

PERTA

Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 363

bast

PERTA

Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

von

Ernst Tomasch
Ulrich Radeschnig
Clemens Dünser
Wolfgang Sinz
Gregor Gstrein

Institut für Fahrzeugsicherheit
TU Graz

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 363

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0555
PERTA - Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

Fachbetreuung
Moritz Grimmelsmann

Referat
Straßenausstattung

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-697-9

Bergisch Gladbach, Juli 2022

Kurzfassung – Abstract

PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

Bei einem Anprall gegen ein ortsfestes Hindernis ist mit tiefen Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum zu rechnen, die zu schwersten Verletzungen führen können. Untersuchungen haben gezeigt, dass Kollisionen mit künstlichen Hindernissen an der Fahrbahnseite, wie Gabelständer, Trimasten, zu 80 % frontal angeprallt werden.

Ziel des Forschungsprojektes war die Bewertung der passiven Sicherheit von Gabelständern und Trimasten, um anhand der Ergebnisse Empfehlungen für die Notwendigkeit einer Absicherung durch Schutzeinrichtungen zu erarbeiten.

Als Methode wurde ein Mix aus Realversuchen und Finiten Elemente Simulationen gewählt. Ausgangspunkt bildeten je zwei Validierungsversuche für den Gabelständer und Trimast. Aufbauend auf diesen Versuchen wurden Simulationsmodelle validiert. Die Simulationsmodelle wurden modifiziert und die Insassensicherheit nach Kriterien der EN 12767 bewertet. Wesentliche Kriterien waren der Index für die Schwere der Beschleunigung (ASI: Acceleration Severity Index) und die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV: Theoretical Head Impact Velocity).

Der wesentliche Faktor zum Erreichen einer passiven Sicherheit wurde im Abreißen der Gurtrohre beim Anprall festgestellt. Ein Abreißen der Gurtrohre führt zum Unterschreiten der Grenzwerte für den ASI und THIV gemäß EN 12767. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang der Gurtrohrdurchmesser und die Ausführung der Fußplatten. Fixierte Fußplatten begünstigen ein Abreißen der Gurtrohre und ein Unterschreiten der Grenzwerte für den ASI und insbesondere für den THIV.

Die Masthöhe, die Spreizung und das Schild selbst haben nur einen geringen Einfluss auf die beiden Kennwerte. Unterschiedliche Diagonalrohranordnungen, Schwächung der Gurtrohre oder Reduktion des Schweißnahtumfangs wirken sich positiv auf das Abreißen der Gurtrohre aus und führen zum Unterschreiten der Grenzwerte des ASI und THIV.

PERTA – Passive safety in road equipment

In the event of a collision against a stationary obstacle, deep intrusions into the vehicle interior can be expected which lead to severe injuries. Investigations of the impact configurations have shown that frontal collisions with stationary obstacles on the side of the road, such as traffic signs, posts or lighting poles, account for approximately 80% of all possible impact configurations.

The aim of the study was to examine the passive safety of traffic signs (“Gabelständer” and “Trimast”). Based on the results recommendations should be developed if these traffic signs need to be shielded by road restraint systems.

As method a mix of real tests and finite element simulations was chosen. Two tests for each traffic sign served as a basis for the validation of the simulation models. Based on the validated simulation models, the traffic signs were modified and in the simulations the passenger safety was evaluated according to the criteria of EN 12767. Essential criteria were the index for the severity of acceleration (ASI: Acceleration Severity Index) and the theoretical impact velocity of the head (THIV: Theoretical Head Impact Velocity).

The main factor in achieving passive safety of traffic signs was found to be the tearing off of the belt tubes at the impact. If the belt tubes tear off, the values for ASI and THIV are below the limits according to EN 12767. Main factors were identified as belt tube diameter and the design of the foot plates. Fixed footplates support the tearing off of the belt tubes and the values for the ASI and especially the THIV are below the limits.

The belt tube height, the distance between the belt tubes and the shield itself only have a minor influence. Different diagonal tube layout, weakening of the belt tubes or reduction of the weld circumference positively influence ASI and THIV.

Summary

PERTA – Passive safety in road equipment

Scope

Collisions with stationary obstacles (e.g. traffic signs, poles, trees etc.) are the most serious accidents and are therefore a focus of traffic safety policy. In the event of a collision against a stationary obstacle, deep intrusions into the passenger compartment can be expected, especially in the case of a side collision. But also in the case of a frontal collision, intrusions into the passenger compartment can occur, which can lead to further serious injuries. Investigations of the impact configurations have shown that frontal collisions with stationary obstacles on the road side, such as traffic signs, posts or lighting poles, account for approximately 80% of all possible impact configurations. However, the severity of injuries varies considerably between the impact objects.

Objective

Within a survey of the BAST the “Gabelständer” and “Trimast” was identified as the most important traffic signs. Thus, the aim of the study is to examine the passive safety of traffic signs (“Gabelständer” and “Trimast”). Based on the results recommendations should be developed if these traffic signs need to be shielded by road restraint systems.

Method

As method a mix of real tests and finite element simulations was chosen. Two tests for each traffic sign (“Gabelständer” and “Trimast”) served as a basis for the validation of the simulation models. Based on the validated simulation models, the traffic signs were modified and in the simulations the passenger safety was evaluated according to the criteria of EN 12767. Essential criteria were the index for the severity of acceleration (ASI – Acceleration Severity Index) and the theoretical impact velocity of the head (THIV – Theoretical Head Impact Velocity). The most favourable modification of each traffic sign in terms of passenger safety was finally assessed in a real test.

Test and simulation matrix

As there are no standardised sign dimensions in use and each traffic sign is made individually for the respective situation, the selection of the appropriate object size was a particular challenge. For the validation tests, the “Gabelständer” type 750 x 76 mm was identified as the most critical impact object from an expert point of view and recommended for

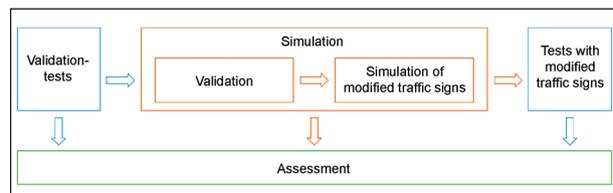


Fig. 1: Method



Fig. 2: Impact configuration “Gabelständer” 750 x 76 mm and “Trimast” 500 x 60 mm prior to the test

the tests. A signboard size of 2,600 x 4,000 mm (W x H) was specified. For the “Trimast” the type 500 x 60 mm with a signboard size of 1,400 x 2,000 mm was specified.

After the simulation was completed, the type 750 x 60 mm was selected for the “Gabelständer” to be finally tested. The signboard size was 3,000 x 3,000 mm. The type 350 x 48 mm with a signboard size of 1,800 x 1,500 mm was chosen for the final test of the “Trimast”.

According to EN 12767, the impact speeds were set at 35 km/h and 100 km/h and the impact angle at 20°. The test matrix is given in Table 1. The impact occurred at the “Gabelständer” on the front belt tube at the vehicle centre (see Figure 3). For the “Trimast” the point of impact was defined centrally between the two posts. For the tests a Suzuki Swift with a mass of approximately 800 kg was used.

Based on the validated simulation models, impact simulation of modified traffic signs were carried out.

No	Object type	Test	Vehicle type	Impact speed	Impact angle	Impact side	Impact locationi
1	GS 750 x 76 board 2,600 x 4,000	Validation	Suzuki Swift	100 km/h	20°	Front	Center
2	GS 750 x 76 board 2,600 x 4,000	Validation	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Center
3	TRI 500 x 60 board 1,400 x 2,000	Validation	Suzuki Swift	100 km/h	20°	Front	Center
4	TRI 500 x 60 board 1,400 x 2,000	Validation	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front <td Center	
5	GS 750 x 60 board 3,000 x 3,000	Modification	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Center
6	TRI 350 x 48 board 1,800 x 1,500	Modification	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Center

Tab. 1: Test matrix

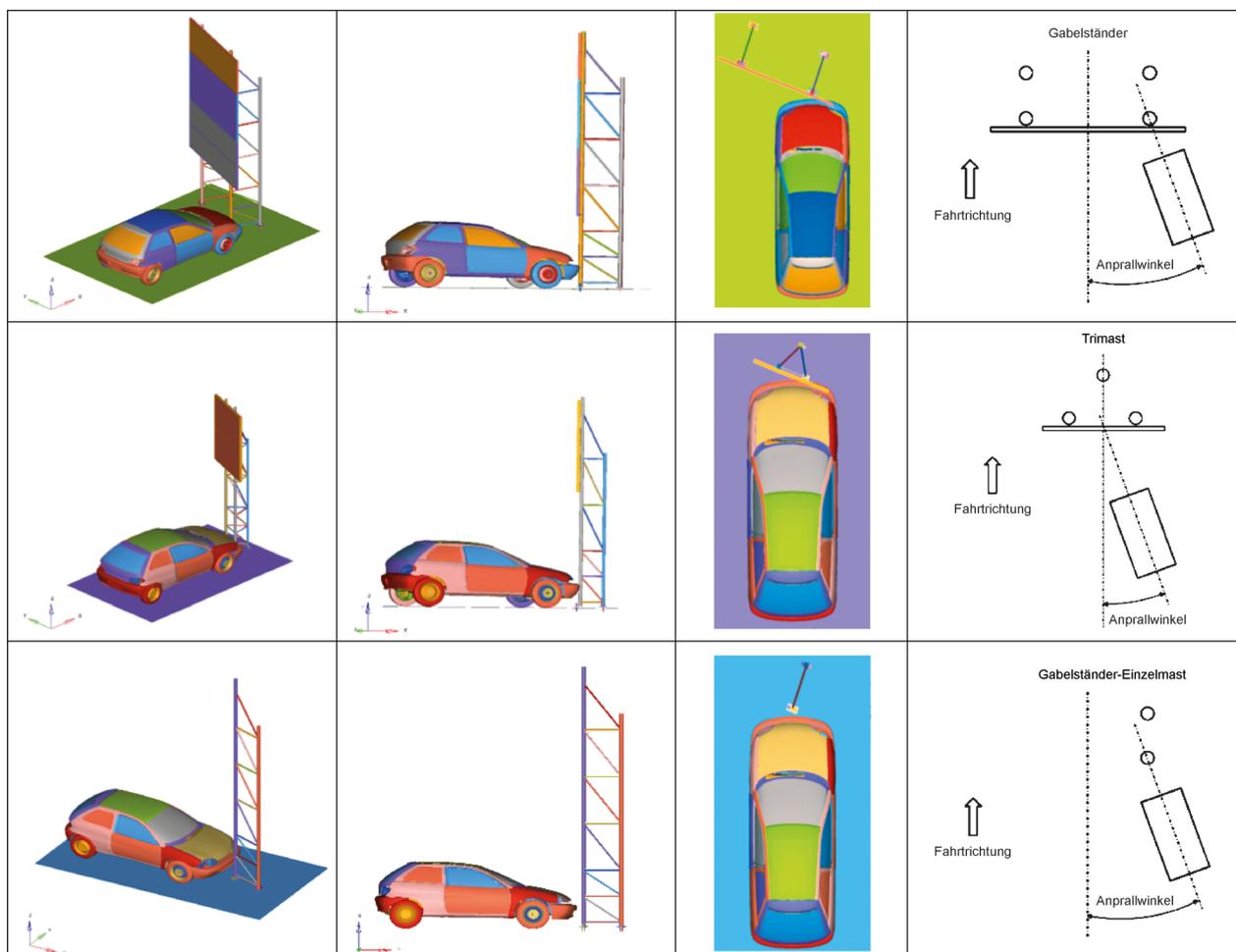


Fig. 3: Impact configuration at the “Gabelständer”, “Trimast” and “Gabelständer”-single pole

The aim of these simulations was to identify the influence of modifications to the “Gabelständer” or “Trimast” on passenger safety, so that the passengers are sufficiently protected at an impact speed of 100 km/h as well as at 35 km/h. The following modifications were investigated:

- Modified diagonal tube pattern
- Weakening of the belt tube
- Reduction of the weld circumference at the connection of the belt tube to the foot plate
- Fixation of the foot plate to the foundation
- “Gabelständer” single pole simulations
 - Spreading dimension of the belt tubes
 - Belt tube diameter
 - Traffic sign height
 - Spreading dimension of the belt tubes and traffic sign with the same belt tube diameter
 - Impact side

In the tests it was found that the belt tube of the “Gabelständer” type 750 x 76 mm and also of the “Trimast” type 500 x 60 mm tear off at the connection to the foot plate at an impact speed of 100 km/h. At an impact speed of 35 km/h this was not the case. Therefore the simulation study was carried out at an impact speed of 35 km/h only.

Assessment of the passenger safety

The assessment of the passenger safety of the tested traffic signs was carried out according to EN 12767:2008-01 – Passive safety of supporting structures. The assessment of occupant safety during an impact in the test as well as in the simulation is based on the index for the severity of acceleration (ASI – Acceleration Severity Index) and the Theoretical Head Impact Velocity (THIV).

Results

The main factor in achieving passive safety of traffic signs was found to be the tear off of the belt tubes at the impact. If the belt tubes tear off, the values for ASI and THIV are below the limits according to EN 12767. Due to the high impact energy at 100 km/h, the belt tubes were torn off at the welded seams of the “Gabelständer” type 750 x 76 mm as well as the

“Trimast” type 500 x 60 mm. Therefore the ASI and THIV were below the limit at this impact speed. At an impact speed of 35 km/h, however, the belt tubes were not torn off and especially the THIV was not below the limits.

For the “Gabelständer” type 750 x 60 mm, both in the simulation and in the test, ASI and THIV were below the limit values according to EN 12767. Protection by a vehicle restraint system would therefore not be necessary. Based on the simulation results for the “Gabelständer” type 500 x 60 mm, protection by a vehicle restraint system would not be necessary either. “Gabelständer” and “Trimast” in the current version with a tube diameter of 76 mm or 60 mm shall be protected by a vehicle restraint system.

In simulations on the “Trimast” type 350 x 48 mm, a tearing off of the belt tubes was determined with a ASI below the limit for the version with fixed front foot plates and movable rear foot plate. The THIV was exceeding the limit. In real tests the ASI was matching exactly the limit. The THIV was significantly below the limit. A protection of a “Trimast” type 350 x 48 mm with fixed front foot plates and with a movable rear foot plate is therefore not necessary. However, if all the foot plates are movable, the results of the simulation show that the “Trimast” type 350 x 48 mm shall be protected by a vehicle restraint system. For a “Trimast” type 500 x 60 mm in the current design, protection by a vehicle restraint system would be required.

No penetration of parts of the “Gabelständer” or “Trimast” into the passenger compartment was detected neither in the tests nor in the simulations.

Main factors were identified as belt tube diameter and the design of the foot plates. Fixed footplates support the tearing off of the belt tubes and the values for the ASI and especially the THIV is below the limits. The belt tube height, the distance between the belt tubes (spreading dimension) and the shield itself only have a minor influence compared to the belt tube diameter. The impact side was identified as a further factor. In an impact simulation on the belt tube of the “Gabelständer” type 750 x 76 mm, on the opposite side of the traffic sign, a significant reduction for the ASI and THIV was determined, so that ASI and THIV were below the limit values of EN 12767.

Inhalt

1	Einleitung	9	3	Ergebnisse	43
1.1	Problemstellung	9	3.1	Anprallversuche	43
1.2	Forschungsziel	9	3.1.1	Gabelständer GS 750 x 76 mm Anprallgeschwindigkeit 100 km/h	43
2	Methode	9	3.1.2	Gabelständer GS 750 x 76 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h	44
2.1	Anprallversuche	9	3.1.3	Gabelständer GS 750 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h	44
2.1.1	Prüffahrzeug	9	3.1.4	Trimast TRI 500 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 100 km/h	45
2.1.2	Datenaufzeichnung	10	3.1.5	Trimast TRI 500 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h	45
2.1.3	Anprallobjekte	11	3.1.6	Trimast TRI 350 x 48 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h	46
2.1.4	Versuchsmatrix	15	3.2	Simulation	46
2.2	Simulation	16	3.2.1	Gabelständer Typ 750 x 76	47
2.2.1	Fahrzeugmodell	16	3.2.2	Prinzipsimulationen an Gabelständer- Einzelmast	59
2.2.2	Anprallobjekte	17	3.2.3	Gabelständer Typ 500 x 60	60
2.2.3	Materialkennwerte	20	3.2.4	Trimast Typ 500 x 60	61
2.3	Bewertung der Insassensicherheit	22	3.2.5	Prinzipsimulationen am Trimast	71
2.3.1	EN 12767 – Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßen- ausstattung	22	4	Schlussfolgerungen	72
2.3.2	EN 1317 – Rückhaltesysteme	23	4.1	Grundsätzliches	72
2.4	Validierung	24	4.2	Gabelständer	73
2.4.1	Bewertung der Qualität der Simulation	24	4.3	Trimast	75
2.4.2	Gabelständer Typ 750 x 76	24	4.4	Zusammenfassung	76
2.4.3	Trimast Typ 500 x 60	27	5	Ausblick	76
2.5	Simulationsmatrix	29	Literatur	78	
2.5.1	Anprallkonfiguration der Simulationen	29	Bilder	79	
2.5.2	Gabelständer Typ 750 x 76	30	Tabellen	83	
2.5.3	Gabelständer Typ 500 x 60	34			
2.5.4	Prinzipsimulationen an Gabelständer-Einzelmast	34			
2.5.5	Trimast Typ 500 x 60	38			
2.5.6	Prinzipsimulationen am Trimast	42			

Die Anhänge A – G sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In Deutschland zählen neben Kollisionen an Bäumen als häufigstes Kollisionsobjekt (BERG and AHLGRIMM, 2010b, 2010a) Kollisionen an ortsfeste Hindernisse (Masten, Pfeiler etc.) zu den schwersten Unfällen überhaupt und stehen daher im Blickpunkt der Verkehrspolitik. Bei einem Anprall gegen ein ortsfestes Hindernis durch Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn ist mit tiefen Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum zu rechnen, insbesondere bei einer Seitenkollision (PINTAR et al., 2007). Aber auch bei einem Frontalanprall kann es zu Intrusionen in den Fahrzeuginnenraum kommen, die zu schwersten Verletzungen führen (EL-MARAKBI et al., 2006).

Untersuchungen durch die BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) haben gezeigt, dass künstliche Hindernisse (Tragkonstruktionen für Verkehrszeichen) an der Fahrbahnseite, wie Gabelständer, Trimasten und VZ-/Lichtmaste, zu 80 % frontal angeprallt werden, wobei sich die frontalen Kollisionen auf verschiedene Frontbereiche aufteilen. Die Verletzungsschwere beim Anprall und die Anprallgeschwindigkeit variieren jedoch zwischen den Objekten. Aufgrund verschiedener Einsatzorte weisen die relevanten Unfalldaten bei den Gabelständern und Trimasten im Durchschnitt eine höhere Anprallgeschwindigkeit auf, da sie auch auf Landstraßen, Bundesstraßen und Autobahnen zum Einsatz kommen. Die Kollisionen mit Lichtmasten wiederum haben zum Großteil im innerstädtischen Bereich stattgefunden, wodurch die durchschnittliche Anprallgeschwindigkeit unter 50 km/h liegt. Sowohl Trimasten als auch Gabelständer führen nach bisherigen Auswertungen im Vergleich zu massiven Licht- bzw. Verkehrszeichenmasten zu deutlich geringeren Verletzungen als ein Anprall an einem vergleichsweise massiven Verkehrszeichenmast. Die Objekte werden in verschiedenen Ausführungen aufgestellt und objektive Daten zur passiven Sicherheit beim Anprall an diese Objekte sind nicht verfügbar.

1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die passive Sicherheit von ausgewählten Objekten (Gabelständer und Trimast und VZ-/Lichtmaste) der Straßenausstattung zu überprüfen, um anhand der Ergebnisse Empfehlungen für die Notwendigkeit einer Absiche-

rung durch Schutzeinrichtungen (Fahrzeug-Rückhaltesystem – FRS) zu erarbeiten.

2 Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein Methodenmix aus Anprallversuchen und Simulationen angewandt (Bild 2-1). Die Anprallversuche erfolgten gemäß EN 12767:2008-01 (Comité Européen De Normalisation, 2008). Durch Vorsimulationen erfolgte eine erste Abschätzung des Verhaltens der Anprallobjekte. Diese Vorsimulationen wurden in weiterer Folge für die Erstellung der Simulationsmodelle für die Validierung verwendet. Mit jeweils zwei Validierungsversuchen für den Gabelständer und Trimast wurden die Simulationsmodelle validiert. Danach wurden durch Modifikationen am Gabelständer und Trimast unterschiedliche Mechanismen bzw. Systemkonfigurationen untersucht. Die für die Insassensicherheit günstigste Variante wurde abschließend in jeweils einem Realversuch für den Gabelständer und Trimast bewertet.

2.1 Anprallversuche

2.1.1 Prüffahrzeug

Gemäß der Anforderungen EN 12767:2008-01 (Comité Européen De Normalisation, 2008) ist für den Versuch ein marktüblicher Personenkraftwagen (Pkw) mit einer Prüfmasse von 825 ± 40 kg und ein (Ballast-)Dummy mit einer Masse von 78 ± 5 kg zu verwenden, sodass die statische Bruttomasse 900 ± 40 kg beträgt.

Für die Versuche wurde ein Suzuki Swift mit einer Masse von etwa 800 kg verwendet. Ein Ballastdummy mit einer Masse von 80 kg wurde im Fahrzeug positioniert. Die statische Bruttomasse beträgt etwa 900 kg.

Der in der EN 12767:2008-01 geforderte Kalibrierungsversuch zum Nachweis der Eignung des Prüffahr-

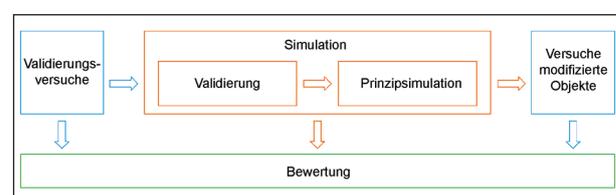


Bild 2-1: Methodik

zeugs wurde an der TU Graz bereits 2011 durchgeführt. In Bild 2-2 ist der dazugehörige Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf dargestellt. Die rote und blaue Linie kennzeichnen den Korridor, in welchem sich der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf beim Anprall befinden muss. Die beiden Kurven (rot: strichliert, blau: durchgezogen) sind die integrierten Verläufe von den im Fahrzeug befindlichen Beschleunigungssensoren.

Da in der EN 12767:2008-01 keine konkrete Regelung vorliegt, welche Positionierung des Insassen vorzunehmen ist, wird der Ballastdummy nach dem in der Arbeitsanweisung AA 005 festgelegten Verfahren der TU Graz im Fahrzeug positioniert. Dadurch wird sichergestellt, dass sich der Dummy bei jedem Versuch beim Anprall in annähernd gleicher Position befindet. Folgende Anforderungen an die Dummypositionierung sind festgelegt:

- aufrechter Oberkörper
- Nacken senkrecht $\pm 5^\circ$

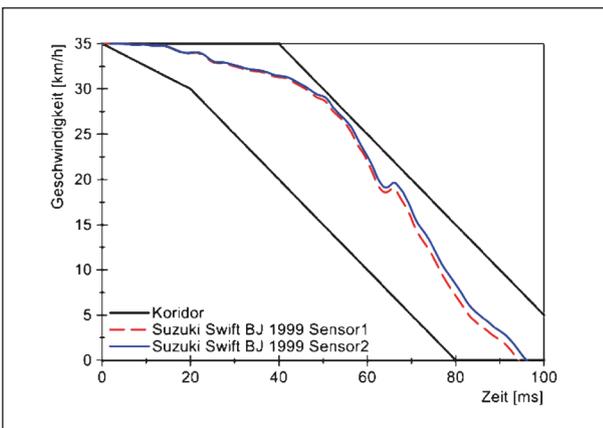


Bild 2-2: Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf beim Kalibriertest

- Arme müssen Lenkrad erreichen
- Füße müssen Pedale erreichen
- Dummy muss angeschnallt sein

2.1.2 Datenaufzeichnung

Filmtechnik

Die Filmaufnahmen mit Hochgeschwindigkeits-Filmkameras erfolgen nach den Vorgaben der EN 12767:2008-01. Die Hochgeschwindigkeits-Kameras sind so positioniert, dass eine vollständige Dokumentation des Weges des Versuchsfahrzeugs und des Verhaltens des Prüfgegenstands, einschließlich Verformung und Verschiebungen, gegeben ist. Es wurden zwei Hochgeschwindigkeits-Kameras senkrecht zur Versuchsfahrbahn aufgestellt und eine Hochgeschwindigkeit-Kamera seitlich zum Prüfgegenstand. Für die Versuche wurde von HS Vision die SpeedCam MacroVis EoSens verwendet. Aufgezeichnet wurden die Videos mit einer Bildrate von 500 Bildern pro Sekunde. Eine weitere schwenkbare Kamera zeichnete mit normaler Geschwindigkeit den Fahrzeugweg auf.

Messtechnik

Zur Messung der Beschleunigungen wird ein Triax-Beschleunigungssensor mit einem Messbereich bis 100 g im Schwerpunkt des Fahrzeugs bzw. in den definierten Toleranzgrenzen angebracht (Bild 2-3, linkes Bild). Aus Gründen der Redundanz wird ein weiterer Triax-Beschleunigungssensor mit einem Messbereich bis 100 g montiert. In der Regel sind beim Anprall Beschleunigungen von unter 100 g zu

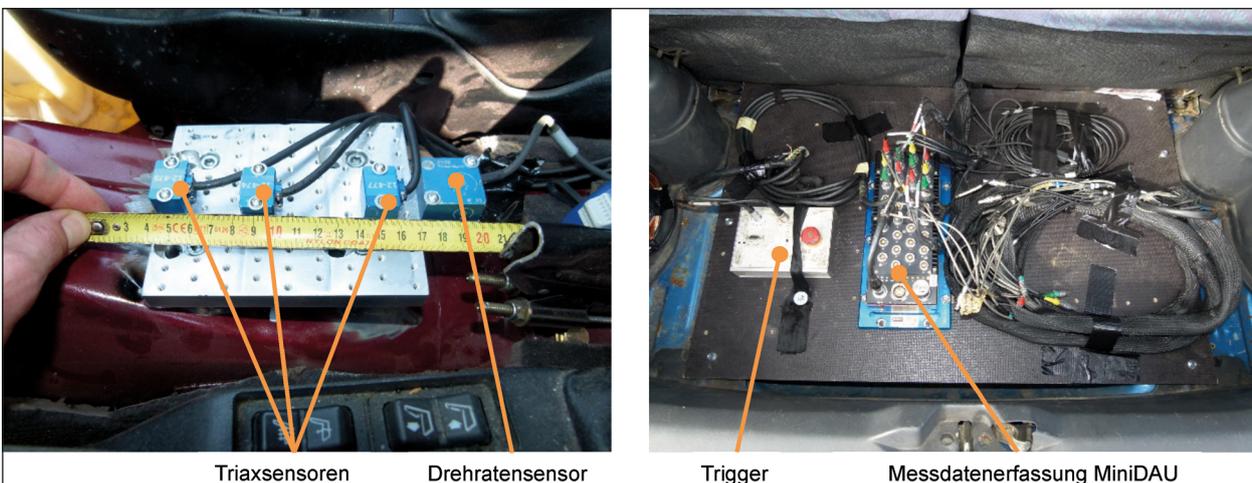


Bild 2-3: Einbau Beschleunigungssensoren und Messtechnik

erwarten. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Beschleunigungen 100 g überschreiten. Daher wird zusätzlich ein Triax-Beschleunigungssensor mit einem Messbereich von 500 g verwendet. Zur Analyse von Rotationsbeschleunigungen wird ein Drehratensensor angebracht. Die Sensoren befinden sich auf einer Metallplatte, welche im Bereich des Schwerpunkts am Mitteltunnel befestigt ist. Für die Messdatenaufzeichnung wird eine MiniDAU (Mini Data Acquisition Unit) verwendet (Bild 2-3, rechtes Bild).

Fotodokumentation

Vor dem Versuch werden Fotos vom Inneren und Äußeren des Versuchsfahrzeugs aufgenommen. Ebenso wird die Position der Beschleunigungssensoren und der Messdatenaufzeichnung dokumentiert. Nach dem Versuch werden Fotos von der Endlage des Fahrzeugs angefertigt. Es werden Fotos vom Inneren und Äußeren des Fahrzeugs als auch Detailbilder von Schäden am Fahrzeug angefertigt. Der Prüfgegenstand wird ebenfalls fotografiert. Des Weiteren werden die Lage und Maße von unter Umständen vorhandenen Bruchstücken dokumentiert.

2.1.3 Anprallobjekte

Zu den aus der Untersuchung durch die BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) identifizierten Hindernissen Gabelständer, Trimasten und VZ-/Lichtmaste kam in Diskussionen mit dem Betreuerkreis noch der Quattromast als viertes potenziell gefährliches Hindernis hinzu. In einer von der BASt durchgeführten Umfrage wurde der Quattromast dem VZ-/Lichtmasten vorgezogen. Nach den ersten Versuchsergebnissen am Trimast würde jedoch auch der Quattromast die in Kapitel 2.3 festgelegten Anforderungen nicht erfüllen können. Es wurde daher beschlossen, nur die Gabelständer und Trimasten in Realversuchen zu testen.

Da keine Gabelständer und Trimasten mit standardisierten Schildmaßen im Einsatz sind und jedes Verkehrsschild individuell für die jeweilige Situation angefertigt wird, stellte die Auswahl der Anprallobjekte eine besondere Herausforderung dar.

Der Dimensionstyp vom Gabelständer (Bild 2-4, links) wird über das Spreizmaß und den Gurtrohrdurchmesser definiert. Als Spreizmaß ist der Abstand zwischen den beiden, in Fahrtrichtung hintereinander angeordneten Gurtrohren zu verstehen. Trimasten werden ebenfalls über ihr Spreizmaß und Gurtrohrdurchmesser eingeteilt (Bild 2-4, rechts).

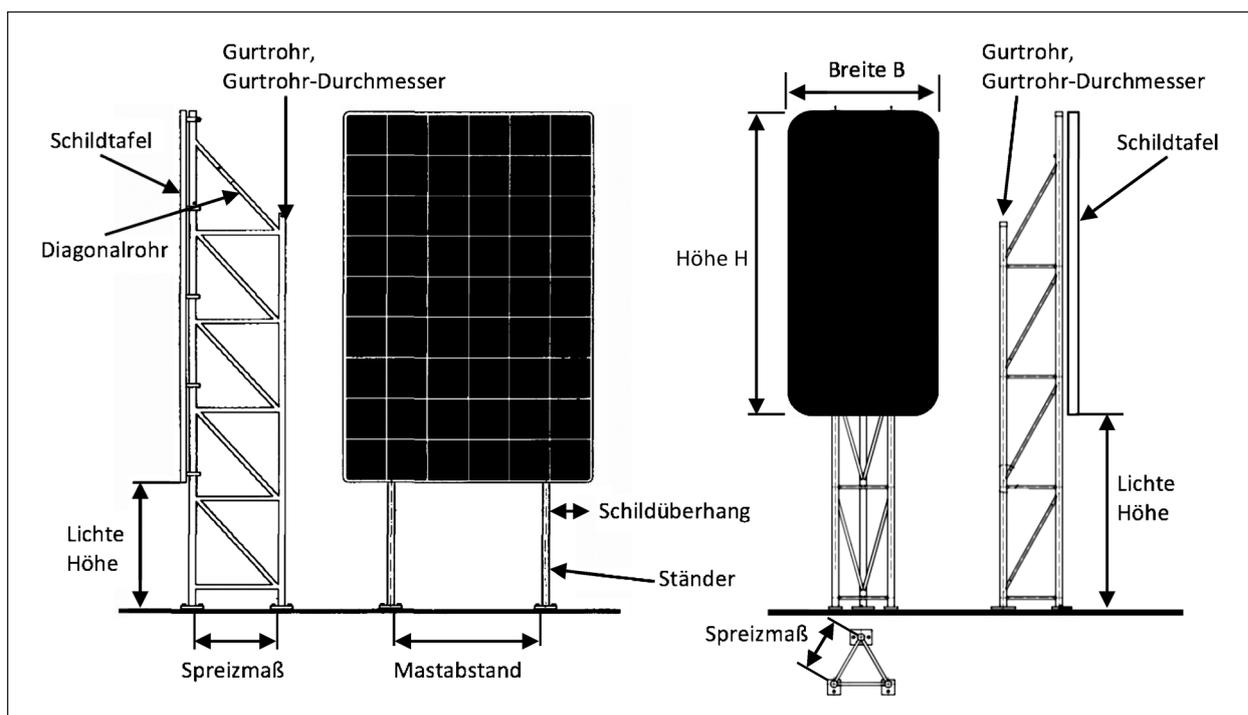


Bild 2-4: Prinzipskizze Gabelständer (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2000) und Trimast (adaptiert nach Forster GmbH)

Das Verhältnis von Mastabstand zu Schildüberhang beträgt erfahrungsgemäß etwa 3,2 (RAL – Güteschutzgemeinschaft Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen e. V., 2007). Dieser Wert ergäbe eine optimale Widerstandsfähigkeit bei hohen Windlasten.

2.1.3.1 Gabelständer

Eine Erhebung bei Herstellern und bei dem für das Projekt von der BAST eingerichteten Betreuerkreis ergab, dass die in Deutschland am häufigsten verwendeten Bauformen für Gabelständer 1) ein Spreizmaß von 350 mm bei einem Gurtrohrdurchmesser von 48 mm (Typ 350 x 48 mm) und 2) ein Spreizmaß von 500 mm bei einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm (Typ 500 x 60 mm) und 3) ein Spreizmaß von 750 mm bei einem Gurtrohrdurchmesser von 76 mm (Typ 750 x 76 mm) aufweisen. Diese Maße nehmen Bezug auf das ARS 21/2000. Auskünfte der Firma Forster ergaben, dass der Typ 350 x 48 mm vorwiegend auf Bundesstraßen eingesetzt wird, während Gabelständer des Typs 500 x 60 mm sowie des Typs 750 x 76 mm auch auf Autobahnen Anwendung finden, beispielsweise als Anzeigetafeln für Rastplätze, Tankstellen und ähnliches.

Der Gabelständer des Typs 750 x 76 mm (Bild 2-5) wurde aus Expertensicht als das kritischste Anprallobjekt eingestuft und für die Versuche empfohlen, da nach Expertenschätzung eine geringere Dimensionierung (Typ 500 x 60 mm und Typ 350 x 48 mm) umfahrbar sei und damit ein geringeres Verletzungsrisiko aufweist. Wenn sich herausstellt,

dass der Gabelständer des Typs 750 x 76 mm passiv sicher ist, so wird angenommen, dass auch Gabelständer mit geringerer Dimensionierung passiv sicher sind. Der Betreuerkreis empfahl einen Mastabstand von weniger als 1.800 mm. Im ARS 21/2000 sind allerdings Mastabstände für Gabelmasten von größer als 1.800 mm vorgeschrieben. Begründet wird der vorgeschlagene Mastabstand damit, dass bei Abkommen eines Pkw in der Regel nur ein Ständer angeprallt werden kann. Nach Expertenmeinung fehlen aussagekräftige Untersuchungen für Gabelmasten, deren Mastabstand geringer sei. Der Mastabstand für die Versuche wurde mit 1.600 mm festgelegt und die Schildtafelbreite an den Mastabstand angepasst. Die Schildtafelbreite wurde auf 2.600 mm (Mastabstand und Schildüberstand) festgesetzt. Die Schildtafelhöhe wurde für eine Gurtrohrbemessung von 750 x 76 mm mit 4.000 mm festgelegt. Das Schild wurde mit ALFORM-Klemmschellen mit 40 mm Klemmbreite an den Gurtrohren befestigt (Bild 2-7). Die lichte Höhe wurde aus den Empfehlungen des ARS 21/2000 übernommen und beträgt entsprechend 1.500 mm.

Für den weiteren zu überprüfenden Gabelständer wurde, nach Vorliegen der Simulationsergebnisse, der Typ 750 x 60 gewählt (Bild 2-6) und ein Mastabstand von 1.800 mm durch den Betreuerkreis festgelegt. Die Schildgröße betrug für diesen Gabelständertyp (750 x 60 mm) 3.000 x 3.000 mm.

Als Werkstoff wird für alle Ständertypen die Stahlsorte mit mindestens der Qualität S235JR nach ARS 21/2000 verwendet.

Bezeichnung	Typ 750 x 76	Typ 750 x 60
Spreizmaß	750 mm	750 mm
Gurtrohrdurchmesser	76 mm	60 mm
	Wandstärke von 2,9 mm	Wandstärke von 2,9 mm
Diagonalrohrdurchmesser	33,7 mm	33,7 mm
	Wandstärke von 2,9 mm	Wandstärke von 2,9 mm
Ständerhöhe	5.550 mm	4.550 mm
Lichte Höhe	1.500 mm	1.500 mm
Ständerabstand	1.600 mm	1.800 mm
Schildtafelgröße	2.600 x 4.000 mm (B x H)	3.000 x 3.000 mm (B x H)
Schildtafelbefestigungen	ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite	
Fundamentgröße	850 x 600 x 2.750 mm (H x B x L)	
Fundamentbefestigung	vier Ankerstäben M20 x 500 (Festigkeitsklasse 4.6)	

Tab. 2-1: Kenngrößen Gabelständer

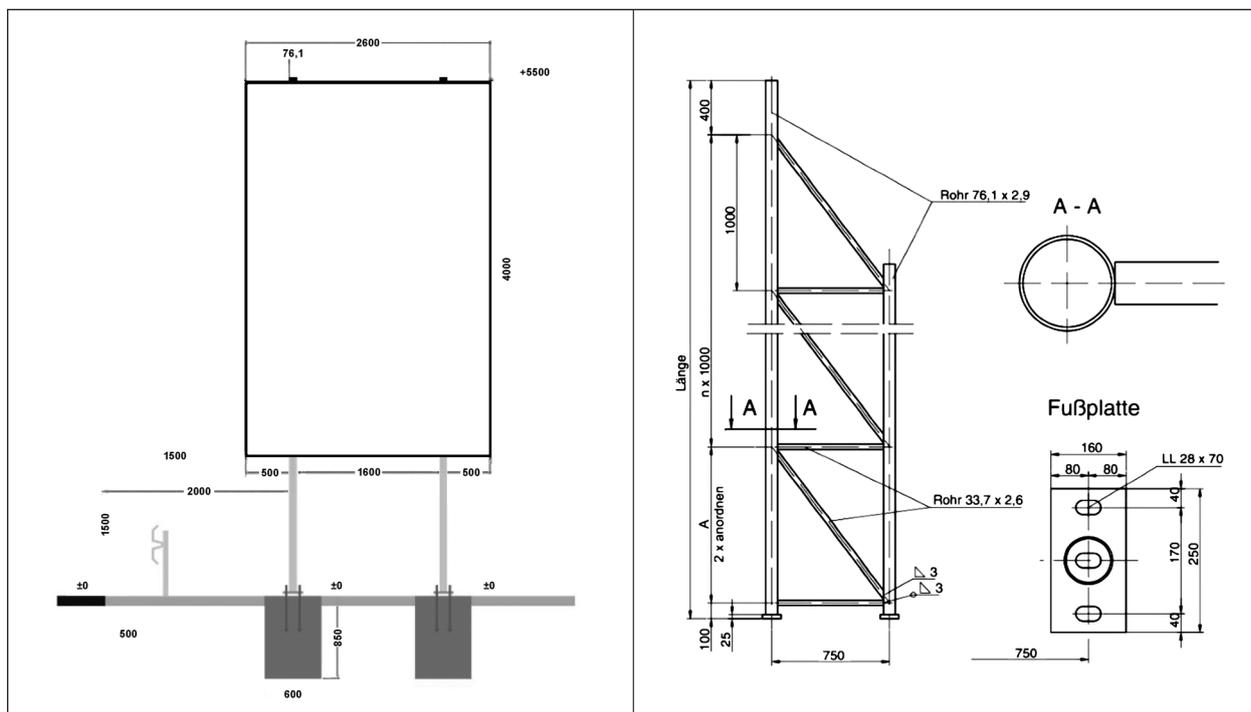


Bild 2-5: Konstruktionsskizzen Gabelständer Typ 750 x 76 mit Schildabmessungen 2.600 x 4.000

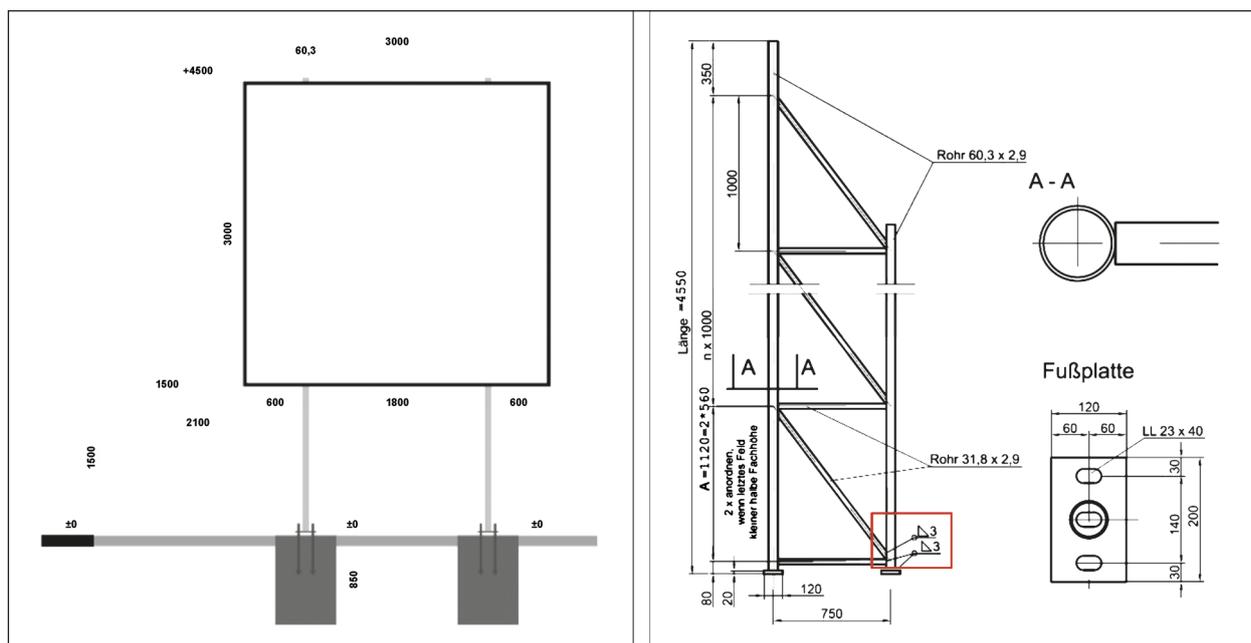


Bild 2-6: Konstruktionsskizzen Gabelständer Typ 750 x 60 mit Schildabmessungen 3.000 x 3.000

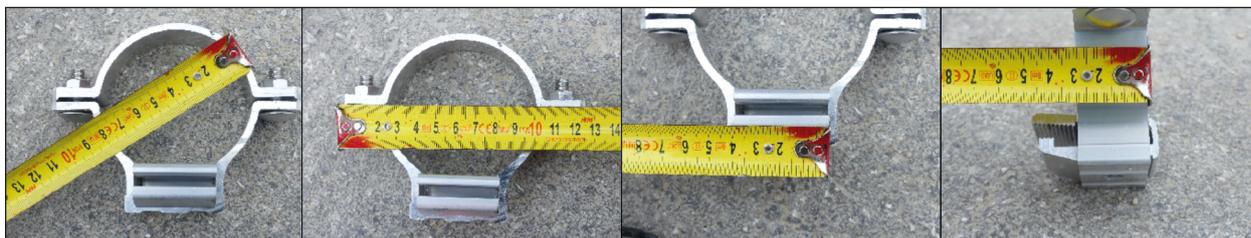


Bild 2-7: ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite

2.1.3.2 Trimast

Für den Trimast sind nach Einschätzung des Betreuerkreises die in Deutschland gängigsten Dimensionen 350 x 48 mm, 350 x 60 mm und 500 x 60 mm. Die Schildtafelgröße variiert lt. Betreuerkreis im Bereich von 1.000 x 1.000 bis 1.500 x 2.700 mm (B x H), wobei für den Typ 350 x 48 mm eine Schildtafelgröße von 1.262 x 2.012 mm und für den Typ 500 x 60 eine Schildtafelgröße von 1.400 x 2.200 mm häufig sind. Das Schild auf Trimasten ist häufiger im Hochformat als im Querformat montiert.

Aus Sicht des Betreuerkreises war der Typ 500 x 60 mm am kritischsten (Bild 2-9). Es wurde eine durchgängige Schildtafel mit den Maßen 1.400 x 2.000

mm festgelegt. Die lichte Höhe wurde mit 2.500 mm für Trimasten festgelegt. Die Befestigung am Fundament erfolgte mit vier Ankerschrauben. Als zweiter Trimast wurde der Typ 350 x 48 mit einer Schildtafel mit den Maßen 1.800 x 1.500 mm und einer lichten Höhe von 2.000 mm festgelegt (Bild 2-8). Die Befestigung am Fundament erfolgte für diese Ausführung mit sechs Ankerschrauben.

Die Befestigung des Schildes an den Gurtrohren erfolgte für beide getesteten Trimaste mit einer ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite nach Bild 2-7.

Die Kenngrößen der beiden Trimaste sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Bezeichnung	Typ 500 x 60	Typ 350 x 48
Spreizmaß	500 mm	350 mm
Gurtrohrdurchmesser	60 mm	48 mm
	Wandstärke von 2,9 mm	Wandstärke von 2,9 mm
Diagonalrohrdurchmesser	26,9 mm	26,9 mm
	Wandstärke von 2,6 mm	Wandstärke von 2,6 mm
Ständerhöhe	4.550 mm	3.850 mm
Lichte Höhe	2.500 mm	2.000 mm
Schildtafelgröße	1.400 x 2.000 mm (B x H)	1.800 x 1.500 mm (B x H)
Schildtafelbefestigungen	ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite	
Fundamentgröße	850 x 600 x 2.750 mm (H x B x L)	
Fundamentbefestigung	vier Ankerstäben M20 x 500 (Festigkeitsklasse 4.6)	sechs Ankerstäben M20 x 500 (Festigkeitsklasse 4.6)

Tab. 2-2: Kenngrößen Trimast

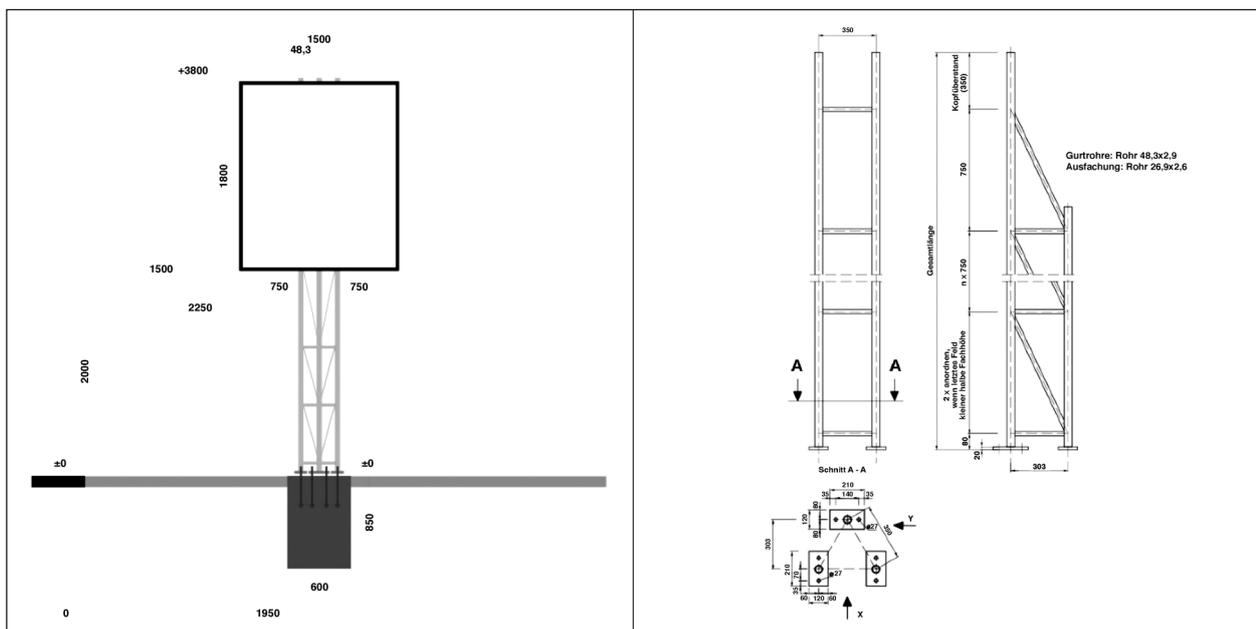


Bild 2-8: Trimast TRI 350 x 48 mit Schildabmessungen 1.500 x 1.800

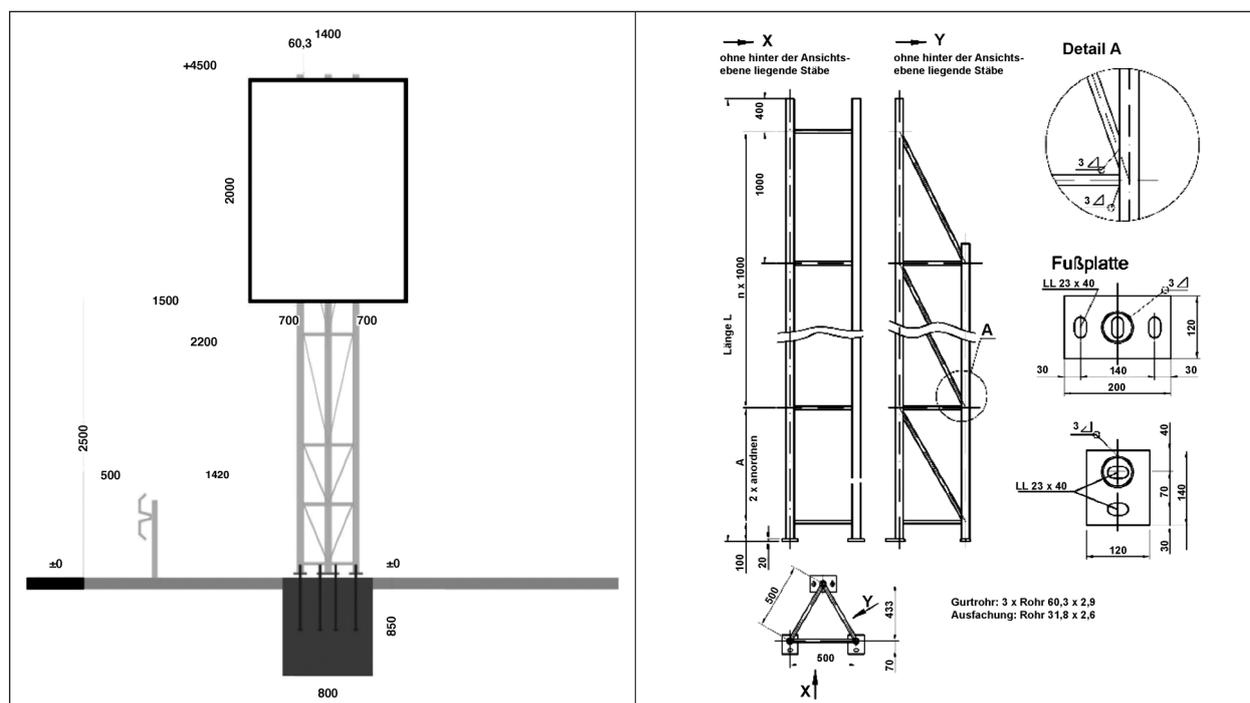


Bild 2-9: Trimast TRI 500 x 60 mit Schildabmessungen 1.400 x 2.000

2.1.4 Versuchsmatrix

Anprallgeschwindigkeit

Im Rahmen einer Voruntersuchung der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) wurden die Anprallgeschwindigkeiten und die Verletzungsschwere beim Anprall eines Fahrzeugs an Objekte aus der GIDAS (German In-Depth Accident Study) ausgewertet. Die Auswertung liefert in erster Linie Daten zu den Anprallgeschwindigkeiten, Anprallpositionen und den Verletzungsgraden der in den Unfällen involvierten Verkehrsteilnehmer. Die Verletzungsschwere wurde nach dem MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) klassifiziert.

Es konnten in dieser Studie 14 Unfälle an Gabelständern ausgewertet werden. Die Kollisionsgeschwindigkeit lag zum Großteil (11 der 14 Unfälle) im Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 und 79 km/h. Bis auf je einen Unfall der Kategorie MAIS 2 und MAIS 9, die sich beide im Geschwindigkeitsbereich 20 – 39 km/h ereigneten, war die Verletzungsschwere aller Unfälle mit Gabelständern in der Kategorie MAIS 1.

Bei Unfällen mit Trimasten konnten lediglich zwei Ereignisse festgestellt werden, welche sich beide mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 km/h ereigneten und die Verletzungsschwere MAIS 1 und MAIS 2 betrug.

Mit 194 Ereignissen aus dem Zeitraum zwischen 2000 bis 2015 stellten Lichtmaste und Verkehrszeichen-Masten allerdings die größte Datenmenge dar. Diese werden als Anprall gegen Einzelmast zusammengefasst. Der Großteil der Unfälle war im Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 km/h und 59 km/h (78 %) festzustellen. Die Verletzungsschwere lag zwischen MAIS 0 und MAIS 4. Bei einem geringen Anteil von ca. 2 % lag die Anprallgeschwindigkeit über 100 km/h. Tendenziell nimmt die Verletzungsschwere mit zunehmender Anprallgeschwindigkeit zu. Da Lichtmaste und Verkehrszeichen-Mast jedoch größtenteils innerorts aufgestellt werden und die Anprallgeschwindigkeit daher niedriger ist als außerorts, wurden diese nicht in der gegenständlichen Untersuchung berücksichtigt.

Basierend auf der GIDAS Auswertung und Überlegungen gemeinsam mit dem Betreuerkreis wurden die Anprallgeschwindigkeiten gemäß EN 12767 mit 35 km/h und 100 km/h festgelegt. Die tatsächliche Anprallgeschwindigkeit im Versuch muss sich in den Grenzen von 35 ± 3 km/h und 100 ± 5 km/h befinden.

Anprallwinkel

Aus der Voruntersuchung der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) gingen keine Anprallwinkel hervor. Es wurde daher der Anprallwinkel ge-

mäß EN 12767 mit 20° festgelegt. Der tatsächliche Anprallwinkel muss sich beim Versuch in der Grenze von $20 \pm 2^\circ$ befinden.

Anprallpunkt am Versuchsfahrzeug

In der Voruntersuchung der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) zum gegenständlichen Thema wurde festgestellt, dass der Großteil der Kollisionen an der Fahrzeugfront stattfindet. Bei Gabelständern sind das etwa 86 %, bei Trimasten wurden nur Frontkollisionen festgestellt, jedoch standen hierbei lediglich zwei Unfälle zur Verfügung. Ebenso war dies für Lichtmast und Verkehrszeichen-Mast der Fall (ca. 80 %).

In Abstimmung mit dem Betreuerkreis wurde daher für die Versuche eine mittige Anprallposition gemäß EN 12767 festgelegt. Nach EN 12767 ist bei einer projizierten Weite zwischen den Pfosten der Tragkonstruktion von mehr als 1,5 m der Anprallpunkt des Fahrzeugs mittig auf dem Pfosten zu wählen (Bild 2-10). Bei einer projizierten Weite zwischen den Pfosten von weniger als 1,5 m ist der Anprall gegen zwei Pfosten durchzuführen, wobei sich der Anprallpunkt des Versuchsfahrzeugs mittig zwischen den beiden Pfosten befindet. Beim Gabel-

ständer Typ 750 x 76 mm und Typ 750 x 60 mm wird immer nur ein Pfosten angefahren (Bild 2-10, links) und beim Trimast erfolgt der Anprall mittig zwischen den vorderen Gurtrohren (Bild 2-10, rechts).

In Tabelle 2-3 ist die Versuchsmatrix zusammengefasst. Insgesamt wurden sechs Realversuche durchgeführt: für den Gabelständer 750 x 76 mm sowie den Trimast 500 x 60 mm jeweils ein Anprallversuch bei 100 km/h und 35 km/h, für den Gabelständer 750 x 60 mm und Trimast 350 x 48 mm jeweils ein Anprallversuch bei 35 km/h. Die Versuche 1 bis 4 dienen als Grundlagen für die Validierung der Finiten Elemente Simulation. Die Versuche 5 und 6 erfolgten aufgrund der Erkenntnisse der Prinzipuntersuchungen aus den Finiten Elemente Simulationen und wurden in der Tabelle als Modifikation bezeichnet.

2.2 Simulation

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der Anprallobjekte und des verwendeten Fahrzeugs in der Finiten Elemente Simulation. Die Anprallobjekte wurden mit dem Programm HyperWorks CAE Software (HW, Version 2017.1) von Altair Engineering erstellt und die Simulation mittels des Solver LS-Dyna (Version: smp s R9.0.1) von Livermore Software Technology Corporation (LSTC) durchgeführt.

2.2.1 Fahrzeugmodell

Das verwendete Fahrzeugmodell (Suzuki Geo Metro, ver. GM R3, Bild 2-11) stammt von der NCAC (National Crash Analysis Center) und ist ein validiertes, öffentlich und frei zugängliches Modell (NCAC, 2008, 2013). Dieses Modell wird derzeit als Stand der Technik verwendet und wurde bereits in vielen Studien eingesetzt (z. B. TAHAN et al., 2005; BOROVKOV et al., 2006; KRAMER et al.; BRUSKI

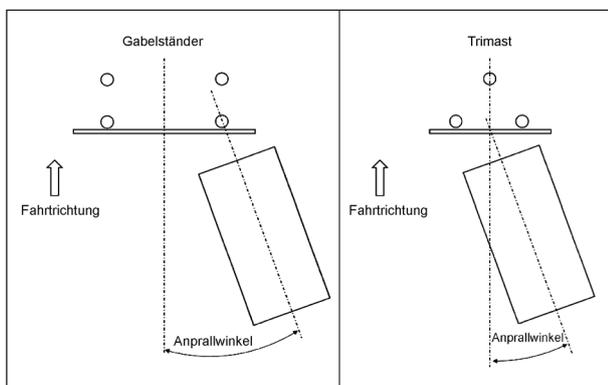


Bild 2-10: Prinzipskizze der Anprallkonfiguration – Anprallwinkel und Anprallposition

Nr.	Objekttyp	Versuch	Fahrzeugtyp	Anprallgeschwindigkeit	Anprallwinkel	Anprallseite	Anprallpunkt
1	GS 750 x 76 Schild 2.600 x 4.000	Validierung	Suzuki Swift	100 km/h	20°	Front	Mittig
2	GS 750 x 76 Schild 2.600 x 4.000	Validierung	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Mittig
3	TRI 500 x 60 Schild 1.400 x 2.000	Validierung	Suzuki Swift	100 km/h	20°	Front	Mittig
4	TRI 500 x 60 Schild 1.400 x 2.000	Validierung	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Mittig
5	GS 750 x 60 Schild 3.000 x 3.000	Modifikation	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Mittig
6	TRI 350 x 48 Schild 1.800 x 1.500	Modifikation	Suzuki Swift	35 km/h	20°	Front	Mittig

Tab. 2-3: Versuchsmatrix

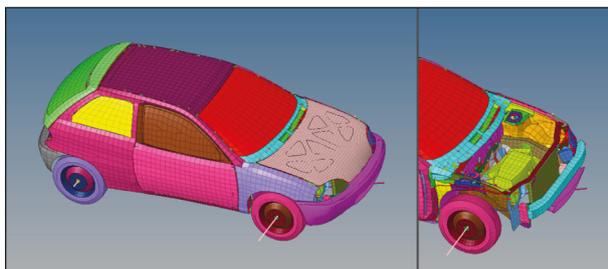


Bild 2-11: Verwendetes Fahrzeugmodell Suzuki GEO METRO ver. GM R3 in Vollansicht (links) und mit teilweise ausgeblendeten Frontabdeckungen (rechts).

et al., 2019; PAWLAK, 2016). Die Abmessungen des Fahrzeugmodells entsprechen den Vorgaben gemäß EN 12767 (Comité Européen De Normalisation, 2008). Die Masse von 900 kg entspricht der Gewichtsklasse der EN 12767 mit einem Gesamtgewicht von $900 (\pm 40)$ kg. Es wurden zwei Veränderungen vorgenommen. Es wurde eine Scheinwerferoberfläche links vorne hinzugefügt, da es in Vorgängerprojekten hierbei öfters zu Kontaktproblemen gekommen ist. Zusätzliche wurde das Netz des linken vorderen Kotflügels verfeinert, um die gleiche Netzgröße zwischen dem Anprallobjekt und dem Fahrzeug zu erhalten, was für die Kontaktformulierung von Vorteil ist. Diese beiden Änderungen wurde für Anprallsituationen mit Schutzeinrichtungen nach EN1317 vorgenommen. Für das vorliegende Projekt haben die beiden Änderungen aber keine Auswirkungen, da der Anprall an der Vorderseite des Fahrzeugs erfolgt. Die resultierende Gesamtmasse des Fahrzeuges als auch die Geschwindigkeit wurden entsprechend den Versuchen angepasst.

2.2.2 Anprallobjekte

2.2.2.1 Gabelständer Typ 750 x 76

Der Gabelständer Typ 750 x 76 wurde entsprechend dem getesteten Gabelständer (Bild 2-12) aufgebaut. Für die Vernetzung als FE-Modell wurde eine Elementkantenlänge von 7 mm angestrebt (FRÖHLICH, 2018; TENG, 2016), worin ein übliches Verhältnis zwischen Simulationsgenauigkeit und Recheneffizienz vorliegt.

Klemmschelle

Das Klemmschellenmodell (Bild 2-13, oben) wurde als 3 mm starker Schellengürtel (rot) realisiert an die eine Klemme (grün) zur Schildbefestigung, entsprechend der in den Versuchen verwendeten

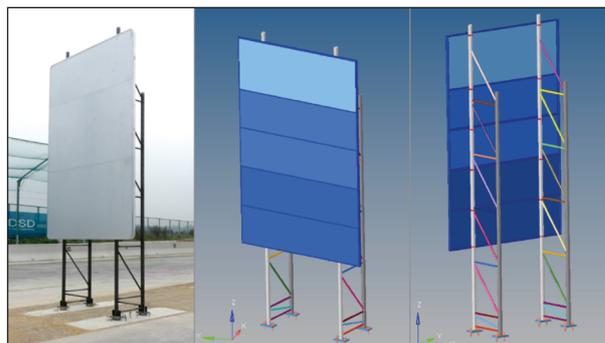


Bild 2-12: Getesteter Gabelständer Typ 750 x 76 mit dreiteiliger Schildtafel in der Größe 2.600 x 4.000 mm (links) und Simulationsmodell (mittig und rechts).

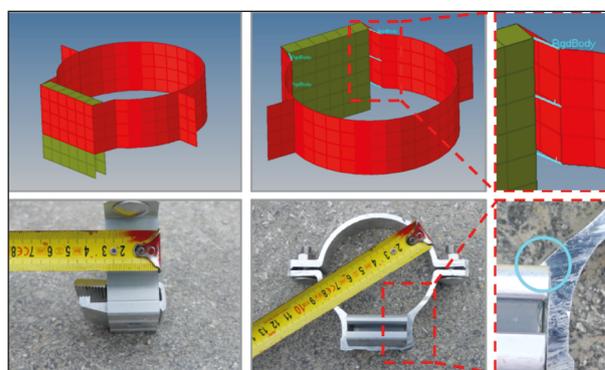


Bild 2-13: Oben: Das Klemmschellenmodell setzt sich aus Schellengürtel (rot) und Klemme (olivgrün) zusammen. Unten: Die getestete Aluminium-Klemmschelle im Vergleich. Rechts: Der Klemmmechanismus, der die Klemme in der Schellenausfuchtung hält, wurde mittels eindimensionaler, starrer Verbindungen angenähert.

Klemmschelle (ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite), angebracht. Es wurde in allen Simulationsmodellen des Gabelständers diese Klemmbreite verwendet. Das Schild wurde an jedem Gurtrohr mit sechs Klemmschellen befestigt. Die Verbindung zwischen Schellengürtel und Klemme wurde mittels 6 eindimensionaler starrer Verbindungselemente (hellblau, rechts) abgebildet. Diese Verbindungen dienen als Annäherung, die Alu-Klemme in der Ausfuchtung des Schellengürtels hält (hellblaue Markierung in Bild 2-13, rechts unten).

Die Klemmwirkung zwischen Schildtafel ausfaltung und Klemme (Bild 2-14 a) wurde über ein eindimensionales, spannfederähnliches Element realisiert, das zwischen den Klemmlaschen eingesetzt wurde (Bild 2-14 b, magentafarbene Linie). Diesem Federelement wurde eine Vorspannung zugeordnet, um zwischen Klemme und Schildausfaltung (Bild 2-14 b) eine Klemmwirkung aufzubauen. Die Vorspannung wurde iterativ so gewählt, dass sich in der Simulation das gleichen Systemverhalten wie in

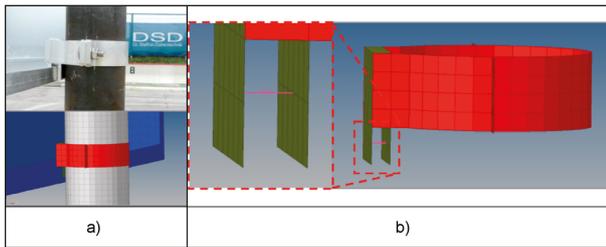


Bild 2-14: a) Vergleich der Schildbefestigung im Versuch (oben) und im Simulationsmodell (unten) am Gabelmast. Die Schildausfaltung befindet sich zwischen den Klemmaschen. b) Realisierung der Klemmspannkraft mittels eindimensionalem Federelement (magentafarbene Linie).

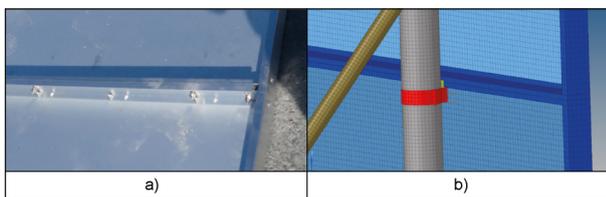


Bild 2-15: Die Verbindung der einzelnen Schilduntergruppen ((b) wurde über die Zusammenlegung einzelner Knoten der Schildränder (dunkelblau) realisiert (nicht sichtbar), um der Wirkung einer Schraubverbindung zu entsprechen (a)).

der Realität (siehe Kapitel 2.4.2) einstellt. Eine Vereinfachung wurde im Aufbau des Klemmschellengürtels vorgenommen, da sie als einteiliges Element modelliert wurde. Die reale Klemmschelle besteht aus zwei Teilen, die mittels Schraubverbindungen zusammengehalten und damit an das Gurtrohr gepresst werden (Vergleich jeweils in Bild 2-13 und Bild 2-14). Die eigentliche Verbindung zwischen Klemmschelle und vertikalem Gurtrohr wurde mittels TIED Kontakt ohne Versagenskriterium realisiert, da anhand der Validierungsversuche festgestellt wurde, dass es zu einem Ausfädeln der Schildtafel aus der Klemmschelle kommt und nicht zu einer Verschiebung der Klemmschelle bezogen auf das Gurtrohr.

Schildtafel

Die Schildtafel besteht aus drei miteinander verbundenen Einzeltafeln, die jeweils in (verstärkte) Schildrahmen eingebettet sind. Im Anpralltest wurden die Schildrahmen mit mehreren Schrauben verbunden (Bild 2-15 a), im Simulationsmodell wurden dementsprechend ausgewählte Elementknoten miteinander verbunden (Bild 2-15 b), Elementknoten sind nicht sichtbar). Die Validierung zeigte, dass diese Vereinfachung die Anforderungen dieser Anprallkonfiguration hinsichtlich des Schildabrisses gut abbildet.

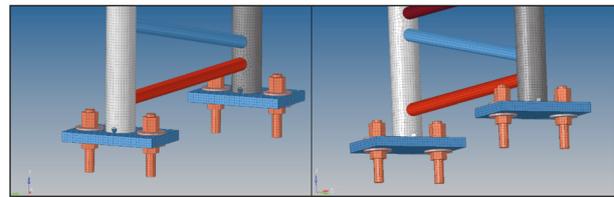


Bild 2-16: Fußplatten mit Gewindestangensegment, Muttern und Unterlegscheibe am Gabelmast. Die Fußplatte befindet sich entsprechend der Versuchsbedingung etwa 40 mm über dem Fundament. Die Fixierung der Gesamtkonstruktion wird über eine Einspannung der unteren Elementknoten des Gewindestangensegments erreicht.

Befestigung der Fußplatten

Die Befestigung der Gurtrohre wurde entsprechend dem getesteten System aufgebaut (Bild 2-16), bestehend aus Fußplatte, Gewindestange mit Schraubmutter und Unterlegscheiben. Im Realversuch kam es zu keiner erkennbaren Positionsänderung von Gewindestange, oberer/unterer Schraubmutter oder Kontermutter zueinander, weshalb diese im Simulationsmodell jeweils als durchgehende Komponente abgebildet wurden. Die Verbindung zwischen Gewindestange/Schraubmutter zu Unterlegscheibe und Unterlegscheibe zu Fußplatte wurde mittels einzelnen, zusammengelegten Elementknoten realisiert, da im Realversuch keine Positionsänderung von Gewindestange, oberer/unterer Schraubmutter oder Kontermutter zueinander festgestellt werden konnte. Durch diese Modellierung sind diese Bauteile fix miteinander verbunden. Die Gewindestangen können allerdings ein Deformationsverhalten entsprechend den Versuchen abbilden und können somit als beweglich bezeichnet werden.

Die Länge der Gewindestangen (M24) betrug 150 mm, deren Elementknoten wurden etwa 40 mm unterhalb der Fußplattenunterkante eingespannt (Bild 2-17, oben, blaue Dreiecke). Dies entspricht dem Einguss in das Betonfundament im Realversuch (Bild 2-17, unten rechts). Das Betonfundament wurde nicht eigens modelliert, sondern als Teil des Bodens ausgeführt. Die Bodenfläche selbst wurde als 2D-Element (Rigidwall) ausgeführt.

Zur Realisierung der Schweißnähte zwischen Gurt- und Diagonalrohren sowie Gurtrohr und Fußplatten wurden dem Modell stabile, unlösbare Verbindungen, sogenannten Tied-Kontakte zwischen Elementen, die sich im Bereich der auftretenden Schweißnaht befanden (Bild 2-17, dunkelgraue Struktur), definiert. Diese Modellannahmen sind damit begründet, dass im Realversuch kein Versagen der



Bild 2-17: Detaillierte Ansicht der Fußplatte. Die Fixierung der Gesamtkonstruktion erfolgt in der Simulation über das Einspannen von Elementknoten (blaue Dreiecke). Die Schweißnahtverbindung wird mittels fixierten Elementverbindungen (dunkelgraue Struktur) umgesetzt. Die Versuche wurden mit zwei Schraubmuttern über der Fußplatte durchgeführt, die im Modell durch eine durchgehende Schraubmutter angenähert wurden.

Schweißnähte in diesem Bereich festgestellt wurde. Die Anzahl der miteinander verbundenen Elemente richtet sich individuell nach der Breite der Schweißnaht an den getesteten Ständern.

2.2.2.2 Trimast Typ 500 x 60

Der Aufbau des Trimastmodells wurde analog zum Gabelmast durchgeführt. Das Modell richtet sich nach den im Anpralltest verwendeten Strukturen (Bild 2-18). Es wurde ebenfalls eine FE Netzkantenlänge von 7 mm angestrebt. Die relevanten Komponenten im Aufbau des Trimast sind die Klemmschelle, Fußplatte, Gewindestange, Schildplatten sowie die Verbindung zwischen Schild zu Klemmschelle, Gurt- zu Diagonalrohr, Diagonalrohr zu Fußplatte und Gewindestange zu Fundament.

Klemmschelle

In Bild 2-19 ist das für den Trimast konstruierte Klemmschellenmodell abgebildet (ALFORM-Klemmschelle). Der Klemmlasche (grün) und dem Schellengürtel (rot) wurde eine Dicke von 3 mm zugewiesen. Die Klemmbreite beträgt in allen Simulationsmodellen des Trimasts 40 mm, der Durchmesser des Schellengürtels dem Gurtrohr des Trimast entsprechend 60 mm. Die Klemmlaschenelemente wurden mit den Schellengürtелеlementen schildseitig miteinander verbunden. Gurtrohrseitig wurde die Verbindung mittels starrer 1D-Elemente realisiert. Die Verbindung zwischen Schellengürtel und Gurtrohr ist analog zum Gabelständer modelliert (siehe Bild 2-13, rechts).

Das Schild besteht aus einer Schildtafel mit einem verstärkten Rahmen. Das Schild am Trimast ist durchgehend und damit nicht in Einzelbereiche unterteilt. Die Befestigung erfolgt mittels sechs Klemmschellen am Schildrahmen. Die Klemmschellen sind

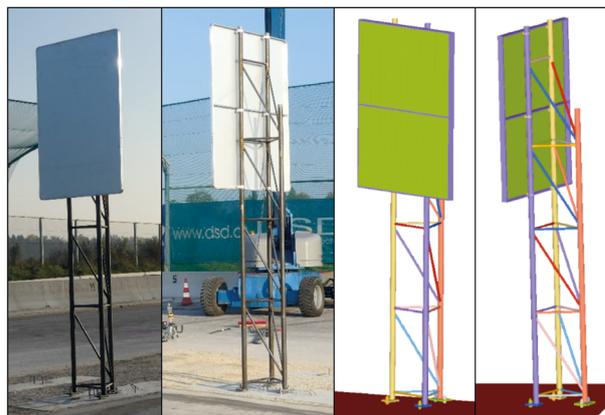


Bild 2-18: Getesteter Trimast vom Typ 500 x 60 mit Schild 1.400 x 2.500 mm und Simulationsmodell

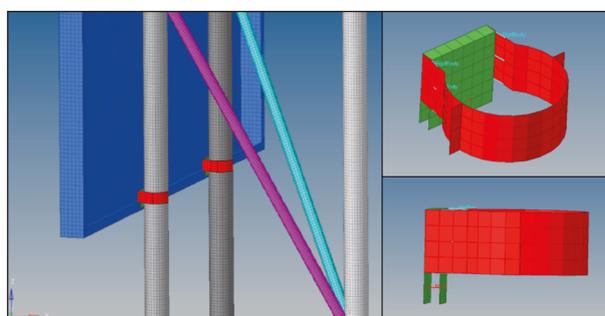


Bild 2-19: Links: Schildbefestigung beim Simulationsmodell am Trimast Typ 500 x 60. Die Schildausfaltung (Schildrahmen) befindet sich zwischen den Klemmlaschen. Rechts: Klemmschelle Durchmesser 60 mm für den Trimast (siehe auch Bild 2-13 bis Bild 2-14).

dahingehend orientiert, dass die Klemmlaschen nach oben offen sind und somit von unten klemmen. Lediglich die Klemmlaschen der untersten Klemmschellenreihe sind – ebenfalls analog zum Gabelmast – nach unten offen, um den Schildrahmen umfassen zu können.

Befestigung der Fußplatten

Die Befestigung der Fußplatten mit dem Fundament wurde durch Gewindestangen der Stärke M20 modelliert. Dabei wurde, analog dem Gabelständer, vereinfachend Gewindestange und Mutter als eine Komponente modelliert (Bild 2-20). Die Gesamtkonstruktion wurde über fixierte Elementknoten der unteren Elemente der Gewindestangen befestigt. In Bild 2-21 ist die Gewindestangenbefestigung als blaue Struktur dargestellt. Sie wurde entsprechend dem im Anpralltest gemessenen Abstand von Fußplattenunterkante zu Fundament (etwa 25 mm) angepasst. Die Schweißnähte zwischen Gurt- und Diagonalrohren sowie Gurtrohr und Fußplatten wurden wie zuvor mittels TIED-Kontakte modelliert (siehe rote, grüne und graue Struktur in Bild 2-21).

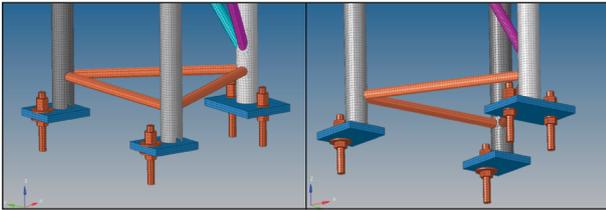


Bild 2-20: Fußplatten mit Gewindestangen, Muttern und Unterlegscheibe am Trimast.



Bild 2-21: Vergleich von Versuch und Modell im unteren Mastbereich des vorderen Gurtrohres mit Fußplatte. Die Schweißnähte (rote, grüne und graue Struktur) wurden dem Realmast angepasst. Die Gewindestangen wurden durch fixierte Elementknoten befestigt (blaue Struktur).

2.2.3 Materialkennwerte

Die Materialkennwerte von Gurt- und Diagonalrohr der getesteten Gabelständer und Trimasten wurden am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie an der TU Graz geprüft. Insgesamt wurden acht Proben getestet, jeweils ein Gurtrohr und ein Diagonalrohr für die jeweiligen Validierungstests bei 35 km/h und 100 km/h. Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Zur Prüfung der Gurtrohr- und Diagonalrohre wurden Zugversuche durchgeführt. Dabei wurden aus den Gurtrohren Proben genommen, während die kleiner dimensionierten Diagonalrohre als Ganzes geprüft wurden. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Bild 2-23 als Diagramm abgebildet. Die Simulationsmodelle verlangen die Hinterlegung von Materialdaten als wahre Spannung zu wahrer Dehnung, weshalb die experimentell ermittelten Werte (technische Spannung zu technischer Dehnung) umgerechnet werden müssen. Dies ist für Dehnungen nur im Bereich unterhalb der maximalen Zugfestigkeit (schwarzer Punkt in den Diagrammen innerhalb Bild 2-23) möglich, da ab dann eine Probenverformung durch Materialeinschnürung (Necking) auftritt. Die wahre Dehnung für höhere Dehnwerte wird im Prüfverfahren lokal im Bereich der Einschnürung gemessen, eine Aussage über die wahre Dehnung ist über die technische Deh-

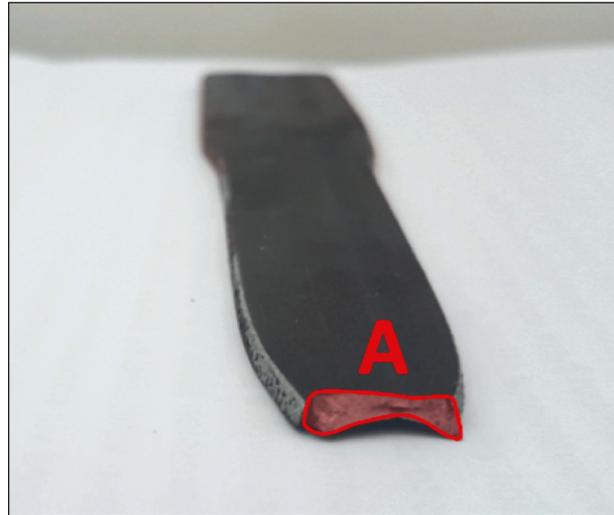


Bild 2-22: Die Bruchspannung wird aus der Zugkraft und der Querschnittsfläche (A) bei Materialversagen bestimmt. Diese Methode war nur für die Gurtrohrproben möglich. Die Diagonalrohre wurden als Ganzes geprüft, womit eine Querschnittsflächenvermessung für eine exakte Bruchspannungsberechnung nicht genau genug möglich war.

nung, wie in Bild 2-23 dargestellt, nicht mehr möglich. Damit ist die Konvertierung in wahre Spannung ab der maximalen Zugfestigkeit ebenfalls nicht direkt möglich. Zur Berechnung der wahren Spannung an der (wahren) Bruchdehnung der Gurtrohre wurde die Bruchquerschnittsfläche an den getesteten Proben gemessen (Bild 2-22) und die Zugkraft zum Zeitpunkt des Materialversagens bestimmt. Für Diagonalrohre konnte diese Methode nicht angewendet werden, da diese jeweils als ganze Komponente (Rohr) getestet wurden und ihre Querschnittsfläche zur Spannungsberechnung damit nicht genau genug bestimmbar war. Die wahre Spannung an der (wahren) Bruchdehnung der Diagonalrohre wurde qualitativ entsprechend den Gurtrohrergebnissen angepasst.

Die Materialkennwerte der übrigen Komponenten wie Schildtafel und -rahmen, Klemmschelle, Gewindestangen und Fußplatten wurden nicht über Materialprüfungen ermittelt, sondern basieren auf Literatur- und institutsinternen verwendeten Materialkennwerten (Aluminiumschild/-rahmen, Klemmschellen) sowie den Prüfergebnissen von Gurt und Diagonalrohren (Fußplatten, Gewindestangen). Wesentliche Materialkennwerte sind in Tabelle 2-5 zusammengefasst.

Für die Fußplatten wurden die Materialkennwerte vom jeweiligen Gurtrohr herangezogen und verwendet. Der Schildtafel wurden Kennwerte han-

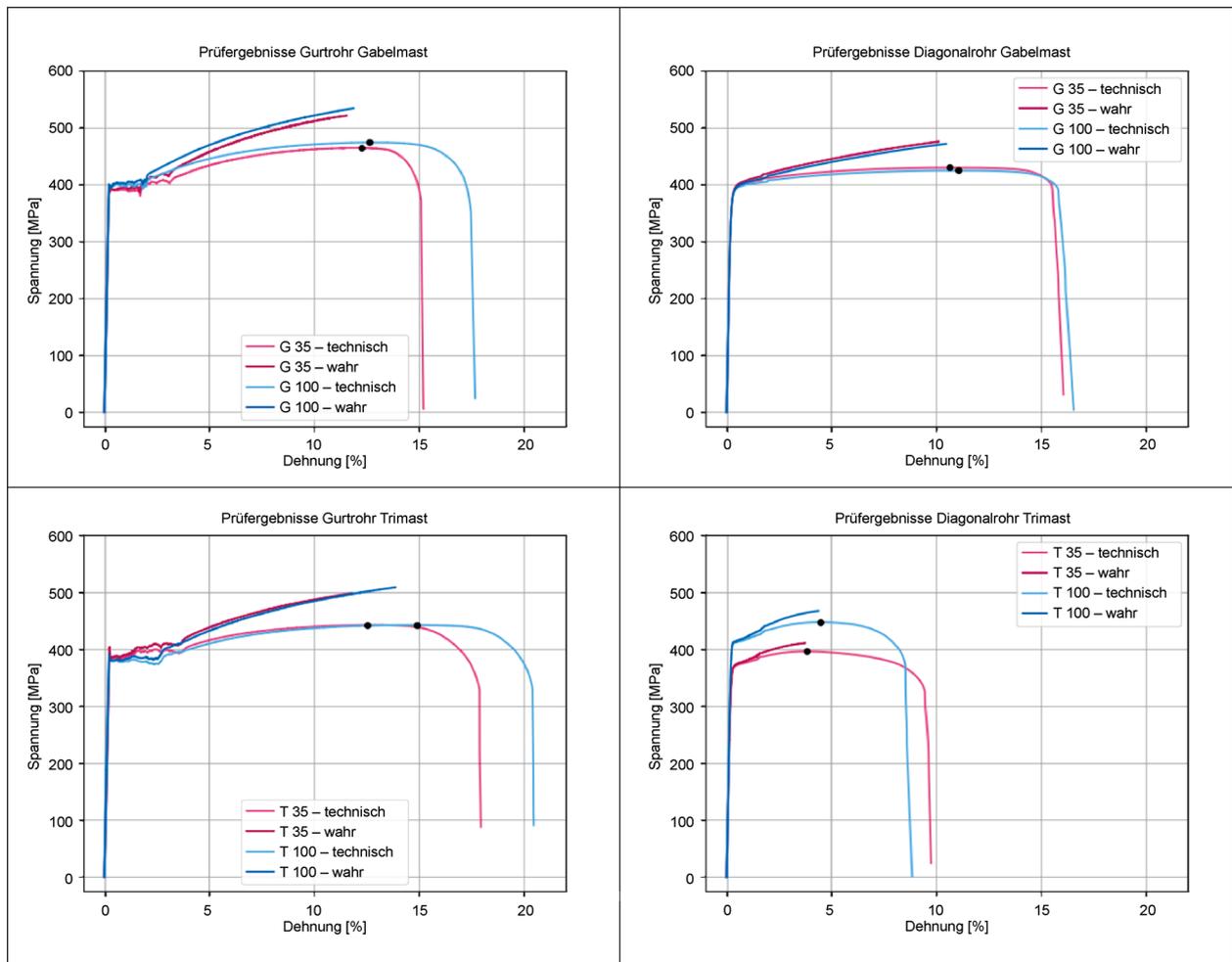


Bild 2-23: Spannung-Dehnungs-Diagramm für Gurtrohr (links) und Diagonalrohr (rechts). Aus der experimentell bestimmten technischen Spannung – technische Dehnung wird bis zur Zugfestigkeit (schwarzer Punkt) die wahre Spannung – wahre Dehnung berechnet. Die wahre Spannung für Dehnungswerte ab maximaler Zugfestigkeit (schwarzer Punkt) wird über den Probenquerschnitt und der darauf wirkenden Zugkraft ermittelt und ist hier nicht abgebildet. Die wahre Dehnung wird ab Beginn der der Materialeinschnürung (schwarzer Punkt) lokal im Einschnürungsbereich (Necking) gemessen.

	Probe		Probenquerschnitt [mm ²]	Streckgrenze Re [N/mm ²]	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	Bruchdehnung AS [%]
Diagonalrohre	Probe 1 – TUG 18001	Gabelständer	270	390	429	30,2
	Probe 2 – TUG 18002	Trimast	198	370	396	26,5
	Probe 3 – TUG 18003	Trimast	193	411	447	30,7
	Probe 4 – TUG 18004	Gabelständer	273	390	424	32,7
Gurtrohre	Probe 5 – TUG 18001	Gabelständer	65,3	388	464	37,3
	Probe 6 – TUG 18002	Trimast	68,8	403	443	41,0
	Probe 7 – TUG 18003	Trimast	65,8	390	442	42,6
	Probe 8 – TUG 18004	Gabelständer	71,6	399	474	37,3
	Anforderungen gem. EN 10.025-2:			≥ 235	360 – 510	≥ 26

Tab. 2-4: Materialkennwerte für Diagonalrohre und Gurtrohre. Alle Werte beziehen sich auf die technische Spannung/technische Dehnung.

	Dichte [kg/dm ³]	E-Modul [GPa]	Poissonzahl	Streckgrenze (wahr) [MPa]	Bruchdehnung (wahr) [%]
Schildtafel	2,7	70	0,3	90	25
Klemme	2,7	150	0,3	200	3,9
Gewindestange (Gabelmast)	7,85	210	0,3	440	kein Bruch
Gewindestange (Trimast)	7,85	210	0,3	450	kein Bruch
Gurtrohr	7,85	210	0,3	394	31.6
Diagonalrohr	7,85	210	0,3	390	27.4
Fußplatte	wie jeweiliges Gurtrohr				

Tab. 2-5: Primäre Materialkennwerte einzelner Gabel- und Trimastkomponenten

delsüblichen Aluminiums zugewiesen. Die Stärke des Schildmodelles betrug entsprechend dem Schild aus dem Anpralltest 3 mm, die des Schildrahmens 4,5 mm mit gleichen Materialkennwerten. Die Materialkennwerte der Gewindestangen entsprechen, wie die Fußplatten, den Materialdaten des jeweiligen Gurtrohres. Infolge dieser Annahme entspricht das Modellverhalten dem der durchgeführten Tests (z. B. das Hochheben der vorderen Fußplatten beim Trimast nach dem Mastabriss bei 100 km/h). Den Klemmschellenkomponenten wurden hinsichtlich Dichte und Poissonzahl die gleichen Werte wie der Schildtafel zugewiesen. E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung wurden adaptiert, um ein Abrissverhalten entsprechend den vier Validierungstests realisieren zu können ohne die Materialkennwerte für einzelne Anprallkonfigurationen ändern zu müssen. Es ist davon auszugehen, dass die Klemmschelle durch Legierung eine höhere Steifigkeit mit verminderter Bruchdehnung im Vergleich zu reinem Aluminium aufweist. Die Klemmschelle soll bei einem Anprall mit 100 km/h am angeprallten Mast versagen, bei einem Anprall mit 35 km/h stabil bleiben sowie die Schildtafel des Gabelmastes an einem Mast halten können (siehe Gabelmasthanprall bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h). Um dies zu erreichen, wurde die Materialsteifigkeit (E-Modul) und -festigkeit (Streckgrenze) der Klemme erhöht und die Bruchdehnung verringert (siehe Tabelle 2-5). Parallel dazu wurden Simulationen an den Klemmschellen durchgeführt, um deren Festigkeit bzw. Modellverhalten an Prüfergebnisse nach FREUDENSTEIN (2012) annähern zu können. In einem ersten Schritt wurden die Materialdaten der Prüfergebnisse nach FREUDENSTEIN (2012) in das Modell übernommen. Dabei wurde die Wirkung der Klemmkraft mittels eindimensionaler Federelemente zwischen den Klemmlaschen modelliert. In einem zweiten Schritt wurde die Vorspannung iterativ

derart gewählt, dass sich in der Simulation das gleiche Systemverhalten (z. B. Lösen der Schildtafel) wie in der Realität (siehe Kapitel 2.4.2) einstellt.

2.3 Bewertung der Insassensicherheit

Durch die Bewertung soll die Sicherheit der geprüften Objekte objektiv beurteilt werden. Dazu werden die Normen EN 12767 – Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen und die EN 1317 – Rückhaltesysteme an Straßen (Comité Européen De Normalisation, 2011, 2010) herangezogen. Die Bewertung der Insassensicherheit beim Anprall im Versuch als auch in der Simulation erfolgt nach dem Index für die Schwere der Beschleunigung (ASI – Acceleration Severity Index) und der theoretischen Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV – Theoretical Head Impact Velocity). Der ASI wird aus der triaxialen Beschleunigung des Fahrzeugs gemäß EN 1317-1 berechnet. Der THIV wird als Geschwindigkeit in km/h ausgedrückt, wobei ein hypothetischer, punktmassenförmiger Fahrzeuginsasse an die Oberfläche eines hypothetischen Fahrzeuginnenraums prallt. Der THIV wird ebenso gemäß EN 1317-1 berechnet.

2.3.1 EN 12767 – Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung

Beim Anprall an eine Tragkonstruktion¹ dürfen die Höchstwerte des ASI und des THIV die in Tabelle 2-7 festgelegten Werte nicht überschreiten. Der

¹ Tragkonstruktion nach EN 12767: System zur Anbringung von Gegenständen der Straßenausstattung.

Anprallgeschwindigkeit v_i [km/h]	50	70	100
Energieabsorptionskategorie	Abprallgeschwindigkeit v_e [km/h]		
HE	$v_e = 0$	$0 \leq v_e \leq 5$	$0 \leq v_e \leq 50$
LE	$0 < v_e \leq 5$	$5 < v_e \leq 30$	$50 < v_e \leq 70$
NE	$5 < v_e \leq 50$	$30 < v_e \leq 70$	$70 < v_e \leq 100$

Tab. 2-6: Energieabsorptionskategorien gemäß EN 12767

Energieabsorptionskategorie	Insassensicherheitsstufe	Geschwindigkeiten			
		Obligatorische Anprallprüfung bei niedriger Geschwindigkeit 35 km/h		Anprallprüfungen für verschiedene Geschwindigkeitsklassen 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h	
		Höchstwerte		Höchstwerte	
		ASI	THIV km/h	ASI	THIV km/h
HE	1	1,0	27	1,4	44
HE	2	1,0	27	1,2	33
HE	3	1,0	27	1,0	27
LE	1	1,0	27	1,4	44
LE	2	1,0	27	1,2	33
LE	3	1,0	27	1,0	27
NE	1	1,0	27	1,2	33
NE	2	1,0	27	1,0	27
NE	3	1,0	27	0,6	11
NE	4	Keine Anforderung	Keine Anforderung	Siehe 5.6 in EN12767	

Tab. 2-7: Insassensicherheit gemäß EN 12767

Höchstwert ist bei der obligatorischen, niedrigen Anprallgeschwindigkeit für den ASI mit 1,0 und für den THIV mit 27 km/h festgelegt. Bei den höheren Geschwindigkeitsklassen ist der Höchstwert für den ASI und THIV abhängig von der Energieabsorptionsklasse und Insassensicherheitsstufe. Die Energieabsorptionsklassen werden in hoch energieabsorbierend (HE), niedrig energieabsorbierend (LE) und nicht energieabsorbierend (NE) unterteilt. Die Tragkonstruktionen sind den Energieabsorptionskategorien entsprechend für die ausgewählte Geschwindigkeitsklasse hinsichtlich der Abprallgeschwindigkeit nach Tabelle 2-6 einzustufen. Die Insassensicherheitsstufen werden von 1 bis 4 unterteilt. Die Insassensicherheitsstufen 1, 2, und 3 stellen zunehmende Sicherheitsniveaus dar, bei welchen die Schwere des Anpralls in dieser Reihenfolge vermindert wird, wobei die Stufe 4 sehr sichere Tragkonstruktionen umfasst.

2.3.2 EN 1317 – Rückhaltesysteme

Um zu bewerten, ob eine Tragkonstruktion an der Fahrbahnseite durch eine Schutzvorrichtung abgesichert werden sollte, werden die Grenzwerte für

Anprallheftigkeit	Indexwerte		
A	ASI $\leq 1,0$	Und	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI $\leq 1,4$		
C	ASI $\leq 1,9$		

Tab. 2-8: Anprallheftigkeitsstufen gemäß EN 1317

die Anprallheftigkeit der EN 1317 für ASI und THIV herangezogen. Für die höchste Stufe der Anprallheftigkeit „A“ muss der ASI kleiner oder gleich 1,0 sein, bei einem maximalen THIV von kleiner oder gleich 33 km/h (Tabelle 2-8). Für die Anprallheftigkeit „B“ ist ein ASI kleiner oder gleich 1,4 gefordert und der THIV darf 33 km/h nicht überschreiten.

Eine Tragkonstruktion würde als passiv sicher gelten, wenn der ASI und THIV unter den Grenzwerten der Tabelle 2-7 liegen, eine Absicherung wäre nicht erforderlich. Sollte die Tragkonstruktion jedoch abgesichert werden, so wäre eine Absicherung dann zu empfehlen, wenn ASI und THIV über den Grenzwerten der Tabelle 2-8 liegen. Je nach gewünschtem Sicherheitsniveau ergibt sich die maximale Anprallheftigkeit für die Betrachtung der Grenzwerte.

Wäre beispielsweise der ASI der Tragkonstruktion 1,2 und das Sicherheitsniveau sollte der Anprallheftigkeit „B“ entsprechen, so wäre eine Absicherung nicht empfehlenswert, da die Schutzeinrichtung für diesen Fall einen ASI von 1,4 haben könnte. Wird hingegen das Sicherheitsniveau auf die Anprallheftigkeit „A“ festgelegt, so wäre eine Absicherung empfehlenswert. Schutzeinrichtungen können jedoch unter die Anprallheftigkeit „B“ fallen, wenn der ASI größer als 1,0 und kleiner oder gleich 1,4 ist. Daher wäre eine Absicherung der Tragkonstruktion individuell aufgrund von Prüfergebnissen der aufzustellenden Schutzeinrichtung zu prüfen. Jedenfalls sollte der ASI der Schutzeinrichtung kleiner sein als der ASI der passiven Tragkonstruktion. Der Grenzwert für den THIV ist für alle drei Anprallheftigkeitsstufen gleich hoch und die zuvor genannten Überlegungen zur Absicherung gelten auch dementsprechend.

2.4 Validierung

Die Validierung der Simulationen erfolgte durch Vergleich der Simulationsmodelle und den Versuchen für Gabelständer 750 x 76 mm sowie für den Trimast Typ 500 x 60 mm mit den Anprallgeschwindigkeiten von 100 km/h und 35 km/h. Die Validierung der Simulationsmodelle erfolgte in Anlehnung an die prEN 16303 2018 (Comité Européen De Normalisation, 2018).

2.4.1 Bewertung der Qualität der Simulation

Da sich die prEN 16303 2018 eher auf die Simulation von Fahrzeugrückhaltesystemen bezieht, wurden nur jene Parameter berücksichtigt, welche auch für die Validierung von passiven Tragkonstruktionen relevant sind. Neben dem Vergleich der Fahrzeugkinematik aus den Videodaten und der Fahrzeugkinematik der Simulation wurden ASI und THIV als Parameter zur Bewertung der Qualität der Simulation herangezogen. Die dabei einzuhaltenden Grenzen für den ASI und THIV für ein ausreichend valides Simulationsmodell sind in Tabelle 2-9 angegeben. Der ASI muss demnach in der Simulation auf $\pm 0,1$ mit dem Versuch übereinstimmen und beim THIV beträgt die Toleranz ± 3 km/h. Im zeitli-

Bezeichnung	Toleranz	Toleranz Zeitverlauf
ASI	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$
THIV	± 3 km/h	$\pm 0,05$

Tab. 2-9: Toleranzbereich für ASI und THIV in der Validierung gemäß prEN 16303:2018

chen Verlauf ist eine Toleranz von $\pm 0,05$ s festgelegt.

Weitere Verifizierungs- und Bewertungskriterien:

- Das Ergebnis der Simulation ist physikalisch annehmbar
- Abweichung der Gesamtenergie ist geringer als 10 %
- Hourglass-Energie gegen innere Energie ist weniger als 10 % der inneren Energie
- Hinzugefügte Masse ist weniger als 5 % der Gesamtmasse
- Zeitknoten des Schießverfahrens sind nicht vorhanden
- Feste Elemente mit negativem Volumen sind nicht vorhanden
- Summe der Energie zwischen Master- und Slave-Kontakt ist Null
- Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist berücksichtigt

2.4.2 Gabelständer Typ 750 x 76

Die Validierung des Gabelständers erfolgte basierend auf zwei Versuchen. Beim Anprall mit 35 km/h wurde beim Versuch eine Geschwindigkeit von 36,3 km/h erreicht. Der Anprallwinkel war 19,6°. Die Simulation erfolgte mit einer Anprallgeschwindigkeit von 36 km/h unter einem Anprallwinkel von 20°. Beim Anprall mit 100 km/h wurde beim Versuch eine Geschwindigkeit von 103,7 km/h erreicht. Der Anprallwinkel war 19,9°. Die Simulation erfolgte bei einer Anprallgeschwindigkeit von 104 km/h und einem Anprallwinkel von 20°. Der Anprallwinkel wurde von den Vorsimulationen übernommen und in der Simulationsmatrix nicht geändert. Die Anprallgeschwindigkeiten wurden gerundet.

Damit für beide Versuche dasselbe Fahrzeugmodell verwendet werden kann, wurde der Mittelwert der Fahrzeugmassen der Validierungsversuche gebildet und im Simulationsmodell verwendet. Zur Darstellung der Abhängigkeit des ASI bzw. THIV vom Fahrzeugmasse und der Anprallgeschwindigkeit wurde eine Parameterstudie am Gabelständer 750 x 76 mm durchgeführt (Anhang E). Hierbei wurden die maximal zulässigen Toleranzen für das Fahrzeuggesamtgewicht von 900 (± 40) kg sowie die Anprallgeschwindigkeit von 35 (± 3) km/h simuliert. Der geringe Unterschied der Fahrzeugmasse des Validierungsversuchs zur Fahrzeugmasse in

der Simulation hat nur einen geringen Einfluss auf den ASI (vierte Kommastelle) und THIV (zweite Kommastelle).

Sowohl bei der niedrigen als auch bei der hohen Geschwindigkeit konnte eine sehr gute Übereinstimmung von ASI und THIV erreicht werden (Tabelle 2-10). Beide Werte lagen jedenfalls in den zulässigen Grenzen, sowohl für die niedrige als auch die hohe Anprallgeschwindigkeit. Der Vergleich der Fahrzeugkinematik bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h ist in Tabelle 2-13 und bei 35 km/h in Tabelle 2-14 dargestellt.

Nr.	Objekttyp	Fahrzeugmasse [kg]		Anprallgeschwindigkeit [km/h]		Anprallwinkel [°]		ASI [-]		THIV [km/h]		THIV Zeit [s]	
		V	S	V	S	V	S	V	S	V	S	V	S
1	GS 750 x 76	873	870	36,3	36	19,6	20	1,0	1,1	39	40	0,14	0,15
2	GS 750 x 76	866	870	103,7	104	19,9	20	0,9	0,9	16	18	0,17	0,16

V: Versuch
S: Simulation

Tab. 2-10: Ergebnisse der Validierung des Gabelständers Typ 750 x 76 mm

Verifikation und Evaluierungskriterien für das virtuelle Testen von Anprallsituationen	Ja	Nein	NR
Das Ergebnis der Simulation ist physikalisch annehmbar	X		
Abweichung der Gesamtenergie ist geringer als 10 %	X		
Hourglass-Energie gegen innere Energie ist weniger als 10 % der inneren Energie	X		
Hinzugefügte Masse ist weniger als 5 % der Gesamtmasse	X		
Zeitknoten des „Schießverfahrens“ sind nicht vorhanden	X		
Feste Elemente mit negativem Volumen sind nicht vorhanden	X		
Summe der Energie zwischen Master- und Slave-Kontakt ist Null		X ¹	
Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist berücksichtigt		X ²	

NR: Nicht Relevant

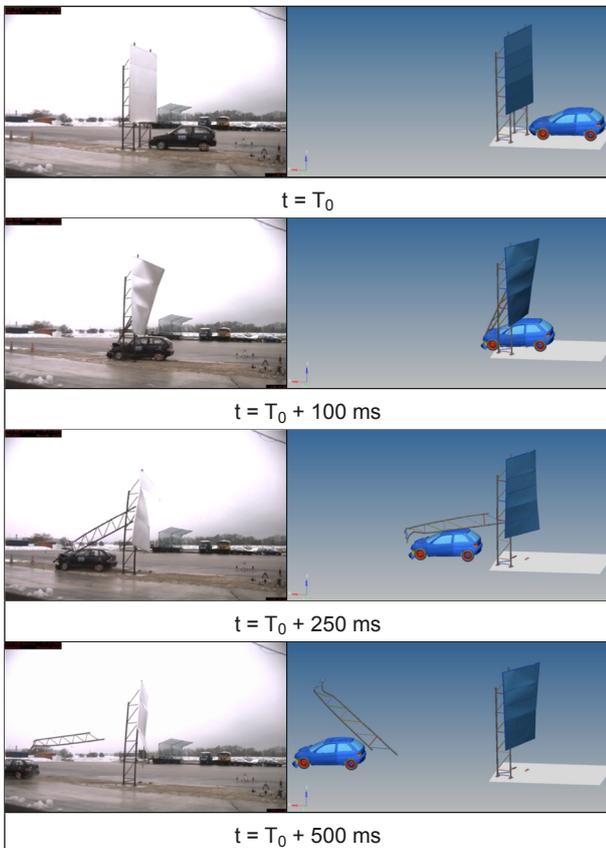
¹ Aufgrund der sich ergebenden Kontakte in den Anprallsituationen kommt es speziell beim Fahrzeug zu Situationen, die zu einem Ungleichgewicht zwischen den Master- und Slave-Kontakten führen können. Da aber das Modell entsprechend dem Validierungsstand nicht geändert werden sollte, wurde diese Abweichung akzeptiert. Der Einfluss ist aber nicht relevant, da die Prognosegüte für die im Projekt entscheidenden Validierungsgrößen (z. B. ASI, Verformungsbild des Hindernisses) sehr gut abgebildet wurden. Anzumerken ist auch, dass nur ein Modell für mehrere Anprallkonfigurationen sehr gute Prognosegüten aufweist.

² Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde für den relevanten Bereich (Anprallgeschwindigkeit: 35 km/h und 100 km/h) ausreichend abgebildet, da in der Validierung Versuchsdaten aus diesem Bereich verwendet wurden. Dieser Umstand ist auch daran zu erkennen, dass nur ein Modell mehrere Lastfälle mit unterschiedlichen Anprallgeschwindigkeiten und Anprallhindernissen sehr gut abbildet.

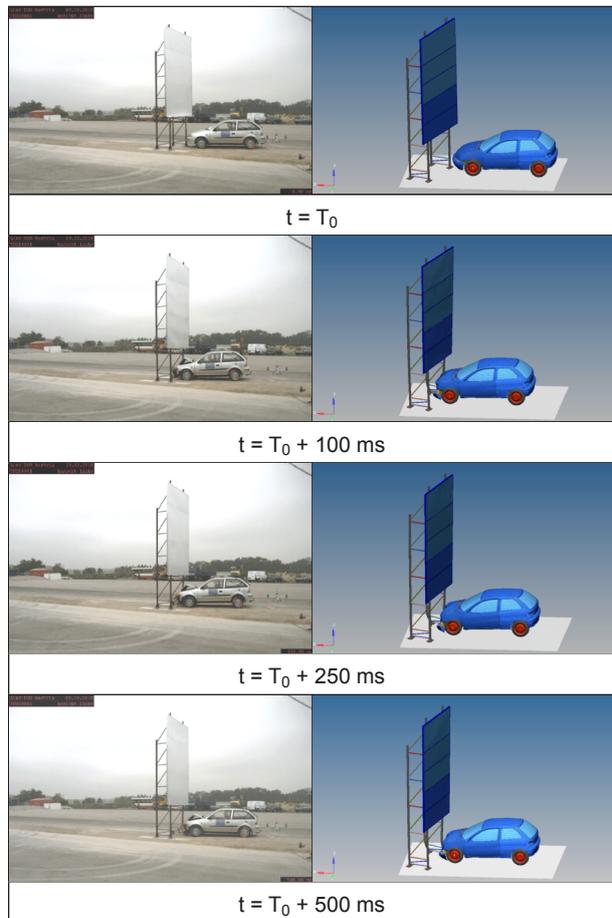
Tab. 2-11: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Gabelständers Typ 750 x 76 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Verifikation und Evaluierungskriterien für das virtuelle Testen von Anprallsituationen	Ja	Nein	NR
Das Ergebnis der Simulation ist physikalisch annehmbar	X		
Abweichung der Gesamtenergie ist geringer als 10 %	X		
Hourglass-Energie gegen innere Energie ist weniger als 10 % der inneren Energie	X		
Hinzugefügte Masse ist weniger als 5 % der Gesamtmasse	X		
Zeitknoten des „Schießverfahrens“ sind nicht vorhanden	X		
Feste Elemente mit negativem Volumen sind nicht vorhanden	X		
Summe der Energie zwischen Master- und Slave-Kontakt ist Null		X ¹	
Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist berücksichtigt		X ²	
NR: Nicht Relevant			
¹ Aufgrund der sich ergebenden Kontakte in den Anprallsituationen kommt es speziell beim Fahrzeug zu Situationen, die zu einem Ungleichgewicht zwischen den Master- und Slave-Kontakten führen können. Da aber das Modell entsprechend dem Validierungsstand nicht geändert werden sollte, wurde diese Abweichung akzeptiert. Der Einfluss ist aber nicht relevant, da die Prognosegüte für die im Projekt entscheidenden Validierungsgrößen (z. B. ASI, Verformungsbild des Hindernisses) sehr gut abgebildet wurden. Anzumerken ist auch, dass nur ein Modell für mehrere Anprallkonfigurationen sehr gute Prognosegüten aufweist. ² Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde für den relevanten Bereich (Anprallgeschwindigkeit: 35 km/h und 100 km/h) ausreichend abgebildet, da in der Validierung Versuchsdaten aus diesem Bereich verwendet wurden. Dieser Umstand ist auch daran zu erkennen, dass nur ein Modell mehrere Lastfälle mit unterschiedlichen Anprallgeschwindigkeiten und Anprallhindernissen sehr gut abbildet.			

Tab. 2-12: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Gabelständers Typ 750 x 76 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h



Tab. 2-13: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Gabelständer Typ 750 x 76 mm bei 100 km/h



Tab. 2-14: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Gabelständer Typ 750 x 76 mm bei 35 km/h

2.4.3 Trimast Typ 500 x 60

Die Validierung des Trimasts erfolgte anhand von zwei Versuchen. Beim Anprall mit 35 km/h wurde beim Versuch eine Geschwindigkeit von 36,4 km/h erreicht. Der Anprallwinkel war 18,8°. Die Simulation erfolgte mit einer Anprallgeschwindigkeit von 36 km/h unter einem Anprallwinkel von 20°. Beim Anprall mit 100 km/h wurde beim Versuch eine Geschwindigkeit von 102,9 km/h erreicht. Der Anprallwinkel war 19,3°. Die Simulation erfolgte bei einer Anprallgeschwindigkeit von 103 km/h und einem Anprallwinkel von 20°. Der Anprallwinkel wurde von den Vorsimulationen übernommen und in der Simulationsmatrix nicht geändert. Die Anprallgeschwindigkeiten wurden gerundet.

Damit für beide Versuche dasselbe Fahrzeugmodell verwendet werden kann, wurde der Mittelwert der Fahrzeugmassen der Validierungsversuche gebildet und im Simulationsmodell verwendet. Für einen Zusammenhang zwischen ASI bzw. THIV zu Fahrzeuggewicht und der Anprallgeschwindigkeit siehe Anhang E.

Sowohl bei der niedrigen als auch bei der hohen Geschwindigkeit konnte eine sehr gute Übereinstimmung von ASI und THIV erreicht werden (Tabelle 2-15). Beide Werte lagen jedenfalls in den zulässigen Grenzen, sowohl für die niedrige als auch die hohe Anprallgeschwindigkeit. Der Vergleich der Fahrzeugkinematik bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h ist in Tabelle 2-18 und bei 35 km/h in Tabelle 2-19 dargestellt.

Nr.	Objekt-typ	Fahrzeug-masse [kg]		Anprall-geschwindig-keit [km/h]		Anprall-winkel [°]		ASI [-]		THIV [km/h]		THIV Zeit [s]	
		V	S	V	S	V	S	V	S	V	S	V	S
3	TRI 500 x 60	866	867	36,4	36	18,8	20	1,1	1,0	38	39	0,14	0,16
4	TRI 500 x 60	868	867	102,9	103	19,3	20	0,9	0,9	18	19	0,16	0,17

V: Versuch
S: Simulation

Tab. 2-15: Ergebnisse der Validierung des Trimast Typ 500 x 60 mm

	Ja	Nein	NR
Das Ergebnis der Simulation ist physikalisch annehmbar	X		
Abweichung der Gesamtenergie ist geringer als 10 %	X		
Hourglass-Energie gegen innere Energie ist weniger als 10 % der inneren Energie	X		
Hinzugefügte Masse ist weniger als 5 % der Gesamtmasse	X		
Zeitknoten des „Schießverfahrens“ sind nicht vorhanden	X		
Feste Elemente mit negativem Volumen sind nicht vorhanden	X		
Summe der Energie zwischen Master- und Slave-Kontakt ist Null		X ¹	
Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist berücksichtigt		X ²	

NR: Nicht Relevant

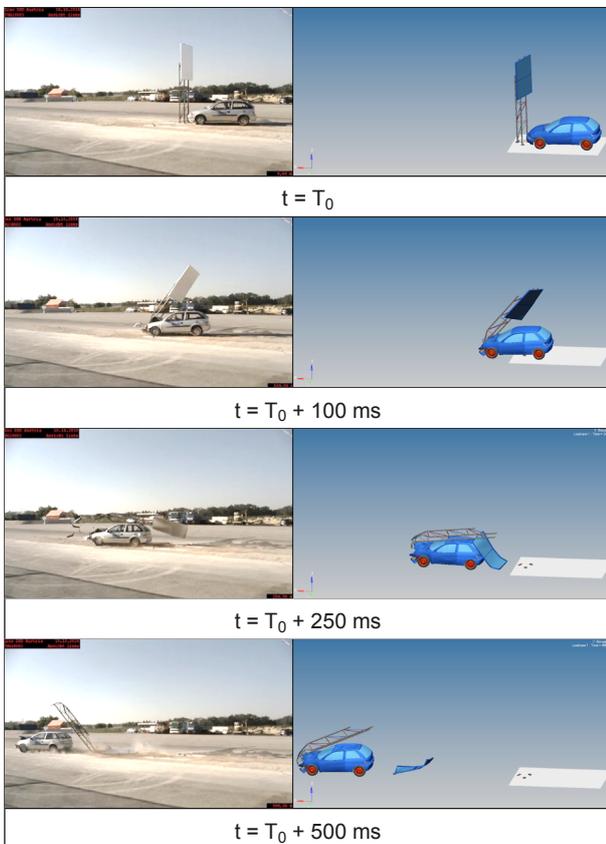
¹ Aufgrund der sich ergebenden Kontakte in den Anprallsituationen kommt es speziell beim Fahrzeug zu Situationen, die zu einem Ungleichgewicht zwischen den Master- und Slave-Kontakten führen können. Da aber das Modell entsprechend dem Validierungsstand nicht geändert werden sollte, wurde diese Abweichung akzeptiert. Der Einfluss ist aber nicht relevant, da die Prognosegüte für die im Projekt entscheidenden Validierungsgrößen (z. B. ASI, Verformungsbild des Hindernisses) sehr gut abgebildet wurden. Anzumerken ist auch, dass nur ein Modell für mehrere Anprallkonfigurationen sehr gute Prognosegüten aufweist.

² Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde für den relevanten Bereich (Anprallgeschwindigkeit: 35 km/h und 100 km/h) ausreichend abgebildet, da in der Validierung Versuchsdaten aus diesem Bereich verwendet wurden. Dieser Umstand ist auch daran zu erkennen, dass nur ein Modell mehrere Lastfälle mit unterschiedlichen Anprallgeschwindigkeiten und Anprallhindernissen sehr gut abbildet.

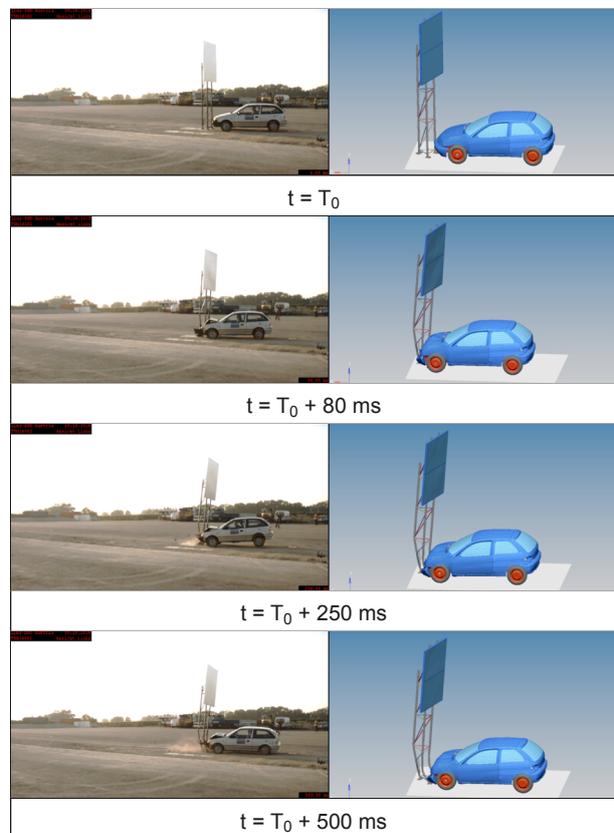
Tab. 2-16: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Trimasts Typ 500 x 60 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

	Ja	Nein	NR
Das Ergebnis der Simulation ist physikalisch annehmbar	X		
Abweichung der Gesamtenergie ist geringer als 10 %	X		
Hourglass-Energie gegen innere Energie ist weniger als 10 % der inneren Energie	X		
Hinzugefügte Masse ist weniger als 5 % der Gesamtmasse	X		
Zeitknoten des „Schießverfahrens“ sind nicht vorhanden	X		
Feste Elemente mit negativem Volumen sind nicht vorhanden	X		
Summe der Energie zwischen Master- und Slave-Kontakt ist Null		X ¹	
Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist berücksichtigt		X ²	
NR: Nicht Relevant			
¹ Aufgrund der sich ergebenden Kontakte in den Anprallsituationen kommt es speziell beim Fahrzeug zu Situationen, die zu einem Ungleichgewicht zwischen den Master- und Slave-Kontakten führen können. Da aber das Modell entsprechend dem Validierungsstand nicht geändert werden sollte, wurde diese Abweichung akzeptiert. Der Einfluss ist aber nicht relevant, da die Prognosegüte für die im Projekt entscheidenden Validierungsgrößen (z. B. ASI, Verformungsbild des Hindernisses) sehr gut abgebildet wurden. Anzumerken ist auch, dass nur ein Modell für mehrere Anprallkonfigurationen sehr gute Prognosegüten aufweist.			
² Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde für den relevanten Bereich (Anprallgeschwindigkeit: 35 km/h und 100 km/h) ausreichend abgebildet, da in der Validierung Versuchsdaten aus diesem Bereich verwendet wurden. Dieser Umstand ist auch daran zu erkennen, dass nur ein Modell mehrere Lastfälle mit unterschiedlichen Anprallgeschwindigkeiten und Anprallhindernissen sehr gut abbildet.			

Tab. 2-17: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Trimasts Typ 500 x 60 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h



Tab. 2-18: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Trimast Typ 500 x 60 mm bei 100 km/h



Tab. 2-19: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Trimast Typ 500 x 60 mm bei 35 km/h

2.5 Simulationsmatrix

Basierend auf der Validierung der Simulationsmodelle wurden Prinzipuntersuchungen zum Anprall an den Gabelständer und Trimast durchgeführt. Ziel der Untersuchung war, den Einfluss von Modifikationen am Gabelständer oder Trimast auf die Insassensicherheit abzuleiten, sodass für eine Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h als auch bei 35 km/h die Insassen ausreichend geschützt sind. Folgende Modifikationen wurden untersucht:

- geänderte Konstruktion (Diagonalrohranordnung),
- Gurtrohr-Schwächung durch einen Einschnitt,
- Reduktion des Schweißnahtumfangs an der Anbindung Gurtrohr zu Fußplatte,
- Fixierung der Fußplatte zum Fundament.

2.5.1 Anprallkonfiguration der Simulationen

In den Realversuchen wurde festgestellt, dass das Gurtrohr des Gabelständers Typ 750 x 76 mm und auch beim Trimast Typ 500 x 60 mm an der Schweißnahtverbindung zur Fußplatte bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h abreißt und die Werte für den ASI und THIV unter den Grenzwerten der EN 12767 lagen (siehe Kapitel 3). Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h war das nicht der Fall. Die Insassenbelastung für diese Versuche war höher als bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h. Daher wurden die Prinzipuntersuchungen nur bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h durchgeführt. Der Anprallwinkel wurde mit 20° definiert und die Anprallposition war an der Fahrzeugmitte (Bild 2-24). Der Anprallpunkt am Gabelständer war das vom Fahrzeug aus gesehene rechte Gurtrohr. Der Anprallpunkt am Trimast war mittig, zwischen den beiden Gurtrohren.

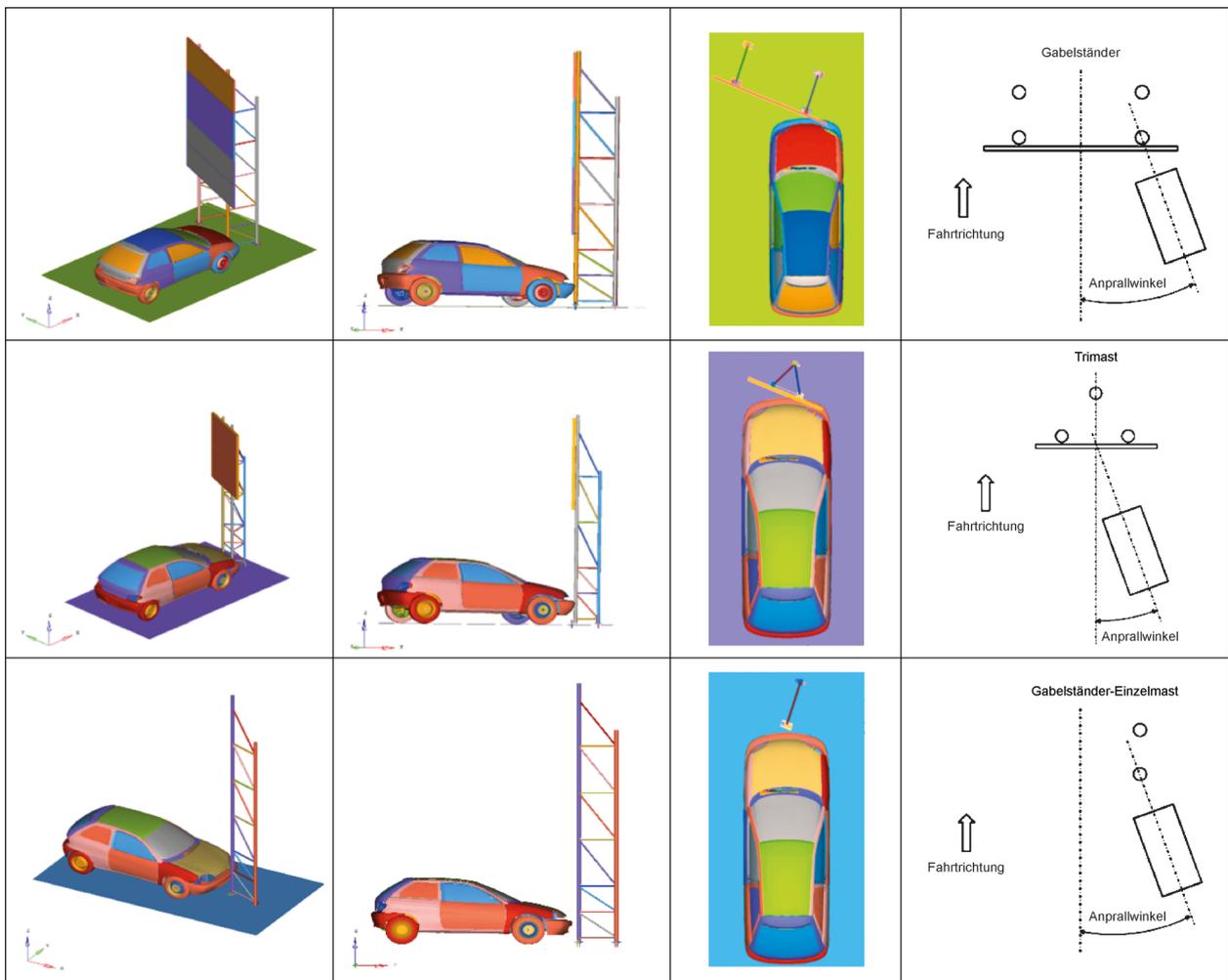


Bild 2-24: Anprallkonfiguration beim Gabelständer, Trimast und Gabelständer-Einzelmast

2.5.2 Gabelständer Typ 750 x 76

2.5.2.1 Referenzmodell

Entsprechend den Konstruktionsvorgaben ist das letzte Feld des Gabelständers Typ 750 x 76 durch zwei gleich große Ausgleichsfelder zu ersetzen, sofern das letzte Feld kleiner als die halbe Fachhöhe wäre (Bild 2-25 a)). Durch einen Fertigungsfehler wurde das letzte Feld nicht durch zwei gleich große Ausgleichsfelder ersetzt, sondern von oben zäh-

lend die Felder mit jeweils 1.000 mm Abstand ausgeführt, sodass das letzte Feld kleiner als die halbe Fachhöhe war (Bild 2-25 d)).

Für die Simulationsmatrix wurde das untere Ausgleichsfeld allerdings so angepasst, dass die untersten beiden Felder gleich groß ausgeführt sind und den Konstruktionsvorgaben entsprachen (Bild 2-25 c)) und als Referenzmodell bezeichnet. Das Referenzmodell entspricht daher nicht der konstruktiven Ausführung des Validierungsmodells.

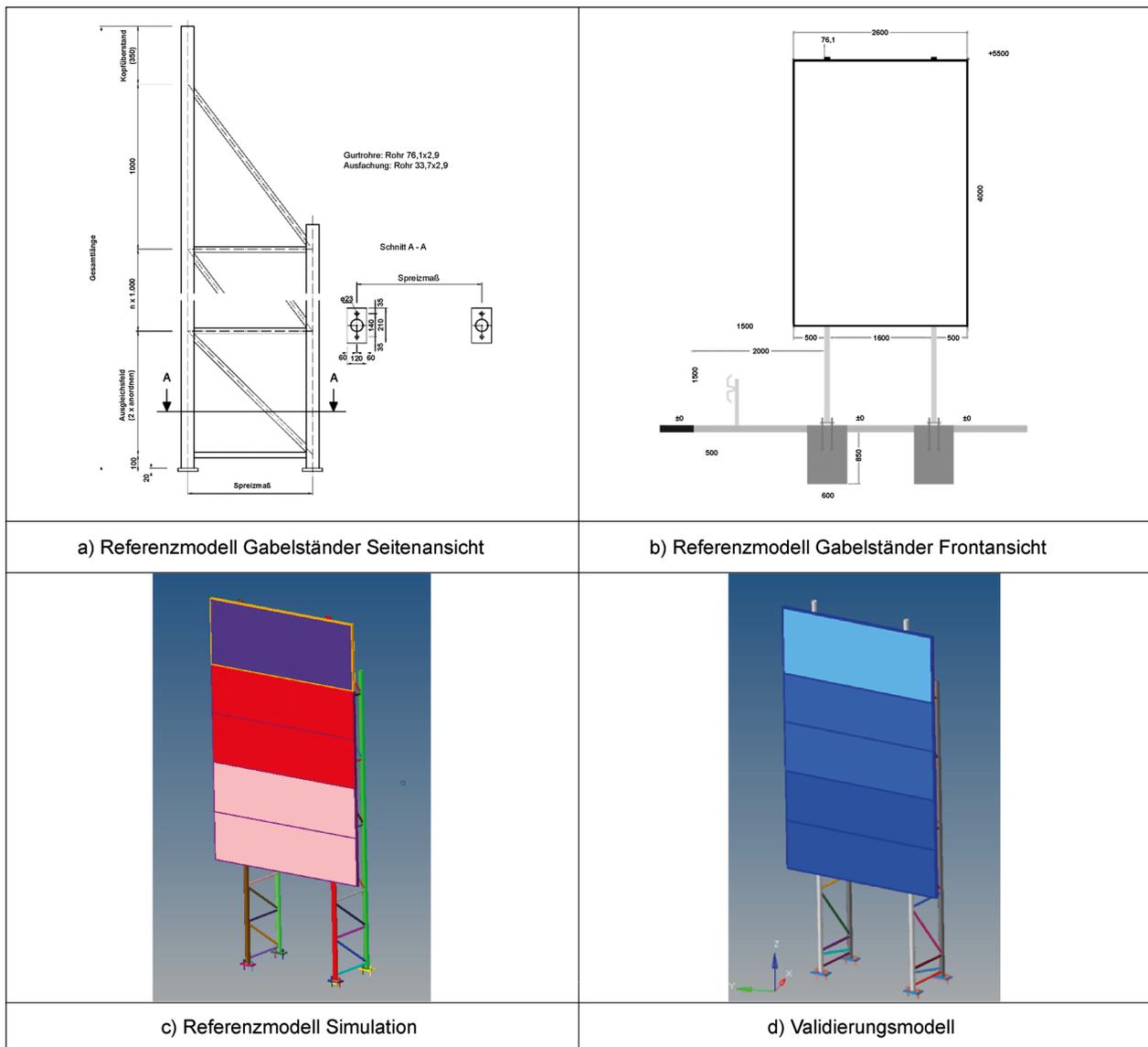


Bild 2-25: Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Validierungsmodell	-	-
b)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	x	x

Tab. 2-20: Simulationsmatrix des Referenzmodells für den Gabelständer Typ 750 x 76

Es wurden zwei Varianten simuliert (Tabelle 2-20). In der ersten Variante wurden die Fußplatten beweglich ausgeführt und in der zweiten Variante wurden die Fußplatten fixiert. Die Fußplatten in der Ausgangslage und Orientierung waren dabei sowohl bei der fixierten als auch bei der beweglichen Varianten ident. Zum Vergleich der Ergebnisse des ASI und THIV dient das Validierungsmodell, welches nicht erneut simuliert wurde. In der Tabelle sind die durchgeführten Simulationen mit einem „X“ gekennzeichnet.

2.5.2.2 Änderungen der Diagonalrohranordnungen

Ausgehend vom Referenzmodell wurde die Anordnung der Diagonalrohre verändert (Bild 2-26). Im Vergleich zu dem Referenzmodell (Bild 2-26 a)) wurden in den Modifikationen:

- b) das unterste, diagonal verlaufende Diagonalrohr entfernt,
- c) das unterste, horizontal verlaufende Diagonalrohr entfernt,
- d) die beiden Ausgleichsrohrfelder/-ebenen durch ein zusammenhängendes ersetzt,

- e) die beiden Ausgleichsrohrfelder entfernt unter Beibehaltung des untersten, horizontal verlaufenden Diagonalrohres,
- f) die beiden Ausgleichsrohrfelder entfernt,
- g) doppelt so große Materialsteifigkeit in den Diagonalrohren als im Referenzmodell.

Prinzipiell liegen die Fußplatten nicht auf dem Fundament auf, sondern es besteht ein Abstand zum Fundament, welcher über die Ankerstäbe und Muttern eingestellt werden kann. Beim Anprall verbiegt sich der Ankerstab und wird für die Simulationen als beweglich bezeichnet. Um den Einfluss auf das Verhalten beim Anprall auch von aufliegenden Fußplatten herauszufinden, wurde jede Variante von a) bis g) sowohl als bewegliche als auch fixierte Variante simuliert. Fixierte Fußplatten wären ein Extremfall, wenn beim Aufstellen von Gabelständern kein Abstand zum Boden eingehalten werden kann bzw. der Spalt zwischen der Fußplatte und Boden mit einem entsprechenden Material aufgefüllt werden würde. Die Simulationsmatrix mit den Modifikationen ist in Tabelle 2-21 angegeben. Es wurden die einzelnen Varianten jeweils mit beweglicher und fixierter Fußplatte simuliert.

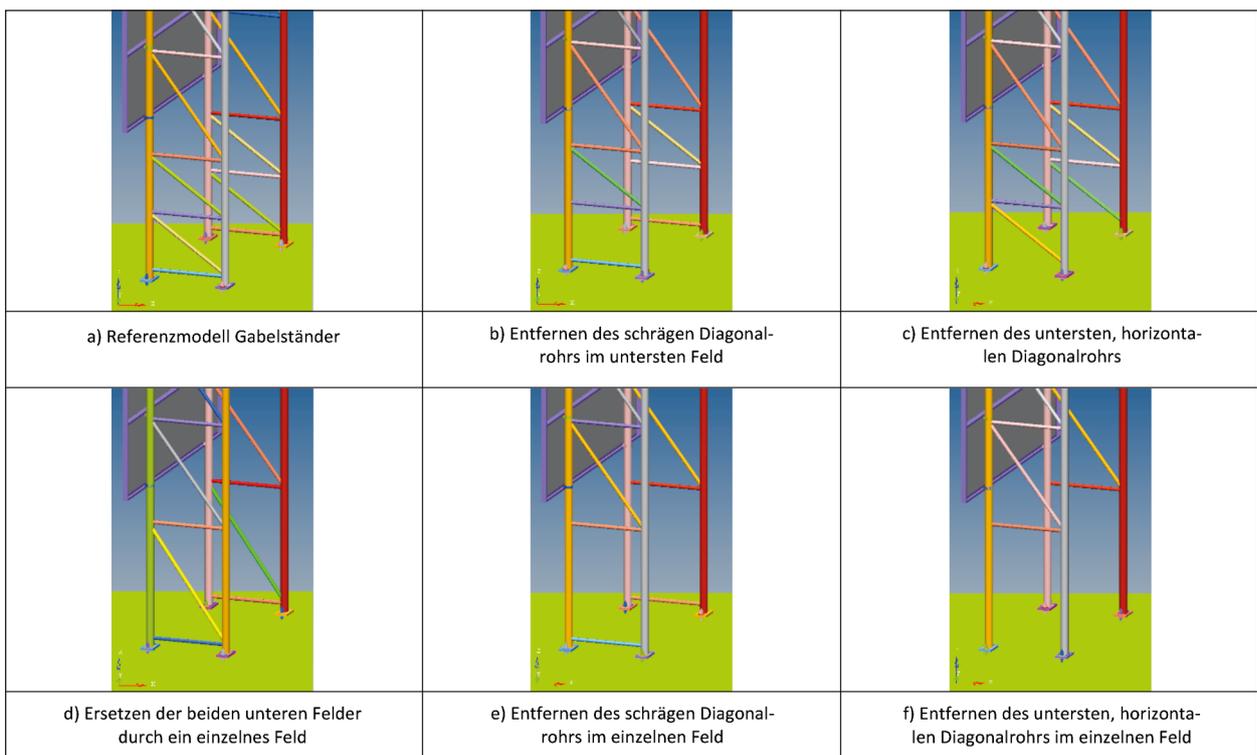


Bild 2-26: Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Gabelständer Typ 750 x 76. a) Referenzmodell. b) bis f) Modifikationen des Referenzmodells

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	-	-
b)	Entfernen des schrägen Diagonalrohrs im untersten Feld	x	x
c)	Entfernen des untersten, horizontalen Diagonalrohrs	x	x
d)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld	x	x
e)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld und entfernen des schrägen Diagonalrohrs im einzelnen Feld	x	x
f)	Entfernen des untersten, horizontalen Diagonalrohrs im einzelnen Feld	x	x
g)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76 + doppelte so große Materialsteifigkeit der Diagonalrohre	x	x

Tab. 2-21: Simulationsmatrix durch Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Gabelständer Typ 750 x 76. a) Referenzmodell. b) bis g) Modifikationen des Referenzmodells.

Variante	Bezeichnung	Position	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	-	-	-
b)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr	1	x	x
c)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	1+6	x	x
d)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	2	x	x
e)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	2+8	x	x
f)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr	3	x	x
g)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	3+5	x	x
h)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	4	x	x
i)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	4+7	x	x

Tab. 2-22: Simulationsmatrix durch Gurtrohrschwächung für den Gabelständer Typ 750 x 76

2.5.2.3 Schwächung der Gurtrohre

Alternativ zur Veränderung der Anordnung der Diagonalrohre wurden die Gurtrohre geschwächt. Dies erfolgte am vorderen bzw. hinteren Gurtrohr, etwa 50 mm über bzw. unter dem untersten, horizontal verlaufenden Diagonalrohr bzw. etwa 50 mm unterhalb des zweiten, horizontal verlaufenden Diagonalrohres (Bild 2-27). Die Schwächung erfolgte durch einen keilförmigen Einschnitt von etwa 50 % des Rohrumfanges, d.h. der Einschnitt reichte bis zur Symmetrieachse des Rohres (schematisch dargestellt in Bild 2-27 a) und b)). Es wurden an der Außenseite des Gurtrohres drei Elemente und hin zur Mitte ein Element entfernt, sodass angenähert ein keilförmiger Einschnitt entstand. Der Bereich wurde dabei nicht neu vernetzt.

In Bild 2-27 (c)) sind die Varianten für die Gurtrohrschwächung mit Ziffern markiert. Die Schwächung erfolgte an den Positionen ober- und unterhalb des

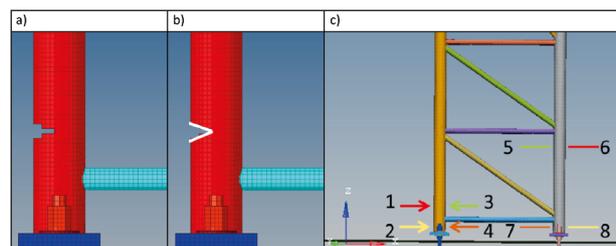


Bild 2-27: Gurtrohrschwächung am Gabelständer. Keilförmiger Einschnitt am Gurtrohr erfolgte durch Entfernen von Elementen a), optisch hervorgehoben durch die weiße Markierung b). Untersuchte Positionen am vorderen (Position 1-4) sowie am hinteren Gurtrohr (Position 5-8) c).

untersten horizontal verlaufenden Diagonalrohres innen- und/oder außenseitig des vorderen (zuerst angeprallten) Gurtrohres. Jede Positionsvariante (1-4) wurde zusätzlich mit jeweils einer Schwächung (5-8) am hinteren Gurtrohr sowie als Ausführung mit beweglicher bzw. fixierter Fußplatte simuliert (Tabelle 2-22).

2.5.2.4 Reduktion Schweißnahtumfang Gurtrohr zu Fußplatte

Als weitere Variation wurde der Umfang der Schweißnaht an der Anbindung des Gurtrohres zur Fußplatte durch zwei Ansätze untersucht (Bild 2-28):

- 1) Reduktion durch einen keilförmigen Einschnitt an der Verbindung zur Fußplatte sowie
- 2) Reduktion durch Schweißnahtausparung an der Verbindung zwischen Gurtrohr und Fußplatte.

Der Einschnitt wurde keilförmig unter einem Winkel von etwa 45 Grad unmittelbar über der Fußplattenanbindung variiert. Um dies in dem Simulations-

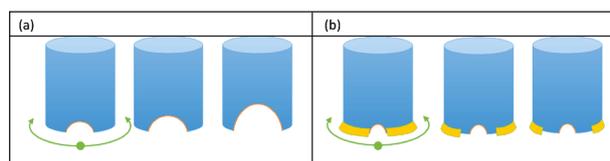


Bild 2-28: Schematische Darstellung der Reduktion des Schweißumfangs mittels keilförmigen Einschnitt (a) und Schweißnahtausparung an der Verbindung zwischen Gurtrohr und Fußplatte (b).

modell zu realisieren, wurden Schalenelemente derart gelöscht, dass sich näherungsweise ein keilförmiger Einschnitt mit der entsprechenden Keilgröße ergab (Bild 2-29).

Für die Modellierung der Reduktion des Schweißnahtumfangs wurden die entsprechenden Verbindungen zwischen Gurtrohr- und Fußplattenelementen (Tied contact) entfernt.

Beide Varianten der Reduktion des Schweißnahtumfangs wurden jeweils innenseitig des Gurtrohres realisiert, beginnend an der Position des Zinkabflussloches. Die Reduktion wurde schrittweise vergrößert, wobei die exakte Schrittgröße von der Elementkantenlänge abhing. Der Reduktionsgrad wurde bis ca. 42 % erhöht, sodass noch 58 % des Schweißnahtumfangs verblieben. Nichtreduzierte Schweißnahtumfänge weisen, aufgrund der beiden Zinkabflusslöcher, bereits im Referenzmodell eine initiale Reduktion des Schweißnahtumfangs von etwa 8 % auf, d.h. der Schweißnahtumfang beträgt 92 %. Zur Beschreibung der Einschnittsgröße bzw. die Schweißnahtausparung wird der Anteil im Rohrumfang angegeben (Tabelle 2-23). Die Simulationen erfolgten mit einer beweglichen und fixierten Fußplatte. Die Modifikationen wurden schrittweise

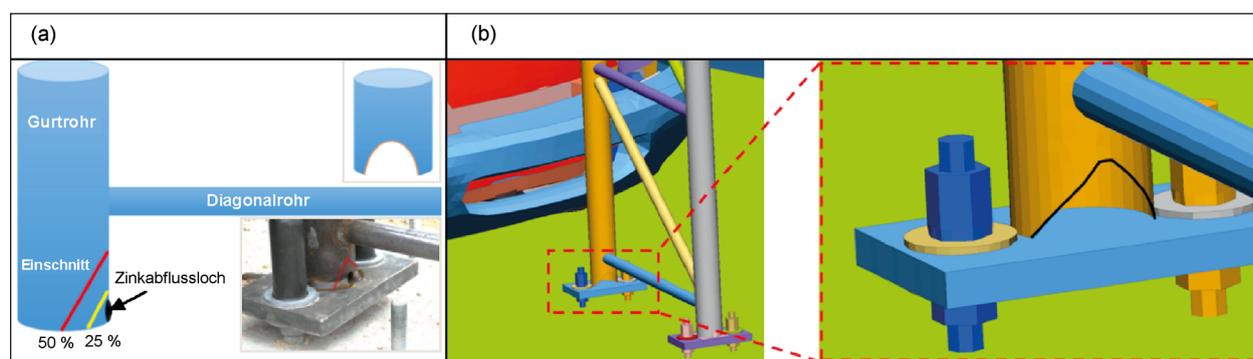


Bild 2-29: Reduktion des Schweißnahtumfangs mittels Einschnitt. (a) Der Einschnitt variiert bei gleichbleibendem Schnittwinkel (kleines Bild: schematischer Einschnitt am Gurtrohr). (b) Schematische Darstellung im Simulationsmodell am Beispiel einer innenseitigen Reduktion von etwa 40 % des Gesamtumfangs.

Variante	Bezeichnung	Keilförmiger Einschnitt		Schweißnahtausparung	
		Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell: 8 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt)	-	-	-	-
b)	16 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)		x		
c)	23 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)		x	x	x
d)	30 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	x	x	x	x
e)	35 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	x	x	x	x
f)	42 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	x		x	

Tab. 2-23: Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt oder Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Gabelmasts Typ 750 x 76 mm an der Anbindung zur Fußplatte

geändert, sodass, z. B. wie in Variante (f), nur die Version mit beweglicher Fußplatte und Reduktion des Schweißnahtumfanges simuliert wurde. In vorangegangenen Simulationen durchläufen mit geringerer Reduktion des Schweißnahtumfanges und fixierten Platten wurde bereits ein Abreißen der Gurtrohre festgestellt. Daher wurde in Variante (f) nur mit beweglicher Fußplatte simuliert.

2.5.3 Gabelständer Typ 500 x 60

Der Gabelständer Typ 500 x 60 wurde mit einer Ständerhöhe von 3,0 m ausgeführt (Bild 2-30). Der Abstand zwischen den Gurtrohren ist 1.600 mm. Das Schild hat eine Größe von 2.200 x 1.500 mm. Die Höhe des Schildes zum Boden beträgt 1.500 mm. Der Gabelständer wurde mit beweglichen und fixierten Fußplatten simuliert (Tabelle 2-24).

2.5.4 Prinzipsimulationen an Gabelständer-Einzelmast

Die Kennwerte ASI und THIV sind im Wesentlichen von einem Abreißen der Gurtrohre abhängig. Um

die Simulationszeit zu optimieren, wurden daher Prinzipsimulationen am Einzelständer durchgeführt. Das Schild und der zweite Ständer blieben unberücksichtigt.

Es wurden folgende Parameter variiert:

- Spreizmaß
- Gurtrohrdurchmesser
- Ständerhöhe
- Spreizmaß und Ständerhöhe bei gleichem Gurtrohrdurchmesser
- Anprallseite

2.5.4.1 Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast

Um den Einfluss des Schildes auf die Ergebnisse bewerten zu können, wurde das Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 mm auch als Einzelmast simuliert (Tabelle 2-25). Dieser dient für die Prinzipsimulationen am Einzelmast als Referenzmodell.

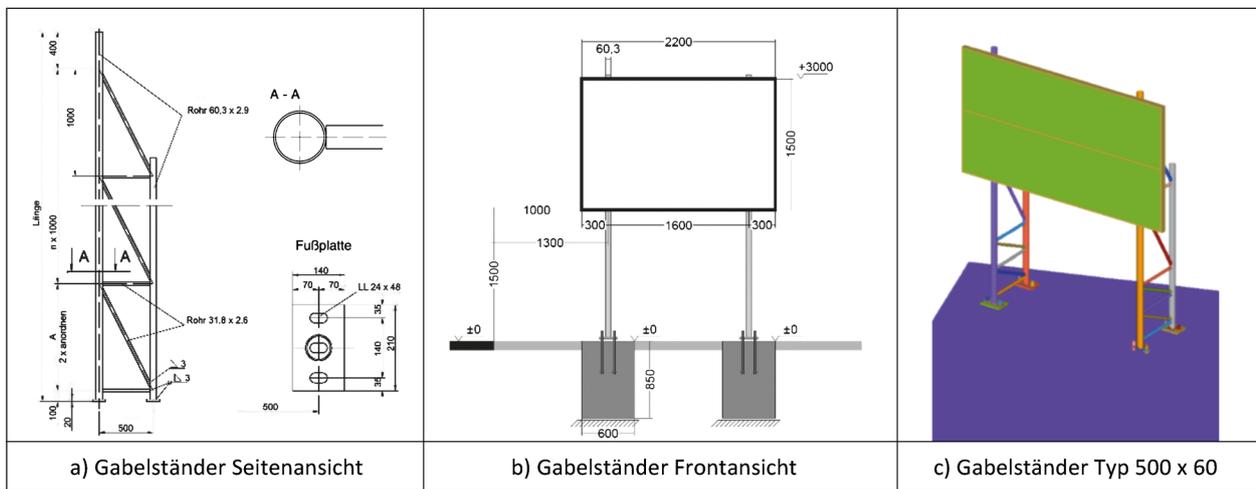


Bild 2-30: Gabelständer Typ 500 x 60 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Gabelständer Typ 750 x 76 (Referenzmodell)	-	-
b)	Gabelständer Typ 500 x 60	x	x

Tab. 2-24: Simulationsmatrix für den Gabelständer Typ 500 x 60

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76	x

Tab. 2-25: Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76

2.5.4.2 Variation der Spreizung

Um den Einfluss der Spreizung auf das Abrissverhalten des Gabelständers beurteilen zu können, wurden Simulationen am Einzelständer mit einem Gurtrohrdurchmesser von 76 mm für Spreizungen von 750 mm, 1.000 mm und 1.300 mm simuliert (Bild 2-31). Die Höhe des Gabelständers betrug 5,5 m. Die Simulationen erfolgten mit einer innenseitigen Reduktion des Schweißnahtumfangs von etwa 42 % durch eine Schweißnahtausparung (Tabelle

2-26). Als Vergleich diente der ungeschwächte Gabelständer-Einzelmast (Referenzmodell). Da bereits in den Simulationen mit dem ungeschwächten Gabelständer Typ 750 x 76 mm kein Abreißen der Gurtrohre festgestellt werden konnte, wurde angenommen, dass dies auch bei einer größeren Spreizung nicht der Fall sein wird. Daher wurden die unterschiedlichen Spreizungen mit einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % simuliert.

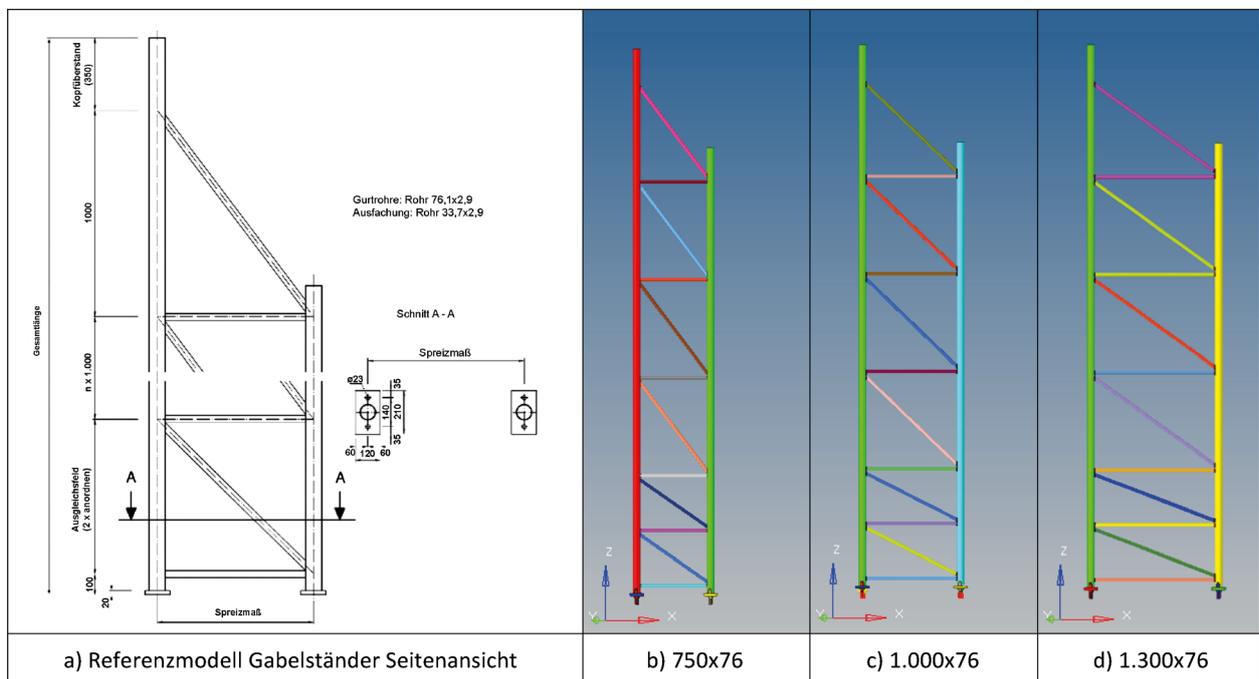


Bild 2-31: Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung, gleicher Ständerhöhe und bei gleichem Gurtrohrdurchmesser.
b) Referenzmodell des Typs 750 x 76 und Änderung des Spreizmaßes bei c) und d).

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76	-
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 + Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 %	x
c)	Gabelständer-Einzelmast Typ 1.000 x 76 + Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 %	x
d)	Gabelständer-Einzelmast Typ 1.300 x 76 + Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 %	x

Tab. 2-26: Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung, gleicher Ständerhöhe bei gleichem Gurtrohrdurchmesser und Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % durch Schweißnahtausparung

2.5.4.3 Variation des Gurtrohrdurchmessers

Aufbauend auf dem Referenzmodell des Gabelständer-Einzelmasts Typ 750 x 76 mm wurde der Gurtrohrdurchmesser auf 60 mm reduziert (Bild 2-32). Die Höhe des Gabelständers betrug 5,5 m. Von oben zählend wurden die Felder mit jeweils 1.000 mm Abstand ausgeführt. Das letzte Feld des Gabelständers wurde durch zwei gleich große Ausgleichsfelder ersetzt. Die Diagonalrohre blieben unverändert. Ebenso wurde die Spreizung nicht geändert.

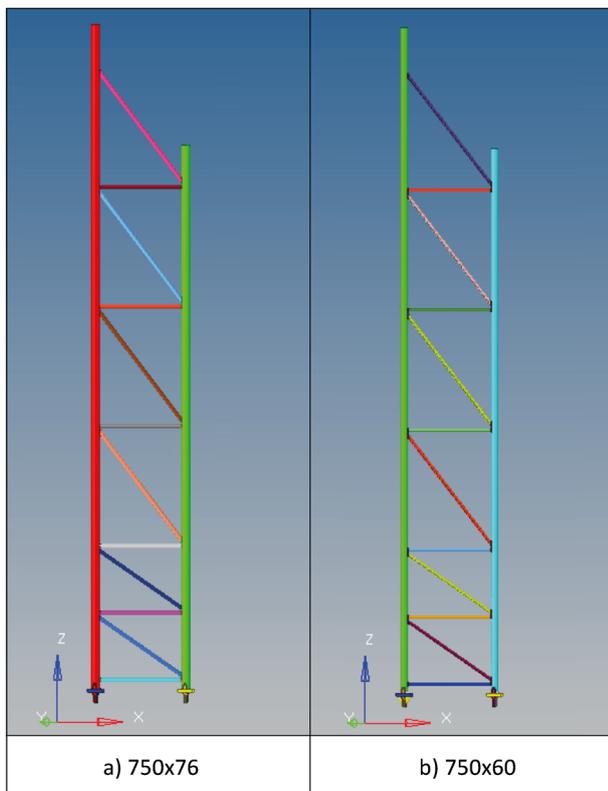


Bild 2-32: Gabelständer-Einzelmast bei gleicher Spreizung, gleichen Ständerhöhen und unterschiedlichem Gurtrohrdurchmesser.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 (Referenzmodell)	-
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60	x

Tab. 2-27: Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast gleicher Spreizung und unterschiedlichem Gurtrohrdurchmesser

2.5.4.4 Variation der Gabelständerhöhe

Des Weiteren wurde der Einfluss der Ständerhöhe untersucht. Da beim Typ 750 x 76 mm der Grenzwert des THIV nach EN 12767 nicht unterschritten werden konnte, wurde als Referenzmodell zum Vergleich der Simulationsergebnisse der Gabelständer Typ 750 x 60 mm herangezogen (Bild 2-33). Die Ständerhöhe wurde zwischen 5,5 m und 2,5 m variiert.

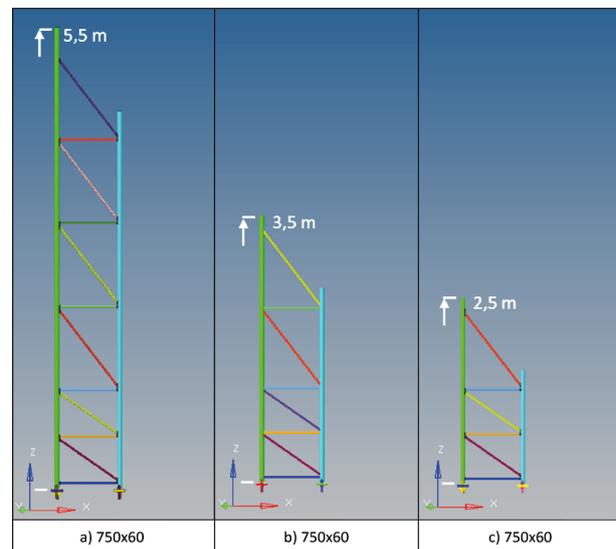


Bild 2-33: Gabelständer-Einzelmast bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen. a) Referenzmodell Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 5,5 m. b) Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 3,5 m und c) Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 2,5 m.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 5,5 m (Referenzmodell)	-
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 3,5 m	x
c)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 2,5 m	x

Tab. 2-28: Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60 bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen

2.5.4.5 Variation der Spreizung und Ständerhöhe bei gleichem Gurtrohrdurchmesser

Für den Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60 wurde das Spreizmaß auf 500 mm reduziert. Die Ständerhöhe wurde auf 3,0 m geändert. Als Referenzmodell wird der Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60 mit einer Ständerhöhe von 3,5 m verwendet.

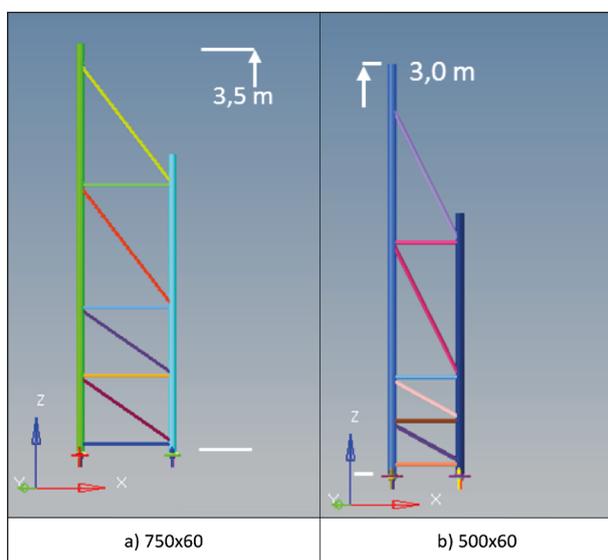


Bild 2-34: Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen. a) Referenzmodell Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 3,5 m. b) Typ 500 x 60 mit einer Höhe von 2,5 m.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 3,5 m (Referenzmodell)	-
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 500 x 60, Ständerhöhe 2,5 m	x

Tab. 2-29: Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen

2.5.4.6 Variation der Anprallseite

In der derzeitigen Ausführung der Gabelständer sind die schrägen Diagonalrohre so angeordnet, dass sich diese am hinteren Gurtrohr bei einem Anprall zusätzlich abstützen. Um den Einfluss dieser Versteifung zu bewerten wurde der Anprallpunkt um 180° gedreht (Bild 2-35). Die konstruktive Ausführung blieb gleich.

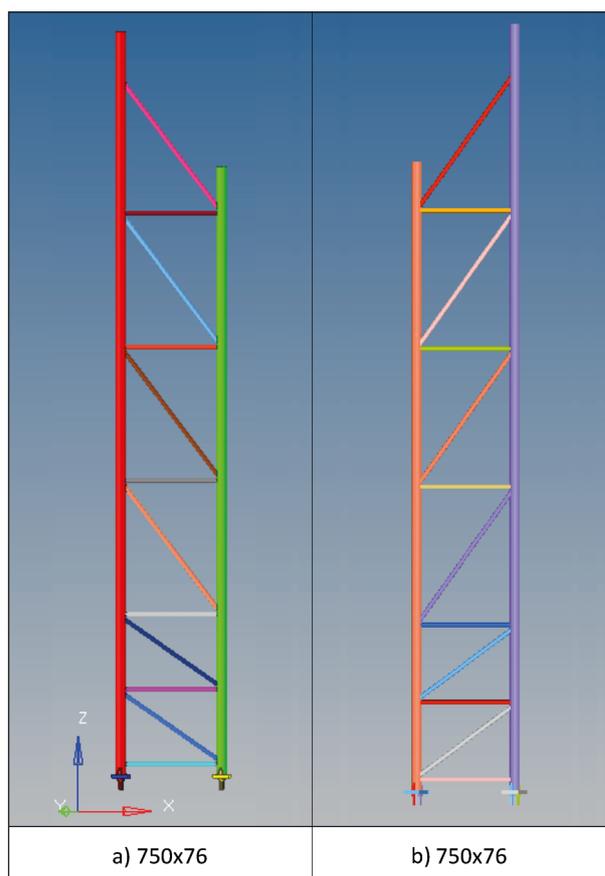


Bild 2-35: Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 mit einer Höhe von 5,5 m. a) Referenzmodell, b) Gabelständer-Einzelmast um 180° gedreht

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 (Referenzmodell)	-
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 + 180° gedrehte Anprallposition	x

Tab. 2-30: Simulationsmatrix Gabelständer Einzelmast Typ 750 x 76 und um 180° gedrehte Anprallposition am Gurtrohr

2.5.5 Trimast Typ 500 x 60

2.5.5.1 Referenzmodell

Das Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 wurde entsprechend dem Validierungsmodell aufgebaut. Gemäß den Konstruktionsvorgaben ist auch hier das letzte Feld durch zwei gleich große Ausgleichsfelder zu ersetzen, sofern das letzte Feld kleiner als die halbe Fachhöhe wäre (Bild 2-36 a)). Durch einen Fertigungsfehler wurde das letzte Feld für die Validierungsversuche nicht durch zwei gleich große Ausgleichsfelder ersetzt. In den Validierungsversuchen wurden die einzelnen Felder von oben zählend mit jeweils 1.000 mm Abstand ausgeführt. Das letzte Feld sollte jedoch geteilt sein und durch zwei Felder ausgeführt werden. Die Ständerhöhe war 4.550 mm. Das Validierungsmodell entsprach

dem Trimast der Versuche (Bild 2-36 d)). Für das Referenzmodell wurde das untere Ausgleichsfeld nun so angepasst, dass die untersten beiden Felder gleich groß ausgeführt sind (Bild 2-36 c)) und den Konstruktionsvorgaben entsprachen.

Es wurden zwei Varianten simuliert (Tabelle 2-31). In der ersten Variante wurden die Fußplatten beweglich ausgeführt und in der zweiten Variante wur-

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Validierungsmodell	x	-
b)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	x	x

Tab. 2-31: Simulationsmatrix des Referenzmodells für den Trimast Typ 500 x 60

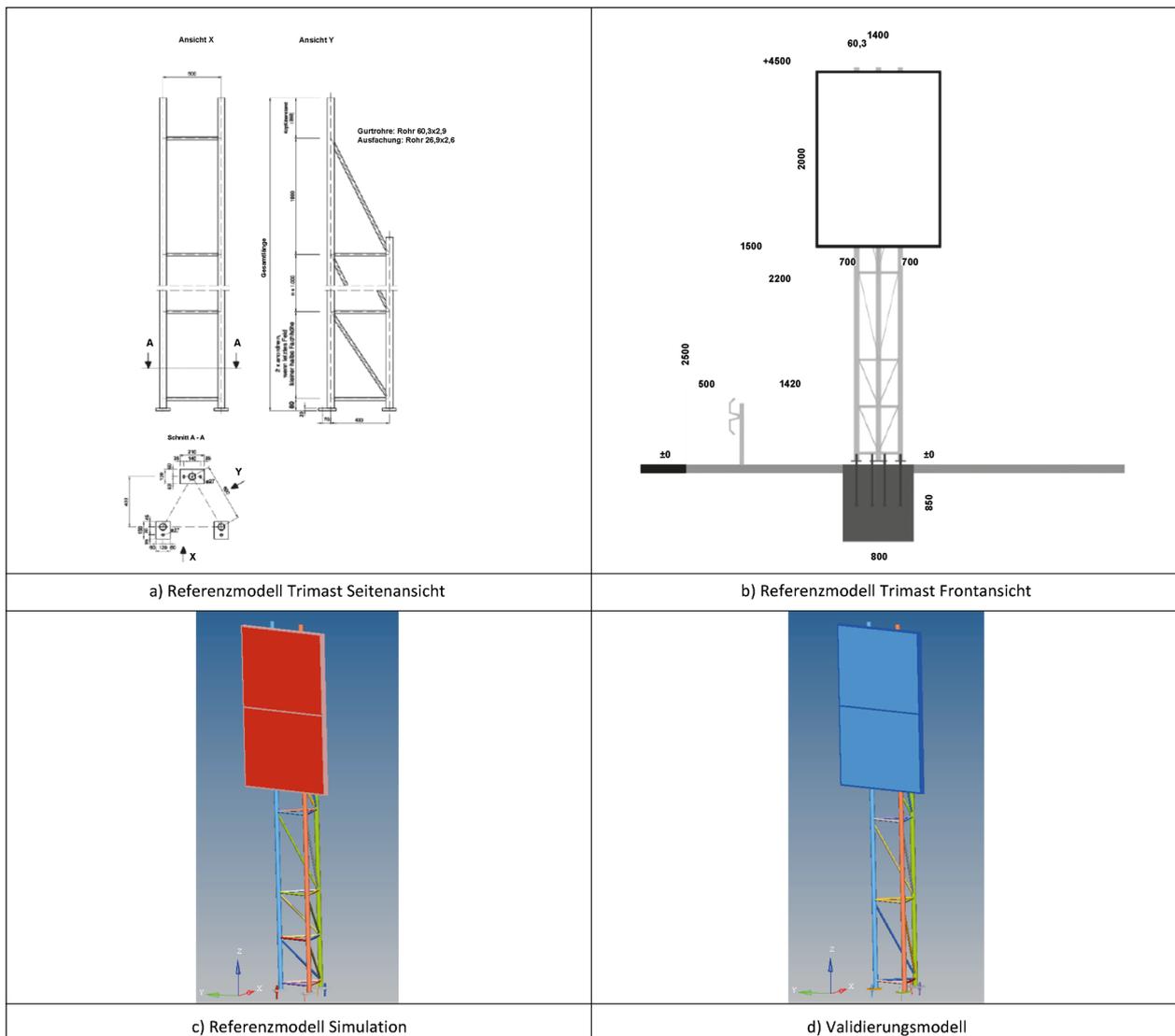


Bild 2-36: Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH

den die Fußplatten fixiert. Als Vergleich dient das Ergebnis des Validierungsmodells. Das Schild hat eine Größe von 2.000 x 1.400 mm.

2.5.5.2 Änderungen der Diagonalrohranordnungen

Ausgehend vom Referenzmodell wurde die Anordnung der Diagonalrohre verändert (Bild 2-37). Zum Vergleich mit dem Referenzmodell (Bild 2-26 a)) wurden in den Modifikationen:

- b) die horizontalen, unteren Diagonalrohre im untersten Feld entfernt.
- c) die beiden untersten Felder kombiniert und die schrägen Diagonalrohre entfernt.
- d) die horizontalen und schrägen Diagonalrohre der beiden unteren Felder entfernt.

Die Simulationsmatrix mit den Modifikationen ist in Tabelle 2-32 angegeben. Es wurden die einzelnen Varianten jeweils mit beweglicher und fixierter Fußplatte simuliert.

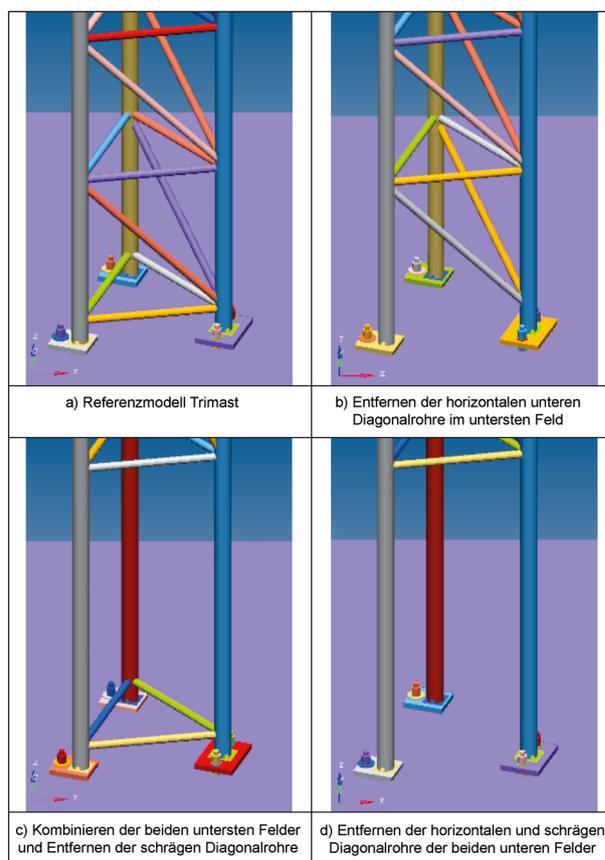


Bild 2-37: Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Trimast 500 x 60. a) Referenzmodell. b) bis d) Modifikationen des Referenzmodells mit entfernten Diagonalrohren im Bereich der beiden Ausgleichsrohrebenen

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	-	-
b)	Entfernen der horizontalen unteren Diagonalrohre im untersten Feld	x	x
c)	Kombinieren der beiden untersten Felder und Entfernen der schrägen Diagonalrohre	x	x
d)	Entfernen der horizontalen und schrägen Diagonalrohre der beiden unteren Felder	x	x

Tab. 2-32: Simulationsmatrix durch Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Trimast 500 x 60. a) Referenzmodell. b) bis d) Modifikationen des Referenzmodells mit entfernten Diagonalrohren im Bereich der beiden Ausgleichsrohrebenen

2.5.5.3 Schwächung der Gurtrohre

Die Gurtrohrschwächung erfolgte innen- und außenständig unterhalb des unteren horizontalen Diagonalrohres (Bild 2-38) mit und ohne die unteren Horizontalrohre. Die Schwächung erfolgte keilförmig und betrug etwa 50 % des Rohrumfangs und reichte bis zur Symmetrieachse der Gurtrohre. Für den keilförmigen Einschnitt wurden an der Außenseite drei und zur Mitte hin ein Element entfernt. Der Bereich wurde dabei nicht neu vernetzt. Die Schwächung wurde etwa 50 mm unterhalb der untersten, horizontal verlaufenden Diagonalrohre eingefügt.

Für eine weitere Variante wurde die Schwächung der vorderen Gurtrohre um 90° gedreht. Es wurden die Varianten jeweils für bewegliche und fixierte Fußplatten simuliert. Die Simulationsmatrix ist in Tabelle 2-33 zusammengefasst.

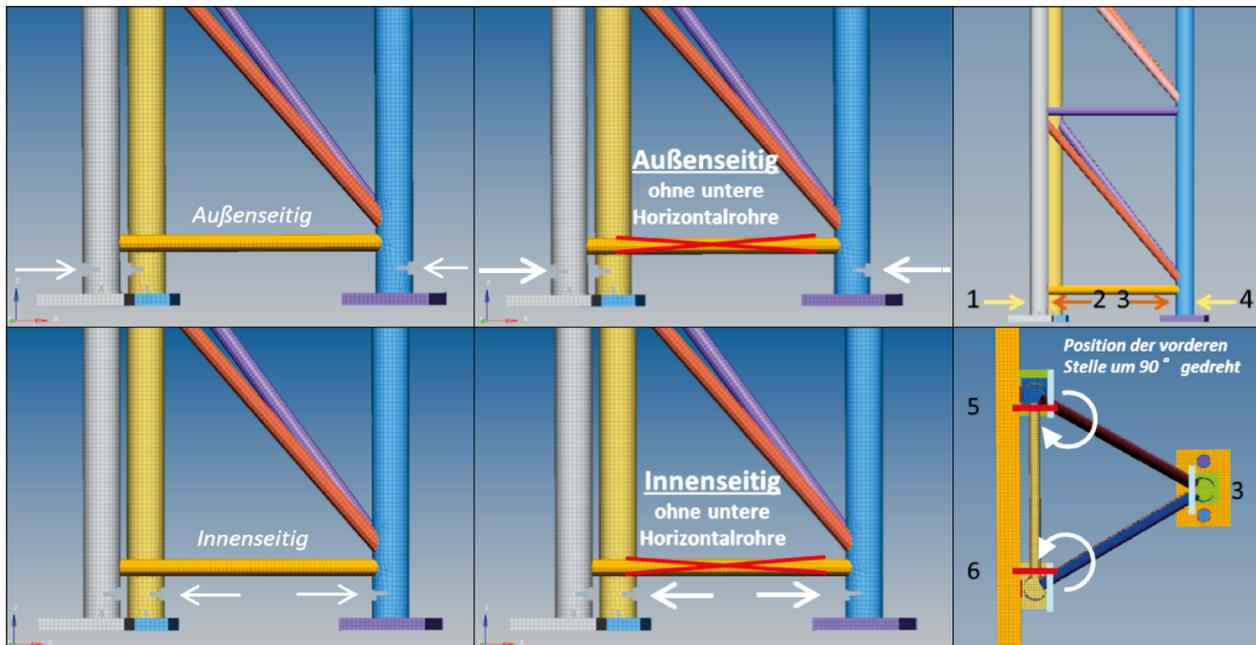


Bild 2-38: Gurtrohrschwächung am Trimast mit und ohne untere Horizontalrohre. Keilförmiger Einschnitt am Gurtrohr an der Außen- bzw. Innenseite (Position 1-4) sowie Verdrehen des Einschnitts um 90° an den beiden vorderen Gurtrohren (Position 5-6).

Variante	Bezeichnung	Position	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	-	-	x
b)	Außenseitige Schwächung der Gurtrohre	1+4	x	x
c)	Innenseitige Schwächung der Gurtrohre	2+3	x	x
d)	Außenseitige Schwächung der Gurtrohre + entfernen unteres Horizontalrohr	1+4	x	x
e)	Innenseitige Schwächung der Gurtrohre + entfernen unteres Horizontalrohr	2+3	x	x
f)	Schwächung der vorderen Gurtrohre innenseitig gedreht und innenseitig ungedreht am hinteren Gurtrohr	5+6+3	x	x

Tab. 2-33: Simulationsmatrix durch Gurtrohrschwächung für den Trimast

2.5.5.4 Reduktion Schweißnahtumfang Gurtrohr zu Fußplatte

Für die Bestimmung des für eine Umfahrbarkeit nötigen Schwächungsgrades an den Trimastgurtrohren erfolgte eine Schweißnahtausparung zwischen Gurtrohr und Fußplatte (Bild 2-39). Zusätzlich wurden die Simulationen mit (Bild 2-39 a)) und ohne (Bild 2-39 b)) die untersten, horizontal verlaufenden Diagonalrohre durchgeführt, sowohl für bewegliche als auch fixierte Fußplatten. Für die Varianten ohne die untersten, horizontal verlaufenden Diagonalrohre wurde die Reduktion des Schweißnahtumfangs um 90° auf die Innenseite der beiden vorderen Gurtrohre gedreht. Es sollte der Einfluss der Schweißnahtausparung hinsichtlich der Positionierung bewertet werden. Am hinteren Gurtrohr blieb die Schwächung an der Vorderseite. Die Reduktion des Schweißnahtumfangs erfolgte schrittweise bis etwa 52 % des Rohrumfanges (siehe Bild 2-28 b)). Aufgrund der beiden Zinkabflusslöcher ist der Schweiß-

nahtumfang bereits auf 84 % reduziert. Die Simulationsmatrix dazu ist in Tabelle 2-34 und Tabelle 2-35 zusammengefasst.

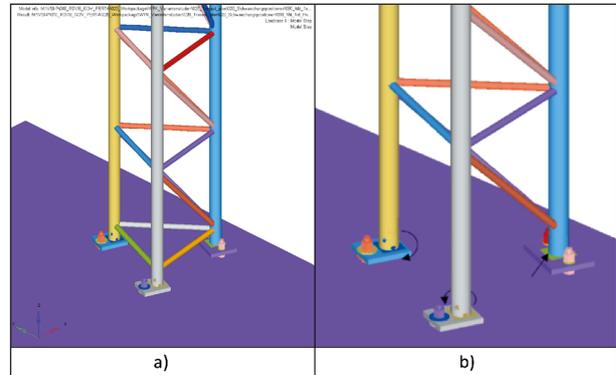


Bild 2-39: Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der Anbindung zur Fußplatte mit (a)) und ohne (b)) unterste horizontalen Diagonalrohren, wobei im Fall b) die Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre um 90° zur Innenseite gedreht ist.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) mit untersten horizontalen Diagonalrohren	-	x
b)	37 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) mit untersten horizontalen Diagonalrohren	x	x
c)	44 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) mit untersten horizontalen Diagonalrohren	x	x

Tab. 2-34: Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der Anbindung zur Fußplatte

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) mit untersten horizontalen Diagonalrohren	-	-
b)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) ohne unterste horizontale Diagonalrohre	-	-
c)	37 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste horizontale Diagonalrohre + um 90° zur Innenseite gedrehte Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre	x	x
d)	44 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste horizontale Diagonalrohre + um 90° zur Innenseite gedrehte Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre	x	x
e)	52 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste horizontale Diagonalrohre + um 90° zur Innenseite gedrehte Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre	x	x

Tab. 2-35: Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der Anbindung zur Fußplatte + um 90° zur Innenseite gedrehte Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre

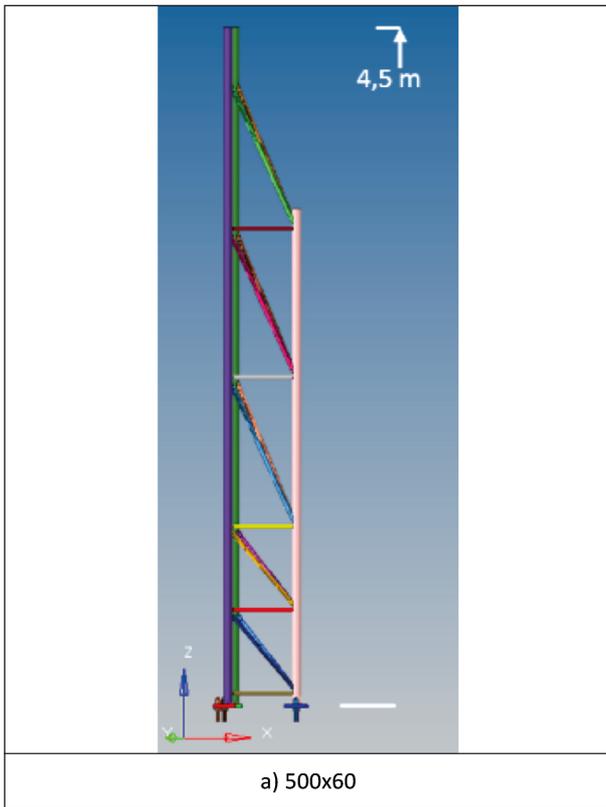


Bild 2-40: Trimast Typ 500 x 60 mit einer Ständerhöhe von 4,5 m ohne Schild

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Trimast ohne Schild Typ 500 x 60	x	-

Tab. 2-36: Simulationsmatrix Trimast ohne Schild Typ 500 x 60

2.5.6 Prinzipsimulationen am Trimast

2.5.6.1 Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild

Um den Einfluss des Schildes auf die Ergebnisse bewerten zu können, wurde der Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild mit einer Höhe von 4,5 m simuliert (Tabelle 2-36). Die Fußplatte wurde als bewegliche Version ausgeführt, da für den Trimast Typ 500 x 60 mit Schild und fixierter Fußplatte ein deutlich höherer ASI als bei beweglichen Fußplatten festgestellt wurde. Es wurde daher angenommen, dass in der Simulation mit fixierten Fußplatten keine Verbesserung in der Prinzipsimulation erreicht wird. Der Trimast ohne Schild Typ 500 x 60 dient in weiterer Folge als Referenzmodell.

2.5.6.2 Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild

Zur Überprüfung der Umfahrbarkeit des Trimast Typ 350 x 48 erfolgte eine Prinzipsimulation ohne Schild (Bild 2-41). Hierbei wurde die Variante mit beweglichen Fußplatten untersucht, welche dem Trimast

Variante	Bezeichnung	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a)	Referenzmodell Trimast ohne Schild Typ 500 x 60	-	-
b)	Trimast ohne Schild Typ 350 x 48 mit fixierten, vorderen Fußplatten und beweglicher hinterer Fußplatte	x	x

Tab. 2-37: Simulationsmatrix Trimast Typ 350 x 48 mm

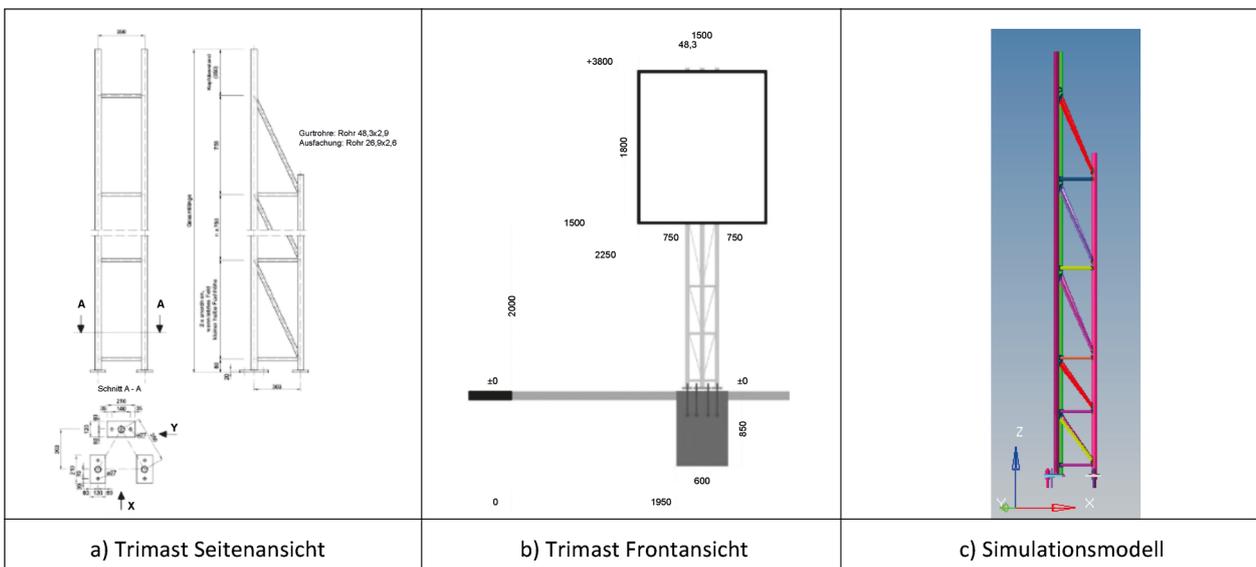


Bild 2-41: Referenzmodell des Trimast Typ 350 x 48 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH

mit Schild entspricht. Anschließend wurde eine Variante mit fixierten, vorderen Fußplatten und beweglicher hinterer Fußplatte simuliert.

3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse aus den Realversuchen und den Finiten Elementen Simulationen zusammengefasst.

3.1 Anprallversuche

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Anprallversuche dargestellt. Die Anprallversuche an den Gabelständer GS 750 x 76 mm sowie vom Trimast 500 x 60 mm bei 100 km/h und 35 km/h bildeten die Grundlage der Validierung der Simulationsmodelle.

Die Anprallversuche an den Gabelständer 750 x 60 mm und Trimast 350 x 48 mm erfolgten aufgrund der Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen. Auf Anregung des Betreuerkreises wurde für die abschließenden Versuche beschlossen, jene Objekte zu wählen, welche aufgrund der Simulationen als passiv sicher eingestuft werden können und nicht künstlich geschwächt werden müssten. Als künstlich geschwächt gelten jene Gabelständer und Trimasten, welche beispielsweise durch einen Einschnitt am Gurtrohr, Änderung des Schweißnahtumfangs oder Änderung der Diagonalrohranordnungen modifiziert wurden. In einer Untersuchung durch das Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH würde eine Reduktion des Schweißnahtumfangs, bei welcher der Gabelständer (Gurtrohrdurchmesser 76 mm) bzw. Trimast (Gurtrohrdurchmesser 60 mm) abreißt, den zulässigen Grenznormalkräften eines ungeschwächten Gurtrohres mit der nächstkleineren Dimension entsprechen. Daher wurde für die abschließenden Versu-



Bild 3-1: Anpralltest Gabelständer 750 x 76 mm bei 100 km/h vor dem Versuch

che die nächstkleinere Dimension der Gurtrohre gewählt und der Gabelständer mit Gurtrohrdurchmesser von 60 mm und der Trimast mit Gurtrohrdurchmesser von 48 mm getestet.

Weitere Bilder zu den Versuchen des Gabelständers sind in Anhang A und des Trimast in Anhang B dokumentiert.

3.1.1 Gabelständer GS 750 x 76 mm Anprallgeschwindigkeit 100 km/h

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 103,7 km/h und unter einem Winkel von 19,9° gegen das vordere, rechte Gurtrohr des Gabelständers. Nach dem Erstkontakt kommt es zum Abriss des rechten Gurtrohres von der Fußplatte und dem Verkehrsschild oberhalb der Schweißnähte (Bild 3-2), wobei das Fahrzeug seine Fahrtrichtung beibehält. Das Fahrzeug kollidiert nach dem Anprall mit der Betonleitwand, welche zur Absicherung des Testgeländes dient und wird in ein angrenzendes Kiesbett geleitet. Der abgerissene Ständer wird verformt und kommt etwa 28 m in Fahrtrichtung hinter dem Anprallpunkt und 7 m seitlich rechts der Anlaufspurrichtung zum Stillstand. Nach dem Erstkontakt (Abriss) kommt es zu keinem weiteren Kontakt zwischen Fahrzeug und Testobjektelementen. Das obere Drittel des Verkehrsschildes löst sich etwa zwei Sekunden nach dem Anprall und fällt zu Boden, der restliche Teil verbleibt am linken Ständer.

Es wurde ein ASI von 0,9 und ein THIV von 16,1 km/h festgestellt. Die Abprallgeschwindigkeit betrug ca. 80 km/h. Der Gabelständer Typ 750 x 76 mm wäre nach der EN 12767 als nicht energieabsorbierend (NE) einzustufen.



Bild 3-2: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 76 mm bei 100 km/h nach dem Versuch

3.1.2 Gabelständer GS 750 x 76 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 36,3 km/h und unter einem Winkel von 19,6° gegen das vordere, rechte Gurtrohr des Gabelständers (in Bewegungsrichtung des Fahrzeugs gesehen). Die Anprallgeschwindigkeit reichte nicht aus, um das angeprallte Gurtrohr abzureißen (Bild 3-4).

Nach dem Erstkontakt kommt es zur Verformung der Fahrzeugfront, das Fahrzeug wird bis zum Stillstand abgebremst und wird in entgegengesetzter Richtung zurückbewegt. Nach dem Ausrollen kommt es in einem Abstand von etwa 4 m vor dem Verkehrszeichen zum Stillstand. Am rechten Ständer (Erstanprall) kommt es zu Verformungen der beiden vertikalen Gurtrohre in der Höhe des Anprallpunktes. Am hinteren Gurtrohr (rechts) ist ein Einriss im Bereich der Schweißung der untersten Diagonalstrebe erkennbar. Trotz der Verformung des rechten Ständers kommt es zu keinem Loslö-



Bild 3-3: Anpralltest Gabelständer 750 x 76 mm bei ca. 35 km/h vor dem Versuch



Bild 3-4: Anprallsituation am Gabelständer bei ca. 35 km/h nach dem Versuch

sen des Schildes auf dieser Seite. Das Schild und der linke Ständer bleiben unbeschädigt. Es sind keine Systemteile in das Fahrzeuginnere eingedrungen.

Es wurde ein ASI von 1,03 und ein THIV von 39,6 km/h festgestellt.

3.1.3 Gabelständer GS 750 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h

Beim Gabelständer mit dem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm wurde in den Simulationen sowohl für die beweglichen als auch fixierten Fußplatten ein Unterschreiten der Grenzwerte für ASI und THIV festgestellt und dieser Typ wurde daher für die abschließenden Anprallversuche gewählt.



Bild 3-5: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 60 mm bei 35 km/h vor dem Versuch



Bild 3-6: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 60 mm bei 35 km/h nach dem Versuch

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 35,8 km/h und unter einem Winkel von 21,0° gegen das rechte Gurtrohr des Gabelständers. Nach dem Erstkontakt kommt es zur Verformung der Fahrzeugfront, das Fahrzeug wird bis zum Stillstand verzögert. Am rechten Ständer (Erstanprall) kommt es zum Versagen der Schweißverbindung der Fußplatte mit den beiden vertikalen Gurtrohren (Bild 3-6). Die Gewindestangen des Fundaments verbiegen sich, bis es zum Kontakt der Fußplatte am Fundament kommt. An beiden vertikalen Gurtrohren (rechts) ist ein Einriss im Bereich der Schweißnaht der untersten Diagonalstrebe erkennbar. Das Schild und der linke Ständer bleiben unbeschädigt.

Es wurde ein ASI-Wert von 0,9 und ein THIV-Wert von 25,2 km/h festgestellt.

3.1.4 Trimast TRI 500 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 100 km/h

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 102,9 km/h und unter einem Winkel von 19,3° gegen den Ständer des Trimastes. Es konnte ein Abreißen der Gurtrohre an den Schweißnähten im Bereich der Fußplatten festgestellt werden (Bild 3-8), wobei das Fahrzeug seine Fahrtrichtung nach



Bild 3-7: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 100 km/h vor dem Versuch



Bild 3-8: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 100 km/h nach dem Versuch

dem Anprall beibehält. Das Fahrzeug kollidiert nach dem Anprall mit der Betonleitwand, welche zur Absicherung des Testgeländes dient. Das Fahrzeug wird von der Betonleitwand abgelenkt und in das Kiesbett am Ende des Testgeländes geleitet. Der abgerissene Ständer verformt sich und kommt etwa 29 m hinter dem Anprallpunkt in Fahrtrichtung im Bereich der Absicherung des Testgeländes an den Betonleitelementen zum Stillstand. Die Schildtafel löst sich kurze Zeit nach dem Anprall und kommt etwa 12 m hinter dem Anprallpunkt in Fahrtrichtung und 1,5 m links zur Anlaufspurrichtung zum Stillstand. Nach dem Erstkontakt (Abriss) schlägt der Ständer auf den Dachträger auf, wodurch dieser leicht verformt wird. Der Kontakt des Gurtrohres am Dachträger ist ca. 20 cm von der rechten Dachkante entfernt. Die Deformationstiefe beträgt ca. 25 mm. Ebenso weist das Dach an der B-Säule durch den Einschlag eine Deformationstiefe von ca. 25 mm auf. Der Abstand zur rechten Seite der Dachkante beträgt ca. 16 cm. An dieser Stelle ist das Dach auch eingerissen. An der hinteren Kante des Dachträgers im Bereich des Kofferraums beträgt die Deformationstiefe ca. 10 mm in einem Abstand von ca. 11 cm zum rechten Rand der Dachkante.

Es wurde ein ASI von 0,95 und ein THIV von 17,9 km/h festgestellt. Die Abprallgeschwindigkeit betrug ca. 82 km/h. Der Trimast Typ 500 x 60 mm wäre nach EN 12767 als nicht energieabsorbierend einzustufen.

3.1.5 Trimast TRI 500 x 60 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 36,4 km/h und unter einem Winkel von 18,8° gegen den Trimasts. Es konnte kein Abreißen des Trimasts festgestellt werden (Bild 3-10).

Nach dem Erstkontakt kommt es zur Verformung der Fahrzeugfront, das Fahrzeug wird bis zum Stillstand abgebremst und in entgegengesetzter Rich-



Bild 3-9: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 35 km/h vor dem Versuch

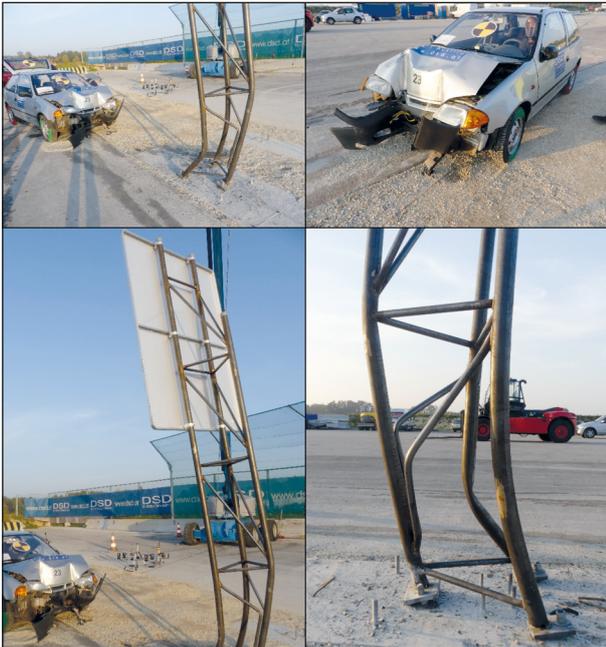


Bild 3-10: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 35 km/h nach dem Versuch

tion zurückbeschleunigt. Nach dem Ausrollen kommt es in einem Abstand von etwa 4 m vor dem Verkehrszeichen zum Stillstand. Am Trimasten (Erstanprall) kommt es zu Verformungen der vorderen vertikalen Gurtrohre. Die Gewindestangen des Fundaments im Bereich der vorderen Gurtrohre verbiegen sich teilweise, die des hinteren Gurtrohres soweit, bis es zum Kontakt der Fußplatte am Fundament kommt. Am vorderen rechten Gurtrohr ist ein Einriss im Bereich der Schweißnaht zur Fußplatte erkennbar. Das Schild bleibt unbeschädigt. Es haben sich keine Teile gelöst oder sind in das Fahrzeuginnere eingedrungen.

Es wurde ein ASI von 1,06 und ein THIV von 38,1 km/h festgestellt.

3.1.6 Trimast TRI 350 x 48 mm Anprallgeschwindigkeit 35 km/h

In den Simulationen konnte für den Trimast mit dem Gurtrohrdurchmesser von 48 mm sowohl für die bewegliche als auch für die fixierte Ausführung der Fußplatten ein Unterschreiten des Grenzwertes für zumindest den ASI festgestellt werden. Der THIV lag etwas über dem Grenzwert. Entsprechend den Empfehlungen des Betreuerkreises sollten bevorzugt Trimasten ohne Modifikationen verwendet werden. Daher wurde für den abschließenden Anprallversuch der Trimast 350 x 48 mm gewählt.



Bild 3-11: Anprallsituation Trimast 350 x 48 mm bei 35 km/h vor dem Versuch



Bild 3-12: Anprallsituation Trimast 350 x 48 mm bei 35 km/h nach dem Versuch

Das Prüffahrzeug prallt mit einer Geschwindigkeit von 35,6 km/h und unter einem Winkel von 21,4° gegen den rechten Ständer des Trimastes. Nach dem Erstkontakt kommt es zur Verformung der Fahrzeugfront, das Fahrzeug wird verzögert und kommt etwa 8,9 m nach dem Erstanprall zum Stillstand. An allen drei Ständern kommt es zum Versagen der Schweißverbindung zur Fußplatte, sodass der Trimast vollständig abgelöst wird (Bild 3-12). Die Gewindestangen des hinteren der drei Fundamente verbiegen sich, bis es zum Kontakt der Fußplatte am Fundament kommt. An allen Gurtrohren als auch an den Diagonalstreben sind Verformungen festzustellen.

Es wurde ein ASI-Wert von 1,0 und ein THIV von 23,3 km/h festgestellt.

3.2 Simulation

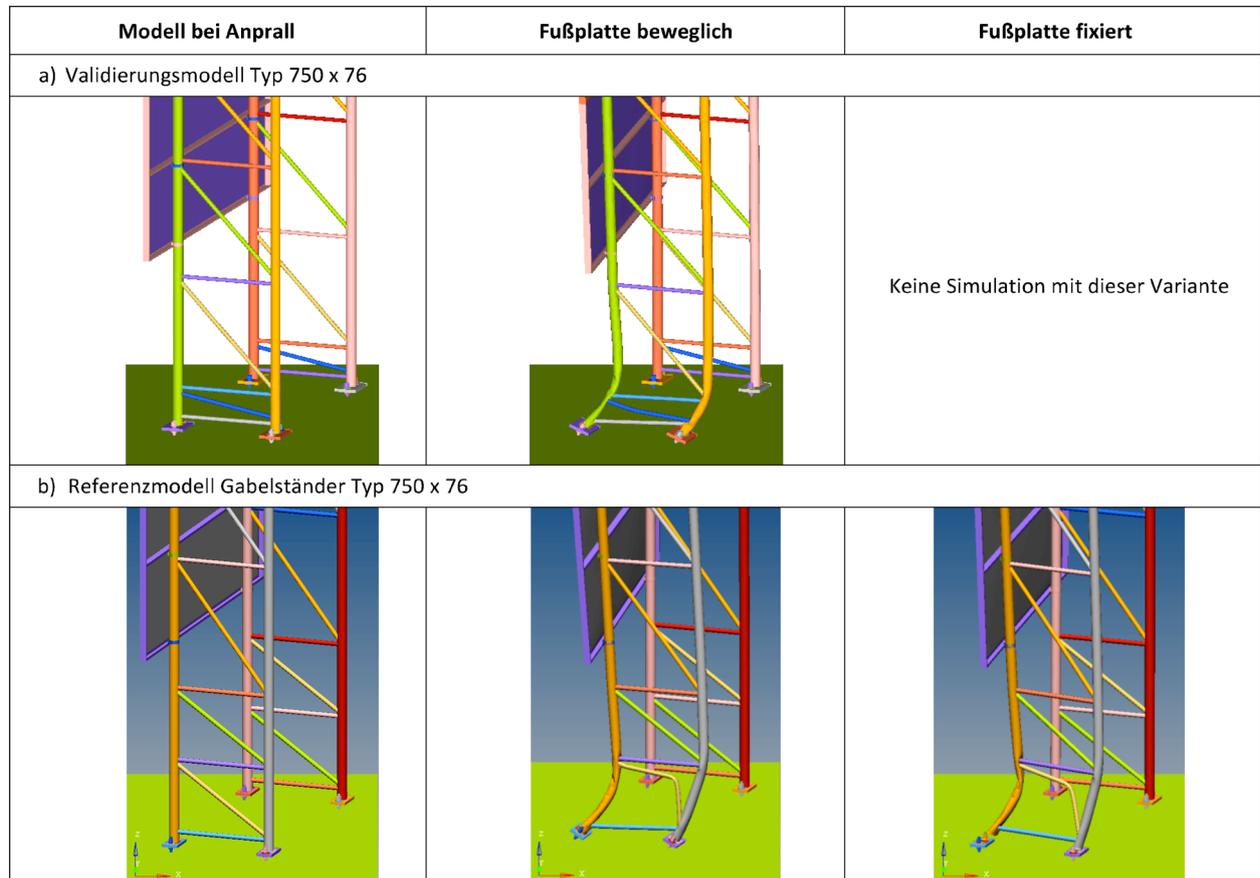
In diesem Kapitel werden die einzelnen Ergebnisse der Simulationen im Detail beschrieben. Alle Simulationen erfolgten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die komplette Simulationsmatrix mit den Ergebnissen zu ASI und THIV ist in Anhang C (Gabelständer) und Anhang D (Trimast) zusammengefasst.

3.2.1 Gabelständer Typ 750 x 76

3.2.1.1 Referenzmodell

Das Gurtrohr und die Diagonalrohre im Referenzmodell werden durch den Anprall verformt, ein Abreißen der Gurtrohre in der Variante mit beweglichen Fußplatten konnte nicht festgestellt werden (Tabelle 3-1). Der ASI ist deutlich niedriger als im Validierungsmodell (Tabelle 3-2). Der zeitliche Verlauf des ASI für das Referenzmodell mit beweglichen Fußplatten zeigt zwei Peaks (siehe Anhang F). Der erste Peak wird erreicht, wenn das unterste, schräge Diagonalrohr einzuknicken beginnt. Danach sinkt der ASI bis zu jenem Zeitpunkt, wo das

unterste, schräge Diagonalrohr die maximale Verformung aufweist. Anschließend steigt der ASI wieder und erreicht sein Maximum. Die Gurtrohre werden nicht abgerissen. In der Variante mit den fixierten Fußplatten steigt der ASI kontinuierlich, bis ein Maximum erreicht wird. Das vordere Gurtrohr wird dabei abgerissen. Dieser Verlauf mit zwei Peaks konnte in anderen Simulationen nicht festgestellt werden. In beiden Ausführungsvarianten kann der Grenzwert für den ASI von 1,0 gemäß EN 12767 unterschritten werden. Beim THIV ist das jedoch nicht der Fall. In beiden Ausführungsvarianten liegt der Wert über dem Grenzwert von 27 km/h.



Tab. 3-1: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Validierungsmodell Typ 750 x 76	beweglich	1,1	40	Nein
b)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	beweglich	0,81	37	Nein
		fixiert	1,00	33	Nein

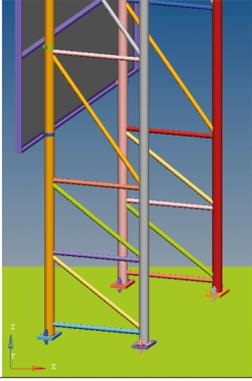
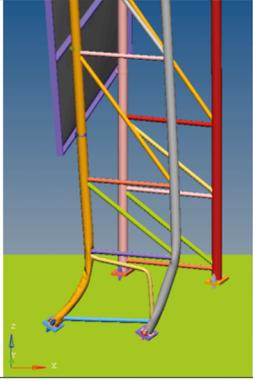
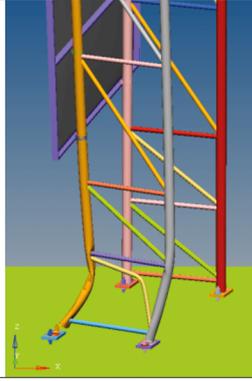
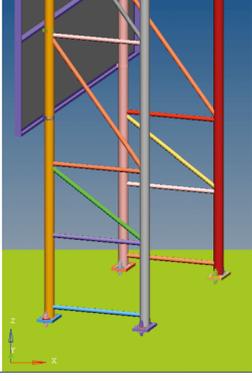
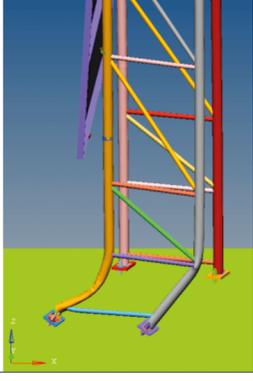
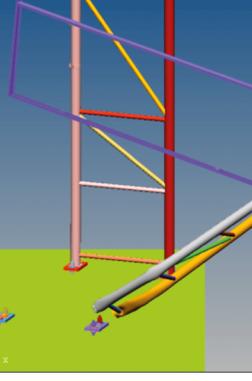
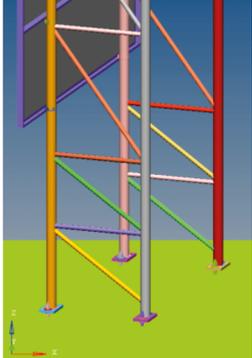
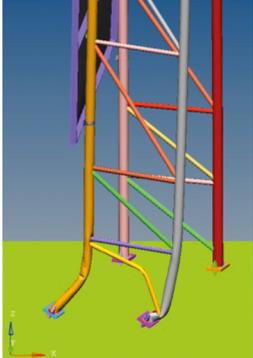
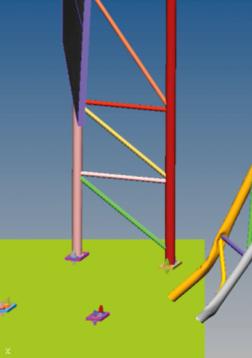
 Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-2: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

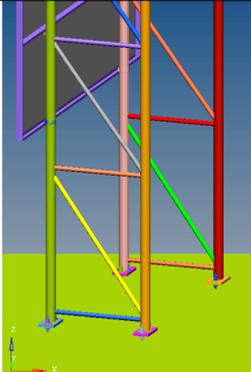
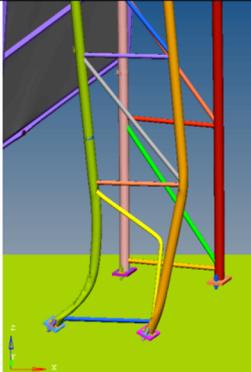
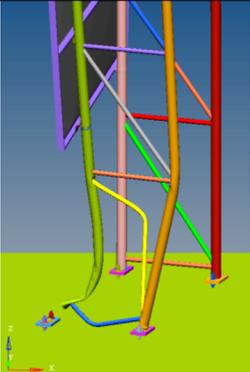
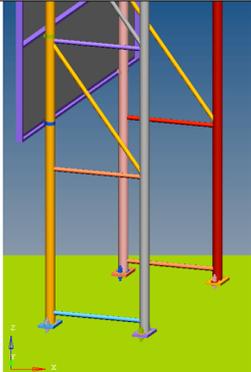
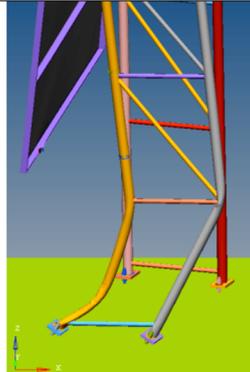
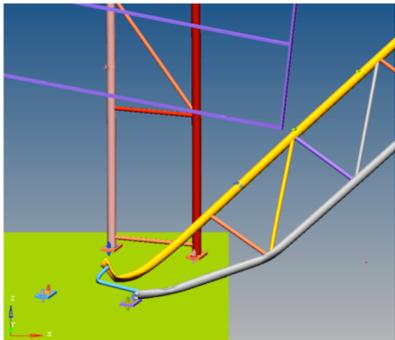
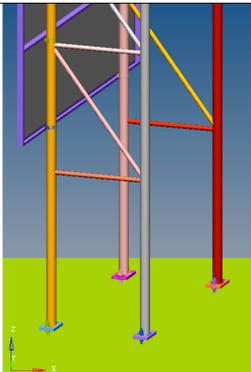
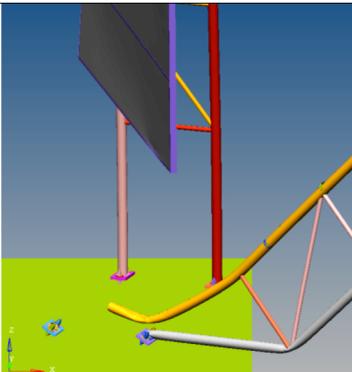
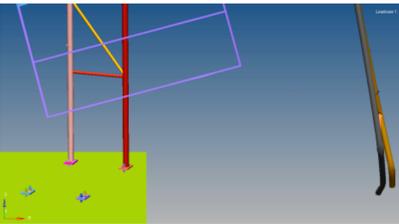
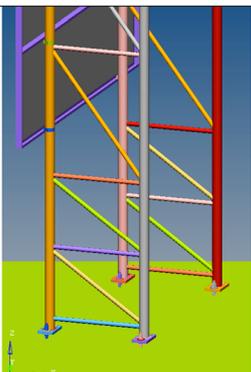
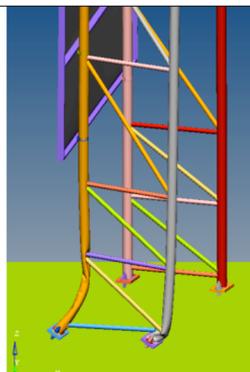
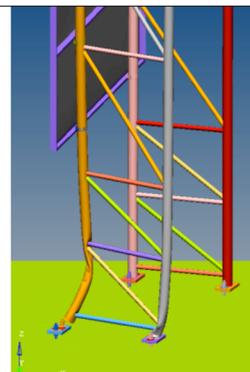
3.2.1.2 Änderungen der Diagonalrohranordnungen

Zur Optimierung der Diagonalrohranordnung wurden unterschiedliche Modifikationsvarianten simuliert. In Tabelle 3-3 sind die Ergebnisse zu den Änderungen der Diagonalrohranordnungen dargestellt. In allen Simulationen mit fixierten Fußplatten wurde zumindest das vordere Gurtrohr durch den Anprall abgerissen. Bei den beweglichen Varianten war dies nicht der Fall.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse der einzelnen Varianten, so erhöht sich der ASI bei fixierter zu beweglicher Ausführung der Fußplatte beim Referenzmodell bzw. beim Referenzmodell inkl. erhöhter Steifigkeit der Diagonalrohre als auch bei der Variante, in welcher im ersten Feld das schräge Diagonalrohr entfernt wurde (Bild 3-13). Für die restlichen Varianten ist der ASI bei der Ausführung mit fixierter Fußplatte niedriger als bei einer beweglichen Fußplatte. Bis auf die Variante mit erhöhter Steifigkeit der Diagonalrohre ist für alle anderen

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a) Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76		
		
b) Entfernen des schrägen Diagonalrohrs im untersten Feld		
		
c) Entfernen des untersten, horizontalen Diagonalrohrs		
		

Tab. 3-3: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
d) Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld		
		
e) Entfernen des schrägen Diagonalrohrs im einzelnen Feld		
		
f) Entfernen des untersten, horizontalen Diagonalrohrs im einzelnen Feld		
		
g) Referenzmodell Gabelständer Typ 750x76 + doppelte so große Materialsteifigkeit der Diagonalrohre		
		

Tab. 3-3: Fortsetzung

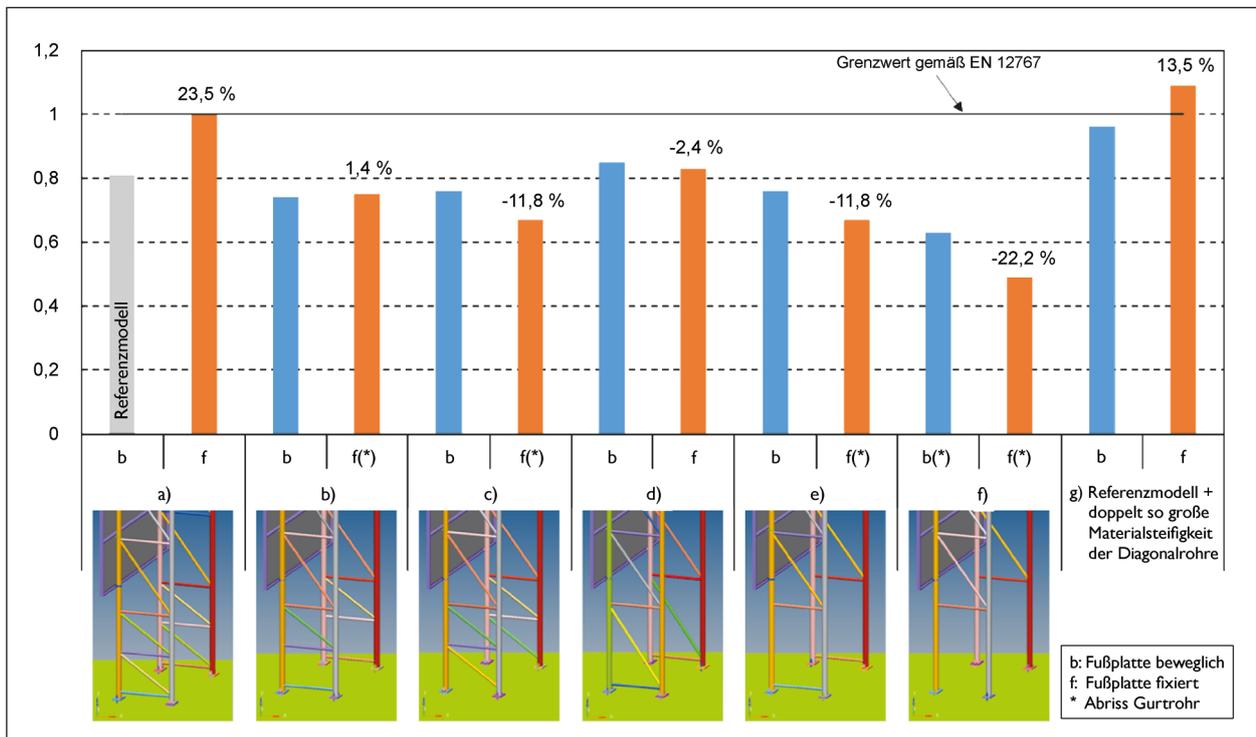


Bild 3-13: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

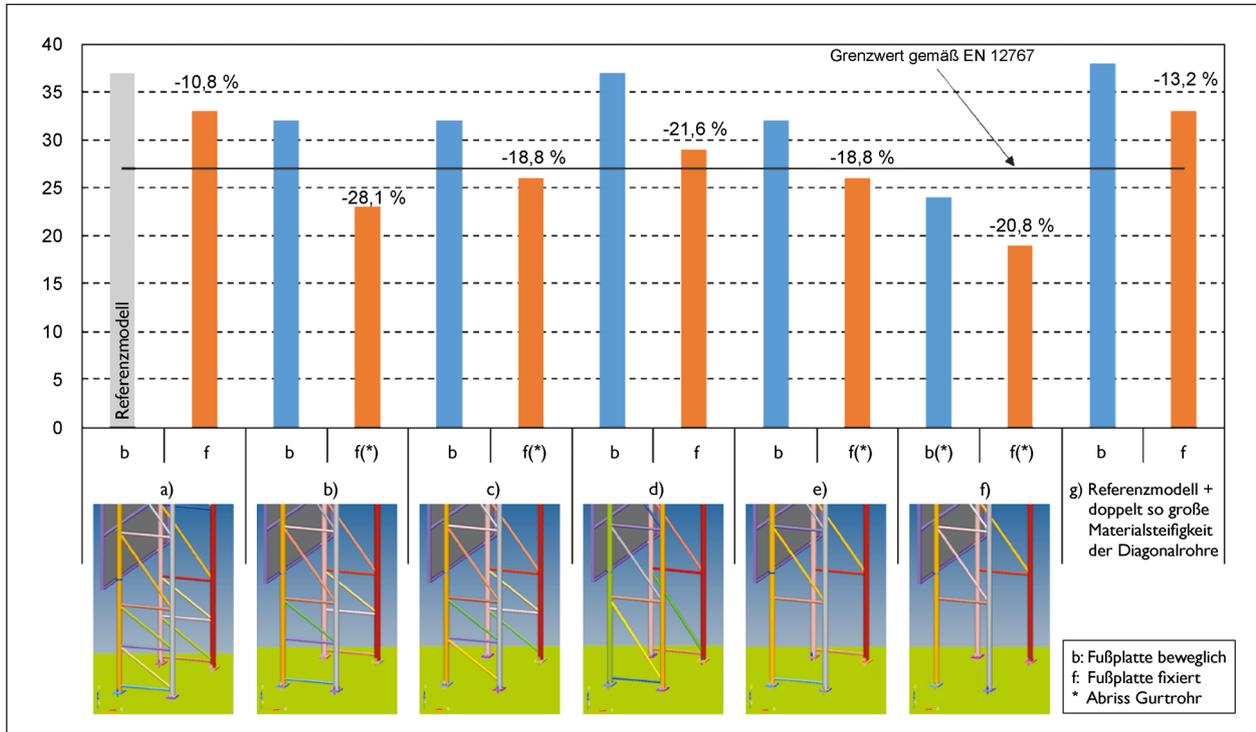


Bild 3-14: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Varianten der ASI unter dem Grenzwert gemäß EN 12767. Die Relativangaben beziehen sich auf die jeweilige Ausführung mit beweglichen Fußplatten.

Beim THIV ist in jeder Variante der Wert für fixierte Fußplatten unter dem Wert der beweglichen Fußplatten (Bild 3-14). Eine Unterschreitung des Grenzwertes

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	beweglich	0,81	37	Nein
		fixiert	1,00	33	Nein
b)	Entfernen des schrägen Diagonalrohrs im untersten Feld	beweglich	0,74	32	Nein
		fixiert	0,75	23	Ja
c)	Entfernen des untersten, horizontalen Diagonalrohrs	beweglich	0,76	32	Nein
		fixiert	0,67	26	Ja
d)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld	beweglich	0,85	37	Nein
		fixiert	0,83	29	Nein
e)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld und entfernen des schrägen Diagonalrohrs im einzelnen Feld	beweglich	0,76	32	Nein
		fixiert	0,67	26	Ja
f)	Entfernen der beiden untersten Ausgleichsrohrfelder	beweglich	0,63	24	Ja
		fixiert	0,49	19	Ja
g)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76 + doppelte so große Materialsteifigkeit der Diagonalrohre	beweglich	0,96	38	Nein
		fixiert	1,09	33	Nein

 Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-4: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

wertes für den THIV von 27 km/h gemäß EN 12767 ist nur für die Varianten b), c), e) und f) festzustellen.

In Tabelle 3-4 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen zusammengefasst.

3.2.1.3 Schwächung der Gurtrohre

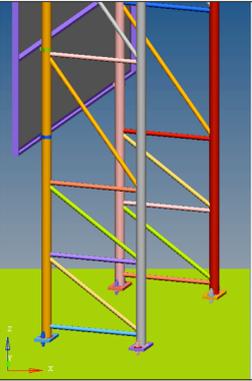
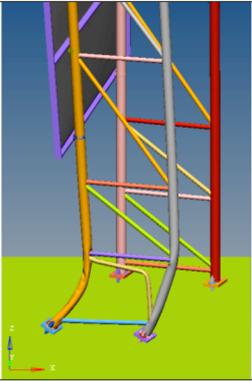
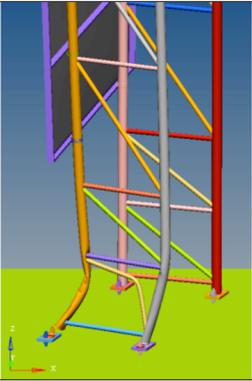
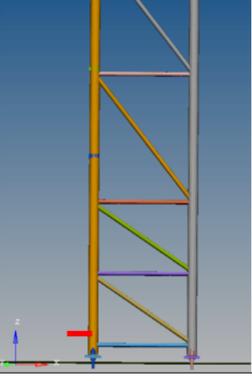
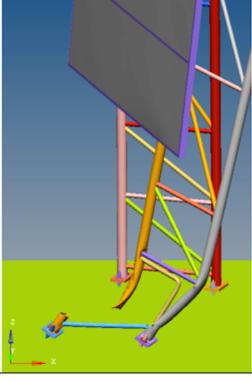
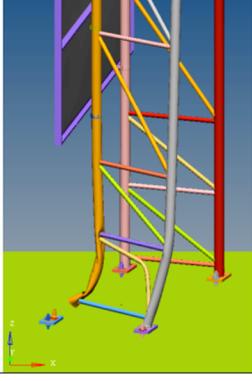
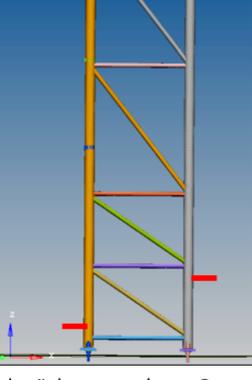
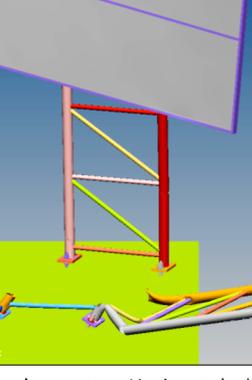
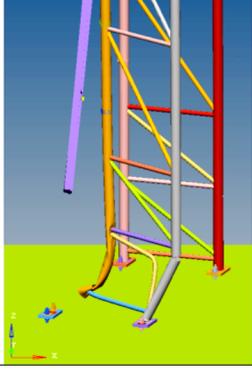
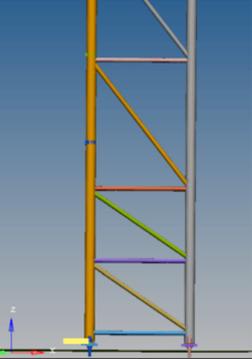
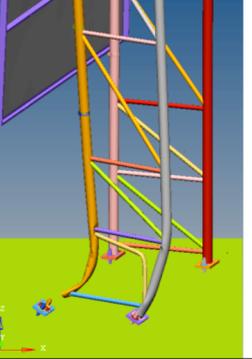
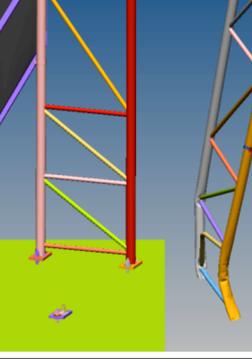
In Tabelle 3-5 sind die Simulationsergebnisse, jeweils eine Sekunde nach Anprallbeginn, der unterschiedlichen Schwächungsvarianten dargestellt. Die Gurtrohre reißen an der Stelle des Einschnitts. Je nach Schwächungsvariante kann das vordere als auch das hintere Gurtrohr abreißen. Es wurde in jeder Simulation zumindest ein Abriss des vorderen Gurtrohres festgestellt. In den Varianten d), e), g), h) und i) ist sowohl das vordere als auch das hintere Gurtrohr abgerissen.

Der ASI liegt für alle Varianten der Gurtrohrschwächung unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 von 1,0, sowohl für bewegliche als auch fixierte Fußplatten (Bild 3-15). Bezogen auf das Referenzmodell kann bis auf die Variante h) eine Verbesserung der Werte festgestellt werden. In Variante h) mit beweglichen Fußplatten bleibt der ASI unverändert. Für bewegliche Fußplatten sind die Varianten f) und g) bezogen auf einen niedrigen ASI Wert am günstigsten. Der ASI ist hierbei um 17,3 % bzw. 18,9 % unter dem Wert des Referenzmodells. Eine fixierte

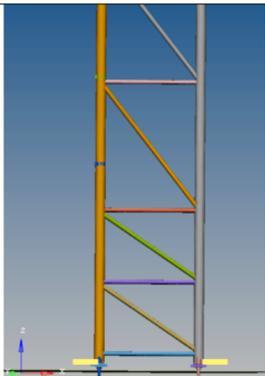
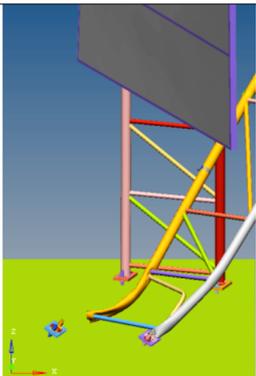
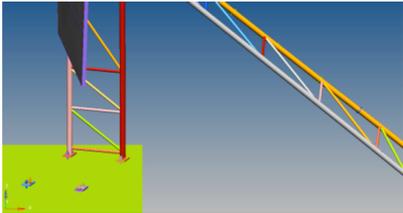
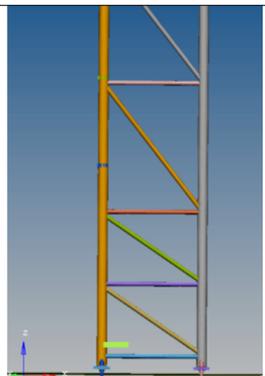
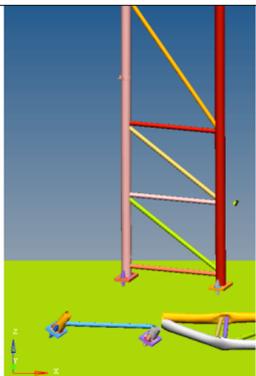
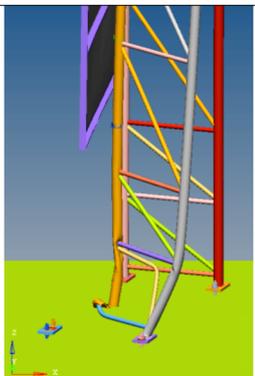
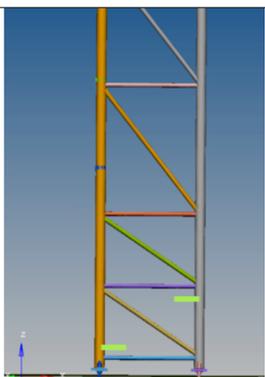
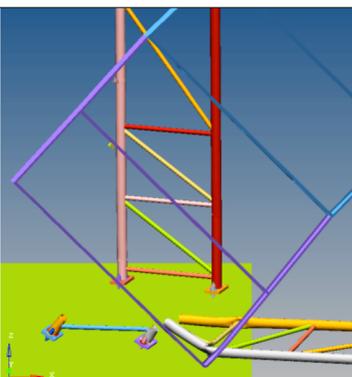
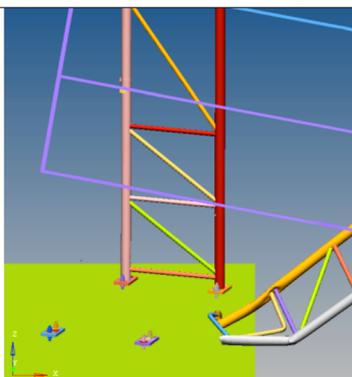
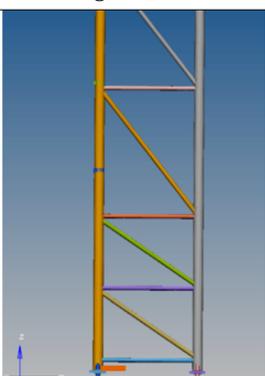
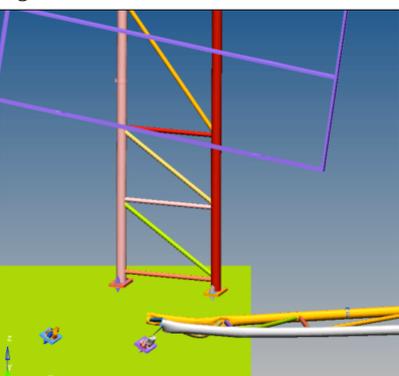
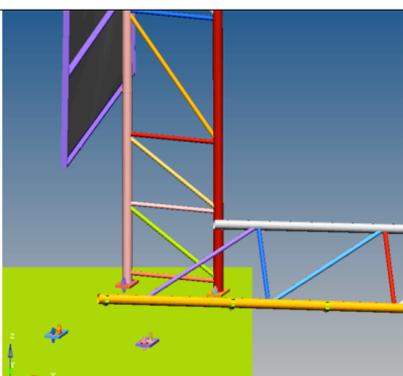
Fußplatte wirkt sich im Vergleich zur beweglichen Fußplatte eher negativ auf den ASI aus. Bis auf die Varianten e) und i) ist der ASI auch teilweise deutlich höher als im Referenzmodell. Tendenziell ist eine innenseitige Schwächung der Gurtrohre für den ASI besser als die außenseitige.

Beim THIV liegen die Werte unter jenen des Referenzmodells (Bild 3-16). In Variante b) mit beweglichen Fußplatten bleibt der THIV unverändert. Der THIV für fixierte Fußplatten, ausgenommen Variante c), f) und g), ist niedriger als für bewegliche. Der niedrigste THIV ist für die Variante e) mit fixierten Fußplatten festzustellen. Allerdings liegt der THIV für bewegliche Fußplatten dieser Variante über dem Grenzwert der EN 12767. Innenseitige Schwächungen (Variante f), g), h) und i)) der Gurtrohre wirken sich deutlich günstiger auf den THIV aus als außenseitige. Der THIV ist für alle diese Varianten unter dem Grenzwert von 27 km/h gemäß EN 12767. Allerdings wurde für Variante f) mit fixierten Fußplatten und der Variante h) mit beweglichen Fußplatten der Grenzwert gerade noch nicht überschritten. Die für den THIV günstigste Variante, sowohl für bewegliche als auch fixierte Fußplatten, ist Variante i).

Die Ergebnisse der Simulationen für die Schwächung der Gurtrohre sind in Tabelle 3-6 zusammengefasst.

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a) Referenzmodell Gabelständer Typ 750x76		
		
b) Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr		
		
c) Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig		
		
d) Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr		
		

Tab. 3-5: Simulationsergebnisse am Gabelmast Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von ca. 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
e) Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig		
		
f) Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr		
		
g) Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig		
		
h) Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr		
		

Tab. 3-5: Fortsetzung

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
i) Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig		

Tab. 3-5: Fortsetzung

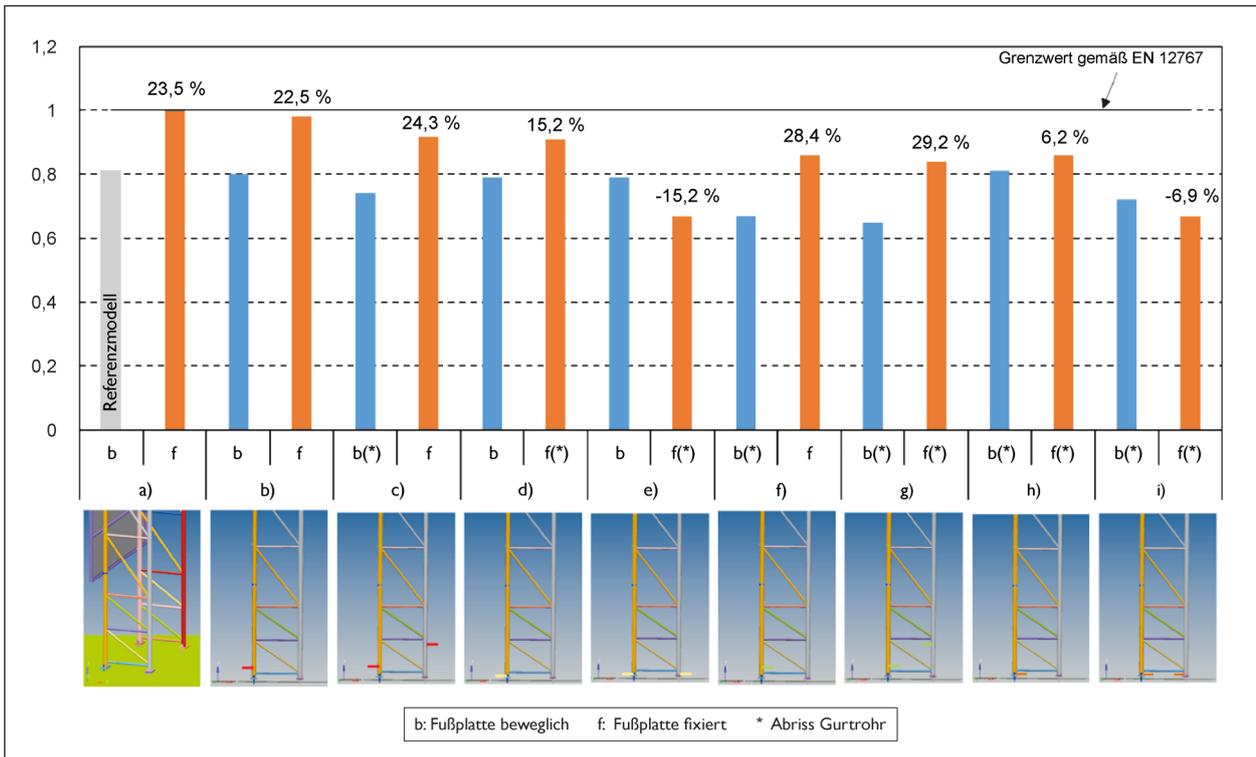


Bild 3-15: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

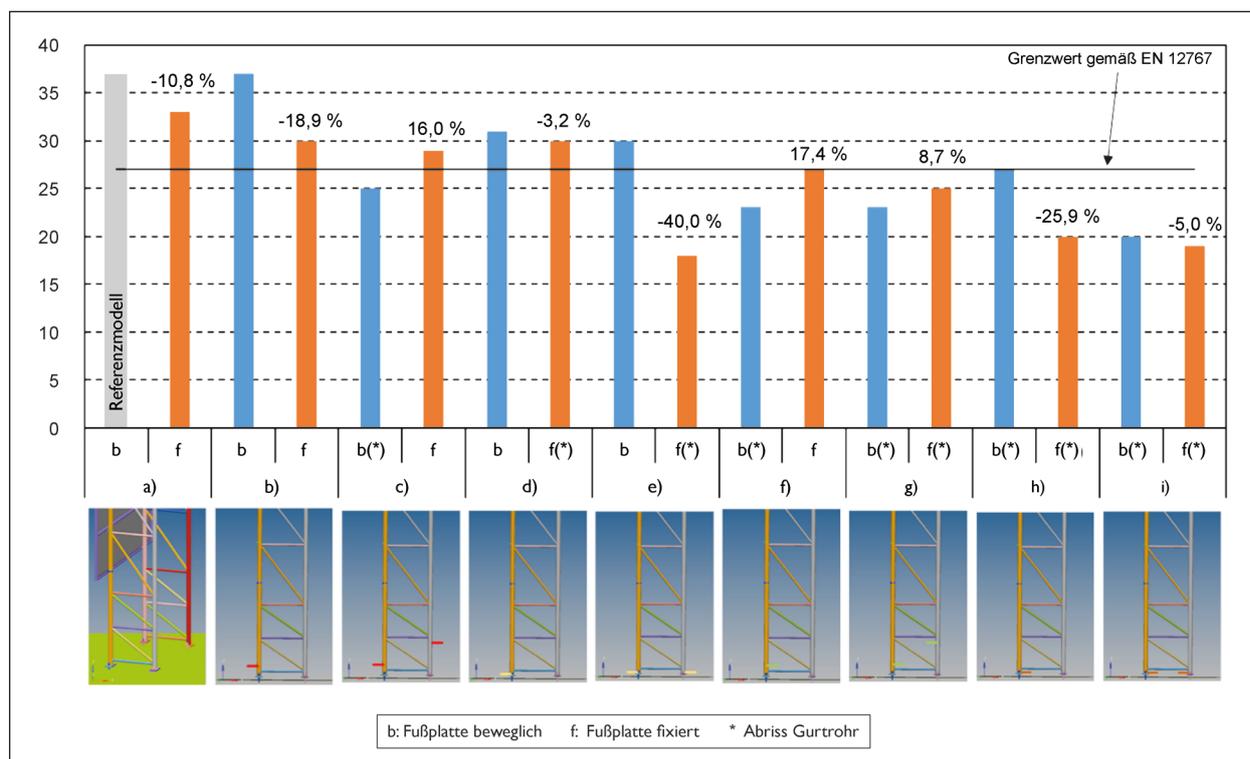


Bild 3-16: Absolutwert bzw. Veränderung THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	beweglich	0,81	37	Nein
		fixiert	1,00	33	Nein
b)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr	beweglich	0,80	37	Nein
		fixiert	0,98	30	Nein
c)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	beweglich	0,74	25	Ja
		fixiert	0,92	29	Nein
d)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	beweglich	0,79	31	Nein
		fixiert	0,91	30	Ja
e)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	beweglich	0,79	30	Nein
		fixiert	0,67	18	Ja
f)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr	beweglich	0,67	23	Ja
		fixiert	0,86	27	Nein
g)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	beweglich	0,65	23	Ja
		fixiert	0,84	25	Ja
h)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	beweglich	0,81	27	Ja
		fixiert	0,86	20	Ja
i)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	beweglich	0,72	20	Ja
		fixiert	0,67	19	Ja

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-6: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

3.2.1.4 Reduktion Schweißnahtumfang Gurtrohr zu Fußplatte

In beiden Ausführungen zur Reduktion des Schweißnahtumfangs, durch Einschnitt am Gurtrohr als auch durch Schweißnahtausparung, sind dieselben Tendenzen für den ASI bzw. THIV festzustellen (Bild 3-17 bis Bild 3-20). Die Werte für den ASI bzw. THIV unterscheiden sich im Vergleich der beiden Varianten nicht wesentlich voneinander.

Bei der Reduktion des Schweißnahtumfangs zeigt der ASI eine leicht fallende Tendenz mit zunehmender Reduktion, sowohl für die Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr (Bild 3-17) als auch durch Schweißnahtausparung (Bild 3-19), allerdings nur für die Varianten mit fixierten Fußplatten. Bei den Varianten mit beweglichen Fußplatten bleibt der ASI, im Vergleich zum Referenzmodell, mit zunehmender Reduktion des Schweißnahtumfangs nahezu unverändert. Bezogen auf das Referenzmodell ist der ASI für die Varianten mit fixierten Fußplatten deutlich höher. Mit zunehmender Reduktion des Schweißnahtumfangs ist eine leicht abnehmende Tendenz des ASI festzustellen.

Beim THIV ist hingegen für die Reduktion durch Einschnitt am Gurtrohr (Bild 3-18) und auch durch Schweißnahtausparung (Bild 3-20), eine deutliche abnehmende Tendenz mit zunehmender Reduktion des Schweißnahtumfangs festzustellen. Die Varianten mit fixierten Fußplatten haben im Vergleich zu den Varianten mit beweglichen Fußplatten durchwegs einen niedrigeren Wert. Fixierte Fußplatten wirken sich auf den THIV daher positiv aus.

Ein Abreißen der Gurtrohre ist bei fixierten Fußplatten für beide Varianten – Einschnitt am Gurtrohr als auch Schweißnahtausparung – erst ab einer Reduktion des Schweißnahtumfangs ab 30 % festzustellen (Tabelle 3-7). Für bewegliche Fußplatten wurde in der Simulation erst ab einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % ein Abreißen der Gurtrohre festgestellt.

Ab einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von etwa 42 % sind ASI und THIV unter den Grenzwerten gemäß EN 12767 von 1,0 bzw. 27 km/h festzustellen. Die Ergebnisse der Simulationen sind Tabelle 3-7 in zusammengefasst.

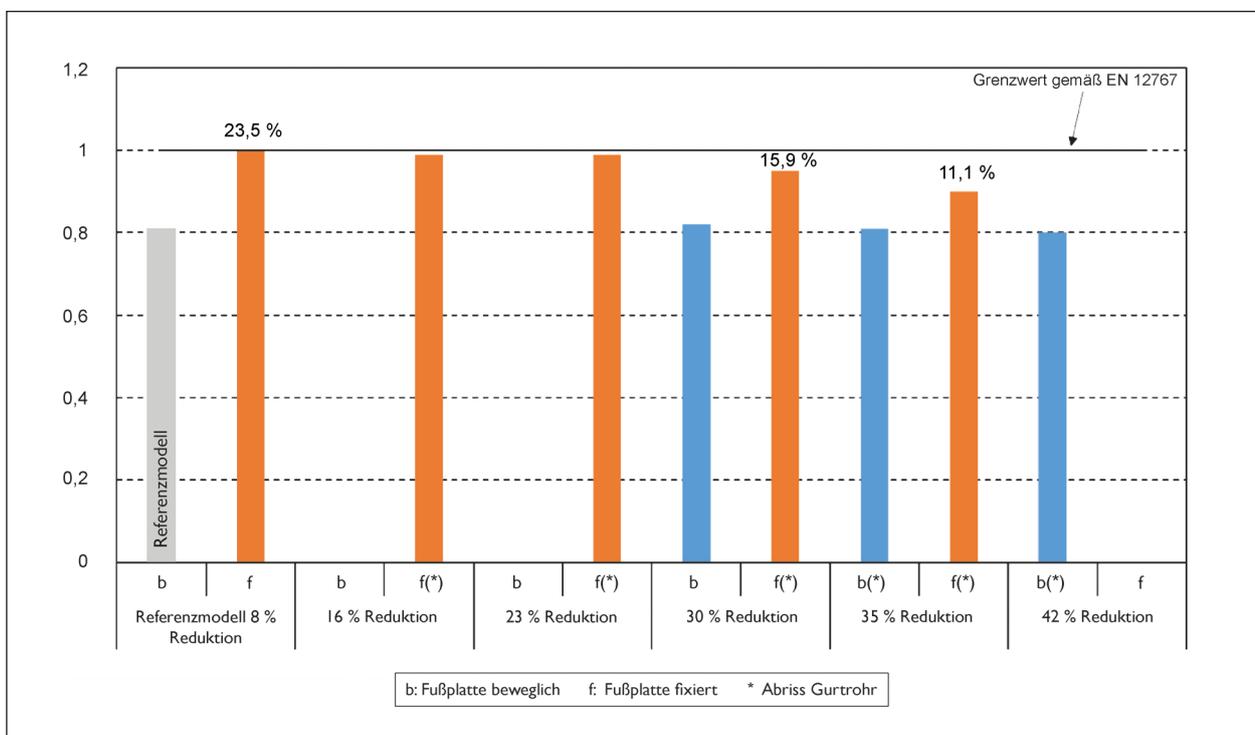


Bild 3-17: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

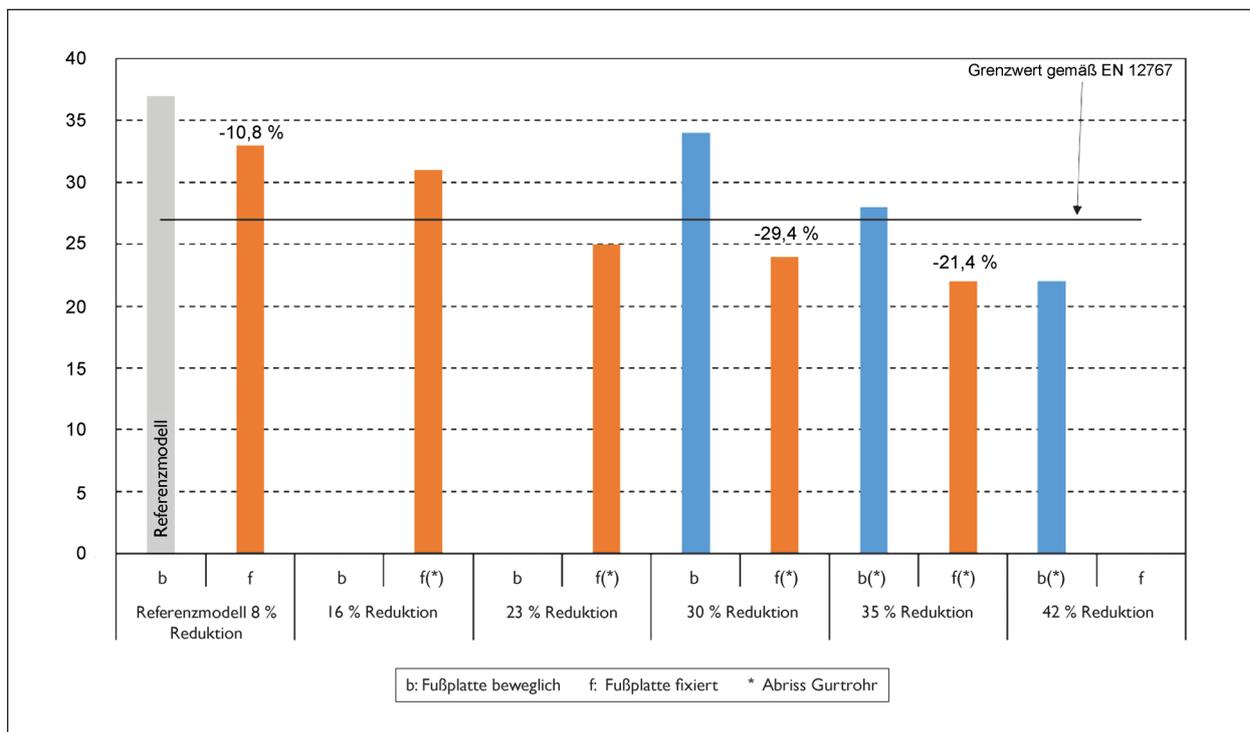


Bild 3-18: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

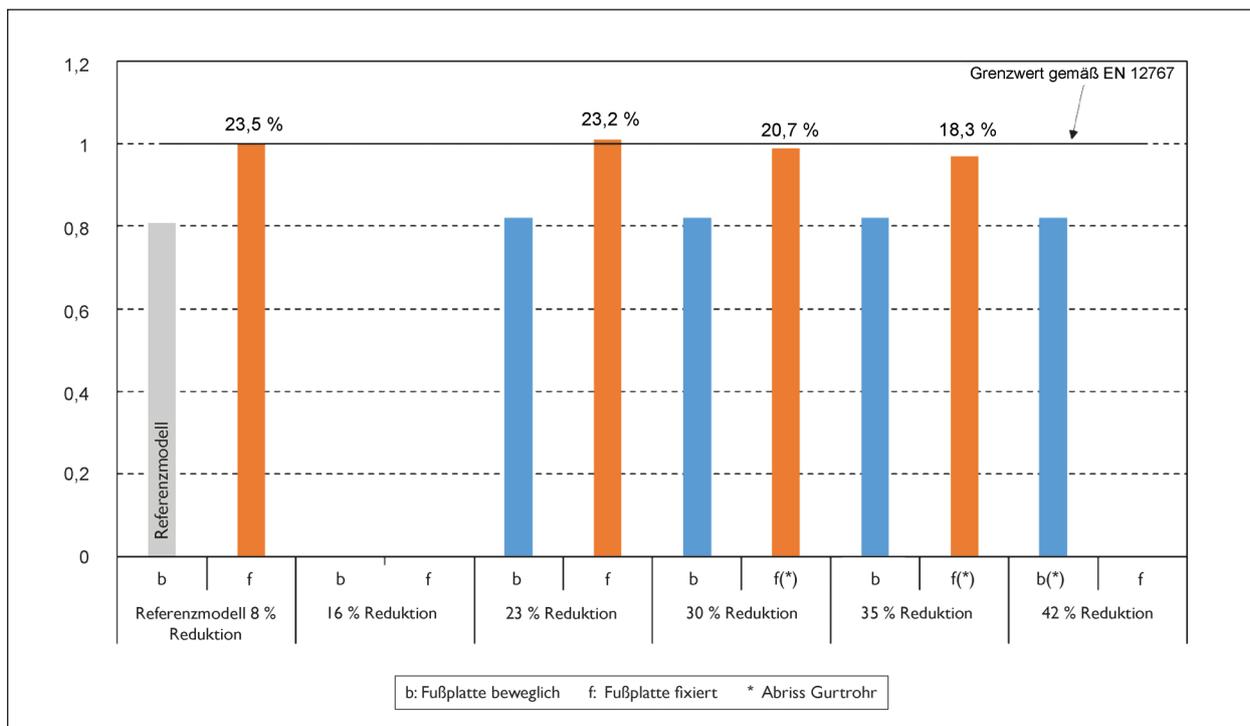


Bild 3-19: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

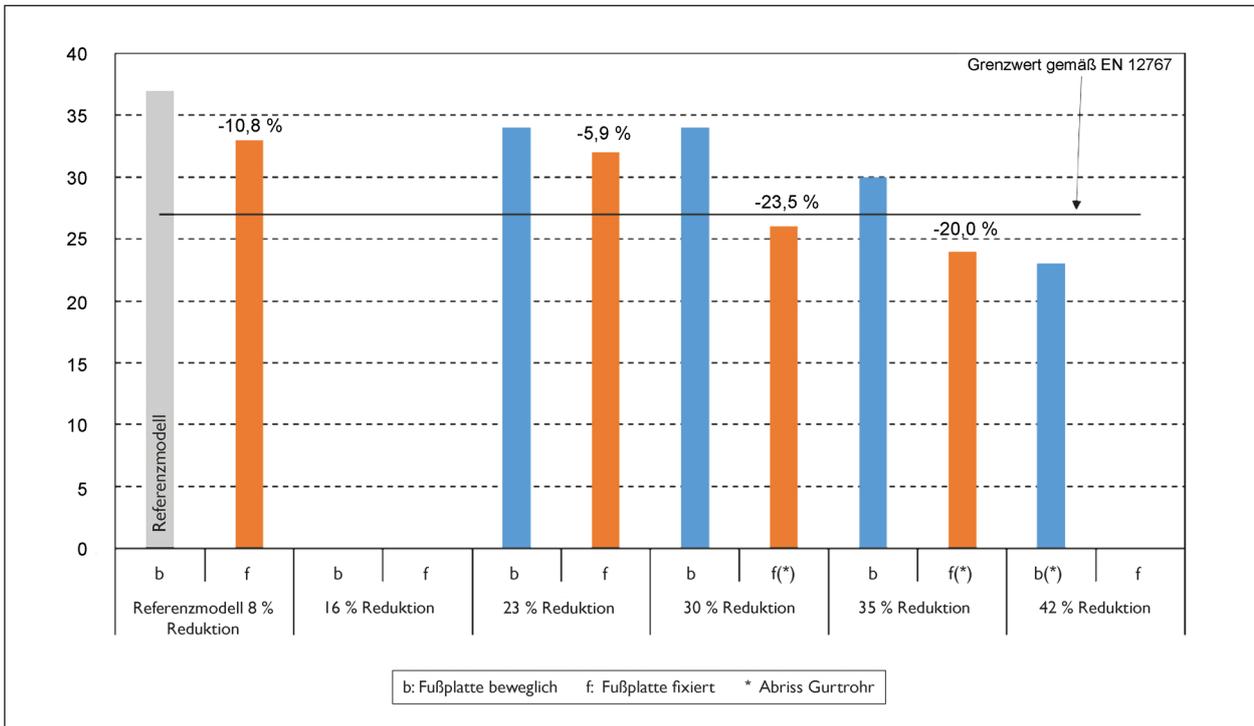


Bild 3-20: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	Einschnitt am Gurtrohr			Schweißnahtausparung		
			ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell: 8 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt)	beweglich	0,81	37	Nein	0,81	37	Nein
		fixiert	1,00	33	Nein	1,00	33	Nein
b)	16 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich	-	-	-	-	-	-
		fixiert	0,99	31	Ja	-	-	-
c)	23 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich	-	-	-	0,82	34	Nein
		fixiert	0,99	25	Ja	1,01	32	Nein
d)	30 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich	0,82	34	Nein	0,82	34	Nein
		fixiert	0,95	24	Ja	0,99	26	Ja
e)	35 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich	0,81	28	Ja	0,82	30	Nein
		fixiert	0,90	22	Ja	0,97	24	Ja
f)	42 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich	0,80	22	Ja	0,82	23	Ja
		fixiert	-	-	-	-	-	-

■ Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-7: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr und durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Gabelständer Typ 750 x 76 inkl. Schild	beweglich	0,81	37	Nein
b)	Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76	beweglich	0,78	35	Nein
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-8: Simulationsergebnisse Gabelständer-Einzelmast mit und ohne Schild

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	1) Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76	beweglich	0,78	35	Nein
	2) Gabelständer Typ 750 x 76 inkl. Schild + Reduktion Schweißnahtumfang 42 % (Einschnitt am Gurtrohr)	beweglich	0,80	22	Ja
	3) Gabelständer Typ 750 x 76 inkl. Schild + Reduktion Schweißnahtumfang 42 % (Schweißnahtausparung)	beweglich	0,82	23	Ja
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 + Reduktion Schweißnahtumfang 42 %	beweglich	0,76	19	Ja
c)	Gabelständer-Einzelmast Typ 1.000 x 76 + Reduktion Schweißnahtumfang 42 %	beweglich	0,72	27	Ja
d)	Gabelständer-Einzelmast Typ 1.300 x 76 + Reduktion Schweißnahtumfang 42 %	beweglich	0,74	25	Ja
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-9: Simulationsergebnisse Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung

3.2.2 Prinzipsimulationen an Gabelständer-Einzelmast

3.2.2.1 Referenzmodell Gabelständer-Einzelmast

Bei der Anprallsimulation des Referenzmodells des Gabelständer-Einzelmasts kann kein Abreißen der Gurtrohre festgestellt werden. Die Werte für ASI und THIV unterscheiden sich nicht wesentlich von den Simulationsergebnissen inkl. Verkehrsschild (Tabelle 3-8). Der Einfluss des Verkehrsschildes auf ASI und THIV ist eher gering.

3.2.2.2 Variation der Spreizung

In den Simulationen mit dem ungeschwächten Gabelständer Typ 750 x 76 mm konnte kein Abreißen der Gurtrohre festgestellt werden. Erst ab einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % konnte ein Abreißen der Gurtrohre sowohl für die Ausführung mit beweglicher als auch die mit fixierter Fußplatte erreicht werden. Ein Einschnitt am Gurtrohr oder eine Schweißnahtausparung führen zu mehr oder weniger den gleichen Werten für ASI und THIV.

In den Varianten mit Reduktion des Schweißnahtumfangs ist ein Abreißen der Gurtrohre für die Spreizmaße 750 mm, 1.000 mm und 1.300 mm vorliegend. Je nach Spreizmaß wird der Einzelmast nach dem Anprall mehr oder weniger verdreht und in Fahrtrichtung des Fahrzeugs geschleudert (siehe Anhang G). Der ASI unterscheidet sich für alle Varianten nicht wesentlich vom Referenzmodell des Gabelständer-Einzelmasts. Die Werte liegen unter dem Grenzwert von 1,0 gemäß EN 12767. Der THIV ist im Referenzmodell deutlich über dem Grenzwert von 27 km/h. Für die Varianten mit Reduktion des Schweißnahtumfangs ist der THIV unter dem Grenzwert gemäß EN 12767, wobei in der Variante c) der Grenzwert gerade noch unterschritten bzw. erreicht wird.

3.2.2.3 Variation des Gurtrohrdurchmessers

Für den Gabelständer-Einzelmast mit einem 60er-Gurtrohr ist gerade noch ein Abreißen in der Simulation festzustellen. Der ASI ist deutlich niedriger als im Referenzmodell. Beim THIV wurde genau der Grenzwert gemäß EN 12767 erreicht.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 (Referenzmodell)	beweglich	0,78	35	Nein
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60	beweglich	0,57	27	Ja
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-10: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 und Typ 750 x 60

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 5,5 m (Referenzmodell)	beweglich	0,57	27	Ja
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 3,5 m	beweglich	0,57	26	Ja
c)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 2,5 m	beweglich	0,55	24	Ja
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-11: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhe

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60, Ständerhöhe 3,5 m (Referenzmodell)	beweglich	0,57	26	Ja
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 500 x 60, Ständerhöhe 3,0 m	beweglich	0,74	19	Ja
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-12: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 (Referenzmodell)	beweglich	0,78	35	Nein
b)	Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 + 180° gedrehte Anprallposition	beweglich	0,64	23	ja
 Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-13: Simulationsergebnisse am Gabelständer Einzelmast Typ 750 x 76 und um 180° gedrehter Anprallposition am Gurtrohr

3.2.2.4 Variation der Gabelständerhöhe

Die Gabelständer-Einzelmasten werden durch den Anprall an den Gurtrohren abgerissen, sodass sich dies günstig auf den ASI und THIV auswirkt. Beim ASI sind die Unterschiede je nach Gabelständerhöhe sehr gering. In allen Simulationen wurde ein Unterschreiten des Grenzwertes festgestellt. Der THIV nimmt mit geringerer Gabelständerhöhe tendenziell ab und liegt leicht unter dem Grenzwert der EN 12767.

3.2.2.5 Variation der Spreizung, Ständerhöhe und Gurtrohrdurchmesser

Im Vergleich der Spreizung von 750 mm gegenüber einer Spreizung von 500 mm ist beim Gabelstän-

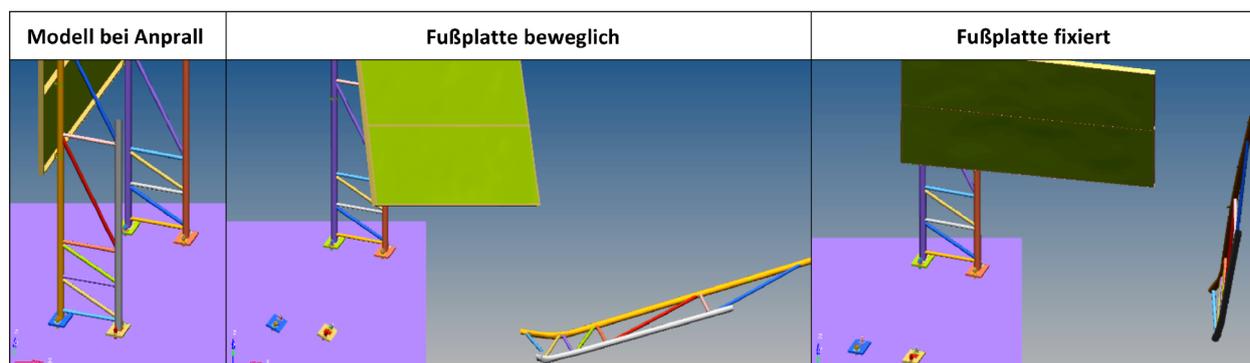
der-Einzelmast mit 60er-Rohr ein deutlich besseres Ergebnis für die 500er-Spreizung beim THIV festzustellen (Tabelle 3-12).

3.2.2.6 Variation der Anprallseite

Beim Anprall an den Gabelständer-Einzelmast an der um 180° gedrehten Anprallposition kann eine deutliche Reduktion beim ASI als auch beim THIV festgestellt werden (Tabelle 3-13). Das Gurtrohr wird abgerissen.

3.2.3 Gabelständer Typ 500 x 60

Sowohl in der Variante mit beweglicher als auch in jener mit fixierter Fußplatte erfolgte in der Simulati-



Tab. 3-14: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 500 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell Gabelständer Typ 750 x 76	beweglich	0,81	37	Nein
		fixiert	1,00	33	Nein
	Gabelständer-Einzelmast Typ 500 x 60, Ständerhöhe 3,0 m	beweglich	0,74	19	Ja
b)	Gabelständer Typ 500 x 60, Ständerhöhe 3,0 m	beweglich	0,8	21	Ja
		fixiert	0,7	15	Ja

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-15: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 500 x 60

on ein Abriss der Gurtrohre. Die Schildtafel wurde in beiden Simulationen vom Gabelständer abgerissen. ASI und THIV lagen für beide Varianten deutlich unter den Werten des Gabelständers Typ 750 x 76 als auch unter den Grenzwerten der EN 12767.

3.2.4 Trimast Typ 500 x 60

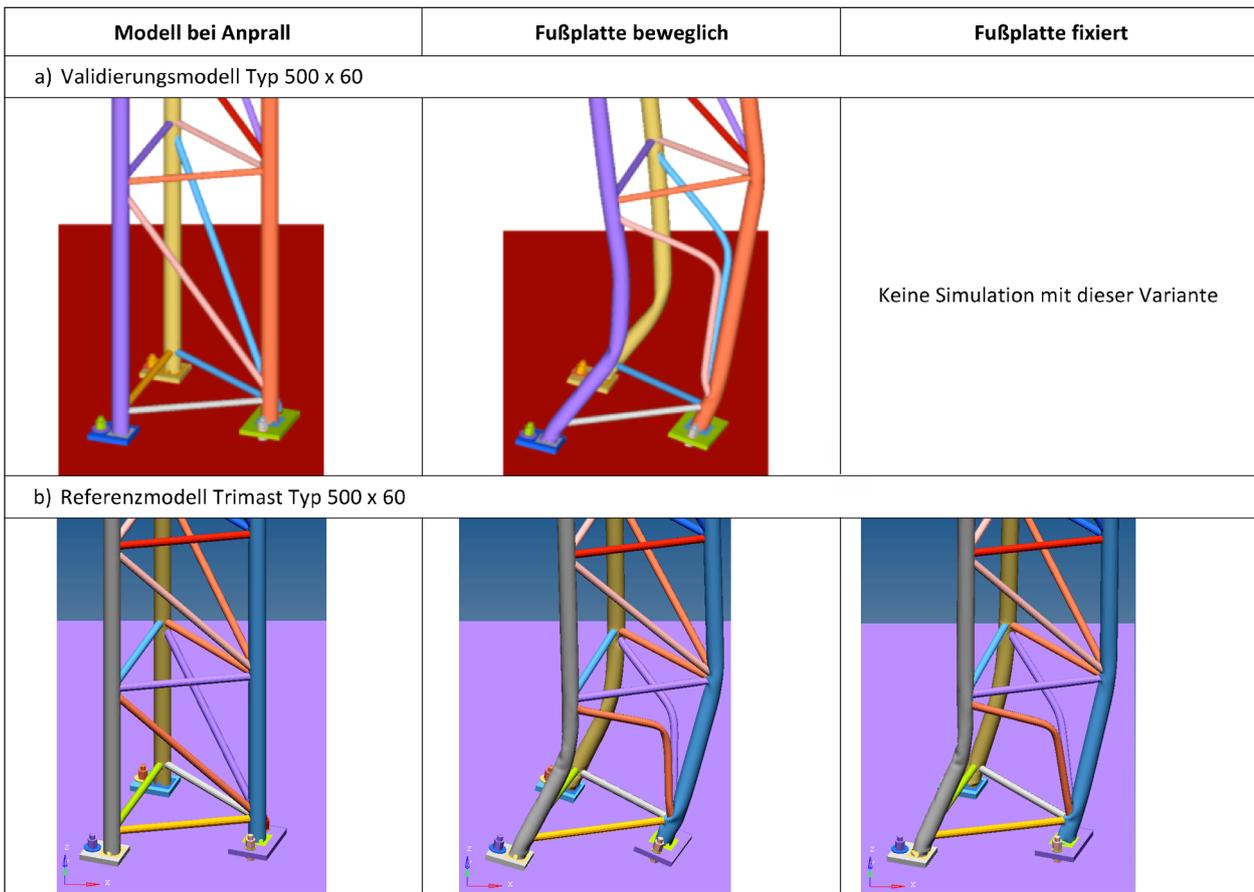
3.2.4.1 Referenzmodell

Das Gurtrohr und die schrägen Diagonalrohre werden im Referenzmodell durch den Anprall verformt (Tabelle 3-16). Ein Abreißen der Gurtrohre kann in keiner der Ausführungsvarianten festgestellt werden. Der ASI ist für das Referenzmodell mit beweglichen Fußplatten geringfügig höher und für die Ausführungsvariante mit den fixierten Fußplatten ist der ASI deutlich höher als im Validierungsmodell (Tabelle 3-17). Der THIV ist für beide Ausführungsvarianten geringfügig geringer als im Validierungsmodell. In keiner der Ausführungsvarianten ist ein Unterschreiten der Grenzwerte für den ASI von 1,0 und für den THIV von 27 km/h gemäß EN 12767 festzustellen.

3.2.4.2 Änderungen der Diagonalrohranordnungen

Durch die Änderungen der Diagonalrohranordnungen konnte nur für die Variante d), sowohl in der Ausführung mit beweglichen als auch der mit fixierten Fußplatten, ein Abreißen der Gurtrohre festgestellt werden (Tabelle 3-18). Bei den Varianten a) bis c) war das nicht der Fall.

Durch fixierte Fußplatten (Variante a)) wird der ASI des Referenzmodells deutlich erhöht (Bild 3-21). Das Entfernen der untersten horizontalen Diagonalrohre hat keinen wesentlichen Einfluss auf den ASI. Werden die beiden untersten Felder kombiniert und die schrägen Diagonalrohre entfernt (Variante c)), so ist ein deutlich niedriger ASI im Vergleich mit dem Referenzmodell festzustellen, sowohl für bewegliche als auch fixierte Fußplatten. Durch ein vollständiges Entfernen der horizontalen und schrägen Diagonalrohre der unteren beiden Felder kann nochmals eine Reduktion des ASI erreicht werden. Der ASI ist für bewegliche und fixierte Fußplatten gleich groß.

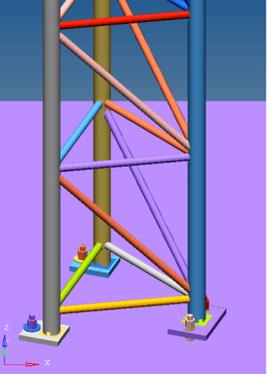
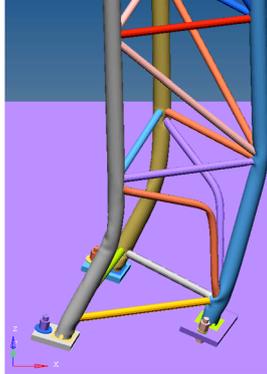
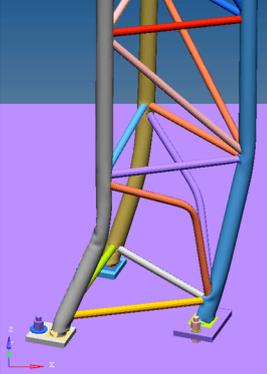
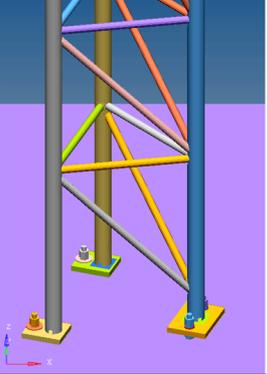
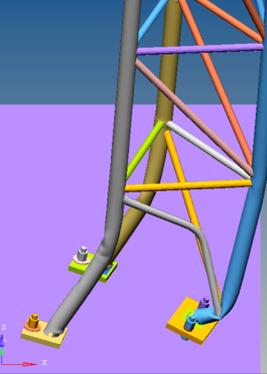
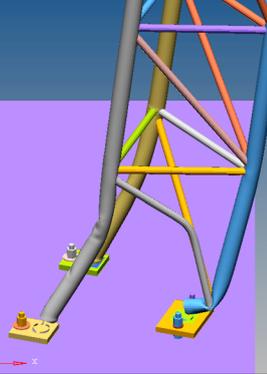
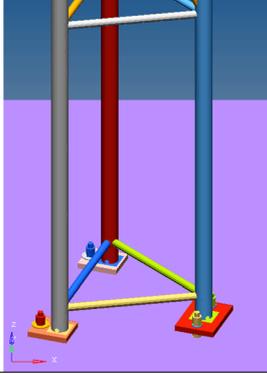
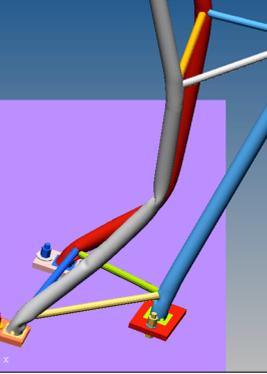
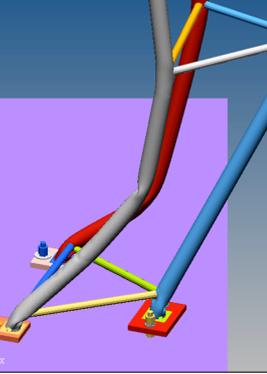
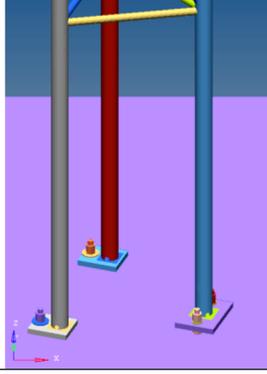
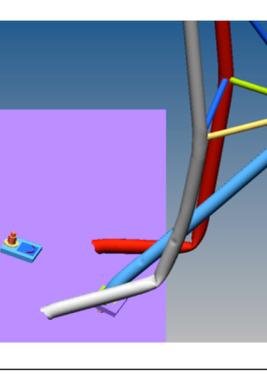
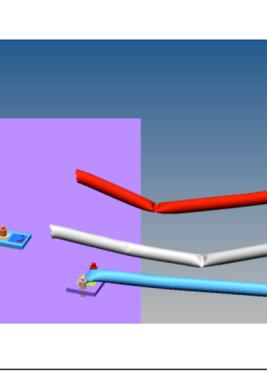


Tab. 3-16: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Validierungsmodell Typ 500 x 60	beweglich	1,0	39	Nein
b)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	beweglich	1,06	38	Nein
		fixiert	1,21	37	Nein

 Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-17: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
a) Referenzmodell Trimast Typ 500x60		
		
b) Entfernen der unteren horizontalen Diagonalrohre im untersten Feld		
		
c) Kombinieren der beiden untersten Felder und Entfernen der schrägen Diagonalrohre		
		
d) Entfernen der horizontalen und schrägen Diagonalrohre der unteren beiden Felder		
		

Tab. 3-18: Simulationsergebnisse am Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Beim THIV ist in jeder Variante ein niedrigerer Wert als im Referenzmodell festzustellen (Bild 3-22). Eine fixierte Fußplatte hat im Vergleich zu einer beweglichen keinen wesentlichen Einfluss auf den THIV. Bis auf die Variante d) wird der Grenzwert von

27 km/h gemäß EN 12767 überschritten. Auch in dieser Variante ist ein Abreißen der Fußplatten bei der Ausführungsformen festzustellen, was zur einer Reduktion des THIV führt.

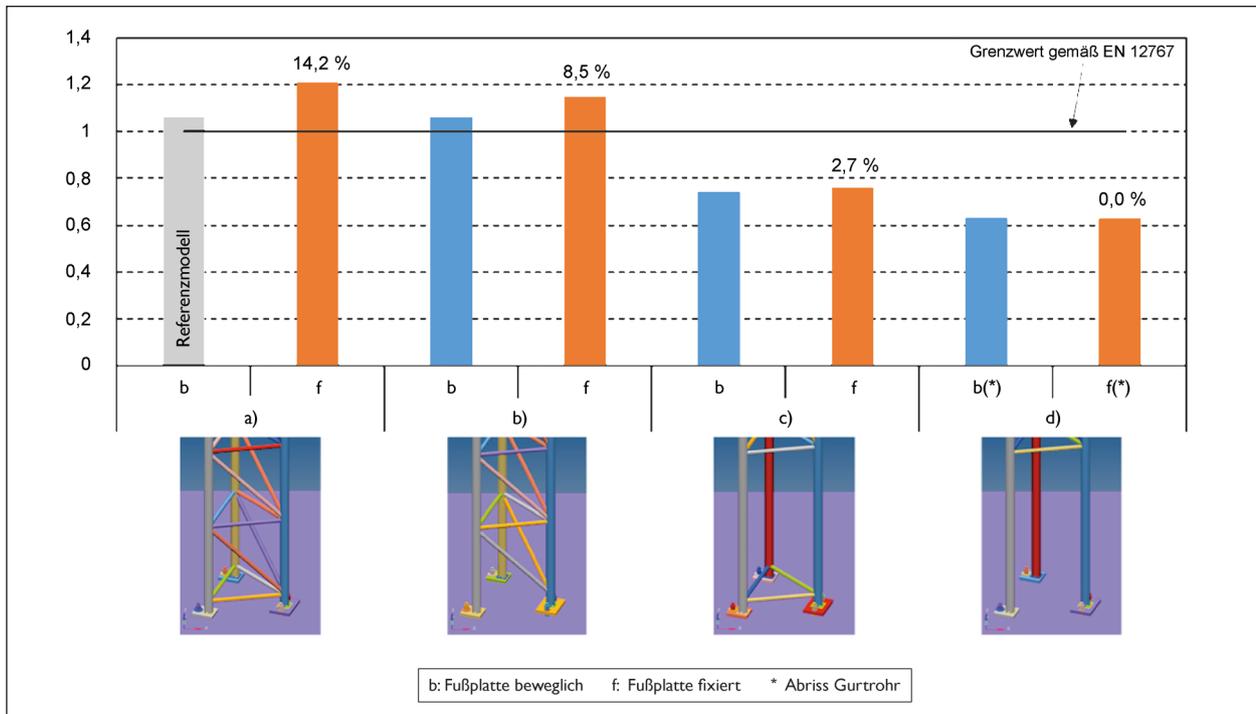


Bild 3-21: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

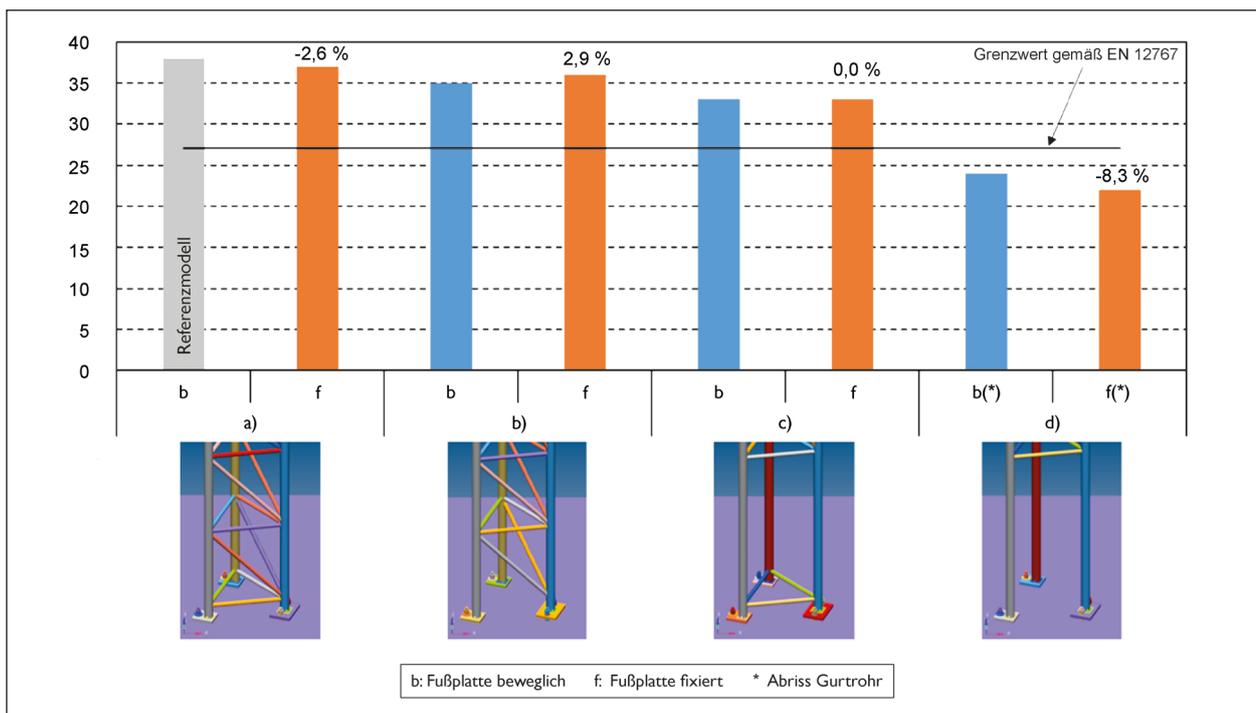


Bild 3-22: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 3-19 zusammengefasst. Damit sowohl der ASI als auch der THIV unter den Grenzwerten gemäß EN 12767 liegen, müssten die horizontalen und schrägen Diagonalrohre der unteren beiden Felder vollständig entfernt werden.

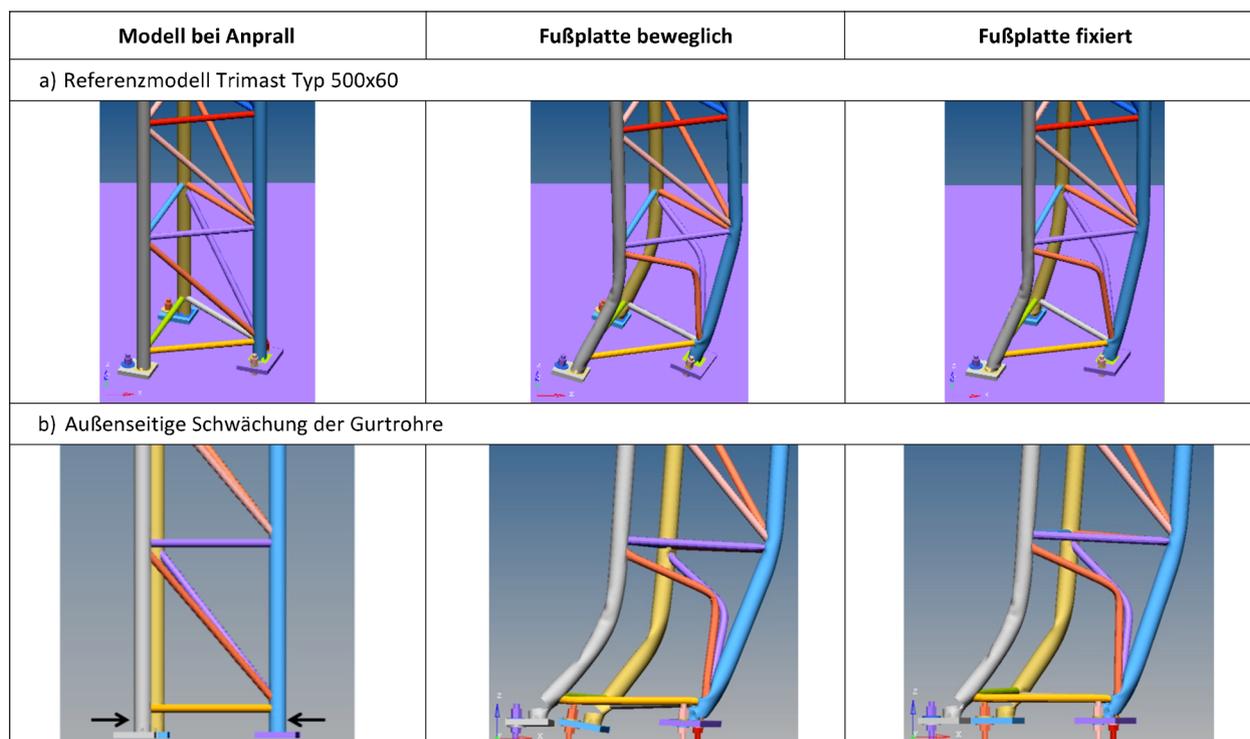
3.2.4.3 Schwächung der Gurtrohre

Ein vollständiges Abreißen der Gurtrohre für bewegliche und fixierte Fußplatten wird nur in der Variante f) erreicht (Tabelle 3-20). In der Variante d) mit fixierten Fußplatten konnte ebenso ein Abreißen der Gurtrohre festgestellt werden. In allen übrigen Varianten wurden die Gurtrohre massiv verformt, doch abgerissen wurden diese nicht.

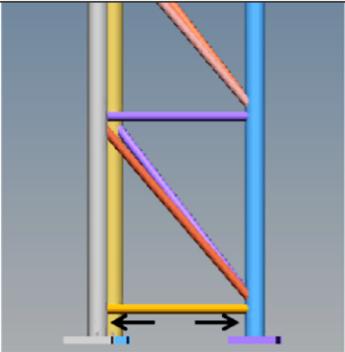
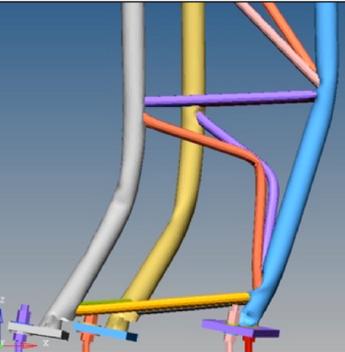
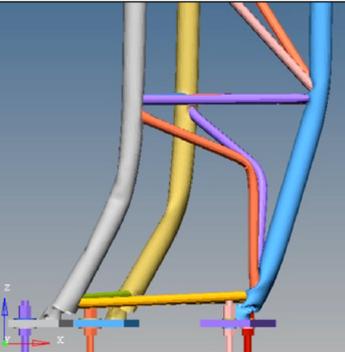
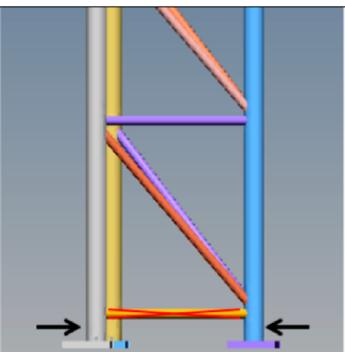
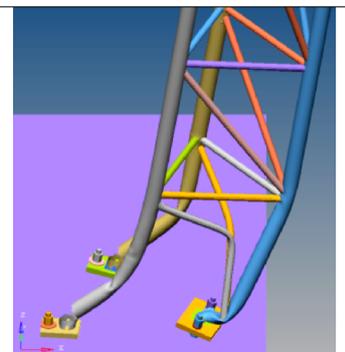
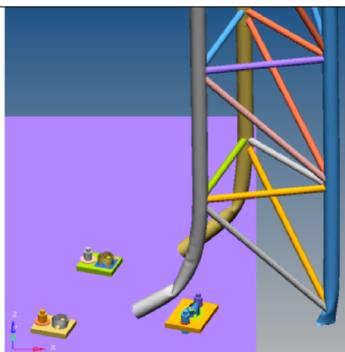
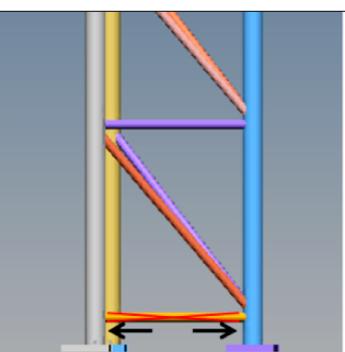
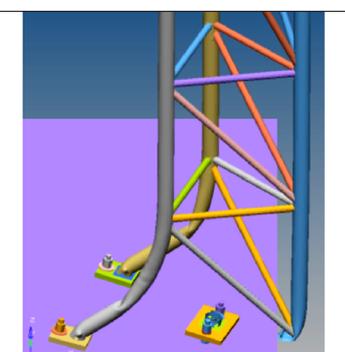
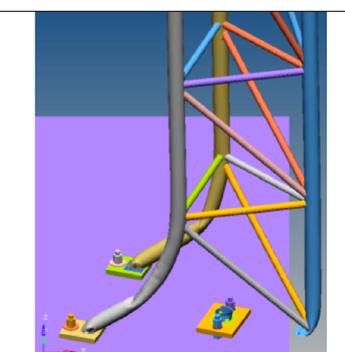
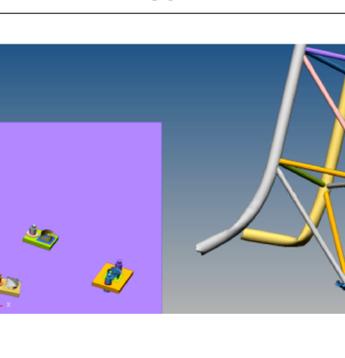
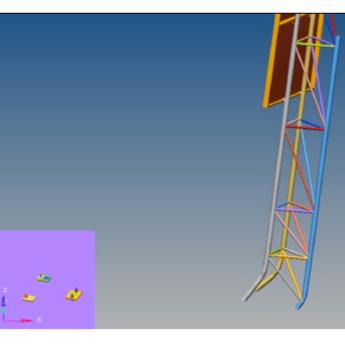
Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	beweglich	1,06	38	Nein
		fixiert	1,21	37	Nein
b)	Entfernen der unteren horizontalen Diagonalrohre im untersten Feld	beweglich	1,06	35	Nein
		fixiert	1,15	36	Nein
c)	Kombinieren der beiden untersten Felder und Entfernen der schrägen Diagonalrohre	beweglich	0,74	33	Nein
		fixiert	0,76	33	Nein
d)	Entfernen der horizontalen und schrägen Diagonalrohre der unteren beiden Felder	beweglich	0,63	24	ja
		fixiert	0,63	22	ja

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-19: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h



Tab. 3-20: Simulationsergebnisse am Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Modell bei Anprall	Fußplatte beweglich	Fußplatte fixiert
c) Innenseitige Schwächung der Gurtrohre		
		
d) Außenseitige Schwächung der Gurtrohre + Entfernen unteres Horizontalrohr		
		
e) Innenseitige Schwächung der Gurtrohre + Entfernen unteres Horizontalrohr		
		
f) Schwächung zwischen den vorderen Gurtrohren innenseitig gedreht und innenseitig am hinteren Gurtrohr		
		

Tab. 3-20: Fortsetzung

Der Grenzwert für den ASI von 1,0 gemäß EN 12767 konnte nur für die Varianten d), e) und f) für beide Ausführungsformen, bewegliche und fixierte Fußplatte unterschritten werden (Bild 3-23). In den anderen Varianten lag der ASI für zumindest eine Ausführung über dem Grenzwert. Bis auf das Referenzmodell mit fixierten Fußplatten war der ASI aller anderen Varianten geringer als beim Referenzmodell mit beweglichen Fußplatten. Eine außenseitige Schwächung der Gurtrohre (Variante b)) macht im Vergleich zu einer innenseitigen Schwächung (Variante c)) keinen nennenswerten Unterschied beim ASI. Der ASI für die Variante b) und c) in der jeweiligen Ausführung mit fixierten Fußplatten war höher als jene Ausführungen mit beweglichen Fußplatten. Werden die untersten horizontalen Diagonalrohre entfernt, so sind für bewegliche Fußplatten keine wesentlichen Unterschiede in den Varianten d) und e) festzustellen. Der ASI für die fixierten Fußplatten in den beiden Varianten liegt unter dem Wert der beweglichen, wobei für die Variante d) dieser deutlich darunterliegt. Die niedrigsten Werte für den ASI lassen sich mit der Variante f) erzielen, bei der die

Schwächung der beiden vorderen Gurtrohre um 90° gedreht wurde.

Der Grenzwert für den THIV von 27 km/h gemäß EN 12767 konnte nur für die Variante d) und f) mit jeweils fixierten Fußplatten unterschritten werden (Bild 3-24). Für keine der Varianten war eine Unterschreitung des Grenzwertes für beide Ausführungsformen festzustellen. Die Varianten b), c) und e) unterscheiden sich nicht wesentlich vom Referenzmodell. In der Variante d) liegt der THIV für die Ausführung mit fixierten Fußplatten deutlich unter der Ausführung mit beweglichen Fußplatten. Ebenso ist dies für die Variante f) festzustellen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-21 zusammengefasst.

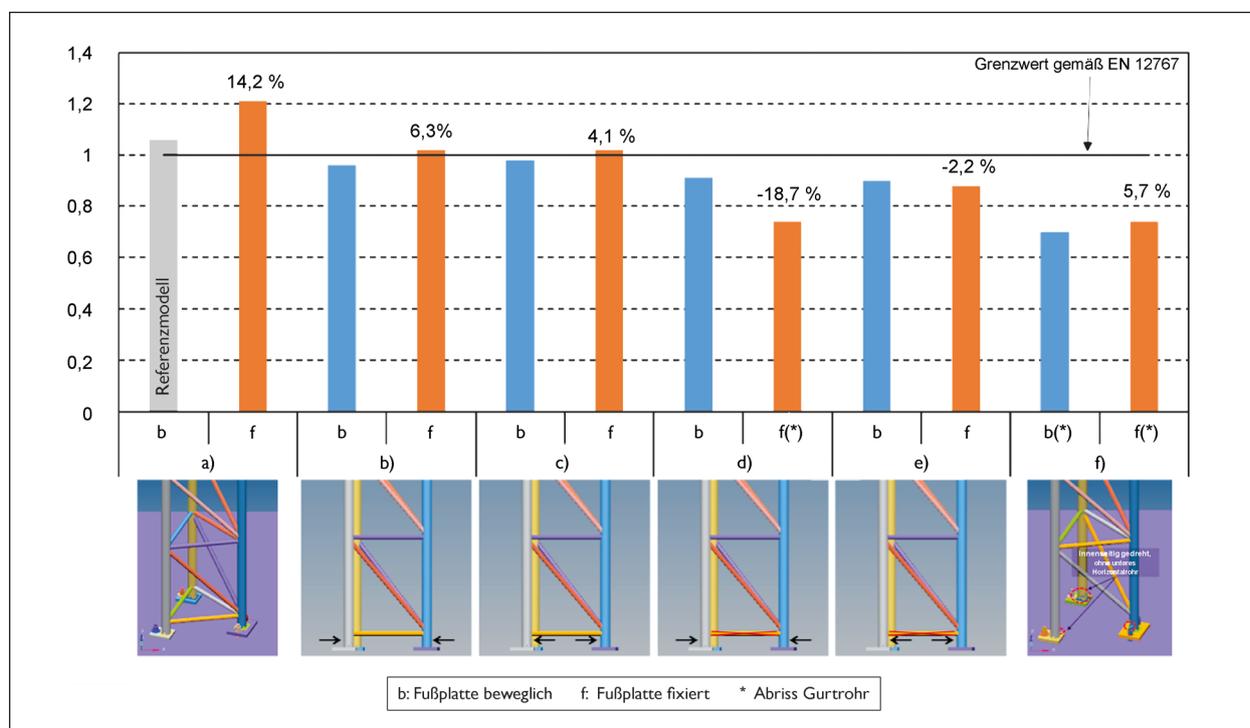


Bild 3-23: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

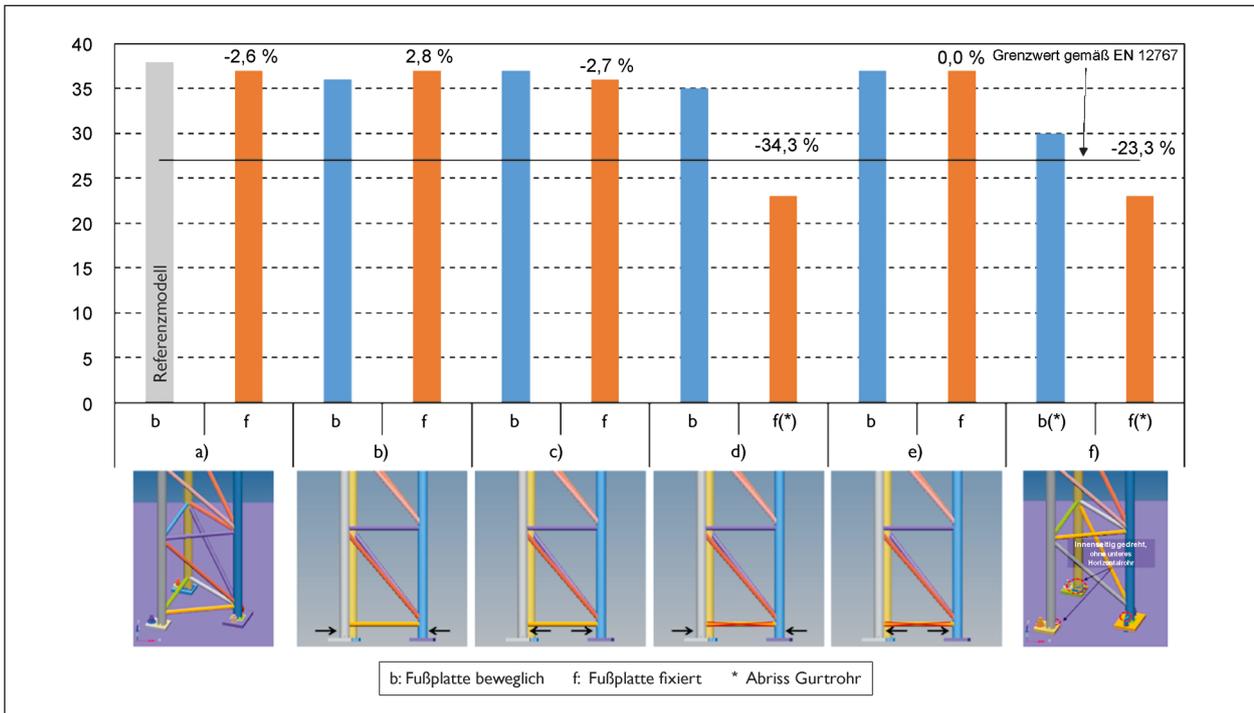


Bild 3-24: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell Trimast Typ 500 x 60	beweglich	1,06	38	Nein
		fixiert	1,21	37	Nein
b)	Außenseitige Schwächung der Gurtrohre	beweglich	0,96	36	Nein
		fixiert	1,02	37	Nein
c)	Innenseitige Schwächung der Gurtrohre	beweglich	0,98	37	Nein
		fixiert	1,02	36	Nein
d)	Außenseitige Schwächung der Gurtrohre + Entfernen unteres Horizontalrohr	beweglich	0,91	35	Nein
		fixiert	0,74	23	Ja
e)	Innenseitige Schwächung der Gurtrohre + Entfernen unteres Horizontalrohr	beweglich	0,90	37	Nein
		fixiert	0,88	37	Nein
f)	Schwächung zwischen den vorderen Gurtrohren innenseitig gedreht und innenseitig am hinteren Gurtrohr	beweglich	0,70	30	Ja
		fixiert	0,74	23	Ja

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-21: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

3.2.4.4 Reduktion Schweißnahtumfang Gurtrohr zu Fußplatte

Für die Varianten inklusive der untersten Horizontalrohre konnte weder für bewegliche noch für fixierte Fußplatten ein wesentlicher Unterschied des ASI oder THIV zum Referenzmodell festgestellt werden (Tabelle 3-22). Ein Abriss der Gurtrohre fand für diese Varianten nicht statt. Erst das Entfernen der untersten Horizontalrohre und ein Verdrehen der Schweißnahtausparung auf die Innenseite der vorderen beiden Gurtrohre bewirkt eine Reduktion des ASI und THIV im Vergleich zum Referenzmodell

(Bild 3-25 und Bild 3-26). Der ASI kann mit zunehmender Reduktion des Schweißnahtumfangs, bis auf die Ausführung mit fixierten Fußplatten des Referenzmodells, für alle Varianten verringert werden (Tabelle 3-23). Der Grenzwert von 1,0 gemäß EN 12767 wird mit einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von etwa 37 % erreicht. Ebenso ist das für den THIV der Fall, jedoch erst ab einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von etwa 52 % unterschreitet auch der THIV den Grenzwert von 27 km/h.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) mit untersten Horizontalrohren	beweglich	1,01	38	nein
		fixiert	1,15	37	nein
b)	37 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) mit untersten Horizontalrohren	beweglich	1,03	38	nein
		fixiert	1,18	37	nein
c)	44 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) mit untersten Horizontalrohren	beweglich	1,00	38	nein
		fixiert	1,13	37	nein

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-22: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte

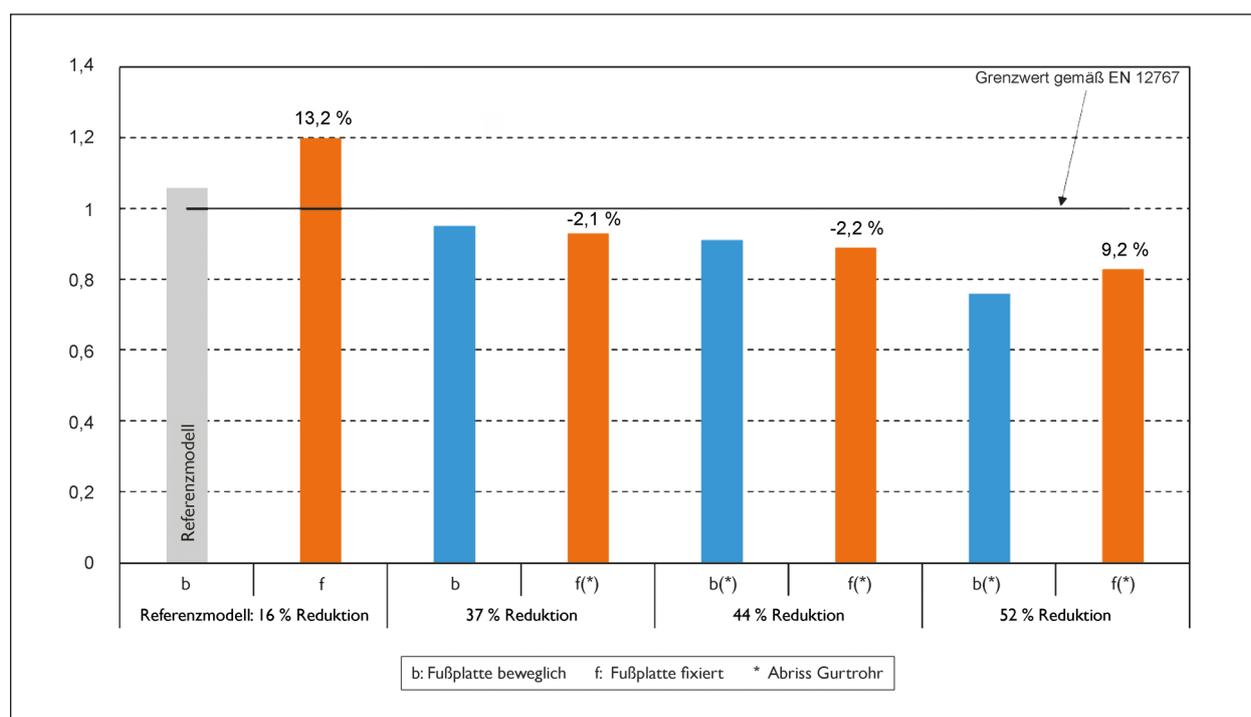


Bild 3-25: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung zwischen den vorderen Gurtrohren bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h ohne unterste Horizontalrohre

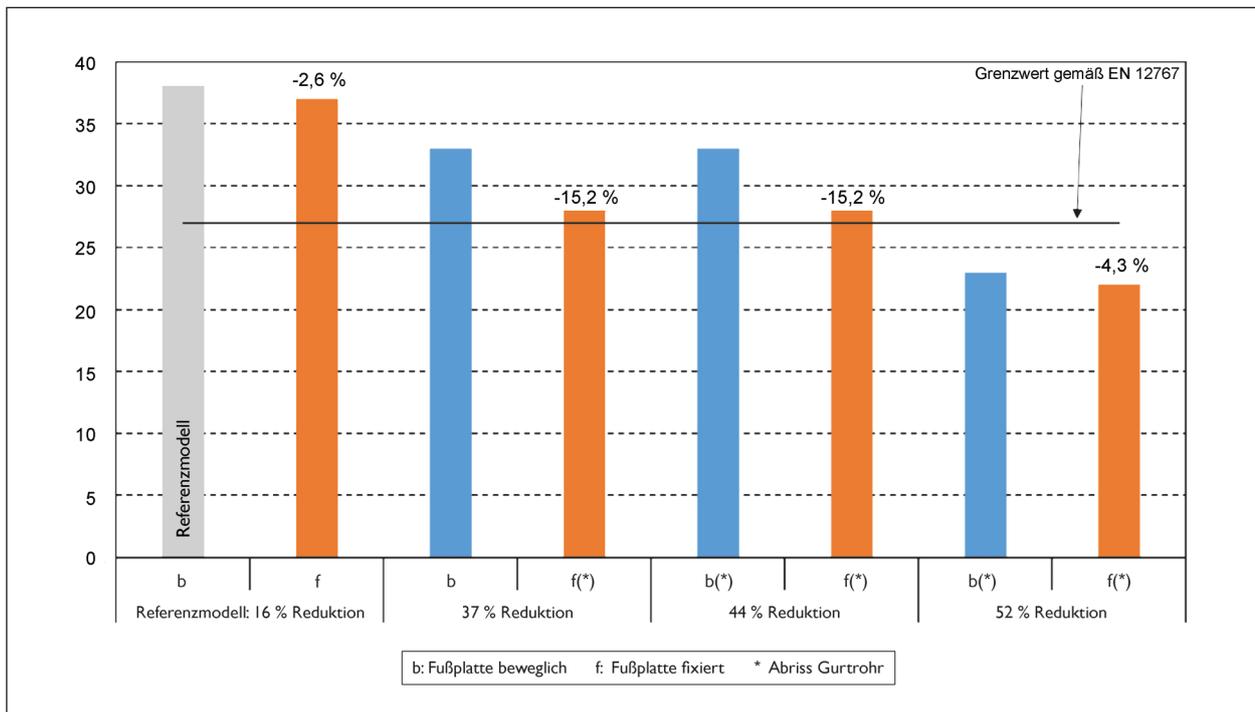


Bild 3-26: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung zwischen den vorderen Gurtrohren bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h ohne unterste Horizontalrohre

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) mit untersten horizontalen Diagonalrohren	beweglich	1,01	38	nein
		fixiert	1,15	37	nein
b)	Referenzmodell: 16 % Reduktion Schweißnahtumfang (nur Zinkabflusslöcher berücksichtigt) ohne unterste Horizontalrohre	beweglich	1,06	38	Nein
		fixiert	1,2	37	Nein
c)	37 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedrehte Schweißnahtausparung	beweglich	0,95	33	Nein
		fixiert	0,93	28	Ja
d)	44 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedrehte Schweißnahtausparung	beweglich	0,91	33	Ja
		fixiert	0,89	28	Ja
e)	52 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedrehte Schweißnahtausparung	beweglich	0,76	23	Ja
		fixiert	0,83	22	Ja

Grenzwert wird eingehalten

Tab. 3-23: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte und um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedrehte Schweißnahtausparung

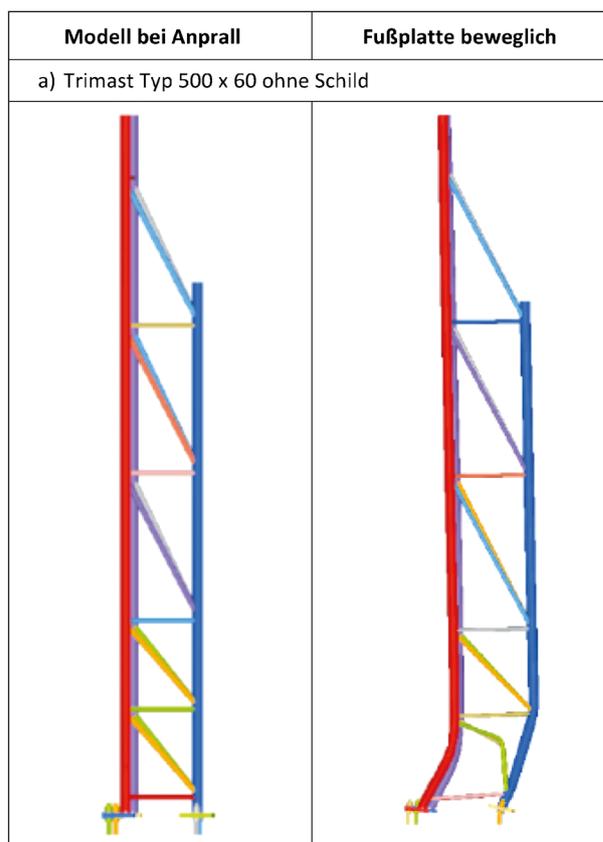
3.2.5 Prinzipsimulationen am Trimast

3.2.5.1 Trimast 500 x 60 ohne Schild

Beim Trimast 500 x 60 ohne Schild ist kein Abreißen der Gurtrohre festzustellen (Tabelle 3-24). Sowohl der ASI als auch der THIV unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ergebnissen des Trimast 500 x 60 mit Schild (Tabelle 3-25).

3.2.5.2 Trimast 350 x 48 ohne Schild

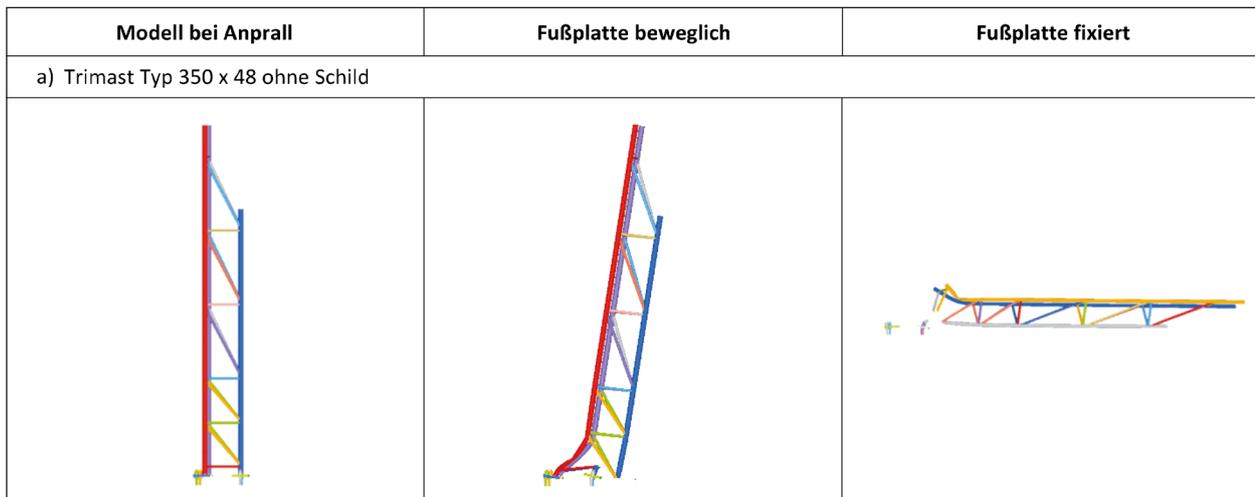
Beim Trimast Typ 350 x 48 mm ohne Schild werden in der Ausführung mit beweglichen Fußplatten die vorderen beiden Gurtrohre gerade noch nicht abgerissen (Tabelle 3-26). Das hintere Gurtrohr wird durch den Anprall abgerissen. In der Ausführung mit fixierten, vorderen Fußplatten ist ein Abreißen der Gurtrohre festzustellen. Der ASI liegt für beide Varianten unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 (Tabelle 3-27). Der THIV ist in der Ausführung mit beweglichen Fußplatten deutlich über dem Grenzwert, in der Variante mit fixierten, vorderen Fußplatten geringfügig über dem Grenzwert.



Tab. 3-24: Simulationsergebnisse für den Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Trimast Typ 500 x 60 mit Schild	beweglich	1,06	38	Nein
b)	Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild	beweglich	1,04	38	Nein

Tab. 3-25: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 mit und ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h



Tab. 3-26: Simulationsergebnisse für den Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	ASI	THIV [km/h]	Abriss Gurtrohr
a)	Referenz Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild	beweglich	1,04	38	Nein
b)	Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild mit fixierten, vorderen Fußplatten und beweglicher hinterer Fußplatte	beweglich	0,8	34,3	Nein
		fixiert	0,91	29	Ja
<div style="background-color: #92d050; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Grenzwert wird eingehalten					

Tab. 3-27: Simulationsergebnisse Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

4 Schlussfolgerungen

4.1 Grundsätzliches

Als Wesentlich für das Unterschreiten der maximal zulässigen Grenzwerte gemäß EN 12767, insbesondere für den THIV, hat sich bei allen untersuchten Konfigurationen das Abreißen der Gurtrohre herausgestellt. Durch die hohe Anprallenergie bei 100 km/h wurden die Gurtrohre beim Gabelständer Typ 750 x 76 mm als auch beim Trimast Typ 500 x 60 mm bei den Schweißnähten abgerissen. Daher war der ASI und der THIV für diese Versuche unter dem Grenzwert. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h wurden die Gurtrohre allerdings nicht abgerissen und der Grenzwert konnte insbesondere für den THIV nicht unterschritten werden.

Durch die Finite Elemente Simulation wurden unterschiedliche Modifikationen des Gabelständers und Trimasts untersucht und nach ihrer Insassensicherheit bewertet. Da im Versuch ein Abreißen der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h festgestellt wurde und ASI und THIV unter den Grenzwerten lagen, wurden die Modifikationen nur

bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h untersucht. Es wurde angenommen, dass die Ergebnisse der Modifikationen bei 35 km/h auch bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h keinen gegenteiligen Effekt zeigen.

Inwiefern sich Modifikationen auf die Grundstatik (z. B. Windlasten) des Gabelständers als auch des Trimast auswirken, wurde nicht untersucht.

Weder bei den Versuchen noch in den Simulationen wurde ein Eindringen von Teilen der Gabelständer oder Trimaste in den Fahrgastraum festgestellt.

Von Bedeutung für das Abreißen der Gurtrohre sind insbesondere der Gurtrohrdurchmesser und die Ausführung der Fußplatten. Fixierte Fußplatten wirken sich deutlich günstiger aus als bewegliche. Die Ständerhöhe und die Schildmaße haben bei den untersuchten Konfigurationen nur einen geringen Einfluss. Die Spreizung ist ebenfalls von eher untergeordneter Bedeutung im Vergleich zum Gurtrohr.

Ein weiterer Faktor wäre die Anprallseite. Erfolgt der Anprall beim Gabelständer an der gegenüberliegenden Gurtrohrseite, so begünstigt dies die Insas-

sensicherheit, da die Wirkrichtung der Diagonalen in diesem Fall umgekehrt ist. Eine kleinere Nahtdicke begünstigt das Abreißen der Gurtrohre. Die Schweißnahtdicke ist der Wandstärke der Gurtrohre entsprechend auszuführen.

Eine Tragkonstruktion sollte durch eine Schutzeinrichtung abgesichert werden, wenn beim Anprall an diese ASI und THIV über den entsprechenden Grenzwerten für eine Schutzeinrichtung liegen würden. Andernfalls wäre der Anprall an die Tragkonstruktion weniger folgenschwer als der Anprall an eine Schutzeinrichtung. Sollte ein Einsatz von Tragkonstruktionen aufgrund der Simulationen erfolgen, so sollte ein Toleranzbereich von ± 3 km/h gemäß prEN 16303 2018 berücksichtigt werden. Der Toleranzbereich von ± 3 km/h dient zum Nachweis einer ausreichenden Validierungsqualität eines Simulationsmodells. Die Wahrscheinlichkeit wäre mit diesem Toleranzbereich sehr hoch, dass der THIV, ausgehend von einem ausreichend validen Simulationsmodell und darauf aufbauenden Modifikationen, auch im Realversuch unter dem Grenzwert der EN 1317 liegen würde. Abgesichert sollten daher jene Tragkonstruktionen werden, für welche der THIV inkl. eines Toleranzbereichs von ± 3 km/h über dem Grenzwert von 33 km/h gemäß EN 1317 liegt.

4.2 Gabelständer

Für den Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60 mm konnte in den Finiten Elemente Simulationen festgestellt werden, dass der Grenzwert für den THIV knapp unterschritten wird. Im Realversuch wurde der Grenzwert etwas deutlicher unterschritten. Eine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung wäre für den Gabelständer Typ 750 x 60 mm mit Schild nicht erforderlich.

Für die Spreizung von 500 mm mit einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm wurde in den Simulationen ein Unterschreiten der Grenzwerte für ASI und THIV festgestellt. Eine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung für den Gabelständer Typ 500 x 60 mm mit Schild ist aufgrund der durchgeführten Untersuchungen daher ebenso nicht erforderlich.

Für Spreizmaße von 1.000 mm und 1.300 mm konnte in den Simulationen (Gabelständer-Einzelmast) bei einem Gurtrohrdurchmesser von 76 mm inkl. einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % im Vergleich zur Spreizung von 750 mm ein deutlich höherer THIV festgestellt werden. Inklusive

des Toleranzbereichs würde der Wert jedoch für beide Varianten unter dem Grenzwert nach EN 1317 liegen. Entsprechend der Untersuchung durch das Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH entsprächen die zulässigen Grenznormalkräfte der beiden Varianten in etwa den zulässigen Grenznormalkräften eines ungeschwächten Gabelständers mit einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm. Geht man davon aus, dass der THIV für einen Gurtrohrdurchmesser von 76 mm und einer Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % dem THIV eines ungeschwächten Gabelständers mit einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm entspricht, so wäre für die Spreizmaße von 1.000 mm und 1.300 mm und einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm keine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung erforderlich. Es erfolgte jedoch keine Simulation der Spreizmaße von 1.000 mm und 1.300 mm mit einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm, so dass hierzu keine Informationen vorliegen.

Beim Gabelständer Typ 750 x 76 mm in der gegenwärtigen Ausführung ist ein Überschreiten des Grenzwerts für den THIV festzustellen. Auch bei der Variation der Spreizmaße wurde nur durch eine Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % ein Unterschreiten des Grenzwertes gemäß EN 12767 erreicht. Einer derartig hohen Reduktion des Schweißnahtumfangs wäre ein ungeschwächter Typ 750 x 60 mm zu bevorzugen. Ungeschwächte Gabelständer mit einem Gurtrohrdurchmesser von 76 mm sollten unabhängig der Spreizmaße durch eine Schutzeinrichtung abgesichert werden.

Könnten Gabelständer mit Gurtrohrdurchmesser von 76 mm modifiziert werden, so wäre für bestimmte Modifikationen eine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung nicht notwendig. Aufgrund der Simulationsergebnisse wäre für die modifizierten Varianten (Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-4) der Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 mm, bezogen auf ASI und THIV, günstiger als ein Anprall an eine Schutzeinrichtung. Berücksichtigt sind hier nur jene Varianten, für welche der THIV inkl. des Toleranzbereichs von ± 3 km/h unter dem Grenzwert von 33 km/h gemäß EN 1317 liegt.

Besteht die Möglichkeit den Gabelständer um 180 Grad zu verdrehen, so wäre basierend auf den Simulationsergebnissen eine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung nicht notwendig. Die Untersuchung erfolgte als Gabelständer-Einzelmast Simulation. Ein Realversuch erfolgte nicht.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
b)	Entfernen des schrägen Diagonalrohrs im untersten Feld	fixiert	*
c)	Entfernen des untersten Horizontalrohr	fixiert	
d)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld	fixiert	
e)	Ersetzen der beiden unteren Felder durch ein einzelnes Feld und entfernen des schrägen Diagonalrohrs im einzelnen Feld	fixiert	
f)	Entfernen der beiden untersten Ausgleichsrohrfelder	beweglich fixiert	* *

Tab. 4-1: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch unterschiedliche Diagonalrohranordnungen gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
b)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr	fixiert	
c)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	beweglich fixiert	
d)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	fixiert	
e)	Schwächung vorderes Gurtrohr außenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr außenseitig	beweglich fixiert	* *
f)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr	beweglich fixiert	* *
g)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig über dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	beweglich fixiert	* *
h)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr	beweglich fixiert	* *
i)	Schwächung vorderes Gurtrohr innenseitig unter dem ersten Horizontalrohr + Schwächung hinteres Gurtrohr innenseitig	beweglich fixiert	* *

Tab. 4-2: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
c)	23 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	fixiert	*
d)	30 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	fixiert	*
e)	35 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich fixiert	* *
f)	42 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich fixiert	* *

Tab. 4-3: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
d)	30 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	fixiert	
e)	35 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich fixiert	* *
f)	42 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch)	beweglich fixiert	* *

Tab. 4-4: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtaussparung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

4.3 Trimast

In den Prinzipsimulationen am Trimast Typ 350 x 48 mm ohne Schild konnte für die Ausführung mit beweglichen Fußplatten für den THIV ein deutliches Überschreiten des Grenzwertes festgestellt werden. Für die Ausführung mit fixierten, vorderen Fußplatten ist ein Abreißen der Gurtrohre festzustellen und der THIV ist deutlich niedriger als der Grenzwert. Im Realversuch wurde der Trimast Typ 350 x 48 mm mit fixierten, vorderen Fußplatten und mit einer beweglichen hinteren Fußplatte getestet. Der ASI erreichte hierbei den Grenzwert von 1,0. Der THIV lag deutlich unter dem Grenzwert (THIV = 23,3 km/h). Eine Absicherung eines Trimast Typ 350 x 48 mm mit fixierten, vorderen Fußplatten und mit einer beweglichen hinteren Fußplatte ist nicht erforderlich. Sofern alle Fußplatten als beweglich ausgeführt werden, ist aufgrund der Simulationsergebnisse eine Absicherung erforderlich.

Ein Trimast Typ 500 x 60 mm in der gegenwärtigen Ausführung wäre durch eine Schutzeinrichtung abzusichern. Könnten Trimast mit Gurtrohrdurchmesser von 60 mm in geeigneter Weise modifiziert werden, so wäre für bestimmte Modifikationen eine Absicherung durch eine Schutzeinrichtung nicht notwendig. Aufgrund der Simulationsergebnisse wäre für die modifizierten Varianten (Tabelle 4-5 bis Tabelle 4-7) der Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 mm, bezogen auf ASI und THIV, günstiger als ein Anprall an eine Schutzeinrichtung. Berücksichtigt sind hier nur jene Varianten, für welche der THIV inkl. des Toleranzbereichs von ± 3 km/h unter dem Grenzwert von 33 km/h gemäß EN 1317 liegt.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
d)	Entfernen der horizontalen und schrägen Diagonalrohre der unteren beiden Felder	beweglich	*
		fixiert	*

Tab. 4-5: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
d)	Außenseitige Schwächung der Gurtrohre + Entfernen unteres Horizontalrohr	fixiert	*
f)	Schwächung zwischen den vorderen Gurtrohren innenseitig gedreht und innenseitig am hinteren Gurtrohr	beweglich	
		fixiert	*

Tab. 4-6: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm durch Schwächung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Variante	Bezeichnung	Fußplatte	
c)	37 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre verdrehten Schweißnahtausparung	fixiert	
d)	44 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedreht Schweißnahtausparung	fixiert	
e)	52 % Reduktion Schweißnahtumfang (inkl. Zinkabflussloch) ohne unterste Horizontalrohre + um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedreht Schweißnahtausparung	beweglich	*
		fixiert	*

Tab. 4-7: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

4.4 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojektes war die passive Sicherheit von ausgewählten Objekten (Gabelständer und Trimast und VZ-/Lichtmaste) der Straßenausstattung zu überprüfen. In Diskussionen mit dem Betreuerkreis wurde auch der Quattromast als potenziell gefährliches Hindernis genannt und durch eine Umfrage dem VZ-/Lichtmasten vorgezogen. Nach Vorliegen der ersten Versuchsergebnisse am Trimast würde jedoch der Quattromast die festgelegten Anforderungen nicht erfüllen können. Es wurde daher beschlossen, nur die Gabelständer und Trimasten in Realversuchen zu testen.

Für den Gabelständer mit einem Gurtrohrdurchmesser von 60 mm bei einem Spreizmaß von 750 mm wäre aufgrund der Simulationsergebnisse keine Absicherung durch eine Schutzreinrichtung erforderlich. Dies konnte auch durch einen Anprallversuch bestätigt werden.

Für den Gabelständer Typ 500 x 60 mm wäre aufgrund der Simulationsergebnisse ebenso eine Absicherung nicht erforderlich.

Könnte die Anprallseite des Gabelständers Typ 750 x 76 mm um 180° gedreht werden, so wäre entsprechend des Ergebnisses der Prinzipsimulation an einem Gabelständer-Einzelmast eine Absicherung mit einer Schutzeinrichtung nicht erforderlich. Diese Überlegung gilt für Bereiche ohne Gegenverkehr, andernfalls ist ein Anprall aus beiden Richtungen möglich. Für Straßenbereiche mit Gegenverkehrsbereichen müssten Anprallvorrichtungen eingesetzt werden, welche für Anprallsituationen aus beiden Richtungen als sicher gelten.

Die konstruktive Ausführung mit der Unterteilung der Felder und Anordnung der Diagonalrohre kann beibehalten werden. Das wesentliche Kriterium ist der Gurtrohrdurchmesser, welcher beim Gabelständer bei 60 mm zu einem Abreißen führt.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Simulationen und nachfolgendem Anprallversuch ist eine Absicherung bei einem Trimast Typ 350 x 48 mm mit fixierten, vorderen Fußplatten und mit einer beweglichen hinteren Fußplatte nicht erforderlich.

Ebenso kann die konstruktive Ausführung mit der Unterteilung der Felder und Anordnung der Diagonal- und Horizontalrohre beim Trimast beibehalten werden.

Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernde Gabelständer und Trimasten inkl. der untersuchten

Modifikationen sind in Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-7 angegeben und wären aufgrund der Ergebnisse passiv sicher. Die Auswirkungen auf die Grundstatik der modifizierten Objekte, beispielsweise durch Windbelastung, wurde nicht untersucht. Vor einer Empfehlung für die Aufstellung dieser Varianten wäre daher noch ein statischer Nachweis einzuholen.

5 Ausblick

In der gegenständlichen Studie erfolgte die Bewertung der passiven Sicherheit gemäß EN 12767. Eine Abweichung von den darin definierten Anprallkonfigurationen erfolgte nicht. In Realunfalluntersuchungen von Pkw-Abkommensunfällen (TOMASCH et al., 2016b) wurde festgestellt, dass, insbesondere auf Autobahnen, die Abkommensgeschwindigkeit von Fahrzeugen über 40 km/h liegt. Im EU Projekt RISER (Roadside Infrastructure for Safer European Roads) wurden ebenfalls Abkommensunfälle untersucht und für mehr als 95 % der Unfälle wurde eine Abkommensgeschwindigkeit von über 40 km/h festgestellt (THOMSON et al., 2005). Es wäre daher auch eine von der EN 12767 abweichende Anprallgeschwindigkeit für künftige Untersuchungen empfehlenswert.

Zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Abkommenswinkel besteht ein theoretischer Zusammenhang (THOMSON et al., 2005; HOSCHOPF and TOMASCH, 2008), sodass mit zunehmender Abkommensgeschwindigkeit der Abkommenswinkel abnimmt. Das konnte auch bei einer Auswertung von Realunfällen festgestellt werden (TOMASCH et al., 2016b; TOMASCH et al., 2016a). Aufgrund dieses Zusammenhangs wäre auch der Anprallwinkel zu variieren.

Nach Auswertungen des Kraftfahrbundesamtes ist das durchschnittliche Fahrzeuggewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2018 von 1.426 kg auf 1.515 kg angestiegen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2019). Das Mindestgewicht ausgewählter Hersteller² in Europa

² Folgende Hersteller wurden in der Studie vom International Council on Clean Transportation Europe (2019) berücksichtigt: Audi, BMW, Citroën, Dacia, Fiat, Ford, Hyundai, Kia, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Peugeot, Renault, Seat, Škoda, Suzuki, Toyota, Vauxhall, Volvo, VW, Mini, Chevrolet.

war seit 2001 stets über 1.000 kg und betrug 2017 knapp 1.200 kg (International Council on Clean Transportation Europe, 2019). Im Vergleich zum derzeit in der EN 12767 verwendeten Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 900 kg liegt das Gewicht neu zugelassener Personenkraftwagen deutlich darüber. Daher wäre für weitergehende Untersuchungen der passiven Sicherheit der in der gegenständlichen Studie bewerteten Anprallobjekte die Anprallgeschwindigkeit sowie auch die Masse des Pkw anzupassen.

In den Voruntersuchungen der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018) konnte festgestellt werden, dass es bei den Unfällen nicht nur zu Frontalkollisionen kommt. 16 % der Fahrzeuge prallten mit der Seite gegen ein Objekt neben der Fahrbahn. Diese Fahrzeuge kommen mit einer schleudernden Bewegung von der Fahrbahn ab. Im Projekt RISER (THOMSON et al., 2005) wurde für etwa 53 % der untersuchten Abkommensunfälle eine Gierbewegung des Fahrzeugs festgestellt. Eine Untersuchung zu Auswirkungen beim Anprall an die Fahrzeugseite wäre hierzu erforderlich.

Vielfach ist aufgrund der Geländebeschaffenheit eine ebene Aufstellung der Gabelständer nicht möglich, sodass ein Gabelständer fahrbahnenmontiert wird und der zweite beispielsweise erhöht auf der Böschung befestigt werden muss. Hierzu sind keine Erkenntnisse zum Verhalten beim Anprall vorliegend.

Da die Objekte Witterungseinflüssen (Korrosion) ausgesetzt sind, welche von hochsommerlichen Temperaturen bis zu tief winterlichen Verhältnissen reichen, fehlt hier die Kenntnis, wie sich Witterungseinflüsse auf die Sicherheit auswirken.

Hinsichtlich der statischen Auslegung der Objekte erfolgte eine Untersuchung durch das Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH. Jedoch bezog sich das nur auf die Gurtrohrdurchmesser. Eine Überprüfung der statischen Auslegung der einzelnen Modifikationsvarianten wurde nicht detailliert durchgeführt.

Die zum Einsatz kommenden Stähle werden aufgrund ihrer Materialdaten eingeteilt. Diese müssen Mindestanforderungen erfüllen. Maximalwerte werden jedoch nicht berücksichtigt. Teilweise können hierbei die Materialdaten doch erheblich über den Mindestanforderungen liegen (STRAUSS et al., 2006). Eine Untersuchung der Auswirkungen unter-

schiedlicher Bruchdehnungen derselben Stahlgütegruppen wäre daher empfehlenswert.

Obwohl alternativ angetriebene Fahrzeuge noch ein Nischensegment sind und 2019 lediglich einen Anteil von rund 9 % aller Neuzulassungen in Deutschland hatten, nimmt der Anteil stetig zu (KBA, 2020). Insbesondere den Elektrofahrzeugen kommt besondere mediale Aufmerksamkeit zu, da es immer wieder zu Fahrzeugbränden kommt. Inwieweit sich Kollisionen mit Tragkonstruktionen auf die Insassensicherheit und auf das mögliche Auslösen eines Fahrzeugbrandes auswirken, ist nicht bekannt.

Zusammenfassend werden folgende Konfigurationen zu weiteren Untersuchungen vorgeschlagen:

- Unterschiedliche Anprallgeschwindigkeiten bei dem gemäß EN 12767 eingesetzten Fahrzeug
- Unterschiedliche Fahrzeugmassen bei der gemäß EN 12767 vorgeschriebenen Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Unterschiedliche Anprallwinkel bei dem gemäß EN 12767 eingesetzten Fahrzeug
- Bewertung der Insassensicherheit beim Seitenanprall
- Berücksichtigung von straßenspezifischen Gegebenheiten wie beispielsweise Böschungen
- Statische Bemessung der untersuchten Modifikationsvarianten (Dauerfestigkeit, Windlasten)
- Berücksichtigung des Alterungsprozesses und Korrosionseinflüsse auf das Verhalten beim Anprall
- Berücksichtigung unterschiedlicher Festigkeitssparameter derselben Stahlgütegruppen
- Bewertung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen hinsichtlich Insassensicherheit und Unfallfolgen wie beispielsweise eines Fahrzeugbrandes

Literatur

- BERG, A. & AHLGRIMM, J. (2010a), „Baumunfälle – nach wie vor Handlungs- und Forschungsbedarf“, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, S. 118–126.
- BERG, A. & AHLGRIMM, J. (2010b), “Tree impacts – still one of the most important focal points of road deaths”, paper presented at 4th International Conference on ESAR, September 16-18, Hanover, Germany.
- BOROVKOV, A.; KLYAVIN, O. & HICHAILOV, A. (2006), “Finite Element Modeling and Analysis of Crash Safe Composite Lighting Columns, Contact-Impact Problem”, 2006, Detroit, USA, available at: <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2006/32ImpactAnalysis.pdf>.
- BRUSKI, D.; BURZYŃSKI, S.; CHRÓSCIELEWSKI, J.; PACHOCKI, Ł. & WITKOWSKI, W. (2019), “On the validation of the LS-DYNA Geo Metro numerical model”, MATEC Web of Conferences, Vol. 262 No. 6, p. 1.0001.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2018), Voruntersuchung von Unfällen zur passiven Sicherheit von Gegenständen der Straßenausstattung.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2000), ARS 21/2000: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 21/2000; Sachgebiet 07.5: Straßenverkehrstechnik und Straßenausstattung; Wegweisung und Nummerierung; Verkehrszeichen; Grundsätze für die Aufstellung von Verkehrsschildern an Bundesfernstraßen (accessed 3 October 2017).
- Comité Européen De Normalisation (2008), EN 12767: Passive safety of support structures for road equipment — Requirements and test methods, 93.080.30 (accessed 22 April 2016).
- Comité Européen De Normalisation (2010), EN 1317-1: Road restraint systems — Part 1: Terminology and general criteria for test methods, 13.200; 93.080.30 (accessed 22 April 2016).
- Comité Européen De Normalisation (2011), EN 1317-2: Road restraint systems — Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets, 13.200; 93.080.30 (accessed 22 April 2016).
- Comité Européen De Normalisation (2018), prEN 16303:2018: Rückhaltesysteme an Straßen – Validierungs- und Nachweisverfahren für die Nutzung von Computersimulationen bei Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesysteme, 13.200; 93.080.30.
- ELMARAKBI, A.; SENNAH, K.; SAMAAN, M. & SIRIYA, P. (2006), “Crashworthiness of Motor Vehicle and Traffic Light Pole in Frontal Collisions”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132 No. 9, pp. 722–733.
- FREUDENSTEIN, S. (2012), Untersuchung an Schildhalterkonstruktionen (3 Bauarten) zur statischen Tragfähigkeit nach Korrosion im Salzsprühnebel gemäß DIN EN ISO 9227:2006 und Dauerschwellbelastung: Bericht Nr. 2872, Technische Universität München.
- FRÖHLICH, B. (2018), “Crash Simulation von Fahrzeugen an Schutzeinrichtungen der Strasse”, paper presented at German LS-DYNA Forum, 15th – 17th October 2018, Bamberg, available at: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/2018-ls-dyna-forum/papers-2018/dienstag-16.-oktober/crash-road-safety/crash-simulation-von-fahrzeugen-an-schutzeinrichtungen-der-strasse>.
- HOSCHOPF, H. & TOMASCH, E. (2008), “Single Vehicle Accidents, Incidence and Avoidance”, paper presented at 3rd International Conference ESAR, September 5-6, Hanover, Germany.
- International Council on Clean Transportation Europe (2019), European Vehicle Market Statistics: Pocketbook 2019/20, Berlin, Germany, available at: https://theicct.org/sites/default/files/publications/European_vehicle_market_statistics_20192020_20191216.pdf.
- KBA (2020), Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2019, FZ 14, available at: https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz14_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2019), Durchschnittliches Leergewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2018, available at: <https://de.statista.com/>

- statistik/daten/studie/12944/umfrage/entwicklung-des-leergewichts-von-neuwagen/#statistic-Container.
- KRAMER, F.; SCHICK, S.; LEPENIES, I. & LIEBSCHER, M.; “Normgerechte Auslegung von Lichtmasten bei PKW-Kollisionen mit Hilfe numerischer Simulation”.
- NCAC (2008), Development & Validation of a Finite Element Model for the 1997 Geo Metro Passenger Sedan, Washington, D.C.; USA.
- NCAC (2013), “Crash Simulation Vehicle Models”, available at: <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> (accessed 27 June 2013).
- PAWLAK, M. (2016), “The Acceleration Severity Index in the impact of a vehicle against permanent road equipment support structures”, Mechanics Research Communications, Vol. 77, pp. 21–28.
- PINTAR, F. A.; MAIMAN, D. J. & YOGANANDAN, N. (2007), “Injury Patterns in Side Pole Crashes”, Annual Proceedings/Association for the Advancement of Automotive Medicine, Vol. 51, pp. 419–433.
- RAL – Güteschutzgemeinschaft Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen e. V. (GVZ) (2007), Industrie-Norm für Aufstellvorrichtungen von Standardverkehrszeichen: IVZ 2007.
- STRAUSS, A.; KALA, Z.; BERGMEISTER, K.; HOFFMANN, S. & NOVÁK, D. (2006), “Technologische Eigenschaften von Stählen im europäischen Vergleich”, Stahlbau, Vol. 75 No. 1, S. 55–60.
- TAHAN, F.; MARZOUGUI, D.; ZAOUK, A.; BEDEWI, N.; ESKANDARIAN, A. & MECZKOWSKI, L. (2005), “Safety performance evaluation of secure mailboxes using finite element simulations and crash testing”, International Journal of Crashworthiness, Vol. 10 No. 4, pp. 341–349.
- TENG, T.-L. (2016), “Impact Performance of W-beam Guardrail Supported by Different Shaped Posts”, International Journal of Mechanical Engineering and Applications, Vol. 4 No. 2, p. 59.
- THOMSON, R.; FAGERLIND, H.; MARTINEZ, A. V.; AMENGUAL, A.; NAING, C. L.; HILL, J.; HOSCHOPF, H.; DUPRE, G.; BISSON, O.; KELKKA, M.; VAN DER HORST, R. & GARCIA, J. M. (2005), Deliverable D06: European Best Practice for Road Design: Guidelines for Roadside Infrastructure on New and Existing Roads, EC FP5 Project RISER, available at: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/riser_guidelines_for_roadside_infrastructure_on_new_and_existing_roads.pdf.
- TOMASCH, E.; HOSCHOPF, H.; SINZ, W. & STRNAD, B. (2016a), “Method to Optimise the Position of Rumble Strips on the Hard Shoulder to Avoid Run-off-road Accidents and Unnecessary Noise Pollution”, Transportation Research Procedia, Vol. 14, pp. 3849–3858.
- TOMASCH, E.; HOSCHOPF, H.; STEFAN Ch. & STÜTZ, R. (2016b), “Requirements of a safety zone width for run-off-road accidents to prevent severe injuries when impacting hazardous objects”, paper presented at European Road Infrastructure Congress, 18.10.-20.10.2016, Leeds, UK.

Bilder

Bild 2-1: Methodik

Bild 2-2: Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf beim Kalibriertest

Bild 2-3: Einbau Beschleunigungssensoren und Messtechnik

Bild 2-4: Prinzipskizze Gabelständer (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2000) und Trimast (adaptiert nach Forster GmbH)

Bild 2-5: Konstruktionsskizzen Gabelständer Typ 750 x 76 mit Schildabmessungen 2.600 x 4.000

Bild 2-6: Konstruktionsskizzen Gabelständer Typ 750 x 60 mit Schildabmessungen 3.000 x 3.000

Bild 2-7: ALFORM-Klemmschelle mit 40 mm Klemmbreite

Bild 2-8: Trimast TRI 350 x 48 mit Schildabmessungen 1.500 x 1.8000

Bild 2-9: Trimast TRI 500 x 60 mit Schildabmessungen 1.400 x 2.000

- Bild 2-10: Prinzipskizze der Anprallkonfiguration – Anprallwinkel und Anprallposition
- Bild 2-11: Verwendetes Fahrzeugmodell Suzuki GEO METRO ver. GM R3 in Vollansicht (links) und mit teilweise ausgeblendeten Frontabdeckungen (rechts).
- Bild 2-12: Getesteter Gabelständer Typ 750 x 76 mit dreiteiliger Schildtafel in der Größe 2.600 x 4.000 mm (links) und Simulationsmodell (mittig und rechts).
- Bild 2-13: Oben: Das Klemmschellenmodell setzt sich aus Schellengürtel (rot) und Klemme (olivgrün) zusammen. Unten: Die getestete Aluminium-Klemmschelle im Vergleich. Rechts: Der Klemmmechanismus, der die Klemme in der Schellenausfachung hält, wurde mittels eindimensionaler, starrer Verbindungen angenähert.
- Bild 2-14: a) Vergleich der Schildbefestigung im Versuch (oben) und im Simulationsmodell (unten) am Gabelmast. Die Schildausfaltung befindet sich zwischen den Klemmlaschen. b) Realisierung der Klemmspannkraft mittels eindimensionalem Federelement (magentafarbene Linie).
- Bild 2-15: Die Verbindung der einzelnen Schilduntergruppen (b)) wurde über die Zusammenlegung einzelner Knoten der Schildränder (dunkelblau) realisiert (nicht sichtbar), um der Wirkung einer Schraubverbindung zu entsprechen (a)).
- Bild 2-16: Fußplatten mit Gewindestangensegment, Muttern und Unterlegscheibe am Gabelmast. Die Fußplatte befindet sich entsprechend der Versuchsbedingung etwa 40 mm über dem Fundament. Die Fixierung der Gesamtkonstruktion wird über eine Einspannung der unteren Elementknoten des Gewindestangensegments erreicht.
- Bild 2-17: Detaillierte Ansicht der Fußplatte. Die Fixierung der Gesamtkonstruktion erfolgt in der Simulation über das Einspannen von Elementknoten (blaue Dreiecke). Die Schweißnahtverbindung wird mittels fixierten Elementverbindungen (dunkelgraue Struktur) umgesetzt. Die Versuche wurden mit zwei Schraubmuttern über der Fußplatte durchgeführt, die im Modell durch eine durchgehende Schraubmutter angenähert wurden.
- Bild 2-18: Getesteter Trimast vom Typ 500 x 60 mit Schild 1.400 x 2.500 mm und Simulationsmodell
- Bild 2-19: Links: Schildbefestigung beim Simulationsmodell am Trimast Typ 500 x 60. Die Schildausfaltung (Schildrahmen) befindet sich zwischen den Klemmlaschen. Rechts: Klemmschelle Durchmesser 60 mm für den Trimast (siehe auch Bild 2-13 bis Bild 2-14).
- Bild 2-20: Fußplatten mit Gewindestangen, Muttern und Unterlegscheibe am Trimast.
- Bild 2-21: Vergleich von Versuch und Modell im unteren Mastbereich des vorderen Gurtrohrs mit Fußplatte. Die Schweißnähte (rote, grüne und graue Struktur) wurden dem Realmast angepasst. Die Gewindestangen wurden durch fixierte Elementknoten befestigt (blaue Struktur).
- Bild 2-22: Die Bruchspannung wird aus der Zugkraft und der Querschnittsfläche (A) bei Materialversagen bestimmt. Diese Methode war nur für die Gurtrohrproben möglich. Die Diagonalrohre wurden als Ganzes geprüft, womit eine Querschnittsflächenvermessung für eine exakte Bruchspannungsberechnung nicht genau genug möglich war.
- Bild 2-23: Spannung-Dehnungs-Diagramm für Gurtrohr (links) und Diagonalrohr (rechts). Aus der experimentell bestimmten technischen Spannung – technische Dehnung wird bis zur Zugfestigkeit (schwarzer Punkt) die wahre Spannung – wahre Dehnung berechnet. Die wahre Spannung für Dehnungswerte ab maximaler Zugfestigkeit (schwarzer Punkt) wird über den Probenquerschnitt und der darauf wirkenden Zugkraft ermittelt und ist hier nicht abgebildet. Die wahre Dehnung wird ab Beginn der der Materialeinschnürung (schwarzer Punkt) lokal im Einschnürungsbereich (Necking) gemessen.

- Bild 2-24: Anprallkonfiguration beim Gabelständer, Trimast und Gabelständer-Einzelmast
- Bild 2-25: Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH
- Bild 2-26: Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Gabelständer Typ 750 x 76. a) Referenzmodell. b) bis f) Modifikationen des Referenzmodells
- Bild 2-27: Gurtrohrschwächung am Gabelständer. Keilförmiger Einschnitt am Gurtrohr erfolgte durch Entfernen von Elementen a), optisch hervorgehoben durch die weiße Markierung b). Untersuchte Positionen am vorderen (Position 1-4) sowie am hinteren Gurtrohr (Position 5-8) c).
- Bild 2-28: Schematische Darstellung der Reduktion des Schweißumfangs mittels keilförmigen Einschnitt (a) und Schweißnahtausparung an der Verbindung zwischen Gurtrohr und Fußplatte (b).
- Bild 2-29: Reduktion des Schweißnahtumfangs mittels Einschnitt. (a) Der Einschnitt variiert bei gleichbleibendem Schnittwinkel (kleines Bild: schematischer Einschnitt am Gurtrohr). (b) Schematische Darstellung im Simulationsmodell am Beispiel einer innenseitigen Reduktion von etwa 40 % des Gesamtumfangs.
- Bild 2-30: Gabelständer Typ 500 x 60 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH
- Bild 2-31: Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung, gleicher Ständerhöhe und bei gleichem Gurtrohrdurchmesser. b) Referenzmodell des Typs 750 x 76 und Änderung des Spreizmaßes bei c) und d).
- Bild 2-32: Gabelständer-Einzelmast bei gleicher Spreizung, gleichen Ständerhöhen und unterschiedlichem Gurtrohrdurchmesser
- Bild 2-33: Gabelständer-Einzelmast bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen. a) Referenzmodell Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 5,5 m. b) Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 3,5 m und c) Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 2,5 m.
- Bild 2-34: Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen. a) Referenzmodell Typ 750 x 60 mit einer Höhe von 3,5 m. b) Typ 500 x 60 mit einer Höhe von 2,5 m.
- Bild 2-35: Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 mit einer Höhe von 5,5 m. a) Referenzmodell, b) Gabelständer-Einzelmast um 180° gedreht.
- Bild 2-36: Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH
- Bild 2-37: Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Trimast 500 x 60. a) Referenzmodell. b) bis d) Modifikationen des Referenzmodells mit entfernten Diagonalrohren im Bereich der beiden Ausgleichsrohrebenen
- Bild 2-38: Gurtrohrschwächung am Trimast mit und ohne untere Horizontalrohre. Keilförmiger Einschnitt am Gurtrohr an der Außen- bzw. Innenseite (Position 1-4) sowie Verdrehen des Einschnitts um 90° an den beiden vorderen Gurtrohren (Position 5-6).
- Bild 2-39: Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der Anbindung zur Fußplatte mit (a)) und ohne (b)) unterste horizontalen Diagonalrohren, wobei im Fall (b)) die Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre um 90° zur Innenseite gedreht ist.
- Bild 2-40: Trimast Typ 500 x 60 mit einer Ständerhöhe von 4,5 m ohne Schild.
- Bild 2-41: Referenzmodell des Trimast Typ 350 x 48 gemäß den Konstruktionsunterlagen vom Ingenieurbüro für Tragwerksanalyse Dresden GmbH
- Bild 3-1: Anpralltest Gabelständer 750 x 76 mm bei 100 km/h vor dem Versuch

- Bild 3-2: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 76 mm bei 100 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-3: Anpralltest Gabelständer 750 x 76 mm bei ca. 35 km/h vor dem Versuch
- Bild 3-4: Anprallsituation am Gabelständer bei ca. 35 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-5: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 60 mm bei 35 km/h vor dem Versuch
- Bild 3-6: Anprallsituation am Gabelständer 750 x 60 mm bei 35 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-7: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 100 km/h vor dem Versuch
- Bild 3-8: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 100 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-9: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 35 km/h vor dem Versuch
- Bild 3-10: Anprallsituation Trimast 500 x 60 mm bei 35 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-11: Anprallsituation Trimast 350 x 48 mm bei 35 km/h vor dem Versuch
- Bild 3-12: Anprallsituation Trimast 350 x 48 mm bei 35 km/h nach dem Versuch
- Bild 3-13: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-14: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-15: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h.
- Bild 3-16: Absolutwert bzw. Veränderung THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-17: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-18: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-19: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtaussparung bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-20: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Gabelständer Typ 750 x 76 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtaussparung bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-21: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-22: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Bild 3-23: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Bild 3-24: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten der Gurtrohre bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Bild 3-25: Absolutwert bzw. Veränderung des ASI bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung zwischen den vorderen Gurtrohren bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h ohne unterste Horizontalrohre

Bild 3-26: Absolutwert bzw. Veränderung des THIV bezogen auf das Referenzmodell beim Anprall an den Trimast Typ 500 x 60 bei Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung zwischen den vorderen Gurtrohren bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h ohne unterste Horizontalrohre

Tab. 2-11: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Gabelständers Typ 750 x 76 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Tab. 2-12: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Gabelständers Typ 750 x 76 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h

Tab. 2-13: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Gabelständer Typ 750 x 76 mm bei 100 km/h

Tab. 2-14: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Gabelständer Typ 750 x 76 mm bei 35 km/h

Tab. 2-15: Ergebnisse der Validierung des Trimast Typ 500 x 60 mm

Tab. 2-16: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Trimasts Typ 500 x 60 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h

Tab. 2-17: Verifizierungs- und Bewertungskriterien für Versuchssimulation des Trimasts Typ 500 x 60 mm bei einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h

Tab. 2-18: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Trimast Typ 500 x 60 mm bei 100 km/h

Tab. 2-19: Vergleich Anpralltest zu Simulation an den Trimast Typ 500 x 60 mm bei 35 km/h

Tab. 2-20: Simulationsmatrix des Referenzmodells für den Gabelständer Typ 750 x 76

Tab. 2-21: Simulationsmatrix durch Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Gabelständer Typ 750 x 76. a) Referenzmodell. b) bis g) Modifikationen des Referenzmodells.

Tab. 2-22: Simulationsmatrix durch Gurtrohrschwächung für den Gabelständer Typ 750 x 76

Tab. 2-23: Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt oder Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Gabelmasts Typ

Tabellen

Tab. 2-1: Kenngrößen Gabelständer

Tab. 2-2: Kenngrößen Trimast

Tab. 2-3: Versuchsmatrix

Tab. 2-4: Materialkennwerte für Diagonalrohre und Gurtrohre. Alle Werte beziehen sich auf die technische Spannung/technische Dehnung.

Tab. 2-5: Primäre Materialkennwerte einzelner Gabel- und Trimastkomponenten

Tab. 2-6: Energieabsorptionskategorien gemäß EN 12767

Tab. 2-7: Insassensicherheit gemäß EN 12767

Tab. 2-8: Anprallheftigkeitsstufen gemäß EN 1317

Tab. 2-9: Toleranzbereich für ASI und THIV in der Validierung gemäß prEN 16303:2018

Tab. 2-10: Ergebnisse der Validierung des Gabelständers Typ 750 x 76 mm

	750 x 76 mm an der Anbindung zur Fußplatte	Anbindung zur Fußplatte + um 90° zur Innenseite gedrehte Schweißnahtausparung der vorderen Gurtrohre
Tab. 2-24:	Simulationsmatrix für den Gabelständer Typ 500 x 60	Tab. 2-36: Simulationsmatrix Trimast ohne Schild Typ 500 x 60
Tab. 2-25:	Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76	Tab. 2-37: Simulationsmatrix Trimast Typ 350 x 48 mm
Tab. 2-26:	Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung, gleicher Ständerhöhe bei gleichem Gurtrohrdurchmesser und Reduktion des Schweißnahtumfangs von 42 % durch Schweißnahtausparung	Tab. 3-1: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
Tab. 2-27:	Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast gleicher Spreizung und unterschiedlichem Gurtrohrdurchmesser	Tab. 3-2: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Gabelständers Typ 750 x 76 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h.
Tab. 2-28:	Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 60 bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen	Tab. 3-3: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
Tab. 2-29:	Simulationsmatrix Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen	Tab. 3-4: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
Tab. 2-30:	Simulationsmatrix Gabelständer Einzelmast Typ 750 x 76 und um 180° gedrehter Anprallposition am Gurtrohr	Tab. 3-5: Simulationsergebnisse am Gabelmast Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von ca. 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
Tab. 2-31:	Simulationsmatrix des Referenzmodells für den Trimast Typ 500 x 60	Tab. 3-6: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
Tab. 2-32:	Simulationsmatrix durch Modifikation der Diagonalrohrfelder für den Trimast 500 x 60. a) Referenzmodell. b) bis d) Modifikationen des Referenzmodells mit entfernten Diagonalrohren im Bereich der beiden Ausgleichsrohrebenen	Tab. 3-7: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 750 x 76 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr und durch
Tab. 2-33:	Simulationsmatrix durch Gurtrohrschwächung für den Trimast	
Tab. 2-34:	Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der Anbindung zur Fußplatte	
Tab. 2-35:	Simulationsmatrix bei einer Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr des Trimast Typ 500 x 60 mm an der	

- Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte
- Tab. 3-8: Simulationsergebnisse Gabelständer-Einzelmast mit und ohne Schild
- Tab. 3-9: Simulationsergebnisse Gabelständer-Einzelmast mit unterschiedlicher Spreizung
- Tab. 3-10: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 und Typ 750 x 60
- Tab. 3-11: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast Typ 750 x 76 bei gleicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhe
- Tab. 3-12: Simulationsergebnisse am Gabelständer-Einzelmast bei unterschiedlicher Spreizung, gleichem Gurtrohrdurchmesser und unterschiedlichen Ständerhöhen
- Tab. 3-13: Simulationsergebnisse am Gabelständer Einzelmast Typ 750 x 76 und um 180° gedrehter Anprallposition am Gurtrohr
- Tab. 3-14: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 500 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
- Tab. 3-15: Simulationsergebnisse Gabelständer Typ 500 x 60
- Tab. 3-16: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
- Tab. 3-17: Simulationsergebnisse für das Referenzmodell des Trimast Typ 500 x 60 bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Tab. 3-18: Simulationsergebnisse am Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
- Tab. 3-19: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Diagonalrohranordnungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Tab. 3-20: Simulationsergebnisse am Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
- Tab. 3-21: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Schwächungsvarianten bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Tab. 3-22: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte
- Tab. 3-23: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte und um 90° zur Innenseite der vorderen Gurtrohre gedreht Schweißnahtausparung
- Tab. 3-24: Simulationsergebnisse für den Trimast Typ 500 x 60 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die rechte Spalte zeigt das Modell 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.
- Tab. 3-25: Simulationsergebnisse Trimast Typ 500 x 60 mit und ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Tab. 3-26: Simulationsergebnisse für den Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Die mittlere und rechte Spalte zeigt die jeweiligen Modelle 1.000 ms nach dem Anprall. Das Fahrzeug ist ausgeblendet.

- Tab. 3-27: Simulationsergebnisse Trimast Typ 350 x 48 ohne Schild bei einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h
- Tab. 4-1: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch unterschiedliche Diagonalrohranordnungen gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-2: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-3: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Einschnitt am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-4: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Gabelständer Typ 750 x 76 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-5: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm durch Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-6: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm durch Schwächung am Gurtrohr gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.
- Tab. 4-7: Nicht durch eine Schutzeinrichtung abzusichernder Trimast Typ 500 x 60 mm für unterschiedliche Reduktion des Schweißnahtumfangs durch Schweißnahtausparung an der Anbindung zur Fußplatte gemäß den Simulationsergebnissen. Varianten, für welche der THIV inkl. Toleranzbereich auch unter dem Grenzwert gemäß EN 12767 liegt, sind gekennzeichnet.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2019

V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Waltherr € 22,00

V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**
Lippold, Vettters, Ressel, Alber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfsэлеmente von Rad-schnellverbindungen**
Malik, Lange, Andriess, Gwasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**
Hausmann € 18,00

V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**
Fitschen, Nordmann € 31,50
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00

2020

V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00

V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50

V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**
Frenken, Mahmoudi € 16,50

V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**
Baier, Leu, Rittershaus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**
Lippold, Zösch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**
Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**
Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**
Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crljenkovic, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**
Müller, Huth, Liepert € 15,00

V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**
Schwietering, Löffering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**
Bohle, Busek, Schröder € 18,50

V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**
Schreck-von Below € 22,00

V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Bartolomaeus, Strigari, Sammet
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**
Holldorb, Cypra, Pape
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

V 352: **Abriebe von Fahrbahnoberflächen**
Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**
Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

V 354: **Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**
Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 355: **Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrern bei Rot**
Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 356: **Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**
Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 357: **Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**
Klöckner, Gärtner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 358: **Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**
Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 359: **Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**
Bartels
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 360: **Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**
Stephan, Ehm, Kamaruddin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 361: **Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur**
Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 362: **Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung**
Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 363: **PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung**
Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.