



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

# Diplomarbeit

## Optimierung der Konstruktion und Bewertung von Alternativen eines Vorbaus aus höherfestem Stahl für Metrofahrzeuge

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

### Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig**

(E307 - Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik)

**Dipl.-Ing Wilhelm Mayer**

(Siemens AG Österreich)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Mario Dollensky BSc**

1025030 (066482)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Raabs/Thaya, im März 2016

---

Mario Dollensky BSc



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank dem Institut für Konstruktionswissenschaften und technischer Logistik, ins besonderen Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei der Siemens AG Österreich bedanken, vor allem bei Herrn Dipl. Ing. Gerhard Moser, welcher es mir ermöglicht hat diese Arbeit zu schreiben. Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl. Ing. Wilhelm Mayer bedanken, der mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite stand. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Dieter und Monika bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten.

---

# Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird untersucht, ob es möglich ist mit höherfesten Stählen Masse bei einem Vorbau für Metrofahrzeuge einzusparen. Zuerst wird eine Auswahl mittels KO-Kriterien durchgeführt um herauszufinden, welche Stahlgruppe am besten zur gewünschten Anforderung passt. Bei dieser Auswahl stellt sich heraus, dass die thermomechanisch gewalzten Stähle am besten den Anforderungen entsprechen.

Als erster Berechnungsschritt wird eine Analyse des vorhandenen Vorbaus durchgeführt. Dabei stellt sich heraus, dass die beiden Komponenten Kopfstück und Mittellangträger das größte Potential zur Massereduzierung aufweisen. Deswegen werden im Zuge der Arbeit nur mehr diese Komponenten behandelt. Ein weiterer Aspekt ist, dass durch dynamische Belastungen und durch konstruktive Maßnahmen, wie Gewinde und Befestigungen am Hauptquerträger, Wandstärkenreduzierungen am Hauptquerträger nicht möglich sind.

Auf Grund dieser Analyse werden spezielle Bleche zur Massenreduktion des Vorbaus ausgewählt. Bei diesen Blechen wird die Wandstärke meistens um eine Normblechdicke verringert. Die erste Berechnung hat gezeigt, dass eine weitere Reduzierung zu Problemen bei der Schweißbarkeit bzw. zu Festigkeitsproblemen geführt hätte.

Auf Basis der Erkenntnisse der ersten Berechnung wird eine zweite Berechnung durchgeführt. Bei dieser Berechnung werden auch die Anticlimber miteinbezogen und analysiert, ob diese den geforderten Anforderungen standhalten.

Schlussendlich ist es auf Grund der Berechnungsgänge notwendig, konstruktive Maßnahmen zur Erreichung der Festigkeit zu setzen. Hierzu werden Schweißnähte geändert bzw. Beulsteifen eingeschweißt. Schließlich ergibt sich als Ergebnis, dass 10,5 % der Masse eingespart werden kann.

Zusätzlich wird eine Aufstellung der Herstellungskosten für den Vorbau durchgeführt, welche das Ergebnis liefert, dass auf Grund der Verringerung der Blechdicken die Schweißzeiten auch geringer werden. Dadurch ergeben sich geringere Herstellungskosten.

Abschließend wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt, welche zur Auswahl des benötigten Stahls führt. Diese Analyse ergibt, dass der Stahl S700MC am besten den geforderten Kriterien entspricht.

# Abstract

This diploma thesis deals with the question whether it is possible to reduce the mass of a underframe using high-strength steel. With the help of criteria for exclusion a choice is made to find out which group of steel fits the needs best. The selection process shows that the thermomechanically rolled steel is best suited for the requirements.

As a first step an analysis of the existing underframe is conducted. In the course of this analysis it turns out that the head stockt and the sole bar show the biggest potential for reducing mass. Consequently, only those two components are dealt with in the rest of the paper. Another aspect is that reducing wall thickness on the main cross girder is not possible because of dynamic loading and constructive measures like threads and fixings on the main cross girder.

On the basis of this analysis special sheet metals for the underframe are chosen. With these sheet metals the wall thickness is usually reduced by one standard- sheet metal thickness. The first calculation showed that another reduction would lead to problems in welding and stability.

Because of the insights of the first calculation, a second one is made. This calculation also includes the anitclimbers and analyses whether they can stand the requirements.

Finally the calculations show that it is necessary to take constructive measures in order to reach the prescribed stability. To reach this aim, welds are changed or buckling stiffness is welded. The end result shows that 10,5% of the mass can be reduced.

Additionally, a list for the costs of production for the underframe is made which shows that along with the reduction of the wall thickness of the metal sheets also the costs for welding can be reduced. This leads to a decrease in manufacturing costs.

To conclude, a cost-utility analysis is conducted which leads to the choice of the steel. This analysis shows that the steel S700MC best meets the set criteria.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Zielsetzung Aufgabenstellung u. Forschungsfragen .....	1
1.2	Methodik .....	2
2	Grundlagen- / Theorieteil .....	3
2.1	Der Produktentwicklungsprozess .....	3
2.2	Methodisches Klären und Präzisieren .....	5
2.3	Methodisches Konzipieren .....	5
2.4	Methodisches Entwerfen .....	6
2.4.1	Grundregeln zum Entwerfen .....	6
2.4.2	Gestaltungsprinzipien .....	10
2.4.3	Gestaltungsrichtlinien .....	12
2.4.4	Bewerten von Entwürfen .....	14
2.5	Methodisches Ausarbeiten .....	17
2.6	Werkstoffe im Schienenfahrzeugbau .....	18
2.7	Einteilung der Stähle .....	20
2.8	Höherfeste Stähle .....	21
2.8.1	Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle .....	22
3	Berechnung Vorbau .....	24
3.1	Normen für Schienenfahrzeuge .....	25
3.2	Randbedingungen für die Berechnung .....	26
3.3	Zulässige Spannungen .....	28
3.4	Berechnungsergebnisse .....	32
3.4.1	Berechnung Basisversion .....	32
3.4.2	Erste Berechnung Wandstärkenreduzierung .....	38
3.4.3	Zweite Berechnung der Wandstärkenreduzierung .....	43
3.4.4	Vergleich der Wandstärkenreduzierungen .....	44
4	Änderungen des Vorbaus .....	47
4.1	Masse des vorhandenen Vorbaus .....	47
4.2	Werkstoffauswahl mittels K.O.-Kriterien .....	48
4.3	Konstruktive Maßnahmen des Vorbaus .....	49

4.3.1	Bauraummodell .....	50
4.3.2	Konstruktive Maßnahmen .....	51
4.4	Nutzwertanalyse .....	59
4.4.1	Paarweiser Vergleich .....	61
4.4.2	Nutzwertanalyse .....	62
4.4.3	Kosten.....	63
4.4.4	Bewertung der Nutzwertanalyse .....	65
4.5	Herstellungskosten .....	66
5	Ergebnisse / Auswertung .....	68
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	70
7	Literaturverzeichnis .....	72
8	Abbildungsverzeichnis .....	73
	Tabellenverzeichnis .....	75
9	Abkürzungsverzeichnis .....	76
10	Anhang .....	77
10.1	Zeichnungen .....	77

# 1 Einleitung

## 1.1 Zielsetzung Aufgabenstellung u. Forschungsfragen

Der Vorbau ist ein massiver Schweißteil, welcher im Wesentlichen dazu dient, den Wagenkasten mit dem Fahrwerk zu verbinden. Er befindet sich beim Wagenkasten am vorderen und hinteren Ende. Der Vorbau KKE (Kurzkupplungsende) befindet sich am hinteren Ende des Waggons. Der Vorbau FSTE (Langkupplungsende Führerstand) befindet sich am Beginn des Wagenkastens.

Die Vorbauten von Metrofahrzeugen werden derzeit mit dem Baustahl S355J2C\_N DIN EN 10025-2:2005-02 gefertigt. Siemensinterne Untersuchungen bei Reisezugwagen haben gezeigt, dass bis zu 30% der Masse eines Vorbaus eingespart werden kann, wenn man höherfeste Stähle für die Fertigung des Vorbaus verwendet. Bei Metrofahrzeugen würde eine Verringerung der Masse des Vorbaus um 30% eine Gesamtmassenreduzierung des Wagenkastens von ca. 3% bedeuten.

Um weiter konkurrenzfähig zu bleiben und gegenüber den Mitbewerbern einen Vorteil zu haben, liegt der Fokus darauf, bei den anteilmäßig schwersten Teilen im Rohbau Masse einzusparen. Die beiden Vorbauten weisen ca. 10% der Gesamtmasse des Wagenkastens auf. Deshalb soll bei den Metrofahrzeugen aus Stahl der Vorbau überarbeitet und so Masse eingespart werden. Vorgabe ist es, mit unlegierten, höherfesten Stählen dieses Ziel zu erreichen. Das heißt, es sollen keine legierten und nichtrostenden Stähle verwendet werden. Weiters wirkt sich eine Reduktion der Masse auf die Auslegung des Antriebes und auf die Betriebskosten im Fahrbetrieb aus.

In der vorliegenden Arbeit soll ein Vorbau aus S355J2C\_N überarbeitet werden und es sollen höherfeste Stähle verwendet werden. Außerdem müssen die schweißtechnischen Aspekte bei der Fertigung berücksichtigt werden, um die optimalen Eigenschaften des Stahls ausnützen zu können. Zusätzlich muss auf Grund der Wandstärkenverringerung verstärkt auf die Beulspannung geachtet werden. Darüber hinaus müssen konstruktive Maßnahmen gefunden werden, um diese Spannungen in den vorgesehenen Grenzen zu halten.

Ein weiterer Aspekt in der vorliegenden Arbeit ist die Abstimmung mit den angrenzenden Schnittstellen des Vorbaus. Hierzu gehören der Innenausbau, das Fahrwerk und die Kupplung.

Somit ergeben sich folgende Forschungsfragen, welche in der Arbeit behandelt werden:

- Welcher Werkstoff eignet sich am besten für die vorgegebenen Kriterien?
- Welche Möglichkeiten der Massereduktion gibt es?
- Wie weit können die Wandstärken verringert werden?
- Welche Kosten treten durch die Verwendung von höherfesten Stählen auf?

## 1.2 Methodik

Zu Beginn wurde durch eine Recherche von möglichen Stählen jene Gruppe ausgewählt, die am besten zu dieser Anwendung passt.

Als erste Phase wurde die Wandstärkenreduzierung von ausgewählten Bauteilen festgelegt. Dies wurde mittels des Berechnungsprogrammes Hypermesh v12.0 anhand des bestehenden FE-Modells durchgeführt. Dieses Modell enthält die nötigen Parameter und Lasten für die Berechnung.

Als zweite Phase wurde die Optimierung des vorhandenen Vorbaus festgelegt. Dazu wurde das für die Konstruktion wesentliche Bauraummodell definiert.

Als dritte Phase wurde die Auswahl eines geeigneten Stahls festgelegt. Diese Auswahl erfolgte mit festgelegten Kriterien, welche für den Stahl von höchster Bedeutung sind. Die Kriterien wurden mittels der Methode des Paarweisen-Vergleiches gewichtet. Anschließend wurden die Stähle anhand der Kriterien bewertet und eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Zusätzlich zu dieser Analyse wurden die Kosten der Vorbauten verglichen.

Als vierte und letzte Phase wurde die Ausarbeitung der neuen Wandstärken und konstruktiven Maßnahmen mittels PTC Creo durchgeführt.

## 2 Grundlagen- / Theorieteil

### 2.1 Der Produktentwicklungsprozess

Der Produktentwicklungsprozess besteht im Wesentlichen aus vier Grundmethoden, welche zur Entwicklung eines neuen Produktes dienen:

- Methodisches Klären und Präzisieren
- Methodisches Konzipieren
- Methodisches Entwerfen
- Methodisches Ausarbeiten

In Abbildung 1 ist der komplette Produktentwicklungsprozess mit seinen einzelnen Punkten dargestellt. Weiters sieht man an der rechten Seite die verschiedenen Phasen der Optimierung der einzelnen Punkte. Zusätzlich werden in der Darstellung konkrete Punkte aufgelistet, die zur Verwirklichung des Produktes von hoher Bedeutung sind.

Der Abschluss des Produktentwicklungsprozesses wird in der Grafik mit dem letzten Punkt als Lösung bezeichnet. Ab diesem Zeitpunkt ist das Produkt bereit für die Fertigung.

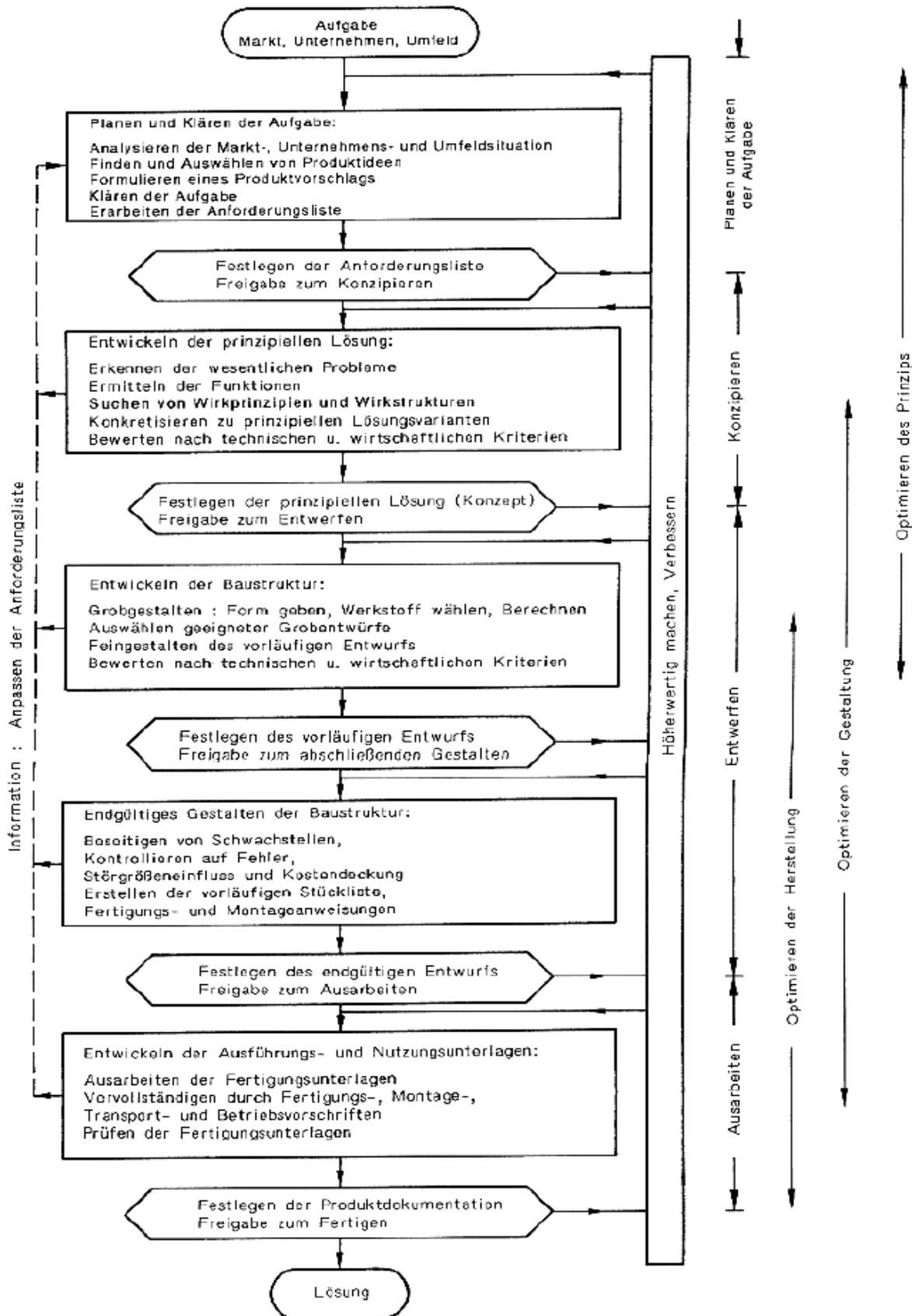


Abbildung 1: Produktentwicklungsprozess<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 198)

## 2.2 Methodisches Klären und Präzisieren

*"Basis der Entwicklungs-/Konstruktionsarbeiten ist die Aufgabenstellung wie sie vom Vertrieb oder den verantwortlichen Bereichen an den Bereich Technik gegeben wird."*<sup>2</sup>

Beim methodischen Klären und Präzisieren wird die grundsätzliche Informationsbeschaffung durchgeführt. Hier werden die groben Eckpunkte festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt gibt es noch keine konkrete Bauform bzw. kein konkretes Design des Produktes. Ergebnis ist die Anforderungsliste, welche die Ziele für die Entwicklung- bzw. Konstruktionsabteilung festlegt. Als Hilfestellung wird oftmals eine Checkliste verwendet, welche die Hauptthemen für die konkrete Erfassung einer Aufgabe beinhaltet.

## 2.3 Methodisches Konzipieren

*"Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der nach Klären der Aufgabenstellung durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in eine Wirkstruktur die prinzipielle Lösung festlegt."*<sup>3</sup>

Beim methodischen Konzipieren werden die einzelnen Punkte der Anforderungsliste in ein Konzept eingearbeitet und geklärt, welche Punkte technisch möglich bzw. nicht möglich sind. Weiters können auch auf Grund von Kostenvorgaben bestimmte Wünsche wegfallen bzw. hinzugefügt werden. Das Ergebnis des Konzipierens ist ein konkretes Konzept bzw. falls mehrere Lösung zu diesem Zeitpunkt realisierbar sind mehrere Konzepte. Endergebnis des Schrittes "Konzipieren" ist die Ausarbeitung einer der Hauptfunktion entsprechenden Skizze. Die Konzepte werden nun im Punkt methodisches Entwerfen zu konkreten Baugruppen (zB. in Form von 3D-Modellen) ausdetailliert.

---

<sup>2</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 195)

<sup>3</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 195)

## 2.4 Methodisches Entwerfen

*"Entwerfen ist der Teil des Konstruierens, der für ein technisches Gebilde von der Wirkstruktur bzw. prinzipiellen Lösung ausgehend die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig und vollständig erarbeitet."*<sup>4</sup>

Das Ergebnis des Entwerfens ist ein fertiges Modell, bei dem alle expliziten Anforderungen berücksichtigt worden sind und bei dem die Wirkstruktur und Kosten bereits konkret vorliegen. Wenn der Entwurf den Ansprüchen des Kunden entspricht, folgt der nächste Schritt des Produktentwicklungsprozesses, das methodische Ausarbeiten.

### 2.4.1 Grundregeln zum Entwerfen

Die folgenden Grundregeln dienen als Richtlinie für das korrekte Entwerfen. Sie lauten "Eindeutig", "Einfach" und "Sicher" und ergeben sich aus den Zielsetzungen:<sup>5</sup>

- Erfüllung der technischen Funktion,
- wirtschaftliche Realisierung und
- Sicherheit für Mensch und Umgebung

#### Eindeutig

Unter "Eindeutig" versteht man, dass bei der Konstruktion eindeutig erkennbar ist, welche wesentliche Aufgabe ein Bauteil in der Wirkstruktur zu erfüllen hat. Als praktisches Beispiel dient die Anordnung von Los- und Festlager.

#### Einfach

Soweit es die Funktionsstruktur einer Anwendung erlaubt, sollten einfache Teile bzw. Mechanismen verwendet werden. Somit soll ein Bauteil mit einfachen Einzelteilen leichter zu verstehen sein als jenes mit komplizierten Bauteilen, das aber nur dieselbe Funktionsstruktur erfüllt. Einfache Teile können normalerweise auch mit weniger Fertigungsaufwand und dadurch billiger produziert werden.

---

<sup>4</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 196)

<sup>5</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 314)

## Sicher

Die Grundregel "Sicher" wird in drei Sicherheitstechniken eingeteilt. Diese lauten:

- unmittelbare Sicherheitstechnik
- mittelbare Sicherheitstechnik
- hinweisende Sicherheitstechnik

In Abbildung 2 werden die einzelnen Sicherheiten und deren Zusammenhänge dargestellt. Als erste wichtige Sicherheitsmaßnahme gilt es, Bauteile so auszulegen, dass sie auf ihren Lebenszyklus ausgelegt werden. Dies bedeutet, dass die Bauteile von sich aus im festgelegten Zeitraum nicht versagen sollen.

Als nächste Stufe soll die Funktionszuverlässigkeit eines kompletten Produkts gewährleistet sein, dazu gehört, dass die Einzelteile auf Grund der Berechnungsauslegung gut zusammenarbeiten und die Funktion erfüllt wird.

Diese zwei Grundvoraussetzungen wie Bauteilzuverlässigkeit und Funktionszuverlässigkeit müssen erfüllt sein um die drei Sicherheiten zu erfüllen.

Die Betriebssicherheit muss im Laufe des Anwendungszeitraumes gesichert sein. Somit können während des Betriebes keine unvorhergesehenen Schäden am Produkt entstehen.

Bei der Arbeitssicherheit ist es wichtig, dass Personen vor Arbeitsunfällen geschützt oder diese durch die Arbeitssicherheit vermindert werden.

Die Umweltsicherheit dient zum Schutz der Umwelt und zur fachgerechten Entsorgung von umweltschädlichen Stoffen.

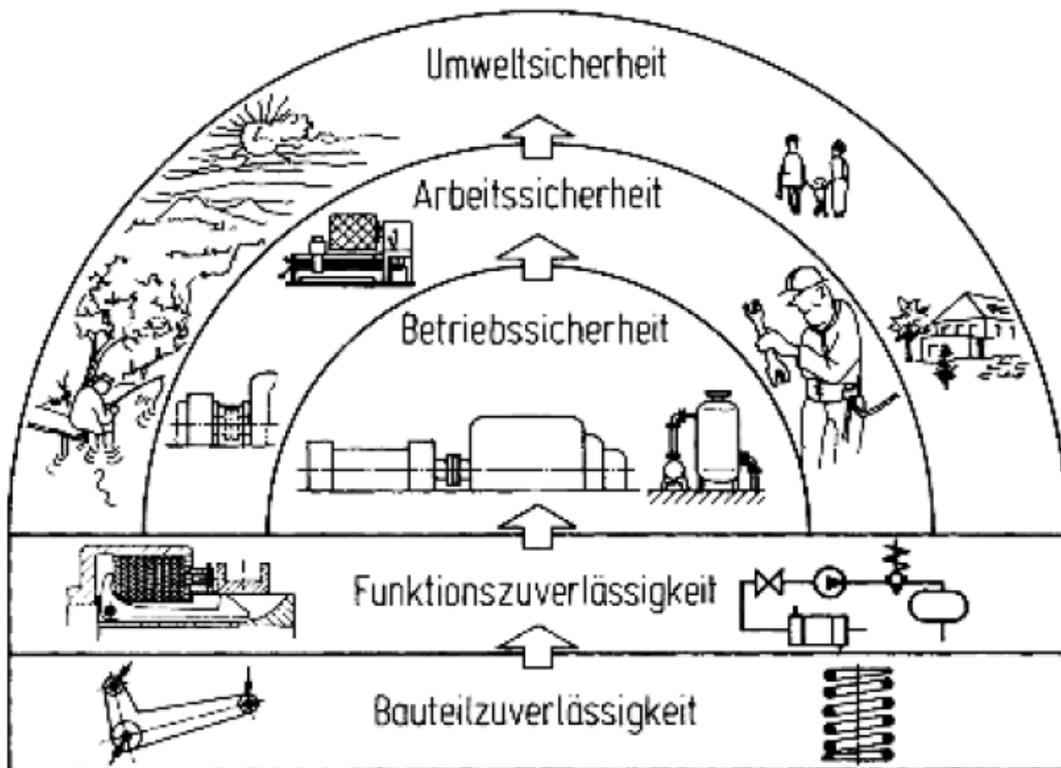


Abbildung 2: Zusammenhang der Sicherheiten <sup>6</sup>

## Unmittelbare Sicherheitstechnik<sup>7</sup>

Bei der unmittelbaren Sicherheitstechnik geht es darum, dass Bauteile im Betrieb keinen Schaden erfahren bzw. wenn ein Schaden auftritt, die Funktion des Bauteils nicht beeinträchtigt wird.

Hierzu gibt es 3 Prinzipien:

- Prinzip des "Sicheren Bestehens" (safe-life Verhalten)

Bei diesem Prinzip wird davon ausgegangen, dass der Bauteil auf Grund der zu erwartenden Einsatzzeit den Belastungen standhält.

- Prinzip des "Beschränkten Versagens" (fail-safe Verhalten)

Bei diesem Prinzip wird davon Gebrauch gemacht, dass bei Versagen eines Bauteils nicht die komplette Funktion beeinträchtigt wird, sondern, dass das Bauteil noch eine bestimmte Zeit die Funktion erfüllt, bis es schließlich ausgetauscht werden muss.

- Prinzip der "Redundanten Anordnung"

<sup>6</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 330)

<sup>7</sup> vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 330 ff)

Bei diesem Prinzip verwendet man entweder aktive oder passive Systeme. Bei aktiven Systemen sind zwei baugleiche Systeme parallel geschaltet. Sie laufen beide gleichzeitig und erfüllen denselben Zweck. Falls eines der beiden Systeme ausfällt, kann die Grundfunktion des Gesamtsystems erhalten bleiben, z.B. die Anordnung von mehreren Triebwerken bei Flugzeugen.

Bei der passiven Redundanz werden Ersatzsysteme zum Hauptsystem errichtet. Sollte das Hauptsystem ausfallen, so kann innerhalb kürzester Zeit das Ersatzsystem angesteuert werden und die Hauptfunktion des Systems ohne weitere Verzögerungen weiter genützt werden.

## Mittelbare Sicherheitstechnik<sup>8</sup>

Die mittelbare Sicherheitstechnik wird unterteilt in:

- Schutzsysteme

Schutzsysteme lösen bei Gefährdung eine Schutzreaktion aus. Das bedeutet, es wird eine gezielte Gegenmaßnahme gesetzt um der Gefährdung entgegen zu wirken. In diesem Fall werden ein Eingangssignal und ein Ausgangssignal benötigt. Ein Beispiel dafür wäre die Roboter-Mensch Kooperation. Wenn eine Person den Arbeitsraum betritt, wird auf Grund von Sensoren dem Roboterarm übermittelt, dass er sofort stoppen muss, um eine Kollision zu verhindern.

- Schutzorgane

Schutzorgane lösen eine Schutzfunktion aus, welche aber ohne Signalumsetzung zustande kommt. Ein Beispiel dazu wäre ein Überdruckventil in einem Stoffkreislauf. Durch den Überdruck wird eine Feder über ihre Federkraft belastet und öffnet somit das Ventil, wenn der Druck wieder im grünen Bereich ist, schließt sich das Ventil wieder.

- Schutzeinrichtungen

Schutzeinrichtungen haben eine Schutzfunktion ohne Schutzreaktion. Dies bedeutet, dass Personen vor den gefährlichen Teilen geschützt sind, hierbei aber kein Signalfluss bzw. eine Schutzreaktion vorkommt. Im einfachsten Fall bezeichnet man solche Schutzeinrichtung als räumliche Trennung von der Gefahr. Hiermit sind einfache Abdeckungen gemeint, welche einfach vor der Inbetriebnahme geschlossen werden müssen, bzw. welche immer vorhanden sind.

---

<sup>8</sup> vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 336 ff)

## Hinweisende Sicherheitstechnik<sup>9</sup>

Bei der hinweisenden Sicherheitstechnik wird auf die Gefahr nur hingewiesen. Dies bedeutet, es ist ein Schriftzug bzw. ein einfach zu erkennendes Warnschild bei der Maschine angebracht. Die hinweisende Sicherheitstechnik wird meistens zusätzlich bei der mittelbaren und unmittelbaren Sicherheitstechnik verwendet.

### 2.4.2 Gestaltungsprinzipien<sup>10</sup>

Die folgenden fünf Prinzipien sollen eine Hilfe zum richtigen Gestalten darstellen. Sie können dem Konstrukteur bei gewissen Anforderungen und Zielen die richtige Richtung für die Konstruktion vorgeben. Weiters können diese Prinzipien bei verschiedensten Anwendungen von Nutzen sein.

#### Prinzipien der Kraftleitung

Die Prinzipien der Kraftleitung werden in folgende eingeteilt:

- Kraftfluss und Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit

Beim Kraftfluss ist es wesentlich, dass die einzelnen Teile keine sprungartigen Querschnittsänderungen erfahren. Durch diese können Spannungsspitzen an den jeweiligen Stellen entstehen und das Bauteil kann überbelastet werden. Bei der Gestaltfestigkeit wird darauf geachtet, dass durch korrekte Wahl von Bauteilen oder Abmessungen die einzelnen Bauteile auch gleichmäßig beansprucht werden.

- Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung

Hierbei soll man darauf achten, dass Krafteinleitungspunkte immer mit möglichst kurzen Abständen in die Struktur eingeleitet werden. Somit können je nach Anwendungsfall des Bauteils ungewollte Zusatzlasten verringert bzw. verhindert werden.

- Prinzip der abgestimmten Verformungen

Hierzu wird für bestimmte Anforderungen die Flexibilität von Stoffen ausgenützt um diese durch die auftretende Belastung in die korrekte Lage zu bringen.

<sup>9</sup> vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 327 ff)

<sup>10</sup> vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 393 ff)

- Prinzip des Kräfteausgleichs

Hiermit wird darauf hingewiesen, dass jede Kraft eine Gegenkraft hervorruft. Dies kann man sich zu Nutzen machen, indem sich voneinander unabhängige Belastungen auf Grund ihrer Richtungen gegenseitig aufheben bzw. die Gesamtbelastung verringern.

- Praxis der Kraftleitung

Die Kraftleitung in einem Bauteil sollte immer möglichst kurz sein. Weiters sollen scharfe Umlenkungen des Kraftflusses möglichst verhindert werden.

## Prinzip der Aufgabenteilung

- Zuordnung der Teilfunktionen

Durch das Aufstellen der Funktionsstruktur ergeben sich die verschiedenen Teilfunktionen. Diese erfüllen einen Teil der Gesamtfunktion und können parallel ablaufen oder in Schritten nacheinander.

- Aufgabenteilung bei unterschiedlichen Funktionen

Hierzu werden Aufgaben in unterschiedliche Funktionen geteilt. Ein einfaches Beispiel wäre die Aufteilung eines Lagers in zwei, die zusammen eine Aufgabe erfüllen.

- Aufgabenteilung bei gleicher Funktion

Bei der Aufgabenteilung bei gleicher Funktion werden dieselben Bauteile mehrmals verbaut um z. B. größere Kräfte zu übertragen.

## Prinzip der Selbsthilfe

- Selbstverstärkende Lösungen

Bei der selbstverstärkenden Lösung wird davon Gebrauch gemacht, dass vorhandene Belastungen so ausgenutzt werden, dass sie im besten Fall die Konstruktion unterstützen. Das einfachste Beispiel hierzu ist ein Druckbehälter, in dem ein Innendruck wirkt. Man kann die Wartungslücke von außen auf den Behälter anbringen. Hierzu werden aber zusätzliche Befestigungen benötigt, um dem Innendruck entgegen zu wirken und dadurch den Behälter dicht zu halten. Hierbei könnte man den Deckel so anbringen, dass dieser von Innen das Loch schließt. Wenn nun der Behälter unter Druck steht, dient dieser zur Verstärkung des Anpressdrucks und zur Dichtheit des Behälters.

- Selbstaussgleichende Lösungen

*"Bei der selbstausgleichenden Lösung wird ebenfalls bereits unter Normallast eine ausgleichende Hilfswirkung aus begleitenden Nebengrößen in fester Zuordnung zu einer Hauptgröße gewonnen, wobei die Hilfswirkung der Ursprungswirkung entgegenwirkt und dadurch einen Ausgleich erzielt, der eine höhere Gesamtwirkung ermöglicht."<sup>11</sup>*

- Selbstschützende Lösungen

Bei einer selbstschützenden Lösung tritt im Überlastfall eine Schutzwirkung zur Kompensation der Kräfte auf. Hier wird kurzzeitig auf die erwartende Reaktion verzichtet. Ein Beispiel dazu wäre eine Spiralfeder. Diese verhält sich je nach Belastung entlang ihrer Federkennlinie, tritt jedoch eine Überbelastung auf, so liegen die einzelnen Windungen aneinander an. Somit wird die Feder in diesem Fall komplett zusammengedrückt. Die Federkennlinie verändert sich zu diesem Zeitpunkt sprunghaft, aber es treten keine Folgeschäden für die Feder auf.

### 2.4.3 Gestaltungsrichtlinien<sup>12</sup>

Die unten angeführten Richtlinien dienen als Leitlinien zum Konstruieren. Sie sollen dazu dienen, die wesentlichen Aspekte zu beachten und wenn möglich zu berücksichtigen.

#### Ausdehnungsgerecht

Auf Grund von Temperaturschwankungen kommt es in den Bauteilen zu Ausdehnungen bzw. zu Schrumpfungen. Durch diese physikalischen Abläufe kann es in Bauteilen zu nicht vorhersehbaren Spannungen kommen, welche unter Umständen zum Versagen des Bauteils führen können.

#### Korrosionsgerecht

Wenn Stähle im Einsatz sind, muss man auch auf die Korrosion achten. Diese kann mit der Verwendung von hochlegierten, rostfreien Stählen vermeiden, was aber wiederum eine Erhöhung der Materialkosten mit sich trägt. Mit passenden Überlegungen, kann die Konstruktion so ausgeführt werden bzw. Bauteile so positioniert werden, dass ein Eindringen von Flüssigkeiten ohne zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen nicht möglich ist.

<sup>11</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 383)

<sup>12</sup> vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 393 ff)

## **Verschleißgerecht**

Da Verschleiß bei keinen Bauteilen, welche in Bewegung sind, zu vermeiden ist, muss bei der Konstruktion darauf achtgegeben werden, dass dieser in einem vertretbaren Ausmaß auftritt. Hierzu sind passende Oberflächenbeschaffenheiten sowie während des Betriebs eine ausreichende Schmierung anzustreben.

## **Formgebungsgerecht**

Bauteile sollen nicht nur ihre angeforderten Beanspruchungen erfüllen sondern auch im Sinne der Ästhetik gefallen. Gerade in letzter Zeit ist es für Kunden immer wichtiger, ein Produkt nicht nur mit herausragender Zuverlässigkeit zu erwerben, sondern auch mit einem passenden Design.

## **Fertigungsgerecht**

Ein wesentlicher Bestandteil des Konstruierens ist die fertigungsgerechte Gestaltung des einzelnen Produkts. Hierbei können eine Menge Kosten eingespart werden, welche auf die fertigungsgerechte Konstruktion zurückzuführen ist. Als Beispiele hierfür sind die beiden Bauweisen Integralbauweise und Differentialbauweise anzuführen. Beide dieser Bauweisen haben ihre Vor- und Nachteile, wobei für die benötigte Konstruktion natürlich die Vorteile überwiegen sollen.

## **Montagegerecht**

Ein wesentlicher Faktor ist die montagegerechte Konstruktion, vor allem wenn mehrere individuelle Bauteile verwendet werden, welche denselben Bauraum benötigen. Vor allem Bauteile, welche kreisförmig sind, sind oftmals schwierig zu montieren. Hier reichen schon einfache Bohrungen bzw. Nasen, die somit nur eine Einbausituation ermöglichen.

## **Instandhaltungsgerecht**

Wenn für die Instandhaltung maßgebende Aspekte berücksichtigt werden, kann dies einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil während des Betriebes des Produktes hervorrufen. Lange Wartungsintervalle und geringe Stillstandszeiten für eine Wartung fördern maßgeblich die Produktivität.

## **Recyclinggerecht**

Für den grünen Fußprint des Produktes sollten möglichst viele Teile recycelbar oder wiederverwendbar sein. Vor allem im Bereich des Zugbaus betrifft dies große Mengen an Stahl bzw. Aluminium. Ein weiterer Aspekt wäre

auch die Verwendung von biologisch abbaubaren Materialien, welche ohne großen Aufwand wieder recycelt werden können.

## Normgerecht

Für die Konstruktion von Bauteilen sind je nach Anforderungen und Anwendungsgebiet verschiedenste Normen zu erfüllen. Bei Schienenfahrzeugen sind dies die DIN EN 12663:2010-07 Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen, DIN EN 15663:2012-05 Bahnanwendungen – Definition der Fahrzeugreferenzmassen und die DIN EN 15085-5:2008-01 Bahnanwendungen – Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen.

### 2.4.4 Bewerten von Entwürfen<sup>13</sup>

Zum Bewerten von Entwürfen gibt es verschiedene Verfahren, welche zum Ziel führen können. Zu Beginn jeder Analyse empfiehlt sich eine grobe Auswahl mittels KO-Kriterien. Diese dienen zur Einschränkung der möglichen Varianten und führen den Konstrukteur grob in die anzustrebende Richtung. Für eine genaue Analyse empfiehlt sich die Bewertung nach der Richtlinie VDI 2225 oder die Durchführung einer Nutzwertanalyse. Diese beiden Analyseverfahren unterscheiden sich im Wesentlichen nur dadurch, dass bei der Nutzwertanalyse die einzelnen Bewertungskriterien eine Gewichtung erhalten. Anschließend wird die Nutzwertanalyse erklärt, da diese auch im Laufe der Arbeit angewendet wird.

### Paarweiser- Vergleich/Nutzwertanalyse<sup>14</sup>

Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren welches zur Bewertung von Lösungsvarianten dient. Hierbei handelt es sich über eine grobe Grundauswahl, welche in weiteren Schritten noch konkretisiert werden muss.

Hierzu werden bei der Nutzwertanalyse verschiedenste Bewertungskriterien festgelegt und miteinander verglichen. Für diesen Vergleich wird der Paarweise-Vergleich durchgeführt. Dabei werden die einzelnen Bewertungskriterien in einer Matrix gegenübergestellt. Die einzelnen Kriterien werden in selber Reihenfolge in

<sup>13</sup>vgl. (Pahl/Beitz, 2006, p. 513 ff)

<sup>14</sup>vgl. (Zangemeister, 2014)

den Zeilen und Spalten eingetragen. Anschließend werden Faktoren festgelegt, beispielsweise:

- "0" ein Kriterium ist weniger wichtiger als ein gegenüber gestelltes,
- "0,5" ein Kriterium hat dieselbe Wichtigkeit wie das gegenüber gestellte und
- "1" ein Kriterium ist wichtiger als das gegenüber gestellte.

Aus diesen Gegenüberstellungen bekommt man durch Bildung der Summer in einer Zeile, aus dem Paarweisen-Vergleich für jedes einzelne Kriterium eine bestimmte Gewichtung.

Anschließend wird mit einer Wertigkeit von 1-10 Punkten ("1"- trifft nicht zu bis "10"- trifft zu) die Nutzwertanalyse für die verschiedenen Möglichkeiten durchgeführt. Durch Multiplikation der verschiedenen Gewichtungen mit den Wertigkeiten ergibt sich ein bestimmter Gewichtungswert, durch Bildung der Summe über die einzelnen Gewichtungswerte in einer Spalte folgt daraus der Wert der Nutzwertanalyse. Der höchste Wert trifft somit am besten auf die einzelnen Bewertungskriterien zu und diese Möglichkeit ist somit die beste Lösung für die Aufgabenstellung.

Bei der Nutzwertanalyse ist des Weiteren zu beachten, dass es einen subjektiven Anteil bei jeder Bewertung gibt. Somit können bei Durchführung einer Nutzwertanalyse zweier unabhängiger Parteien, zwei verschiedene Ergebnisse auftreten.

In Abbildung 3 ist ein Paarweiser-Vergleich mit einer Nutzwertanalyse dargestellt. Im linken Bereich der Abbildung sieht man die Gegenüberstellung der einzelnen Kriterien. Es ist darauf zu achten, dass man die Bewertung der einzelnen Kriterien so durchführt, dass beim Vergleich zweier Kriterien die Angaben so eingetragen werden, dass sich keine Widersprüche ergeben. Beispielsweise kann man in der ersten Zeile erkennen, dass "Kriterium 1" wichtiger als "Kriterium 2" ist. Daraus folgt, dass in der nächsten Zeile "Kriterium 2" als weniger wichtig als "Kriterium 1" angegeben werden muss.

In der Spalte "SUMME" wird in den einzelnen Zeilen die Summe gebildet. Diese Werte können zum besseren Verständnis in Prozent angegeben werden.

Die blau markierten Werte sind jene, die zur Wertigkeit der einzelnen Möglichkeiten nach subjektivem Ermessen passen. Wie man bei "Kriterium 1" erkennen kann, ist der Wert für "Möglichkeit 1" 2, dies bedeutet, dass das "Kriterium 1" nahezu unpassend für "Möglichkeit 1" ist. Nach Festlegung der Wertigkeiten, wird das Produkt mit den Gewichtungen gebildet. Die Summe aller einzelnen Zeilen ergibt die technische Wertigkeit für die Möglichkeit. In dem unten angeführten Beispiel ist "Möglichkeit 2" die beste Lösung.

		PAARWEISER-VERGLEICH							NUTZWERTANALYSE							
als		Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium 4	Kriterium 5	SUMME	%	Möglichkeit 1		Möglichkeit 2		Möglichkeit 3		Möglichkeit 4	
wichtiger																
Kriterium 1			1	0,5	0	1	2,5	25	2	50	6	150	1	25	8	200
Kriterium 2		0		0	0,5	0	0,5	5	8	40	2	10	5	25	7	35
Kriterium 3		0,5	1		1	0,5	3	30	6	180	4	120	4	120	3	90
Kriterium 4		1	0,5	0		0,5	2	20	7	140	3	60	3	60	1	20
Kriterium 5		0	1	0,5	0,5		2	20	1	20	6	120	7	140	2	40
							10			430		460		370		385

Abbildung 3: Paarweiser-Vergleich Nutzwertanalyse

Zusätzlich können die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt werden, wie man es in Abbildung 4 erkennen kann. In diesem Diagramm trägt man die technische Wertigkeit auf der Abszisse auf und die wirtschaftliche Wertigkeit auf der Ordinate. Somit ergibt sich eine Linie mit positiver Steigung, links unten ist das schlechteste Ergebnis und rechts oben ist das beste Ergebnis. Trägt man jedoch die technische Wertigkeit gegenüber den Kosten auf, so ändert sich die Steigung der besten Lösung und somit ist links oben (höchste Kosten und schlechteste technische Wertigkeit) das schlechteste Ergebnis und rechts unten (niedrigste Kosten und beste technische Wertigkeit) das beste Ergebnis. Je nachdem welche Werte man gegenüber stellt, kann man durch Einstechen und Ziehen eines Kreises die optimale Lösung mit dem geringsten Abstand zum max. Punkt bestimmen.

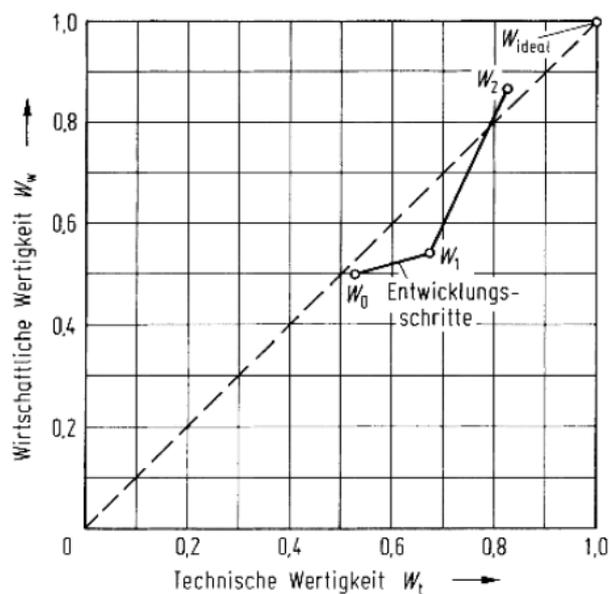


Abbildung 4: Diagramm technische- und wirtschaftliche- Wertigkeit<sup>15</sup>

<sup>15</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 177)

## 2.5 Methodisches Ausarbeiten

*"Ausarbeiten ist der Teil des Konstruierens, der die Baustruktur eines technischen Gebildes durch endgültige Vorschriften für Form, Bemessung und Oberflächenbeschaffenheit aller Einzelteile, Festlegen aller Werkstoffe, Überprüfung der Herstellmöglichkeit sowie der endgültigen Kosten ergänzt und die verbindlichen zeichnerischen und sonstigen Unterlagen für seine stoffliche Verwirklichung schafft."*<sup>16</sup>

Beim Ausarbeiten werden alle fertigungstechnischen sowie bautechnischen Einzelheiten geklärt und durchgeführt. Davon sind z.B. die einzelnen Schritte der Zeichnungserstellung sowie die Planung der Arbeitsvorbereitung betroffen.

In Abbildung 5 werden die Hauptarbeitsschritte des methodischen Ausarbeitens dargestellt. Grundvoraussetzung für das methodische Ausarbeiten ist ein konkreter Entwurf, welcher der Anforderungsliste entspricht und die geforderte Funktion erfüllt. Anschließend werden von dem Entwurf die benötigten Einzelteilzeichnungen abgeleitet. Dies beinhaltet die Erstellung der Zeichnung mit allen zur Fertigung benötigten Maßen, Toleranzen, Form- und Lagetoleranzen, Oberflächenbeschaffenheit, sowie, falls benötigt, Passungstabellen für die Fertigung.

Weiters werden die Zusammenstellungszeichnungen bzw. Schweißzeichnung für den Zusammenbau erstellt. Diese Zeichnungen dokumentieren die Hauptabmessungen sowie die Einbaumaße für den Zusammenbau. Für die eindeutige Unterscheidung der Einzelteile werden Positionsnummern vergeben, welche auch mit der zugehörigen Stückliste übereinstimmen.

Ein wesentlicher Schritt bei der Ausarbeitung ist die Erstellung der Stücklisten. Diese Informationen werden zusätzlich für den Einkauf, Logistik und Arbeitsvorbereitung benötigt. Um die einzelnen Bauteile eindeutig zu definieren, werden konkrete Bauteilnummern vergeben.

Zusätzlich müssen die für die Montage relevanten Vorgehensweisen definiert werden, um eine standardisierte Montage zu gewährleisten und die geforderten Toleranzen einzuhalten.

Als letzter großer Schritt folgt die Prüfung der einzelnen Dokumente. Diese Prüfung folgt meistens von dritter Hand um etwaige Beeinflussungen bei Kenntnis des Produktes zu eliminieren.

Nach dieser Prüfung folgt die allgemeine Freigabe zur Fertigung.

---

<sup>16</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 197)

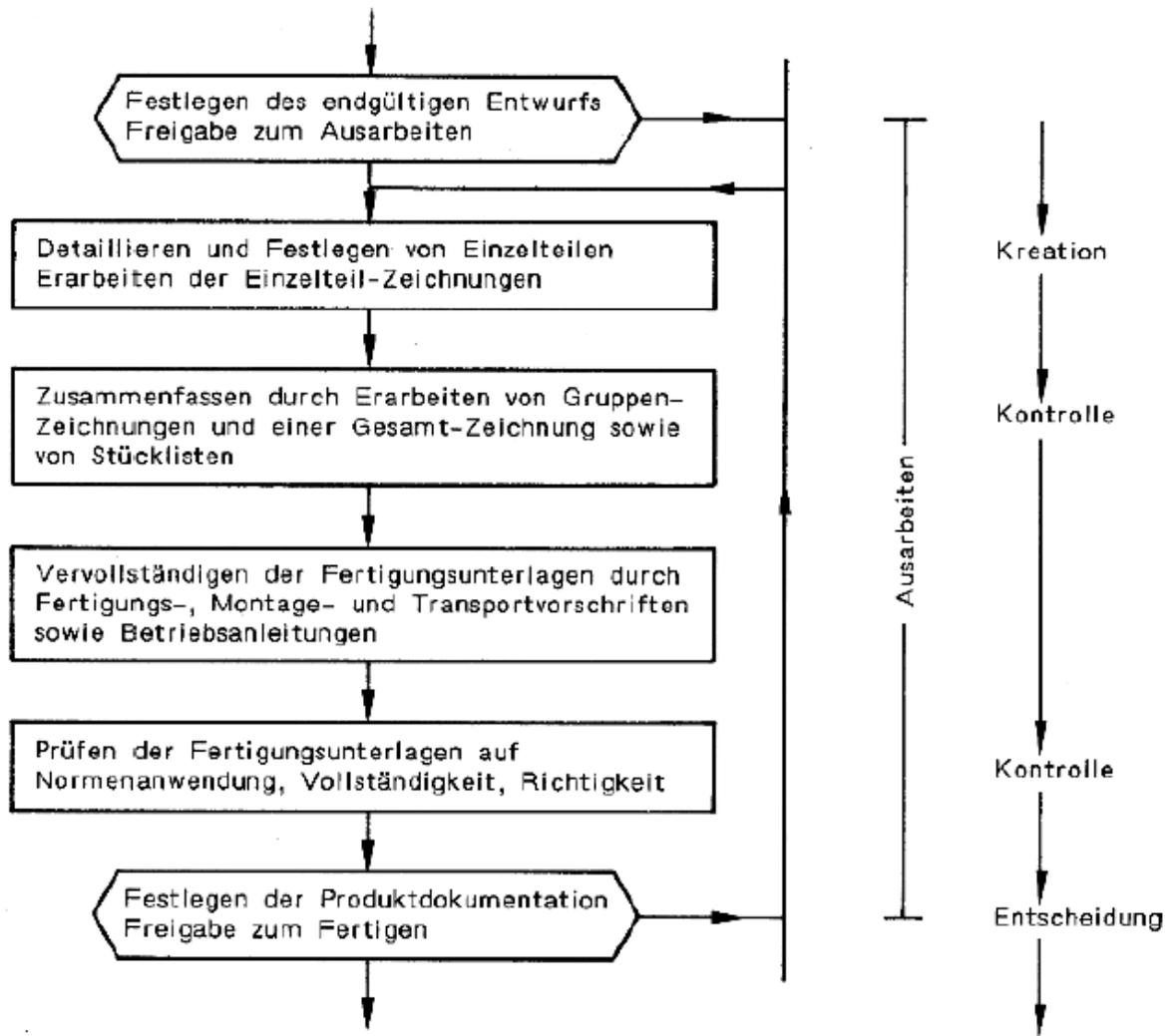


Abbildung 5: Arbeitsschritte beim methodischen Ausarbeiten<sup>17</sup>

## 2.6 Werkstoffe im Schienenfahrzeugbau

Der erste aus Stahl gefertigte Wagenkasten hieß GLENGYLE und wurde 1907 von der Firma Pullmann in den Vereinigten Staaten gefertigt. Zuvor wurden Eisenbahnen noch aus einem Holzrahmen konstruiert. Der Waggon GLENGYLE war ein Meilenstein in der Bahnindustrie, denn ab diesem Waggon wurden die meisten aus Stahl gefertigt. Die Konstruktion basierte auf einem massiven Mittellangträger, an dem die Seitenwände mit Hilfe einfacher Träger befestigt wurden.<sup>18</sup>

<sup>17</sup> (Pahl/Beitz, 2006, p. 552)

<sup>18</sup> (J.L.Pee, 1987)

In Abbildung 6 ist der Rohbau des Waggons GLENGYLE dargestellt. In der Mitte des Bildes kann man den massiven Mittellangträger mit den links und rechts angeordneten Trägern zur Seitenwand erkennen.



Abbildung 6: Rohbau von GLENGYLE <sup>19</sup>

Heutzutage werden Züge nicht nur aus Baustahl gefertigt, sondern auch aus verschiedensten hochwertigen Werkstoffen. Die am öftesten verwendeten Werkstoffe sind Baustahl, nichtrostender Stahl und Aluminium. Die häufigste Anwendung von Stahl ist im Bereich der Reisezüge. Weiters können je nach Kundenanforderung die Wagenkästen im Reisezugbereich auch aus nichtrostendem Stahl gefertigt werden. Im Metro-Bereich werden die meisten Züge aus Aluminium gefertigt. So kann man im Betrieb auf Grund der ständigen Beschleunigung und Abbremszyklen am meisten Energie und Kosten sparen.

Bei den Metros besteht ebenfalls die Möglichkeit den Wagenkasten aus Stahl zu fertigen. Allerdings kommt es auf Grund der Konstruktion mit Stahl zu größeren Massen, welche sich im Betrieb und in der Auslegung des Antriebes bemerkbar machen. Hierzu soll die vorliegende Diplomarbeit ein Ergebnis liefern, wie viel Masse durch die Verwendung von höherfesten Stählen eingespart werden kann.

---

<sup>19</sup> (J.L.Pee, 1987)

## 2.7 Einteilung der Stähle

Laut DIN EN 10 020:2000-07 werden Stähle in folgende Gruppen eingeteilt:

1. Einteilung nach der chemischen Zusammensetzung:

- Maßgebende Legierungsgehalte
- Definition von Klassen
  - unlegierte Stähle und nichtrostende Stähle

2. Einteilung nach Hauptgüteklassen:

- unlegierte Stähle
  - unlegierte Qualitäts- und unlegierte Edelstähle
- nichtrostende Stähle
- Andere legierte Stähle
  - legierte Qualitäts- und legierte Edelstähle

Da für die Diplomarbeit vorgegeben ist, dass Baustähle ohne Legierungselemente verwendet werden müssen, kommen aus den oben angeführten Stahlgruppen für den Vorbau nur unlegierte Qualitätsstähle und unlegierte Edelstähle in Frage.

## 2.8 Höherfeste Stähle

Höherfeste Stähle sind jene Stähle, welche eine höhere Streckgrenze als 355 MPa<sup>20</sup> aufweisen. Diese Stähle werden auch im Lastkraftfahrzeugbau bzw. im Kranbau eingesetzt. Durch ihre hohe Streckgrenze können Wandstärken dementsprechend verringert werden.

Zu der Gruppe der höherfesten Stähle zählen:

- normalisierte Feinkornbaustähle (DIN EN 10025-3:2005-02)
- thermomechanisch- gewalzte Feinkornbaustähle (DIN EN 10025-4:2005-04)
- TRIP-Stähle (DIN EN 10338:2015-10)
- Dualphasen-Stähle DP (DIN EN 10346:2009-07)
- Mikrolegierte-Stähle (DIN EN 10268:2006-10)

In Abbildung 7 werden die verschiedenen höherfesten Stähle sowie Aluminiumlegierungen und austenitischen Stähle dargestellt. Auf der Ordinate ist die Bruchdehnung [%] und auf der Abszisse die Zugfestigkeit [MPa] aufgetragen. Die einzelnen Bezeichnungen im Diagramm bedeuten:

P = phosphorlegiert, IF = interstitial free, HSLA = high strength, low alloy, BH = bake hardening, DP = dual phase, TRIP = transformation induced plasticity, CP = Complexphasen, MS = Martensitphasen.

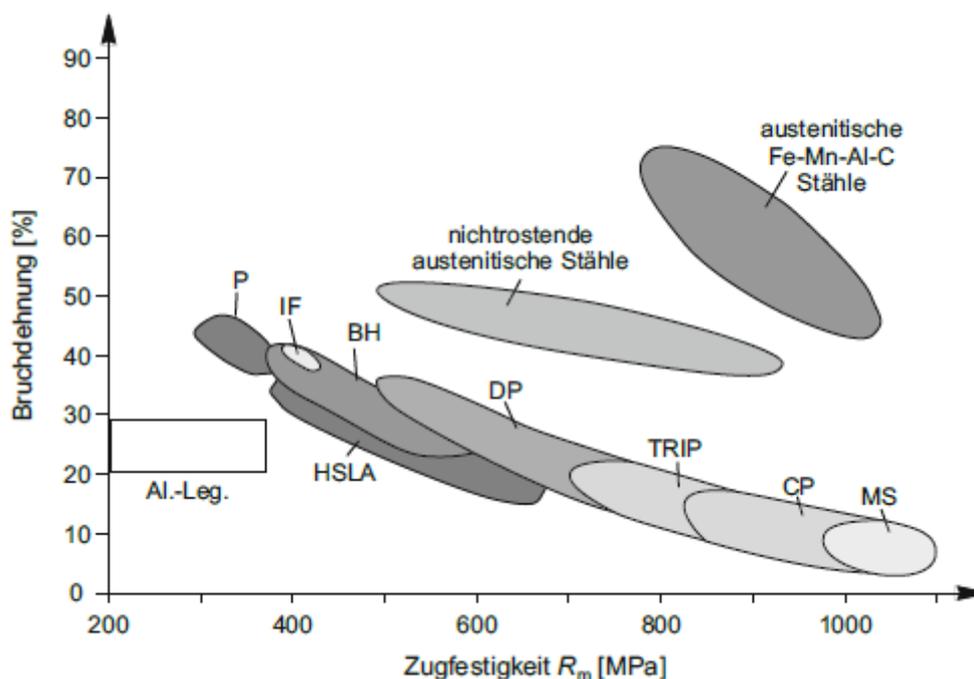


Abbildung 7: Vergleich höherfester Stähle<sup>21</sup>

<sup>20</sup> (Bargel/Schulze, 2012, p. 242)

<sup>21</sup> (Berns & Theisen, 2008, p. 181)

## 2.8.1 Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle

Da sich die thermomechanisch gewalzten Stähle auf Grund der Analyse mittels KO-Kriterien, als passende Stahlgruppe herausgestellt haben, wird diese Gruppe im Zuge der Diplomarbeit näher betrachtet.

Thermomechanische Stähle zeichnen sich nicht nur dadurch aus, dass sie einer bestimmten Wärmebehandlung unterliegen, wie z.B.: Anlassen, sondern bei diesen Werkstoffen wird auch mittels einer zeitgleichen mechanischen Behandlung die Festigkeit gesteigert. Durch diese Verfahren werden somit aus Standardbaustählen höherfeste unlegierte Stähle hergestellt.<sup>22</sup>

Um die Kaltumformbarkeit und die guten Schweißigenschaften gewährleisten zu können, werden die Anteile von Kohlenstoff und Legierungselementen niedrig gehalten. Diese sind mit V, Ti und Nb mikrolegiert und als ausgeschiedene Carbonitride wirken sie mehrfach. Sie dienen zur Begrenzung des Kornwachstums im austenitischen Zustand und verhindern die Rekristallisation.<sup>23</sup>

In Abbildung 8 werden die verschiedenen Walzverfahren gegenüber gestellt. Auf der Ordinate ist die Walztemperatur [°C] aufgetragen und auf der Abszisse die Zeit. Die gepunkteten Linien stellen die Abkühlung mittels Luft dar, "W" Kennzeichnet die Abkühlung mittels Wasser. Wie man erkennen kann, wird beim konventionellen Walzen mit dem Vorwalzen bei ca. 1100°C begonnen, anschließend wird bis unter ca. 1000°C fertiggewalzt. Die Haspeltemperatur liegt bei ca. 800°C. Beim normalisierenden Walzen wird bei ca. 1050°C mit dem Vorwalzen begonnen, nach einer Zwischenabkühlung mittels Luft folgt bei ca. 900°C das Fertigwalzen. Die Haspeltemperatur liegt bei ca. 700°C. Beim thermomechanischen Walzen liegt die Vorwalztemperatur bei ca. 1000°C. Nach einer Abkühlung mittels Luft wird bei ca. 800°C fertiggewalzt. Die Haspeltemperatur liegt unter 600°C, diese Abkühlung kann mittels Luft oder Wasser erfolgen. Auf Grund der geringeren Walztemperaturen und der Kombination von Warmumformung und Wärmebehandlung, bilden sich feinere Körner als beim herkömmlichen Walzen, deswegen werden beim thermomechanischen Walzen höhere Festigkeiten erreicht.<sup>24</sup>

<sup>22</sup> (Weißbach, 2012, p. 156)

<sup>23</sup> vgl. (Weißbach, 2012, p. 157)

<sup>24</sup> (Berns & Theisen, 2008, p. 166)

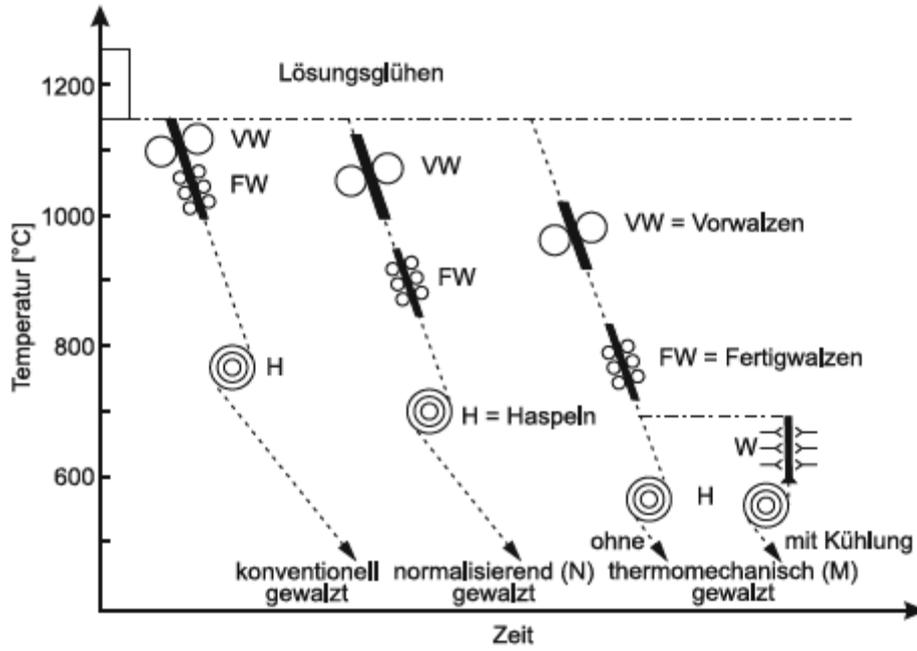


Abbildung 8: Vergleich Walzverfahren<sup>25</sup>

<sup>25</sup> (Berns & Theisen, 2008, p. 166)

### 3 Berechnung Vorbau

Der Vorbau ist ein massiver Schweißteil, welches im Wesentlichen dazu dient, den Wagenkasten mit dem Fahrwerk zu verbinden. Er befindet sich beim Wagenkasten am vorderen und hinteren Ende. Der Vorbau KKE (Kurzkupplungsende) befindet sich am hinteren Ende des Waggons. Der Vorbau FSTE (Langkupplungsende Führerstand) befindet sich am Beginn des Wagenkastens. Die beiden Vorbauten sind bis auf das Kopfstück baugleich, wobei beim FSTE Vorbau am Kopfstück noch eine zusätzliche Baugruppe angeschweißt ist.

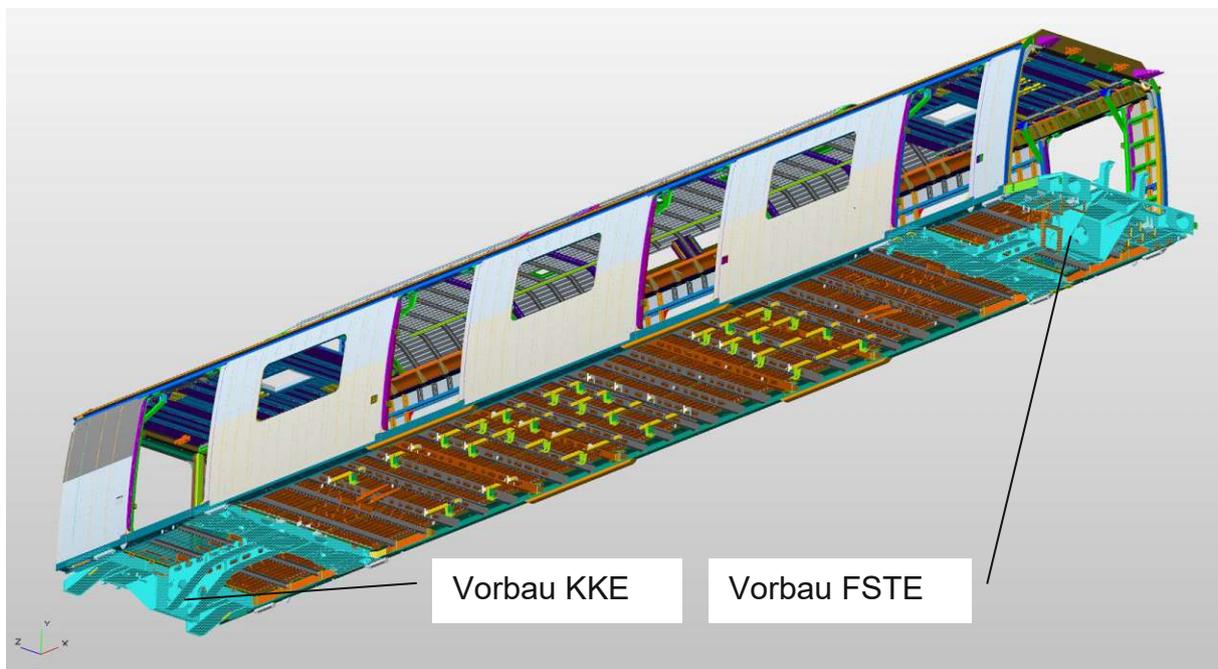


Abbildung 9: Darstellung der Vorbau im Wagenkasten

Durch den Vorbau werden die Axialkräfte der Kupplung eingeleitet. Wie in Abbildung 10 dargestellt besteht der Vorbau aus drei Hauptbestandteilen: dem Hauptquerträger, dem Mittellangträger und dem Kopfstück. Der Hauptquerträger übernimmt im Wesentlichen die Teilfunktion der vertikalen Lastenleitung des Fahrwerks in den Wagenkasten. Ein Teil der Kupplungslasten wird auf Grund der Anbindung des Mittellangträgers mitaufgenommen.

Der Mittellangträger übernimmt die Krafteinleitung der Kupplung und verteilt diese auf den Wagenkasten und den Hauptquerträger.

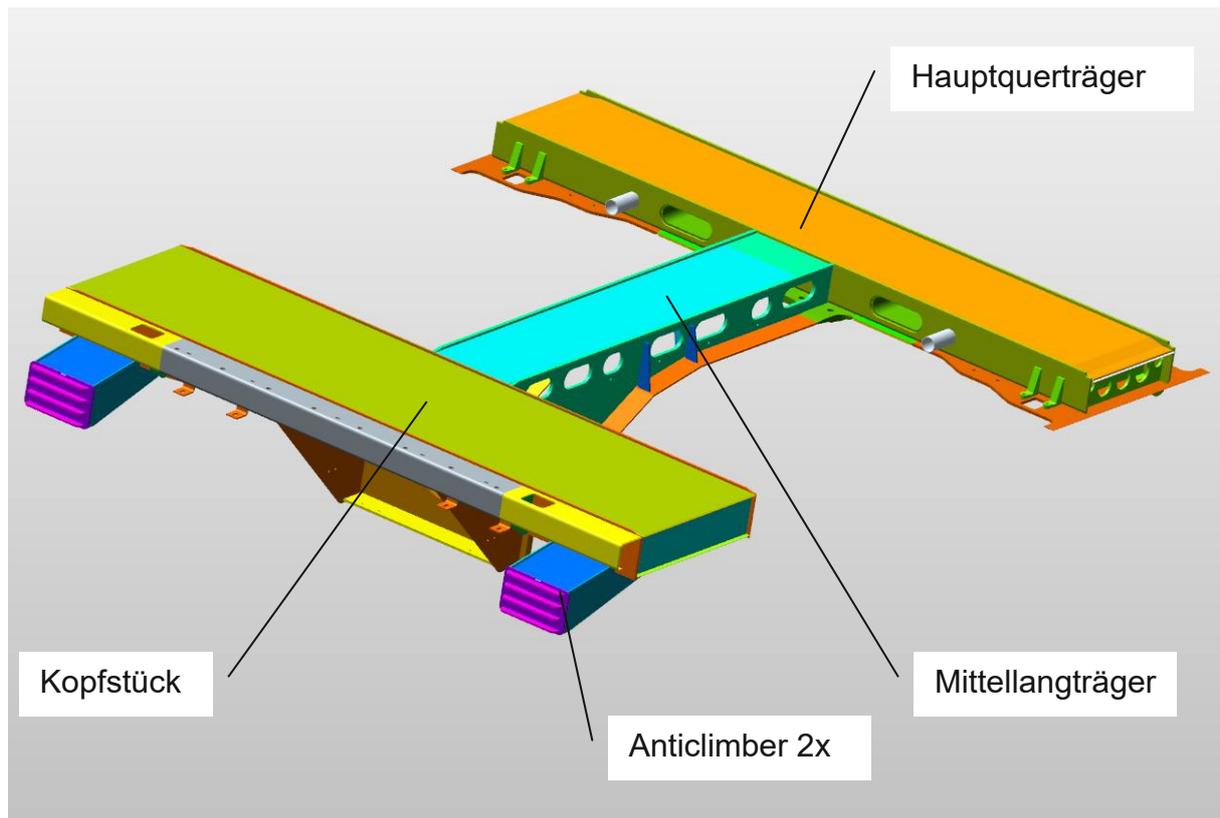


Abbildung 10: Vorbau KKE

### 3.1 Normen für Schienenfahrzeuge

Schienenfahrzeuge unterliegen in Europa DIN EN 12663:2010-07. Diese Norm legt die Anforderungen an die Festigkeit für Wagenkästen fest. Außerdem werden darin die einzelnen Nachweise, die zu erfüllen sind, definiert.

In Zusammenarbeit mit DIN EN 12663:2010-07 ist auch DIN EN 15663:201205 für die Auslegung eines Wagenkastens maßgebend. Diese Norm definiert die einzelnen Massen des Wagenkastens.

Darüber hinaus dient die Schweißnorm DIN EN 15085-5:2008-01 zur Herstellung von Schienenfahrzeugen. Diese Norm definiert die Anforderungen an Schweißbetrieb, Qualität und Fertigung sowie Prüfung der Schweißnähte.

### 3.2 Randbedingungen für die Berechnung

Die Auslegung eines Wagenkastens wird in Zusammenarbeit mit den Kunden in einem Dokument festgehalten. Dort werden alle Belastungen zur Berechnung und Auslegung des Wagenkastens definiert. Im Grunde wird der Wagenkasten für Axialbelastungen, seitliche Belastungen und Torsionsbelastungen berechnet. Der Wagenkasten wird mit einem Koordinatensystem im Raum definiert. Die Ebene  $xy$  liegt parallel zur Schienenoberkant wobei die  $x$ -Achse in Längsrichtung des Wagenkastens zeigt. Die Achse  $z$  liegt normal auf die  $xy$ -Ebene.

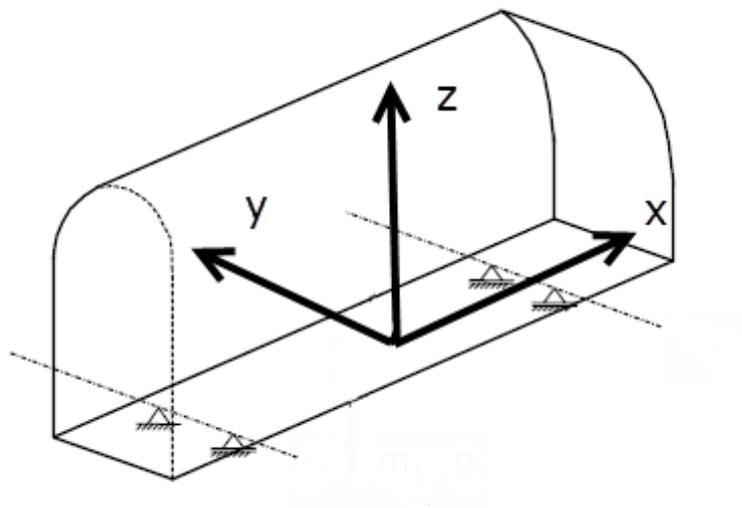


Abbildung 11: Koordinatensystem Wagenkasten

Die einzelnen Belastungen des Wagenkastens werden in der folgenden Tabelle 1 definiert. Diese Tabellen sind der Norm DIN EN 15663-1:2012-05 entnommen. Sie definieren die einzelnen Belastungen für Druck- bzw. Zugkraft und das maximale Betriebsgewicht.

Die Masse  $m_1$  bezeichnet die Wagenmasse des Waggons ohne Fahrwerk.

Die Masse  $m_4$  bezeichnet die Beladung des Waggons.

Die einzelnen Kupplungskräfte werden anhand der Kategorie festgelegt. Metrofahrzeuge werden laut Norm DIN EN 15663\_1:201205 in der Kategorie P-III eingestuft.

Tabelle 2 — Druckkraft auf Puffer- und/oder Kupplungsbefestigung

Kraft in kN

Lokomotiven	Personenfahrzeuge					Güterwagen	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
2 000	2 000	1 500	800	400	200	2 000 <sup>a</sup>	1 200 <sup>a</sup>

Tabelle 5 — Zugkraft an der Kupplungsbefestigung

Kraft in kN

Lokomotiven	Personenfahrzeuge					Güterwagen	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
1 000 <sup>a</sup>	1 000 <sup>a</sup>	1 000	600 <sup>b</sup>	300 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	1 500 <sup>c</sup>	1 500 <sup>c</sup>
						1 000 <sup>d</sup>	1 000 <sup>d</sup>

Tabelle 9 — Maximales Betriebsgewicht

Belastung in N

Lokomotiven	Personenfahrzeuge					Güterwagen	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$1,3 \times g \times m_1$	$1,3 \times g \times (m_1 + m_4)$					$1,3 \times g \times (m_1 + m_3)^a$	

Tabelle 1: Lasten und Beladungen DIN EN 15663\_1:2012-05

### 3.3 Zulässige Spannungen

Die zulässigen Spannungen für den Wagenkasten, welcher aus Stahl gefertigt ist, ergeben sich aus den Vorgaben der DVS 1612:2014-08 sowie aus auftragsspezifischen Definitionen, welche in internen Dokumenten festgehalten sind.

Dort sind die Spannungen für die Berechnung festgelegt mit:

$$\sigma_{zul} = \frac{Rp_{0,2}}{S_1} \quad \text{Gl. 1}$$

$Rp_{0,2}$ ... Streckgrenze des Werkstoffes

$S_1$ ... Sicherheit gegenüber der Streckgrenze, festgelegter Minimalwert 1.15.

$$\sigma_{zul} = \frac{Rm}{S_2} \quad \text{Gl. 2}$$

$R_m$  ... Zugfestigkeit des Werkstoffes

$S_2$  ... Sicherheit gegenüber die Zugfestigkeit, festgelegter minimal Wert 1.5.

Für die Dauerfestigkeitsbetrachtung des Werkstoffes sind die zulässigen Spannungen für die verschiedenen Kerbfälle der Schweißnähte maßgebend. Diese Fälle werden von A (entspricht Grundmaterial) bis F3 (entspricht einer HY-Naht mit einseitiger Kehlnaht, welche eine Zugspannung normal zur Naht und eine Momentenbelastung in Richtung der Naht aufweist). Dieser Kerbfall ist in Abbildung 12 dargestellt.

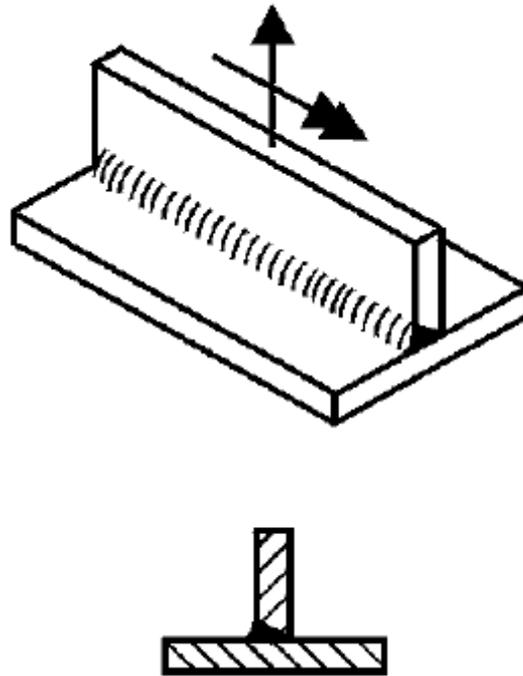


Abbildung 12: Kerbfall F3 laut DVS 1612:2014-08

Für die zulässigen Spannungen zur Berechnung der Dauerfestigkeit gibt es MKJ-Diagramme, wo anhand des Belastungsverhältnisses und des Kerbfaktors ein zulässiger Spannungswert abgelesen werden kann. In Abbildung 12 ist ein MKJ-Diagramm für die zulässigen Normalspannungen dargestellt. Auf der Abszisse ist das Spannungsverhältnis aufgetragen und auf der Ordinate die zulässige Spannung. Ein analoges Diagramm gibt es auch für Schubspannungen. Diese Werte sind laut DVS 1612:2014-08 für folgende Voraussetzungen gültig:

- Überlebenswahrscheinlichkeit  $p_u = 97,5\%$  (mindestens 95%)
- Mindestanzahl von  $2 \times 10^6$  Zyklen für Stahl bei konstanter Lastamplitude
- Klassifizierung der Bauformen in Bezug auf Kerbfälle
- Überprüfen der Übertragbarkeit von Kleinprobenwerten auf reale Bauteile

Weiters wird in der DVS 1612:2014-08 festgelegt, dass bei Stählen, welche eine höhere Streckgrenze als der Stahl S355J2C\_N aufweisen, für den Kerbfall A (Grundmaterial) höhere Werte verwendet werden können, jedoch für die Kerbfälle B-F3 die Werte für S355J2C\_N zu verwenden sind. Dies liegt daran, dass auf Grund der Schweißverbindungen und deren Imperfektionen keine höheren Spannungswerte übertragen werden können.

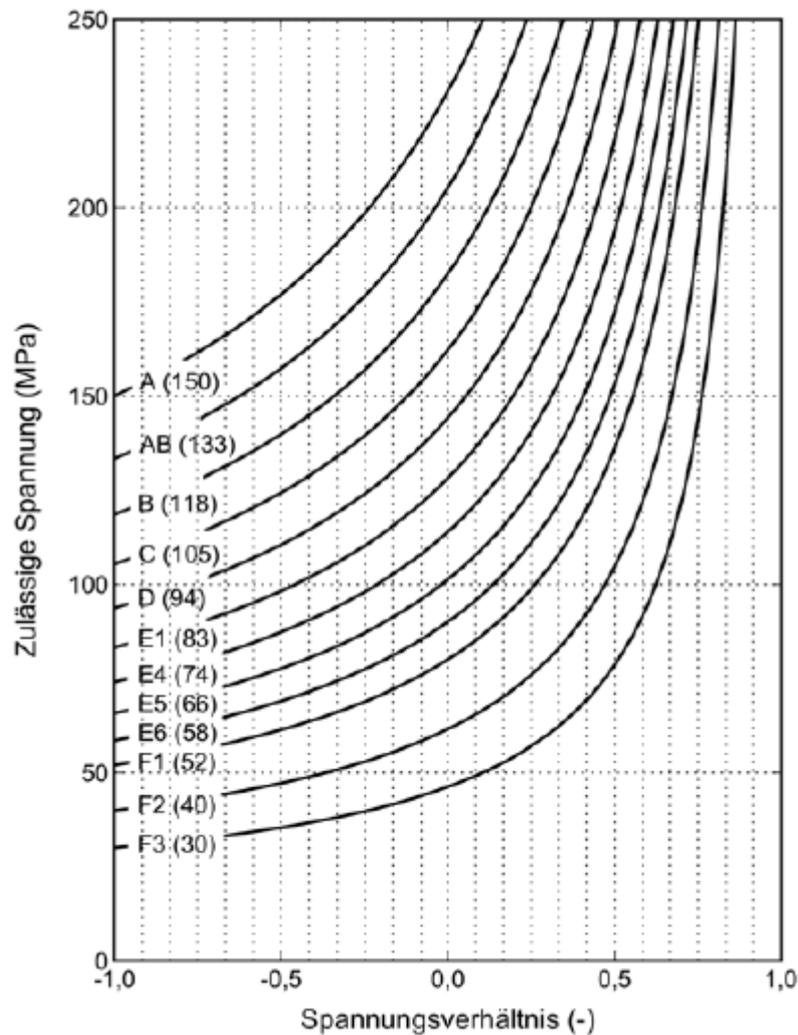


Abbildung 13: MKJ - Diagramm für S355J2C\_N laut DVS1612:2014-08

Die Berechnung der Ermüdung ist eine Kombination aller Lastfälle und liefert am Ende ein Ergebnis, bei dem die verschiedenen Stufen der Sicherheit in unterschiedlichen Farben dargestellt sind. Die Berechnung der Sicherheiten wird in der DIN EN15085-3:2008-01 festgelegt. Diese weist drei Sicherheitsbedürfnisse auf, "Niedrig", "Mittel" und "Hoch". Das Sicherheitsbedürfnis für Schienenfahrzeuge wird als "Mittel" eingestuft. Dadurch ergibt sich ein Auslastungswert von 90%, welcher in Folge dem Sicherheitswert 1,11 entspricht. Jene Werte, die  $>1,11$  sind, entsprechen der Sicherheit. Werte, welche  $\leq 1,11$  sind, entsprechen nicht der geforderten Sicherheit.

Zusätzlich müssen bei der Berechnung auch die Beulspannungen berücksichtigt werden. Die zulässige Spannung ergibt sich hier je nach Einspannung des Bleches und dem daraus folgenden k-Wert für die Berechnung. Hier wurde der Wert 3.6 gewählt. Dies ist die konservativste Annahme für die Berechnung der zulässigen Beulspannung und entspricht einer allseitig gelenkig gelagerten Platte. Die zulässige Spannung wird anhand folgender Gleichung berechnet:<sup>26</sup>

$$\sigma^* = k * E * \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \text{Gl. 3}$$

k... k-Wert, Beulfaktor abhängig von Einspannung und Länge zu Breite Verhältnis

E... E-Modul des Werkstoffes (für Stahl 210000 MPa)

t... Wandstärke des Bleches [mm]

b... Breite des Bleches in [mm]

Wie man in Gl.3 erkennen kann, ist die zulässige Beulspannung nur vom Beulfaktor und der Wandstärke bzw. der Breite des Bleches abhängig. Jedoch muss man auch erwähnen, dass es sich bei dieser Gleichung um eine grobe Vereinfachung der Beulformel handelt. Sie zeigt aber, dass die Wahl eines Werkstoffes mit höherer Streckgrenze keinen Einfluss auf die zulässige Spannung hat.

<sup>26</sup> (Wiedemann, 2006, p. 63 ff)

## 3.4 Berechnungsergebnisse

### 3.4.1 Berechnung Basisversion

Da es sich beim Vorbau im Prinzip um zwei verschiedene Bauteile handelt, aber der Grundaufbau immer gleich ist, wird in den folgenden Betrachtungen immer jener Vorbau herangezogen, welcher die höchsten Belastungen bei einem Lastfall aufweist.

#### **Ermüdung:**

In Abbildung 14 ist der Vorbau des FSTE (Fahrerstandsende) dargestellt. Die hier dargestellten Werte sind Sicherheitswerte, welche sich aus dem Verhältnis der auftretenden Spannungen zu den zulässigen Spannungen errechnen. Wie in der Abbildung erkennbar ist, weisen die beiden Baugruppenkomponenten Kopfstück und Mittellangträger gegenüber der Ermüdung in den meisten Bereichen eine Sicherheit auf, welche weit über den geforderten Wert liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf Grund der dynamischen Belastung diese Bauteile wenig bzw. kaum belastet werden. Im Gegensatz dazu sieht man, dass auf dem Hauptquerträger die Sicherheiten wesentlich geringer sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Hauptquerträger fast nur dynamisch belastet wird. Zusätzlich werden am Hauptquerträger das Fahrwerk und die Dämpfer befestigt. Auf Grund der notwendigen Bohrungen und Gewinde, sind bestimmte Wandstärken alleine durch diese Parameter vorgegeben und eine Verringerung der Wandstärke ist bei diesem Bauteil nicht möglich. Deswegen wird im Zuge der Optimierung hauptsächlich auf die beiden Bauteile Kopfstück und Mittellangträger eingegangen, da nach erster Betrachtung diese beiden das größte Optimierungspotential aufweisen.

Die Skala der vorhandenen Sicherheiten reicht von rot (minimaler Sicherheitswert 1,19) bis zu den grauen Bereichen, wo die Sicherheit über 7 liegt. Die Farben in diesem Bereich zeigen den Verlauf der Sicherheiten. Wie man erkennen kann, ergeben sich rote Bereiche beim Mittellangträger bei den beiden Knicken des Gurtes, bei der Anbindung vom Mittellangträger zur Kupplungsplatte und auch bei der Anbindung des Kopfstückes zum Langträger, welcher in dieser Darstellung nicht gezeigt wird.

Die oben angeführten Sicherheiten können bei einer Reduzierung der Wandstärken unter die vorgegebenen Werte sinken und sind daher genau zu betrachten.

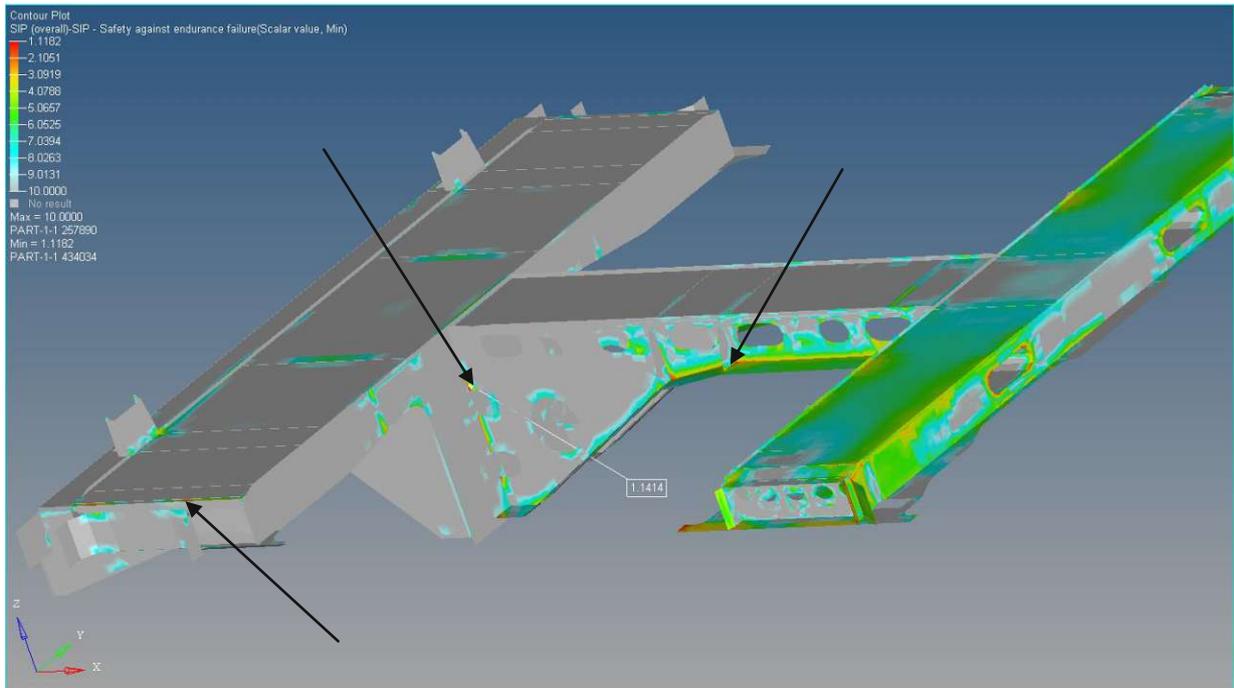


Abbildung 14: Sicherheitsschaubild KKE oben

In Abbildung 15 ist der Vorbau von der Unterseite dargestellt. Wie man erkennen kann, ist der Hauptquerträger wieder am meisten belastet und das Kopfstück und der Mittellangträger weisen nur vereinzelte Spannungskonzentrationen auf.

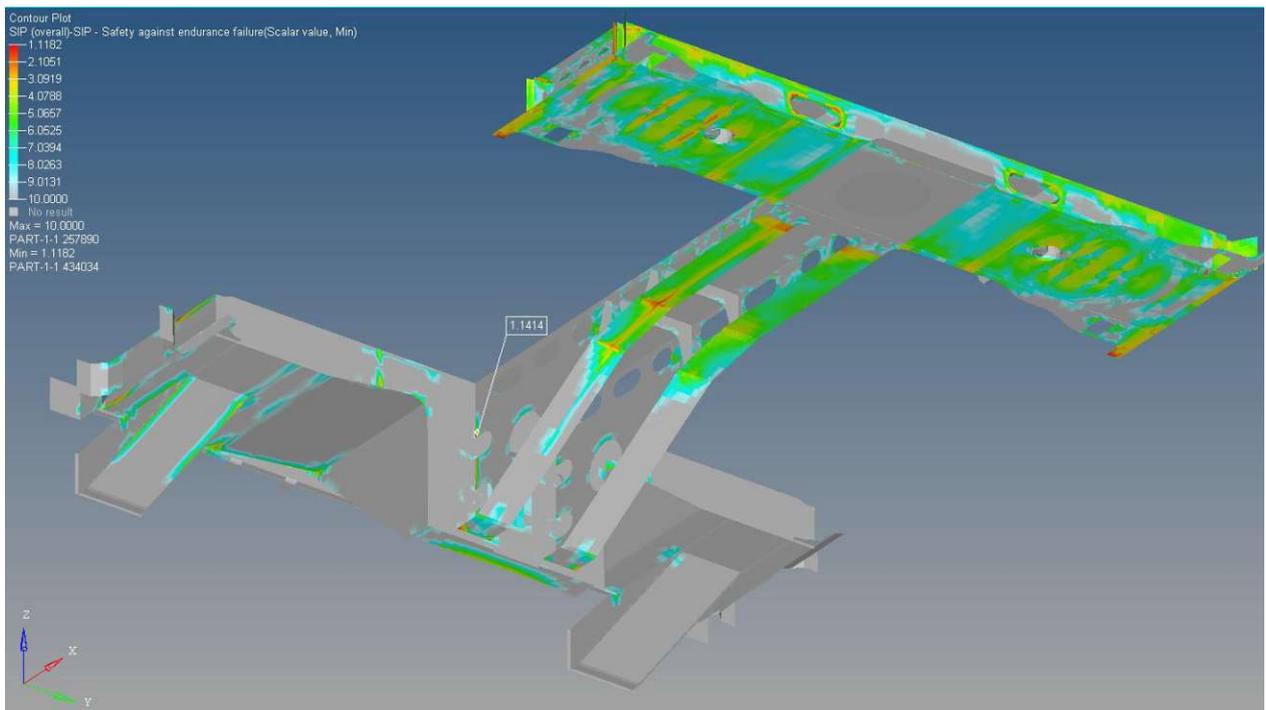


Abbildung 15: Sicherheitsschaubild KKE unten

## Statische Belastung:

Da im Ermüdungsfall und im dauerfesten Bereich die Schweißnähte maßgebend sind, werden auch zur Berechnung die Lastfälle herangezogen, welche die höchste Belastung auf die Bauteile aufweisen. Hierzu wurden von den zweiundvierzig durchgerechneten Lastfällen, welche zum Beispiel Seitenwind, Kupplungsdruck, Anheben etc. behandeln, jene Lastfälle ausgewählt, welche die höchste statische Beanspruchung für den Vorbau aufweisen. Hierzu zählen die drei Belastungsfälle:

- Kupplungsdruck bei maximaler Personenbelastung
- Kupplungszug bei maximaler Personenbelastung
- Anticlimber Druck bei maximaler Personenbelastung

In den folgenden Abbildungen werden die Spannungen dargestellt, die im Bauteil auf Grund der Lastfälle auftreten.

## Kupplungsdruck

In Abbildung 16 ist der Lastfall "Kupplungsdruck bei maximaler Personenbelastung" dargestellt. Die höchste auftretende Spannung befindet sich in diesem Fall bei der Verbindung des Kopfstückes mit dem Langträger. Die hier auftretende Spannung weist einen Wert von 311MPa auf.

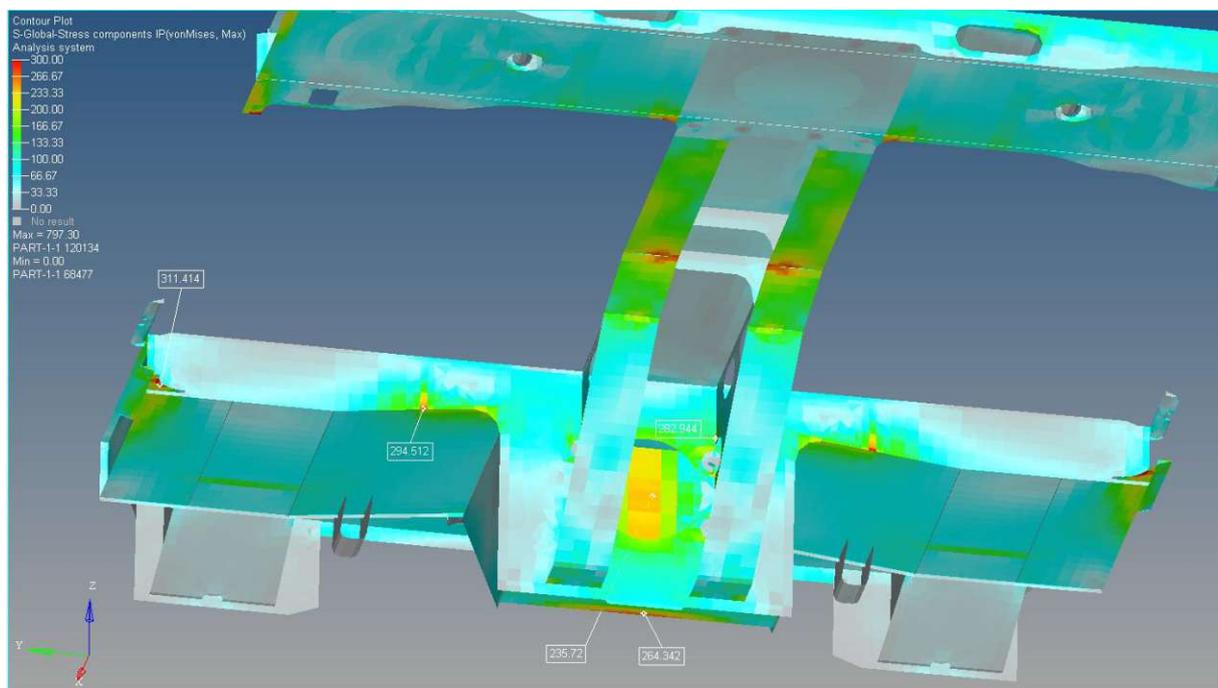


Abbildung 16: Lastfall Kupplungsdruck Basis

## Kupplungszug

In Abbildung 17 wird der Lastfall "Kupplungszug bei maximaler Personenbeladung" dargestellt. Wie man erkennen kann, sind die Belastungen der einzelnen Bauteile geringer als beim Lastfall Kupplungsdruck. In diesem Lastfall beträgt die höchste auftretende Spannung 281,8 MPa.

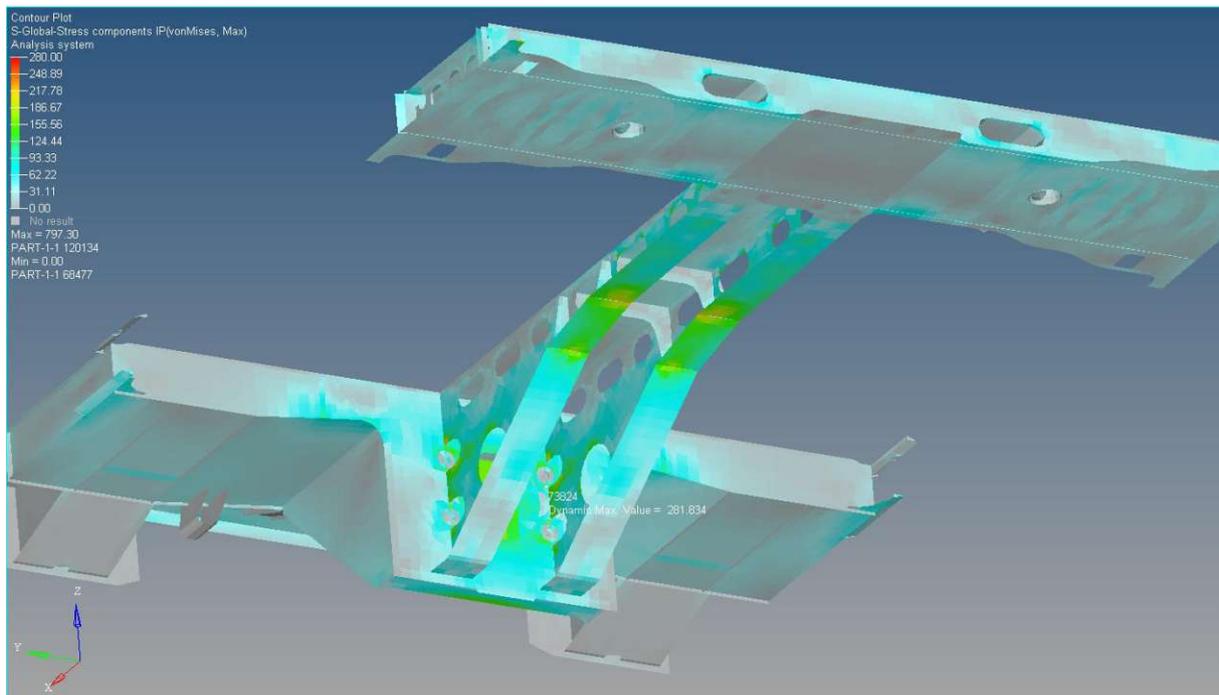


Abbildung 17: Kupplungszug Basis

## Anticlimber

In Abbildung 18 wird der Lastfall "Anticlimber Druck bei maximaler Personenbeladung" dargestellt. Hier weisen die Spannungen höhere Werte als die zulässige Spannung auf. Der max. Wert beträgt hier 478,3 MPa. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Lastfall Anticlimber lokales plastifizieren zugelassen wird.

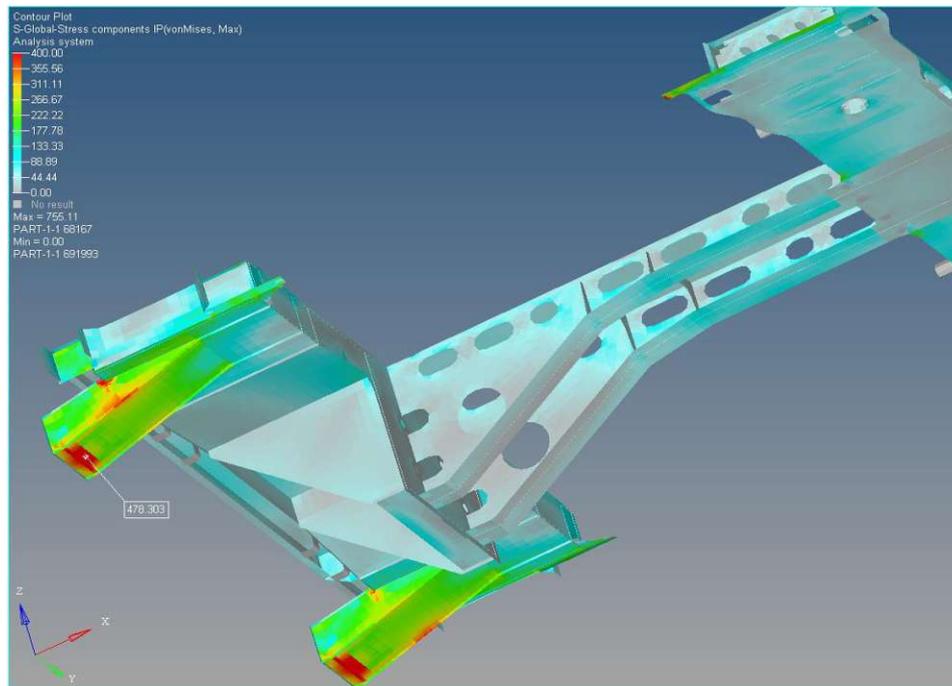


Abbildung 18: Anticlimber KKE Basis

In Abbildung 19 wird der Lastfall "Druck bei maximaler Personenbeladung" des FSTE dargestellt. Die höchste Spannung weist hier 755 MPa auf. Hier muss man darauf hinweisen, dass es seitens der Berechnung intern festgelegt ist, bei kleinen Flächen höhere Spannungen zuzulassen.

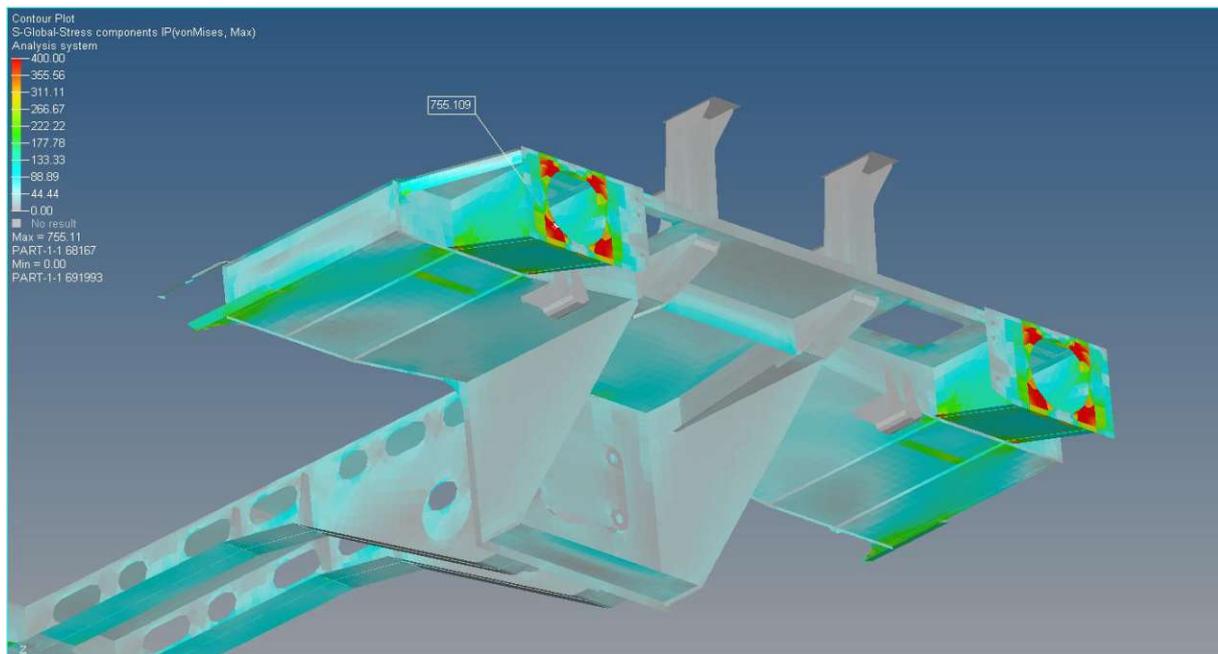


Abbildung 19: Anticlimber FSTE

Wie man in den oben angeführten Abbildungen erkennen kann, weist der Lastfall "Anticlimber Druck bei maximaler Personenbeladung" die höchsten Spannungen auf. Wie oben erwähnt werden in bestimmten Ausnahmefällen höhere Spannungen toleriert. Deswegen ist der Lastfall des Kupplungsdruckes jener, der den Vorbau an den kritischen Stellen am höchsten belastet.

### 3.4.2 Erste Berechnung Wandstärkenreduzierung

Auf Grund der Ergebnisse des Vorbaus aus S355J2C\_N wurden passende Bleche ausgewählt, bei denen eine Wandstärkenreduzierung möglich ist. Diese Wandstärkenreduzierungen betreffen vor allem die Bleche des Kopfstückes. In Abbildung 20 sind die Bleche des Kopfstückes dargestellt, bei denen die Wandstärke verringert wurde. Hierbei handelt es sich um achtzehn Bestandteile. Die Wandstärke wurde bis auf die Kupplungsplatte jeweils um einen Normblechstärke verringert. Die beiden Anticlimber wurden bei dieser Betrachtung absichtlich nicht geändert. In Tabelle 2 sind die einzelnen Wandstärken aufgelistet. Wie man erkennen kann, wurde die größte Wandstärkenreduktion bei der Kupplungsplatte durchgeführt.

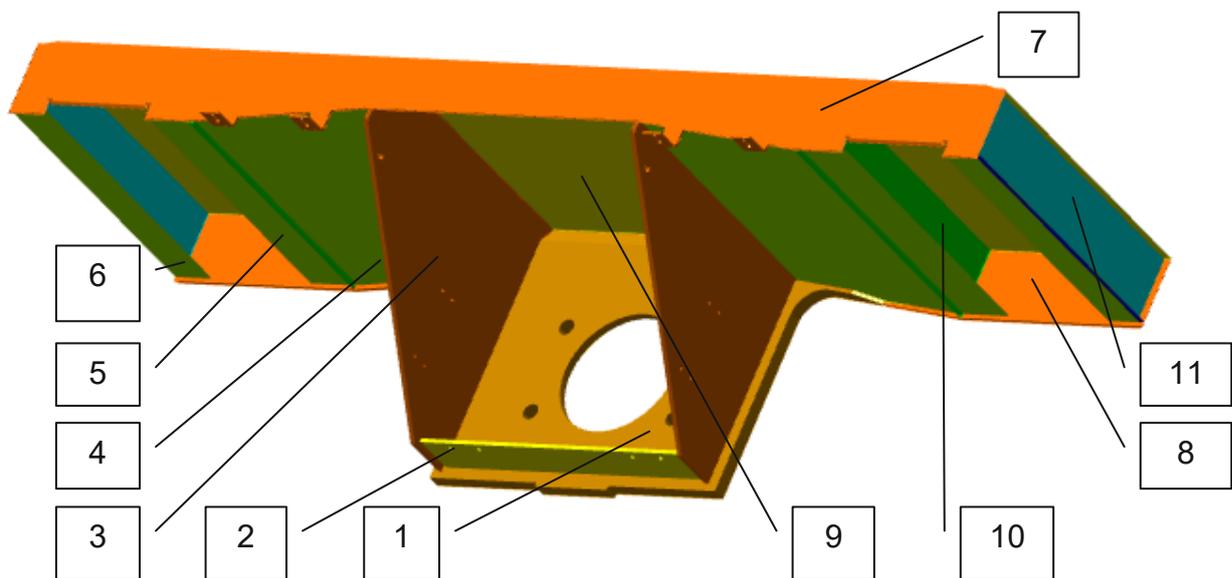


Abbildung 20: Wandstärken Kopfstück

Kopfstück				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Kupplungsplatte	1	35	25
2	Blech Kupplungsplatte unten	1	10	8
3	Dreiecksblech Kupplungsplatte	2	12	10
4	Untergurt Kopfstück	2	6	5
5	Untergurt Kopfstück 1	2	6	5
6	Untergurt Kopfstück 2	2	6	5
7	Kopfblech vorne	1	6	5
8	Kopfblech hinten	2	10	8
9	Bodenblech	1	6	5
10	Kopfstege innen	2	5	4
11	Kopfstege außen	2	5	4

Tabelle 2: Wandstärkenreduzierung Kopfstück

Da diese die größten Bauteile beim Kopfstück sind, kann die größte Massereduktion mit der Verringerung der Wandstärke der Kupplungsplatte sowie der beiden Abstützungsbleche der Kupplungsplatte und dem Bodenblech erreicht werden.

In Abbildung 21 ist der Mittellangträger dargestellt. Hier wurden auf Grund der Berechnungen der Basisversion die Wandstärken der beiden Mittellangträgerstege verringert. Da in dem Bereich der beiden Gurte die Sicherheiten schon nahe der Grenzwerte waren, wurde die Wandstärke der beiden Gurte nicht verringert. Jedoch wurden die Wandstärken der beiden Rippen, welche in diesem Bereich liegen, verringert. In Tabelle 3 sind die Wandstärkenreduzierungen aufgelistet. Die größte Massenreduktion kann mit den beiden Stegen erreicht werden, da diese die größten Bauteile beim Mittellangträger sind.

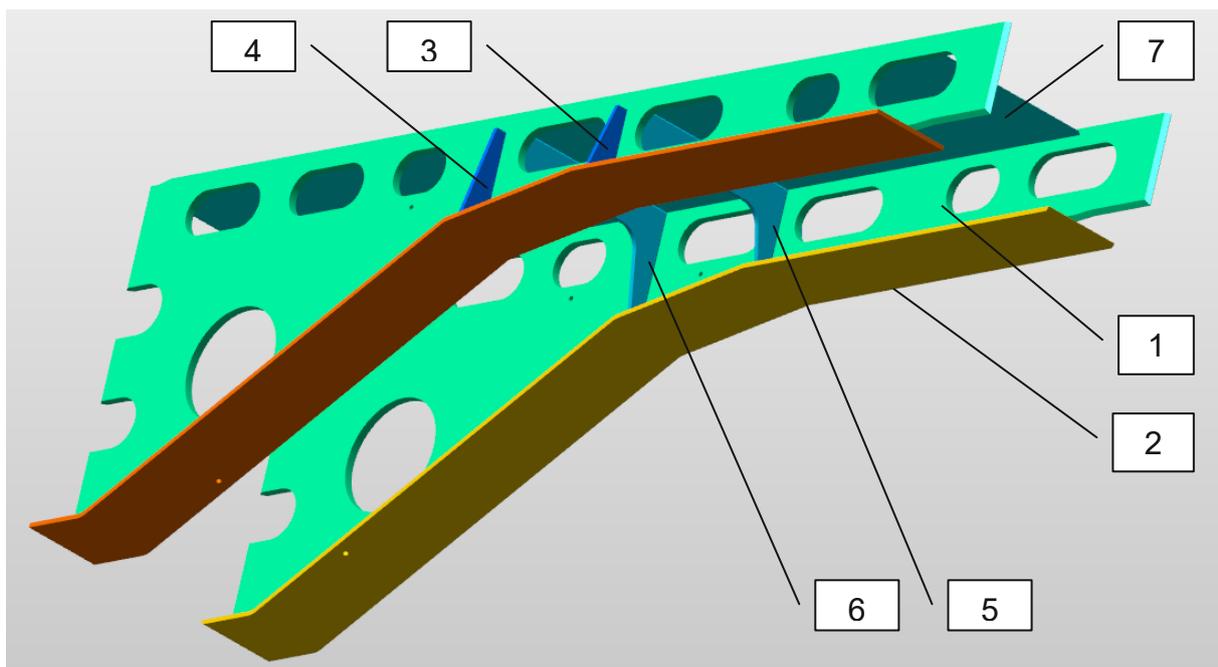


Abbildung 21: Wandstärken Mittellangträger

Mittellangträger				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Mittellangträger Steg	2	15	12
2	Mittellangträger Gurt	2	8	8
3	Rippe 1	2	8	6
4	Rippe 2	2	8	6
5	Rippe 1 innen	1	8	6
6	Rippe 2 innen	1	8	6
7	Bodenblech	1	5	4

Tabelle 3: Wandstärkenreduzierung Mittellangträger

## Ermüdung

In Abbildung 22 ist die Ermüdungsberechnung mit verringerter Wandstärke dargestellt. Wie man erkennen kann, ist die Sicherheit bei dem Anschluss von Kupplungsplatte zu Mittellangträgersteg unter 1,11 gesunken. Dies bedeutet, dass die Vorgaben der Auslegung nicht erfüllt werden und deswegen nicht zulässig sind. Das liegt daran, dass in diesem Bereich die Wandstärke der Kupplungsplatte sowie die des Steges verringert wurde. Auf Grund der Reduzierung der Wandstärke erhöht sich auch die Durchbiegung in diesem Bereich, was dazu führt, dass diese Bereiche höher belastet werden. Ein weiterer Aspekt in diesem Bereich ist die Ausführung der Schweißnaht bzw. die Bewertung des Kerbfalles im Berechnungsmodell. In diesem Bereich muss für die Erfüllung der Sicherheit eine Lösung gefunden werden.

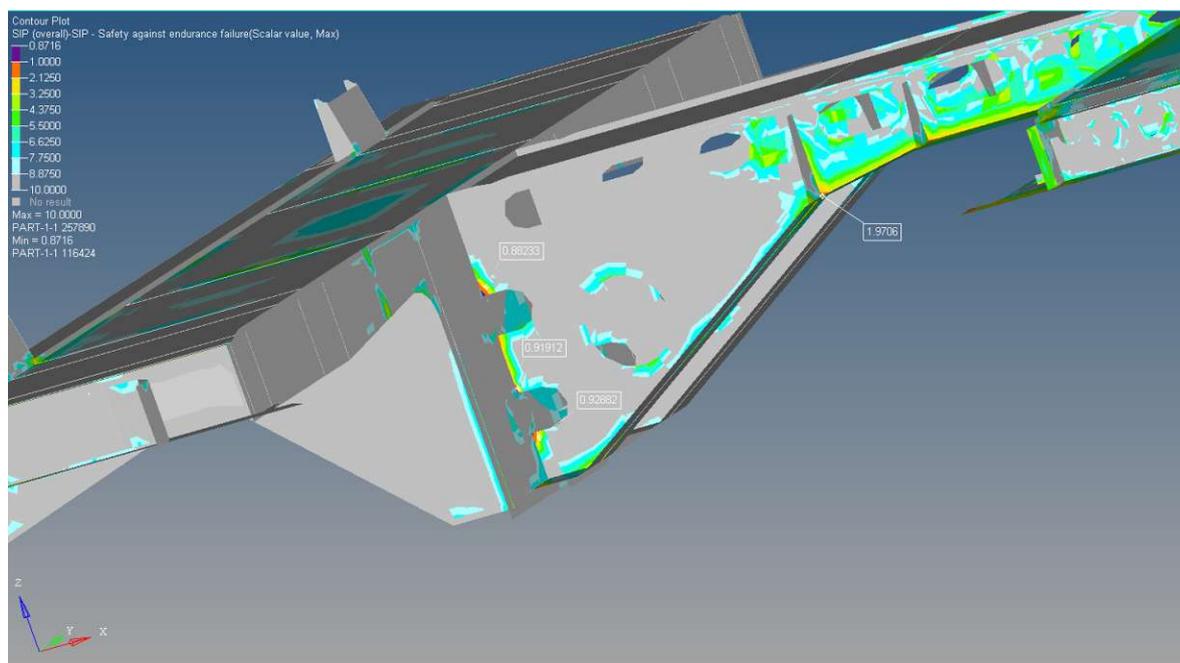
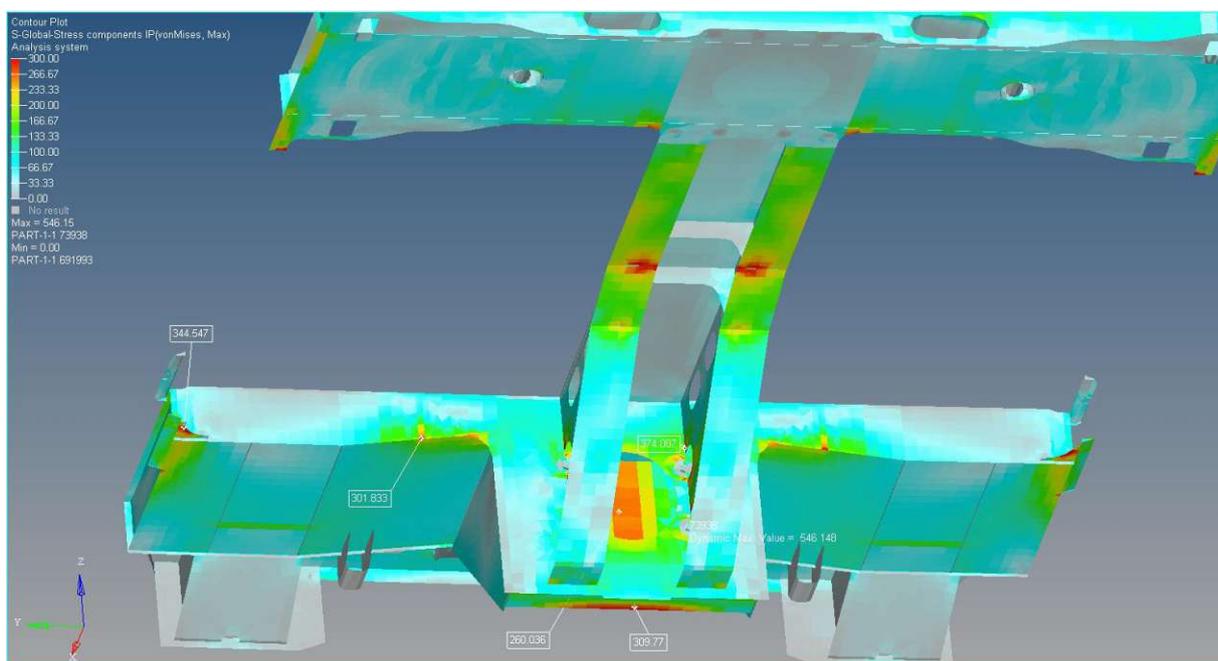


Abbildung 22: Sicherheitsschaubild Wandstärkenreduzierung

## Statische Belastung

In Abbildung 23 ist der Lastfall Kupplungsdruck unter voller Belastung dargestellt. Durch die Wandstärkenreduzierung ergibt sich im Bereich der Anbindung von Kupplungsplatte zu Mittellangträger eine wesentliche Erhöhung der Spannungen. Die höchste auftretende Spannung beträgt 546,15 MPa. Diese Spannung würde die zulässige Spannung des S355J2C\_N bei weitem übersteigen und den Belastungen nicht standhalten. Daher würde es sich anbieten, einen Stahl mit höherer Streckgrenze zu verwenden, der den Spannungen standhält. Weiters kann man auch bei den beiden Knicken des Mittellangträgers eine erhöhte Spannung erkennen. Vor allem bei Rippe 1 sind die Spannungen im roten Bereich.



**Abbildung 23: Lastfall Kupplungsdruck Wandstärkenreduzierung**

In Abbildung 24 ist der Lastfall Kupplungszug dargestellt. Hier kann man erkennen, dass der Lastfall wesentlich weniger höhere Spannung hervorruft als der Lastfall Kupplungsdruck. Die hier max. auftretende Spannung liegt bei 418 MPa und tritt wieder im Bereich der Anbindung des Mittellangträgers zur Kupplungsplatte auf.

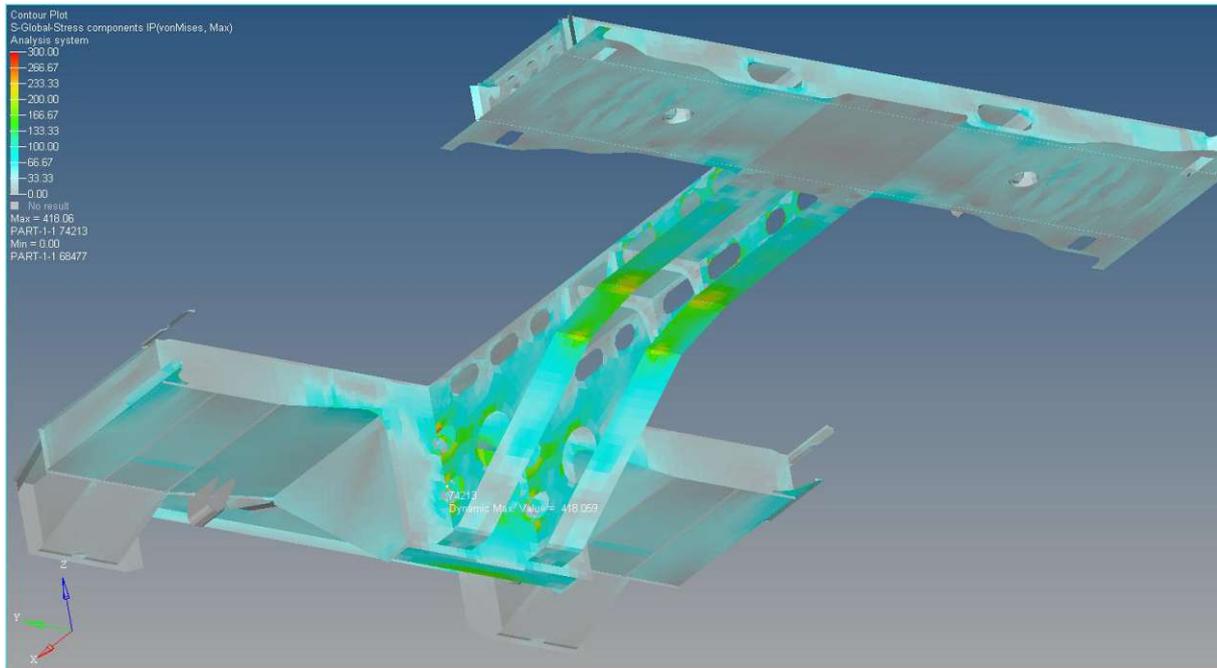


Abbildung 24: Lastfall Kupplungszug Wandstärkenreduzierung

## Beulen

Auf Grund der Wandstärkenreduzierung musste vermehrt auf das Beulen der Blechplatten Rücksicht genommen werden. Hierzu wurde eine Beulanalyse des Vorbaus durchgeführt. Wie man in Abbildung 25 erkennen kann, neigt das Bodenblech des Vorbaus zum Beulen. Da die Bodenplatte geschlossen sein muss, gibt es zwei Möglichkeiten, dem entgegen zu wirken. Eine Möglichkeit wäre die Wandstärke wieder auf fünf Millimeter zu erhöhen oder zusätzliche Beulsteifen einzuschweißen. Durch die Wandstärkenreduzierung könnte die Masse um 20% gesenkt werden. Dieses Thema wird im Kapitel "Änderungen des Vorbaus" behandelt.

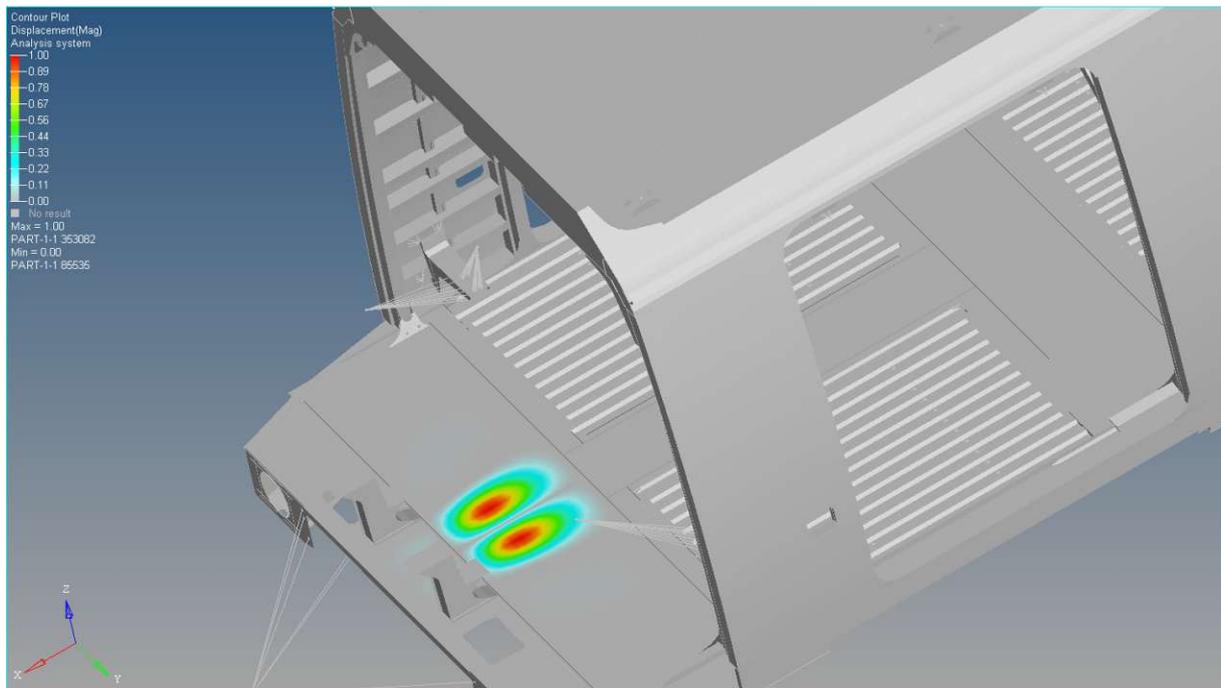


Abbildung 25: Beulanalyse

### 3.4.3 Zweite Berechnung der Wandstärkenreduzierung

Bei der zweiten Berechnung wurde der oben weggelassene Anticlimber in die Berechnung mit einbezogen. Die restlichen Maßnahmen von der ersten Berechnung wurden für die zweite Berechnung übernommen. Hier gibt es bei KKE und FSTE einen Unterschied bezüglich der Ausführung. Da der Anticlimber für das KKE die größte Masse aufweist, wird dieser für die Berechnung herangezogen. In Abbildung 26 ist der Anticlimber für das KKE dargestellt.

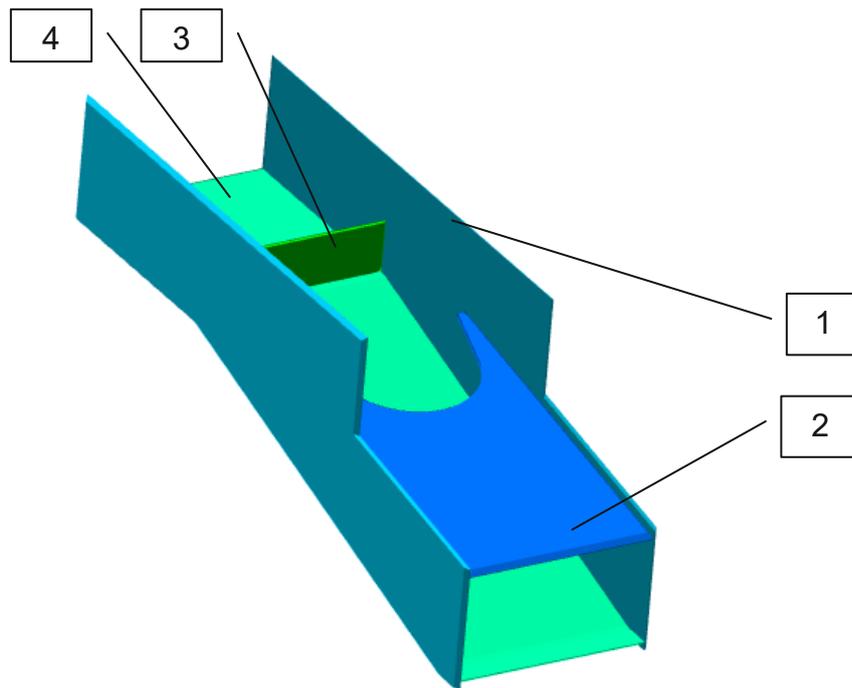


Abbildung 26: Anticlimber KKE

In Tabelle 4 werden die einzelnen Bauteile des Anticlimber KKE dargestellt. Im Wesentlichen wurden alle Wandstärken um eine Normblechdicke verringert.

Anticlimber				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Stegblech	2	6	5
2	Versteifungsblech	1	6	5
3	Rippe	1	6	5
4	Untergurt	1	6	5

Tabelle 4: Wandstärkenreduzierung Anticlimber

### 3.4.4 Vergleich der Wandstärkenreduzierungen

#### Kopfstück

In Tabelle 5 sind die einzelnen Bauteile des Kopfstückes aufgelistet. Wie man erkennen kann, hat die Kupplungsplatte den größten Anteil bei der Reduzierung der Masse. Weiters können durch die Reduzierung der Wandstärke des Bodenbleches weitere 4% eingespart werden. Jedoch werden auf Grund der Wandstärkenreduzierung im Bereich über der Kupplung Beulsteifen benötigt, welche die Massereduzierung wieder mindern. In Summe können beim Kopfstück bezogen auf die Ausgangsmasse theoretisch 21,3 % der Masse eingespart werden.

Kopfstück (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Kupplungsplatte	1	134,4	134,4	96	96	38,4	28,6%	10,3%
2	Blech Kupplungsplatte unten	1	6,2	6,2	5	5	1,2	19,4%	0,3%
3	Dreiecksblech Kupplungsplatte	2	27,3	54,6	22,7	45,4	9,2	16,8%	2,5%
4	Untergurt Kopfstück	2	14,8	29,6	12,4	24,8	4,8	16,2%	1,3%
5	Untergurt Kopfstück 1	2	3,9	7,8	3,3	6,6	1,2	15,4%	0,3%
6	Untergurt Kopfstück 2	2	3,1	6,2	2,6	5,2	1	16,1%	0,3%
7	Kopfblech vorne	1	20,7	20,7	20,7	20,7	0	0,0%	0,0%
8	Kopfblech hinten	2	10,5	21	8,4	16,8	4,2	20,0%	1,1%
9	Bodenblech	1	73,5	73,5	58	58	15,5	21,1%	4,2%
10	Kopfstege innen	2	5,6	11,2	4,7	9,4	1,8	16,1%	0,5%
11	Kopfstege außen	2	3,5	7	2,6	5,2	1,8	25,7%	0,5%
Summe:				372,2		293,1	79,1		
Ersparnis:									21,3%

Tabelle 5: Massenaufstellung Kopfstück

## Mittellangträger

In Tabelle 6 sind die einzelnen Bauteile des Mittellangträgers aufgelistet. Wie man erkennen kann, liefert eine Wandstärkenreduzierung der Rippen nur einen geringen prozentuellen Anteil an der Gesamtmasse. Die größte Masseersparnis kann man mit dem Mittellangträgersteg erreichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine Wandstärkenreduktion beim Gurt zu einem Nichterreichen der Sicherheiten führen würde, da an der Stelle der Anbindungen der Rippen die Schweißnahtbewertung maßgebend ist. Die Wandstärkenreduzierung des Bodenbleches bewirkt eine Massenersparnis von 2,9 %. Weiters ist eine Reduktion der Masse des Gurtes mittels einer Verringerung der Gurtbreite ebenfalls nicht zielführend, da die Breite für die Anbindung an der Kupplungsplatte bzw. am Hauptquerträger benötigt wird. In Summe können theoretisch beim Mittellangträger 14,5 % der Masse eingespart werden.

Mittellangträger (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Mittellangträger Steg	2	51,1	102,2	42	84	18,2	17,8%	10,8%
2	Mittellangträger Gurt	2	18,2	36,4	18,2	36,4	0	0,0%	0,0%
3	Rippe 1	2	0,3	0,6	0,25	0,5	0,1	16,7%	0,1%
4	Rippe 2	2	0,4	0,8	0,3	0,6	0,2	25,0%	0,1%
5	Rippe 1 innen	1	1,7	1,7	1,2	1,2	0,5	29,4%	0,3%
6	Rippe 2 innen	1	1,9	1,9	1,4	1,4	0,5	26,3%	0,3%
7	Bodenblech	1	24,3	24,3	19,5	19,5	4,8	19,8%	2,9%
Summe:				167,9		143,6	24,3		
Ersparnis:									14,5%

Tabelle 6: Massenaufstellung Mittellangträger

## Anticlimber

In Tabelle 7 sind die einzelnen Massen des Anticlimbers aufgelistet. Die Massenangaben beziehen sich auf einen Anticlimber, im Vorbau sind zwei verbaut. Die größte Massenersparnis kann mit den beiden Stegblechen bzw. mit dem Untergurt erzielt werden. Bei den beiden Stegblechen ist die Massenersparnis 8,4 %, beim Untergurt 5,6 %. Zu vernachlässigen wäre die Rippe, welche nur einen geringen Beitrag leistet. Da es aber in der Beschaffung bzw. Bearbeitung keinen Mehraufwand bedeutet, wurde auch die Wandstärke der Rippe reduziert. In Summe können beim Anticlimber theoretisch 16,9 % der Masse eingespart werden.

Anticlimber (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Stegblech	4	8,9	35,6	7,4	29,6	6	16,9%	8,4%
2	Versteifungsblech	2	4,5	9	3,7	7,4	1,6	17,8%	2,2%
3	Rippe	2	0,9	1,8	0,7	1,4	0,4	22,2%	0,6%
4	Untergurt	2	12,4	24,8	10,4	20,8	4	16,1%	5,6%
Summe:				71,2		59,2	12		
Ersparnis:									16,9%

Tabelle 7: Massereduktion Anticlimber

### Gesamt mögliche Masseneinsparung am Vorbau

In Summe können durch die Verringerung der Wandstärken an den drei Baugruppen Kopfstück, Anticlimber und Mittellangträger 18,7 % eingespart werden. Jedoch ist dies nur der maximal mögliche Wert, da wie oben angeführt, bei der Anbindung vom Mittellangträgersteg zur Kupplungsplatte so die zulässigen Sicherheitswerte nicht erreicht werden und daher konstruktive Maßnahmen gesetzt werden müssen, um den Belastungen stand zu halten. Vor allem eine weitere Verringerung der Wandstärken würde keinen Nutzen mehr erzielen, da dann die geforderten Sicherheiten nicht mehr erreicht werden.

## 4 Änderungen des Vorbaus

### 4.1 Masse des vorhandenen Vorbaus

Der zu optimierende Vorbau weist eine Masse von 1087,5 kg auf. Der betrachtete Vorbau ist hierbei der des KKE. Hier wurde die Masse des Hauptquerträgers und der beiden Anticlimber miteinbezogen. Die Masse des Kopfstückes beträgt mit Anticlimber 454,3 kg. Die Masse des Mittellangträgers beträgt 170,7 kg. Die Masse des Hauptquerträgers beträgt 462,5 kg. Wie man in dieser Auflistung erkennen kann, weist der Hauptquerträger die größte relative Masse des Vorbaus auf.

Um die Vorgabe der Diplomarbeit 30% der Masse einzusparen zu erreichen, muss die neue Masse ca. 761,3 kg betragen. Dies bedeutet eine Reduktion von 326,2 kg.

In Abbildung 27 ist der Vorbau des KKE dargestellt. Die Massenanalyse wurde anhand ProE Creo View dargestellt.

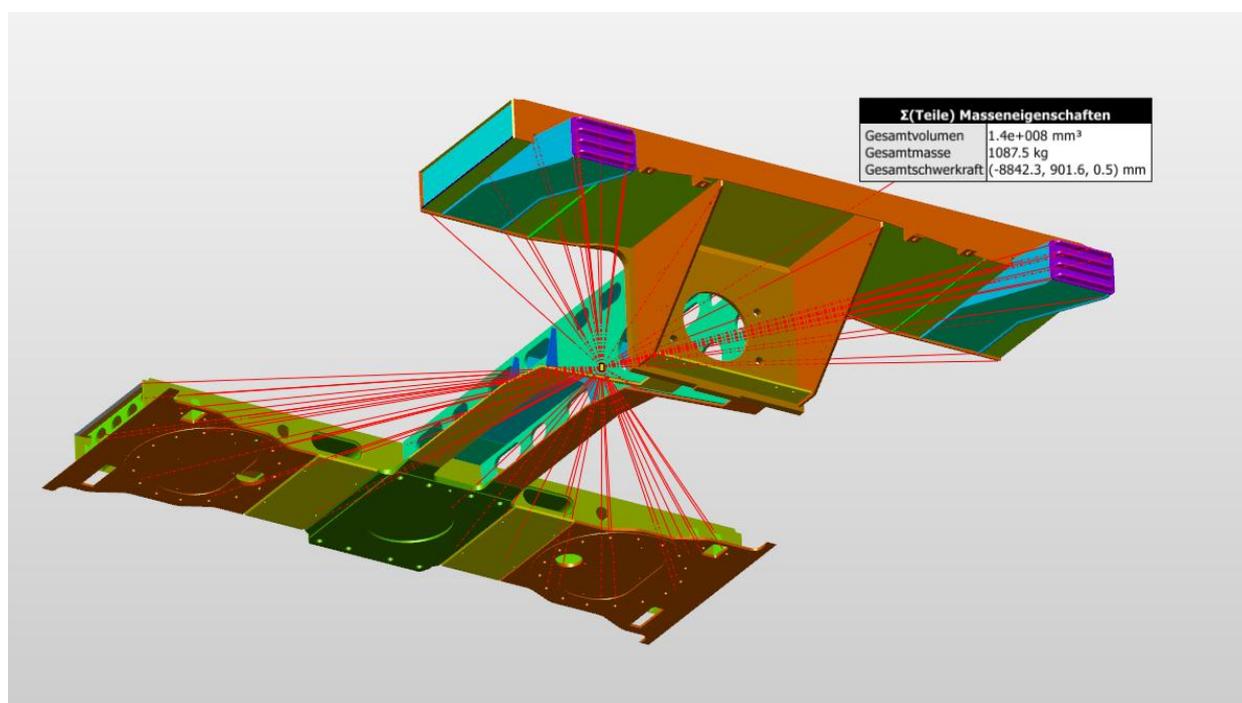


Abbildung 27: Masse Vorbau KKE

## 4.2 Werkstoffauswahl mittels K.O.-Kriterien

In Anlehnung zum Verfahren der Werkstoffauswahl wurde eine Analyse mittels K.O.-Kriterien durchgeführt. Im Wesentlichen wurde hier eine Anpassung des Werkstoffes durchgeführt. Dies bedeutet, dass dieselbe Werkstoffart aber mit erhöhten Werten verwendet wird. Bei konkreten Vorgaben der zu verwendenden Werkstoffe bietet sich in diesem Fall eine vereinfachte Direktwahl des Werkstoffes an.<sup>27</sup>

Ein weiteres Verfahren wäre die indirekte Werkstoffwahl: Hier werden auf Basis verschiedener Anforderungen geeignete Werkstoffe ausgewählt, welche diese erfüllen. Dies können zum Bsp. Al-Legierungen, Faserverbundwerkstoffe oder Stähle sein. Durch weitere Aspekte, wie z.B. der Fertigungsrelevanz verkleinert sich der Lösungsraum, bis schlussendlich der passende Werkstoff ausgewählt wird.<sup>28</sup>

Für die Eingrenzung der in Frage kommenden Werkstoffe wurden folgende K.O.-Kriterien festgelegt:

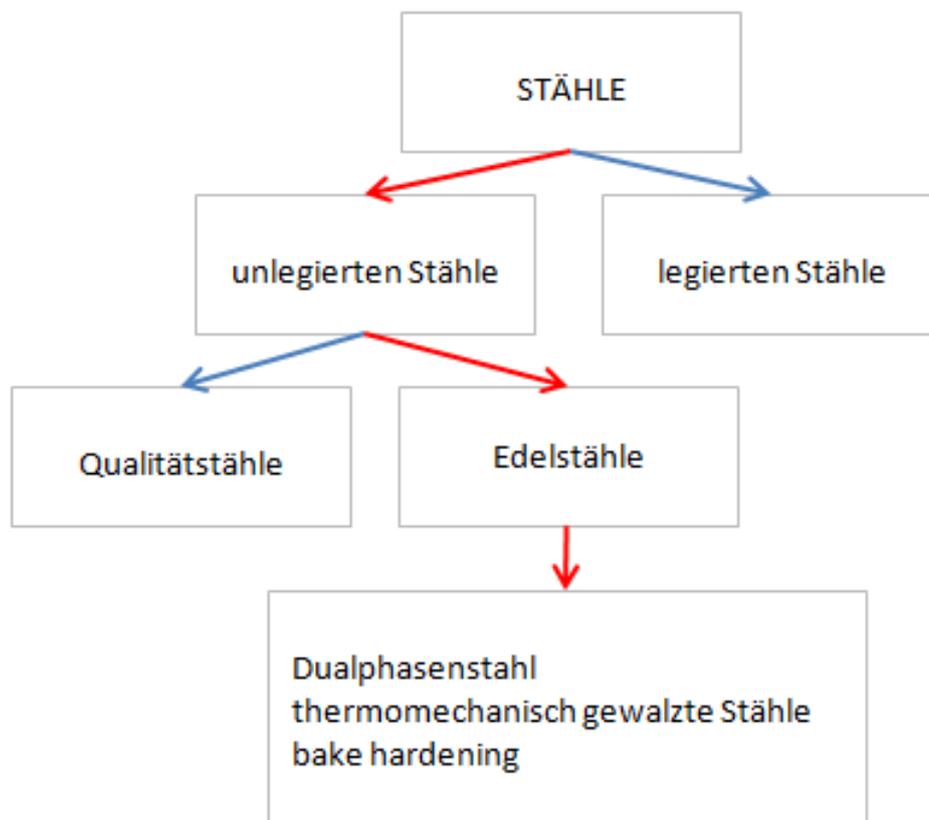
- Materialgruppe = unlegierter Stahl
- Streckgrenze  $\geq 460$  MPa
- CEV (Kohlenstoff Equivalent) Wert möglichst niedrig
- Weltweite Verfügbarkeit

Da als Vorgabe der Diplomarbeit unlegierter Stahl verwendet werden soll, fallen alle alternativen Werkstoffe wie Faserverbundwerkstoffe, Aluminium und hochlegierte Stähle schon bei der groben Vorauswahl weg. Auf Grund der Definition der Stähle laut DIN EN 10020:2000-07 und unter Berücksichtigung der K.O.-Kriterien fällt dadurch die Auswahl des Werkstoffes auf die Gruppe der unlegierten Stähle. Weiters werden Stähle benötigt, welche eine Streckgrenze über 460 MPa aufweisen. Ein weiterer Aspekt liegt bei der guten Schweißbarkeit des Stahls. Hierbei weisen die thermomechanisch gewalzten Stähle den besten CEV-Wert auf. Zusätzlich werden auch keine Maßnahmen zur Verbesserung der Schweißignung berücksichtigt. Hiermit ist gemeint, dass die Stähle keiner Wärmebehandlung unterzogen werden.

In Abbildung 28 ist der Entscheidungsweg für die grobe Werkstoffauswahl aufgelistet. Der rote Weg beschreibt jenen, der auf Grund der K.O.-Kriterien und der Vorgaben der Diplomarbeit gewählt wurde. Zum Schluss blieben drei Gruppen von höherfesten Stählen über, von denen die thermomechanisch gewalzten Stähle schließlich den besten CEV-Wert aufweisen und somit als passende Gruppe ausgewählt wurden.

<sup>27</sup> (Weißbach, 2012, p. 358 ff)

<sup>28</sup> (Weißbach, 2012, p. 360 ff)



**Abbildung 28: Entscheidungsweg KO - Kriterien**

Auf Grund der Auswahl der thermomechanisch gewalzten Stähle wurden folgende vier Stähle definiert, welche zur Analyse herangezogen werden. Diese weisen Streckgrenzen von 400 MPa bis 700MPa auf. Des Weiteren liegen die CEV- Werte ca. im selben Bereich.

- S460MC
- S500MC
- S700MC
- S690QL

### 4.3 Konstruktive Maßnahmen des Vorbaus

Einführend muss erwähnt werden, dass das Bodenblech des Kopfstückes keine Änderungen der Ausführung zulässt. Hiermit ist gemeint, dass keine Löcher in das Blech gebohrt werden dürfen, z.B.: für Massereduktion, weil vorgegeben ist, dass der Boden geschlossen sein muss. Dies ist auf die geforderte Dichtheit des Bodens zurückzuführen bzw. auf die allgemeinen Brandschutzvorgaben bei Metros.

Im Laufe der Entwicklung innerhalb der Siemens AG Österreich stellte sich die Ausführung des Kopfstückes mittels Kastenbau als beste Konstruktion zur Übertragung der Kräfte heraus. Gründe dafür sind die einfache Fertigung mittels Blechen sowie die Schweißbarkeit.

### 4.3.1 Bauraummodell

Um die optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Platzes zu gewährleisten, wurde ein Bauraummodell für den vorhandenen Bauraum des Vorbaus erstellt. Dieses Bauraummodell beschreibt die äußeren Grenzen des Vorbaus. Der Vorbau ist rechts und links von den Langträgern begrenzt. Des Weiteren ist der Kupplungsplattenabstand zum Hauptquerträger festgelegt. Die maximal verfügbare Höhe des Bauraumes ergibt sich durch die Eingrenzung des Fahrgestells und die festgelegten Werte, wie dem Abstand von der Schienenoberkante zur Fußbodenoberkante. Das Bauraummodell orientiert sich am vorgegebenen Vorbau, welcher in „Berechnung Vorbau“ beschrieben wurde. In Abbildung 29 ist das entworfene Bauraummodell des Vorbaus dargestellt. Man kann die drei Bereiche Hauptquerträger, Mittellangträger und Kopfstück erkennen.

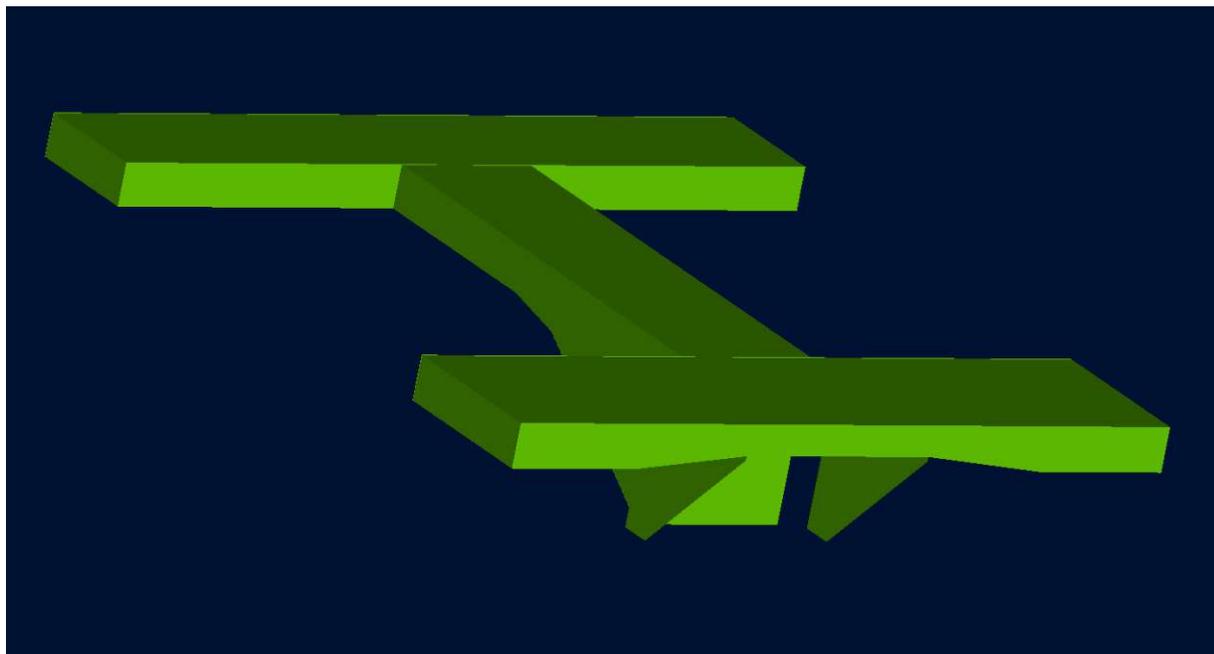


Abbildung 29: Bauraummodell

### 4.3.2 Konstruktive Maßnahmen

Im folgenden Abschnitt soll durch eine allgemeine Analyse gezeigt werden, dass man durch Verringerung der Wandstärke bei geringen Blechstärken mehr Masse einsparen kann als mit Ausschnitten.

In Abbildung 30 ist ein Quader mit quadratischer Grundfläche mit der Seitenlänge  $a$ , der Dicke  $t$  und dem Durchmesser  $d$  eines kreisförmigen Ausschnittes dargestellt, der als Referenz für die Analyse dienen soll.

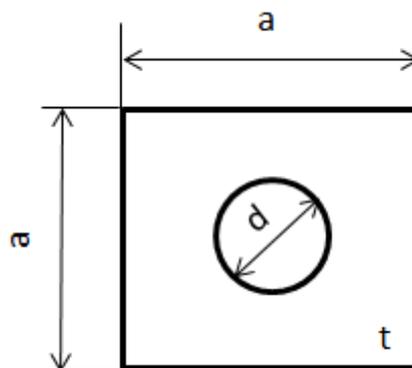


Abbildung 30: Ausschnitt

Anhand dieses Quaders soll eine Reduzierung der Dicke  $t$  bei geringer Blechstärke (dies ist nur bei Blechstärken unter 6 mm gültig) mit einer Massenreduktion durch einen Ausschnitt im Blech verglichen werden (siehe Abbildung 30) um zu erkennen, welche der beiden Varianten sich als sinnvoller erweist.

Um dies zu zeigen, wurde eine Gleichung aufgestellt, die die Massenreduktion bei Verringerung der Blechstärke um 1 mm mit der Massenreduktion durch dementsprechende Ausschnitte im Blech gleichsetzt. Zum Vergleich wurde für den Quader eine Blechdicke  $t_0$  gewählt, womit man eine bestimmte Masse des Teiles erhält. Anschließend wurde die Blechstärke auf  $t_1$ , welche 1 mm kleiner als  $t_0$  ist, gewählt. (Es gilt folgende Randbedingung: die Verringerung der Blechstärke entspricht immer einer Normblechstärke, was in dem oben angeführten Bereich  $t_n = 1$  mm entspricht.) Somit erhält man eine Formel für die neue Masse mittels der Wandstärkenreduzierung.

Anschließend wurde zum Vergleich eine Formel für die Masse des Quaders mit einer Blechstärke  $t_0$  und einem Ausschnitt wie in Abbildung 30 bestimmt.

Setzt man nun diese Formeln für die beiden Massen gleich, bekommt man eine Beziehung, welche beschreibt wie groß der Ausschnitt sein muss, um mit einem

Ausschnitt dieselbe Massenreduktion wie durch die Verringerung der Blechdicke zu erreichen. Das Ergebnis lautet:

$$d = 2 * a * \sqrt{\frac{t_n}{\pi * (t_0 + t_n)}} \quad \text{Gl. 4}$$

Wenn man die Blechstärken von 1 mm bis 6 mm wählt, ergibt sich unter der Wurzel ein Wert von 0,39 bis 0,21. Dies bedeutet, dass der Durchmesser des kreisförmigen Ausschnittes 0,79 bis zu 0,42 mal die Seitenlänge  $a$  sein muss, um dieselbe Massenreduzierung wie durch die Blechstärkenverringering zu erreichen. Dies würde einer Flächenreduzierung von ca. 50% bis zu 13% entsprechen. Wie man erkennen kann, ist es nur für den Fall großer Blechstärken sinnvoll die Masse mittels Ausschnitten zu reduzieren. Da aber die Anzahl der Bleche, bei denen sich eine Reduzierung der Masse mittels Ausschnitten auszahlen würde, im Vergleich zu denen, wo man eine Wandstärkenreduzierung durchführen kann, gering ist, würde sich der Mehraufwand nicht rechnen.

## Analyse für Ausschnitte

Basierend auf den Ergebnissen von oben wurde die beschriebene Methode auf einem Stegblech angewendet. Das Bauteil in der Basisversion weist eine Masse von 5.6 kg auf.

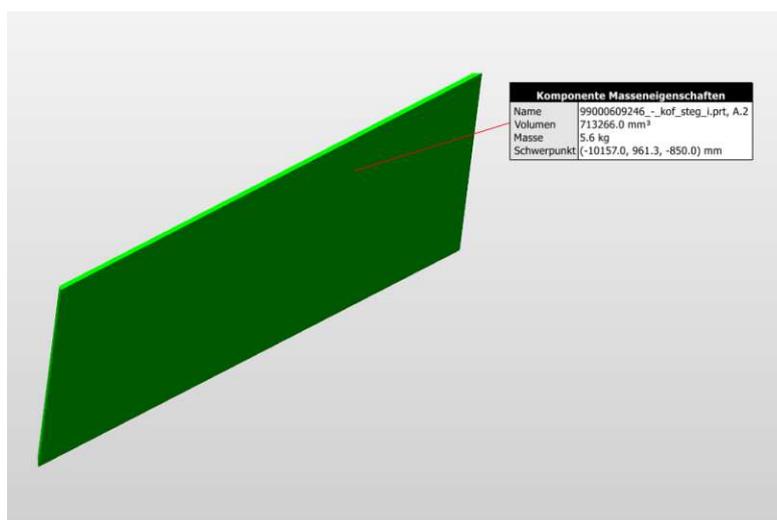


Abbildung 31: Blech 6 mm

Als erste Möglichkeit wurde die Wandstärke um eine Normblechdicke verringert. In diesem Fall war dies von 6 mm auf 5 mm. Dadurch betrug die neue Masse 4.6 kg, dies ist eine Massenreduktion von 17.9 %. Ein wesentlicher Vorteil dieser Möglichkeit ist, dass nur ein dünneres Blech bestellt werden muss, der Aufwand für die Bearbeitung bleibt gleich wie bei der Basisversion. Jedoch muss man darauf achten, dass die geforderten Sicherheiten bei den Schweißverbindungen erfüllt werden.

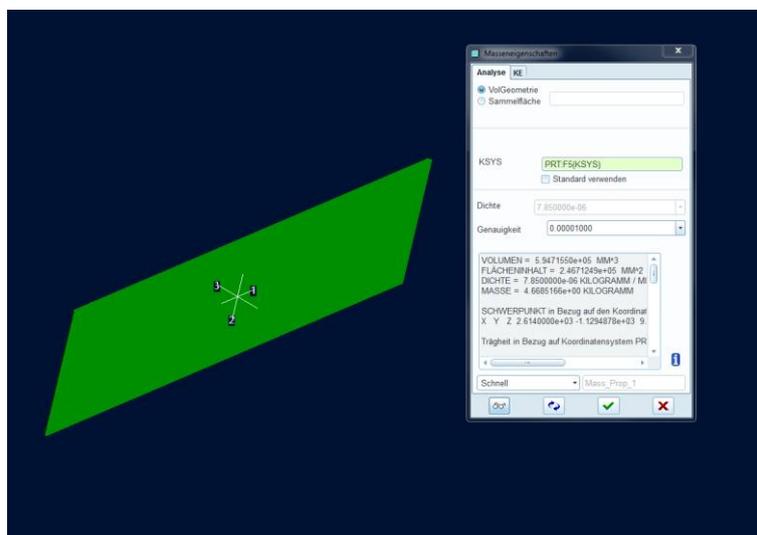


Abbildung 32: Blech 5 mm

Als zweite Möglichkeit wurde die Wandstärke gleich gelassen, jedoch das Bauteil mit Löchern versehen. Dadurch betrug die neue Masse 4.9 kg, was einer Massenreduktion von 12.5 % entspricht. Der Vorteil dieser Methode ist, dass für die Schweißnaht eine dickere Wandstärke zur Verfügung steht. Allerdings ist für die Löcher zusätzlicher Fertigungsaufwand zu berücksichtigen.

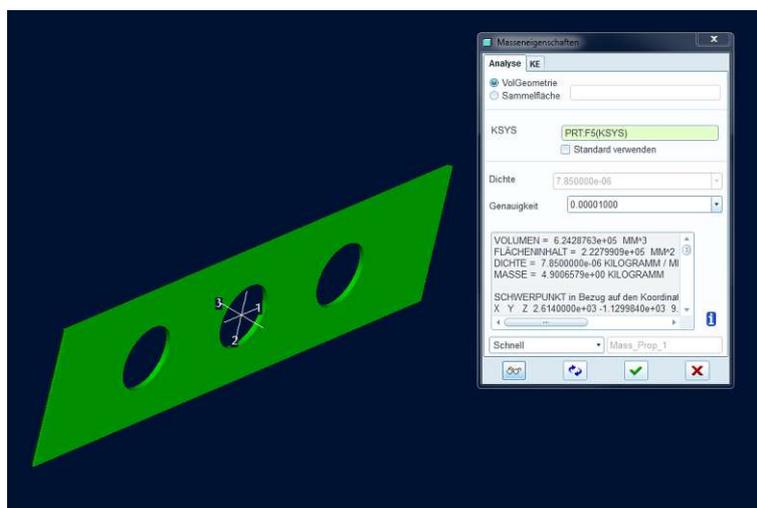


Abbildung 33: Blech gelocht

Bei dieser Untersuchung wurde für die Massenreduktion der Ansatz der Wandstärkenreduzierung gewählt, da dieser einen gleichbleibenden Fertigungsaufwand sichert und mit geringerem Aufwand eine größere Ersparnis liefert. Bereiche, die auf Grund der Reduzierung Spannungsprobleme aufweisen, können mittels Rippen bzw. Steifen behoben werden.

## Wandstärkenreduzierung

Zur Erreichung des Zieles der Massenersparung wurde bei den in Tabelle 8 aufgelisteten Blechen die Wandstärke reduziert. Nur die Wandstärke des Gurtes des Mittellangträgers konnte auf Grund der Belastungen und konstruktiver Vorgaben nicht reduziert werden.

<b>Kopfstück</b>				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Kupplungsplatte	1	35	25
2	Blech Kupplungsplatte unten	1	10	8
3	Dreiecksblech Kupplungsplatte	2	12	10
4	Untergurt Kopfstück	2	6	5
5	Untergurt Kopfstück 1	2	6	5
6	Untergurt Kopfstück 2	2	6	5
7	Kopfblech vorne	1	6	5
8	Kopfblech hinten	2	10	8
9	Bodenblech	1	6	5
10	Kopfsteg innen	2	5	4
11	Kopfsteg außen	2	5	4
<b>Mittellangträger</b>				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Mittellangträger Steg	2	15	12
3	Rippe 1	2	8	6
4	Rippe 2	2	8	6
5	Rippe 1 innen	1	8	6
6	Rippe 2 innen	1	8	6
7	Bodenblech	1	5	4
<b>Anticlimber</b>				
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Wandstärke Basis [mm]	Wandstärke neu [mm]
1	Stegblech	2	6	5
2	Versteifungsblech	1	6	5
3	Rippe	1	6	5
4	Untergurt	1	6	5

Tabelle 8: Wandstärkenreduzierung

## Benötigte Bauteile

Um den im Abschnitt „Erste Berechnung Wandstärkenreduzierung“ erlangten Erkenntnissen entgegenzuwirken, werden für die Konstruktion zusätzliche Bauteile benötigt. Hierzu wird im Bereich der Bodenplatte des Kopfstückes oberhalb der Kupplungsplatte eine Beulsteife eingeschweißt. Hiermit soll das Beulen der Bodenplatte unterbunden werden. In Abbildung 34 ist die Beulsteife dargestellt. Sie weist eine Wandstärke von 3 mm auf und wird als L-Profil ausgeführt. Die berechnete Masse der Steife beträgt ca. 1,3 kg.

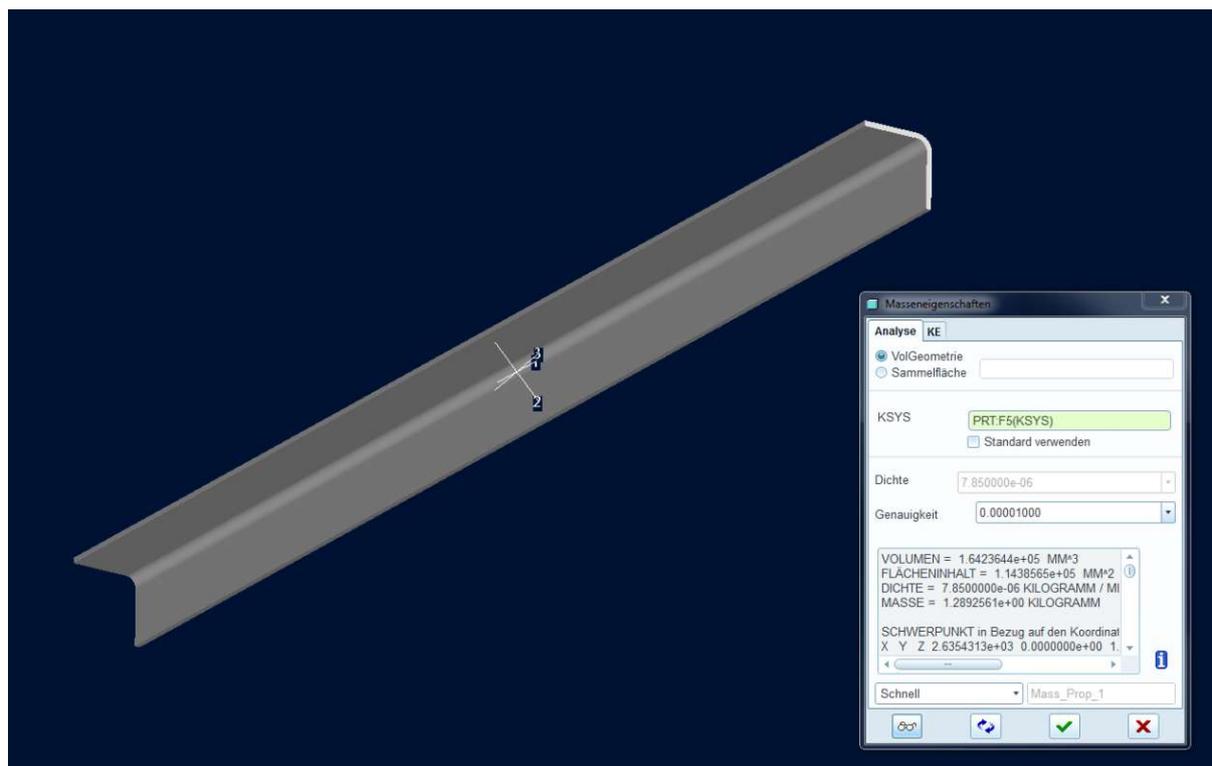


Abbildung 34: Beulsteife Bodenblech

## Benötigte Maßnahmen

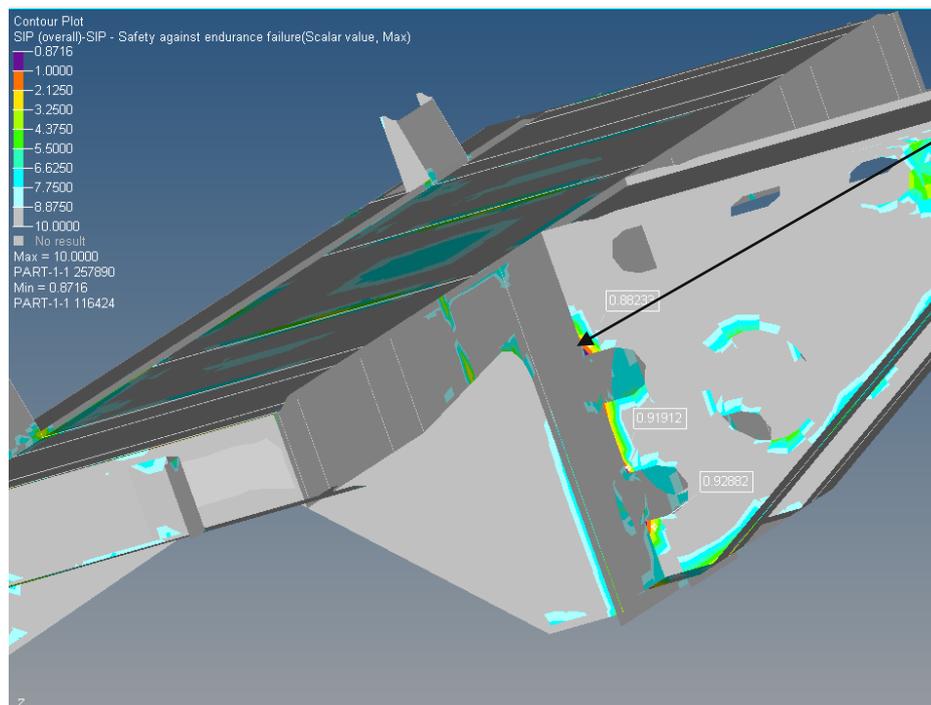


Abbildung 35: Anbindung Kupplungsplatte Mittellangträger

Im Bereich der Anbindung vom Mittellangträger zur Kupplungsplatte (in Abbildung 35 ersichtlich) gibt es mehrere Möglichkeiten für die Erzielung der geforderten Sicherheit. Es können einzelnen Rippen eingeschweißt werden, welche den Kraftfluss gleichmäßiger an die Umgebung ableiten. Des Weiteren könnte durch eine Änderung der Schweißnaht der auftretende Kerbfall so verändert werden, dass die benötigte Sicherheit erreicht wird. In Abbildung 36 ist der Kerbfall der Anbindung laut DVS 1612:2014-08 dargestellt. Die schlechteste Bewertung erfolgt hierbei mit F2. Dies würde einer DHY-Naht entsprechen. Diese Naht wird nicht durgeschweißt, was zu einer schlechteren Bewertung führt. Wenn man an dieser Stelle die Naht auf eine DHV-Naht mit Bearbeitung und Sichtprüfung ändern würde, würde sich die zulässige Spannung von 40 MPa auf die Bewertung E5 mit einer zulässigen Spannung von 66 MPa erhöhen. Ebenso würde sich die Bewertung E6 durch die Änderung auf eine DHV-Naht auf E5 ändern. Dies würde die zulässige Spannung von 58 MPa auf 66 MPa erhöhen. Die Bewertung E4 würde sich auf Grund der Änderung der Naht auf C- erhöhen. Dies würde bedeuten, dass die zulässige Spannung sich von 74 MPa auf 90 MPa erhöhen würde. Die Bewertung H- bzw. H ändert sich auf H+ auf 65 MPa.

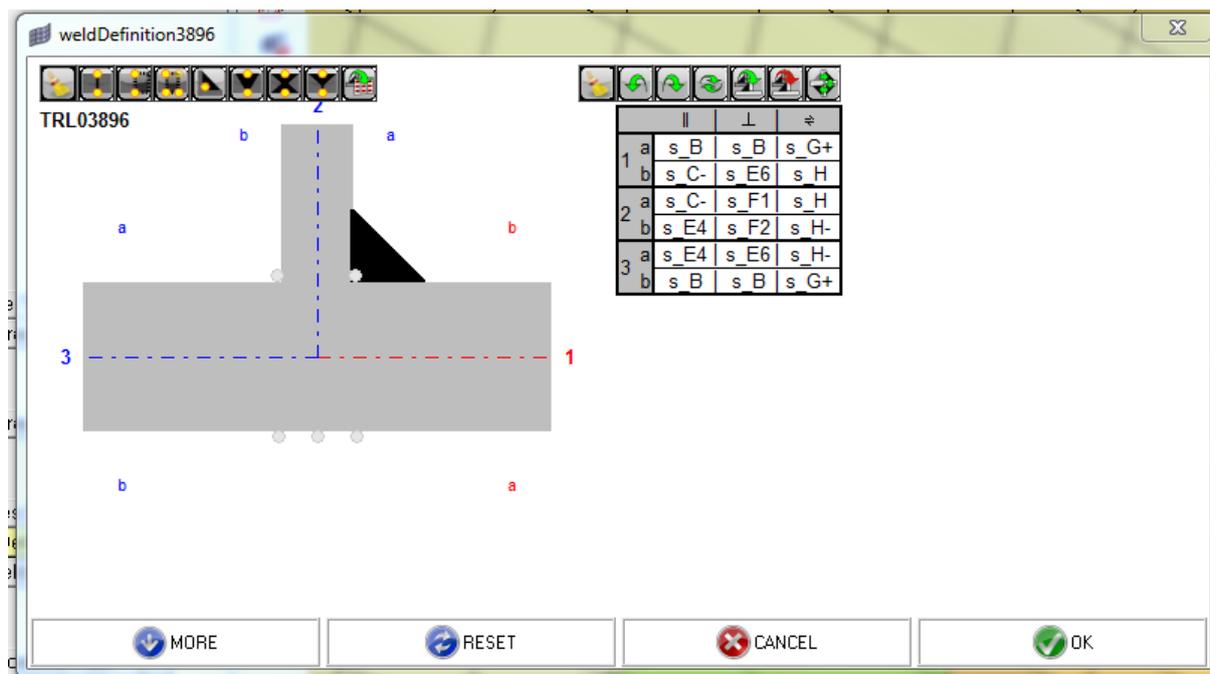


Abbildung 36: Schweißnahtbewertung (DHY-Naht)

In Abbildung 37 ist die neue Schweißnahtbewertung laut DVS 1612:2014-08 dargestellt. Die Kerbfälle wurden, wie schon oben erklärt, zu den Kerbfällen für eine DHV-Naht geändert. Durch die Änderung wurde die vorgegebene Sicherheit an der kritischen Stelle erreicht. Dies wurde anhand eines dritten Berechnungsganges kontrolliert. Auf Grund der Änderung von einer DHY-Naht auf eine DHV-Naht wird aber eine zusätzliche Kontrolle der Schweißnaht benötigt. Diese Prüfung wird ein Ansteigen der Herstellkosten bewirken.

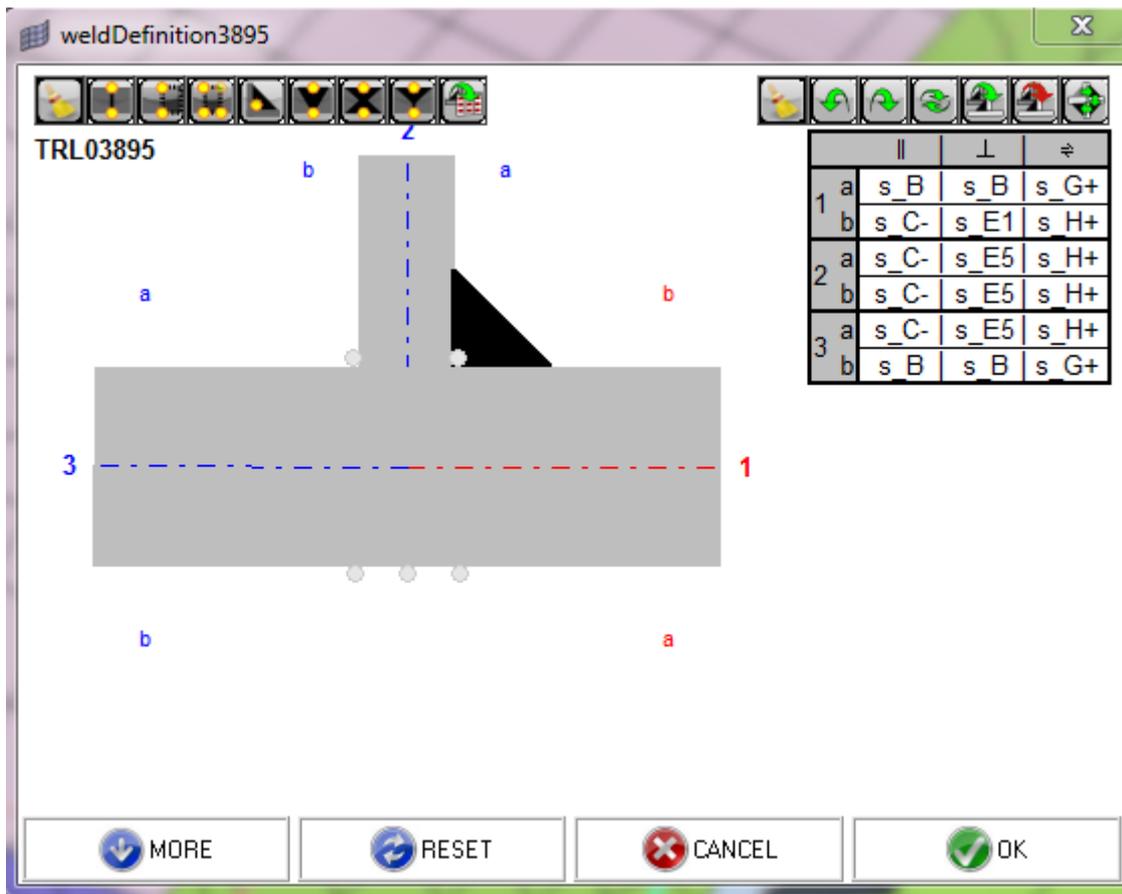


Abbildung 37: Schweißnahtbewertung DHV-Naht

In Abbildung 38 ist der finale Berechnungsgang dargestellt. Hier wurden alle Wandstärken der vorigen Berechnungsgänge übernommen. Wie in der Abbildung erkennbar ist, werden die geforderten Sicherheiten erfüllt. Der minimale Wert, der bei der ersten Berechnung 0,88 betrug, änderte sich beim kritischen Bereich, nämlich der Anbindung von Kupplungsplatte zu Mittellangträger, auf 1,9.

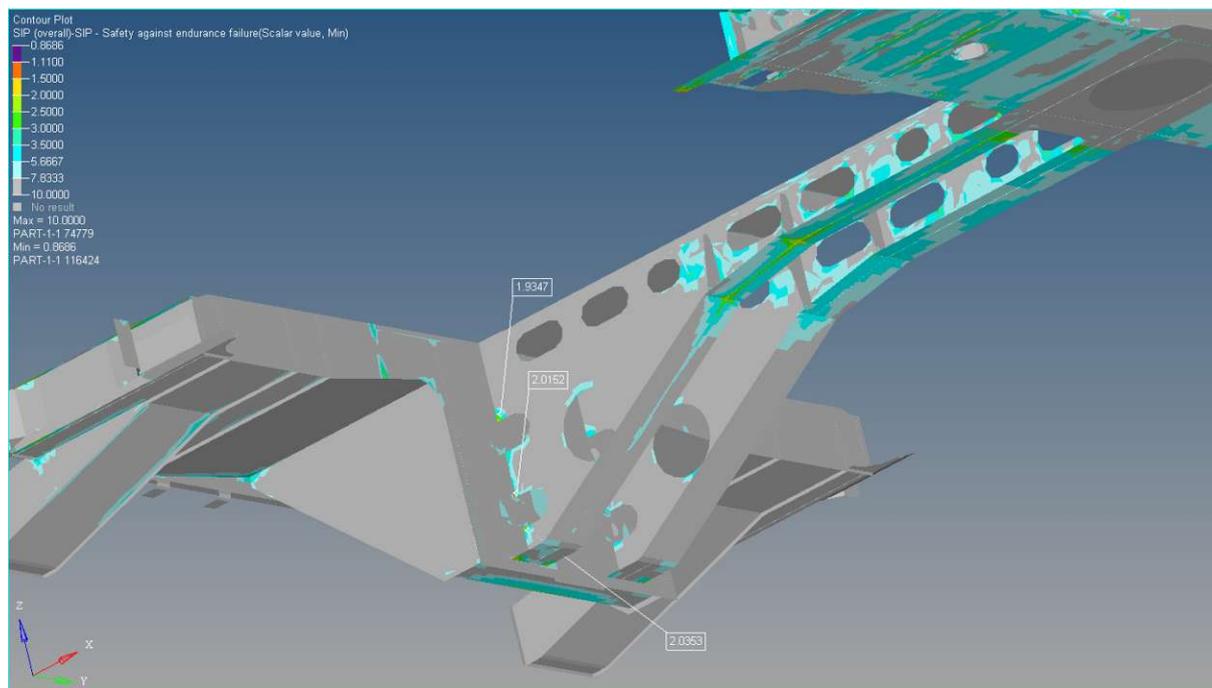


Abbildung 38: Sicherheiten Ermüdung DHV-Naht

## 4.4 Nutzwertanalyse

Auf Basis der Werkstoffauswahl im Abschnitt "Werkstoffauswahl mittels K.O.-Kriterien" wurden die Stähle einer Nutzwertanalyse unterzogen. Anhand eines paarweisen Vergleichs und einer Nutzwertanalyse wurde der passende Stahl ausgewählt. Hier ist anzumerken, dass die max. auftretende Spannung bei dem Lastfall Kupplungsdruck auftritt und einen Wert von 546,15 MPa aufweist. Dies bedeutet, dass für die zulässige Spannung des ausgewählten Stahls die Streckgrenze größer sein muss.

Es wurden folgende Kriterien für die Anforderungen des Stahles ausgewählt und definiert:

- gute Schweißseignung (CEV)
- Lieferbereitschaft
- ausnutzbare Festigkeit
- hohe Bruchdehnung
- Gewichtsreduzierung
- Schweißzertifizierung
- geringer Biegeradius

### **Gute Schweißseignung:**

Bei der guten Schweißseignung der Stähle wurde besonders auf den CEV-Wert (Kohlenstoffequivalent) geachtet. Eine gute Schweißseignung wird bei Stählen, welche einen geringeren Wert als 0,45 aufweisen, erzielt. Eine schlechte Schweißseignung liegt bei einem Wert über 0,65 vor. Die in betracht gezogenen thermomechanisch gewalzten Stähle weisen einen CEV-Wert von 0,43-0,47. Der vergütete Stahl (S690QL) weist jedoch einen CEV-Wert von 0,65-0,77.

### **Lieferbereitschaft:**

Da die Fertigung des Vorbaus normalerweise von Subfirmen durchgeführt wird, ist auch die Lieferbereitschaft von Bedeutung. Schließlich soll auch in Drittstaaten die Fertigung möglich sein. Bezüglich der Lieferbereitschaft weisen höherfeste Stähle keinen Unterschied zu Standardbaustählen auf.

### **Ausnutzbare Festigkeit:**

Die ausnutzbare Zugfestigkeit ist eine grundlegende Größe, welche für die statische Belastung bzw. Berechnung von höchster Priorität ist. Es wurde deswegen die ausnutzbare Zugfestigkeit gewählt, da aus Erfahrung die Biegegewechselfestigkeit für die statische Berechnung keine Auswirkung hat. Ab dem Stahl S355J2C\_N trägt die Biegegewechselfestigkeit generell zu keiner Steigerung der zulässigen Spannungswerte bei.

### **Hohe Bruchdehnung:**

Eine hohe Bruchdehnung wird auch im Zuge eines Crashes benötigt. Damit verformt sich der Stahl weitgehend bevor es zum Gewaltbruch kommt. Dies bewirkt eine maximale Energieabsorption, welche angestrebt wird. Zusätzlich werden in dem Vorbau noch Crashelemente vorgesehen, welche die meiste Energie aufnehmen sollen.

## Massenreduzierung

Das Hauptaugenmerk liegt bei der Reduzierung der Masse. Hierfür wurde bei dem paarweisen Vergleich und der Nutzwertanalyse die Annahme getroffen, dass jener Stahl mit der höchsten Streckgrenze auch die höchste Einsparung erzielt. Der Aspekt, dass es während der Konstruktion des Vorbaus aufgrund schweißtechnischer bzw. bautechnischer Anforderungen zur Anhebung von Wandstärken kommen kann, wurde bei der Auswahl des Werkstoffes nicht berücksichtigt.

## Schweißzertifizierung

Die Stähle, welche für den Vorbau in Frage kommen, weisen eine höhere Streckgrenze als 360 MPa auf. Deswegen werden sie laut DIN CEN ISO/TR 15608: Schweißen-Richtlinie in die Gruppe 2 eingeteilt. Diese Gruppe erfordert eine bestimmte Zertifizierung zum Schweißen von höherfesten Stählen. Dies muss bei der Fertigung des Vorbaus von Subfirmen beachtet werden.

## Geringer Mindestbiegeradius

Da bei der Konstruktion auch Biegeteile vorkommen werden, ist ein geringer Biegeradius von Vorteil. Die Werte der Biegeradien befinden sich zwischen  $1 \times t$  bis  $2 \times t$ , laut DIN EN 10149-2:2013-12

### 4.4.1 Paarweiser Vergleich

Die Kriterien wurden mittels des paarweisen Vergleichs gewichtet. In Tabelle 9 ist der paarweise Vergleich für die einzelnen Kriterien durchgeführt. Hier kann man erkennen, dass die Massenreduktion die höchste Gewichtung hat. Der Wert beträgt 23,21 %. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die ausnutzbare Zugfestigkeit, welche einen Prozentsatz von 19,64 % aufweist. Denselben Wert erreicht auch die gute Schweißbeignung. Die restlichen Kriterien erreichen eine Gewichtung von 1,79 - 12,5 %.

Paarweiser - Vergleich										
als wichtiger	gute Schweißbeignung CEV	Kostenpunkt	Lieferbereitschaft	ausnutzbare Festigkeit	hohe Bruchdehnung	Massenreduzierung	Schweißzertifizierung	geringer Mindestbiegeradius	Summe	
gute Schweißbeignung CEV		1	1	1	1	0	0,5	1	5,5	19,64%
Kostenpunkt	0		0,5	0	0	0	0	0	0,5	1,79%
Lieferbereitschaft	0	0,5		0	0	0	0,5	0,5	1,5	5,36%
ausnutzbare Festigkeit	0	1	1		1	0,5	1	1	5,5	19,64%
hohe Bruchdehnung	0	1	1	0		0	0,5	1	3,5	12,50%
Massenreduzierung	1	1	1	0,5	1		1	1	6,5	23,21%
Schweißzertifizierung	0,5	1	0,5	0	0,5	0		1	3,5	12,50%
geringer Mindestbiegeradius	0	1	0,5	0	0	0	0		1,5	5,36%
Summe									28	100,00%

Tabelle 9: Paarweiser - Vergleich

#### 4.4.2 Nutzwertanalyse

In Tabelle 10 ist die Nutzwertanalyse dargestellt. Nach subjektiver Bewertung der einzelnen Stähle anhand der Auswahlkriterien, liefert die Nutzwertanalyse folgendes Ergebnis: Der Stahl S700MC erreicht den höchsten Wert mit 5,52. Den niedrigsten Wert erreicht der Stahl S355J2C\_N. Laut diesem Ergebnis wäre der Stahl S700MC die beste Lösung für die geforderten Kriterien.

Nutzwertanalyse											
Kriterien	Gewichtung Paarweiser Vergleich	S355		S460MC		S500MC		S700MC		S690QL	
		Bewertung	Wert								
gute Schweißbeignung CEV	19,64%	7,00	1,38	6,00	1,18	6,00	1,18	6,00	1,18	3,00	0,59
Kostenpunkt	1,79%	7,00	0,13	7,00	0,13	5,00	0,09	2,00	0,04	5,00	0,09
Lieferbereitschaft	5,36%	5,00	0,27	5,00	0,27	5,00	0,27	5,00	0,27	5,00	0,27
ausnutzbare Festigkeit	19,64%	4,00	0,79	6,00	1,18	5,00	0,98	6,00	1,18	6,00	1,18
hohe Bruchdehnung	12,50%	4,00	0,50	6,00	0,75	5,00	0,63	5,00	0,63	6,00	0,75
Massenreduzierung	23,21%	3,00	0,70	4,00	0,93	5,00	1,16	6,00	1,39	6,00	1,39
Schweißzertifizierung	12,50%	5,00	0,63	5,00	0,63	5,00	0,63	5,00	0,63	5,00	0,63
geringer Mindestbiegeradius	5,36%	6,00	0,32	6,00	0,32	6,00	0,32	4,00	0,21	4,00	0,21
Summe	100,00%	41,00	4,70	45,00	5,38	42,00	5,25	39,00	5,52	40,00	5,11

Tabelle 10: Nutzwertanalyse

#### 4.4.3 Kosten

##### Materialkosten für die Stähle pro Tonne

Die Kosten sind immer ein wesentlicher Punkt bei der Konstruktion eines Bauteils. Allerdings stehen in diesem Fall die Optimierung des Vorbaus mittels höherfesten Stählen und die Schweißbeignung der Stähle im Vordergrund. Die einzelnen Preise wurden dem Dokument: "Preisliste warmgewaltes Stahlband der Vöstalpine von April 2013"<sup>29</sup> entnommen. Die Preise verstehen sich ohne Steuern und Abgaben für Lieferung. Weiters sind die Preise pro Tonne zu verstehen.

Nach einer ersten groben Berechnung ohne Berücksichtigung von Fertigungsaspekten und Lieferkosten zeigt sich jedoch, dass sich bei einer theoretischen Massenersparnis von 18,8% bei Kopfstück und Mittellangträger,

<sup>29</sup> (Stahl Voestalpine, 2013)

bei den Stählen sogar ein finanzieller Vorteil ergeben würde. In Tabelle 11 sind die einzelnen Stähle dargestellt: die Ersparnis reicht von 9,87% - 0,74%. Jedoch muss hier erwähnt werden, dass bei den beiden Stählen S460MC und S500MC auch eine Massenersparnis von 18,8% bei Mittellangträger und Kopfstück angenommen wurde. Diese Werte würden bei einer genauen Analyse wesentlich kleiner sein, da sich die ersparte Masse verkleinern würde. Des Weiteren wurden die Preise der Blechdicke bei einer Walzbreite von 1200 - 1299 mm gemittelt um die Preise auf derselben Basis zu berechnen. Zusätzlich wurde der Hauptquerträger mit einem konstanten Preis festgelegt, da hier kein neuer Stahl zum Einsatz kommt. Der Preis berechnet sich auf Basis des Stahls S355J2C\_N.

Der Grundpreis für eine Tonne Stahl liegt bei 750€. Da dieser Wert für alle Stahlsorten gleich ist, wird er in der Tabelle nicht angeführt. Je nach Stahl ergibt sich ein Aufpreis pro Tonne der von 60€-240€ reicht. Im ersten Abschnitt der Tabelle wurde der Preis pro Tonne ausgerechnet. Im zweiten Abschnitt wurde der Preis bezogen auf den Vorbau berechnet.

<b>Preis - Massenanalyse</b>					
	<b>S355</b>	<b>S460MC</b>	<b>S500MC</b>	<b>S700MC</b>	<b>S690QL</b>
<b>Aufpreis[€]:</b>	60	75	80	230	240
<b>Blechdicke:(Breiten:1200-1299)</b>					
<b>Durchschnittswert aller Dicken [€]</b>	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13
<b>Preis pro Tonne [€]</b>	835,13	850,13	855,13	1005,13	1015,13
<b>Preise bezogen auf Vorbau</b>					
<b>Preis pro (Mittellangträger und Kopstück)</b>	510,51	519,68	522,74	614,43	620,55
<b>bei 18,8% Massenersparnis</b>		421,98	424,46	498,92	503,89
<b>Preis Hauptquerträger</b>	386,25	386,25	386,25	386,25	386,25
<b>Summe/Basis</b>	896,76	808,23	810,71	885,16	890,13
<b>Preisliche Ersparnis</b>		9,87%	9,60%	1,29%	0,74%

**Tabelle 11: Werkstoffkosten pro Tonne bzw. pro Vorbau**

Die einzelnen Werkstoffe wurden in Abbildung 39 mit den Preisen für den Vorbau aus Tabelle 11 dargestellt. In dem Diagramm wurde auf der Abszisse die technische Wertigkeit aufgetragen, welche der Auswertung der Nutzwertanalyse entspricht und auf der Ordinate wurde die wirtschaftliche Wertigkeit aufgetragen. Als Bezugswert für die technische Wertigkeit wurde basierend auf der Nutzwertanalyse der max. erreichbare Wert, 10 gewählt. Somit bekommt man eine für alle Bewertungen gleiche Basis. Als Bezugswert für die wirtschaftliche Wertigkeit wurde der Wert des Vorbaus aus Baustahl S355J2C\_N verwendet.

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der Nutzwertanalyse anhand eines Diagramms dargestellt. Wie man erkennen kann, liegen die drei Stähle S460MC, S500MC und S700MC am nächsten zum optimalen Punkt und liefern somit die besten Ergebnisse der Nutzwertanalyse. Die beiden Stähle S690QL und S355J2C\_N erzielen bei der Nutzwertanalyse die schlechtesten Ergebnisse.

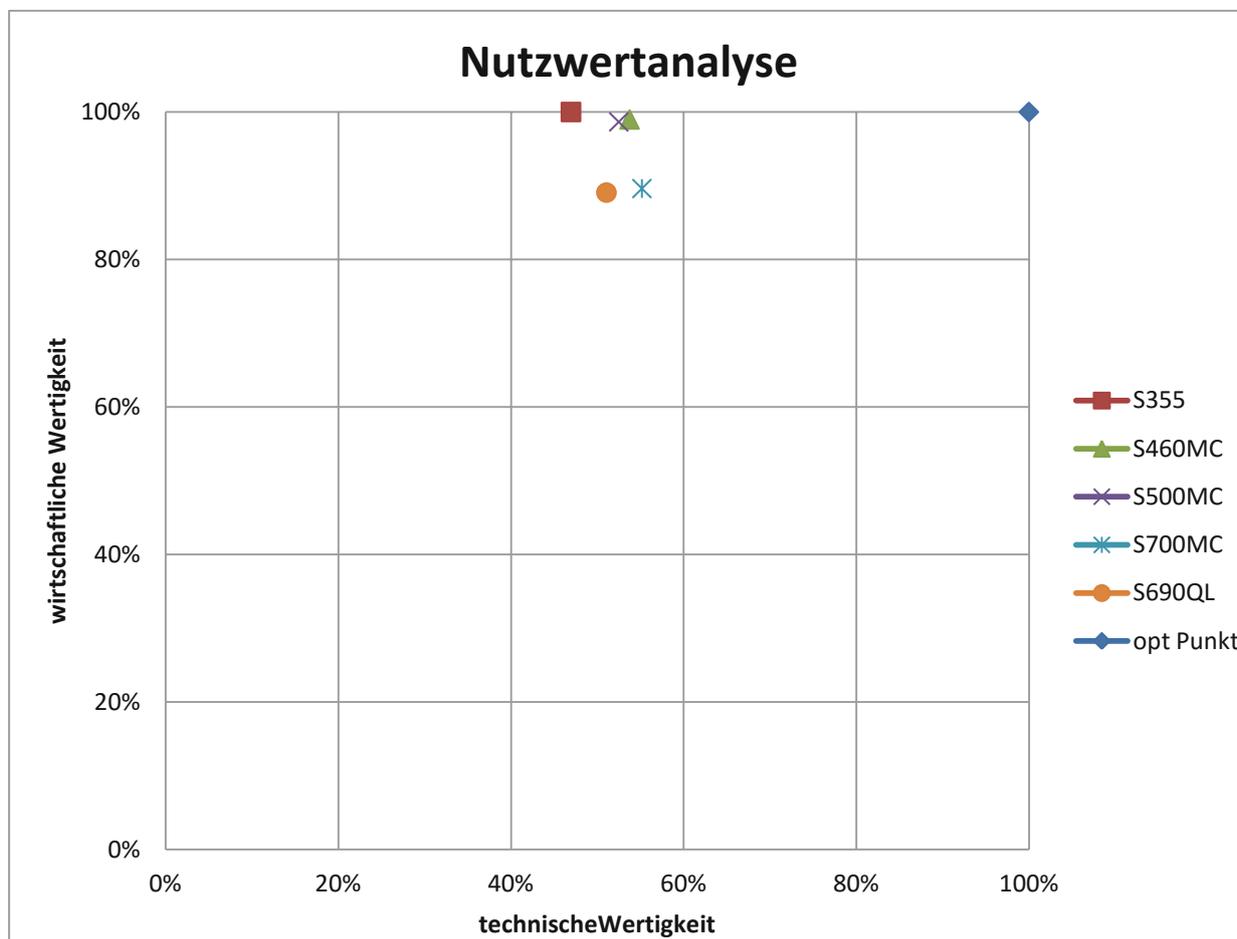


Abbildung 39: Darstellung Nutzwertanalyse

#### 4.4.4 Bewertung der Nutzwertanalyse

Wie in Abbildung 39 ersichtlich, würden sich drei Stähle zur Optimierung anbieten. Allerdings muss man erwähnen, dass auf Grund der Wandstärkenreduzierungen höhere Spannungen in den Schweißnähten aufgetreten sind. Wie man in Abschnitt 3.4.2 erkennen kann, sind die Spannungen wesentlich höher als die Streckgrenze des S460MC und S500MC. Deswegen ist die endgültige Wahl des Werkstoffes, auf den Stahl S700MC gefallen.

## 4.5 Herstellungskosten

Dies sind jene Kosten, die für die Herstellung des Vorbaus anfallen. Diese beinhalten die Kosten für Vorbereitungsarbeiten und für die schweißtechnischen Maßnahmen, welche getroffen werden müssen, z.B. das Anfassen der Stahlbleche für Y bzw. V Nähte. Hauptsächlich enthalten die Herstellungskosten die Schweißarbeiten und Richtarbeiten. Zusätzliche Kosten fallen durch Prüf- und Nachbearbeitungen an.

Für die Berechnung der Herstellungskosten mussten einige Vereinfachungen getroffen werden:

- Die Richtarbeiten bzw. Richtzeiten wurden für beide Versionen als gleich angesehen.
- Es wurden dieselben Anarbeitungszeiten für die Blech- bzw. Schweißvorbereitung getroffen.
- Die Schweißzusätze wurden als gleich angesehen.
- Der Hauptquerträger wurde schweißtechnisch nicht betrachtet.
- Die Lohnkosten wurden mit 69 €/h angenommen.
- Gemeinkosten wurden vernachlässigt.

Somit ergibt sich in der folgenden Auswertung der Herstellungskosten, dass nur die reinen Schweißzeiten und die Materialkosten betrachtet werden. Die Zeiten wurden anhand der Schweißzeittabelle der Siemens AG Österreich berechnet.

In Tabelle 12 sind die Herstellkosten der Basisversion dargestellt. Die Herstellungskosten ergeben sich zu 1756,86 €.

Aufstellung der Herstellkosten Basisversion						
Kostenart	Komponente	Menge		Kosten pro Einheit		Gesamtkosten [€]
Materialkosten	Kopfstück	443,40	kg	0,84	€/kg	370,29
Materialkosten	Mittellangträger	167,90	kg	0,84	€/kg	140,22
<b>Materialkosten</b>						<b>510,51</b>
Lohnkosten	Kopfstück	12,29	h	69,00	€/h	848,23
Lohnkosten	Mittellangträger	4,01	h	69,00	€/h	276,45
Lohnkosten	Assembling	1,76	h	69,00	€/h	121,67
<b>Lohnkosten</b>						<b>1246,35</b>
				<b>Summe:</b>		<b>1756,86</b>

Tabelle 12: Herstellkosten Basis

In Tabelle 13 sind die Herstellkosten der optimierten Version mit dem Stahl S700MC dargestellt. Die Herstellungskosten ergeben sich zu 1440,01 €.

<b>Aufstellung der Herstellkosten optimierte Version</b>						
<b>Kostenart</b>	<b>Komponente</b>	<b>Menge</b>		<b>Kosten pro Einheit</b>		<b>Gesamtkosten [€]</b>
Materialkosten	Kopfstück	352,30	kg	1,01	€/kg	354,11
Materialkosten	Mittellangträger	143,60	kg	1,01	€/kg	144,34
<b>Materialkosten</b>						<b>498,44</b>
Lohnkosten	Kopfstück	8,57	h	69,00	€/h	591,04
Lohnkosten	Mittellangträger	3,60	h	69,00	€/h	248,32
Lohnkosten	Assembling	1,48	h	69,00	€/h	102,21
<b>Lohnkosten</b>						<b>941,57</b>
				<b>Summe:</b>		<b>1440,01</b>

**Tabelle 13: Herstellkosten optimierte Version**

Wie man erkennen kann, werden durch die Verringerung der Blechstärken auch geringere Kosten erzielt. Dies ist aber nicht nur auf die folgende Verringerung der Masse zurückzuführen, sondern auch auf die verkleinerten Schweißnähte. Dadurch ergeben sich geringere Schweißzeiten und somit geringere Kosten.

Jedoch muss man beachten, dass auf Grund der Verwendung von dünneren Blechen die Richtarbeiten sicherlich steigen werden. Insbesondere die Arbeiten wegen Schweißverzug werden höher sein. Daraus folgend werden die Kosten zur Herstellung nahezu dieselben sein bzw. ist zu erwarten, dass die Kosten steigen werden. Dies ist zwar nur eine Annahme, aber auf Grund der Erfahrungswerte plausibel. Eine genaue Zeitaufnahme ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Dies könnte man erst konkret bei der Fertigung eines Vorbaus feststellen.

## 5 Ergebnisse / Auswertung

Zusammenfassend wurden alle Massenersparnisse und konstruktiven Maßnahmen in einer Tabelle aufgelistet. Diese Auswertung bezieht sich auf den Stahl S700MC der für die Optimierung ausgewählt wurde. In Tabelle 14 werden die eingesparten Massen gegenüber der zusätzlich benötigten Beulsteife zusammengefasst. Schlussendlich ergibt sich eine Massenersparnis von 10,5 %. Diese 10,5 % entsprechen einer Masse von 114,1 kg.

Die aufgelisteten Massen beziehen sich auf den Vorbau am KKE. Somit würde die neue Gesamtmasse des Vorbaus 973,4 kg betragen. Die größte bauteilbezogene Ersparnis kann beim Kopfstück erreicht werden. Hier wurden 21,3% der Ausgangsmasse eingespart. Der Mittellangträger weist eine bauteilbezogene Ersparnis von 14,5 % auf und der Anticlimber einen Wert von 16,9 %.

Kopfstück (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Kupplungsplatte	1	134,4	134,4	96	96	38,4	28,6%	10,3%
2	Blech Kupplungsplatte unten	1	6,2	6,2	5	5	1,2	19,4%	0,3%
3	Dreiecksblech Kupplungsplatte	2	27,3	54,6	22,7	45,4	9,2	16,8%	2,5%
4	Untergurt Kopfstück	2	14,8	29,6	12,4	24,8	4,8	16,2%	1,3%
5	Untergurt Kopfstück 1	2	3,9	7,8	3,3	6,6	1,2	15,4%	0,3%
6	Untergurt Kopfstück 2	2	3,1	6,2	2,6	5,2	1	16,1%	0,3%
7	Kopfblech vorne	1	20,7	20,7	20,7	20,7	0	0,0%	0,0%
8	Kopfblech hinten	2	10,5	21	8,4	16,8	4,2	20,0%	1,1%
9	Bodenblech	1	73,5	73,5	58	58	15,5	21,1%	4,2%
10	Kopfstege innen	2	5,6	11,2	4,7	9,4	1,8	16,1%	0,5%
11	Kopfstege außen	2	3,5	7	2,6	5,2	1,8	25,7%	0,5%
Summe:				372,2		293,1	79,1		
Ersparnis:									21,3%
Mittellangträger (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Mittellangträger Steg	2	51,1	102,2	42	84	18,2	17,8%	10,8%
2	Mittellangträger Gurt	2	18,2	36,4	18,2	36,4	0	0,0%	0,0%
3	Rippe 1	2	0,3	0,6	0,25	0,5	0,1	16,7%	0,1%
4	Rippe 2	2	0,4	0,8	0,3	0,6	0,2	25,0%	0,1%
5	Rippe 1 innen	1	1,7	1,7	1,2	1,2	0,5	29,4%	0,3%
6	Rippe 2 innen	1	1,9	1,9	1,4	1,4	0,5	26,3%	0,3%
7	Bodenblech	1	24,3	24,3	19,5	19,5	4,8	19,8%	2,9%
Summe:				167,9		143,6	24,3		
Ersparnis:									14,5%
Anticlimber (Werte in kg)									
Pos. Nr.	Name Bauteil	Anzahl	Masse Basis	Masse Basis ges.	Masse neu	Masse neu ges.	Differenz	Prozentuelle Einsparung pro Bauteil	Prozentuelle Einsparung zur Gesamtmasse
1	Stegblech	4	8,9	35,6	7,4	29,6	6	16,9%	8,4%
2	Versteifungsblech	2	4,5	9	3,7	7,4	1,6	17,8%	2,2%
3	Rippe	2	0,9	1,8	0,7	1,4	0,4	22,2%	0,6%
4	Untergurt	2	12,4	24,8	10,4	20,8	4	16,1%	5,6%
Summe:				71,2		59,2	12		
Ersparnis:									16,9%
Gesamte Massenreduzierung (Werte in kg)									
Summe:				611,3		495,9	115,4		
Beulsteife						1,3			
Bodenblech MLT				2,7		2,7			
Anticlimber Rippen				11		11			
Hauptquerträger				462,5		462,5			
Summe				1087,5		973,4	114,1		
Ersparnis:									10,5%

Tabelle 14: Auflistung Gesamtmassen

Wie man erkennen kann, können insgesamt nur 10,5 % Massenersparnis erreicht werden. Dies ist im Grunde darauf zurückzuführen, dass der Hauptquerträger auf Grund der dynamischen Belastungen und zu befestigenden Bauteile keine Reduzierung der Abmessungen bzw. Wandstärken zulässt.

Bei der alleinigen Betrachtung der beiden Bauteile Kopfstück mit Anticlimber und Mittellangträger können nahezu 20 % der Masse eingespart werden.

Dass die 30 % Massenersparnis, die bei Reisezugwagen erzielt werden, nicht erreicht werden, lässt sich damit begründen, dass der generelle Aufbau ein anderer ist. Den Aufbau eines Vorbaus für Reisezugwagen und Metrofahrzeugen kann man direkt nicht vergleichen, da verschiedene Anforderungen an die Übertragung der Kräfte festgelegt werden. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass bei Metrofahrzeugen bei der Auslegung grundsätzlich eine leichte Bauweise angestrebt wird, da für die zahlreichen Beschleunigungs- und Abbremsungsmanöver geringere Massen von Vorteil sind. Bei Reisezugwagen liegt bei der Konstruktion von Wagenkasten das Hauptaugenmerk nicht auf der Massereduktion.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie viel Masse man bei einem Vorbau von Metrofahrzeugen, unter der Verwendung von höherfesten Stähle einsparen kann.

Im Zuge der Arbeit wurde eine Masse von 10,5 % eingespart. Dies entspricht 114,1 kg. Bezogen auf die Gesamtmasse des Wagenkastens ist dies eine Reduzierung der Masse um ca. 1%. Wie in Kapitel 1 beschrieben, konnten beim Vorbau des Reisezugwagens 30% eingespart werden. Durch die Arbeit wurde gezeigt, dass diese 30 % beim Vorbau von Metrofahrzeugen nicht erreicht werden können, da auf Grund des Hauptquerträgers keine größere Massensparnis möglich war. Hierzu muss man erwähnen, dass ein Vorbau eines Reisezugwagens generell anders aufgebaut ist und nicht eins zu eins mit einem Vorbau einer Metro vergleichbar ist. Deswegen hat ein Vorbau eines Reiszugwagens mehr Einsparpotential als jener der Metros.

Jedoch konnte man bei einzelnen Baugruppen wie z.B. beim Kopfstück eine Massenreduktion von 21,3 % erreichen.

Eine wesentliche Erkenntnis war, dass durch die Reduktion der Wandstärken prozentuell die meiste Masse eingespart werden kann. Vor allem erspart man sich bei solchen Maßnahmen generell die steigenden Kosten, falls zusätzliche Löcher zur Massereduzierung gefertigt werden müssen.

Wie in der Arbeit auch angewendet, kann man durch die Änderungen von einzelnen Schweißnähten ebenso die zulässigen Sicherheiten erreichen und Masse einsparen. Jedoch muss man darauf achten, wenn Nähte geändert werden, dass diese auch noch prüfbar sind. Es wäre nicht zielführend, alle Nähte auf durchgeschweißte Nähte zu ändern und somit dünnere Wandstärken zu erreichen. Somit gilt es, sinnvolle Schweißnähte auszuwählen und zu bewerten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass auf Grund der bauraumtechnischen Einschränkungen und der vorgegebenen Belastungen keine größeren Masseersparnisse möglich sind.

Die Berechnung der Herstellkosten lieferte ebenso ein interessantes Ergebnis. Wie man erkennen kann, werden auf Grund der Wandstärkenreduzierung die Schweißzeiten kürzer. Die Folge daraus ist, dass die Kosten sinken. Jedoch sind diese Werte nur theoretisch und es ist zu erwarten, dass die Richtzeiten bzw. Nacharbeitszeiten wesentlich höher sein werden als bei der Basisversion.

Abschließend kann man sagen, dass auf Grund der Verwendung von höherfesten Stählen, Masse definitiv eingespart werden kann. Ob man auch die Kosten für die Fertigung verringern kann, würde sich erst durch die Fertigung eines Prototypen zeigen.

Ob die erarbeiteten Kenntnisse der vorliegenden Arbeit in Zukunft für die Produktion verwendet werden, ist eine Entscheidung, zu der man zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage tätigen kann. Diese Entscheidung muss von den Verantwortlichen der Siemens AG Österreich getroffen werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Bargel/Schulze, 2012. *Werkstoffkunde*. 11 Hrsg. Berlin: Springer.
- [2] Berns, H. & Theisen, W., 2008. *Eisenwerkstoffe*. 4 Hrsg. Bochum: Springer.
- [3] DVS 1612, D. V. f. S. u. v. V., 2014. *DVS 1612\_Gestaltung der Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau*. Dresden: DVS.
- [4] J.L.Pee, 1987. *American Society of Mechanical Engineers*. [Online] Available at: <https://www.asme.org/getmedia/379a7270-9504-4fc0-a38d-bce7a0cea4a5/125-Pullman-Sleeping-Car-Glengyle-1911.aspx> [Zugriff am 3 Juni 2015].
- [5] Pahl/Beitz, 2006. *Konstruktionslehre*. Berlin: Springer.
- [6] Siemens, 2013. *Carbody structure and crashworthiness*. Wien: Siemens intern.
- [7] Stahl Voestalpine, 2., 2013. *Warmgewalztes Stahlband*. [Online] Available at: <http://www.voestalpine.com/stahl/Produkte/Produkte/Stahlbaender/Warmgewalztes-Stahlband> [Zugriff am 02 03 2016].
- [8] Weißbach, W., 2012. *Werkstoffkunde*. 18 Hrsg. Braunschweig: Vieweg+Teurer.
- [9] Wiedemann, 2006. *Leichtbau Elemente und Konstruktion*. 3 Hrsg. Berlin: Springer.
- [10] Zangemeister, C., 2014. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. 5 Hrsg. Winnemark: Zangenmeister und Partner.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktentwicklungsprozess .....	4
Abbildung 2: Zusammenhang der Sicherheiten .....	8
Abbildung 3: Paarweiser-Vergleich Nutzwertanalyse .....	16
Abbildung 4: Diagramm technische- und wirtschaftliche- Wertigkeit .....	16
Abbildung 5: Arbeitsschritte beim methodischen Ausarbeiten .....	18
Abbildung 6: Rohbau von GLENGYLE .....	19
Abbildung 7: Vergleich höherfester Stähle .....	21
Abbildung 8: Vergleich Walzverfahren.....	23
Abbildung 9: Darstellung der Vorbaus im Wagenkasten .....	24
Abbildung 10: Vorbau KKE .....	25
Abbildung 11: Koordinatensystem Wagenkasten .....	26
Abbildung 12: Kerbfall F3 laut DVS 1612:2014-08 .....	29
Abbildung 13: MKJ - Diagramm für S355J2C_N laut DVS1612:2014-08 .....	30
Abbildung 14: Sicherheitsschaubild KKE oben.....	33
Abbildung 15: Sicherheitsschaubild KKE unten.....	33
Abbildung 16: Lastfall Kupplungsdruck Basis .....	34
Abbildung 17: Kupplungszug Basis .....	35
Abbildung 18: Anticlimber KKE Basis .....	36
Abbildung 19: Anticlimber FSTE.....	37
Abbildung 20: Wandstärken Kopfstück.....	38
Abbildung 21: Wandstärken Mittellangträger .....	39
Abbildung 22: Sicherheitsschaubild Wandstärkenreduzierung .....	40
Abbildung 23: Lastfall Kupplungsdruck Wandstärkenreduzierung.....	41
Abbildung 24: Lastfall Kupplungszug Wandstärkenreduzierung .....	42
Abbildung 25: Beulanalyse .....	43
Abbildung 26: Anticlimber KKE.....	44
Abbildung 27: Masse Vorbau KKE .....	47
Abbildung 28: Entscheidungsweg KO - Kriterien .....	49
Abbildung 29: Bauraummodell.....	50
Abbildung 30: Ausschnitt .....	51
Abbildung 31: Blech 6 mm.....	52
Abbildung 32: Blech 5 mm.....	53
Abbildung 33: Blech gelocht .....	53
Abbildung 34: Beulsteife Bodenblech.....	55
Abbildung 35: Anbindung Kupplungsplatte Mittellangträger .....	56
Abbildung 36: Schweißnahtbewertung (DHY-Naht).....	57
Abbildung 37: Schweißnahtbewertung DHV-Naht .....	58
Abbildung 38: Sicherheiten Ermüdung DHV-Naht .....	59

Abbildung 39: Darstellung Nutzwertanalyse .....65

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lasten und Beladungen DIN EN 15663_1:2012-05 .....	27
Tabelle 2: Wandstärkenreduzierung Kopfstück .....	39
Tabelle 3: Wandstärkenreduzierung Mittellangträger .....	40
Tabelle 4: Wandstärkenreduzierung Anticlimber .....	44
Tabelle 5: Massenaufstellung Kopfstück .....	45
Tabelle 6: Massenaufstellung Mittellangträger .....	45
Tabelle 7: Massereduktion Anticlimber .....	46
Tabelle 8: Wandstärkenreduzierung .....	54
Tabelle 9: Paarweiser - Vergleich .....	62
Tabelle 10: Nutzwertanalyse .....	63
Tabelle 11: Werkstoffkosten pro Tonne bzw. pro Vorbau .....	64
Tabelle 12: Herstellkosten Basis .....	66
Tabelle 13: Herstellkosten optimierte Version .....	67
Tabelle 14: Auflistung Gesamtmassen .....	68

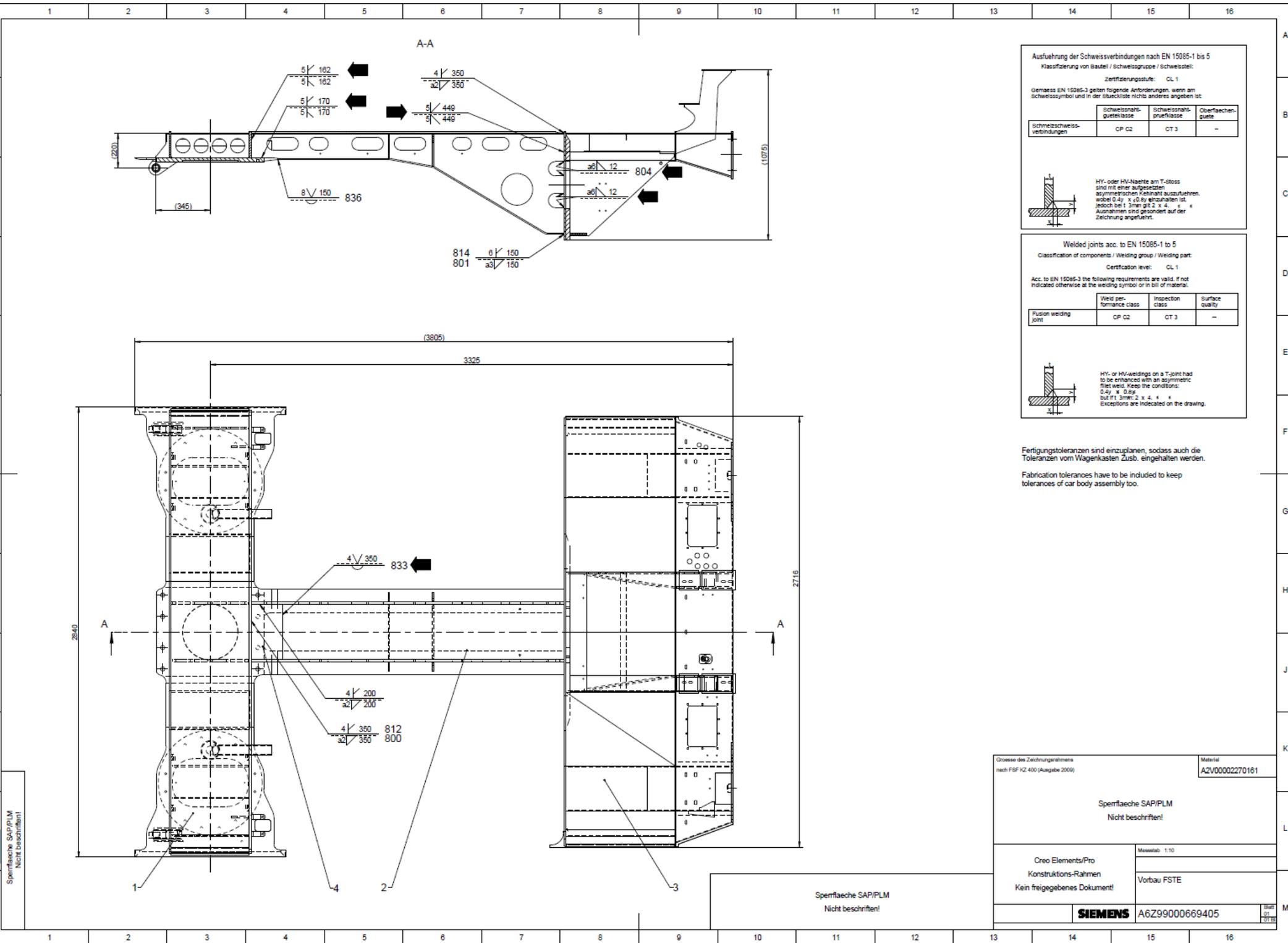
## 9 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
€	Euro
CEV	Kohlenstoff Equivalent
etc.	et cetera
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
max.	maximal
sh.	siehe
z.B.	zum Beispiel
KKE	Kurzkupplungsende
FSTE	Langkupplungsende/Führerstand
MKJ	Moore Kommers Jaspers
DHY	Doppel HY- Naht
DHV	Doppel HV-Naht
V	Vanadium
Ti	Titan
Nb	Niobium

## 10 Anhang

### 10.1 Zeichnungen

Auf den folgenden Seiten sind die Zeichnungen des Vorbaus dargestellt.



Ausführung der Schweissverbindungen nach EN 15085-1 bis 5  
 Klassifizierung von Bauteil / Schweissgruppe / Schweissstelle:  
 Zertifizierungsstufe: CL 1  
 Gemäss EN 15085-3 gelten folgende Anforderungen, wenn am Schweissymbol und in der Stückliste nichts anderes angegeben ist:

	Schweissnahtgüteklasse	Schweissnahtprüfklasse	Oberflächen-güte
Schweissverbindungen	CP C2	CT 3	-

HY- oder HV-Nahte am T-Stöss sind mit einer ausgesetzten asymmetrischen Kehlnaht auszuführen, wobei  $0,4y \times y$  einzuhalten ist, jedoch bei  $3\text{mm} \leq x \leq 4 \times x$  Ausnahmen sind gesondert auf der Zeichnung angeführt.

Welded joints acc. to EN 15085-1 to 5  
 Classification of components / Welding group / Welding part:  
 Certification level: CL 1  
 Acc. to EN 15085-3 the following requirements are valid if not indicated otherwise at the welding symbol or in bill of materials.

	Weld performance class	Inspection class	Surface quality
Fusion welding joint	CP C2	CT 3	-

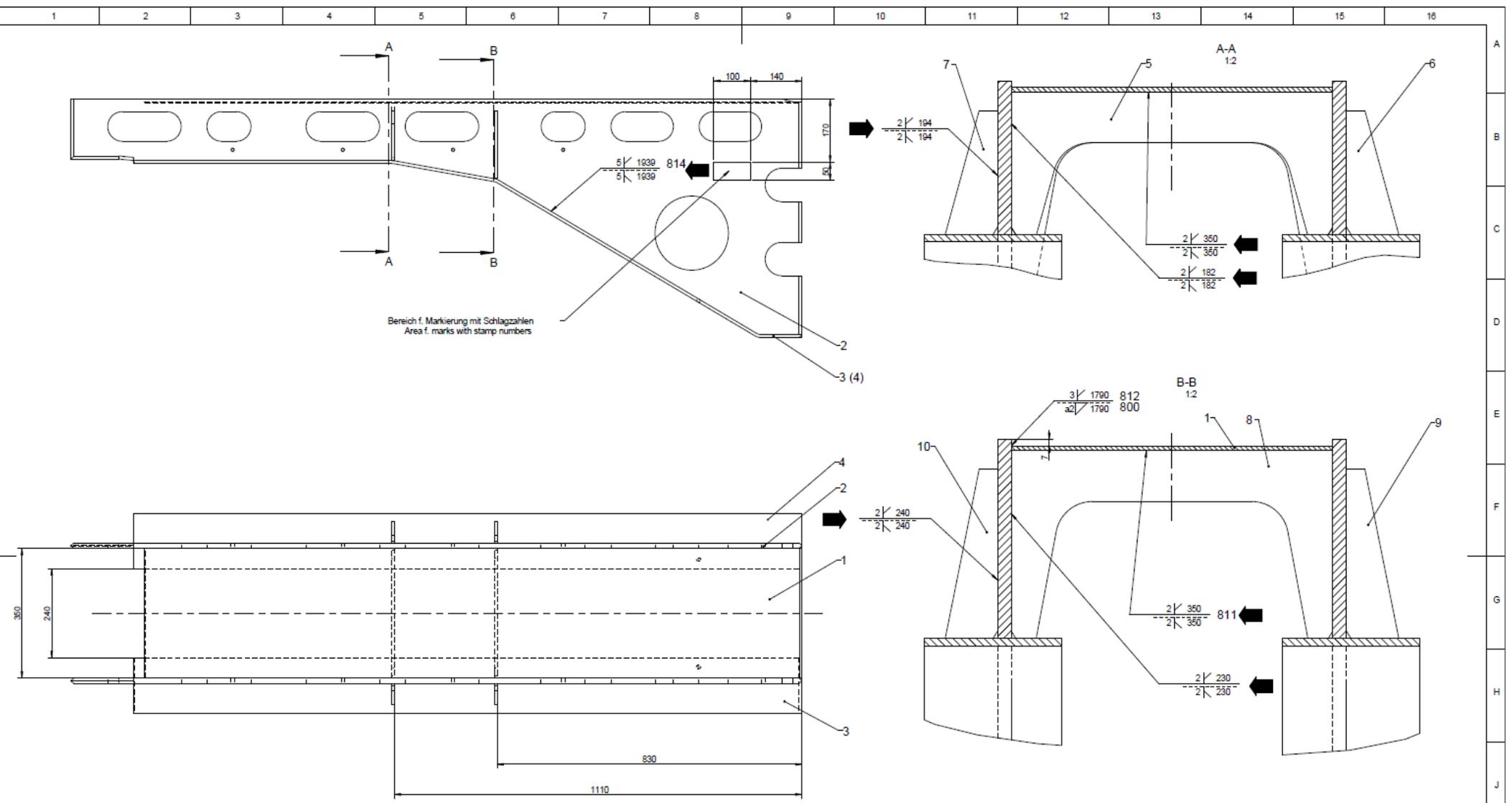
HY- or HV-weldings on a T-joint had to be enhanced with an asymmetric fillet weld. Keep the conditions:  $0,4y \times y$ , but if  $3\text{mm} \leq x \leq 4 \times x$  Exceptions are indicated on the drawing.

Fertigungstoleranzen sind einzuplanen, sodass auch die Toleranzen vom Wagenkasten Zub. eingehalten werden.  
 Fabrication tolerances have to be included to keep tolerances of car body assembly too.

Grossz. des Zeichnungsrahmens nach FSF KZ 400 (Ausgabe 2009)		Material A2V00002270161	
Sperrfläche SAP/PLM Nicht beschriftet!			
Creo Elements/Pro Konstruktions-Rahmen Kein freigegebenes Dokument!		Massstab: 1:10 Vorbau FSTE	
<b>SIEMENS</b>		A6Z99000669405	
		Blatt 01 von 02	

Sperrfläche SAP/PLM  
 Nicht beschriftet!

Sperrfläche SAP/PLM  
Nicht beschriftet!



**Ausführung der Schweissverbindungen nach EN 15085-1 bis 5**  
 Klassifizierung von Bauteil / Schweissgruppe / Schweisstel:  
 Zertifizierungsstufe: CL 1

Gemäss EN 15085-3 gelten folgende Anforderungen, wenn am Schweissymbol und in der Stückliste nichts anderes angegeben ist:

	Schweisnahtgüteklasse	Schweisnahtprüfklasse	Oberflächen-güte
Schweisnahtverbindungen	CP C2	CT 3	-

HY- oder HV-Nahte am T-Stoss sind mit einer aufgesetzten asymmetrischen Keinnäht auszuführen, wobei 0,2y x 0,8y einzuhalten ist, jedoch bei 13mm gilt 2 x 4. Ausnahmen sind gesondert auf der Zeichnung angeführt.

**Welded joints acc. to EN 15085-1 to 5**  
 Classification of components / Welding group / Welding part:  
 Certification level: CL 1

Acc. to EN 15085-3 the following requirements are valid, if not indicated otherwise at the welding symbol or in bill of material.

	Weld performance class	Inspection class	Surface quality
Fusion welding joint	CP C2	CT 3	-

HY- or HV-weldings on a T-joint had to be enhanced with an asymmetric fillet weld. Keep the conditions: 0,2y x 0,8y but if 13mm: 2 x 4. Exceptions are indicated on the drawing.

Fertigungstoleranzen sind einzuplanen, sodass auch die Toleranzen vom Wagenkasten Zub. eingehalten werden.  
 Fabrication tolerances have to be included to keep tolerances of car body assembly too

Sperflaeche SAP/PLM  
 Nicht beschriftet!

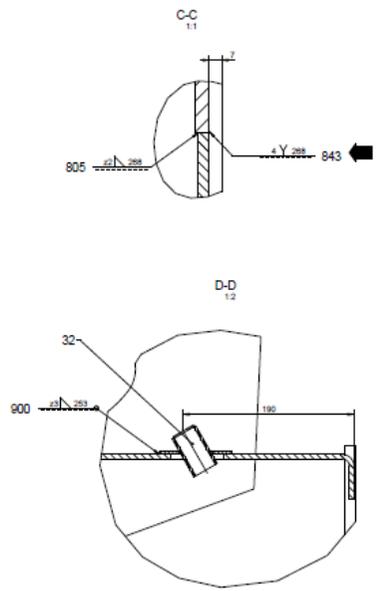
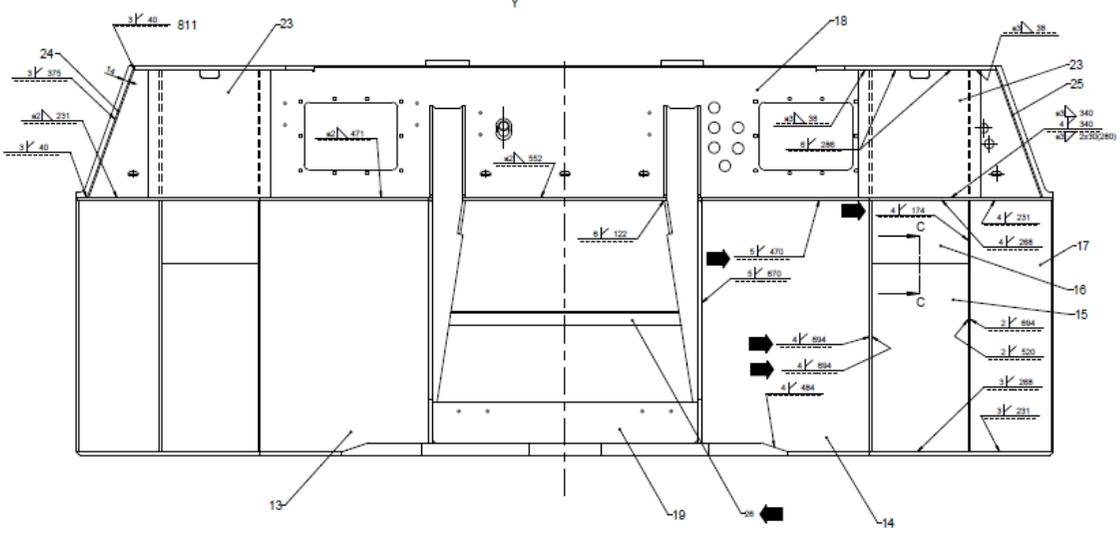
Pro/ENGINEER  
 Konstruktions-Rahmen  
 Kein freigegebenes Dokument!

Messstab 1:5  
 Mittellangträger

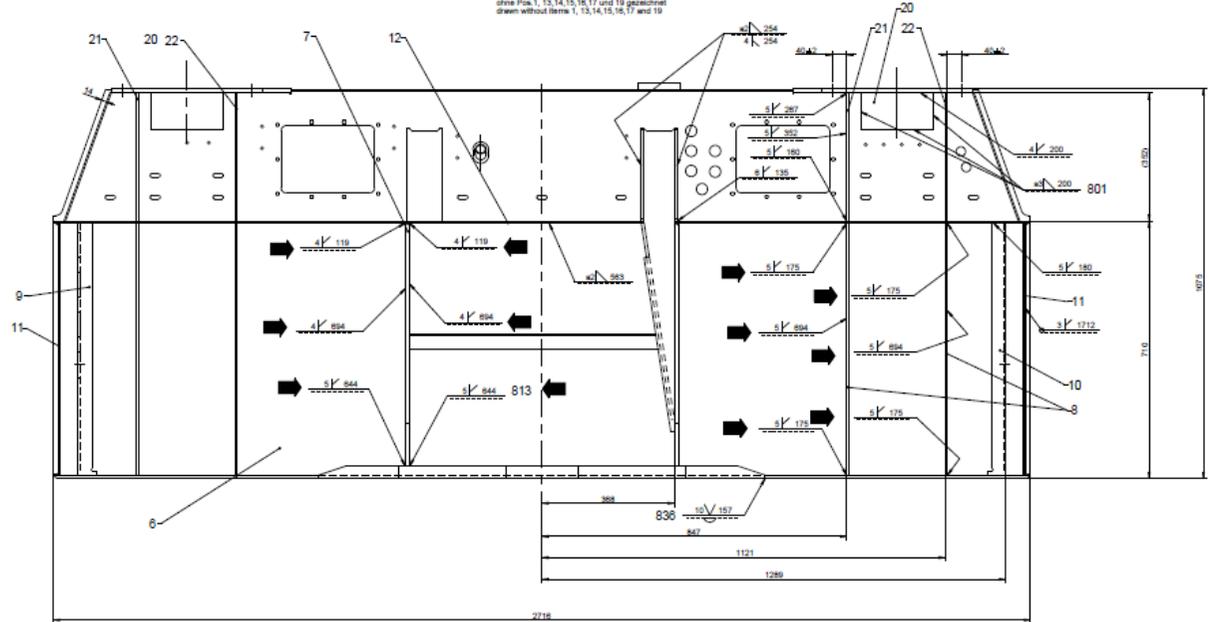
**SIEMENS** A6Z99000669406

Blatt 01  
 01/18

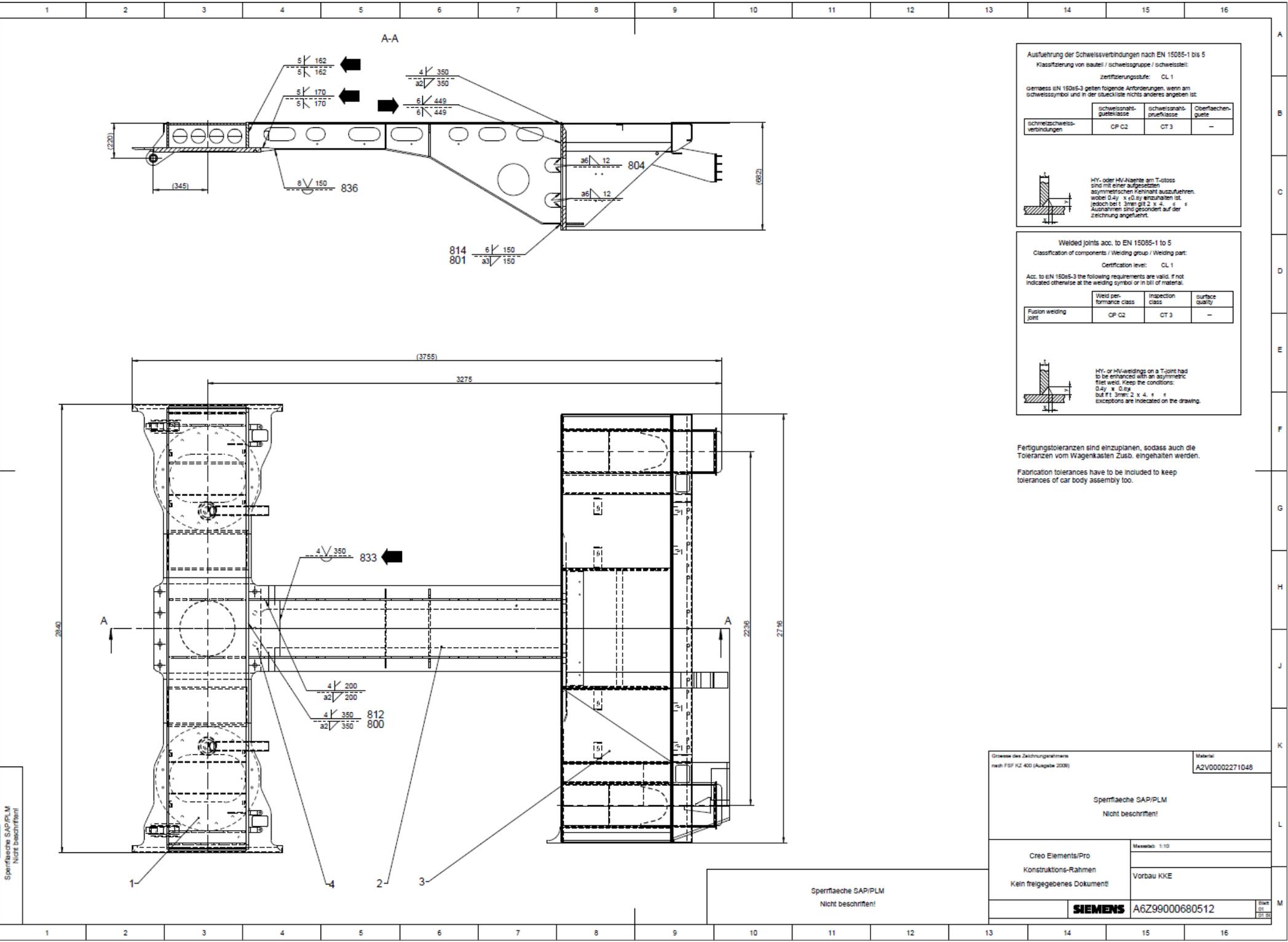




Y  
ohne Pos. 1, 13, 14, 15, 16, 17 und 19 gezeichnet  
drawn without items 1, 13, 14, 15, 16, 17 and 19



Name des Zeichnungsraums nach DIN 12 410 (August 2000)		Nummer AZV0002284303
Sperfläche SAP/PLM Nicht beschriften!		
Creo Element/Pro Konstruktions-Rahmen Kein freigegebenes Dokument!	Version: 1.0 Kopfbereich	SAP 2011
Sperfläche SAP/PLM Nicht beschriften!		A6Z90000660411



Ausführung der Schweißverbindungen nach EN 15085-1 bis 5  
 Klassifizierung von Bauteil / schweißensgruppe / schweißstelle:  
 zertifizierungsstufe: CL 1  
 gemäss EN 15085-3 gelten folgende Anforderungen, wenn am schweißsymbol und in der stückliste nichts anderes angegeben ist:

schweißverbindungen	zertifizierungsstufe: CL 1	
	schweißnahtgüteklasse	schweißnahtprüfklasse
	CP C2	CT 3

HV- oder HV-Nahte am T-Stoss sind mit einer aufgesetzten asymmetrischen Kehlnaht auszuführen, wobei 0,4y x r0,7y einzuhalten ist jedoch bei 1,3mm gilt 2 x 4,4 x 4,4 Ausnahmen sind gesondert auf der zeichnung angeführt.

Welded joints acc. to EN 15085-1 to 5  
 Classification of components / Welding group / Welding part:  
 Certification level: CL 1  
 Acc. to EN 15085-3 the following requirements are valid, if not indicated otherwise at the welding symbol or in bill of material.

Fusion welding joint	zertifizierungsstufe: CL 1	
	Weld performance class	Inspection class
	CP C2	CT 3

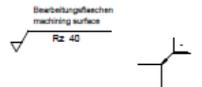
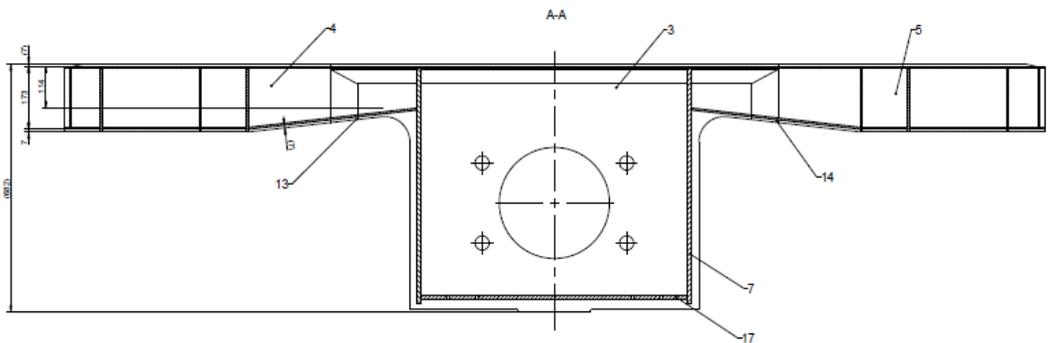
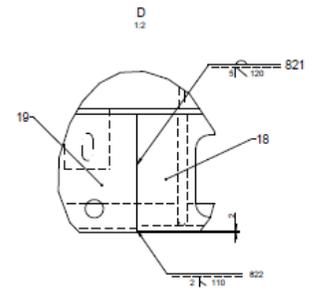
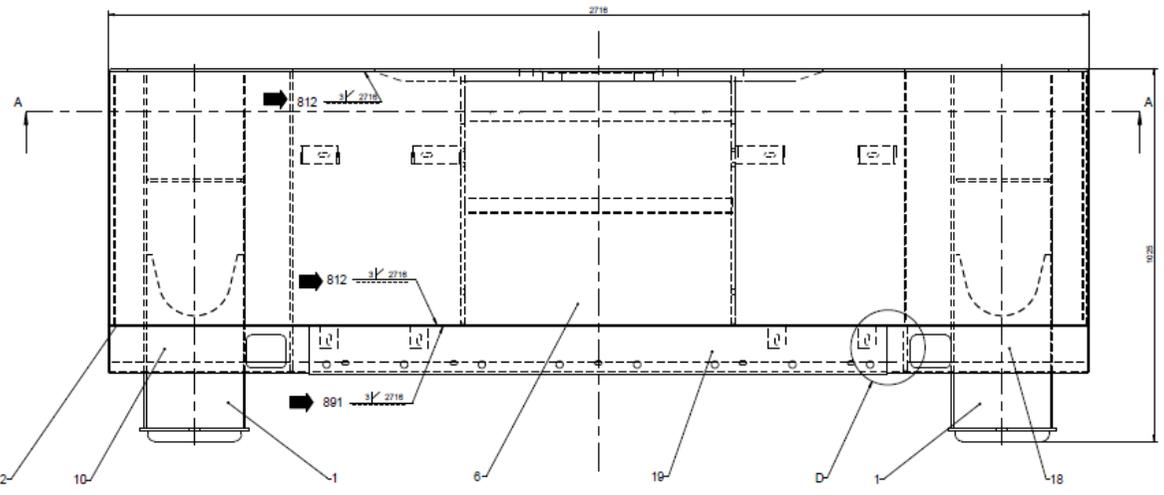
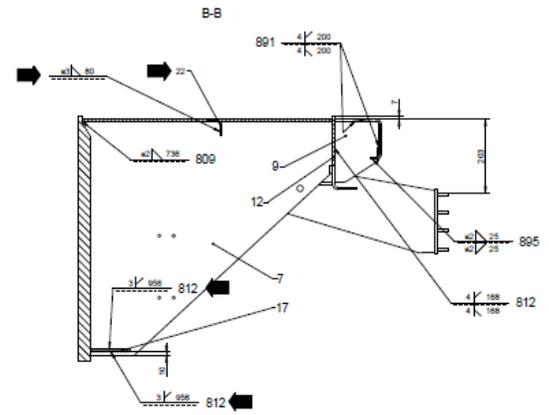
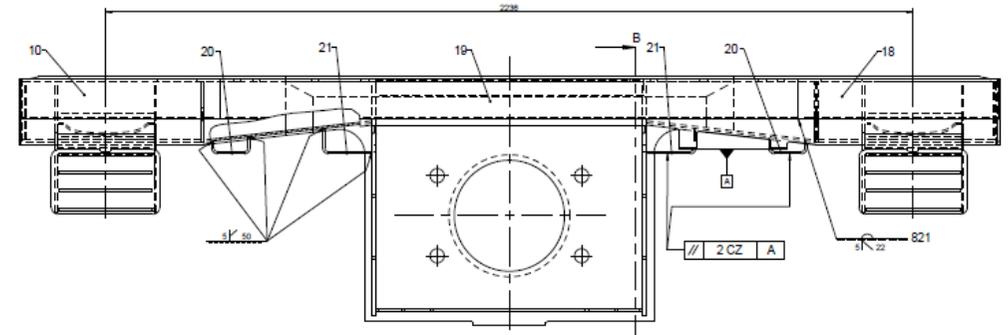
HV- or HV-weldings on a T-joint had to be enhanced with an asymmetric flat weld. Keep the conditions: 0,4y x 0,7y but if 1,3mm: 2 x 4,4 x 4,4 exceptions are indicated on the drawing.

Fertigungstoleranzen sind einzuplanen, sodass auch die Toleranzen vom Wagenkasten Zusb. eingehalten werden.  
 Fabrication tolerances have to be included to keep tolerances of car body assembly too.

Grunde des Zeichnungselementes nach FSP K2 400 (Ausgabe 2008)		Material A2V00002271048	
Sperrfläche SAP/PLM Nicht beschriftet!			
Creo Elements/Pro Konstruktions-Rahmen Kein freigegebenes Dokument		Maßstab: 1:10 Vorbau KKE	
<b>SIEMENS</b>			Blatt 01 01/01
			A6Z99000680512

Sperrfläche SAP/PLM  
Nicht beschriftet!

Sperrfläche SAP/PLM  
Nicht beschriftet!



Werkstückkanten nach ISO 13715  
Edges according ISO 13715

Fertigungstoleranzen sind einzuplanen, sodass auch die Toleranzen vom Wagenkasten Zub. eingehalten werden.  
Fabrication tolerances have to be included to keep tolerances of car body assembly too.

Welded joints acc. to EN 15085-1 to 5  
Classification of components (Welding group / Welding part)

Certification level: CL 1

Acc. to EN 15085-2 the following requirements are valid, if not indicated otherwise at the welding symbol or in list of materials.

Process welding joint	Weld per substrate class	Inspection class	Surface quality
SP 02	CT 3	-	-

HT- oder HTW-Stähle acc. T 1000  
to be achieved with an appropriate  
heat treatment for austenitic  
steel acc. to EN 10088-2  
and EN 10088-3  
Exceptions are indicated on the drawing.

Ausfertigung der Schweißverbindungen nach EN 15085-1 bis 5  
Ausfertigung von Naht / Schweißgruppe / Schweißnaht

Zertifizierungsstufe: CL 1

Genauere EN 15085-2 gelten folgende Anforderungen, wenn ein Schweißverfahren und in der Schweißnaht nichts anderes angegeben ist:

Schweißverfahren / Schweißverbindungen	Schweißnaht / Schweißgruppe	Zertifizierungsstufe	Überprüfungsstufe
SP 02	CT 3	-	-

HT- oder HTW-Stähle acc. T 1000  
sind mit einer geeigneten  
elektrolytischen Oberflächenbehandlung,  
welche EN 10088-2 und EN 10088-3  
entsprechend erfüllt, zu versehen.  
Ausnahmen sind gegenüber der  
Zertifizierung angegeben.

Titel: AZV5000221956

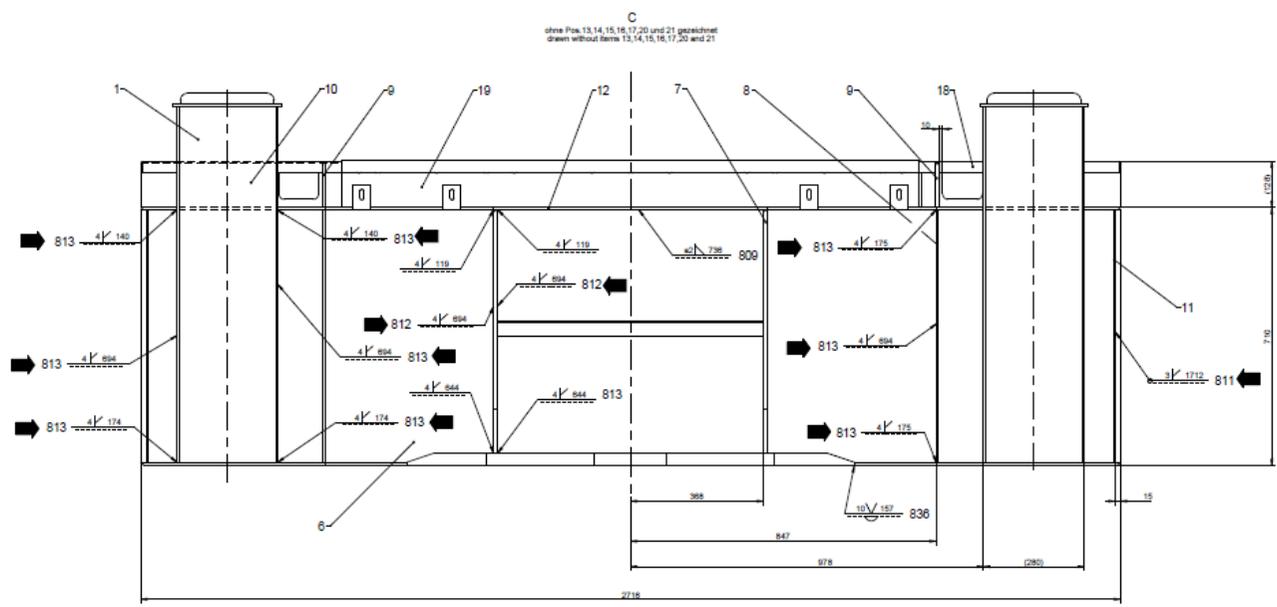
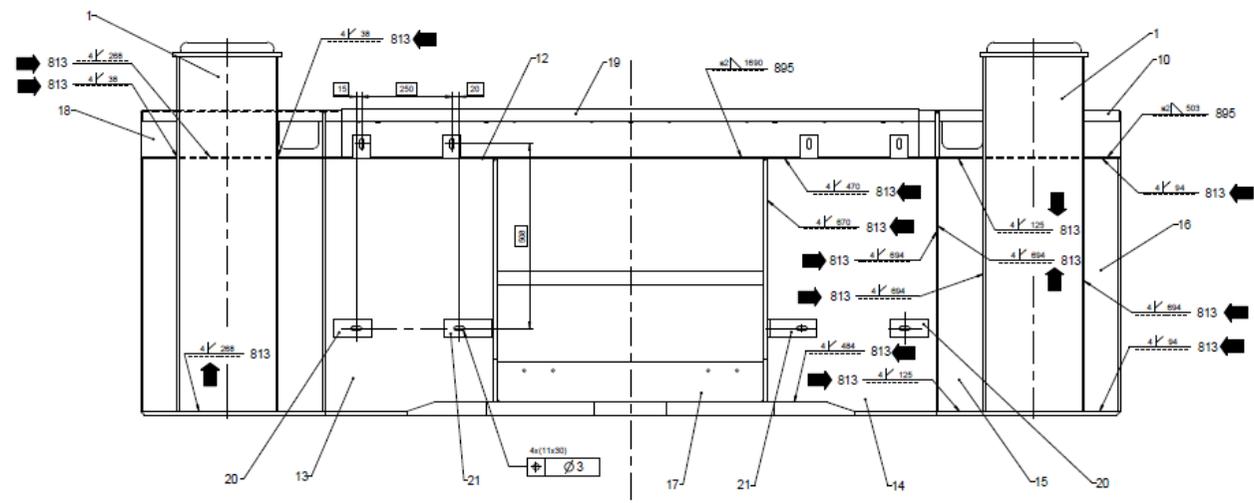
Spezifische SAP/PLM  
Nicht beschriften!

Prof.INGENIEUR  
Konstruktions-Team  
Kein freigegebenes Dokument

Version: 13  
Kopfdruck KKE

AGZ99000681614

Spezifische SAP/PLM  
Nicht beschriften!



Sperrfläche SAPFILM Nicht beschriften!		Version: AZV00002271998
Prof.INGENIEUR Konstruktion-Rahmen Kein freigegebenes Dokument!	Blatt: 13 Kopfbereich KKE	Datum: 1998
Sperrfläche SAPFILM Nicht beschriften!		A6Z9G00081614