



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



## Diplomarbeit

# Festigkeitsbeurteilung des Wagenkastens der U-Bahn Wien

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

**Michael Mantl, BSc**

Mat.Nr.: 01325503

unter der Leitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinz Pettermann  
Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, E317

Wien, November 2022



Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der  
Prüfungskommission berechtigt bin.

### *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.

Wien, am 17. November 2022

---

Michael Mantl, BSc



# Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinz Pettermann bedanken, welcher mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit unter seiner Leitung am Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der TU Wien zu schreiben. Besonders dankbar bin ich für die gewissenhafte Betreuung, die fachliche Unterstützung sowie für die gestalterischen Ratschläge dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich die Festigkeitsberechnungsabteilung der Firma Siemens Mobility Austria GmbH in Wien hervorheben, durch welche ich die Chance der Bearbeitung dieser Arbeit bekommen habe. An dieser Stelle möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. Markus Seitzberger meine besondere Wertschätzung ausdrücken, für die Möglichkeit dieser Arbeit und die organisatorische Abwicklung. Im Speziellen möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Robert Nedelik bedanken, welcher mein Interesse für den Schienenfahrzeugbau, unmittelbar beim ersten Kontakt als Ferialpraktikant geweckt und mich auch für das Thema der Diplomarbeit begeistert hat. Ich möchte mich für seine Bereitschaft der Betreuung dieser Arbeit sowie die umfangreiche Unterstützung und das bereitwillige Teilen seiner fachlichen Expertise erkenntlich zeigen.

Mein Dank gilt auch all meinen Kollegen, die mir durch zahlreiche Diskussionen und Hilfestellungen bei der Bearbeitung dieser Arbeit geholfen haben.

Weiters möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meinen Eltern Gerlinde und Robert Mantl, welche mir dieses Studium ermöglicht haben und mich immer bedingungslos unterstützen. Meinem Bruder Ing. Thomas Mantl möchte ich ebenfalls für sein immer offenes Ohr und die gute Zusprache im Laufe meines Studiums Beachtung schenken.

Ein großes Danke gebührt auch meinen Freunden, auf deren Unterstützung ich immer zählen kann. Durch ihre Gesellschaft und Motivation haben sie einen wesentlichen Beitrag zu meinem Studium und dieser Arbeit beigetragen.

Abschließend möchte ich mein herzlichstes Dankeschön meiner Frau Ing. Julia Mantl aussprechen, für ihre unermüdliche Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit aber insbesondere während meines gesamten Studiums. Durch sie habe ich die notwendige Kraft und Energie erhalten, um meine Ziele nicht aus den Augen zu verlieren.

Mit ihr erscheint nichts unerreichbar.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Kurzfassung</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Problemstellung . . . . .	2
<b>2 Auslegung eines Schienenfahrzeugs</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Betriebsfestigkeit . . . . .	5
2.1.1 Allgemeines . . . . .	5
2.1.2 Lastermittlung . . . . .	8
2.2 Spannungskonzepte . . . . .	11
2.2.1 Nennspannungskonzept . . . . .	12
2.2.2 Strukturspannungskonzept . . . . .	13
2.2.3 Kerbspannungskonzept . . . . .	14
2.2.4 Kerbfallkatalog - Anwendung von Nenn- und Strukturspannungskonzept . . . . .	15
2.3 Normen . . . . .	16
2.3.1 DIN EN 12663-1 . . . . .	18
2.3.1.1 Statische Auslegungslastfälle . . . . .	20
2.3.1.2 Auslegungsermüdungslastfälle . . . . .	21
2.3.2 VDV 152 . . . . .	22
2.3.2.1 Statische Auslegungslastfälle . . . . .	23
2.3.2.2 Auslegungsermüdungslastfälle . . . . .	23
2.3.3 DVS 1608 . . . . .	24
2.3.3.1 Allgemeines . . . . .	25
2.3.3.2 Nachweis der statischen Festigkeit . . . . .	26

2.3.3.3	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit . . . . .	27
2.4	Normungs-Historie . . . . .	33
2.4.1	VDV 152 (1992) . . . . .	35
2.4.2	DVS 1608 (1983) . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Modellbildung . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>Festigkeitsberechnungen . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1	Statischer Nachweis der Festigkeit . . . . .	46
4.1.1	Berechnung der statischen Auslastung . . . . .	47
4.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis . . . . .	49
4.2.1	Kerbfalldefinition . . . . .	49
4.2.2	Transformation der Spannungskomponenten . . . . .	50
4.2.3	Ermüdungsbewertung . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Beurteilung des Bewertungsmodells . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1	Nennspannungen versus Strukturspannungen . . . . .	55
5.2	Schalenmodellierung von Strukturdetails . . . . .	57
5.2.1	Variante 1 . . . . .	59
5.2.2	Variante 2 . . . . .	60
5.2.3	Variante 3 . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion . . . . .</b>	<b>63</b>
6.1	Festigkeitsergebnisse . . . . .	63
6.1.1	statische Festigkeit . . . . .	64
6.1.2	Ermüdungsfestigkeit . . . . .	66
6.1.3	Wagenkastensteifigkeit . . . . .	67
6.1.3.1	Deformation . . . . .	68
6.1.3.2	Eigenfrequenzen . . . . .	71
6.2	Konstruktionsdetails . . . . .	73
6.2.1	Bereich - Türsäule, Obergurtverstärkung . . . . .	73
6.2.2	Schiebesitz . . . . .	81
6.2.2.1	Schweißnahtdefinitionen der Schiebesitzmodellierungsvarianten . . . . .	82

---

6.2.2.2	Ermüdungsauslastungsergebnisse der Schiebesitzmodellierungsvarianten . . . . .	86
6.2.2.3	Detailuntersuchung - Variante 1 . . . . .	87
6.3	Ergebnisinterpretationen . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Resümee und Ausblick . . . . .</b>	<b>95</b>
7.1	Resümee . . . . .	95
7.2	Ausblick . . . . .	95
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>98</b>



# Abstract

In the context of this thesis a finite element shell model is created from a historical metro car body, which has already demonstrated its operational strength. Using this model, a strength assessment is carried out according to the current state of the art. For this purpose, the basics of fatigue strength and the design of a metro car body according to the current standards as well as the procedures of strength verification are explained.

The main focus of the strength verification lies on the assessment of construction details for which the verification shows inadmissible utilisations. For this purpose, two construction details have been selected whereby in one documented fatigue cracks occurred during operation. After remediation, no further documented cracks appeared, although this location continues to show an overload in the finite element model. The construction details are used to investigate the level of detail of the simulation model, in relation to the prediction of fatigue strength in service.

The results show that mesh fineness, element order, wall thickness reduction due to the throat size and especially the distance assessment have a significant influence on the calculated utilisation and, depending on the modelling, there are different reserves.

Ultimately, the assessment of any critical weld seam must be carried out by experts. As the explanations presented here show, widely differing results may well be produced depending on the modelling strategy used. Therefore, an unreflective adoption of borderline calculation results must be avoided at all costs.



# Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wird von einem historischen Metro-Wagenkasten ein FE-Schalenmodell erstellt, welcher seine Betriebsfestigkeit bereits demonstriert hat. Anhand dieses Modells wird eine Festigkeitsbeurteilung nach dem heutigen Stand der Technik durchgeführt. Dafür werden die Grundlagen der Betriebsfestigkeit und die Auslegung eines Metro-Wagenkastens nach den aktuellen Normen sowie die Vorgehensweisen der Festigkeitsnachweise erläutert.

Das Hauptaugenmerk des Festigkeitsnachweises liegt auf der Beurteilung von Konstruktionsdetails, für welche der Nachweis unzulässige Auslastungen ergibt. Dafür sind zwei Konstruktionsdetails ausgewählt worden, wo bei einem im Laufe des Betriebs ein dokumentierter Ermüdungsriss auftrat. Nach der Sanierung tauchte kein weiterer dokumentierter Riss auf, wobei diese Stelle im FE-Modell weiterhin eine Überlastung aufweist. Anhand der Konstruktionsdetails wird der Detaillierungsgrad des Simulationsmodells, in Bezug auf die Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit im Fahrbetrieb, untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass Netzfeinheit, Element-Ordnung, Wandstärkenreduzierung aufgrund des  $a$ -Maßes sowie insbesondere die Abstandsbewertung einen wesentlichen Einfluss auf die errechneten Auslastungen haben und, je nach Modellierung, Reserven vorhanden sind.

Letztendlich muss die Beurteilung jeder kritischen Schweißnaht durch die Fachleute erfolgen. Wie die hier dargestellten Ausführungen zeigen, können je nach verwendeter Modellierungsstrategie durchaus stark unterschiedliche Ergebnisse erzeugt werden. Daher ist eine unreflektierte Übernahme grenzwertiger Berechnungsergebnisse unbedingt zu vermeiden.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	2D-Zeichnung des Wagekastens . . . . .	1
2.1	Einteilung der Betriebsfestigkeit . . . . .	6
2.2	Exemplarische Darstellung der Wöhler- und Gaßnerlinie . . . . .	8
2.3	Exemplarische Darstellung der geläufigen Schadensakkumulationshypothesen . . . . .	9
2.4	Exemplarische Darstellung des Rainflow-Verfahrens . . . . .	11
2.5	Ermittlung der Strukturspannung . . . . .	14
2.6	Kerbspannungskonzept mit Kerbradien von 1mm am Schweißnahtübergang und -wurzel . . . . .	15
2.7	Schwingversuch einer aufgeschweißten Rippe - Strukturspannungsergebnis	16
2.8	Wagenkastenkoordinatensystem . . . . .	18
2.9	Grafische Darstellung des empfohlenen Auswertepunkts nach DVS 1608 für einen Stumpf- und T-Stoß . . . . .	26
2.10	MKJ- und Haigh-Diagramm für Normalspannungen in Schweißverbindungen	29
2.11	Grafische Darstellung der Mittelspannungsbereiche . . . . .	31
2.12	Längsbeanspruchter T-Stoß; Auszug aus der DVS 1608: Anhang B . . . . .	33
2.13	Querbeanspruchter T-Stoß; Auszug aus der DVS 1608: Anhang B . . . . .	33
2.14	Flussdiagramm der Berechnung aus dem Jahre 1970 . . . . .	34
2.15	Belastungskennlinien für EN AW-7020 aus dem Merkblatt DVS 1608 aus 1983	37
3.1	3D-CAD-Modell . . . . .	40
3.2	Mittelflächenmodell des Metro-Wagenkastens . . . . .	41
3.3	Darstellung aller Lasteinleitssets des Wagenkastens . . . . .	42
3.4	Traceline - Visualisierung der Knotenabfolge . . . . .	43
3.5	FE-Modell des Wagenkastens inklusive Tracelines . . . . .	44
4.1	Flussdiagramm der statischen Festigkeitsberechnung . . . . .	47
4.2	Beispiel einer Kerbfaldefinition anhand eines Stumpfstoßes . . . . .	50
4.3	Methode der kritischen Schnittebenen . . . . .	51
4.4	Flussdiagramm der Ermüdungsfestigkeitsberechnung . . . . .	54
5.1	Grafische Darstellung der verschiedenen möglichen Auswertepunkte . . . . .	56
5.2	Grafische Darstellung - Falsch positionierter Auswertepunkt (falsche Wandstärke) . . . . .	57

5.3	Abstand der Mittelflächen im Modell des Schiebesitzes . . . . .	58
5.4	Darstellung der unterschiedlichen Schiebesitzmodellierungsmethoden . . . . .	61
6.1	Visualisierung der Schweißnähte des Wagenkastens . . . . .	65
6.2	Auslastungsergebnisse - Darstellung der maximalen Auslastungen aller Lastfälle des statischen Festigkeitsnachweises . . . . .	66
6.3	Auslastungsergebnisse - Darstellung der maximalen Auslastungen aller Lastfälle des Ermüdungsfestigkeitsnachweises . . . . .	67
6.4	Vergleich der Biegelinien aus dem Messprotokoll mit dem FE-Modell . . . . .	70
6.5	Eigenfrequenzen des Metro-Wagenkastens . . . . .	72
6.6	Ausschnitt der oberen Türecke mit Ermüdungsrissmarkierung . . . . .	73
6.7	Sanierungslösung der Türecke . . . . .	74
6.8	Konstruktionsdetail mit Sanierungslösung - Türecke inklusive Kerbfalldefinition	75
6.9	Ermüdungsauslastungen - Türecke mit Elementen erster Ordnung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz) . . . . .	76
6.10	Darstellung der Abaqus Elementtypen mit deren Integrationsordnung . . . . .	77
6.11	Türecke mit den schematisch dargestellten Auswertepunkten für die Abstandsbewertung . . . . .	78
6.12	Ermüdungsauslastungen - Türecke mit Elementen erster Ordnung mit Abstandsbewertung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz) . . . . .	79
6.13	Ermüdungsauslastungen - Türecke mit <i>S4R</i> -Elementen (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz) . . . . .	80
6.14	Ermüdungsauslastungen - Türecke mit <i>S4R</i> -Elementen mit Abstandsbewertung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz)	80
6.15	Modellierungsvarianten der Schiebesitze inkl. Wandstärken und Tracelines mit cyan markiert . . . . .	82
6.16	Ausschnitt der Schweißzeichnung des Langträgers . . . . .	83
6.17	Schweißnahtdefinition - Variante 1 . . . . .	84
6.18	Schweißnahtdefinition - Variante 2 . . . . .	84
6.19	Schweißnahtdefinition - Variante 3a . . . . .	85
6.20	Schweißnahtdefinition - Variante 3b . . . . .	86
6.21	Ermüdungsauslastungen - Varianten des Schiebesitzes . . . . .	87
6.22	Schiebesitz Variante 1 mit verschobenen Auswertepunkten . . . . .	88
6.23	Ermüdungsauslastungen - Detailuntersuchung Variante 1 (links: <i>S4</i> -Elemente, Mitte: <i>S4R</i> -Elemente, rechts: <i>S4</i> -Elemente mit Abstandsbewertung) . . . . .	89
6.24	FE-Modell der Schiebesitzvariante 1 einer abgesetzten Kehlnaht . . . . .	90

---

6.25 Ermüdungsauslastungen - Detailuntersuchung Variante 1 mit abgesetzter Kehlnaht (links: mit Wandstärkenreduktion, rechts: ohne Wandstärkenreduktion) . . . . .	91
6.26 Schiebesitzmodellierungsvariante 1 mit abgesetzter Schweißnaht - Querschnitt mit markierter Wandstärkenreduktion und maximalen Auslastung . .	91
6.27 Sicherheitskonzept - Schematische Darstellung der Teilsicherheitsfaktoren .	93



# Tabellenverzeichnis

2.1	Schienenfahrzeugkategorien . . . . .	19
2.2	Statische Lastfälle nach DIN EN 12663-1 . . . . .	20
2.3	Auslegungsmassen nach DIN EN 12663-1[2] . . . . .	20
2.4	Beschleunigungsniveaus mit $10^7$ Zyklen . . . . .	22
2.5	Kombinationen der statischen Auslegungslastfälle . . . . .	23
2.6	Ermüdungsrelevante Betriebslastfälle mit Einstufenkollektiv mit $2 \cdot 10^6$ Zyklen	24
2.7	Vorgeschriebene Werkstoffparameter . . . . .	25
2.8	Kerfalllinienbezeichnung nach DVS 1608 . . . . .	32
6.1	Vergleich der Eigenfrequenzen typischer Metro-Wagenkästen mit der Serie U	71
6.2	Vergleich der maximalen Auslastungen an der markierten Türecke . . . . .	81



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Für die Entwicklung heutiger U-Bahn-Züge gibt es detaillierte Normen und Richtlinien, deren Einhaltung die Voraussetzung zur Erteilung der Zulassung ist. Darin sind die zu berücksichtigenden Lastfälle, Lastfallkombinationen für den Fahrzeugbetrieb sowie zulässige Festigkeitswerte festgelegt.

Zur Festigkeitsbeurteilung wird die Finite Elemente Methode verwendet, mit welcher aus 3D CAD-Konstruktionen von Zugstrukturen, wie Drehgestelle oder Wagenkästen, mechanische Simulationsmodelle erstellt werden. Auf diese Modelle werden die Normlasten aufgebracht und die Berechnung durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden mit den zulässigen Festigkeitswerten beurteilt.

Die genannte Vorgehensweise ist seit längerer Zeit Stand der Technik. Diese unterliegt jedoch einer ständigen Weiterentwicklung durch kontinuierliche Erhöhung des Detaillierungsgrades der Simulationsmodelle sowie der Änderung auslegungsrelevanter Normwerte.

Wie sich die genannten Änderungen auf die Konstruktion der Wagenkästen auswirken soll in dieser Arbeit anhand eines "historischen" Metrofahrzeuges untersucht werden.

Der U-Bahn Zug der Serie U wurde in den frühen 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und ab 1972 gebaut. Zur damaligen Zeit wurde die Entwicklung mittels 2D Zeichnungen (siehe Abbildung 1.1) durchgeführt. Die durchgeführte Festigkeitsberechnung beruhte auf vereinfachten analytischen Modellen, welche nur begrenzte Aussagen über lokale Spannungsverhältnisse liefern konnten.

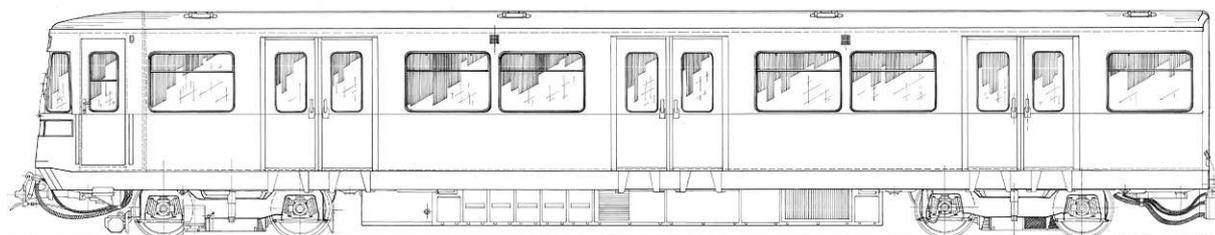


Abbildung 1.1: 2D-Zeichnung des Wagekastens

## 1.2 Problemstellung

Da die Züge der Serie U nun das Ende ihrer Betriebslebensdauer von mehr als 35 Jahren erreicht haben und die Wagenkastenstruktur somit ihre Betriebsfestigkeit demonstriert hat, bietet sich nun die Möglichkeit, eine Konstruktion, die ihre Tauglichkeit über die Einsatzdauer bewiesen hat, nachträglich den aktuellen Auslegungskriterien zu unterwerfen. Damit lässt sich die Realitätsnähe dieser Auslegungskriterien in Kombination mit dem Detaillierungsgrad des Simulationsmodells, in Bezug zur Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit im Fahrbetrieb untersuchen.

Da die Entwicklung der Serie U nicht nach den aktuellen Auslegungskriterien erfolgte, sind verschiedene Konstruktionsdetails, die heute für den Nachweis der Festigkeit notwendig sind, wie etwa Ausrundungsradien an verschiedenen Trägerverbindungen, in diesem Wagen nicht vorhanden. In einigen dokumentierten Fällen mussten Schweißungen wegen Ermüdungsrissen saniert werden.

Daher werden im Zuge dieser Arbeit einige der Modellierungsprinzipien solcher Konstruktionsdetails beurteilt, um Erkenntnisse über die gesamte Bewertungsmethodik gewinnen zu können.

Dafür wurde aus den archivierten 2D Zeichnungen vorab ein 3D CAD-Modell des Wagenkastens erstellt.

Mit Hilfe dieser 3D CAD-Geometrie und den 2D Zeichnungen soll ein Finite Element Simulationsmodell erstellt werden. Dieses Modell soll dem aktuell üblichen Detaillierungsgrad, im Bezug auf die Netzfeinheit, entsprechen. Bei der Netzerstellung sollen an einigen Konstruktionsdetails verschiedene Varianten der Modellierung verwendet werden. Dazu zählen etwa Blechüberlappungen oder Wandstärkensprünge. Ziel der Arbeit ist einen Festigkeitsnachweis für statische Höchstlasten sowie den Ermüdungsfestigkeitsnachweis zu führen. Das Hauptaugenmerk des Festigkeitsnachweises soll auf der Beurteilung von Konstruktionsdetails liegen, für welche der Nachweis unzulässige Auslastungen ergibt. Das gilt im Besonderen für die Schweißnahtbewertung, welche mit den bei *Siemens* eingesetzten Verfahren erfolgen soll.

Die Interpretation der Ergebnisse sollte Rückschlüsse auf die Vorhersagegenauigkeit der aktuellen Simulationsmethodik geben. Die Arbeit soll auch Aussagen darüber liefern, ob der heute verwendete/geforderte Detaillierungsgrad bei der Erstellung von Simulationsmodellen eventuell dazu führt, dass rechentechnisch kritischer bewertet wird als es der Realität

entspricht und damit Wagenkästen unnötig konservativ ausgelegt werden.



## 2 Auslegung eines Schienenfahrzeugs

Um heute eine Zulassung für ein Schienenfahrzeug zu erhalten, müssen eine Vielzahl von Normen und Richtlinien im Laufe der Entwicklung berücksichtigt werden. Jede zu beachtende Norm oder Richtlinie deckt einen anderen Aspekt der Auslegung ab. Diese Arbeit beschränkt sich auf jene Werke, welche für die Festigkeitsnachweise von Schienenfahrzeugen in Europa und im speziellen im deutschsprachigen Raum erforderlich sind.

Die nachfolgenden Normen enthalten für Schienenfahrzeuge betriebsrelevante Lasten, welche über jahrzehntelange Betriebserfahrung bzw. Langzeituntersuchungen ermittelt wurden. Traditionell wird für die Zulassung eines Schienenfahrzeuges ein Typtest gefordert, bei dem in der Norm definierte Prüflasten aufgebracht werden und an kritischen Stellen die Spannungen gemessen werden. Dieser Typtest war vor der Einführung der Simulation der wesentliche Nachweis der Festigkeit. Ein solcher statischer Test hat natürlich nur geringe Aussagekraft in Bezug auf Ermüdungsfestigkeit. Heute wird jede Fahrzeugkonstruktion vor der Fertigung mittels Finiter Elemente (FE) basierter Simulation auf Ermüdungsfestigkeit mittels Normlasten ausgelegt.

Zur Nachvollziehbarkeit der Entstehung der Normlasten und der Ermüdungsfestigkeitsberechnung, im Abschnitt 4.2, werden die Grundlagen der Betriebsfestigkeit kurz beschrieben. Im Anschluss an die aktuellen Normen wird zusätzlich auf die älteren Versionen der Normen und Richtlinien eingegangen, um die Veränderungen der Anforderungen an die Festigkeit der Wagenkastenstruktur zu erläutern.

### 2.1 Betriebsfestigkeit

#### 2.1.1 Allgemeines

Die Betriebsfestigkeit untersucht die Auswirkungen aller auf eine Struktur wirkenden Belastungen unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften.

Für die betriebsfeste Auslegung und Konstruktion eines Bauteils sind fertigungstechnische und geometrischen Einflüsse und die daraus resultierenden örtliche Beanspruchung zu berücksichtigen. Ziel einer solchen Auslegung ist es die geforderte Lebensdauer, Sicherheit und Zuverlässigkeit zu erreichen.

Die Betriebsfestigkeit lässt sich wie in Abbildung 2.1 dargestellt in die folgenden Belastungen unterteilen. Diese allgemeine Einteilung der im Betrieb auftretenden Belastungen wird

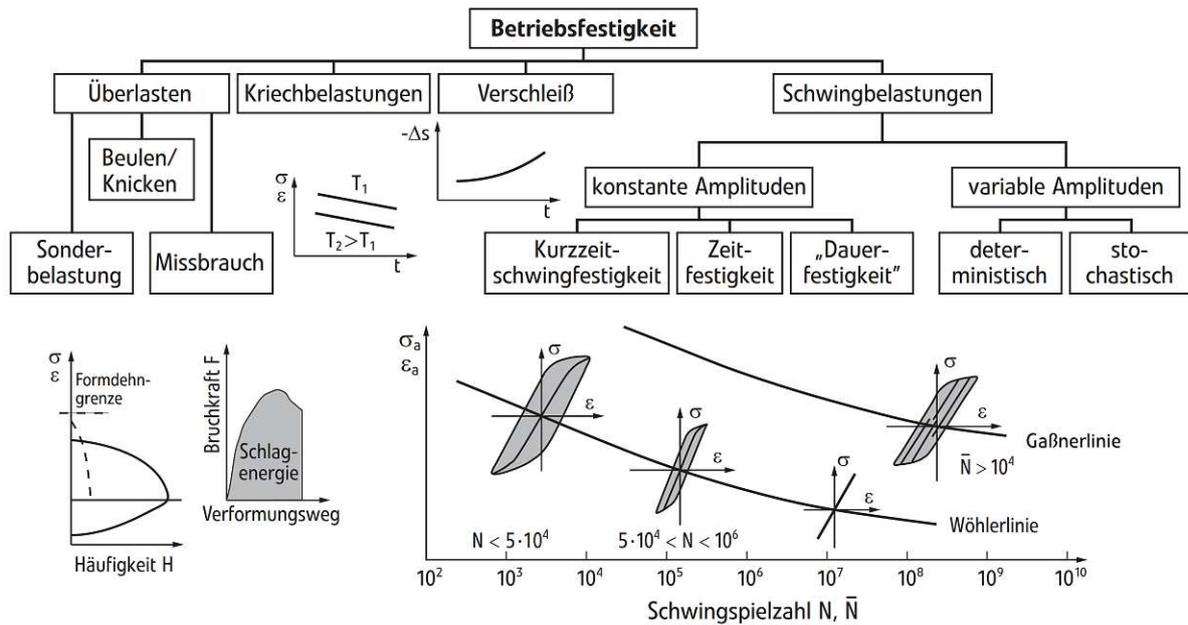


Abbildung 2.1: Einteilung der Betriebsfestigkeit; siehe [9, S. 78]

im Schienenfahrzeugbau in verschiedene Belastungstypen aufgeteilt, welche nach den jeweils relevanten Bemessungskriterien ausgelegt werden. Es wird unterschieden in:

- Crashbelastungen (nach DIN EN 15227)
- Prüflasten (Typtest nach DIN EN 12663)
- Maximale Betriebslasten (nach VDV 152)
- Ermüdungsrelevante Betriebslasten (nach DIN EN 12663 und VDV 152)

Mit der Crashauslegung sind globale Instabilitäten abgedeckt. Lokale Instabilitäten werden durch eine Beulanalyse für jede Prüf- und Betriebslast ermittelt. Kriech- und Verschleißbetrachtungen sind für übliche Wagenkästen (metallische Schweißkonstruktion) nicht relevant.

Der Betriebsfestigkeitsnachweis im engeren Sinn beschäftigt sich also mit der zyklischen Beanspruchung der Struktur. Die zyklische Belastung lässt sich in Belastungen mit einer konstanten oder variablen Amplitude unterteilen. Dabei wird je nach der ertragenen Schwingspielzahl  $N$  bei einem Einstufenversuch und somit mit einer konstanten Belastungsamplitude in die Bereiche der Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit unterschieden und diese anhand der sogenannten Wöhlerlinie dargestellt. Als kurzzeitfest wird jener Bereich

bezeichnet, welcher sich bis zu einer Schwingspielzahl  $N < 5 \cdot 10^4$  erstreckt. Die Zeitfestigkeit wird in der Abbildung 2.1 mit  $5 \cdot 10^4 < N < 10^6$  angegeben. Anschließend folgt die sogenannte Dauerfestigkeit mit  $N > 10^6$ , wobei im Allgemeinen mit einer kontinuierlichen Abnahme der ertragbaren Spannungsamplituden bei größer werdenden Schwingspielzahlen zu rechnen ist. Im Schienenfahrzeugbau ist für die Dauerfestigkeit der Wert  $N > 10^6$  für Stahl- bzw.  $N > 10^7$  für Aluminiumfahrzeuge üblich.

Die meisten in der Realität auftretenden Spannungen haben eine variable Amplitude, entweder stochastischer oder deterministischer Natur. Die Darstellung der ertragbaren gemittelten Spannungsamplituden erfolgt anhand der sogenannten Gaßnerlinie, welche meist für Schwingspielzahlen von  $\bar{N} > 10^4$  ermittelt werden.

Sowohl die Gaßnerlinie als auch die Wöhlerlinie stellen die ertragbaren Belastungen je nach dem Spannungsverhältnis  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  über die Schwingspielzahl  $N$  auf. Abhängig vom Spannungsverhältnis  $R$  ergibt sich zwischen  $R = -\infty$  und  $R = 0$  der Bereich der wechselnden Beanspruchung und für  $R$  zwischen 0 und 1 der Bereich der schwellenden Beanspruchung. Bei  $R = -1$  erhält man eine rein wechselnde, bei  $R = 0$  eine zugschwellende und bei  $R = -\infty$  eine druckschwellende Beanspruchungen.

Das Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen oder Proben wird durch Schwingversuche ermittelt und meistens in Form einer Wöhlerlinie dargestellt.

Für Bauteilversuche werden die jeweiligen Konstruktionsdetails so modifiziert, dass jene Bereiche, die geprüft werden sollen in der Prüfmaschine möglichst ähnlich beansprucht werden wie in der Gesamtstruktur. Die Prüfkörper müssen das Konstruktionsdetail also gut repräsentieren aber auch das Einspannen in die Prüfmaschine ermöglichen.

Die Betriebslasten von Schienenfahrzeugen kommen im Wesentlichen von den Beschleunigungen aus dem Fahrbetrieb und den unterschiedlichen Beladezuständen. Das bedeutet, dass die Lastamplituden innerhalb von Maximal- und Minimalwerten stochastisch auftreten und auch für jeden Punkt der Struktur anders sind. Man muss daher die auftretenden Lasten statistisch erfassen und kollektivieren, wie im nächsten Abschnitt (2.1.2) beschrieben.

Aus diesem Grund sind Gaßnerlinie für die Ermüdungsbewertung von Schienenfahrzeugen nicht gebräuchlich, sondern es wird mit schädigungsäquivalenten Lasten konstanter Amplitude anhand von Wöhlerlinien bewertet.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der Wöhlerlinien-Darstellung und damit einhergehend auch unterschiedliche Formeln für dessen Beschreibung. Weit verbreitet ist die halb

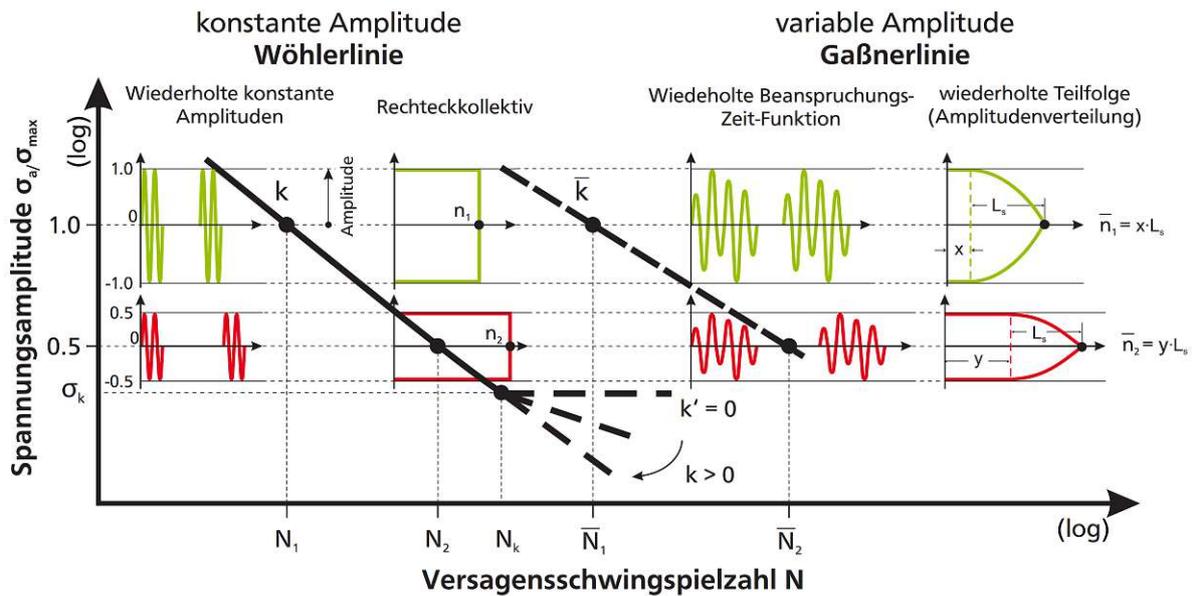


Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung der Wöhler- und Gaßnerlinie; siehe [8, S. 7]

bzw. doppellogarithmische Darstellung, welche exemplarische in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Der Zeitbereich der Wöhlerlinie wird durch die Neigung  $k$  beschrieben und befindet sich vor dem sogenannten Abknickpunkt der sich bei einer Schwingungszahl  $N_k$  und einer ertragbaren Spannungsamplitude  $\sigma_k$ . Je nach verwendeter Schadensakkumulationshypothese kann die Position des Abknickpunktes variieren. Im Falle einer Belastung mit einer konstanten Amplitude  $\sigma_a$  lässt sich mit Hilfe der Steigung  $k$ , der Schwingungszahl am Abknickpunkt  $N_k$  sowie der dortigen Spannungsamplitude  $\sigma_k$  die Versagenschwingungszahl  $N$  im Zeitbereich mit der nachfolgenden Gleichung ermitteln.

$$N = N_k \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_k} \right)^{-k} \quad (2.1)$$

## 2.1.2 Lastermittlung

Die Ermittlung einer Gaßnerlinie ist im Allgemeinen aufgrund der hohen Anzahl von zu testenden Schwingspielen sowie der komplexen Belastung (variable Amplitude) relativ aufwendig. Abhilfe schafft hierbei das bereits erwähnte Konzept einer Schadensakkumulationshypothese, welche eine auf Einstufenkollektive basierende, rechnerische Bewertung der Lebensdauer unter variabler Belastung ermöglicht. Dazu werden Teilschädigungen der jeweiligen Schwingspiele zugeordnet und zu einer Gesamtschädigung über die Lebensdauer aufsummiert. Die einfachste und damit auch am häufigsten angewandte Hypothese

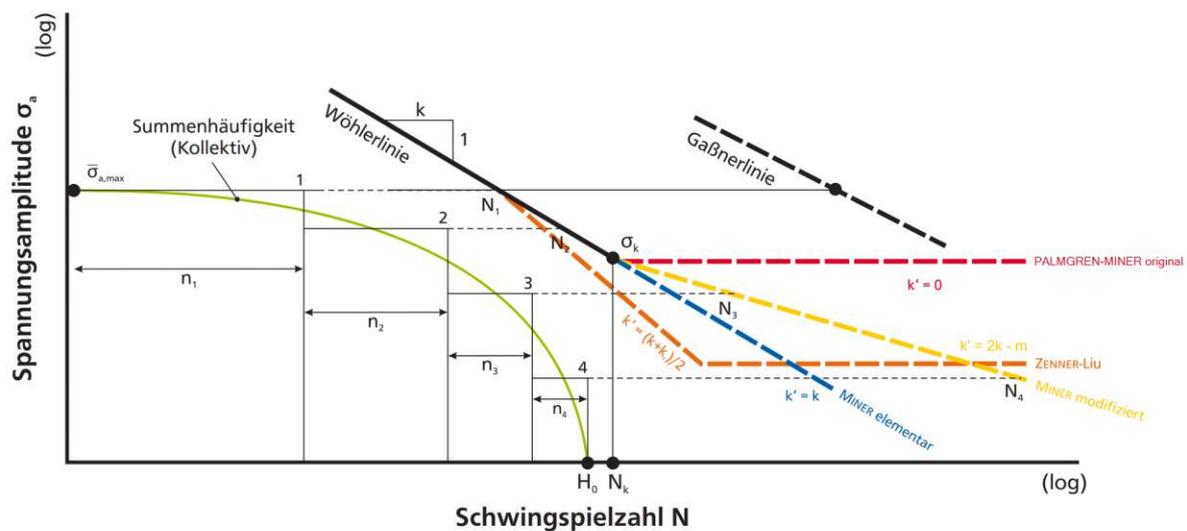


Abbildung 2.3: Exemplarische Darstellung der geläufigen Schadensakkumulationshypothesen; vergl. [8, S. 13]

ist die lineare Schadensakkumulation nach *Palmgren-Miner*. Dabei wird eine Schädigung  $D$  aus der Summe von Teilschädigungen  $\Delta D_i$  eines Schwingenspieles bestimmt oder mit dem Verhältnis aufgebrauchte Schwingungszahl  $n_i$  zu ertragbare Schwingungszahl  $N_i$ . Die Teilschädigungen setzen sich wiederum aus der ertragbaren Schwingungszahl  $N_i$  zur Spannungsamplitude  $\sigma_a$ , basierend auf der Wöhlerlinie zusammen, wie es die nachfolgenden Gleichungen beschreiben.

$$D = \sum_i \Delta D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.2)$$

$$\Delta D_i = \frac{1}{N_i} \quad (2.3)$$

Typischerweise definiert man eine rechnerische Schadenssumme  $D = 1$ . Im Falle eines Überschreitens von  $D \geq 1$  geht man davon aus, dass ein Versagen auftreten kann.

Die gebräuchlichste Schadensakkumulationshypothese von *Palmgren-Miner* (original) ist in der Abbildung 2.3 dargestellt. Zusätzlich werden in der Abbildung weitere gebräuchliche Varianten dieser Hypothese gezeigt.

Die wesentlichen Unterschiede der Hypothesen sind die verschiedenen Steigungen  $k'$  nach dem Abknickpunkt  $\sigma_k$ . Für eine konservative Auslegung kann beispielsweise die Hypothese *Miner-elementar* mit  $k' = k$  verwendet werden. Bei der Verwendung der modifizierten

Hypothese nach *Palmgren-Miner* von *Haibach*<sup>1</sup> wird die Steigung  $k'$  mit  $k' = 2 \cdot k - m$  anhand der Werkstoffeigenschaften bestimmt, wobei  $m = 1$  für duktile und  $m = 2$  für spröde Werkstoffe angewandt wird. Des Weiteren sei hier noch die Hypothese nach *Zenner-Liu* erwähnt, welche bereits die Steigung im Zeitbereich, ab dem Erreichen des Kollektivhöchstwert  $\bar{\sigma}_{a,\max}$ , modifiziert und bei höheren Schwingungszahl mit einer waagrechten Wöhlerlinie endet, sobald  $\sigma_a = \frac{\sigma_k}{2}$  erreicht wird.

Um die anschließend in Abschnitt 2.3 vorgestellten Normlasten zu erhalten, werden sogenannte Betriebsmessungen, anhand von Messfahrten mittels Schienenfahrzeugen oder Mehrkörper-Simulationen (MKS), abgeleitet. In beiden Fällen werden dabei charakteristische Strecken für die jeweilige Fahrzeugkategorien (siehe Tabelle 2.1) abgefahren. In diesem Fall handelt es sich um variable Amplituden, welche von der Struktur oder dem Bauteil ertragen werden müssen und gemessen werden. Anhand von den virtuell bzw. in der Praxis angebrachten Messsensoren, wie beispielsweise Beschleunigungssensoren, werden sogenannte Belastungs-Zeit-Reihen erfasst. Anhand dieser lassen sich mittels statistischer Zählverfahren, wie dem Klassendurchgangs-, Spannenpaar- oder Rainflow-Verfahren, die Bauteilbelastungen eindeutig beschreiben.

Ein in der Praxis häufig eingesetztes Verfahren ist das Rainflow-Verfahren. Dabei erfolgt eine Indikation von geschlossenen Hystereseschleifen, welche sich durch die jeweiligen Umkehrpunkte auszeichnen. Je nach programmtechnischer Umsetzung werden dafür der Ober- oder Unterspannung ( $\sigma_{o/u}$  bzw.  $\sigma_{\max/\min}$ ) oder die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  und Mittelspannung  $\sigma_m$  verwendet und in einer Rainflow-Matrix klassiert. Die Matrix besteht aus der Start- und Zielklasse, welche man an der Ordinate des Belastungs-Zeit-Verlaufs entnehmen kann. Die jeweiligen Matrixelemente kennzeichnen die Anzahl der geschlossenen Hystereseschleifen, welche durchlaufen werden und in der Abbildung 2.4(a) und 2.4(b) in der Matrix, in Form von Zahlenwerten oder farbigen Quadraten, dargestellt werden. Mit Hilfe der Klassierung lässt sich aus den Belastungs-Zeit-Verlauf ein mehrstufiges Belastungskollektiv bilden. Die höchsten Belastungen werden meistens am Anfang des Kollektivs gereiht und die Nachfolgenden weisen oft die geringeren Werte auf, wie es bereits in der Abbildung 2.3 gezeigt wurde. Diese Mehrstufenkollektive wurden anschließend zu einem schädigungsäquivalenten Einstufen-Ersatzkollektiv anhand der jeweiligen Schadensakkumulationshypothese umgeformt. Im Falle der Verwendung der Hypothese nach *Palmgren-*

---

<sup>1</sup>siehe [6]

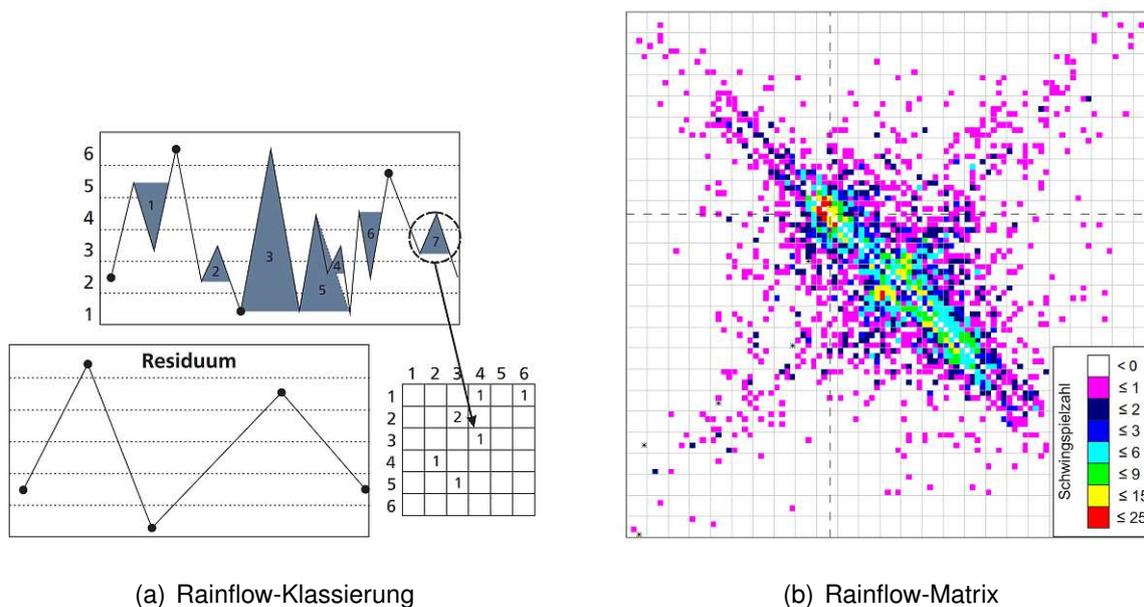


Abbildung 2.4: Exemplarische Darstellung des Rainflow-Verfahrens; siehe [8, S. 14]

*Miner* ergibt sich für eine Normlast, welche in Form einer Beschleunigung angegeben wird (siehe Abschnitt 2.3) zu

$$a_{\ddot{a}qui} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot a_i^k}{N_D} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.4)$$

wobei die Schwingspielzahl  $N_D$  jene von der Norm oder Richtlinie geforderte zu ertragende Schwingspielzahl darstellt (siehe Tabelle 2.4 oder 2.6).

## 2.2 Spannungskonzepte

In der Betriebsfestigkeit erfolgt die rechnerische Bemessung der Bauteile anhand von unterschiedlichen Konzepten. Die für diese Arbeit wesentlichen Bemessungskonzepte werden an dieser Stelle kurz vorgestellt. Es gibt darüber hinaus noch weitere Konzepte, wie beispielsweise das Rissfortschrittskonzept, welches insbesondere dann seine Anwendung findet, wenn das Bauteil von einem zyklischen Risswachstum maßgeblich bestimmt wird oder wenn aufgrund eines Anrisses die Lebensdauer des Bauteils bestimmt werden soll. Da es im Schienenfahrzeugbau aufgrund der dauerfesten Auslegung zu keinen Rissen kommen sollte, findet dieses Konzept nur in Ausnahmefällen seine Anwendung.

Für weitere Konzepte sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur wie [6] verwiesen.

## 2.2.1 Nennspannungskonzept

Das Nennspannungskonzept ist sozusagen das klassische Spannungskonzept, da die sogenannten Nennspannungen auch ohne computergestützte Analyse zu berechnen sind. Normal- und Schubspannungen werden im Nennspannungskonzept immer auf eine Querschnittsfläche mit dem Nennquerschnitt  $A$  bezogen. Die Nennspannung ist der einfachste Spannungszustand, der den Schnittkräften an der entsprechenden Querschnittsfläche am freigeschnittenen mechanischen System entspricht. (Das Freischneiden ist ein Grundprinzip der klassischen Festigkeitslehre.)

Die Normalspannungen  $S_i$  werden unterteilt in jene Normalspannungen aufgrund von Normalkräften  $S_N$  und jene zufolge von Biegemomenten  $S_b$ . Erstere werden anhand von Normalkräften  $F$  bezogen auf den Nennquerschnitt  $A$  mit Gleichung 2.5 ermittelt. Normalspannungen zufolge von Biegemomenten lassen sich mit der Gleichungen 2.6 mittels Biegemoment  $M_b$  bezogen auf das Biegezugwiderstandsmoment  $W_b$  berechnen.

$$S_N = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

$$S_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (2.6)$$

Wie die Normalspannungen lassen sich auch die Schubspannungen  $T_i$  in Schubspannungen zufolge von Querkräften  $T_Q$  bzw. Torsionsmomenten  $T_t$  unterteilen und mit den Gleichungen 2.7 und 2.8 mittels Querkraft  $Q$  bezogen auf den Nennquerschnitt  $A$  und dem Torsionsmoment  $M_t$  bezogen auf das Torsionswiderstandsmoment  $W_t$  ermitteln.

$$T_Q = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

$$T_t = \frac{M_t}{W_t} \quad (2.8)$$

Das Nennspannungskonzept hat den wesentlichen Vorteil der einfachen analytischen Berechnung, allerdings kann die Nennspannung aufgrund des Bezugs auf den Nennquerschnitt (gleichmäßig linear verteilt) erheblich von den tatsächlichen Spannungen des Bauteils unter den einwirkenden Belastungen abweichen. Diese Abweichungen treten insbesondere bei einem nennenswerten Spannungsgradienten (z.B. Steifigkeitssprung) auf. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen wird je nach Bauteilgeometrie eine Formzahl  $\alpha_k$  mit

$\frac{\sigma_{\max}}{S_i}$  bzw.  $\frac{\tau_{\max}}{T_i}$  ermittelt, welche das Verhältnis der lokalen Spannungsspitzen unter Voraussetzung eines elastischen Materialverhaltens zur Nenn- bzw. Schubspannung beschreibt. Für die Ermittlung von zulässigen Nennspannungen müssen folglich Bemessungswöhlerlinienversuche von Bauteilen mit der gleichen Formzahl herangezogen werden.

Im Falle eines gekerbten Bauteils beschreibt die Kerbwirkungszahl  $\beta_k$  die Reduktion der Lebensdauer zur Folge der auftretenden Kerbwirkung. Durch die örtliche Stützwirkung bei einer zyklischen Belastung in Verbindung mit einem kleinen Kerbgrundradius oder einen steilen Spannungsgradienten kann sich die Formzahl von der Kerbwirkungszahl unterscheiden. Für die Bewertung von Schweißnahtverbindungen benötigt man folglich beim Nennspannungskonzept Schwingfestigkeitsdaten eines jeden Konstruktionsdetails. Die immense Vielzahl an möglichen Schweißverbindungen lässt sich durch experimentell ermittelte Schwingfestigkeitskennwerte kaum in einem Kerbfallkataloge abdecken. Leider ist auch eine zweifelsfreie Zuordnung, trotz des Vorhandenseins eines konstruktiven Details im Kerbfallkatalog, nicht immer möglich.

### 2.2.2 Strukturspannungskonzept

Dieses Konzept wird meistens bei der Bewertung von Schweißverbindungen mit Hilfe der Finiten Element Methode angewendet. Das wesentliche Merkmal des Konzepts ist, mit dem FE-Modell die geometrischen Einflüsse abzubilden, welche zu Spannungsüberhöhungen bzw. -gradienten führen können. Die so ermittelten Spannungsverteilungen in der Struktur werden genutzt um auf die Spannungen der Schweißnahtübergangskerbe zu extrapolieren, als sogenannte Hot-Spot-Spannung (siehe Abbildung 2.5).

Der wesentliche Vorteil des Konzepts besteht darin, dass komplexere Strukturen damit bewertet werden können, da die geometrische Komplexität im FE-Modell abgebildet wird und damit die Schweißnahtdetails in eine endliche Anzahl von Kerbdetails reduziert werden. Dafür kann ein sogenannter Kerbfallkatalog erstellt werden, in dem die einzelnen Kerbfälle, das sind die zulässigen Spannungswerte für die jeweiligen Schweißdetails, angegeben werden können.

Für eine detaillierte Bewertung der Schweißnahtkerben (ohne Schweißnahtkatalog) muss das Kerbspannungskonzept angewandt werden.

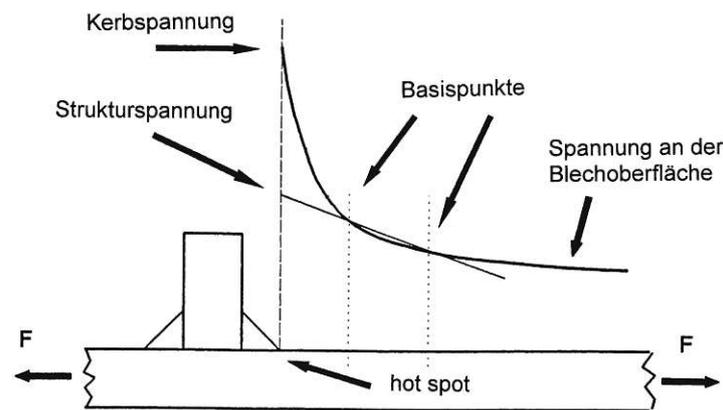


Abbildung 2.5: Ermittlung der Strukturspannung; siehe [6, S. 212]

### 2.2.3 Kerbspannungskonzept

Das Kerbspannungskonzept wird teilweise auch als Kerbgrund- oder örtliches Konzept bezeichnet. Dieses setzt genau wie die vorher beschriebenen Konzepte ein elastisches Materialverhalten voraus. Das ist insofern bemerkenswert, da beim örtlichen Konzept die räumliche Auflösung des Berechnungsmodells so detailliert ist, dass metallurgische Einflüsse des realen Systems keine lokale Isotropie des metallischen Werkstoffes erwarten lassen.

Beim Kerbspannungskonzept werden die Kerbspannungen an den als schwingbruchkritisch erachteten Stellen, wie eben Schweißnähte, mittels Finiten Elemente Methode berechnet. Üblicherweise werden Kerbspannungsdetails nicht direkt im FE-Modell des Wagenkastens abgebildet, sondern als Detailmodell, meist auch nur als 2D-Querschnitt, modelliert. Im Kerbspannungskonzept wird die eigentliche Kerbe im FE-Modell durch einen Ersatzradius am Kerbgrund ersetzt. Somit werden Singularitäten vermieden.

Eine wichtige Voraussetzung für eine Berechnung der Kerbspannungen ist eine hinreichend feine Vernetzung und je nach abzubildender Geometrie, die geeignete Wahl der Elementtypen. Im Falle der Modellierung von Schweißnähten sind sowohl am Nahtübergang sowie an der -wurzel sogenannte Kerbradien zu modellieren, welche von den zu verbindenden Wandstärken abhängig sind.

Den verwendeten Radien sind zulässige lokale Spannungen zugeordnet, welche aus Versuchen abgeleitet wurden. Das wird erreicht indem man Schwingproben in gleicher Modellierung erstellt und mit der ermittelten zulässigen Kraftamplitude belastet.

Kerbradien  $r_{\text{ref}}$  mit 1mm, wie es in der Abbildung 2.6 gezeigt wird, werden bei Wandstärken größer 5mm modelliert. Bei dünnen Wandstärken, wie im Karosseriebau üblich, werden

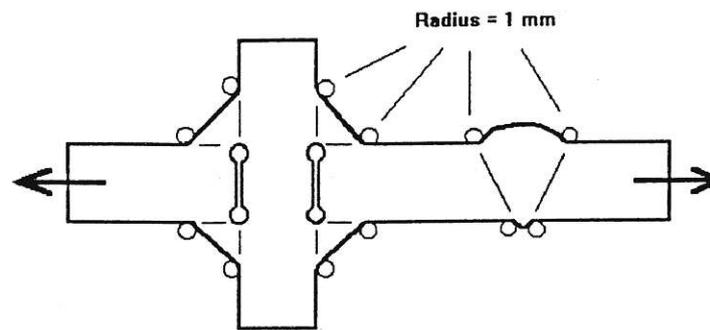


Abbildung 2.6: Kerbspannungskonzept mit Kerbradien von 1 mm am Schweißnahtübergang und -wurzel; siehe [6, S. 220]

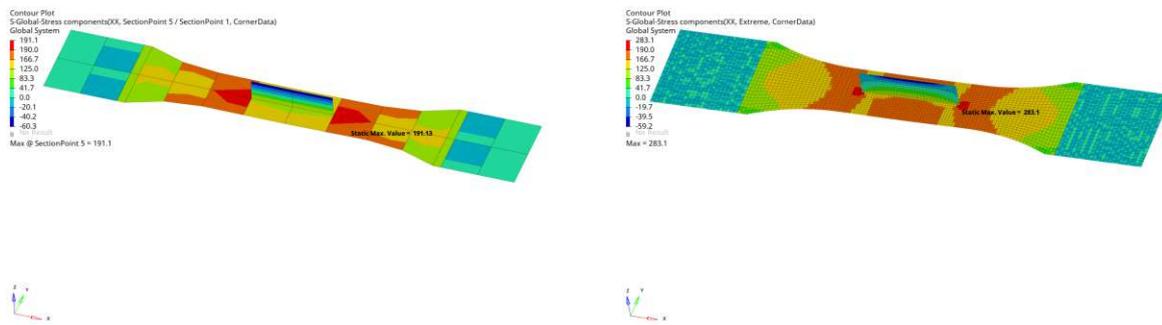
Referenzradien zwischen 0,05 mm und 0,3 mm verwendet. Damit wird der Einfluss der Querschnittsreduktion gering gehalten.

Durch die Modellfeinheit wird das Kerbspannungskonzept nicht direkt im Wagenkastenmodell verwendet. Es kann aber zur Ermittlung von Kerbfallkurven verwendet werden.

## 2.2.4 Kerbfallkatalog - Anwendung von Nenn- und Strukturspannungskonzept

Die Angaben der Kerbfälle in den Kerbfallkatalogen der Normen basieren auf Nennspannungen. Die für die Ermittlung der Kerbfallspannungen verwendeten Proben werden so ausgewertet, dass die ermittelte ertragbare Kraft auf eine Querschnittsfläche bezogen wird. Das ist bei einfachen Geometrien, wie etwa Stumpfstoßen, auch direkt für das Strukturspannungskonzept anwendbar. Bei Geometrien wo etwa Dickensprünge, Überlappungen oder Steifigkeitsänderungen durch aufgeschweißte Teile (z.B.: Rippen) ausgewertet werden müssen, kann die Spannung oft nicht sinnvoll auf eine definierte Querschnittsfläche bezogen werden. Den Strukturspannungen der Finite Elemente Methode liegt die infinitesimale Definition des Spannungstensors zugrunde (diskretisiert in den Elementintegrationspunkten), eine Bezugsfläche für die Spannung ist somit nicht vorhanden.

Es hat sich gezeigt, dass es durchaus plausibel ist, Proben aus Schwingversuchen mit Schalen zu modellieren und somit das Verhältnis Nenn- zu Strukturspannung für den konkreten Fall zu bestimmen. Dafür werden von einem Strukturspannungsdetail, wie etwa eine aufgeschweißte Rippe (siehe Abbildung 2.7) mehrere Schwingproben erzeugt, um eine Wöhlerlinie aufnehmen zu können. Diese Versuchsreihe wird einem Schwingversuch un-



(a) Contourplot - Netzfeinheit entspricht dem Wagenkastenmodell

(b) Contourplot - feines Netz

Abbildung 2.7: Schwingversuch einer aufgeschweißten Rippe - Strukturspannungsergebnis; Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH

terzogen um aus den Versuchsergebnissen eine ertragbare Oberspannung zu ermitteln (siehe auch Abschnitt 2.3.3.1). Diese Oberspannung ist die Nennspannung, ermittelt aus der dazugehörigen Prüfkraft (ertragbare Oberkraft) bezogen auf den Probenquerschnitt.

In einem weiteren Schritt wird von der Probengeometrie ein FE-Modell erstellt, dass von der Elementgröße möglichst dem FE-Netz des Wagenkastens entspricht. In diesem Simulationsmodell wird nun die ermittelte ertragbare Oberkraft aufgebracht und die FE-Strukturspannungen am Anrissort der Proben ermittelt. Für den konkreten Fall (Abbildung 2.7) befindet sich dieser am Scheißnahtbeginn bzw. -ende der Rippe (rechts in der Abbildung). Mit dem dort dargestellten Strukturspannungswert von 192MPa und dem Nennspannungswert aus dem Modell (aufgebrachte Kraft: 15kN, Querschnittsfläche: 90mm<sup>2</sup>) von 167MPa ergibt sich hier ein Verhältnis von 1,15 für das untersuchte Strukturspannungsdetail. Zusätzlich lässt sich an diesem Beispiel (Abbildung 2.7(b)) erkennen, dass die Netzfeinheit einen wesentlichen Einfluss auf die sich ergebenden Strukturspannungswerte haben. Für das bedeutend feinere Netz (charakteristische Elementkantenlänge von rund 1,5mm) ergibt sich eine Spannung am Anrissort von 283MPa, welches wiederum zu einem Verhältnis von 1,7 führt.

## 2.3 Normen

Für einen Nachweis der Wagenkastenfestigkeit und somit einen wesentlichen Punkt in der Zulassung eines Schienenfahrzeuges in Europa, muss die Norm DIN EN 12663-1[2] erfüllt

werden. Die DIN EN 12663-1[2] definiert Mindestanforderungen für die Wagenkastenfestigkeit von Schienenfahrzeugen indem Belastungen festgelegt werden und nennt Prinzipien wie die Validierung der Konstruktion durch eine Berechnung und Prüfung, welche angewendet werden sollen. Zusätzlich wird, insbesondere im deutschsprachigen Raum, die Richtlinie VDV 152[10] berücksichtigt, welche detailliertere Lastannahmen bezüglich der Auslegungslasten für Straßen-, Stadt- und U-Bahnfahrzeugen liefert. Die dort beschriebenen Betriebslasten gehen über jene Lasten der DIN EN 12663-1[2] hinaus. Damit bestimmen die beiden genannten Werke die Lastseite der Festigkeitsnachweise eines Schienenfahrzeugs für metallische Werkstoffe, ohne konkret auf die zu verwendenden zulässigen Festigkeitswerte einzugehen. Die im europäischen Raum gebräuchlichen Richtlinien sind die DVS 1608[4] und DVS 1612. Wobei die erstgenannte Richtlinie für Schienenfahrzeuge aus Aluminium- und die andere für Stahllegierungen heranzuziehen ist. Diese beiden Richtlinien stellen die Widerstandsseite der Festigkeitsberechnung, je nach verwendeten Werkstoff, dar.

Die beiden Richtlinien werden von allen Herstellern von Schienenfahrzeugen für die Basisauslegung der Fahrzeuge genutzt, selbst wenn andere Normen, wie beispielsweise der *British Standard* für die Dokumentation gegenüber dem Kunden erforderlich ist. Die Unterschiede in den Ergebnissen bei der Anwendung unterschiedlicher Normen sind quantitativ, nicht qualitativ. Folglich werden kritische Stellen der Struktur in den gleichen Bereichen gefunden, egal welche Norm angewendet wird. Allein die Höhe der Überschreitung ist unterschiedlich.

Das zeigt das Phänomen auf, dass die Normen für die Lastseite und die Normen für die Widerstandsseite aufeinander abgestimmt sein müssen, um nicht zu geringe oder zu hohe Auslastungen zu errechnen.

Im Schienenfahrzeugbau nach DIN EN 12663-1[2] gilt das folgende, in Abbildung 2.8 dargestellte, einheitliche Koordinatensystem, bei welchem die Wagenkastenlängsachse in die Fahrtrichtung 1 zeigt und als x-Achse definiert ist. Die Hochachse des Wagenkastens verläuft entlang der positiven z-Achse. Daraus folgt aus der rechten Hand-Regel, dass die positive y-Achse in Fahrtrichtung 1 nach links zeigt und sich auf der horizontalen Ebene befindet. Der Ursprung befindet sich in der Mitte zwischen den Fahrwerkdrehpunkten auf Höhe der Schienenoberkante. Die Bodenhöhe wird für Nominallage, Masse fahrbereites Fahrzeug, unbeladen, dargestellt.

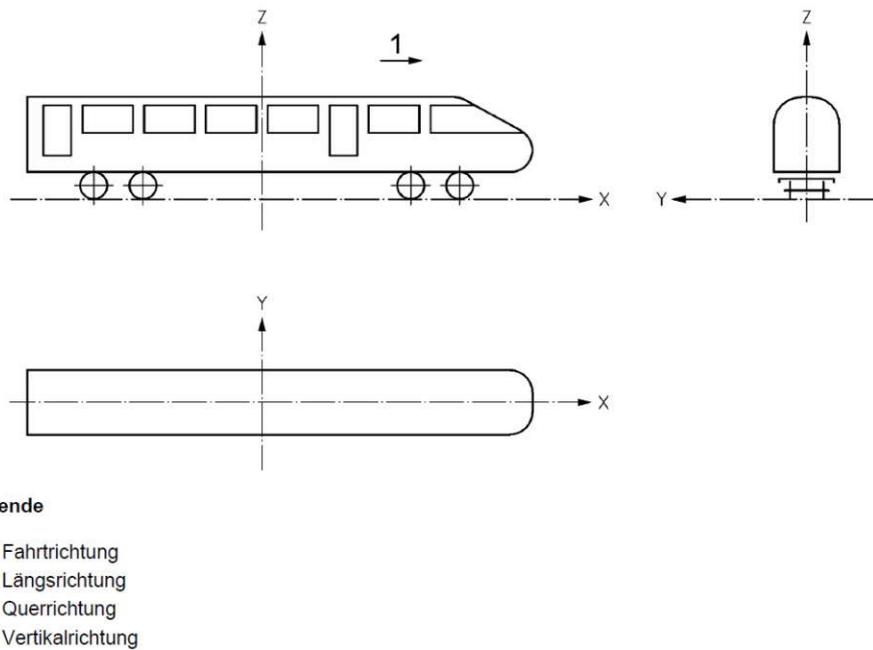


Abbildung 2.8: Wagenkastenkoordinatensystem [2, S. 7]

### 2.3.1 DIN EN 12663-1

Die DIN EN 12663-1[2] ist eine europäische Norm des Europäischen Komitees für Normung (CEN), welche für Bahnanwendungen gilt und die Festigkeitsanforderungen von Schienenfahrzeugwagenkästen reglementiert. Da europäische Normen einen nationalen Normencharakter besitzen sind diese nach der Veröffentlichung einzuhalten bzw. falls die nationale Norm dadurch nicht vollständig abgelöst wird, zusätzlich zu der nationalen Vorgabe zu erfüllen. Die Norm DIN EN 12663-1[2] dient als Ausgangsbasis der Auslegung heutiger Wagenkästen im Schienenfahrzeugbau, welche für den europäischen Markt zugelassen werden sollen.

Laut DIN EN 12663-1[2] müssen alle strukturellen Teile und Details von Schienenfahrzeugwagenkästen die maximalen Belastungen entsprechend ihrer Betriebsanforderungen standhalten und dabei unter normalen Betriebsbedingungen mit einer angemessenen Überlebenswahrscheinlichkeit die geforderte Lebensdauer erreichen.

Durch die Norm soll gewährleistet werden, dass der Wagenkasten bei den geforderten Belastungen keine bleibende Verformung aufweist oder zu Bruch geht, wobei dies durch eine Berechnung und/oder Testung nachzuweisen ist.

Die Hauptbewertungskriterien bestehen darin die außergewöhnlichen Belastungen, welche mit den maximalen Belastungen bei vollem Betrieb definiert sind, ertragen werden müssen.

Tabelle 2.1: Schienenfahrzeugkategorien; vergl. [2, S. 9]

Gruppe	Kategorie	Beschreibung
Personen- verkehrsfahrzeuge	P-I	Reisezugwagen
	P-II	Triebzugeinheiten und Reisezugwagen
	P-III	U-, S-Bahn-Fahrzeuge und leichte Triebwagen
	P-IV	leichte U-Bahn-Fahrzeuge und Stadtbahnfahrzeuge
	P-V	Straßenbahnfahrzeuge
Güterwagen	F-I	Fahrzeuge, die ohne Beschränkung rangieren können
	F-II	Fahrzeuge, die weder über einen Ablaufberg noch durch Abstoßen rangiert werden dürfen
Lokomotiven	L	Lokomotiven und Triebfahrzeuge

Dabei ist eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten, sodass die außergewöhnlichen Belastungen deutlich überschritten werden können, ohne einem Versagen oder Bruch der Struktur. Auch ein Eingleisen oder Bergen muss ohne bleibende Schädigung möglich sein. Des Weiteren müssen Betriebs- oder zyklischen Belastungen ertragen werden, sodass keine Beeinträchtigung der Struktursicherheit während der festgelegten Lebensdauer auftritt. Hierfür unterscheidet die Norm die Schienenfahrzeuge in konstruktive Kategorien, welche auf die unterschiedlichen Festigkeitsanforderungen der Wagenkästen eingehen und in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Bei dem in dieser Arbeit behandelten Metro-Wagenkasten handelt es sich um ein Kategorie P-III Fahrzeug.

Um die geforderte Überlebenswahrscheinlichkeit jedes Konstruktionsdetails nachweisen zu können, wird ein Sicherheitskonzept implementiert. Dafür muss das Berechnungsmodell des Wagenkastens für alle Lasten bestimmte Festigkeitskriterien erfüllen. Man unterscheidet zwischen Stabilitätskriterien und Festigkeitskriterien für statische Lasten und die Ermüdung. Im Falle einer rechnerischen Nachweisführung, ohne eine Validierung durch einen Test der Konstruktion, wird von der DIN EN 12663-1[2] eine Sicherheit je Lastfall von  $S_1 = 1,15$  gegen die Streck- und Dehngrenze,  $S_2$  bzw.  $S_3$  gegen die Bruchfestigkeit bzw. Instabilitäten von 1,5.

Die Sicherheitsfaktoren für den rechnerischen Ermüdungsfestigkeitsnachweis sind dem Abschnitt 4.2.3 zu entnehmen.

Tabelle 2.2: Statische Lastfälle nach DIN EN 12663-1 [2]

	Beschreibung	Kraft in kN
Längsgerichtete statische Belastungen	Druckkraft auf Kupplungsbefestigung	800
	Zugkraft an Kupplungsbefestigung	600
	Druckkraft in Höhe der Fensterbrüstung	300
	Druckkraft in Höhe des Obergurts	150
Vertikale statische Belastungen	Maximales Betriebsgewicht	$1,3 \cdot g \cdot \frac{(m_1+m_4)}{1000}$
	Anheben an einem Fahrzeugende an festgelegten Anhebepunkten	$1,1 \cdot g \cdot \frac{(m_1+m_2)}{1000}$
	Anheben des ganzen Fahrzeugs an festgelegten Anhebepunkten	$1,1 \cdot g \cdot \frac{(m_1+2 \cdot m_2)}{1000}$

Tabelle 2.3: Auslegungsmassen [2, S. 15]

Symbol	Beschreibung
$m_1$	Auslegungsmasse des Wagenkastens (betriebsbereit)
$m_2$	Auslegungsmasse des Drehgestells
$m_3$	Normale Zuladung
$m_4$	Außergewöhnliche Zuladung

### 2.3.1.1 Statische Auslegungslastfälle

Für den statischen Festigkeitsnachweis sind in der Norm Auslegungslastfälle definiert, welche die Mindestanforderungen an einen Schienenfahrzeugwagenkasten darstellen. Die Lastfälle sind für die jeweiligen Kategorien angegeben. Im Allgemeinen handelt es sich bei den Auslegungslasten um außergewöhnliche Bedingungen, wie beispielsweise eine deutliche Überschreitung der außergewöhnlichen Belastungen, sodass diese mit einer ausreichenden Sicherheit gewährleistet werden kann.

Die in Tabelle 2.2 angeführten Werte sind die zu berechnenden statischen Auslegungslastfälle für Wagenkästen der Kategorie P-III. Die dafür in der DIN EN 12663-1[2] definierten Auslegungsmassen sind der Tabelle 2.3 zu entnehmen. Die Erdbeschleunigung  $g$  wird in der DIN EN 12663-1[2] mit  $9,81\text{m/s}^2$  angegeben.

Des Weiteren muss ein versetztes Anheben, mit einem vertikalen Versatz von mindestens 10mm an einer Anhebestelle für die Wagenkastenfestigkeit nachgewiesen werden. Dabei

liegen die anderen drei Stützpunkte auf einer horizontalen Ebene.

In Kundenlastenheften können zusätzliche Lasten definiert werden, die über die Lasten der DIN EN 12663-1[2] hinausgehen. Dazu zählen etwa Lastfälle, die spezielle Bergungsoperationen nach dem Entgleisen abdecken.

Um eine ausreichende statische Festigkeit des Wagenkastens zu gewährleisten, ist es nach DIN EN 12663-1[2] zusätzlich erforderlich die Kupplungsdruck- und Kupplungszugkraft mit  $g \cdot (m_1 + m_4)$  zu überlagern.

Für den vollständigen statischen Festigkeitsnachweis müssen die Verbindung von Wagenkasten zum Drehgestell mit  $\pm g \cdot m_2$  in Querrichtung und  $\pm 3 \cdot g \cdot m_3$  in Längsrichtung mit berücksichtigt werden sowie die Beschleunigungen der Ausrüstungsgegenstände. Dafür ist die Masse der Ausrüstungsgegenstände mit  $\pm 3 \cdot g$  in Längs- und mit  $\pm g$  in Quer- und Vertikalrichtung zu multiplizieren. Zusätzlich sind die genannten Nachweislastfälle für das Drehgestell und die Ausrüstung mit der Auslegungsmasse des Wagenkastens  $m_1$  in Vertikalrichtung zu kombinieren.

### 2.3.1.2 Auslegungsermüdungslastfälle

Grundsätzlich müssen alle Bereiche zyklischer Belastung, welche Ermüdungsschäden verursachen können, ermittelt werden.

Zu den Ermüdungslasten am Wagenkasten zählen Be- und Entladezyklen, aerodynamische Belastungen durch Tunnelfahrten, starkem Seitenwind, Zugbegegnungen bei hohen Geschwindigkeiten oder das Zuladungsspektrum, welches insbesondere bei dem modellierten Metro-Wagenkasten durch die Definition von unterschiedlichen Betriebsperioden erfolgt. Für die Betriebsperioden sind in der Norm keine expliziten Lasten angegeben, sondern nur der Hinweis, dass diese zu beachten sind und geeignet für Berechnungszwecke aus zu arbeiten sind. In diesen Fällen ist man meistens auf Daten der Betreiber angewiesen.

Zusätzlich wird bei den Wagenkastenermüdungslasten auf die Belastungen aus dem Fahrwerk und durch die Traktion und das Bremsen eingegangen. Diese resultieren aus den Längs-, Quer-, Vertikal- und Verwindungsunregelmäßigkeiten des Fahrwerks und können nach der DIN EN 12663-1[2] unterschiedlich bestimmt werden. Die Belastungen können aus dynamischen Modellen, auf Basis von Gleislagefehlern und Trassierung, mittels Messdaten aus bereits befahrenen oder ähnlichen Strecken ermittelt oder aus den empirischen

Tabelle 2.4: Beschleunigungsniveaus mit  $10^7$  Zyklen; vergl. [2]

Beschreibung	Beschleunigung in $m/s^2$
Beschleunigung in x-Richtung	$\pm 0,15 \cdot g$
Beschleunigung in y-Richtung	$\pm 0,15 \cdot g$
Beschleunigung in z-Richtung	$(1 \pm 0,15) \cdot g$

Daten aus der Norm entnommen werden. Die Werte der DIN EN 12663-1[2] sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst und sind aus den herkömmlichen Betriebsbedingungen in Europa abgeleitet worden. Bei den angegebenen Beschleunigungswerten handelt es sich um Beschleunigungsniveaus mit  $10^7$  Zyklen, welche schädigungsäquivalente Einstufen-Ersatzkollektive darstellen.

Zusätzlich zu den Ermüdungslasten am Wagenkasten müssen auch jene Lasten an den Schnittstellen mit berücksichtigt werden. Bei diesen Lasten handelt es sich beispielsweise um die Verbindung zwischen Wagenkasten und Drehgestell, Befestigung der Ausrüstungsgegenstände, Kupplungen, Verbindungen zu etwaigen Gelenkeinheiten.

Da es sich bei den angeführten Auslegungslasten um Einzellasten handelt, müssen diese nach DIN EN 12663-1[2] für einen sicheren Betrieb eines Schienenfahrzeugs sinnvoll miteinander kombiniert werden, sodass die Auslegungskriterien erfüllt werden. MKS-Simulationen oder Überlagerungen nach VDV 152[10] können für die Überlagerungskennwerte herangezogen werden.

### 2.3.2 VDV 152

Die VDV 152[10] ist eine Richtlinie, welches vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen erstellt wurde und ein Gesamtkonzept für die Nachweisführung der Festigkeitsauslegung von städtischen Schienenfahrzeugen bietet. Diese Richtlinie beinhaltet Lastannahmen, welche aus Messungen diverser in Deutschland fahrenden U-, Stadt- und Straßenbahnen abgeleitet wurden und sich über dessen Grenzen Deutschlands hinaus, insbesondere im deutschsprachigen Raum, bewährt haben. Im Vergleich zur DIN EN 12663-1[2] bietet die VDV 152[10] in vielen Fällen detaillierte Lastfallannahmen.

Tabelle 2.5: Kombinationen der statischen Auslegungslastfälle; vergl. [10, S. 42]

Lastfall	$a_x$ in $m/s^2$	$a_y$ in $m/s^2$	$a_z$ in $m/s^2$	Seitenwind in Pa	Verwindung
Weichenfahrt	$\pm 3,0$	$\pm 2,8$	$-g - 3,4$	$\pm 600$	-
Bogenfahrt	$\pm 3,0$	$\pm 3,0$	$-g - 1,4$	$\pm 600$	$\pm 1/250$

### 2.3.2.1 Statische Auslegungslastfälle

Die statischen Auslegungslastfälle für den Wagenkasten und dessen Anbauteile sind für die in der VDV 152[10] behandelten Schienenfahrzeugkategorien P-III bis P-V deckungsgleich mit jener der DIN EN 12663-1[2] aus Abschnitt 2.3.1.1, allerdings unterscheiden sich die Lastfallkombinationen für den Wagenkasten erheblich. Die Richtlinie orientiert sich bei den Festigkeitsanforderungen des Wagenkastens an dessen Fahrbetrieb und liefert Beschleunigungen, welche mit den Auslegungsmassen  $m_1 + m_4$  multipliziert werden müssen. Diese Kombinationen der statischen Auslegungslastfälle sind in Tabelle 2.5 für P-III Fahrzeuge zusammengefasst.

Die VDV 152[10] ergänzt die DIN EN 12663-1[2] Auslegungslastfälle bei der Verbindung des Wagenkastens zum Drehgestell um eine weitere Belastung, bei welcher das Drehgestell frei auf der Wagenstruktur hängt. Dafür muss für den Festigkeitsnachweis  $-1,1 \cdot g \cdot m_2$  mit berücksichtigt werden.

Zusätzlich sind Kräfte für außergewöhnliche Dämpferkräfte, die Sitzbefestigungen, Handläufe, Haltestangen und Haltegriffe sowie für die begehbaren Bereiche auf dem Dach gegeben und nachzuweisen.

### 2.3.2.2 Auslegungsermüdungslastfälle

Die VDV 152[10] beinhaltet wie die DIN EN 12663-1[2] Auslegungslastfälle für einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis in Form eines Dauerfestigkeitsnachweises (siehe Tabelle 2.6), welche als schädigungsäquivalente Einstufen-Kollektive, allerdings mit  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (ungleich den  $10^7$  Zyklen der DIN EN 12663-1[2] Auslegungsermüdungslastfälle) definiert sind. Um die Konsistenz mit den Normlasten der DIN EN 12663-1[2] zu gewährleisten wird eine schädigungsäquivalente Umrechnungsformel in der VDV 152[10] angegeben, um die zulässigen Festigkeitswerte umrechnen zu können. Dadurch kann mit den gegebenen Lastkollektiven gerechnet werden, welche anschließend auf der Widerstandsseite umge-

Tabelle 2.6: Ermüdungsrelevante Betriebslastfälle mit Einstufenkollektiv mit  $2 \cdot 10^6$  Zyklen; vergl. [10, S. 54]

Lastfall	$a_x$ in $m/s^2$	$a_y$ in $m/s^2$	$a_z$ in $m/s^2$	Seitenwind in Pa	Verwindung
Weichenfahrt	-	$\pm 1,2$	$-g \pm 1,9$	$\pm 200$	-
Bogenfahrt	-	$\pm 1,6$	$-g \pm 1,0$	-	$\pm 1/250$
Anfahren/Bremsen	$\pm 1,5$	$\pm 0,6$	$-g \pm 1,0$	-	-
Anbauteile >50kg	$\pm 2,2$	$\pm 2,2$	$-g \pm 2,2$	-	-

rechnet werden.

### 2.3.3 DVS 1608

Die DVS 1608[4] ist eine Richtlinie des Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren und liefert Hinweise zur Gestaltung und Auslegung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen für den Schienenfahrzeugbau. Für Stahlfahrzeuge wird die DVS 1612 verwendet, welche sich bezüglich des Werkstoffs und dessen Materialeigenschaften unterscheidet. Die grundsätzliche Vorgangsweise bei der Bewertung ist gleich.

Die Richtlinie konzentriert sich auf wesentliche und bewährte Schweißkonstruktionsdetails (Kerbfälle). Sie liefert eine Vorgehensweise für den statischen Festigkeitsnachweis sowie den Ermüdungsfestigkeitsnachweis. Dabei wird zwischen den Grundwerkstoff und der Schweißverbindungen unterschieden. Die Nachweisführung der Ermüdungsfestigkeit kann sowohl in Form eines Dauerfestigkeitsnachweises mittels des Nennspannungskonzeptes, als auch mittels eines Betriebsfestigkeitsnachweis nach dem Nenn- oder Kerbspannungskonzept erfolgen.

In dieser Arbeit wird nur die Vorgangsweise des Dauerfestigkeitsnachweises mittels Nennspannungskonzept beschrieben, da die in der DVS 1608[4] angegebenen zulässigen Festigkeitswerte auf Nennspannungen beruhen und der Ermüdungsfestigkeitsnachweis im Moment bei *Siemens Mobility Austria GmbH* mit dieser Methode erfolgt.

Die DVS 1608[4] liefert darüber hinaus Empfehlungen für den Einsatz von Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau und rät beispielsweise dazu die Legierung EN AW-7020 (in dieser Arbeit verwendete Legierung) bei heutigen Neukonstruktionen, aufgrund der Spannungsrisskorrosions- bzw. Schichtkorrosionsempfindlichkeit, nicht mehr zu ver-

Tabelle 2.7: Vorgeschriebene Werkstoffparameter [4, S. 6]

Beschreibung	Wert
Elastizitätsmodul $E$	70.000MPa
Querdehnungszahl $\nu$	0,3
Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$	$23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Dichte $\rho$	2.700kg/m <sup>3</sup>

wenden. Hier zeigt sich die Einbindung der jahrzehntelangen Betriebserfahrung, da früher diese Legierung im Schienenfahrzeugbau häufig angewendet wurde, so auch im hier behandelten Fahrzeug.

### 2.3.3.1 Allgemeines

Die Materialeigenschaften der Aluminiumlegierungen werden in der DVS 1608[4] durch die in der Tabelle 2.7 dargestellten Werkstoffparametern definiert. Bei den genannten Werkstoffeigenschaften handelt es sich um isotrope Eigenschaften, welche bereits die Einflüsse von Walz- oder Pressrichtungen berücksichtigen.

Des Weiteren werden in der Richtlinie für den statischen Festigkeitsnachweis Werkstoffkennwerte für verschiedene Aluminiumlegierungen, welche die minimale Streck- und Dehngrenze sowie die Zugfestigkeit, unter Berücksichtigung des Festigkeitsabfalls im Bereich der Schweißnaht, der sogenannten Wärmeeinflusszone beinhalten, genannt.

Für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit sind in der DVS 1608[4] Festigkeitswerte enthalten, welche auf einer Lastspielzahl von  $10^7$  Lastwechsel basieren und eine Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{v}} \geq 97,5\%$  bei einem einseitigem Vertrauensintervall aufweisen. Schweißnahtverbindungen werden durch sogenannte Kerbfälle klassifiziert. Als Kerbfall wird eine zulässige Spannungskomponente relativ zur Schweißnahtorientierung verstanden. Es gibt für jede Naht eine Kerbfallzuordnung längs und quer zur Naht sowie einen Kerbfall für die Schubbelastung. Die Festigkeitswerte basieren auf Kleinproben, welche aufgrund der Berücksichtigung des Eigenspannungseinflusses (nach DIN EN 15085 mit den Mittelspannungsempfindlichkeiten  $M_{\sigma} = 0,15$  bzw.  $M_{\tau} = 0,09$ ) auf reale geschweißte Bauteile übertragbar sind. Die Mittelspannungsempfindlichkeit beschreibt den Einfluss der Mittelspannung auf die Dauerfestigkeitswerte in Abhängigkeit vom Werkstoff und dessen Zugfestigkeit. Im Allgemeinen kann es bei Druckmittelspannungen zu einem Anstieg und

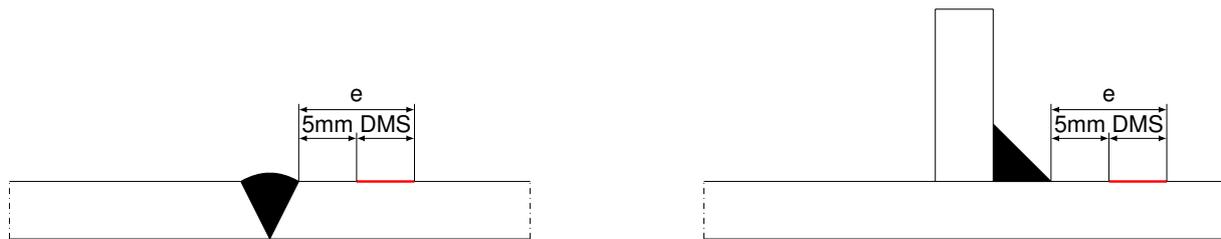


Abbildung 2.9: Grafische Darstellung des empfohlenen Auswertepunkts nach DVS 1608 für einen Stumpf- (links) und T-Stoß (rechts); vergl. [4, S. 11]

bei Zugmittelspannungen zu einer Reduktion der Dauerfestigkeitsamplitude kommen. Da die DVS 1608[4] von einem rechnerischen Nachweis der Festigkeit mittels Finite Elementen Methode ausgeht, findet sich daran eine Empfehlung bezüglich der Auswertung der ermittelten Spannungen. Denn bei den Spannungen, welche mit der FE-Methode ermittelt werden, handelt es sich im Allgemeinen um Strukturspannungen. Um einen direkten Vergleich zwischen den, mittels Finite Elementen Methode ermittelten, Strukturspannungen und den Spannungen aus Dehnmessstreifen (DMS) zu gewährleisten, wird empfohlen den Auswertepunkt im FE-Modell an die gleiche Position zu setzen wie bei einem, im Zuge eines Versuchsaufbaus applizierten DMS. Dabei soll die Mitte des Dehnmessstreifens mit dem Auswertepunkt im FE-Modell übereinstimmen. Der DMS soll nach der Richtlinie in einem Abstand von 5mm am Schweißnahtübergang angebracht werden. Folglich sollte sich der Auswertepunkt für eine Schweißverbindung in einem Finite Elemente Schalenmodell in einem Abstand  $e$  von  $5\text{mm} + \frac{\text{DMS-Messgitterlänge}}{2}$  befinden (siehe Abbildung 2.9). Damit wird davon ausgegangen, dass die so ermittelten Spannungen etwas höher als die auftretenden Nennspannungen sind, welche sich durch die Schnittgrößen und dem Nahtquerschnitt ergeben.

### 2.3.3.2 Nachweis der statischen Festigkeit

Bei der Bewertung der statischen Festigkeit wird zwischen Grundmaterial, Wärmeeinflusszone und der Schweißnaht unterschieden, daher sind diese separiert zu bewerten.

Für das Grundmaterial und die Wärmeeinflusszone sind die statischen Dehn- und Bruchgrenzen in Form von Spannungswerten sowie deren Bruchdehnung je Legierung, Dickenbereich und Werkstoffzustand definiert. Im Falle einer mehrachsigen Beanspruchung muss in der Bewertung zwischen Werkstoffen mit einer ausreichenden Duktilität, also einer Bruchdehnung  $A_{50} \geq 6\%$  (siehe DVS 1608[4]) und einer geringeren Duktilitäten unterschieden

werden. Dabei muss die Bewertung von Werkstoffen mit einer Bruchdehnung größer 6% anhand der "Von Mises" Vergleichsspannung und bei Werkstoffen mit  $A_{50} < 6\%$  anhand der betragsmäßig größten Hauptnormalspannungen erfolgen.

Der Festigkeitsnachweis des Grundmaterials und der Wärmeeinflusszone erfolgt somit anhand des Vergleichs der jeweiligen zulässigen Spannungswerte mit auftretenden Vergleichs- oder Hauptnormalspannungen.

Beim Nachweis der Schweißnähte wird zwischen durchgeschweißten und nicht durchgeschweißten Nähten unterschieden. Bei den durchgeschweißten Stumpf- oder T-Stößen kann mit dem vollen Querschnitt (Blechdicke oder Steghöhe) gerechnet werden. Im Falle einer nicht durchgeschweißten Naht muss mit dem tragenden Nahtquerschnitt (im Allgemeinen gegenüber den angeschlossenen Blech- oder Stegdicken reduziert werden) nach DIN EN 15085-3[3] gerechnet werden. Bei einer Spannungsauswertung mittels Schalenelementen eines nicht durchgeschweißten T-Stoßes müssen die Schalenelemente lokal reduziert werden, oder die sich ergebenden Spannungen im Verhältnis der vollen Stegdicke erhöht werden. Zusätzlich muss bei dieser Stoßart die Vergleichsspannung mit der Festigkeit der Wärmeeinflusszone (WEZ) an den durchgehenden Blechen verglichen werden. Auch bei der Bewertung von Kehlnähten müssen bei der Spannungsermittlung, mittels Schalenelementen, die Spannungsverhältnisse  $R$  auf den maßgebenden Schweißnahtquerschnitt umgerechnet werden oder die jeweiligen Schnittgrößen für die Spannungsermittlung herangezogen werden.

Der Festigkeitsnachweis der Schweißnähte wird nach DVS 1608[4] mit den Festigkeitsparametern der Wärmeeinflusszone durchgeführt. Die Festigkeit der Aluminiumlegierungen wird durch eine Wärmebehandlung (EN AW-6000 Legierungen) oder Kaltwalzen (EN AW-5000 Legierungen) erreicht. Durch das Schweißen wird die erzielte Festigkeitssteigerung eliminiert.

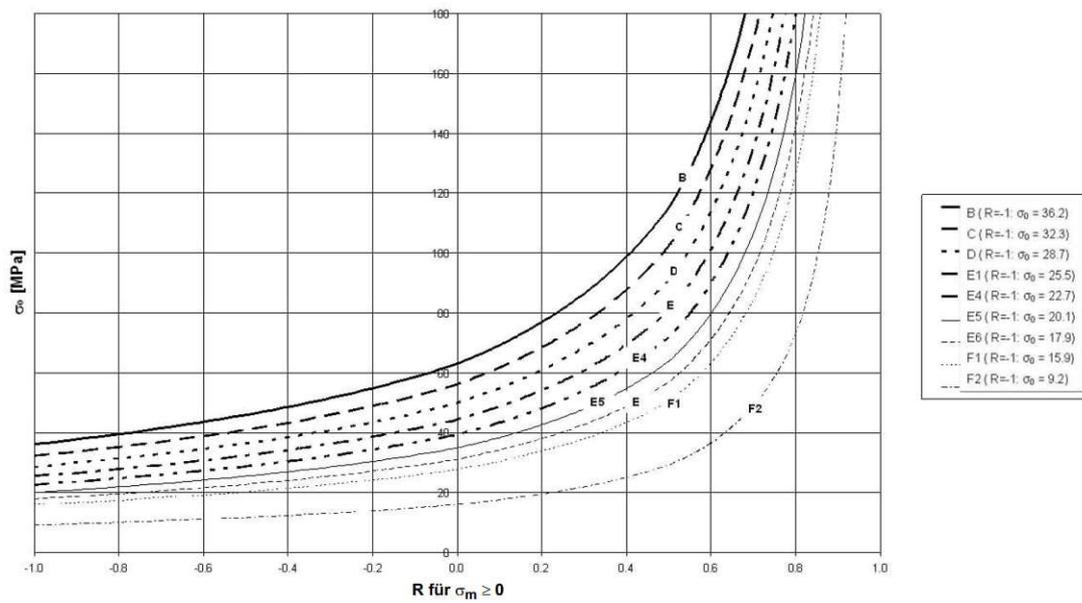
### 2.3.3.3 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Grundsätzlich wird die Ermüdungsfestigkeitsbewertung, wie bei dem Nachweis der statischen Festigkeit, in zwei separaten Schritten durchgeführt. Einerseits muss die Ermüdungsfestigkeit des Grundmaterials und andererseits jene der Schweißverbindungen nachgewiesen werden.

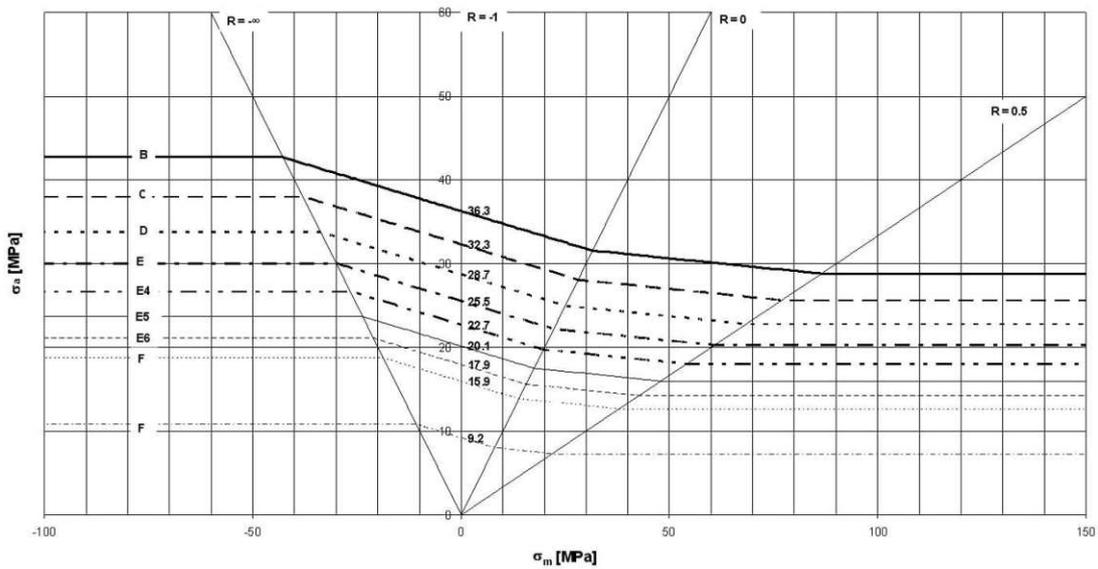
Beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis ist zu beachten, dass bei den Ermüdungslastfällen

auch die statischen Festigkeitskriterien erfüllt werden müssen. Die Ermüdung selbst wird durch zyklisch auftretende Lasten verursacht, wobei jeder Punkt der Struktur im allgemeinen ein unterschiedliches Verhältnis der auftretenden größten und kleinsten Beanspruchung hat. Dieses Verhältnis wird als Spannungsverhältnis  $R$  bezeichnet und wird für jeden Punkt in der Struktur aus allen Lastfallkombinationen ermittelt.

Es ist zu bemerken, dass die Kerbfälle eine Funktion dieses Spannungsverhältnisses sind. Diese Abhängigkeit wird in MKJ- bzw. Haigh-Diagrammen festgelegt. Abbildung 2.10 zeigt ein MKJ- (Mittelspannung  $\sigma_m > 0$ ) und ein Haigh-Diagramm. Beide weisen eine Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma = 0,15$  auf. Das Spannungsverhältnis  $R$  ist im Falle des MKJ-Diagramms direkt auf der Abszisse ersichtlich. Beim Haigh-Diagramm sind Linien für unterschiedliche Spannungsverhältnisse eingetragen, um das Ablesen zu erleichtern (siehe Abbildung 2.10(b)).



(a) MKJ-Diagramm



(b) Haigh-Diagramm

Abbildung 2.10: MKJ- und Haigh-Diagramm für Normalspannungen in Schweißverbindungen; siehe [4, S. 16, 19]

## Grundmaterial

Bei den zu ermittelnden Dauerfestigkeitswerten des Grundmaterials wird zwischen den Normal- und Schubspannungen unterschieden.

Anfänglich wird die Wechselfestigkeit des Grundmaterials für Normalspannungen mit Hilfe der Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffes (angegeben in der DVS 1608[4]), Konstruktionsfaktor

$K_{WK}$  (abhängig von der Oberflächenrauheit) und einem Sicherheitsfaktor  $j_{ges}$  ermittelt. Im Falle eines Gusswerkstoffes muss zusätzlich ein technologischer Größenfaktor  $f_s$  mit der Zugfestigkeit multipliziert und der Konstruktionsfaktor mit Hilfe eines Rauheitsfaktors  $K_{R,\sigma}$  bestimmt werden, welcher von der tatsächlichen Rauheit  $R_z$  abhängt.

Das Spannungsverhältnis  $R_\sigma$  ergibt sich aus dem Verhältnis der minimalen und maximalen Normalspannung. Da im Grundmaterial im Gegensatz zur Schweißnaht keine Vorzugsrichtung (längs oder quer) vorhanden ist, muss das maximale Spannungsverhältnis durch entsprechendes Drehen der Bezugsebene (normal zur Schalenebene) ermittelt werden.

Die Dauerfestigkeitswerte des Grundmaterials für Normalspannungen  $\sigma_{a,zul}$  sind vom Spannungsverhältnis  $R_\sigma$  und der Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma$  abhängig. Zusammen mit der ermittelten Wechselfestigkeit  $\sigma_{W,zd}$  wird die zulässige Spannungsamplitude berechnet. In Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses ( $R_\sigma$ -Verhältnis) ergeben sich unterschiedliche Mittelspannungsbereiche, welche wie folgt definiert sind:

- **Bereich I:** Druckschwellbereich mit  $R_\sigma > 1$
- **Bereich II:** Wechselbereich mit  $-\infty \leq R_\sigma \leq 0$
- **Bereich III:** niedriger Zugschwellbereich mit  $0 < R_\sigma < 0,5$
- **Bereich IV:** hoher Zugschwellbereich mit  $0,5 \leq R_\sigma < 1$

Für die Ermittlung der Dauerfestigkeitswerte des Grundmaterials für Schubspannungen wird die Wechselfestigkeit  $\sigma_{W,zd}$  mit dem Faktor 0,65 multipliziert, woraus sich die Wechselfestigkeit  $\tau_{W,s}$  für Schubspannungen ergibt. Die zulässige Spannungsamplitude wird mit der Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\tau$  und dem Spannungsverhältnis  $R_\tau$  ermittelt. Aufgrund der beliebigen Vorzeichenwahl von Schubspannungen ergeben sich im Vergleich zu den Normalspannungen andere Bereiche, basierend auf dessen  $R$ -Verhältnis, mit den folgenden Grenzen:

- **Bereich I:** entfällt
- **Bereich II:**  $-1 \leq R_\tau \leq 0$
- **Bereich III:**  $0 < R_\tau < 0,5$
- **Bereich IV:**  $R_\tau \geq 0,5$

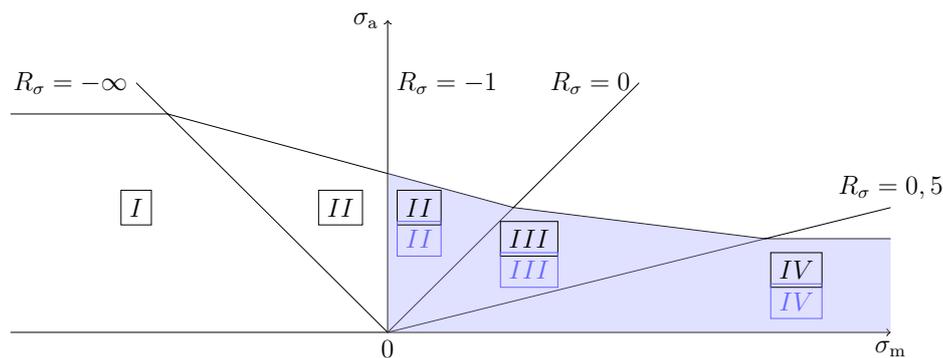


Abbildung 2.11: Grafische Darstellung der Mittelspannungsbereiche für Normal- (schwarz) und Schubspannung (blau); vergl. [4, S. 11]

Abbildung 2.11 zeigt die jeweiligen Mittelspannungsbereiche für die Normal- und Schubspannungen. Einhergehend mit diesen verschiedenen Bereichen ergeben sich je nach  $R$ -Verhältnis je Bereich unterschiedliche zulässige Spannungsamplituden.

## Schweißnähte und Wärmeeinflusszone

Im Unterschied zum Grundmaterial ist bei der Schweißnaht die zulässige Spannungsamplitude von der geometrischen Ausbildung der Naht abhängig. Die verwendete Aluminiumlegierung des Wagenkastens spielt bei der Schweißnahtbeurteilung keine Rolle, da durch das Aufschmelzen und Durchmischen mit dem Schweißzusatzmaterial die ursprünglichen Legierungseigenschaften verloren gehen. Außerdem ist die in der Schweißnaht entstehende metallurgische und geometrische Kerbe maßgeblich für die Ermüdung, nicht jedoch das Legierungsgefüge.

Die geometrische Ausbildung wird durch die Einschweißtiefe, die Nahtübergangs- und die Nahtwurzelausbildung berücksichtigt und in sogenannte Kerbfälle eingeteilt. Diese Einteilung basiert auf Ergebnissen von Schwingprüfungen der entsprechenden Nähte.

Im Unterschied zur Bewertung des Grundmaterials ist die Schweißnahtbewertung richtungsabhängig. Dabei wird die Normalspannung in einen Längs- ( $\sigma_{\parallel}$ ) und Queranteil ( $\sigma_{\perp}$ ) aufgeteilt. Die zulässigen Spannungsamplituden sind wie bei der Ermüdungsbewertung des Grundmaterials von den Mittelspannungsempfindlichkeiten und Spannungsverhältnissen abhängig. Bei der Bewertung von Gusswerkstoffen muss zusätzlich beachtet werden, dass die Ermüdungsfestigkeitswerte der Schweißnähte sowie dessen Wärmeeinflusszone nicht jene des Grundwerkstoffes übertreffen.

Tabelle 2.8: Kerbfalllinienbezeichnung nach DVS 1608; vergl. [4, S. 15]

Bezeichnung	B	B-	C+	C	C-	D+	D	D-	E1+	E1	E1-	
Exponent $x$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Bezeichnung	E4+	E4	E4-	E5+	E5	E5-	E6+	E6	E6-	F1+	F1	F2
Exponent $x$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	41

Die Dauerfestigkeitswerte für Normalspannungen lassen sich mit Hilfe von Kerbfalllinien (Exponenten  $x$ ) nach DVS 1608[4] und mittels  $R_\sigma$  ermitteln. Dabei gelten die selben Mittelspannungsbereiche aber andere Mittelspannungsempfindlichkeit wie bei der Ermittlung der Ermüdungsfestigkeitswerte des Grundmaterials inklusive dessen Grenzen.

Exemplarisch wird hier die Gleichung zur Ermittlung der zulässigen Spannungsamplitude  $\sigma_{a,zul}$  für den Druckschwellbereich ( $R_\sigma > 1$ ) nach DVS 1608[4] angeführt:

$$\sigma_{a,zul(R_\sigma)} = 54 \cdot 1,04^{-x} \quad (2.9)$$

An dieser Stelle sei hier an die DVS 1608[4] verwiesen, welche weitere Gleichungen für andere Spannungsverhältnisse liefert.

Bei den Kerbfalllinien  $x$  handelt es sich um ganzzahlige Exponenten, welche in der Tabelle 2.8 zusammengefasst sind. Die jeweiligen Kerbfalllinien zwischen B und F1 unterscheiden sich jeweils um den Faktor 1,12. Zwischen den beiden Vorzeichen + und - ist ausgehend von der Kerbfallbezeichnung immer ein Faktor 1,04 (siehe Gleichung 2.9). Nach DVS 1608[4] ist für die ungestörte Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs die Kerbfalllinie B für Normalspannungen zu verwenden. Beispielhaft sieht man in Abbildung 2.12 und 2.13 einen längs- bzw. querbeanspruchten T-Stoß, mit den entsprechend anzuwendenden Kerbfalllinien. Alle anderen Kerbfalllinien sind je nach Stoßart und Schweißqualität im Anhang B der DVS 1608[4] zu finden.

Die Dauerfestigkeitswerte für Schubspannungen lassen sich ebenfalls mit Hilfe von Kerbfalllinien und dem Spannungsverhältnis  $R_\tau$  bestimmen. Die Mittelspannungsbereiche (andere Mittelspannungsempfindlichkeit) stimmen mit den Bereichen der Schubspannungen für das Grundmaterial überein. Die Kerbfalllinien reduzieren sich bei den Schubspannungen auf die Linien G bzw. H, mit den Exponenten  $x = 0$  bzw. 9. Die Linie G wird für die ungestörte Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs und für durchgeschweißte Verbindungen angewandt. Für nicht durchgeschweißte Verbindungen oder Kehlnähte ist die Kerbfalllinie H zu verwenden.

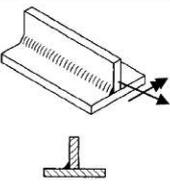
Nr.	Stoß- und Nahtausbildung				Prüfart und -umfang	Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3	Kerbfal-linie	$\sigma_a$ , zul (R = -1)	Neigungs-exponent der Wöhlerlinie	Bemerkungen
	Darstellung	Beschreibung	Nahtart	Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3						
1.3.10		einseitig nicht durchgeschweiß	einseitige Kehlnaht <sup>2)</sup>	13a <sup>1)</sup>	Sichtprüfung	CP C2	E4	23	4,3	

Abbildung 2.12: Längsbeanspruchter T-Stoß; Auszug aus der DVS 1608: Anhang B[4, S. 32]

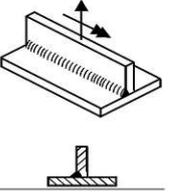
Nr.	Stoß- und Nahtausbildung				Prüfart und -umfang	Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3	Kerbfal-linie	$\sigma_a$ , zul (R = -1)	Neigungs-exponent der Wöhlerlinie	Bemerkungen
	Darstellung	Beschreibung	Nahtart	Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3						
1.5.9		einseitig nicht durchgeschweiß	HY-Naht einseitige Kehlnaht	11a 13a	Sichtprüfung	CP C2	F2 <sup>1)</sup>	9	3,4	Anrissort an der Nahtwurzel

Abbildung 2.13: Querbeanspruchter T-Stoß; Auszug aus der DVS 1608: Anhang B[4, S. 35]

den.

## 2.4 Normungs-Historie

Die Berechnung des U-Bahn Wagenkastens der Serie U wurde im Jahr 1970 durchgeführt. Die Normen und Richtlinien des oberen Abschnittes 2.3 existierten zu dieser Zeit noch nicht und wurden erst später aus den nachfolgend erwähnten Werken abgeleitet.

Als Basis für die Berechnung diente der Artikel "Lastannahmen und Sicherheiten für Schienenfahrzeuge" aus Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge (Sonderheft aus Juli 1963 bzw. Heft 14 Januar 1970). Dieser Artikel beinhaltet sowohl die Last- als auch die Widerstandsseite, in Form von Lastannahmen und zulässigen Spannungen, welche jenen Werten der DV 952 aus dem Jahr 1962 entsprachen (Richtlinie der Deutschen Reichsbahn und später DS 952 Richtlinie der Deutschen Bahn AG), für die Festigkeitsnachweise. Im Laufe der Jahre wurden die Lastannahmen dieses Werks in die VDV 152 und die Berechnungskennwerte der DV 952 in die DS 952 sowie der DVS 1608 (Aluminium) bzw. DVS 1612 (Stahl) übergeführt. Die Lastannahmen wurden in 90er Jahren durch die europäischen Normen für Strukturanforderungen DIN EN 12663 (Wagenkasten) und DIN EN 15749 (Fahrwerkrahmen) ergänzt.

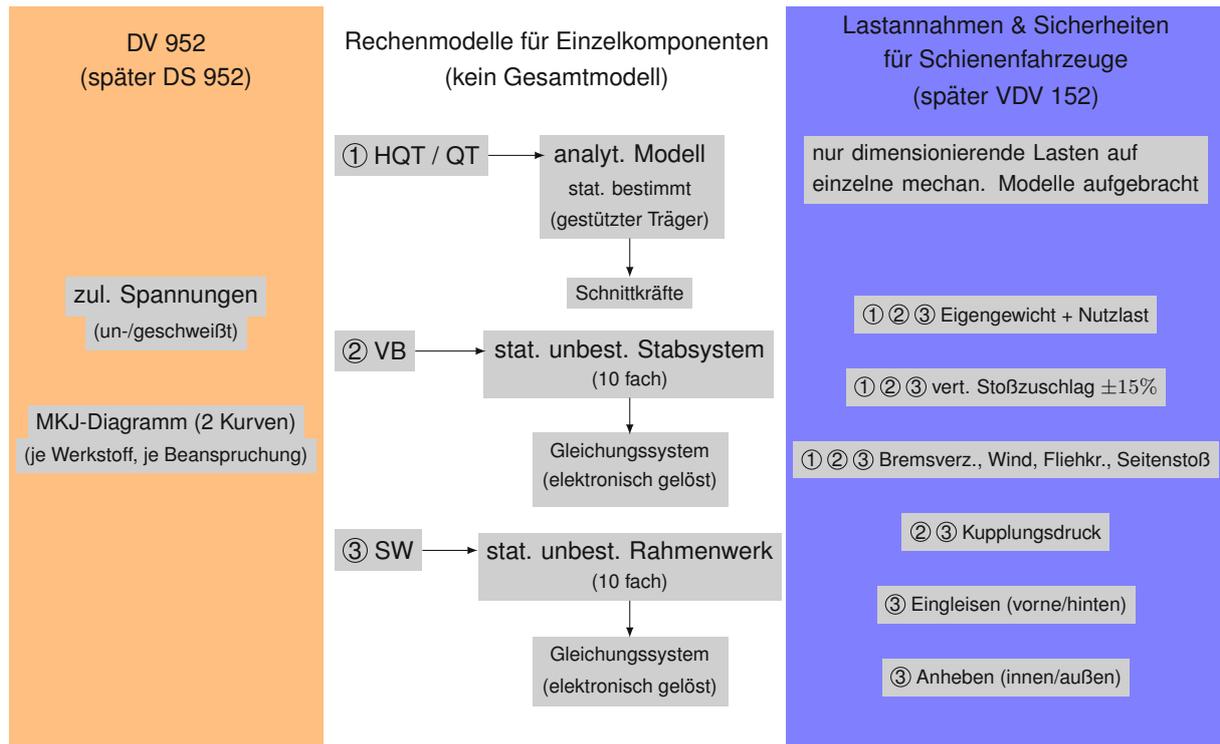


Abbildung 2.14: Flussdiagramm der Berechnung aus dem Jahre 1970

Im Vergleich zur VDV 152 beinhaltet die DIN EN 12663 auch Lastannahmen für Schienenfahrzeugkategorien abseits der in der VDV 152 behandelten Straßen-, Stadt und U-Bahnen (städtische Schienenfahrzeuge) (siehe Tabelle 2.1).

Die Abbildung 2.14 zeigt schematisch die Vorgehensweise der in den 70er Jahren durchgeführten Berechnung des Metrowagenkastens. Dabei wurden die Großkomponenten Hauptquerträger, (alle) Querträger, Vorbau und die Seitenwand (inklusive Dach- und Untergestell-Langträger) berechnet. Dafür wurden jeweils unterschiedliche Rechenmodelle erstellt, welche im weißen Bereich dargestellt sind. Beispielsweise wurden die Querträger als Stäbe, diskretisiert. Damit wurde ein statisch bestimmtes System abgebildet, welches sich mit den Haupt- & Zusatzlasten des Sonderheftes aus Juli 1963 (siehe auch Abschnitt 2.4.1) lösen ließ. Für die Seitenwandberechnung wurde diese zu einem Rahmenwerk vereinfacht, wodurch durch die Fenster- und Türöffnungen sowie die Mitberücksichtigung der Ober- und Untergurte 10 Felder entstanden. An jedem dieser Felder sowie an den Auflagern (Drehzapfen) wurde die Normal-, Querkräfte und Biegemomente berechnet (14 Stellen). Da die Obergurt-Normalkräfte in die 10 Felder eingeleitet wurden, ergab sich eine 10-fach statisch unbestimmtes Gleichungssystem. Dieses wurde mit Hilfe des Satzes von Menabrea gelöst. Für die Berechnung der Wagenkastendurchbiegung ist der Satz von Castigliano angewandt

worden. Dieser besagt, dass die Verformung an der Einleitungsstelle einer Kraft gleich der partiellen Ableitung der Formänderungsarbeit des Systems nach der Kraft ist. Durch das Lösen des elastischen Gleichungssystems und Summation der Arbeitsintegrale wurde die Durchbiegung zufolge der Querkraft und der Biegemomente berechnet. Diese Vorgehensweise wurde bei allen Hauptkomponenten durchgeführt, welche mit dem blauen Bereich der Lastseite in Abbildung 2.14 verbunden sind. Die Spannungen wurden aus einer Überlagerungsrechnung ermittelt und anschließend mit den zulässigen Spannungen aus der linken Widerstandsseite (oranger Bereich) verglichen.

### 2.4.1 VDV 152 (1992)

Als Basis für dieses Werk dienten die in Deutschland fahrenden städtischen Schienenfahrzeuge der 70er und 80er Jahre, für welche Lastannahmen und Sicherheiten, aufgrund von Messungen definiert wurden.

Für den Festigkeitsnachweis des Schienenfahrzeuges ist ein Nachweis gegen die Streckgrenze und gegen den Dauerbruch zu führen. In der Richtlinie ist der Dauerfestigkeitsbereich mit einer Lastspielzahl von größer  $5 \cdot 10^6$  für Aluminiumwerkstoffe definiert. Dafür sind sogenannten festigkeitsrelevante Beanspruchungsarten angegeben, welche sich in die Grund- und Zusatzbeanspruchung aufteilen. Die Grundbeanspruchung beinhaltet alle während der Fahrt dauernd auftretenden Beanspruchungen wie die konstante Fahrzeugmasse, die veränderlichen Nutzlasten sowie Beschleunigungen, welche aus Gleisunebenheiten resultieren. Jene Beanspruchungen, die nur zeitweise auftreten sind unter den Begriff Zusatzbeanspruchungen zusammengefasst und beinhalten Kräfte, welche beispielsweise durch Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen, Bogen- oder Kreuzungsfahrten, Anheben, Bruch einer Feder oder Wind bewirkt werden. Die entsprechenden Eingabedaten sowie Kennlinienblätter für Beschleunigungsamplituden, mit welchen anschließend die Grund- und Zusatzbeanspruchungen ermittelt werden, je Beanspruchung und Schienenfahrzeugkategorie sind angegeben. Für die Nachweisführung müssen einige der Beanspruchungen vektoriell überlagert werden.

Die neue, letztgültige Richtlinie wurde im Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Die Überarbeitung in den 2000er wurde insbesondere durch die steigende Beliebtheit und Verbreitung des Niederflurschienenfahrzeuges vorangetrieben. Im Zuge dessen hat sich herausgestellt, dass die Lasten für den Niederflurbereich teilweise nicht ausreichend konservativ waren und da-

mit erhöht werden mussten. Zusätzlich wurde die Richtlinie den neuen technischen Möglichkeiten angepasst und beispielsweise um den Betriebsfestigkeitsnachweis erweitert.

### 2.4.2 DVS 1608 (1983)

Die Dauerfestigkeitswerte der Berechnung des Metrowagenkastens der Serie U wurde aus dem Artikel "Lastannahmen und Sicherheiten für Schienenfahrzeuge" aus Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge (Sonderheft aus Juli 1963 bzw. Heft 14 Januar 1970) entnommen. Das damalige Merkblatt unterscheidet vorwiegend ruhende und schwingende Beanspruchungen.

Bei ersteren werden Festigkeitswerte und zulässige Spannungen bei Schweißverbindungen angegeben. Die Werte sind je Naht-, Spannungsart, Schweißverfahren (MIG oder WIG), Probendicke, Werkstoff und Lastfall zu entnehmen.

Für die Bewertung von schwingenden Beanspruchungen sind Belastungskennlinien, je Werkstoff gegebenen, welche die Oberspannungsgrenze über das Spannungsverhältnis darstellen. Die jeweiligen zulässigen Spannungen werden aus Kurve A für den Grundwerkstoff und Kurve D für Schweißverbindungen entnommen. Bei einer Biegung des Vollquerschnittes muss der entnommene Wert aus der Kurve A mit 1,2, bei einer Wandstärke von 0 bis 15mm und bei einer Schubbeanspruchung mit 0,65 multipliziert werden. Die aus den Grafiken abgelesenen Werte müssen mit einer Sicherheit von 1,5 in der Berechnung berücksichtigt werden. Bei Wandstärken größer 12mm muss zusätzlich ein Abminderungsfaktor angewandt werden.

Abbildung 2.15 zeigt die beiden Belastungskennlinien A (ungeschweißter Werkstoff) und D (Schweißverbindung) der Aluminiumlegierung EN AW-7020 (früher AlZn4,5Mg1). Die Werte der Kurven gelten für Zug/Druck, Biegung und Schub und einer Schwingspielzahl von  $10^7$ .

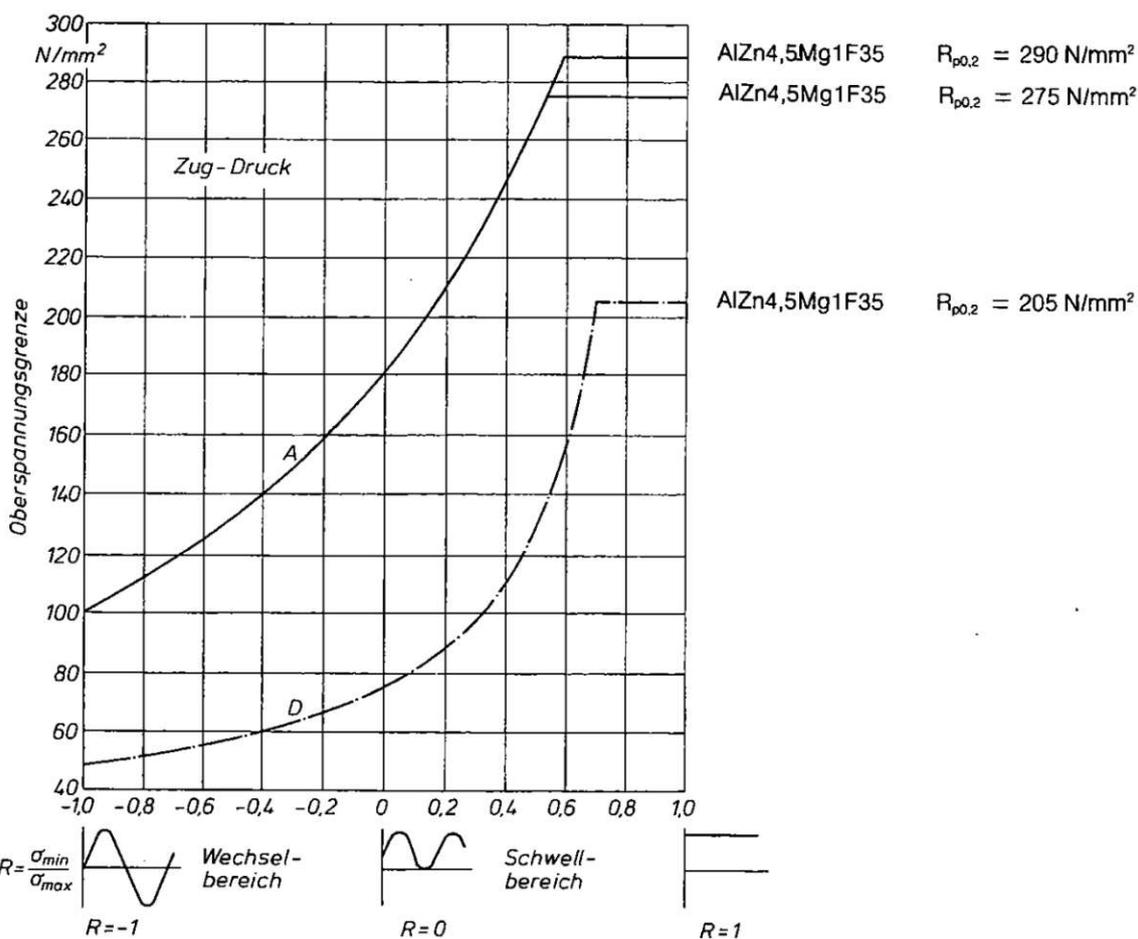


Abbildung 2.15: Belastungskennlinien für EN AW-7020 aus dem Merkblatt DVS 1608[5, S. 6] aus 1983



### 3 Modellbildung

Die Modellierung des Finite Elemente (FE) Modells erfolgte mit dem FE-Solver unabhängigen Preprozessor *Hypermesh 2019*<sup>2</sup>, mit welchem eine Input-Datei (.inp) für den Gleichungslöser (*engl. solver*) *Abaqus/Standard 2017*<sup>3</sup> erstellt wurde. Nach einer erfolgreichen Berechnung können die Ergebnisse mit Hilfe eines Post-Prozessors, wie beispielsweise dem in dieser Arbeit verwendeten *Hyperview 2017*<sup>4</sup>, betrachtet und interpretiert werden. Als Ausgangsbasis diente ein im Vorfeld der Arbeit erstelltes 3D-CAD-Modell des Metro Wagenkastens der Serie U (siehe Abbildung 3.1). Zusammen mit den archivierten 2D-Zeichnungen wurde daraus eine Mittelflächengeometrie der halben Wagenkastenstruktur (halbiert über die x-y-Ebene nach DIN EN 12663-1[2] ; siehe Abbildung 2.8) abgeleitet. Abbildung 3.2 zeigt das Mittelflächenmodell, bei welchem die asymmetrischen Bauteile über die Wagenkastenmittelebene hinausragen. Die asymmetrischen Komponenten haben bei der Modellierung eine von den symmetrischen Komponenten abweichende Benennung mittels Suffix erhalten um diese beim späteren Spiegeln (zu einen gesamten Wagenkasten) zu exkludieren.

Das FE-Netz wurde wie im Schienenfahrzeugbau üblich, aufgrund der dünnwandigen und großflächigen Strukturen von Wagenkästen, mittels Schalenelementen erzeugt. Dafür werden derzeit bevorzugt vierknotige Schalenelemente mit einer vollständigen Integrationsordnung und einer charakteristischen Elementkantenlänge von rund 20mm verwendet. In Ausnahmefällen muss bei gewissen Stellen, bei welchen es aufgrund der gegebenen Geometrie unvermeidbar ist, auf dreiknotige Elemente mit reduzierter Integrationsordnung zurückgegriffen werden. Diese weisen im Vergleich zu den vierknotigen Elementen schwächere Konvergenzeigenschaften auf und provozieren unter Umständen ungewollte Spannungsspitzen. Die beiden genannten Schalenelemente werden in der *Abaqus*-Elementbibliothek mit *S4* (vierknotig) und *S3R* (dreiknotig) bezeichnet. Diese Elementtypen werden in ihrer Standardkonfiguration verwendet, wodurch die Dickenintegration nach *Simpson* mit 5 Dickenintegrationspunkten angewandt wird.

Nach der Fertigstellung des Schalen-Halbmodells wurden die symmetrischen Geometrie-Anteile, mittels Makros, gespiegelt. Das so erstellte Metro-Wagenkastenmodell besteht aus rund 1,1 Millionen Elementen und Elementknoten, woraus sich circa 6,6 Millionen Freiheits-

<sup>2</sup>Altair Engineering Inc., Troy, Michigan, USA

<sup>3</sup>Dassault Systemes SE, Vélizy-Villacoublay, Frankreich

<sup>4</sup>Altair Engineering Inc., Troy, Michigan, USA

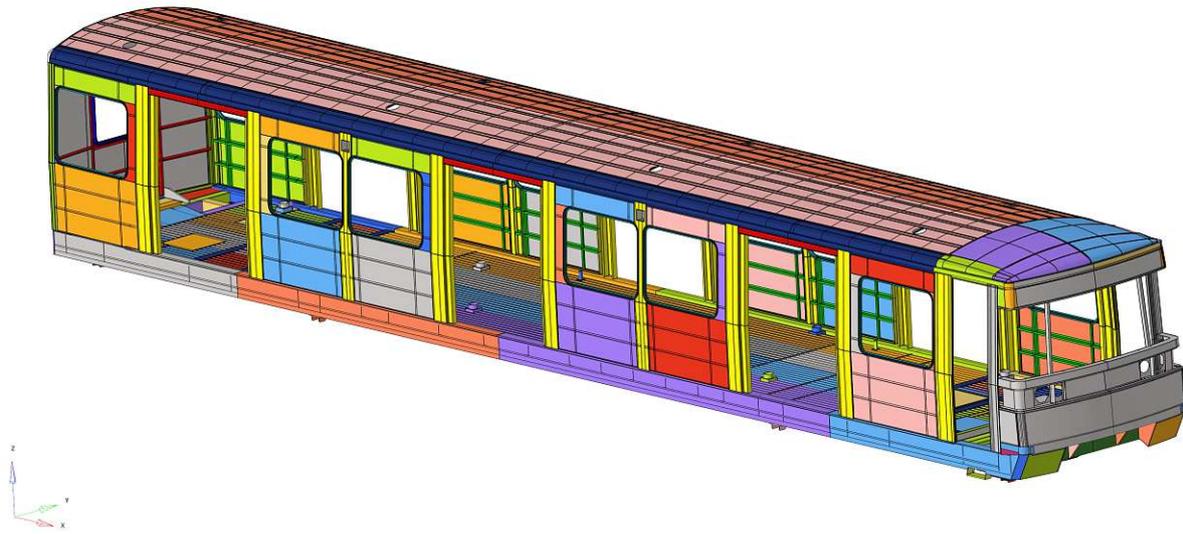


Abbildung 3.1: 3D-CAD-Modell des Metro-Wagenkastens; Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH

grade ergeben.

Um eine möglichst FE-Netz unabhängige Lasteinleitung zu gewährleisten, wurden diese mit Hilfe von Sets realisiert. Zur Anwendung kamen dabei sogenannte Komponenten-Sets (*engl. component-sets*), wo die jeweilige Komponenten-Identifikationsnummer, anstelle von Knoten (*engl. node*)- oder Element (*engl. element*)-Nummern, gespeichert werden. Damit lässt sich der Nachteil der Knoten- bzw. der Element-Sets umgehen, welche bei einer neuerlichen Vernetzung des FE-Netzes unter Umständen eine andere Nummerierung der Knoten/Elemente zur Folge haben, da sich auch deren Anzahl ändern kann. Sollte sich beispielsweise die Anzahl der Elemente im Component-Set ändern, so wird unabhängig vom FE-Netz auf alle Elemente die im Set enthalten sind referenziert und stehen somit für jedwede Manipulation bereit. Die Vielzahl der Lasteinleitungen setzt sich aus Component-Sets zusammen, welche aus Schalen-, Balkenelementen oder Punktmassen bestehen. Beispielsweise ist die Seitenwand für die Einleitung des Seitenwinds in einem eigenen Set. Die Balkenelemente werden verwendet um Lasten von den Haltestangen oder den Anhebepunkten in die Struktur einzuleiten. Die Sitzlasten werden anhand von Punktmassen innerhalb eines Komponenten-Sets eingeleitet. Das Einheitensystem ist mit der Kraft in Newton ( $N$ ), der Länge in mm und der Zeit in s definiert. Da 1 Newton bekanntlich mit  $N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$  definiert ist muss für die Konsistenz mit  $N = \frac{t \cdot mm}{s^2}$  gerechnet werden. Folglich werden Mas-

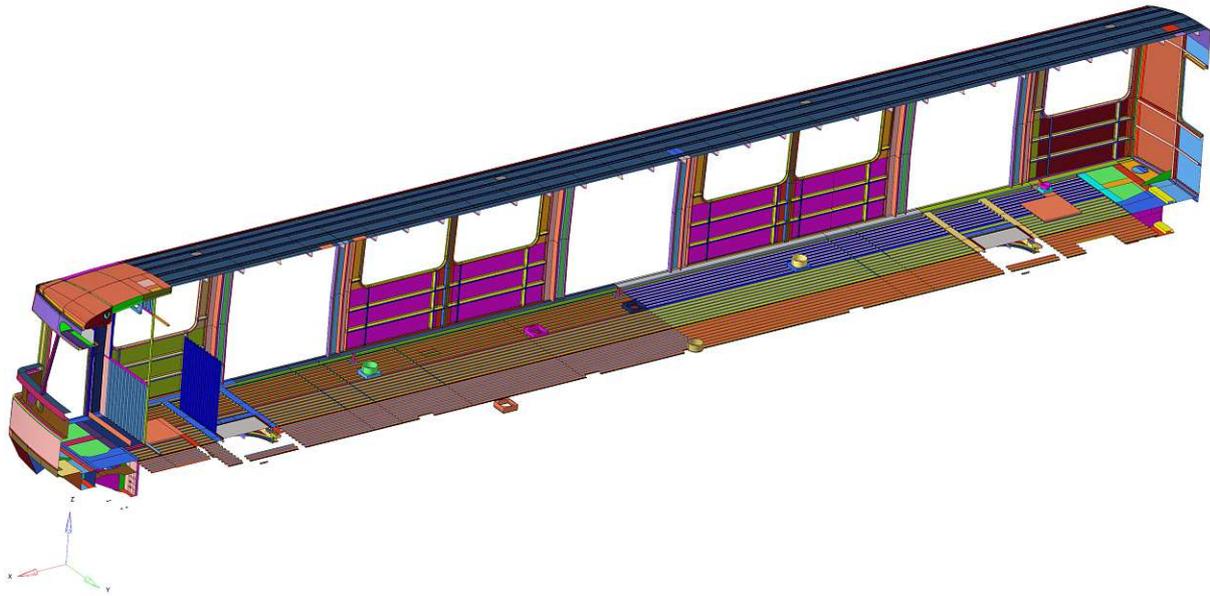


Abbildung 3.2: Mittelflächenmodell des Metro-Wagenkastens

sen in Tonnen ( $t$ ) angegeben.

Aus der Vielzahl der Lasteinleitungssets werden, mittels Makros, die nachfolgenden Informationen extrahiert und in eine extra Datei geschrieben:

- Masse
- Fläche
- Volumen
- Massenschwerpunkt
- Knotenanzahl
- Typ

Die in dieser Arbeit definierten Lasteinleitungssets sind in Abbildung 3.3 ersichtlich. Die Anzahl an Lasteinleitungen entspricht jener von heutigen Metrowagenkästen. Anhand der Daten der Lasteinleitungsset werden anschließend mit Hilfe eines Python-Skript die auf die Struktur aufgebrachten Lasten anhand der Normen und Richtlinien aus Abschnitt 2.3 definiert.

Da das FE-Modell nur den Wagenkastenrohbau als Struktur abbildet und Anbauteile oder

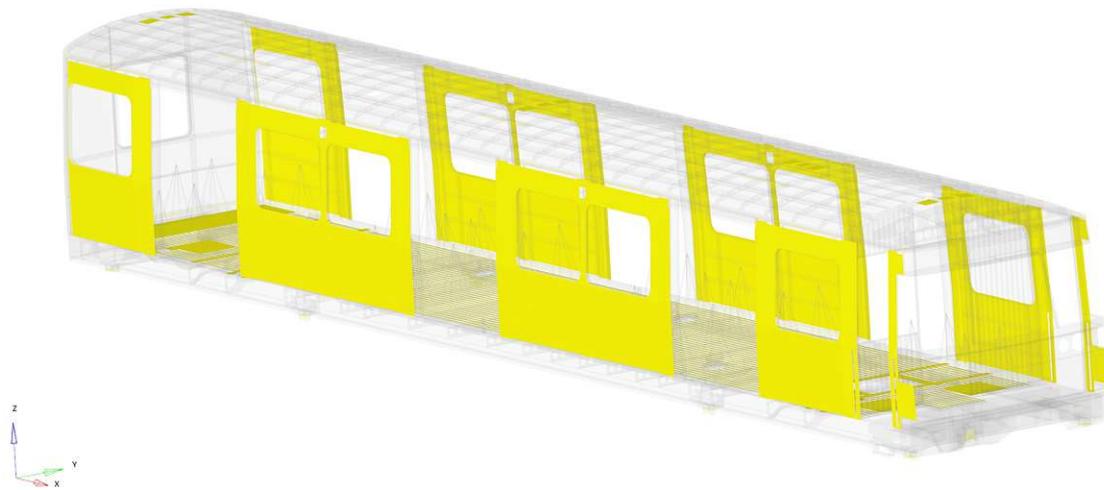


Abbildung 3.3: Darstellung aller Lasteinleitungssets des Wagenkastens

der Innenausbau nicht mit modelliert werden, müssen diese zusätzlichen Massen und dessen Massenmittelpunkte durch das sogenannte Ballastieren mit berücksichtigt werden. Dabei wurden im Vorfeld alle Massen der Komponenten und deren Schwerpunkte in eine Gewichtsliste eingetragen und daraus die Gesamtmasse und der Gesamtschwerpunkt für den Wagenkasten ermittelt. Diese werden im Ballastier-Makro definiert und die Gesamtmasse auf fünf Sets mit sogenannten "non structural masses" verteilt. Bei den genannten Sets handelt es sich um die jeweiligen Großkomponenten des Wagenkastens, also das Dach, die Seitenwand links und rechts sowie das Untergestell vorne und hinten. Durch die Auswahl dieser Sets ist es möglich den Gesamtmassenmittelpunkt des Wagenkastens in jede Koordinatenachsenrichtung zu verschieben.

Die Wagenkastenstruktur ist eine komplexe Schweißbaugruppe und beinhaltet eine Vielzahl unterschiedlicher Schweißnähte. Um dies Nähte in der Simulation berücksichtigen zu können werden im FE-Modell sogenannte "Tracelines" in das Modell eingefügt. Diese werden in *Hypermesh* als Linienzug mit einem Pfeil am Anfang und am Ende der Linie dargestellt. Jede Traceline stellt eine Knotenabfolge dar, welche durch die Auswahl des Start- und Endknotens definiert wird und in Abbildung 3.4 ersichtlich ist. Bei der anschließenden Kerbfalldefinition (siehe Abschnitt 4.2.1) wird jeder Schweißnaht ein lokales richtungsabhängiges Bewertungskriterium an den anliegenden Elementen zugeordnet. Aufgrund der Symmetrie des Metro-Wagenkastens ist es möglich die Schweißnähte nur in einer Hälfte

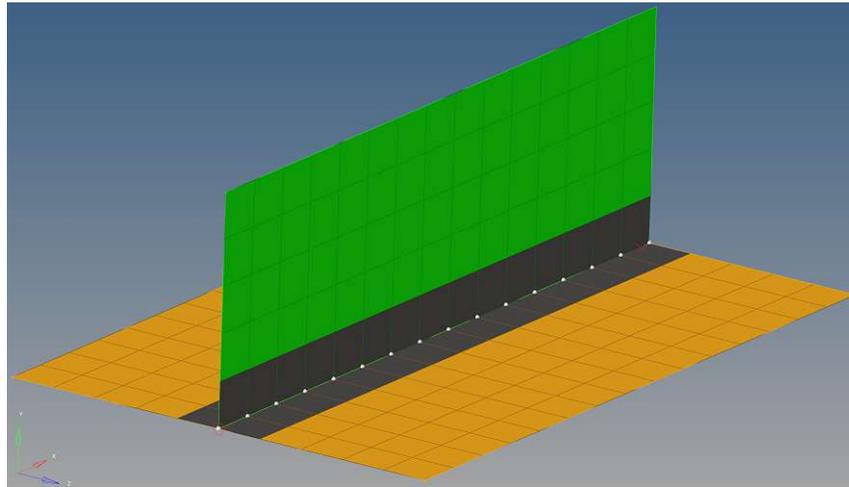


Abbildung 3.4: Traceline - Visualisierung der Knotenabfolge

des Wagens zu definieren. Allerdings ist es notwendig die asymmetrischen Teile der Struktur ebenfalls mit Tracelines zu versehen.

Da die Schweißnähte und deren Wärmeeinflusszone in der Nachweisführung gesondert vom Grundmaterial ausgewertet werden müssen, werden die an einer Traceline anliegenden Elemente einem eigenen Auswertungsset zuzuordnen. Dies erfolgt mit Hilfe eines Makros in *Hypermesh*, welches mit einem Suchradius von 29mm um die Schweißnaht alle eingeschlossenen und angrenzenden Elemente diesem Set zuzuordnet. Es werden nur jene Elemente in das Set inkludiert, welche sich innerhalb des entstehenden Suchzylinders der verschweißten Komponenten befinden, dh. eine Komponente die zwar im Suchradius einer Schweißnaht enthalten ist, aber nicht an der Schweißverbindung beteiligt ist, wird folglich nicht inkludiert.

Die Zuordnung der Elemente in das Set der Wärmeeinflusszone erfolgte somit erst nach der Erstellung der Schweißnähte, mittels Makro. Da nur eine Hälfte der Wagenkastenstruktur mit Tracelines ausgestattet ist (Ausnahme: asymmetrische Bauteile mit Tracelines), gibt es bei diesem Makro die Möglichkeit das Wärmeeinflusszonenset im Falle eines symmetrischen Wagenkastens beidseitig, also gespiegelt, zu erstellen. Diese Option wurde bei diesem FE-Modell gewählt.

Die Abfolge der Modellierung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Mittelflächenerstellung
2. Vernetzung

3. Spiegelung (falls es sich um einen symmetrischen Wagenkasten handelt)
4. Lasteinleitungssets erstellen und exportieren
5. Schweißnähte erstellen, Kerbfälle zuordnen und Export der Tracelines
6. Erstellen der Wärmeeinflusszonen
7. Ballastieren
8. Exportieren des FE-Netzes als Abaqus-Input-File

Nach der Abarbeitung der oben genannten Punkte erhält man ein FE-Netz des Wagenkastens inklusive Schweißnähte als Tracelines, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

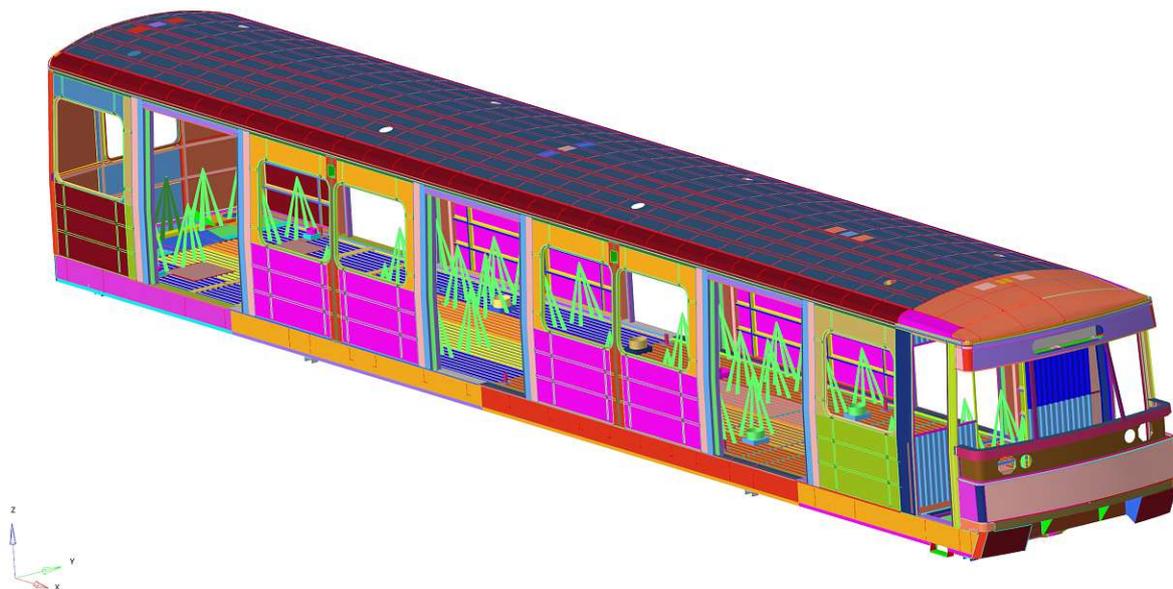


Abbildung 3.5: FE-Modell des Wagenkastens inklusive Tracelines

## 4 Festigkeitsberechnungen

Für den Nachweis der Wagenkastenfestigkeit muss wie in Abschnitt 2.3 beschrieben die statische Festigkeit sowie die Ermüdungsfestigkeit nachgewiesen werden. Dies erfolgt in Form eines Simulationsmodells unter der Anwendung der Finite Elemente Methode. Der zu analysierende Metro-Wagenkasten wird mittels Schalenelementen entsprechend dem Abschnitt 3 diskretisiert. Bei der Modellierung wird darauf geachtet, dass die charakteristische Elementkantenlänge im Vergleich zu jener im gesamten Wagenkasten nicht weit unterschritten wird. Denn je kleiner die Elemente werden desto größer wird der Unterschied zwischen der Strukturspannung, welche mit dem FE-Modell berechnet wird und den zulässigen Festigkeitswerten der DVS 1608, welche als Nennspannungen angegeben sind.

Im Zuge der Modellierung werden die notwendigen Informationen, wie Lasteinleitungsstellen, Auslegungsmasse des Wagenkastens, Schweißnähte (Tracelines), Bereiche mit Wärmeeinflusszone und Kerbfälle definiert. Im Allgemeinen wird nach der Fertigstellung des FE-Modells des Wagenkastens, das FE-Netz als *Abaqus*-Inputfile und die Lasteinleitungssets als Textdatei exportiert. Die darin enthaltenen Informationen sind dem Abschnitt 3 zu entnehmen. Dieses sogenannte Lastenset dient einem Python-Skript als Input. Aus dieser Datei wird beispielsweise die Position, die Masse oder die Knotenanzahl ausgelesen, mit welchem das Skript sowohl die statischen Lastfälle und dessen Überlagerungen nach Abschnitt 2.3.1.1 und 2.3.2.1 sowie die Ermüdungseinheitslasten (siehe Abschnitt 2.3.1.2 und 2.3.2.2) erstellt. Es werden Randbedingungen so gewählt, dass das FE-Modell ein statisch bestimmtes System ist. Vom Python-Skript werden die Reaktionskräfte, wie beispielsweise am Hauptquerträger, berechnet und zusammen mit den aufzubringenden Lasten die *Abaqus*-Inputfiles (statisch und Ermüdung) geschrieben. Wegen der statisch bestimmten Lagerung des FE-Modells und dem Aufbringen der Lasten inklusive der Reaktionskräfte, entstehen in den festgehaltenen Elementknoten der Randbedingungen keine Reaktionskräfte. Die Randbedingungen wurden wie folgt definiert:

Dabei werden bei einem Knoten alle drei translatorischen Freiheitsgrade gesperrt. Beim zweiten Elementknoten wird nur die longitudinale Richtung freigegeben und die beiden anderen Translationsfreiheitsgrade bleiben gesperrt. Der letzte Knoten wird nur in der Vertikalrichtung gesperrt. Damit ist das Kraftsystem vollständig bestimmt und die Reaktionskräfte an diesen RB sollten nach erfolgter Berechnung verschwinden. Die Randbedingungen sind so gewählt, dass ein "natürliches" Deformationsverhalten resultiert. Theoretisch können die RB-Positionen beliebig gewählt werden.

Die Inputfiles, welche die einzelnen Lastfälle beinhalten referenzieren auf das FE-Netz des Wagenkastens und dienen dem FE-Solver *Abaqus 2017* als Eingangsgröße (*engl. input*). Mit diesem Gleichungslöser werden die Spannungen und Deformationen des FE-Modells berechnet, wobei ersteres als Eingangsgröße für die Berechnung des Auslastungsgrades mittels *FAST*<sup>5</sup> darstellt. Die Definition der Auslastungsgrade werden im Abschnitt 4.1.1 und 4.2.3, für den statischen Festigkeitsnachweis sowie den Ermüdungsfestigkeitsnachweis beschrieben.

## 4.1 Statischer Nachweis der Festigkeit

Der statische Nachweis der Festigkeit erfolgt durch die Erstellung der in Abschnitt 2.3.1.1 und 2.3.2.1 beschriebenen Auslegungslasten mit Hilfe eines Python-Skripts. In Summe werden in dieser Arbeit mittels Skript 80 statische Lastfälle erstellt, die entweder einen definierten Auslegungslastfall, wie beispielsweise den zu bewertenden Kupplungsdruck nach DIN EN 12663-1[2] darstellen, oder einen der Lastfallkombination nach VDV 152[10] wie zum Beispiel eine der 16 Kombinationen der Bogenfahrt. Die 16 Kombinationen lassen sich aus der Tabelle 2.5 in Abschnitt 2.3.2.1 anhand der Zeile "Bogenfahrt" ableiten. Durch eine linearen FE-Berechnung werden die Spannungen und Deformationen mit Hilfe des *Abaqus*-Solvers ermittelt. Obwohl die Ermittlung der Deformationen für die weitere Berechnung der Auslastungen nicht notwendig ist wird diese zu Kontrollzwecken ausgegeben. Durch die Darstellung der Ergebnisse im Postprozessor mit einem großen Deformationsfaktor lassen sich einerseits sehr schnell etwaige Modellierungsfehler erkennen und andererseits kann man Informationen über die Durchbiegung des Bodens, Seitenwand- oder Dachpaneelen erhalten. Damit kann die ausgewogene Steifigkeit der Struktur beurteilt werden.

Um aus den ermittelten Strukturspannungen für jedes Element eine Auslastung zu ermitteln wird das *Abaqus*-Ergebnis dem Programm *FAST* übergebenen. Dieses liest die Spannungsergebnisse und die *FAST*-Steuerungsdatei ein. In dieser sind die Materialeigenschaften, Sicherheitsfaktoren bezüglich Streck- und Dehngrenze, Sicherheitskonzept sowie die Informationen aus dem FE-Netz hinterlegt. Aus den Daten des FE-Netzes werden die verwendeten Materialien und die Wärmeeinflusszonen, welche anhand er Tracelines definiert wurden (siehe Abschnitt 3) entnommen. Der Ablauf der statischen Festigkeitsberechnung

<sup>5</sup>eigens entwickeltes Programm von *Siemens Mobility Austria GmbH* zur Berechnung der Auslastungen für die statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit

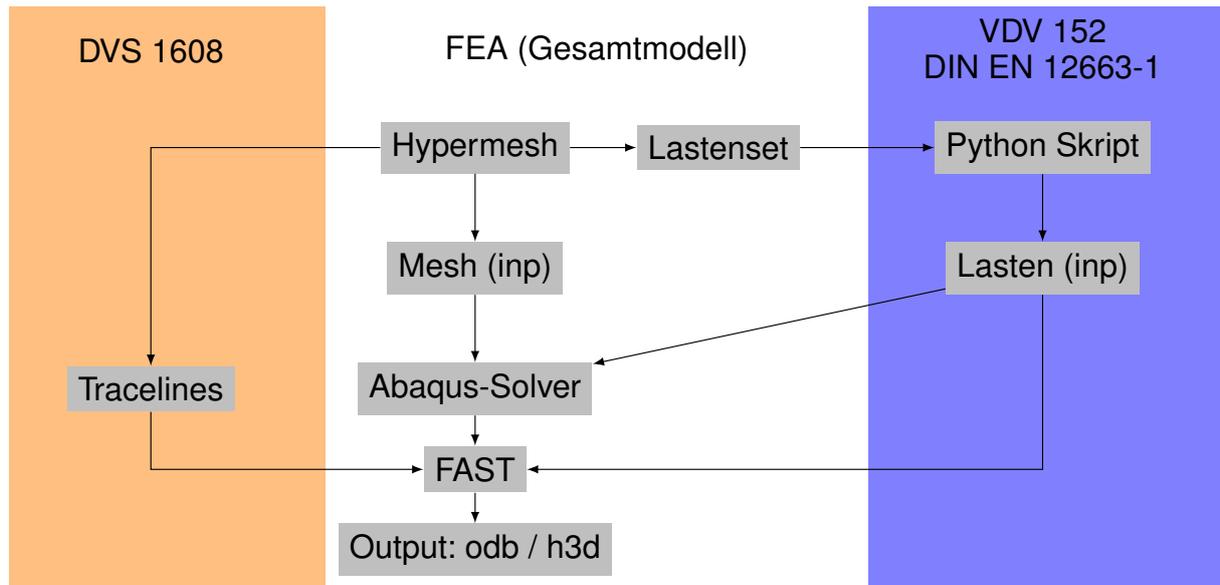


Abbildung 4.1: Flussdiagramm der statischen Festigkeitsberechnung

lässt sich anhand der Abbildung 4.1 darstellen. Der Ausgangspunkt ist das FE-Modell auf dessen Basis die Last- (links, oranger Bereich) und die Widerstandsseite (rechts, blauer Bereich) mit den jeweiligen Informationen versorgt wird. Diese kommen im *FAST* wieder zusammen und bilden damit den mittleren Bereich der Finite Elemente Analyse (FEA).

#### 4.1.1 Berechnung der statischen Auslastung

Um einen statischen Auslastungsgrad aus den Spannungsergebnissen zu erhalten, werden mit den Normalspannungen und der Schubspannung aus dem Spannungstensor eines jeden Elements einerseits die "Von Mises" Vergleichsspannung und andererseits die Hauptnormalspannungen ermittelt. Dies erfolgt an der Schalenober-/unterseite für jeden Lastfall. Die Spannungsermittlung erfolgt durch die Extrapolation vom Gauß'schen Integrationspunkt zu den Elementknoten. Die Spannungen werden im Allgemeinen über die Komponenten gleicher Materialeigenschaften gemittelt. Bei unterschiedlichen Materialeigenschaften, wie beispielsweise bei einem Wandstärkensprung, erfolgt keine Mittelung.

Da es sich beim verwendeten FE-Modell um ein Schalenmodell handelt werden die Normalspannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  sowie die Schubspannung  $\tau_{xy}$  aus den ebenen Spannungstensoren der Schalenergebnisse entnommen. Für den ebenen Spannungszustand ergibt sich die "Von Mises" Vergleichsspannung zu

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (4.1)$$

Da bei Bruchdehnungen  $A_{50} < 6\%$  gegen die betragsmäßig größte Hauptnormalspannung bewertet werden muss (siehe Abschnitt 2.3.3.2), wird diese wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.2)$$

Für die beiden ermittelten Spannungen (Von Mises Vergleichsspannung und Hauptnormalspannung) wird je Elementknoten, je Lastfall  $i$  das Maximum der jeweiligen Spannung

$$\sigma_{vM,max} = \max(\sigma_{vM,i}) \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{I,II,max} = \max(\sigma_{I,II,i}) \quad (4.3)$$

ermittelt und mit diesem Lastfall an dieser Stelle im FE-Modell definierten zulässigen Spannung  $\sigma_{zul,i}$  verglichen und eine Einzelauslastung wie folgt gebildet:

$$a_{stat,i} = \begin{cases} a_{stat,vM,i} = \frac{\sigma_{vM,max,i}}{\sigma_{zul,i}} & \text{für } A_{50} \geq 6\% \\ a_{stat,I,II,i} = \frac{\sigma_{I,II,max,i}}{\sigma_{zul,i}} & \text{für } A_{50} < 6\% \end{cases} \quad (4.4)$$

Die Auswahl der zulässigen Spannung  $\sigma_{zul,i}$  erfolgt anhand des Werkstoffes, der Einordnung in Grundmaterial- oder WEZ-Bereich sowie je nach Lastfall mit den jeweiligen vorgeschriebenen/definierten Sicherheitsfaktoren.

Aus den ermittelten Einzelauslastungsgraden  $a_{stat,i}$  wird anschließend eine Gesamtauslastung  $a_{stat,DVS1608}$  als Maximum der statischen Einzelauslastungen mit

$$a_{stat,DVS1608} = \max(\sigma_{zul,i}) \quad (4.5)$$

gebildet.

Da bereits in den zulässigen Spannungen die notwendigen Sicherheitsfaktoren inkludiert werden, gilt die statische Festigkeit des Wagenkastens als nachgewiesen, wenn die Auslastung  $a_{stat,DVS1608} \leq 1$  ist.

## 4.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Die Ermüdungsfestigkeitsberechnung erfolgt auf Basis einer linear-elastischen Berechnung. Dabei erfolgt eine separate Bewertung des Grundmaterials und der Schweißnähte, wie es bereits im Abschnitt 2.3.3.3 beschrieben wurde. Als Eingangsgröße für die Bewertung mittels *FAST* dienen die von *Abaqus* errechneten Spannungen der Einheitslastfälle. Die Lasten bestehen aus den Einheitsbeschleunigen des Wagenkastens und der Anbauteile  $a_x, \pm a_y, a_z$  mit  $1\text{m/s}^2$ , Seitenwind (von links/rechts) mit  $1\text{Pa}$ , Verwindung, Einheitslasten von  $1\text{kN}$  auf die Kupplung und Dämpfer. Die berechneten Spannungen aus den Einheitslastfälle werden mit dem Programm *FAST* anschließend anhand einer vorab definierten Überlagerungsmatrix überlagert. In der hier behandelten Analyse entstehen dadurch 46 Lastfallkombinationen die von *FAST* berechnet werden, wodurch die Lastseite nach VDV 152[10] abgedeckt ist. Der wesentliche Vorteil dieser Vorgangsweise ist, dass die Spannungen einmalig normiert berechnet werden und anschließend bei der Lastfallüberlagerung nur mehr mit den jeweiligen Faktoren multipliziert werden müssen. Diese Faktoren müssen je nach geforderter Norm, Richtlinie, Streckengegebenheiten oder Kundenwunsch angepasst werden. Durch die Verwendung von Einheitslastfällen wird der Zeitaufwand für den Rechenlauf reduziert. Die Vorgehensweise der Lastfallerstellung mittels Linearkombination von Einheitslasten ist auf linear-elastische FE-Rechnungen beschränkt.

### 4.2.1 Kerbfalldefinition

Für die Schweißnahtbewertung müssen die im FE-Wagenkastenmodell enthaltenen Tracelines, mit den entsprechenden Kerbfällen, je nach Schweißverbindung, definiert werden (siehe Abschnitt 2.3.3.3). Dafür wird jeder Schweißverbindung an jedem Schweißschenkel eine Kerbfalllinie in Längs-, Quer- und Schubrichtung zugeordnet, wobei sich die genannten Richtung aus der Orientierung der Schweißnaht ergeben. Jeder Traceline wird dadurch ein lokales richtungsabhängiges Bewertungskriterium mitgegeben, welches auf die anliegenden Elemente angewendet wird.

Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft die Kerbfalldefinition einer Traceline anhand eines nicht durchgeschweißten Stumpfstoßes. An den vier Zeilen  $1a1$ ,  $1b1$ ,  $2a1$  und  $2b2$  ist zu erkennen, dass die Definition der Kerbfalllinien nicht nur für die drei oben genannten Richtungen zu erfolgen hat, sondern auch für die jeweilige Schalenober- und -unterseite. An der sym-

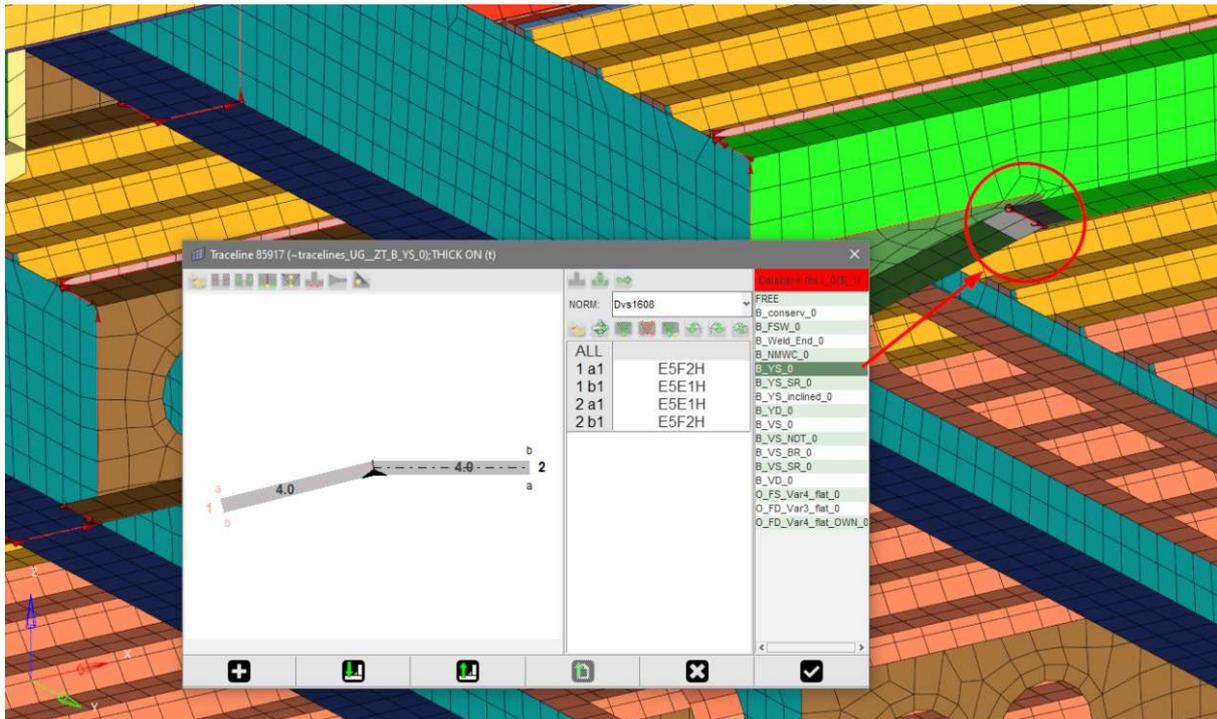


Abbildung 4.2: Beispiel einer Kerbfalldefinition anhand eines Stumpfstoßes

bolisierten Schweißnaht erkennt man, dass es sich bei der Schalenseite  $1a1$  um die Seite mit der offenen Schweißnahtwurzel handelt. Beginnend von links wird hier die Kerbfalldefinition  $E5$  in Schweißnahtlängsrichtung  $\sigma_{\parallel}$ ,  $F2$  für die nicht durchgeschweißte Seite der Schweißnaht in Querrichtung  $\sigma_{\perp}$  und  $H$  für die Schubrichtung  $\tau$  vergeben. Auf der rechten Seite des Kerbfalldefinitions-Makros sieht man, dass es für einen Stumpfstoß wie diesen einige vorgefertigte Kerbfalldefinitionen vorhanden sind, um nicht alle Kerbfalldefinitionen für die jeweiligen Richtungen einzeln vergeben zu müssen.

## 4.2.2 Transformation der Spannungskomponenten

Für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung des Grundmaterials wird die Methode der kritischen Schnittebenen an jedem Elementknoten angewandt (siehe Abbildung 4.3). Ausgehend von einer Basisebene, welche von den Einheitsvektoren  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_2$  aufgespannt wird, erfolgt über den resultierenden Normalvektor  $\vec{n}$  eine Drehung jeweils um den Winkel  $\alpha$  der beiden Basisvektoren. Die Schnittebene wird mit einer Schrittweite von  $15^\circ$  gedreht. Basierend auf den ebenen Spannungszustand ergeben sich die Spannungskomponenten zu:

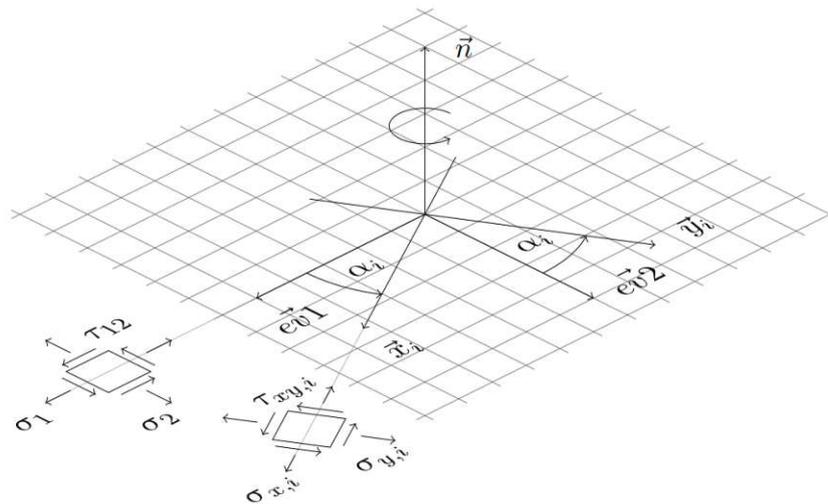


Abbildung 4.3: Methode der kritischen Schnittebenen; Quelle: *Siemens Mobility Austria GmbH*

$$\sigma_x = \sigma_1 \cdot \cos^2(\alpha_i) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\alpha_i) + 2 \cdot \tau_{12} \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i) \quad (4.6)$$

$$\sigma_y = \sigma_1 \cdot \cos^2(\alpha_i) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\alpha_i) - 2 \cdot \tau_{12} \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i) \quad (4.7)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i) + \tau_{12} \cdot (\cos^2(\alpha_i) - \sin^2(\alpha_i)) \quad (4.8)$$

### 4.2.3 Ermüdungsbewertung

In jedem Auswertepunkt wird für jede Schnittebene, Spannungskomponente und Lastfall sowie deren Kombinationen die Ober- und Unterspannung ermittelt. Daraus werden die maximalen Spannungsamplituden sowie das Spannungsverhältnis  $R$  bestimmt, indem die niedrigsten und die höchsten auftretenden Werte aus allen Lastfallkombinationen am Auswertepunkt ermittelt werden. Somit ist für jeden Auswertepunkt eine auftretende Spannungsamplitude bestimmt.

Da die Auslegungsermüdungslasten der VDV 152[10] auf einer Lastspielzahl von  $2 \cdot 10^6$  basieren und die Festigkeitswerte der DVS 1608[4] mit  $10^7$  Lastwechseln angegeben sind, wird ein Umrechnungsfaktor  $f_{2Mio,\sigma/\tau}$  mit Hilfe des Wöhlerlinien-Exponenten  $k_\sigma$  bzw.  $k_\tau$ , der in der DVS 1608[4] vorgegeben ist, wie folgt

$$f_{2M_{io},\sigma/\tau} = \left( \frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^7} \right)^{\frac{1}{k_{\sigma/\tau}}} \quad (4.9)$$

berechnet.

Die zulässigen Spannungsamplituden werden somit anhand des  $R$ -Verhältnisses, der Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_{\sigma}$ , der Wechselfestigkeit  $\sigma_{W,zd,10M_{io}}$ , dem Umrechnungsfaktor  $f_{2M_{io}}$  und dem Materialrisikofaktor  $j_{R,F}$  nach VDV 152[10, S. 35] ermittelt. Beispielhaft wird der zulässige Festigkeitswert für den Druckschwellbereich ( $R_{\sigma} > 1$ ) nach DVS 1608[4] wie folgt berechnet:

$$\sigma_{a,zul} = \frac{1}{j_{R,F}} \cdot f_{2M_{io}} \cdot \frac{\sigma_{W,zd,10M_{io}}}{1 - M_{\sigma}} \quad (4.10)$$

In Gleichung 4.10 wurde der vorhin beschriebene Umrechnungsfaktor (siehe Gleichung 4.9) und der Materialrisikofaktor  $j_{R,F}$  nach VDV 152[10] inkludiert. Für die anderen Spannungsbereiche (siehe Abschnitt 2.3.3.3) wird an dieser Stelle auf die DVS 1608[4] verwiesen.

Für die Ermüdungsbewertung des Grundmaterials werden die Auslastungsgrade für jede Spannungskomponente einzeln bewertet. Die Auslastungen der Einzelkomponenten werden wie folgt berechnet:

$$a_{x,GM} = \left| \frac{\sigma_x}{\sigma_{x,zul}} \right| \quad (4.11)$$

$$a_{y,GM} = \left| \frac{\sigma_y}{\sigma_{y,zul}} \right| \quad (4.12)$$

$$a_{\tau,GM} = \left| \frac{\tau}{\tau_{zul}} \right| \quad (4.13)$$

Aus diesen drei Auslastungen wird ein kombinierter Auslastungsgrad ermittelt:

$$a_{\text{komb},GM} = \sqrt{a_{x,GM}^2 + a_{y,GM}^2 + f_V \cdot a_{x,GM} \cdot a_{y,GM} + a_{\tau,GM}^2} \quad (4.14)$$

$f_V$  ... Vorzeichenfaktor im Bereich:  $-1 \leq f_V \leq 1$

Der Vorzeichenfaktor berücksichtigt dabei die Interaktion der Normalspannungen zueinander (siehe DVS 1608[4, S. 9]).

Aus den vier für das Grundmaterial berechneten Auslastungen wird der Auslastungsgrad als das Maximum der vier Werte bestimmt.

$$a_{\text{DVS1608,GM}} = \max \left\{ \begin{array}{l} a_{x,\text{GM}} \\ a_{y,\text{GM}} \\ a_{\tau,\text{GM}} \\ a_{\text{komb,GM}} \end{array} \right. \quad (4.15)$$

Für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung der Schweißnähte werden die Normalspannungen längs  $\sigma_{\parallel}$  und quer  $\sigma_{\perp}$  zur Schweißnaht sowie die Schubspannungen  $\tau$  herangezogen. Dies erfolgt sowohl für die Ober- und Unterseite eines jeden Schweißnahtschenkels (siehe Abschnitt 4.2.1). Die Beurteilung erfolgt für jedes Element, welches durch die Knotenabfolge (Traceline) ein lokales richtungsabhängiges Bewertungskriterium bekommen hat. Dafür wird die Transformation der Spannungskomponenten, wie bei der Ermüdungsbewertung des Grundmaterials, genutzt um die Spannungen in den jeweiligen Schweißnahtverlauf abhängigen Richtungen zu erhalten. Aus diesen werden wiederum die Ober- und Unterspannungen für jeden Elementknoten und jeden Lastfall ermittelt, womit in weiterer Folge die Spannungsverhältnisse  $R$  für die Berechnung der zulässigen Spannungswerte berechnet werden.

Wie beim Grundmaterial wird auch bei einer Schweißverbindung der Umrechnungsfaktor  $f_{2Mio}$  sowohl für die Normal-, als auch für die Schubspannungen berechnet. Die Wöhlerlinien-Exponenten unterscheiden sich bei den Schweißnähten von jenen des Grundmaterials. Die Ermittlung der Einzelauslastungen und der kombinierten Auslastung erfolgt äquivalent zur oben beschriebenen Methode für das Grundmaterial.

Bei den berechneten Auslastungsgraden handelt es sich um vorläufig berechnete Auslastungen, welche für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach VDV 152[10] um den allgemeinen Sicherheitsfaktor  $j_D$  erhöht werden. Dabei wird für das Grundmaterial und für Schweißverbindungen ein Sicherheitsfaktor von  $j_{D,\text{GM}} = 1,17$  und  $j_{D,\text{SN}} = 1,25$  berücksichtigt. Damit lässt sich die endgültige Ermüdungsauslastung mit

$$a_{\text{Erm.,DVS1608,GM/SN}} = a_{\text{DVS1608,GM/SN}} \cdot j_{D,\text{GM/SN}} \quad (4.16)$$

berechnen.

Da die allgemeinen Sicherheitsfaktoren bereits im Auslastungsgrad der Ermüdungsberechnung enthalten sind, gilt der Ermüdungsfestigkeitsnachweis als erbracht, wenn es im FE-Modell des Wagenkastens keine Stellen mit  $a_{\text{Erm.,DVS1608,GM/SN}} \geq 1$  gibt.

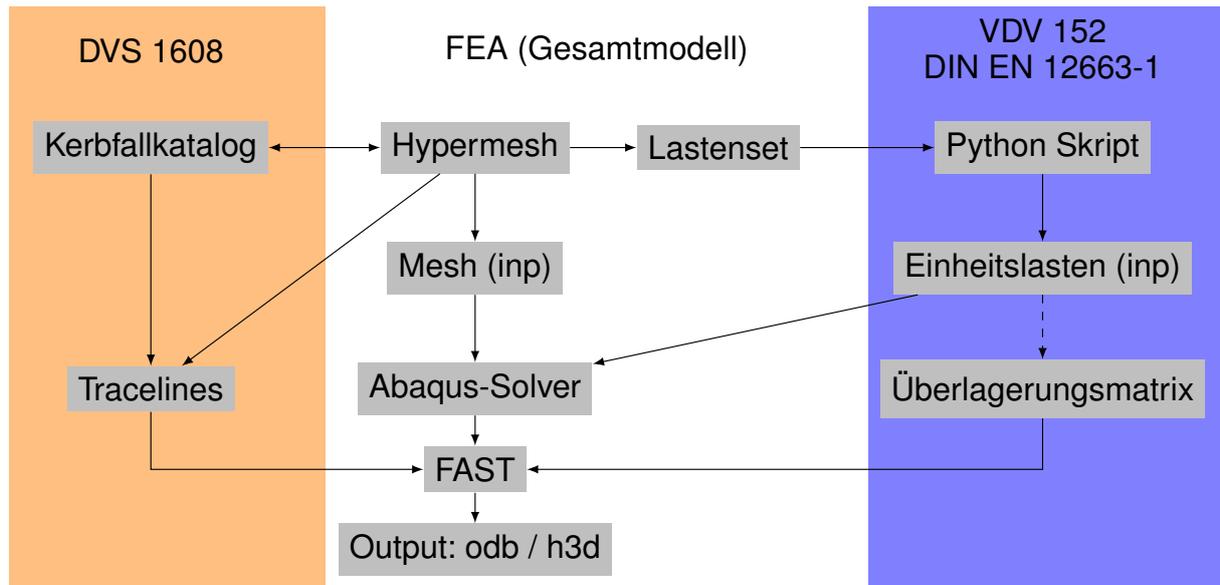


Abbildung 4.4: Flussdiagramm der Ermüdungsfestigkeitsberechnung

Im Allgemeinen lässt sich der Ablauf der Ermüdungsfestigkeitsberechnung anhand der Abbildung 4.4 veranschaulichen. Ähnlich wie bei dem Nachweis der statischen Festigkeit ist die Basis das FE-Modell, welches in diesem Fall für die Widerstandsseite (orange, linker Bereich) zusätzlich zu den Tracelines auch die Kerbfalld Definitionen anhand des Kerbfalkatalogs beinhalten muss. Auf der Lastseite (blau, rechter Bereich) ist zusätzlich eine Überlagerungsmatrix erforderlich, mit welcher die Lastfallkombinationen, anhand der Einzellastfälle im *FAST* gebildet werden.

# 5 Beurteilung des Bewertungsmodells

## 5.1 Nennspannungen versus Strukturspannungen

Wie im Abschnitt 2.3.3 beschrieben, basieren die Festigkeitswerte des Kerbfallkatalogs der DVS 1608[4] auf Dauerfestigkeitswerten, welche für den Einsatz des Dauerfestigkeitsnachweises mittels Nennspannungskonzepts ermittelt wurden. Allerdings liefert das erstellte FE-Modell, aufgrund der verwendeten Schalenelemente mit der gewählten Netzfeinheit, eigentlich Strukturspannungen. Auf diese Problematik wird in der DVS 1608[4], wie in Abschnitt 2.3.3.1 beschrieben, eingegangen.

Es kann generell festgestellt werden, dass die Problematik der höheren Strukturspannungswerte gegenüber den Nennspannungswerten durch die heute möglichen hohen Netzfeinheiten bzw. kleineren Finiten Elemente immer mehr Einfluss gewinnt.

Dadurch ergibt sich die folgende Problematik, dass bei feinen Netzen an Steifigkeitssprüngen hohe Strukturspannungen errechnet werden, welche dann mit einem Nennspannungswert, nämlich dem zulässigen Wert aus der DVS 1608[4] verglichen werden. Damit erhält man eine zu konservative Beurteilung, da die Strukturspannungswerte immer größer oder gleich den Nennspannungswerten sind. Daher versucht man durch Abstandsbewertung (unabhängig von der Netzfeinheit) den Strukturspannungseinfluss zu reduzieren.

Bei der Schweißnahtbewertung mittels *FAST* ist es möglich die Auswertepunkte für Schweißnähte zu verschieben bzw. für jede Schalenseite, entlang einer Traceline, zu definieren. Anfänglich wird eine konservative Einstellung im Kerbfallkatalog des *Hypermesh*-Makros ausgewählt, indem aus den vordefinierten Kerbfällen jene mit dem Suffix *\_0* verwendet werden. Die Auswertepunkte der Schweißverbindung befinden sich in diesem Fall an der Schalenober- bzw. -unterseite in der Schweißnahtwurzel und an dessen gegenüberliegenden Schalenseiten, wie es in Abbildung 5.1 anhand der blauen Punkte dargestellt wird (türkis & orange = Schalenelemente + Elementknotenpunkte). Bei der Wahl dieser Auswertepunkte kann es dazu kommen, dass die zulässigen Spannungsamplituden mit jenen von Spannungsspitzen verglichen werden.

Durch die Wahl eines vordefinierten Kerbfalles (ohne Suffix *\_0*) werden die Auswertepunkte hier beispielsweise um 8mm (Annahme einer DMS-Messgitterlänge von 6mm) vom Nahtübergang ausgehend verschoben. Die Auswertepunkte sind in der Abbildung 5.1 mittels der limefarbenen Punkte dargestellt. Eine Besonderheit stellen die beiden Auswertepunkte der Schalenelemente ohne Schweißnahtübergang dar, also an jenen Schweißschenkeln an

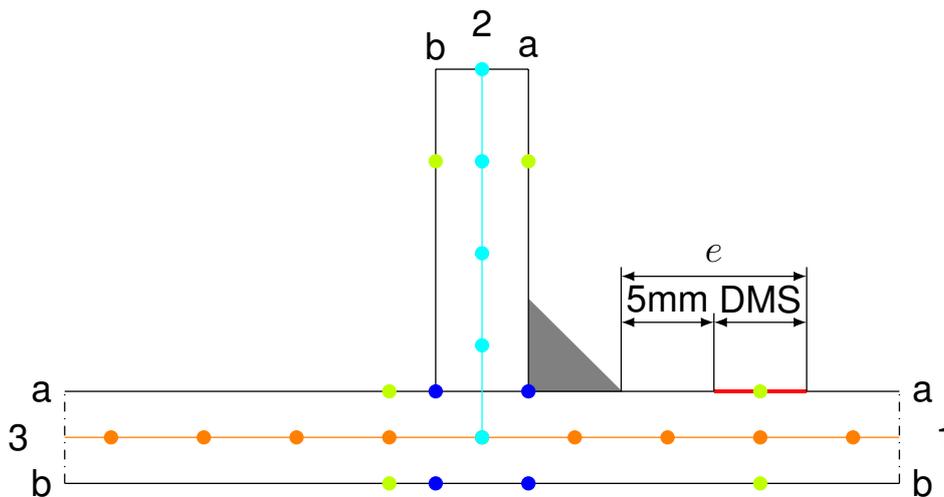


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der verschiedenen möglichen Auswertepunkte

welchen sich keine Schweißnaht befindet (Schenkel  $2b$  und  $3a$  in Abbildung 5.1). In diesem Fall wird der Abstand ausgehend von der Nahtwurzel berechnet. Diese Methode ist allerdings mit großer Vorsicht anzuwenden, da die Auswertepunkte, je nach Schalenelementlänge, auch auf einem eventuell benachbartem dickeren Schalenelement liegen könnten, wie es in der Abbildung 5.2 dargestellt wird. Dieser Fall tritt ein, wenn der Abstand  $e$ , betrachtet im Querschnitt der Schweißnaht, größer als die charakteristische Elementkantenlänge der Schweißnaht ist. Dadurch würde es zu einer Auswertung der Schweißnaht am dickeren Grundmaterial kommen (hier von  $t_3$ ). Für die Traceline wird folglich ein Auslastungsgrad anhand jener Spannungswerte am Auswertepunkt mit zulässigen Werten verglichen. Dadurch kann es in dem dargestellten Fall zu ungewollt geringeren Auslastungen kommen, da anstelle der Spannungswerte basierend auf der Wandstärke  $t_2$  jenen der dickeren Wandstärke  $t_3$  verwendet werden.

Falls die Elementkantenlänge kleiner als der Abstand  $e$  ist, wie im Falle der hellgrün dargestellten "Verbindungselementen", wird der Abstand der Auswertepunkte auf 0 gesetzt und wie in der Abbildung 5.1 anhand der blauen Punkte dargestellt an der Schweißnahtober- und -unterschenkel positioniert.

Zusätzlich verschärft wird die beschriebene Problematik dadurch, dass aktuell die Wandstärken der an der Traceline anliegenden Schalenelemente meistens reduziert werden, um das a-Maß aus der Schweißzeichnung mitzubersichtigen. Diese Reduktion erfolgt sobald ein a-Maß kleiner als die Wandstärke des anzuschließenden Bauteils ist sowie bei Überlappstößen wo meistens oftmals ein z-Maß angegeben wird, welches auf ein a-

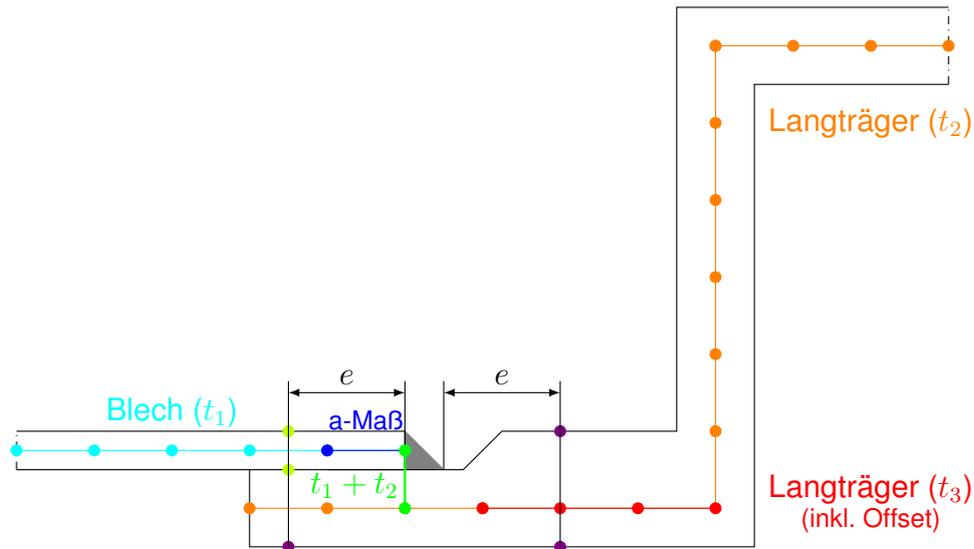


Abbildung 5.2: Grafische Darstellung - Falsch positionierter Auswertepunkt (falsche Wandstärke)

Maß umgerechnet wird (siehe Abschnitt 5.2.1). Mit dieser Modellierungsmethodik verfolgt man einen konservativen Ansatz indem bei einer Schweißnaht davon ausgegangen wird, dass nur das Mindestmaß des Schweißnahtquerschnitts als tragender Querschnitt angesehen wird. Dadurch werden Strukturspannungswerte an der reduzierten Wandstärke der Schweißnaht errechnet, welche nicht mehr der vorhandenen Geometrie entsprechen. Diese werden dann allerdings wieder mit den zulässigen Nennspannungswerte der DVS 1608[4] verglichen, wodurch es meistens zu deutlichen höheren Auslastungen kommt.

Aufgrund dessen ist die beschriebene Vorgehensweise mit größter Vorsicht anzuwenden und eine händische Definition der jeweiligen Auswertepunkte je Schenkel und Schalenseite empfohlen. Daher werden im Allgemeinen die konservativen Auswertepunkte verwendet und in Ausnahmefällen auf die manuelle Auswertepunktmethodik zurückgegriffen.

## 5.2 Schalenmodellierung von Strukturdetails

Im Schienenfahrzeugbau erfolgt die FE-Wagenkastenmodellierung im Allgemeinen mittels Schalenelementen. FE-Schalenelemente sind bei Blechkonstruktionen wie eben Karosserien, wo die Tragelemente um Größenordnungen dünner sind als die Abmaße der Struktur die effizienteste Modellbildung. Bei typischen Wagenkästen sind die Wandstärken im Bereich um 3mm, die Wagenlänge beträgt 30m und ist damit um vier Zehnerpotenzen größer. Bei Profilen und Blechen werden die Schalenelemente zumeist in die Mittelebene der ab-

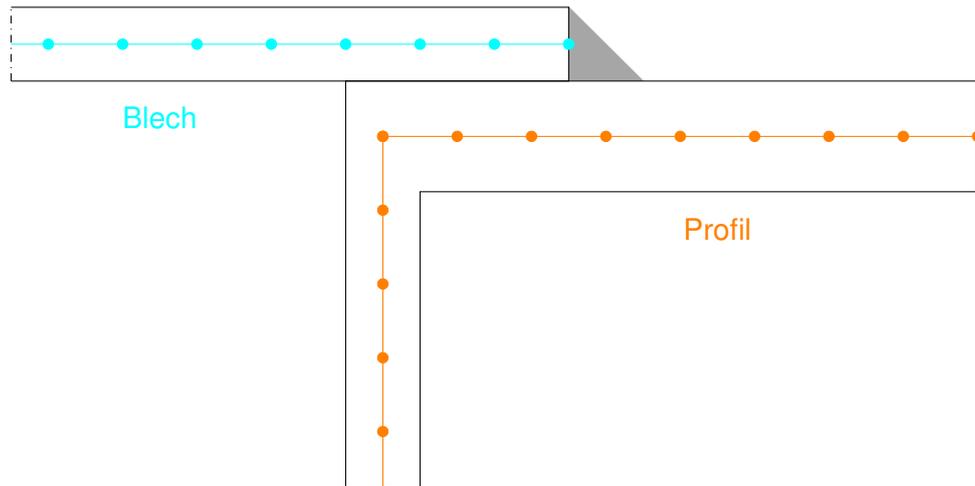


Abbildung 5.3: Abstand der Mittelflächen im Modell des Schiebesitzes

zubildenden Geometrie erstellt (vergleiche Abbildung 5.1). Solange etwaige Bleche oder Profile, wie zum Beispiel Türsäulen, entweder Stumpf oder T-Stoß ähnlich (unter Umständen mit einem Anschlusswinkel  $\neq 90^\circ$ ) angebunden werden ist eine Modellierung anhand von Mittelflächen einfach zu erstellen und Elementknotenpunkte treffen meist exakt aufeinander. Bei der Anbindung von dünnwandigen Blechen an dickwandigen Profilen kann es notwendig sein, dass die Bleche mit einem Offset versehen werden.

Diese beschriebenen Schweißverbindungen sind in der oben beschriebenen Art notwendig, denn im Schienenfahrzeug werden an verschiedenen Stellen im Wagenkasten sogenannte Schiebesitze vorgesehen um einen Toleranzausgleich und damit eine einfachere Fertigung zu gewährleisten. Eine typische Stelle für einen Schiebesitz ist die Anbindung des Bodens an den Langträger. Der Schiebesitz zeichnet sich dadurch aus, dass es zu einem sogenannten Überlappstoß kommt, wo beispielsweise das Blech eine gewisse Überlappungszone mit dem Profil hat und auf diesem aufliegt. Damit ist eine Toleranz für die Lage der Schweißnaht gegeben. Verwendet man bei der Schalenmodellierung konsequent die Mittelflächen der CAD-Geometrie, entsteht im Modell ein Spalt zwischen den eigentlich verschweißten Komponenten, wie es in der Abbildung 5.3 gezeigt wird. Die Schalenelemente und Elementknoten des Blechs, welches an ein Profil mittels Überlappstoß angeschweißt wird, ist in lila dargestellt. Jene des Profils sind in orange abgebildet. In grau ist die Kehlnaht der Schweißverbindung ersichtlich. Um den Spalt im FE-Modell des Schiebesitzes zu überbrücken existieren unterschiedliche Modellierungsmethoden, welche in der Festigkeitsberechnungsabteilung der *Siemens Mobility Austria GmbH* angewandt werden. Im Zuge

dieser Arbeit wurden alle gebräuchlichen Varianten modelliert und berechnet.

Abbildung 5.4 zeigt die unterschiedlichen in dieser Arbeit angewandten Modellierungsmethodiken.

### 5.2.1 Variante 1

Die derzeitig häufigst angewandte Modellierung eines Schiebesitzes ist die Variante 1. Bei dieser Methode werden die FE-Schalenelemente, nach Möglichkeit, in den Mittelebenen der 3D CAD-Geometrie erstellt. Dabei ist zu beachten, dass die Elemente aufgrund der unterschiedlichen Ebenen der Geometrie, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, miteinander verbunden werden müssen, um die Kräfte und Momente zu übertragen. Um dies zu gewährleisten werden bei der Variante 1 an den jeweiligen Positionen der Schweißnähte dicke, vertikale “Verbindungselemente” eingefügt, welche aus Schalenelementen bestehen und alleinig zur Verbindung der Komponenten dienen. Dadurch wird die Mittelflächengeometrie möglichst genau mit den Schalenelementen abgebildet.

Die Wandstärke dieser “Verbindungselemente” ergibt sich aus der Summe beider zu verschweißenden Komponentenwandstärken mit  $t_1 + t_2$ . Bei dieser Art von Überlappstößen wird in den Schweißzeichnungen meistens ein z-Maß angegeben. Dabei wird die Schweißschenkellänge einer Kehlnaht angegeben, welche vereinfacht anhand eines gleichschenkligen Dreiecks dargestellt wird. Die minimale Querschnittshöhe, über welchen die Kräfte und Momente übertragen werden können, wird durch die Division durch  $\sqrt{2}$  ermittelt, was dem a-Maß der Kehlnaht entspricht. Bei einem Überlappstoß ist am Ende der Überlappungszone jeweils mit der minimalen Wandstärke zu bewerten, welche für die Übertragung der Kräfte und Momente verfügbar ist. Dies wird mit einer Reihe von Elementen, mit einer verringerten Wandstärke, an der Kehlnaht realisiert, wie es in der Abbildung 5.4(a) durch die in blauen und roten Elemente dargestellt wird.

Diese Modellierungsmethode ist sehr konservativ und umstritten, da das Berechnungsergebnis in der Schale mit reduziertem Querschnitt keinen Spannungszustand repräsentiert, der in der Kehlnaht auftritt (Biegespannung statt Schub). Außerdem ist der zulässige Wert der DVS 1608[4] ein Nennspannungswert, also auf die volle Wandstärke bezogen.

Die beiden Kehlnähte können in diesem Falle nicht wie bei einem T-Stoß oder einer Stumpfnaht mit einer Traceline definiert werden, da sich die zu verbindenden Komponenten überlappen und sich somit nicht in einer Ebene entlang einer Linie treffen. Daher ist es bei

dieser Modellierungsmethode notwendig vier Tracelines für diesen Überlappstoß zu definieren, welche sich jeweils entlang der grünen Punkte in Abbildung 5.4(a) erstrecken. Die vertikalen Elemente werden bei dieser Variante mit den Kerbfalllinien der Wärmeeinflusszone bewertet.

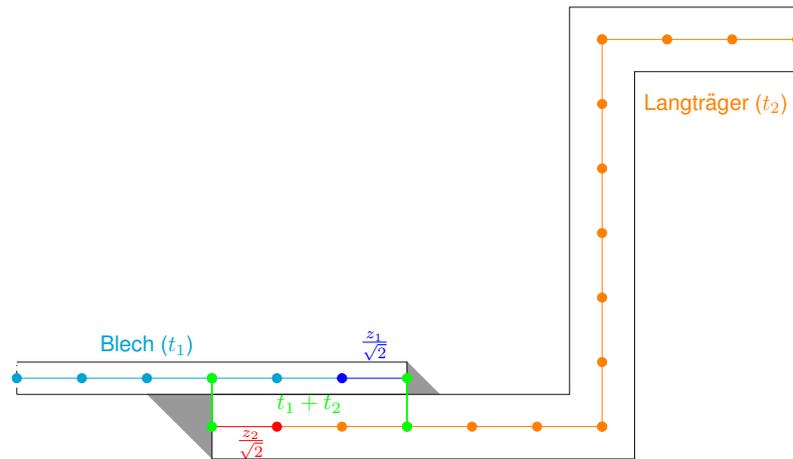
## 5.2.2 Variante 2

Bei der Modellierung nach Variante 2 ist in Abbildung 5.4(b) ist zu erkennen, dass der Langträger als auch das Blech, wie bei der Variante 1 in der Mittelebene der 3D CAD-Geometrie modelliert wird. Die Unterscheidung ist die andere Gestaltung der Überlappungszone. In dieser Variante wird der Abstand der beiden Schalenelementebenen mit schrägen, dickeren Schalenelementen überbrückt. Diese Wandstärke der schrägen Elemente ergibt sich wieder aus der Summe der beiden Wandstärken der zu verschweißenden Komponenten ( $t_1 + t_2$ ). Es wird in dieser Variante davon ausgegangen, dass die Überlappungsbreite recht klein ist und damit eine Stützwirkung durch die Doppelkehlnaht vorhanden ist. Damit entfällt hier auch eine Abminderung der Wandstärken auf das a-Maß der Schweißnaht am Ende der Überlappzone.

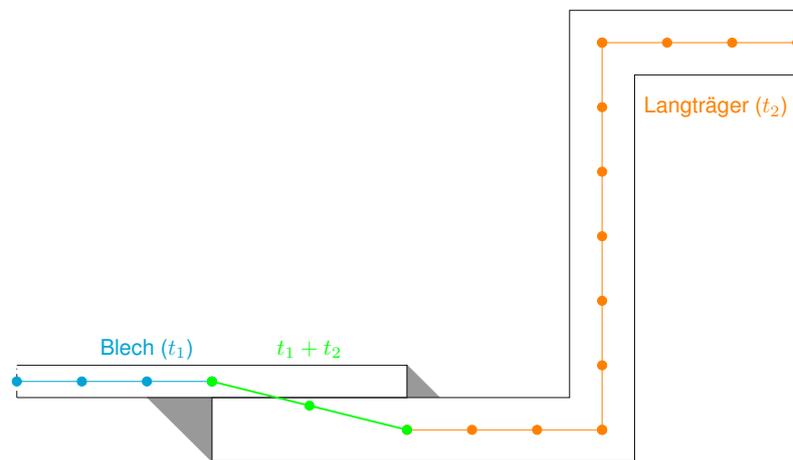
## 5.2.3 Variante 3

Die Modellierung nach Variante 3 zeigt Abbildung 5.4(c). In dieser Variante wird auf den vertikalen Versatz des Bleches (bei diesem Beispiel) verzichtet. In diesem Fall wird das Blech wie bei einem Stumpfstoß direkt in der Abschlussebene des Langträgers modelliert und in der Mitte der Überlappzone mit einer Traceline versehen. Dabei ist die überlappende Komponente, in diesem Beispiel das Blech, mit dem Nahtquerschnitt zu versehen.

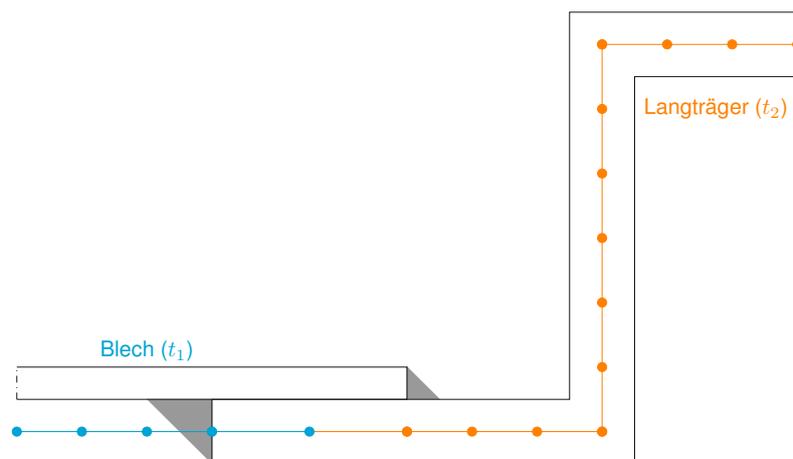
Diese Modellierung entspricht am ehesten der Philosophie einer reinen Nennspannungsbewertung bei der keine lokalen Biegeeffekte berücksichtigt werden. Der Vergleich mit den zulässigen Nennspannungen aus der DVS 1608[4] ist bei dieser Modellierung am plausibelsten. Der Nachteil dieser Modellierung ist die Aufgabe der Mittelflächenmodellierung der Bleche, was die standardisierte Modellierungsvorgabe erschwert, da jede Überlappung "händisch" modelliert werden muss.



(a) Variante 1



(b) Variante 2



(c) Variante 3

Abbildung 5.4: Darstellung der unterschiedlichen Scherflussmodellierungsmethoden



# 6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der statischen Festigkeit sowie der Ermüdungsfestigkeit, für einen in der 70er Jahren ausgelegten Wagenkasten gezeigt.

Die Wagenstruktur wurde in der vorliegenden Arbeit nach den heute gültigen Normen und Richtlinien mittels Finiter Elemente Simulation berechnet. Einige Konstruktionsdetails der Wagenkastenstruktur werden mit verschiedenen Modellierungs- und Auswertungsarten bewertet und die Ergebnisse gegenüber gestellt.

Ziel ist es, die Art der Modellierung und Auswertung so zu wählen, wie sie für die aktuellen Projekte verwendet werden. Zu konservative Berechnungsergebnisse, welche vorhersagen, dass die Ermüdungsfestigkeit einiger Schweißnähte für die Betriebsdauer des Fahrzeuges nicht gegeben ist, sollen hinterfragt werden, da dies im realen Fahrzeug nicht eingetreten ist.

## 6.1 Festigkeitsergebnisse

Die Ergebnisse die in dieser Arbeit dargestellt werden entsprechen einem, an heutigen Entwicklungsmethoden gemessenen, FE-Modellstand in der Phase der konzeptionellen Strukturentwicklung (*engl. Conceptual Design Review = CDR*) . Das bedeutet, dass das FE-Modell die Wagenkastenstruktur und damit dessen Steifigkeit ausreichend genau abbildet und alle relevanten Lasten und dessen Einleitungen in die Struktur definiert sind. Es kann in diesem Stadium allerdings noch zu geometrischen Änderungen von Komponenten, Profilen oder Massen im Unterflurbereich kommen. Neben den möglichen Änderungen von Seiten der Konstruktion zeichnet sich dieser Entwicklungsstand auch durch die konservative Bewertung der Schweißnähte aus. Damit befinden sich einerseits noch ein beträchtlicher Anteil an Schweißnähten in dieser Arbeit, welche wie in jedem Wagenkasten am Anfang der Entwicklung, eine einheitliche, konservative Kerbfalldefinition an allen Schweißschenkeln mit *E5, F2, H* (Kerbfalllinien in längs, quer und Schubrichtung) aufweisen. Damit werden je Richtung jene Kerbfalllinien der DVS 1608[4] vergeben, welche die geringsten zulässigen Festigkeitswerte besitzen. Andererseits wurden die derzeit üblichen Abminderungen der Wandstärken bei Schweißnähten mit einem kleineren  $\alpha$ -Maß als die angeschlossenen Wanddicken nicht immer vorgenommen, da diese Anpassungen äußerst zeitintensiv (und umstritten) sind. Um einen Wagenkasten von der beschriebenen Entwicklungsphase (CDR) zu einem finalen Entwicklungsstand (*engl. Final Design*) zu modellieren würde den

Rahmen einer Diplomarbeit sprengen, dazu sind erfahrungsgemäß im Allgemeinen drei Festigkeitsberechnungsingenieure für ein Jahr beschäftigt.

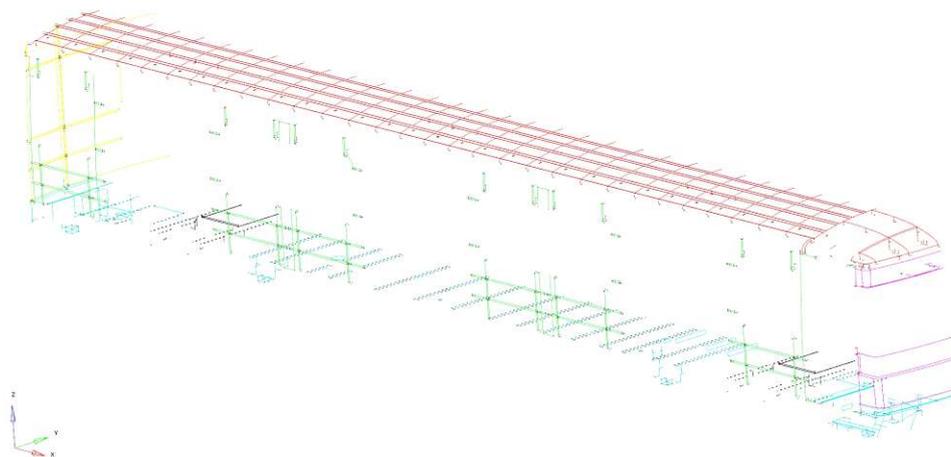
Üblicherweise werden jene Schweißnähte, welche mit den konservativsten Kerbfalllinien Auslastungen kleiner 1 aufweisen bei dieser Kerbfalldefinition belassen, denn in diesem Fall kann jene Schweißnahtart ausgeführt werden. Alle anderen Schweißverbindungen mit einem Auslastungsgrad größer 1 sind entsprechend der Schweißzeichnungen, falls vorhanden, definiert und bewertet worden. Im Falle von fehlenden Schweißzeichnungen sind die Schweißnähte anhand der Ingenieurserfahrung bewertet worden. Beispielsweise ist die Schweißzeichnung der Türsäule zur Anbindung an den Untergestell-Longträger nicht mehr auffindbar gewesen, wodurch eine heute üblicherweise verwendete Y-Naht für diese Verbindung definiert worden ist. Insgesamt wurden so rund 1000 von etwa 5500 Schweißnähten an einer Wagenkastenhälfte einzeln individuell definiert. Alle so definierten Tracelines sind mit den üblichen konservativen Auswertepunkten (siehe Abbildung 5.1 in Abschnitt 5) bewertet worden.

Abbildung 6.1 zeigt eine Visualisierung der Schweißnähte des Metrowagenkastens. Links (Abbildung 6.1 (a)) sind jene Tracelines zu sehen, die mit den konservativsten Kerbfalllinien der DVS 1608[4] bewertet wurden ( $E5$ ,  $F2$ ,  $H$ ). Abbildung 6.1 (b) zeigt alle manuell definierten Schweißverbindungen des Wagenkastens.

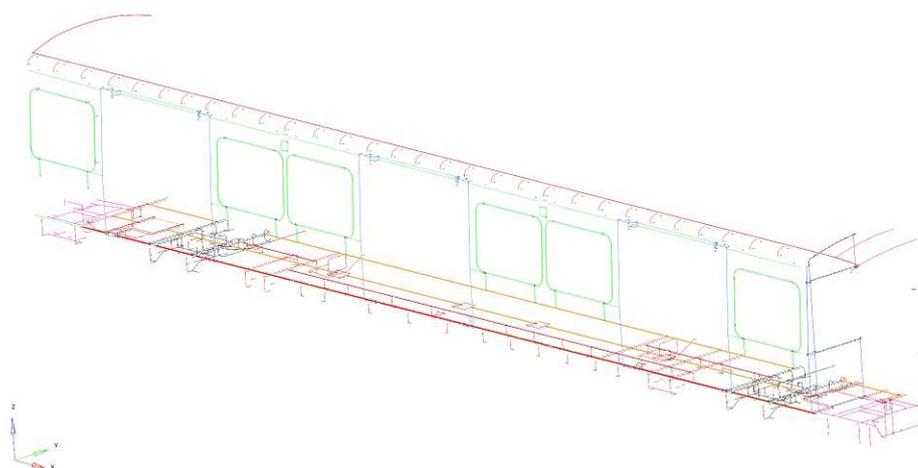
### 6.1.1 statische Festigkeit

Abbildung 6.2 zeigt einen Contourplot der statischen Auslastungen  $a_{stat,DVS1608}$ , welche im Abschnitt 4.1.1 beschrieben wurden. Dieser Auslastungsgrad beinhaltet bereits alle maximalen Einzelauslastungen und dessen kombinierte Auslastung und sollte für einen erfolgreichen Nachweis keine Werte größer 1 aufweisen.

Zu erkennen ist, dass der Metrowagenkasten den statischen Festigkeitsnachweis nach der aktuellen normativen Lage nicht besteht und damit so nicht mehr neu zugelassen werden würde. Alle Elemente mit einer Auslastung größer 1 wurden in der Abbildung 6.2 mit rot markiert. Einige hoch ausgelastete Stellen, sind damals allerdings nicht so kritisch beurteilt bzw. erst anhand von neuen Erkenntnissen in die Normen aufgenommen worden. Beispielhaft ist hier der Bereich der Maske und der Einstieg für das Fahrpersonal großflächig überlastet. Diese Überlastung ist dem Druck auf den Stirnwandbereich aus den statischen Auslegungslastfällen der DIN EN 12663-1[2] geschuldet, welcher wiederum bei der Last-



(a) Konservativ bewertete Schweißnähte im Wagenkasten ( $E5$ ,  $F2$ ,  $H$ ; Kerbfalllinien nach DVS 1608[4] mit den geringsten zulässigen Festigkeitswerten)



(b) Ausdefinierten Schweißnähte des Wagenkastens

Abbildung 6.1: Visualisierung der Schweißnähte des Wagenkastens

höhe die Kollisionssicherheit nach DIN EN 15227 mitberücksichtigt und zum Zeitpunkt der Entwicklung des Fahrzeuges noch nicht als Auslegungskriterium existierte.

Es gibt noch mehrere Stellen, für die der heutige konservative statische Nachweis nicht erbracht wird. Hier kann jedoch heute durch nicht-lineare Rechnungen, beispielsweise mittels Verwendung von plastischen Materialverhalten, noch einiges „gerettet“ werden. In dieser Arbeit wird jedoch darauf nicht weiter eingegangen, da der Fokus ganz klar auf die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit gerichtet ist.

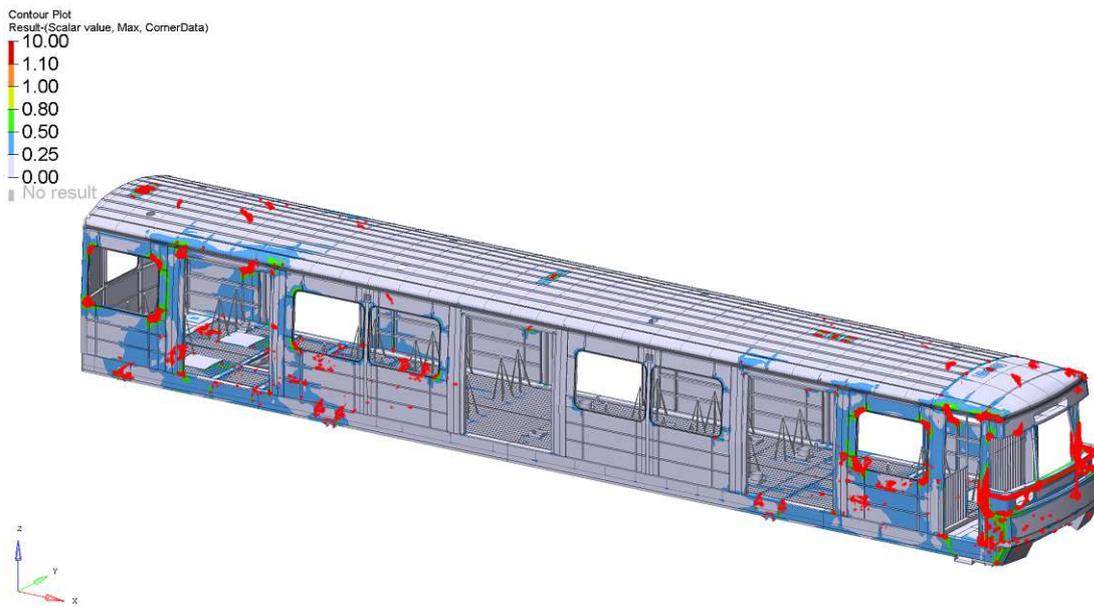


Abbildung 6.2: Auslastungsergebnisse - Darstellung der maximalen Auslastungen aller Lastfälle des statischen Festigkeitsnachweises

### 6.1.2 Ermüdungsfestigkeit

Die Auslastungen der Ermüdungsfestigkeit  $a_{Erm.,DVS1608,GM/SN}$  sind in der Abbildung 6.3 anhand eines Contourplots dargestellt. Dieser beinhaltet bereits die allgemeinen Sicherheitsfaktoren für das Grundmaterial und die Schweißverbindungen. Wie im Abschnitt 4.2.3 beschrieben sind in der oben genannten Auslastung die maximalen Auslastungsgrade aller maximalen Einzelauslastungen sowie die kombinierte Auslastung inkludiert. Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ist folglich dann erfüllt, wenn im FE-Wagenkastenmodell keine Stellen existieren mit einer Auslastung  $a_{Erm.,DVS1608,GM/SN} > 1$ .

Analog zum vorherigen Abschnitt 6.1.1 sind jene Elemente mit einer Auslastung größer 1 mit einer roten Markierung versehen worden. Es soll hier erwähnt sein, dass viele Schweißnähte im Wagenkasten als abgesetzte Schweißnähte ausgeführt wurden, welche im FE-Modell zur Vereinfachung jedoch durchgezogen verbunden modelliert sind. Auf die daraus resultierende Fragestellung der nicht konservativen Bewertung solcher abgesetzter Schweißnähte wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Auch hier ist festzustellen, dass der Wagenkasten aus den 70er Jahren, welcher mit dem aktuellen Normenstand berechnet wurde, heutzutage so nicht mehr zulassungsfähig wäre, was an den zahlreichen überlasteten Stellen der Abbildung 6.3 zu erkennen ist.

Da die Wagenkästen, trotz ihrer zahlreichen Überlastungen, eine Lebensdauer von mehr

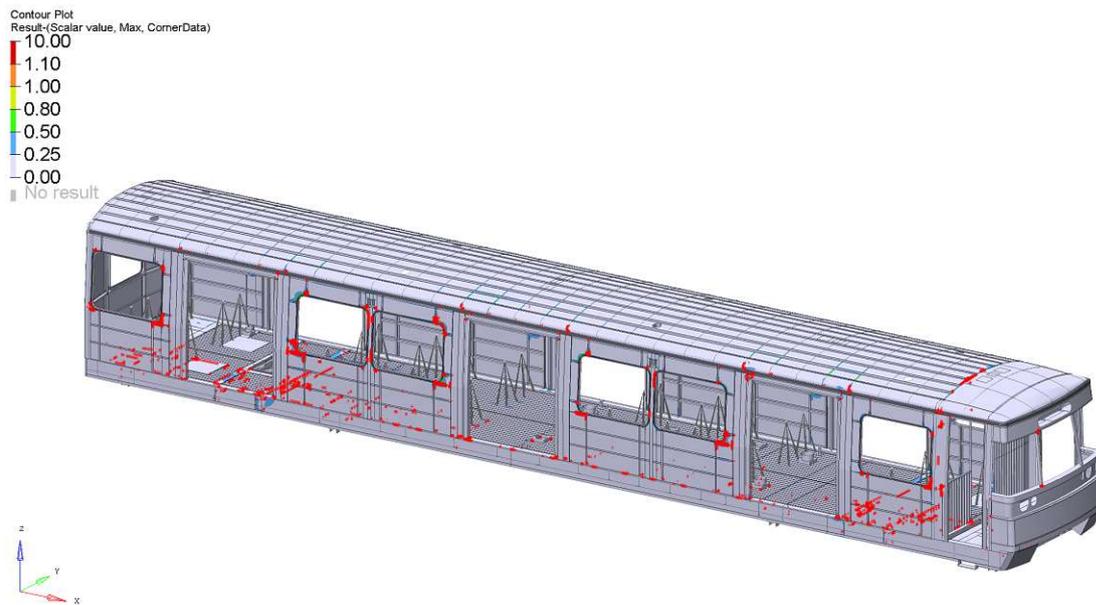


Abbildung 6.3: Auslastungsergebnisse - Darstellung der maximalen Auslastungen aller Lastfälle des Ermüdungsfestigkeitsnachweises

als 35 Jahren erreicht haben ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Ist die Normenkombination VDV 152[10] zu DVS 1608[4] zu konservativ?
- Liefert der Detaillierungsgrad des FE-Modells angemessene Spannungen für die Beurteilung nach DVS 1608[4] ?
- Welchen Einfluss hat die charakteristische Elementkantenlänge auf die Festigkeitsbewertung?
- Werden manche Konstruktionsdetails zu konservativ modelliert?
- Sind die Abminderungen der Wandstärken bei der Schweißnahtbewertung notwendig?
- Welchen Einfluss hat die Wahl des Auswertepunktes der Abstandsbewertung auf die Schweißnahtbewertung?

### 6.1.3 Wagenkastensteifigkeit

Bei der Konstruktion von Schienenfahrzeugen muss auch eine ausreichende Struktursteifigkeit des Wagenkastens gewährleistet werden, neben der statischen Festigkeit und Er-

mühdungsfestigkeit. Um ungewollte Resonanzen im Fahrbetrieb zu vermeiden wird eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt und diese mit den derzeitig entwickelten Wagenkasten verglichen. Nach DIN EN 12663-1[2] kann die Steifigkeit des Wagenkastens als maximale Verformung bei einer vorgeschriebenen Belastung oder als Mindestbiegeeigenfrequenz festgelegt werden.

### 6.1.3.1 Deformation

Die Ermittlung der Durchbiegung der Wagenkastenstruktur erfolgte damals anhand einer analytischen Berechnung unter Anwendung des Satzes von *Castigliano*. Die mit dieser Methode berechnete Durchbiegung ergab in der Wagenkastenmitte einen Wert von 9,717mm, bei einer Beladung von 16,32t. Diese Beladung entspricht der reinen Nutzlast, ohne des Eigengewichts des Wagenkastens.

Zur Absicherung der Berechnung bzw. als Voraussetzung für die Zulassung wurde ein Belastungsversuch durchgeführt. Dafür wurden die Durchbiegungen des Wagenkastens an definierten Stellen am Langträger des Wagenkastens, bei unterschiedlichen Belastungen gemessen und in einem Messprotokoll, anhand eines Diagramms, zusammengefasst. Die Messergebnisse sowie die sich daraus ergebenden Biegelinien sind in der Abbildung 6.4 (a) dargestellt.

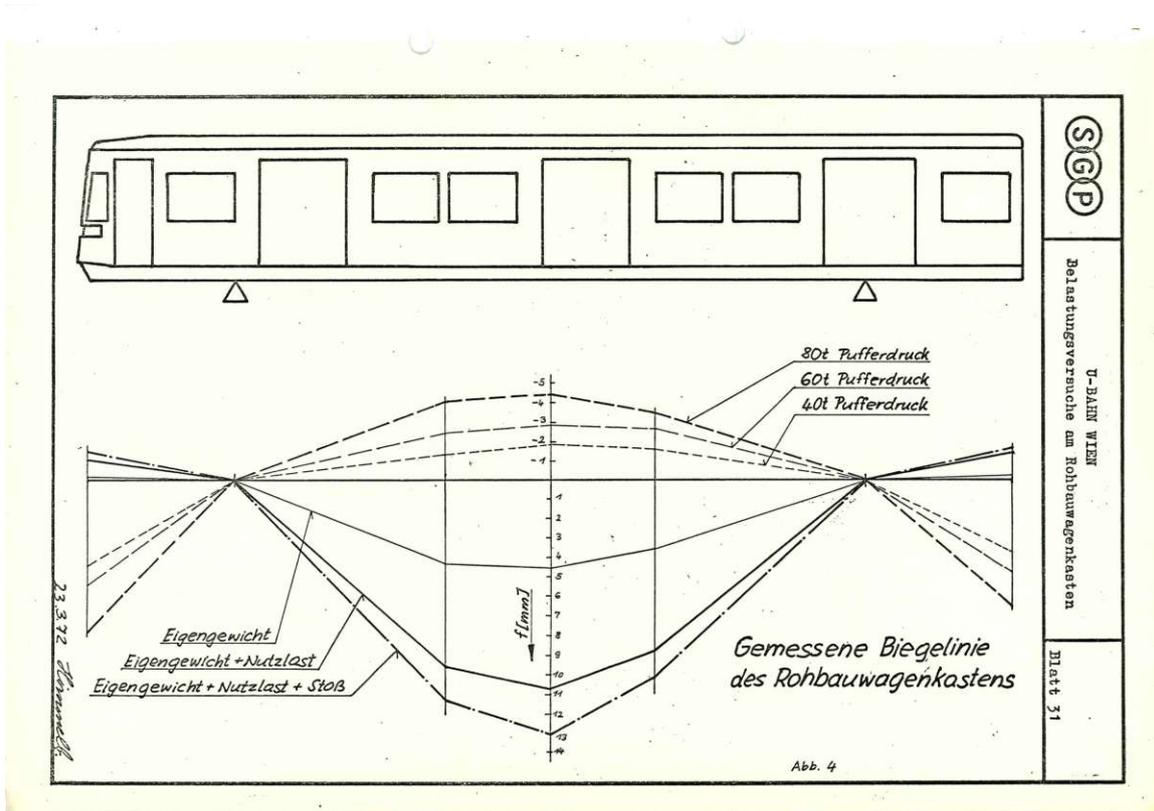
Abbildung 6.4 (b) zeigt zum Vergleich einen Verschiebungs-Contourplot des aktuellen Wagenkastenmodells in z-Richtung. Die unterhalb des Wagenkastens dargestellten Linien stellen die jeweiligen Elementknotenverschiebungen von links nach rechts (vom Kopf- bis zum Wagenkastenende) entlang eines Knotenpfades am Langträger dar. Dieser Pfad befindet sich am Langträger auf der selben Höhe wie die Auflagefläche des Hauptquerträgers und entspricht daher der Anordnung der damaligen Messungen. Es wurden also die Biegelinien des damaligen Messprotokolls mittels FE-Modell nachgerechnet. Die durchgezogenen Linien stellen die Biegelinien des Wagenkastens dar, welche aus den unterschiedlichen vertikalen Belastungszuständen resultieren. Die strichlierten Biegelinien ergeben sich aus den verschiedenen aufgebrauchten Kupplungsdruckkräften. In Anlehnung an das Messprotokoll wurde für die entsprechenden Druckkräfte in 200kN Schritten, beginnend bei 400kN (dunkelgrün) bis 800kN (blau) die Biegelinien ermittelt und dargestellt. Die durchgezogene magentafarbige Linie stellt den betriebsbereiten Wagenkasten dar, welcher im Messprotokoll mit "Eigengewicht" (betriebsbereiter Wagenkasten) benannt wurde. Das gemess-

sene Belastungsszenario "Eigengewicht+Nutzlast+Stoß" (Höchste Nutzlast) entspricht der schwarzen Biegelinie. Als hellgrün ist die Biegelinie "Eigengewicht+Nutzlast" dargestellt. Zu erkennen ist, dass die mittels FE-Modell ermittelten Biegelinien für die vertikalen Belastungsszenarien nur eine geringe Abweichung von der Messung im Bereich der üblichen Schwankungen aufweisen.

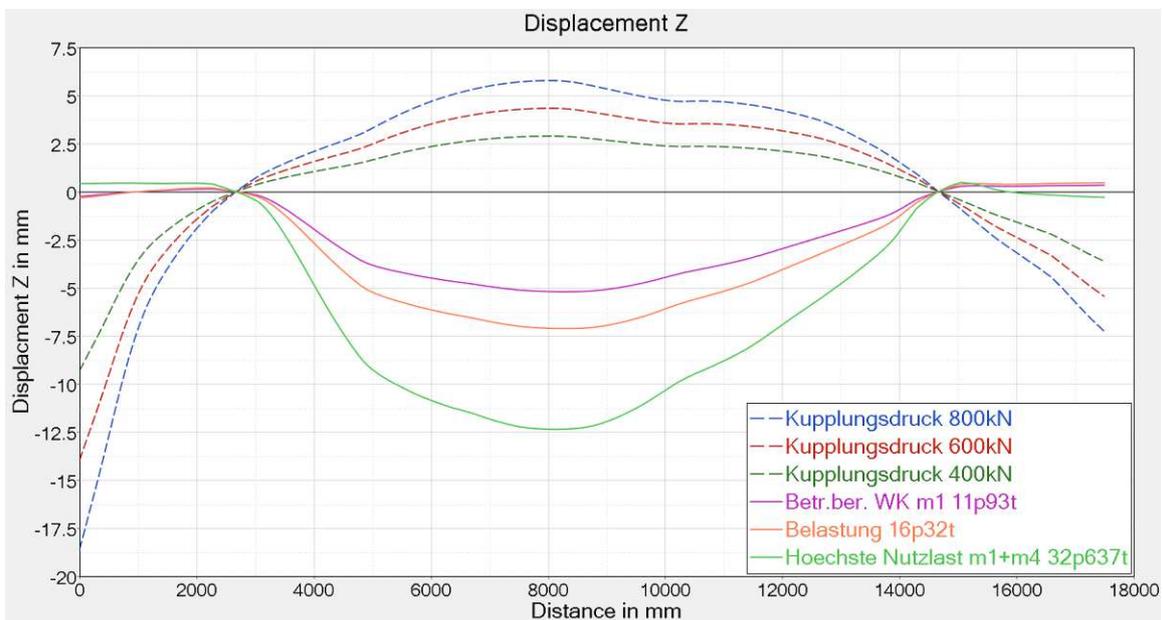
Die orange Linie stellt eine Beladung mit der Nutzlast von 16,32t dar, welche die Wagenkastenrohbaumasse nicht mit berücksichtigt. Diese Belastung wurde als zusätzliches Szenario mittels Finiter Elemente Methode berechnet, da die Belastung in der analytischen Durchbiegungsberechnung angewandt wurde. Beim Vergleich der Durchbiegungswerte aus der damaligen und der heutigen Berechnung ist zu erkennen, dass die Werte mit knapp 10mm und 7mm rund 30% auseinanderliegen. Die berechnete Durchbiegung stimmt mit der gemessenen nicht sehr gut überein. Wahrscheinlich, weil in der klassischen Modellbildung nur der Untergestell-Langträger und den Dachlangträger mitberücksichtigt wurden und auf die Dach- und Bodenbleche verzichtet wurde. Dadurch wurde das Flächenträgheitsmoment unterschätzt und die Durchbiegung zu hoch berechnet.

Da die Messergebnisse mit jenen aus dem FE-Modell nicht mehr als 1mm differieren, was als übliche Schwankungsbreite angesehen werden kann, lässt sich schlussfolgern, dass die damals gewählte Berechnungsmethode, mit den getätigten Vereinfachungen, das Problem nicht ausreichend genau abgebildet hat.

Als Auslegungskriterium für eine ausreichende Steifigkeit des Wagenkastens hat sich aus empirischen Erfahrungen gezeigt, dass die maximale Durchbiegung eines maximal beladenen Wagenkastens rund 1‰ des Abstandes der Mitte der Hauptquerträger betragen sollte. Im Vorliegenden Fall beträgt dieser Abstand 12m und die maximale Durchbiegung bei der Beladung etwa 12,5mm. Somit ist diese Kriterium erfüllt.



(a) Messprotokoll des Belastungsversuchs für die Durchbiegung des Wagenkastens aus 1972; Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH



(b) Durchbiegung des Langträgers bei verschiedenen Belastungsszenarien

Abbildung 6.4: Vergleich der Biegelinien aus dem Messprotokoll mit dem FE-Modell

Tabelle 6.1: Vergleich der Eigenfrequenzen typischer Metro-Wagenkästen mit der Serie U;

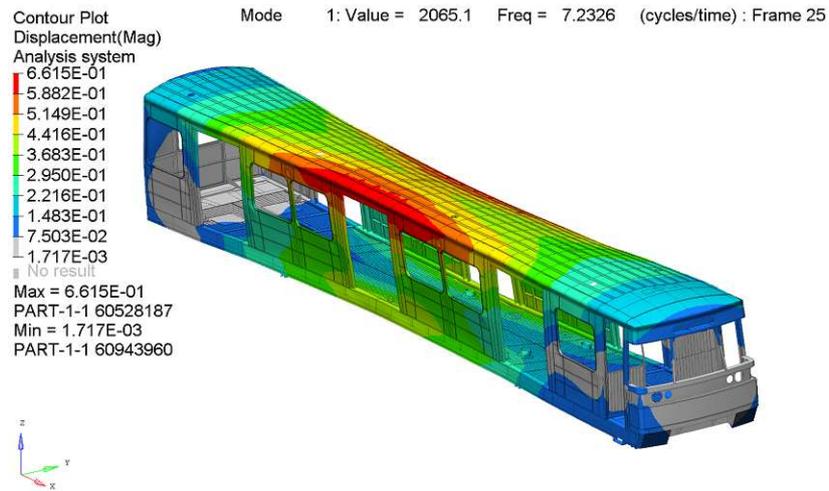
Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH

Metro-Wagenkästen	Schwingmode	Frequenz in Hz
Metro Wien Serie U	Dachquerschwingung	7,2
	Torsion	10,0
	Vertikalbiegung	9,1
Metro-Leichtbauwagenkasten	Dachquerschwingung	7,8
	Torsion	9,4
	Vertikalbiegung	10,5
Metro Wien (neu)	Dachquerschwingung	8,2
	Torsion	10,7
	Vertikalbiegung	11,0

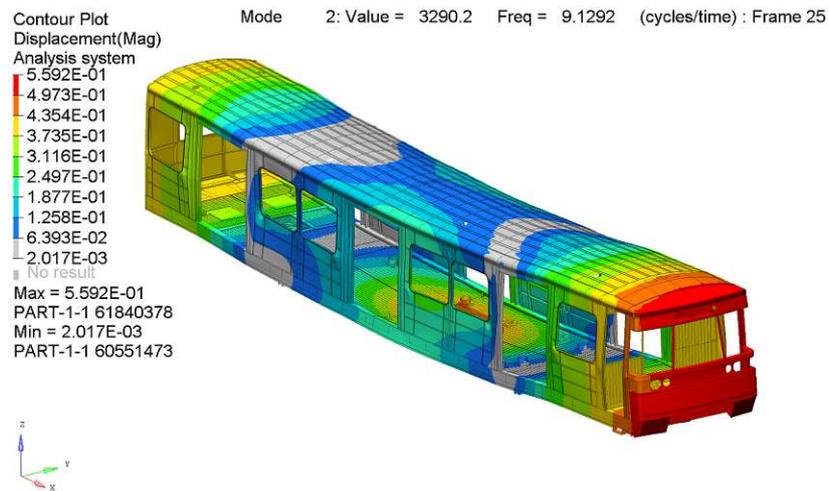
### 6.1.3.2 Eigenfrequenzen

Bei der Auslegung eines Wagenkastens ist nicht nur die statische Festigkeit und die Ermüdungsfestigkeit von Relevanz, sondern auch eine ausreichende Struktursteifigkeit, durch welche starke Verformungen und Vibrationen vermieden werden. Im Falle einer unzureichenden Steifigkeit kann es aufgrund der Fahrdynamik zu ungewollten Resonanzen durch Anregungen aus dem Fahrwerk führen und damit zu einer Beeinflussung des Fahrkomforts und der -sicherheit kommen. Mit Hilfe der Eigenfrequenzanalyse werden die Schwingmoden eines betriebsbereiten Metro-Wagenkastens ermittelt. Dabei wurde der in *Abaqus* integrierte *Lanczos*-Algorithmus an einem frei schwebenden Modell verwendet. Mit diesem wurden die Eigenfrequenzen zwischen 0Hz und 25Hz ermittelt. Die wichtigsten Schwingmoden des Metro-Wagenkastens sind in der Abbildung 6.5 dargestellt.

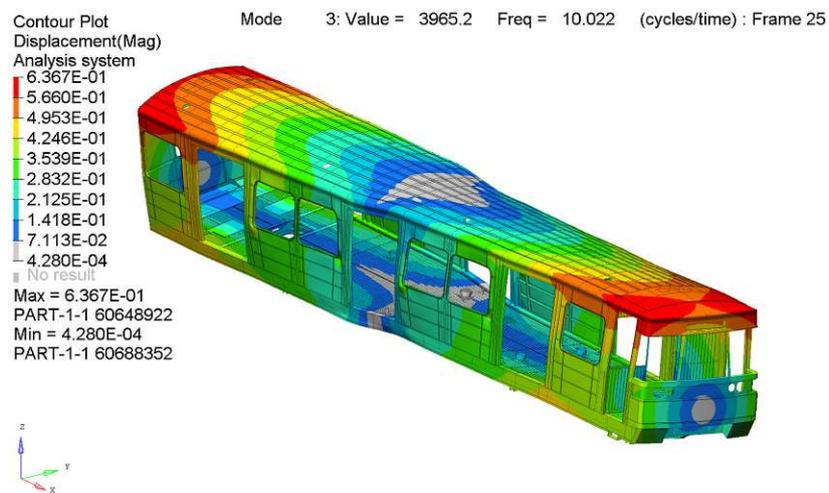
Zum Vergleich sind die Schwingmoden (Dachquerschwingung, Torsion und Vertikalbiegung) von heutigen typischen Metro-Wagenkästen in der Tabelle 6.1 ersichtlich. Zu erkennen ist, dass der historische Metro-Wagenkasten ähnliche Eigenfrequenzen von heutigen Wagenkästen aufweist und somit den Steifigkeitsanforderungen nach DIN EN 12663-1[2] genügt.



(a) Dachquerschwingung 7,2Hz



(b) Vertikalbiegung 9,1Hz



(c) Torsion 10,0Hz

Abbildung 6.5: Eigenfrequenzen des Metro-Wagenkastens

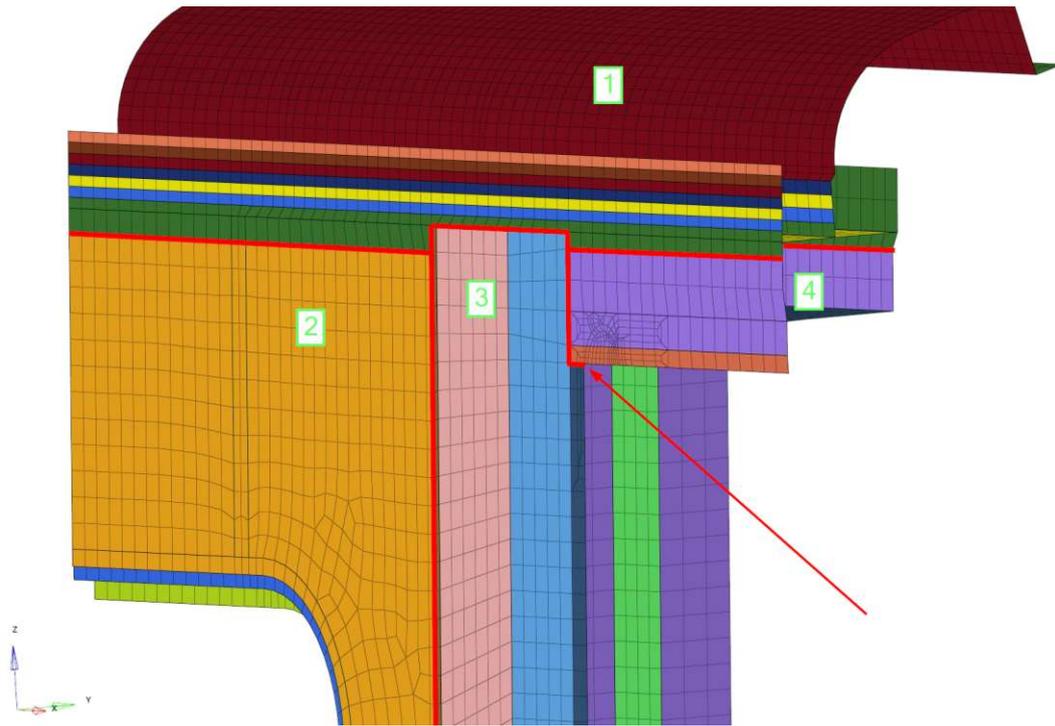


Abbildung 6.6: Ausschnitt der oberen Türecke mit Ermüdungsrisssmarkierung

## 6.2 Konstruktionsdetails

In diesem Abschnitt werden einige Konstruktionsdetails des Wagenkastens genauer beschrieben und dafür unterschiedlich modelliert bzw. ausgewertet. Die Ergebnisse werden im Anschluss erläutert und interpretiert. Es soll damit gezeigt werden, dass die Modellierung einen großen Einfluss auf die errechneten Spannungen hat und damit der Vergleich mit den zulässigen Spannungen zu durchaus großen Unterschieden in der Auslastung führt.

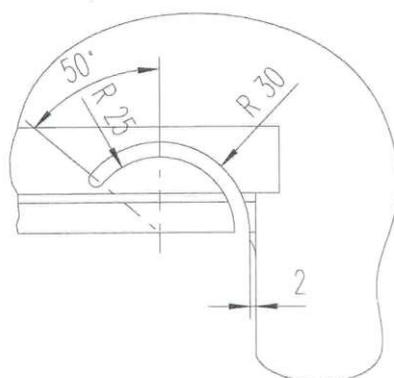
### 6.2.1 Bereich - Türsäule, Obergurtverstärkung

Bei dem hier modellierten Metro-Wagenkasten wurden im Betriebseinsatz an einigen Türportalen in den oberen Ecken Ermüdungsrisse an Schweißnähten festgestellt. Abbildung 6.6 zeigt einen Ausschnitt dieser Türecke anhand des FE-Modells. Die dargestellten Beschriftungen beziehen sich auf die wesentlichen Komponenten des Türausschnittes. Am Dachlangträger (1) sind die Seitenwände (2) angeschweißt. Diese sind links und rechts von den Türsäulen (3) beschränkt. Der Bereich zwischen zwei Türsäulen wird Türportal genannt und wird in diesem Wagenkasten von einer sogenannten Obergurtverstärkung (4) gestützt.

Der Übersicht halber sind nur jene Schweißnähte als rote Linien symbolisch dargestellt, welche für dieses Detail relevant sind. Der rote Pfeil zeigt auf jene Stelle, bei welcher es zu Ermüdungsrissen der Schweißnaht kam. Anhand des Details ist erkennbar, dass es aufgrund der Geometrie zwischen Türsäulen- und der Obergurtlippe zu einer scharfen Kerbe kommt, was zwangsläufig zu einer Spannungskonzentration führt. Wie in Abbildung 6.6 dargestellt, befindet sich an dieser Stelle eine Schweißnaht. Durch die Schweißung erfährt diese Stelle im Zuge der Fertigung eine Festigkeitsminderung. Der Ermüdungsriss ist aufgrund der Kerbwirkung entstanden. Als Sanierungslösung wurde bei jeder Türecke eine sichelförmige Entlastungsfräsung an dem Blech der Obergurtverstärkung erstellt (siehe Abbildung 6.7), welche das Risswachstum unterbinden und einen Betrieb bis zum Erreichen der Fahrzeuglebensdauer gewährleisten.

Da die Befräsung der Obergurtverstärkung erst nach einigen Jahren des Betriebes durchgeführt wurde, erfolgte die Berechnung nicht auf die gesamte Lebensdauer, sondern die noch verbleibende Lebensdauer des Metro-Wagenkastens. Die Auslegung der sanierten Türecke wurde mit einem Betriebsfestigkeitsnachweis an einem Detailmodell geführt, wobei ein relativer Vergleich der Spannungen vor und nach der Sanierung erfolgte. Damit wurde das Risswachstum bis zum Ende der Lebensdauer des Wagenkastens verhindert.

Die besagte Stelle ist im Wagenkastenmodell so modelliert, dass die Sanierungslösung bereits im FE-Netz an jeder Türecke vorhanden ist und durch das Löschen oder Hinzufügen der dortigen Elemente einfach die Ursprungs- bzw. Sanierungsvariante berechnet werden



(a) Skizze der Türsanierungslösung;

(b) Sanierungslösung am realen Fahrzeug

Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH

Abbildung 6.7: Sanierungslösung der Türecke

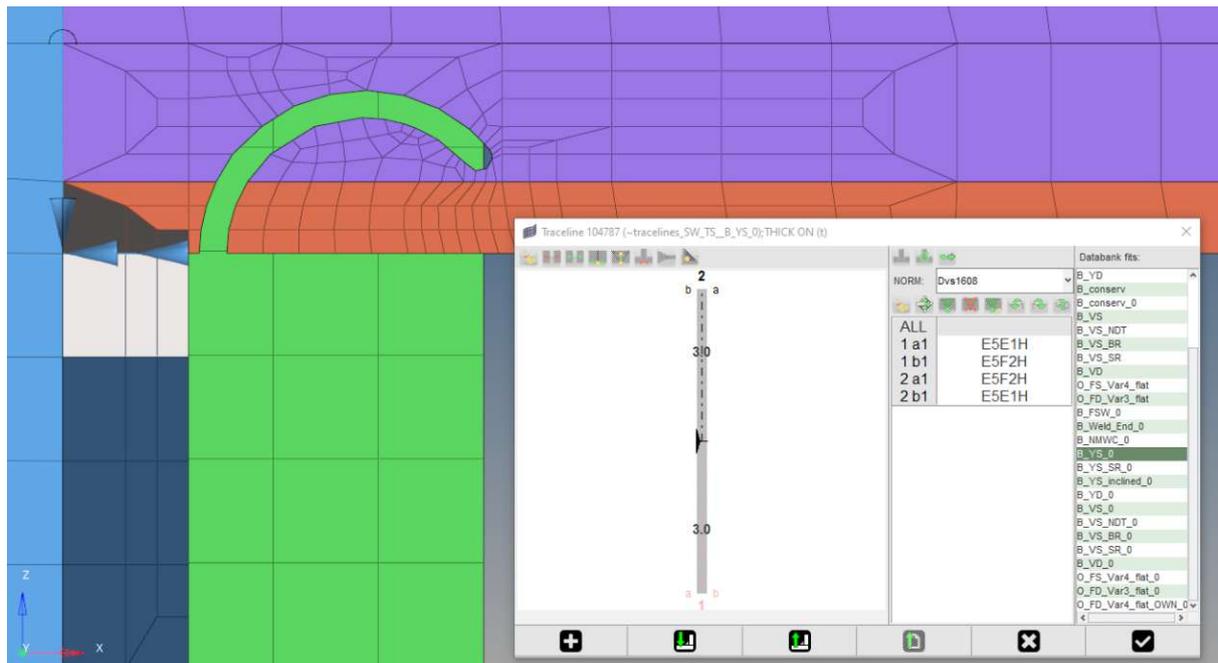


Abbildung 6.8: Konstruktionsdetail mit Sanierungslösung - Türecke inklusive Kerbfalldefinition

kann. Dieses Detail wird fein vernetzt, um die Kontur der Fräsung gut abbilden zu können. Abseits des Details kommt die übliche Netzfeinheit zum Einsatz. Bei der Vernetzung des Konstruktionsdetails wurde darauf geachtet, dass alle Elemente entlang der Fräsung vierknotige Schalenelemente vom Typ *S4* sind (siehe Abschnitt 3).

Die beschriebene Schweißnaht, an welcher Risse aufgetreten sind in der Fertigung als Y-Naht mit einem *a*-Maß von 2mm ausgeführt, um die beiden 3mm dicken Bleche miteinander zu verbinden. Dem Sanierungsprotokoll ist zu entnehmen, dass diese Schweißung von außen erfolgte und nicht vollständig durchgeschweißt wurde. Die Definition der Schweißnaht im FE-Modell ist der Abbildung 6.8 zu entnehmen. Die äußere Schalenseite wird hier mit *1a1* und *2b1* bezeichnet und ist mit den Kerbfalldlinien *E5* längs und *E1* quer zur Schweißnaht sowie mit *H* für Schub bewertet. Die innere Schalenseite (*1b1* und *2a1*), welche in diesem Fall die Schalenunterseite ist, ist mit den Kerbfalldlinien *E5/F2/H* (längs/quer/Schub) bewertet. Die Kerbfalldlinie *F2* wird aufgrund der nicht durchgeschweißten Nahtwurzel der Y-Naht nach DVS 1608[4] definiert.

Die beschriebene Kerbfallddefinition wird für alle nachfolgenden Ergebnisse angesetzt. Berechnet wurde die unsanierte und sanierte Türecke mit einer Netzfeinheit, welche eine detaillierte Auflösung um den Bereich der Befräsung besitzt. Die Elementkantenlänge ist dort rund 4mm, eine im Schienenfahrzeugbau für Details durchaus übliche Netzfeinheit. Zu-

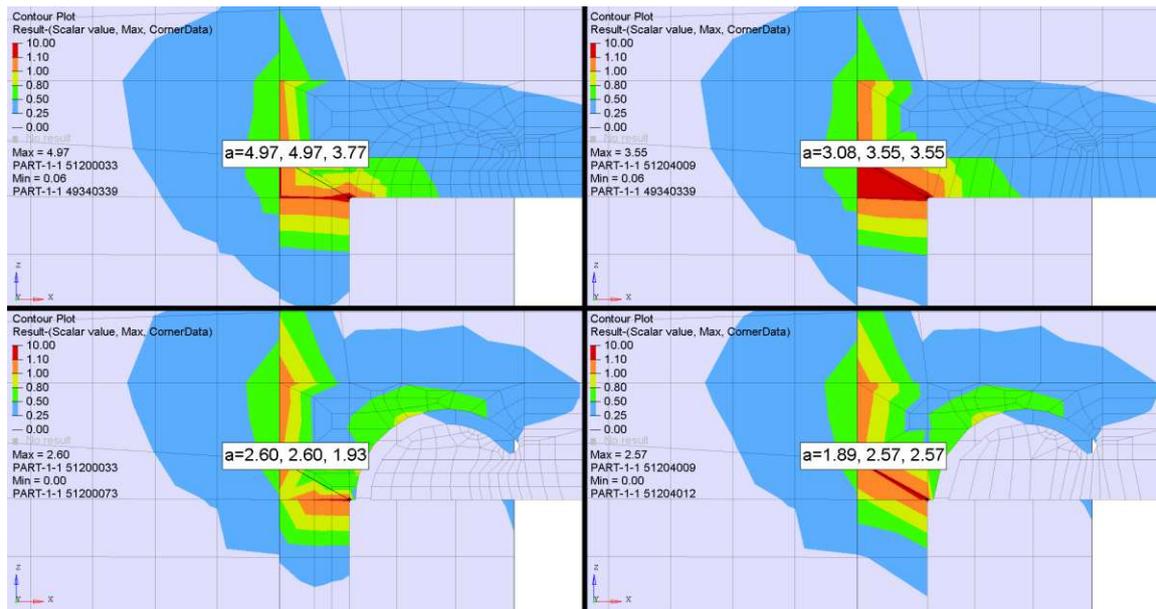


Abbildung 6.9: Ermüdungsauslastungen - Türcke mit Elementen erster Ordnung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz)

sätzlich wurde dieses Konstruktionsdetail mit einem groben Netz berechnet, welches der charakteristischen Elementkantenlänge von 20mm aus Abschnitt 3 entspricht. Damit soll der Einfluss der Netzfeinheit für solche Konstruktionsdetails untersucht werden.

Abbildung 6.9 zeigt die Ermüdungsauslastung an der kritischsten Stelle, welche gleichzeitig auch jene Stelle war, von welcher die Rissausbildung begonnen hat. Die obere Ergebniszeile zeigt die unsanierte Türcke und die untere Zeile die Sanierungslösung. Links sind die Auslastungsgrade des feineren und rechts jene des gröberen Netzes zu sehen.

Zu erkennen ist, dass die sanierte Türcke einen wesentlich geringeren Ermüdungsauslastungsgrad aufweist als die unsanierte Türcke. Die Auslastung verringert sich beim feinen Netz um rund den Faktor 2. Beim gröberen Netz ist ebenfalls einer Verbesserung der Auslastung ablesbar, allerdings nicht mehr im selben Ausmaß. Bei der Betrachtung der unteren Zeile lässt sich erkennen, dass die Netzfeinheit in diesem Fall keine wesentlichen Einfluss hat, da der Auslastungsgrad zwischen linkem und rechtem Ergebnis nahezu ident ist.

Anhand dieses Konstruktionsdetails wurde auch der Einfluss von Elementen zweiter Ordnung (*S8R*) bzw. Elemente mit einer Integrationsordnung von 1x1 untersucht, wofür jeweils das gesamte FE-Modell auf diese Elementordnung bzw. den Elementtyp umgestellt wurde. Abbildung 6.10 zeigt den Unterschied zwischen den einzelnen Elementtypen. Die ersten drei Abbildungen 6.10(a) bis 6.10(c) zeigen Elemente erster Ordnung mit unterschiedlichen Integrationsordnungen und damit einer unterschiedlichen Anzahl an Gauß'schen Intergra-

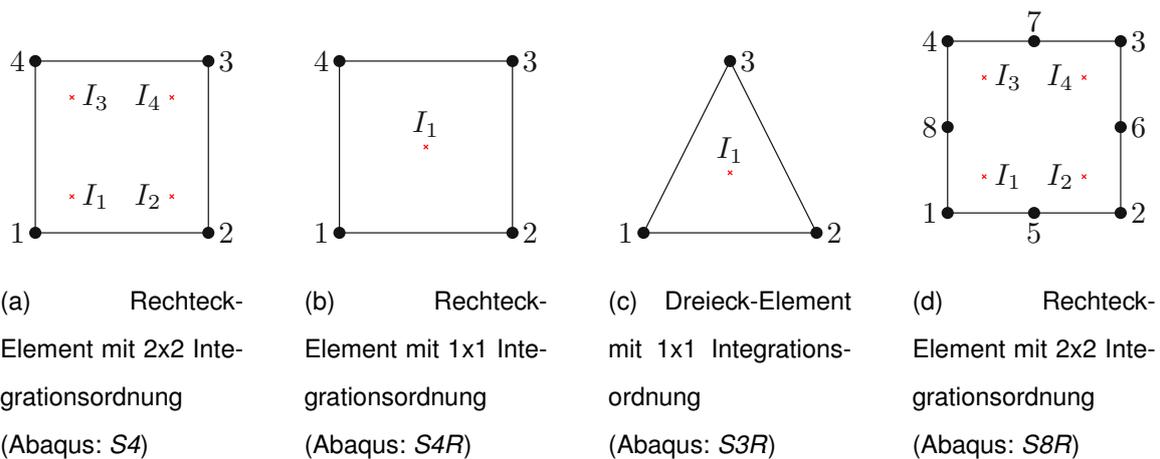


Abbildung 6.10: Darstellung der Abaqus Elementtypen mit deren Integrationsordnung

tionspunkten. Abbildung 6.10(d) zeigt ein rechteckiges Schalenelemente zweiter Ordnung mit reduzierter Integrationsordnung, welches neben den Elementknoten an den Ecken auch in der Mitte einer jeden Elementkante einen Knoten besitzt.

Es wird auch die Festigkeitsbeurteilung des Details mit der Abstandsbewertung durchgeführt. Dabei wird der Abstand von  $e = 8\text{mm}$  beim groben Netz verwendet, wie in Abschnitt 2.3.3.1 beschrieben. Für die feiner aufgelöste Türecke würde ein Abstand von  $8\text{mm}$  vom Schweißnahtübergang die Auswertepunkte in die oberste Elementreihe der orangen Komponente legen, da die einzelnen Elemente dort eine Höhe von etwas mehr als  $4\text{mm}$  aufweisen. Das würde bei der Verwendung eines Abstands von  $8\text{mm}$  zu einem irreführenden Contourplot führen, bei welchem die Auslastungen der Schweißnaht auf der obersten orangen Elementreihe dargestellt wären. Dies passiert, da *FAST* die extrapolierten Spannungen der Elementknoten verwendet. Bei der Abstandsbewertung werden die Spannungsergebnisse der Elementknotenpunkte links und rechts von den Auswertepunkten auf diese interpoliert. Für diese Auswertepunkte wird dann die Auslastung berechnet, welche anschließend wiederum auf die jeweiligen Elementknotenpunkte links und rechts vom Auswertepunkt angezeigt werden.

Daher wird hier die Abstandsbewertung auf einen Wert von  $e = 3\text{mm}$  geändert, wie es in der Abbildung 6.11 anhand der cyanen Punkte dargestellt ist. Die roten Punkte sind jene Auswertepunkte, welche um einen Abstand von  $8\text{mm}$  von der Schweißnaht verschoben sind. Die in Abbildung 6.11 dargestellten Auswertepunkte werden je nach Netzfeinheit bei der unsanierten und der sanierten Türsäule für die Berechnung aller oben genannten Elementtypen verwendet.

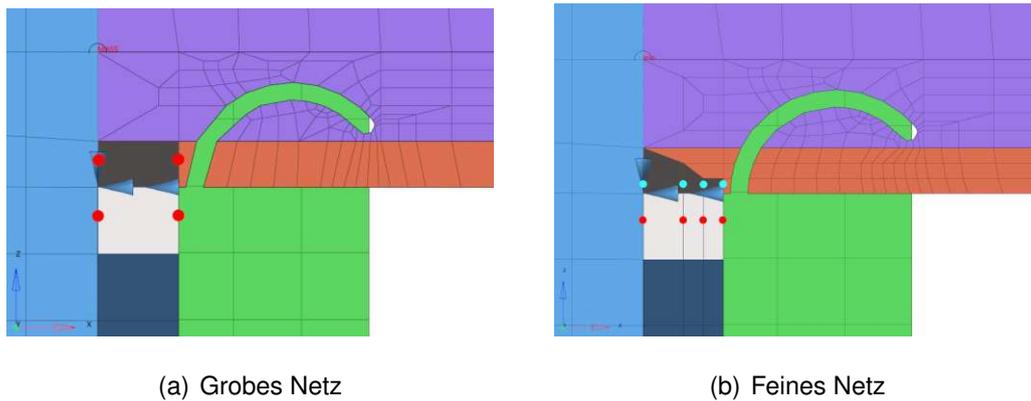


Abbildung 6.11: Türecke mit den schematisch dargestellten Auswertepunkten für die Abstandsbewertung

Die Abbildung 6.12 zeigt die Ermüdungsauslastungsgrade der Türecke für Elemente erster Ordnung mit Abstandsbewertung. Die Auslastungen der unsanierten Türecke lassen sich durch die Verwendung der Abstandsbewertung reduzieren. Den größten positiven Effekt auf die Auslastungsgrade werden bei der fein vernetzten Türecke erzielt. Auffällig ist, dass die sanierten Türecken bei dieser Variante in beiden Fällen minimal höhere Auslastungen liefern als Sanierungslösungen der Abbildung 6.9. Beim Gegenüberstellen der unteren Ergebnis-Zeile der sanierten Lösung erkennt man, dass die Auslastungen des markierten Elementknotens, wie auch schon in Abbildung 6.9, nahezu übereinstimmen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Sanierung die Spannungskonzentration in der Schweißnaht wesentlich reduziert.

Die Abbildung 6.13 und 6.14 zeigen die Auslastungsergebnisse der Türecke, welche mit den reduziert integrierten Elementen (*S4R*) modelliert wurde, ohne und mit Abstandsbewertung. Bei der Verwendung dieses Elementtyps erkennt man, dass die Auslastungen im Allgemeinen niedriger sind als jene der *S4*-Elemente aus den Abbildungen 6.9 und 6.12. Anhand der beiden Abbildungen ist, wie bei den vorigen Ergebnissen, eine Verbesserung zwischen sanierter und unsanierter Türecke zu erkennen. Hervorzuheben ist, dass die Verwendung der Abstandsbewertung bei *S4R*-Elementen bei diesem Detail zu schlechteren bzw. gleichbleibenden Auslastungen führt.

Anzumerken ist, dass der kleine Überstand, welcher aus modellierungstechnischer Gründe im FE-Modell verblieben ist, weiterhin eine Spannungskonzentration an der noch vorhandenen Kante generiert (vergl. mit Abbildung 6.7(a)). Der 2mm Absatz ist der Zeichnung der Sanierungslösung entnommen, wo zu sehen ist, dass die reale Befräsung nicht unmittelbar

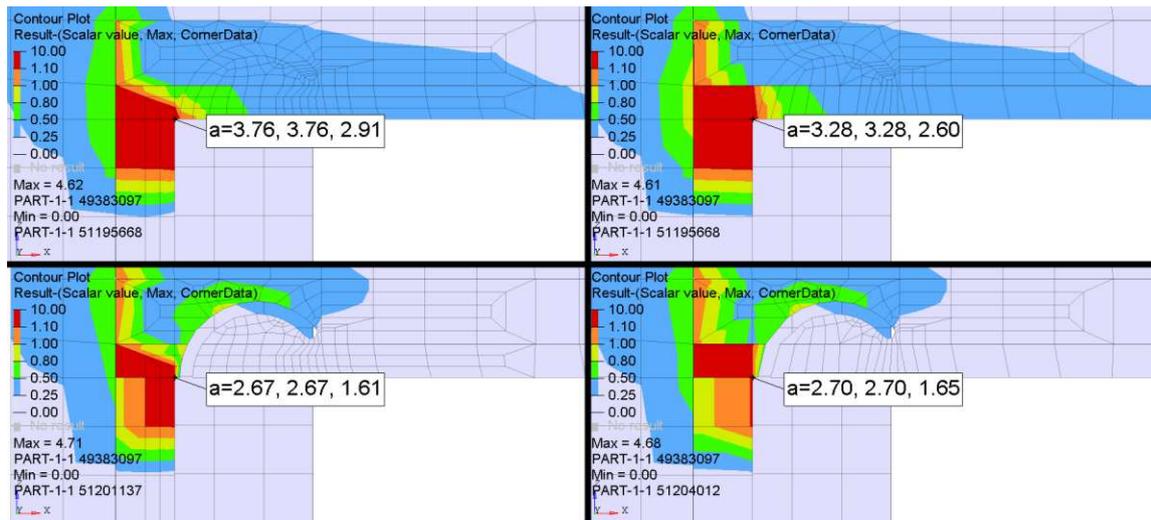


Abbildung 6.12: Ermüdungsauslastungen - Türecke mit Elementen erster Ordnung mit Abstandsbewertung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz)

nach dem Y-Nahtende erfolgt. Dieser Überstand wurde definiert, um die bereits bestehende Naht nicht zu beschädigen.

Die Auslastungen der einzelnen berechneten Varianten ist in der Tabelle 6.2 zusammengefasst. Anhand der gezeigten Ergebnisse ist festzustellen, dass die unsanierte Türecke einen großen Spannungsgradienten aufgrund der Kerbe aufweist und damit der Einfluss der gewählten Netzfeinheit sehr groß ist. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Sanierungslösung unabhängig vom verwendeten Elementtyp oder der Verwendung der Abstandsbewertung eine geringe Auslastungen liefert. Der Tabelle 6.2 ist zu entnehmen, dass bei der Betrachtung der sanierten Ergebnisse ohne Abstandsbewertung die Netzfeinheit einen Einfluss auf die Auslastungsgrade haben. Dieser fällt aber auf Grund des geringeren Spannungsgradienten deutlich geringer aus. Bei den *S4R*-Elementen ist mittels Abstandsbewertung kein geringerer Auslastungsgrad erkennbar. Zur Berechnung der Auslastungen mit Abstandsbewertung zieht *FAST* die Spannungsergebnisse der Elementknotenpunkte links und rechts von den Auswertepunkten heran. Die Spannungen werden auf den Auswertepunkt interpoliert und anschließend wieder auf den benachbarten Elementknoten dargestellt. Durch die Verwendung des Elementtyps wird die lokale Steifigkeit nicht gut repräsentiert, was sich negativ auf die Genauigkeit der Spannungen und somit vermutlich besonders auf die errechneten Auslastungen mit Abstandsbewertung bei *S4R*-Elementen auswirkt. Das genannte Phänomen kann bei der Verwendung dieses Elementtyps auftreten. Die weitere

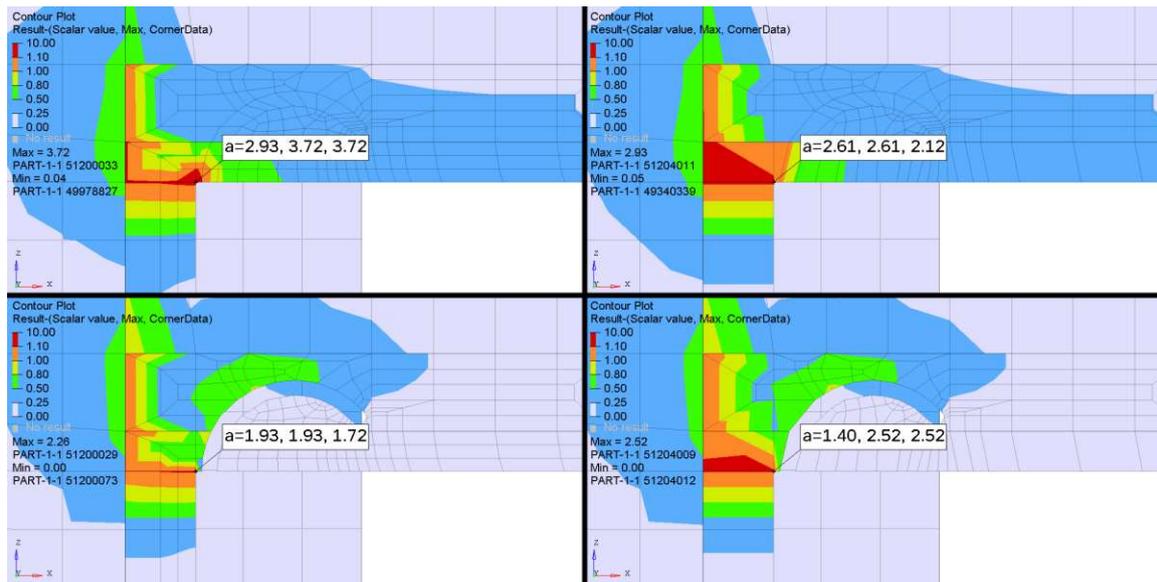


Abbildung 6.13: Ermüdungsauslastungen - Türecke mit *S4R*-Elementen (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz)

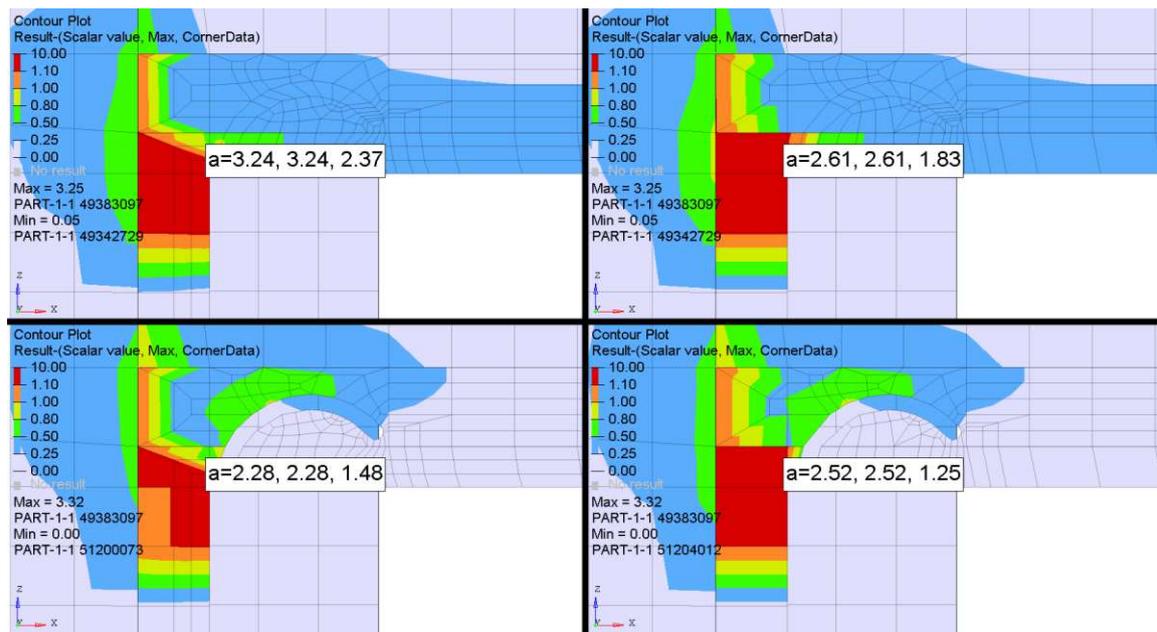


Abbildung 6.14: Ermüdungsauslastungen - Türecke mit *S4R*-Elementen mit Abstandsbewertung (oben: unsaniert, unten: saniert, links: feines Netz, rechts: grobes Netz)

Untersuchung dieser Besonderheit ist kein Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

Abschließend ist anzumerken, dass die Verwendung der Abstandsbewertung nicht zwangsweise zu geringeren Auslastungen führt, was beim Vergleich der Auslastungen der sanierten Türecke bei gleichbleibender Netzfeinheit erkennbar ist.

Tabelle 6.2: Vergleich der maximalen Auslastungen an der markierten Türecke

Elementtyp	Netzfeinheit	Abstandsbewertung	Auslastung	
			unsaniert	saniert
S4	grob	nein	3,55	2,57
S4	fein	nein	4,67	2,60
S4	grob	ja	3,28	2,70
S4	fein	ja	3,76	2,67
S4R	grob	nein	2,61	2,52
S4R	fein	nein	3,72	1,93
S4R	grob	ja	2,61	2,52
S4R	fein	ja	3,24	2,28
S8R	grob	nein	4,81	2,73
S8R	fein	nein	7,15	3,02
S8R	grob	ja	3,07	2,76
S8R	fein	ja	4,02	2,55

## 6.2.2 Schiebesitz

Im Abschnitt 5.2 wurden bereits die verschiedenen gebräuchlichen Modellierungsvarianten eines Schiebesitzes der Abteilung Festigkeitsberechnung der *Siemens Mobility Austria GmbH* vorgestellt. Diese wurden in dem hier untersuchten Metro-Wagenkasten bei der Anbindung des Bodens an den Untergestell-Langträger modelliert und berechnet. Alle Schiebesitzvarianten wurden nach den selben Gesichtspunkten, die in Abschnitt 3 beschrieben wurden, erstellt.

Je nach Variante wurden die entsprechenden Anpassungen (siehe Abschnitt 5.2) im FE-Modell, wie etwa die Wandstärkenabminderung aufgrund des a- bzw. z-Maßes der Schweißnaht oder die dickere Wandstärke bei den "Verbindungselementen", mitberücksichtigt. Für die Variante 3 wurden zwei Versionen (3a und 3b) berechnet. Eine Version mit einer Kehlnaht und eine mit zwei Kehlnähten.

Des Weiteren wurde die Variante 1 aufgrund der häufigen Verwendung ausgewählt und für weitere Untersuchungen diverser Einflüsse herangezogen (siehe Abschnitt 6.2.2.3).

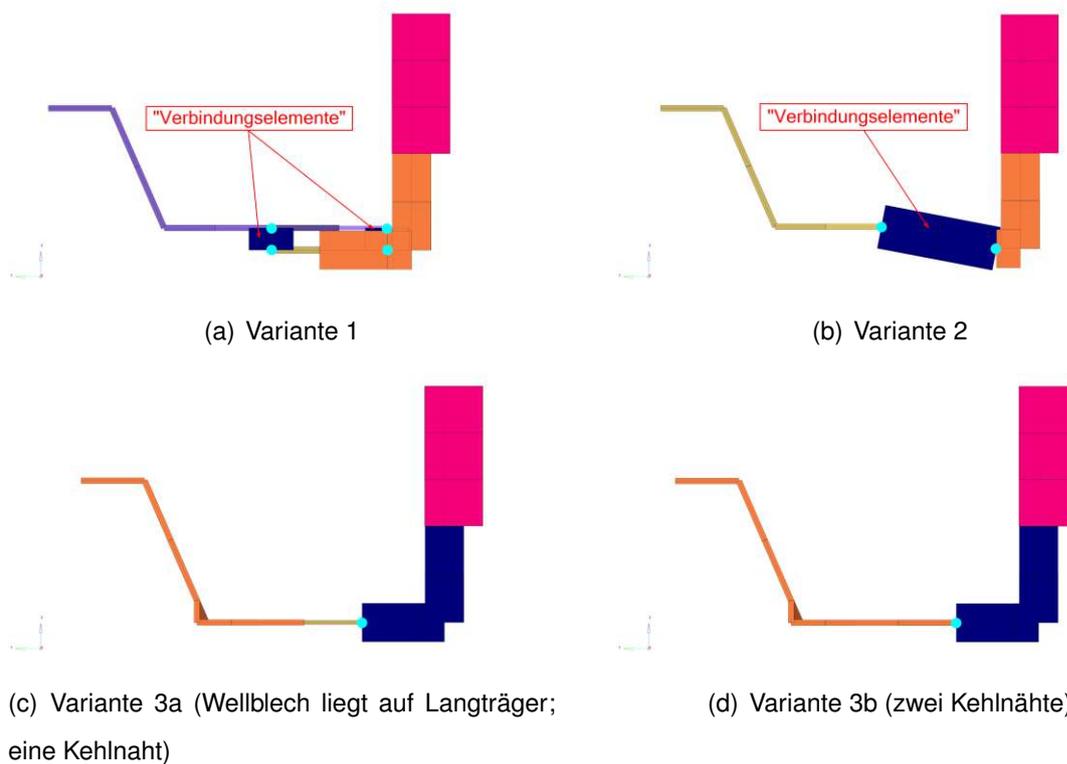


Abbildung 6.15: Modellierungsvarianten der Schiebesitze inkl. Wandstärken und Tracelines mit cyan markiert

### 6.2.2.1 Schweißnahtdefinitionen der Schiebesitzmodellierungsvarianten

Abbildung 6.15 zeigt die zuvor grafisch dargestellten Varianten (siehe Abbildung 5.4 aus Abschnitt 5.2) anhand des FE-Modells. In der Abbildung 6.16 sind die Schweißnähte mittels Schweißnahtsymbol markiert. Es ist zu bemerken, dass diese 2D-Zeichnung spiegelbildlich zu den anderen Abbildungen dieses Details dargestellt ist. Die Abbildung 6.15 zeigt die unterschiedlichen Wandstärken aufgrund der Modellierungsvarianten. Bei der Variante 1 (siehe Abbildung 6.15(a)) handelt es sich bei den gelb und hell-violett dargestellten Komponenten um die Wandstärkenabminderungen aufgrund des z-Maßes der Schweißnaht. Nach Abschnitt 5.2.1 ergibt sich für die obere Schweißnaht wegen der Wandstärke des Wellbleches von 1,2mm ein a-Maß von 0,85mm (hell-violette Komponente). Für die untere Schweißnaht wurde in der Schweißzeichnung ein z-Maß von 2mm angegeben, wodurch sich ein a-Maß von 1,41mm (gelbe Komponente) ergibt. Die dunkelblauen Schalenelemente stellen die sogenannten "Verbindungselemente" dar, welche sich aufgrund der Wandstärke des Langträgers mit 8mm und dem Wellblech mit 1,2mm zu 9,2mm ergeben. Die Schweißnähte der Variante 1 sind in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.15 anhand der cyanen Mar-

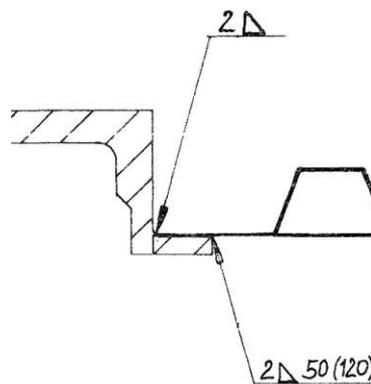


Abbildung 6.16: Ausschnitt der Schweißzeichnung des Langträgers; Quelle: *Siemens Mobility Austria GmbH*

kierungen dargestellt. Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, müssen die zwei Schweißnähte bei dieser Variante wegen der “Verbindungselemente“ auf jeweils zwei Tracelines aufgeteilt werden. Bei der oberen Traceline in Abbildung 6.17 ist die ausgeführte Kehlnaht zu erkennen. Die Schweißnaht erstreckt sich über die gesamte Höhe der “Verbindungselemente“ und verbindet so das Wellblech mit dem Langträger. Die Schalenseiten  $2a1, 2b1, 3b1$  für die obere und  $1a1$  sowie  $1b1$  für die untere Traceline werden mit den Kerbfalllinien  $B/B/H$  definiert. Die genannten Kerbfälle werden für die Wärmeeinflusszone vergeben. Einzig die Schalenseite  $3b1$  wird mit dem besseren der beiden Schub-Kerbfalllinien bewertet, womit folglich  $G$  anstelle von  $H$  verwendet wurde. Die Schweißnahtwurzelbewertung befindet sich auf den Schalenseiten  $1b1$  (obere Traceline) und  $2a1$  (untere Traceline). Im Falle einer Kehlnaht handelt es sich, wie bei einer Y-Naht, um eine nicht gurchgeschweißte Nahtwurzel, wodurch dort die Kerbfalllinien  $E5/F2/H$  definiert werden. Die Schalenseiten  $1a1$  und  $3a1$  (obere Traceline) sowie  $2b1$  (untere Traceline), an welcher sich der Schweißnahtübergang befindet erhalten die Kerbfälle  $E5/E5/H$  bzw.  $E5/E6/H$ .

Bei der Variante 2 aus Abbildung 6.15(b) bleibt der Versatz der Schalenmittelebene zwischen Wellblech und Langträger wie bei der Variante 1 bestehen. Die Verbindung der beiden Komponenten erfolgt ebenfalls mittels der “Verbindungselemente“. Die Dicke der dunkelblauen Komponente wird aus der Summe der beiden zu verschweißenden Wandstärken gebildet. In diesem Fall repräsentiert jeweils eine Traceline eine Schweißnaht, welche sich unmittelbar an den Elementknoten zwischen “Verbindungselementen“ und Wellblech bzw. Langträger befinden. Die Schweißnahtdefinition ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Bei dieser Variante werden die Schalenseiten  $1a1, 2b1$  an den Tracelines, welche sich am Schweiß-

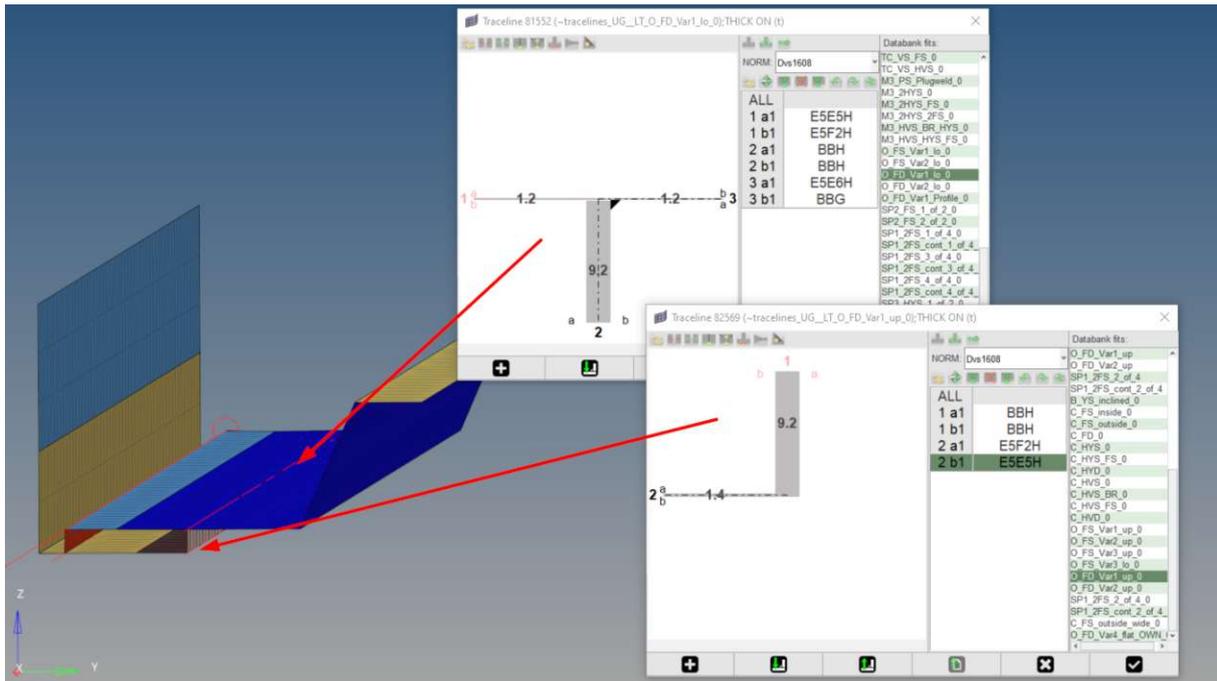


Abbildung 6.17: Schweißnahtdefinition - Variante 1

nahtübergang befinden, mit den Kerbfalllinien  $D/E5/H$  bzw.  $D/E6/H$  definiert. Wie bereits in der vorherigen Variante wird jene Schalenseite, an welcher der Überstand der jeweils anderen Komponente angeschweißt wird, hier  $1b1$  mit einer schlechteren Kerbfalllinie bewertet, also  $E6$  anstelle von  $E5$ . Die restliche Bewertung der Schalenseiten erfolgt mit den Kerbfalllinien für die Wärmeeinflusszone mit  $B/B/H$ . Diese Kerbfalllinien werden der Überlappungszone, welche bei dieser Modellierungsvariante durch die "Verbindungselemente" definiert wurden, angewandt.

Die Modellierung der Variante 3 (Abbildung 6.15(c) und 6.15(d)) erfolgte so, dass die letzte

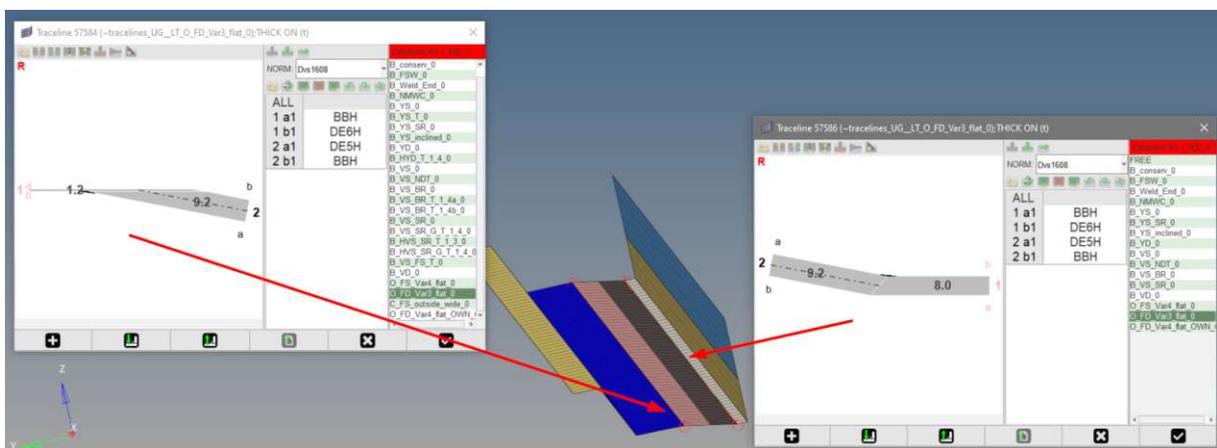


Abbildung 6.18: Schweißnahtdefinition - Variante 2

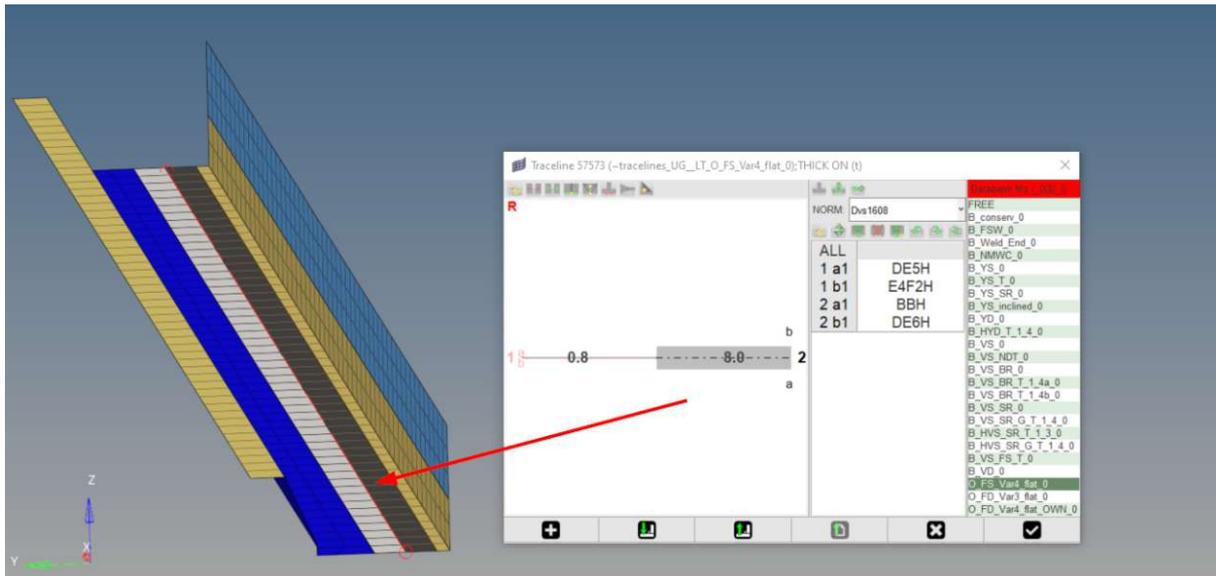


Abbildung 6.19: Schweißnahtdefinition - Variante 3a

Flanke des Wellbleches bis zur Mittelebene des Untergestell-Langträgers verlängert wurde. Somit sind die Schalenmittelebenen des Wellblechs und der Langträger in einer Ebene. In beiden Ausführungen der Variante 3 wird das Wellblech direkt, ohne "Verbindungselemente", am Langträger mit einer Traceline verschweißt. Diese befindet sich auf den Elementknoten zwischen dunkelblauer und oranger (Abbildung 6.15(d)) bzw. gelber (Abbildung 6.15(c)) Komponente. Bei den gelben Schalenelementen handelt es sich wie bei der Variante 1 um das  $a$ -Maß der Schweißnaht am Wellblech von 0,85mm. Bei der Variante 3a ist nur eine Kehlnaht vorgesehen. Die Schweißnahtdefinition ist in der Abbildung 6.19 dargestellt. Bei der Variante 3a wird mit einer Kehlnaht das Wellblech am Langträger angeschweißt, wodurch in der Überlappungszone die Schweißnahtwurzel liegt. Die einzelne Kehlnaht besitzt eine nicht durchgeweißte Nahtwurzel auf der Schalenseite  $1b1$ , in der theoretischen Überlappungszone, welche einen konservativen Kerbfall  $E4/F2/H$  zur Folge hat. Die Schweißnahtübergänge auf den Schalenseiten  $1a1$  und  $2b1$  wurden wie gehabt mit den Kerbfalllinien  $D/E5/H$  bzw.  $D/E6/H$  bewertet.  $2a1$  wird nur von der Wärmeeinflusszone beeinflusst und wurde somit mit  $B/B/H$  bewertet.

Die Schweißnahtdefininition der Variante 3b ist in der Abbildung 6.20 ersichtlich. Bei dieser Ausführung handelt es sich um zwei Kehlnähte wie bei den Varianten 1 und 2 mit dem Unterschied, dass hier kein Versatz zwischen Wellblech und Langträger modelliert wurde und dass eine Traceline zwei Kehlnähte bewertet. Es wurden die Kerbfalllinien  $D/E5/H$  auf den Schalenseiten  $1a1$  und  $2a1$  definiert. Die anderen Schalenseiten  $1b1$  und  $2b1$  erhielten die

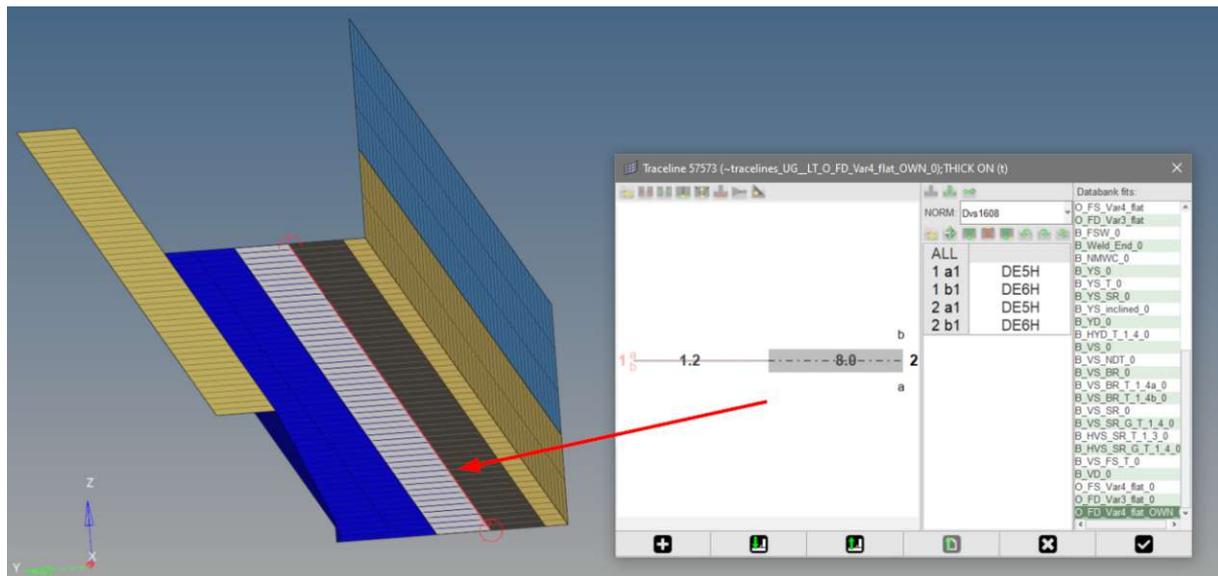


Abbildung 6.20: Schweißnahtdefinition - Variante 3b

Kerbfälle  $D/E6/H$ .

### 6.2.2.2 Ermüdungsauslastungsergebnisse der Schiebesitzmodellierungsvarianten

Abbildung 6.21 zeigt die Ermüdungsauslastungsgrade der unterschiedlichen Schiebesitzmodellierungsvarianten aus Abschnitt 6.2.2. Die Anordnung der gezeigten Ermüdungsergebnisse entsprechen der Schiebesitzmodellierungsvarianten der Abbildung 6.15. Jener Elementknotenpunkt, welcher in Variante 1 den maximalen Auslastungsgrad zeigt, wurde auch in den anderen Varianten ausgewertet und markiert. Dadurch kann der Maximalwert der Auslastung der Legende von den dargestellten Markierungen abweichen. Die Maximalwerte der einzelnen Varianten sind in den anderen Ergebnissen maximal 3 Elementknoten von der Markierung entfernt.

Bei dem linken oberen Ermüdungsauslastungsergebnis kommt es aufgrund der "Verbindungselemente", welche sich am markierten Elementknoten befinden, zu der Darstellung von sechs Auslastungsgraden. Das paarweise Auftreten der Auslastungen ist dem geschuldet, dass der Elementknoten an einer Stelle liegt, wo zwei benachbarte Elemente der selben Komponente zusammentreffen und damit eine Mittelung der Spannung erfolgt. Damit erhalten die beiden benachbarten Elemente der gleichen Komponente am gemeinsamen Elementknotenpunkt die gleiche Auslastung. Bei den anderen drei Varianten sind nur vier

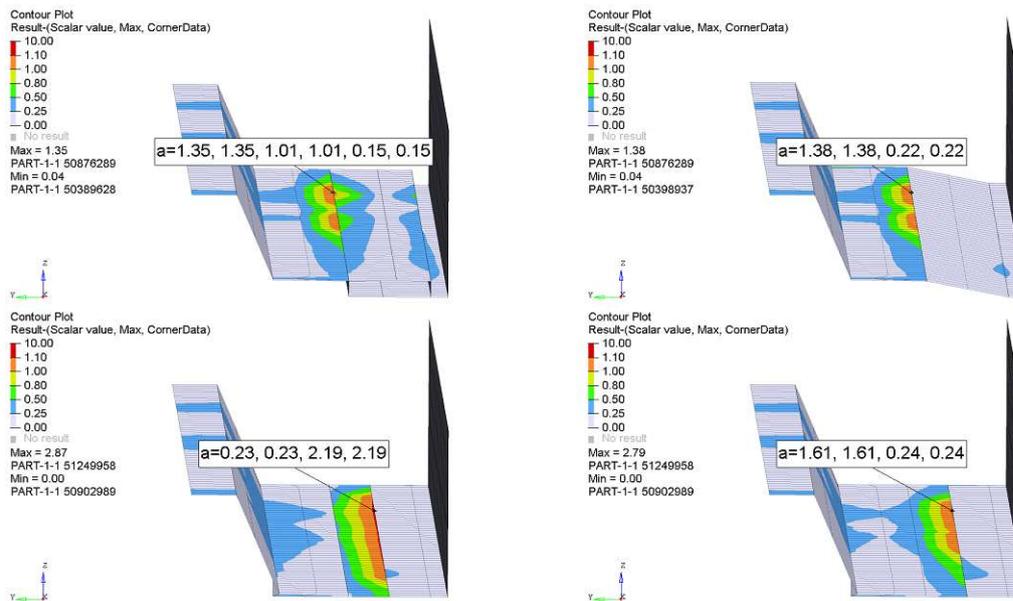


Abbildung 6.21: Ermüdungsauslastungen - Varianten des Schiebesitzes

Auslastungswerte vorhanden, da dort keine Überlappungen modelliert wurden.

Zu erkennen ist, dass alle Varianten eine Auslastung größer 1 am Schiebesitz aufweisen und damit mit den aktuellen Beurteilungskriterien nicht zulassungsfähig wären. Die Variante 1 (links oben) weist die geringsten Auslastungsgrade und die Variante 3a naturgemäß, aufgrund nur einer Kehlnaht, die höchsten Auslastungen auf.

Bei diesem FE-Modell weisen die Varianten 1 und 2 mit einem modellierten Versatz geringere Auslastungen auf, als die Varianten 3a und 3b, welche in einer Ebene durchmodelliert wurden. Der Unterschied zwischen Variante 1 und Variante 3b beträgt rund 20%, welcher ausschließlich durch die unterschiedliche Modellierung zustande kommt. Des Weiteren ist festzustellen, dass die größten Auslastungen an jener Schweißnaht auftreten, welche näher zur Wagenkastenmitte ist und die erste Anbindung des Wellbleches an den Langträger darstellt. Die andere, Wagenkasten-äußere Schweißnaht, weist nur mehr geringe Auslastungen auf.

### 6.2.2.3 Detailuntersuchung - Variante 1

Anhand der Variante 1 wurden unterschiedliche Einflüsse, wie die verwendeten Elementtypen (*S4R* statt *S4*; siehe Abschnitt 6.2.1), Verwendung der Abstandsbewertung mittels Auswertepunkte (siehe Abschnitt 5.1) auf die Ermüdungsauslastungsgrade des Schiebesitzes untersucht. Für die nachfolgenden Detailuntersuchungen wurde immer die Schweißnahtde-

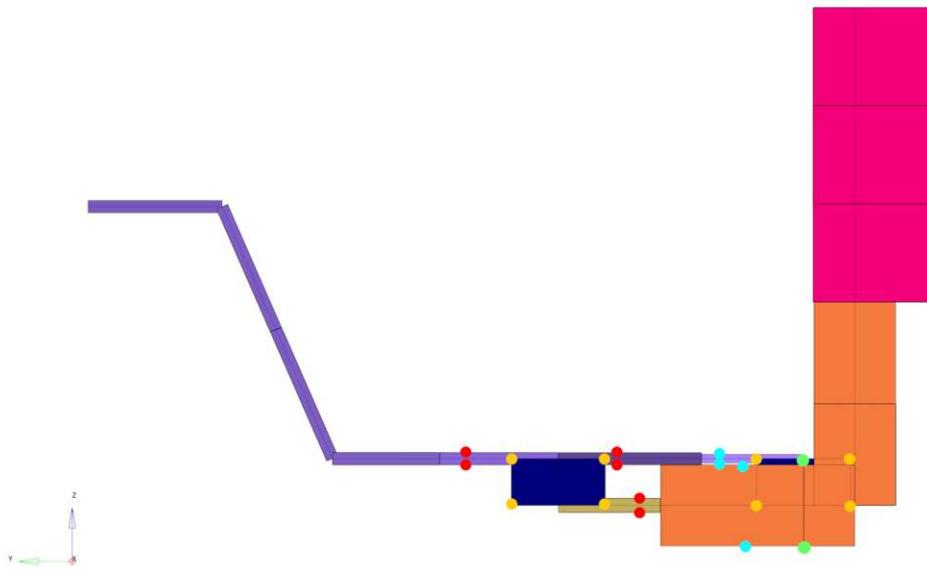


Abbildung 6.22: Schiebesitz Variante 1 mit verschobenen Auswertepunkten

definition aus Abbildung 6.17 angewendet. Für die Variante mit *S4R*-Elementen wurden alle *S4*-Elemente des FE-Modells auf den Elementtyp *S4R* umgestellt. Mit dieser Änderung wurden die  $2 \times 2$  Integrationsordnung zu einer  $1 \times 1$  Integrationsordnung, reduziert (siehe Abbildung 6.10 aus Abschnitt 6.2.1). Die Variante mit Abstandsbewertung, wo die Auswertepunkte versetzt werden, ist in der Abbildung 6.22 dargestellt. Diese orientiert sich an der DVS 1608[4], wie es im Abschnitt 2.3.3.1 beschrieben wurde. Aufgrund der Geometrie ist erkennbar, dass bei diesem Schiebesitzquerschnitt nicht bei jedem, von der Schweißnaht beeinflussten, Element der gewünschte Abstand zwischen Schweißnaht und Auswertepunkt realisierbar ist. Die Auswertepunkte, welche mit dem Abstand von  $e = 8\text{mm}$  positionierbar sind, sind in Abbildung 6.22 mit roten und cyanen Punkten dargestellt. Dieser Abstand ergibt sich aus dem im Abschnitt 5.1 beschriebenen Annahmen, dass die DMS-Gitterlänge  $6\text{mm}$  beträgt. Die "Verbindungselemente" wurden weiterhin direkt an den Elementknoten bzw. an der Schweißnahtwurzel ausgewertet, was durch die orangenen Punkte veranschaulicht wird. Die hellgrünen Auswertepunkte am Langträger mussten in diesem Fall auch in der Nahtwurzel bzw. an den Elementknotenpunkten positioniert werden, da der Abstand von der Schweißnaht zum vertikalen Steg des Untergestell-Langträgers kleiner als  $e = 8\text{mm}$  ist.

Abbildung 6.23 zeigt die Ermüdungsauslastungsgrade beschriebenen Untervarianten der Schiebesitzmodellierungsvariante 1. Anhand der Ermüdungsauslastungen ist zu erkennen, dass die Bewertung mit einem reduziert integrierten Elementtyp (*S4R*) kaum einen Einfluss

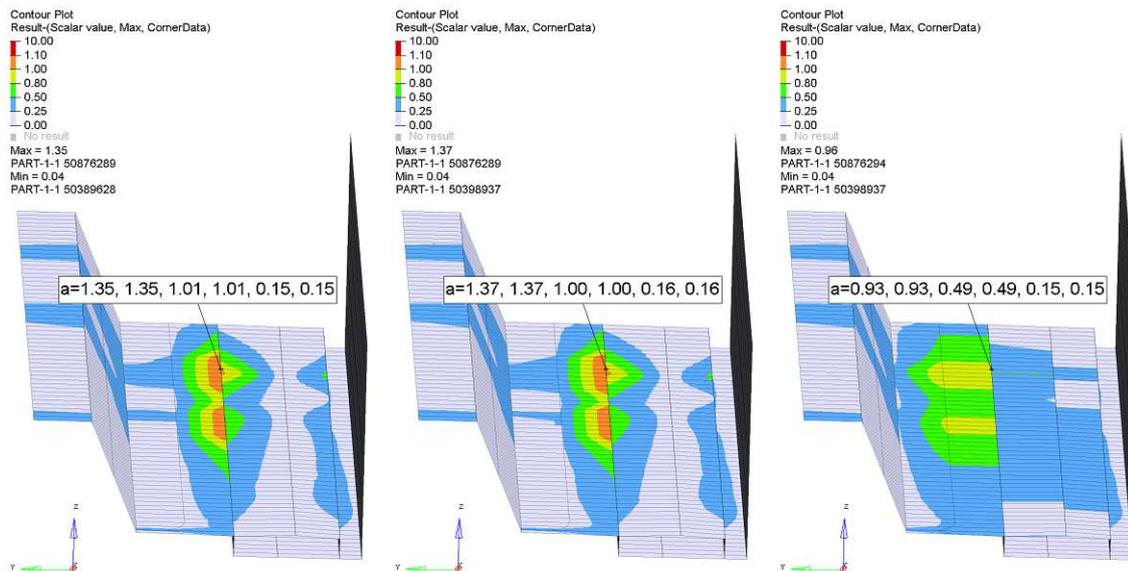


Abbildung 6.23: Ermüdungsauslastungen - Detailuntersuchung Variante 1 (links:  $S_4$ -Elemente, Mitte:  $S_4R$ -Elemente, rechts:  $S_4$ -Elemente mit Abstandsbewertung)

auf die Auslastungen hat. Die Variante mit der Abstandsbewertung liefert ein Ergebnis, dass eine rund 30% reduzierte Auslastung zeigt. Mit dieser Modellierungsvariante wäre der Schiebesitz auch mit der aktuellen Bewertungsmethodik rechnerisch Ermüdungsfest, was die Betriebserfahrung auch zeigt.

Um den Einfluss der Wandstärkenreduktion zufolge des  $a$ -Maß bzw.  $z$ -Maßes (siehe Abschnitt 5.2.1) zu untersuchen, wurde auf diese Reduktion bei einem Wagenkastenmodell verzichtet und direkt mit dem Nennmaß der anzuschließenden Bleche modelliert. Als Ausgangsmodell diente wieder die Variante 1.

Dafür wurde die linke Schweißnaht der Variante 1, wie es in Abbildung 6.24 dargestellt ist, als abgesetzte Kehlnaht modelliert. Dadurch wechseln sich die Bereiche mit beidseitiger Kehlnaht mit jenen der einseitigen Kehlnaht ab. Die abgesetzten Kehlnähte haben jeweils eine Länge von 50mm und einen Abstand von einer Schweißnaht zur nächsten mit 120mm (vergl. mit Abbildung 6.16). Des Weiteren ist in der Abbildung 6.24 zu erkennen, dass die Komponenten mit einer Wandstärkenreduktion in dunkelrot und hellblau dargestellt sind. Wobei in diesem Fall nur die hellblaue Komponente entlang der Schweißnaht gemeint ist. Die andere Komponente gehört zum Langträger.

Abbildung 6.25 zeigt die Ermüdungsauslastungsgrade der Schiebesitzmodellierungsvariante 1 mit abgesetzter Kehlnaht. Im linken Ergebnis wurde die Wandstärkenreduktion mit

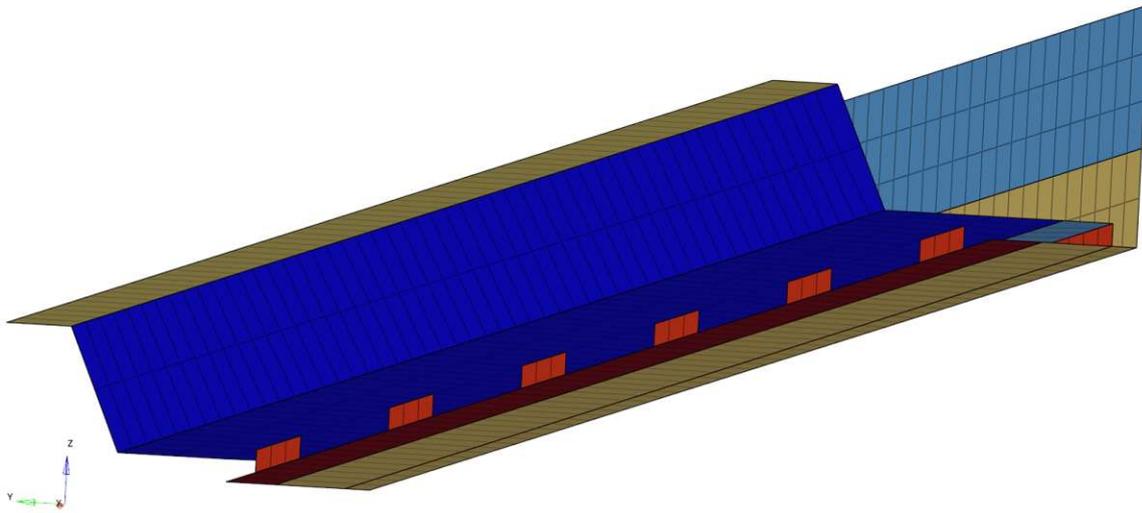


Abbildung 6.24: FE-Modell der Schiebesitzvariante 1 einer abgesetzten Kehlnaht

modelliert, wie es auch in Abbildung 6.26 dargestellt ist. Im rechten Ergebnis wurde anstelle des  $a$ -Maßes die Nennwandstärke der jeweiligen benachbarten Komponente herangezogen.

Anhand des Contourplots ist gut erkennbar in welchen Bereichen nur eine Kehlnaht ausgeführt wurde und in welchem ein Bereich mit beidseitiger Kehlnaht existiert. Dort wo das Wellblech Auslastungen größer 0,25, rund um die linken "Verbindungselementen", aufweist, ist eine Kehlnaht vorhanden. Die Schweißnaht, welche sich näher zum vertikalen Steg des Langträgers befindet, ist durchgängig modelliert und weist in beiden dargestellten Ergebnissen in positiver  $x$ -Achsen-Richtung ansteigende Auslastungswerte auf. Die Stelle der maximalen Auslastung tritt bei der Variante 1 in der Mitte des Schiebesitzes auf wie es in der Abbildung 6.26 dargestellt ist.

Festzustellen ist, dass die maximalen Auslastungen der beiden Ergebnisse nahezu übereinstimmen aber die Schweißnaht in der Nähe des vertikalen Stegs des Langträgers im linken Ergebnis höher ausgelastet ist, was auf die Wandstärkenreduktion aufgrund der Berücksichtigung des  $a$ -Maßes der Schweißnaht zurückzuführen ist. Des Weiteren zeigt sich, dass es in den Bereichen des Überlappstoßes wo beidseitig eine Kehlnaht existiert, bei der äußeren Kehlnaht, zu keiner Auslastung größer 1 kommt. Noch deutlicher ist dies in den Ergebnissen der Abbildung 6.23 ersichtlich.

Daraus lässt sich erkennen, dass eine Wandstärkenreduktion aufgrund des  $a$ -Maßes bei einem Überlappstoß, egal ob mit einer oder zwei Kehlnähten, höhere Auslastungen erge-

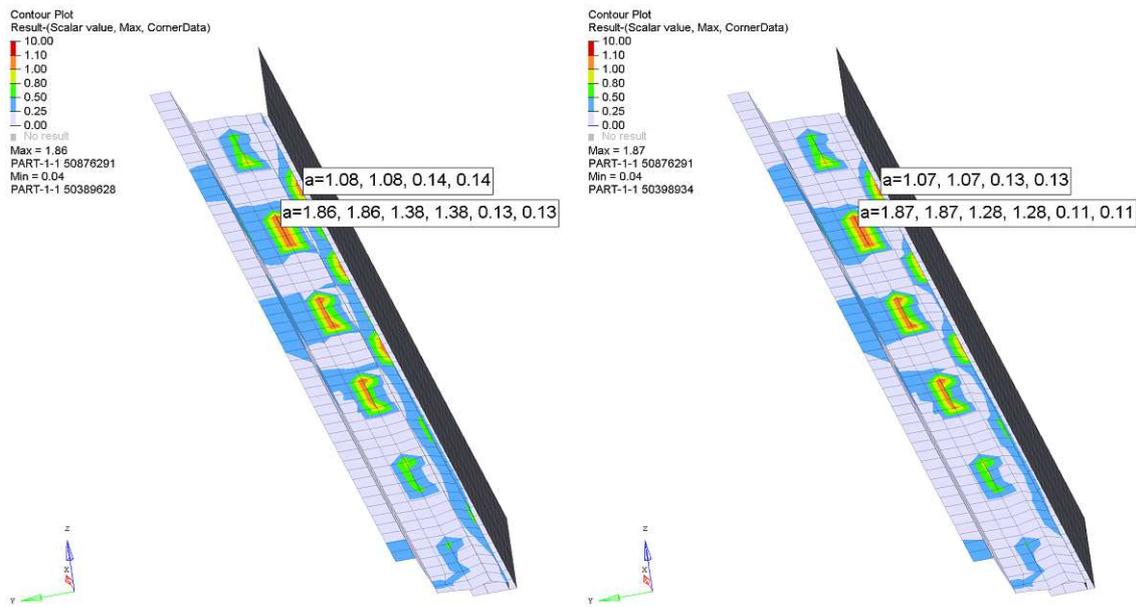


Abbildung 6.25: Ermüdungsauslastungen - Detailuntersuchung Variante 1 mit abgesetzter Kehlnaht (links: mit Wandstärkenreduktion, rechts: ohne Wandstärkenreduktion)

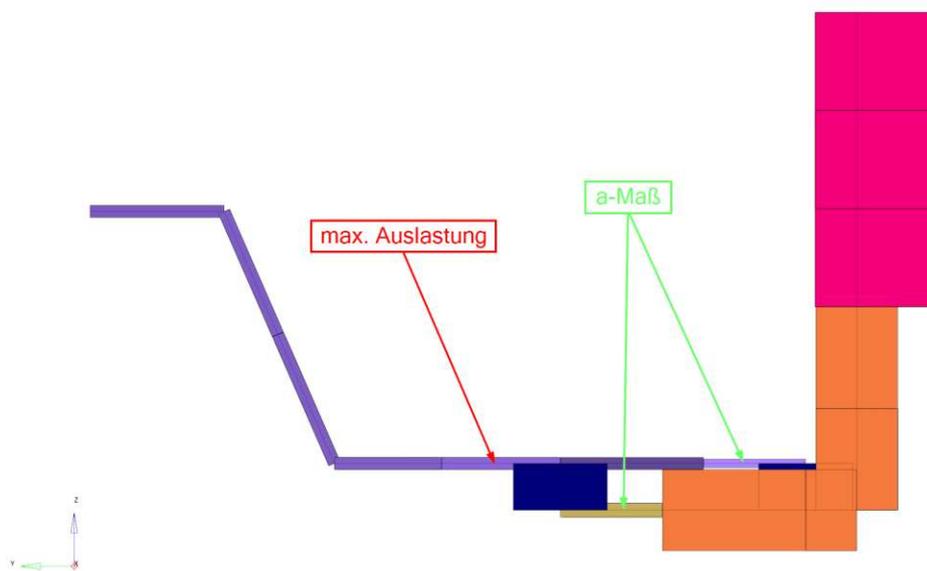


Abbildung 6.26: Schiebesitzmodellierungsvariante 1 mit abgesetzter Schweißnaht - Querschnitt mit markierter Wandstärkenreduktion und maximalen Auslastung

ben. Bei nur einer Kehlnaht ist dieser Effekt beim Überlappstoß größer. Hier ist besonders bemerkenswert, dass bei dem hier untersuchten Überlappstoß mit zwei Kehlnähten die maximale Auslastung nicht bei Elementen mit reduzierter Wandstärke auftritt, sondern wie in Abbildung 6.26 gezeigt, am Nennquerschnitt des Wellblechs. Die äußere Kehlnaht weißt

weder beim linken noch beim rechten Ergebnis Auslastungen größer 1 auf und hat im wesentlichen nur eine Stützwirkung für die innere hochbelastete Naht. Eine Modellierung der Wandstärkenreduktion bei Überlappstößen mit zwei Kehlnähten ist nicht notwendig, da die Maximalauslastung in Blechanschlüssen ohne Wandstärkenreduktion auftritt.

### 6.3 Ergebnisinterpretationen

Aufgrund des Ermüdungsergebnisse von Abbildung 6.3 wäre der Metro-Wagenkasten nach den heutigen normativen Standards, wie bereits in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, nicht mehr zulassungsfähig. Die hier untersuchte Wagenkastenstruktur hat allerdings seine Ermüdungsfestigkeit bereits durch einen Betrieb von über 35 Jahren bewiesen.

Nun lässt sich die Frage stellen, warum der hier mittels Finite Elemente Methode untersuchte, "historische" Metro-Wagenkasten heutzutage eine Vielzahl von überlasteten Bereichen beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis aufweist?

Es werden die Strukturen mancher Konstruktionsdetails für die Analyse viel feiner modelliert und mit einer Nennspannung verglichen, wodurch man teilweise höhere Auslastungswerte berechnet (siehe Abschnitt 2.2.4 und 6.2.1). Die Ermüdungsbelastung wird höher angesetzt und basiert auf einem Sicherheitskonzept der VDV 152[10]. Jede Lastannahme, jeder Festigkeitswert aus beispielsweise Versuchen oder Regelwerken sowie jede FE-Modellierung inkludiert einen Sicherheitsfaktor. Diese werden Teilsicherheitsfaktoren genannt.

Aus dem Produkt der oben genannten Teilsicherheitsfaktoren ergibt sich ein allgemeiner Sicherheitsfaktor für das Sicherheitskonzept, sodass die "angemessene Überlebenswahrscheinlichkeit" nach DIN EN 12663-1[2] gewährleistet wird. Die Abbildung 6.27 zeigt den Zusammenhang der Teilsicherheitsfaktoren mit dem allgemeinen Sicherheitsfaktor  $\gamma_M$ . Hier sind schematisch zwei statistische Verteilungen in rot und blau dargestellt. Bei einer Normalverteilung ist der Mittelwert  $\mu$  auf der Abszisse, an der Stelle wo die Dichtefunktion ihr Maximum erreicht, ablesbar. Die Wendepunkte der kontinuierlichen Normalverteilung definieren die Standardabweichung  $\sigma$ , welche ein Maß der Streuung der Grundgesamtheit ist. Die von links beginnende Fläche unter der Kurve bis zu einer Vertikalen, wie beispielsweise "gegebene Lastannahme", wird mit  $G(x|\mu; \sigma)$  bezeichnet. Diese Fläche entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass die Beanspruchung höchstens gleich  $x$  ist, also die "gegebene

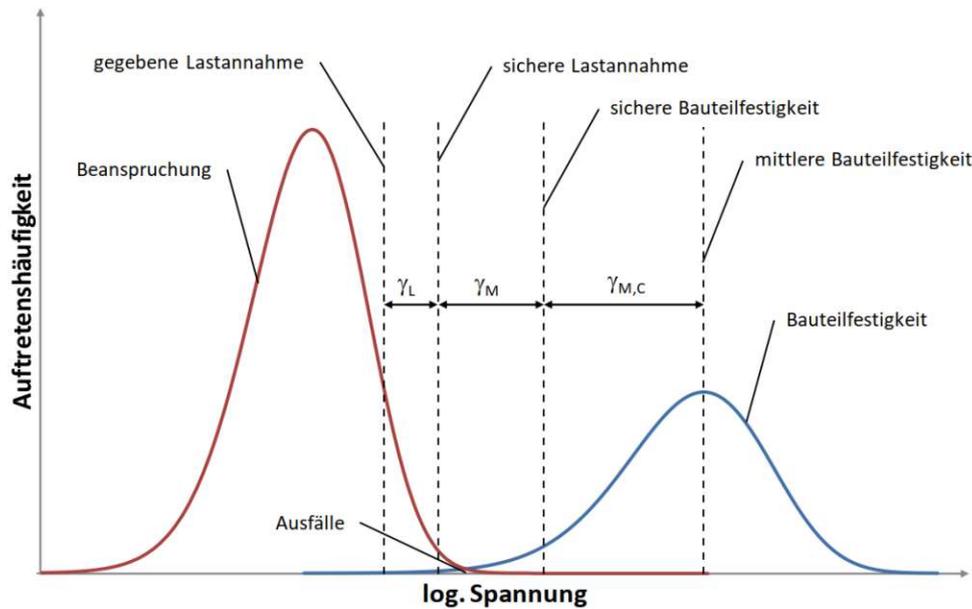


Abbildung 6.27: Sicherheitskonzept - Schematische Darstellung der Teilsicherheitsfaktoren; Quelle: Siemens Mobility Austria GmbH in Anlehnung an [10, S. 30]

Lastannahme“. Die Fläche, welche sich rechts von der Vertikalen befindet, ergibt sich mit  $1 - G(x)$  zu  $Q(x)$ , was der Wahrscheinlichkeit entspricht, dass die Beanspruchung größer als  $x$  und somit der gegebenen Lastannahme ist.

Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur wie beispielsweise [7] verwiesen.

Die DIN EN 12663-1[2] fordert, dass alle Lasten die zur Auslegung der Wagenkastenstruktur herangezogen werden alle notwendigen Toleranzen für Unsicherheiten mit einbezogen werden müssen (vergl. [2, S. 13]). Der Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_L$  aus Abbildung 6.27 beschreibt somit die Verschiebung von der “gegebenen Lastannahme“ zur “sicheren Lastannahme“. Damit einhergehend wird die Fläche unter der Dichtefunktion vergrößert. Bei der Verwendung von Normlasten nach DIN EN 12663-1[2] kann im Allgemeinen  $\gamma_L = 1$  verwendet werden. Entstammen die Lasten aus MKS-Simulationen oder Betriebsmessungen ist  $\gamma_L$  größer 1 zu wählen.

Die DIN EN 12663-1[2] stellt auch diverse Anforderungen an die Ermüdungsfestigkeitswerte (siehe [2, S. 26]), welche anhand des Teilsicherheitsfaktors  $\gamma_{M,C}$  dargestellt werden. Dieser Sicherheitsfaktor verschiebt die "mittlere Bauteilfestigkeit“ zu der “sicheren Bauteilfestigkeit“, womit beispielsweise eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% gewährleistet wird. Auch bei diesem Faktor kann  $\gamma_{M,C} = 1$  verwendet werden, wenn die Festigkeitswerte der DVS 1608[4] entnommen werden, da diese die Anforderungen der DIN EN 12663-1[2]

erfüllen. Entstammen die Daten anderen Quellen ist  $\gamma_{M,C}$  größer gleich 1 zu verwenden. Die durch die Überschneidung der roten und blauen Kurve entstehende Fläche aus Abbildung 6.27 spiegelt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls eines Bauteils aufgrund der aufgetragenen Last wieder. Der allgemeine Sicherheitsfaktor  $\gamma_M$  setzt sich aus den folgenden Teilsicherheitsfaktoren

- Inspektionsmöglichkeit  $\gamma_{M,I}$  (Bereich:  $0,9 \leq \gamma_{M,I} \leq 1$ )
- Sicherheitsbedürfnis  $\gamma_{M,S}$  (Bereich:  $1 \leq \gamma_{M,S} \leq 1,2$ )
- Umfang des Validierungsprozesses  $\gamma_{M,V}$  (Bereich:  $1 \leq \gamma_{M,V} \leq 1,2$ )

zu folgender Gleichung zusammen:

$$\gamma_M = \gamma_{M,I} \cdot \gamma_{M,S} \cdot \gamma_{M,V} \quad (6.1)$$

Anhand der genannten Teilsicherheitsfaktoren ergibt sich ein resultierender allgemeiner Sicherheitsfaktor von 1 bis 1,3.

Zusätzlich sieht man anhand der gezeigten Ergebnisse, dass je nach Modellierung eine gewisse, nicht zu vernachlässigende, Streuung der Auslastungen existiert.

Damit beinhaltet die Beurteilung mittels FE-Modell diverse Abweichungen vom Realverhalten der Struktur, was sich im untersuchten Fall der Türeckensanierung deutlich zeigt. Im untersuchten Fall geht die Abweichung in Richtung konservativer Beurteilung. Es ist aber auch durchaus denkbar, dass bei einer modifizierten Vorgehensweise auch nicht konservative Ergebnisse errechnet werden können.

# 7 Resümee und Ausblick

## 7.1 Resümee

Im Zuge dieser Arbeit wurde für einen historischen Metro-Wagenkasten, welcher seine Betriebsfestigkeit bereits demonstriert hat, ein FE-Schalenmodell erstellt. Anhand dieses Modells wurde eine Festigkeitsbeurteilung nach dem heutigen Stand der Technik durchgeführt. Diese wies sowohl beim statischen Festigkeitsnachweis sowie beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis eine Vielzahl von überlasteten Stellen auf, wodurch der Wagenkasten so heute nicht mehr zulassungsfähig wäre. Von besonderem Interesse war das Konstruktionsdetail der Türsäule, für welches es im Laufe des Fahrbetriebs der Metro zu Rissen und aufgrund dessen zu einer Sanierung kam. Die Sanierungslösung sicherte einen Betrieb bis zum Erreichen der Fahrzeuglebensdauer. Da das besagte Konstruktionsdetails im FE-Modell sowohl im originalen Zustand also auch im sanierten Zustand Überlastungen aufwies, wurden verschiedene Modellierungs- und Auswertemethoden angewendet, um anhand dieser die Reserven der derzeitigen FE-Modellierung zu veranschaulichen.

## 7.2 Ausblick

Die nachfolgend Punkte dienen als Anregungen für weiterführende Untersuchungen bzw. nachfolgende Arbeiten:

- Validierung der Ergebnisse des Schiebesitzes durch die Untersuchung des Schiebesitzes am historischen Metro-Wagenkasten, durch Rissprüfung vor der Verschrottung der Fahrzeuge;
- Validierung der Ergebnisse des Schiebesitzes durch die BauteilSchwingversuche;
- Untersuchung weiterer häufig vorkommender Konstruktionsdetails durch Rechnung und Versuche;
- Kritische Überarbeitung der Methodik der Abstandsbewertung;
- Weitere Untersuchungen zur realitätsnahen Modellierung von überlappenden Schweißverbindungen mit Schalenelementen.
- Erstellung von schädigungsäquivalenten Einstufenlastkollektiven aus den vorhanden

Messfahrten des U-Bahn Wien Netzes, inklusive anschließender Festigkeitsbeurteilung mit diesen Lasten.

# Literaturverzeichnis

- [1] V.-V. Dassault Systèmes. *Abaqus 6.14 Online Documentation*. Juli 2017. URL: <http://wufengyun.com/v6.14/books/usb/default.htm>.
- [2] *DIN EN 12663:2015 Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., 2015.
- [3] *DIN EN 15085-3:2010 Bahnanwendungen - Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 3: Konstruktionsvorgaben*. Norm. Berlin: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.v. (DVS), 2010.
- [4] *DVS 1608:2011 Gestaltung und Fertigungsbewertung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau*. Richtlinie. Düsseldorf: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.v. (DVS), 2011.
- [5] *DVS 1608:1983 Schmelzschweißen von Aluminium im Schienenfahrzeugbau*. Merkblatt. Düsseldorf: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.v. (DVS), 1983.
- [6] E. Haibach. *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. ger. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [7] R. Mohr. *Statistik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendung statistischer Verfahren*. 2., erw. Aufl. Renningen: Expert Verl., 2008.
- [8] P. Rösch. „Virtuelle Lebensdaueranalyse von Leichtbau-Strukturen unter Berücksichtigung des Steifigkeitsverhaltens im Betrieb“. Dissertation. Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, TU Darmstadt, 2019.
- [9] C. M. Sonsino. „Betriebsfestigkeit — Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen“. *Materialprüfung* Bd. 50, Nr. 1 (2008), S. 77–90.
- [10] *VDV 152:2016 Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenzügen nach BOSTrab*. Richtlinie. Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2016.

- [11] *VDV 152:1992 Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen nach BOStrab*. Richtlinie. Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 1992.