferenzmassen**

Das Ziel dieser Europäischen Norm ist die Definition der Fahrzeugreferenzmassen für die Auslegung, Prüfung, Kundenabnahme, Beschriftung, Lieferung und Betrieb der Schienenfahrzeuge. Folgende Massen werden definiert [2]:

- Leermasse
- Auslegungsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs
- Auslegungsmasse bei normaler Zuladung
- Auslegungsmasse bei außergewöhnlicher Zuladung
- Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs
- Betriebsmasse bei normaler Zuladung.

Es werden sämtliche Zuladungszustände (z.B. Verbrauchsstoffe, Zugpersonal usw.), Stehflächen oder Zuladungen definiert.

### **2.1.3 DIN EN 15085-3: Schweißen von Schienenfahrzeugen und - fahrzeugteilen**

Diese Norm ist Teil der Normenreihe, die das Schweißen metallischer Werkstoffe bei der Herstellung und Instandsetzung von Schienenfahrzeugen und -teilen beschreibt. Konkret werden die Gestaltung von Schweißverbindungen, konstruktive Anforderungen und Regeln beschrieben. Definiert werden die Beanspruchungszustände, Sicherheitsbedürfnisse, Schweißnahtgüte und -prüfklassen. Des Weiteren definiert die Norm die Nahtdicken von Schweißnähten, die aber teilweise durch strengere Konstruktionsrichtlinien ersetzt werden. [3]

## 2.1.4 DVS 1608 - Richtlinie: Gestaltung und Festigkeitsberechnung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen

Diese Richtlinie [4] beschreibt das Vorgehen beim Nachweis der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen für den Schienenfahrzeugbau. [4]

Von Bedeutung für die Diplomarbeit ist der Abschnitt „Nachweis der Ermüdungsfestigkeit“ und die „Dauerfestigkeitswerte für Schweißnähte nach dem Nennspannungskonzept“. Diese werden im Kapitel 2.5.2 detailliert beschrieben.

## 2.1.5 DIN EN 15227: Anforderungen an die Kollisionssicherheit

Das Ziel dieser Europäischen Norm [5] ist die Folgen von Kollisionsunfällen zu minimieren. Die Norm beschreibt die Anforderungen an die Kollisionssicherheit für Neukonstruktionen von Schienenfahrzeugen wie Lokomotiven, Wagen mit Steuerkopf oder Personenschienenfahrzeugen (Straßenbahnen, U-Bahnen). Die Methoden werden zur Bereitstellung der passiven Sicherheit sowie die Masse der Referenzhindernismodellen für die Kollisionsszenarien spezifiziert. Es werden auch die Anforderungen und Verfahren spezifiziert, wenn der Nachweis über einen Vergleich mit einer bestehenden Konstruktion, über numerische Simulation, über Versuche mit Bauteilen, über Prüfungen in Originalgröße, oder über eine Kombination dieser Methoden durchgeführt wird. [5]

Der Wagenkasten der Version v0 wurde also noch nicht nach dieser Norm ausgelegt/geprüft. Für den Wagenkasten der Version v1 war die Norm bereits gültig, d.h., der Wagenkasten erfüllt die Anforderungen der Norm.

Die Crash-Simulation wird für die angepasste Variante nicht durchgeführt, diese Norm wird also nicht direkt verwendet. Begründung erfolgt im Kapitel 4.4.7.

## 2.2 Grundlagen Schienenfahrzeuge, Meterspur

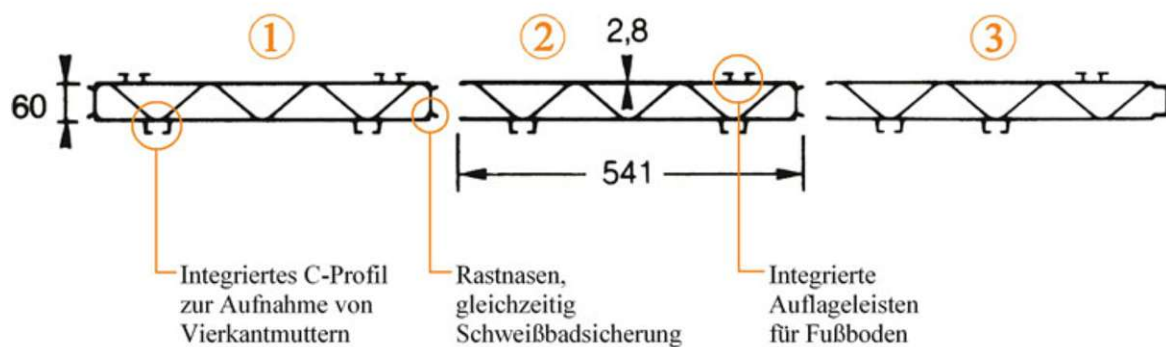
Die Definition der Schienenfahrzeuge lautet nach Janicki et. al. [6] folgendermaßen: „Der Begriff „Schienenfahrzeuge“ steht für schienengebundene Fahrzeuge, die auf mit Spurkranz versehenen Rädern auf paarweisen und parallel angeordneten Schienen fahren und sowohl

Güter als auch Personen befördern. Die Verbindung zwischen dem Radsatz des Schienenfahrzeuges und der Schiene ist die wesentliche Schnittstelle im System Bahn. Dabei übernimmt der Radsatz die Spurführung des Fahrzeugs, stützt das Fahrzeuggewicht ab und überträgt kraftschlüssig die zur Fahrzeugbewegung erforderlichen Zug- und Bremskräfte.“[6]

Eine besondere Kategorie der Schienenfahrzeuge bilden die Meterspurfahrzeuge. Hier ist die Spurbreite dieser Fahrzeuge im Gegensatz zu der Normalspur (1435 mm) 1000 mm breit. Die meterspurigen Bahnen sind in Europa, vor allem in Spanien, Italien oder in der Schweiz zu finden, wo sie unter anderem auch von privaten Bergbahnen genutzt werden. [6]

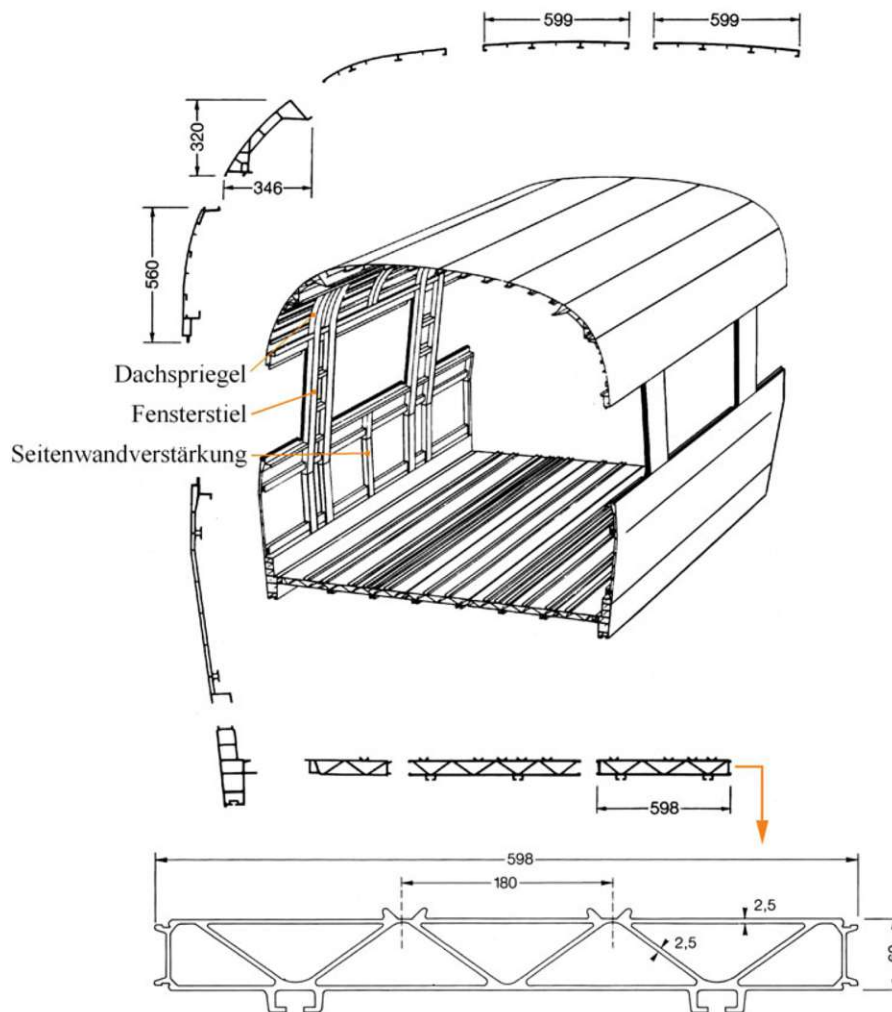
## 2.3 Kastenbauweise

Die Ende der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals verwendete, heutzutage übliche Integralbauweise aus Aluminiumstrangpressprofilen wurde auch im Falle des zu untersuchenden Fahrzeugs verwendet. Der Wagenkasten aus stranggepressten (Hohl-) Profilen ist selbsttragend, nimmt Kräfte und Momente auf und braucht keine zusätzliche Außenbeblechung. Wie die Abbildung 5 zeigt, ermöglicht das Strangpressen die direkte Integration der Aufnahme von Aufbauten (Wassertank, Klimaanlage usw.), sog. C-Schienen.



**Abbildung 5: Stranggepresste geschlossene Aluminiumprofile für den Boden [6]**

Typisch verwendete Strangpressprofile sind geschlossene Profile. Allerdings wie in der Abbildung 6 gezeigt, werden in der Wagenkastenkonstruktion auch offene Profile verwendet.



**Abbildung 6: Zusammenbau des Wagenkastens aus verschiedenen stranggepressten Al-Profilen [6]**

### 2.3.1 Materialien

Sämtliche Strangpressprofile werden aus einer AlSiMg-Legierung mit der Bezeichnung EN AW-6005A T6 (lösungsgeglüht und warmausgelagert) hergestellt (siehe DVS 1608[4]). Es handelt sich um eine aushärtbare Knetlegierung mit mittlerer bis hoher Festigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit. Die Legierung ist gut schweißbar und mechanisch stark beanspruchbar. Die gesamte Bodenkonstruktion wird aus diesem Material hergestellt.

Weitere Materialien:

- EN AW-6082 – ebenfalls eine AlSiMg Knetlegierung, für mechanisch beanspruchte Bauteile geeignet, bei dem untersuchten Wagenkasten für die massiven Frästeile verwendet
- Stahl: S355, S690, 42CrMoS4 für Bauteile wie Drehzapfenlager, Bahnräumer usw., für Zwecke der Arbeit nicht von Bedeutung

### 2.3.2 Schweißen von Aluminium

Die für die Untersuchung und Optimierung des Wagenkastens relevante Legierung EN AW-6005A T6 besitzen sehr gute Schweißeigenschaften. Allerdings gibt es nach Ostermann [7] folgende spezifische Merkmale:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit bedeutet, dass die Wärme von der Schweißnaht leicht in das Grundmaterial „abfließt“, dies ist vor allem beim Schweißen von Bauteilen mit unterschiedlicher Wandstärke zu beachten – Neigung zum Nahtriss
- Etwa doppelter Wärmeausdehnungskoeffizient als bei Stahl – dies kann zu deutlichen Wärmeausdehnungen beim Erwärmen führen
- Hohe Neigung zur Oxidation – Schweißschmelzbad muss durch eine Schutzatmosphäre inerte Gase geschützt werden, sonst Versagensgefahr durch Imperfektionen
- Natürliche Oxidschicht wird nicht durch den Schweißprozess geschmolzen – Notwendigkeit der Vorbereitung der Schweißnaht
- Durch das Schweißen kommt es zur Entfestigung des ausgehärteten Materials in der Wärmeeinflusszone

Zu erwähnen ist auch die Verwendung von Schweißbadstützen wie in Abbildung 7, die qualitativ hochwertigere Nahtarten durch volle Durchschweißung des Grundmaterials ermöglichen.

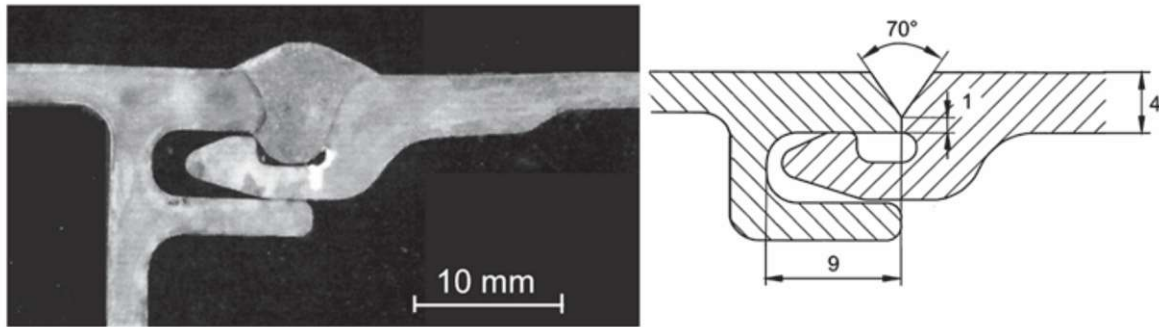


Abbildung 7: Schweißbadsicherung an einem Stranggepressten Profil aus Aluminium [7]

## 2.4 Verwendete Leichtbaumethoden

Bei der Konstruktion bzw. Optimierung des Wagenkastens werden folgende Leichtbaumethoden angewendet:

- Integralbauweise mit Aluminium (beschrieben im Kap. 2.3)
- Offene Profile: aus der Sicht der Biegebeanspruchung sind die offenen Profile dank der Ähnlichkeit zu I- oder H-Träger (Material möglichst weit weg von der neutralen Achse) sehr effizient, sie stellen eine leichtere Konstruktion als geschlossene Profile dar, sind jedoch für Anwendungen, wo Torsionssteifigkeit gewünscht ist, ungeeignet – offene Profile besitzen geringe Torsionssteifigkeit
- Entlastungskerbe: Eine Entlastungskerbe bewirkt einen sanfteren Kraftfluss im Bauteil, dies führt zur Verteilung des Kerbeffekts und anschließend auch zur Verteilung der Spannung

## 2.5 Analysen

In den folgenden Kapiteln wird ein kurzer theoretischer Hintergrund der Analysen vorgestellt. Beim Vergleich der gemessenen oder berechneten Spannung zu der zulässigen Spannung wird die Auslastung folgendermaßen bestimmt [1]:

$$U = \frac{R_d * S}{R_L} \leq 1$$

$U$  Auslastung der Komponente

$R_d$  ermitteltes Ergebnis

$S$  konstruktiver Sicherheitsfaktor

$R_L$  zulässiger Wert/Grenzwert

### 2.5.1 Statische Festigkeitsanalyse

Die lineare statische Analyse wird als die einfachste und fundamentale Analyse betrachtet. Das Berechnungsprogramm verfolgt die lineare Hook'sche Gerade, die durch  $\sigma = \varepsilon * E$  definiert ist. Es werden folgende Bedingungen berücksichtigt: [8]

- $\frac{dF}{dt} = 0$
- $\sum F_i = 0, \sum M_i = 0$

Für die statischen Lastfälle gilt nach EN 12663-1 eine Sicherheit von 1.0 gegen die Streckgrenze und 1.3 gegen Bruch – allerdings müssen die Auslegungslastfälle durch Tests nachgeprüft werden und/oder Korrelation zwischen Test und Berechnung nachgewiesen werden. Dies wird durch früher erfolgreich validierte Wagenkastendruckversuche nachgewiesen. [1]

$$U = \frac{\sigma_c * S_1}{R} \leq 1$$

$U$  Auslastung der Komponente

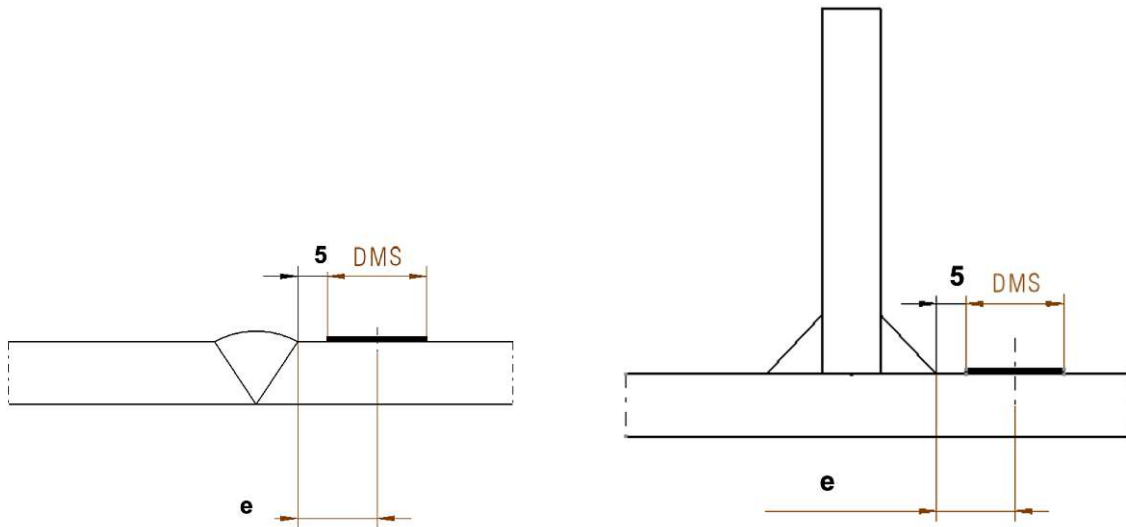
$\sigma_c$  berechnete Spannung in N/mm<sup>2</sup>

$S_1$  Sicherheitsfaktor für Streck bzw. Dehngrenze (1.0)

### 2.5.2 Ermüdungsanalyse

Im Fall der Optimierung der Wagenkastenbauweise mit offenen Profilen werden für die Ermüdungsanalyse die Schweißnähte im Bodenbereich berücksichtigt. Aufgrund der niedrigeren Festigkeitswerten sind die Schweißverbindungen versagensanfälliger als das Grundmaterial. Die Analyse wird als quasi-statisch vorausgesetzt.





**Abbildung 8 Position des Auswertepunktes; Stumpfnah (li.), Kehlnah (re.) [4]**

❖ Nennspannungskonzept

Nach dem Nennspannungskonzept, definiert in der Richtlinie DVS 1608, ergeben sich die maßgebenden Nennspannungen für die Ermüdungsberechnung aus den auf den jeweiligen Nahtquerschnitt bezogenen Schnittgrößen. Das bedeutet, dass eine Spannungsüberhöhung, die durch die konstruktive Gestaltung der Verbindung entsteht, nicht berücksichtigt wird.

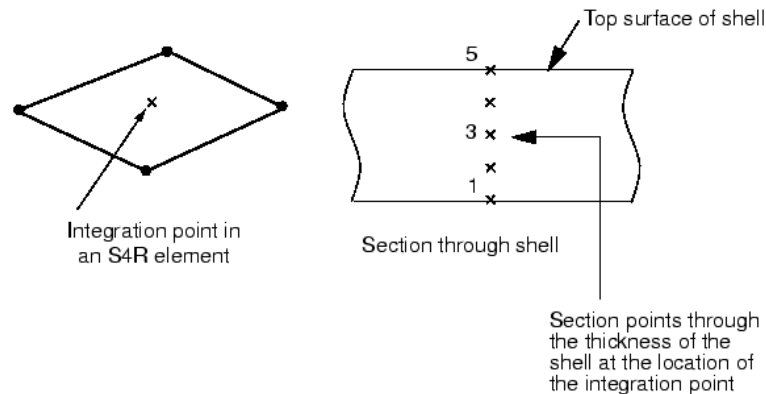
❖ Dauerfestigkeit

Als Dauerfestigkeit wird in Schienenfahrzeugbau die Zeitfestigkeit für 10 Millionen Lastwechsel angenommen. Die Festigkeitswerte für Schweißnähte sind von der verwendeten Legierung des Grundwerkstoffes unabhängig. Entscheidend für die Festigkeitswerte ist das Spannungsverhältnis  $R_\sigma$  (Verhältnis der auftretenden Ober- zu der Unterspannung). In dem gegebenen Fall wird nur mit dem Spannungsverhältnis  $R_\sigma = -1$  gerechnet, d.h. reiner Zug-Druckbereich. Die zulässigen Dauerfestigkeitswerte, die von der Nahtart, Prüfmethode und -umfang und Schweißnahtgüteklasse abhängig sind, werden durch die Kerbfalllinien, die im MKJ-Diagramm dargestellt sind, definiert.

Die Dauerfestigkeitswerte für die zulässigen Ausschlagsspannungen werden für den Fall  $R = -1$  mit folgender Formel berechnet [4]:

$$\sigma_{a\_zul} = 46 * 1.04^{-x} [MPa] \quad x \quad \text{Exponent der Kerbfalllinie}$$

Die Nominalspannung, die in der Naht entsteht, setzt sich aus 3 Komponenten zusammen: S11, S22 und S21 die den Spannungen in der Schweißnaht  $\sigma_{||}$ ,  $\sigma_{\perp}$  und  $\tau$  entsprechen. Diese Spannungen werden für ein Element jeweils den Section points 1 und 5 (Abbildung 9), die die untere und obere Seite des Schalenelementes darstellen, ausgewertet.



**Abbildung 9: Darstellung der Section points an einem Schalenelement [9]**

Die Auswertung erfolgt durch den Vergleich der Werte mit den Dauerfestigkeitswerten (Sicherheitsfaktor 1.0).

#### ❖ Kerbspannungskonzept

Eine Alternative zu dem Nennspannungskonzept stellt das Kerbspannungskonzept dar. Mit dem nur für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis anwendbarem Kerbspannungskonzept werden die Spannungen in einer Schweißnaht örtlich bewertet. Von Interesse sind die Spannungen im Nahtübergang und der Nahtwurzel. Um diese Auswertung zu ermöglichen, muss die Schweißnaht im Berechnungsmodell auch mit dem entsprechenden Kerb- bzw. Referenzradius modelliert werden.

### 2.5.3 Stabilitätsanalyse

In der Stabilitätsanalyse wird die Sicherheit gegen Beulen nachgewiesen und somit die strukturelle Stabilität des Wagenkastens geprüft. In diesem Fall ist das Beulen des ebenen Schalenelementes unter Druckkräften in seiner Fläche von Bedeutung. Nach Weidemann wird ein Druckbeulwert für das Beulen einer ebenen Platte folgendermaßen definiert [10]:

$$k \equiv \frac{p_{kr}}{B} \left( \frac{b}{\pi} \right)^2 = \frac{12(1 - \nu^2) p_{kr} b^2}{\pi^2 E t^3}$$

$p_{kr}$  kritische Drucklast in N/m

$B$  Biegesteifigkeit

$b$  Plattenbreite

$t$  Plattendicke

Das Beulen ist von dem Seitenverhältnis der beanspruchten Fläche und den Materialeigenschaften abhängig. Ein wichtiger Faktor ist auch die Randbedingung. [10]

Bei einer Beulanalyse handelt es sich um folgenden Eigenwertproblem [11]:

$$(\mathbf{K}_B - \lambda * \mathbf{K}_G) * \mathbf{U} = 0$$

$\mathbf{K}_B$  Systembiegesteifigkeitsmatrix

$\lambda$  Eigenwert

$\mathbf{K}_G$  Systemgeometriesteifigkeitsmatrix

$\mathbf{U}$  Systemverschiebungsvektor

Das Ausbeulen der Platte trifft somit ein, wenn es für  $\lambda$  eine nichttriviale Lösung gibt. Das Problem wird durch einen speziellen Eigenwertlöser gelöst. [11]

Folgende Gleichung stellt die Sicherheit der Wagenkastenstruktur gegen Instabilität dar. Eine ungenügende Sicherheit würde zum globalen Versagen der Struktur führen. [1]

$$U = \frac{L_c * S_3}{L_{cb}} \leq 1$$

$U$  Auslastung

$L_c$  berechnete Belastung, in N

$S_3$  Sicherheitsfaktor für Instabilität (1.5)

$L_{cb}$  berechnete Knicklast, in N

## 2.5.4 Eigenfrequenzanalyse

Die Eigenfrequenzanalyse liefert die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Wagenkastens. Das Ziel dieser Analyse ist eine ausreichende Entkopplung von den Eigenfrequenzen der

Drehgestelle nachzuweisen. Es handelt sich um ein Eigenwertproblem mit der Bewegungsgleichung der freien ungedämpften Schwingung [11]:

$$M * \ddot{U} + K * U = 0$$

$M$	Systemmassenmatrix
$\ddot{U}$	Systembeschleunigungsvektor
$K$	Systemsteifigkeitsmatrix
$U$	Systemverschiebungsvektor

### 2.5.5 Nachbeulanalyse

Die Nachbeulanalyse, auch als Post-Buckling Analyse genannt, könnte in diesem Fall, was die Deformation des Wagenkastens betrifft, als eine Alternative zu der Crash-Simulation betrachtet werden. Es handelt sich um eine nichtlineare zeitgesteuerte Analyse, die die Struktur unter einer Druckbelastung analysiert. Die Analyse wird mit einem expliziten Solver mit elastisch-plastischen Materialeigenschaften durchgeführt.

## 3 Ausgangskonstruktionen

Als Ausgangskonstruktionen stehen zwei Wagenkastenmodelle zur Verfügung. In den folgenden Kapiteln werden die Modelle beschrieben und bezüglich der Konstruktion, der konstruktionsrelevanten Regelwerke sowie der Modellierungsmethoden verglichen.

### 3.1 Variante v0

Die Variante v0 stammt aus dem Jahr 2005. Es ist ein Passagierwagen einer Meterspur-Bergbahn, bei dem die Bodenkonstruktion mit offenen Profilen konstruiert ist. Die selbsttragende Wagenkastenkonstruktion wird in einer Integralbauweise mit Hohlkammer-Aluminiumprofilen konzipiert.

Verwendete Normen:

- DIN EN 12663:2000-10 Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen
- DIN 5513:2003-05 Werkstoffe für Schienenfahrzeuge – Aluminium und Aluminiumlegierungen – zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien
- DIN EN 755-2:1997-08 Aluminium und Aluminiumlegierungen - stranggepresste Stangen, Rohre und Profile - Teil 2: Mechanische Eigenschaften – zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien

Diese Variante dient nur zum Studium und Vergleich der früheren mit der heutigen Bauweise.

### 3.2 Variante v1

Variante v1 ist ein kürzlich produzierter Wagenkasten, der dem heutigen Stand der Technik entspricht. Es handelt sich um einen ebenfalls aus Hohlkammer-Aluminiumprofilen konzipierten Steuerwagen einer Meterspur-Bergbahn. Im Wagenkasten wird die Bodenkonstruktion aus geschlossenen Querprofilen konstruiert.

Verwendete Normen:

- DIN EN 12663-1:2015
- DIN EN 15085-3:2010
- DIN EN 15663:2017+A1:2018
- DIN EN 15227:2008+A1:2010
- DVS 1608(2011)

**Tabelle 1: Vergleich der Lastfälle der Modellversionen v0 und v1**

	Anzahl der definierten Lastfälle	
	v0	v1
<b>Statische Analyse</b>	17	44*
<b>Ermüdungsanalyse</b>	5	6
<b>Beulanalyse</b>	3	4
<b>Modalanalyse</b>	1	1
<b>Nachbeulanalyse</b>	0	1
<b>Crashanalyse</b>	0	5
<b>Torsionssteifigkeit</b>	0	1

\*viele Varianten wie: Querkraft: vorne links, vorne rechts, innen, außen, ...

### 3.3 Vergleich der Modellierungsmethoden

Da zwischen den beiden Modellversionen 14 Jahre liegen, gibt es auch einige Modellierungsunterschiede. Diese werden in der folgenden Tabelle erwähnt.

**Tabelle 2: Vergleich der Modellierungsmethoden v0 x v1**

v0	v1
<b>Schweißnähte nicht modelliert</b>	<b>Schweißnähte modelliert</b>
Bei der aktuellen Version v1 sind die Schweißnähte als separate Komponenten (Elementenreihe) oder als Beam-Elemente (Lochschweißnähte) modelliert. Diesen Komponenten werden ein geeignetes Material, sowie entsprechende Eigenschaften (Dicke der Naht) zugewiesen. Dies ermöglicht eine bessere Übersicht und genauere Auswertung der Schweißnähte.	
<b>Auf Details verzichtet</b>	<b>Fast alle Details modelliert</b>
Bei der Version v0 wurde auf die Details zwecks der Einfachheit des Modells verzichtet. Grund dafür ist die geringere Rechenkapazität. Als Beispiel können z.B. Löcher im Stirnwanndblech dienen, die bei v1 modelliert, bei v0 nicht modelliert sind.	
<b>Frästeile aus 2D-Elementen</b>	<b>Frästeile aus 3D-Elementen</b>
Modellierung aus 3D-Elementen erhöht die Komplexität, d.h. Modellierung aus 2D-Elementen bedeutet einen geringeren Rechenaufwand.	
<b>Keine Berücksichtigung der Fenster</b>	<b>Fenster berücksichtigt</b>
In Version v1 sind Fenster mit MPCBEAM Elementen und einem Massenpunkt modelliert. Somit wird sowohl die Masse als auch die Steifigkeit berücksichtigt.	
<b>Nur ein AI-Typ definiert</b>	<b>Mehrere AI-Typs definiert</b>
In Version v0 wird die gesamte Wagenkastenstruktur auf Tara-Masse skaliert. Da in Version v1 Schweißnähte und 3D Elemente vorkommen, sind mehrere Materialien definiert – skaliert für Profile aus Schalenelementen, unskaliert für Bauteile aus 3D Elementen.	
<b>Nur wenige Geräte/Massenteile dargestellt</b>	<b>Alle Massenteile &gt;100kg dargestellt</b>
Bei Version v0 sind Massenteile wie z.B. Sitze nicht dargestellt. Wenn ein Massenteil dargestellt wird, dann mit einem DCOUP Element mit wenigen (4) Anbindungsknoten – konzentrierte Lasteinleitung.	
<b>Meshüberlappung</b>	
In Version v0 entsteht die Meshüberlappung einerseits konstruktionsbedingt (entspricht nicht mehr dem heutigen Modellierungsstandard) andererseits durch Absenz der Schweißnahtmodellierung. In Version v1 besteht die Meshüberlappung nur als einer	

„Außenschicht“ der 3D Elemente. Dies kann auch zur Auswertung der Oberflächenspannung bei den 3D Elementen herangezogen werden.

#### Andere Merkmale

Keine Kontakte – hoher Rechenaufwand	Kontakte zwischen Bauteilen aus 3D Elementen modelliert
Balkenähnliche Elemente als 1D-BEAM (B31) Elemente dargestellt (z.B. C-Schienen) – geringerer Rechenaufwand,	Vollständige Modellierung der C-Schienen über Schalenelemente.

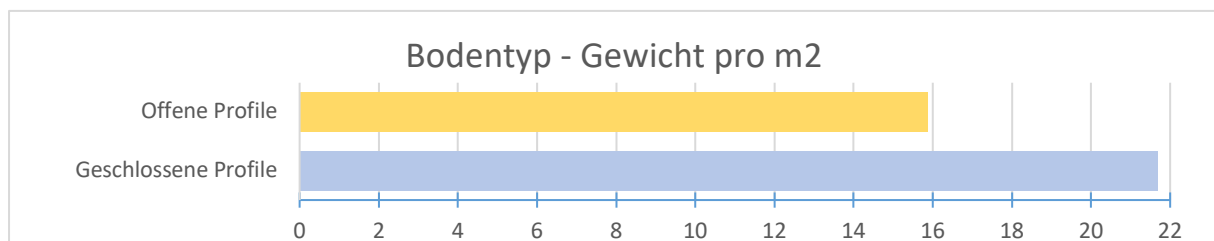


## 4 Analyse des Wagenkastens - Istzustand

Im folgenden Teil wird die Analyse des Wagenkastens v1, mit dem Boden mit offenen Profilen (stammend aus v0) vollständig beschrieben. Diese kombinierte Modellvariante wird als **v2** bezeichnet. Diese Analyse dient sowohl als Ausgangspunkt für spätere Optimierungsvarianten sowie auch als Nachweis der strukturellen Integrität der kombinierten Variante.

### 4.1 Gewichtspotenzial der offenen Profile

Der erste Schritt der Analyse ist die Untersuchung des Gewichtseinsparpotenzials der Variante mit offenen Profilen. Da die beiden Wagenkastenversionen verschiedene Maße haben, wird das Gesamtgewicht der jeweiligen Bodenvarianten auf die Fläche bezogen und verglichen. Die Masse wird ohne Berücksichtigung jeglicher Gerätebefestigungen verglichen. Der Massenvergleich berücksichtigt nur die strukturellen Bauteile, Teile wie Isolation, Verkabelung u.Ä. werden nicht berücksichtigt.



**Abbildung 10: Offene und geschlossene Profile, Vergleich Masse/m<sup>2</sup>**

**Tabelle 3: Differenz Masse/m<sup>2</sup> (für Bodenkonstruktion)**

	Geschlossene Profile	Offene Profile
Masse/m <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	21.67	15.87
Differenz		-27%
Differenz absolut [kg]		-141

Die Konstruktionsänderung verursacht natürlich auch eine Änderung der Steifigkeit. Die Steifigkeit der offenen Profile ist niedriger, genaue Zahlenwerte werden in der Tabelle 12 im Kapitel 4.4.2 aufgelistet.

## 4.2 FE-Modell

Da der Wagenkasten nicht vollkommen symmetrisch ist, und asymmetrische Lastfälle vorkommen, wird ein Vollmodell erstellt. In der folgenden Tabelle sind die Werte für die Modellgröße des Wagenkastens angegeben.

**Tabelle 4: Größe des FE-Modells v1**

Anzahl der Knoten	1 187 861
Anzahl der Elemente	1 285 349
Anzahl der Freiheitsgrade	7 767 506

### ❖ Verwendete Elemente

Das FE-Modell wird hauptsächlich aus 4-Knoten Schalenelementen (Abaqus Typ S4R) modelliert. Es werden auch Dreieckselemente (Typ S3R) verwendet, allerdings im möglichst kleinen Ausmaß. Die massiven Teile (z.B. Kupplung) werden mithilfe von Volumenelementen modelliert (Typ C3D8I, C3D4, C3D6). Die typische Kantenlänge eines Elements beträgt 20mm. Geräte, wie z.B. Klimaanlage sind mit Massenelementen (Massenpunkten) (Typ MASS) repräsentiert. Die Massen sind durch Distributing Coupling Elemente – DCOUP3D (sog. Spinnen) an die Wagenkastenstruktur angebunden. Dies ermöglicht die gleichmäßige Verteilung der Masse an ein bestimmtes Elemente-Set. Die Steifigkeit mancher Bauteile, z.B. Fenster ist durch lineare Feder-Elemente (JOINTC) repräsentiert. Letztlich sind Teile wie z.B. Schrauben durch 1D Balkenelemente (B31) dargestellt.

### ❖ Koordinatensystem

Das Koordinatensystem des Wagenkastens wird als Rechtssystem definiert.

**Tabelle 5: Koordinatensystem**

X-Achse	Längsachse in Fahrtrichtung, X=0: Mitte des hinteren Drehgestells
Y-Achse	Horizontale Querachse
Z-Achse	Vertikale Achse

❖ Randbedingungen

**Tabelle 6: Randbedingungen**

	Gesperrte Freiheitsgrade	Beschreibung
<b>Drehgestelle</b>	X, Y, Z Rotation um X	Anbindung der Drehgestelle über Distributed Coupling Elemente dargestellt: Puffer, Rahmen, Drehzapfenlager
<b>Kupplung</b>	X, Y	Kupplungen über Distributed Coupling Elemente vorne und hinten gesperrt
<b>Anhebestellen</b>	Y, Z	Ebenfalls über Distributed Coupling Elemente

❖ Lasten

**Tabelle 7: Lasten**

Bezeichnung	Kraft [kN]	Richtung	Beschreibung
<b>Kupplungskräfte</b>	800	-X	Kupplungsdruck
	600	+X	Kupplungszug
<b>Drehgestellkräfte</b>	23	X	Puffer
<b>DG-Stoss 3g längs</b>	112	X	Rahmen
<b>DG-Stoss 1g quer</b>	25	Y	Puffer
	46	Y	Rahmen
<b>Querkräfte</b>	14	(-)Y	Querkräfte an den Anhebestellen
<b>Abhebesicherung</b>	21.6	-Z	1.1-faches Drehgestellgewicht, relevant beim Anheben, Eingleisen

❖ Massen

**Tabelle 8: Massen**

Bezeichnung	Beschreibung	Definition
<b>Tara</b>	Auslegungsmasse im betriebsbereiten Zustand	
<b>Brutto</b>	Auslegungsmasse bei außergewöhnlicher Zuladung	Tara 100% Sitzplätze belegt Stehende Passagiere

Es werden nur die Passagiermassen und -anzahl erwähnt, da diese für das Verständnis der Beladung bei den Lastfällen Tara – Brutto dienen. Die Masse der stehenden Passagiere wird durch einen gleichmäßigen Flächendruck auf eine vordefinierte Fläche repräsentiert. Andere Massen, wie z.B. Klimageräte wirken bei allen Lastfällen und werden hier nicht detailliert aufgelistet.

**Tabelle 9: Passagiermassen**

Bezeichnung	Anzahl	Masse [kg]	Anmerkung
<b>Passagier (Person)</b>	1	70	
<b>Passagiere sitzend</b>	34	2380	
<b>Passagiere stehend</b>	46	3220	5P/m <sup>2</sup>

## 4.3 Berücksichtigte Lastfälle

Die Definition der Lastfälle basiert auf der Norm DIN EN 12663-1:2010+A1:2014 [1]. Eine detaillierte Beschreibung der Lastfälle, Begründung der Auswahl und Risiken, die entstehen könnten, wenn auf die Berechnung eines Lastfalls verzichtet wird, sind im Anhang A, Tabelle A 1, zu finden.

**Tabelle 10: Berücksichtigte Lastfälle**

Lastfall	Bezeichnung	Anmerkung
<b>Statische Lastfälle</b>		
LF_1	Tara + 1g	
LF_2	Brutto + 1.3g	
LF_3	Kupplungsdruck 800kN + Brutto 1g	
LF_4	Kupplungszug 600kN + Brutto 1g	
LF_5	Anheben asymmetrisch	
LF_6	Eingleisen symmetrisch	
LF_7	Querkraft Anhebestelle	
<b>Ermüdungslastfälle</b>		
LF_E1	Stossbelastung längs 0.15g	*
LF_E2	Stossbelastung quer 0.15g	
LF_E3	Stossbelastung vertikal 1.15g	
<b>Beulanalyse</b>		
LF_B1	Kupplungsdruck 800kN + Tara 1g	
LF_B2	Kupplungszug 600kN + Tara 1g	*
<b>Eigenfrequenzanalyse</b>		
LF_EF1		
<b>Post-Buckling Analyse</b>		
LF_PB1		

\*nur für v2 berechnet, da die Optimierungsvarianten keinen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse zeigen

## 4.4 Auswertung

In den folgenden Kapiteln findet die Auswertung der Ausgangsversion v2 statt. Auf eine ausführliche Auswertung wird hier verzichtet, Tabellen mit den vollständigen Ergebnissen befinden sich im Anhang.

#### 4.4.1 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse

Die Plausibilitätsprüfung der Berechnung wird anhand der resultierenden Reaktionskräfte gemacht. Es werden die Soll-Kräfte, die durch Eigengewicht oder durch eine äußere Kraft verursacht werden, mit den Ist-Reaktionskräften verglichen, die für das gesamte Modell berechnet werden.

Der Vergleich zeigt eine maximale Abweichung von 0.11%. Das bestätigt die korrekte Definition der Belastung des Modells. Für weitere Varianten wird auf eine Plausibilitätsprüfung verzichtet, da die Definition der Lastfälle nicht geändert wird.

#### 4.4.2 Statische Lastfälle

Auswertekonzept:

- Auswertung ist auf die Elemente des Bodens beschränkt
- Auswertung einzelner Lastfälle
- Auswertung anhand der maximalen von Mises Spannung, jeweils im Grundmaterial und in den Schweißnähten
- Vorhandene Spannung wird mit der maximal zulässigen Spannung verglichen
- Auslastungsgrad nach der folgenden Formel bestimmt (Sicherheitsfaktor  $S=0$ )

$$U = \frac{|\sigma|}{\sigma_{zul}}$$

$U$  Auslastungsgrad

$\sigma$  Höchstwert der Spannung

$\sigma_{zul}$  Zulässige Spannung

Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse der statischen Analyse und die Auslastung des Grundmaterials und der jeweils höchstbelasteter Schweißnaht der Version v2 dar. Später werden für die Varianten die Ergebnisse nur wörtlich beschrieben.

**Tabelle 11: Ergebnisse der statischen Analyse der Version v2**

Lastfall	Typ	$\sigma_{zul}$ [MPa]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]
LF_1 Tara 1g	$\sigma_M$	192	GM	49	0,26
	$\sigma_M$	104	Y	31	0,30
LF_2 Brutto 1.3g	$\sigma_M$	192	GM	70	0,36
	$\sigma_M$	104	Y	66	0,63
LF_3 KD 800kN + Br.	$\sigma_M$	192	GM	100	0,52
	$\sigma_M$	104	HV	95	0,92
LF_4 KZ 600kN + Br.	$\sigma_M$	192	GM	106	0,55
	$\sigma_M$	104	V	63	0,60
LF_5 Anheben asym.	$\sigma_M$	192	GM	56	0,29
	$\sigma_M$	104	Y	35	0,33
LF_6 Eingleisen sym.	$\sigma_M$	192	GM	57	0,30
	$\sigma_M$	104	F	25	0,24
LF_7 Querkr. Anhebest.	$\sigma_M$	192	GM	62	0,32
	$\sigma_M$	104	Y	79	0,76

Zu der maximalen Auslastung kommt es bei dem Lastfall LF\_3 - Kupplungsdruck 800kN + Tara 1g. Das Element mit dem Auslastungsgrad von 0.92 ist ein Element einer HV-Naht, die das Bodenprofil mit einem Befestigungsblech auf der unteren Seite der Konstruktion verbindet. Bei sonstigen Lastfällen wird die Struktur nicht bemerkenswert ausgelastet.

Die Auswertung der Lochschweißnähte wird separat durchgeführt, da es dafür eine eigene Vorgehensweise gibt (jedes Element separat betrachtet). Die Auslastung liegt bei allen Lastfällen unter 46%. Da die ausführliche Auswertung sehr umfangreich ist, wird darauf im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

❖ Durchbiegung

**Tabelle 12: Maximale Durchbiegung – Vergleich v1 vs v2**

	v1 - GP	v2 - OP	Diff. Abs [mm]	Diff. GP vs OP [%]
Tara 1g	-8,32	-8,74	0,42	5
Brutto 1.3g	-17,20	-18,65	1,45	8
Kupplungsdruck + Brutto	-10,00	-9,46	-0,53	-5

Kupplungszug + Brutto	-15,75	-18,04	2,29	15
--------------------------	--------	--------	------	----

### 4.4.3 Ermüdungsanalyse

Die Analyse basiert auf der Richtlinie DVS 1608. Es werden nur die Schweißverbindungen betrachtet, da sie die kritischen Elemente der Konstruktion darstellen. Ausgegangen wird vom Modell v0, bei dem das Grundmaterial kaum in Hinsicht auf Ermüdung ausgelastet ist. Für die genaue Auswertung führt man ein Screening durch. Als versagensanfällig und somit für die detaillierte Auswertung relevant werden nur die Elemente betrachtet, die mindestens 75% der zulässigen Spannung erreichen. Die Spannungen werden mit einem Sicherheitsfaktor 1.0 für die Zeitfestigkeit bei 10 Millionen Zyklen ausgewertet.

- LF\_E1: Stoßbelastung X +0.15g  
Screening: keine Elemente >75% ausgelastet, keine detaillierte Auswertung notwendig
- LF\_E2: Stoßbelastung Y +0.15g  
Screening: 68 Elemente >75% ausgelastet, 8EL der 030\_FWELD\_QT, Rest Y-Naht
- LF\_E3: Stoßbelastung Z -1.15g  
Screening: keine Elemente >75% ausgelastet, keine detaillierte Auswertung notwendig

Lastfall „Ladungszyklus Tara-Normalzustand 1g“ ist im Lastfall Stoßbelastung Z -1.15g abgedeckt. Lastfälle, die die Geräte-Stoßbelastungen behandeln, werden aufgrund der fehlenden konstruktiven Lösung der Anbindung weggelassen.

**Tabelle 13: Überlastete Elemente LF\_E2**

Komponente	Anzahl El. mit $U \geq 1.0$	Max. $U_{\text{quer}}$
SH_UG_YWELD_025	31	1.21

### 4.4.4 Stabilitätsanalyse

Die Ergebnisse der Beulanalyse zeigen Beulen im Bereich des Kupplungskastens und der Brüstung. Der Boden mit offenen Profilen weist unter den ausgewählten Lastfällen keine



Neigung zum Beulen auf. Da der Boden durch das Beulen nicht betroffen ist, wird hier nicht weiter ausgewertet.

Um die Ergebnisse später vergleichen zu können, befindet sich eine Tabelle mit den vollständigen Ergebnissen im Anhang.

#### 4.4.5 Eigenfrequenzanalyse

Die Eigenfrequenzanalyse liefert die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenformen bis zu einer Frequenz von 30Hz. Die Analyse wird mit dem FE-Modell im Beladezustand Tara (keine Massenanteile durch sitzende oder stehende Passagiere) mit frei-frei Randbedingungen durchgeführt. Die ersten sechs Eigenformen mit Eigenfrequenzen 0Hz sind Starrkörpereigenformen. Auf genauere Analyse der Eigenformen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

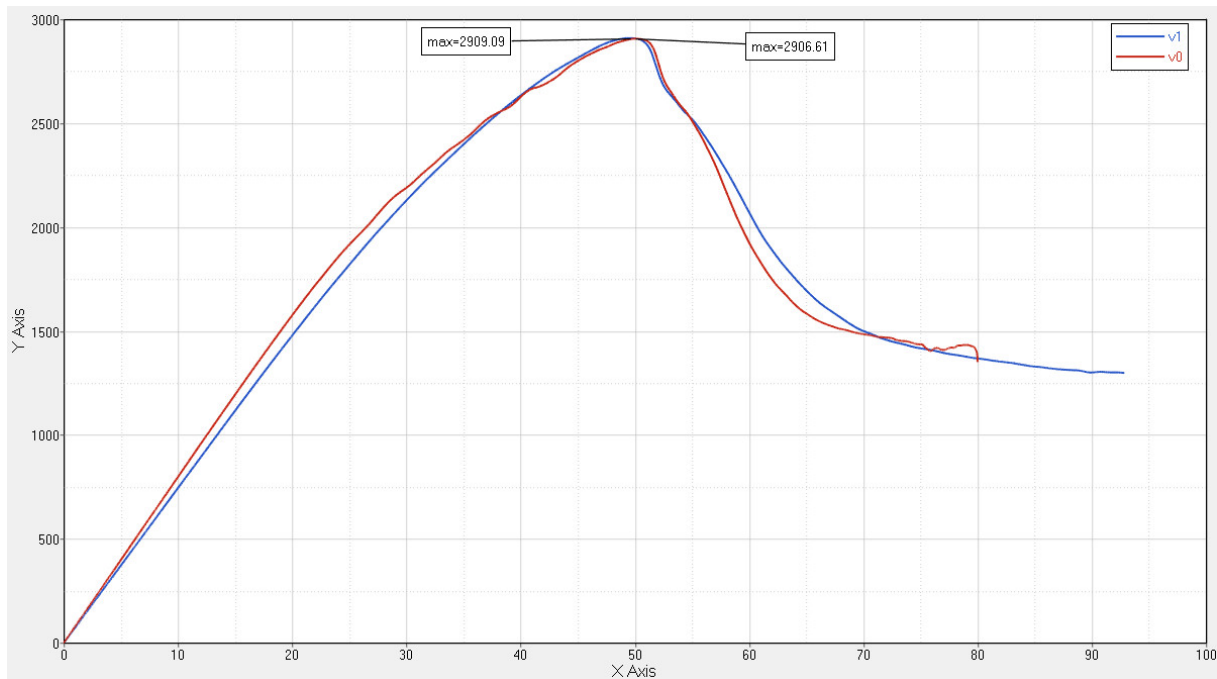
**Tabelle 14: Erste Eigenfrequenzen der Wagenkasten v1 und v2**

v1 - GP		v2 - OP		
Mode	f [Hz]	f [Hz]		Beschreibung der Eigenform
1-6	0.0	0.0		Starrkörpermodi
7	7.5	7.4		1. Biegemode Dach
8	8.7	7.9		1. Torsionsmode Wagenkasten
9	8.9	8.5		1. Biegemode Seitenwand
...	...	...		...

#### 4.4.6 Nachbeulanalyse

Der Wagenkasten wird im Bereich der Drehgestelle vertikal gelagert, eine Lagerung in der Längsrichtung gibt es im Bereich der Kupplung am hinteren Wagenende. Im Bereich der Kupplung vorne wird der Wagenkasten gezwungenerweise verschoben. Es wird ein außergewöhnlicher Drucklastfall auf die Wagenkastenstruktur ausgeübt und die Struktur zum Plastifizieren bzw. zum Kolaps gebracht. Die Beulanalyse hat bereits Stabilitätsverlust bei

1770kN gezeigt, wobei bei der Nachbeulanalyse, die Struktur noch weiter belastet wird (nur Wegabhängige Analyse).



**Abbildung 11: Kraft-Weg Diagramm der Nachbeulanalyse**

Die Reaktionskraft steigt mit der zunehmenden Verschiebung in X-Richtung. Bis ca. 1600kN zeigen beide Kurven lineares Verhalten. Danach wird die Struktur plastisch umgeformt. Nach dem Erreichen des Maximums ist ein deutlicher Einbruch erkennbar.

**Tabelle 15: Maximal erreichte Werte bei der Nachbeulanalyse**

	Maximal erreichte Kraft [kN]	Verschiebung bei F_max [mm]	Absorbierte Energie [kJ]
<b>v1</b>	2906.6	50.03	142.4
<b>v2</b>	2909.1	49.56	141.5

Wie die Grafik sowie die Tabelle zeigen, gibt es zwischen den Versionen mit offenen/geschlossenen Profilen kaum Unterschiede. D.h. die Änderung der Konstruktion hat keine Auswirkung auf das Nachbeulverhalten der gesamten Konstruktion. Die Nachbeulanalyse hat plastische Deformation, bzw. Versagen der Struktur an einer anderen Stelle gezeigt.

#### 4.4.7 Kollisionsanalyse

Die Kollisionsanalyse ist in Anlehnung die Norm DIN EN 15227 definiert. Im Rahmen der Analyse werden folgende Kollisionsszenarien untersucht:

- Szenario 1: Kollision gegen ein identisches Fahrzeug mit 13 km/h
- Szenario 2: Kollision gegen einen Triebzug 9000 mit 14 km/h respektive gegen einen 80 t Güterwagen mit 16 km/h
- Szenario 3: Kollision gegen einen 15 t LKW mit 25 km/h

Die Analyse wird nur mit dem Wagenkasten mit dem Boden mit geschlossenen Profilen – v1 durchgeführt. Ergebnisse der Analyse zeigen, dass der Deformationsweg der Crashmodule nicht voll ausgenutzt wird, d.h. die Crashmodule weisen Reserven auf und der Nachweis der Kollisionssicherheit ist erbracht.

Die nicht-lineare dynamische Crashsimulation wird mit einem explizitem Solver gelöst. Für die Analyse wird ein Zeitinkrement von 0,0035s gewählt.

Da der Modellierungs- und Rechenaufwand sehr hoch ist, wird die Kollisionsanalyse für den Wagenkasten mit Boden mit offenen Profilen – v2, nicht durchgeführt. Die Betrachtung der Kollisionsanalyse der Version v1 hat gezeigt, dass der Boden nicht besonders beansprucht wird und sich daher nicht auf die Kollisionseigenschaften auswirkt.

## 4.5 Zusammenfassung der Ist-Variante

Tabelle 16: Zusammenfassung und Vergleich der durchgeführten Berechnungen der Version v2

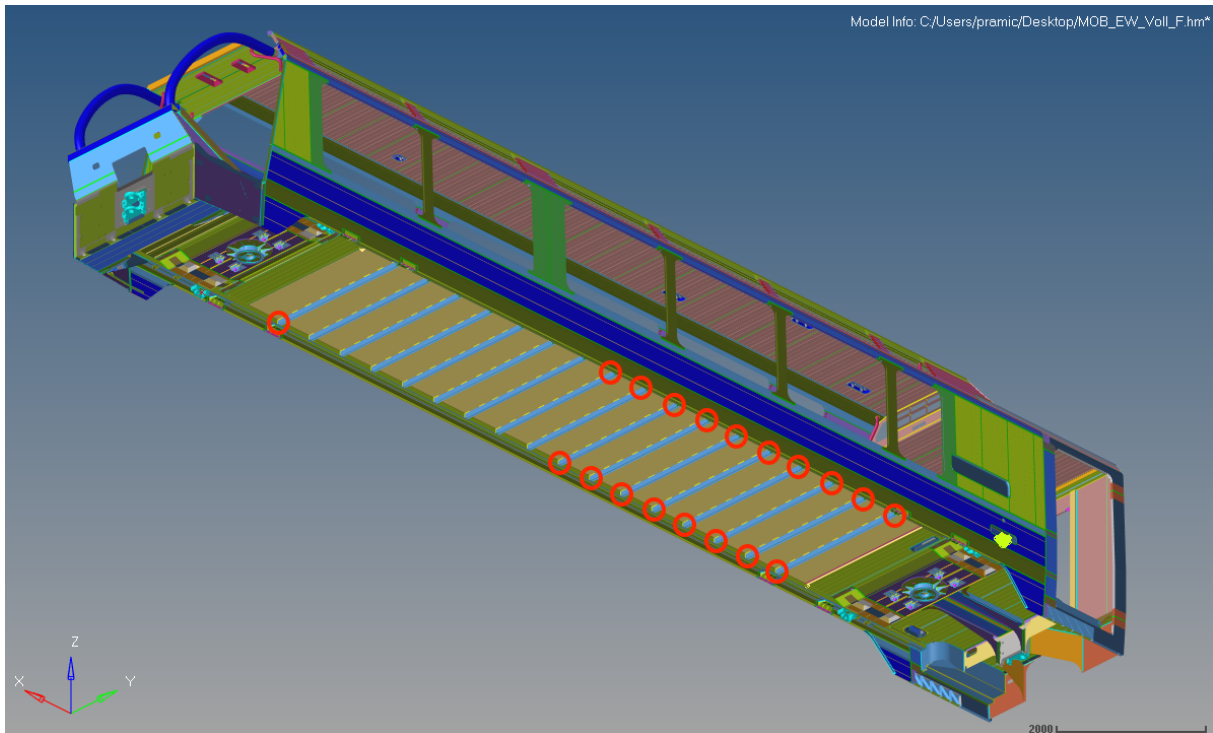
		v1 - GP	v2 - OP
Masse	[kg]	552	412
max. Durchbiegung	[mm]	-17,20	-18,65
Steifigkeit			↓
min. EF	[Hz]	7,50	7,4
min. Beullast	[kN]	1703	1770
Statische Festigkeit			
Beulanalyse			
Nachbeulverhalten			
Eigenfrequenzanalyse			
Ermüdungsfestigkeit			

Die Bauweise mit offenen Profilen zeigt eine deutliche Massereduzierung im Vergleich zu den geschlossenen Profilen. Die reduzierte Masse spiegelt sich jedoch in der Reduktion der Steifigkeit wider, die im Falle des LF\_2 um 8% geringer ist. Dies ist auch an den geringeren Eigenfrequenzen der Konstruktion sichtbar. Obwohl die minimale Beullast ähnlich ist, unterscheiden sich die Beulformen deutlich. Bei der Version v1 tritt Beulen im Bereich der Bodenkonstruktion auf, die Version v2 zeigt Beulen im Bereich des Kupplungskastens. Keine der anderen Beulformen betreffen den Boden.

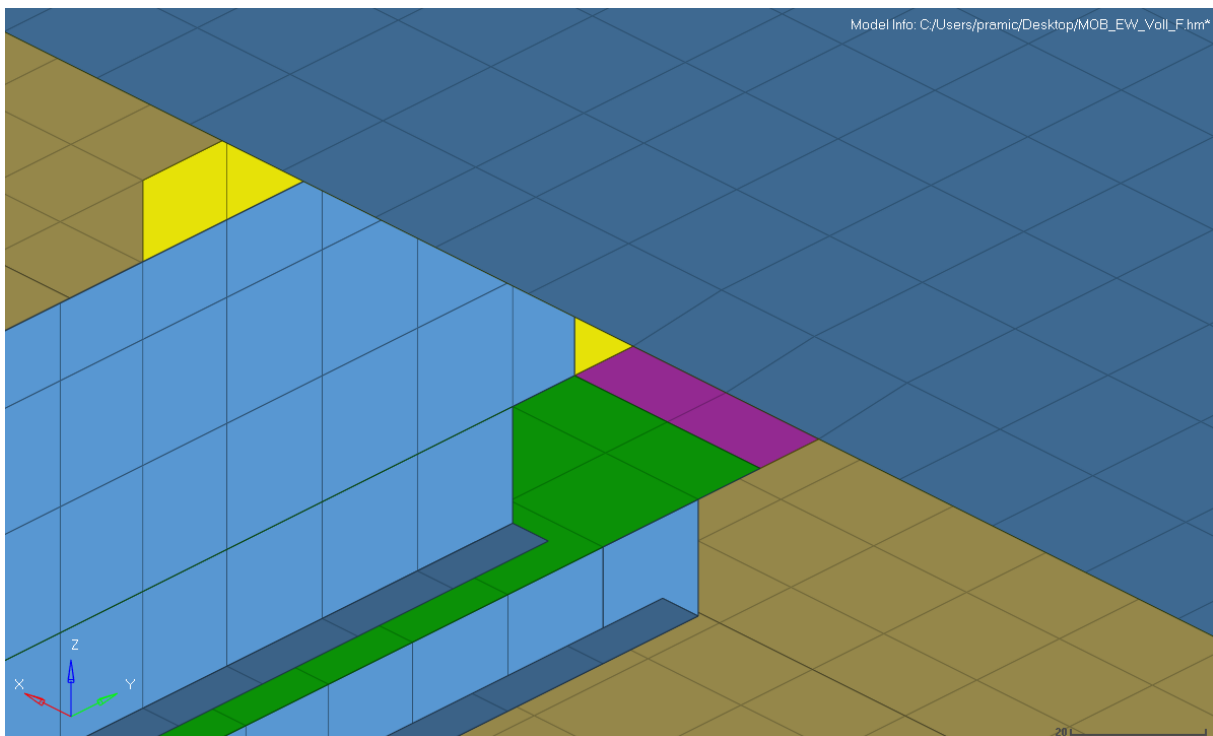
Die Ermüdungsanalyse zeigt eine überlastete Y-Naht zwischen dem Querträger und dem Langträger. Die restlichen Analysen haben befriedigende Ergebnisse gezeigt.

Zu beachten ist noch eine hoch ausgelastete ( $U=0.92$ ) HV-Naht zwischen den Bodenprofilen und dem Verstärkungsblech an der Unterseite der Konstruktion.

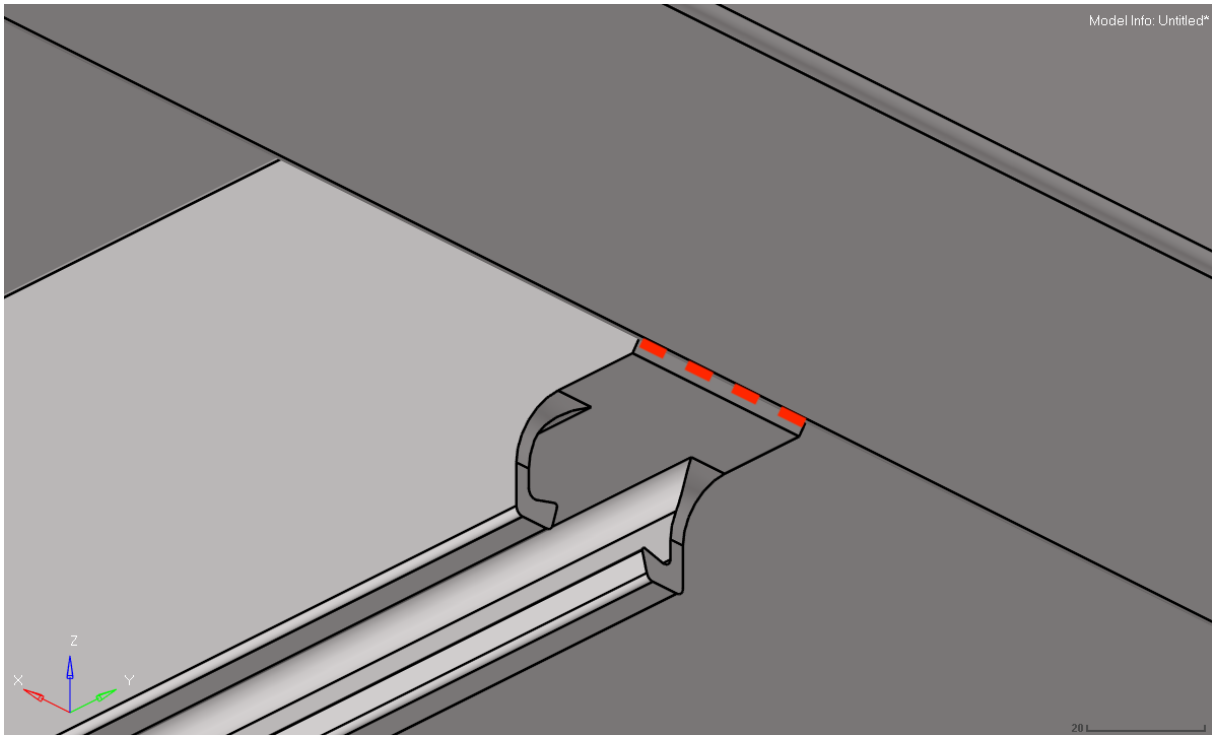
Folgende Abbildungen zeigen die Position der kritischen Y-Naht an der Wagenkastenkonstruktion.



**Abbildung 12: Überlastete Elemente der Y-Naht**



**Abbildung 13: Querträger mit der überlasteten Y-Naht (lila) als FE-Modell**



**Abbildung 14: Position der überlasteten Y-Naht, Darstellung der Geometrie**

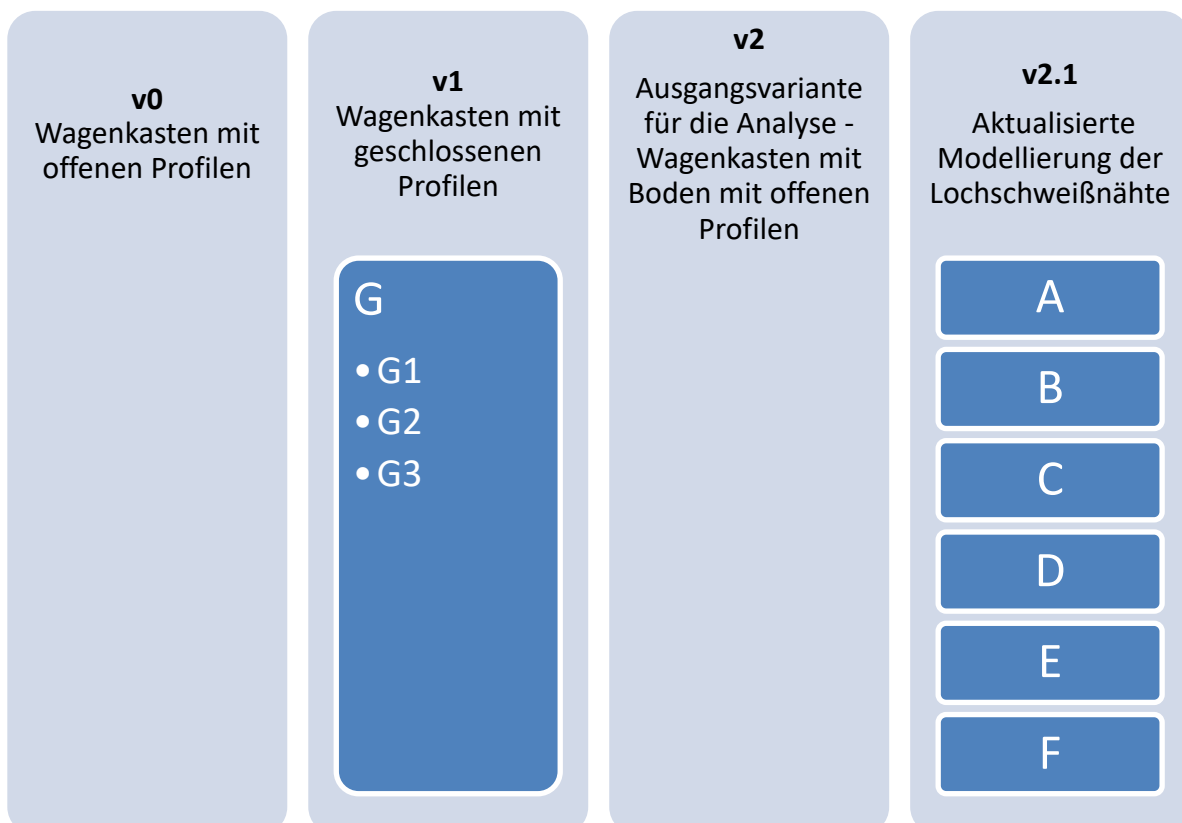
## 5 Optimierung der Bauweise

Die Optimierungsvarianten basieren auf einem im Vergleich zur Version v2 optimierten FE-Modell – Version **v2.1**. Bei diesem Modell wird die Modellierung der Lochschweißnähte nach der bei Stadler üblichen Art durchgeführt. Die Schalenelemente werden durch ein B31 Beam-Element mit einem kreisförmigen Querschnitt ersetzt. Diese Modellierungsweise ist durch Versuche validiert.

### 5.1 Optimierungsvarianten

Als kritische Stelle der Konstruktion hat sich die 2.5mm dicke Y Naht, die die Querträger und die Längsträger verbindet, gezeigt. Die Naht befindet sich auf der Unterseite des Querträgers und ist speziell bei der Querbelastung des Wagenkastens auf Ermüdung versagensanfällig.

Die Optimierungsvarianten A-E sind also so konzipiert, dass die überlastete Schweißnaht den Belastungen standhält. Varianten F und G sind Optimierungen einer Lösung, für die die strukturelle Integrität nachgewiesen wird.

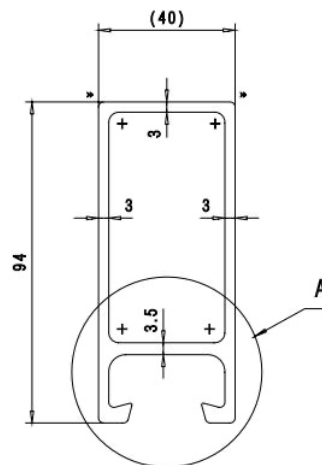


**Abbildung 15: Übersicht der FE-Modell- und Optimierungsvarianten**

### 5.1.1 Variante A – Verdickung des Profils/ der Y-Schweißnaht

Die überlastete 2.5 mm dicke Y-Naht befindet sich auf der unteren waagrechten Seite des Profils. Hier beträgt die Dicke des Profils  $t=3.5$  mm. Die Flankenhöhe ist in diesem Fall  $h=3$  mm, die Steghöhe  $c=0.5$  mm. Normgerecht nach DIN EN 15085-3 wäre die Nahtdicke  $a_R \leq t-c$  also  $a_R \leq 3$  mm. Die stadlerinterne Richtlinie definiert die Nahtdicke konservativer, in diesem Fall als  $a_R=2.5$  mm.

In dieser Optimierungsvariante wird die Wandstärke des unteren waagrechten Teils des Profils von 3.5 mm auf 5 mm erhöht, d.h. der Querträger mit Nahtdicke der Y-Naht  $a_R=4$  mm, wird untersucht.



**Abbildung 16: Profil des Querträgers**

Vorteile:

- Naht ausreichend gegen Ermüdungsversagen ausgelegt
- Geringe Steifigkeitserhöhung
- Keine Komplexitätserhöhung der Konstruktion

Nachteile:

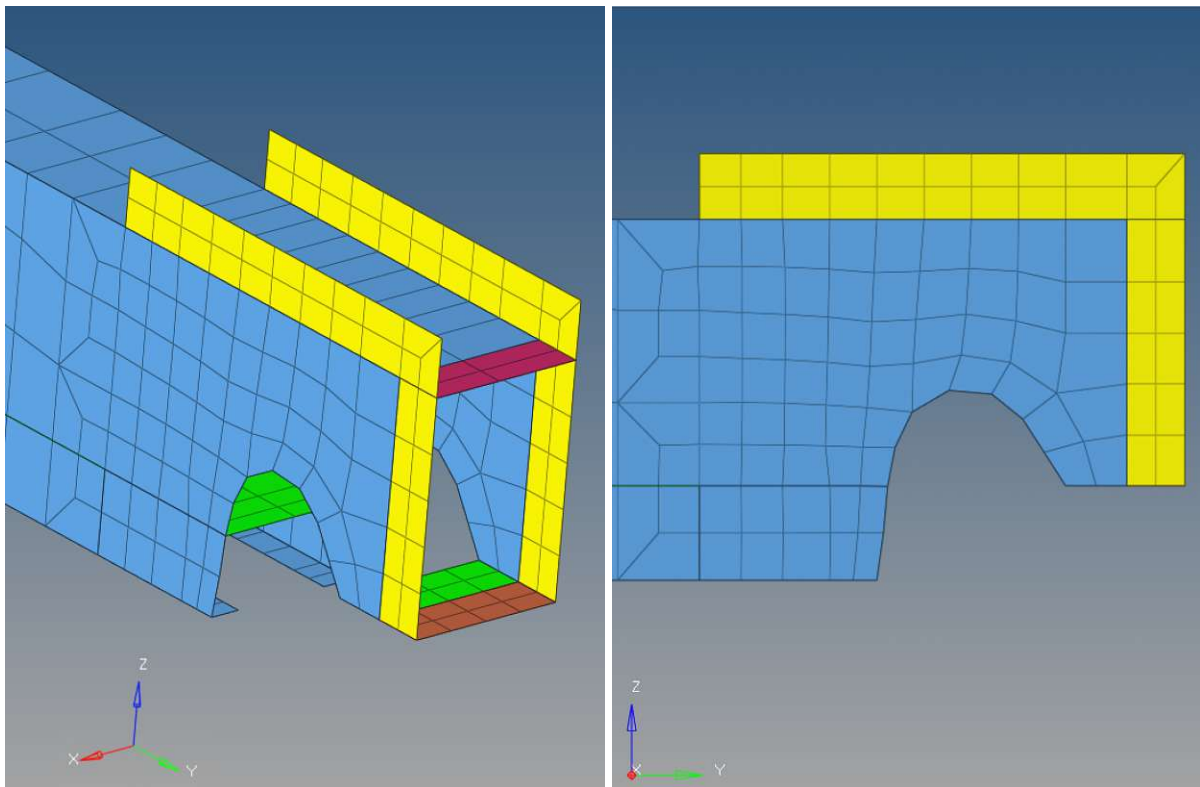
- Gewichtserhöhung (direkt mit Kostenerhöhung verbunden)



### 5.1.2 Variante B – Entlastungskerbe am Querträger

Um die Spannungskonzentration von der versagensanfälligen Schweißnaht in das Grundmaterial zu verschieben, wird am Querträger eine Entlastungskerbe modelliert. Die Auslastung der Y-Naht sinkt. Der Kraftfluss wird teilweise durch die seitliche Kehlnaht übernommen.

Kerbe nur im FE-Programm modelliert.



**Abbildung 17: Entlastungskerbe am Querträger, Variante B**

Vorteile:

- Spannungskonzentration im Grundmaterial – höhere zulässige Spannungswerte als in der Schweißnaht
- Gewichtsreduktion

Nachteile:

- Bearbeitung der Querträger notwendig

- Profil anfällig auf Wasser- und Schmutzeindringung -> Korrosion. Abdichtung notwendig

### 5.1.3 Variante C – Änderung der Nahtart

Die Veränderung der Nahtart stellt eine relativ einfache Lösung dar. Hier bietet sich die Möglichkeit die bestehende Y-Naht ohne Gegenlage durch eine V-Naht (Schweißbadsicherung) zu ersetzen. Eine V-Naht zeichnet sich durch höhere zulässige Werte der Ober- bzw. Unterspannung bei der Ermüdung aus. Der Querträger bleibt dimensionsmäßig unverändert. Es wäre nur eine größere Fase bei der Nahtvorbereitung sowie die Anbringung einer Gegenlage in das Profil notwendig. Die Gegenlage müsste geheftet werden. Abmessungen der Gegenlage, die für die Gewichtsbeurteilung verwendet wird:  $b=34$  mm,  $h=10$  mm,  $l=30$  mm.

Vorteile:

- Nur geringe Änderung des Querträgers notwendig
- Sonst keine Auswirkung auf die gesamte Bodenkonstruktion

Nachteile:

- Anbringung/Befestigung der Gegenlage in das Innere des Querträgers

### 5.1.4 Variante D – Änderung des Querträgerprofils

Die Änderung der Profilbreite würde die Nahtlänge der kritischen Y-Naht erhöhen. Damit wäre die Spannung in der Naht geringer und die Ermüdungsfestigkeit der Naht wäre damit positiv beeinflusst.

Vorteile:

- Größere Nahtlänge
- Erhöhte Festigkeit, Steifigkeit der Bodenkonstruktion

Nachteile:

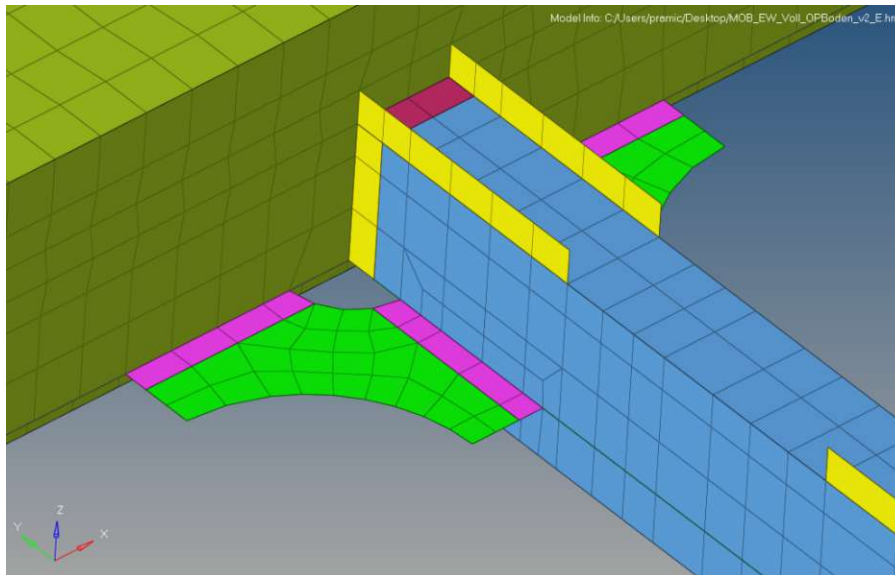
- Notwendigkeit der Herstellung eines neuen Profilquerschnittes

- Deutlich höhere Masse
- Integration der C-Schiene kompliziert / nicht optimal

Da die oben genannten Nachteile, vor allem die Steigerung der Masse, dem Prinzip des Leichtbaus widersprechen, wird diese Lösung nicht weiter untersucht.

### 5.1.5 Variante E – Rippen

Eine Variante, die die überlastete Y-Naht entlastet, ist die Anbringung der Rippen zwischen Quer- und Längsträgern. Die Rippe wird mit der Kantenlänge von 70mm modelliert.



**Abbildung 18: Querträger mit seitlich angeschweißten Rippen – Variante D**

Vorteile:

- Größere Nahtlänge
- Erhöhte Festigkeit und Steifigkeit

Nachteile:

- Widerspricht dem Prinzip der Integralbauweise
- Höhere Masse
- Rippe als Konzentrationsstelle der Verunreinigungen, Feuchtigkeit => Korrosionsgefahr
- Steigerung der Produktionskomplexität

Aufgrund der oben genannten Nachteile, vor allem aufgrund des Widerspruchs mit dem Prinzip der Integralbauweise, wird diese Variante nicht detailliert untersucht. Die Rippen werden nur an einem Querträger modelliert, die Ergebnisse werden bei **einem** statischen und **einem** Ermüdungslastfall verglichen.

### 5.1.6 Variante F – Optimierte offene Profile

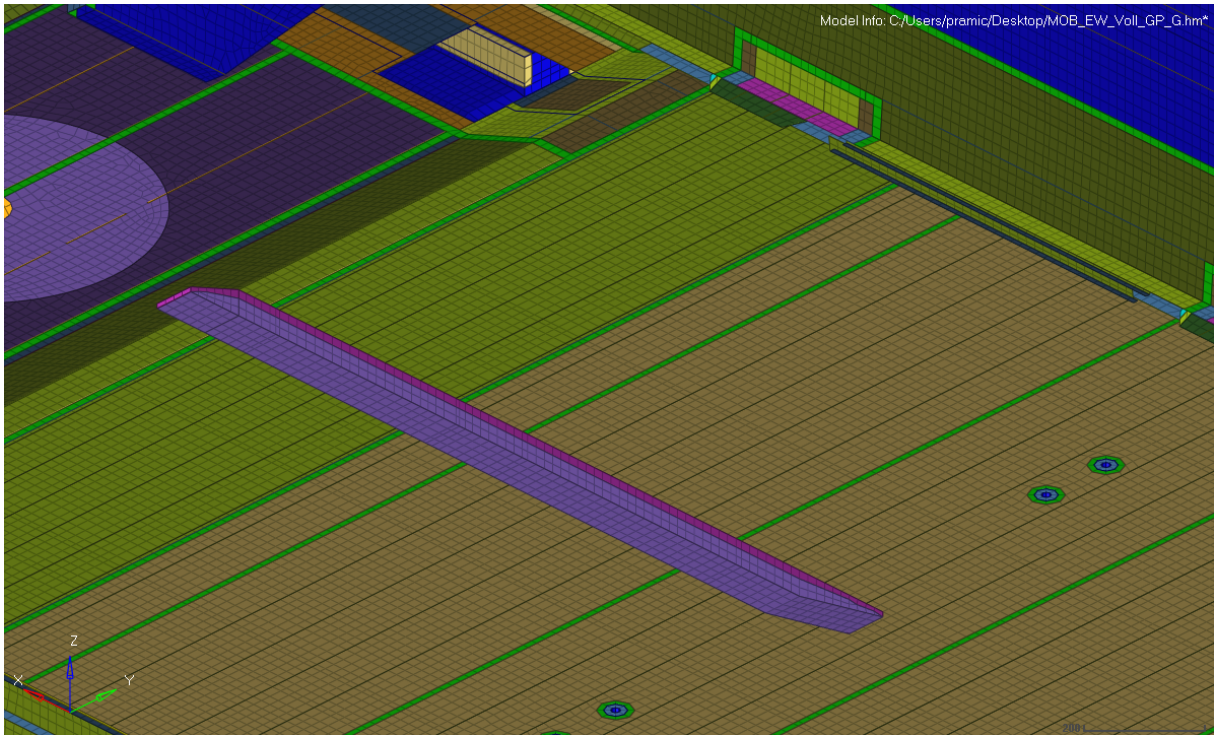
Bei den offenen Profilen kann noch eine Gewichtsersparnis durch die Reduzierung der Wandstärke erzielt werden. Die Variante F ist die Kombination der Variante A – Verdickung des Querträgerprofils/der Y-Naht (Sicherstellung der strukturellen Integrität) und einer Reduktion der Wandstärke der offenen Längsprofile von 3.0mm auf 2.5mm.

### 5.1.7 Variante G – Optimierte geschlossene Profile

Zum Vergleich werden auch Varianten mit geschlossenen Profilen mit einer reduzierten Wandstärke modelliert.

Folgende Varianten werden untersucht:

- G1: eine Variante mit ausgefrästen Taschen auf der Oberseite des Profils
- G2: Variante die die Auswirkung der Einbringung eines Verstärkungsprofils auf der Unterseite des Bodens untersucht.
- G3: Variante mit der Wandstärke von 2.4mm



**Abbildung 19: Verstärkungsprofil auf der Unterseite des Bodens, Variante G2**

## 6 Auswertung – Vergleich der optimierten Varianten

Der folgende Teil der Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich der Optimierungsvarianten mit der Originallösung v2.

Bei der Variante C hat die Änderung der Konstruktion keine relevante Auswirkung auf die globalen Festigkeits-, Schwing- oder Beuleigenschaften, somit wird auf die Berechnung verzichtet.

### 6.1 Übersicht

Variante	Masse		Max. Durchbiegung LF_2 - Brutto 1.3g	Steifigkeit	Max. Auslastung		Min. Beullast [kN]	Min. Eigenfrequenz
		zu v2			GM	Y- Naht		
<b>v1</b>	507,3	↑	17,2		-	-	1703	7,5
<b>v2</b>	<b>371,0</b>		<b>18,6</b>		<b>0,55</b>	<b>0,92</b>	<b>1770</b>	<b>7,4</b>
<b>A</b>	377,2	↗	18,3		0,55	0,60	-	7,4
<b>B</b>	369,6	↘	18,7		0,84	0,28	1769	7,2
<b>C</b>	371,9	↗	-		-	-	-	-
<b>D</b>	384,9	↗	-		-	-	-	-
<b>E</b>	374,8	↗	18,7		-	-	-	-
<b>F</b>	331,8	↓	18,4		0,61	0,60	1779	7,4
<b>G</b>	412,8	↑	18,1		0,47	-	1229	7,5

Die Varianten werden auch nach folgenden Kriterien bewertet:

#### ❖ Herstellbarkeit

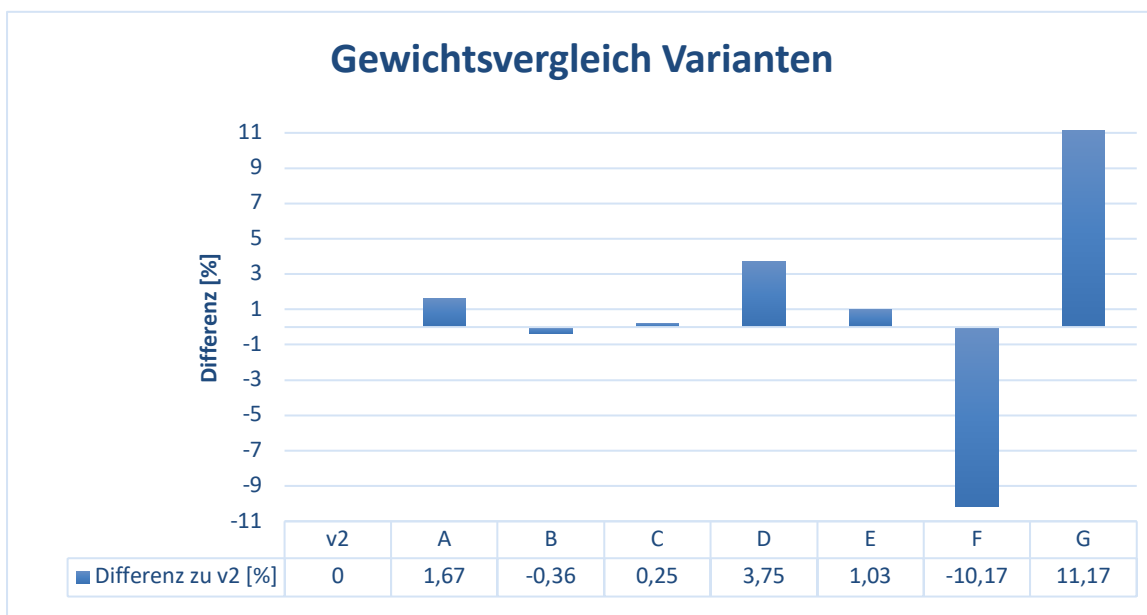
- B: Fräsen der Entlastungskerbe unkompliziert, QT werden sowieso bearbeitet, somit nicht mit viel Kostenaufwand verbunden
- C: Befestigung der inneren Gegenlage könnte sowohl aus der Sicht der Genauigkeit als auch der Befestigungsmethode (Heften) problematisch sein
- E: Notwendigkeit der Anbringung von 4 Rippen pro QT - zeitintensiv
- A, D, F, G – nur neues Profil, sonst unverändert

#### ❖ Schweißbarkeit

- D: Mindestens 4 zusätzliche Schweißnähte pro QT, hoher Aufwand
- F, G: dünnere Profile = dünnere Schweißnähte
- Weitere Varianten unverändert
- ❖ Praxisbezogene Probleme
  - B: Entlastungskerbe müsste abgedichtet werden, um Feuchtigkeits- und Schmutzeindringung zu verhindern
  - E: Hohe Wahrscheinlichkeit der Ablagerung von Schmutz und Feuchtigkeit auf den Rippen => korrosionsanfällig

## 6.2 Gewichtsvergleich der Varianten

Da die Varianten nur im FE-Modell erstellt werden, sind diese nicht mit den Massen, die im Abschnitt „Gewichtspotential“ angeführt werden, direkt vergleichbar. Die Massen im Abschnitt „Gewichtspotenzial“ entsprechen der Realität, da sie auf den CAD Geometrien basieren. Die Massen der Varianten sind nur Näherungen, da sie von einem stark vereinfachten FE-Modell abgeleitet sind.



**Abbildung 20: Gewichtswergleich der Varianten gegenüber v2**

Da die Varianten A bis E nur geringe konstruktive Änderungen darstellen, ist der Masseunterschied im Vergleich zu der Version v1 nur sehr gering. Eine deutliche Massenänderung sieht man bei der Variante F, dank der geringeren Wanddicke der

längslaufenden offenen Profile. Die Variante G, die zwar im Vergleich zu den offenen Profilen um 11% mehr Masse hat, zeigt jedoch bezüglich der ursprünglichen Lösung mit geschlossenen Profilen 18% Gewichtsersparnis.

### 6.3 Vergleich statische Berechnung

Eine vollständige Berechnung und eine Auswertung der statischen Lastfälle werden nur bei den Varianten A, B, F und G durchgeführt. Die Ergebnisse der statischen Berechnung der Variante C können als gleichwertig mit der Variante v2 angenommen werden. Bei den Varianten D und E wird die Berechnung aus Gründen, die im Kap. 4 erwähnt sind, nicht durchgeführt.

Die folgende Tabelle enthält Ergebnisse der statischen Berechnung der Varianten A und B im Vergleich zu der Variante v2 mit dem Fokus auf die kritische Y-Naht. Die Spannungswerte werden immer für ein konkretes Element der Y-Naht ausgewertet, das in der Version v2 höchstbelastet ist. Die Ergebnisse zeigen die Auswirkungen der geänderten Konstruktionen.

**Tabelle 17: Spannungen und Auslastung der Y-Naht, Varianten v2, A und B**

Lastfall	Typ	v2			A			B			
		$\sigma_{zul}$ [MPa]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	$\sigma$ [MPa]	Diff. zu v2	U	$\sigma$ [MPa]	Diff. zu v2	U
LF_1 Tara 1g	$\sigma_v M$	104	Y	31	0,30	25,45	-19	0,24	11,27	-64	0,11
LF_2 Brutto 1.3g	$\sigma_v M$	104	Y	66	0,63	52,79	-20	0,51	24,01	-63	0,23
LF_3 KD 800kN + Br.	$\sigma_v M$	104	Y	39	0,92	31,21	-21	0,30	14,86	-62	0,14
LF_4 KZ 600kN + Br.	$\sigma_v M$	104	Y	62	0,60	50,78	-18	0,49	28,72	-54	0,28
LF_5 Anheben asym.	$\sigma_v M$	104	Y	35	0,33	26,61	-23	0,26	7,96	-77	0,08
LF_6 Eingleisen sym.	$\sigma_v M$	104	Y	22	0,24	8,28	-62	0,08	3,48	-84	0,03
LF_7 Querkr. Anhebest.	$\sigma_v M$	104	Y	79	0,76	62,67	-20	0,60	23,74	-70	0,23

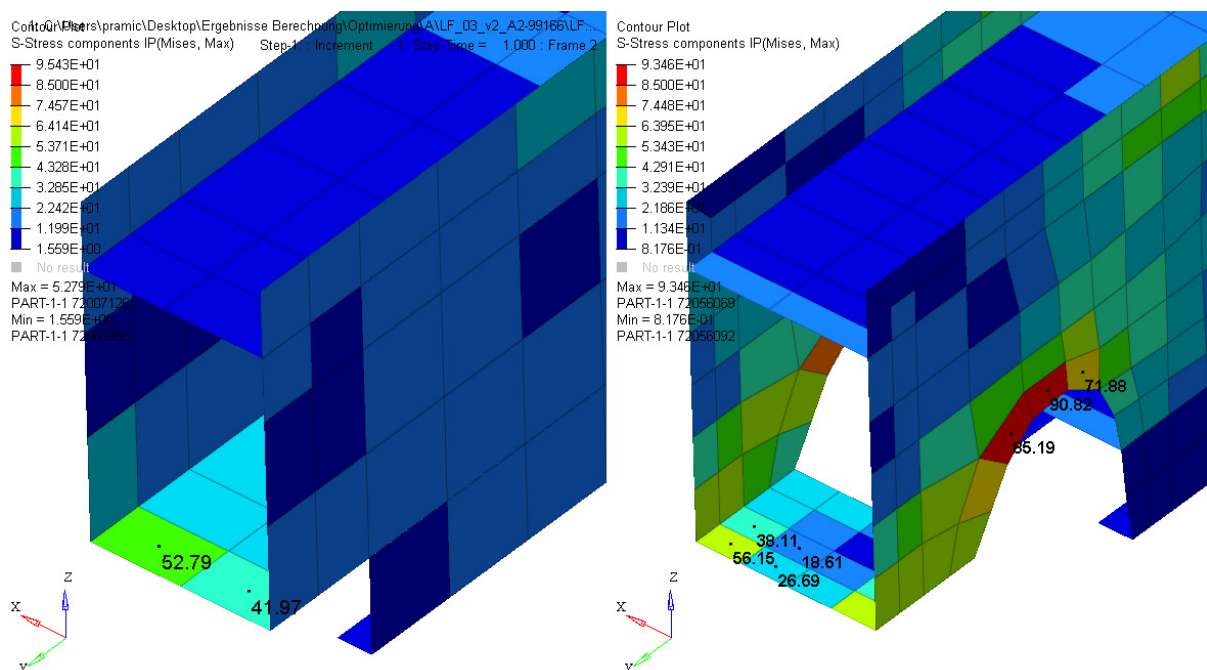
#### ❖ Variante A

Obwohl die statische Festigkeit der Ausgangsvariante v2 ausreichend ist, kann man in der Auswertung der optimierten Variante A eine geringere Auslastung der Y-Naht beobachten. Die geringere Auslastung ist offensichtlich durch die Vergrößerung der Nahtquerschnittsfläche verursacht. Man beobachtet keine Auswirkung auf die Auslastung des Grundmaterials.



❖ Variante B

Die Aufgabe der Entlastungskerbe ist die Spannungskonzentration von der Y-Naht in das Grundmaterial zu verschieben. Die Ergebnisse der statischen Berechnung haben dies bestätigt. Die Auslastung der Y-Naht ist im Schnitt um 67% geringer. Eine Steigerung der Spannung ist in der seitlichen Kehlnaht zu beobachten, dieser Anstieg führt jedoch zu keiner bemerkenswerten Auslastung der Naht. Sichtbar ist auch die erhöhte Spannungskonzentration in der Entlastungskerbe, also im Grundmaterial. Im Lastfall LF\_07 sinkt die Spannung in der Y-Naht um 70% im Vergleich zum Wert der ursprünglichen Konstruktion. Global betrachtet befindet sich die höchste Spannung im Grundmaterial in einer der Entlastungskernen. Lastfall LF\_3 – Kupplungsdruck: eine wesentliche Auslastung von 92% ist bei der HV-Naht am hinteren Ende der Konstruktion zu beobachten. Die maximale Belastung befindet sich an den Stellen, an denen die T-Füßchen der offenen Profile über der Naht befestigt sind. Die Füßchen versteifen den Boden, verhindern die Durchbiegung, an der Verbindungsstelle entsteht eine höhere Spannung.



**Abbildung 21: Effekt der Entlastungskerbe, statische Beanspruchung**

❖ Variante E

Diese Variante wird aus produktionstechnischen Gründen als ungeeignet betrachtet. Sie wird aber trotzdem bei zwei Lastfällen untersucht und ausgewertet. Diese Untersuchung dient

schlicht einer Beurteilung der Auswirkungen auf die strukturelle Integrität. Die Rippen bedeuten eine Verlängerung der horizontalen Nahtlänge, die die Kräfte und Momente übertragen kann. Die Ergebnisse der statischen Analyse zeigen eine Verringerung der Auslastung der Y-Naht um bis zu 41%.

**Tabelle 18: Variante E vs. v2 – Vergleich der Spannungen**

	EL: Y-Naht	Typ	v2	E	diff [%]
LF_2	72007126	$\sigma_{VM}$	65,73	38,32	41,7
	72007127	$\sigma_{VM}$	53,24	36,64	31,2
LF_7	72007130	$\sigma_{VM}$	77,62	48,86	37,1
	72007131	$\sigma_{VM}$	77,83	47,24	39,3

#### ❖ Variante F

Die Variante mit dünneren Bodenprofilen und dementsprechend kleinerer Schweißnahtennfläche der Umfangskehlnaht zeigt generell einen Anstieg der Auslastung. Die maximale Auslastung in der HV-Naht ist von der Änderung nicht betroffen und der Mittelwert der Auslastung liegt bei  $U=0.48$ .

#### ❖ Variante G

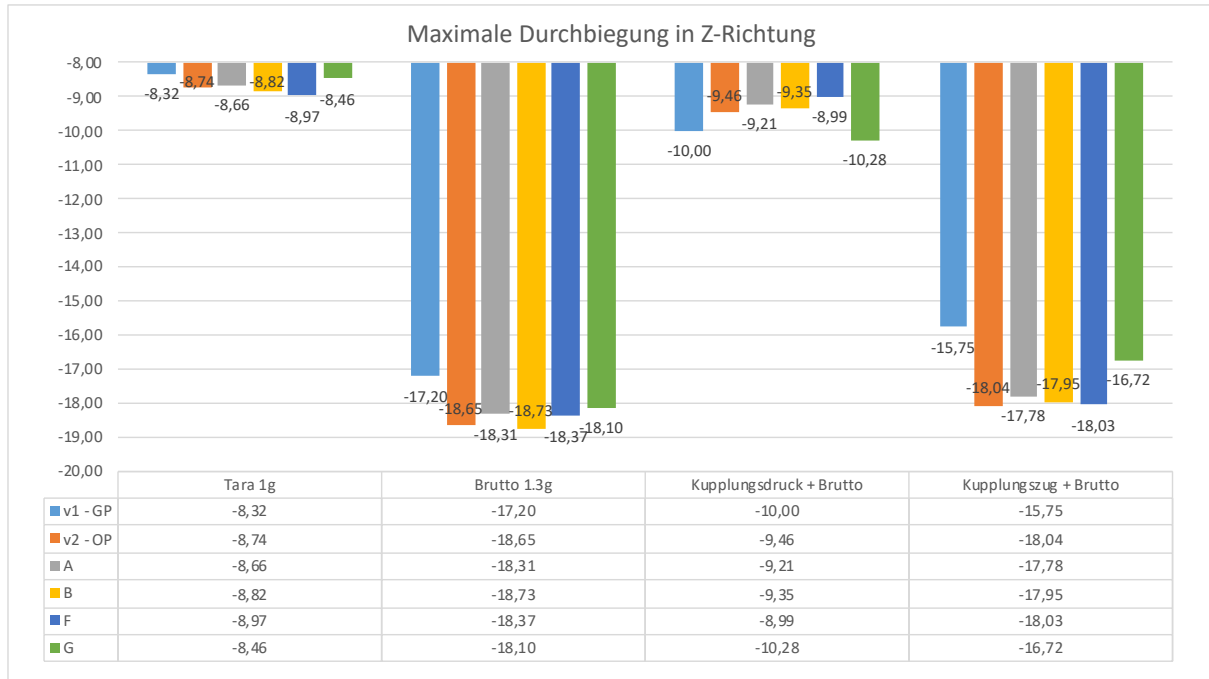
Die Ergebnisse der statischen Berechnung der Variante G mit geschlossenen Profilen sind mit den Varianten mit offenen Profilen nicht direkt vergleichbar. Die Auslastung ist generell niedrig und erreicht im Mittelwert nur  $U=0.34$ . Die maximale Auslastung befindet sich in einer Kehlnaht und beträgt  $U=0.76$ .

## 6.4 Vergleich Steifigkeit

#### ❖ Maximale Durchbiegung

Die Steifigkeit der Konstruktion wird anhand der maximalen Durchbiegung der Bodenkonstruktion in Z-Richtung beurteilt. In allen Fällen, außer im LF\_4, handelt es sich um Änderungen unter 10% im Vergleich zu den geschlossenen Profilen. Beim Lastfall LF\_4, Kupplungszug + Brutto, ist der Unterschied der Steifigkeit am größten, bis zu 15% bei der Variante A.

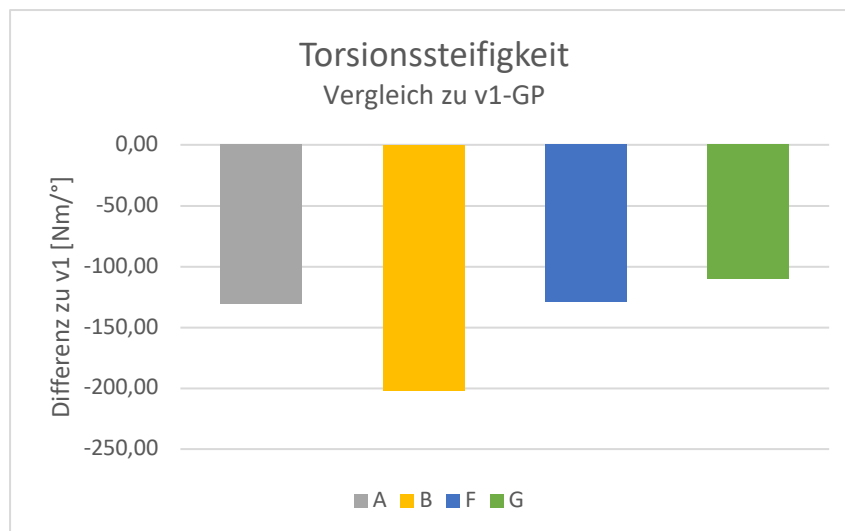
**Tabelle 19: Vergleich maximale Durchbiegung, alle Varianten**



❖ **Torsionssteifigkeit**

Wie die Analyse der Optimierungsvarianten zeigt, wirkt sich der Boden mit offenen Profilen durch eine Senkung der Torsionssteifigkeit der Wagenkastenstruktur aus. Allerdings ist die Senkung nur gering – maximal 0,40% im Vergleich zur Struktur mit geschlossenen Profilen. Diese Senkung stellt keine Risiken dar.

**Tabelle 20: Vergleich der Torsionssteifigkeit**



## 6.5 Vergleich Beulen

Die vollständig untersuchten Varianten A und B stellen keine relevante Änderung der Konstruktion dar, die sich auf das Beulverhalten auswirkt. Die Variante F, bei der die offenen Profile reduzierte Wandstärke haben, zeigt ebenfalls keine beul-relevante Auswirkung. Wie aber die Ergebnisse der Stabilitätsanalysen zeigen, liegt die kritische Beullast der offenen Profile höher als bei den geschlossenen Profilen.

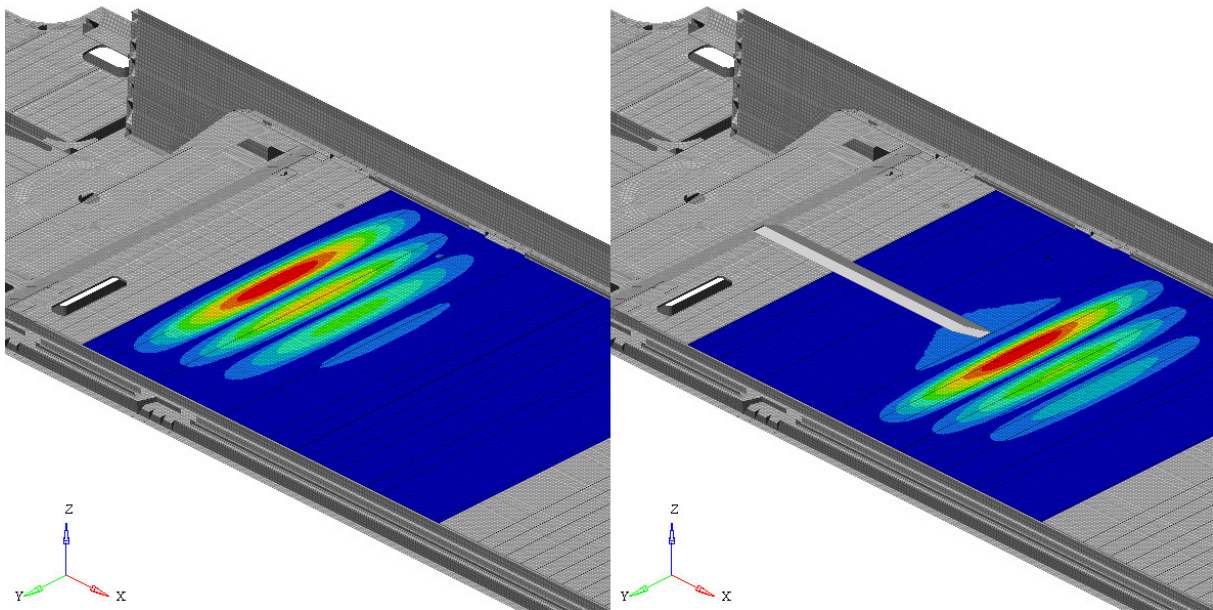
### ❖ Variante G

Bei der Variante G ist das Beulverhalten ein entscheidendes Kriterium für die Wahl der Wandstärke. Bereits die ursprüngliche Variante v1 zeigt Beulen im Bereich der Bodenprofile.

- Die Variante G1 mit ausgefrästen Taschen zeigt auch bei der ursprünglichen Wandstärke von 3.2mm ein unzulässiges Beulverhalten gezeigt. Die Taschen bedeuten eine deutlich geringere Querschnittsfläche, auf die die Druckkraft wirkt. Somit ergibt sich eine kleinere Beullast.
- G2: Die Anbringung eines Verstärkungsprofils auf die Unterseite des Bodens bedeutet eine ausreichende Versteifung, um das Beulen an der ursprünglichen Stelle zu vermeiden. Allerdings, werden die Beulmodi weiter in Richtung Mitte des Wagenkastens verschoben. Die kritische Beullast wird höher, jedoch nicht hoch genug, um die erforderlichen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen.
- G3: Die Wandstärke von 2.4mm ist die dünnste mögliche Wandstärke der geschlossenen Profilen.

1: C:\Users\pramic\Desktop\Ergebnisse Berechnung\Optimierung\G\LF\_B04\_G-102931\LF\_B...  
LF-B04\_09\_Kupplungsdruck\_800kN\_Buckling: : Mode 1: EigenValue = 1.0662 : Frame 2

1: C:\Users\pramic\Desktop\Ergebnisse Berechnung\Optimierung\G\LF\_B04\_G2-103287\LF\_...  
LF-B04\_09\_Kupplungsdruck\_800kN\_Buckling: : Mode 1: EigenValue = 1.1335 : Frame 2



**Abbildung 22: Auswirkung des Verstärkungsprofils auf das Beulverhalten**

## 6.6 Vergleich Ermüdung

Alle Elemente der Y-Naht werden auf Ermüdungsversagen untersucht. In der folgenden Tabelle werden nur die Maximal- und Mittelwerte der Gesamtauslastungen verglichen. Bei der Variante E werden nur die Elemente des dazugehörigen Querträgers in Betracht gezogen und verglichen, bei dem die Rippen modelliert werden. Es handelt sich um 4 Elemente.

**Tabelle 21: Auslastung der Elemente bei der Ermüdungsanalyse**

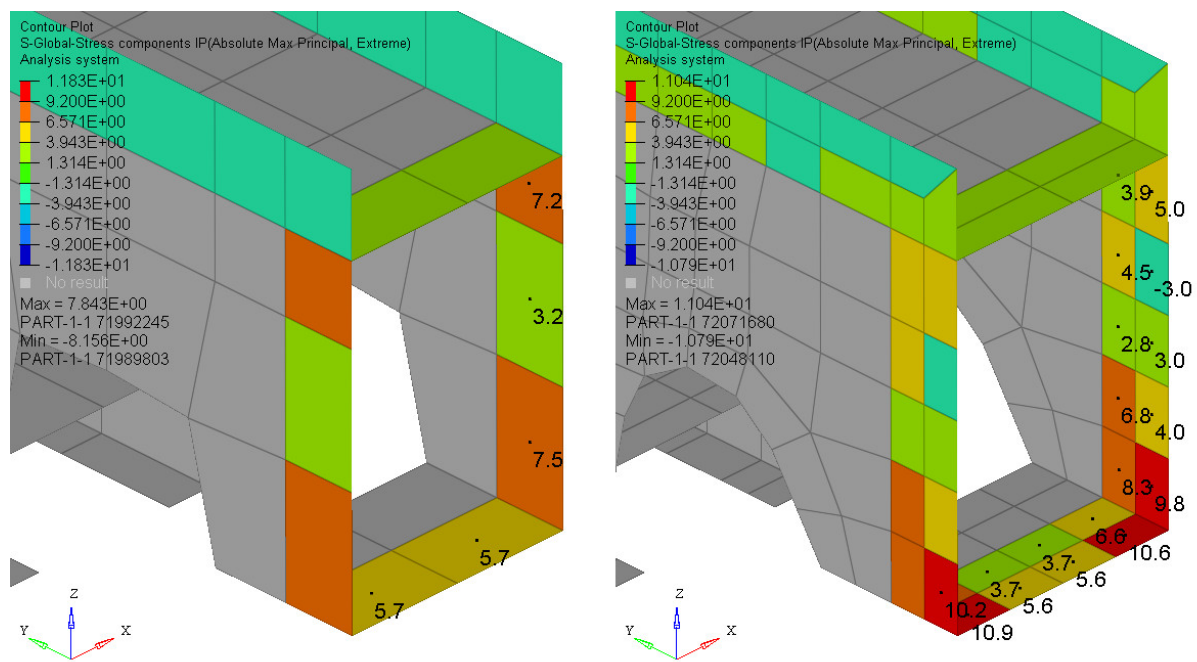
Auslastung U				
Variante	Mittelwert	diff zu v1 [%]	Maximalwert	diff zu v1 [%]
v2	0,73	-	1,14	-
A	0,51	-29	0,88	-23
B	0,19	-74	0,44	-61
C	0,25	-66	0,39	-66
E	0,34	-53	0,51	-55
F	0,58	-20	0,89	-22

Alle Optimierungsvarianten zeigen eine deutliche Senkung der Auslastung der Y-Naht. Die Senkung der Auslastung bei der Variante B ist durch die Entlastungskerbe verursacht. Die

Spannung wird nicht mehr in der Y-Naht, sondern in der Kerbe oder in der seitlichen Kehlnaht konzentriert. Die Variante C zeigt geringere Werte, weil die V-Naht mit Gegenlage eine höhere zulässige Spannungsamplitude aufweist. Bei der Variante F sind die Werte sehr ähnlich wie bei der Variante A.

❖ Variante B

Bei der Variante B wird die Entlastungskerbe grob und fein modelliert. Die grobe Modellierung hat eine global verwendete Elementkantenlänge von 20mm. Für diese Kantenlänge hat der Vergleich mit Versuchen eine gute Übereinstimmung gezeigt. Die feine Modellierung zeigt eine Überlastung der Naht. Allerdings wird die feine Modellierung schon als eine Näherung zum Kerbspannungskonzept laut DVS 1608 betrachtet. Das Kerbspannungskonzept ist mit anderer Modellierungs- und Auswertungsmethodik und zulässigen Werten verbunden. Als relevant werden die Ergebnisse der groben Modellierung angenommen.



**Abbildung 23: Ermüdungsbelastung, Vergleich der Modellierung grob x fein, Variante B**

## 6.7 Zusammenfassung der Berechnungen

- Die Varianten B, C und E zeigen sich als gewichtsneutral, da sie nur eine Änderung bis +/- 1% des ursprünglichen Gewichts verursachen. Am besten ist die Variante F mit der reduzierten Wanddicke der offenen Profile mit -11% Massenreduzierung im Vergleich zur Version v2.
- Bei dem Vergleich der Resultate der statischen Berechnungen zeigen alle Varianten geringe Auslastung, die bei allen Varianten im Mittelwert unter 50% liegt, außer bei der Variante B, wo die durchschnittliche Auslastung bei 52% liegt.
- Die Steifigkeit der geschlossenen Profile ist bis auf den Lastfall LF\_3 Kupplungsdruck höher. Geringere Deformation im Fall des Kupplungsdrucks sind durch eine höhere Steifigkeit der offenen Profile in der Längsrichtung verursacht.
- Die vorherige Aussage wird auch durch die höhere kritische Beullast der offenen Profile gegenüber der geschlossenen bestätigt.
- Alle Varianten werden vor allem mit Rücksicht auf die Ermüdungsfestigkeit der Y-Naht definiert. Bei den optimierten Varianten spielt somit die Ermüdung keine kritische Rolle.
- Wie die Ergebnisse der Variante G zeigen, ist die ursprüngliche Variante v1 mit geschlossenen Profilen überdimensioniert

## 7 Zusammenfassung der Arbeit und Empfehlungen

Bei den heutigen Schienenfahrzeugen sind die Anforderungen an Komfort sehr hoch. Damit verbunden ist u.A. die Integration von Klimageräten, die eine Massesteigerung des Wagens bedingt. Da die Achsenbelastung begrenzt ist, sind die Herausforderungen bezüglich Leichtbau sehr hoch. Deswegen wird hier das Gewichtseinsparpotenzial des Bodens mit offenen Profilen untersucht.

Die strukturelle Nachweisführung für Wagenkasten setzt sich aus folgenden Analysen zusammen: statische Analyse, Modalanalyse und Stabilitätsanalyse gemäß DIN EN 12663-1, Ermüdungsanalyse gemäß DVS 1608, und Kollisionsanalyse gemäß DIN EN 15227. Die Analysen basieren auf einem dreidimensionalen Finite-Elemente Modell. Im Modell sind Bauteile wie Fenster (mit gewisser Masse und Steifigkeit), Geräte (als Massenpunkte), Ausrüstung (wie z.B. Sitze) und die meisten Details, die die Steifigkeit beeinflussen, repräsentiert. Das Wagenkastenmodell wird meistens als Vollmodell konzipiert, da gewisse Unsymmetrien konstruktionsbedingt vorkommen. Die Modellgröße hat ca. 1,3 Mio. Elemente und 8 Mio. Freiheitsgrade.

Es wird ein FE-Modell des Wagenkastens mit Boden mit offenen Profilen erstellt. Dieses Modell wird analysiert. Dabei wird eine Schwachstelle gefunden. Die HY-Schweißnaht, die die Querträger, die als Unterstützung für die offenen Längsprofile dienen, und die Langträger verbindet, hat einen zu hohen Auslastungsgrad.

Bei allen Optimierungsvarianten, mit Ausnahme bei Varianten G1 und G2, wird die strukturelle Integrität nachgewiesen. Bei den Varianten G1 und G2 wird die Sicherheit gegen Beulen nicht nachgewiesen.

In der Optimierung wird in der ersten Linie die strukturelle Integrität angestrebt, erst dann die Gewichtsreduzierung der Konstruktion. Die Optimierungsvarianten A, B, C werden mit Hinsicht auf die minimalen konstruktiven und herstellungstechnischen Änderungen entworfen. Bei den Varianten D und E wird der Effekt der verlängerten Schweißnaht zwischen den Querträgern und Langträgern untersucht, allerdings sind diese Varianten herstellungstechnisch ungeeignet. Bei den Varianten F und G wird durch zahlreiche



Iterationen eine maximal mögliche Gewichtsreduzierung angestrebt. Es zeigt sich, dass die Wandstärkenreduktion sowohl der geschlossenen als auch der offenen Profile noch Potenzial besitzt.

Die Bauweise mit geschlossenen Profilen ist eine bewährte Bauweise, die für das gesamte Spektrum der von der Firma Stadler produzierten Schienenfahrzeuge verwendet wird. Im Vergleich zu den offenen Profilen ist die Konstruktion torsionssteifer. Die offenen Profile wiederum zeigen eine höhere Belastbarkeit in der Längsrichtung, was die Beulanalyse zeigt. Die Konstruktionsvariante mit offenen Profilen zeigt eine höhere Neigung zum Ermüdungsversagen der Schweißnähte, was aber schon durch einfache Konstruktionsänderung beseitigt werden kann. Anhand der durchgeführten Analysen kann also nicht eindeutig gesagt werden, dass eine der Konstruktionsvarianten vorteilhafter wäre. Entscheidender Faktor ist also die Masse der Konstruktionsvariante. Mit den offenen Profilen ist es möglich, gegenüber den geschlossenen Profilen, bis zu 175kg einzusparen, was 20% der Gesamtmasse des Bodens entspricht.

Andere Faktoren die hier nicht untersucht werden, sind die Kosten und Herstellungsmöglichkeiten. Die Herstellung des Bodens mit offenen Profilen ist unter anderem auch wegen fehlender Erfahrung aufwendiger.

Nach der Auswertung aller Varianten ist also die Variante F – verstärkte Querprofile und reduzierte Wandstärke der offenen Profile, zu empfehlen. Diese Variante stellt die leichteste Konstruktion dar, die gleichzeitig noch die normativen Anforderungen erfüllt. Ein Risiko dieser Variante liegt jedoch in der Wandstärke der offenen Profile. Die Wandstärke von 2.0 mm ist problematisch bei der Manipulation wegen der verringerten (Torsions-) Steifigkeit, sowie bei der Herstellung. Als Risiken bei der Herstellung sehe ich z.B. Aufenthalt der Arbeiter im Wagenkasten bei der Installation der Leitungen oder bei der eigenen Komplettierung des Bodens wegen der verringerten Wandstärke der ‚Füsschen‘.

## 8 Anhang

**Tabelle A 1: Auswahl der relevanten Lastfällen, ausführlich**

Gruppe	Lastfälle	Beladezustand	Gewählt	Bezeichnung
<b>01</b> Vertikallastfälle	Tara 1g Brutto 1g Brutto 1.3g	Tara 1g Brutto 1g Brutto 1.3g	Tara 1g Brutto 1.3g	LF_1 LF_2
	Begründung: <ul style="list-style-type: none"> <li>Tara 1g stellt eine gute Basis dar</li> <li>Brutto 1.3g verursacht die höchste vertikale Belastung des Bodens</li> </ul> Risiken: <ul style="list-style-type: none"> <li>Das Auslassen von Brutto 1g stellt kein Risiko dar da die Belastung mit Brutto 1.3g gedeckt wird</li> </ul>			
<b>02</b> Lastfälle auf Kupplungsniveau	Kupplungsdruck 800kN Kupplungszug 600kN Kupplungsdruck 800kN Kupplungszug 600kN	Tara 1g Tara 1g Brutto 1g Brutto 1g	Kupplungszug 800kN + Brutto 1g Kupplungsdruck 600kN + Brutto 1g	LF_3 LF_4
	Begründung: <ul style="list-style-type: none"> <li>Bei Zug als auch Druck ist die Konstruktion beim Bruttobeladezustand mehr beansprucht</li> </ul> Risiken: <ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>			
<b>03</b> Längslastfälle auf anderen Niveaus	Brüstungsdruck xneg 300kN Brüstungsdruck xpos 300kN Dachgurtdruck xneg 150kN Dachgurtdruck xpos 150kN	Tara 1g Tara 1g Tara 1g Tara 1g	keine	
	Begründung: <ul style="list-style-type: none"> <li>Diese Gruppe der Lastfälle stellt keine relevante Beanspruchung des Bodens dar</li> </ul> Risiken: <ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>			
<b>04</b> Anheben/	Anheben symmetrisch, innere/äussere Anhebestellen Anheben asymmetrisch, innere/äussere Anhebestellen	Tara 1.1g Tara 1.1g	Anheben asymmetrisch, innere Anhebestellen hl -10mm	LF_5

<b>Eingleisen</b>	Eingleisen symmetrisch, WE1/WE2, äussere Anhebestellen	Tara 1.1g	Eingleisen symmetrisch, WE1, innen Querkraft Anhebestelle innen vl	LF_6 LF_7
	Eingleisen symmetrisch, WE1, Anhebestellen Front (aussen)	Tara 1.1g		
	Eingleisen symmetrisch, WE1, Anhebestellen Front (innen) Querkraftlastfälle an den Anhebestellen, basierend Anheben	Tara 1.1g Tara 1.1g Tara 1.1g		
Begründung:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lastfälle „Anheben“ (auch asymmetrisch) alle sehr ähnlich, Anheben bei den inneren Anhebestellen verursacht leicht höhere Spannung im Boden</li> <li>Lastfall Eingleisen WE1 innen zeigt erhöhte Spannung in den Lochnähten hinten</li> <li>Querkräfte bei den inneren Anhebestellen verursachen höhere Belastung bei den Querträgern, daher von Bedeutung</li> </ul>				
Risiken:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Belastung des Bodens bei den Lastfällen, wo die Kräfte an den äusseren Anhebestellen eher gering wirken, daher keine Risiken</li> </ul>				
<b>05 Geräte- Stossbelastung</b>	Gerätebefestigungen ±3g in X-Richtung (längs)	Tara 1g	keine	
	Gerätebefestigungen ±1g in Y-Richtung (quer)	Tara 1g		
	Gerätebefestigungen ±2g in Z-Richtung (vertikal)	Tara 1g		
Begründung:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Geräte-Befestigungselemente für den Boden nicht konstruiert bzw. modelliert, daher wäre die Berechnung ungenau</li> </ul>				
Risiken:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Geräte stellen eine bedeutende Masse die am Boden befestigt wird dar und können die Auslastung der Schweißnähte wesentlich beeinflussen</li> </ul>				
<b>06 Drehgestell- Stossbelastung</b>	Drehgestellstoss ±3g in X-Richtung (längs)	Tara 1g	keine	
	Drehgestellstoss ±1g in Y-Richtung (quer)	Tara 1g		
	Begründung:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Belastung durch Drehgestellstoß verursacht keine bemerkenswerte Belastung des Bodens</li> </ul>				
Risiken:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>				
<b>07 Bahnräumerlast</b>	Bahnräumerdruck mittig 120kN	Tara 1g	keine	
	Bahnräumerdruck außermittig 100kN	Tara 1g		
	Bahnräumerdruck mittig 120kN; Detailmodell Bahnräumer (drei Positionen)	Tara 1g		
	Bahnräumerdruck links 100kN; Detailmodell Bahnräumer (drei Positionen)	Tara 1g		
	Bahnräumer «Energieaufnahme»	Tara 1g		
Begründung:				

# STADLER

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Für die Berechnung des Bodens nicht relevant</li> </ul>			
	Risiken:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>			
<b>08</b> Vertikaldämpfer und Wankstabilisatoren	Drehgestell Wankstabilisator	Tara 1g	keine	
	Drehgestell Vertikaldämpfer	Tara 1g		
	Begründung:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine besondere Auswirkung auf die Bodenbelastung</li> </ul>			
	Risiken:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hinsichtlich des Bodens keine</li> </ul>			
<b>09</b> Beulanalysen	Beulen Kupplungsdruck 800kN	Tara 1g	Beulen Kupplungsdruck 800kN + Tara 1g	LF_B1
	Beulen Kupplungszug 600kN	Tara 1g		
	Beulen Kupplungsdruck 800kN Beulen Kupplungszug 600kN	Brutto 1g Brutto 1g		
	Begründung:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterschiede in den Eigenwerten zwischen Tara und Brutto nur sehr gering (einige Zehntel), Beulbereiche gleich</li> </ul>			
	Risiken:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>			
<b>10</b> Sonstiges	Eigenfrequenzen	Tara 1g	Eigenfrequenzen	LF_EF1
	Torsionssteifigkeit		Versagenslastfall	LF_PB1
	Versagenslastfall (Nachbeulverhalten)	Brutto 1g		
	Begründung:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alle Lastfälle relevant</li> </ul>			
	Risiken:			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> </ul>			

**Tabelle A 2: Vollständige Auswertung der statischen Lastfälle, Varianten v2, A, B, F, G**

		v2 - OP				A				B				F				G				
Lastfall	Typ	$\sigma_{zul}$ [MPa]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	Diff. zu v2 [%]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	Diff. zu v2 [%]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	Diff. zu v2 [%]	Naht	$\sigma$ [MPa]	U [1]	Diff. zu v2 [%]	
1	Tara 1g	ovM	192	GM	49	0,26	GM	49	0,26	0	GM	49	0,25	-1	GM	71	0,37	44	GM	27	0,14	-44
		ovM	104	Y	31	0,30	Y	25	0,24	-19	Y	32	0,31	3	Y	26	0,25	-17	V	35	0,34	12
2	Brutto 1.3g	ovM	192	GM	70	0,36	GM	70	0,36	0	GM	93	0,49	34	GM	96	0,50	38	GM	58	0,30	-17
		ovM	104	Y	66	0,63	Y	53	0,51	-20	Y	65	0,62	-1	Y	56	0,54	-15	V	61	0,59	-7
3	KD 800kN + Br.	ovM	192	GM	100	0,52	GM	99	0,52	0	GM	103	0,54	3	GM	106	0,55	7	GM	90	0,47	-9
		ovM	104	HV	95	0,92	HV	96	0,92	0	HV	95	0,92	0	HV	96	0,92	0	F	79	0,76	-17
4	KZ 600kN + Br.	ovM	192	GM	106	0,55	GM	106	0,55	0	GM	107	0,56	0	GM	117	0,61	10	GM	70	0,36	-34
		ovM	104	V	63	0,60	HV	61	0,58	-4	Y	67	0,64	6	HV	61	0,58	-3	V	77	0,74	23
5	Anheben asym.	ovM	192	GM	56	0,29	GM	56	0,29	0	GM	70	0,36	26	GM	80	0,42	45	GM	24	0,12	-58
		ovM	104	Y	35	0,33	Y	28	0,26	-20	F	40	0,38	14	F	28	0,27	-19	V	24	0,23	-31
6	Eingleisen sym.	ovM	192	GM	57	0,30	GM	57	0,30	0	GM	46	0,24	-20	GM	82	0,43	43	GM	36	0,19	-36
		ovM	104	F	25	0,24	F	25	0,24	0	F	30	0,29	20	F	28	0,27	10	F	33	0,32	31

7	Querkr. Anhebest.	ovM	192	GM	62	0,32	GM	57	0,30	-9	GM	162	0,84	159	GM	81	0,42	31	GM	14	0,07	-77
		ovM	104	Y	79	0,76	Y	63	0,60	-20	F	89	0,85	13	Y	63	0,60	-20	V	7	0,07	-91

		v1 - GP		v2 - OP		A				B				F				G		
Lastfall		v_z [mm]	v_z [mm]	Diff. zu GP [mm]	Diff. zu GP [%]	v_z [mm]	Diff. zu GP [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]
1	Tara 1g	-8,32	-8,74	0,42	5	-8,66	0,34	4	-1	-8,82	0,50	6	1	-8,97	0,65	8	3	-8,46	0,14	2
2	Brutto 1.3g	-17,20	-18,65	1,45	8	-18,31	1,11	6	-2	-18,73	1,53	9	0	-18,37	1,17	7	-1	-18,10	0,90	5
3	KD + Brutto	-10,00	-9,46	-0,53	-5	-9,21	-0,78	-8	-3	-9,35	-0,65	-7	-1	-8,99	-1,00	-10	-5	-10,28	0,29	3
4	KZ + Brutto	-15,75	-18,04	2,29	15	-17,78	2,03	13	-1	-17,95	2,20	14	-1	-18,03	2,28	14	0	-16,72	0,97	6

**Tabelle A 3: Maximale Durchbiegung in Z-Richtung, Varianten A, B, F, G**

		v1 - GP		v2 - OP		A				B				F				G		
Lastfall		v_z [mm]	v_z [mm]	Diff. zu GP [mm]	Diff. zu GP [%]	v_z [mm]	Diff. zu GP [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]	Diff. zu OP [%]	v_z [mm]	Diff. Abs [mm]	Diff. zu GP [%]
1	Tara 1g	-8,32	-8,74	0,42	5	-8,66	0,34	4	-1	-8,82	0,50	6	1	-8,97	0,65	8	3	-8,46	0,14	2
2	Brutto 1.3g	-17,20	-18,65	1,45	8	-18,31	1,11	6	-2	-18,73	1,53	9	0	-18,37	1,17	7	-1	-18,10	0,90	5
3	KD + Brutto	-10,00	-9,46	-0,53	-5	-9,21	-0,78	-8	-3	-9,35	-0,65	-7	-1	-8,99	-1,00	-10	-5	-10,28	0,29	3
4	KZ + Brutto	-15,75	-18,04	2,29	15	-17,78	2,03	13	-1	-17,95	2,20	14	-1	-18,03	2,28	14	0	-16,72	0,97	6

**STADLER**