

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Postfach 10 48 42

40039 Düsseldorf

Sohnstr. 65

40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de

www.stahlforschung.de



## Innovative Freileitungsmaste für die Energie- wende unter Berücksichtigung gestalterischer, technischer und wirtschaftlicher Aspekte

Overhead line tower for the energy turnaround  
in consideration of architectural, technical and  
economic aspects

Forschung für die Praxis P 1101

# **Forschungsvorhaben P 1101 / S 024/10218/14**

## **Innovative Freileitungsmaste für die Energiewende unter Berücksichtigung gestalterischer, technischer und wirtschaftlicher Aspekte**

Overhead line tower for the energy turnaround in consideration of architectural, technical and economic aspects

### **Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau**

Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Dipl.-Ing. Alena Patschin

### **Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Städtebau**

Prof. Dipl.-Ing. Christoph Mäckler

Dipl.-Ing. Karen Seiler

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Das Forschungsvorhaben wurde an der Technischen Universität Dortmund, am Lehrstuhl Stahlbau und am Lehrstuhl Städtebau mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

## **Beteiligte Unternehmen:**

IHT Ingenieur-, Hoch- und Tiefbau GmbH  
J.J.Brühl Stahlbau GmbH & Co. KG  
KINA Ingenieurgesellschaft mbH  
OCAS N.V.  
Poetsch GmbH CNC Dreh- und Fräsbearbeitung  
PSP - Prof. Sedlacek & Partner  
R. Lange GmbH  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH  
SSF Ingenieure AG  
Stahlbau Raulf GmbH  
thyssenkrupp Steel Europe AG  
Vallourec Deutschland GmbH

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1101  
ISBN 978-3-946885-72-6

Ansprechpartner bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.:  
Dr. Gregor Nüsse M.Sc.  
Tel.: +49 (0)211 / 6707-856

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung des Verlages sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

## **Kurzdarstellung**

Die politisch forcierte Energiewende erfordert zahlreiche Ausbau- und Netzverstärkungsmaßnahmen. Für Freileitungsmaste aus Stahl werden noch immer fast ausschließlich fachwerkartige Gittermaste verwendet, die schon vor 100 Jahren planerisch, fertigungstechnisch und rechnerisch beherrschbar waren. Heute werden diese oftmals als visuelle Störung oder Beeinträchtigung der Ästhetik der Landschaft und des Ortsbildes bewertet.

Mit diesem Forschungsprojekt soll das Image der Freileitungen verbessert werden und diese zu einem notwendigen und akzeptierten Teil unserer industriellen Gesellschaft werden. Ziel ist es, einen neuen Freileitungs-Masttyp aus Stahl zu entwickeln, der neben technisch und wirtschaftlich höchsten Anforderungen auch in seiner Gestaltung der Zeit der Energiewende entspricht. Die Bearbeitung hat daher interdisziplinär von Ingenieuren und Architekten stattgefunden.

Im vorliegenden Forschungsbericht werden zunächst die Grundlagen des Freileitungsbaus sowie elektrotechnische und mechanische Anforderungen bei der Entwicklung der Mastkonstruktion vorgestellt. Darauf aufbauend werden verschiedene entwickelte Optimierungsansätze für die Gittermastkonstruktion dargelegt. Für die Entwicklung der innovativen Form für den Freileitungsmast werden vier Varianten der Freileitungsmastentwürfe erläutert und die detaillierten Untersuchungen in Form von FE-Analysen zu der favorisierten Variante vorgestellt.

Mit dem experimentellen Ansatz wird anschließend das Tragverhalten der neuartigen Rohr-in-Rohr Pressverbindung analysiert. Die gesamten Entwicklungen fließen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der innovativen Konstruktion mit der Berücksichtigung der Serienfertigung ein.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde so eine ansprechende und wirtschaftliche Alternative zu den bisherigen Gittermastkonstruktionen geschaffen. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde somit erreicht.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

März 2020

## **Abstract**

The politically driven energy turnaround requires numerous expansion and grid strengthening measures. Steel overhead line masts are still almost exclusively lattice masts, which were already controllable 100 years ago in terms of planning, production technology and calculation. Today, however, these are often considered a visual disturbance or an impairment of the aesthetics of the landscape and the townscape.

This research project aims to improve the image of overhead lines and make them a necessary and accepted part of our industrial society. The aim is to develop a new type of overhead line mast made of steel which, in addition to meeting the highest technical and economic requirements, also meets the requirements of the energy turnaround in its design. Therefore, the work has been carried out by engineers and architects in an interdisciplinary way.

In the present research report, the basics of overhead line construction as well as electrotechnical and mechanical requirements for the development of the mast construction are presented first. Based on this, various developed optimisation approaches for the lattice mast construction are presented. For the development of the innovative form for the overhead line mast, four variants of the overhead line mast designs are explained and the detailed investigations in the form of FE analyses for the favoured variant are presented.

The experimental approach is then used to analyse the load-bearing behaviour of the new type of tube-in-tube press connection. The entire development work is incorporated into the economic efficiency analysis of the innovative design with consideration of series production.

Within the scope of the investigations, an attractive and economical alternative to the previous lattice mast designs was created. The goal of the research project has been achieved.

FOSTA - Research Association for Steel Application

March 2020

## Inhaltsverzeichnis Content

1	Einleitung <i>Introduction</i> .....	1
1.1	Problemstellung und Motivation <i>Problem definition and Motivation</i> .....	1
1.2	Zielsetzung <i>Objective</i> .....	3
2	Stand der Technik <i>State of the art</i> .....	5
2.1	Freileitung <i>Overhead power line</i> .....	5
2.2	Mast <i>Mast</i> .....	7
2.2.1	Mastarten/-bilder <i>Types of mast engl</i> .....	9
2.2.2	Elektrotechnische Grundlagen <i>Electrotechnical basics</i> .....	15
2.2.3	Mechanische Grundlagen <i>Mechanical basics</i> .....	21
2.3	Rechtliche Grundlagen / Voraussetzungen <i>Legal foundations/ requirements</i>	31
2.3.1	Elektrokution <i>Electrocution</i> .....	32
2.3.2	Kollision <i>Collision</i> .....	33
2.3.3	Vergleich Erdkabel - Freileitung <i>Compare underground cable with overhead line</i> .....	33
3	Gittermastoptimierung <i>Optimisation of lattice towers</i> .....	36
3.1	Referenzmast <i>Reference mast</i> .....	36
3.2	Optimierungsansätze einer Gittermastkonstruktion <i>Optimization of a lattice mast construction</i> .....	40
3.2.1	Allgemeines <i>General</i> .....	40
3.2.2	Verwendung von höherfesten Stahlsorten <i>Use of high strength steels</i>	40
3.2.3	Verwendung von hochfesten Schrauben <i>Use of high-strength bolts</i> ....	44
3.2.4	Wahl kleinerer Eckprofile <i>Choice of smaller corner profiles</i> .....	46
3.2.5	Modifikation der Ausfachung <i>Modification of the infill</i> .....	47
3.2.6	Weitläufigkeit der Mastausteilung <i>Extensiveness of mast distribution</i> ..	52
3.2.7	Optimierungsansätze im Vergleich <i>Comparison of optimisation approaches</i> .....	53
4	Konzeptionen / Entwürfe für Freileitungsmaste <i>Concepts / Drafts of overhead line towers</i> .....	57
4.1	Typisierung der Freileitungsmaste <i>Typification of overhead line towers</i> .....	57
4.2	Entwurf eines Freileitungsmastes: Varianten 1 bis 4 <i>Draft of overhead line tower: Variant 1 - 4</i> .....	60
4.2.1	Allgemeines <i>General</i> .....	60
4.2.2	Elektrotechnische Anforderungen <i>Electro technical requirements</i> .....	61
4.2.3	Statische Untersuchungen <i>Investigations on static performance</i> .....	63

4.2.4	Architektonisch-konstruktive Studien <i>Architectonic-constructive studies</i> .....	76
4.2.5	Gründung <i>Foundation</i> .....	84
5	Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende <i>Innovative overhead line tower for the energy revolution</i> .....	90
5.1	Entwicklung der Details <i>Development of the details</i> .....	90
5.1.1	Allgemeines <i>General</i> .....	90
5.1.2	Konstruktion der Traverse <i>Construction of the cross arm</i> .....	91
5.1.3	Übergangskonstruktion Mastschaft-Vierfußsockel <i>Transition construction tower section- four foot pedestal</i> .....	93
5.1.4	Vierfußsockel-Fundament-Anschluss <i>Four foot pedestal – foundation - connection</i> .....	107
5.2	Die Gestalt des Freileitungsmastes im landschaftlichen Raum <i>The shape of the overhead line tower in the landscape</i> .....	108
5.2.1	Die Farbe des Freileitungsmastes im landschaftlichen Raum <i>The colour of the overhead line tower in the landscape</i> .....	112
6	Experimentelle Untersuchungen der Pressverbindung <i>Experimental investigations of steel pipe press connection</i> .....	116
6.1	Allgemeines <i>General</i> .....	116
6.2	Versuchskörper <i>Sample assembly</i> .....	118
6.2.1	Allgemeines <i>General</i> .....	118
6.2.2	Fertigung <i>Assembly</i> .....	119
6.2.3	Toleranzuntersuchung <i>Tolerance investigation</i> .....	121
6.3	Kleinteilversuchsserie, Maßstab 1:5 <i>Test series of small components, measuring unit 1:5</i> .....	125
6.3.1	Allgemeines <i>General</i> .....	125
6.3.2	Versuchsreihe Verpressen <i>Test sequence pressing</i> .....	126
6.3.3	Versuchsreihe Torsion <i>Test sequence torsion</i> .....	133
6.3.4	Versuchsreihe Biegung <i>Test sequence bending</i> .....	140
6.4	Großteilversuchsserie, Maßstab 1:2 <i>Test series of big components, measuring unit 1:2</i> .....	146
6.4.1	Allgemeines <i>General</i> .....	146
6.4.2	Versuchsreihe Verpressen <i>Test sequence pressing</i> .....	147
6.4.3	Versuchsreihe Torsion <i>Test sequence torsion</i> .....	151
6.4.4	Versuchsreihe Biegung <i>Test sequence bending</i> .....	155
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung <i>Profitability contemplation</i> .....	161
7.1	Vergleich der Entwürfe <i>Comparison of the designs</i> .....	161

7.2	Gegenüberstellung Gittermast – Vollwandmast <i>Comparison of lattice tower - Solid tube tower</i> .....	162
7.2.1	Baukosten <i>Building-costs</i> .....	162
7.2.2	Bauzeit <i>Construction period</i> .....	165
7.2.3	Instandhaltung <i>Maintenance</i> .....	165
8	Zusammenfassung und Ausblick <i>Summary and outlook</i> .....	167
9	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen <i>List of publications related to the project</i> .....	170
10	Ergebnistransfer in die Wirtschaft <i>Transfer to economy</i> .....	171
11	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts <i>Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept</i>	175
12	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten <i>Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry</i> .....	176
13	Literaturverzeichnis <i>Bibliography</i> .....	177
14	Danksagung <i>Acknowledgement</i> .....	180
15	Anhang A <i>Appendix A</i> .....	181
16	Anhang B <i>Appendix B</i> .....	192
16.1	Anhang B1.....	197
16.2	Anhang B2.....	205
16.3	Anhang B3.....	212

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: STAND DER VORHABEN AUS DEM BUNDESBEDARFSPLANGESETZ (BBPLG) UND DEM ENERGIELEITUNGS-AUSBAUGESETZ (ENLAG) NACH DEM ZWEITEN QUARTAL 2018 AUS [1] .....	2
ABBILDUNG 1-2: ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS .....	4
ABBILDUNG 2-1: A) AUFTEILUNG DES ÜBERTRAGUNGSNETZBETRIEBS [10], B) KARTE DES HÖCHSTSPANNUNGSNETZES IN DEUTSCHLAND [3] .....	6
ABBILDUNG 2-2: STRUKTUR EINES STROMNETZES .....	6
ABBILDUNG 2-3: A) TRASSENQUERSCHNITT; B) ANSICHT EINES TRASSENABSCHNITTS.....	7
ABBILDUNG 2-4: STAHLGITTERMAST MIT DONAUMASTBILD (380 kV) – ALLGEMEINES KONSTRUKTIONSSHEMA, FE-MODELL .....	8
ABBILDUNG 2-5: ANSCHLÜSSE EINER GITTERMASTKONSTRUKTION .....	9
ABBILDUNG 2-6: A) TRAGMAST; B) WINKELTRAGMAST [15] .....	10
ABBILDUNG 2-7: WINKELABSPANNMAST;.....	11
ABBILDUNG 2-8: A) KREUZUNGSMAST; B) ABZWEIGMAST (IM VORDERGRUND) .....	12
ABBILDUNG 2-9: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG EINER VERDRILLUNG AN EINEM DONAUMAST: A) ANORDNUNG DER LEITER AUF DER EINEN SEITE; B) ANORDNUNG DER LEITER AUF DER ANDEREN SEITE .....	12
ABBILDUNG 2-10: MEHRERE ENDMASTEN VOR EINEM UMSPANNWERK (LINKS, NICHT IM BILD)13	
ABBILDUNG 2-11: UMSPANNWERK IN DORTMUND-KRUCKEL .....	13
ABBILDUNG 2-12: ZUSAMMENSTELLUNG IN DEUTSCHLAND ÜBLICHER MASTBILDER FÜR EINSYSTEM-, DOPPEL- UND MEHRFACHLEITUNGEN .....	14
ABBILDUNG 2-13: VIERER- UND ZWEIER-LEITERBÜNDEL A) AM TRAGMAST, B) AM ABSPANNMAST.....	19
ABBILDUNG 2-14: TRAGKETTE AUS KERAMIK IN V-FORM, B) TRAGKETTE AUS SILIKON IN V-FORM, C) DOPPELABSPANNKETTE AUS SILIKON UND KERAMIK .....	20
ABBILDUNG 2-15: FELDABSTANDHALTER ZWEIERBÜNDEL, B) FELDABSTANDHALTER VIERERBÜNDEL .....	21
ABBILDUNG 2-16: DRUCKVERTEILUNG ÜBER EINEN ZYLINDRISCHEN QUERSCHNITT NACH DIN 1991-1-4 [25].....	25
ABBILDUNG 2-17: STORCHENNEST AUF MITTELSPANNUNGSMAST [11] .....	32
ABBILDUNG 2-18: A) FREILEITUNG RIED 2 [15], B) LEITERSEILE UNTERHALB DER TRAVERSE ..	32
ABBILDUNG 2-19: A) STORCH AUF SITZSTANGE [4]; B) SITZSTANGE OBERHALB DER LEITUNGEN .....	33
ABBILDUNG 2-20: A) VOGELMARKER AN ERDSEIL DER FREILEITUNG [7], B) POWERLINEMARKER [18] .....	33
ABBILDUNG 2-21: ERDKABEL [2].....	34
ABBILDUNG 2-22: VERGLEICH ERDKABEL - FREILEITUNG [IN ANLEHNUNG AN [8]] .....	34
ABBILDUNG 3-1: REFERENZMAST A) ZEICHNUNG; B) FE-MODELL [35] .....	36

ABBILDUNG 3-2: FE-MODELL DES REFERENZMASTS A) BELASTUNG LF A; B) VERFORMUNG INFOLGE LF A; C) AUSNUTZUNG, MITTELS [35] .....	39
ABBILDUNG 3-3: AUSNUTZUNG DES REFERENZMASTS .....	39
ABBILDUNG 3-4: VERGLEICH DES GESAMTEN KONSTRUKTIONSGEWICHTS BEI DER VERWENDUNG UNTERSCHIEDLICHER STAHLSORTEN .....	43
ABBILDUNG 3-5: ABSCHLIEßENDER VERGLEICH BEI VERWENDUNG VERSCHIEDENER SCHRAUBENGÜTEKLASSEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STAHLORTE DER KONSTRUKTION .....	46
ABBILDUNG 3-6: MOMENTENVERLÄUFE UNTER HORIZONTALLASTEN .....	47
ABBILDUNG 3-7: MASTVARIANTE 2.2, FE-MODELL MIT RSTAB [36] .....	49
ABBILDUNG 3-8: MASTAUSTEILUNG DES REFERENZMASTES (OBEN) UND MASTAUSTEILUNG DER VARIANTE 3 (UNTEN) .....	52
ABBILDUNG 3-9: STAHL TONNAGE (BEZOGEN AUF DIE OBEREN VIER MASTSCHÜSSE) .....	55
ABBILDUNG 3-10: ANZAHL DER VERBAUTEN DIAGONALEN (BEZOGEN AUF DIE OBEREN VIER MASTSCHÜSSE) .....	55
ABBILDUNG 4-1: SPANNUNGSEBENEN IM HOCHSPANNUNGSNETZ .....	58
ABBILDUNG 4-2: ANZAHL DER STROMKREISE DER 380 kV-EBENE .....	58
ABBILDUNG 4-3: MASTBAUARTEN BEI ZWEI STROMKREISEN .....	59
ABBILDUNG 4-4: ANSICHT TRASSENABSCHNITT - MINIMALE AUFHÄNGERHÖHE DER LEITER UND QUERSCHNITT TRASSE - ANORDNUNG FÜR MINIMALE TRASSENHÖHE .....	63
ABBILDUNG 4-5: ABMESSUNGEN ALS RANDBEDINGUNGEN FÜR DEN ENTWURF DER MASTKONSTRUKTION (SKIZZE) .....	64
ABBILDUNG 4-6: VARIANTE 1: A) FE-MODELL, B) VERFORMUNG GZG (FAKTOR 5), C) AUSNUTZUNGSGRAD GZT .....	68
ABBILDUNG 4-7: VARIANTE 2: A) FE-MODELL, B) VERFORMUNG GZG IN MM (ERHÖHUNGSFAKTOR 5), C) AUSNUTZUNGSGRAD GZT .....	69
ABBILDUNG 4-8: VARIANTE 3: A) FE-MODELL, B) VERFORMUNG GZG IN MM (ERHÖHUNGSFAKTOR 7), C) AUSNUTZUNGSGRAD GZT .....	70
ABBILDUNG 4-9: VARIANTE 3: AUSNUTZUNGSGRAD DER FLÄCHEN IN DEN ÜBERGANGSBEREICHEN GZT .....	71
ABBILDUNG 4-10: VARIANTE 4: A) FE-MODELL, B) VERFORMUNG GZG IN MM (ERHÖHUNGSFAKTOR 5), C) AUSNUTZUNGSGRAD GZT .....	72
ABBILDUNG 4-11: VARIANTE 4: A) KNICKFIGUR NR. 1, B) VERZWEIGUNGSLASTFAKTOREN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KNICKFIGUR NACH RSKNICK [36] .....	73
ABBILDUNG 4-12: STUDIE ZUR STATISCH-KONSTRUKTIVEN OPTIMIERUNG .....	74
ABBILDUNG 4-13: VARIANTE 4A: A) SPANNUNGSVERTEILUNG $\Sigma_{GES}$ DES MASTSCHAFTS OBERHALB DES SOCKELS, B) AUSNUTZUNGSGRAD GZT, C) AUSNUTZUNGSGRAD GZT BEI DER AUSFACHUNG DES SOCKELS .....	75
ABBILDUNG 4-14: A) VARIANTE 1: VOLLWANDROHR ZYLINDRISCH; VARIANTE 2: KONISCHER VOLLWANDROHRMAST; C) VARIANTE 3: GITTERSTRUKTURROHR ZYLINDRISCH; VARIANTE 4: VOLLWANDROHR KONISCH-VIERFUßSOCKEL .....	76

## Verzeichnisse

### Lists

---

ABBILDUNG 4-15: PROPORZIONISSSTUDIEN .....	77
ABBILDUNG 4-16: A) TRAVERSE ABGESPANNT B) OBERE TRAVERS KÜRZER .....	78
ABBILDUNG 4-17: MAST MIT VOLLWANDROHR KONISCH UND TRAVERSE ABGESPANNT .....	78
ABBILDUNG 4-18: UNTERSCHIEDLICHE GITTERGRÖßEN DES MASTES.....	79
ABBILDUNG 4-19: GITTERSTRUKTURROHR ZYLINDRISCH .....	80
ABBILDUNG 4-20: GITTERSTRUKTURROHR ZYLINDRISCH MIT SCHMALEM MAST.....	80
ABBILDUNG 4-21: GITTERSTRUKTURROHR ZYLINDRISCH MIT BREITEREM MAST.....	81
ABBILDUNG 4-22: GITTERSTRUKTUR ZYLINDRISCH MIT VIERFUßSOCKEL.....	81
ABBILDUNG 4-23: MAST MIT VOLLWANDROHR KONISCH, VIERFUßSOCKEL UND TRAVERSE ABGESPANNT .....	82
ABBILDUNG 4-24: MAST MIT VOLLWANDROHR KONISCH, VIERFUßSOCKEL UND TRAVERSE AUFGESTECKT .....	83
ABBILDUNG 4-25: VOLLWANDROHR KONISCH, VIERFUßSOCKEL UND TRAVERSE AUFGESTECKT IN DER LANDSCHAFT .....	83
ABBILDUNG 4-26: MODELL VARIANTE 4: VOLLWANDROHR KONISCH VIERFUßSOCKEL, TRAVERSE AUFGESTECKT.....	84
ABBILDUNG 4-27: GRÜNDUNGSVARIANTE EINES EINSTIELIGEN STAHLVOLLWANDMASTS: A) FE- MODELL [38], B) ECKDATEN .....	87
ABBILDUNG 4-28: GRÜNDUNGSVARIANTEN DES VIER-FUß-MASTS: A) FE-MODELL [38], B) ECKDATEN .....	88
ABBILDUNG 4-29: GRÜNDUNGSVARIANTEN DES VIER-FUß-MASTS: PFAHLLÄNGE IN ANHÄNGIGKEIT DER MODELLBÖDEN .....	88
ABBILDUNG 5-1: VIER-FUß-MAST MIT UNTERSUCHTEN ANSCHLUSSDETAILS.....	91
ABBILDUNG 5-2: TRAVERSENTYP 1: ABGESPANNTE TRAVERSENKONSTRUKTION .....	91
ABBILDUNG 5-3: TRAVERSENTYP 2: AUFGESTECKTE TRAVERSENKONSTRUKTION.....	91
ABBILDUNG 5-4: AUFGESTECKTE TRAVERSE: MASTSCHAFT-TRAVERSE-VERBINDUNG (HÄLFTE) .....	92
ABBILDUNG 5-5: A) FE-NETZ, B) VERGLEICHSSPANNUNG IM MPA, C) GESAMTVERFORMUNG IN MM [34].....	92
ABBILDUNG 5-6: MODELL DER AUFGESTECKTEN TRAVERSE .....	93
ABBILDUNG 5-7: EXPLOSIONSDARSTELLUNG DER BAUELEMENTE DER URSPRUNGSGEOMETRIE (1 BAUTEIL „FUß“, 2 BAUTEIL „RING“, 3 FÜGUNGSBEREICH DER „FÜßE“, 4 FÜGUNGSBEREICH DES „RINGS“ MIT DEN VIER „FÜßEN“) .....	94
ABBILDUNG 5-8: GEGENÜBERSTELLUNG VERFORMUNGEN BEI A) GROBER UND B) MANUELL VERFEINERTER NETZSTRUKTUR .....	95
ABBILDUNG 5-9: EXPLOSIONSDARSTELLUNG A) SCHRITT 01, B) SCHRITT 02.....	96
ABBILDUNG 5-10: ISOMETRISCHE DARSTELLUNG A) SCHRITT 03, B) SCHRITT 04.....	97
ABBILDUNG 5-11: EXPLOSIONSDARSTELLUNG A) SCHRITT 05, B) SCHRITT 06.....	98
ABBILDUNG 5-12: ISOMETRISCHE DARSTELLUNG A) SCHRITT 07, B) SCHRITT 08.....	99

ABBILDUNG 5-13: ISOMETRISCHE DARSTELLUNG DER ABSCHLIEßENDEN OPTIMIERUNGSSCHRITTE .....	100
ABBILDUNG 5-14: A) VERGLEICHSSPANNUNG, B) GESAMTVERFORMUNG DES ABSCHLIEßENDEN OPTIMIERUNGSSCHRITTS .....	100
ABBILDUNG 5-15: A) GESAMTGEWICHT DER EINZELNEN VARIANTEN.....	101
ABBILDUNG 5-16: MODELL DES ÜBERGANGES MAST-VIERFUßSOCKEL.....	102
ABBILDUNG 5-17: ERGEBNIS DER OPTIMIERUNG (ERGEBNISKÖRPER).....	103
ABBILDUNG 5-18: BASISMODELL (GRUNDKÖRPER) .....	104
ABBILDUNG 5-19: ÜBERSICHT DER ENTWURFSVARIANTEN A BIS E .....	104
ABBILDUNG 5-20: A) VERNETZUNG, B) RANDBEDINGUNGEN .....	105
ABBILDUNG 5-21: VERGLEICHSSPANNUNGEN .....	106
ABBILDUNG 5-22: DAUERFORM: A) ÄUßERE NEGATIVFORM, B) KERNFORMEN - INNERE NEGATIVFORM, C) ENDFORM NACH DEM GIEßVORGANG .....	107
ABBILDUNG 5-23: ANSCHLUSS FUß-FUNDAMENT: A) GELENKIG, B) STARR.....	107
ABBILDUNG 5-24: MODELL DES ANSCHLUSSES FUß-FUNDAMENT MIT RUNDEM EINZELFUNDAMENT.....	108
ABBILDUNG 5-25: FREILEITUNGSTRASSE PARALLEL ZUR AUTOBAHN.....	109
ABBILDUNG 5-26: FREILEITUNGSTRASSE ÜBER FELDER.....	109
ABBILDUNG 5-27: FREILEITUNGSTRASSE ÜBER FELDER MIT WÄLDERN.....	110
ABBILDUNG 5-28: FREILEITUNGSTRASSE ÜBER FELDER MIT WÄLDERN.....	110
ABBILDUNG 5-29: FREILEITUNGSTRASSE ÜBER FELDER IN ABENDSTIMMUNG .....	111
ABBILDUNG 5-30: FREILEITUNGSTRASSE ÜBER FELDER IN ABENDSTIMMUNG .....	111
ABBILDUNG 5-31: UNTERSCHIEDLICHE FARBGEBUNG DES MASTES, A) WEIß, B) ANTHRAZIT, C) GRÜN .....	112
ABBILDUNG 5-32: UNTERSCHIEDLICHE FARBGEBUNG DES MASTES: A) BLAU, B) GRAU, C) ROST .....	113
ABBILDUNG 5-33: FREILEITUNGSTRASSE ENTLANG DER AUTOBAHN, A) ANTHRAZIT, B) WEIß, C) GRÜN, D) GRAU .....	113
ABBILDUNG 5-34: FREILEITUNGSTRASSE ENTLANG VON FELDERN, A) ANTHRAZIT, B) WEIß, C) GRÜN, D) GRAU .....	114
ABBILDUNG 5-35: FREILEITUNGSTRASSE ENTLANG DER AUTOBAHN, A) WEIß, B) GRÜN .....	115
ABBILDUNG 6-1: DEMONSTRATORBAUTEIL EINER PRESSVERBINDUNG: A) VOR DEM VERPRESSEN, B) NACH DEM VERPRESSEN.....	117
ABBILDUNG 6-2: A) VIER-FUß-MAST MIT DER LAGE DER ROHR-IN-ROHR-PRESSVERBINDUNG, B) UND DEN MAßGEBENDEN BEANSPRUCHUNGEN AM LF A NACH DIN EN 50341; .....	117
ABBILDUNG 6-3: WICHTIGSTE KENNGRÖßEN EINER ROHR-IN-ROHR-PRESSVERBINDUNG .....	118
ABBILDUNG 6-4: V2B01- UND V2T01-PROBEKÖRPER DER GROßTEILVERSUCHSSERIE: A) FORMTEIL INNEN, B) FORMTEIL AUßEN;.....	119
ABBILDUNG 6-5: FERTIGUNG DER PRESSVERBINDUNG: A) PLANDREHEN DES ROHLINGS, B) SCHRUPPEN DER FUGE AM INNENROHR .....	120

ABBILDUNG 6-6: FERTIGUNG DER PRESSVERBINDUNG: A) SCHLICHTE DER FUGE AM INNENROHR, B) KONTROLLE DER MAß- UND FORMGENAUIGKEIT .....	120
ABBILDUNG 6-7: VERANSCHAULICHUNG DER GRUNDBEGRIFFE FÜR TOLERANZEN AM BEISPIEL DES AUßENKÖRPERS [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN [33]] .....	121
ABBILDUNG 6-8: LAGE DES TOLERANZINTERVALLS BEZÜGLICH DES NENNMAßES MIT PASSUNGSARTEN [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN [33]] .....	122
ABBILDUNG 6-9: A) MESSUNGEN AN DER FUGE MIT HAARLINEAL, B) MAßGEBENDE VARIABLEN FÜR DIE GEOMETRIEMESSUNG .....	123
ABBILDUNG 6-10: A) UNTERSUCHUNG DER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT AM VERSUCHSKÖRPER V2B01-A1 B) ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG.....	124
ABBILDUNG 6-11: A) MESSSTELLEN AM FE-MODELL ZUR KALIBRIERUNG, B) VERFORMUNGEN IM GEFÜGTEN ZUSTAND (ÜBERHÖHTE DARSTELLUNG) .....	126
ABBILDUNG 6-12: POSITION DER DEHNMESSUNGSSTREIFEN AM PROBEKÖRPER: A) VERSUCHSREIHE TORSION, B) VERSUCHSREIHE BIEGUNG, C) AUSRICHTUNG DER DEHNMESSUNGSSTREIFEN .....	127
ABBILDUNG 6-13: A) HYDRAULISCHE PRÜFMASCHINE FÜR DEN VERPRESSVORGANG, B) VERSUCHSKÖRPER EINGEBAUT, C) KONTROLLE DES AUFSCHUBWEGS.....	127
ABBILDUNG 6-14: PRESSVERBINDUNG: A) VOR UND NACH DER VERPRESSEN, B) SPANNUNGSVERLAUF IM PRESSVERBAND [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN [24]] .....	128
ABBILDUNG 6-15: KRAFT-VERFORMUNGSDIAGRAMM DES VERSUCHSKÖRPERS V1B03-2 .....	129
ABBILDUNG 6-16: VERSUCHSKÖRPER V1B03-2 AUßENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN .....	129
ABBILDUNG 6-17: VERSUCHSKÖRPER V1B03-2 INNENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN .....	130
ABBILDUNG 6-18: VERSUCHSKÖRPER V1B03-2 (ÜBERHÖHTE DARSTELLUNG): A) VERSCHIEBUNG (X-ACHSE) RADIAL, B) VERSCHIEBUNG (Z-ACHSE) MERIDIAN.....	130
ABBILDUNG 6-19: ERGEBNISSE DER FE-SIMULATION LASTFALL VERPRESSEN: A) UMFANGSDEHNUNG IN MM/MM, B) MERIDIANDEHNUNG IN MM/MM .....	131
ABBILDUNG 6-20: EINFLUSS DER GEOMETRIEVARIABLEN AUF DIE DEHNUNGEN AN DER MAßGEBENDEN STELLE DES AUßENKÖRPERS UND DIE EINPRESSKRAFT.....	132
ABBILDUNG 6-21: SKIZZE VERSUCHSAUFBAU .....	134
ABBILDUNG 6-22: A) VERSUCHSAUFBAU, B) LASTEINLEITUNG UND AUFLAGER.....	134
ABBILDUNG 6-23: MESSEINRICHTUNG .....	135
ABBILDUNG 6-24: VERSUCHSREIHE TORSION – V1T09_1: A) SPALTVERFORMUNG MERIDIAN, B) TORSIONSMOMENT-VERDREHUNGSBEZIEHUNG .....	137
ABBILDUNG 6-25: VERSUCHSREIHE TORSION – V1T09_1 TORSIONSMOMENT-SCHUBDEHNUNGS-DIAGRAMM: A) VOR DEM ERSTEN DURCHRUTSCHEN, B) NACH DEM ERSTEN DURCHRUTSCHEN .....	137
ABBILDUNG 6-26: VERSUCHSREIHE TORSION – V1T09_1: A) TORSIONSMOMENT-MERIDIANDEHNUNGS-DIAGRAMM, B) TORSIONSMOMENT-UMFANGSDEHNUNGS-DIAGRAMM .....	138

ABBILDUNG 6-27: VERSUCHSREIHE TORSION: A) ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE, B) EINFLUSS DER VARIABLENÄNDERUNG AUF DAS TORSIONSMOMENTS .....	139
ABBILDUNG 6-28: FE-ERGEBNISSE, VERSUCHSREIHE TORSION: A) RANDBEDINGUNGEN, B) HAUPTSPANNUNGSVEKTOR, C) UMFANGSSPANNUNGEN.....	139
ABBILDUNG 6-29: A) VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE MIT DEM TORSIONSMOMENT EINES REFERENZROHRES, B) SKIZZE REFERENZROHR UND PRESSVERBINDUNG .....	140
ABBILDUNG 6-30: VERSUCHSAUFBAU - VERSUCHSREIHE BIEGUNG.....	141
ABBILDUNG 6-31: VERSUCHSAUFBAU - VERSUCHSREIHE BIEGUNG: A) LASTVERTEILUNG, B) LASTEINLEITUNG, C) AUFLAGERKONSTRUKTION.....	141
ABBILDUNG 6-32: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V01B03: A) MOMENTEN-VERSCHIEBUNGSBEZIEHUNG, B) ANORDNUNG DER WEGAUFNEHMER.....	142
ABBILDUNG 6-33: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V01B03 AUßENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN.....	143
ABBILDUNG 6-34: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V01B03 INNENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN .....	144
ABBILDUNG 6-35: ERGEBNISSE DER VERSUCHSREIHE BIEGUNG A) IN ABHÄNGIGKEIT VOM GEOMETRIEVERHÄLTNIS, B) ALS VERHÄLTNIS BEZOGEN AUF EIN REFERENZROHR .....	145
ABBILDUNG 6-36: FE-ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V01B03: A) UMFANGSDEHNUNGEN IN MM/MM, B) MERIDIANDEHNUNGEN IN MM/MM .....	145
ABBILDUNG 6-37: VERLAUF DER BEZOGENEN UMFANGSSPANNUNGEN IM AUßENTEIL $\Sigma_{Y,A}/F_Y$ IN ABHÄNGIGKEIT DES.....	146
ABBILDUNG 6-38: A) VERSUCHSSTAND - VERSUCHSREIHE VERPRESSEN B) WEGAUFNEHMER AM PROBEKÖRPER .....	148
ABBILDUNG 6-39: POSITION DER DEHNMESSUNGSSTREIFEN AM PROBEKÖRPER: A) VERSUCHSREIHE TORSION, B) VERSUCHSREIHE BIEGUNG.....	149
ABBILDUNG 6-40: KRAFT - VERFORMUNGSKURVE .....	149
ABBILDUNG 6-41: VERSUCHSKÖRPER V2B02 AUßENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN.....	150
ABBILDUNG 6-42: VERSUCHSKÖRPER V2B02 INNENKÖRPER: A) UMFANGSDEHNUNGEN, B) MERIDIANDEHNUNGEN.....	150
ABBILDUNG 6-43: A) ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE, B) AUSNUTZUNGSGRAD DER PRESSVERBINDUNGEN INFOLGE VERPRESSEN.....	151
ABBILDUNG 6-44: A) VERSUCHSAUFBAU, B) LASTEINLEITUNG UND AUFLAGER.....	152
ABBILDUNG 6-45: A) AUSRICHTUNG DER DEHNMESSUNGSSTREIFEN AUF DEM VERSUCHSKÖRPER, B) MESSEINRICHTUNG .....	152
ABBILDUNG 6-46: VERSUCHSREIHE TORSION: A) TORSIONSMOMENT-VERDREHUNGS-DIAGRAMM, B) TORSIONSMOMENT-ZEIT-DIAGRAMM .....	153
ABBILDUNG 6-47: VERSUCHSREIHE TORSION – V02T01: A) SCHUBDEHNUNG AUßENKÖRPER, B) SCHUBDEHNUNG INNENKÖRPER .....	154
ABBILDUNG 6-48: VERSUCHSREIHE TORSION – V02T01: A) UMFANGSDEHNUNG, B) MERIDIANDEHNUNG .....	154

## Verzeichnisse

### Lists

---

ABBILDUNG 6-49: SKIZZE ZUR VERDEUTLICHUNG DER SCHAFTVERDREHUNG EINES VOLLWANDMASTES .....	155
ABBILDUNG 6-50: VERSUCHSAUFBAU .....	156
ABBILDUNG 6-51: VERSUCHSAUFBAU: A) LASTEINLEITUNG, B) AUFLAGERSATTEL, C) LASCHENVERBINDUNG ZUM VERLÄNGERUNGSRÖHR .....	156
ABBILDUNG 6-52: MESSEINRICHTUNG: A) WEGAUFNEHMER AM SPALT OBEN, B) WEGAUFNEHMER AM SPALT UNTEN, C) WEGAUFNEHMER KLAFFEN, D) WEGAUFNEHMER LASCHENVERBINDUNG.....	157
ABBILDUNG 6-53: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V02B02: MOMENTENVERSchiebungsbeziehung .....	158
ABBILDUNG 6-54: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V02B02: MERIDIANDEHNUNGEN .....	159
ABBILDUNG 6-55: VERSUCHSREIHE BIEGUNG – V02B02: UMFANGSDEHNUNGEN .....	159
ABBILDUNG 7-1: VERGLEICH DER KONSTRUKTIONEN.....	161
ABBILDUNG 7-2: KOSTENSTELLEN DER FREILEITUNG [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN [12]].....	162
ABBILDUNG 7-3: KOSTENARTENSUMMEN DER ERRICHTUNGSKOSTEN DER VARIANTE 4 .....	164
ABBILDUNG 16-1: VARIANTE 1, MAßGEBENDE LASTKOMBINATIONEN.....	197
ABBILDUNG 16-2: VARIANTE 1: SCHNITTGRÖßEN IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT ..	198
ABBILDUNG 16-3: VARIANTE 2, MAßGEBENDE LASTKOMBINATIONEN.....	199
ABBILDUNG 16-4: VARIANTE 2: SCHNITTGRÖßEN IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT ..	200
ABBILDUNG 16-5: VARIANTE 3, MAßGEBENDE LASTKOMBINATIONEN.....	201
ABBILDUNG 16-6: VARIANTE 4, MAßGEBENDE LASTKOMBINATIONEN.....	203
ABBILDUNG 16-7: VARIANTE 4: SCHNITTGRÖßEN IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT ..	204
ABBILDUNG 16-8: ENTWURFSZEICHNUNG DER URSPRUNGSGEOMETRIE .....	206
ABBILDUNG 16-9: SCHRITT 01: A) GESAMTVERFORMUNG, B) VERGLEICHSSPANNUNG VON MISES .....	207
ABBILDUNG 16-10: SCHRITT 02: VERGLEICHSSPANNUNG (DETAILLIERTE DARSTELLUNG SPANNUNGSNIVEAU, RANDBEREICH UND STÖßBEREICH DER AUSSTEIFUNGSSCHEIBE)....	207
ABBILDUNG 16-11: VERGLEICHSSPANNUNGEN IM FÜGUNGSBEREICH A) SCHRITT 02, B) SCHRITT 03, C) SCHRITT 04 .....	207
ABBILDUNG 16-12: VERGLEICHSSPANNUNGEN A) SCHRITT 05, B) SCHRITT 06.....	208
ABBILDUNG 16-13: VERFORMUNG A) SCHRITT 07, B) SCHRITT 08, C) SCHRITT 09 .....	208
ABBILDUNG 16-14: EIGENWERTBEULANALYSE DER A) URSPRUNGSVARIANTE, B) OPTIMIERUNGSVARIANTE.....	208
ABBILDUNG 16-15: ENTWURFSZEICHNUNG VARIANTE E.....	210
ABBILDUNG 16-16: AUFLAGERLASTEN IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT DER VARIANTE 4.....	211
ABBILDUNG 16-17: V1T01-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	212

ABBILDUNG 16-18: V1T02-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	212
ABBILDUNG 16-19: V1T03-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	213
ABBILDUNG 16-20: V1T04-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	213
ABBILDUNG 16-21: V1T06-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	214
ABBILDUNG 16-22: V1T08-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	214
ABBILDUNG 16-23: V1T09-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	215
ABBILDUNG 16-24: V1B01-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	216
ABBILDUNG 16-25: V1B02-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	216
ABBILDUNG 16-26: V1B03-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	217
ABBILDUNG 16-27: V1B04-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	217
ABBILDUNG 16-28: V1B05-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	218
ABBILDUNG 16-29: V1B06-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	218
ABBILDUNG 16-30: V1B07-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	219
ABBILDUNG 16-31: V1B08-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	219
ABBILDUNG 16-32: V1B09-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	220
ABBILDUNG 16-33: V1B10-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	220
ABBILDUNG 16-34: V1B11-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL .....	221
ABBILDUNG 16-35: V2B01- UND V2T01-VERSUCHSKÖRPER: A) INNERES FORMTEIL, B) ÄUßERES FORMTEIL.....	222

## List of figures

FIGURE 1-1: STATE OF THE PROJECTS FROM THE FEDERAL REQUIREMENTS PLANNING ACT (BBPLG) AND THE ENERGY PIPELINE EXPANSION ACT (ENLAG) AFTER THE SECOND QUARTER OF 2018 [1].....	2
FIGURE 1-2: OBJECTIVES OF THE RESEARCH PROJECTS.....	4
FIGURE 2-1: A) DISTRIBUTION OF TRANSMISSION SYSTEM [10], B) MAP OF THE EXTRA-HIGH VOLTAGE GRID IN GERMANY [3] .....	6
FIGURE 2-2: STRUCTURE OF AN ELECTRICITY GRID .....	6
FIGURE 2-3: A) TRAIL CROSS SECTION, B) VIEW OF A TRAIL SECTION .....	7
FIGURE 2-4: STEEL LATTICE MAST WITH DANUBE MAST PICTURE – GENERAL CONSTRUCTION, FE-MODEL.....	8
FIGURE 2-5: CONNECTIONS OF A LATTICE MAST CONSTRUCTION .....	9
FIGURE 2-6: A) SUSPENSION TOWER, B) ANGLE SUSPENSION TOWER [15].....	10
FIGURE 2-7: DEAD-END / "ANCHOR" TOWER .....	11
FIGURE 2-8: A) „CROSSING” TOWER, B) “BRANCH” TOWER (IN THE FOREGROUND) .....	12
FIGURE 2-9: EXEMPLARY PRESENTATION OF A TWIST AT DANUBE MAST: A) ARRANGEMENT OF THE CONDUCTORS ON ONE SIDE, B) ARRANGEMENT OF THE CONDUCTORS ON THE OTHER SIDE.....	12
FIGURE 2-10: SEVERAL TERMINAL TOWER IN FRONT OF THE ELECTRICAL SUBSTATION (ON THE LEFT SIDE, NOT SEEN IN THE PICTURE) .....	13
FIGURE 2-11: ELECTRICAL SUBSTATION IN DORTMUND-KRUCKEL.....	13
FIGURE 2-12: COMPILATION OF MAST DESIGNS COMMON IN GERMANY FOR SINGLE SYSTEM, DOUBLE AND MULTIPLE CABLES .....	14
FIGURE 2-13: QUAD AND DUAL CONDUCTOR BUNDLES A) SUSPENSION TOWER, B) DEAD-END / "ANCHOR" TOWER .....	19
FIGURE 2-14: CERAMIC CARRIER CHAIN IN V-SHAPE, B) SILICONE CARRIER CHAIN IN V-SHAPE, C) SILICONE AND CERAMIC DOUBLE TENSIONING CHAIN .....	20
FIGURE 2-15: FIELD SPACER DOUBLE BUNDLE, B) FIELD SPACER QUAD BUNDLE .....	21
FIGURE 2-16: PRESSURE DISTRIBUTION OVER A CYLINDRICAL CROSS-SECTION ACCORDING TO DIN 1991-1-4 [25].....	25
FIGURE 2-17: STORK'S NEST ON MEDIUM VOLTAGE MAST [11].....	32
FIGURE 2-18: A) OVERHEAD LINE TOWER RIED 2 [15] B) LADDER ROPES BELOW THE CROSSBAR .....	32
FIGURE 2-19: A) STORK ON PERCH [4]; B) PERCH ABOVE THE PIPES.....	33
FIGURE 2-20: A) BIRD MARKER ON THE GROUND WIRE OF THE OVERHEAD LINE [7], B) POWERLINEMARKER [18] .....	33
FIGURE 2-21: UNDERGROUND CABLES [2].....	34
FIGURE 2-22: COMPARISON UNDERGROUND CABLES - OVERHEAD LINE [BASED ON [8]] .....	34
FIGURE 3-1: REFERENCE MAST A) DRAWING; B) FE-MODEL [35].....	36

FIGURE 3-2: FE-MODEL OF THE REFERENCE MAST A) STRAIN LF A; B) DEFORMATION AS A RESULT OF LF A; C) UTILISATION PER [35] .....	39
FIGURE 3-3: UTILIZATION OF THE REFERENCE MAST .....	39
FIGURE 3-4: COMPARISON OF THE TOTAL CONSTRUCTION WEIGHT USING DIFFERENT STEEL GRADES .....	43
FIGURE 3-5: FINAL COMPARISON BY USING DIFFERENT BOLT QUALITY CLASSES DEPENDING ON THE STEEL GRADE OF THE CONSTRUCTION .....	46
FIGURE 3-6: MOMENT CURVES UNDER HORIZONTAL LOADS .....	47
FIGURE 3-7: MAST VARIANT 2.2, FE MODEL WITH RSTAB [36] .....	49
FIGURE 3-8: MAST DISTRIBUTION OF THE REFERENCE MAST (TOP) AND MAST DISTRIBUTION OF VARIANT 3 (BOTTOM) .....	52
FIGURE 3-9: STEEL TONNAGE (RELATED TO THE UPPER FOUR MAST SECTIONS).....	55
FIGURE 3-10: NUMBER OF USED DIAGONALS (RELATED TO THE UPPER FOUR MAST SECTIONS)...	55
FIGURE 4-1: VOLTAGE LEVELS IN THE HIGH-VOLTAGE NETWORK .....	58
FIGURE 4-2: NUMBER OF ELECTRIC CIRCUITS OF THE 380 kV-LEVEL .....	58
FIGURE 4-3: MAST TYPES WITH TWO ELECTRIC CIRCUITS .....	59
FIGURE 4-4: VIEW OF THE PATHWAY SECTION - MINIMUM HEIGHT OF THE CONDUCTOR TO HANG UP AND CROSS SECTION OF THE PATHWAY SECTION – ARRANGEMENT FOR MINIMUM HEIGHT OF THE PATHWAY .....	63
FIGURE 4-5: DIMENSIONS AS BOUNDARY CONDITIONS FOR THE DESIGN OF THE CONSTRUCTION OF THE MAST (DRAWING).....	64
FIGURE 4-6: VARIANT 1: A) FE-MODEL, B) DEFORMATION (FACTOR 5), C) UTILIZATION FACTOR .....	68
FIGURE 4-7: VARIANT 2: A) FE-MODEL, B) DEFORMATION SERVICEABILITY LIMIT STATE IN MM (INCREASE FACTOR 5), C) PERCENTAGE OF UTILIZATION ULTIMATE LIMIT STATE.....	69
FIGURE 4-8: VARIANT 3: A) FE-MODEL, B) DEFORMATION SERVICEABILITY LIMIT STATE IN MM (INCREASE FACTOR 7), C) PERCENTAGE OF UTILIZATION ULTIMATE LIMIT STATE .....	70
FIGURE 4-9: VARIANT 3: UTILISATION RATE OF THE AREAS IN THE TRANSITION SECTORS ULTIMATE LIMIT STATE.....	71
FIGURE 4-10: VARIANT 4: A) FE-MODEL, B) DEFORMATION SERVICEABILITY LIMIT STATE IN MM (INCREASE FACTOR 5), C) PERCENTAGE OF UTILIZATION ULTIMATE LIMIT STATE .....	72
FIGURE 4-11: VARIANT 4: A) BUCKLED SHAPE NO.1, B) FACTORS OF THE LOAD AT THE BRANCHING POINT DEPENDING TO THE BUCKLED SHAPE ACCORDING TO RSKNICK [36] ..	73
FIGURE 4-12: STUDY ABOUT THE STATIC-CONSTRUCTIVE OPTIMISATION .....	74
FIGURE 4-13: VARIANT 4A: A) STRESS DISTRIBUTION $\Sigma_{GES}$ OF THE MAST SHAFT ABOVE THE PEDESTAL, B) PERCENTAGE OF UTILISATION ULTIMATE LIMIT STATE, C) PERCENTAGE OF UTILISATION ULTIMATE LIMIT STATE OF THE BASE IN THE INFILL .....	75
FIGURE 4-14: A) VARIANT 1: SOLID TUBE TAPED CYLINDRICAL; B) VARIANT 2: SOLID TUBE TAPED CONICAL; C) VARIANT 3: GRID STRUCTURE CYLINDRICAL; D) VARIANT 4: GRID STRUCTURE CONICAL WITH FOUR FOOT PEDESTRAL.....	76
FIGURE 4-15: PROPORTION STUDIES .....	77

# Verzeichnisse

## Lists

---

FIGURE 4-16: A) TRAVERSE TENSIONED B) UPPER TRAVERSE SHORTER .....	78
FIGURES 4-17: MAST WITH SOLID TUBE TAPED CONICAL AND TRAVERSE TENSIONED.....	78
FIGURES 4-18: DIFFERENT GRID SIZES OF THE MAST .....	79
FIGURES 4-19: GRID STRUCTURE CYLINDRICAL .....	80
FIGURES 4-20: GRID STRUCTURE CYLINDRICAL WITH A NARROW MAST.....	80
FIGURES 4-21: GRID STRUCTURE CYLINDRICAL WITH A WIDER MAST .....	81
FIGURES 4-22: GRID STRUCTURE CYLINDRICAL WITH FOUR FOOT PEDESTRAL .....	81
FIGURES 4-23: MAST WITH SOLID TUBE TAPED CONICAL, FOUR FOOT PEDESTRAL AND TRAVERSE TENSIONED .....	82
FIGURES 4-24: MAST WITH SOLID TUBE TAPED CONICAL, FOUR FOOT PEDESTRAL AND TRAVERSE TENSIONED .....	83
FIGURES 4-25: SOLID TUBE TAPED CONICAL, FOUR FOOT PEDESTRAL AND TRAVERSE TENSIONED IN THE LANDSCAPE .....	83
FIGURES 4-26: MODEL OF THE VARIANT 4: SOLID TUBE TAPED CONICAL, FOUR FOOT PEDESTALS AND TRAVERSE PLUGGED .....	84
FIGURE 4-27: FOUNDATION VARIANT OF A SOLID-WEBBED POLE MADE OF STEEL: A) FE-MODEL [38], B) REFERENCE VALUES .....	87
FIGURE 4-28: FOUNDATION VARIANT OF A FOUR-FOOT MAST [38], B) REFERENCE VALUES .....	88
FIGURE 4-29: FOUNDATION VARIANTS OF THE FOUR-FOOT MAST: LENGTH OF THE PILES AS A FUNCTION OF THE MODEL SOILS .....	88
FIGURE 5-1: FOUR-FOOT-MAST WITH THE INVESTIGATED CONNECTION DETAILS .....	91
FIGURE 5-2: TRAVERSE TYPE 1: SPANNED TRAVERSE CONSTRUCTION.....	91
FIGURE 5-3: TRAVERSE TYPE 2: ATTACHED TRAVERSE CONSTRUCTION .....	91
FIGURE 5-4: TRAVERSE PLUGGED: MAST SECTION- TRAVERSE- CONNECTION.....	92
FIGURE 5-5: A) FE-MESH, B) V-MISES STRESS, C) TOTAL DEFORMATION [34].....	92
FIGURE 5-6: MODEL OF THE TRAVERSE PLUGGED .....	93
FIGURE 5-7: EXPLODED VIEW OF THE COMPONENTS OF THE ORIGINAL GEOMETRY (1 COMPONENT “FOOT”, 2 COMPONENT “RING”, 3 COINCIDENCE SECTION OF THE “FEET”, 4 COINCIDENCE SECTION OF THE “RING” WITH THE FOUR “FEET”).....	94
FIGURE 5-8: COMPARISON OF DEFORMATIONS IN A) COARSE AND B) MANUALLY REFINED NET STRUCTURES.....	95
FIGURE 5-9: EXPLODED VIEW A) STEP 01, B) STEP 02 .....	96
FIGURE 5-10: ISOMETRIC REPRESENTATION A) STEP 03, B) STEP 04.....	97
FIGURE 5-11: EXPLODED VIEW A) STEP 05, B) STEP 06 .....	98
FIGURE 5-12: ISOMETRIC REPRESENTATION A) STEP 07, B) STEP 08.....	99
FIGURE 5-13: ISOMETRIC REPRESENTATION OF THE FINAL OPTIMIZATION STEPS.....	100
FIGURE 5-14: A) V-MISES STRESS, B) TOTAL DEFORMATION OF THE FINAL OPTIMIZATION STEP .....	100
FIGURE 5-15: TOTAL WEIGHT OF THE DIFFERENT VARIANTS .....	101
FIGURE 5-16: MODEL OF THE TRANSITION MAST-FOUR FOOT PADESTALS .....	102

FIGURE 5-17: RESULT OF THE OPTIMIZATION (RESULT BODY) .....	103
FIGURE 5-18: BASIC MODEL (BASE BODY) .....	104
FIGURE 5-19: OVERVIEW OF THE DRAFT VARIANTS A TO E .....	104
FIGURE 5-20: A) CROSSLINKING, B) EDGE CONDITIONS .....	105
FIGURE 5-21: COMPARISON STRESSES .....	106
FIGURE 5-22: PERMANENT MOULD: A) OUTER NEGATIVE MOULD, B) CORE MOULDS - INNER NEGATIVE MOULD, C) FINAL MOULD AFTER THE CASTING PROCESS .....	107
FIGURE 5-23: CONNECTION FOOT-FOUNDATION: A) LIMBER, B) RIGID .....	107
FIGURE 5-24: MODEL OF THE CONNECTION FOOT-FOUNDATION WITH SINGLE ROUND FOUNDATION .....	108
FIGURE 5-25: OVERHEAD LINE ROUTE PARALLEL TO THE MOTORWAY .....	109
FIGURE 5-26: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS .....	109
FIGURE 5-27: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS WITH WOODS .....	110
FIGURE 5-28: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS WITH WOODS .....	110
FIGURE 5-29: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS IN THE EVENING MOOD .....	111
FIGURE 5-30: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS IN THE EVENING MOOD .....	111
FIGURE 5-31: DIFFERENT COLOURS OF THE MAST, A) WHITE, B) ANTHRACITE, C) GREEN .....	112
FIGURE 5-32: DIFFERENT COLORS OF THE MAST: A) BLUE, B) GREY, C) RUST .....	113
FIGURE 5-33: OVERHEAD LINE ROUTE PARALLEL TO THE MOTORWAY, A) ANTHRACITE, B) WHITE, C) GREEN, D) GREY .....	113
FIGURE 5-34: OVERHEAD LINE ROUTE VIA FIELDS, A) ANTHRACITE, B) WHITE, C) GREEN, D) GREY .....	114
FIGURE 5-35: OVERHEAD LINE ROUTE PARALLEL TO THE MOTORWAY, A) WHITE, B) GREEN ....	115
FIGURE 6-1: DEMONSTRATION PART OF A CRIMP CONNECTION: A) BEFORE THE INJECTION, B) AFTER THE INJECTION .....	117
FIGURE 6-2: FOUR-FOOT-MAST WITH THE POSITION OF THE TUBE-IN-TUBE CRIMP CONNECTION AND THE DECISIVE LOADS .....	117
FIGURE 6-3: MOST IMPORTANT PARAMETERS OF A PIPE-IN-PIPE PRESS CONNECTION .....	118
FIGURE 6-4: V2B01- UND V2T01- SAMPLES OF THE MAJOR PART OF THE TEST SERIES: A) INTERNAL MOULDING, B) OUTSIDE MOULDING .....	119
FIGURE 6-5: PRODUCTION OF THE CRIMP CONNECTION: A) FACING OF THE BLANK, B) ROUGHING THE JOINT ON THE INNER PIPE .....	120
FIGURE 6-6: PRODUCTION OF THE CRIMP CONNECTION: A) SMOOTHING THE JOINT ON THE INNER PIPE, B) CONTROL OF DIMENSIONAL AND SHAPE ACCURACY .....	120
FIGURE 6-7: ILLUSTRATION OF THE BASIC TERMS FOR TOLERANCES USING THE OUTER BODY FOR AN EXAMPLE [OWN PRESENTATION BASED ON [33]] .....	121
FIGURE 6-8: POSITION OF THE TOLERANCE INTERVAL WITH RESPECT TO THE NOMINAL DIMENSION WITH FIT TYPES [OWN PRESENTATION BASED ON [33]] .....	122
FIGURE 6-9: A) MEASUREMENT AT THE JOINT WITH A STRAIGHT EDGE, B) DECISIVE VARIABLES FOR GEOMETRY MEASUREMENT .....	123

FIGURE 6-10: A) INVESTIGATION OF THE SURFACE CONDITION OF THE SAMPLE V2B01-A1, B) RESULTS OF THE INVESTIGATION.....	124
FIGURE 6-11: A) MEASURING POINTS ON THE FE-MODEL FOR CALIBRATION, B) DEFORMATIONS IN THE JOINED STATE (SUPER ELEVATED REPRESENTATION) .....	126
FIGURE 6-12: POSITION OF THE STRAIN GAUGE ON THE SAMPLE: A) EXPERIMENTAL RUN TORSION, B) EXPERIMENTAL RUN BENDING, C) ORIENTATION OF STRAIN GAUGE .....	127
FIGURE 6-13: A) HYDRAULIC TESTING MACHINE FOR THE PRESSING PROCESS, B) SAMPLE INSTALLED, C) CONTROL OF THE DEFLECTION PATH .....	127
FIGURE 6-14: PRESS CONNECTION: A) BEFORE AND AFTER PRESSING, B) TENSION CURVE IN THE PRESS CONNECTION [OWN PRESENTATION BASED ON [24]].....	128
FIGURE 6-15: FORCE-DEFORMATION DIAGRAM OF THE SAMPLE V1B03-2 .....	129
FIGURE 6-16: SAMPLE V1B03-2 EXTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRAINS, B) MERIDIAN STRETCHES. ....	129
FIGURE 6-17: SAMPLE V1B03-2 INTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRAINS, B) MERIDIAN STRETCHES .....	130
FIGURE 6-18: SAMPLE V1B03-2 (SUPER ELEVATED REPRESENTATION): A) DISPLACEMENT (X-AXIS) RADIAL, B) DISPLACEMENT (Z-AXIS) MERIDIAN.....	130
FIGURE 6-19: RESULTS OF THE FE-SIMULATION LOAD CASE PRESSING: A) CIRCUMFERENTIAL STRAINS, B) MERIDIAN STRAINS .....	131
FIGURE 6-20: INFLUENCE OF THE GEOMETRY VARIABLES ON THE STRAINS AT THE DECISIVE POINT OF THE OUTER BODY AND THE PRESS-IN FORCE .....	132
FIGURE 6-21: DRAFT EXPERIMENTAL SETUP .....	134
FIGURE 6-22: A) EXPERIMENTAL SETUP, B) LOAD INTRODUCTION AND SUPPORT .....	134
FIGURE 6-23: MEASURING SYSTEM .....	135
FIGURE 6-24: EXPERIMENTAL RUN TORSION – VT09_1: A) GAP DEFORMATION MERIDIAN, B) TORSIONAL MOMENT-ROTATION RELATIONSHIP .....	137
FIGURE 6-25: EXPERIMENTAL RUN TORSION – VT09_1 TORSIONAL MOMENT- SHEAR STRAIN-DIAGRAM: A) BEFORE THE FIRST SLIDING THROUGH, B) AFTER THE FIRST SLIDING THROUGH .....	137
FIGURE 6-26: EXPERIMENTAL RUN TORSION – VT09_1: A) TORSIONAL MOMENT – MERIDIAN STRETCHING – DIAGRAM, B) TORSIONAL MOMENT – CIRCUMFERENTIAL STRETCHING – DIAGRAM.....	138
FIGURE 6-27: EXPERIMENTAL RUN TORSION: A) SUMMARIZED RESULTS, B) INFLUENCE OF THE VARIABLE CHANGE ON THE TORSIONAL MOMENTS .....	139
FIGURE 6-28: FE- RESULTS, EXPERIMENTAL RUN TORSION: A) EDGE CONDITION, B) PRINCIPAL STRESS VECTOR, C) CIRCUMFERENTIAL STRESSES.....	139
FIGURE 6-29: COMPARISON OF THE TEST RESULTS WITH THE TORSIONAL MOMENT OF A REFERENCE TUBE, B) SKETCH OF THE REFERENCE TUBE AND PRESS CONNECTION .....	140
FIGURE 6-30: EXPERIMENTAL SETUP – EXPERIMENTAL RUN BENDING .....	141
FIGURE 6-31: EXPERIMENTAL SETUP – EXPERIMENTAL RUN BENDING: A) LOAD DISTRIBUTION, B) LOAD APPLICATION, C) SUPPORT CONSTRUCTION.....	141

FIGURE 6-32: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V01B03: A) MOMENT – DISPLACEMENT RELATIONSHIP, B) ARRANGEMENT OF THE DISPLACEMENT SENSOR .....	142
FIGURE 6-33: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V01B03 EXTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES, B) MERIDIAN STRETCHES .....	143
FIGURE 6-34: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V01B03 INTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES, B) MERIDIAN STRETCHES .....	144
FIGURE 6-35: RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RUN BENDING: A) DEPENDING ON THE GEOMETRIC RELATIONSHIP, B) AS A RATIO RELATED TO A REFERENCE TUBE.....	145
FIGURE 6-36: FE- RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RUN BENDING – V01B03: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES, B) MERIDIAN STRETCHES.....	145
FIGURE 6-37: CURVE OF THE RELATED CIRCUMFERENTIAL STRESSES IN THE OUTDOOR COMPONENT $\Sigma_{Y,A}/F_Y$ DEPENDING ON THE BENDING MOMENT $M_B$ (JOINT LENGTH PARAMETER) .....	146
FIGURE 6-38: A) TEST STAND – EXPERIMENTAL RUN PRESSING B) DISPLACEMENT TRANSDUCER ON SAMPLES .....	148
FIGURE 6-39: POSITION OF THE STRAIN GAUGE ON THE SAMPLE: A) EXPERIMENTAL RUN TORSION, B) EXPERIMENTAL RUN BENDING .....	149
FIGURE 6-40: FORCE - DEFORMATION CURVE .....	149
FIGURE 6-41: SAMPLE V2B02 EXTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES, B) MERIDIAN STRETCHING .....	150
FIGURE 6-42: SAMPLES V2B02 INTERNAL BODY: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES, B) MERIDIAN STRETCHES .....	150
FIGURE 6-43: A) SUMMARIZED RESULTS, B) UTILISATION LEVEL OF THE PRESS CONNECTION AS A RESULT OF PRESSING.....	151
FIGURE 6-44: A) EXPERIMENTAL SETUP, B) LOAD APPLICATION AND SUPPORT CONSTRUCTION	152
FIGURE 6-45: A) POSITION OF THE STRAIN GAUGE ON THE SAMPLE, B) MEASURING SYSTEM ....	152
FIGURE 6-46: EXPERIMENTAL RUN TORSION: A) TORSIONAL MOMENT-ROTATION DIAGRAM, B) TORSIONAL MOMENT-TIME DIAGRAM .....	153
FIGURE 6-47: EXPERIMENTAL RUN TORSION – V02T01: A) SHEAR STRAIN EXTERNAL BODY, B) SHEAR STRAIN INTERNAL BODY .....	154
FIGURE 6-48: EXPERIMENTAL RUN TORSION – V02T01: A) CIRCUMFERENTIAL STRETCHES,....	154
FIGURE 6-49: SKETCH TO ILLUSTRATE THE SHAFT TWIST OF A SOLID TUBE MAST.....	155
FIGURE 6-50: EXPERIMENTAL SETUP .....	156
FIGURE 6-51: EXPERIMENTAL SETUP: A) LOAD APPLICATION B) SUPPORT CONSTRUCTION, C) TAB CONNECTION TO THE EXTENSION TUBE .....	156
FIGURE 6-52: MEASURING SYSTEM: A) WAY SENSOR AT THE GAP ABOVE, B) WAY SENSOR AT THE GAP BELOW, C) WAY SENSOR GAP, D) WAY SENSOR CONNECTION .....	157
FIGURE 6-53: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V02B02: MOMENT – DISPLACEMENT RELATIONSHIP. ....	158
FIGURE 6-54: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V02B02: MERIDIAN STRETCHES .....	159
FIGURE 6-55: EXPERIMENTAL RUN BENDING – V02B02: CIRCUMFERENTIAL STRETCHES.....	159

FIGURE 7-1: COMPARISON OF THE CONSTRUCTIONS .....	161
FIGURE 7-2: COST TYPES FOR THE OVERHEAD POWER LINE [OWN REPRESENTATION ACCORDING TO [12]] .....	162
FIGURE 7-3: COST ELEMENT TOTALS OF THE CONSTRUCTION COSTS OF VARIANT 4 .....	164
FIGURE 16-1: VARIANT 1, DECISIVE LOAD COMBINATION .....	197
FIGURE 16-2: VARIANT 1: INTERNAL FORCES IN ULTIMATE LIMIT STATE .....	198
FIGURE 16-3: VARIANT 2, DECISIVE LOAD COMBINATION .....	199
FIGURE 16-4: VARIANT 2: INTERNAL FORCES IN ULTIMATE LIMIT STATE .....	200
FIGURE 16-5: VARIANT 3, DECISIVE LOAD COMBINATION .....	201
FIGURE 16-6: VARIANT 4, DECISIVE LOAD COMBINATION .....	203
FIGURE 16-7: VARIANT 4: INTERNAL FORCES IN ULTIMATE LIMIT STATE .....	204
FIGURE 16-8: DRAFT OF THE ORIGINAL GEOMETRY .....	206
FIGURE 16-9: STEP 01: A) TOTAL DEFORMATION, B) VON MISES STRESS .....	207
FIGURE 16-10: VON MISES STRESS (DETAILED REPRESENTATION OF STRESS LEVEL, BORDER AREA AND JOINT AREA OF THE STIFFENING DISC).....	207
FIGURE 16-11: VON MISES STRESS IN THE JOINTING AREA A) STEP 02, B) STEP 03, C) STEP 04	207
FIGURE 16-12: VON MISES STRESS A) STEP 05, B) STEP 06 .....	208
FIGURE 16-13: DEFORMATION A) STEP 07, B) STEP 08, C) STEP 09 .....	208
FIGURE 16-14: INTRINSIC DENT ANALYSIS OF A) THE ORIGINAL VARIANT, B) THE OPTIMIZATION VARIANT.....	208
FIGURE 16-15: DRAFT OF THE VARIANT E .....	210
FIGURE 16-16: REACTION LOADS AT THE ULTIMATE LIMIT STATE OF VARIANT 4 .....	211
FIGURE 16-17: V1T01 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	212
FIGURE 16-18: V1T02 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	212
FIGURE 16-19: V1T03 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	213
FIGURE 16-20: V1T04 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	213
FIGURE 16-21: V1T06 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	214
FIGURE 16-22: V1T08 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	214
FIGURE 16-23: V1T09 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....	215
FIGURE 16-24: V1B01 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	216
FIGURE 16-25: V1B02 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	216
FIGURE 16-26: V1B03 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	217
FIGURE 16-27: V1B04 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	217
FIGURE 16-28: V1B05 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	218
FIGURE 16-29: V1B06 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	218
FIGURE 16-30: V1B07 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	219
FIGURE 16-31: V1B08 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	219
FIGURE 16-32: V1B09 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	220
FIGURE 16-33: V1B10 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING.....	220

FIGURE 16-34: V1B11 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL MOULDING .....221

FIGURE 16-35: V2B01 – AND V2T01 – SAMPLE: A) INTERNAL MOULDING, B) EXTERNAL  
MOULDING.....222

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: MASTFUNKTIONEN .....	10
TABELLE 2-2: BEISPIELE AUSGEWÄHLTER LEITER, BEZEICHNUNG NACH DIN EN 50182 [30] ..	18
TABELLE 2-3: REAKTIONSBEIWERT $GC$ [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN DIN EN 50341-2-4, 4.4.1 [32]].....	23
TABELLE 2-4: BÖENGESCHWINDIGKEITSDRÜCKE $qpze$ [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN DIN EN 1991-1-4 UND NA [25]].....	25
TABELLE 2-5: ARTEN VON EISABLAGERUNGEN AN FREILEITUNGEN .....	26
TABELLE 2-6: TEILSICHERHEITSBEIWERTE NACH DIN EN 50341-2-4 [32].....	30
TABELLE 2-7: TABELLE VERGLEICH ERDKABEL / FREILEITUNG [IN ANLEHNUNG AN [6]].....	35
TABELLE 3-1 : GEWICHT UND KOSTEN DER KONSTRUKTION IN ABHÄNGIGKEIT DER VERWENDETEN STAHLORTE BEZOGEN AUF EINEN STAHL S355J2 (IN PROZENT) .....	43
TABELLE 3-2 : GESAMTKOSTEN FÜR S355J2, S460MUND S690M BEI VERWENDUNG VON 5.6 SCHRAUBEN .....	45
TABELLE 3-3 : GESAMTKOSTEN FÜR S460MUND S690M BEI VERWENDUNG VON 8.8 SCHRAUBEN .....	45
TABELLE 3-4 : GESAMTKOSTEN FÜR S460MUND S690M BEI VERWENDUNG VON 10.9 SCHRAUBEN .....	45
TABELLE 3-5 : KONIZITÄT DER GITTERMASTKONSTRUKTION DER MASTVARIANTE 2.2 .....	49
TABELLE 3-6 : QUERSCHNITTE, MATERIAL UND EXZENTRIZITÄT DER VARIANTEN 2.2 UND 2.3	50
TABELLE 3-7 : QUERSCHNITTSFLÄCHEN DER ECKSTIELE .....	50
TABELLE 3-8 : VERGLEICH DES SCHAFTES DES REFERENZMASTES MIT DER KONSTRUKTION DER VARIANTE 2 .....	51
TABELLE 3-9 : QUERSCHNITTE, MATERIAL UND EXZENTRIZITÄT DER VARIANTEN 3.1 UND 3.2	53
TABELLE 3-10 : VERGLEICH DES REFERENZMASTES MIT DER VARIANTE 2 .....	53
TABELLE 3-11 : ABSCHLIEßENDER VERGLEICH DER VARIANTEN 1 BIS 3.....	54
TABELLE 4-1 : EINFLUSS DER LEITUNGSGESTALTUNG AUF FELDER, FUNKSTÖRUNGEN, GERÄUSCHEMISSIONEN [EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN [12]].....	61
TABELLE 4-2 : BESEILUNG DER EINZELNEN LEITERPLÄTZE.....	66
TABELLE 4-3 : MAßGEBENDE SCHNITTGRÖßEN FÜR DIE VORENTWURFSKONSTRUKTION AM FUßPUNKT IN SCHWERACHSE .....	67
TABELLE 4-4 : EXCEL-DATENBLATT DER STATISCH-KONSTRUKTIVEN STUDIE FÜR DIE FORMFINDUNG DER MASTFUßKONSTRUKTION .....	74
TABELLE 4-5 : KENNGRÖßEN DER GEWÄHLTEN BAUGRUNDFORMATIONEN .....	85
TABELLE 4-6 : KNOTENLAGERKRÄFTE (BEMESSUNGSKRÄFTE) AM FUß DER VARIANTE 2 .....	86
TABELLE 5-1 : VERGLEICH DER TRAVERSENVARIANTEN .....	93
TABELLE 5-2 : SCHNITTGRÖßEN DES MAßGEBENDEN LASTFALLS A .....	94
TABELLE 5-3 : ÜBERSICHT DER BETRACHTETEN OPTIMIERUNGEN .....	101

TABELLE 6-1 : ÜBERSICHT DER UNTERSUCHTEN VERSUCHSKÖRPER: A) VERSUCHSREIHE BIEGUNG, B) VERSUCHSREIHE TORSION .....	125
TABELLE 6-2 : MAXIMALE AUSNUTZUNG DER PROBEKÖRPER BEIDER VERSUCHSREIHEN.....	132
TABELLE 6-3 : SCHNITTGRÖßEN AN DER PRESSVERBINDUNG, VARIANTE 4F-MAST .....	147
TABELLE 6-4 : ÜBERSICHT DER UNTERSUCHTEN VERSUCHSKÖRPER .....	147
TABELLE 6-5 : ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE DER VERSUCHSREIHE .....	158
TABELLE 6-6 : TRAGFÄHIGKEIT IM VERGLEICH ZU DEN SCHNITTGRÖßEN DER MASTKONSTRUKTION.....	160
TABELLE 7-1 : KOSTENSTELLEN DER VARIANTE 4: VOLLWANDROHR KONISCH-VIERFUßSOCKEL .....	163
TABELLE 15-1: EINGABEMASKE FÜR OPTIMIERUNG DER GITTERMASTKONSTRUKTION .....	181
TABELLE 15-2: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S355J2 MIT DEM PROGRAMMVORSCHLAG .	182
TABELLE 15-3: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S355J2 MIT DEM GRUNTYP DERSELBEN STAHLGÜTE .....	183
TABELLE 15-4: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S460M MIT DEM PROGRAMMVORSCHLAG .	184
TABELLE 15-5: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S355J2 MIT DER OPTIMIERUNG IN S460M .	185
TABELLE 15-6: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S690M MIT DEM PROGRAMMVORSCHLAG .	186
TABELLE 15-7: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S355J2 MIT DER OPTIMIERUNG IN S690M .	187
TABELLE 15-8: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S460M MIT DER OPTIMIERUNG S690M .....	188
TABELLE 15-9: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S355J2 MIT EINER VERÄNDERTEN AUSFACHUNG IN S355J2 .....	189
TABELLE 15-10: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S460M MIT EINER VERÄNDERTEN AUSFACHUNG IN S460M .....	190
TABELLE 15-11: VERGLEICH DER OPTIMIERUNG IN S690M MIT EINER VERÄNDERTEN AUSFACHUNG IN S690M .....	191
TABELLE 16-1: ZUSAMMENSTELLUNG DER LASTFÄLLE .....	192
TABELLE 16-2: ZUSAMMENSTELLUNG DER LASTKOMBINATIONEN .....	193
TABELLE 16-3: BEMESSUNGSSITUATION A: WINDLASTEN AUS BESEILUNG MIT EISLAST WINDZONE 4, EISZONE 2 .....	194
TABELLE 16-4 : BEMESSUNGSSITUATION B: WINDLASTEN AUS BESEILUNG MIT EISLAST WINDZONE 1, EISZONE 2 .....	194
TABELLE 16-5: BEMESSUNGSSITUATION C: WINDLASTEN AUS BESEILUNG MIT EISLAST WINDZONE 2, EISZONE 4 .....	195
TABELLE 16-6: LEITERZUGKRÄFTE AUS GEWICHTSKRÄFTEN .....	195
TABELLE 16-7: RESULTIERENDE LEITERZUGKRÄFTE FÜR DEN LASTFALL J.....	196
TABELLE 16-8: RESULTIERENDE LEITERZUGKRÄFTE FÜR DEN LASTFALL K .....	196
TABELLE 16-9: VARIANTE 3, SCHNITTGRÖßEN IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT FÜR AUSGEWÄHLTE QUERSCHNITTE .....	202
TABELLE 16-10: ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE DER GEOMETRIEMESSUNG MAßSTAB 1:5223	
TABELLE 16-11: ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE DER GEOMETRIEMESSUNG MAßSTAB 1:2224	

## Verzeichnisse

### Lists

---

TABELLE 16-12: ERGEBNISSE DER TOLERANZUNTERSUCHUNG DER PROBEKÖRPER IM MAßSTAB 1:2.....	225
TABELLE 16-13: ZUSAMMENFASSENDER ERGEBNISSE DER VERSUCHSREIHE VERPRESSEN IM MAßSTAB 1:2 .....	226

List of tables

TABLE 2-1: MAST FUNCTIONS .....	10
TABLE 2-2: EXAMPLES OF SELECTED CONDUCTORS, DESIGNATION ACCORDING TO DIN EN 50182 [30].....	18
TABLE 2-3: REACTION COEFFICIENT $GC$ [OWN REPRESENTATION ACCORDING TO DIN EN 50341-2-4, 4.4.1 [32]] .....	23
TABLE 2-4: GUST VELOCITY PRESSURES $qpze$ [OWN REPRESENTATION ACCORDING TO DIN EN 1991-1-4 AND NA [25]] .....	25
TABLE 2-5: TYPES OF ICE DEPOSITS ON OVERHEAD POWER LINES.....	26
TABLE 2-6: PARTIAL SAFETY FACTORS ACCORDING TO DIN EN 50341-2-4 [32] .....	30
TABLE 2-7: TABLE COMPARISON UNDERGROUND CABLES / OVERHEAD LINE [BASED ON [6]].....	35
TABLE 3-1: WEIGHT AND COST OF THE CONSTRUCTION DEPENDING ON THE STEEL GRADE USED IN RELATION TO A STEEL S355J2 (IN PERCENT).....	43
TABLE 3-2: TOTAL COST OF S355J2 , S460M AND S690M BY USING 5.6 BOLTS .....	45
TABLE 3-3: TOTAL COST OF S460M AND S690M USING 8.8 BOLTS .....	45
TABLE 3-4: : TOTAL COST OF S460M AND S690M USING 10.9 BOLTS .....	45
TABLE 3-5: CONICITY OF THE LATTICE MAST CONSTRUCTION OF MAST VARIANT 2.2.....	49
TABLE 3-6: CROSS SECTIONS, MATERIAL AND ECCENTRICITY OF VARIANTS 2.2 AND 2.3.....	50
TABLE 3-7: CROSS SECTIONS, MATERIAL AND ECCENTRICITY OF VARIANTS 2.2 AND 2.3.....	50
TABLE 3-8: COMPARISON OF THE SHAFT OF THE REFERENCE MAST WITH THE CONSTRUCTION OF VARIANT 2 .....	51
TABLE 3-9: CROSS SECTIONS, MATERIAL AND ECCENTRICITY OF VARIANTS 3.1 AND 3.2.....	53
TABLE 3-10: COMPARISON OF THE REFERENCE MAST WITH VARIANT .....	53
TABLE 3-11: FINAL COMPARISON OF THE VARIANTS 1 TO 3 .....	54
TABLE 4-1: INFLUENCE OF OVERHEAD LINE DESIGN ON FIELDS, RADIO INTERFERENCE, NOISE EMISSIONS OWN PRESENTATION BASED ON [12]] .....	61
TABLE 4-2: ROPE OF THE SEPARATE CONDUCTOR POSITIONS.....	66
TABLE 4-3: DECISIVE INTERNAL FORCES FOR THE PRELIMINARY DESIGN CONSTRUCTION AT THE BASE IN NEUTRAL AXIS .....	67
TABLE 4-4: EXCEL DATA SHEET OF THE STATIC-CONSTRUCTIVE STUDY TO FIND OUT THE FORM OF THE MAST FOOT CONSTRUCTION .....	74
TABLE 4-5: CHARACTERISTICS OF THE SELECTED SUBSOIL FORMATIONS .....	85
TABLE 4-6: NODAL REACTION DESIGN FORCES AT THE BASE POINT OF VARIANT 2 .....	86
TABLE 5-1: COMPARISON OF TRAVERSE VARIANTS .....	93
TABLE 5-2: INTERNAL FORCES OF THE GOVERNING LOADING CASE A .....	94
TABLE 5-3: OVERVIEW OF THE CONSIDERED OPTIMIZATIONS .....	101
TABLE 6-1: OVERVIEW OF THE INVESTIGATED SAMPLES: A) EXPERIMENTAL RUN BENDING, B) EXPERIMENTAL RUN TORSION .....	125
TABLE 6-2: MAXIMUM UTILISATION OF THE SAMPLES FROM BOTH TEST SERIES.....	132

# Verzeichnisse

## Lists

---

TABLE 6-3: OVERVIEW OF THE INTERNAL FORCES AT THE PRESS CONNECTION, VARIANT 4F-MAST .....	147
TABLE 6-4: OVERVIEW OF THE INVESTIGATED SAMPLES .....	147
TABLE 6-5: SUMMARIZED RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RUN.....	158
TABLE 6-6: LOAD CAPACITY COMPARED TO THE INTERNAL FORCES OF THE MAST CONSTRUCTION .....	160
TABLE 7-1: COST TYPES FOR THE VARIANT 4: GRID STRUCTURE CONICAL WITH FOUR-FOOT PEDESTAL .....	163
TABLE 15-1: INPUT MASK FOR THE OPTIMIZATION OF THE GRID STRUCTURED TOWER CONSTRUCTION .....	181
TABLE 15-2: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S355J2 AND THE PROGRAM PROPOSAL ...	182
TABLE 15-3: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S355J2 AND THE BASE TYPE OF THE SAME GRADE OF STEEL .....	183
TABLE 15-4: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S460M AND THE PROGRAM PROPOSAL ...	184
TABLE 15-5: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S355J2 AND THE OPTIMIZATION IN S460M .....	185
TABLE 15-6: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S690M AND THE PROGRAM PROPOSAL ...	186
TABLE 15-7: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S355J2 AND THE OPTIMIZATION IN S690M .....	187
TABLE 15-8: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S460M AND THE OPTIMIZATION IN S690M .....	188
TABLE 15-9: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S355J2 AND A MODIFIED INFILL IN S355J2 .....	189
TABLE 15-10: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S460M AND A MODIFIED INFILL IN S460M .....	190
TABLE 15-11: COMPARISON OF THE OPTIMIZATION IN S690M AND A MODIFIED INFILL IN S690M .....	191
TABLE 16-1: COMPILATION OF LOAD CASES.....	192
TABLE 16-2: COMPILATION OF LOAD COMBINATIONS .....	193
TABLE 16-3: DESIGN SITUATION A: WIND LOADS FROM ROPING WITH ICE LOAD, WIND ZONE 4, ICE ZONE 2.....	194
TABLE 16-4: DESIGN SITUATION B: WIND LOADS FROM ROPING WITH ICE LOAD, WIND ZONE 1, ICE ZONE 2.....	194
TABLE 16-5: DESIGN SITUATION C: WIND LOADS FROM ROPING WITH ICE LOAD, WIND ZONE 2, ICE ZONE 4.....	195
TABLE 16-6: CONDUCTOR TENSILE FORCES FROM WEIGHT FORCES.....	195
TABLE 16-7: RESULTING CONDUCTOR TENSILE FORCES FOR LOAD CASE J .....	196
TABLE 16-8: RESULTING CONDUCTOR TENSILE FORCES FOR LOAD CASE K.....	196
TABLE 16-9: VARIANT 13: INTERNAL FORCES IN ULTIMATE LIMIT STATE FOR SELECTED CROSS SECTIONS.....	202
TABLE 16-10: SUMMARY RESULTS OF THE GEOMETRY MEASUREMENT SCALE 1:5.....	223

TABLE 16-11: SUMMARY RESULTS OF THE GEOMETRY MEASUREMENT SCALE 1:2 ..... 224  
TABLE 16-12: RESULTS OF THE TOLERANCE ANALYSIS OF THE SAMPLES SCALE 1:2..... 225  
TABLE 16-13: SUMMARIZED RESULTS OF TEST SEQUENCE PRESSING OF THE SAMPLES SCALE 1:2.  
..... 226

## Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

Symbol	Bedeutung
%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
A	Querschnittsfläche
$A_{ins}$	vom Wind angeströmte Isolatorfläche
$A_{pol}$	projizierte Fläche des einstielligen Mastes
$A_{ref}$	Bezugsfläche des Abschnitts
$A_{Ti}$	die jeweils von Profilen ausgefüllte Fläche der zugehörigen Wand
$A_{TQ}$	die von Profilen ausgefüllte Fläche der Querträgerwand
b	Durchmesser des Abschnitts
$B_o$	Breite des Gittermastes am oberen Ende des Abschnitts
$B_u$	Breite des Gittermastes am unteren Ende des Abschnitts
$C_C$	Windwiderstandsbeiwert der Leiter
$C_{cl}$	Windwiderstandsbeiwert für Leiter mit Eisansatz
$C_f$	Gesamtwindkraftbeiwert
$C_{f,0}$	Basiskraftbeiwert des Kreiszylinders in Abhängigkeit von der Reynoldszahl
$C_{f,A}$	Windkraftbeiwert für langgestreckte und kompakte Anbauteile
$C_{f,s}$	Windkraftbeiwert für tragende Bauteile ohne Anbauten bzw. des Schaftes unter Verwendung eines Völligkeitsgrades
$C_{pol}$	Windwiderstandsbeiwert des einstielligen Mastes
$C_Q$	Windwiderstandsbeiwert der Querträgerwand
$C_s C_d$	Strukturbeiwert
$C_{ti}$	Widerstandsbeiwert der zugehörigen Wand in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad dieser
d	Durchmesser des Leiterkabels
$D_{50Hz\_pe}$	Abstand zwischen Leiter und Erde bei höchster Betriebsspannung
$D_{50Hz\_pp}$	Abstand zwischen Leiter und Leiter bei höchster Betriebsspannung
$D_a$	Außendurchmesser des Rohres
$D_{el}$	Abstand des Außenleiters zum geerdeten Bauteil

---

$D_{el,1}$	Abstand zwischen Leiter und Erde bei Blitzüberspannung
$D_{el,2}$	Abstand zwischen Leiter und Erde bei Schaltüberspannung
$D_{el,3}$	Abstand zwischen Leiter und Erde als empirischer Wert zur Sicherstellung öffentlicher Personensicherheit
$D_l$	modifizierter Leiterdurchmesser mit Eisansatz
$D_{pe}$	Abstand zum Tragwerk
$D_{pp}$	Abstand zwischen den Außenleitern
$D_{pp,1}$	Abstand zwischen Leiter und Leiter bei Blitzüberspannung
$D_{pp,2}$	Abstand zwischen Leiter und Leiter bei Schaltüberspannung
$D_{pp,3}$	Abstand zwischen Leiter und Leiter als empirischer Wert zur Sicherstellung öffentliche Personensicherheit
$E_d$	Bemessungswert der Einwirkung
$F_W$	Windkraft auf einen Gittermasten
$f_y$	Streckgrenze
$G_C$	Reaktionsbeiwert für Leiter in Abhängigkeit von der Spannweite und dem dynamischen Verhalten
$g_l$	längenbezogene Eislast an Leiter
$G_K$	charakteristisches Eigengewicht der Leiter, Isolatoren und Stützpunkte
$G_q$	Böenfaktor
$h$	Höhe über dem Gelände
$H_{ges}$	Gesamthöhe des jeweiligen Abschnitts
$H_i$	Höhe des jeweiligen Mastschusses
$I$	extreme Eislast
$K_i$	Konizität des jeweiligen Mastschusses
$K_m$	mittlere Konizität
$L$	Spannweite
$L_1$	Spannweite des vorangehenden Feldes
$L_2$	Spannweite des nachfolgenden Feldes
$M_X$	Moment um die x-Achse
$M_Y$	Moment um die y-Achse
$M_Z$	Moment um die z-Achse
$q$	Staudruck
$q_0$	Bezugsstaudruck

## Verzeichnisse

### Lists

---

$Q_{CK}$	charakteristische Leiterzugkräfte unter Temperaturveränderung
$q_h$	Staudruck
$Q_{IK}$	charakteristische Eiseinwirkung auf Leiter und Isolatoren
$q_p(z_e)$	Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bezugshöhe
$Q_{PK}$	charakteristische Einwirkung aus Errichtung und Instandhaltung
$Q_{Wc}$	Windlasten auf die Stützpunkte in Kombination mit einem Eisansatz an den Leitern
$Q_{Wins}$	Windlasten auf Isolatoren
$Q_{WK}$	charakteristische Windeinwirkung
$Q_{Wpol}$	Windlast auf einstielige Masten
$Q_{WT}$	Windlasten auf Mastschaft
$Q_{WTQ}$	Windlasten auf Querträger
$Q_{WTQx}$	Komponente parallel zur Querträgerachse
$Q_{WTQy}$	Komponente orthogonal zur Querträgerachse
$Q_{WTx}$	Komponente parallel zur Querträgerachse
$Q_{WTy}$	Komponente orthogonal zur Querträgerachse
$Re$	Reynoldszahl
$t$	Dicke des Bleches
$U_{90\%\_ff\_is}$	Blitzüberspannung
$U_s$	höchste Betriebsspannung
$V_X$	Querkraft in x-Richtung
$z_e$	Bezugshöhe
$\gamma_C$	Teilsicherheitsbeiwert für Horizontalzugkräfte aus den Leitern infolge Temperaturänderungen
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für das Eigengewicht
$\gamma_I$	Teilsicherheitsbeiwert für Eislasten
$\gamma_M$	Materialbeiwert
$\gamma_P$	Teilsicherheitsbeiwert für Montagelasten
$\gamma_W$	Teilsicherheitsbeiwert für Windlasten
$\Delta$	Differenz
$\varepsilon$	Materialkennwert
$\vartheta$	Winkel zwischen der Lotrechten und der Windrichtung auf die Leiter
$\lambda$	effektive Schlankheit

$v_{ih}$	Windgeschwindigkeit
$\rho$	relative Luftdichte
$\rho_I$	Wichte des Eises
$\varphi$	Einwirkungswinkel für Wind aus der kritischen Richtung
$\psi$	Kombinationsbeiwert
$\psi_I$	Kombinationsbeiwert für Eis
$\psi_W$	Kombinationsbeiwert für Wind
$\psi_\lambda$	Abminderungsfaktor zur Betrachtung der effektiven Schlankheit



# 1 Einleitung Introduction

## *Kurzfassung*

*In diesem Kapitel wird kurz auf die Grundlagen des Forschungsprojekts „Freileitungsmaste für die Energiewende“ eingegangen. Dabei werden Pläne für die Energiewende aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) und dem Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) vorgestellt und anschließend Ziele des Forschungsprojekts dargelegt.*

## *Abstract*

*This chapter briefly describes the basics of the research project "Overhead line masts for energy revolution". Plans for the energy revolution from the Federal Requirements Plan Act and the Energy Pipeline Expansion Act are presented, followed by the objectives of the research project.*

## 1.1 Problemstellung und Motivation Problem definition and Motivation

Die Nutzung regenerativer Energiequellen rückte in den letzten Jahren in den Fokus der Öffentlichkeit und des Gesetzgebers. Die Abkehr von konventionellen Energieträgern wird in Deutschland als Energiewende bezeichnet und verankert ferner per Gesetz den vollständigen Ausstieg aus der Atomenergie. Mit einem rasanten Anstieg des Neubaus von Windkraftträdern und Photovoltaikanlagen im vergangenen Jahrzehnt, wird der größte Anteil an regenerativer Stromerzeugung durch Windkraft, vor allem an den Küsten im Norden Deutschlands, gewonnen. Die Bundesländer mit dem größten Energieverbrauch liegen dagegen im Süden Deutschlands. Damit ist für die Übertragung der Energie ein umfangreicher, per Gesetz festgelegter Aus- und Umbau des Stromnetzes erforderlich.

Nachdem die zukünftig notwendige Energiemenge von den vier Übertragungsnetzbetreibern in mehreren Szenarien prognostiziert wurde, wurden für die Erfüllung dieser Vorgaben aktuell 43 Aus-, Um- und Neubaumaßnahmen in dem Netzentwicklungsplan (NEP) für das Zieljahr 2024 festgelegt. Diese sind in dem am 31. Dezember 2015 in Kraft getretenen Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) festgelegt und beinhalten aktuell rund 2.850 km Neubautrassen und rund 3.050 km Optimierungs- und Verstärkungsmaßnahmen an bestehenden Trassen. Zur Beschleunigung des Ausbaus der Übertragungsnetze verabschiedeten Bundestag und Bundesrat im Jahr 2009 das Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen (EnLAG). Dort sind zusätzlich 22 Vorhaben aufgelistet mit aktuell rund 1.800 km Gesamtlänge der Leitungen [5]. Außerdem sind auch Offshore-Vorhaben als Anbindungsleitungen in der Nord- und Ostsee und unionsweite PCI (Vorhaben von gemeinsamem Interesse) geplant.

Nach der Genehmigung der Vorhaben durch die Bundesnetzagentur oder andere Landesbehörden sind für die Umsetzung dieser die Netzbetreiber zuständig. Seit dem

Jahr 2017 müssen sie außerdem nur noch alle zwei Jahre einen Szenariorahmen für den zukünftig notwendigen Energieverbrauch vorlegen.

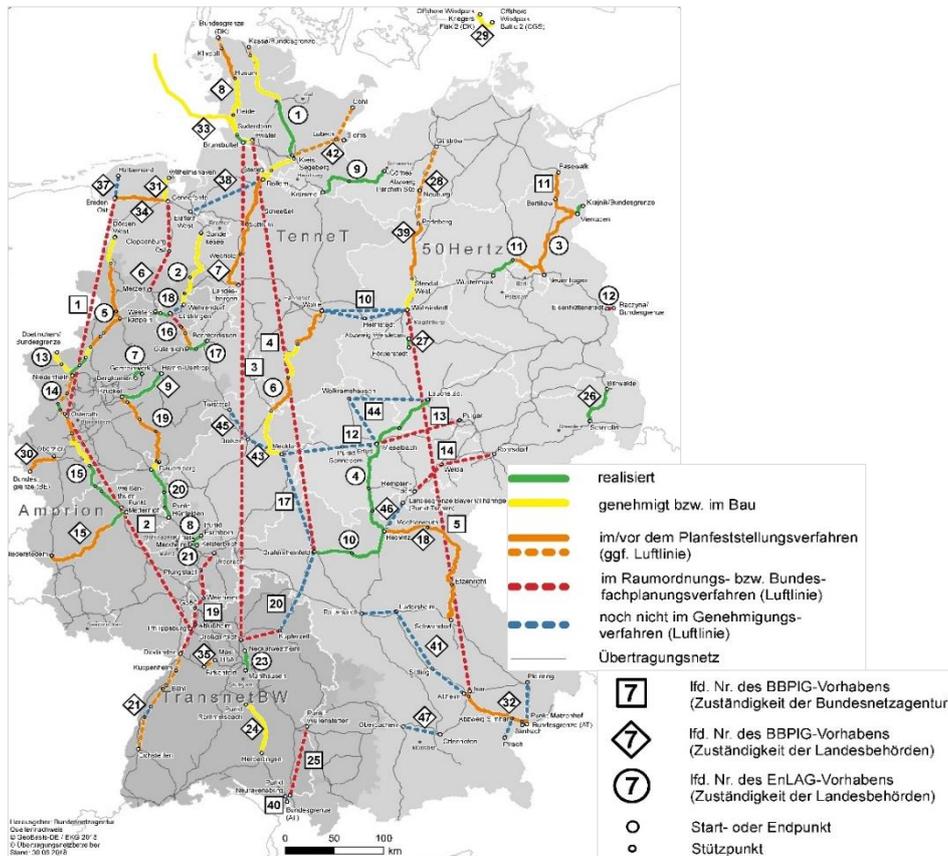


Abbildung 1-1: Stand der Vorhaben aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) und dem Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) nach dem zweiten Quartal 2018 aus [1]

Figure 1-1: State of the projects from the Federal Requirements Planning Act (BBPIG) and the Energy Pipeline Expansion Act (EnLAG) after the second quarter of 2018 [1]

Die Karte in Abbildung 1-1 zeigt neben dem vorhandenen Übertragungsnetz auch die aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) und dem Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) geplanten Vorhaben.

Die vorrangige Lösung für die Baumaßnahmen ist der Bau von Freileitungen überwiegend in Stahlbauweise, da die Verlegung als Erdkabel technisch aufwendiger und teurer ist. Freileitungen für Hoch- und Höchstspannungsleitungen (>220kV) in Deutschland werden üblicherweise als hohe Stahlgittermasten ausgeführt. Die Gittermastentechnologie für Freileitungsmasten ist mehr als 100 Jahre alt und hat sich seitdem wenig geändert. Vorteile dieser traditionellen Stahlgittermastkonstruktionen sind ihr im Verhältnis zur Bauhöhe relativ geringes Eigengewicht und so die eher leichte Bauweise. Daraus resultieren eine leichte Besteigbarkeit und Inspizierbarkeit sowie die meist einfache Reparatur.

Als Nachteile seien hier zum einen die Fertigung und die Montage des Gittermastes erwähnt. Durch seine Kleinteiligkeit und die Vielzahl von Stäben und Schraubverbindungen ist der Zusammenbau der Konstruktion eher arbeitsaufwändig und erzeugt vergleichsweise hohe Lohnkosten. Zum anderen werden heute jegliche, mit industrieller Nutzung verbundene Bauten als Belastung der natürlichen Ressourcen

und Einschränkung der Freiräume betrachtet. Zum Schutz des Menschen und der Landschaft werden visuelle Störungen und die Beeinträchtigung der Ästhetik der Landschaft und des Ortsbildes durch den Raumanspruch der Maste und Leitungen bewertet [16].

Es ist daher von elementarer Bedeutung, das Image der Freileitungen vom umweltzerstörenden Bauwerk zu einem notwendigen, aber auch akzeptierten Teil unserer industriellen Gesellschaft zu verbessern. Zudem wird das große Potential des modernen Stahlbaus und moderner Stähle auch im Bereich des Freileitungsbaus gewinnbringend ausgeschöpft.

Dies konnte nur gelingen, indem für den Entwurf und die Konstruktion von Freileitungsmasten neben den modernen Produktions-, Fertigungs- und Ausführungstechnologien und wirtschaftlichen Aspekten insbesondere auch gestalterische Kriterien berücksichtigt wurden. Damit wird die sensible Einbindung in die Umwelt erreicht und die Akzeptanz der Bevölkerung ermöglicht.

## **1.2 Zielsetzung** ***Objective***

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts war der ganzheitliche Entwurf und die Konstruktion von neuartigen Freileitungsmasten aus Stahl. Neben den modernen Materialien sowie Produktions-, Fertigungs- und Ausführungstechnologien und den wirtschaftlichen Aspekten wurden insbesondere auch gestalterische Kriterien berücksichtigt, die den Entwurf geprägt haben.

Das vorliegende Projekt wurde interdisziplinär von Ingenieuren und Architekten der Lehrstühle Stahlbau und Städtebau, von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen an der TU Dortmund, bearbeitet. Es wurden im Einzelnen folgende Forschungsergebnisse erzielt:

- Definition und Zusammenstellung der technischen und architektonischen Anforderungen zur Konstruktion von Freileitungsmasten
- Entwicklung architektonisch-ingenieurtechnisch optimierter Konstruktion für Freileitungsmasten unter Einsatz moderner Werkstoffe aus Stahl, polygonaler Rund-Rohr-Querschnitte und neuwertiger Fertigungstechnologien
- Wissenschaftliche Analyse und Optimierung der neuartigen Anschlusskonstruktionen von Rohrtürmen für Freileitungsmasten
- Analyse der Wirtschaftlichkeit der neu entwickelten Freileitungsmasten

Die Ziele des Forschungsvorhabens mit der Verknüpfung der einzelnen Disziplinen werden in Abbildung 1-2 anschaulich dargestellt.



Abbildung 1-2: Ziele des Forschungsvorhabens  
Figure 1-2: Objectives of the research projects

Die Forschungsarbeiten umfassen umfangreiche architektonische, statisch-konstruktive, experimentelle und numerische Untersuchungen, mit denen die wesentlichen Faktoren, die die Trag- und Gebrauchsfähigkeit, sowie die Gestaltung von Freileitungsmasten aus Stahl beeinflussen, grundlegend erfasst und ganzheitlich optimierte Konstruktionen entwickelt wurden.

## 2 Stand der Technik *State of the art*

### *Kurzfassung*

*Der Bau von Stahlgittertürmen für Freileitungsmasten der Stromleitungsführung hat eine 100 Jahre lange Tradition. Seitdem sind Form, Gestalt und Konstruktion der Gittermasttürme in Deutschland nahezu unverändert. Nach wie vor werden traditionelle Baustähle, Winkelprofile und einfachste SL-Schraubverbindungen mit herkömmlichen Knotenblechanschlüssen verwendet. Im Weiteren werden neben den allgemeinen Definitionen des Freileitungsbaus, die wichtigsten Grundlagen des Masttragwerks und die rechtlichen Anforderungen bei der Planung vorgestellt.*

### *Abstract*

*The construction of steel grid towers for overhead power line masts has a 100-year tradition. Since then, the form, shape and construction of the grid towers have almost remained unchanged in Germany. Traditional structural steels, angle profiles and the simplest screw connections with conventional junction plate connections are still used. In addition to the general definitions of pipeline construction, the most important basics of the mast structure and the legal requirements for planning are presented.*

### 2.1 Freileitung *Overhead power line*

Die elektrischen Stromleitungen, mit deren Hilfe die aus den Kraftwerken eingespeiste Energie über die Energieumwandler an die Verbraucher transportiert wird, bilden das Stromnetz. In Deutschland ist das Stromnetz topografisch auf vier Netzbetreiber aufgeteilt. Dabei handelt es sich um die Firmen Amprion, Tennet, Transnet BW und 50 Hertz. Die Regelzonen dieser Übertragungsnetzbetreiber sind in der Abbildung 2-1 a) dargestellt. Das Stromnetz lässt sich nach Spannungsebenen einteilen; diese sind in Westeuropa standardmäßig die Höchst-, Hoch- und Niederspannungsebenen. Das bestehende Freileitungsnetz wurde bis in die 1980er-Jahre ausgebaut und umfasst im Höchstspannungsnetz aktuell 35.000 km Leitungslänge. In Abbildung 2-1 b) ist die Karte des Höchstspannungsnetzes in Deutschland dargestellt, hier sind auch die Ballungsgebiete in Deutschland deutlich erkennbar.

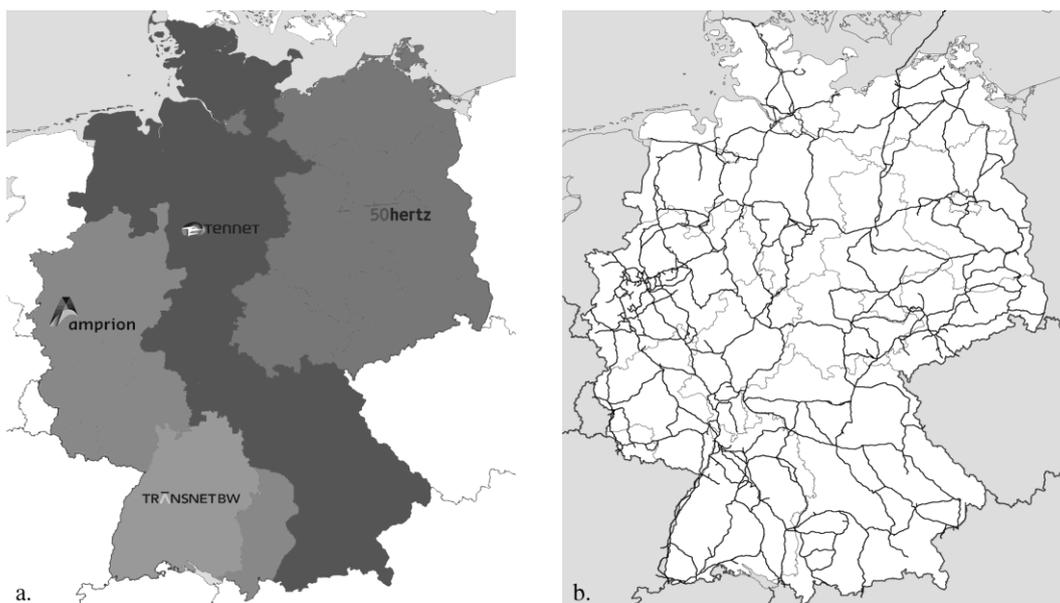


Abbildung 2-1: a) Aufteilung des Übertragungsnetzbetriebs [10],  
b) Karte des Höchstspannungsnetzes in Deutschland [3]  
Figure 2-1: a) Distribution of transmission system [10],  
b) Map of the extra-high voltage grid in Germany [3]

Wie in Abbildung 2-2 dargestellt, gehören zum Stromnetz neben den Freileitungen und den Verbrauchern auch Einrichtungen wie Schalt- und Umspannwerke, in denen Transformatoren eine Verbindung von Stromnetzen mit unterschiedlichen Spannungsebenen ermöglichen.

Eine Freileitung hat die Aufgabe, die elektrische Energie zu übertragen. Ziel ist, den Endverbraucher zuverlässig und sicher mit Strom zu beliefern und dabei die Übertragungsverluste zu minimieren. Die Abbildung 2-2 zeigt die Bestandteile einer oberirdischen Freileitung, zu denen vorrangig das Tragwerk und zwar der Mast mit der zugehörigen Gründung gehört. Dazwischen werden Stromleiter mit Verbindungsteilen gespannt.

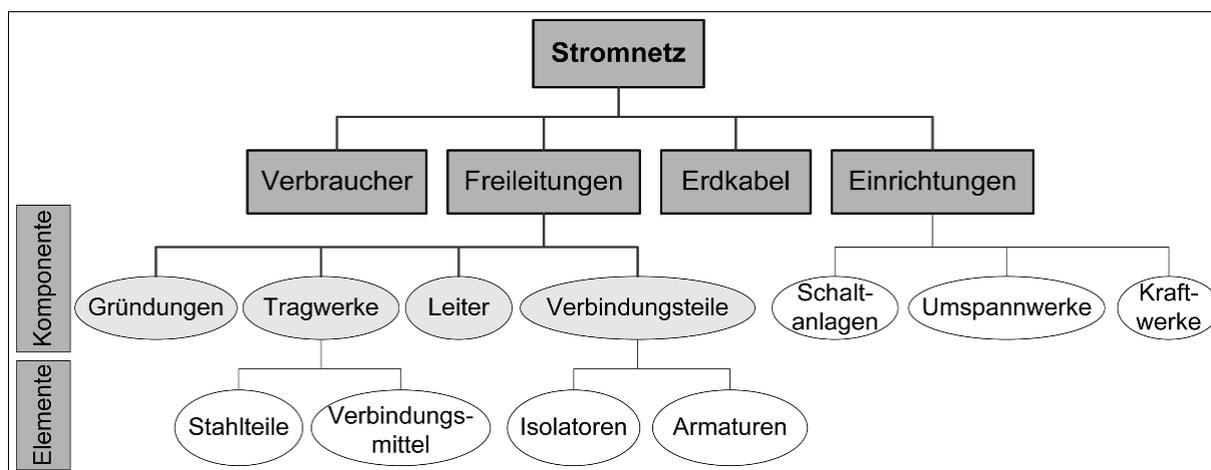


Abbildung 2-2: Struktur eines Stromnetzes  
Figure 2-2: Structure of an electricity grid

Die sogenannten Abspannmaste als Festpunkte auf der Strecke einer Trasse grenzen einen Abspannabschnitt ab. Die Länge dieses Abschnitts definiert auch die Länge der Leiter. Eine weitere Unterteilung in Spannfelder geschieht durch die Tragmaste, die die

Lasten aus den Leitern an den Hängeisolatoren vertikal abtragen. Die sogenannte Windspannweite des jeweiligen Masts wird durch die Hälfte der Länge der angrenzenden Felder definiert. Zum Schutz der Freileitung vor direkten Blitzeinschlägen verläuft oberhalb, meist auf einer Erdseilstütze befestigt, ein Erdseil. Die Blitzeinschläge werden vom Erdseil durch den Erdungsleiter in das Erdreich weitergeleitet und gewährleistet somit sowohl die Zuverlässigkeit einer Leitung als auch die Personensicherheit. Die Abbildung 2-3 b) zeigt die maßgebenden Komponenten einer Freileitung in der Ansicht.

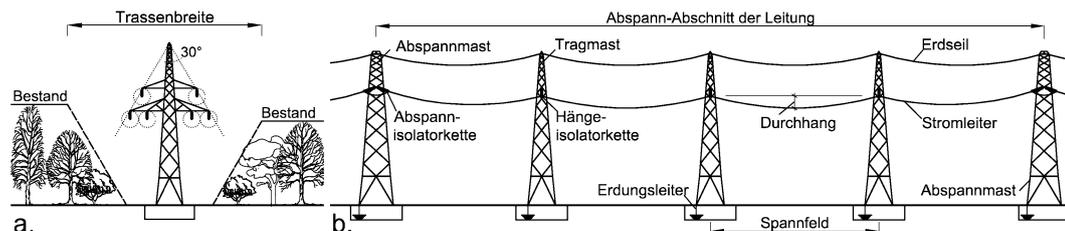


Abbildung 2-3: a) Trassenquerschnitt; b) Ansicht eines Trassenabschnitts  
Figure 2-3: a) Trail cross section, b) view of a trail section

In Abbildung 2-3 a) ist der für den störungsfreien und sicheren Betrieb einer Stromleitung erforderliche Korridor, der vorab zu planen und frei zu räumen ist, zu erkennen. Dabei werden die notwendigen Abstände auch im ausgeschwenkten Zustand des Leitungsseils sowohl zur Topografie als auch seitlich zu Bebauungen und anderen Hindernissen berücksichtigt. Diese Abstände sind auch im Betrieb kontinuierlich zu prüfen und einzuhalten.

## 2.2 Mast Mast

Die weit verbreitete Stahlgittermastkonstruktion in Deutschland für Höchstspannungsleitungen (>220 kV) mit Bauhöhen >25 m ist die Konstruktion eines Donaumastes. In Abbildung 2-4 ist dessen allgemeines Konstruktionsschema als FE-Modell dargestellt. Seine Gitterkonstruktion ist aus dem Mastfuß, der an die Gründung anbindet, aus Mastschaft, dessen Querschnittsform meistens quadratisch ist, und der Erdseilstütze zusammengesetzt. Die Energieübertragung erfolgt über die Leiterseile, bei deren Auswahl ein Kompromiss zwischen elektrischer Leitfähigkeit, vorzugsweise ohne große Energieverluste, und mechanischer Festigkeit getroffen werden muss. Für die im Drehstromsystem typische Dreileiteranordnung sind Querträger, auch Traversen genannt, übereinander angeordnet und tragen hier zusammen je Seite einen Stromkreis. Aus statischer Sicht ist der Mast ein Kragträger aufgelöst als Fachwerkträger, mit Einspannung in das Fundament. Abhängig vom Biegemomentenverlauf wächst mit der Masthöhe die Aufstandsweite des Stahlgittermastes am Fußpunkt.

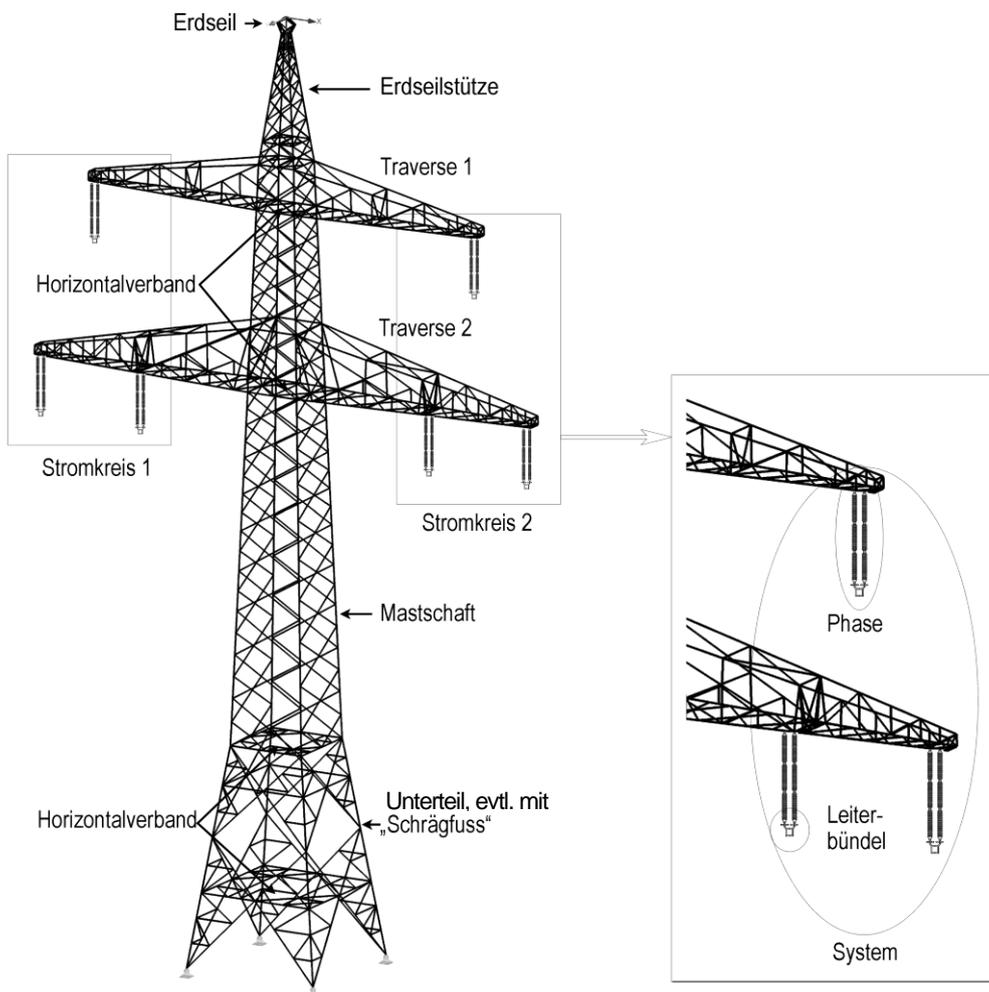


Abbildung 2-4: Stahlgittermast mit Donaumastbild (380 kV) – allgemeines Konstruktionsschema, FE-Modell

Figure 2-4: Steel lattice mast with Danube mast picture – general construction, FE-Model

Stahlgittermasten werden meist in einfachster Stahlbauweise unter Verwendung warmgewalzter, winkelförmiger Stahlquerschnitte nach DIN EN 10056-1 (bzw. ungenormt) für Stützen, Diagonalen, und Ausfachungsstäbe ausgeführt. Die Winkelprofile werden einfach, in Schmetterlingsanordnung oder als Doppelwinkel eingesetzt.

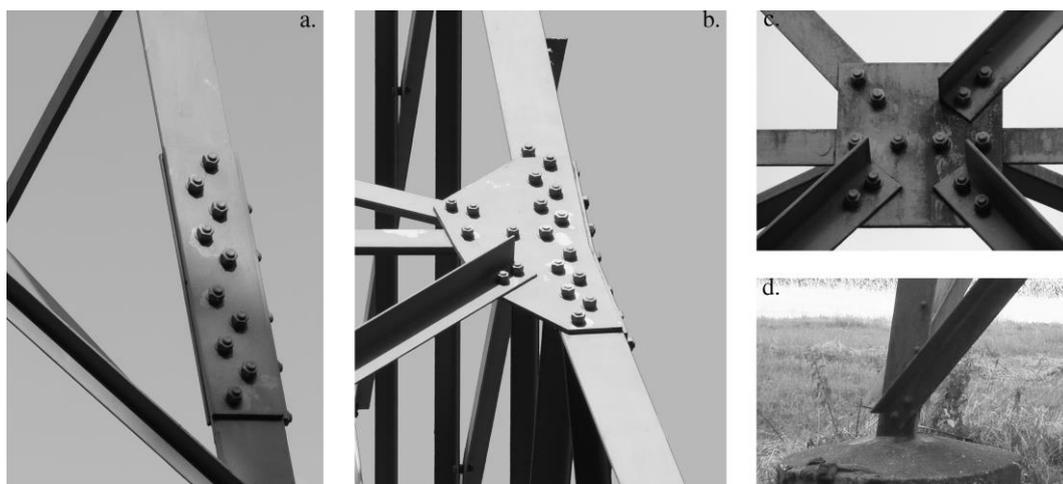


Abbildung 2-5: Anschlüsse einer Gittermastkonstruktion  
Figure 2-5: Connections of a lattice mast construction

Jedes Profil wird werksseitig für die Montage durch Ablängen und das Bohren und Stanzen von Verbindungslochern vorkonfektioniert. Eingesetzt werden Stahlgüten bis ~S355J2 (DIN EN 10025), die Blechdicken liegen für ca. 45m hohe Gittermaste im Bereich von ca. 4 bis 15 mm.

Die Gründung eines Freileitungsmastes besteht aus einem oder mehreren Stahlbetonteilen. Unterschieden werden Flachgründungen und Pfahlgründungen. Ist es beim oberirdischen Tragwerk (Mastschaft, Querträger) oft möglich und sinnvoll, Abmessungen und Bauart auf einem Trassenabschnitt wenig bis gar nicht zu variieren, kann sich Gründungsart auch auf einer kurzen Trassenstrecke mehrmals verändern, da sie maßgeblich von den vorliegenden Bodenverhältnissen abhängig ist. Eine Aussage zur Gründungsart kann daher für jeden einzelnen Mast nur nach der Erstellung eines Bodengutachtens getätigt werden.

## **2.2.1 Mastarten/-bilder** *Types of mast engl*

Bei Hochspannungsleitungen werden unterschiedliche Mastarten eingesetzt, die je nach Mastfunktion unterschiedliche Belastungen aufnehmen müssen. Die wichtigsten Mastarten sind im Folgenden dargestellt (vgl. [12]).

### **2.2.1.1 Nach Funktion** *According to function*

Die Gliederung der Maste nach ihren Funktionen ist in der Literatur nicht einheitlich. Zwar wiederholen sich die wichtigsten Bezeichnungen, jedoch wird in den meisten Fachbüchern keine vorherige Grobunterteilung und eine anschließende Feingliederung vorgenommen. Es erscheint jedoch sinnvoll, die Masten vorerst nach ihrer Tragfunktion zu gliedern, in Tragmasten und Abspannmasten. Dieses Vorgehen ist auch in der Freileitungsnorm, der DIN EN 50341-1 [31], beschrieben und wird ebenso von den Betreibern des Stromnetzes zur Kennzeichnung der Maste in ihren Plänen bevorzugt. Somit lassen sich die in der Literatur genannten Mastarten nach der Grobunterteilung in der folgenden Tabelle zusammenstellen.

Tabelle 2-1: Mastfunktionen  
Table 2-1: Mast functions

Tragmasten	Abspannmasten
Tragmast Winkeltragmast	Abspannmast Winkelabspannmast Kreuzungsmast Abzweigmast Verdrillmast Endmast

Die **Tragmasten** sind zur Aufnahme des Eigengewichts, äußerer Lasten aus Wind- und Eiseinwirkungen und vertikaler Kräfte aus den Leiterseilen sowie dem anschließenden Abtrag der genannten Lasten bestimmt. Daher können die Leiterseile durchgehend von Tragmast zu Tragmast an den vertikal angeordneten Isolatoren befestigt werden. Aufgrund seiner verhältnismäßig einfachen Konstruktion und dem damit verbundenen geringen Materialaufwand ist der Tragmast der meist gebaute Masttyp.

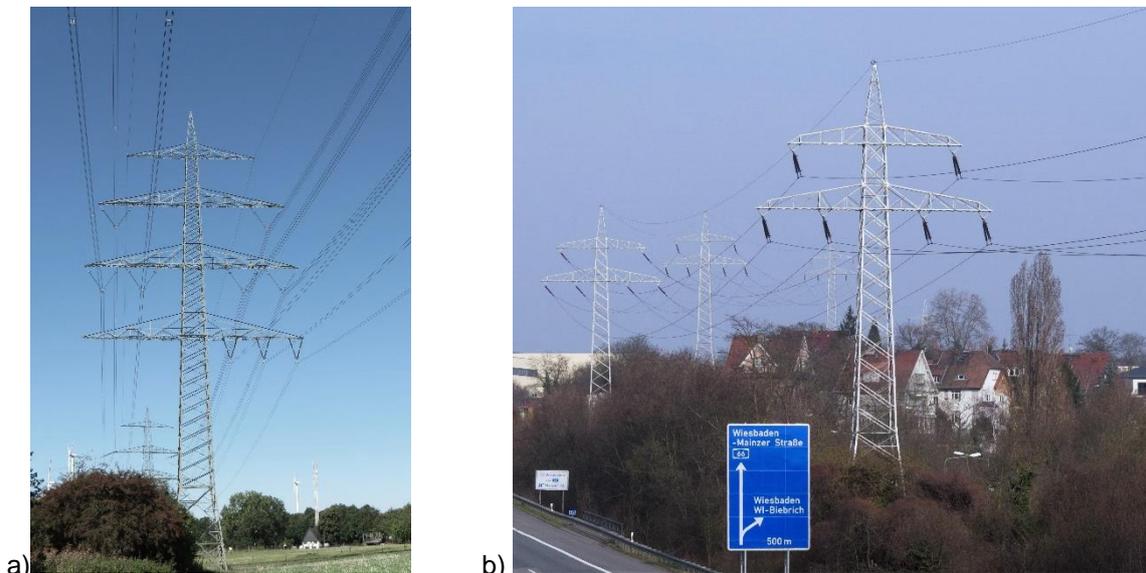


Abbildung 2-6: a) Tragmast; b) Winkeltragmast [15]  
Figure 2-6: a) Suspension tower, b) angle suspension tower [15]

Bei einem **Winkeltragmast** hängen die Isolatorketten in Abhängigkeit vom Trassenwinkel schräg. Zwar können mit dieser Mastart Trassenwinkel von bis zu  $20^\circ$  überbrückt werden, jedoch können das schräge Hängen der Isolatorketten und die damit einhergehenden Komplikationen mit einer Anordnung der Isolatoren in V-Form umgangen werden. Bei der Planung und Ausführung der Winkeltragmaste muss erreicht werden, dass die Isolatorketten keine Leiterzugkräfte aufnehmen. Trotz eines sorgfältigen Vorgehens bleibt die Anfälligkeit bei außergewöhnlichen Lasten, weswegen dieser Masttyp selten verwendet wird.

Die **Abspannmasten** nehmen zusätzlich zu den Lasten, die die Tragmasten ebenso abtragen, die Zugkräfte aus den Leiterseilen auf. Aus diesem Grund enden die Leiterseile an den Masten und werden dort zur Stromübertragung über eine Stromschleife verbunden. Außerdem sind Abspannmaste generell so ausgelegt, dass

sie auch einseitigen Belastungen oder unterschiedlichen Leiterzugkräften standhalten, sodass dieser Masttyp grundsätzlich an den Endpunkten einer Leitung, bei Richtungswechseln, sowie auf geraden Strecken nach etwa 5 km oder vor und hinter besonderen Kreuzungen zur Stabilisierung vorzufinden ist. Aufgrund der größeren Belastungen sind die Abspannmaste im Vergleich zu den Tragmasten komplexer und stabiler konstruiert.



Abbildung 2-7: Winkelabspannmast;  
Figure 2-7: dead-end / "anchor" tower

Der **Winkelabspannmast** unterscheidet sich optisch kaum vom einfachen Abspannmast, dafür jedoch stark in seiner Konstruktion. Er kann wie auch der Abspannmast ungleiche Seilzüge (LF H) aufnehmen. Ferner ist er jedoch auch für Seilzugumlenkkräfte parallel zu den Traversen ausgelegt.

Im Falle von Kreuzungen meist zweier Leitungstrassen kommt der **Kreuzungsmast** zum Einsatz. Dieser kennzeichnet sich durch Querträger, die in beide Richtungen orientiert sind. Die Freileitungen müssen in diesem Fall auch nicht unbedingt unter einem Winkel von  $90^\circ$  aufeinandertreffen, dieser darf auch spitzer ausfallen. **Abzweigmaste** differenzieren sich zu den Kreuzungsmasten nur darin, dass eine der beiden Freileitungen an einem Abzweigmast endet und nur die andere fortgeführt wird.



a)



b)

Abbildung 2-8: a) Kreuzungsmast; b) Abzweigmast (im Vordergrund)  
Figure 2-8: a) „crossing” tower, b) “branch” tower (in the foreground)

**Verdrillmasten** werden bei Leitungen mit Spannung oberhalb von 110 kV und Leitungslängen von mehr als 20 km benötigt. Aus mechanischer Sicht gleicht der Verdrillmast dem einfachen Abspannmast, jedoch müssen beim Einsatz von Verdrillmasten die Belastungen auf beiden Seiten des Mastes besonders betrachtet werden, da bei diesem Masttyp die Anordnung der Leiter aus Gründen der elektrischen Kapazität rotiert. Die Leiterseile werden somit nicht auf der gleichen Ebene fortgeführt, an der sie ankamen. Der Stromfluss wird jedoch wieder über die Stromschlaufen aufrechterhalten. Dieser Wechsel der Anordnung ist in der folgenden Abbildung exemplarisch für einen Donaumast dargestellt.

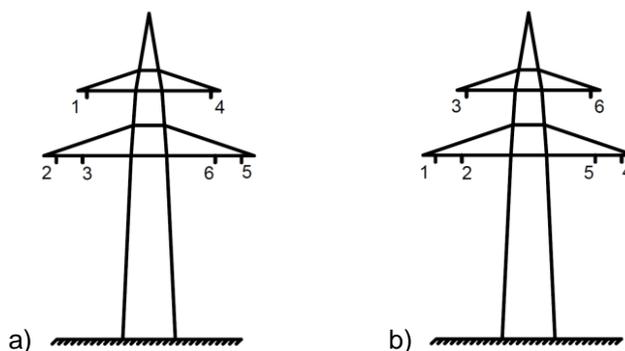


Abbildung 2-9: exemplarische Darstellung einer Verdrillung an einem Donaumast: a) Anordnung der Leiter auf der einen Seite; b) Anordnung der Leiter auf der anderen Seite  
Figure 2-9: exemplary presentation of a twist at Danube mast: a) Arrangement of the conductors on one side, b) Arrangement of the conductors on the other side

**Endmaste** befinden sich, wie die Bezeichnung bereits erahnen lässt, am Ende einer Freileitung. Sie bilden somit den Übergang zu einer Erdkabelung oder zu einem Umspannwerk und sind daher nur einseitig sehr viel stärker belastet. Besonders vor größeren Umspannwerken, an denen viele Leitungen ankommen, wird dieser Masttyp bevorzugt als Portalmast ausgeführt.



Abbildung 2-10: Mehrere Endmasten vor einem Umspannwerk (links, nicht im Bild)  
Figure 2-10: Several terminal tower in front of the electrical substation  
(on the left side, not seen in the picture)



Abbildung 2-11: Umspannwerk in Dortmund-Kruckel  
Figure 2-11: Electrical substation in Dortmund-Kruckel

### **2.2.1.2 Nach Bauart** ***According to the type of construction***

Die verschiedenen Mastarten können nicht nur nach ihrer Funktion, sondern auch nach ihrer Bauart kategorisiert werden. Das Bild eines Freileitungsmastes wird wesentlich durch die Anzahl und die Anordnung der Stromkreise bestimmt. Auch die Anordnung von Erdseilen bestimmt das Mastbild. In Europa sind Hoch- und Höchstspannungsleitungen (>220 kV) fast ausschließlich als Mehrfachleitungen ausgeführt. Die Stahlmasten lassen sich in sechs wesentliche Kategorien nach der Bauart unterteilen.

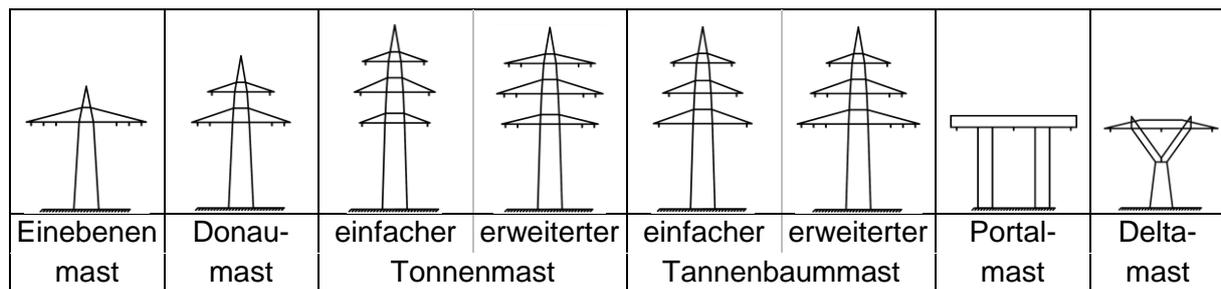


Abbildung 2-12: Zusammenstellung in Deutschland üblicher Mastbilder für Einsystem-, Doppel- und Mehrfachleitungen

Figure 2-12: Compilation of mast designs common in Germany for single system, double and multiple cables

Die einfachste, aber auch in ihren Möglichkeiten beschränkteste Konstruktion ist die eines **Einebenenmastes**. Dieser führt, wie die Bezeichnung schon aussagt, alle Leiter auf einer Ebene und bringt somit Vorteile in der Montage mit sich. Bei der Übertragung von Drehstrom befindet sich im Regelfall auf jeder Mastseite ein Stromkreis, also drei Leiter. Durch die Anordnung auf einer Ebene weisen Einebenenmasten bei einer geringeren Bauhöhe meist eine größere Breite im Vergleich zu anderen Mastarten auf. Somit bietet sich dieser Masttyp besonders für die Verwendung in ländlichen Regionen, in denen häufig nur ein einziges Spannungsniveau übertragen werden muss und wenig Platzmangel besteht, an. Jedoch ist er auch dort in geringem Maße vorzufinden wegen seiner mangelnden Erweiterbarkeit.

Der **Donaumast**, der seinen Namen durch die Ersterrichtung im Donautal erhielt, ist bei der Drehstromübertragung von zwei Stromkreisen der am häufigsten gebaute Mast und wird auch bei Um- und Neubauten häufig gewählt. Es befinden sich insgesamt zwei Leiter an der oberen kürzeren und vier Leiter an der unteren längeren Traverse. In Ausnahmefällen sind die Traversen andersherum angeordnet. Durch diese Anordnung optimiert der Donaumast die große erforderliche Trassenbreite eines vergleichbaren Einebenenmastes sowie die große Höhe eines einfachen Tonnenmastes.

**Tonnenmasten** haben im Vergleich zu Donaumasten eine geringere Breite und werden daher in Gebieten eingesetzt, in denen der zur Verfügung stehende Platz sehr gering ist. Aufgrund der Anordnung der Leiter an drei Traversen, wobei die mittlere Traverse die Breiteste ist, gleicht die äußere Erscheinung des Strommastes einer Tonne. Gleichzeitig bringt diese Anordnung einen höheren Montagaufwand sowie einen gesteigerten Materialbedarf mit sich. Der einfache Tonnenmast führt auf jeder Ebene einen Leiter und somit insgesamt zwei Stromkreise. Durch eine Erweiterung der Traversen kann diese Mastart bis zu vier Stromkreise führen. Dann werden im Regelfall auf jeder Mastseite an jeder Traverse je zwei Leiter geführt. Falls sich die Leiter auf dem gleichen Spannungsniveau befinden, bilden in der Regel je drei untereinander montierte Leiter einen Stromkreis. Bei Leitern unterschiedlicher Stromspannung werden diese meist ungleich auf die Traversen verteilt, sodass eine Übertragung des Stroms sowohl im Transportnetz als auch für die Verteilung in Gebieten, in der Regel in der Kombination 380 kV/ 110kV, zeitgleich möglich ist. Die 110 kV Ebene fungiert als Verteiler und die 380 kV Ebene dient dem Transport.

Der **Tannenbaummast** weist viele Gemeinsamkeiten zum Tonnenmast auf. Der Hauptunterschied liegt jedoch darin, dass bei dem Tannenbaummast die unterste

Traverse die breiteste ist und die Traversenbreite zur Mastspitze hin abnimmt. Da die breiteste Traverse meist größer ausfällt als die eines Tonnenmastes benötigt diese Mastart in der Regel eine größere Trassenbreite. Hier wird ebenso zwischen der einfachen und der erweiterten Version unterschieden. Der einfache Tannenbaummast führt je einen Stromkreis pro Mastseite. Der erweiterte Tannenbaummast führt hingegen bis zu vier Stromkreise. Die insgesamt 12 Leiter sind entweder analog zum Tonnenmast je zu zweit pro Mastseite und Traverse oder in Anlehnung an die äußere Form angeordnet, also mit je einem Leiter an der oberen Traverse, je zwei an der mittleren und je drei an der unteren pro Mastseite. In der letzteren, gebräuchlicheren Kombination bilden je die drei oberen Leiter einen Stromkreis, sowie die drei Leiter an der untersten Traverse, sodass der erweiterte Tannenbaummast häufig für die gleichzeitige Übertragung von Strom im Transportnetz und im Verteilnetz genutzt wird. Durch die Zuteilung der Stromkreise zu den Traversen bringt ein abschnittsweiser Wechsel der 110 kV- Leitung weniger Probleme mit sich und erleichtert die Montagearbeiten.

**Portalmasten** setzen sich aus zwei Mastschäften mit einer aufgelegten Traverse zusammen und differenzieren sich somit optisch von den bisher beschriebenen Masten. Diese Mastart, die durch einen zweiten Querträger erweiterbar ist, ist für große, besonders einseitig angreifende Leiterzugkräfte konzipiert und wird daher häufig in einer Aneinanderreihung mehrerer Portalmaste als Endmasten vor Elektrizitäts- und Umspannwerken genutzt. Die Leiter sind je einer am Ende des Querträgers und einer in der Mitte zwischen den beiden Mastschäften angeordnet.

Falls die Leiterzugkräfte die Belastungsgrenze eines Portalmastes übersteigen, kommt ein **Deltamast** oder auch **Y-Mast** zum Einsatz. Jedoch schwindet bei diesem Masttyp die Widerstandsfähigkeit gegenüber einseitigen Lasten. Der Deltamast besteht aus einem Mastschaft, der sich ab einer gewissen Höhe entzweit und somit die Form des namensgebenden Y bildet, sowie einem an den Spitzen angebrachten Querträger, an dem die Leiter befestigt sind. Zur Übertragung von mehr als einem Stromkreis können weitere Querträger hinzugefügt werden. In der Praxis wird dennoch ein einfacher Einebenenmast dem Deltamast vorgezogen, da selten so hohe Belastungen auftreten, die die Kosten und den Aufwand eines Deltamastes rechtfertigen würden.

## 2.2.2 Elektrotechnische Grundlagen *Electrotechnical basics*

Um möglichst sicher und wirtschaftlich innovative Freileitungsmaste gestalten zu können, sind bei der Planung elektrische Anforderungen, die zur Verhinderung von Überschlägen und zur Verringerung der Leitungsverluste dienen, entscheidend. Die einzuhaltenden Abstände der Leiter untereinander ergeben sich aus der elektrischen Spannung und des Durchhanges der Leiterseile. Bei Hoch- und Höchstspannungsleitungen hat die Leiteranordnung außerdem Einfluss auf die elektrischen Kenngrößen und damit auf die Übertragungsfähigkeit.

Grundlegende Kenngröße zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit einer Freileitung ist die natürliche Leistung. Sie wird aus der elektrischen Kapazität, die Ladungsmenge, die über den Leiterquerschnitt ideell transportiert werden kann, unter Berücksichtigung des Wellenwiderstandes einer Leitung gegen den Transport elektrischer Ladung,

ermittelt. Infolge von Ladungsverlusten ist die natürliche Leistung meist jedoch geringer als die tatsächliche Leistungsübertragung. Um dennoch ein zuverlässiges Netz gewährleisten zu können sind mehr Leiter, größere Leiterquerschnitte oder Kondensatoren vorzusehen.

Eine Bewertung des Netzes hinsichtlich seiner Fähigkeit, nach einem Störfall den normalen Netzbetrieb aufnehmen zu können, erfolgt über die Kenngröße der Stabilität. Ebenfalls entscheidend für die Leistungsfähigkeit einer Freileitung sind die auftretenden Spannungsverluste. Verluste treten zum einen an den Außenleitern der Freileitung, die Ohm'schen Verluste, und zum anderen an den Armaturen und Isolatoren, die dielektrischen- und Koronaverluste, auf. Die Größe der Verluste ist abhängig der Konstruktionsart und sollte daher für eine wirtschaftliche Trasse möglichst früh in der Planung berücksichtigt werden.

Um die wirtschaftliche Ausnutzung einer Stromtrasse zu verifizieren, wird der Trassenausnutzungsgrad ermittelt. Er wird über das Verhältnis der Wirkleistung als tatsächlich übertragene Leistung und der Trassenbreite bestimmt. Im Hochspannungsbereich ergeben sich dadurch wirtschaftliche Nutzungsgrade von ca. 15 MVA/m. Um trotz der genannten Verluste ein gefordertes Leitungsniveau erzielen zu können, ist es daher meist erforderlich, die Leitungen größer zu dimensionieren. Hierbei sollten jedoch die elektrischen Einflüsse bzw. Auswirkungen für die Umgebung beachtet werden.

Da sich um die Leitungstrasse elektrische und magnetische Felder bilden, beeinflussen Freileitungen sowohl technische Anlagen als auch den menschlichen Körper. Die Freileitungsmaste führen nicht nur zu Funkstörungen und Geräuschen bei Geräten der Informationstechnik, sondern auch zu gesundheitlichen Gefahren für Menschen im direkten Einflussbereich.

Zum Schutz der Menschen, die sich kurz- oder längerfristig im Einflussbereich der Trasse befinden, sind daher Grenzabstände einzuhalten. Diese sind einerseits unverbindlich durch die WHO als Vorsorgewerte und zum anderen verbindlich durch entsprechende Normungen festgelegt.

Zusätzlich zu den einzuhaltenden Abständen für die körperliche Gesundheit sind weitere Grenzwerte definiert, die für die Sicherheit der Freileitung einzuhalten sind. Diese sind tabellarisch nach der DIN EN 50341-1 zu ermitteln und können zusätzlich an langjährige Erfahrungswerte infolge empirischer Ermittlungen angepasst werden.

Nach der DIN EN 50341-1 wird zwischen dem inneren Abstand zum Leiter  $D_{pp}$ , dem inneren Abstand zum Tragwerk  $D_{pe}$  und dem äußeren Abstand zum geerdeten Bauteil  $D_{el}$  unterschieden. Die erforderlichen Abstände sind für die Blitzüberspannung  $U_{90\%_{ff_{is}}}$  der Isolatorkette, die Schaltüberspannung und die höchste Betriebsspannung  $U_s$  zu ermitteln. Daraus kann der geforderte Gesamtabstand bestimmt werden, der in Abhängigkeit des Hindernisses einen zusätzlichen Abstand enthält. Dieser Abstand ist auch bei Schwingungen und Auslenkungen infolge von Windeinwirkungen einzuhalten.

### **2.2.2.1 Leiter und Isolatoren** **Conductors and insulators**

#### **Leiter**

Entscheidend für den Stromtransport mit Freileitungen sind die Leiter. Sie dienen als elektrisches Leiterseil der Energieübertragung zwischen zwei Punkten, den Freileitungsmasten. Zusätzlich zur funktionellen Aufgabe der Leiter ist ebenfalls die wirtschaftliche Bedeutung bei der Planung zu beachten. Mit 35% bis 60% entfallen ein Großteil der Errichtungskosten auf die Leiter und deren Verlegung.

Die Auswahl des Leiters sollte daher unter Berücksichtigung der Leiterfähigkeit, der Wirtschaftlichkeit der Übertragung, der mechanischen Leiterfestigkeit und der entsprechenden Beanspruchung, des Kriechverhaltens und des Schwingverhaltens erfolgen. Die verschiedenen Leiterarten werden dementsprechend nach ihrer Funktion, dem Werkstoff und der Konstruktion differenziert.

Die Unterscheidung der verschiedenen Leiterseile erfolgt zunächst nach ihrer Funktion. Die Leiter, die zwischen den Masten der Freileitungstrasse spannen, werden als Leiterseile, auch Phasen, bezeichnet. Sie ermöglichen die Stromübertragung. Die Art der Stromübertragung bestimmt hierbei die erforderliche Anzahl an Leiterseilen. Für die Übertragung von Gleichstrom sind je Stromrichtung zwei Phasen, bei Drehstrom sind hingegen mindestens drei Phasen je Stromrichtung erforderlich.

Erdseile hingegen dienen lediglich der Erdung des Mastes und übertragen keine elektrische Leistung. Sie schützen den Mast und die stromführenden Leiterseile vor Blitzeinschlägen und den daraus resultierenden Überspannungen. Eine Anordnung ist ab der Hochspannungsebene erforderlich. Bei Tragmasten ist ein Blitzschutzwinkel von 30° notwendig. In einigen Fällen ist bei sehr ausladender Konstruktion pro Mastseite ein Erdseil erforderlich, wofür dann die Mastspitze in ein Erdseilhorn aufgelöst wird.

Differenziert wird zwischen Einwerkstoffleitern, die nur aus einem Werkstoff bestehen, und Verbundleitern, die unterschiedliches Material im Kern und im Mantel angeordnet haben. Die Wahl der Materialien erfolgt in Abhängigkeit der Spannweite, der mechanischen Festigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit.

Bei kurzen Spannweiten und somit geringen Zugkräften werden vermehrt Einwerkstoffleiter aus Aluminium eingebaut. Zwar nimmt die Tragfähigkeit mit steigender Spannweite infolge des ansteigenden Eigengewichts ab, jedoch verbleibt eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit bei einer kleinen Masse.

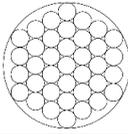
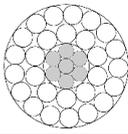
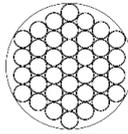
Um diese elektrische Leitfähigkeit ebenfalls bei größeren Spannweiten der Hochspannungsleitungen ausnutzen zu können, werden Verbundleiter konstruiert. Ein Außengeflecht aus Aluminiumdrehblech dient der Stromübertragung und wird durch einen innenliegenden Stahlkern verstärkt, um den steigenden Leiterzugkräften standhalten zu können. Ein steigender Stahlanteil erhöht den praktischen E-Modul und die davon abhängige rechnerische Bruchkraft des Leiters. Der Anteil des Aluminiums hingegen beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit und somit den spezifischen Leitwert positiv. Diese Kombination der Werkstoffe Aluminium und Stahl ist zusätzlich in der Lage sich wechselnden Beanspruchungen aus winderregenden Schwingungen anzupassen. Um

die Tragfähigkeit und Leitfähigkeit vollends gewährleisten zu können, ist die Korrosionsbeständigkeit der Stahlseile über Verzinken und Einfetten zu sichern.

Als Erdseile hingegen werden meist aluminiumummantelte Stahldrähte verwendet. Die Bimetalleiter ermöglichen große Tragfähigkeiten und können daher ebenfalls bei weiter ansteigenden Spannweiten eingesetzt werden. Alternativ können auch Seile mit Adern aus Lichtwellenleitern für Erdseile benutzt werden. So können die Leiter neben ihrer eigentlichen Blitzschutzaufgabe auch der Nachrichtenübertragung dienen.

Entsprechend des Leiterwerkstoffes erfolgt die Bezeichnung der Leiter nach DIN EN 50182 [30]. Beispiele verschiedener Leiter sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Beispiele ausgewählter Leiter, Bezeichnung nach DIN EN 50182 [30]  
Table 2-2: Examples of selected conductors, designation according to DIN EN 50182 [30]

	1. Einwerkstoff- leiter	2. Verbund- leiter	3. Bimetal- leiter
			
Bezeichnung	147-AL1	122-AL1/ 20-ST1A	147-A20SA
Anzahl Drähte	37	26 Al / 7 St	37
Durchmesser Leiter [mm]	15,8	15,5	15,8
Spez. Leitwert [ $m/\Omega mm^2$ ]	35,38	35,38 / 5,21	11,8
Rechnerische Bruchkraft [kN]	26,48	44,5	197,13
Dauerstrombelastbarkeit [A]	455	410	225
Praktischer E-Modul [ $N/mm^2$ ]	57.000	77.000	159.000

Die erste Zahl der Bezeichnung gibt die Querschnittsfläche der Leiter in  $mm^2$  an, gefolgt von der Abkürzung des verwendeten Werkstoffes. Aluminiumleiter sind zusätzlich mit einer Zahl ergänzt, die die Art der Legierung angibt. Bei Bimetalleitern steht die Zahl hingegen für den Anteil des um Stahl ummantelnden Aluminiums. Bei vorhandenen Stahlseilen folgt zunächst die Festigkeitsstufe, dann ein Buchstabe, der die Größe der Verzinkungsschicht beschreibt.

Die Leiterseile werden in Abhängigkeit des vorhandenen Spannungsniveaus als Einzelleiter oder Bündelleiter angeordnet. Bei niedrigen Spannungsniveaus ist es ausreichend Einzelleiter, d.h. ein Leiterseil, anzuordnen. Bündelleiter als Gruppe einzelner, verbundener Leiterseile werden hingegen bei höheren Spannungsniveaus verwendet. Die Bündelung erfolgt über Feldabstandshalter, die die Teilleiter auf einen Abstand von 400 mm fixieren, und führt zu einem verbesserten Wellenwiderstand und einer erhöhten natürlichen Leistung. Die Anordnung von Zweierbündeln bei einer 220-kV-Leitung führt bereits zu einer Reduzierung der Leitungsverluste und des Schallpegels. Hinzu kommt als weiterer Vorteil der Bündelleiter die reduzierte elektrische Randfeldstärke, die verringerte Abstände der einzelnen Phasen ermöglicht. Bezogen auf eine klassische 380-kV-Leitung werden üblicherweise Dreier- oder Viererbündelleiter verwendet. Höhere Spannungsniveaus können die Verwendung von 6- oder 8-fach Bündelleitern erfordern.

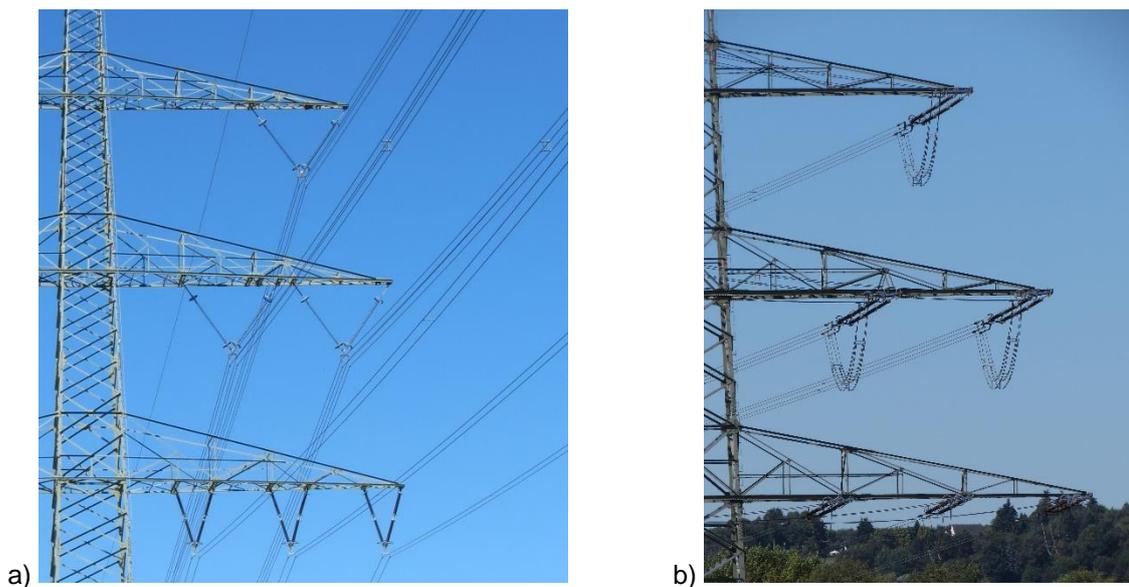


Abbildung 2-13: Vierer- und Zweier-Leiterbündel a) am Tragmast, b) am Abspannmast  
Figure 2-13: Quad and dual conductor bundles a) Suspension tower, b) dead-end / "anchor" tower

### **Isolatoren**

Um die stromführenden Leiter von dem Freileitungsmast als Tragstruktur zu entkoppeln, werden Isolatoren benötigt. Sie bilden die isolierenden Verbindungskomponenten zwischen den stromführenden Leiterseilen und den geerdeten Masten.

Zusätzlich zur isolierenden Aufgabe ist die tragende Funktion bei der Konstruktionswahl zu beachten. Die kraftschlüssige und isolierende Verbindung zwischen den Leitern und dem Mast ist auch bei wechselnden Einflüssen zu gewährleisten. Es ist somit sowohl eine elektrotechnische Bemessung als auch eine statische Auslegung des Isolatorsystems erforderlich, die meist durch den Hersteller übernommen werden.

Generell werden für die Isolatoren überwiegend nichtleitende Baustoffe verwendet. Die Materialwahl erfolgt unter Berücksichtigung der mechanischen Beanspruchbarkeit, des Spannungsniveaus und der Schmutzempfindlichkeit der Oberfläche, die Einfluss auf die isolierende Wirkung hat.

Keramik, als mechanisches hochfestes Porzellan, wurde bereits vor über 100 Jahren bei damaligen, niedrigen Spannungsniveaus als Kappenisolator eingesetzt. Eine Glasur des Porzellans ermöglichte einen Schutz des Isolators gegenüber Verschmutzungen, die zu einem Kriechstrom an der Isolatoraußenseite führten. Wesentlicher Vorteil, der eine wirtschaftliche Bemessung ermöglichte, ist die Schwingfestigkeit des Materials, die nahe der statischen Festigkeit lag. Ein additives Zusammenfügen der Isolatorelemente führte bereits damals zu einer Vielzahl von Kettenisolatoren.

Gehärtetes Glas ist ebenfalls als nichtleitender Baustoff zur Herstellung von Isolatoren geeignet, findet jedoch meist nur außerhalb von Deutschland seine Anwendung. Zum einen können infolge der geringen mechanischen Beanspruchbarkeit des Glases nur kleinere Isolatoren gefertigt werden, zum anderen führt die rauer werdende Oberfläche

während der Nutzung zu Kriechstrom. Dennoch gibt es in den Ländern, die Glasisolatoren verwenden, nur vereinzelte Langzeitschäden.

Aktuell geht die Entwicklung über zum Einbau von Silikonschirm-Verbundisolatoren. Die Verwendung von Verbundwerkstoffen, wie Epoxidharze, Teflon oder Silikonkautschuk, führt zu geringen Kriechströmen, geringem Gewicht, Hydrophobie, die eine hohe Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen ermöglicht, sowie der Eignung bei Gleichstromnetzen. Für die Anwendung im Hochspannungsbereich wird ein glasfaserverstärkter Kern mit einer Silikonbeschirmung ummantelt.

Die Isolatoren lassen sich abhängig der Form in Kappenisolatoren, meist aus Porzellan oder Glas, und Langstabisolatoren, meist aus Porzellan oder Verbundwerkstoffen, einteilen. Entsprechend der Anordnung ist zusätzlich zwischen stehenden und hängenden Isolatoren zu unterscheiden, die zwingend bei Hochspannungsleitungen zu verwenden sind. Hängeisolatoren werden als Isolatorkette aus zusammengefügt Isolatoren gebildet. Isolatorketten können bei paralleler Anordnung eine Doppelkette oder aber eine V-Form-Kette erzeugen. Die V-Formkette findet ihre Anwendung bei Tragisolatoren, die das Gewicht der Leiterseile sowie Wind- und Schneelasten tragen müssen. Doppelketten hingegen werden bei Trag- und Abspannisolatoren eingesetzt, da zusätzliche Leiterzugkräfte aus der Hälfte des Abspann-Abschnitts aufzunehmen sind.

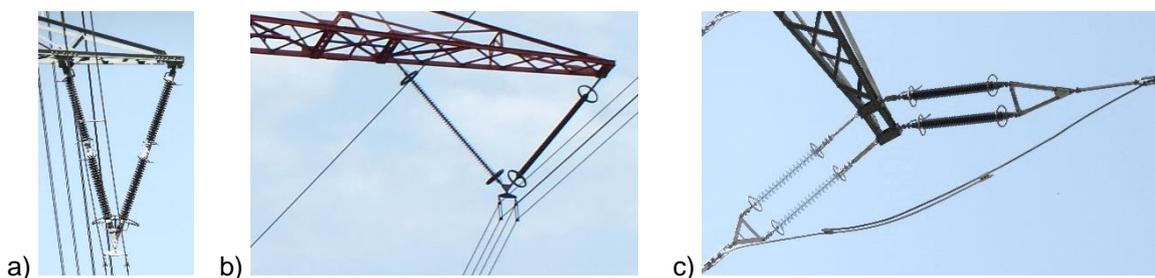


Abbildung 2-14: Tragkette aus Keramik in V-Form, b) Tragkette aus Silikon in V-Form, c) Doppelabspannkette aus Silikon und Keramik  
Figure 2-14: Ceramic carrier chain in V-shape, b) Silicone carrier chain in V-shape, c) Silicone and ceramic double tensioning chain

### **Armaturen**

Als mechanische Befestigung zwischen den Leiterseilen und den Isolatoren dienen Armaturen. Sie stellen die Verbindungsmittel im Freileitungsbau dar. Die entsprechenden Armaturtypen sind in Abhängigkeit ihrer mechanischen und elektrischen Eigenschaften zu wählen.

Die Befestigung der Leiter mit den Isolatorketten erfolgt über Klemmen, die sowohl statische als auch dynamische Beanspruchungen aufnehmen müssen. Die Klemmenart ist daher abhängig der Mastart zu wählen. Tragklemmen werden bei Tragmasten eingesetzt, da dort lediglich eine vertikale Unterstützung der Leiterseile mit geringer Spannweite erforderlich ist. Abspannklemmen hingegen sind bei Abspannmasten mit größeren Spannweiten anzuordnen, da dort die Leiterzugkräfte aufzunehmen und weiterzuleiten sind.

Sollen Stromleiter miteinander verbunden werden, kommen Verbinder zum Einsatz. Diese ermöglichen sowohl eine elektrische als auch eine mechanische Nahtstelle. Aufgrund der Korrosionsgefahr bei Potentialunterschieden sind geeignete Werkstoffpaarungen zu wählen.

Für die Anordnung der Leiterseile in Bündeln werden Feldabstandhalter benötigt, die den geforderten Abstand von 400 mm zwischen den Teilleitern im Feldbereich gewährleisten. Sie dienen der Lagesicherheit und erhöhen den Wellenwiderstand der Leiterseile. Zu unterscheiden sind flexible und starre Feldabstandhalter. Eine flexible Ausführung erzeugt eine gewisse Dämpfung, die zur Verringerung von Seilschwingungen führen kann.

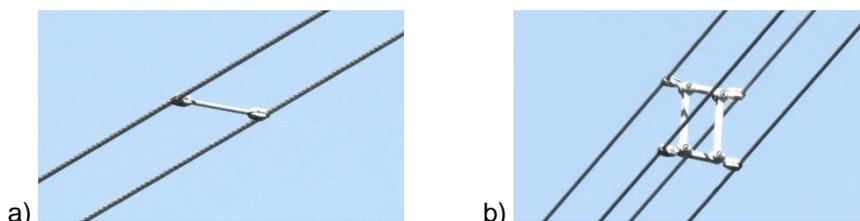


Abbildung 2-15: Feldabstandhalter Zweierbündel, b) Feldabstandhalter Viererbündel  
Figure 2-15: Field spacer double bundle, b) Field spacer Quad bundle

Besser geeignet zur Dämpfung von Seilschwingungen sind jedoch Schwingungsdämpfer, die an die Einzelleiter montiert werden. Sie sollen Schwingungen aus wechselseitigen Beanspruchungen reduzieren, um einen daraus resultierenden Leitungsbruch vermeiden zu können.

### 2.2.3 Mechanische Grundlagen *Mechanical basics*

Die Bemessung von Freileitungsmaste erfolgt seit Januar 2001 nach DIN EN 50341 und entspricht somit dem europäischen Standard. Teil 1 [31] enthält allgemeine Bemessungs- und Konstruktionsanforderungen, Teil 2-4 nationale normative Festlegungen (NNA) mit Zahlenwerten zur Anwendung von Teil 1. Für Deutschland gilt die DIN EN 50341-2-4 [32]. Je nach Dauer der Einwirkung können die Lasten in drei Gruppen wie ständige, veränderliche und außergewöhnliche eingeteilt werden. Diese Einwirkungen werden in Lastfällen (nach DIN EN 50341 Lastfall A bis Lastfall L) kombiniert und im jeweils maßgebenden Lastfall dem Widerstand des Bauteils gegenübergestellt. Die Lastannahmen für Freileitungsmasten aus Stahl werden im Folgenden dargestellt:

- G Eigengewicht der Leiter, Isolatoren und Stützpunkte
- $Q_w$  Windeinwirkung
- $Q_l$  Eiseinwirkung auf Leiter und Isolatoren
- $Q_c$  Leiterzugkräfte unter Temperaturveränderung
- $Q_p$  Einwirkung aus Errichtung und Instandhaltung
- A Sondereinwirkungen

### 2.2.3.1 Lastarten Types of loads

Nach DIN EN 50341-2-4 wird das Eigengewicht des Tragwerks einschließlich der Gründung, der Leiter und der Verbindungsteile als ständige Einwirkung bezeichnet. Ihre Größe hängt von den Kennwerten des verwendeten Materials ab.

Die Wind-, Eis- und andere äußere Lasten sowie Zugkräfte in den Leitern, die durch Wind, Eis oder eine Temperaturänderung gegenüber der Bezugstemperatur hervorgerufen werden, gelten als veränderlichen Einwirkungen. Zu beachten ist, dass Zugkräfte aus einem möglichen Leiterriss an Abspannmasten abgetragen werden können. Auch Sonderlasten werden nur bei Bemessung von Abspannmasten angesetzt. Währenddessen die Tragmaste höchstens für unterschiedliche Zugkräfte von ankommenden und abgehenden Seilen resultierend aus ungleichmäßigen Eisabwurf bemessen werden.

#### Windlasten

Windlasten sind gemäß DIN EN 50341-1 [31] ein Bestandteil der veränderlichen Lasten und unterteilen sich hinsichtlich ihrer Wirkungsrichtung in Windbeanspruchungen senkrecht und parallel zu der Leitungsrichtung, sowie in Windlasten über Eck auf die Masten, die Querträger und die Isolatoren.

Die Bundesrepublik Deutschland gliedert sich nach DIN EN 1991-1-4/NA:2013-04 [26] in vier Windlastzonen, um die für die Bemessung nach DIN EN 50341-2-4 [32] notwendigen Staudrücke zu ermitteln. Diese Staudrücke  $q$  sind neben dem Bezugsstaudruck  $q_0$ , der sich von  $q_0 = 320 \text{ N/m}^2$  für Windlastzone 1 über  $q_0 = 390 \text{ N/m}^2$  für Windlastzone 2 und  $q_0 = 470 \text{ N/m}^2$  für Windlastzone 3 bis zu  $q_0 = 560 \text{ N/m}^2$  für Windlastzone 4 steigert, ebenso von der Höhe  $h$  über dem Gelände abhängig. Diese lassen sich wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} q &= 1,5 \cdot q_0 & [\text{N/m}^2] & \quad \text{für } h \leq 7\text{m} \\ q &= 1,7 \cdot q_0 \cdot (h/10)^{0,37} & [\text{N/m}^2] & \quad \text{für } 7\text{m} < h \leq 50\text{m} \\ q &= 2,1 \cdot q_0 \cdot (h/10)^{0,24} & [\text{N/m}^2] & \quad \text{für } 50\text{m} < h \leq 300\text{m} \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Dieser Staudruck wird benötigt, um die jeweiligen Windlasten auf die einzelnen Komponenten einer Freileitung zu berechnen. Diese Berechnungsverfahren werden im Folgenden genauer erläutert.

Die Windlasten auf **Leiter** werden laut DIN EN 50341-2-4 [32] in der Höhe der jeweiligen Befestigungspunkte unter Verwendung der folgenden Formel berechnet:

$$Q_{wc} = q_p(h) \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot L \cdot \cos^2\vartheta \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit:

$q_p(h)$  : der Staudruck

$G_c$  : der Reaktionsbeiwert für Leiter abhängig von der Spannweite  $L$  und dem dynamischen Verhalten

$C_c$  : der Windwiderstandsbeiwert der Leiter, als Maß für die Windschlüpfrigkeit, gemäß Tabelle 4/DE.1 in

- d : der Durchmesser des Leiterkabels  
 L : die Spannweite; für die Bemessung ist hierfür anzunehmen  

$$L = (L_1 + L_2)/2$$
  
 ϑ : Winkel zwischen der Lotrechten und der Windrichtung auf die Leiter,

Tabelle 2-3: Reaktionsbeiwert  $G_C$  [eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN 50341-2-4, 4.4.1 [32]]  
 Table 2-3: Reaction coefficient  $G_C$  [own representation according to DIN EN 50341-2-4, 4.4.1 [32]]

Spannweite L	Windzone 1 & 2	Windzone 3	Windzone 4
Bis 200m	0,75	0,67	0,6
über 200m	0,45+60/L	0,4+54/L	0,36+48/L

Anschließend wird die berechnete Windlast für ein Feld auf die Leiter je hälftig auf die beiden Befestigungspunkte aufgeteilt.

Die Windlasten auf die **Isolatoren** sind lediglich vom Staudruck  $q$  und der vom Wind angeströmten Isolatorfläche  $A_{ins}$  abhängig und werden nach DIN EN 50341-2-4, 4.4.2 auf folgende Weise berechnet:

$$Q_{W_{ins}} = A_{ins} \cdot 1,2 \cdot q_p(h) \quad \text{Gl. 2-3}$$

Außerdem wirken diese Lasten in Windrichtung und werden von den Isolatoren aus in Kombination mit den Beanspruchungen aus Windlasten auf die Leiter an die Mastkonstruktion weitergegeben.

Die Berechnung der Windlasten auf **Gittermastkonstruktionen** kann entweder auf Annahmen beruhend und damit praxistauglicher über die DIN EN 50341-2-4 [32] oder detaillierter über die DIN EN 1993-3-1 [28] erfolgen.

In der DIN EN 50341-2-4 [32] wird zunächst zwischen Beanspruchungen des Mastschafts und Windlasten auf die Querträger unterschieden. Die durch Wind entstehenden Lasten auf den Mastschaft lassen sich näherungsweise pro Mastschuss durch je zwei resultierende Kräfte bestimmen. In Bezug auf die jeweilige Geländehöhe sowie den zuvor berechneten Staudruck  $q$  ergeben sich folgende Komponenten der vereinfacht im Schwerpunkt des jeweiligen Mastschusses angreifenden Windlast:

$$\begin{aligned} Q_{W_{tx}} &= q_p(h) \cdot (1 + 0,2 \sin^2 2\phi) (A_{t1} C_{xt1} \cos^2 \phi + A_{t2} C_{xt2} \sin^2 \phi) \cos \phi \\ Q_{W_{ty}} &= q_p(h) \cdot (1 + 0,2 \sin^2 2\phi) (A_{t1} C_{xt1} \cos^2 \phi + A_{t2} C_{xt2} \sin^2 \phi) \sin \phi \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-4}$$

mit:

- $q_p(h)$  : der Staudruck  
 $Q_{W_{tx}}$  : Komponente parallel zu der Querträgerachse  
 $Q_{W_{ty}}$  : Komponente orthogonal zu der Querträgerachse  
 $\phi$  : Winkel zwischen der Querträgerachse und der Windrichtung  
 $A_{t1}, A_{t2}$  : die jeweils von Profilen ausgefüllte Fläche der zugehörigen Wand  
 $C_{t1}, C_{t2}$  : Widerstandsbeiwert der zugehörigen Wand in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad dieser; Annahme bei regulären Winkelstabausführungen  
 $C_{ti} = 2,8$

Die Windlasten auf die Querträger sind dazu analog über die Höhe über dem Gelände und den Staudruck  $q$  sowie im Schwerpunkt des Querträgers angreifend über die folgenden Formeln definiert:

$$\begin{aligned} Q_{WtQx} &= 0,4 \cdot q_p(h) \cdot A_{tQ} \cdot C_Q \cdot \cos^2 \phi \\ Q_{WtQy} &= q_p(h) \cdot A_{tQ} \cdot C_Q \cdot \sin^2 \phi \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-5}$$

mit:

- $Q_{WtQx}$ : Komponente parallel zur Querträgerachse
- $Q_{WtQy}$ : Komponente orthogonal zur Querträgerachse
- $\phi$ : Winkel zwischen der Querträgerachse und der Windrichtung
- $A_{tQ}$ : die von Profilen ausgefüllte Fläche der Querträgerwand
- $C_Q$ : Windwiderstandsbeiwert; bei Winkelstäben sowie U-Profilen  
 $C_{xQ} = 2,8$

Unter gesonderten Bedingungen ist eine Veränderung des Staudrucks  $q$  über die Höhe zu beachten und die ungünstigsten Belastungen der jeweiligen Mastelemente zu berücksichtigen.

Die DIN EN 1993-3-1 [28] verweist zur Berechnung der Windlasten auf Gittermasten auf den Anhang B und gilt als Ergänzung zu den Regelungen in der DIN EN 1991-1-4 [25].

Vorab sind Windkraftbeiwerte nach DIN EN 1993-3-1 NA.B.2.1 zu berechnen, sodass sich der Gesamtwindkraftbeiwert aus der Superposition der einzelnen Kräfte ergibt. Die Berechnung dieses höhenabhängigen Gesamtwindkraftbeiwertes  $c_f$  steht in Abhängigkeit der Form des Mastquerschnittes. Für quadratische sowie gleichseitig dreieckige Querschnitte gilt folgende Formel:

$$c_f = c_{f,S} + \sum c_{f,A} \quad \text{Gl. 2-6}$$

mit:

- $c_{f,S}$  Windkraftbeiwert für tragende Bauteile ohne Anbauten bzw. des Schaftes unter Verwendung eines Völligkeitsgrades
- $c_{f,A}$  Windkraftbeiwert für langgestreckte und kompakte Anbauteile, mit Berücksichtigung des Abschattungseffekts des Schafts

Für Tragwerke, die nicht auf jeder Seite die gleiche Bezugsfläche aufweisen also einen rechteckigen oder dreieckigen Grundriss aufweisen oder durch große Anbauteile gekennzeichnet sind, wird zu Windkanaluntersuchungen geraten.

Nachdem die Gesamtwindkraftbeiwerte für die jeweiligen Abschnitte der Gittermasten ermittelt wurden, berechnet man nach DIN EN 1991-1-4 die Windkraft  $F_w$  durch Addition der einzelnen Windkraftresultierenden auf die jeweiligen Bauwerksabschnitte wie folgt:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad \text{Gl. 2-7}$$

mit:

$c_{s,c_d}$  Strukturbeiwert, Berücksichtigung des punktuellen Auftretens von Spitzenwinddrücken sowie dynamischer Erhöhungen aufgrund von Windturbulenzen

$q_p(z_e)$  Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bezugshöhe  $z_e$

$A_{ref}$  Bezugsfläche des Abschnitts

Tabelle 2-4: Böengeschwindigkeitsdrücke  $q_p(z_e)$  [eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4 und NA [25]]

Table 2-4: Gust velocity pressures  $q_p(z_e)$  [own representation according to DIN EN 1991-1-4 and NA [25]]

	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
$q_p$	$2,6 \cdot q_b(z/10)^{0,19}$	$2,1 \cdot q_b(z/10)^{0,24}$	$1,6 \cdot q_b(z/10)^{0,31}$	$1,1 \cdot q_b(z/10)^{0,40}$
$q_b [kN/m^2]$	0,32	0,39	0,47	0,56

Die Ermittlung der resultierenden Windkraft  $F_W$  für die einzelnen Abschnitte des Mastes, wenn dieser aus **Kreiszyklindern** ausgebildet ist, erfolgt analog zu den üblichen Gittermasten. Sie unterscheidet sich hauptsächlich in der Berechnung des Kraftbeiwertes  $c_f$ . Dieser berechnet sich für endliche, kreisrunde Zylinder wie folgt:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad \text{Gl. 2-8}$$

mit:

$c_{f,0}$  Basiskraftbeiwert des Kreiszylinders in Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$  nach DIN EN 1991-1-4, Bild 7.28

$\Psi_\lambda$  Abminderungsfaktor zur Betrachtung der effektiven Schlankheit  $\lambda$  nach DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.16

Vergleicht man die Windlastermittlung der Freileitungsnorm mit der Ermittlung der Druckverteilung in DIN EN 1991-1-4 Kap. 7.9 (siehe Abbildung 2-16), so ist der Ansatz eines Windwiderstandsbeiwertes  $C_{p0}$  nach [32] Tabelle 4/DE.1 eine starke Vereinfachung, da weder die Schlankheit, noch die winkelabhängige Strömungsablösung berücksichtigt wird.

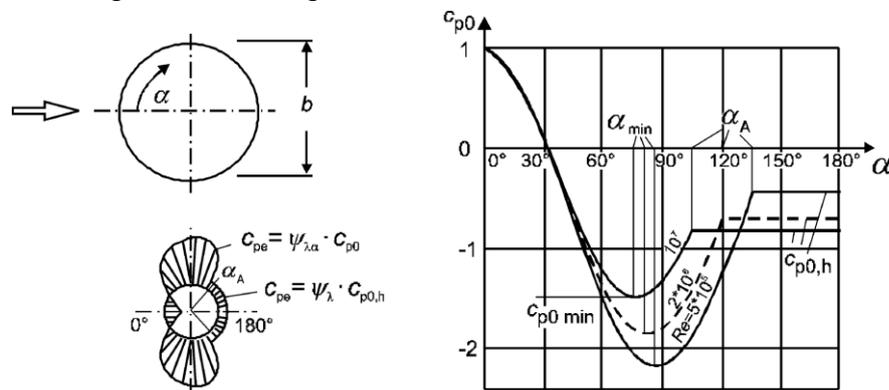


Abbildung 2-16: Druckverteilung über einen zylindrischen Querschnitt nach DIN 1991-1-4 [25]  
Figure 2-16: Pressure distribution over a cylindrical cross-section according to DIN 1991-1-4 [25]

Die Windlasten auf die einstieligen Masten werden nach beiden Normen mit Hilfe der projizierten Fläche ermittelt, d.h. in Abhängigkeit von der Geometrie des Mastes. Diese Fläche  $A_{pol}$  berechnet sich aus dem Produkt des Durchmessers  $b$  und der Länge des jeweiligen Abschnittes  $l$  der zylindrischen Mastkonstruktion.

Die Windlast wirkt nach DIN EN 50341-2-4 in die Angriffsrichtung des Windes und wird wie folgt berechnet.

$$Q_{Wpol} = 1,1 \cdot q \cdot C_{pol} \cdot A_{pol} \quad \text{Gl. 2-9}$$

mit:

- $q$  Staudruck (s.o.)
- $C_{pol}$  Windwiderstandsbeiwert nach [32] Tabelle 4/DE.1
- $A_{pol}$  projizierte Fläche des einstieligen Mastes

### **Eislasten**

Die Bemessungsverfahren für Eislasten beruhen größtenteils auf Erfahrungswerten und dazu ist zunächst eine Definition der unterschiedlich entstehenden Eislasten an Freileitungen notwendig. Für den Mastschaft braucht aufgrund der klimatischen Bedingungen in Deutschland keine Eislast angenommen zu werden. Eine Eisbildung kann aber an allen Leitern und Isolatoren auftreten. Zunächst wird zwischen Eisbildung aus Niederschlägen und in Eisbildung aus Nebel und Wolken differenziert. Die erste Variante, Eisbildung aus Niederschlägen, wird nochmals in drei Unterkategorien eingeteilt. In [13] sind mögliche Arten von Eisablagerungen an Freileitungen zusammengefasst, siehe Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Arten von Eisablagerungen an Freileitungen  
Table 2-5: Types of ice deposits on overhead power lines

Art	Eigenschaften Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Haftung	Gestalt	Entstehung	Temperaturen [°C]
Klareis	700 bis 900	stark	Walzen	gefrierender Regen	-10 bis 0
Nassschnee	200 bis 700	mittel	Fahnen in Windrichtung	Schneefall	0 bis 3
Raureif	200 bis 600	mittel	Walzen	in Nebel und Wolken	-10 bis 0
Raueis	700 bis 900	stark	Fahnen in Windrichtung	in Nebel und Wolken	-10 bis 0

Die erste Unterkategorie, Klareis aus gefrierendem Regen, zeichnet sich durch klare massive Eisbildung mit einer Dichte von 700 kg/m<sup>3</sup> bis 900 kg/m<sup>3</sup> aus und tritt in kalten Luftschichten durch das Abkühlen und anschließende Gefrieren der Regentropfen an den Leitungen auf. Das Volumen des Eisansatzes hängt in diesen eher windstillen Wetterlagen daher vorrangig von der Dauer und Intensität des Niederschlags ab und weniger von der Windstärke.

Die zweite Art der Eisbildung aus Niederschlag, der Nassschneeansatz, entsteht beim Schmelzen der Schneeflocken in warmen Luftschichten und dem darauffolgenden Festfrieren dieser an den kühlen Freileitungen. Die Dichte des Nassschneeansatzes streut zwischen 200 kg/m<sup>3</sup> und 700 kg/m<sup>3</sup>. Dadurch weist das Eis ein eher loses

Erscheinungsbild auf, das sich jedoch beim Abfall der Umgebungstemperatur unter den Gefrierpunkt zu massiv und stark haftend entwickeln kann.

Der Trockenschneeansatz unterscheidet sich zu den anderen Unterkategorien dadurch, dass sich der Schnee lediglich auf der Freileitung absetzt und diese gegebenenfalls durch Windeinwirkungen umschließt jedoch nicht daran haftet und somit nach kurzer Zeit wieder herunterfällt. Bei der Ummantelung der Leitung erfährt diese ein Torsionsmoment. In der praktischen Bemessung lässt sich der Trockenschneeansatz insgesamt wegen der sehr niedrigen Dichte sowie der geringen Haftung vernachlässigen.

Die Eisbildung aus Nebel und Wolken, auch weicher Raufrost genannt, setzt eine gewisse Menge an Wasser in der Luft voraus, die dann direkt an den Leiterkabeln gefriert. Die Dichte des ansetzenden Eises beträgt  $200 \text{ kg/m}^3$  bis  $600 \text{ kg/m}^3$  und die dadurch entstehenden Belastungen sind von der jeweiligen Temperatur und Windstärke abhängig.

Schlussendlich sind Art und Umfang der Eisbildung an Freileitungen von den herrschenden Wetterverhältnissen, aber ebenso von der Umgebungstopologie abhängig.

Für die Bestimmung der anzusetzenden Eislast an den Leitern der Freileitungen wird Deutschland, ähnlich der Windlast, in Zonen von eins bis vier eingeteilt. Die Einstufung des Baugebiets ist dabei nicht unbedingt starr anhand der Übersichtskarte vorzunehmen, sondern kann aufgrund von Betriebserfahrungen oder Kreis- oder Gemeindegrenzen durchaus abweichen. Die Eislast ist vom Durchmesser des verwendeten Leiters bzw. Teilleiters abhängig.

Die Berechnung der Eislasten erfolgt über eine der folgenden Formeln.

$$\text{Eislastzone E1: } g_1 = 5 + 0,1 \cdot d \text{ [N/m]}$$

$$\text{Eislastzone E2: } g_1 = 10 + 0,2 \cdot d \text{ [N/m]}$$

$$\text{Eislastzone E3: } g_1 = 15 + 0,3 \cdot d \text{ [N/m]}$$

$$\text{Eislastzone E4: } g_{I,min}^* = 20 + 0,4 \cdot d \text{ [N/m]}$$

Gl. 2-10

\* durch ein Gutachten festzulegen

mit:

d: Leiter- oder Teilleiterdurchmesser in mm.

Die vier Eislastzonen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer geographischen Gegebenheiten und klimatischen Bedingungen sowie durch die Erfahrungen, die in den jeweiligen Regionen über viele Jahre gesammelt wurden. Eislastzone E1 charakterisiert sich durch geringe Eislasten, sodass die Freileitungen schadensfrei bleiben. Diese treten in Deutschland besonders in Gebieten unter 400 Meter über dem Meeresspiegel auf. Eislastzone E2 steigert sich zu hohen Eislasten, die gegebenenfalls Schäden verursachen können und umfasst hauptsächlich Areale mit einer Geländehöhe zwischen 400 und 600 Meter. Eislastzone E3 kennzeichnet sich durch häufig entstehende, hohe Eislasten und damit einhergehenden Schäden an den Freileitungen. In der Eislastzone E4 treten überdurchschnittlich große Eislasten auf, sodass diese individuell durch ein Gutachten oder den Netzbetreiber, begründet auf seiner langjährigen Erfahrung, zu bewerten sind. In der folgenden Abbildung sind die

Eislastzonen E3 und E4 zusammengefasst, jedoch gehören die Gebiete mit einer Höhe von über 750 Meter über NN typischerweise zur Eislastzone E4 und die weiteren Bereiche zur Eislastzone E3. Im Südwesten Deutschlands wurden die Abgrenzungen in der Geländehöhe zwischen den einzelnen Eislastzonen nach oben hin optimiert, aufgrund der dort vorzufindenden positiven Erfahrungswerte. Diese Erkenntnisse sind bereits in die Eislastzonenkarte mit eingearbeitet.

Die Eislast für Isolatorketten ist lediglich von der Länge der Kette abhängig, d.h. unabhängig vom Durchmesser und damit der Art der verwendeten Isolatorkette. Aufgrund der geringen Eislast, die sich auf dem Mast bilden könnte, darf diese ebenso vernachlässigt werden.

### **Gleichzeitige Wind- und Eislast**

In den kälteren Monaten treten Wind- und Eislasten häufig zusammen an Freileitungen auf, sodass diese ebenso für eine Belastung unter beiden Lasten ausgelegt werden müssen. In dem Verfahren nach der DIN EN 50341-1 [31] wird ausschließlich das zeitgleiche Wirken von Eis- und Windlasten auf die Leiter berücksichtigt, jedoch können die Eis- und Windlasten auf weitere Bauteile in Anlehnung an dieses Verfahren berechnet werden.

Für ausgewählte Lastfälle (siehe 2.2.3.2), muss die Kombination aus Wind und Eislasten betrachtet werden. Hier ergibt sich durch die Eislast auf dem Leiter eine größere Windangriffsfläche und somit höhere Beanspruchungen infolge Windangriff.

Nach 4.6.4 DE.1 der DIN EN 50341-2-4, wird zur Ermittlung der Last ein modifizierter Leiterdurchmesser bestimmt:

$$D_I = \sqrt{d^2 + 0,00017g_I} \quad \text{Gl. 2-11}$$

mit:

$d$  Leiterdurchmesser

$g_I$  längenbezogene Eislast an Leiter (N/m)

Die Größe der Lasten ist maßgeblich abhängig von der Eisschichtmasse, ihrer Form sowie der momentanen Windgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Eisansatzes. Zur vereinfachten Berechnung wurden nach [31] die unterschiedlichen Lastfälle zu zwei Hauptkombinationen zusammengefasst. Man betrachtet einerseits die extreme Eislast  $I = Q_{IK} \cdot \gamma_I$  kombiniert mit einer um den Faktor  $\Psi_W = 0,4$  abgeminderten Windlast  $\Psi_W \cdot Q_{WK}$  und andererseits die hohe Windlast verbunden mit einer um den Faktor  $\Psi_I = 0,35$  verringerten Eiseinwirkung. Der EC 3-3-1 geht ebenso von diesen zwei Lastkombinationen aus, jedoch mit den Kombinationsbeiwerten  $\Psi_W = \Psi_I = 0,5$ . Nach dem nationalen Anhang des EC 3-3-1 muss jedoch lediglich die Kombination mit Eis als Haupteinwirkung und Wind als Nebeneinwirkung berücksichtigt werden, dabei wird die Windlast um den Faktor  $\Psi_O = 0,6$  verkleinert.

Die Windlasten auf die Stützpunkte in Kombination mit einem Eisansatz an den Leitern werden nach der DIN EN 50341-1 [31] wie folgt berechnet:

$$Q_{Wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_{cl} \cdot D_I \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot \cos^2 \phi \quad \text{Gl. 2-12}$$

mit:

$q_h$  Staudruck:  $q_h = \frac{1}{2} \rho \cdot v_{Ih}^2$

mit:  $v_{Ih}$  Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe über dem Grund  $h$

$\rho$  Relative Luftdichte in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel und der Temperatur (siehe 4.2.2.2 in [31])

$G_q$  Böenfaktor (siehe 4.2.2.3 in [31])

$G_c$  Spannweitenbeiwert (siehe 4.2.2.4.1 in [31])

$C_{cl}$  Windwiderstandsbeiwert für Leiter mit Eisansatz (siehe 4.2.4.2 in [31])

$D_I$  Ersatzdurchmesser des mit Eis besetzten Leiters

$L_1, L_2$  Spannweite der danebenliegenden Felder

$\phi$  Einwirkungswinkel für Wind aus der kritischen Richtung

Nach DIN EN 50341-2-4 [32] kann dieses Verfahren vereinfacht werden, indem der Staudruck  $q_h$  mit dem Faktor 0,5 abgemindert, die Dichte des Eises konstant mit  $\rho_I = 7.500 \text{ N/m}^3$  und der Widerstandsbeiwert für den Wind mit  $C_{cl} = 1,0$  angenommen werden.

### **Sonderlasten**

Begehbare Stäbe, d.h. die eine Neigung von weniger als  $30^\circ$  aufweisen, müssen mit einer Montagelast von 1,0 kN in Feldmitte versehen werden. Außerdem müssen lotrecht wirkende Montagelasten auf die Querträger von mindestens 1,0 kN jeweils an der statisch ungünstigsten Stelle aufgebracht werden.

In Deutschland können bei der Bemessung von Freileitungsmasten, unabhängig von ihrer Art (Gittermast oder einstieliger Mast), Kurzschlusslasten und Schwingungen, die aus Winderregungen stammen, vernachlässigt werden. In Feldern zwischen Schaltanlagen und Freileitungen, also den Endfeldern einer Trasse, kann allerdings die Kurzschlussbeanspruchung maßgebend für die Bemessung werden, sodass hier eine gesonderte Betrachtung notwendig wird.

Die Normung gibt abschließend Sonderlasten an, zu denen auch Nutzungserweiterungen bzw. –änderungen zählen.

Erweitert man einen bestehenden Freileitungsmast, ohne, dass diese weitere Nutzung bereits in der ursprünglichen Statik berücksichtigt wurde, so muss die Tragfähigkeit aller betroffenen Mastbereiche erneut nachgewiesen werden. Daher empfiehlt es sich, gleich bei der Planung einer neuen Trasse eventuelle Erweiterungen zu untersuchen und in die Bemessung mit einfließen zu lassen.

### **2.2.3.2 Lastfälle**

#### **Load cases**

Zur Bemessung von Freileitungsmasten werden von der DIN EN 50341 zwölf Standardfälle angegeben. Die oben beschriebenen Lastarten werden in den Lastfällen (A bis J) zusammengeführt. Damit werden alle möglichen Grenzzustände des Tragwerks betrachtet und, um den Grundsatz der Abwehr von Gefahr von Leib und

Leben zu wahren, wird für jedes Bauteil des Freileitungsmastes jeweils der ungünstigste Lastfall als maßgebend angesetzt.

In den ersten sieben Lastfällen (A bis G) werden neben den ständigen Einwirkungen unter anderem meteorologisch bedingte Belastungen berücksichtigt. Dabei werden in den Lastfällen A bis C die ständig auftretenden Lasten mit den Windeinwirkungen in drei Hauptrichtungen und den zugehörigen horizontalen Leiterzugkräften bei einer Temperatur von 5°C kombiniert. In den Lastfällen D bis F werden wie zuvor die Windeinwirkung in drei Hauptrichtungen aber mit gleichzeitigem Eisansatz und im Lastfall G die Einwirkung für Maste mit Hochzügen behandelt. Im Lastfall H werden die Festpunktbelastungen von Abspann- und Winkelabspannmasten berücksichtigt, während die Montagelasten im Lastfall I thematisiert werden. Die Ausnahmebelastungen infolge ungleichförmigem Eisansatz oder Eisabwurf sind in den Lastfällen J bis L definiert.

Zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und des Zusammenspiels der Lastarten werden diese mithilfe von Teilsicherheitsbeiwerten nach [32] zu ermittelnden Lastfälle zusammengeführt.

Tabelle 2-6: Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 50341-2-4 [32]  
Table 2-6: Partial safety factors according to DIN EN 50341-2-4 [32]

Lastfälle A bis I bei ungünstiger Wirkung	Lastfälle A bis F bei günstiger Wirkung	Lastfälle J bis L (Ausnahmelastfälle)	Montagelasten im Lastfall I
$\gamma_G = \gamma_W = \gamma_I = \gamma_C$ = 1,35	$\gamma_G = \gamma_I = 1,0$	$\gamma_G = \gamma_W = \gamma_I = \gamma_C$ = 1,0	$\gamma_P = 1,5$

Die Gesamtbelastung des Bauteils berechnet sich schlussendlich mit der folgenden Funktion aus den einzelnen Lasten.

$$E_d = f\{\gamma_G G_K; \gamma_W Q_{WK}; \gamma_I Q_{IK}; \gamma_P Q_{PK}; \gamma_C Q_{CK}\} \quad \text{Gl. 2-13}$$

mit:

$G_K$  Eigengewicht der Leiter, Isolatoren und Stützpunkte

$Q_{WK}$  Belastung aus Windeinwirkungen

$Q_{IK}$  Belastung aus Eiseinwirkungen auf die Leiter

$Q_{PK}$  Belastung aus der Montage

$Q_{CK}$  Horizontalzugkräfte der Leiter unter Beachtung der Temperaturänderung sowie der Wind- und Eislasten

$\gamma$  Teilsicherheitsbeiwerte inklusive der Kombinationsbeiwerte  $\Psi$  in Abhängigkeit von dem verwendeten Lastfall

Zur Bemessung benötigt man neben dem Bemessungswert für die Belastung noch den Bemessungswert der Werkstofffestigkeit, der sich aus dem Quotient des charakteristischen Wertes und dem Materialbeiwert  $\gamma_M$  nach 3.6.3 errechnet.

Die Bemessung einer Freileitungsmastkonstruktion unter der Berücksichtigung der Beanspruchungen aus den Stromseilen und die Überlagerung verschiedenster Seilkonfigurationen und Ausfallszenarien ist im Vergleich zu üblichen Stahlkonstruktionen des allgemeinen Hochbaus auch in Hinblick auf die Anzahl der

Lastkombinationen immens anspruchsvoller. Beispielhaft wird ein typischer Tragmast in Donauanordnung durch ca. 160 Lastkombinationen, die auch unterschiedliche Belegungssituation des Mastes berücksichtigen, beansprucht.

## **2.3 Rechtliche Grundlagen / Voraussetzungen** ***Legal foundations/ requirements***

Im Rahmen der Bundesfachplanung werden die Trassenkorridore, die zwischen 50 und 1000m Breite liegen, bestimmt. Bei der Planung des Trassenkorridors müssen verschiedenen Aspekte berücksichtigt werden:

1. Die Belange der Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit
2. Der Naturschutz
3. Das Landschaftsbild
4. Technische und wirtschaftliche Aspekte

1. Für die Belange der Menschen ist zu berücksichtigen, dass die Erscheinung der Freileitungsmasten möglichst zurückhaltend ist.

Da die menschliche Gesundheit durch magnetische und elektrische Felder gefährdet ist und dadurch ein erhöhtes Krebsrisiko besteht, muss ein Abstand von mind. 80 m, besser 100 m gewährleistet sein.

2. Bei dem Naturschutz ist der Schutz der Tiere, vor allem der Vogelschutz zu berücksichtigen, da diese besonders gefährdet sind, aber auch der Schutz der Pflanzen und der Schutz der biologischen Vielfalt.

3. Der Landschaftsschutz bestimmt, dass keine Freileitungsmasten in

- Hoch- und Niedermooren
- Sümpfen
- rezenten Auen
- an Gewässerufern und
- Trockenrasen

aufgestellt werden dürfen.

4. Technische und wirtschaftliche Aspekte beziehen sich auf eine einfache Konstruktion, die den technischen Anforderungen an einen Freileitungsmast entsprechen und deren Produktion und Errichtung möglichst wirtschaftlich sind.

### ***Vogelschutz:***

Besonders Vögel sind durch Freileitungsmasten gefährdet, zum einen durch Elektrokution, d.h. sie werden durch Stromschlag getötet. Das betrifft vor allem Vögel, die auf Leitungen rasten und nisten.

Zum anderen sind fliegende Vögel durch Kollision mit den Leitungsdrähten gefährdet. Vor allem dort, wo die Flugrouten der Zugvögel entlangführen, wie durch Flusstäler

oder Täler zwischen Bergrücken und Meerengen. Vögel sind besonders auch dann gefährdet, wenn Freileitungsmasten auf dem Weg der Vögel zu ihren Rast- und Überwinterungsgebieten und zu Feuchtgebieten stehen.

Da die Masten von Hochspannungsleitungen meistens eine Höhe von 50 m aufweisen und der Vogelflug in einer Höhe von 20 – 50 m stattfindet, sind die Vögel einer hohen Kollisionsgefahr ausgesetzt.

### 2.3.1 Elektrokution *Electrocution*

Die Leitungen sind gegen Stromschlag zu sichern.

Bei langen Isolatoren ist die Gefahr eines Stromschlages gering.



Abbildung 2-17: Storchennest auf Mittelspannungsmast [11]  
Figure 2-17: Stork's nest on medium voltage mast [11]

Die Leiterseile sind unterhalb der Traversen vorzusehen.

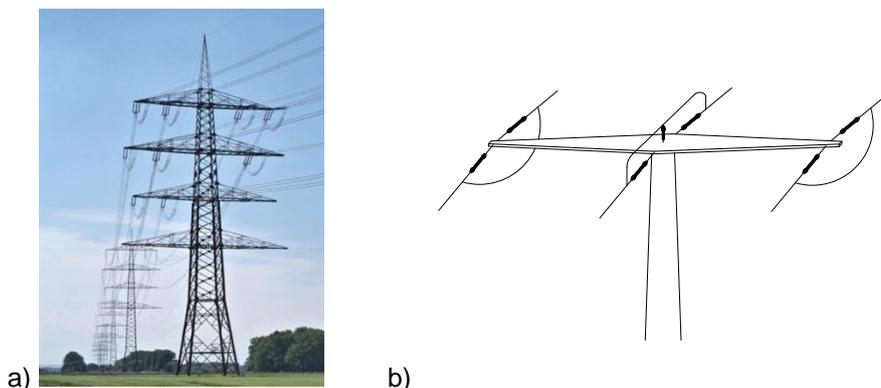


Abbildung 2-18: a) Freileitung Ried 2 [15], b) Leiterseile unterhalb der Traverse  
Figure 2-18: a) Overhead line tower Ried 2 [15] b) Ladder ropes below the crossbar

Es sind Sitzstangen für die Vögel oberhalb der Leitungen, an den Traversen anzuordnen.

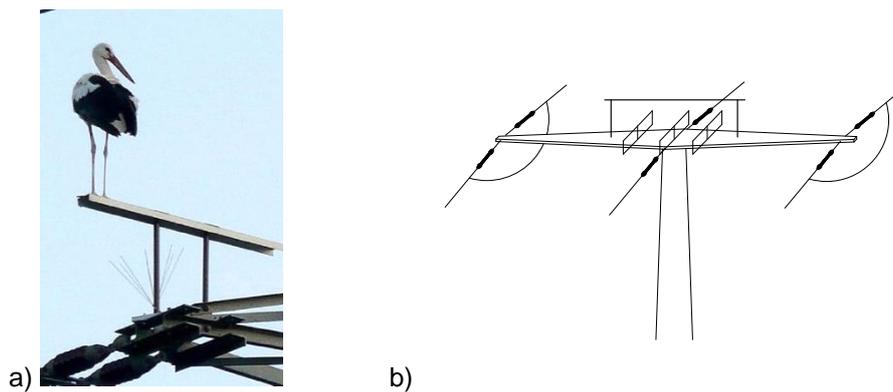


Abbildung 2-19: a) Storch auf Sitzstange [4]; b) Sitzstange oberhalb der Leitungen  
Figure 2-19: a) Stork on perch [4]; b) perch above the pipes

### 2.3.2 Kollision *Collision*

Kollisionen können reduziert werden, in dem man

- eine Einebenen-Anordnung vornimmt und auf den Nulleiter verzichtet.
- linienartige Infrastrukturen bündelt und Freileitungsmasten entlang von Straßen und Bahntrassen aufstellt.
- Freileitungsmasten entlang von hohen Straßen und Eisenbahnbrücken, sowie Bergflanken errichtet.
- gut sichtbare schwarz-weiße, bunte oder leuchtenden, blinkenden Markierungen an den Leitungen angeordnet.

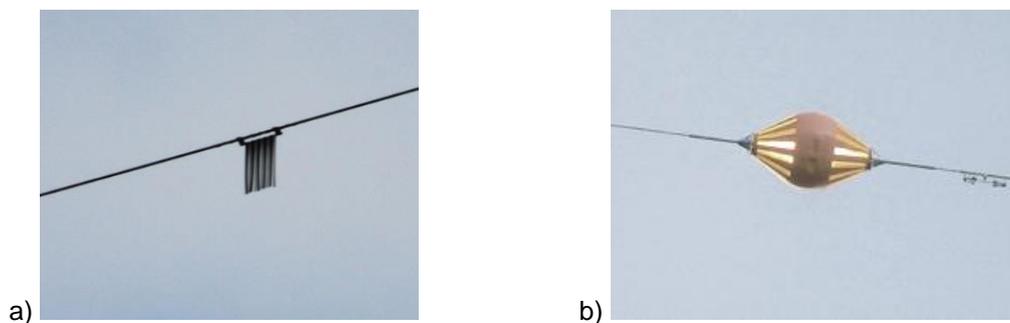


Abbildung 2-20: a) Vogelmarker an Erdseil der Freileitung [7], b) Powerlinemarker [18]  
Figure 2-20: a) Bird marker on the ground wire of the overhead line [7], b) Powerlinemarker [18]

- Die Flugwege untersucht und so eine risikoarme und vogelsichere Trassenführung gewährleistet.

### 2.3.3 Vergleich Erdkabel - Freileitung *Compare underground cable with overhead line*

Eine Möglichkeit, die Vögel zu schützen, wäre Erdkabel zu verlegen. Diese sind aber in der Regel vier- bis siebenmal teurer als Freileitungen. Da es kaum Erfahrungswerte für den Naturschutz mit Erdkabeln gibt, sind die Folgen noch nicht absehbar.

Erdkabel benötigen ebenfalls breite, immer freizuhaltenen Schneisen. Zwar ist die elektrische Spannung sehr gering, aber die magnetische Spannung genauso hoch wie bei den Freileitungen.

Erdkabel bringen daher keine Verbesserung bei der Strahlenbelastung.



Abbildung 2-21: Erdkabel [2]  
Figure 2-21: Underground cables [2]

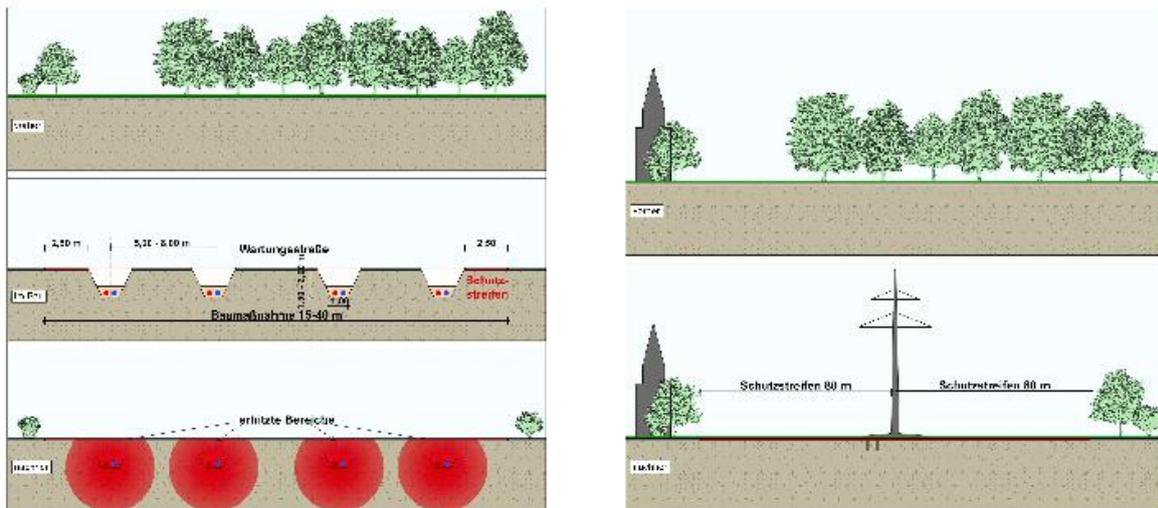


Abbildung 2-22: Vergleich Erdkabel - Freileitung [in Anlehnung an [8]]  
Figure 2-22: Comparison underground cables - overhead line [based on [8]]

Tabelle 2-7: Tabelle Vergleich Erdkabel / Freileitung [in Anlehnung an [6]]  
Table 2-7: Table Comparison underground cables / overhead line [based on [6]]

	Erdkabel	Freileitung
Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beeinträchtigung der Bodenfunktion</li> <li>Erwärmung + Austrocknung je nach thermischer Bettung</li> <li>- Veränderung der Bodenstruktur durch Verdichtung und Versiegelung in Trassenbreite.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Punktuelle Veränderung der Bodenstruktur durch Verdichtung und Versiegelung</li> </ul>
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundwasserabsenkung im Baubetrieb</li> <li>- Erwärmung des (Grund-) Wassers im Trassenbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lokale Auswirkung auf Grundwasser</li> </ul>
Luft und Klima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abgas- und Staubemission in der Bauphase.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ionisierung der Luftmoleküle = gesundheitsschädlich</li> <li>- Abgas- und Staubemission im Bauphase</li> </ul>
Landschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vor allem in Wäldern, Schneise von 12 - 25 m</li> <li>- Trasse muss freigehalten werden</li> <li>- Nebenbauwerke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Objekte in der Landschaft</li> <li>- Schneise entlang der Trasse</li> </ul>
Fauna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lebensraumveränderung durch Schneise/Trasse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vogelschutz</li> </ul>
Flora	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kälteliebende Pflanzenarten auf Trasse nicht mehr möglich</li> <li>- Generelle Standortveränderung (Wärme, Freihaltung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standortverlust im Wald</li> </ul>
Wirtschaftliche Betrachtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4-7 (im Einzelfall auch mehr) mal so teuer wie Freileitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> </ul>
Technische Betrachtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Erfahrungswerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> </ul>

### 3 Gittermastoptimierung Optimisation of lattice towers

#### Kurzfassung

Zur Untersuchung eventuell vorhandenen Tragfähigkeitspotenziale wird eine Gittermastkonstruktion eines Referenzmastes hinzugezogen. Dieser wird unter verschiedenen Ansätzen optimiert. Zielsetzung ist es jedoch nicht, lediglich die Gesamttonnage des Stahls zu verringern, sondern diese mit den Faktoren Montageaufwand, Kosten und baubetriebliche Umsetzung in Verbindung zu setzen und anschließend die wirtschaftlichste Lösung herauszufiltern. Im Weiteren werden die untersuchten Varianten mit den erkennbaren Optimierungspotenzialen dargestellt.

#### Abstract

A lattice mast construction of a reference mast is used to investigate any existing load-bearing capacity potentials. This is optimized under different approaches. The objective is not only to reduce the total tonnage of the steel, but also to relate this to the factors of assembly effort, expense and constructional implementation and subsequently to filter out the most economical solution. In the following, enquired variants with the recognizable optimization potentials are presented.

#### 3.1 Referenzmast Reference mast

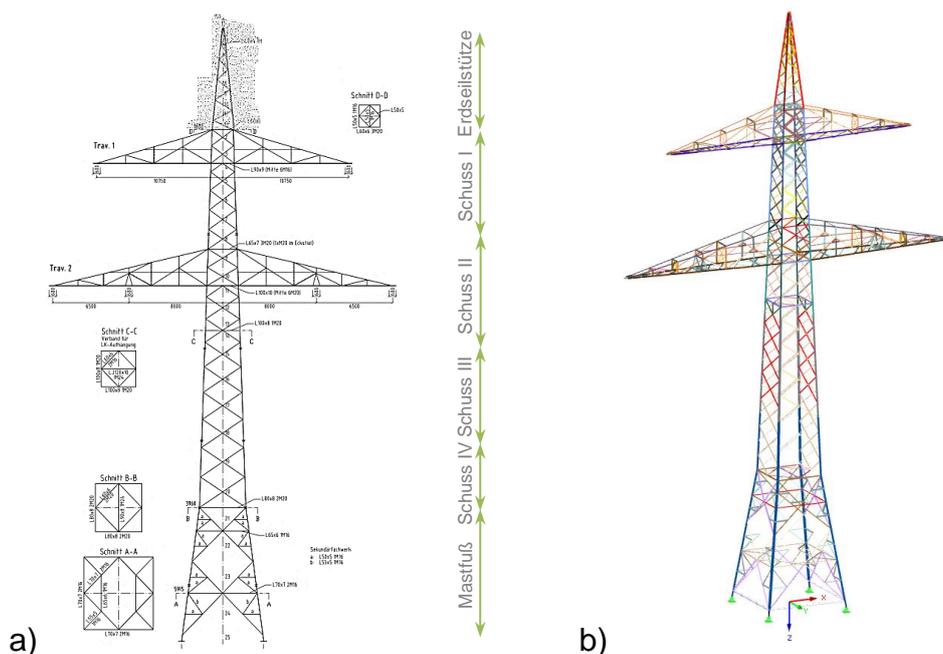


Abbildung 3-1: Referenzmast a) Zeichnung; b) FE-Modell [35]  
Figure 3-1: Reference mast a) drawing; b) FE-Model [35]

Der betrachtete Referenzmast ist ein modellierter Tragmast einer Mastfamilie für Leitungen mit einer Spannung von 380 kV. Dieser Mast, der sich in Wind- und Eislastzone 2 befindetet, wird als Donaumast mit einer Gesamthöhe von 49,75 m und einer Spannweite der unteren Querträger von maximal 29,60 m konzipiert. Durch die beiden unterschiedlich langen Traversen ist das Führen von bis zu zwei Drehstromkreisen und einem Erdseil auf der Mastspitze möglich. Die 380 kV-Leitungen werden mit Viererbündeln belegt, die mittels V-Ketten an der Maststruktur befestigt sind. Der Mastschaft setzt sich aus sechs Schüssen und einer einfachen Erdseilstütze zusammen. Die einzelnen Schüsse bilden einerseits sinnvolle Abschnitte für die statischen Berechnungen und bringen andererseits Vorteile in der Montage mit sich. Ihre Eckstiele bestehen jeweils aus demselben durchgehenden Winkelprofil. Zur optimierten Fertigung werden die Schüsse einzeln vorgefertigt und am Errichtungsort zusammengefügt. Der Grundriss eines Mastschaftes ist in jeder Höhe quadratisch, jedoch nimmt die Seitenlänge mit zunehmender Höhe von 7,0 m auf 1,8 m ab. Dieses konische Verhalten ist bei den untersten Schüssen, fünf und sechs, besonders stark ausgeprägt, sodass sich hier eine Gruppierung zwischen diesen beiden Schüssen und den Schüssen eins bis vier vornehmen lässt. Diese Unterteilung wird zusätzlich durch das Erscheinungsbild der Front- und Seitenwände verstärkt. Während in den oberen Schüssen versatzweise Kreuzverbände mit Ausnahme der Anschlussbereiche zu den Querträgern vorzufinden sind, so sind die Wandflächen der unteren Schüsse auf allen vier Seiten identisch und ebenso im Kreuzverband jedoch mit zusätzlichen Verstärkungen gefügt.

Durch die 38 verschiedenen Profile, in Abbildung 3-1 bunt dargestellt, wurden bei diesem Referenzmast somit 19,5 t Stahl der Güte S355J2 verbaut. Die Anzahl aller Stäbe beläuft sich auf 671 Stäbe, die an insgesamt 290 Knoten gefügt werden.

Dieser Freileitungsmast besitzt typisch symmetrisch angeordnete Traversen gleicher Länge auf beiden Seiten. Das Eigengewicht der Traversen führt, der Funktionsweise des Fachwerks folgend, zu einer Zugbeanspruchung im geneigten Obergurt und zu einer Druckbeanspruchung im horizontal ausgerichteten Untergurt. Die Pfosten in der vertikalen Ausfachung werden ebenfalls auf Druck belastet. Die Beanspruchungsart der Diagonalen in dieser Ausfachung hängt von deren Ausrichtung ab. Die Kräfte im Ober- und Untergurt summieren sich in Richtung des Anschlusspunktes am Mastschaft auf. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass mit zunehmender Länge der Traversen die maximal einwirkenden Kräfte auf Ober- und Untergurt steigen. Durch die Neigung des Obergurtes müssen am Anschlusspunkt der Traverse an den Mastschaft infolge Eigengewicht sowohl horizontale als auch vertikale Kräfte aufgenommen werden, am Anschlusspunkt des Untergurtes dagegen nur horizontale Kräfte. Die Ausfachung in den horizontalen Wänden erfüllt beim Lastabtrag des Eigengewichts keine Funktion, ihre Notwendigkeit wird erst durch die anderen Belastungsarten deutlich.

Die vertikalen Kräfte aus den Traversen können durch die Eckstiele und die am Anschlusspunkt angeschlossenen Diagonalen des Mastschaftes aufgenommen werden. Horizontale Kräfte können zum einen über die Diagonalen und zum anderen über horizontal ausgerichtete Profile aufgenommen werden. Der Mastschaft, an den die Traversen angeschlossen sind, muss also die Lasten aus den Traversen sowie sein

Eigengewicht abtragen. Da die Traversen symmetrisch sind, entsteht auch kein Moment aus einer ungleichen Belastung.

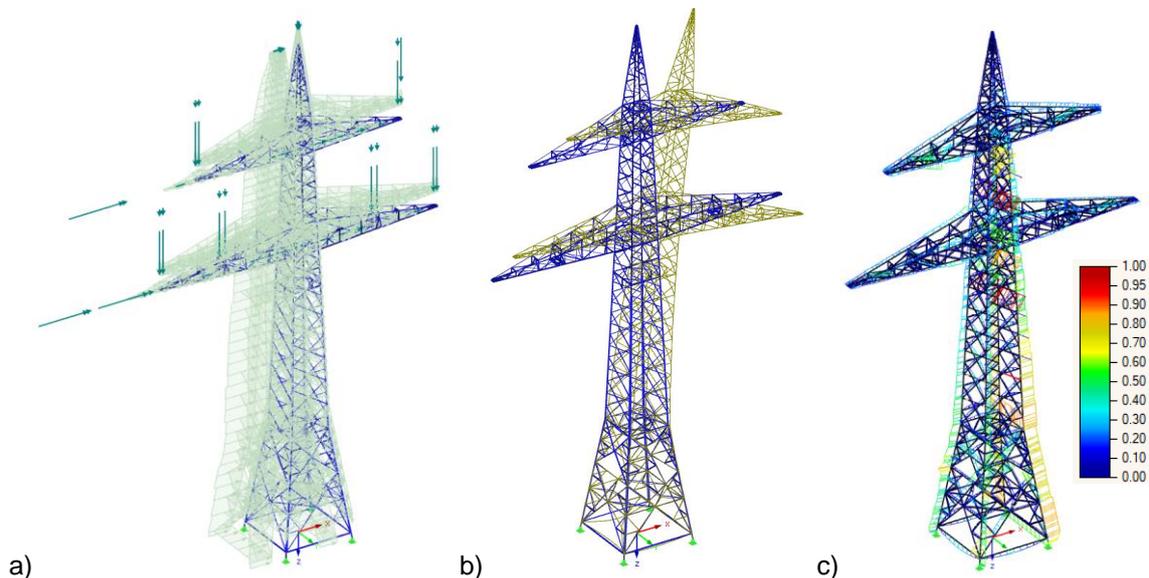
Der Mastschaft kann zur Ermittlung der Lasten und Verformungen ersatzweise wie eine eingespannte Stütze behandelt werden. Bei diesem Donaumast entstehen, wie bereits erläutert, die größeren Lasten aus den Traversen erst an der unteren Traverse. An der oberen Traverse müssen weniger Kräfte übertragen werden. Dementsprechend ist erst im Bereich der unteren Traverse eine wesentliche Erhöhung der abzutragenden Druckkräfte festzustellen.

Die Windeinwirkung auf die Leiterseile hat je nach Windrichtung eine Belastung parallel zu den Traversen oder rechtwinklig zu den Traversen zu Folge. Die Belastung rechtwinklig zu den Traversen kann aber vernachlässigt werden. Die Belastung parallel zu den Traversen ist von allen Mastarten aufzunehmen. Weht der Wind über Eck, also nicht in einem 90°-Winkel auf die Leiterseile, ist die Komponente des Windes, die parallel zu den Traversen läuft, zu berücksichtigen. Da der Wind immer auf alle Leiterseile gleichzeitig weht, sind auch alle Anschlusspunkte in gleichem Maße betroffen. Eine Windeinwirkung parallel zu den Traversenachsen wirkt daher auf den Mastschaft wie eine zusätzliche horizontale Einzellast in Höhe der jeweiligen Traverse. Da der Staudruck auf die Leiterseile mit zunehmender Höhe ansteigt, steigt auch die aufzunehmende Belastung mit der Höhe an. Der Donaumast besitzt bei der Windbelastung auf die Leiterseile demnach Vorteile gegenüber dem Tonnen- oder Tannenbaummast. Zwei der drei Leiterseile je Seite befinden sich auf der untersten Traverse, auf der die Windeinwirkung noch geringer ist als auf den oberen Traversen.

Bei der Windeinwirkung auf die Traversen ist neben der Lage der Traversen die Richtung des Windes entscheidend für die Höhe der Belastung. Weht der Wind parallel zu den Traversen, kann die direkte Windeinwirkung auf die Traversen fast vernachlässigt werden. Dem Wind bietet sich aufgrund der geringen Anzahl an in dieser Richtung ausgerichteter Profile zu wenig Angriffsfläche, als dass er relevant werden könnte. Der Wind parallel zur Traversenrichtung staut sich erst an der Wand des Mastschaftes, an die die Traverse angeschlossen ist. Weht der Wind jedoch rechtwinklig zur Traversenachse, ist wie bereits erläutert, keine Belastung aus Wind durch die Leiterseile zu erwarten, die Traversen selbst stehen aber unter voller Windbelastung.

Trifft der Wind rechtwinklig zur Traversenachse auf den Mastschaft, verstärkt er die Windbelastung, die auch schon auf die Traversen wirken. Zu beachten ist, dass der Staudruck mit der Höhe zunimmt. Nimmt man den Mastschaft als eine eingespannte Stütze an, so ist der Momentverlauf von der Spitze bis zum Boden zunehmend. Trifft der Wind auf die Wand des Mastschafts parallel zur Traversenachse, verstärkt er demnach die Windbelastung aus den Leiterseilen. Die alleinige Einwirkung auf die Mastwand bringt etwa den gleichen Momentenverlauf wie die Einwirkung auf die andere Mastwand hervor, nur um eine andere Achse. Hinzu kommen die wie Einzellasten wirkenden Kräfte aus der Traverse, hervorgerufen durch die Windbelastung auf die Leiterseile. Der Mast konnte somit in der Höhe deutlich „leichter“ konstruiert werden.

Eine Tragfähigkeitsberechnung der Stäbe des Referenzmastes mit einem Statikprogramm ergab, dass die Ausnutzung der Profile sehr unterschiedlich ausfällt. In Abbildung 3-2 ist das FE-System dieses Mastes dargestellt.



a) b) c)  
Abbildung 3-2: FE-Modell des Referenzmastes a) Belastung LF A; b) Verformung infolge LF A; c) Ausnutzung, mittels [35]

Figure 3-2: FE-Model of the reference mast a) strain LF A; b) deformation as a result of LF A; c) utilisation per [35]

Unter Vernachlässigung der Stabilitätsprobleme ergibt sich lediglich eine Belastung von unter 40% der Maximalbelastung. Die Nachweise zu den üblichen Stabilitätsproblemen lassen die Profile dann jedoch wirtschaftliche Ausnutzungsgrade erreichen. In dem folgenden Diagramm ist die Ausnutzung der einzelnen Positionen in Prozent als jeweiliger Mittelwert für die gesamte Gitterkonstruktion, nicht nach Schüssen eingeteilt, dargestellt.

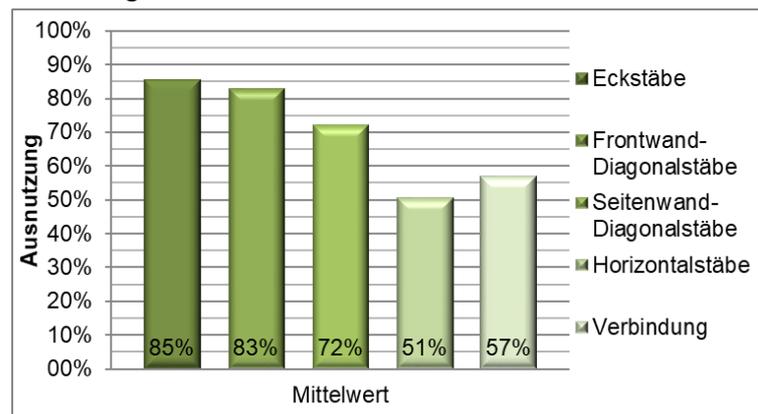


Abbildung 3-3: Ausnutzung des Referenzmastes  
Figure 3-3: Utilization of the reference mast

Auch innerhalb der einzelnen Schüsse weisen die Stäbe sehr unterschiedliche Ausnutzungsgrade auf, sodass im Sinne einer Optimierung für jedes Modul iterativ das passende Profil bestimmt werden müsste. Dies erscheint zwar statisch gesehen sinnvoll, ist jedoch baubetrieblich schwierig umzusetzen. Aus diesem Grund wird weiterhin an der Unterteilung nach den Mastschüssen und der Grundstruktur des Gittermastes festgehalten. Da die horizontalen Ausfachungen zwar nur zur Hälfte

ausgenutzt sind, aber nur einen geringen Anteil an der Gesamttonnage einnehmen und somit keinen wesentlichen Beitrag zur Optimierung leisten, werden diese von den folgenden Ansätzen ausgeschlossen und der Fokus auf die Eckstiele und Diagonalen gerichtet.

Aus diesen Gründen wird das Argument in der weiteren Betrachtung auf den Mastschaft gelenkt und unterhalb des vierten Schusses eine Lagerung simuliert, diese ist jedoch mit einer Höhenkote von 10,90 m gekennzeichnet, um die korrekten Windlastannahmen in der entsprechenden Höhe zu treffen. Des Weiteren idealisiert man die Querträger sowie die Erdseilstütze durch Einzelstäbe an den jeweiligen Befestigungspunkten und betrachtet bei der späteren Berechnung das reale Eigengewicht und die Lasten aus Wind, indem man diese Kräfte nach genauer Berechnung an den entsprechenden Punkten am Mastschaft angreifen lässt.

## **3.2 Optimierungsansätze einer Gittermastkonstruktion** ***Optimization of a lattice mast construction***

### **3.2.1 Allgemeines** ***General***

Die Erkenntnis, dass die Profile des Referenzmastes teilweise nur geringfügig ausgenutzt sind, war einer der Hauptgründe zur Untersuchung diverser Optimierungsansätze. Zur Reduzierung des Eigengewichts und der damit verbundenen erhöhten Wirtschaftlichkeit der Profile wurde der Referenzmast durch die Verwendung höherfester Stahlsorten, die Nutzung hochfester Schrauben, den Gebrauch kleinerer Profile, sowie eine Änderung der Ausfachung verbessert. Ein weiterer Optimierungsansatz besteht darin, die Mastausteilung zu erweitern und somit weniger Masten auf der jeweiligen Strecke errichten zu müssen.

### **3.2.2 Verwendung von höherfesten Stahlsorten** ***Use of high strength steels***

Für diesen Optimierungsansatz werden die gleichen Lasten und die gleiche Ausfachung wie bei dem zu Anfang berechneten Referenzmast zugrunde gelegt und anschließend nacheinander für die Stahlgüten S355J2, S460M und S690M mit den Programmen „FMS“ [37] und „R-Stab“ [36] iterativ die passenden Profile ermittelt. Somit wählt zuerst „FMS“ die kleinstmöglichen Maße für die Profile und gibt diese Daten dann an „R-Stab“ weiter. In „R-Stab“ werden darauffolgend die Schnittgrößen berechnet und zurück an „FMS“ übertragen, um die Nachweise gegen Biegedrillknicken, Biegeknicken sowie Mannlast zu führen. Anschließend werden die Profile in zwei weiteren Iterationsschritten angepasst.

Diese Profilauswahl des Programms ist jedoch im Anschluss auf Plausibilität zu prüfen, da nur bezüglich der Profilfläche optimiert wurde und nicht nach verschiedenen ausformulierten Profilen unterschieden wird. Zusätzlich sollen, wie zuvor beschrieben, im Sinne der baubetrieblichen Optimierung die Eckprofile eines Schusses durchgehend sein. Diese Zusammenhänge eines Schusses werden von dem Programm ebenfalls

nicht erfasst. Daher kommt es vor, dass ein Eckstiel innerhalb eines Mastschusses aus mehreren Profilen besteht.

Die Zuordnung der Verbindungsmittel erfolgt über „FMS“ anhand der gewählten Profile. Dabei wird der Ausnutzungsgrad der Schrauben außer Betracht gelassen, sodass die Verbindungsmittel ebenso einzeln auf Plausibilität geprüft werden müssen. Das Programm „FMS“ gibt die folgenden Schraubenzuordnungen vor:

ab L35 - M12; ab L50 - M16; ab L60 - M20; ab L70 - M24; ab L75 - M27; ab L80 - M30.

In der Tabelle 15-1, im Anhang A, ist der Vorschlag des Programms „FMS“ für die Eckstiele der sechs Schüsse (S1 bis S6) sowie der Erdseilstütze (ES) bezüglich einer Optimierung mit der Stahlgüte S355J2 und einer Verwendung von 5.6 Schrauben aufgeführt. Während die kleiner gewählten Profile und Schrauben jeweils in der Farbe Grün dargestellt sind, werden die durch das Programm größer als notwendig gewählten Profile und Verbindungsmittel rot hinterlegt. Wie die Tabelle bereits erkennen lässt, wurde im Zuge der Plausibilitätsprüfung das größte vorgeschlagene Profil für den jeweiligen Mastschuss maßgebend für die finale Wahl. Bei der Wahl des Profils in Schuss 6 wurde sich an dem Profil im darüber liegenden Schuss orientiert, um von außen ein stimmiges Bild zu erhalten, in dem die Kräfte sichtbar von oben nach unten abgetragen werden und somit die Profile weiter unten größere Abmessungen haben.

Die Wahl der Schrauben weicht teilweise gravierend vom Programmvorschlag ab, da dort wie bereits erwähnt, die Verbindungsmittel bezüglich der Profilgröße ausgewählt werden und somit die vorgeschlagenen Schrauben nur sehr gering ausgelastet sind. Auf eine M30 Schraube wurde aufgrund ihres hohen Randabstands und den damit einhergehenden konstruktiven Erschwernissen in der Optimierung verzichtet. Für den Anschluss eines Eckstiels ist eine gerade Anzahl an Verbindungsmitteln notwendig, da Eckstielprofile im Stoßbereich stets an beiden Schenkeln befestigt werden. Um die Anzahl dennoch sehr gering zu halten, wurde auf mindestens zwei Scherflächen in allen Eckstielen, bis auf die Erdseilstütze, geachtet, weil die Schrauben nur auf Abscheren beansprucht werden. Aus diesem Grund ist zu beachten, dass nur Schrauben mit dem Schaft in der Scherfuge ausgewählt werden.

Der Vergleich zwischen den nun optimierten Eckstielen des Referenzmastes und den originalen Profilen ist in Tabelle 15-3, Anhang A, dargestellt.

Durch die vorgenommene Optimierung der Konstruktion lässt sich Material einsparen. Dies liegt jedoch hauptsächlich daran, dass der Grundtyp mit einer geteilten Erdseilstütze und Schrägfüßen vorgesehen ist und diese beiden Zusätze bei dem hier betrachteten Referenzmast nicht vorhanden sind. Um somit ein aussagekräftiges und realistisches Fazit bei den beiden weiteren Optimierungen mit höherfestem Stahl zu erhalten, wird dort der hier optimierte Mast als Bezugsgröße zugrunde gelegt.

Eine erneute Iteration des Programms unter den gleichen Lasten und der gleichen Ausfachung wie zuvor, nur mit einer Änderung der Stahlgüte zu S460M ergab die in Tabelle 15-4, Anhang A, dargestellten Ergebnisse und gewählten Profile. Jedoch weicht auch hier aus den bereits genannten Gründen die Wahl der Profile sowie der Verbindungsmittel in der Optimierung von dem Programmvorschlag ab.

Bei dieser Optimierung wurde ebenfalls auf die Verwendung der M30 Schrauben verzichtet, da diese nicht ansatzweise ausgelastet sind und konstruktive Schwierigkeiten bei der Befestigung an den kleinen Winkelprofilen mit sich bringen.

Außerdem wurden für die unteren beiden Schüsse aus ästhetischen Gründen größere Profile, als vorgeschlagen, gewählt. Eine mögliche Erklärung für die kleinen, vorgeschlagenen Profile ist die Reduktion der Knicklängen durch das Sekundärfachwerk in den Schüssen fünf und sechs. Neben der Optik können auch statische Überlegungen die Wahl der größeren Profile als nachgewiesen begründen. Dazu zählen Zwängung aus der Montage oder Auflagersenkung, sowie eine mögliche Reserve bei Typenmasten für Schrägfüße.

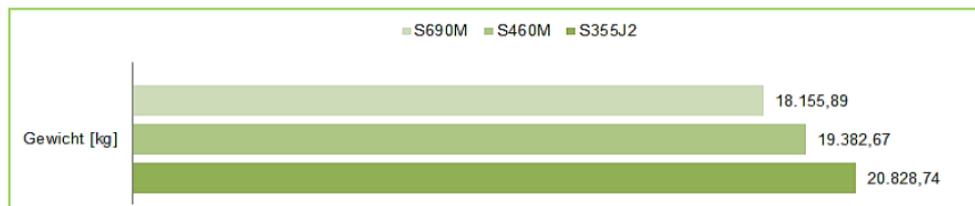
Die Plausibilitätsprüfung erfolgte somit erneut auf Basis der folgenden drei Grundsätze:

- (1) Ein durchgehendes Eckstielprofil pro Mastschuss
- (2) Eine gerade Anzahl von Verbindungsmitteln im Anschlussbereich der einzelnen Eckstiele
- (3) Die Wahl des kleinsten Schraubendurchmessers in Anhängigkeit von wirtschaftlichen und konstruktiven Aspekten

Im Anschluss folgt der Vergleich des optimierten Mastes mit der Stahlgüte S460M mit dem zuvor optimierten Grundtyp in der Stahlsorte S355J2. Dies ist wieder exemplarisch anhand der Eckstielprofile Tabelle 15-5, Anhang A zu entnehmen. Der Vergleich der beiden Tabellenseiten zeigt, dass erst ab Schuss 2 und den darunterliegenden Schüssen eine Materialeinsparung vorgenommen wird. Diese ist jedoch nicht unerheblich, sodass allein durch die Eckstiele 924,44 kg an Stahl eingespart werden können. Trotz der Tatsache, dass in Schuss 3 größere Schrauben benötigt werden, lässt sich die Anzahl der Schrauben um 48 Stück reduzieren.

Analog zu den bereits vorangegangenen Optimierungen erfolgt auch die mit einer Stahlgüte von S690M, siehe Tabelle 15-6, Anhang A. Somit wurde der Programmvorschlag nach den oben genannten Grundsätzen angepasst. Hier wurden ebenfalls die Eckstielprofile des untersten Schusses größer gewählt, um dem ästhetischen Anspruch gerecht zu werden.

Anschließend wurden die gewählten Profile in S690M mit den zuvor ermittelten Profilen in den Stahlgüten S355J2 und S460M gegenübergestellt. Hier ist bereits ab dem ersten Schuss eine deutliche Reduzierung der Größe der Eckstielprofile und der Anzahl der Schrauben zu erkennen. Somit können im Bereich der Eckstiele bei einer Verwendung eines S690M im Vergleich zu einer Verwendung des S355J2 1.842,91 kg an Material und 96 Schrauben eingespart werden. Daraus ergibt sich bei einem Vergleich zwischen dem Gebrauch einer Stahlgüte S690M gegenüber dem Gebrauch einer Stahlgüte S460M eine Materialeinsparnis von 918,47 kg und eine Schraubenersparnis von 48 Stück im Bereich der Eckstiele. Dies ist ebenso der Tabelle 15-8, im Anhang A zu entnehmen. Schlussfolgernd ist daher festzuhalten, dass mit steigender Stahlgüte, das Einsparpotential hinsichtlich des Gewichts und der Anzahl der Verbindungsmittel, größer wird.



➤ Gewichtersparnis von 7% bei S460M und von 13% bei S690M

Abbildung 3-4: Vergleich des gesamten Konstruktionsgewichts bei der Verwendung unterschiedlicher Stahlsorten

Figure 3-4: Comparison of the total construction weight using different steel grades

Jedoch ist nicht allein die Materialeinsparnis für die Wirtschaftlichkeit des Mastes maßgebend, sondern auch der Preis der jeweiligen Profile. Aufgrund der Tatsache, dass Profile in den höherfesten Stahlgüten erst ab einer bestimmten Größe bzw. überhaupt nicht lieferbar sind, wurde zur Ermittlung dieser Preise das Relationsverhältnis zwischen den Preisen für Flachstahl in S355J2 und Flachstahl in S460M bzw. Flachstahl in S690M zugrunde gelegt. Die Preise der Profile in der nachfolgenden Tabelle werden als Prozentanteil zu den Preisen der verwendeten Profile in Stahlsorte S355J2 angegeben.

Tabelle 3-1 : Gewicht und Kosten der Konstruktion in Abhängigkeit der verwendeten Stahlsorte bezogen auf einen Stahl S355J2 (in Prozent)

Table 3-1: Weight and cost of the construction depending on the steel grade used in relation to a steel S355J2 (in percent)

	Stahlsorte	Gewicht (kg)	Gewicht	Preis
Erdseilstütze	S355J2	515,65		
	S460 M	505,21	-2%	+10%
	S690 M	504,58	-2%	+96%
Schuss 1	S355J2	1.390,29		
	S460 M	1.362,45	-2%	+11%
	S690 M	1.237,55	-11%	+80%
Schuss 2	S355J2	2.759,32		
	S460 M	2.574,05	-7%	+5%
	S690 M	2.379,09	-14%	+72%
Schuss 3	S355J2	2.656,17		
	S460 M	2.475,15	-7%	+5%
	S690 M	2.298,77	-13%	+73%
Schuss 4	S355J2	1.762,44		
	S460 M	1.529,14	-13%	-13%
	S690 M	1.352,09	-23%	+37%
Schuss 5	S355J2	3.522,52		
	S460 M	3.233,01	-8%	-4%
	S690 M	3.019,97	-14%	+60%
Traverse 1	S355J2	2.189,62		
	S460 M	2.031,77	-7%	+5%
	S690 M	2.012,87	-8%	+84%
Traverse 2	S355J2	3.524,21		
	S460 M	3.388,60	-4%	+9%
	S690 M	3.172,31	-10%	+80%
Gesamt	S355J2	20.828,74		
	S460 M	19.382,67	-7%	+2%
	S690 M	18.155,89	-13%	+69%

Auf Grundlage dieser Preise, der ermittelten Stablängen und der Stücklisten, wurde der abschließende Vergleich bezüglich der Wirtschaftlichkeit geführt. Die ermittelten

Stablängen gehen auf die Systemzeichnungen zurück, da ansonsten zu viele Faktoren und Zusätze den Vergleich unbrauchbar machen würden. Bei der Berechnung des Gesamtgewichts wurden die Zusätze durch Schrauben, Abspannwinkel, sowie die Walztoleranz und die Zinkauflage unberücksichtigt gelassen. Somit lässt sich dieser Optimierungsansatz bei alleiniger Betrachtung der Profile zusammenfassend als eher unwirtschaftlich bezeichnen. Der zwar vorteilhaften Gesamtgewichtseinsparung bei der Verwendung eines S460M von bis zu -7% bzw. bis -13% bei der Verwendung eines S690M wird eine Steigerung der Gesamtkosten von bis zu +2% bei der Verwendung des S460M und sogar +69% bei einer Verwendung des S690M gegenübergestellt. Bei genauerer Betrachtung der Tabelle lässt sich zudem feststellen, dass kein direkter Zusammenhang zwischen dem Materialpreis und dem Gewicht besteht. Dies liegt unter anderem an den Sonderpreisen für die Profile L55x55x..., L65x65x... und L75x75x.

### **3.2.3 Verwendung von hochfesten Schrauben** *Use of high-strength bolts*

Neben der Optimierung der Profile können auch die Verbindungsmittel hinsichtlich der Güte und somit der Anzahl verbessert werden, da die Wahl dieser entscheidend für die Kosten und die Dauer der Montage sind. Die Zeit, die zum Anziehen der Schrauben benötigt wird, darf hierbei jedoch nicht unterschätzt werden.

Bei dem Referenzmast und auch den üblichen anderen Masten werden Schrauben der Güteklasse 5.6 nach DIN 7990 verwendet. Nun stellt sich die Frage, ob sich einhergehend mit der Verwendung von höherfesten Stählen auch die Nutzung von Schrauben der Güteklassen 8.8 sowie der Güteklasse 10.9 nach ISO 4014 als wirtschaftlich erweist. Alle betrachteten Verbindungsmittel sind als feuerverzinkt anzunehmen.

Vorab wird eine Verwendung der Schrauben der Güteklasse 5.6 in Verbindung mit allen drei Stahlfestigkeiten bei der Konstruktion selbst untersucht. Im Stahlgittermastbau werden die Schrauben in der Regel nur auf Abscheren beansprucht, sodass durch die Erhöhung der Stahlgüte die Anzahl und, oder die Dimension dieser verringert wird.

Die Schraubengarnitur der Güteklasse 5.6 setzt sich nach DIN 7990 aus einer Sechskantschraube mit Schaft, der dazugehörigen Mutter, einer Scheibe (ISO 7089) und einem Federring (DIN128) zusammen. Für diese Güteklasse wurden die Preise für die verschiedenen Schraubengrößen für die durchschnittlich verwendete Schraubenlänge ermittelt.

Bemerkenswert ist, dass sich durch eine Verwendung des S460M bereits 80 Schrauben gegenüber einer Verwendung des üblichen S355J2 einsparen lassen und bei der Verwendung eines S690M sogar 276 Schrauben. Zusätzlich nimmt die Anzahl der kleineren Schrauben deutlich mit der Erhöhung der Stahlgüte zu, sodass sich auch diese Veränderung auch im Preis widerspiegelt. So lässt sich bei der Verwendung eines S460M bis zu 4% und bei einem S690M sogar bis zu 16% des Schraubenpreises einsparen. Die folgende Tabelle stellt eine Übersicht über die Gesamtkosten aus Profil- und Verbindungsmittelkosten bei einer Verwendung von 5.6 Schrauben dar.

Tabelle 3-2 : Gesamtkosten für S355J2, S460M und S690M bei Verwendung von 5.6 Schrauben  
Table 3-2: Total cost of S355J2, S460M and S690M by using 5.6 bolts

	Profilkosten	Schraubenkosten	Gesamt
<b>S355J2</b>	100%	100%	100%
<b>S460M</b>	+2%	-4%	<b>-2%</b>
<b>S690M</b>	+69%	-16%	<b>+20%</b>

Diese Kombination der Preise relativiert die schlechte Bewertung des Optimierungsansatzes der Verwendung von höherfestem Stahl, jedoch auch die obigen positiven Erkenntnisse.

Die Preise für die Schrauben der Güteklasse 8.8 wurden analog zu den oben genannten Preisen ermittelt. Diese Schraubengüteklasse wurde im Gegensatz zu der vorherigen nur in Verbindung mit höherfesten Stahlsorten untersucht. Dabei ist erneut zu erkennen, dass die Anzahl der benötigten Verbindungsmittel mit der Steigerung der Stahlgüte abnimmt. Außerdem wird auch hier zu geringeren Schraubendurchmessern tendiert. Der folgenden Tabelle sind die Preiseinsparungen bezüglich des Gesamtpreises bei einer Kombination zwischen 8.8 Schrauben mit dem Stahl S460M zu entnehmen, wobei dieser Ansatz zunächst als am wirtschaftlichsten erscheint.

Tabelle 3-3 : Gesamtkosten für S460M und S690M bei Verwendung von 8.8 Schrauben  
Table 3-3: Total cost of S460M and S690M using 8.8 bolts

	Profilkosten	Schraubenkosten	Gesamt
<b>Referenz</b>	100%	100%	100%
<b>S460M</b>	+2%	-17%	<b>-9%</b>
<b>S690M</b>	+69%	-31%	<b>+12%</b>

Die 10.9 Schrauben sind seltener als komplette Garnitur erhältlich, dennoch lässt sich ein durchschnittlicher Preis analog zu den Schrauben einer niedrigeren Güteklasse ermitteln. Ebenso wie bei den Schrauben der Güteklasse 8.8 wurden hier nur die höherfesten Stahlgüten betrachtet. Bei dieser Untersuchung hat sich herausgestellt, dass durch die deutlich teureren Schrauben auch keine Preiseinsparung bei den Verbindungsmittelkosten zu erreichen ist und es somit zu einer Erhöhung der Gesamtkosten kommt. Dies ist auch der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 3-4 : Gesamtkosten für S460M und S690M bei Verwendung von 10.9 Schrauben  
Table 3-4: : Total cost of S460M and S690M using 10.9 bolts

	Profilkosten	Schraubenkosten	Gesamt
<b>Referenz</b>	100%	100%	100%
<b>S460M</b>	+2%	+38%	<b>+23%</b>
<b>S690M</b>	+69%	+37%	<b>+50%</b>

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verbindungsmittel einen bedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Stahlgittermastes haben. Besonders der Einsatz von Schrauben der Güteklasse 8.8 in Verbindung mit einer höherfesten Stahlsorte im Stahlgittermast ist zu prüfen. Eine weitere Steigerung der Schraubengüteklasse bringt aufgrund des enorm ansteigenden Preises und der nur geringen Verkleinerung der Profile keine weiteren Vorteile mit sich.

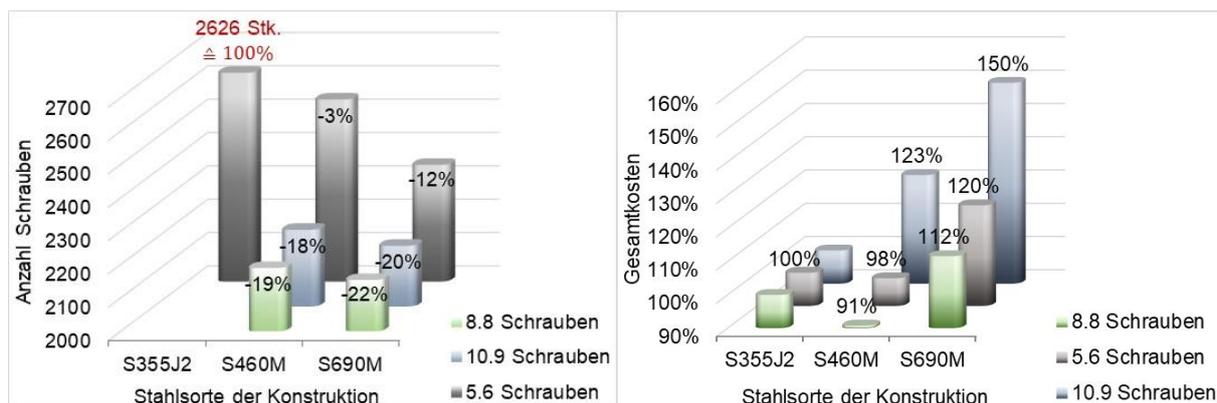


Abbildung 3-5: Abschließender Vergleich bei Verwendung verschiedener Schraubengüteklassen in Abhängigkeit von der Stahlsorte der Konstruktion  
 Figure 3-5: Final comparison by using different bolt quality classes depending on the steel grade of the construction

Bei Betrachtung der Auswertungstabellen fällt besonders auf, dass sich bei einer Verwendung der Stahlgüte S460M mit einer 8.8 Schraube die Anzahl dieser im Vergleich zur 5.6 Schraube um 356 am kompletten Mast reduzieren lässt. Dies wirkt sich aus dem bereits genannten Grund positiv auf die Montagedauer und die damit verbundenen Kosten aus.

### 3.2.4 Wahl kleinerer Eckprofile Choice of smaller corner profiles

Grund für diesen Optimierungsansatz sind die bereits beschriebenen noch vorhandenen Kapazitäten der Eckstiele bezüglich der Tragfähigkeit. Durch eine Funktion des Moduls „Stahl EC3“ im Statikprogramm RStab [35] werden die Querschnitte automatisch optimiert und weiterhin die Erfüllung der Nachweise geprüft. Der Untersuchung liegen alle Größen der Winkelprofil-Reihe zugrunde.

Die sich ergebenden Resultate sind jedoch nicht als endgültig anzusehen, da die Windlasten bei dieser Untersuchung zuvor zu Linienlasten vereinfacht wurden. Bei der Wahl kleinerer Querschnitte bringt dies jedoch keine Probleme mit sich, da die Fläche, auf die sich die generierte Windlast bezieht, reduziert wird und somit eine größere Linienlast, auf der sicheren Seite liegend, mit sich bringt. Der Einfluss einer Veränderung der Windangriffsfläche ist bedeutend bei Nachweisen, weil eine Vergrößerung mit steigenden Biegemomenten einhergeht und diese bei sowieso hohen Ausnutzungsgraden den Nachweis scheitern lassen können.

Laut des Verfahrens sind folgende Optimierungen in den oberen vier Schüssen vorzunehmen:

- Schuss 1: L100x10 (19,2 cm<sup>2</sup>) → L100x6 (11,8 cm<sup>2</sup>)
- Schuss 2: L140x13 (35,0 cm<sup>2</sup>) → L140x9 (24,6 cm<sup>2</sup>)
- Schuss 3: L150x15 (43,0 cm<sup>2</sup>) → L150x14 (40,3 cm<sup>2</sup>)
- Schuss 4: L160x16 (49,0 cm<sup>2</sup>) → L180x13 (45,5 cm<sup>2</sup>)

Die Auswertung zeigt, dass sich sogar die hoch ausgelasteten Profile der Schüsse 3 und 4 noch optimieren lassen. Dies ist eine Folge der kleiner gewählten Profile in den darüber liegenden Schüssen. Trotz der vergleichsweise moderaten Modifikation der

Eckstiele lässt sich bereits eine Ersparnis 651,0 kg Stahl verzeichnen, die prozentual einer Abnahme von -8,3% entspricht.

In der schlussfolgernden Gesamtbetrachtung der verschiedenen Optimierungsansätze und dem einhergehenden Vergleich dieser wird dieser Ansatz als Variante 1 bezeichnet.

### 3.2.5 Modifikation der Ausfachung *Modification of the infill*

Die Standardausfachung eines Mastes, so auch des betrachteten Referenzmastes, besteht aus Rautenfachwerken, die jeweils zwei Diagonalen pro Wand und Modul aufweisen. Durch die Umstellung zu einem Strebenfachwerk, das aus jeweils nur einer Diagonale pro Wand und Modul besteht, könnte somit die Anzahl der benötigten Diagonalen in etwa halbiert werden.

Des Weiteren bietet dieser im Fazit als Variante 2 betitelte Ansatz den Vorteil, dass sich am Fußpunkt eines Schusses Leerknoten ergeben und daher die einzelnen Schüsse sauber gestoßen werden können und nicht weiterhin überlappend ausgeführt werden müssen. Im Gegenzug erhöht sich die Knicklänge einer Diagonale durch die fehlende Mittelstützung. Damit erfolgt die Sicherung der Eckstiele gegen Ausknicken nur noch in jeder vierten anstatt in jeder zweiten Ebene, sodass diese Streben-Ausfachung vorzugsweise für schlanke Gittermasten eingesetzt wird. Um diesem erhöhten Stabilitätsproblem entgegenzuwirken, wird neben dem alleinigen Austausch der Ausfachung (Variante 2.2) zusätzlich eine Modifikation des Mastchaftes vorgenommen und untersucht (Variante 2.3).

Stark vereinfacht gesehen, ist der Referenzmast ein eingespannter Kragarm. Wie bei vielen Biegeträgern üblich, wird nun auch dieser Kragträger momentaffin ausgebildet. Unter einer einzelnen an der Trägerspitze angreifenden horizontalen Last nimmt der Momentenverlauf die Form eines Dreiecks an, unter einer horizontalen Gleichstreckenlast, die einer quadratischen Parabel. Zusammenfassend ist jedoch bei jeder horizontal angreifenden Last das Moment am Fußpunkt des Mastes am größten und läuft zur Mastspitze hin gegen Null.

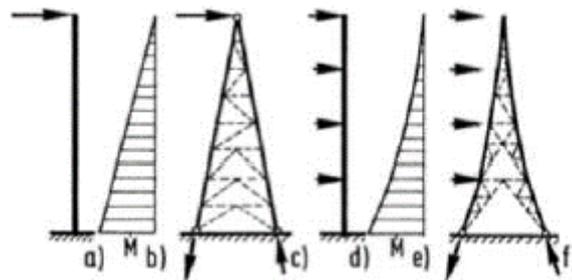


Abbildung 3-6: Momentenverläufe unter Horizontallasten  
Figure 3-6: Moment curves under horizontal loads

Somit ergibt sich eine in ihrer Konizität modifizierte Mastform, mit der eine starke Reduktion der Knicklängen im oberen Bereich und eine moderate Verkürzung dieser im unteren Bereich für die Wanddiagonalen einhergehen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wird die unterste Ebene des vierten Schusses unverändert gelassen. Da jedoch eine quadratische Auslegung der Konizität in der Praxis nahezu gar nicht

umzusetzen ist, wird dieser über die einzelnen Schüsse hinweg jeweils linear angepasst. Zunächst werden folgende Beziehungen zwischen den Konizitäten der Schüsse aufgestellt und diese nach der Ermittlung der vorhandenen mittleren Konizität mithilfe dieses Zusammenhangs genau berechnet (siehe

Tabelle 3-6).

Tabelle 3-5 : Konizität der Gittermastkonstruktion der Mastvariante 2.2  
Table 3-5: Conicity of the lattice mast construction of mast variant 2.2

		Konizität [cm/m]	
Schuss 1	$K_1$	5,86	$K_m = \frac{B_u - B_o}{H_{ges}} = \frac{\sum K_i \cdot H_i}{H_{ges}}$
Schuss 2	$K_2=1,3 \cdot K_1$	7,61	
Schuss 3	$K_3=1,3^2 \cdot K_1$	9,90	
Schuss 4	$K_4=1,3^3 \cdot K_1$	12,87	

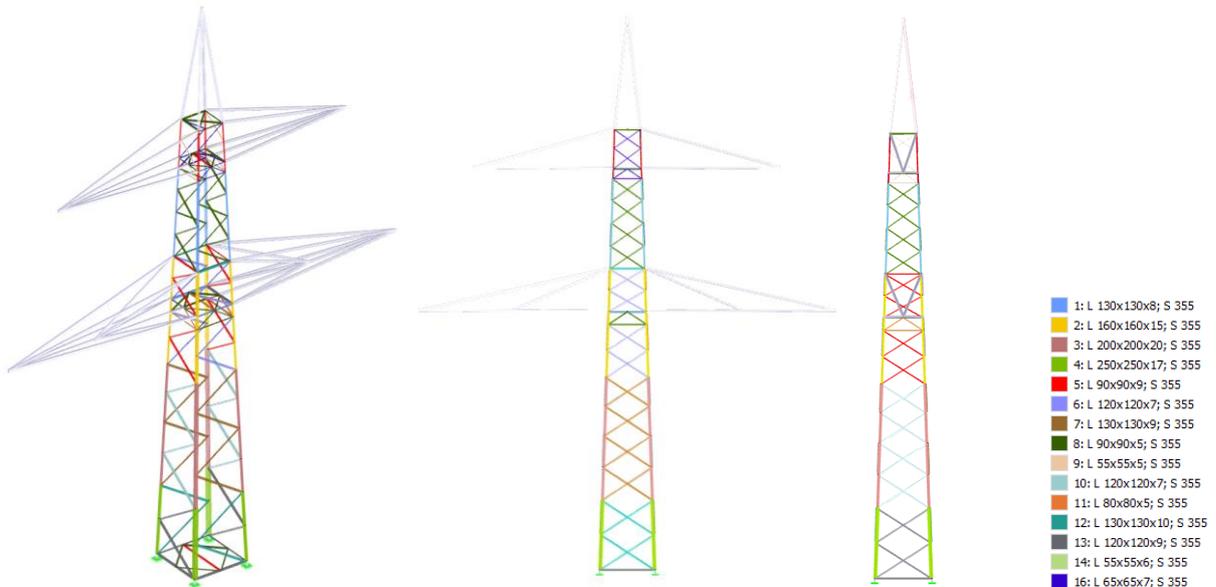


Abbildung 3-7: Mastvariante 2.2, FE-Modell mit RSTAB [36]  
Figure 3-7: Mast variant 2.2, FE model with RSTAB [36]

Zunächst werden die Querschnitte ohne Exzentrizität bestimmt, da diese in direkter Abhängigkeit stehen. Nach einer ersten Ermittlung der Querschnittsabmessungen wurden diese anschließend iterativ angepasst und in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-6 : Querschnitte, Material und Exzentrizität der Varianten 2.2 und 2.3  
 Table 3-6: Cross sections, material and eccentricity of variants 2.2 and 2.3

QS-Nr.	Querschnitt		Exzentrizität	
	Variante 2-2	Variante 2-3	Variante 2-2	Variante 2-3
1	L 130x8	L 130x10	--	--
2	L 160x15	L 180x14	--	--
3	L 200x20	L 200x16	--	--
4	L 250x17	L 250x17	--	--
5	L 90x9	L 90x6	-24,6	-25,8
6	L 120x7	L 110x7	-33,2	-30,6
7	L 130x9	L 120x7	-34,9	-33,2
8	L 90x5	L 90x5	-26,5	-26,5
9	L 55x5	L 55x4	-14,8	-15,3
10	L 120x7	L 120x7	-33,2	-33,2
11	L 80x5	L 75x5	-23,8	-19,9
12	L 130x10	L 120x7	-34,5	-33,2
13	L 120x9	L 120x7	-32,3	-33,2
14	L 55x6	L 55x6	--	--
15	L 65x7	L 60x6	-16,5	-18,1

Schlussfolgernd tritt das vermutete Stabilitätsproblem für die Variante 2.2 weniger in den oberen Schüssen dafür umso massiver in den unteren Schüssen auf. Die Profile in den Wänden in den oberen Bereichen gleichen denen des Referenzmastes, während Profile in den unteren Bereichen sogar doppelt so groß ausfallen. Diese Entwicklungen sind sowohl bei den Eckstielen als auch bei den Diagonalen ersichtlich. Der erste Schuss wird aufgrund der verschiedenen Ausnutzungsgrade nach den ersten beiden Modulen und dem Halbmodul geteilt und der untere Teil dem obersten Modul des zweiten Schusses zugeordnet wird. Darauffolgend liegt die Ausnutzung aller Profile in einem wirtschaftlichen Bereich. Die erhoffte Reduzierung des Montageaufwands stellt sich jedoch größeren Querschnittsabmessungen entgegen.

Durch die Modifikation des Mastschafts in der Variante 2.3 konnten jedoch die meisten Profile in ihren Abmessungen verringert werden. Ein direkter Vergleich der Querschnittsflächen der Eckstiele in den Variante 2.2 und 2.3 zeigt jedoch interessante Ergebnisse, die in folgender Tabelle zusammengefasst sind.

Tabelle 3-7 : Querschnittsflächen der Eckstiele  
 Table 3-7: Cross sections, material and eccentricity of variants 2.2 and 2.3

Querschnitt [cm <sup>2</sup> ]	Schuss 1a	Schuss 1b	Schuss 2	Schuss 3	Schuss 4
Variante 2-2	15,5	20,4	46,1	76,3	82,1
Variante 2-3	13,7	25,2	48,8	61,8	82,1

In den Bereichen, in denen die Querträger anschließen, weist die Variante 2.2 Vorteile durch den größeren vorhandenen Hebelarm auf. Jedoch macht sich in den unteren Schüssen die momentaffine Ausbildung des Mastes bemerkbar und die benötigte Querschnittsfläche verringert sich.

Zusammenfassend verringert sich somit bei der Variante 2.3 die Stahltonnage, während sie sich bei der alternativen Variante 2.2 vergrößert.

Tabelle 3-8 : Vergleich des Schaftes des Referenzmastes mit der Konstruktion der Variante 2  
Table 3-8: Comparison of the shaft of the reference mast with the construction of variant 2

Bezeichnung	verb. Stahl [kg]	relativ [%]	Ausfachungsart	Anz. Diagonalen	relativ [%]
Referenzmast	7820,6	100,0	Rautenfachwerk	160	100,0
Variante 2-2	8886,1	113,6	Strebenfachwerk	92	57,5
Δ	+1065,5	+13,6		-68	-42,5
Variante 2-3	7578,1	96,9	Strebenfachwerk	92	57,5
Δ	-242,5	-3,1		-68	-42,5

Durch den Gebrauch von höherfestem Stahl lässt sich ebenso die Verwendung von einer alternativen Ausfachung begründen. Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert wurde, ist die alleinige Umstellung auf einen höherfesten Stahl ungeeignet. Eine stärkere Belastung der Eckprofile und einer einhergehenden Vergrößerung dieser, könnte die Profilpreise jedoch wieder relativieren, sodass eine Verwendung des S460M lohnenswert wird.

Die größere Belastung der Eckstiele wird durch eine Verlängerung der Knicklängen, indem eine Diagonalauskreuzung je Mastwand ausgelassen wird, hervorgerufen. Aufgrund der Tatsache, dass bei den Stahlgittermasten immer ein ähnliches Verhältnis zwischen Höhe und Breite vorhanden sein muss, kann nur eine Kreuzung entfernt werden. Die entfernten Diagonalen befinden sich im dritten Schuss, sodass sich dort neue Schuss- und Eckstiellängen ergeben.

Die Tabelle 15-9 bis Tabelle 15-11, im Anhang A zeigen die ausgewerteten Daten zu den Eckstiel- und Diagonalprofilen, nachdem die neue Alternative mit den identischen Lasten, wie zuvor, in das Programm „FMS“ eingearbeitet wurde. Zusätzlich stellen sie den Vergleich zwischen den bisher verwendeten Diagonalen und den nun benötigten Diagonalen in den jeweiligen Schüssen dar. Hierbei steht das Kürzel „FB“ für „Front – Back“ und beschreibt somit die Diagonalen senkrecht zur Trassenführung. Die Abkürzung „LF“ bedeutet „Left – Right“ und beschreibt daher die Diagonalen parallel zur Leitungsführung. Außerdem wurde dieser Vergleich zwischen dem Mast mit einer veränderten Ausfachung und dem Referenzmast zunächst für einen S355J2 und anschließend für die Stahlgüten S460M und S690M durchgeführt.

Durch die geänderte Ausfachung wurden, wie zu Beginn vermutet, tatsächlich größere Eckstielprofile benötigt. Die Schrauben sowie die Eckstielprofile in den unteren Schüssen bleiben jedoch aufgrund der konstant gebliebenen Last in ihrer Größe und Anzahl unverändert. Bei alleiniger Betrachtung der Eckstielprofile und dem Vernachlässigen der wegfallenden Diagonalen, verzeichnet sich eine Massenzunahme von 242,6 kg. Zusätzlich müssen in diesem Fall Profile einer höheren Preiskategorie verbaut und die Diagonalen der anderen Schüsse verstärkt werden, sodass man diese Variante schlussendlich als nicht wirtschaftlich bezeichnen kann.

Bei der Stahlgüte S460M ist im Vergleich zum S355J2 positiv zu vermerken, dass keine größeren Eckstielprofile benötigt werden, sondern nur die Längen der einzelnen Profile angepasst werden müssen. Daher lässt sich hierbei keine bedeutende Änderung in der Gesamttonnage erkennen. Durch die Einsparung der weggelassenen Diagonalkreuzung müssen die übrigen Diagonalen größer dimensioniert werden. Insgesamt ist also durch eine Verwendung dieses höherfesten Stahls dennoch kein Einsparpotential vorhanden.

Eine Verwendung des S690M bringt folglich auch keine wirtschaftlichen Vorteile mit sich, da größere Eckstielprofile in den mittleren Schüssen benötigt werden und die Kostenunterschiede zu einem S355J2 die gewonnene Festigkeit nicht rechtfertigen.

Die Untersuchung dieser Variante ergab, dass eine so veränderte Ausfachung keine nennenswerten Veränderungen hinsichtlich des Gewichts und der Kosten mit sich bringt und daher für eine Optimierung ungeeignet ist. Die Einsparungen bei der Verwendung von höherfesten Stählen gegenüber dem Gebrauch eines S355J2 ist analog zu der Einsparung, die bereits bei dem Optimierungsansatz durch höherfeste Stähle ohne eine veränderte Ausfachung erarbeitet wurde.

### 3.2.6 Weitläufigkeit der Mastausteilung *Extensiveness of mast distribution*

Neben den Ansätzen, die direkte Auswirkungen auf den Mast selber haben, soll in dieser Variante eine veränderte Mastausteilung untersucht werden (Variante 3).

Bei einer Erhöhung der Spannweite zwischen den einzelnen Trägern auf 400 m bzw. 425 m, fällt jedoch direkt auf, dass entweder bei der Auslegungstemperatur von 40°C oder unter einer Eislast der Mindestabstand zwischen Boden und Leiter unterschritten wird. Daraus ergibt sich eine notwendige Erhöhung des Mastes, um den notwendigen Abstand wiederherzustellen. Dabei wurde sich an dem Durchhang von 15,50 m des Referenzmastes mit einer Spannweite von 275 m orientiert und variiert. Schlussendlich kommt man zu einer Masthöhe von 57,85 m, sodass der Referenzmast um drei Zusatzmodule oder 8,10 m erweitert werden muss. Vorteilhaft ist, dass die Eckstiele des vierten Schusses dennoch nicht unterteilt werden müssen, da die Stahlträger mit einer Länge von 11,80 m weiterhin lieferbar sind.

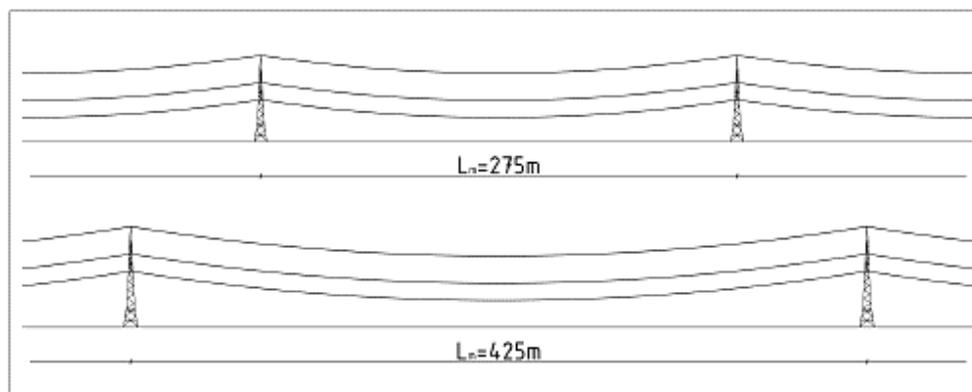


Abbildung 3-8: Mastausteilung des Referenzmastes (oben) und Mastausteilung der Variante 3 (unten)  
Figure 3-8: mast distribution of the reference mast (top) and mast distribution of variant 3 (bottom)

Aufgrund der guten Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel wird einerseits die veränderte Mastausteilung mit einem zu der Variante 2-3 identischen Mast untersucht (Variante 3-1). Alternativ dazu wird in der Variante 3-2 die veränderte Mastausteilung für eine Gittermastkonstruktion mit einem Rautenfachwerk und einer sich linear, veränderlichen Konizität betrachtet. Aus der Modellierung und Berechnung ergeben sich anschließend folgende Querschnitte und Exzentrizitäten:

Tabelle 3-9 : Querschnitte, Material und Exzentrizität der Varianten 3.1 und 3.2  
Table 3-9: Cross sections, material and eccentricity of variants 3.1 and 3.2

QS-Nr.	Querschnitt		Exzentrizität	
	Variante 3-1	Variante 3-2	Variante 3-1	Variante 3-2
1	L 130x13	L 110x10	--	--
2	L 200x15	L 140x15	--	--
3	L 200x20	L 160x17	--	--
4	L 250x25	L 200x17	--	--
5	L 90x8	L 45x4	-25	-12,7
6	L 120x7	L 60x6	-33,2	-18,1
7	L 120x8	L 75x5	-32,7	-19,9
8	L 90x5	L 90x9	-26,5	-24,6
9	L 55x4	L 45x4	-15,3	-12,7
10	L 120x7	L 100x10	-33,2	-26,8
11	L 75x5	L 70x7	-19,9	-20,3
12	L 140x9	L 100x6	-42,5	-28,6
13	L 120x10	L 120x7	-31,9	-33,2
14	L 55x6	L 55x6	--	--
15		L 55x5	--	-14,8

Die größere Spannweite sowie die höheren Staudrücke spiegeln sich in der Gesamttonnage des Mastes wieder und es kommt zu einem Anstieg des Gewichts von circa 175%. Jedoch werden durch die veränderte Mastausteilung Masten eingespart und diese enorme Gewichtssteigerung relativiert sich wieder.

Bei der Variante 3-1 kommt jedoch nun das Stabilitätsproblem zum Tragen. Die Diagonalen, die die Montagearbeiten verkürzen sollten, haben Ausmaße angenommen, sodass sie nicht mehr von Arbeitskräften transportiert werden können und Hilfsmittel benötigt werden. Generell kommt es bei dieser Variante zu einer Gewichtszunahme. Der steigende Stahlverbrauch steht in keinem Verhältnis zu den zunehmenden Kräften resultierend aus der größeren Spannweite.

Variante 3-2, die mit einem Rautenfachwerk ausgesteift wurde, bringt im Bereich des vierten Schusses, der für diesen Optimierungsansatz eine tragende Rolle spielt, enorme Vorteile mit sich. Zusätzlich ist die Stabilität der einzelnen Profile weniger gefährdet. Dies lässt sich durch den Vergleich der eingesetzten Profile belegen. Die Querschnittsflächen fallen bei dieser Variante überwiegend kleiner aus als bei ihrer Alternative. Außerdem werden bei dieser Variante die Kräfte in den Eckstielen gleichmäßiger verteilt.

Tabelle 3-10 : Vergleich des Referenzmastes mit der Variante 2  
Table 3-10: Comparison of the reference mast with variant

Bezeichnung	verb. Stahl [kg] relativ [%]		Ausfachungsart	Maste Stahl [t] relativ [%] pro km Trasse		
Referenzmast	7820,6	100,0	Rautenfachwerk	3,64	28,47	100,0
Variante 3-1	13725,5	175,5	Strebenfachwerk	2,35	32,25	113,3
Δ	+5904,9	+75,5		-1,29	+3,79	+13,3
Variante 3-2	11953,1	152,8	Rautenfachwerk	2,35	28,09	98,7
Δ	+4132,5	+52,8		-1,29	-0,38	-1,3

### 3.2.7 Optimierungsansätze im Vergleich *Comparison of optimisation approaches*

Insgesamt sind die Resultate der Untersuchungen größtenteils zufriedenstellend, da ein Großteil der Optimierungsansätze Vorteile in der Wirtschaftlichkeit mit sich bringt.

Die folgende Tabelle vergleicht noch einmal abschließend die zuvor als Varianten 1 bis 3 bezeichneten Ansätze. Dabei wird besonders deutlich, dass die Varianten 2-3 sowie 3-2 den Referenzmast optimieren. Diese beiden Varianten werden auch hinsichtlich bauwirtschaftlicher und baubetrieblicher Punkte als eine Besserung gegenüber dem Referenzmast beurteilt, auch wenn diese im Rahmen der vorhergehenden Untersuchungen nicht betrachtet wurden. Jedoch ist bei der Variante 3-2 die zusätzliche Höhe der Masten zu beachten. Diese Variante wäre daher aufgrund des Landschaftsschutzes nicht zugelassen.

Tabelle 3-11 : Abschließender Vergleich der Varianten 1 bis 3  
 Table 3-11: Final comparison of the variants 1 to 3

Ausführung Modellbezeichnung	Referenz	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		1-1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2
<b>Einzelmast</b>							
max. QS-Nachweis:							
- ein Stromkreis	0,98	0,98		0,98	1,00	0,97	1,00
- zwei Stromkreise	1,00	1,00		1,00	0,98	0,99	0,96
Ausfachungsart	Rauten	Rauten		Streben	Streben	Streben	Rauten
Anzahl Diagonalen:							
- absolut [-]	160	160		92	92	104	184
- relativ [%]	100,0	100,0		57,5	57,5	65,0	115,0
verbauter Stahl:							
- absolut [kg]	7820,6	7169,6		8886,1	7578,1	13725,5	11953,1
- relativ [%]	100,0	91,7	verworfen	113,6	96,9	175,5	152,8
<b>Maste pro km Trasse</b>							
Stück	3,64	3,64		3,64	3,64	2,35	2,35
Anzahl Diagonalen:							
- absolut [-]	582	582		335	335	244	432
- relativ [%]	100,0	100,0		57,5	57,5	42,0	74,2
verbauter Stahl:							
- absolut [t]	28,47	26,10		32,35	27,58	32,25	28,09
- relativ [%]	100,0	91,7		113,6	96,9	113,3	98,7

Die Veränderung der Konizität hat sich außerdem bewährt, sodass daran festgehalten werden sollte. Die Ausfachung mit einem Strebenfachwerk hat besonders in den oberen Schüssen Vorteile mit sich gebracht, weshalb eine weitere Alternative die Kombination der Varianten 3-1 und 3-2 wäre, also einem Mast, der oben mit einem Strebenfachwerk und in den unteren Schüssen mit einem Rautenfachwerk ausgesteift wird. Die zwei folgenden Grafiken unterstreichen noch einmal die bereits beschriebenen Ergebnisse und verdeutlichen die Einsparpotentiale.

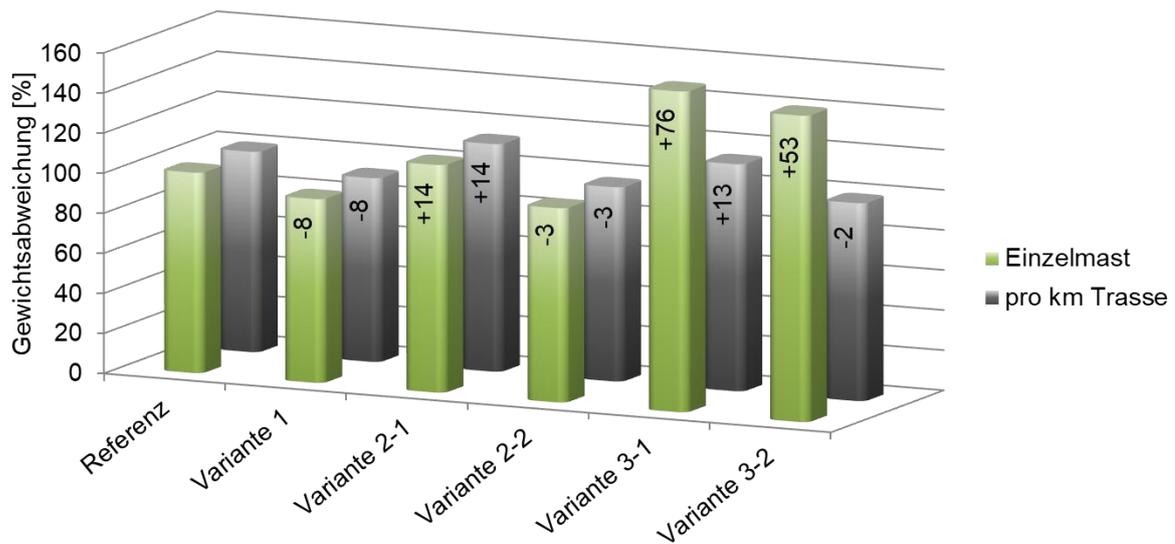


Abbildung 3-9: Stahl Tonnage (bezogen auf die oberen vier Mastschüsse)  
Figure 3-9: Steel tonnage (related to the upper four mast sections)

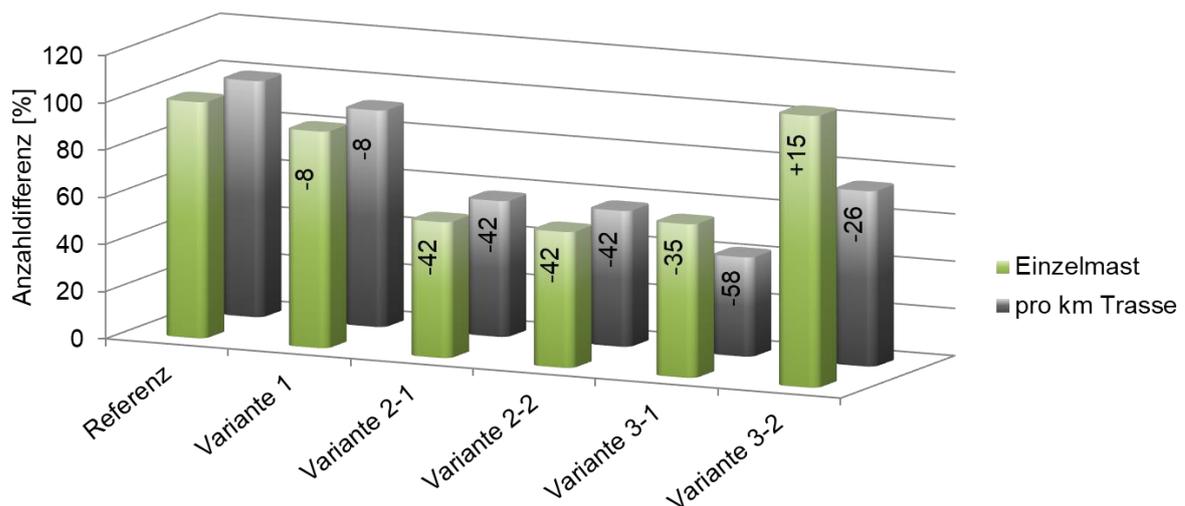


Abbildung 3-10: Anzahl der verbauten Diagonalen (bezogen auf die oberen vier Mastschüsse)  
Figure 3-10: Number of used diagonals (related to the upper four mast sections)

Bezüglich der Modifikation der Stahlgüteklasse lässt sich festhalten, dass sich die Verwendung eines S460M als positiv herausgestellt hat. Der Einsatz dieses festeren Materials führt zu einer Reduktion der Querschnitte und einer damit einhergehenden Verminderung des Gewichts. Außerdem hat die Verwendung dieser Stahlgüte vorteilhafte Auswirkungen auf die Fundamente, da sich das Eigengewicht, sowie die Montagearbeiten und deren Dauer komprimiert.

Der Einsatz der Stahlgüte S690M scheitert hauptsächlich an den deutlich höheren Preisen. Im Gegenzug erhöht sich das Optimierungspotential bei einer Erhöhung der Schraubengüteklasse zu 8.8 in Kombination mit der Verwendung einer Stahlgüteklasse S460M. Auf diese Weise können Querschnittsfläche und Verbindungsmittel eingespart werden und die Kombination erscheint sehr wirtschaftlich. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die eventuell unüblichen Winkelprofile vorrätig sind. Dies sollte jedoch bei der hohen Stückzahl, die an Stahlgittermasten benötigt werden, kein gravierendes Hindernis darstellen.

Bei diesen Untersuchungen blieb jedoch die Verarbeitbarkeit von höherfesten Materialien unberücksichtigt, sodass diese in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit zusätzlich betrachtet werden muss.

Zusammenfassend ist bei einem Stahlgittermast Optimierungspotential vorhanden, das besonders in den Ansätzen einer veränderlichen Konizität des Mastschaftes, einer Anpassung des Fachwerks sowie einer Verwendung der Stahlgüteklasse S460M für die Konstruktion in Kombination mit Schrauben der Güteklasse 8.8 deutlich wird.

## **4 Konzeptionen / Entwürfe für Freileitungsmaste Concepts / Drafts of overhead line towers**

### *Kurzfassung*

*Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden neue Freileitungsmasttypen für die Überführung von Höchstspannungsleitungen entwickelt, die neben den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen in ihrer Gestalt eine neue Zeit, die Zeit der Energiewende der Bundesrepublik Deutschland, symbolisieren sollen.*

### *Abstract*

*In the context of this paper, new types of overhead line masts for the transfer of high-voltage power lines have been developed. In addition to the technical and economic requirements in their form a new era, the time of the energy transition of the Federal Republic of Germany, should be symbolized.*

### **4.1 Typisierung der Freileitungsmaste Typification of overhead line towers**

Um das bestehende Freileitungsnetz zu untersuchen und die Daten auszuwerten, wurden in [20] die Freileitungsmaste nach den Kategorien Spannungsebene, Anzahl der zu führenden Stromkreise, Funktion und Bauart des Mastes analysiert. Die generelle Auswertung aller Einteilungen ergab, dass die Freileitungsmaste bisher ausschließlich als Stahlgittermastkonstruktionen verbaut sind. Aufgrund der hohen Anzahl an bestehenden Freileitungsmasten wurde nur ein repräsentativer Anteil der Bestandsmasten und der Teil der geplanten Trassen, deren Planung bereits genehmigungsreif und öffentlich zugänglich ist, analysiert. Da eine Erneuerung und ein Ausbau des Höchstspannungsnetzes in Deutschland, das bisher ausschließlich mit Drehstrom betrieben wird, erst in Planung sind, wird in diesem Rahmen der Analyse der Fokus auf das bestehende Hochspannungsnetz gelegt.

Die Betrachtung der vertretenen Spannungsebenen ergab, dass insgesamt ein Großteil der in Deutschland bestehenden Freileitungen auf der 380 kV-Ebene betrieben wird. Zwar schwankt der prozentuale Anteil in den verschiedenen Regionen zwischen 55% und 66%, pendelt sich jedoch im Mittel insgesamt bei 63% ein. Nur in den dicht besiedelten Arealen des Ruhrgebiets und der Rhein-Main-Region ist er vergleichsweise niedrig.

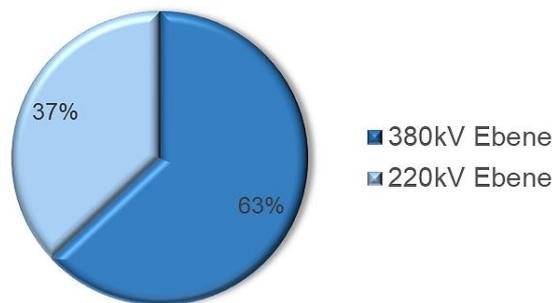


Abbildung 4-1: Spannungsebenen im Hochspannungsnetz  
Figure 4-1: Voltage levels in the high-voltage network

Das Ergebnis der Analyse hinsichtlich der Anzahl der Stromkreise zeigt deutlich, dass die Freileitungen im Regelfall mit zwei Stromkreisen betrieben werden, vier Stromkreise noch von 10 % der Freileitungsmasten geführt werden und die Übertragung eines oder von mehr als vier Stromkreisen mit insgesamt 3% die Ausnahme bilden. Betrachtet man dies jeweils für die unterschiedlichen Spannungsebenen, fällt auf, dass die 220kV – Ebene nahezu grundsätzlich mit zwei Stromkreisen je Freileitungsmast betrieben wird. Die Verteilung in der 380kV - Ebene kann der folgenden Grafik entnommen werden und ähnelt sehr der gesamten zuvor beschriebenen Auswertung.

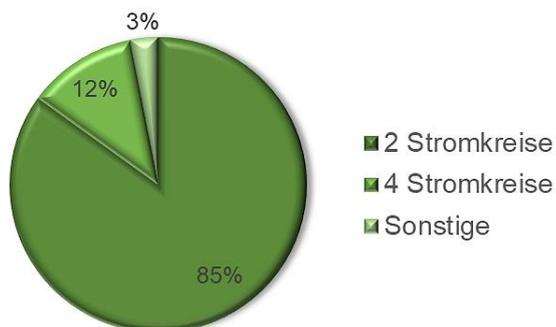


Abbildung 4-2: Anzahl der Stromkreise der 380 kV-Ebene  
Figure 4-2: Number of electric circuits of the 380 kV-level

Auch hier bestehen regionale Unterschiede. Im Ruhrgebiet sind aufgrund des hohen Platzmangels vermehrt Masten mit vier Stromkreisen vorzufinden. Dies trifft auch auf das Bundesland Niedersachsen zu, jedoch ist dies hier anders zu begründen. In Niedersachsen wird viel Strom erzeugt und muss dann über weite Strecken zu den Abnehmern in Süddeutschland transportiert werden, sodass mit vier Stromkreisen eine bessere Ausnutzung der Trassen einhergeht. In Ostdeutschland, dem Gebiet des Netzbetreibers 50 Hertz, ist eine Übertragung von vier oder mehr Stromkreisen eine absolute Ausnahme, da diese Region hauptsächlich Strom für den eigenen Verbrauch produziert und die zu überbrückenden Entfernungen überschaubar sind.

Bezieht man sich bei der Betrachtung des Freileitungsnetzes auf die Bauart der Maste, fällt auf, dass die Maste, die zwei Stromkreise führen, in Deutschland als Einebenenmast, als Donaumast, als Tonnenmast oder als Tannenbaummast ausgeführt werden. Die Verwendung von Portalmasten kommt nahezu ausschließlich auf dem Gelände von Umspannwerken vor und die Ausführung als Deltamast wurde

unter den bestehenden Masten nicht vorgefunden. Der Donaumast ist jedoch die bevorzugte Bauart für einen Freileitungsmast in Deutschland.

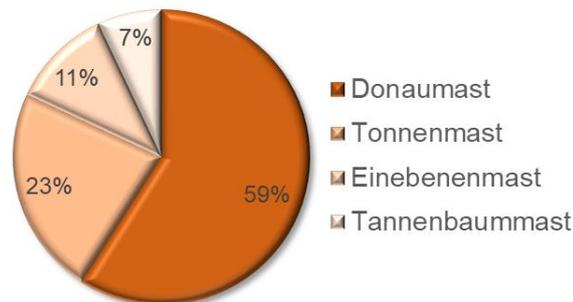


Abbildung 4-3: Mastbauarten bei zwei Stromkreisen  
Figure 4-3: Mast types with two electric circuits

Zusätzlich ergab die Untersuchung des Bestandsnetzes, dass im Höchstspannungsnetz im Regelfall keine Einebenenmaste eingesetzt werden. Dies findet man nur im Gebiet des Netzbetreibers 50 Hertz vor. Dort sind fast 40% der Freileitungsmaste als Einebenenmast, beinahe 50% als Donaumast und die Restlichen als Mast mit mehr als zwei Querträgern konzipiert.

Betrachtet man im Anschluss die Bauart der Masten, die vier Stromkreise führen, fällt auf, dass bis auf wenige Ausnahmen erweiterte Tonnenmaste und erweiterte Tannenbaummaste zum Einsatz kommen. Der Mast wird häufig als Tonnenmast ausgeführt, wenn es sich um die Übertragung von vier Stromkreisen gleichen Spannungsniveaus handelt, da sich so der Vorteil, dass je zwei Leiterseile je Traverse und Seite angebracht werden können, ausnutzen lässt. Der Tannenbaummast bildet hingegen seine Vorzüge bei der Übertragung von Strom unterschiedlicher Spannungsebenen aus. Die insgesamt sechs Leiterseile der niedrigeren Spannungsebene werden nebeneinander auf der untersten Traverse geführt, während die Leiterseile des höheren Spannungsniveaus je im Dreieck auf den oberen beiden Traversen angebracht werden.

Die Analyse der geplanten Freileitungsmasten ergab, dass besonders das Höchstspannungsnetz ausgebaut werden soll und weniger die 220kV- Ebene. Wie bereits beschrieben, ist der Donaumast die meist angewandte Bauart für die Übertragung von zwei Stromkreisen, jedoch wird bei den geplanten Trassen auch häufig auf den Tonnenmast zurückgegriffen. Dies lässt sich so erklären, dass die Hersteller und Netzbetreiber mehr auf eine Art Baukastensystem setzen. Dies bedeutet, dass alle Freileitungsmasten aus derselben Grundplattform, einem unveränderlichen oberen Mastabschnitt inklusive der Traversen und einem in der Höhe anpassbaren unteren Teil bestehen. Damit geht einher, dass der obere Mastabschnitt für die größte Belastung in der gesamten Trasse ausgelegt ist.

Zudem nutzen die Betreiber den Um – und Neubau der 380-kV-Trassen dazu, die 110 kV-Ebene auszubauen und planen daher in der Regel eine Übertragung von vier Stromkreisen, sodass dieser Anteil an Masten, die vier Stromkreise übertragen können, in der Gesamtstatistik ansteigen wird. Dafür kommt bevorzugt der erweiterte Tonnenmast zum Einsatz, an dem die niedrigere Spannungsebene vollständig an der untersten Traverse geführt wird.

Bezüglich der Funktion der Masten ist auffällig, dass an den Punkten, an denen die Trassenrichtung geändert wird, Abspannmaste vorzufinden sind und an den anderen Punkten größtenteils Tragmaste. Dabei werden die Tragmaste immer als einfache Tragmaste und nicht als Winkeltragmaste konstruiert. Über die Anzahl und die Verwendung von Verdrillmasten kann auch nach umfassender Recherche keine Aussage getroffen werden. In den untersuchten Planungsunterlagen kommen keine Kreuzungen zweier Leitungen vor, sodass auch der Einsatz von Kreuzungsmasten wegfällt. Falls ein Mast Leitungen mehrerer Trassen trägt, dann in der Funktion des Abzweigmastes.

Aufgrund des eben benannten Baukastenprinzips ist die Tragfähigkeit der Masten in vielen Fällen nicht ausgenutzt. Dementsprechend lässt sich keine fundierte Aussage über den Zusammenhang zwischen der Spannweite der Maste und ihrer Höhe treffen. Ein Vergleich dieses Verhältnisses zeigt, dass die Werte bis zu 60% abweichen, obwohl die Unterschiede durch die Geländehöhe bereits berücksichtigt wurden.

Jedoch lassen sich die Abmessungen der Maste in Abhängigkeit ihrer Bauart und Funktion ableiten. Tragmaste sind in ihrer Grundhöhe 5,0 m höher als Abspannmasten, da durch die schlaff hängenden Isolatoren ein größerer Seildurchhang zu kompensieren ist. Zudem sind die Maste der 380kV-Ebene mit einer Höhe zwischen 56 m und 86 m deutlich höher als Maste, die die Leiter der 220kV- Ebene tragen. Bei diesen beträgt die Höhe 35 bis 45 Meter. Der Abstand zwischen den Traversen ist mit ungefähr 10 m festgesetzt und hängt nicht von der Anzahl der Stromkreise ab, sodass ein als Donaumast konzipierter Freileitungsmast grundsätzlich kleiner ausfällt als eine Alternative mit drei Traversen. Im Gegenzug dazu weist ein Donaumast mit einer Gesamtbreite von etwa 30 m je 10 m mehr auf als ein vergleichbarer Tonnenmast. Diese fünf Meter Unterschied je Traversenseite in der Breite setzen ebenso den erweiterten Tonnenmast vom einfachen Tonnenmast ab. Grundlegend besteht ein Zusammenhang zwischen der Breite und der Höhe eines Mastes. Mit einer Erhöhung eines Mastes durch eine zusätzliche Traverse geht die Verringerung der Breite um das gleiche Maß einher. Folglich sind für die weiteren Untersuchungen besonders die Bauarten Einebenenmast, Donaumast, Tannenbaummast und Tonnenmast in der Funktion eines Tragmastes oder Abspannmastes in einer 380 kV Trasse von Bedeutung.

## **4.2 Entwurf eines Freileitungsmastes: Varianten 1 bis 4** ***Draft of overhead line tower: Variant 1 - 4***

### **4.2.1 Allgemeines** ***General***

Für die Festlegung, welche Konstruktionsart und welche Gestalt für den Freileitungsmast gewählt wird, wurden nach den oben erwähnten Studien, die baukonstruktiven, statischen, herstellungstechnischen und wirtschaftlichen Kriterien, aber auch anwendungstechnische und gestalterische Anforderungen zugrunde gelegt. Zusätzlich wurde die Gründung des Mastes intensiv untersucht, um gegenüber dem herkömmlichen Gittermast, der oft auf einer großflächigen Fundamentplatte aufsetzt,

Vorteile entwickeln zu können, auch um die Herstellung der Fundamentierung weniger zeitaufwändig gestalten zu können.

Gleichzeitig wird es notwendig sein, dem Freileitungsmast eine hohe Eleganz zu verleihen, um ihn nicht als umweltzerstörendes Bauwerk zu empfinden, sondern vielmehr als modernes Bauteil darzustellen, das als Symbol der Energiewende empfunden wird. Die Windenergie ist ein zukunftsweisendes Medium unserer industriellen Gesellschaft, was mit der gestalterischen Eleganz des Mastes zum Ausdruck kommen muss.

#### 4.2.2 Elektrotechnische Anforderungen *Electro technical requirements*

Für die Gestaltung des Mastkopfes eines Freileitungsmastes sind vorrangig Anforderungen aus der Elektrotechnik einzuhalten. Der Energiebetreiber setzt durch die Planung der Energieversorgung die notwendige Übertragungsmenge des Stroms für die jeweilige Freileitungstrasse fest. Durch die topografischen Gegebenheiten wird der Lauf der Trasse, damit verbunden auch die Anzahl unterschiedlicher Masttypen, beeinflusst. Bei der Wahl des Mastbildes ist ebenfalls die Verringerung der elektrischen und magnetischen Felder, wie die Minimierung der Geräusche und Funkstörungen maßgebend. Der Einfluss der Leitungsgestaltung auf diese Größen ist in [12] zusammengestellt. Grundlegend ist die Größe der einzelnen Einflussfaktoren für die Gestaltung des Mastkopfes von den Parametern der Leitungsgestaltung bedeutend abhängig. So beeinflussen sowohl der Außenleiterabstand, der Bodenabstand, die Teilleiterzahl und der Teilleiterabstand, der Leiterquerschnitt als auch die Außenleiterfolge die technischen und gesundheitlichen Auswirkungen. Es ist stets zwischen Höhe der Maste und der Breite der Trasse abzuwägen.

Tabelle 4-1 : Einfluss der Leitungsgestaltung auf Felder, Funkstörungen, Geräuschemissionen [eigene Darstellung in Anlehnung an [12]]

Table 4-1: Influence of overhead line design on fields, radio interference, noise emissions own presentation based on [12]]

Parameter	Elektrisches Feld	Magnetisches Feld	Funkstörung	Geräusche
Vergrößern des Außenleiterabstandes	↑	↑	↓	↓
Erhöhen des Bodenabstandes	↓	↓	↓	↓
Erhöhen der Teilleiteranzahl	↑	→	↓	↓
Erhöhen des Leiterquerschnitts	→	→	↓	↓
Erhöhen des Teilleiterabstandes im Bündel	→	→	→	↑
Außenleiterfolge mit geringer Impedanz bei Doppelleitung	↓ <sup>1)</sup>	↓ <sup>1)</sup>	→	→

↑ steigt; ↓ sinkt; → bleibt gleich;  
<sup>1)</sup> deutliche Verringerung außerhalb der Leitungstrasse

Die einzuhaltenden Abstände resultieren aus elektrischen Randbedingungen, um elektrische Überspannungen schadlos aufnehmen zu können. Elektrische Überspannungen können entweder betriebsintern oder infolge von Blitzeinschlägen entstehen. Ein entfernter Blitzeinschlag oder fehlerhafte Schaltvorgänge führen zu Spannungsspitzen, die als langsam ansteigende Überspannungen definiert sind. Ein direkter Blitzeinschlag hingegen führt zu einer schnell ansteigenden Überspannung.

Um Überschläge infolge der Überspannung auf umgebende Gegenstände, wie andere Leiter, geerdete Bauteile und sonstige Hindernisse, verhindern zu können, sind unterschiedliche Abstände beim Mastentwurf einzuhalten.

Diese erforderlichen Abstände, wie sie im Kapitel 2.2.2 definiert sind, sind besonders bei dem Entwurf neuer innovativer Geometrien von Freileitungsmasten entscheidend zu berücksichtigen. Für das gewählte Spannungsniveau von 380 kV mit einer höchsten Betriebsspannung von 420 kV und einer Stehblitzspannung von 650 kV bei einem Kettenisolator mit 3 Stabisolatoren ergeben sich folgende Werte:

Blitzüberspannung der Isolatorkette von 1.950 kV:

- $D_{el,1} \geq 3,63$  m (Abstand Leiter – Erde)
- $D_{pp,1} \geq 4,06$  m (Abstand Leiter – Leiter)

Schaltüberspannung von 1.050 kV aus Bemessungsblitzspannung von 1.425 kV:

- $D_{el,2} \geq 3,02$  m (Abstand Leiter – Erde)
- $D_{pp,2} \geq 3,68$  m (Abstand Leiter – Leiter)

Höchste Betriebsspannung von 420 kV unter Windeinwirkung:

- $D_{50Hz\_pe} \geq 0,70$  m (Abstand Leiter – Erde)
- $D_{50Hz\_pp} \geq 1,17$  m (Abstand Leiter – Leiter)

Empirischer Werte zur Sicherstellung öffentlicher Personensicherheit:

- $D_{el,3} \geq 2,80$  m (Abstand Leiter – Erde)
- $D_{pp,3} \geq 3,20$  m (Abstand Leiter – Leiter)

Diese Abstände sind für die Entwicklung innovativer Freileitungsmaste grundlegend, um sowohl menschliche als auch technische Sicherheiten hinsichtlich der entstehenden elektrischen und magnetischen Felder gewährleisten zu können. Hier wird auf eine Differenzierung der Abstände verzichtet und, auf der sicheren Seite liegend, jeweils die Abstände  $D_{el}$  und  $D_{pp}$  angesetzt. Auch wird eine Beeinträchtigung durch andere Hindernisse wie Gebäude, kreuzende Freileitungen oder andere Fernmeldeleitungen nicht betrachtet, da lediglich grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten von Masten bzw. Mastköpfen entwickelt werden.

Maßgebend sind somit die Abstände, die sich bei Betrachtung der Blitzüberspannung der Isolatorkette ergeben. Unter Annahme eines üblichen Bodenprofils ist ein zusätzlicher Abstand von 5 m anzusetzen. Daraus folgen für die weitere Erarbeitung einer Mastgeometrie ein einzuhaltender Abstand der Leiter zum Boden von 8,63 m unter Berücksichtigung des maximalen Leiterdurchhangs in Feldmitte und ein Abstand der Leiter von 4,06 m.

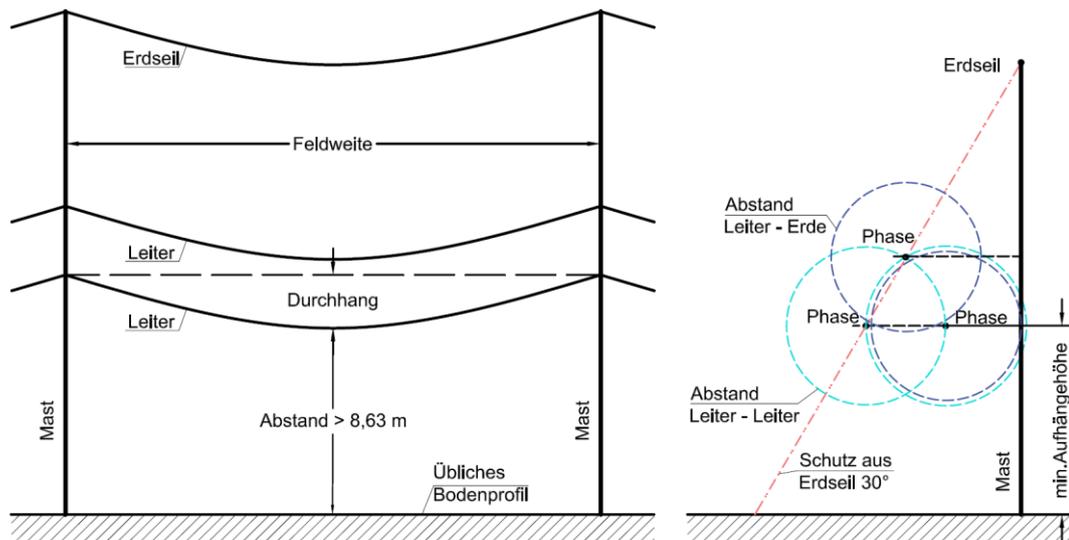


Abbildung 4-4: Ansicht Trassenabschnitt - minimale Aufhängerhöhe der Leiter und Querschnitt Trasse  
 - Anordnung für minimale Trassenhöhe

Figure 4-4: View of the pathway section - minimum height of the conductor to hang up and cross section of the pathway section – arrangement for minimum height of the pathway

Im Hinblick auf die Mastkopfgestaltung ermöglicht eine V-Form der Isolorketten verringerte Seilauslenkungen am Aufhängepunkt und damit eine kompaktere Geometrie. Durch zusätzliche Verwendung von Verbundlangstäben, die keine Verbindungselemente zwischen den Isolatoren erfordern, kann zusätzlich die Kettenlänge und die davon abhängige Masthöhe reduziert werden. Verglichen mit der Gittermastkonstruktion kann aufgrund der geringeren Breite des Mastschafts bei einem Vollwandmast eine geringere Trassenbreite ermöglicht werden.

#### 4.2.3 Statische Untersuchungen *Investigations on static performance*

Bei dem Entwurf einer Freileitungsmastkonstruktion sind neben den einzuhaltenden elektrotechnischen Bedingungen auch mechanische Anforderungen aus den Umwelteinwirkungen, Montagelasten und Ausnahmebelastungen zu berücksichtigen. Die Höhe der Mastkonstruktion wird, wie im Kapitel zuvor beschrieben, durch die inneren und äußeren Abstände festgelegt. Zusätzlich orientiert man sich an der Struktur des Referenzmasts. Somit handelt es sich um einen 49,75m hohen Tragmast mit einer Erdseilstütze und zwei Traversen für insgesamt zwei Drehstromkreise für eine 380kV Ebene. Es werden zwei verschiedene Belegungsvarianten berücksichtigt. Zum einen die volle Belegung aller Leiterplätze und zum zweiten eine Variante mit halber Belegung, also nur einem Stromkreis auf einer Seite des Freileitungsmastes. Dies dient der Einsatzvielfältigkeit und berücksichtigt die dadurch entstehenden Momentenbeanspruchungen im Mastschaft. Die Gewichtsspannweite der Leiterkabel wird analog zur Referenzmaststatik mit einem Minimalwert von 300m und einem Maximalwert von 500m angenommen. Auch hierzu werden Variationslastfälle erstellt, um alle möglichen Lastkombinationen abzudecken. Die an den Mast angrenzenden Spannungsfelder werden als gleich groß angenommen, da dies dem Einsatzgebiet von Tragmasten entspricht. Bei zu großen Spannweitenunterschieden entstehen sonst ungleichmäßige Zugkräfte, die der Tragmast nicht aufnehmen kann.

Für die Gesamtabmessungen der Mastkonstruktion gilt wie folgt:

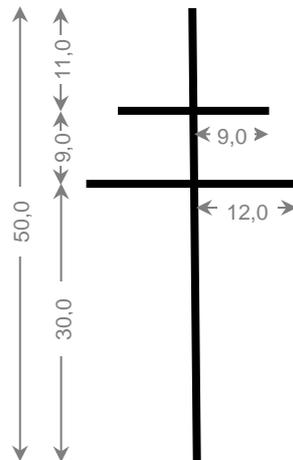


Abbildung 4-5: Abmessungen als Randbedingungen für den Entwurf der Mastkonstruktion (Skizze)  
Figure 4-5: Dimensions as boundary conditions for the design of the construction of the mast (drawing)

#### **4.2.3.1 Lastannahmen** **Load assumptions**

Für die zuvor vorgestellten Abmessungen einer Mastkonstruktion wurden im Weiteren unterschiedliche Varianten entwickelt und dabei auf bestimmte mechanische Anforderungen überprüft. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert werden nach der DIN EN 50341 diese Einflüsse in Lastfällen zusammengefasst. Um die maßgebenden Belastungssituationen in Deutschland abzudecken, wurden vorerst drei verschiedene Lastkombinationen anhand der aktuellen und geplanten Trassenführungen in Deutschland ausgesucht. Der Bundestag hat mit dem Verabschieden des Bundesbedarfsplangesetzes 36 Einzelvorhaben zum Ausbau der Höchstspannungs-Stromleitungen beschlossen. Der Netzausbau umfasst Leitungsführungen zur Anbindung von Offshore-Anlagen bis in den Süden Deutschlands. Anhand des Netzausbauplans wurden vorerst folgende relevante Bemessungssituationen ausgewählt.

A. Anschluss der Offshore-Anlagen an das Binnenland

→ Standort: Küstengebiet Nordsee

→ Windzone 4, Eiszone 2

B. Repräsentative Stromtrasse in Mitteldeutschland

→ Standort: Mitteldeutschland

→ Windzone 1, Eiszone 2

C. Repräsentative Stromtrasse in eisreichen Gebieten in Süddeutschland

→ Standort: Süddeutschland

→ Windzone 2, Eiszone 4

Im Anhang B sind die Windlasten aus Beseilung für verschiedene Bemessungssituationen zusammengestellt. Diese Bemessungssituationen berücksichtigen einerseits die starken Windlasten in nördlichen Küstengebieten sowie andererseits die aus den Gebirgsregionen bekannten hohen Eislasten. Mit der

Bemessungssituation B wird das größte Gebiet des Landes abgedeckt, sodass diese als Regelfall betrachtet wird. Die Auswertung ergab enorme Unterschiede der Lastsituationen A und C als Extremfalllasten bezogen auf den Regelfall. Die extreme Windlast in Lastsituation A erzeugt in ihren maßgebenden Lastfällen A bis C, besonders starke Biegung im Mastschaft und Mastfuß. Aus der Untersuchung ging eine bis zu 71%-ige Mehrbelastung der Bemessungssituation A und eine 60%-ige Mehrbelastung der Bemessungssituation C im Vergleich zu dem Regelfall hervor. Die Belastungen des Regelfalls treffen aber für den größten Bereich Deutschlands zu und werden somit im Weiteren als maßgebend betrachtet.

Ferner sind zusätzliche Belastungen aus dem Lastfall J und K nach DIN EN 50341-2-4 [32] zu berücksichtigen. Diese rufen durch Eiswurf, ungleichmäßige Aneisung der Leiterfelder oder auch durch Versagen einzelner Bauteile eine Torsionsbeanspruchung im Mastschaft hervor. Es wirken dabei ständige Lasten und Eislasten auf alle Leiter bei einer Temperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$ . Um den Eiswurf oder die ungleichmäßige Aneisung zu simulieren, wird zusätzlich die horizontale Zugkraft eines oder mehrerer Leiter abgemindert. Wie viele Leiter wie stark abgemindert werden, hängt von der Anzahl der Stromkreise und der Mastart ab. Bei Trag- und Winkeltragmasten wird die Horizontalzugkraft bei Einfachleitern um 50% abgemindert. Bündelleiter werden bis zu einer Isolatorkettenlänge von 2,5m um 35% im LF J und 20% im LF K, die Erdseile um 65% im LF J und 40% im LF K abgemindert. Die Zusammenstellung der Leiterzugkräfte für Lastfall J und K sind im Anhang B aufgeführt. Die Ermittlung der horizontalen Zugkräfte hängt von der Spannweite und dem Durchhang des Leiterkabels ab. Durch die Hängewirkung des Leiterkabels bildet sich beim Leiterkabel eine sogenannte Kettenlinie, diese kann durch Variation berechnet werden, was aber einen erheblichen rechnerischen Aufwand bedeutet. Für das Bemessungsmodell wird von einer Spannweite von 300 bzw. 500m und einem Durchhang von 5% ausgegangen. Durch den Faktor der Näherung und Untersuchungen statisch ähnlicher Modelle werden die horizontalen Zugkräfte mit der um den Faktor zwei erhöhten vertikalen Aufhängekraft angesetzt. Dazu wird für die innere Zugkraft angenommen, dass die Kettenlinie an den Aufhängepunkten eine horizontale Tangente besitzt.

Die Untersuchung ergab, dass die Leiterzugkräfte aus Gewichtskräften in der Eiszone 4 doppelt so hoch sind, wie die in der Eiszone 2. Bei der Betrachtung der Lastfälle weichen die resultierenden Leiterzugkräfte aus der Verkürzung des Seils infolge der Temperaturänderung, dem Eigengewicht und der Eislast abhängig von der Eiszone deutlich voneinander ab. Bei beiden Lastfällen bekommt jeder Seilpunkt an den Traversen in der Eiszone 4 etwa 38% mehr Zugkraft als in der Eiszone 2 ab. Zusammenfassend ist somit die besondere Auswirkung der Eislast auf die Querträger, sowie die zu berücksichtigende erhöhte Torsionsbeanspruchung des Mastschafts zu erwähnen.

Um die entworfenen Konstruktionsvarianten im Weiteren mit dem Referenzmast vergleichen zu können, wurden dessen Randbedingungen übernommen. Darauf wird die Konstruktion wie oben begründet für eine repräsentative Stromtrasse in Mitteldeutschland, mit Windzone 1 und Eiszone 2 entwickelt.

Die Eigenlasten der zum Tragmast gehörenden Profile werden mit RSTAB [35] automatisch ermittelt. Die Beseilung der einzelnen Leiterplätze wurde folgendermaßen gewählt:

Tabelle 4-2 : Beseilung der einzelnen Leiterplätze  
Table 4-2: Rope of the separate conductor positions

<u>Erdseilstütze:</u>	1 x NKT AY/ACS 178/38
Querschnittsfläche	$A = 216,8 \text{ mm}^2$
Seilgewicht	$G_k = 7,82 \text{ N/m}$
Seildurchmesser	$d = 19,50 \text{ mm}$
<u>Traverse 1:</u>	1 x 4 x AL/ST 265/35
Querschnittsfläche	$A = 4 \times 297,8 \text{ mm}^2$
Seilgewicht	$G_k = 4 \times 9,98 \text{ N/m}$
Seildurchmesser	$d = 4 \times 22,40 \text{ mm}$
<u>Traverse 2:</u>	2 x 4 x AL/ST 265/35
Querschnittsfläche	$A = 4 \times 297,8 \text{ mm}^2$
Seilgewicht	$G_k = 4 \times 9,98 \text{ N/m}$
Seildurchmesser	$d = 4 \times 22,40 \text{ mm}$

Die vertikalen Kräfte aus Leitergewicht werden bei geradem Trassenverlauf in Abhängigkeit der Spannweite ermittelt. Das Eigengewicht teilt sich bei gleichem Höhengniveau zu gleichen Teilen, jeweils  $0,5 \times L$ , unter den benachbarten Freileitungsmasten auf. Die Ermittlung der horizontalen Zugkräfte hängt von der Spannweite und dem Durchhang des Leiterkabels ab.

Da es sich beim Referenzmast um einen Tragmasten handelt, werden die Leiterzugkräfte allerdings nur in den Ausnahmefällen J und K berücksichtigt. In allen anderen Lastfällen herrscht, dank gleich großer Spannweiten und einem Leitungswinkel von  $0^\circ$ , ein Gleichgewicht der Leiterzugkräfte im Aufhängepunkt.

Für die Isolatoren werden pro Leiterpunkt, mit Ausnahme der Erdseilstütze, zwei Kappenisolatoren mit einem Gewicht von 500 N und einer Windanströmfläche von  $0,5\text{m}^2$  ausgewählt.

Die Windlasten auf die Leiterkabel werden wie in „2.2.3.1 Windlasten auf Leiter“ ermittelt. Im Bemessungsmodell wird von einer geraden Trassenführung ( $\theta = 0^\circ$ ) und einem über die Trassenlänge gleichbleibenden Höhengniveau ausgegangen.

Für die Belastung der Konstruktion aus Wind wird im Programm R-Stab [35], wie in 2.2.3.1 beschrieben, die Last als Referenzlast aufgetragen. Diese Belastung wird dann auf die einzelnen Stäbe, abhängig von der Art der Konstruktion und der einzelnen Angriffsflächen der Stäbe, umgerechnet.

Die für die Bemessung erforderlichen Lastfälle, die in Tabelle 16-1 im Anhang B zusammengestellt sind, werden in R-Stab geometrisch linear nach Theorie I. Ordnung berechnet. Die Lastkombinationen der Lastfälle, siehe Tabelle 16-2 im Anhang B, werden nach Theorie II. Ordnung berechnet, um Stabilitätsprobleme zu berücksichtigen. In folgender Tabelle sind die Schnittgrößen am Fußpunkt der Mastkonstruktion in Schwerachse aus der Statik des Referenzmasts dargestellt. Für die Vorentwürfe der Freileitungsmaste werden diese auf die Seilpunkte umgerechnet

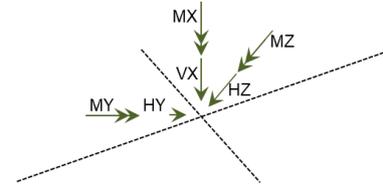
und dafür die Konstruktionen entwickelt. Dabei ist die Z-Achse parallel zu der Seilachse der Freileitung.

Tabelle 4-3 : Maßgebende Schnittgrößen für die Vorentwurfskonstruktion am Fußpunkt in Schwerachse

Table 4-3: Decisive internal forces for the preliminary design construction at the base in neutral axis

VX (kN)	HY (kN)	HZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	LK nach DIN EN
601.97	228.22	0.00	0.00	0.00	-7223.13	D
243.73	201.63	0.00	0.00	0.00	-5409.10	A*
466.02	298.67	0.00	0.00	0.00	-9189.34	A
463.09	0.00	165.64	0.00	5003.32	0.00	B
328.35	0.00	77.51	434.71	2960.47	-1261.51	K
463.09	0.00	165.64	0.00	5003.32	0.00	B
466.02	298.67	0.00	0.00	0.00	-9189.34	A
466.02	298.67	0.00	0.00	0.00	-9189.34	A

\* einseitige Belegung



#### 4.2.3.2 Tragkonstruktion: Variante 1-4 Construction of the traverse

Beim dem Entwurf einer Freileitungsmastkonstruktion ist neben den einzuhaltenden elektrotechnischen Bedingungen und mechanischen Anforderungen auch die Verringerung des Montage- und Instandsetzungsaufwands eine der wichtigsten Aufgaben. Konträr zu der Gittermastkonstruktion mit ihrer Kleinteiligkeit wurden Konstruktionen untersucht, die größere Bauteile und somit weniger Anschlusspunkte aufweisen.

##### Variante1: Vollwandrohr zylindrisch

Zum einen ist für den Abtrag der rein vertikalen Kräfte ein kreisförmiges Hohlprofil für den Freileitungsmast die geeignetste Konstruktion. Zum anderen ist aus der rein fertigungstechnischen Sicht die Herstellung eines zylindrischen Rohres ebenfalls die günstigste Variante. Für diese Variante 1 wurde ein FE-Model mit RSTAB [35] entwickelt. Um die inneren Schnittgrößen zu ermitteln, wurden realitätsnahe, maßgebende Einwirkungen am System generiert. Damit konnten die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der Rohrkonstruktion bestimmt werden. Die Blechdicken wurden dabei so gewählt, dass bei der Querschnittsklassifizierung die Querschnittsklasse 4 ausgeschlossen werden konnte. Für Rohrquerschnitte unter Biegebeanspruchung gibt die DIN EN 50341-1 [31] zur Einhaltung der Querschnittsklasse 3 Kriterien vor. Dabei ist das Verhältnis des Rohrdurchmessers zu der Blechdicke wie folgt zu begrenzen.

$$D_a / t \leq 176 \cdot \varepsilon^2 \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit:

$D_a$  : Außendurchmesser des Rohres

$t$  : Dicke

$$\varepsilon^2 = \sqrt{235/f_y} : \quad \text{mit } f_y : \text{ der Nennwert der Streckgrenze in N/mm}^2$$

Bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit wurden die nach der DIN EN 50341 vorgegebenen Grenzen für eine einstiellige Mastkonstruktion eingehalten. Bei einem Tragmast ist die zulässige Verformung auf 4% der Gesamtlänge begrenzt. Die vorliegende Auslenkung von etwa 800 mm befindet sich deutlich unter dem Grenzwert, sogar unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Schlupfbildung aus der Verbindung der beiden Rohrteile.

In Abbildung 4-6 sind das FE-Modell aus RSTAB [35], das statische System mit der Verformungsfigur für den Grundzustand der Gebrauchstauglichkeit und die Ausnutzungsgrade der Profile für den Grundzustand der Tragfähigkeit dargestellt.

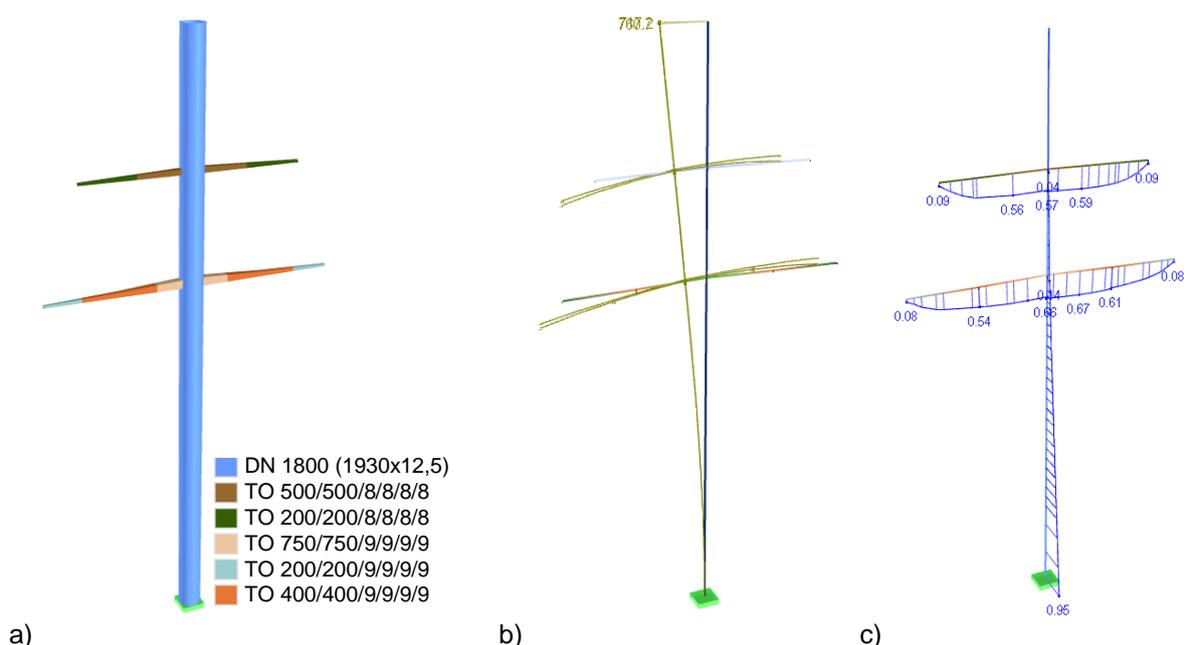


Abbildung 4-6: Variante 1: a) FE-Modell, b) Verformung GZG (Faktor 5), c) Ausnutzungsgrad GZT  
 Figure 4-6: Variant 1: a) FE-model, b) deformation (factor 5), c) utilization factor

Nach der Optimierung der Abmessungen ließ sich ein 90%-iger Zuwachs der Stahltonnage im Vergleich zu der Gittermastkonstruktion des Referenzmastes feststellen. Demzufolge und wegen des massiven Erscheinungsbildes aus architektonischer Sicht wurde diese Variante nicht weiterverfolgt. Um dieser optischen Massivität des Rohres entgegenzuwirken, wurde nach Alternativen gesucht. Hieraus entstanden zwei Varianten, die parallel untersucht wurden.

### **Variante 2: Vollwandrohr konisch**

Wie in Abbildung 4-6 c) zu erkennen, ist der Mastschaft am Fuß am stärksten und die Erdseilstützenspitze am wenigsten beansprucht. Diese Tatsache resultiert aus der dominierenden Biegebeanspruchung der Konstruktion, deren statisches System dem eines Kragarms gleicht. Für die Optimierung der Konstruktion wurde demnach der Querschnitt des Vollwandrohres über die Höhe nach oben verjüngend konisch strukturiert. Die Konizität des Rohres beträgt dabei 15mm/m. Da der Mastschaft mit seiner Höhe von 50 Meter nicht in einem Stück gefertigt werden kann, wird er zu

transportablen Abschnitten aus mehreren Stücken zusammengesetzt. Bei der Entwicklung dieser Abschnitte wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Rohrstücke an beiden Enden die gleiche Dicke aufweisen, damit sie aus einem Blech hergestellt werden können. Die Staffelung der Durchmessergrößen wurde wie oben erwähnt affin zu der Beanspruchung ausgelegt.

Die Optimierung ermöglicht eine konstante Ausnutzung des Mastschaftes. Die Bestimmung der vorhandenen Auslenkung der Konstruktion an der Mastspitze wurde wie auch schon bei der Variante 1 in einer Ergebniskombination unter der Belastung nach Lastfall A oder D gemäß DIN EN 50341 aber mit Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_f = 1,00$  durchgeführt. In der folgenden Abbildung ist die Konstruktion dieser Variante, mit ihrer Auslenkung und Ausnutzung der Querschnitte übersichtlich dargestellt. Nähere Ergebnisse der statischen Analyse sind dem Kapitel 16.1 zu entnehmen.

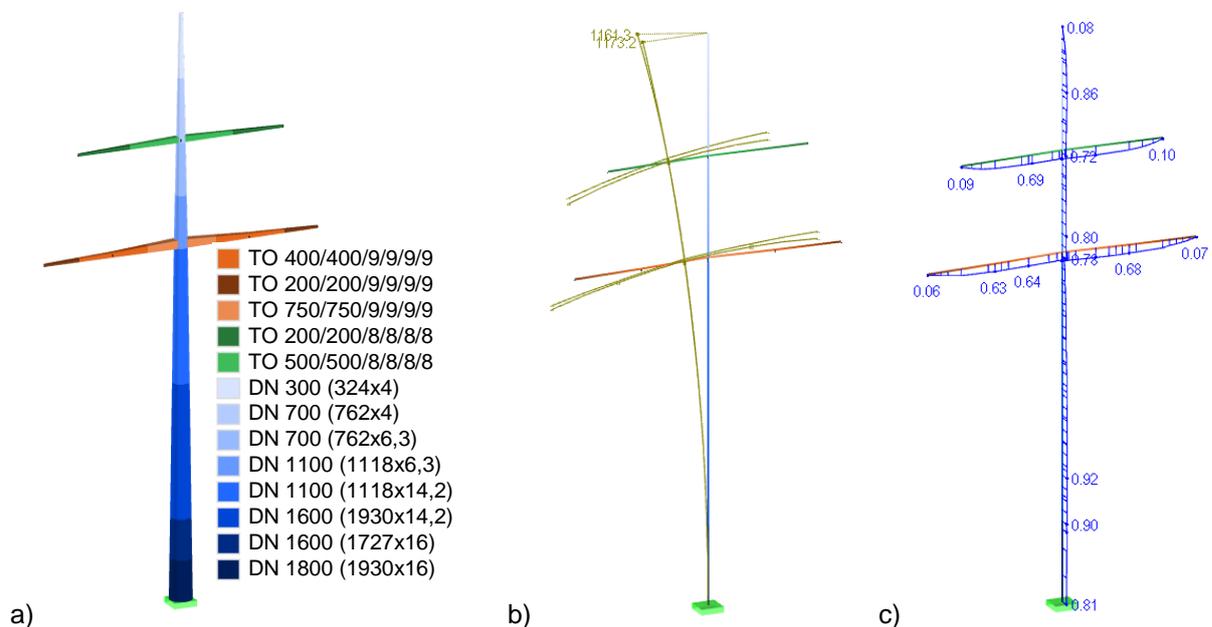


Abbildung 4-7: Variante 2: a) FE-Modell, b) Verformung GZG in mm (Erhöhungsfaktor 5),  
 c) Ausnutzungsgrad GZT

Figure 4-7: Variant 2: a) FE-Model, b) Deformation serviceability limit state in mm (increase factor 5),  
 c) percentage of utilization ultimate limit state

### Variante 3: Gitterstrukturrohr zylindrisch

Um dem massiven Eindruck der zylindrischen Variante entgegen zu wirken, analysierte man zwei Varianten. Mit der nachfolgenden Ausführung des Mastschaftes wurde die zylindrische Vollwandrohrkonstruktion durch ein Rohr, welches aus einem Blech mit Gitterstruktur hergestellt wird, ersetzt.

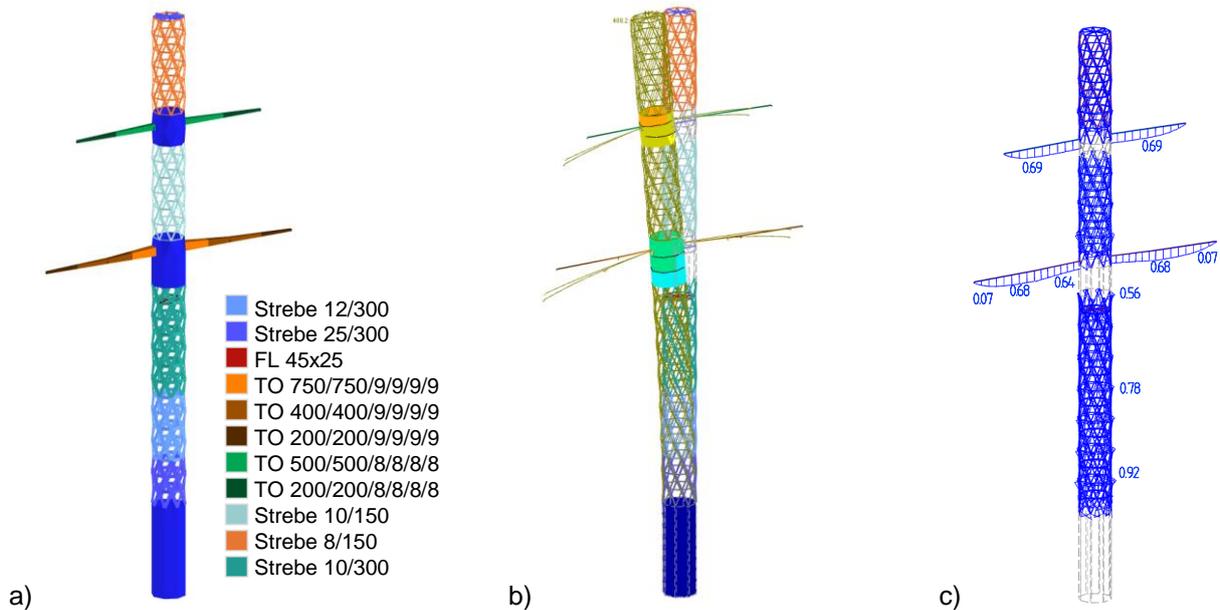


Abbildung 4-8: Variante 3: a) FE-Modell, b) Verformung GZG in mm (Erhöhungsfaktor 7),  
 c) Ausnutzungsgrad GZT

Figure 4-8: Variant 3: a) FE-Model, b) Deformation serviceability limit state in mm (increase factor 7), c)  
 percentage of utilization ultimate limit state

Durch das Auflösen der massiven Struktur versuchte man der Konstruktion einen Anblick, der an die klassischen Freileitungsmasten aus Stahlgitterstäben erinnert, zu verleihen. Um der Konstruktion eine architektonische Eleganz zu geben, wurden dabei unterschiedliche Gittergrößen untersucht (siehe Kapitel 4.2.4.3). Abhängig von der Gittergröße veränderten sich auch die Abstände zwischen den Traversen.

Die Membrantragwirkung des kreiszylindrischen Querschnitts des Rohres der bisherigen Varianten bewirkte eine günstige Lastabtragung. Durch die Auflösung dieser Membranstruktur müssen die Rohre der Variante 3 infolge den statischen Untersuchungen aus dickeren Blechen hergestellt werden. Durch die verminderte Steifigkeit der Konstruktion wurde ebenfalls eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers notwendig. Außerdem mussten Stücke der Rohrkonstruktion teilweise auch nicht gelocht konstruiert werden, da an den Stellen mit den ankommenden Traversen und im Fußbereich sonst die Anschlusskonstruktionen sehr aufwendig wären. Dieses führte ferner zu einer enormen Vergrößerung der Tonnage gegenüber der Gittermastkonstruktion.

Bei der Entwicklung des FE-Modells mit RFEM (Dlubal) wurden die Ausfachung als Stabwerksmodell und die lokalen Vollwandrohrschüsse als Flächentragwerk idealisiert. Die Möglichkeit der Optimierung lag in einer Anpassung der Blechstärken an die vorhandenen Beanspruchungen. Durch die Vergrößerung der Blechdicke gewinnt die Konstruktion an Stabilität und kann somit auch im Durchmesser schlanker gestaltet werden. Diese Maßnahme muss allerdings bei der Herstellung der Rohre berücksichtigt werden, da größere Dicken des zu formenden Bleches mehr Aufwand bedeuten. Durch die notwendigen größeren Kräfte während des Umformprozesses wird im Rohr auch ein höherer Eigenspannungszustand erzeugt. Demnach ist der Umformgrad an die Materialstärke anzupassen. Bei der Längsnahtrohrherstellung laut

[17] ist die Umformung bis zu einem Rohrdurchmesser von 1620mm möglich. Dabei kann als Vormaterial ein Grobblech mit der Wanddicke von bis zu 40 mm verwendet werden.

Nach der Optimierung der Konstruktion sind die gelochten Rohrstücke bis maximal 83 Prozent ausgenutzt. Im Übergang von den gelochten zu den Vollwandrohren konzentrieren sich die Kräfte und beanspruchen die Konstruktion stark lokal.

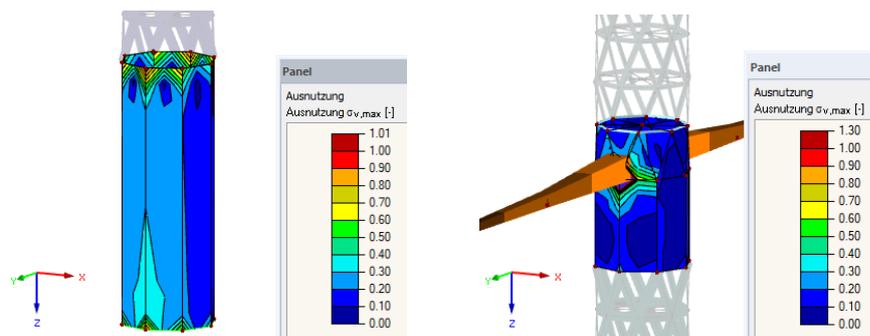


Abbildung 4-9: Variante 3: Ausnutzungsgrad der Flächen in den Übergangsbereichen GZT  
Figure 4-9: Variant 3: Utilisation rate of the areas in the transition sectors ultimate limit state

Dies resultiert einerseits aus der idealisierten FE-Modellierung durch die notwendige Umlenkung der Kräfte in den Kanten, andererseits sammeln sich die Kräfte wegen der Ausfachung in einem Punkt. Um dem entgegen zu wirken, wird die Anordnung von Steifen in diesen Bereichen unumgänglich. Auch dies wird dazu führen, dass das Gewicht dieser Variante sehr von dem der bisher vorgestellten abweicht.

Zusammenfassend ist es bei dieser Variante leider nicht gelungen der Konstruktion die entstandene unbeholfene Wirkung aus architektonischer Sicht zu nehmen.

#### **Variante 4: Vollwandrohr konisch-Vierfußsockel**

Einer der wichtigsten Faktoren zur Optimierung der Konstruktion ist unumgänglich auch die Optimierung ihrer Gründung. Diese wurde sowohl im Hinblick auf die Minimierung des Materials als auch auf die Verringerung des Bauaufwands bzw. der Bauzeit untersucht.

Bei den bisherigen Varianten findet die Einleitung der Lasten in den Baugrund in einem Punkt statt. Dazu resultiert aus der Belastung eine hohe Biegebeanspruchung am Fuß des Mastes. Diese muss unvorteilhaft und erzwungen unterhalb der Geländeoberkante entweder mit einer umfangreichen Flachgründung, ähnlich wie im Gittermastbau, oder durch eine Verteilerplatte mit Verpresspfählen abgetragen werden. Um diesbezüglich eine wirtschaftliche und ökologische Lösung zu entwickeln, wurde der Mastschaft in eine Mastfußkonstruktion aufgelöst. Durch die Aufspreizung der Mastfüße konnte ein Hebelarm zwischen den Lagerpunkten erzeugt werden. Die daraus resultierende Biegemomenten Tragfähigkeit oberhalb der Geländeoberkante ermöglicht die Verwendung weniger umfangreicher Baugrubenverbauten. Die Mastfußkonstruktion besteht aus vier Füßen und einer Übergangskonstruktion zum Mastschaft. Mit der geraden Anzahl an Füßen ist es der Konstruktion möglich auf die hauptsächlich gerichtete Belastung auf den Freileitungsmast zu reagieren. Maßgebend wird die

Richtung der Windlast senkrecht zu der Seilachse, der man mit der unterschiedlichen Spreizung der Füße in beiden Richtungen entgegenwirken kann.

In Abbildung 4-10 ist das FE-Modell der Vier-Fuß-Variante dargestellt.

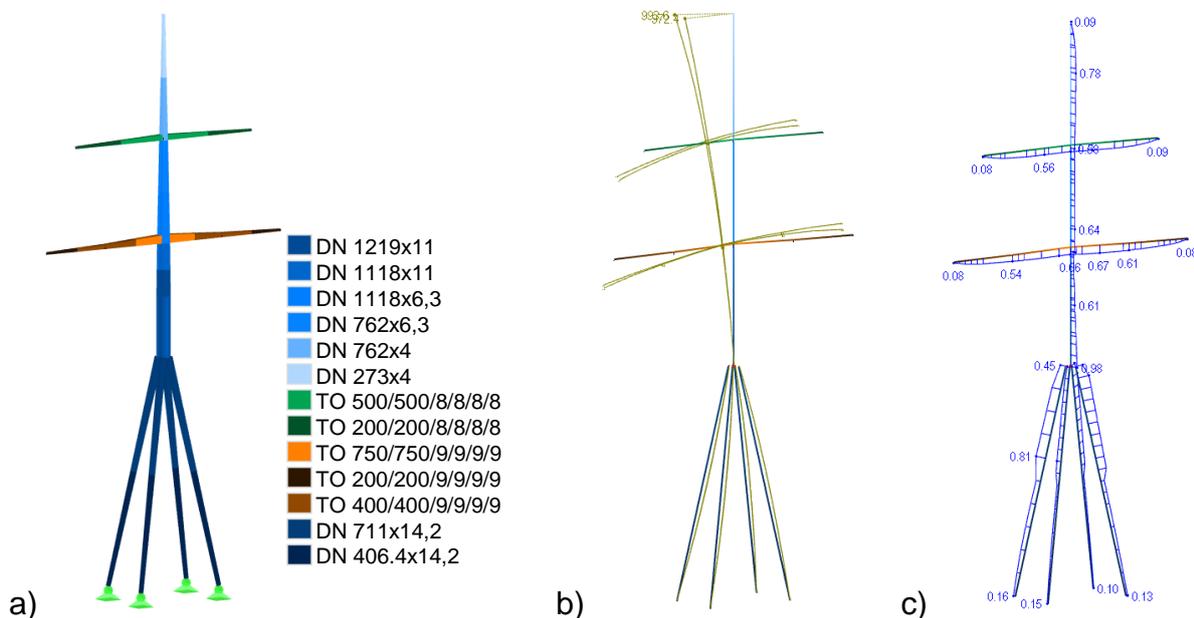


Abbildung 4-10: Variante 4: a) FE-Modell, b) Verformung GZG in mm (Erhöhungsfaktor 5), c) Ausnutzungsgrad GZT

Figure 4-10: Variant 4: a) FE-Model, b) Deformation serviceability limit state in mm (increase factor 5), c) percentage of utilization ultimate limit state

Die einzelnen Profile der Mastfußkonstruktion werden dominierend durch Druck- bzw. Zugkomponenten resultierend aus der Biegebeanspruchung belastet und erfahren lediglich lokal Biegung aus der direkten Windlast. Daher ist für die Stabilität der Konstruktion eine gelenkige Lagerung ausreichend. Folglich konnten die Profile der Mastfüße nach unten hin verjüngend ausgebildet werden. Die Ausbildung des Mastschafts ist an den Grundgedanken der Variante 2 angelehnt. Die Querschnittgröße des Schaftes nimmt mit der Höhe ab und passt sich so den Beanspruchungen an. Dieses ist auch aus dem Ausnutzungsgrad der Querschnitte ersichtlich.

Wie auch bei den oben vorgestellten Varianten fand die Bestimmung der Tragfähigkeit mit Hilfe eines FE-Modells in RSTAB statt. Um das Stabilitätsversagen des Gesamtsystems bewerten zu können, führte man mit dem Zusatzmodul RSKNICK eine Eigenwertanalyse durch. Damit wird der kritische Lastfaktor für die zugehörige Knickfigur ausgegeben, die Auskunft über die stabilitätsgefährdeten Bereiche gibt. Wie in der Abbildung 4-11 dargestellt, ist die Fußkonstruktion an sich sehr stabil. Mit Hilfe dieser wird auch die Knicklänge des Mastschaftes verkürzt, sodass eher der Mastschaft maßgeblich zu der Auslenkung an der Mastspitze beiträgt.

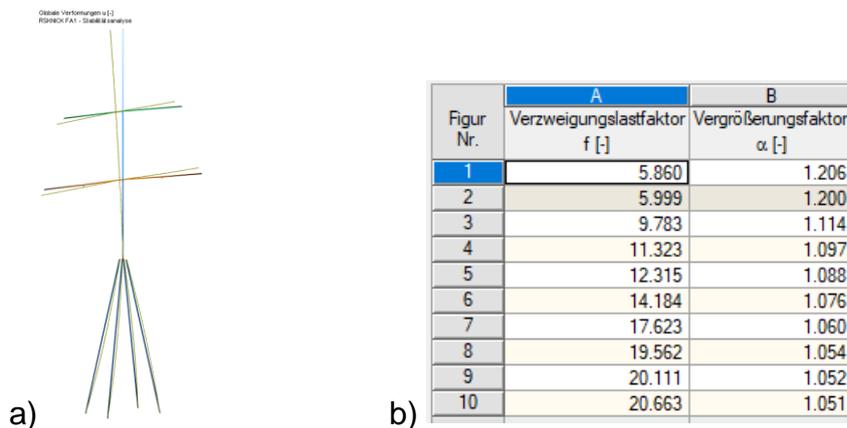


Abbildung 4-11: Variante 4: a) Knickfigur Nr. 1, b) Verzweigungslastfaktoren in Abhängigkeit von der Knickfigur nach RSKNICK [36]

Figure 4-11: Variant 4: a) Buckled shape no.1, b) Factors of the load at the branching point depending to the buckled shape according to RSKNICK [36]

Diese aufbereitete Knickfigur konnte demnach an die Zusatzmodule STAHL EC3 zur Bemessung des Systems weitergegeben werden. Es wurden Querschnittsnachweise nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.9 und 6.2.10 für die Beanspruchung der Konstruktion aus Doppelbiegung, Querkraft, Torsion und Normalkraft durchgeführt. Da die Stäbe hauptsächlich auf Druck und Biegung beansprucht sind, wurden entsprechende Stabilitätsnachweise geführt.

Bei der Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Anforderungen nach [32] erfüllt. Die Auslenkung mit knapp einem Meter an der Mastspitze ist weit unterhalb der Grenze von vier Prozent der Gesamthöhe der Konstruktion, obwohl es sich hierbei nicht direkt um einen einstieligen Mast handelt und nach DIN EN 50341-2-4 keine Verformungsgrenzen für derartige Konstruktion einzuhalten sind. Bezieht man sich bei der Verformungsbegrenzung nur auf die Höhe des Mastschafts (4% von 30m sind 1,2m), wird diese jedoch ebenfalls eingehalten.

Um die Höhe und die Form der Mastfußkonstruktion festzulegen, wurden sowohl statisch-konstruktive Studien als auch architektonische Proportionsstudien (siehe Kapitel 4.2.4.1) durchgeführt. Dabei sollten sowohl die Höhe als auch die Breite der Vier-Fuß-Konstruktion variieren. Um die statische Untersuchung zu automatisieren, wurde ein Excel-Datenblatt entwickelt. Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug daraus. Die grün hinterlegten Daten sind vom Anwender einzugeben.

Tabelle 4-4 : Excel-Datenblatt der statisch-konstruktiven Studie für die Formfindung der Mastfußkonstruktion  
 Table 4-4: Excel data sheet of the static-constructive study to find out the form of the mast foot construction

	A	B	C	D	E	F	G
9	<b>Material</b>			<b>Querschnitt</b>	660,00 mm		
10	Stahl	35,5 kN/cm <sup>2</sup>			17,50 mm		
12	<b>Geometrie Konstruktion</b>			Durchmesser d	66,00 cm <sup>2</sup>		
13	Höhe Vierfuß h	12,0 m		Blechdicke t	1,75 cm <sup>2</sup>		
14	Breite Vierfuß par. Traverse b	4,2 m		Querschnittsfläche A	353,23 cm <sup>2</sup>		
15	Tiefe Vierfuß senkr. Traverse d	2,5 m		Trägheitsmoment I	182406,12 cm <sup>4</sup>		
16	Abstand zur Achse Vollrohr	4,9 m		Trägheitsradius	22,72 cm		
17	Steigungswinkel par. Traverse al	3,9 °		Wiederstandsmoment	5527,46 cm <sup>3</sup>		
18	Steigungswinkel senkr. Traverse	5,9 °		Schubfläche Av	224,88 cm <sup>2</sup>		
19	Länge Stab projiziert Lb	12,2 m		Klasseneinteilung Eps	0,81		
20	Länge Stab projiziert Ld	12,2 m		d/t Verhältnis	37,71		
21	Länge Stab	13,0 m			min OKL 3		
23	<b>Schnittgrößen auf Vierfußstab verteilt</b>			<b>Eigengewicht</b>			
24	Normalkraft Nb	1040,0 kN		Mastschaft Höhe H	38,00 m		
25	Querkraft Qb	182,0 kN		Mastschaft Konizität	0,97 °		
26	Biegemoment Mb	2217,5 kNm		Mastschaft D unten	1,39 m		
27	Normalkraft Nd	676,6 kN		Mastschaft D oben	0,30 m		
28	Querkraft Qd	69,9 kN		Volumen Mastschaft	0,91 m <sup>3</sup>		
29	Biegemoment Md	895,9 kNm		Gewicht Mastschaft	7,14 to		
31	Normalkraft N	1716,6 kN		Volumen Mastfuß x4	1,32 m <sup>3</sup>		
32	Querkraft Q	251,9 kN		Gewicht Mastfuß	10,33 to		
33	Biegemoment M	2376,9 kNm			17,47 to		
35	<b>Bemessung</b>			<b>Schnittgrößen laut RSTAB</b>			
36	Druck			Normalkraft	-516,1 kN		
37	Druckbeanspruchbarkeit Nc,Rd	12539,8 kN		Querkraft Vy	307,1 kN		
38	Nachweis/Ausnutzung	10,1% OK		Querkraft Vz	-92,2 kN		
39	Doppelbiegung			Torsionsmoment Mt	-374,0 kNm		
40	Biegebeanspruchbarkeit Mc,Rd	1962,2 kNm		Biegemoment My	2106,7 kNm		
41	Nachweis/Md/Ausnutzung	83,7% OK		Biegemoment Mz	6692,9 kNm		
42	Nachweis/Md/Ausnutzung	32,3% OK					
43	Doppelbiegung + Normalkraft						
44	Normalspannung aus Biegung	31,9 kN/cm <sup>2</sup>					
45	Normalspannung aus Normalkr	3,6 kN/cm <sup>2</sup>					
46	Nachweis/Ausnutzung	99,9% OK					
47	Querkraft						
48	pl. Querkraftbeanspruchbarkeit	4609,0 kN					
49	Nachweis	4,0% OK					
50		keine Interaktion					
51	Stabilität						
52	KSL a						
53	Imperfektionsbeiwert alfa	0,21					
54	Knicklänge Lcr	9,07 m					
55	Schlankheitsgrad lamda	0,52					
56	Beiwert phi	0,67					
57	Abminderungsfaktor chi	0,92					
58	Biegeknickbeanspruchbarkeit N	10455,6 kN					
59	Nachweis/Ausnutzung	12,2% OK					

Als Randbedingung wurden die Schnittgrößen am System der Variante 2: Vollwandrohr konisch aus RStab in Excel exportiert und mit dem Datenblatt der Studie verknüpft. Damit konnten genauere Werte abhängig von der Höhe der Vier-Fuß-Konstruktion als Grundlage verwendet werden. Die Lasten konnten in Abhängigkeit von der Neigung der Füße auf diese umgerechnet werden. Für diese Beanspruchung wurden die Nachweise hinterlegt, sodass die Querschnittsabmessungen bis zu der kompletten Ausnutzung optimiert werden konnten. Abschließend konnte das Eigengewicht der Gesamtkonstruktion in Abhängigkeit von der Geometrie bewertet werden. Die Zusammenstellung der Studie ist im folgenden Diagramm dargestellt.

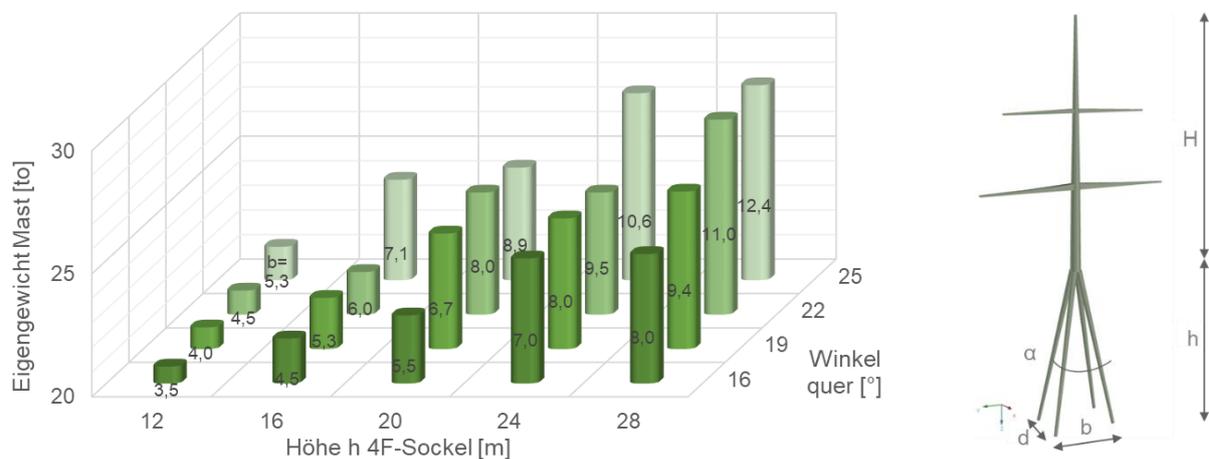


Abbildung 4-12: Studie zur statisch-konstruktiven Optimierung  
 Figure 4-12: Study about the static-constructive optimisation

Dabei stellte sich aus statisch-konstruktiver und gestalterischer Optimierung die Geometrie der Vier-Fuß-Konstruktion mit der Breite  $b = d$  von acht Metern und einer Höhe von  $h = 20$  Metern als die favorisierte Variante heraus (siehe Skizze in Abbildung 4-12).

Angelehnt an die Gründungsstrukturen der Offshore Konstruktionen betrachtete man als eine eventuelle Variante einen Drei-Fuß-Sockel. Es stellte sich früh heraus, dass

die Anzahl, wie auch die Anordnung der FüÙe der symmetrischen Spannungsverteilung des Mastschafts widersprechen.

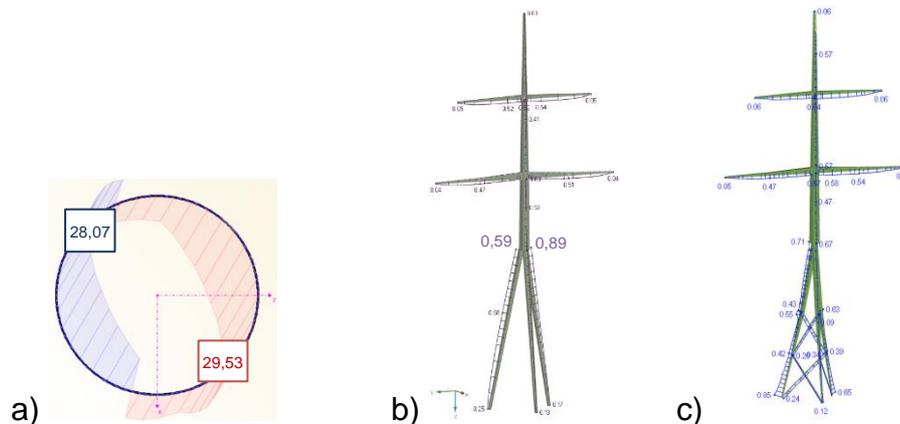


Abbildung 4-13: Variante 4a: a) Spannungsverteilung  $\sigma_{ges}$  des Mastschafts oberhalb des Sockels, b) Ausnutzungsgrad GZT, c) Ausnutzungsgrad GZT bei der Ausfachung des Sockels  
 Figure 4-13: Variant 4a: a) stress distribution  $\sigma_{ges}$  of the mast shaft above the pedestal, b) percentage of utilisation ultimate limit state, c) percentage of utilisation ultimate limit state of the base in the infill

Nach der statischen Untersuchung bestätigte sich die Vermutung und wurde in der ungleichmäßigen Ausnutzung der FüÙe bei gleichen Querschnitten ersichtlich (siehe Abbildung 4-13). Auch die Ausfachung der Sockelkonstruktion zur Verkürzung der Knicklänge der FüÙe bewirkte lediglich eine Umlagerung der Lasten, aber keine gleichmäßigere Verteilung. Aus den zusätzlichen Stäben für die Ausfachung resultiert zusätzlich ein deutlicher Anstieg der Verbindungspunkte. Durch die ungleichmäßige Verteilung der Lasten kommt es zu unterschiedlichen Auflagerkräften am Sockelfuß. Der maximal beanspruchte Fuß bekommt zweieinhalbfach größere Auflagerkräfte im Vergleich zu dem des Vier-Fuß-Sockels. Diese größeren Beanspruchungen bringen ungleiche, aber vor allem deutlich aufwendigere Fundamentkonstruktionen mit sich, sodass diese Variante nicht weiter betrachtet wurde.

Zusammenfassend wird bei der Vier-Fuß-Variante zwar 27% mehr Stahl als bei dem Gittermast verbaut, die Konstruktion erhält aber durch den Vierfußsockel aus architektonischer Sicht eine besondere Eleganz. Ferner wirkt sich die Wahl der Gründung und die wenige Anzahl der Verbindungspunkte positiv aus, sodass diese Variante im Weiteren detaillierter ausgearbeitet wurde.

#### 4.2.4 Architektonisch-konstruktive Studien *Architectonic-constructive studies*

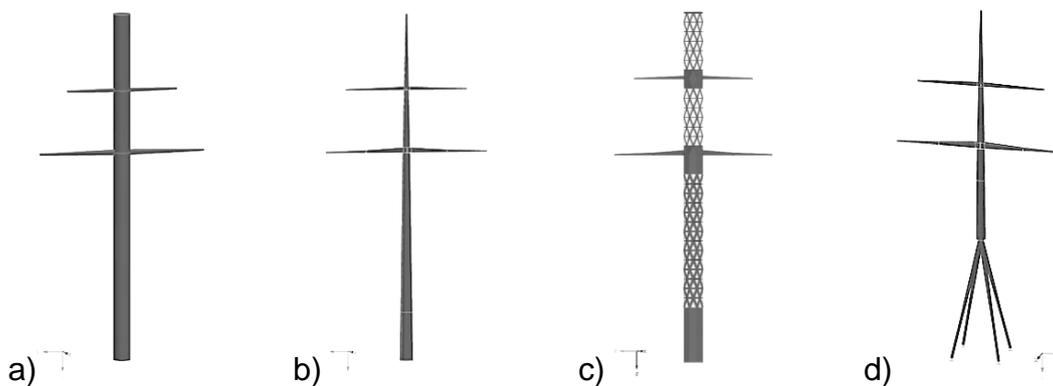


Abbildung 4-14: a) Variante 1: Vollwandrohr zylindrisch; Variante 2: Konischer Vollwandrohrmast; c) Variante 3: Gitterstrukturrohr zylindrisch; Variante 4: Vollwandrohr konisch-Vierfußsockel  
Figure 4-14: a) Variant 1: Solid tube tapered cylindrical; b) Variant 2: solid tube tapered conical; c) Variant 3: Grid structure cylindrical; d) Variant 4: Grid structure conical with four foot pedestal

Das zylindrische Vollwandrohr, siehe Abbildung 4-14 a), wurde aus gestalterischen Gründen verworfen, da es mit seinem statisch notwendigen Querschnitt zu massiv erscheint und zumindest gestalterisch nicht als Alternative zum herkömmlichen Gittermast infrage kommt.

Das gegenüber dem zylindrischen Vollwandrohr in der Herstellung sehr viel aufwändigere konische Vollwandrohr (Abbildung 4-14 b)) entwickelt eine hohe Eleganz und wird weiter untersucht.

Das Gitterstrukturrohr, siehe Abbildung 4-14 c), wurde aufgrund der wenig ansprechenden Eleganz des zylindrischen Vollwandrohres (Variante 1) untersucht, um die optische Massivität des Rohres aufzulösen und gleichzeitig eine große Materialersparnis entwickeln zu können.

Die Variante Vollwandrohr konisch-Vierfußsockel (Abbildung 4-14 d)) teilt den Freileitungsmast in seiner Höhe in zwei unterschiedliche Bauteile und gibt ihm damit gestalterisch eine ansprechende Eleganz. Gleichzeitig aber konnte damit vor allem die Fundamentierung erheblich vereinfacht werden.

**4.2.4.1 Proportionsstudien**  
**Proportion studies**

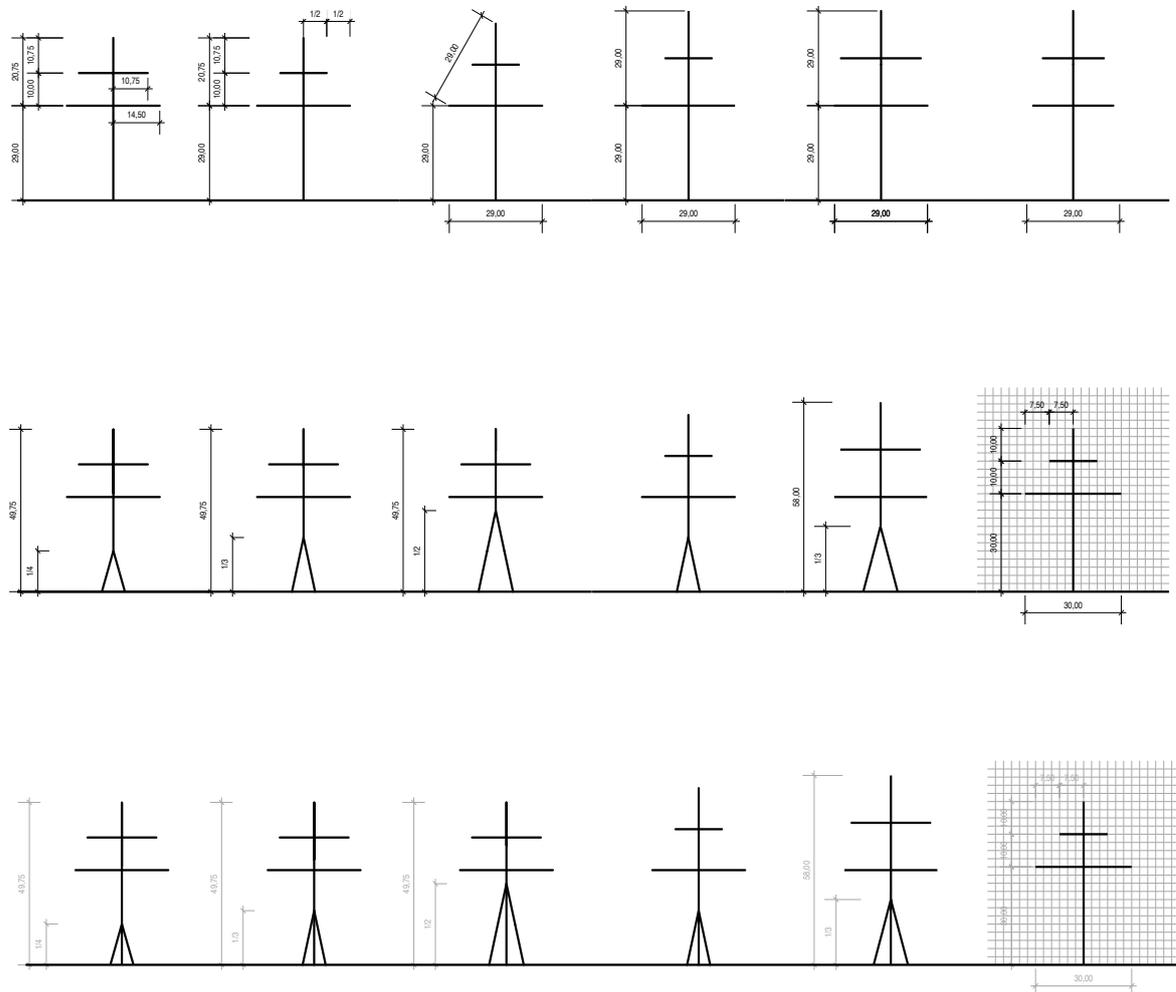


Abbildung 4-15: Proportionsstudien  
 Figure 4-15: Proportion studies

Die Abstände der Traversen, die Längen der Traversen und die Anordnung der Traversen wurden in Proportionsstudien untersucht.

In den Proportionsstudien wurde das Mast-Traverse- und Traversen-Verhältnis untereinander über elementare Grundformen, wie Ellipse, Parabel, Raute, als Umfassungsformen untersucht.

Weitere Proportionsregeln, wie der Goldene Schnitt, das Verhältnis 1:2 und das Verhältnis 1:1,4142... wurden in den weiteren Abbildungen dargestellt. Auch die Ausbildung des Mastes als Vollwandrohr, Dreifußsockel oder Vierfußsockel wurden in verschiedenen Höhen überprüft. Wichtig war dabei ein ausgewogenes Verhältnis zur Höhe der Füße im Verhältnis zur Gesamtlänge des Mastes, sowie ein stimmiger Abstand der Traversen zueinander und, auch hier wieder, ihre Anordnung zur Gesamthöhe des Mastes.

#### 4.2.4.2 Variante 2: Vollwandrohr konisch Variant 2: Solid tube tapered tower conical

Der konische Vollwandrohrmast wurde in zwei unterschiedlichen Alternativen untersucht, mit abgespannter Traverse (Variante 2.1) und mit starrer Traverse.

##### Variante 2.1: Vollwandrohr konisch mit abgespannter Traverse

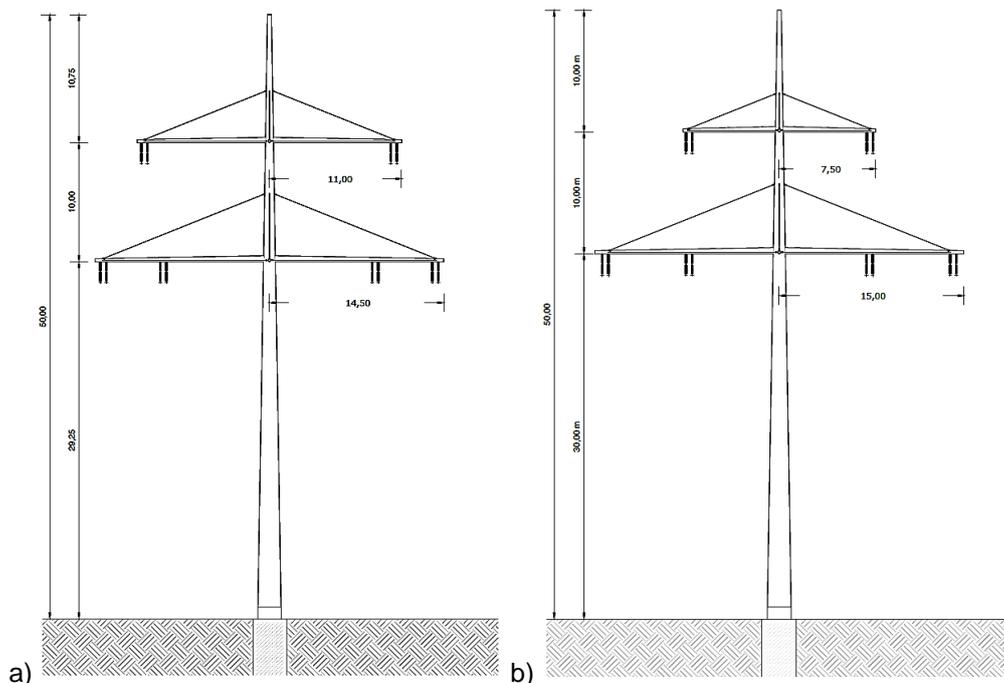


Abbildung 4-16: a) Traverse abgespannt b) obere Travers kürzer  
Figure 4-16: a) traverse tensioned b) upper traverse shorter

Die abgespannte Traverse weist eine hohe Eleganz auf und ist zudem baukonstruktiv mit geringerem Aufwand herzustellen.



Abbildung 4-17: Mast mit Vollwandrohr konisch und Traverse abgespannt  
Figures 4-17: Mast with solid tube tapered conical and Traverse tensioned

**4.2.4.3 Variante 3: Gitterstrukturrohr zylindrisch**  
**Variant 3: Grid structure cylindrical**

Grundidee war es, ein Blech mit Gitterstruktur und unterschiedlichen Gittergrößen zu untersuchen, um den Masten die Massivität zu nehmen und an die klassischen Freileitungsmasten aus Stahlstäben zu erinnern.

Die Gitterstruktur erscheint jedoch wenig elegant. Die Konstruktion wirkt unbeholfen und wird daher im Weiteren nicht mehr verfolgt.

Auch die Unterteilung des Mastes in unterschiedliche Varianten der Gitterstruktur mit variierten Gittergrößen stellt keine näher zu betrachtende Lösung dar, da sie unelegant und in der Konstruktion technisch zu aufwendig erscheint.

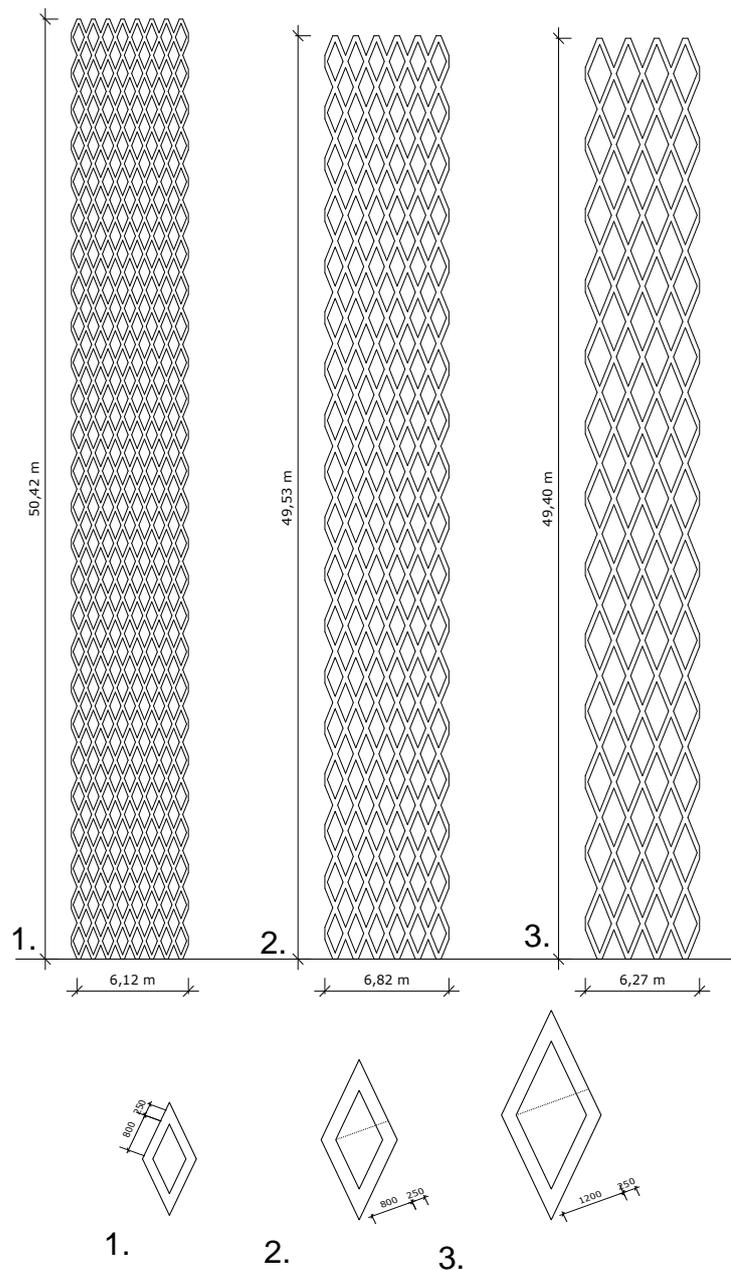


Abbildung 4-18: Unterschiedliche Gittergrößen des Mastes  
 Figures 4-18: Different grid sizes of the mast

**Variante 3.1: Gitterstrukturrohr zylindrisch**

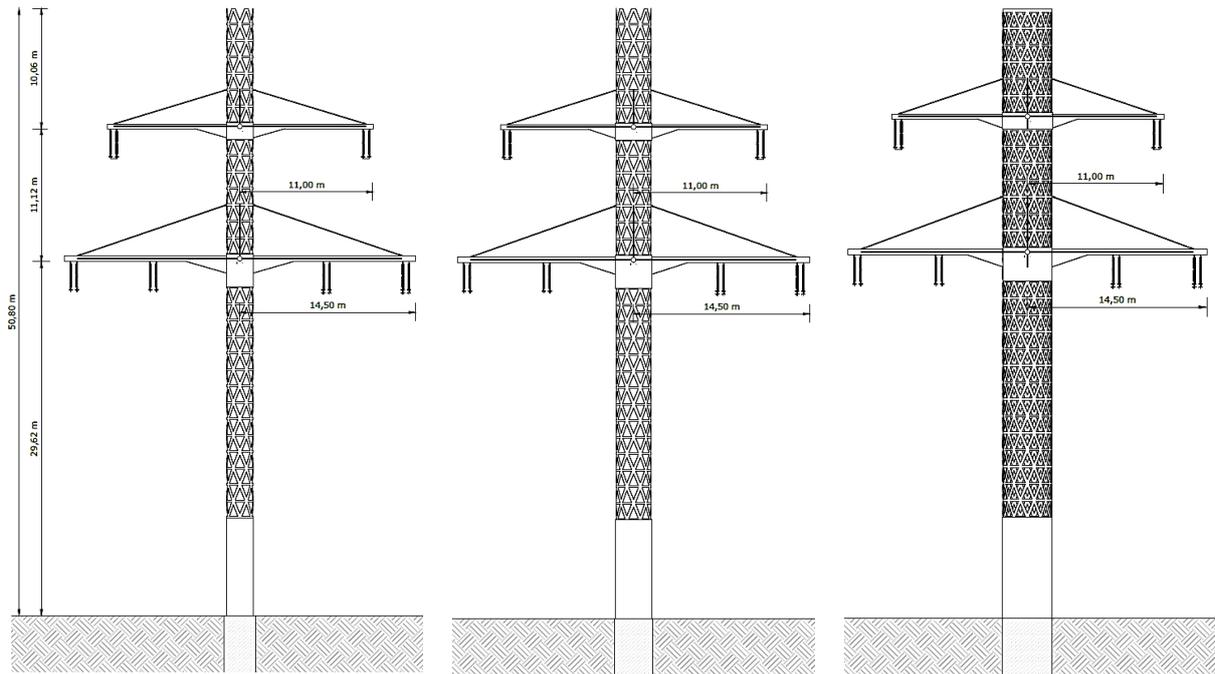


Abbildung 4-19: Gitterstrukturrohr zylindrisch  
Figures 4-19: Grid structure cylindrical



Abbildung 4-20: Gitterstrukturrohr zylindrisch mit schmalem Mast  
Figures 4-20: Grid structure cylindrical with a narrow mast



Abbildung 4-21: Gitterstrukturrohr zylindrisch mit breiterem Mast  
Figures 4-21: Grid structure cylindrical with a wider mast

Die Filigranität des Mastes kommt nicht zum Ausdruck, das Gitterstrukturmuster wirkt eher störend.

**Variante 3.2: Gitterstrukturrohr zylindrisch, Vierfußsockel**

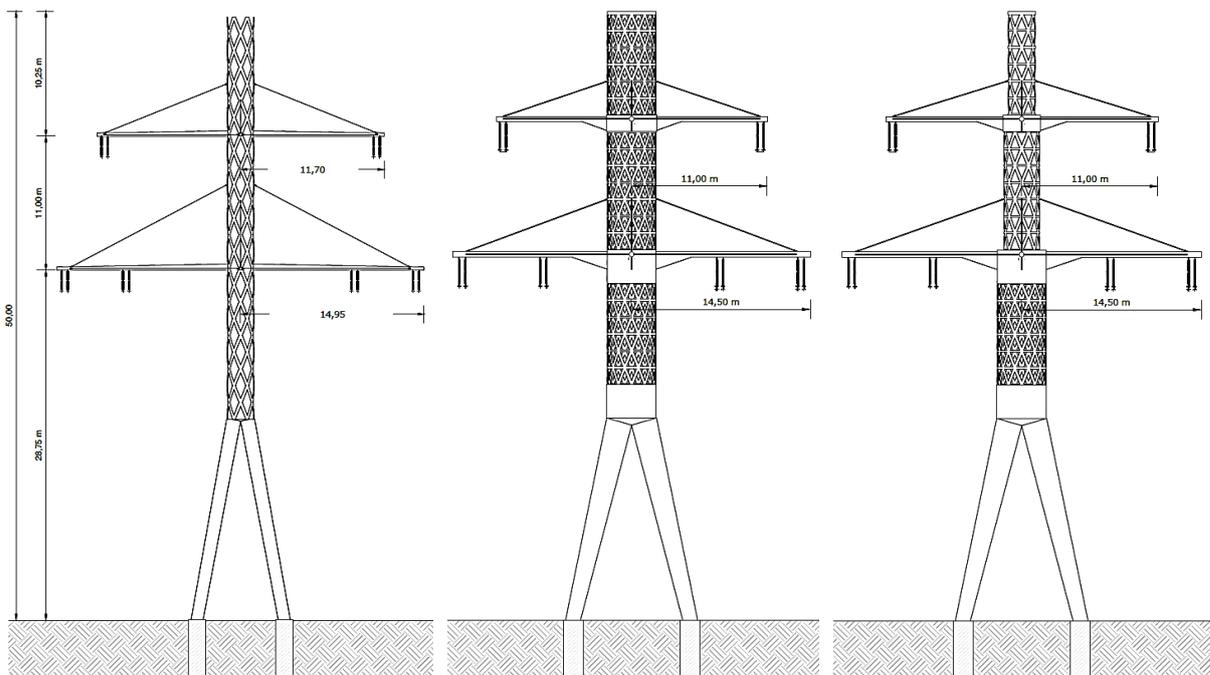


Abbildung 4-22: Gitterstruktur zylindrisch mit Vierfußsockel  
Figures 4-22: Grid structure cylindrical with four foot pedestal

#### **4.2.4.4 Variante 4: Vollwandrohr konisch mit Vierfußsockel**

##### ***Variant 4: Solid tube tapered tower conical with four-legged base***

##### ***Variante 4.1: Vollwandrohr konisch Vierfußsockel, Traverse abgespannt***

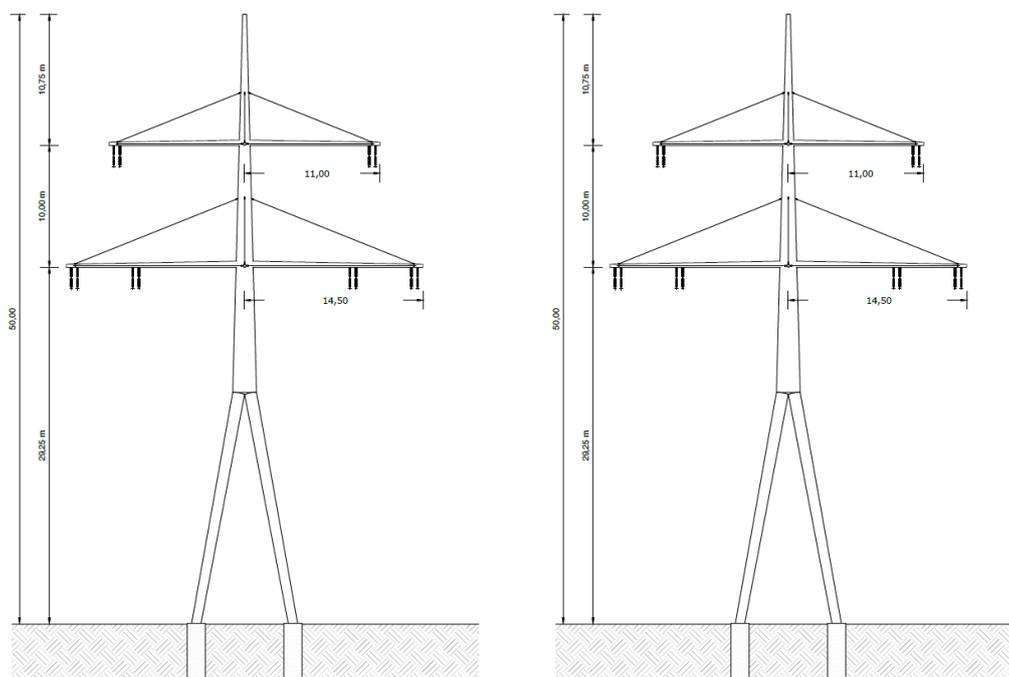


Abbildung 4-23: Mast mit Vollwandrohr konisch, Vierfußsockel und Traverse abgespannt  
Figures 4-23: Mast with solid tube tapered conical, four foot pedestral and traverse tensioned

Der Freileitungsmast dieser Variante mit den abgehängten Traversen ist nach ersten Untersuchungen wirtschaftlich darstellbar und in seinen Rohrquerschnitten in eleganter Form herzustellen.

Der Vierfußsockel gewährt der Konstruktion eine besondere Eleganz und beruht auf der Idee einer Bohrpfahlgründung, die als zeitsparende Alternative zu der Plattengründung bei den heutigen Gittermasten gesehen wird.

##### ***Variante 4.2: Vollwandrohr konisch Vierfußsockel, Traverse aufgesteckt***

Die Entscheidung fiel auf diese Variante 4.2: Vollwandrohr konisch Vierfußsockel, Traverse aufgesteckt.

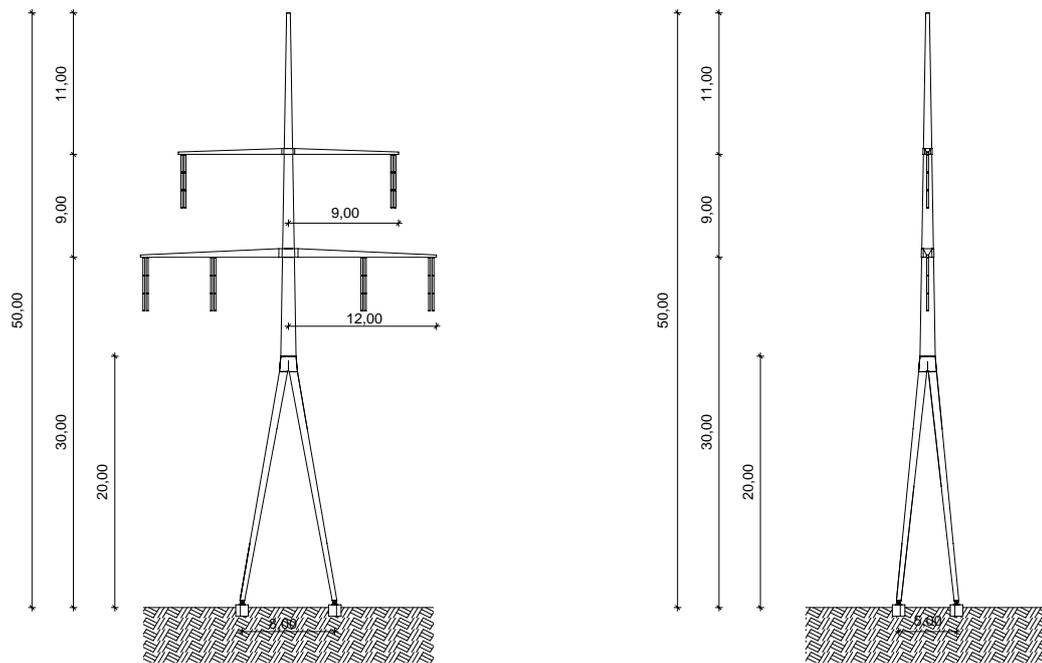


Abbildung 4-24: Mast mit Vollwandrohr konisch, Vierfußsockel und Traverse aufgesteckt  
Figures 4-24: Mast with solid tube tapered conical, four foot pedestral and traverse tensioned

Die Höhe der Füße und die Ausladung der Traversen sind statisch und proportional untersucht und bestimmt worden. Der Mast sollte möglichst filigran wirken.

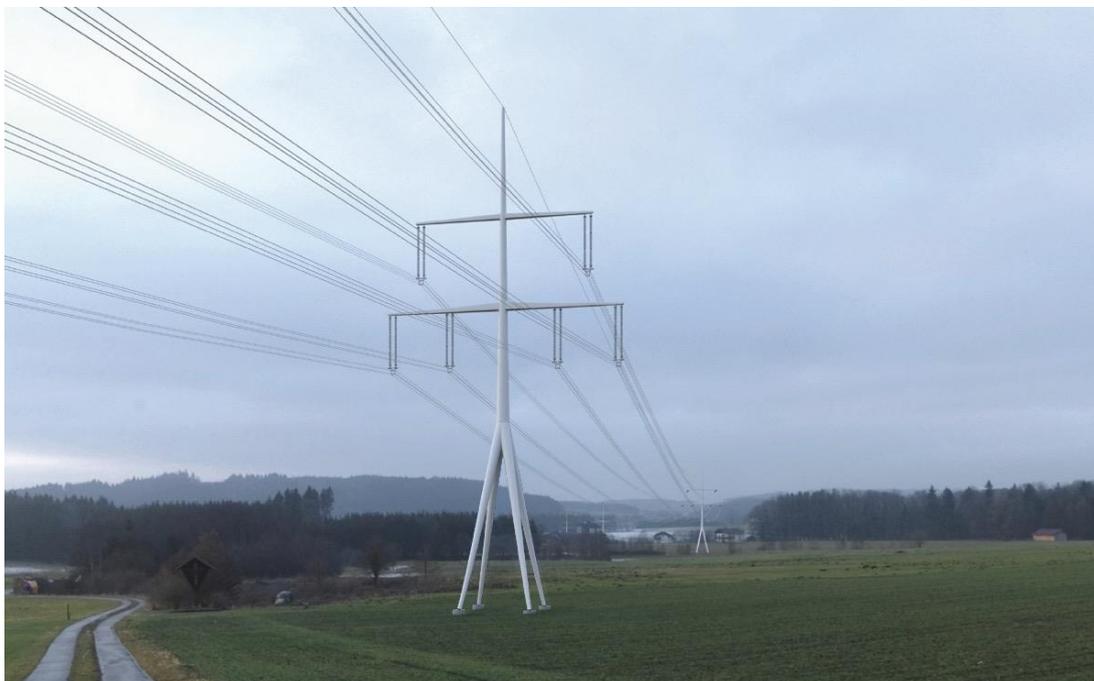


Abbildung 4-25: Vollwandrohr konisch, Vierfußsockel und Traverse aufgesteckt in der Landschaft  
Figures 4-25: Solid tube tapered conical, four foot pedestral and traverse tensioned in the landscape

Auch im landschaftlichen Raum stellt die Variante 4.2 eine elegante Lösung dar, die weiter untersucht wird.



Abbildung 4-26: Modell Variante 4: Vollwandrohr konisch Vierfußsockel, Traverse aufgesteckt  
Figures 4-26: Model of the variant 4: solid tube tapered conical, four foot pedestals and traverse plugged

In einem Modell wird die Konstruktion auf ihre architektonische Eleganz überprüft. Zuvor wurde die Höhe der Füße und die Ausladung der Traversen statisch in ihren Dimensionierungen untersucht und für gut befunden.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Anschlusspunkte, die Rohrausleger der Traversen, der Anschlusspunkt zwischen Mast und Sockel, sowie der Fußpunkt der Sockelfüße an den Fundamenten untersucht.

#### **4.2.5 Gründung** ***Foundation***

Bevor die Detailanalyse vorgestellt wird, soll hier die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Baugrund und der Konstruktion des Freileitungsmastes erfolgen. Wie bei der Variante vier erwähnt, versuchte man eine wirtschaftliche und ökologische Lösung zu entwickeln. Im Vordergrund stand die Vermeidung von umfangreichen Baugrubenverbauten. Somit ist man von der Einleitung der Kraft in den Baugrund in einem Punkt abgewichen und löste die Konstruktion in einen Vier-Fuß-Sockel auf. Zusätzlich bedacht werden musste die Anzahl der zu errichtenden Fundamente im Hinblick auf die Serienfertigung für die neu geplanten Trassen.

Während man sich bei der Stahlkonstruktion eines Freileitungsmastes auf einen bestimmten Typ konzentrieren kann, fällt es bei der Gründung schwer eine Typisierung

vorzunehmen. Der „Werkstoff“ Baugrund mit seinen Materialparametern ist von den geologischen Gegebenheiten abhängig. Es wurden dennoch zwei oft anzutreffende Baugrundformationen untersucht. Bei dem Modellboden I handelt es sich um einen geschichteten bindigen Boden mit in der Tiefe zunehmender Konsistenz. Modellboden II besteht aus einem nicht bindigen Boden mit in der Tiefe zunehmender Lagerungsdichte. Oberhalb dieser gewachsenen Bodenformationen wird in beiden Fällen eine schlecht tragfähige Auffüllung in einer Schichtdicke von zwei Metern angenommen. Der maximale Grundwasserstand wird ab einem Meter unterhalb der Geländeoberkante angesetzt.

Tabelle 4-5 : Kenngrößen der gewählten Baugrundformationen  
 Table 4-5: Characteristics of the selected subsoil formations

Bodenkenngrößen	Symbol	Einheit	Modellboden I	Modellboden II
			Auffüllung bis -2 m	Auffüllung bis -2 m
Wichte	$\gamma/\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	19/10	19/10
Reibungswinkel	$\phi'$	°	30	30
Kohäsion	$c'$	kN/m <sup>2</sup>	0	0
Steifeziffer	$E_s$	kN/m <sup>2</sup>	5	5
charakt. Pfahlmantelreibung	$q_{s,k}$	kN/m <sup>2</sup>	0	0
charakt. Pfahlspitzendruck	$q_{b,k}$	kN/m <sup>2</sup>	0	0
			Lehmboden weich- steif, bis -6 m	Sand/Kies locker- /mitteldicht bis -6 m
Wichte	$\gamma/\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	20/11	19/10
Reibungswinkel	$\phi'$	°	25	32,5
Kohäsion	$c'$	kN/m <sup>2</sup>	5	0
Steifeziffer	$E_s$	kN/m <sup>2</sup>	10	40
charakt. Pfahlmantelreibung	$q_{s,k}$	kN/m <sup>2</sup>	50	80
charakt. Pfahlspitzendruck	$q_{b,k}$	kN/m <sup>2</sup>	0	200
			Lehmboden steif- halbfest	Sand/Kies mitteldicht dicht
Wichte	$\gamma/\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	21/11	20/11
Reibungswinkel	$\phi'$	°	25	37,5
Kohäsion	$c'$	kN/m <sup>2</sup>	15	0
Steifeziffer	$E_s$	kN/m <sup>2</sup>	30	80
charakt. Pfahlmantelreibung	$q_{s,k}$	kN/m <sup>2</sup>	120	200
charakt. Pfahlspitzendruck	$q_{b,k}$	kN/m <sup>2</sup>	1500	4000

Die aufwendiger zu erschließenden Bodenformationen wie Felsen, harte Bodenschichten, Klüfte und Hohlräume sind zusätzlich zu beachten, da diese hier nicht gesondert betrachtet werden. Grundsätzlich benötigt man im konkreten Bemessungsfall für jeden Mast ein Gründungsgutachten.

Im Weiteren werden zum Vergleich sowohl die Fundamentierung eines einstieligen Vollwandmastes als auch die der Vierfuß-Variante dargelegt.

#### 4.2.5.1 Fundamentierung eines einstielligen Stahlvollwandmasts Foundation of a one-piece steel solid tube mast

Bei dem einstielligen Stahlvollwandmast wie in den Varianten 1 bis 3 werden die Lasten in einem Punkt der Gründungskonstruktion zur Weiterleitung in den Baugrund übergeben. Die zugrunde gelegten Bodenschichtungen stellen im Sinne einer statistischen Betrachtung Regelfälle dar.

Insbesondere für die Aufnahme der Lagermomente unterhalb der Geländeoberkante ist ein Einzelfundament als Pfahlbock-System bestehend aus einer Verteilungsplatte mit Verpresspfählen notwendig. Es wurde exemplarisch für die gegebenen Lagerkräfte und Lagermomente der Variante 2 eine Gründungsvariante ausgearbeitet. In der Tabelle 4-6 sind die zugrunde gelegten Auflagerkräfte zusammengestellt.

Tabelle 4-6 : Knotenlagerkräfte (Bemessungskräfte) am Fuß der Variante 2  
 Table 4-6: Nodal reaction design forces at the base point of variant 2

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			Zugehörige Lastfälle
		$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
1	Max $P_{X'}$	<b>0,00</b>	312,12	505,65	10322,80	0,00	0,00	LF 2-A,SG2
	Min $P_{X'}$	<b>-120,21</b>	0,00	502,73	-1,68	3867,45	0,00	LF 5-B
	Max $P_{Y'}$	0,00	<b>312,12</b>	505,65	10322,80	0,00	0,00	LF 2-A,SG2
	Min $P_{Y'}$	-120,21	<b>0,00</b>	502,73	-1,68	3867,45	0,00	LF 5-B
	Max $P_{Z'}$	0,00	283,64	<b>636,03</b>	9375,49	0,00	0,00	LF 6-D
	Min $P_{Z'}$	0,00	182,72	<b>275,07</b>	5334,41	0,00	0,00	LF 4-A,EG1,SG2
	Max $M_{X'}$	0,00	312,12	505,65	<b>10322,80</b>	0,00	0,00	LF 2-A,SG2
	Min $M_{X'}$	-120,21	0,00	502,73	<b>-1,68</b>	3867,45	0,00	LF 5-B
	Max $M_{Y'}$	-120,21	0,00	502,73	-1,68	<b>3867,45</b>	0,00	LF 5-B
	Min $M_{Y'}$	0,00	283,64	636,03	9375,49	<b>0,00</b>	0,00	LF 6-D
	Max $M_{Z'}$	-68,78	51,52	353,57	2242,10	2835,63	<b>352,69</b>	LF 7-K,BG3
	Min $M_{Z'}$	-120,21	0,00	502,73	-1,68	3867,45	<b>0,00</b>	LF 5-B

Aus der Beanspruchung auf die Mastkonstruktion und dem Eigengewicht des Mastes und der Gründung innerhalb der ständigen und vorübergehenden Kombination lassen sich die für die Bemessung maßgebende Lasten zusammenfassen. Die maximale Druckkraft am Pfahlende beträgt 777kN pro Pfahl. Maßgebend ist der Nachweis auf Mantelreibung gemäß DIN EN 1997-1 [29]. Dafür wurde eine Verpresslänge von 18 Metern beim Modellboden I notwendig. Im Modellboden II ist eine Länge von 12 Metern ausreichend. Dabei ist ein Durchmesser der 16 Verpresspfähle von 15cm erforderlich. Für die Aufnahme der Zugbeanspruchung von maximal 504kN pro Pfahl wird nach dem Nachweis der Stahlzugglieder ein Gewindestab mit einem Durchmesser von 50mm nötig. Die dafür notwendigen Mikropfähle können zum Beispiel aus der Reihe GEWI®-Pfahl B500B der Firma DYWIDAG-Systems International [9] gewählt werden. Die Gründungsvariante ist in Abbildung 4-27 dargestellt.

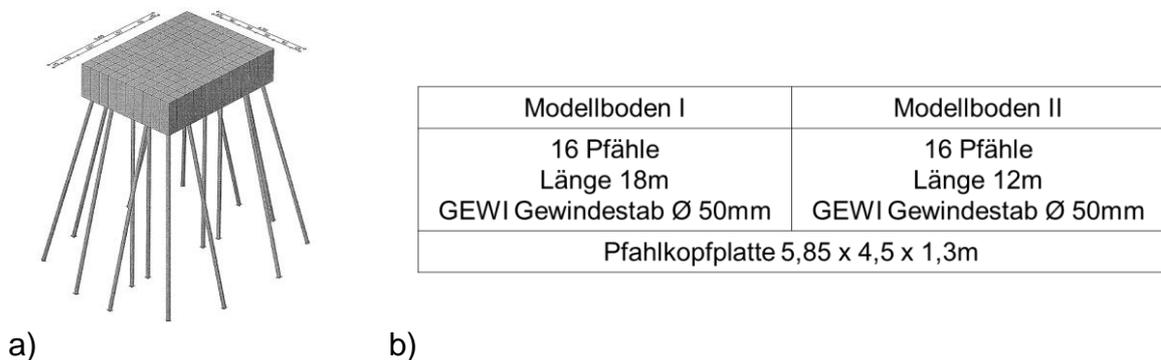


Abbildung 4-27: Gründungsvariante eines einstielligen Stahlvollwandmasts: a) FE-Modell [38], b) Eckdaten  
 Figure 4-27: Foundation variant of a solid-webbed pole made of steel: a) FE-model [38], b) reference values

Der Pfahlbock besteht aus einer rechteckige Pfahlkopfplatte mit den Abmessungen 5,85 auf 4,5 Meter und ist 1,3 Meter tief. Die rechteckigen Abmessungen resultieren aus der unterschiedlichen Biegebeanspruchung in den zwei Achsen des Masts. Aus den Windlasten quer zu der Freileitungsachse folgen höhere Momente, die auch einen größeren Hebelarm unterhalb der Geländeoberkante erfordern. Somit wird der Pfahlbock mit der größeren Breite von 5,85m senkrecht zur Leitung aufgebaut. Die Abmessungen der Verpresspfähle, die zur Übertragung von Bauwerkslasten auf tiefer liegende Bodenschichten des Baugrundes dienen, sind in der Abbildung 4-27 zusammengefasst.

Wie zu erkennen ist, handelt es sich dabei um sehr umfangreiche Baugrubenverbauten, die auch reichlich Erdbewegungen mit sich bringen. Für die Herstellung der Pfähle wird in der zuvor hergestellten Bohrung jeweils ein Gewindestab eingestellt und ausgerichtet. Die Kraftübertragung findet durch den verfüllten Zementmörtel über die Mantelreibung in das Erdreich statt. Dieser dient auch als Korrosionsschutz des Gewindestabes. Zu beachten ist auch die Ausbildung der Pfahlköpfe, da dadurch die Verbindung zu der Verteilerplatte geschaffen wird.

In jedem Einzelfall, also bei einer konkreten Ausführungsplanung für eine Mastgründung, hat jeweils eine Baugrunderkundung entsprechend DIN 4020 [22] zu erfolgen, bei der die Bodenkenngößen vom Baugrundsachverständigen für jede Bodenschicht festzulegen sind.

#### **4.2.5.2 Fundamentierung der Vierfuß-Variante** **Foundation of the four-legged base variant**

Für die Fundamentierung der favorisierten Mastkonstruktion mit Vier-Fuß-Sockel wurden für die zwei gleichen oben erläuterten Bodenformationen vier Varianten ausgearbeitet. Die Bodenschichten können auch hier in statistischer Hinsicht als repräsentativ angenommen werden. Da hierbei die Ableitung der Lasten in vier Punkten stattfindet, ist zwar die Ausbildung von vier Eckstielfundamenten nötig, diese können aber um einiges weniger umfangreich ausgeführt werden.

Die zugrunde gelegten Lastangaben sind dem oben beschriebenen Referenzmast ähnlich und werden wie folgt zusammengefasst. Alle Nachweise erfolgen dabei für die

Extremwerte der Einwirkungen. Pro Mastfuß ist eine Druckkraft von 880kN, eine Zugkraft von 690kN und eine horizontale Komponente von 75kN in den Baugrund einzuleiten. Die Bemessung erfolgt nach DIN EN 1992-1-1:2011 [27], NA:2013-04 [26] mit dem FE System Infograph . Die groben Abmessungen der vier Varianten der Fundamentierung sind in der nachfolgenden Abbildung 4-28 zusammengestellt.

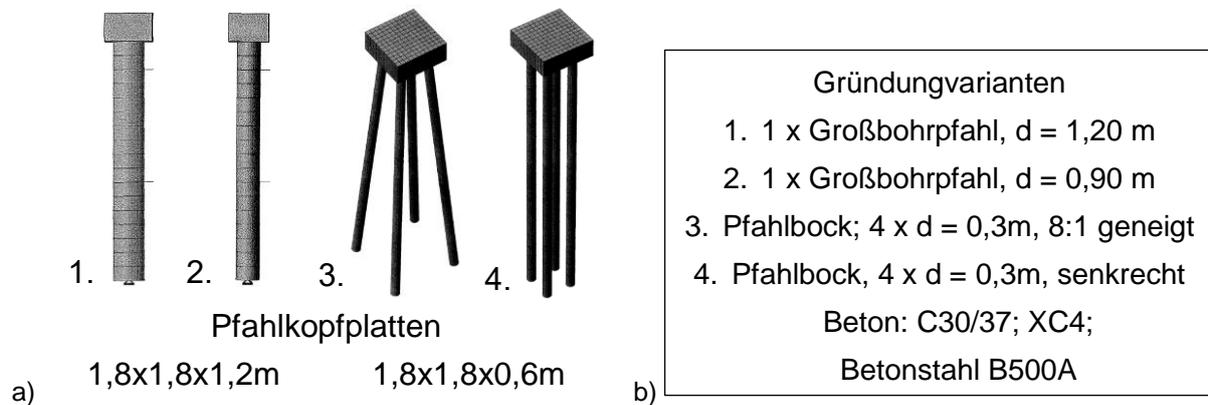


Abbildung 4-28: Gründungsvarianten des Vier-Fuß-Masts: a) FE-Modell [38], b) Eckdaten  
 Figure 4-28: Foundation variant of a Four-foot mast [38], b) reference values

Für die Bemessung der Großbohrpfähle wurde der ungünstigste Fall des Modellbodens I zugrunde gelegt. Durch die weicheren Böden kommt es hier zu den maximalen Biegebeanspruchungen. Die Bettungsreaktion ist auf den Erdwiderstand zu begrenzen. Die Abbildung 4-29 zeigt die Abhängigkeit der notwendigen Pfahlänge der vier Varianten von den gewählten Modellböden.

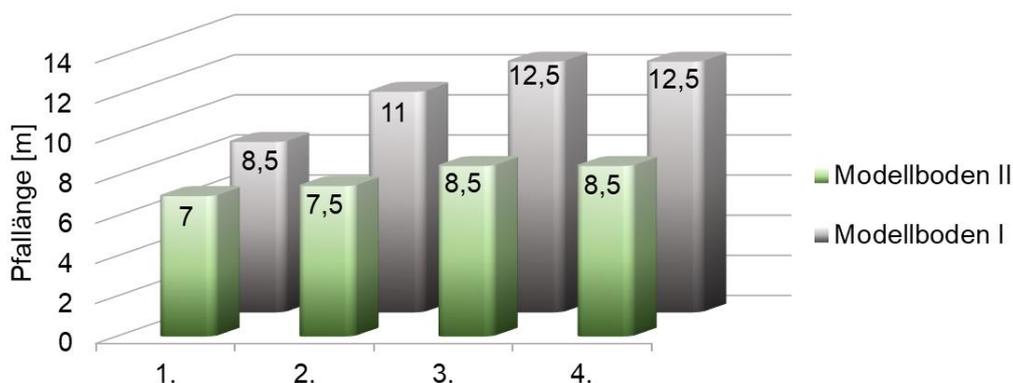


Abbildung 4-29: Gründungsvarianten des Vier-Fuß-Masts: Pfahlänge in Anhängigkeit der Modellböden  
 Figure 4-29: Foundation variants of the four-foot mast: Length of the piles as a function of the model soils

Die letzten beiden Ausführungsvarianten, insbesondere Variante 4, sind für sehr weiche Bodenschichten wegen der fehlenden seitlichen Bettung nur begrenzt geeignet. Eine zu geringe seitliche Bettung der Kleinbohrpfähle führt zu einer unzulässigen Erhöhung der Biegebeanspruchung und der Verschiebung. Da eine wesentliche Erhöhung der Bewehrung bei den kleinen Pfahldurchmessern nicht möglich ist, kommen die Varianten 3 und 4 bei sehr ungünstigen Bodenverhältnissen nur eingeschränkt in Frage.

Die Vorteile der vier Varianten im Vergleich zu dem Pfahlbock-System des einstieligen Mastes liegen in der einfacheren Realisierung und der schnellen Baumontage. Dazu

werden die von der Größe des Pfahls abhängigen Bohrpfahlgeräte zur schnellen und flexiblen Fundamentierung am Maststandort verwendet. Besonders bei den Varianten drei und vier fallen die Geräte im Vergleich zu dem Pfahlbock-System deutlich kleiner aus und erfordern dabei kleinere sowie aufwandsärmere Baustelleneinrichtungen, womit auch die umgebende Landschaft am Maststandort weniger zerstört wird.

Vergleicht man zusätzlich das notwendige Betongewicht der Gründungen untereinander, fällt auf, dass für den ungünstigeren Fall des Modellbodens I die Variante 1 der Fundamentierung des Vier-Fuß-Masts nur 15 % des Gewichts der Fundamentierung eines einstieligen Mastes beträgt. Bei dem steiferen Modellboden II wird es bei den Mikropfählen der Vier-Fuß-Variante sogar nur 7,5 % der Betontonnage der Gründung der einstieligen Mastkonstruktion notwendig.

## 5 Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende *Innovative overhead line tower for the energy revolution*

### *Kurzfassung*

*Für die favorisierte Variante der Mastkonstruktion wurden einige wichtige Verbindungspunkte weiter ausgearbeitet. In diesem Rahmen wurden unterschiedliche Anschlusskonfigurationen entwickelt, statisch vordimensioniert und im Einzelnen auch mit ersten Ansätzen optimiert. Die Bedingung dafür war die Verringerung des Fertigungs-, des Montage- und Instandsetzungsaufwands.*

### *Abstract*

*For the favoured variant of the mast construction, some important connection points were elaborated. Different connection configurations were developed, statically pre-dimensioned and individually optimized with first approaches. The condition was the reduction of manufacturing, assembly and repair costs.*

### 5.1 Entwicklung der Details *Development of the details*

#### 5.1.1 Allgemeines *General*

Nach der globalen Untersuchung der Mastkonstruktion sind die Auswirkungen der lokalen Verformungen der Verbindungspunkte auf das globale System wichtig. Dafür wurden im Einzelnen verschiedene Verbindungen untersucht. In Abbildung 5-1 sind diese Anschlusskonfigurationen angedeutet. Diese Anschlussdetails wurden auch gestalterisch weiter untersucht.

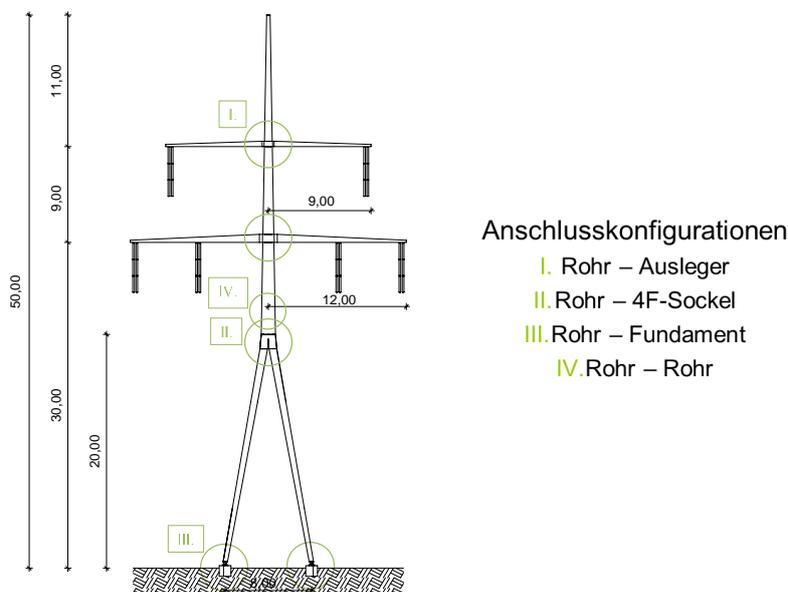


Abbildung 5-1: Vier-Fuß-Mast mit untersuchten Anschlussdetails  
 Figure 5-1: Four-foot-mast with the investigated connection details

### 5.1.2 Konstruktion der Traverse Construction of the cross arm

Für die Entwurfsvariante 2, Vollwandrohr konisch, wurden zwei verschiedene Varianten der Auslegerkonstruktion entworfen und statisch untersucht. Der erste Traversentyp ist eine abgespannte Traversenkonstruktion. Diese schließt vertikal gelenkig und horizontal biegesteif an dem Mastschaft an. Dadurch kann die Montage durch das „Ausklappen“ der Ausleger und Druckstäbe stattfinden. Bei der Optimierung dieser Konstruktion wirken sich die abhebenden Lasten negativ aus. Die Vorteile der schlanken Abspannung wurde damit zunichtegemacht, da bei der Wahl der Querschnitte das Gewicht, das den abhebenden Lasten entgegen wirken muss, im Vordergrund steht.

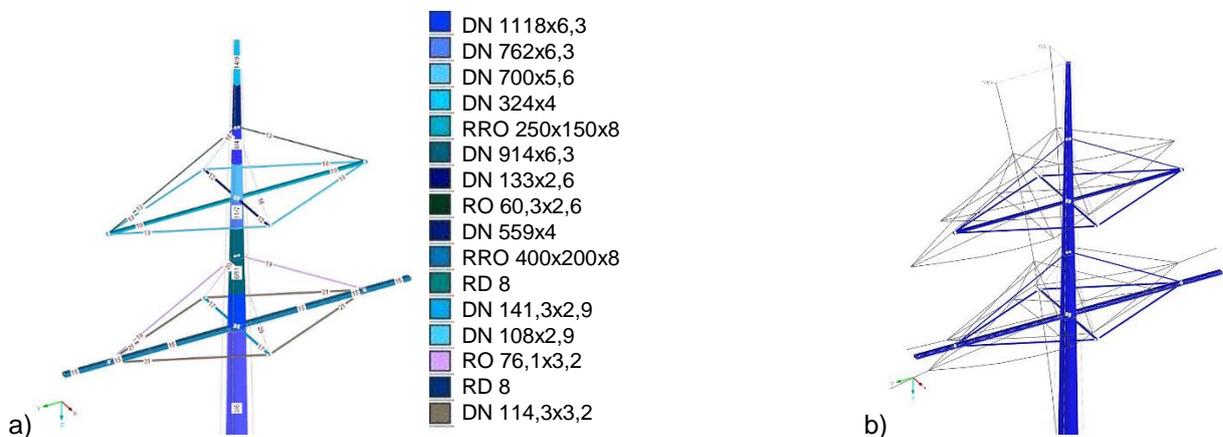


Abbildung 5-2: Traversentyp 1: abgespannte Traversenkonstruktion  
 Figure 5-2: Traverse type 1: spanned traverse construction

Für die zweite Variante werden die Ausleger affin dem Biegemomentenverlauf eines Kragarms ausgebildet. Die Kragarmkonstruktion schließt dabei biegesteif an den Mastschaft an.

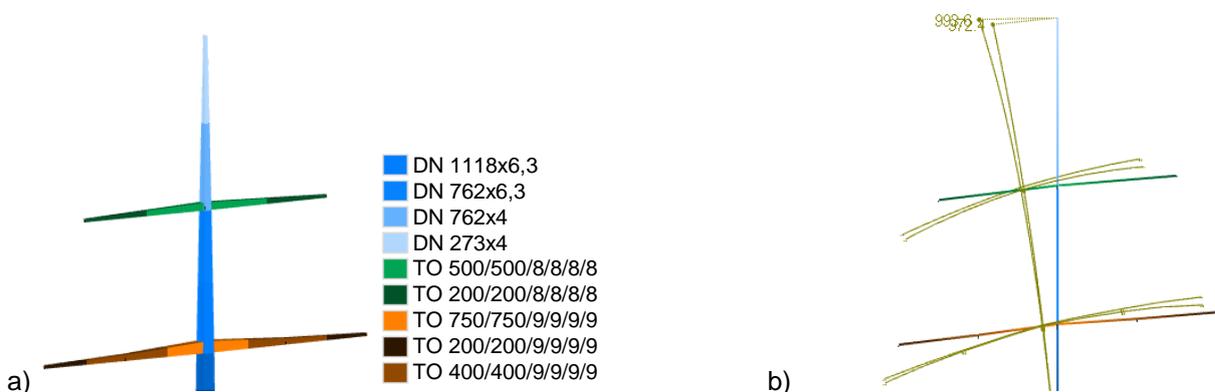


Abbildung 5-3: Traversentyp 2: aufgesteckte Traversenkonstruktion  
 Figure 5-3: Traverse type 2: attached traverse construction

Nach den architektonischen Anforderungen sollte der Übergang zwischen der Traverse und dem Mastschaft möglichst harmonisch sein. Dabei waren jedoch die konstruktiven

und wirtschaftlichen Forderungen zu beachten. Die Verbindung der Elemente sollte ohne zusätzlichen Verbindungsaufwand möglich sein und den Mast als ein Element wirken lassen. Die Forderung lag somit in dem Optimum aus der Montage und der Ästhetik.

Für die einfache und schnelle Montage des Mastes wird die Möglichkeit in Betracht gezogen, die Traverse auf den Schaft aufzuschieben.

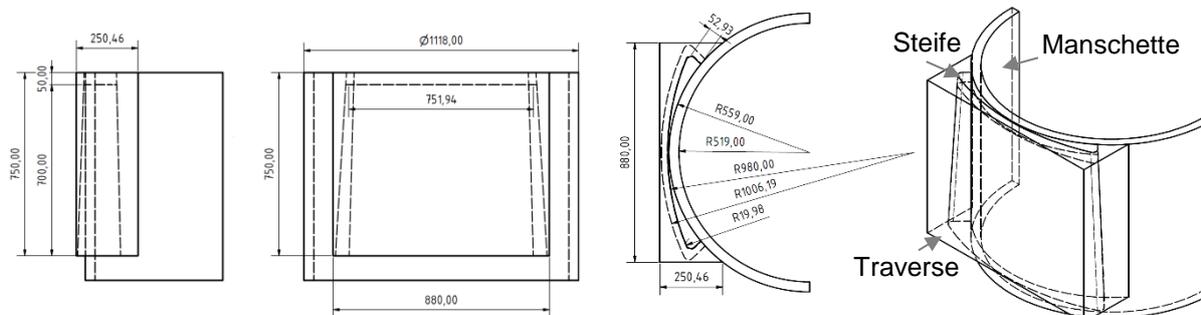


Abbildung 5-4: Aufgesteckte Traverse: Mastschaft-Traverse-Verbindung (Hälfte)  
 Figure 5-4: Traverse plugged: Mast section- traverse- connection

Dabei wird der Vorteil der konischen Ausbildung des Mastschafts genutzt. Nach Möglichkeit soll auf eine mechanische Befestigung durch Schrauben oder Bolzen verzichtet werden. In einer Vordimensionierung wurde die formschlüssige Verbindung zwischen einer Manschette, an der die Ausleger angeschlossen sind, und dem konischen Mastschaft genutzt. Dabei kann auf die später entwickelten Pressverbindung verwiesen werden. Die kraftschlüssige Verbindung der Traverse an der Manschette erfolgt über vertikale und horizontale Knaggen.

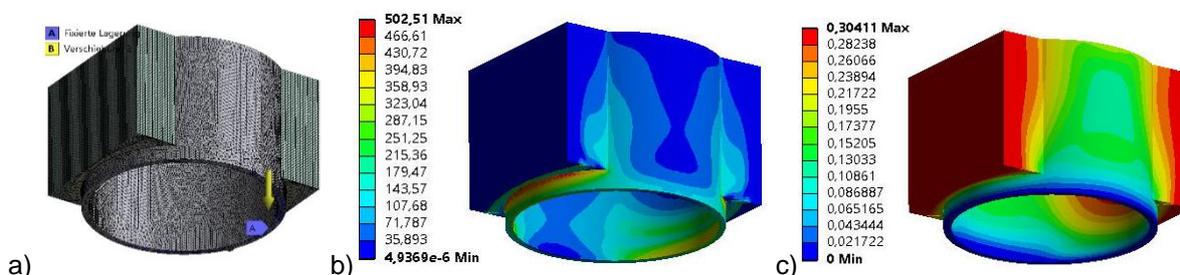


Abbildung 5-5: a) FE-Netz, b) Vergleichsspannung im MPa, c) Gesamtverformung in mm [34]  
 Figure 5-5: a) FE-Mesh, b) V-Mises stress, c) total deformation [34]

In einer numerischen Voruntersuchung wurde mithilfe eines FE-Modells das Trag- und Gebrauchsverhalten der Verbindung analysiert. Bei dem Modell konnten die Symmetriebedingungen genutzt werden. Bei dem Aufbringen der Randbedingungen orientierte man sich an der realitätsnahen Belastung aus dem Lastfall D nach DIN EN 50341. Es sind weitere Betrachtungen und Optimierungen der Blechdicke notwendig, da das Rohr der Manschette lokal sehr stark beansprucht wird.



Abbildung 5-6: Modell der aufgesteckten Traverse  
 Figure 5-6: Model of the traverse plugged

Bei dem Vergleich der Auslegerkonstruktionen wurde die Anzahl der Stäbe, Verbindungen, wie auch des Gewichtes beider Varianten gegenübergestellt. In der Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 5-1 : Vergleich der Traversenvarianten  
 Table 5-1: Comparison of traverse variants

	Traversentyp 1	Traversentyp 2
Anzahl Stäbe	5	25
Anzahl Verbindungen	6	33
Tonnage	22,6t	21,8t

Direkt zu erkennen ist die etwa gleiche Tonnage der Konstruktionen. Beim Vergleich der Anzahl der Verbindungen ist der damit verbundene Aufwand in der Montage und der späteren Instandsetzung zu berücksichtigen. Dies stellt die Ausbildung der abgespannten Variante unvorteilhaft dar.

### 5.1.3 Übergangskonstruktion Mastschaft-Vierfußsockel *Transition construction tower section- four foot pedestral*

#### 5.1.3.1 Geschweißte Variante der Übergangskonstruktion *Welded variant of the transition construction*

##### **Konstruktive Durchbildung**

Die Modellierung der Ursprungsgeometrie der Übergangskonstruktion, die maßgeblich durch den Fertigungsprozess und den Lastabtrag bestimmt wird, erfolgt mit der 3D-CAD-Software „Autodesk Inventor Professional“ [39]. Die dort vorhandenen Modellierungselemente für mechanische 3D-Konstruktionen ermöglichen das Zusammenfügen des Knotenpunktes als Bauteilgruppe aus dem „Ring“ und den vier „Füßen“ als Bauelemente. Die Geometrie des Rings ist hierbei, resultierend aus der Formfindung und der statischen Untersuchung der Mastkonstruktion, mit einem Außendurchmesser von 1321 mm vorgegeben. Die Form der Füße folgt analog aus einem geforderten Aufstellwinkel von 15,80° und einem Außendurchmesser am Übergang von 711 mm. Ein fester Verbund zwischen diesen Elementen führt zu der geschweißten Übergangskonstruktion, der ebenfalls der geforderte Werkstoff zugewiesen wird.

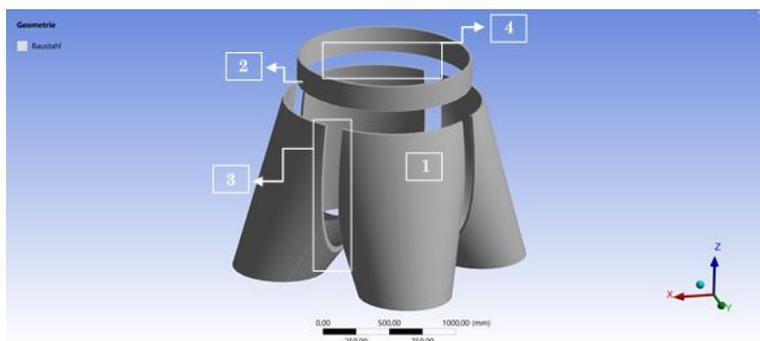


Abbildung 5-7: Explosionsdarstellung der Bauelemente der Ursprungsgeometrie (1 Bauteil „Fuß“, 2 Bauteil „Ring“, 3 Fügungsbereich der „Füße“, 4 Fügungsbereich des „Rings“ mit den vier „Füßen“)  
 Figure 5-7: Exploded view of the components of the original geometry (1 component “Foot”, 2 component “ring”, 3 coincidence section of the “Feet”, 4 coincidence section of the “ring” with the four “Feet”)

Die Abbildung 16-8 im Anhang B2 beinhaltet die Entwurfszeichnung der Ursprungsgeometrie mit allen relevanten Abmessungen.

Durch eine direkte Datenausgabe relevanter Informationen, wie zum Beispiel der Masse, der Flächen und der Volumina, ist es im Weiteren möglich, Varianten exakter und schneller mit der konstruierten Ursprungsgeometrie hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu vergleichen.

### FE – Analyse

Zur Spannungs- und Verformungsanalyse der Ursprungsgeometrie wird das erstellte Volumenmodell in die Finite-Elemente-Software „ANSYS Workbench“ [34] überführt. Dort sind zu Beginn sowohl die zu untersuchenden Lasten als auch die Randbedingungen zu definieren. Als maßgebender Lastfall nach der DIN EN 50341-3-4 wurde der Lastfall A bestimmt. Die ermittelten Schnittgrößen (siehe Tabelle 5-2) werden als Lasten zentrisch auf dem Ring aufgebracht.

Tabelle 5-2 : Schnittgrößen des maßgebenden Lastfalls A  
 Table 5-2: Internal forces of the governing loading case A

Kräfte [kN]			Momente [kNm]			Zugehöriger Lastfall
N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>T</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	gemäß Norm
-331,51	305,58	0,00	0,00	0,00	4234,67	A

Eine Stichprobe der Reaktionskräfte, die in der Summe den aufgetragenen Lasten entsprechen müssen, dient als Plausibilitätsprüfung der FE- Analyse.

Zu den Randbedingungen zählen der Werkstoff, die Lagerung, die Kontakte sowie die Netzstruktur. Gemäß der DIN EN 50341-2-4 sind ausschließlich die Stahlsorten S235J0, S235J2, S355J0 und S355J2 zu verwenden. Für das Außenbauteil wird die Stahlsorte S355 der Kerbschlaggruppe J2 (-20°C) gewählt. Dabei wird ein bilineares Spannungsverhalten als Materialgesetz für die FE-Analyse ausgewählt.

Um jegliche Verformungen an den Lagerpunkten zu verhindern, ist eine fixierte Lagerung zu definieren. Die geschweißte Verbindung zwischen den Bauelementen wird mit dem Kontakttyp „Verbund“ realisiert. Zwar reicht zur Betrachtung des globalen Verformungsverhaltens eine grobe Netzstruktur aus, jedoch ist für die lokale Analyse

von Spannungen und Verformungen eine Netzverfeinerung erforderlich. Aufgrund der erhöhten Rechenzeit bei einer automatischen Netzverfeinerung wird die Netzverfeinerung manuell angepasst. Da besonders die geschweißte Kontaktfläche zwischen den Bauelementen entscheidend ist, wird eine Netzverfeinerung gewählt, die dem Körper eine Elementgröße von 30 mm und der Kontaktfläche eine Elementgröße von 11 mm zuweist.

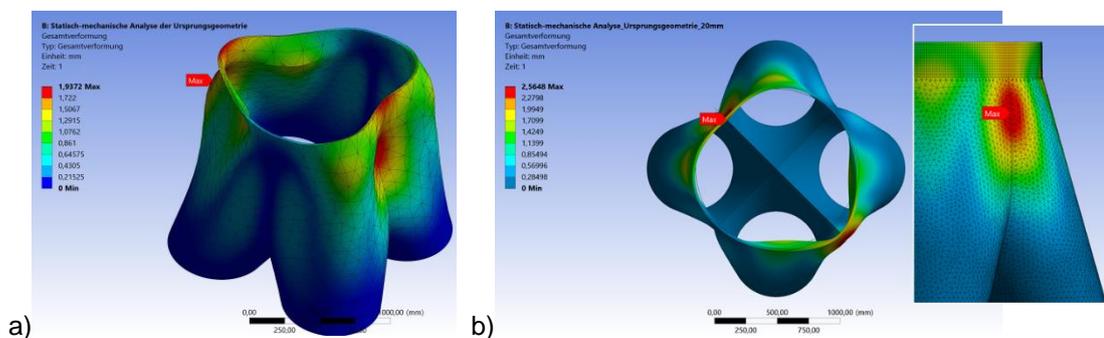


Abbildung 5-8: Gegenüberstellung Verformungen bei a) grober und b) manuell verfeinerter Netzstruktur

Figure 5-8: Comparison of deformations in a) coarse and b) manually refined net structures

Mit der verfeinerten Netzstruktur lässt sich eine maximale Verformung im Fügungsbereich von 2,56 mm entnehmen.

Zusätzlich zur Einschätzung der Verformungen ist mit ANSYS eine Betrachtung der Beultragfähigkeit möglich. Eine Eigenwertbeulanalyse ermöglicht eine grobe Einschätzung des Beulverhaltens über die Ausgabe eines Lastmultiplikators. Dieser gibt an, um welchen Faktor die Last aus der statischen Analyse erhöht werden kann, bis die kritische Beullast erreicht wird. Da diese Ermittlung ohne eine Berücksichtigung der Imperfektionen erfolgt, dient sie lediglich als Anhaltspunkt für weitere Betrachtungen. Für die zu untersuchende Ursprungsgeometrie ergibt sich durch die EWB-Analyse ein Lastmultiplikator von 5,67, der eine Überdimensionierung des Bauteils verdeutlicht. Es ist daher hinsichtlich der Beultragfähigkeit eine Reduktion der Wandstärke möglich. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Verformungen mit abnehmender Wandstärke zunehmen. Daher sind bei einer Optimierung des Bauteils auch konstruktive Maßnahmen zur Reduktion von Verformungen in Betracht zu ziehen.

### **Optimierung der Geometrie**

Die Ausarbeitung optimierter Geometrien erfolgt im Hinblick auf das Verformungs- und Spannungsverhalten der Übergangskonstruktion. Aus der bisherigen Analyse ergibt sich, dass insbesondere die Fügungsstellen das Verformungsverhalten des Bauteils bestimmen und daher bei den Optimierungsvarianten besonders berücksichtigt werden sollten. Ziel der Optimierung ist die Konstruktion des Knotenpunktes mit einer möglichst geringen Stahlmenge.

Die Lasten und Randbedingungen der FE-Analyse bleiben hierbei unverändert. Daher wird weiterhin der maßgebende Lastfall A nach der Freileitungsnorm an einem fixiert gelagerten Bauteil der Stahlsorte S355J2 betrachtet. Lediglich die Netzverfeinerung variiert in den einzelnen Varianten. Die Verfeinerung wird dabei so gewählt, dass durch

einen möglichst geringen Unterschied zwischen der gemittelten und der ungemittelten Vergleichsspannung ein realer Spannungsverlauf abgebildet werden kann.

*Optimierungsschritte 01-02*

Zum einen wird in der ersten Optimierung die Wandstärke des Rings und der Füße auf 15 mm reduziert, zum anderen wird ein Aussteifungskreuz mit 20 mm Wandstärke angeordnet, um die Verformungen an den Fügungsstellen zu begrenzen. Das Aussteifungskreuz besteht aus drei Teilen, um den zusätzlichen Herstellungs- und Fertigungsaufwand zu reduzieren.

Durch die direkte Anordnung der Steifen an den Fügungsstellen der Füße, werden die Verformungen zu dem Übergangsbereich zwischen Ring und den Füßen umgelagert. Es tritt eine maximale Gesamtverformung von 2,05 mm auf. Analog zu den Verformungen findet man eine Spannungskonzentration am Übergangsbereich vor, da hier auch die Lastenumlenkung stattfindet. Das wird bei den Vergleichsspannungen nach Mises deutlich (siehe Abbildung 16-9, Anhang B2).

$$\sigma_{Rd} = \frac{35,50 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 28,40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}; \quad \eta = \frac{\sigma_{vorh}}{\sigma_{Rd}} = \frac{45,73 \text{ kN/cm}^2}{28,40 \text{ kN/cm}^2} = 1,61 > 1,0 \quad \text{Gl. 5-1}$$

Bei der Ermittlung des Ausnutzungsgrades im Bereich der Schweißverbindung wird jedoch deutlich, dass die Spannungskonzentration zum Versagen des Bauteils führt. Der Optimierungsbedarf bleibt daher weiterhin vorhanden.

Zur Reduktion der Spannungen im Übergangsbereich zwischen dem Ring und den Füßen, wird eine Aussteifungsscheibe angeordnet. In Abbildung 5-9 werden die ersten Optimierungsschritte deutlich.

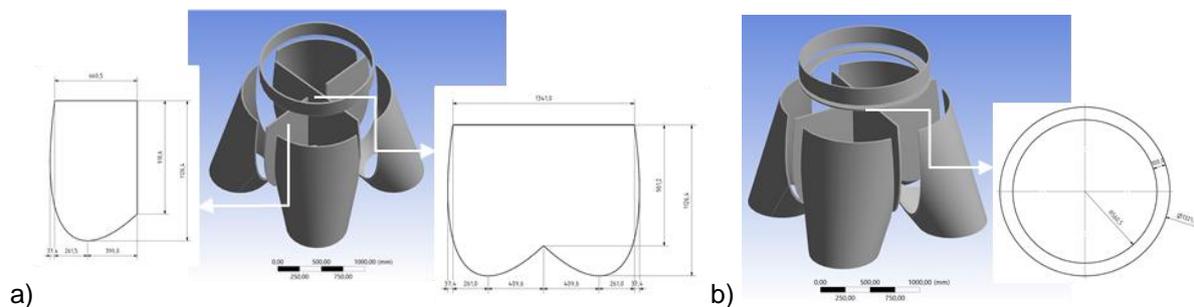


Abbildung 5-9: Explosionsdarstellung a) Schritt 01, b) Schritt 02  
 Figure 5-9: Exploded view a) Step 01, b) Step 02

Die Steife in dem Optimierungsschritt 2 schließt außen bündig mit dem Ring ab, wodurch sich ein Außendurchmesser von 1321 mm ergibt. Mit einer Kreisringbreite von 200 mm folgt ein Innendurchmesser von 1121 mm. Analog zum Aussteifungskreuz wird die Kreisringscheibe ebenfalls mit einer Wandstärke von 20 mm ausgeführt.

Bei Betrachtung der Vergleichsspannungen im Bauteil wird deutlich, dass sich die maximale Vergleichsspannung im Fügungsbereich um 27,73 N/mm<sup>2</sup> auf 429,61 N/mm<sup>2</sup> reduziert. Sie übersteigt jedoch immer noch den maximalen Tragfähigkeitswert der Schweißnaht. Bei genauerer Spannungsanalyse ist jedoch erkennbar, dass der maximale Wert nur am Rand eines FE-Netzelementes auftritt. Die lokale Überbeanspruchung ist daher im Vergleich zu dem restlichen Bauteil mit geringerer Spannung als vernachlässigbar anzusehen.

Dennoch verbleiben konzentrierte Spannungen im Fügungsbereich der Aussteifungsscheibe und den Außenkanten des Aussteifungskreuzes, die bei der weiteren Tragfähigkeitsanalyse näher zu untersuchen sind.

#### Optimierungsschritte 03-04

Die Anordnung von dreiecksförmigen Aussteifungen (20 mm Blechdicke) am Aussteifungsring ermöglicht eine bessere Lastverteilung im Fügungsbereich und führt zu einer Reduktion lokaler Spannungsspitzen in der Aussteifungsscheibe.

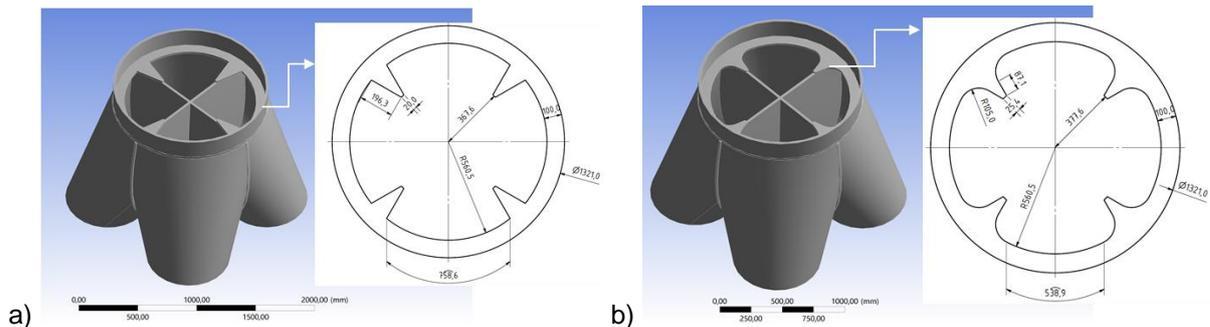


Abbildung 5-10: Isometrische Darstellung a) Schritt 03, b) Schritt 04  
Figure 5-10: Isometric representation a) Step 03, b) Step 04

Verglichen mit den vorherigen Schritten kann durch die optimierte Aussteifungsscheibe die maximale Vergleichsspannung von 352 N/mm<sup>2</sup> auf 323 N/mm<sup>2</sup> reduziert werden. Diese Spannungsoptimierung erfolgt durch die zusätzlichen Aussteifungselemente jedoch nur lokal und ist ohne nennenswerten Einfluss auf den Kraftfluss im Rest der Aussteifungsscheibe.

Zur Optimierung des Kraftflusses innerhalb der Aussteifungsscheibe kann der Innenradius der Aussteifungsscheibe verringert und somit die Kreisringbreite vergrößert werden. Alternativ kann der Fügungspunkt der Zusatzaussteifung mit der Aussteifungsscheibe ausgerundet konstruiert werden. Da die Optimierung der Ursprungsgeometrie immer im Hinblick auf einen möglichst geringen Materialeinsatz erfolgen soll, wird daher im Weiteren eine ausgerundete Ausbildung näher betrachtet. Für die Ausrundung der Ecken im Bereich der Zusatzaussteifung wird ein Radius von 105,0 mm gewählt.

Bei Betrachtung der sich ergebenden Vergleichsspannungen ist lokal jedoch keine Verbesserung des Spannungsverhaltens vorhanden. Lediglich die maximale Vergleichsspannung am Gesamtsystem kann durch die ausgerundete Ausbildung der Anschlussstellen auf 403,05 N/mm<sup>2</sup> reduziert werden.

#### Optimierungsschritte 05-06

Da sowohl der Kernbereich des Aussteifungskreuzes als auch der Fügungsbereich der „Füße“ in den bisherigen Optimierungsvarianten immer nahezu spannungsfrei geblieben sind, liegt auch dort weiterhin Optimierungspotential bezüglich der Geometrie und Materialanordnung vor. Um die Ursprungsgeometrie hinsichtlich eines möglichst geringen Materialeinsatzes zu optimieren, werden die Abmessungen des Aussteifungskreuzes entsprechend der geringen Spannungen im Kernbereich und im Bereich der „Füße“ angepasst. Die reduzierten Stahlblechabmessungen führen jedoch weiterhin zu sehr geringen Vergleichsspannungen im Kernbereich. Auch die

maximalen Verformungen im äußeren Bereich des Aussteifungskreuzes sind mit 0,7 mm sehr gering. Der Knotenpunkt kann daher weiter bezüglich des Kern- und Fußbereichs des Aussteifungskreuzes optimiert werden.

Der nächste Schritt der Geometrieoptimierung bezieht sich sowohl auf die Ausbildung des Aussteifungskreuzes als auch auf die in den ersten Varianten optimierte Aussteifungsscheibe. Zu erzielen ist, ergebend aus den vorherigen Betrachtungen, eine optimale Spannungsauslastung des Aussteifungskreuzes sowie eine verbesserte Spannungsverteilung in der Aussteifungsscheibe.

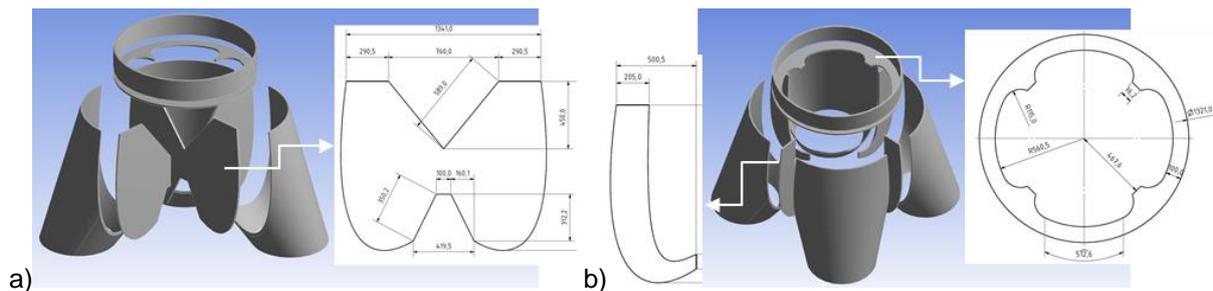


Abbildung 5-11: Explosionsdarstellung a) Schritt 05, b) Schritt 06  
Figure 5-11: Exploded view a) Step 05, b) Step 06

Eine weitere Reduktion der Abmessungen des Aussteifungskreuzes führt zum Übergang der Konstruktion zu vier einzelnen Aussteifungsrippen. Bei einer unveränderten Blechdicke von 20 mm ergibt sich eine durchschnittliche Vergleichsspannung von ca. 110 N/mm<sup>2</sup> und ein Maximalwert von 172 N/mm<sup>2</sup> in den Aussteifungsrippen. Aufgrund der sehr geringen Spannungen ist eine Reduktion der Wandstärke möglich.

Die Optimierung der Aussteifungsscheibe erfolgt über die Vergrößerung des Rundungsradius auf 115,0 mm und das Einkürzen der Spitzen der dreiecksförmigen Zusatzaussteifungen, die nahezu ohne Beanspruchung blieben. Verglichen mit dem vorherigen Optimierungsschritt resultiert aus diesen konstruktiven Maßnahmen ein deutlich besseres Spannungsverhalten. Die maximale Vergleichsspannung von Mises verringert sich von 322 N/mm<sup>2</sup> auf 206 N/mm<sup>2</sup>.

Für die weitere Bearbeitung ist hervorzuheben, dass die bisherigen Betrachtungen rein im Hinblick auf die Tragfähigkeit des Knotenpunktes erfolgten. Die Ursprungsgeometrie wurde dahingehend angepasst, eine optimale Spannungsverteilung und Vergleichsspannung unter möglichst geringem Materialeinsatz zu erzielen. Im Weiteren ist die Geometrie jedoch auch entsprechend der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu untersuchen bzw. zu optimieren.

#### *Optimierungsschritte 07-08*

Aufgrund der geringen Spannungsauslastung der Aussteifungsrippen in den vorherigen Schritten wird die Wandstärke der Rippen von 20 mm auf 15 mm reduziert. Der Ring und die Füße werden weiterhin mit einer Dicke von 15 mm und die Aussteifungsscheibe mit einer Dicke von 20 mm angenommen. Aus der angepassten Wandstärke der Aussteifungsrippen ergibt sich eine erhöhte Vergleichsspannung von 177 N/mm<sup>2</sup>, die jedoch weit unter der maximal zulässigen Spannung im Schweißnahtbereich von 284 N/mm<sup>2</sup> liegt. Zudem wird resultierend aus der weiterhin

geringen Spannungsauslastung in der Aussteifungsscheibe ihre Geometrie erneut angepasst. Dies bedingt eine weitere Einkürzung der Aussteifungsdreiecke und eine Vergrößerung des Rundungsradius auf 160 mm.

Eine zusätzliche Einkürzung der „Füße“ im unteren Bereich ermöglicht die Anordnung einer Revisionsklappe in einer entstehenden Öffnung von 300mm x 300mm. Diese kann bei Bauwerksprüfungen für eine Begutachtung des Knotens von innen genutzt werden. Da die Öffnung ohne relevanten Einfluss auf die Tragfähigkeit des Knotenpunktes ist, wird die Revisionsklappe rein konstruktiv betrachtet.

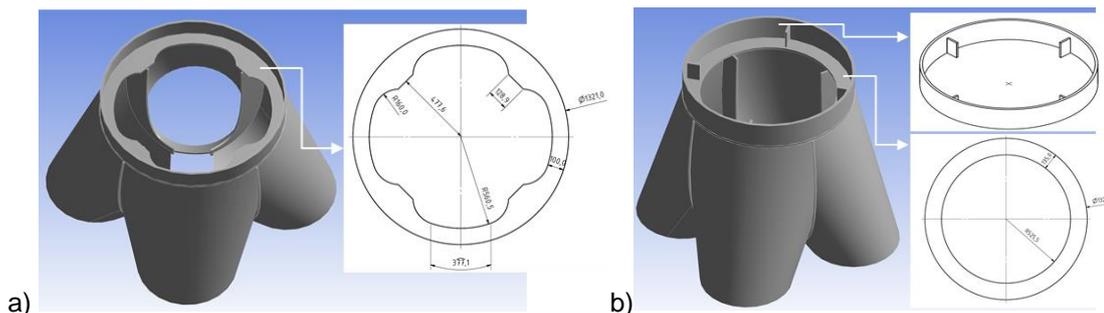


Abbildung 5-12: Isometrische Darstellung a) Schritt 07, b) Schritt 08  
Figure 5-12: Isometric representation a) Step 07, b) Step 08

Entscheidend sind für die Gebrauchstauglichkeit jedoch auch die entstehenden Verformungen infolge reduzierter Blechdicke der Aussteifungsrippen. Die weichere Ausbildung bedingt einen Verformungszuwachs von 27% auf 1,18 mm im Rippenbereich. Aus der festen Verbindung des Rings mit den Füßen durch die Aussteifungsscheibe resultiert ebenfalls eine seitliche Auslenkung am oberen Rand des Ringes, die bezüglich der Gebrauchstauglichkeit näher zu betrachten ist.

Zur Reduktion der aufgetretenen Verformungen im Ringbereich wird zum einen die Wandstärke des Ringes auf 20 mm erhöht, zum anderen werden zusätzliche Längssteifen am Ring auf einer angepassten Aussteifungsscheibe angeordnet. Die Steifen werden rechteckig mit 150 mm x 100 mm und einer Wandstärke von 15 mm ausgebildet. Die optimale Anordnung erfolgt an den Bereichen des Ringes mit größter seitlicher Auslenkung (siehe Abbildung 16-13 a) im Anhang B2). Zur Auflagerung der Steifen auf der Aussteifungsscheibe wird diese zu einer gleichmäßigen Ringscheibe mit einem Innenradius von 525,50 mm abgeändert.

Durch den steiferen Ring und die angeordneten Längssteifen können die Verformungen im oberen Bereich reduziert werden.

#### *Optimierungsvariante 09-10*

Trotz bisheriger Optimierungen verbleiben nennenswerte Verformungen im Bereich der Aussteifungsrippen, die daher zusätzliche Aussteifungsmaßnahmen erfordern. Um den Montageaufwand ergänzender Quersteifen zu umgehen, wird erneut das Aussteifungskreuz herangezogen. Um die Widerstandskräfte im Fußbereich ebenfalls nutzen zu können, werden weitere verlängerte Längssteifen angeordnet.

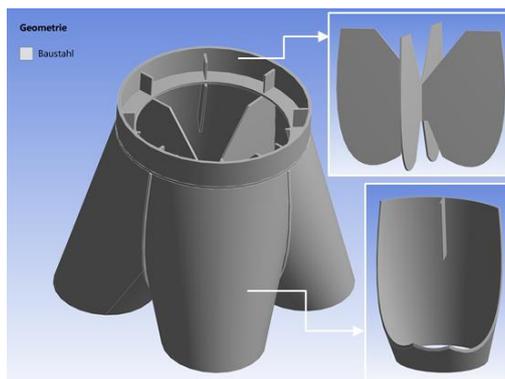


Abbildung 5-13: Isometrische Darstellung der abschließenden Optimierungsschritte  
 Figure 5-13: Isometric representation of the final optimization steps

Die angepasste Geometrie führt zu einem nahezu verformungslosen Tragverhalten des Knotenpunktes. Sowohl die Verformung im Ring als auch im Bereich des Aussteifungskreuzes ist vermindert. Es verbleiben lediglich lokale seitliche Auslenkungen am oberen Rand des Ringes.

Die endgültige Optimierung der Ursprungsgeometrie ergibt sich aus der vorherigen Variante mit einer Erhöhung der Wandstärke des Ringes auf 25 mm und einer Vergrößerung der Auflagerfläche der Zwischensteifen auf 145 mm.

Die Vergleichsspannung von Mises erreicht unter Vernachlässigung lokaler Spannungsspitzen in keinem Bereich den Wert der maximal zulässigen Spannung. Die maximale Gesamtverformung tritt weiterhin am oberen Rand des Ringes auf und beträgt 1,14 mm.

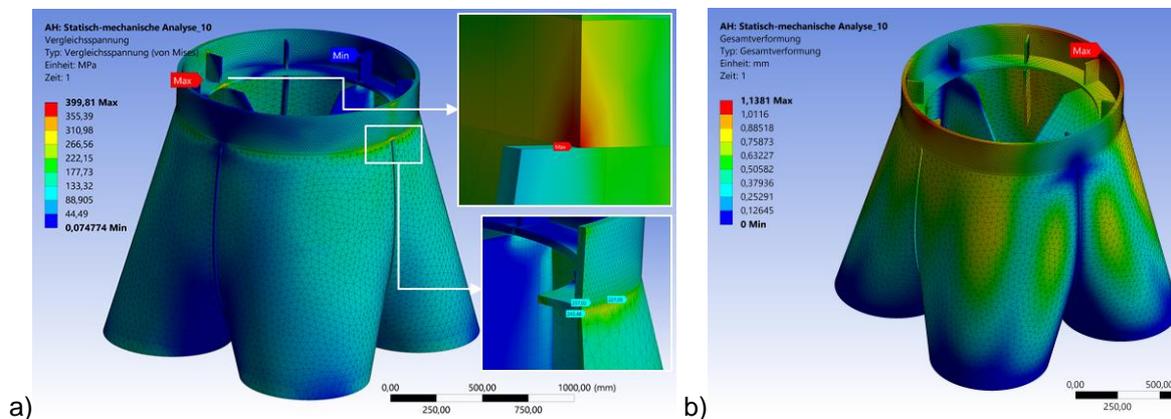


Abbildung 5-14: a) Vergleichsspannung, b) Gesamtverformung des abschließenden Optimierungsschritts  
 Figure 5-14: a) V-Mises stress, b) total deformation of the final optimization step

Die Konstruktion führt zu einer gleichmäßigen Spannungsverteilung und zu begrenzten Verformungen. Sie ermöglicht zudem die Anordnung einer Revisionsklappe für Instandhaltungszwecke. Die Optimierung erfolgte somit sowohl im Hinblick auf die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit als auch den Montageaufwand.

#### Zusammenfassung der Optimierungsvarianten

Entscheidend für die Optimierung der Ursprungsgeometrie ist zusätzlich zur Tragfähigkeit und dem Verformungsverhalten ein möglichst geringer Materialeinsatz. Der Knotenpunkt wurde durch variierte Wandstärken und zusätzliche

Aussteifungselemente optimiert. Die einzelnen Änderungen der unterschiedlichen Optimierungsvarianten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 5-3 : Übersicht der betrachteten Optimierungen  
 Table 5-3: Overview of the considered optimizations

Ursprungsvariante		Optimierung
Optimierungsvariante	01	Reduzierung der Wandstärken und Einbau des Aussteifungskreuzes
	02	Aussteifungsscheibe (AS) hinzugefügt
	03	dreiecksförmige Zusatzaussteifungen an AS hinzugefügt
	04	Verrundung der dreiecksförmigen Zusatzaussteifungen
	05	Aussteifungskreuz zugeschnitten und Zuschnitt an den „Füßen“
	06	aus Aussteifungskreuz werden Aussteifungsrippen, Optimierung der Aussteifungsscheibe
	07	Reduzierung der Wandstärken am Aussteifungskreuz
	08	Erhöhung Wanddicke am Ring, Optimierung der Aussteifungsscheibe und 4 x Steifen am Ring (100mm x 150mm x 15mm)
	09	aus Aussteifungsrippe wird Aussteifungskreuz, 8 x Steifen am Ring (100x150x15mm), 8 x Steifen an „Füßen“ (150x520x15mm)
	10	Erhöhung Wanddicke Ring und Optimierung der Aussteifungsscheibe

Zu berücksichtigen ist eine Interaktion des Materialeinsatzes bzw. des Gesamtgewichts mit der daraus resultierenden Steifigkeit bzw. Verformung. Die optimale Massenverteilung hat daher unter Berücksichtigung der Spannungsauslastung und Verformungsgrenzwerte zu erfolgen. Für die betrachteten Varianten ergibt sich infolge der unterschiedlichen Wandstärken und Konstruktionselemente ein unterschiedliches Gesamtgewicht des Knotenpunktes.

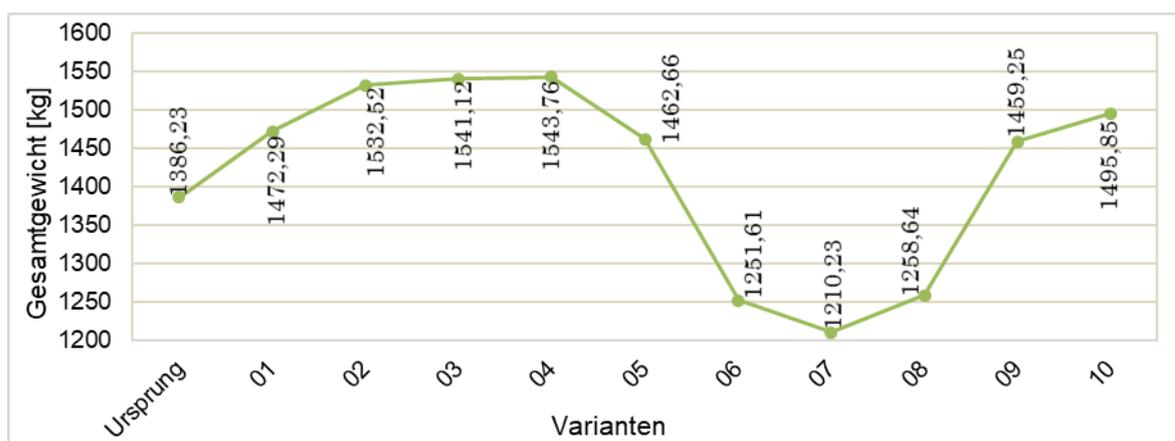


Abbildung 5-15: a) Gesamtgewicht der einzelnen Varianten  
 Figure 5-15: Total weight of the different variants

Die endgültige Optimierung der Ursprungsgeometrie ist hinsichtlich der Spannungsausnutzung, des Stabilitätsversagens und der Gebrauchstauglichkeitskriterien zu betrachten. Der Nachweis der Spannungen erfolgt über die Vergleichsspannung von Mises aus der FE-Analyse des Knotenpunktes. Die maximale Vergleichsspannung von 18 kN/cm<sup>2</sup> führt bei einer zulässigen Spannung im Schweißnahtbereich von 28,4 kN/cm<sup>2</sup> zu einer Ausnutzung von 63 %.

Da es sich bei dem Flächentragwerk um eine Schale handelt, ist zusätzlich das Schalenbeulen zu berücksichtigen. Analog zur Ursprungsgeometrie wird der Lastmultiplikator zu 7,23 bestimmt (siehe Abbildung 16-14 im Anhang B2). Der Nachweis der Beulsicherheit erfolgt über eine Begrenzung des d/t-Verhältnisses. Der Knotenpunkt ist unter der ermittelten Geometrie daher nicht beulgefährdet.

$$\frac{d}{t} = \frac{1321\text{mm}}{15\text{mm}} = 88,07 \leq \begin{cases} 176 \text{ für } S235 \\ 117 \text{ für } S355 \end{cases} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Zusätzlich ist die maximale Mastkopfauslenkung zu bestimmen, um den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen. Die Freileitungsnorm gibt für einstielige Tragsmaste unter dem Lastfall A oder D eine Auslenkung von 4 % der Mastlänge vor. Auf der sicheren Seite liegend wird ein Grenzwert von 3,5 % betrachtet. Die vorhandene Auslenkung des Mastkopfes ergibt sich zum einen aus der Biegesteifigkeit der Stahlsegmente und zum anderen aus der seitlichen Auslenkung am oberen Rand des Ringes des Knotenpunktes. Die Auslenkung infolge der Steifigkeit des Knotenpunktes lässt sich mit der Statik-Software R-Stab zu 1000mm bestimmen. Die Mastkopfverschiebung infolge der Knotenpunktauslenkung ergibt sich bei einer maximalen Verformung von 1,14 mm am oberen Rand des 1520 mm hohen Knotenpunktes zu 22,5 mm. Damit ergibt sich eine Gesamtauslenkung von 1022,50mm, die bei einem 50 Meter hohen Mast kleiner ist als der normativ geforderte Grenzwert von  $50000 \times 0,035 = 1750\text{mm}$ .

Die gewählte Optimierungsvariante 10 erfüllt daher sowohl die Anforderungen der Tragfähigkeit als auch die der Gebrauchstauglichkeit.



Abbildung 5-16: Modell des Überganges Mast-Vierfußsockel  
Figure 5-16: Model of the transition mast-four foot pedestals

Aus der architektonischen Sicht soll das Bindeglied zwischen Mast und Vierfußsockel möglichst harmonisch sein. Das Ziel war es, den Übergang des einen Elementes des Mastes, das sich in die vier Füße aufspaltet, möglichst einfach und elegant zu gestalten, was durch das Verbindungsstück der „Hose“ und die Steckverbindung gelungen ist.

### 5.1.3.2 Übergangskonstruktion als Stahlgussknoten *Transition construction as a node made of cast steel*

#### **Topologieoptimierung**

Die Grundform des Knotenpunktes, bestehend aus 4 symmetrisch konusförmigen Teilen, die oben mit einem großen Ring und unten mit vier kleineren Ringen ergänzt sind, ist hinsichtlich eines minimalen Masseaufwandes bei maximaler Steifigkeit zu optimieren. Computerbasiert erfolgte die Ermittlung der optimierten Grundgestalt des Bauteils mit einer Topologieoptimierung. Hierfür war der massive Grundkörper zunächst zu vernetzen, gegebenenfalls zu verfeinern und mit seinen Randbedingungen zu definieren. Die Ergebnisausgabe erfolgte mit der Finite-Element-Software ANSYS Workbench und ermöglichte eine optimierte Knotenmodellierung in der 3D-CAD-Software Autodesk Inventor [39].

Die Vernetzung des Knotens erfolgte mit der „Hex Dominant“-Methode. Durch die Kombination von Hexaedern und Tetraedern können glatte, abgerundete Oberflächen modelliert werden, die keine Nachbearbeitung erfordern. Um den daraus resultierenden erhöhten Rechenaufwand zu reduzieren, wurden die Elementgröße entsprechend angepasst. Da die Elemente im inneren der Wandung im Rahmen der Topologieoptimierung entfallen werden, wurde die Oberflächengröße der Elemente von 30 mm auf 60 mm erhöht. Auf weitere adaptive Netzverfeinerungen wurde zur Reduktion der Rechenzeit verzichtet.

Zusätzlich waren vor der Optimierungsberechnung die Randbedingungen des Knotenpunktes festzulegen. Dies betraf sowohl die Angabe des Werkstoffes G20Mn5 mit den charakteristischen Mindestfestigkeitswerten  $R_{p0,2}=300$  MPa und  $R_m=500$  MPa, als auch die Definition der Belastung in Form von „Kräften“ und „Momenten“ aus der Schnittgrößenermittlung und die Angabe einer „externen Verschiebung“ als Lagerungsbedingung.

Ausgegeben wird im Rahmen der Topologieoptimierung ein Ergebniskörper, der eine ideale Massenordnung hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit besitzt. Aus dem Ergebniskörper wird ersichtlich, dass Steifen im Schnittpunkt der Viertelkörper anzuordnen sind. Zusätzlich ist ein Lastabtrag vom oberen Ring auf die benachbarten Viertelpunkte ersichtlich. Die unteren Ringe verdeutlichen ebenfalls das Erfordernis einer Wandverstärkung.

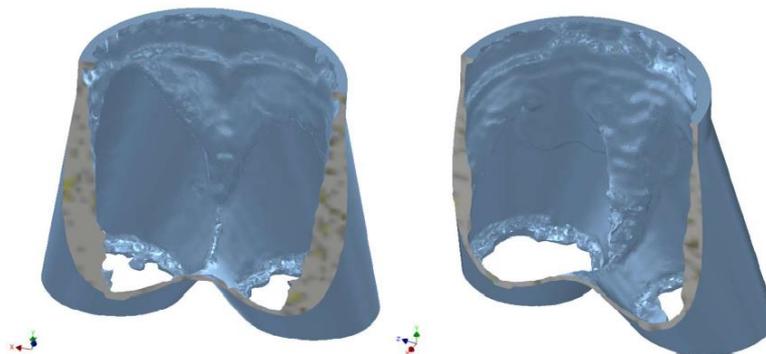


Abbildung 5-17: Ergebnis der Optimierung (Ergebniskörper)  
Figure 5-17: Result of the optimization (result body)

Auf Grundlage der Optimierungsergebnisse ist es möglich, ein Basismodell für weitere Anpassungen zu entwickeln. Das für die weitere Bearbeitung verwendete Modell ergab sich aus Entkernung des massiven Grundkörpers. Dabei entstanden für die Viertelkörper Wanddicken von 25 mm am Rohrfuß und 15 mm am Ringanschluss oben. Der obere Ring wird in 15 mm Wandstärke ausgebildet.



Abbildung 5-18: Basismodell (Grundkörper)  
Figure 5-18: Basic model (base body)

### **Entwicklungsschritte der Konstruktion**

Zur Minimierung örtlicher Spannungsmaxima wird die Geometrie des Basismodells weiter abgeändert. Diese Änderungen erfolgen immer unter Berücksichtigung des Gießvorganges bei der Fertigung des Knotenpunktes. Da der Stahlgussknoten in einer Negativform hergestellt wird, sind Hinterschneidungen in der Geometrie zu vermeiden. Die Entwurfsvarianten wurden aus den Spannungsanalysen, der Fertigungsform, sowie der Interaktion von Masse und Gesamtstabilität entwickelt. Die Änderungen beziehen sich dabei immer auf die Ausbildung des oberen Ringes und die Aussteifung der Stoßpunkte der Viertel-elemente. Die finale Variante des Stahlgussknotens, Variante E, ergab sich aus fortlaufender Anpassung dieser Geometrieparameter.

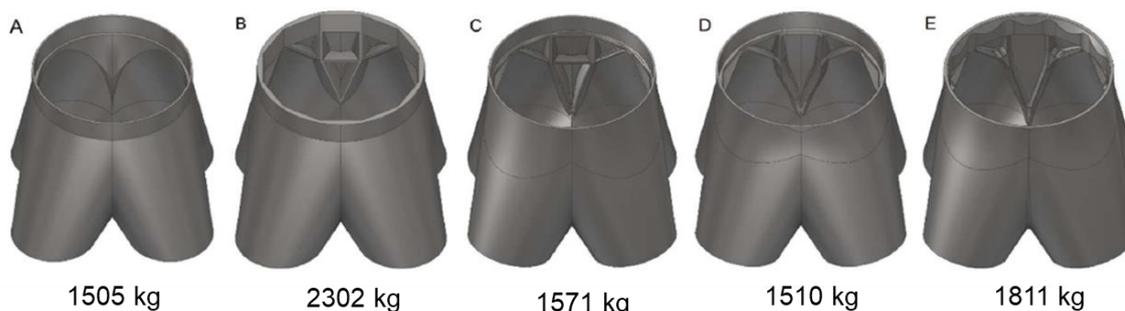


Abbildung 5-19: Übersicht der Entwurfsvarianten A bis E  
Figure 5-19: Overview of the draft variants A to E

Da sich bei der Variante A aufgrund der Kreisform des oberen Ringes Modellierungsprobleme für die anschließenden Längssteifen ergaben, wurde bei der Variante B eine polygonale Ringform gewählt. Die 12 Ecken des Polygons sind entsprechende Konstruktionspunkte der Steifen. Zusätzlich wurden zur Reduktion der Spannungsmaxima horizontale Steifen angeordnet. Eine gezielte Reduktion der Masse unter gleichbleibenden Konstruktionsaspekten erfolgte in Variante C. Da die horizontalen Steifen den Gießvorgang jedoch behindern, wurden diese in der darauffolgenden Variante wieder entfernt. Zusätzlich wurden bei der Variante D durch

Ausrundungen weichere Übergänge konstruiert, um Spannungsspitzen zu verringern. Eine weitere Verringerung konnte mit der Variante E erzielt werden, bei der die Längssteifen im Anschlussbereich an die Viertelelemente aufgedickt ausgebildet und zusätzlich verlängert wurden. Zur Reduktion von Stabilitätsproblemen am oberen Ring wurde dieser ebenfalls verstärkt. Die finalen Abmessungen des Stahlgussknotens können dem Bild Abbildung 16-15 in Anhang B2 entnommen werden.

### **Festigkeitsanalyse**

Grundlegend für die Spannungs- und Verformungsanalyse des Stahlgussknotens ist die entsprechende Modelleingabe. Die Geometrie wurde ebenfalls in Autodesk Inventor modelliert und anschließend zur Analyse und Bewertung in das Finite Element Programm ANSYS Workbench übergeben.

Für die Vernetzung wurden die Tetraeder-Methode und eine Elementabmessung von 10 mm gewählt. Analog zu dem bisher analysierten Vollmodell erfolgte die Eingabe der Randbedingungen. Dies betrifft sowohl den Ansatz der Lasten an der oberen Ringfläche, die Eingabe des Werkstoffes G20Mn5 als auch die Lagerung der Stützenfüße und des oberen Ringes mit einer externen Verschiebung, die die angrenzenden Bauteile berücksichtigt.

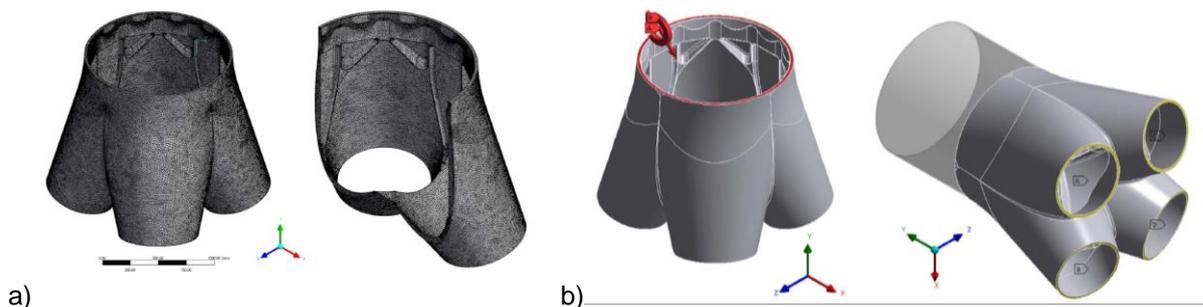


Abbildung 5-20: a) Vernetzung, b) Randbedingungen  
Figure 5-20: a) crosslinking, b) edge conditions

Anschließend wurden die sich ergebenden Reaktionskräfte überprüft. Dies erfolgte über einen Vergleich der Summe der Kräfte in der unteren Lagerfläche mit denen der oberen Ringfläche. Geringe Abweichungen stellten ein akzeptables Ergebnis für die weiteren Analysen und Bewertungen dar.

Der daraufhin folgenden Spannungsanalyse konnte entnommen werden, dass die größten Spannungen jeweils an den Endpunkten der Längssteifen auftreten. Die Maxima der von-Mises-Vergleichsspannung sind mit der Grenz-Vergleichsspannung eines entsprechenden Bemessungskonzeptes gegenüber zu stellen.

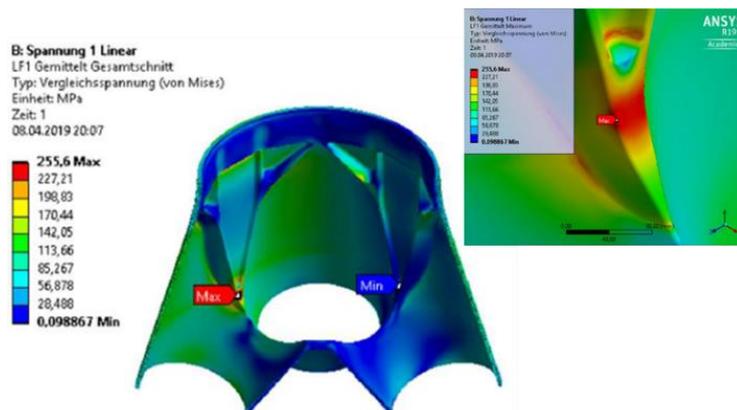


Abbildung 5-21: Vergleichsspannungen  
 Figure 5-21: Comparison stresses

Basierend auf der Spannungsanalyse erfolgt eine Bewertung des Beulverhaltens mit der Eigenwert-Beulanalyse von ANSYS. Die Analyse lieferte einen Lastmultiplikator von  $N=27$ , der auf eine geringe Auslastung hinsichtlich der Beultragfähigkeit schließen lässt.

Zusätzlich können der ANSYS-Berechnung die maximalen Verformungen am oberen Ring entnommen werden. Bei einer seitlichen Auslenkung von 1 mm am oberen Rang ergibt sich bei einer Knotenhöhe von 1528 mm und einer anschließenden Mastlänge von 30 m eine Mastkopfauslenkung von 20 mm.

$$\frac{x}{30.000 \text{ mm} + 1528 \text{ mm}} = \frac{1 \text{ mm}}{1528 \text{ mm}} \rightarrow x = 20 \text{ mm}$$

Mit einer globalen Auslenkung des Mastes von 1333 mm ergibt sich daher eine Gesamtauslenkung am Mastkopf von  $1333 + 20 = 1353 \text{ mm}$ .

Bei einer toleranzbedingten maximal erlaubten Mastverformung von 3,5% über die Gesamtmastlänge von 50 m folgt daher eine zulässige Verformung von

$$0,035 \cdot 50.000 = 1750 \text{ mm} > 1353 \text{ mm}.$$

### Fertigung

Grundlegend für einen reibungslosen Herstellvorgang ist eine gießgerechte Gestaltung des Gussbauteils nach entsprechenden Empfehlungen und Richtlinien. Für den Gussvorgang sollte daher bereits in der Variantenausarbeitung eine fließgerechte Formgebung, die durch weiche Übergänge den Erstarrungsprozess begünstigt, berücksichtigt werden.

Für den Stahlgussknoten wird die Herstellung in einem Gussvorgang vorgesehen. Bei einer betrachteten Stückzahl von bis zu 1500 Stück ergibt sich daher als Vorschlag die sinnvolle Verwendung einer Dauerform, bestehend aus einer inneren Negativform und einer Außenform. Dies bedingt eine aufwändige Gestaltung und Fügung der dauerhaften Kernelemente. Für die Innenform wurden 10 verschiedene Kernformen, insgesamt 31 Kernteile, und für die Außenform 8 Formteile vorgesehen. Dieser Vorschlag ist sehr aufwendig, wird hier dennoch als erster Ansatz vorgestellt. Die Möglichkeit dabei wäre diese Form zu vierteln, wobei es wiederum mehr Aufwand durch das nachträgliche Zusammenfügen der Teile bedeutet. Nach der Montage der inneren Formteile wird die Außenform angebracht. Anschließend erfolgt der

Gießvorgang von oben über die zentrische Ringöffnung und die äußere Ringkontur. Nach Entfernung aller Formteile kann der vollendete Gusskörper nachbearbeitet werden.

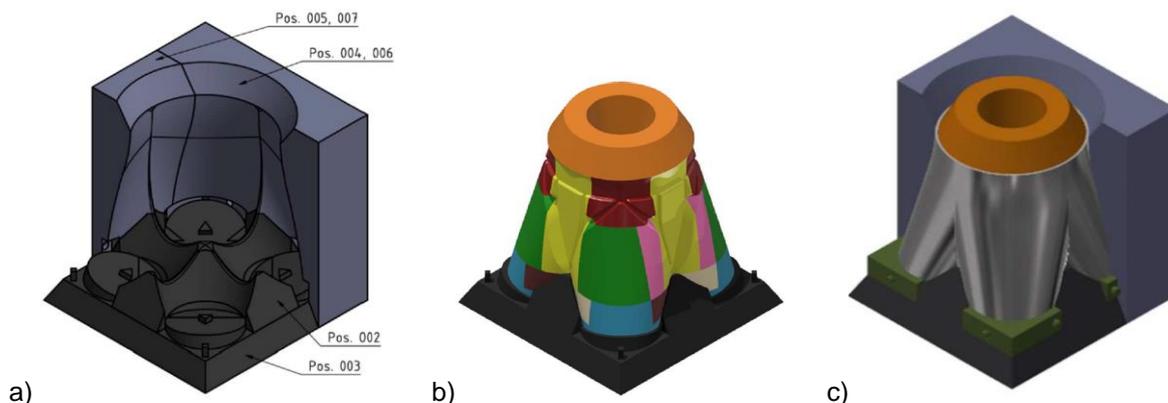


Abbildung 5-22: Dauerform: a) äußere Negativform, b) Kernformen - innere Negativform, c) Endform nach dem Gießvorgang

Figure 5-22: Permanent mould: a) outer negative mould, b) core moulds - inner negative mould, c) final mould after the casting process

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sowohl das genaue Montagekonzept als auch die daraus entstehende Einschätzung der Wirtschaftlichkeit erst nach Absprache mit den Gießereien möglich sind.

#### 5.1.4 Vierfusssockel-Fundament-Anschluss *Four foot pedestral – foundation - connection*

Ein weiterer Verbindungspunkt ist der Anschluss der vier Füße des Sockels an das Fundament. Betrachtet wurden zwei Varianten in Stahl, ausgeführt in Stahlfestigkeitsklasse S355J2. Die ersten Ansätze dafür wurden erarbeitet. Die Abbildung 5-23 zeigt Skizzen der zwei untersuchten Fuß-Verbindungen.

Bei der ersten Variante werden die Füße gelenkig an das Einzelfundament angeschlossen.

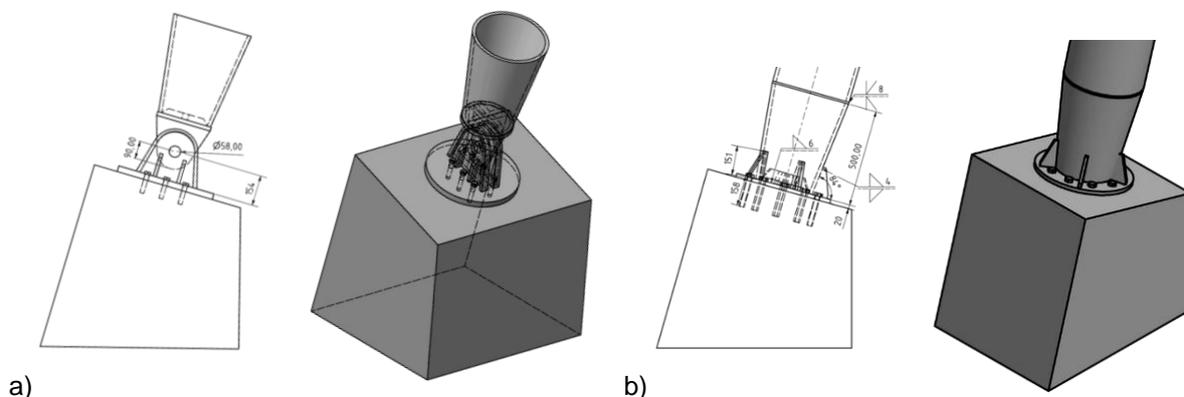


Abbildung 5-23: Anschluss Fuß-Fundament: a) gelenkig, b) starr  
 Figure 5-23: Connection foot-foundation: a) limber, b) rigid

Dabei handelt es sich um eine Augenstab-Bolzen-Verbindung unter Berücksichtigung des Reibungswiderstandes zwischen Augenstab und Bolzen. Die Mastkonstruktion erfährt infolge des maßgebenden Lastfalls A nach der DIN EN 50341 elastische

Formänderungen, die Drehungen des Geleks hervorrufen müssen, damit es nicht zum Haften der Oberflächen kommt. Zusätzlich erfordert dieser Anschluss ein wirksames Einhalten der Toleranzen, was wiederum mit beträchtlichem Aufwand bei der Fertigung verbunden ist.

Bei der zweiten Variante handelt es sich um eine starre Verbindung der Füße mit der Fundamentkonstruktion. Das Rohr wird nach unten hin verjüngend ausgebildet und mit einer Kopfplatte verschweißt. Durch die Ausbildung von Langlöchern in der Platte wird die Möglichkeit zur Justierung bei der Montage gegeben. Die Verbindung zur Fundamentkonstruktion wird durch eine einbetonierte Anschlussbewehrungskonstruktion aus Gewindestäben gewährleistet. Diese wird aus dem Fundament herausstehend positioniert, sodass die Fusskonstruktion eingefädelt und verschraubt werden kann. Zu beachten sind Verformungen aus Gründungsbewegung. Bei Großbohrpfahl 1 sind es etwa 6mm bis 6,5mm. Zu berücksichtigen sind außerdem Nachweise der Anschlusskonstruktion auf Stahlversagen bei Zugbeanspruchung und Quertragfähigkeit, sowie die Nachweise der Platte auf Interaktion Biegung plus Querkraft und der Schweißnaht.

Aus gestalterischen Gründen wurde entschieden, die Fundamentköpfe rund auszuführen.

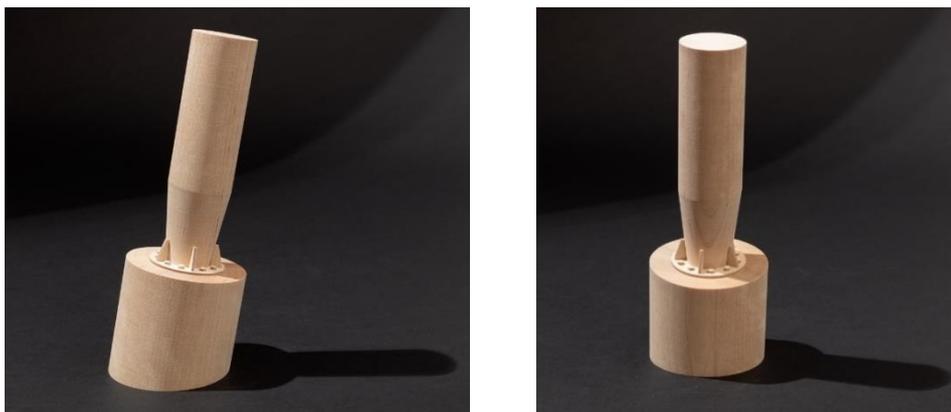


Abbildung 5-24: Modell des Anschlusses Fuß-Fundament mit rundem Einzelfundament  
Figure 5-24: Model of the connection foot-foundation with single round foundation

## 5.2 Die Gestalt des Freileitungsmastes im landschaftlichen Raum *The shape of the overhead line tower in the landscape*

Im Folgenden wird der Freileitungsmast mit konischem Vollwandrohr, Vierfußsockel und aufgesteckter Traverse in verschiedenen landschaftlichen Situationen simuliert und Studien zur Farbgebung angestellt.

Zunächst lässt sich feststellen, dass sich die Eleganz der Konstruktion des Freileitungsmastes in den unterschiedlichsten landschaftlichen Situationen und bei unterschiedlichen Entfernungen bestätigt. Das Höhenverhältnis des Vierfußsockels zum eigentlichen Mast mit seinen zwei Traversen entwickelt sich zu einer stimmigen Eleganz und gibt den neuen Freileitungsmasten einen stimmigen modernen Charakter.

Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende  
Innovative overhead line tower for the energy revolution

---



Abbildung 5-25: Freileitungstrasse parallel zur Autobahn  
Figure 5-25: Overhead line route parallel to the motorway

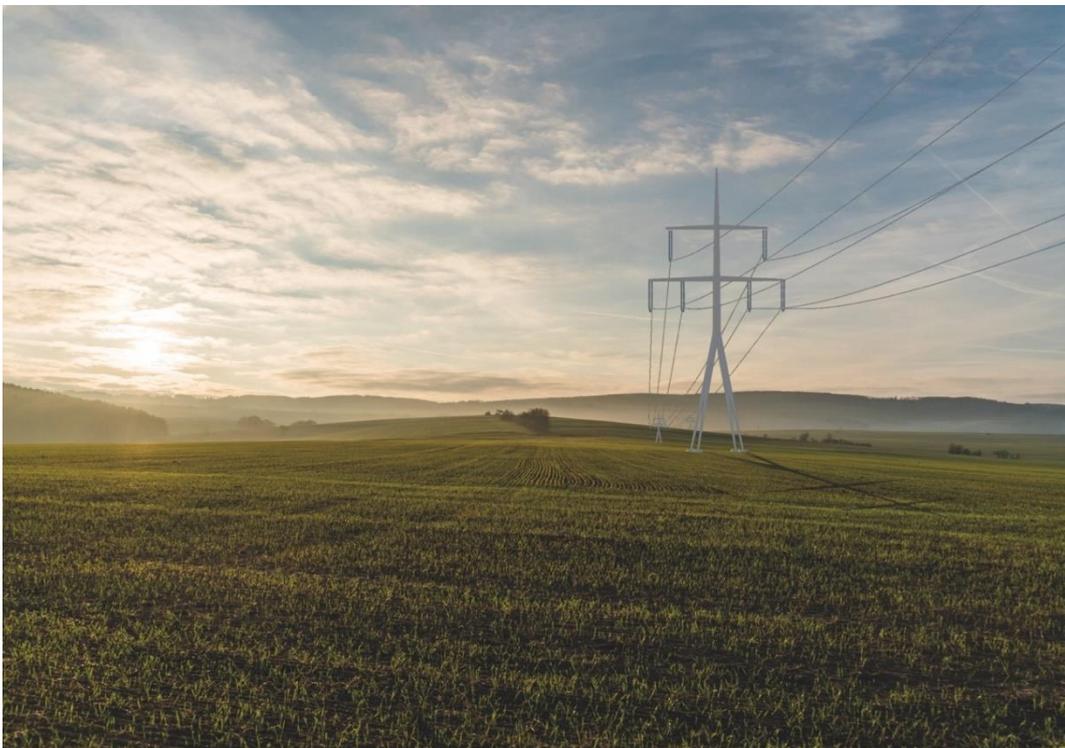


Abbildung 5-26: Freileitungstrasse über Felder  
Figure 5-26: Overhead line route via fields



Abbildung 5-27: Freileitungstrasse über Felder mit Wäldern  
Figure 5-27: Overhead line route via fields with woods



Abbildung 5-28: Freileitungstrasse über Felder mit Wäldern  
Figure 5-28: Overhead line route via fields with woods



Abbildung 5-29: Freileitungstrasse über Felder in Abendstimmung  
Figure 5-29: Overhead line route via fields in the evening mood



Abbildung 5-30: Freileitungstrasse über Felder in Abendstimmung  
Figure 5-30: Overhead line route via fields in the evening mood

### 5.2.1 Die Farbe des Freileitungsmastes im landschaftlichen Raum *The colour of the overhead line tower in the landscape*

Die Farben sollten im weitesten Sinne mit den Farben der Natur und der Vegetation harmonisieren. Zunächst wurde die Farbgestaltung des Freileitungsmastes auf seine Wirkung in der Landschaft in sechs unterschiedlichen Farben untersucht. Ausgewählt wurden die Farben: Weiß, Anthrazit, Grün, Blau, Grau und Rost (Cortenstahl). Ziel der Farbgebung muss es sein, den Mast in der Landschaft möglichst selbstverständlich erscheinen zu lassen. Modische oder grelle Farben wurden deshalb prinzipiell ausgeschlossen. Auch die Farben Grau und Rost (Cortenstahl) wurden in den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen, da sie sich nicht in die Natur einfügen. Die Farben Anthrazit, Grün, Blau und Weiß werden entsprechend den marktüblichen Eisenglimmerfarben gewählt, wobei die Farben Grün und Weiß am besten mit der Landschaft korrespondieren.

Während das Grün der Farbe der heutigen Gittermasten entspricht und sich damit in die Familie der Freileitungsmasten einreicht, könnte ein Weiß auf die erneuerbaren Energien hinweisen und den Masten ihren eigenen Charakter im landschaftlichen Raum verleihen.

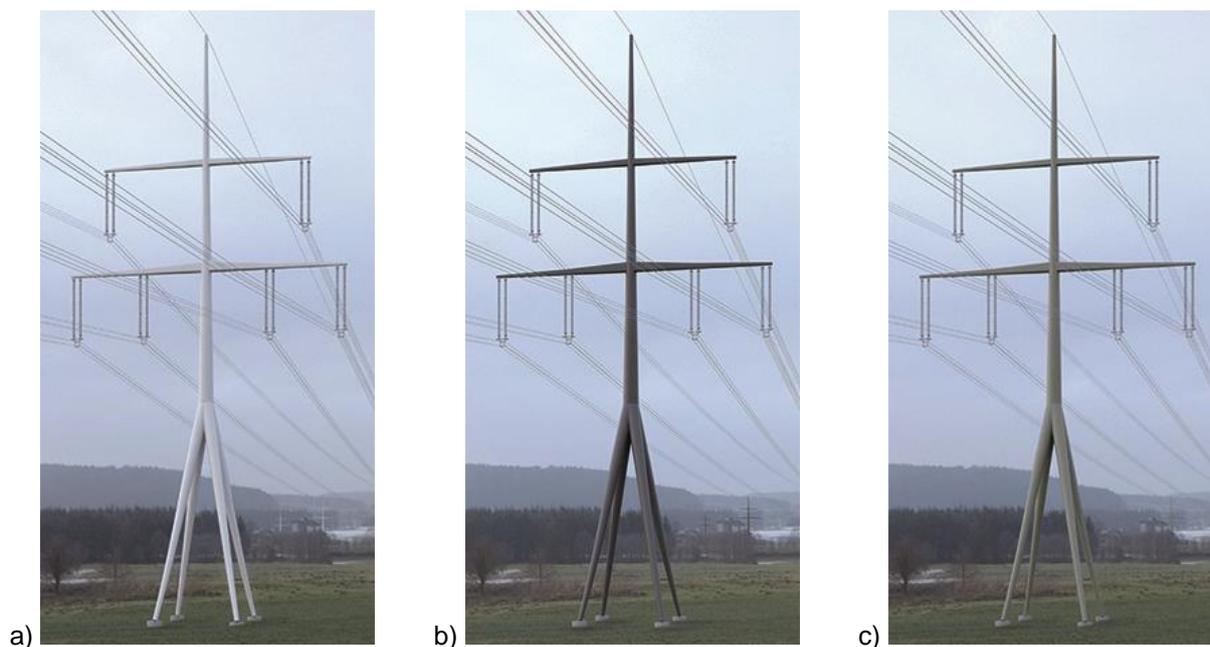


Abbildung 5-31: Unterschiedliche Farbgebung des Mastes, a) weiß, b) anthrazit, c) grün  
Figure 5-31: Different colours of the mast, a) white, b) anthracite, c) green

## Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende Innovative overhead line tower for the energy revolution

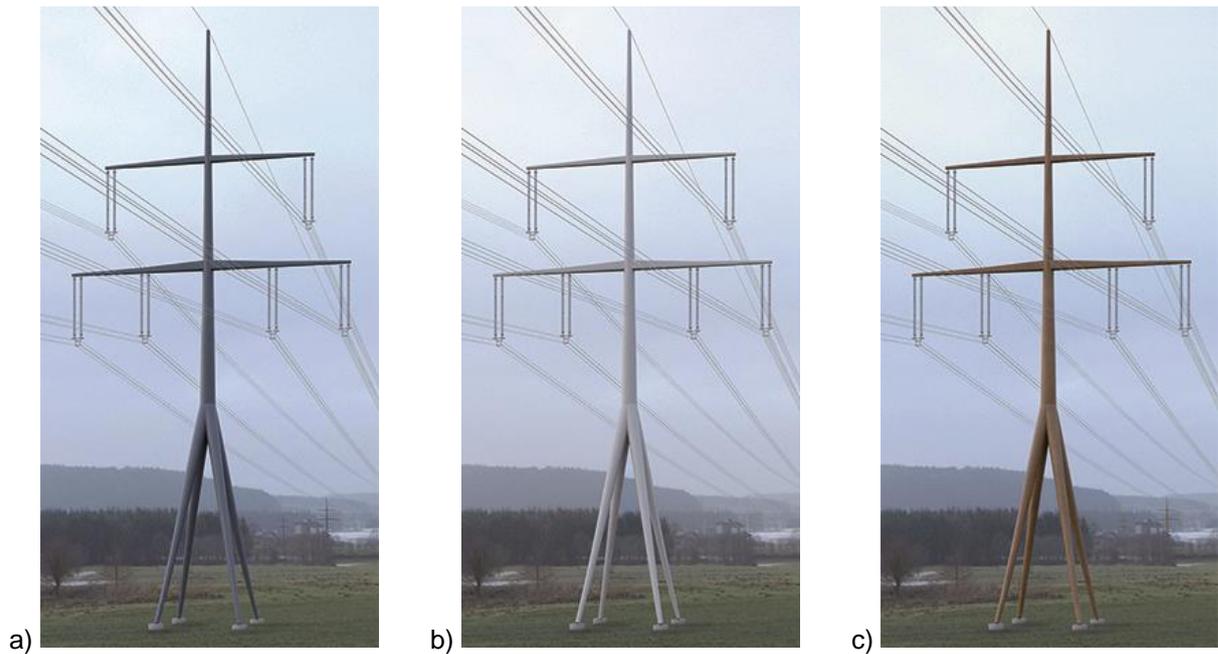


Abbildung 5-32: Unterschiedliche Farbgebung des Mastes: a) blau, b) grau, c) rost  
Figure 5-32: Different colors of the mast: a) blue, b) grey, c) rust

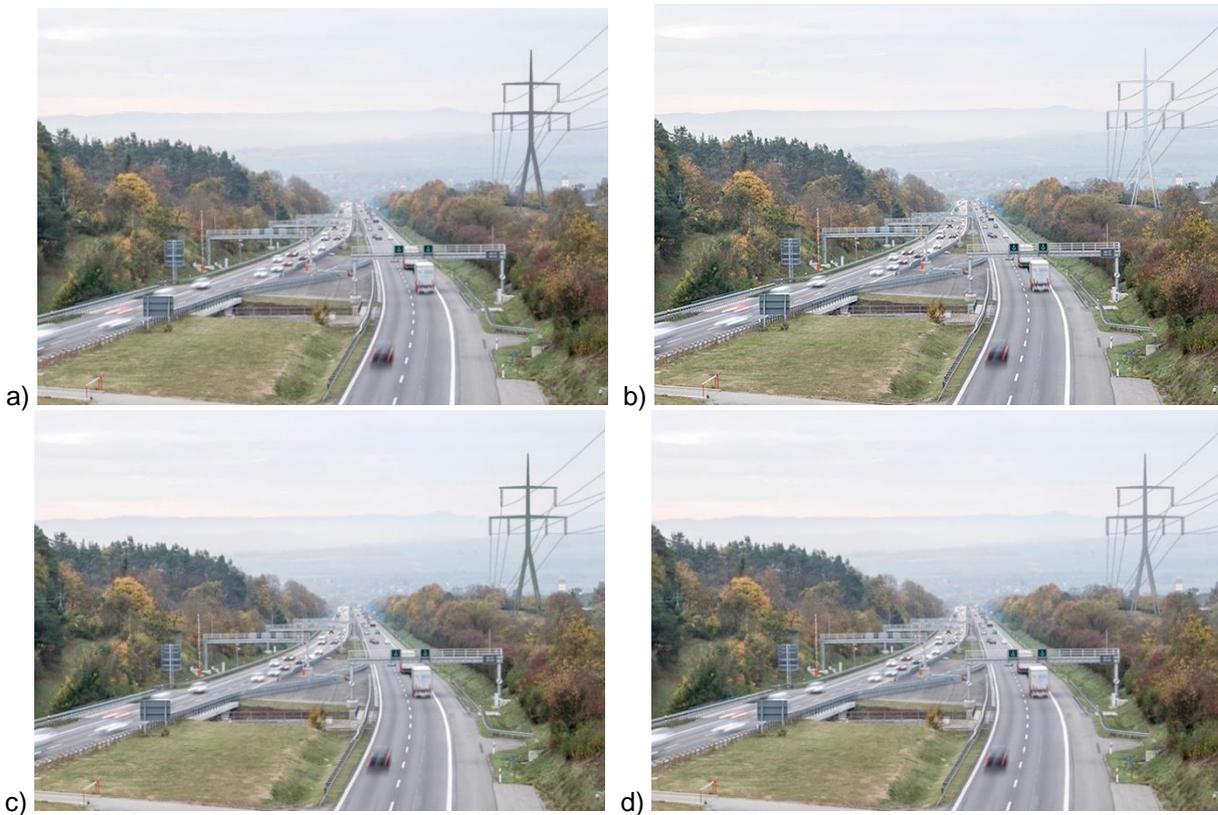


Abbildung 5-33: Freileitungstrasse entlang der Autobahn, a) anthrazit, b) weiß, c) grün, d) grau  
Figure 5-33: Overhead line route parallel to the motorway, a) anthracite, b) white, c) green, d) grey

Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende  
Innovative overhead line tower for the energy revolution

---



Abbildung 5-34: Freileitungstrasse entlang von Feldern, a) anthrazit, b) weiß, c) grün, d) grau  
Figure 5-34: Overhead line route via fields, a) anthracite, b) white, c) green, d) grey

Innovativer Freileitungsmast für die Energiewende  
Innovative overhead line tower for the energy revolution



a)



b)

Abbildung 5-35: Freileitungstrasse entlang der Autobahn, a) weiß, b) grün  
Figure 5-35: Overhead line route parallel to the motorway, a) white, b) green

## **6 Experimentelle Untersuchungen der Pressverbindung** ***Experimental investigations of steel pipe press connection***

### *Kurzfassung*

*Bei dem Stoß des Mastschaftes handelt es sich um eine Stahlrohrverbindung, die für eine zügige Montage als Pressverbindung ausgebildet wird. Diese Rohr-in-Rohr-Verbindung wird durch Normal- und Querkraft sowie Biege- und Torsionsmomente beansprucht. Die Ausbildung der Verbindung erfolgt als selbsthemmende kegelförmige Pressverbindung. Durch die reibschlüssige Verbindung können die Kräfte und die Momente über Haftreibung übertragen werden. Der Haftbeiwert dürfte nicht zu hoch sein, sodass eine schnelle Montage ermöglicht wird. Andererseits soll ein größtmögliches Biegemoment in der Verbindung übertragen werden können. Vorteil der Ausbildung der Stahlrohrverbindung als Pressverbindung ist, dass hierdurch der Montage- und Instandsetzungsaufwand reduziert wird. Um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Verbindung zu untersuchen, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die im Folgenden erläutert werden.*

### *Abstract*

*The joint of the mast shaft is a steel pipe connection which is designed as a press connection for quick assembly. This pipe-in-pipe connection is subjected to normal and transverse forces as well as bending and torsion moments. The connection is formed as a self-locking conic press connection. The frictionally engaged connection allows the forces and torques to be transmitted via static friction. The coefficient of adhesion should not be too high, so that fast assembly is possible. On the other hand, the greatest possible bending torque should be transmitted in the connection. The advantage of using the steel pipe connection as a press connection is that the assembly and repair effort is reduced. In order to investigate the load-bearing capacity and serviceability of the connection, experimental studies were carried out, which are explained below.*

### **6.1 Allgemeines** ***General***

Mit dem Ziel, den Montage- und Instandsetzungsaufwand der Mastkonstruktion zu verringern, wurde die Pressverbindung für konische, kreisförmige Hohlprofile entwickelt. Wie im Demonstratorbauteil zu erkennen (siehe Abbildung 6-1), werden die Mastschaftteile an die Formteile der Pressverbindung im Werk angeschweißt und so zur Baustelle geliefert. Der Mastschaft kann dadurch in transportierbaren Stücken geliefert und erst am Maststandort zum Ganzen zusammengefügt werden.

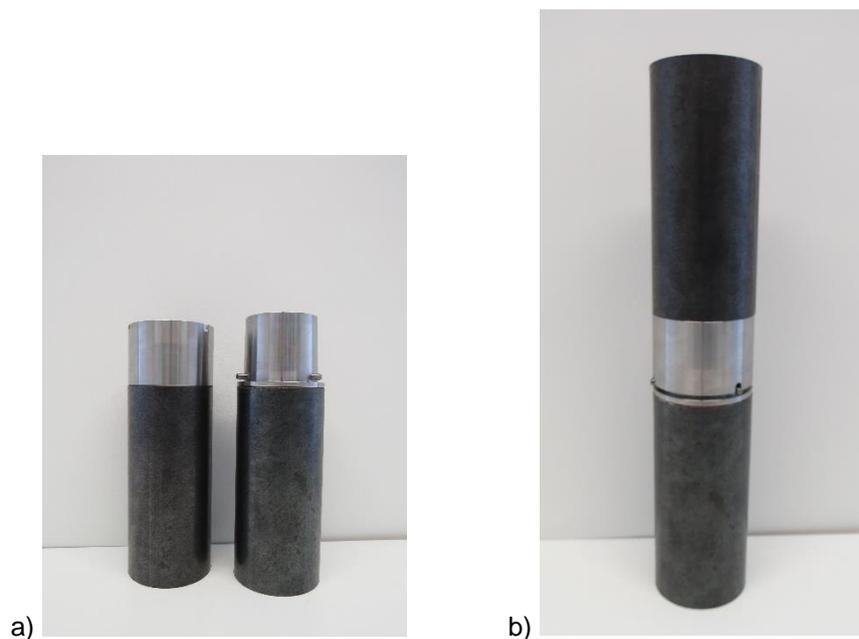


Abbildung 6-1: Demonstratorbauteil einer Pressverbindung:  
 a) vor dem Verpressen, b) nach dem Verpressen

Figure 6-1: demonstration part of a crimp connection: a) before the injection, b) after the injection

Die Entwicklung der Pressverbindung der Rohre basiert auf dem Prinzip einer Wellen-Naben-Verbindung der Maschinenbautechnik. Für die Fertigung werden die Formteile in einer CNC-Drehmaschine (englisch: Computerized Numerical Control oder deutsch: computer-numerische Steuerung) längs-rundgedreht. Der Innendurchmesser des Außenrohrs wird um das sogenannte Übermaß kleiner als der Außendurchmesser des Innenrohrs gefertigt, sodass beim Verpressen der Rohrstücke ineinander in der Fuge ein definierter Druck aufgebaut wird. Mit Hilfe dieses Pressdrucks kann die Reibungskraft in der Fuge aktiviert werden. Damit wird es möglich die maßgebenden Beanspruchungen aus der Belastung der Mastkonstruktion, wie in Abbildung 6-2 skizziert, aufzunehmen. Die maßgebende Biegebeanspruchung folgt aus dem Lastfall A nach DIN EN 50341. Für die maximale Torsionsbeanspruchung ist bei diesem Tragmast der Lastfall K unter einseitiger Belegung verantwortlich.

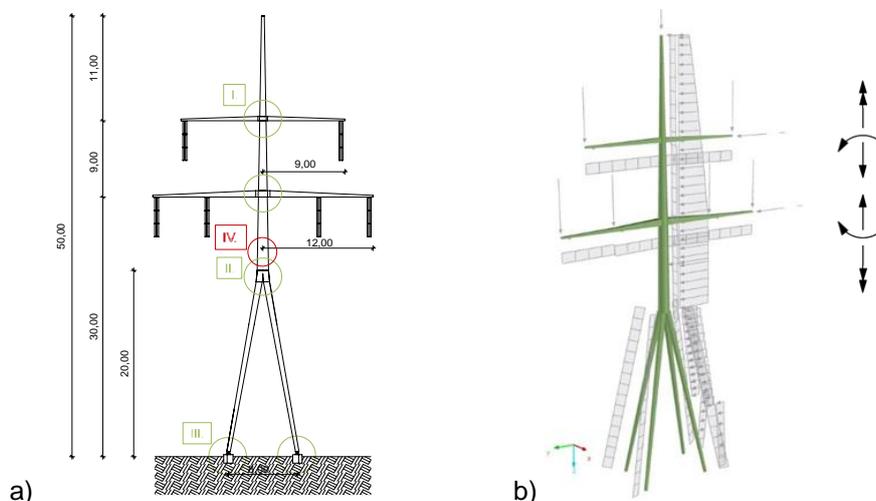


Abbildung 6-2: a) Vier-Fuß-Mast mit der Lage der Rohr-in-Rohr-Pressverbindung, b) und den maßgebenden Beanspruchungen am LF A nach DIN EN 50341;

Figure 6-2: Four-foot-mast with the position of the tube-in-tube crimp connection and the decisive loads

Die experimentellen Untersuchungen der Rohr-in-Rohr-Pressverbindung unterteilen sich in zwei Versuchsserien, die Kleinteil- und Großteilversuchsserien. In der Kleinteilversuchsserie, mit dem 1:5 Maßstab des Durchmessers bezogen auf die tatsächlichen Abmessungen des Mastschafts, werden unterschiedliche geometrische Variablen untersucht und deren Einflüsse auf die Tragfähigkeit herausgearbeitet. Zur Verifizierung der Kleinteilserie wird die Großteilserie, mit dem Maßstab 1:2 bezogen auf die tatsächlichen Abmessungen, auf Trag- und Gebrauchstauglichkeit überprüft. Gemäß der maßgebenden Beanspruchung sind die Serien in jeweils drei Versuchsreihen unterteilt: Versuchsreihe Verpressen zur Herstellung der Pressverbindung, Versuchsreihe Torsion und Versuchsreihe Biegung.

## 6.2 Versuchskörper *Sample assembly*

### 6.2.1 Allgemeines *General*

Für die Aufnahme der definierten Beanspruchungen wurden für beide Versuchsserien Geometrien der Probekörper konstruiert. Für diese Versuchskörper wurde mit einem S355 J2H die gleiche Stahlsorte wie bei dem Mastschaft gewählt. Dies bringt Vorteile für die spätere Schweißverbindung zu dem Mastschaft.

Die Probekörper der Kleinteilserie weisen 1/5 des Außendurchmessers des Mastschaftes an der maßgebenderen Stelle auf. Die maßgebenden Kenngrößen (siehe Abbildung 6-3) für die Geometrie der Verbindung wurden für ein Fünftel der realitätsnahen Lasten analytisch und anlehnend an die Maschinenbautechnik ermittelt. Damit die Steifigkeit der inneren und der äußeren Formteile annähernd gleichbleibt, sollten sich dabei die minimalen Rohrstärken ähneln.

Für die Probekörper der Großteilserie wurde neben dem 1:2 Maßstab der Ausgangsgeometrie, das Geometrieverhältnis  $Q=L_f/D_a=1,25$  der Kleinteilprobekörper übernommen. Mit diesen Eingangsparametern wurden für die vorgegebene Beanspruchung (Hälfte der realen Schnittgrößen der Variante 4 an der betreffenden Stelle) die maßgebenden Kenngrößen festgelegt und damit die Probekörpergeometrie konstruiert.

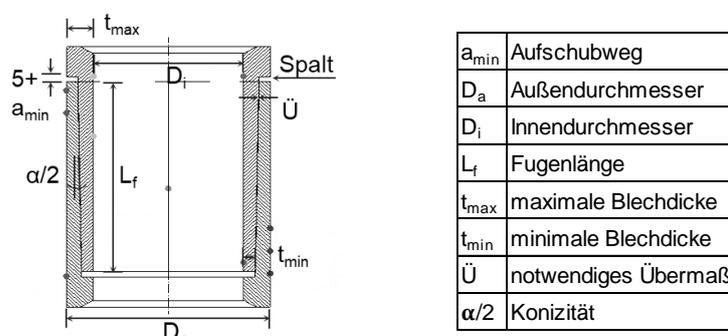


Abbildung 6-3: Wichtigste Kenngrößen einer Rohr-in-Rohr-Pressverbindung  
 Figure 6-3: Most important parameters of a pipe-in-pipe press connection

Für die Fertigung der Formteile wurden Rohlinge in der CNC-Drehmaschine eingespannt. Die verwendeten Maschinen besitzen eine Schnittstelle, mit der auch CAD-Zeichnungen eingelesen und direkt programmiert werden können. Damit war die Genauigkeit der Abmessungen auf die dritte Nachkommastelle notwendig. Die Abbildung 6-4 zeigt einen Auszug aus dem Werksplan. Am Beispiel der V2B01- und V2T01-Probekörper der Großteilversuchsserie sind die genaueren Abmessungen der Geometrie zu erkennen. Die Abmessungen aller gefertigten Versuchskörper beider Versuchsserien sind im Anhang B3 zusammengefasst.

Um das genaue, kontrollierte Verpressen der Formteile durchführen zu können, mussten die Ober- und Unterkanten plangefräst werden. Zusätzlich musste schon beim Konstruieren der Geometrien der Spalt (siehe Abbildung 6-3), der nach dem Verpressen bleibt, groß genug festgelegt werden. Einerseits konnte dadurch der genauere Aufschubweg vor und nach dem Verpressen vermessen werden. Andererseits ist dieser Spalt für die funktionsfähige Abtragung der Biegebeanspruchung als Pressverbindung notwendig, da sich die Flächen infolge Verformung nicht aufeinander abstützen und die Lastübertragung in der Pressfuge stattfindet.

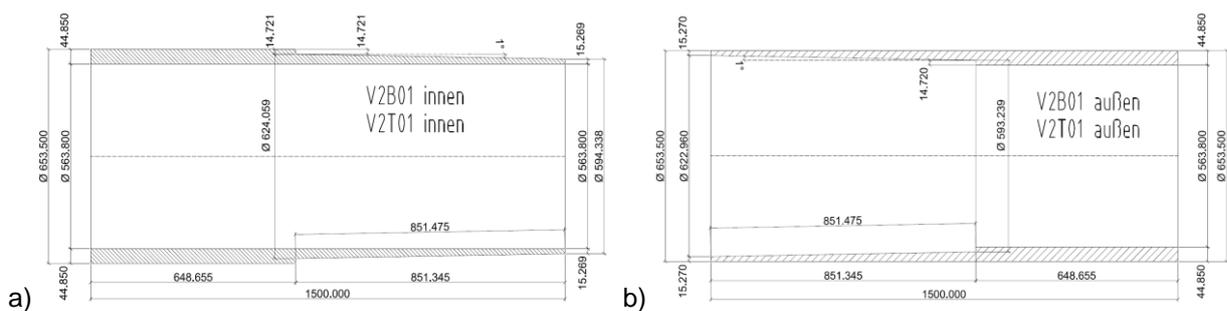


Abbildung 6-4: V2B01- und V2T01-Probekörper der Großteilversuchsserie: a) Formteil innen, b) Formteil außen;

Figure 6-4: V2B01- und V2T01- samples of the major part of the test series: a) internal moulding, b) outside moulding

## 6.2.2 Fertigung Assembly

Zur Fertigung der Probekörper wurden Rohlinge verwendet, die aus dem Walzprozess Fertigungstoleranzen aufwiesen. Um sie zur genaueren Fertigung gut in der Maschine einspannen zu können, mussten sie nach dem Zuschneiden auf Maß erst plangedreht werden (siehe Abbildung 6-5 a)). Dabei konnte auch die Maschine für die weitere Fertigung kalibriert werden.

Nach dem Einladen der Geometrie in den Speicher und der exakten Zentrierung der Rohre wurden die Formteile in mehreren Arbeitsgängen gefertigt.

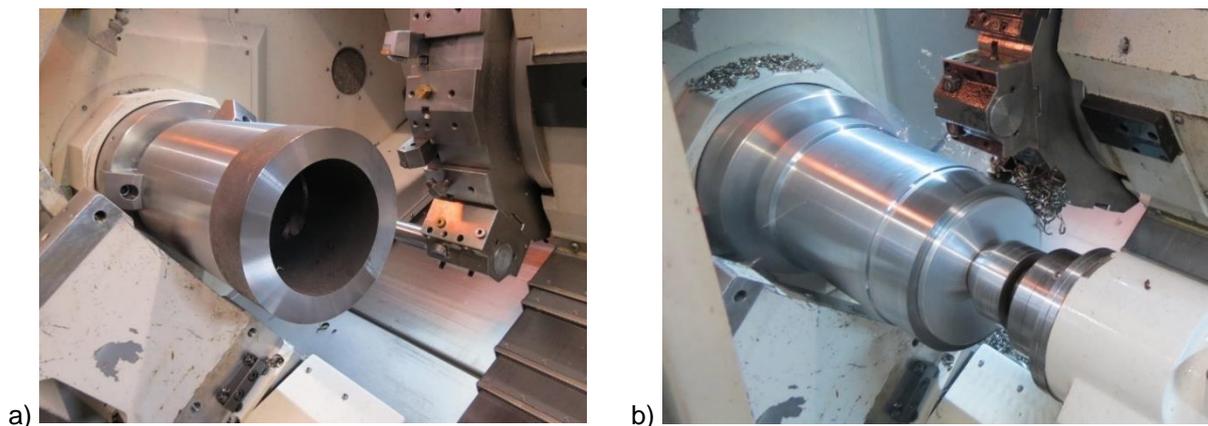


Abbildung 6-5: Fertigung der Pressverbindung: a) Plandrehen des Rohlings,  
b) Schruppen der Fuge am Innenrohr  
Figure 6-5: Production of the crimp connection: a) facing of the blank,  
b) roughing the joint on the inner pipe

Am Beispiel des Innenrohrs ist das Herstellen des Konus in Abbildung 6-5 b) erkennbar. Hier wird die Fuge in mehreren Arbeitsgängen grob vorbearbeitet / geschruppt, mit dem Ziel viel Material in möglichst kurzer Zeit abzutragen. Dabei bleiben die Bearbeitungsspuren erkennbar und die Oberfläche sehr rau. Um die geforderte Oberflächengüte sowie Maß- und Formgenauigkeit zu erreichen, folgt die nachträgliche Feinbearbeitung / das Schlichten. Dabei wurden vom Werkstück meist nur noch einige Zehntel Millimeter abgetragen. Im zusätzlichen Arbeitsgang und nach dem Wechseln des Werkzeugs konnte die rechtwinklige Kante hergestellt werden

Nach jedem Arbeitsgang wurde das Werkstück zur Kontrolle der Maß- und Formgenauigkeit vermessen. Nur dadurch konnten die geforderten Toleranzen eingehalten werden und rechtzeitig mit der Änderung der Einstellungen auf Probleme reagiert werden.

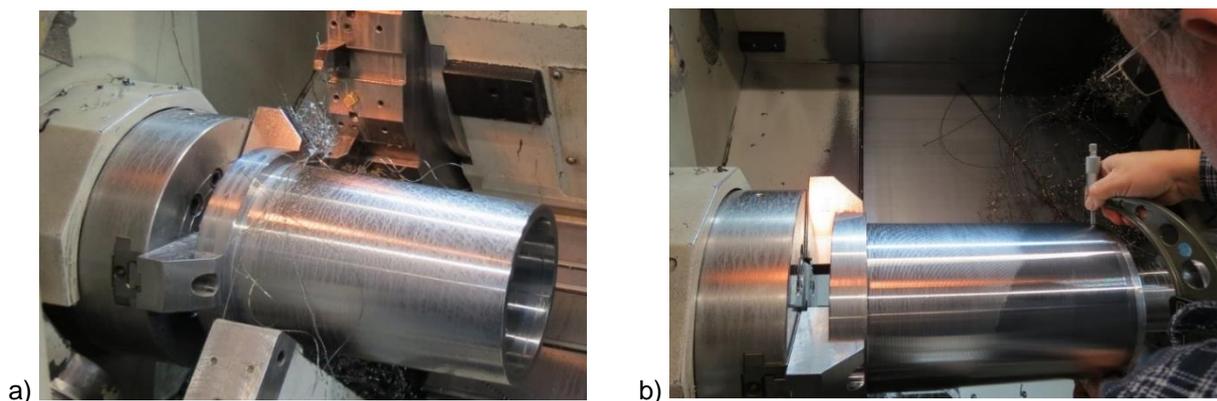


Abbildung 6-6: Fertigung der Pressverbindung: a) Schlichte der Fuge am Innenrohr,  
b) Kontrolle der Maß- und Formgenauigkeit  
Figure 6-6: Production of the crimp connection: a) smoothing the joint on the inner pipe,  
b) Control of dimensional and shape accuracy

Da es sich um kein genormtes Werkstück handelt, konnte auf ständige Betreuung der Fertigung durch das Personal nicht verzichtet werden. Die Einstellungen an der Maschine mussten durch das Erproben festgestellt werden. Dazu bedarf es einer ausreichenden Erfahrung des Personals und der ständigen Überwachung. Zusätzlich



Buchstabe ist bereits ausreichend, um die Lage des Toleranzfeldes und somit die Passungsart der Steckverbindung angeben zu können. Eine Schematische Darstellung der Lage des Toleranzintervalls bezüglich des Nennmaßes ist in der Abbildung 6-8 abgebildet.

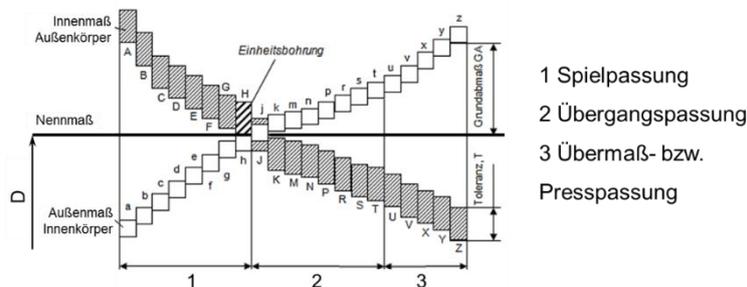


Abbildung 6-8: Lage des Toleranzintervalls bezüglich des Nennmaßes mit Passungsarten  
 [eigene Darstellung in Anlehnung an [33]]

Figure 6-8: Position of the tolerance interval with respect to the nominal dimension with fit types  
 [own presentation based on [33]]

Die Nulllinie des Toleranzfeldes liegt bei H bzw. h und beschreibt die Einheitsbohrung. Kleinere Innenmaße der Bohrung, hier des Innendurchmessers des Außenkörpers, somit Grundabweichungen zwischen J und Z, bzw. größere Außenmaße der Welle, hier des Außendurchmessers des Innenkörpers, ebenfalls Grundabweichungen zwischen j und z, führen zu einer Übergangs- oder sogar Presspassung. Da sich somit die Toleranzfelder überschneiden, wird ein Zusammenfügen der Elemente ohne Kraftaufwand oder Temperatureinfluss nicht möglich sein. Umgekehrt ergeben größere Bohrungsinnenmaße bzw. kleinere Wellenaußenmaße Spielpassungen, die aufgrund der mangelnden Reibungsaktivierung aus fehlender Kontaktpressung keine funktionsgerechte Verbindung darstellen.

Ergänzt wird die Grundabweichungskennung mit einer Zahl für den Grundtoleranzgrad. Dieser lässt sich ebenfalls in Abhängigkeit des Nennmaßes und des vorhandenen Grenzabmaßes tabellarisch bestimmen. Der Toleranzgrad IT enthält daher nur, unabhängig von der Passungsart, eine Aussage bezüglich der Größe der Maßabweichung. Je größer der Toleranzgrad, desto größer ist die vorhandene Abweichung zum geforderten Nennmaß. Im Maschinenbau werden allgemein IT-Klassen von 6 bis 11 gefordert, bei Walz-, Press- und Schmiedeerzeugnissen sind IT-Klassen von 12 bis 16 zulässig.

Mit den so ermittelten Toleranzklassen der Bohrung und der Welle kann das ISO Passungssystem nach DIN EN ISO 286-1 [33] angegeben werden. Typische Beispiele für eine zu erzielende Presspassungen einer Wellen-Naben-Verbindung sind die Toleranzangaben H6/h6 sowie H7/p6, bezogen auf eine Einheitsbohrung. Die DIN 7190-1 [23] für zylindrische Pressverbände empfiehlt die Anwendung des Passungssystems Einheitsbohrung.

Das genaue Vermessen der Probekörper ermöglicht eine Toleranzuntersuchung im Hinblick auf die Passungsart. Vorerst waren die Hauptabmessungen wie die Gesamtlänge und der Außendurchmesser für die Planung bzw. Bestätigung des Versuchsaufbaus wichtig, um die Probekörper unproblematisch darin ausrichten zu können. Des Weiteren wurde im Detail untersucht, wie stark die Form der Probekörper vom Nennmaß abweicht. Am wichtigsten für die Funktionsfähigkeit der

Pressverbindung ist die Ausbildung der Fuge. Dafür wurden an mehreren Achsen Abmessungen der Durchmesser, der Dicken und des Kegelwinkels der Fuge aufgenommen. Neben der Abweichung des Kegelwinkels wurde zur Beurteilung der Fugenqualität auch die Geradheit ihrer Form mit Haarlineal untersucht.

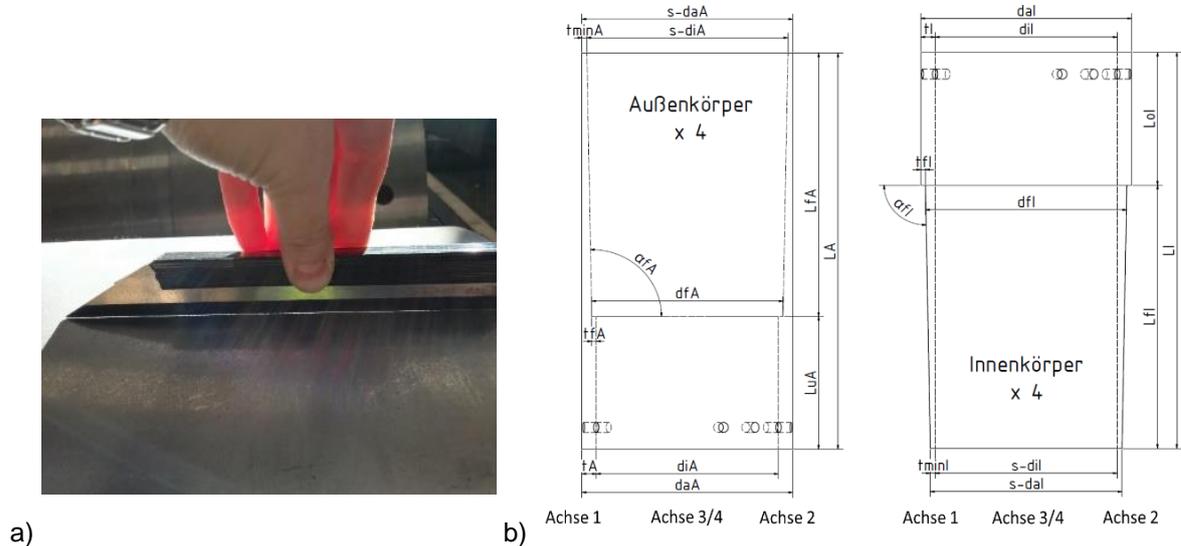


Abbildung 6-9: a) Messungen an der Fuge mit Haarlineal,  
 b) maßgebende Variablen für die Geometriemessung  
 Figure 6-9: a) Measurement at the joint with a straight edge,  
 b) decisive variables for geometry measurement

Um die Exzentrizität, also die Lage des Rohrmittelpunktes festzustellen, wurden das Maximum und das Minimum der Wanddicken ausgewertet. Aus dieser Exzentrizität konnte auch die Rundheit des Rohres abgeleitet werden. Die grobe Zusammenstellung der Messergebnisse aller getesteten Probekörper ist im Anhang B3 dargestellt.

Bei der Bestimmung der Toleranzkennzahlen ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um eine Übertragung der Regelungen in der Maschinenbautechnik auf die nicht genormten Versuchskörper handelt. Zusätzlich ist eine größere Anzahl gleicher Versuchskörper erforderlich, um eine repräsentative Aussage hinsichtlich der Herstellungstoleranzen entnehmen zu können. Die im Weiteren ermittelten Toleranzangaben sind daher unter Vorbehalt zu verstehen und dienen lediglich der groben Passungseinordnung.

Entscheidend ist die Fugenausbildung in der Pressverbindung, welche oben und unten vermessen wurde. Von den Vermessungsdaten werden bei der Bohrung, dem Außenkörper, die Innendurchmesser und von der Welle, dem Innenkörper, die Außenmaße zur Toleranzermittlung benötigt. Differenziert betrachtet werden die Probekörper im Maßstab 1:5 und 1:2 aufgrund der unterschiedlichen Stückzahlen.

Die Probekörper im Maßstab 1:5, die jeweils nur einmal vorhanden waren, wiesen meist Toleranzgrade bis IT 12 auf und lagen somit an der unteren Grenze der IT-Klassen für Walz-, Press- und Schmiedeerzeugnisse.

Die Probekörper im Maßstab 1:2, die jeweils 4-fach vorhanden waren, hatten mit Toleranzgraden bis IT 13 zwar größere Toleranzen, lagen aber immer noch im unteren Bereich der IT-Klassen für Walz-, Press- und Schmiedeerzeugnisse. Die zugehörigen Grundabweichungen waren weit gestreut und führten zu unterschiedlichen

Passungssystemen. Durch unterschiedliche Grenzabmaße der Innen- und Außenkörper sowie in den unterschiedlichen Fugennesspunkten ist eine direkte Aussage hinsichtlich der Passungsart daher nur bedingt möglich. Die Abmessungen des Innenkörpers wiesen zwar meist zu kleine Werte auf, führten jedoch durch ebenfalls zu kleine Innenabmessungen des Außenkörpers meist zu einer Passung U13/d12. Die Abmessungen der Probekörperteile ergeben daher in den meisten Fällen eine Übermaßpassung, bei der das Höchstmaß der Bohrung kleiner als das Mindestmaß der Welle ist. Die Tabelle 16-12 im Anhang B3 enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Toleranzuntersuchungen an Probekörpern der Großteilserie.

Die Messung der Oberflächenrauigkeit wurde vor der Versuchsdurchführung nach dem Tastschnittverfahren mittels Perthometer durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine numerische Bewertung der Oberflächenrauheit über die Rz-Methode, bei der die gemittelte Rautiefe Rz aus dem arithmetischen Mittel von meist fünf gemessenen Einzelrautiefen innerhalb einer Messstrecke bestimmt wird. Laut der Einstellungen des Geräts betrug die Vorschublänge 5mm und die Vorschubgeschwindigkeit 2mm/s. Beispielhaft können die Ergebnisse der Rauheitsmessungen am Versuchskörper V2B01-A1 der Abbildung 6-10 b) entnommen werden.



a)

b)

Achse	Formteil	mittel µm	Theorie	
			min µm	max µm
Achse 4 längs	außen	48,33	12,50	31,50
Achse 4 quer		7,63		
Achse 1 längs	innen	32,20	6,30	20,00
Achse 1 quer		7,30		

Abbildung 6-10: a) Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit am Versuchskörper V2B01-A1  
 b) Ergebnisse der Untersuchung

Figure 6-10: a) Investigation of the surface condition of the sample V2B01-A1,  
 b) Results of the investigation

Die DIN 7190-1 für zylindrische Pressverbände liefert für die Oberflächenrauheit der Fügeflächen Richtwerte des Mittenrauwertes Ra, die sich in gemittelte Rautiefen Rz übertragen lassen. Für die Bohrung ist ein Mittenrauwert von 3,2 µm vorzusehen, der einer gemittelten Rautiefe Rz von 12,5 bis 31,5 µm entspricht. Für die Welle folgt bei einem Mittenrauwert von 1,6 µm eine gemittelte Rautiefe Rz von 6,3 bis 20 µm. Es wird deutlich, dass die gemessenen Werte der Oberflächenrauheit die Grenzwerte der Rautiefe überschreiten. Da diese Überschreitung jedoch nur zu erhöhten Einpresskräften führt, wird die Oberflächenbeschaffenheit als günstiger Einfluss auf die Tragfähigkeit der Pressverbindung gesehen.

### 6.3 Kleinteilversuchsserie, Maßstab 1:5 Test series of small components, measuring unit 1:5

#### 6.3.1 Allgemeines General

Die Versuchsserie mit den Probekörpern im Maßstab 1:5 wurde auf Biegungs- und Torsionstragfähigkeit untersucht. Dabei sollte der Einfluss verschiedener Geometrievariablen auf die Tragfähigkeit geprüft werden. Variiert werden bei den experimentellen Untersuchungen die Wanddicke, die Fugenlänge, die Kegelneigung sowie das Übermaß. Die Tabelle 6-1 fasst diese Variablen zusammen.

Die Versuchsserie Biegung beinhaltet bei elf Konfigurationen sechzehn zu untersuchenden Versuchskörper. In der Versuchsserie Torsion wurden bei sieben Konfigurationen zwölf Versuchskörper geprüft.

Tabelle 6-1 : Übersicht der untersuchten Versuchskörper: a) Versuchsreihe Biegung,  
 b) Versuchsreihe Torsion

Table 6-1: Overview of the investigated samples: a) experimental run bending,  
 b) experimental run torsion

Versuch	Durchmesser D [mm]	Wanddicke t [mm]	Fugenlänge Lf [mm]	Kegelneigung $\alpha/2$ [°]	Übermaß Ü [mm]	Anzahl
V1B01	244,5	32,0	250,0	1,00	0,2	2
V1B02	244,5	32,0	250,0	1,00	0,3	1
V1B03	244,5	32,0	300,0	1,00	0,2	2
V1B04	244,5	32,0	300,0	1,00	0,3	1
V1B05	244,5	32,0	275,0	1,00	0,2	1
V1B06	244,5	32,0	300,0	1,34	0,2	2
V1B07	244,5	32,0	300,0	1,34	0,3	1
V1B08	244,5	36,0	300,0	1,00	0,2	2
V1B09	244,5	36,0	300,0	1,00	0,3	1
V1B10	244,5	36,0	300,0	1,34	0,2	2
V1B11	244,5	36,0	300,0	1,34	0,3	1

a)

Versuch	Durchmesser D [mm]	Wanddicke t [mm]	Fugenlänge Lf [mm]	Kegelneigung $\alpha/2$ [°]	Übermaß Ü [mm]	Anzahl
V1T01	242,0	32,0	250,0	1,00	0,21	2
V1T02	242,0	32,0	250,0	1,00	0,31	2
V1T03	242,0	32,0	300,0	1,00	0,21	3
V1T04	242,0	32,0	300,0	1,00	0,31	1
V1T06	242,0	32,0	300,0	1,34	0,22	1
V1T08	242,0	36,0	300,0	1,00	0,22	2
V1T09	242,0	36,0	300,0	1,00	0,31	1

b)

In der Übersicht ist der Unterschied in den Durchmessergrößen der beiden Serien zu betonen. Dies resultiert aus der Problematik, die bei der Fertigung der Körperteile der Biegeserie deutlich geworden ist. Wie oben erwähnt bringen die gewalzten Rohlinge bestimmte Toleranzen mit. Um diese in die CNC-Maschine einspannen zu können, mussten die Außen- und Innendurchmesser vorerst auf ein bestimmtes Maß plangedreht werden. Diese Erkenntnisse wurden schon beim Konstruieren der Versuchskörpergeometrie für die Torsionsserie berücksichtigt und die Rohlinge dafür direkt etwas mehr abgedreht.

Für die Herstellung der Pressverbindung und damit der Aktivierung der Haftkraft in der Fuge mussten die Formteile mit definierter Kraft ineinander verpresst werden. Dabei wurden für beide Versuchsreihen insgesamt 28 Versuchskörper vorbereitet. Vor den Versuchsserien Torsion und Biegung wird vorerst im Weiteren die Serie „Verpressen“ dargestellt.

### 6.3.2 Versuchsreihe Verpressen *Test sequence pressing*

#### 6.3.2.1 Messtechnik, Versuchsaufbau und –durchführung *Technique of measurement, experimental setup and procedure*

Nach dem Vermessen der Geometrie wurden die Probekörperteile der jeweiligen Versuchsreihen entsprechend vorab mit Dehnmessungstreifen (DMS) ausgestattet. Damit konnte die Aufnahme der Dehnungen während des Versuchs aufgezeichnet werden. Um die maßgebenden Stellen herausarbeiten zu können, wurde ein FE-Modell entwickelt.

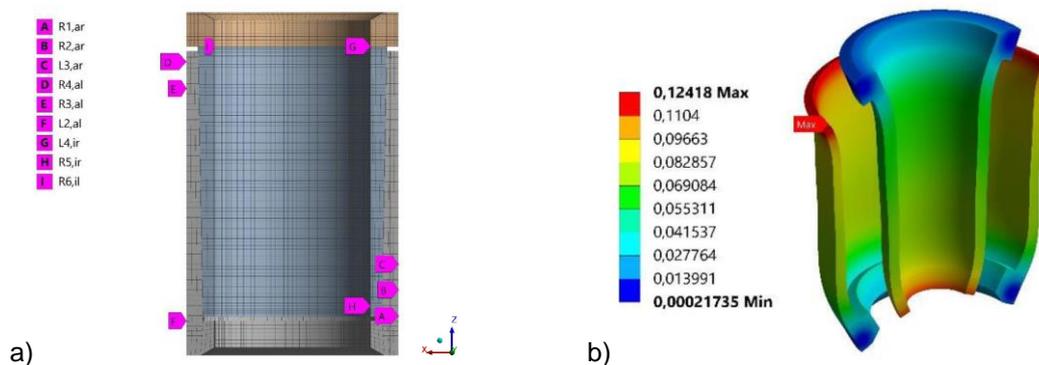


Abbildung 6-11: a) Messstellen am FE-Modell zur Kalibrierung,  
b) Verformungen im gefügten Zustand (überhöhte Darstellung)  
Figure 6-11: a) Measuring points on the FE-Model for calibration,  
b) deformations in the joined state (super elevated representation)

Die Erstellung der 3D-Geometrie der Pressverbindung erfolgt in Autodesk Inventor [39]. Diese wird dann über die CAD-Schnittstelle von ANSYS Workbench [34] importiert und mit einer statisch-mechanischen Analyse verknüpft, die die Simulationsumgebung darstellt.

Für die Simulation des Fügeverfahrens wird das Übermaß der kegelförmigen Pressverbindung geometrisch modelliert, sodass sich ein Eigenspannungszustand einstellt. Auf diese Weise wird das äußere Formteil geweitet und das innere wird komprimiert. Der Wert des Übermaßes ist nicht anzugeben, da dieser bereits geometrisch modelliert ist.

Mit den Ergebnissen der FE-Simulation waren wie erwartet die Stellen mit der kleinsten Steifigkeit die maßgebenden Stellen. Die Positionen der Dehnmessungstreifen (DMS) für die Versuchsreihe Verpressen wurden so festgelegt, dass die gleichen DMS für die darauffolgenden Versuchsreihen Biegung und Torsion genutzt werden konnten. Für die Aufnahme der Meridiandehnungen wurden DMS linear LY4 der Firma HBM mit integrierten Lötflächen unterhalb des Messgitters längs der Rohrachse angebracht. Für die Kontrolle der Umfangsdehnungen wurden die des gleichen Typs, nur quer ausgerichtet, angebracht. An den Stellen, wo gleichzeitig beide Richtungen betrachtet werden mussten, benutzte man Kantenrosetten RY8 mit drei Messgittern in 0°/45°/90°-Anordnung. Die DMS mit 45° angeordneten Messgittern konnten auch für die Aufnahme der Schubdehnungen während der Torsionsbeanspruchung verwendet werden. Die Abbildung 6-12 zeigt für beide Serien der Kleinteilversuchsreihe die Positionen der DMS an den Probekörpern.

## Experimentelle Untersuchungen der Pressverbindung Experimental investigations of steel pipe press connection

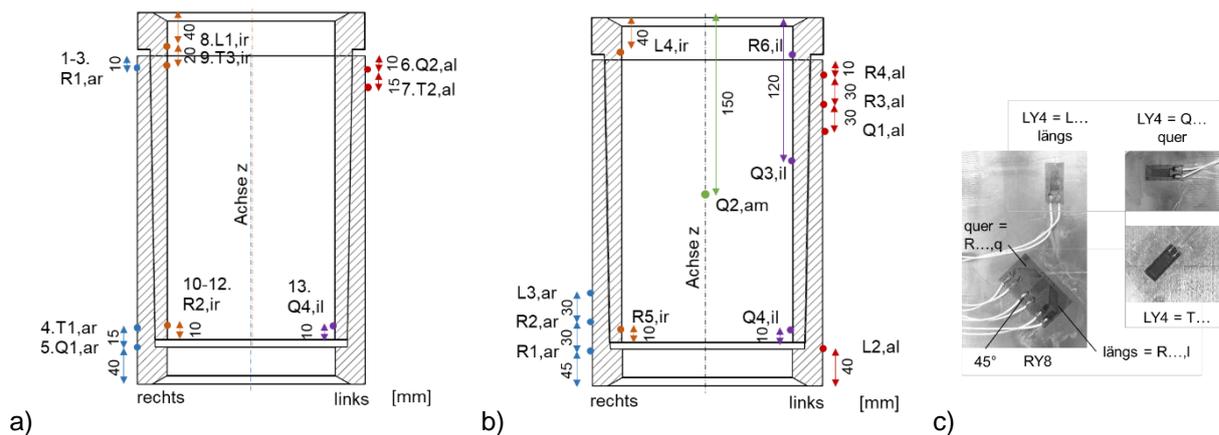


Abbildung 6-12: Position der Dehnmessungsstreifen am Probekörper: a) Versuchsreihe Torsion, b) Versuchsreihe Biegung, c) Ausrichtung der Dehnmessungsstreifen

Figure 6-12: position of the strain gauge on the sample: a) experimental run torsion, b) experimental run bending, c) orientation of strain gauge

Um eine konstant definierte Oberfläche in der Pressfuge zu erhalten, wurden die Formteile im Weiteren vom groben Schmutz gesäubert und danach entölt. Nachdem die Probekörperteile vorbereitet wurden, konnte das Innenrohr in das Außenrohr eingesetzt werden. Daraufhin folgten der Einbau und die Ausrichtung der Versuchskörper in dem Versuchsstand. Für die Kontrolle des Aufschubwegs wurden Wegaufnehmer WTG 5/LR/M am Spalt des Probekörpers angebracht.

Die Versuche wurden in einer Viersäulen Druckprüfmaschine mit der maximal möglichen Prüflast von 5000 kN durchgeführt. Wie in Abbildung 6-13 zu erkennen, wird die Last dabei durch sehr steife Platten eingebracht. Diese sind gelenkig gelagert und, wie auch die Ober und Unterkanten des Probekörpers, plangedreht, wodurch die Lasteinleitung gleichmäßig stattfindet und ein Verkanten der Probekörper vermieden werden kann.

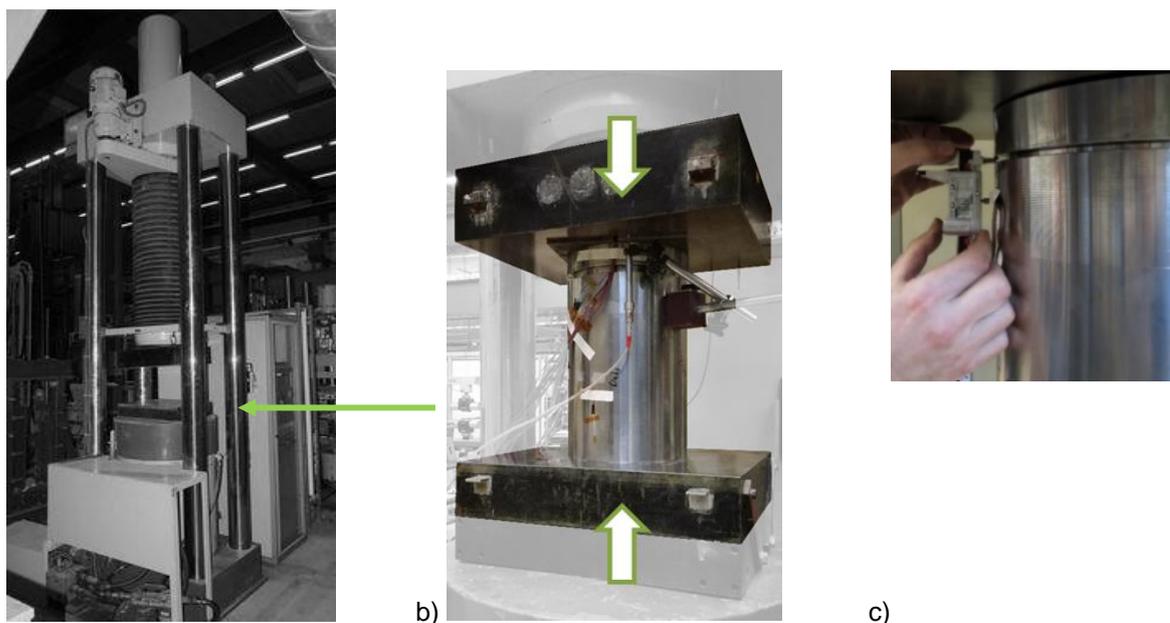


Abbildung 6-13: a) hydraulische Prüfmaschine für den Verpressvorgang, b) Versuchskörper eingebaut, c) Kontrolle des Aufschubwegs

Figure 6-13: a) hydraulic testing machine for the pressing process, b) sample installed, c) control of the deflection path

Während des Versuchs war es wichtig darauf zu achten, dass die Achsen der Innen- und Außenrohre übereinstimmen, damit die Achsen der Messtechnik auf einer Linie liegen. Dazu wurde an Innen- und Außenrohr jeweils eine Markierung in Form von Strichen gesetzt, die zur Ausrichtung dienten. Zum Fügen der Elemente wurde der Längspressverband gewählt. Unter der hydraulischen Presse wurde nun die Nabe mit hoher Axialkraft weggesteuert um das Maß des Aufschubwegs in den Wellensitz gepresst. Da beim Fügen der Probekörper die elementare Verbindung hergestellt wurde, war die Überwachung des Vorgangs wichtig. Während des Verpressens wurden der Maschinenweg und der Spaltmaß aufgenommen, sodass das Übermaß bestimmt werden konnte. Die Geschwindigkeit beim Fügen wird bei 1,2mm/s hochgehalten, um den sogenannten Stick-Slip-Effekt (das Wechseln zwischen dem Haften und Gleiten) zu vermeiden. Der Verpressvorgang fand ungehindert und ohne wahrnehmbare Geräusche statt.

### 6.3.2.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse Evaluation and results of the experiment

Bei der Entwicklung der Pressverbindung orientierte man sich an den Grundlagen und der analytischen Auslegung der Wellen-Naben-Verbindungen. Diese basieren wiederum auf den elastizitätstheoretischen Beziehungen am offenen, dickwandigen Hohlzylinder unter Außen- bzw. Innendruck [14]. In der Fuge entsteht ein Überdruck aus dem Übermaß vor dem Zusammenfügen, der während des Verpressens überwunden werden muss. In der Abbildung 6-14 b) ist der Spannungsverlauf im Querschnitt einer Pressverbindung dargestellt. Zu erkennen sind die maßgebenden Stellen. Dies sind die Innenflächen des Innen- und Außenkörpers.

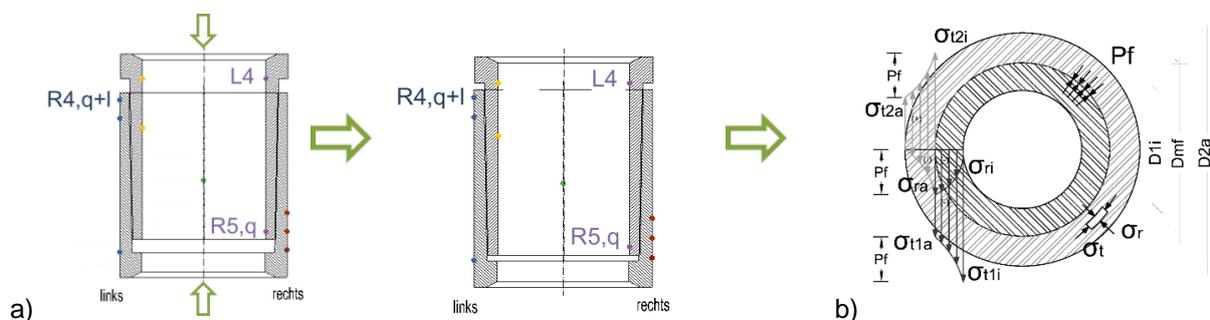


Abbildung 6-14: Pressverbindung: a) Vor und nach der Verpressen, b) Spannungsverlauf im Pressverband [eigene Darstellung in Anlehnung an [24]]

Figure 6-14: Press connection: a) before and after pressing, b) tension curve in the press connection [own presentation based on [24]]

Während der Versuchsdurchführung wurde wie oben erwähnt die Maschinenkraft aufgezeichnet. Ebenfalls konnte die vertikale Verschiebung des Innenkörpers mit Hilfe des aufgetragenen Wegaufnehmers verfolgt werden. Das Verhältnis dieser Werte ist in dem Diagramm in der Abbildung 6-15 dargestellt.

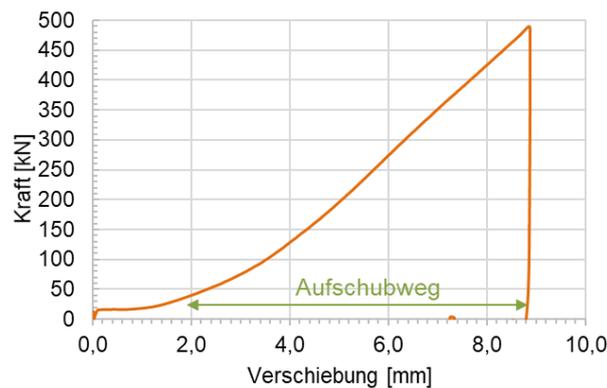
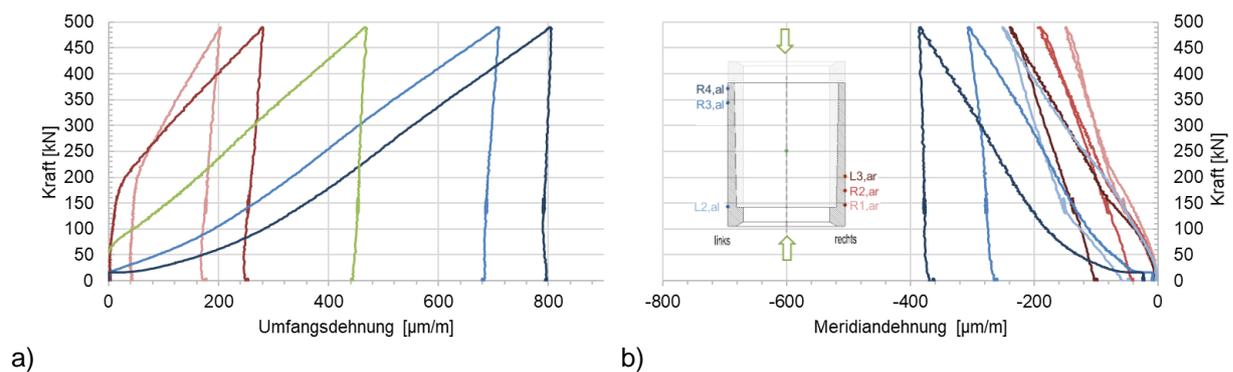


Abbildung 6-15: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers V1B03-2  
 Figure 6-15: Force-deformation diagram of the sample V1B03-2

Anhand der sich einstellenden Steigung der aufgenommenen Verpresskraft im Bezug zu der Verschiebung kann der tatsächliche Aufschubweg von 6,78mm bei dem Versuchskörpers V1B03-2 abgelesen werden. Dieser hängt von den geometrischen Imperfektionen ab und lässt sich auf das in der Fuge vor dem Verpressen vorhandene Übermaß umrechnen.

Das Übermaß bewirkt in der Fuge einen Pressdruck und einen Eigenspannungszustand des Versuchskörpers, der anhand der gemessenen Dehnungen an maßgebenden Stellen gut zu deuten ist. An den in Abbildung 6-11 b) dargestellten Verformungen wird ersichtlich, dass der Innenkörper aufgrund des sich einstellenden Fugendrucks gestaucht und der Außenkörper gedehnt wird. Die größten Verformungen sind an der minimalen Wanddicke des jeweiligen Formteils vorzufinden, da diese die geringste Steifigkeit besitzen. Deutlich wird es auch in den Versuchsergebnissen. Anhand des Versuchskörpers V1B03-2 sind die auftretenden Umfangs- und Meridiandehnungen des Außenkörpers dargestellt.



a) b)  
 Abbildung 6-16: Versuchskörper V1B03-2 Außenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen

Figure 6-16: Sample V1B03-2 external body: a) circumferential strains, b) meridian stretches.

Vorerst ist hier die Aufweitung des Außenkörpers anhand der plausiblen Verläufe der Umfangsdehnung deutlich zu erkennen. Die größeren Dehnungen resultieren aus den kleineren Steifigkeiten am oberen, freien Rand. Aus der aufgebracht Druckkraft resultieren negative Meridiandehnungen, die auf die Stauchung des Körpers hindeuten. Ebenfalls festzustellen sind die bleibenden Dehnungen nach der Entlastung der Probe. Dies folgt aus der Tatsache, dass nun die Verbindung hergestellt wurde und das Innenrohr im Außenrohr verpresst ist.

Der Verpressvorgang hat auch Auswirkungen auf den Innenkörper. Diese sind den Diagrammen in der Abbildung 6-17 zu entnehmen.

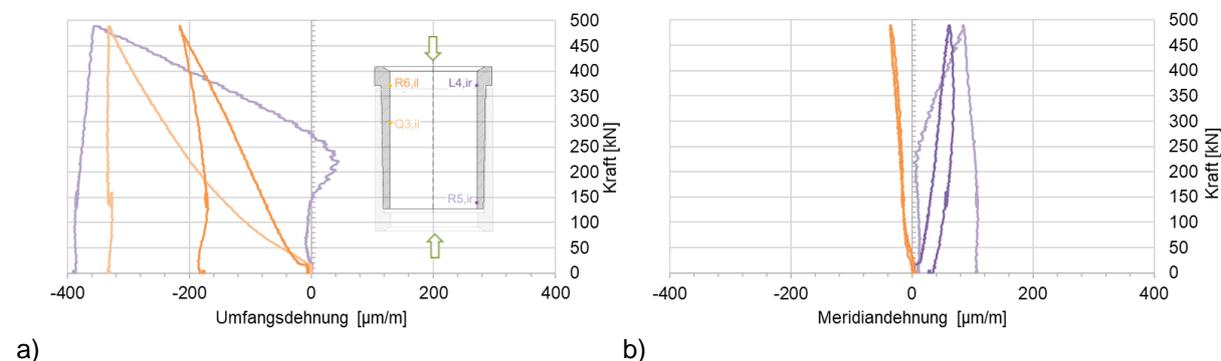


Abbildung 6-17: Versuchskörper V1B03-2 Innenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen  
 Figure 6-17: Sample V1B03-2 internal body: a) circumferential strains, b) meridian stretches

Während das Außenrohr aufgeweitet wird, wird das Innenrohr zusammengedrückt. Dieses ist in den negativen Umfangsdehnungen deutlich zu erkennen. Dabei wird das Innenrohr am freien Rand erst aktiviert, wenn die Fugen ganz aufeinander aufliegen. In die Meridianrichtung sind deutlich kleinere Stauchungen im Vergleich zu dem Außenkörper feststellbar. Die aufgebrachte Druckkraft sucht sich den kürzesten Weg. Deswegen wird über die Reibung in der Fugenfläche das Außenrohr früh zum Lastabtrag aktiviert. Die Einleitung der Last ins Innenrohr ist bezogen auf die Achse der Fuge außermittig. Dadurch entsteht ein zusätzliches Randmoment, das den oberen „Kranz“ nach außen biegt. Die Innenkante des Innerkörpers wird dadurch gezogen, was in den positiven Meridiandehnungen zu erkennen ist. Dieser Einfluss ist sehr klein und über den Umfang verteilt nicht gleichmäßig, was auf eine sensible Reaktion des Innenkörpers auf geometrische Imperfektionen zurückzuführen ist.

Der Einfluss des Dickensprungs am Anfang des Gurts ist ebenfalls in der Verformung des Versuchskörpers zu erkennen. Anhand der Ergebnisse der FE-Simulation zu dem Versuchskörper V1B03-2 in Abbildung 6-18 wird dies deutlich.

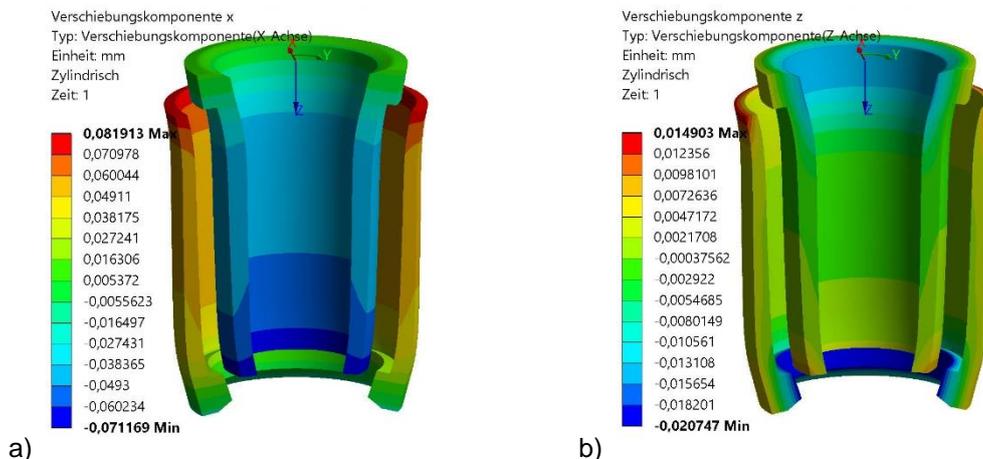


Abbildung 6-18: Versuchskörper V1B03-2 (überhöhte Darstellung): a) Verschiebung (x-Achse) radial, b) Verschiebung (z-Achse) Meridian  
 Figure 6-18: Sample V1B03-2 (super elevated representation): a) displacement (x-axis) radial, b) displacement (z-axis) meridian

Im unteren Bereich der Pressverbindung wölbt sich der Außenkörper am Wanddickensprung nach außen und der Innenkörper nach innen. Ähnliches ist im oberen Bereich zu beobachten. Hier ist eine nach innen gerichtete Wölbung des Innenteils zu verzeichnen, während das äußere Formteil sich nach außen wölbt. Der hinausragende Teil des Innenkörpers ist an der Stirnfläche gelagert und steht nicht unter der Flächenpressung. Zudem weist es eine höhere Steifigkeit als die umliegenden Bereiche auf, sodass sich dieser kaum verformt. Die anschließenden Bereiche jedoch werden infolge des Fugendrucks gestaucht, sodass die Wölbung entsteht. Gleiches gilt für den Überstand des Außenkörpers, der an der unteren Fläche eingespannt ist und aufgrund des sich aufweitenden Nachbarbereichs wölbt. Das beschriebene Verhalten der Überstände wird in der Literatur auch als Stützwirkung bezeichnet (siehe [21]). Sie bewirkt, dass auf die Unterstände ein vergrößerter Druck wirkt.

Bei der weiteren Betrachtung der numerischen Ergebnisse lässt sich das experimentell festgestellte Tragverhalten bestätigen. Für die Ausgabe der richtungsbezogenen Dehnungen wird das zylindrische Koordinatensystem verwendet. Generell gelten für alle Dehnungen im gefügten Zustand, dass sie aufgrund der vorliegenden Rotationssymmetrie in Umlaufrichtung gleich groß sind. Da das Übermaß in der Pressverbindung Zwangsverformungen auslöst, handelt es sich bei den vorliegenden Spannungen um Eigenspannungen. Der Pressdruck in der Fuge ist aus der Radialspannung ablesbar.

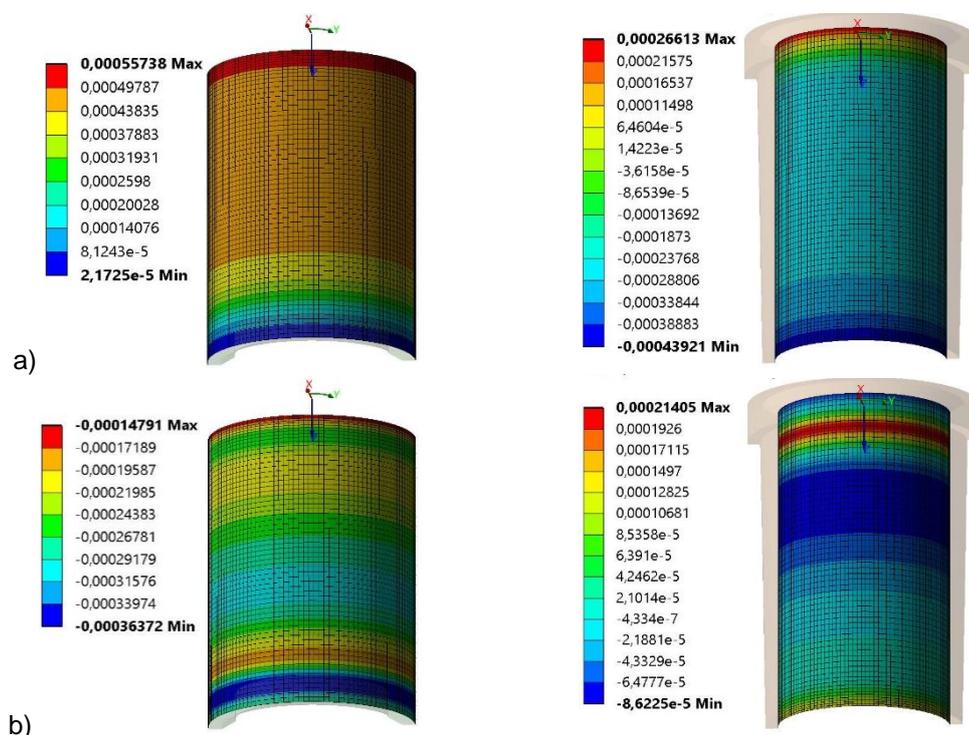


Abbildung 6-19: Ergebnisse der FE-Simulation Lastfall Verpressen: a) Umfangsdehnung in mm/mm, b) Meridiandehnung in mm/mm

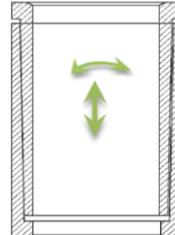
Figure 6-19: Results of the FE-simulation load case pressing: a) circumferential strains, b) meridian strains

Die Membranspannungen in beiden Körperteilen sind dominierend. Wie außerdem zu erkennen ist, wird die Fließgrenze des Werkstoffs nicht erreicht, sodass die

Pressverbindung im gefügten Zustand rein elastisch beansprucht wird. Damit ist ein Potential für eine größere Torsionsmomentaufnahme vorhanden.

Für den infolge des Verpressens geschaffenen Eigenspannungszustand ist die experimentell festgestellte Ausnutzung der Versuchskörper zusammenfassend in folgender Tabelle 6-2 zusammengestellt.

Tabelle 6-2 : Maximale Ausnutzung der Probekörper beider Versuchsreihen  
 Table 6-2: maximum utilisation of the samples from both test series

Außenkörper	Umfangsrichtung	<b>bis 70%</b>		
	Meridianrichtung	<b>bis 32%</b>		
Innenkörper	Umfangsrichtung	<b>bis 47%</b>		
	Meridianrichtung	<b>bis 22%</b>		

Der in der Fuge aufgebaute Pressdruck ist für die Aufnahme des Torsionsmoments notwendig. Bei kombinierter Beanspruchung steht der Restanteil der Ausnutzung für den Abtrag der Biegebeanspruchung zur Verfügung.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Geometrie der Probekörper, die mit Hilfe analytischer Lösung entwickelt wurde, mit dem numerischen Modell für den Lastfall Verpressen verifiziert werden konnte. Die Kalibrierung des FE-Modells anhand von Versuchen ist soweit gelungen, dass gute Übereinstimmungen am Außenkörper festzustellen sind. Für die Übereinstimmungen am Innenkörper sind weitere Studien, besonders in Bezug auf den Einfluss der Toleranzen, notwendig.

Beim Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander wird der Einfluss der Geometrievariablen auf die Tragfähigkeit der Pressverbindung deutlich. Die Abbildung 6-20 zeigt die prozentualen Veränderungen der Dehnungen an der maßgebenden Stelle des Außenkörpers und die Abweichungen in der aufgetragenen Presskraft für das Herstellen des gleichen Pressdrucks in der Fuge.

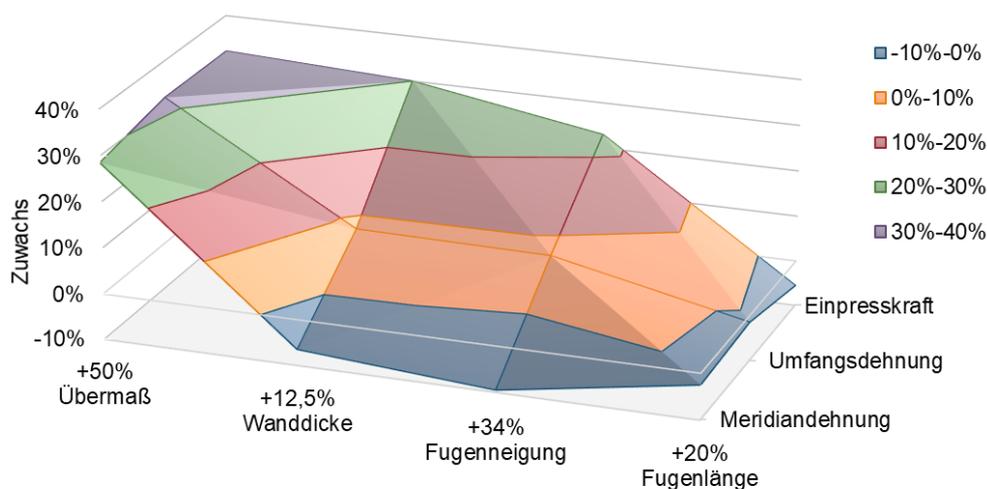


Abbildung 6-20: Einfluss der Geometrievariablen auf die Dehnungen an der maßgebenden Stelle des Außenkörpers und die Einpresskraft

Figure 6-20: Influence of the geometry variables on the strains at the decisive point of the outer body and the press-in force

Dabei werden Werte folgender Versuche miteinander verglichen:

Wanddicken:	V1B03 ↔ V1B08
Fugenflächenneigung:	V1B03 ↔ V1B06
Fugenlänge:	V1B01 ↔ V1B03
Übermaß:	V1B01 ↔ V1B02

Es hat sich dabei herausgestellt, dass die Erhöhung der Fugenflächen kaum Einfluss auf die Aufweitung des Außenkörpers hat. Dazu ist eine annähernd gleiche Kraft notwendig, um das gleiche Übermaß herzustellen. Dies deutet auf einen Vorteil bei der Beigebeanspruchung, da für den Lastabtrag ein größerer Hebelarm beim gleichbleibenden Eigenspannungszustand zu Verfügung steht. Die Variation der Fugenneigung und der minimalen Wanddicke liefern ähnliche Ergebnisse, da diese voneinander geometrisch abhängig sind. Damit führt eine größere Konizität in Verbindung mit kleinerer Rohrdicke zu möglicher Materialersparnis. Die Variation des Übermaßes hat wie vermutet den größten Einfluss auf die Tragfähigkeit und die Einpresskraft der Verbindung und kann als Stellschraube für das Beeinflussen des Pressdrucks in der Fuge, damit auch des Torsionsmoments, ausgelegt werden.

### **6.3.3 Versuchsreihe Torsion** *Test sequence torsion*

#### **6.3.3.1 Versuchsaufbau und –durchführung** *Experimental setup and execution*

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden sieben statische Versuche durchgeführt. Da einige Versuche mehrmals durchgeführt wurden, ergaben sich 12 Probekörper. Die Versuche wurden so geplant, dass sie sich in einigen gezielten Kennwerten unterscheiden, um deren Einfluss auf die Versagenslast zu analysieren.

Bevor der Versuchsstand aufgebaut werden konnte, mussten die zuvor verpressten Versuchskörper vorbereitet werden. Dazu wurde pro Seite je eine Kopfplatte senkrecht zur Zylinderachse an die Probekörper angeschweißt. Die Platten wurden vorher mit Löchern für den Einbau, sowie einem Loch für die DMS-Kabel, die aus dem Innenteil herausführen, versehen. Um die Kabel der Dehnmessungstreifen, die auf das Außenrohr geklebt sind, zu schützen, wurde der Probekörper mit einer feuerfesten Leinendecke ummantelt. Während der ganzen Zeit war es extrem wichtig, auf die anfälligen Kabel der DMS zu achten. Damit ein Verformen der Platten durch die thermische Einwirkung beim Schweißvorgang vermieden wird, wurde die Kopfplatte mit einer Platte größerer Stärke verschraubt und vorgewärmt. Danach konnte der Probekörper in den Versuchsstand eingebaut werden. Im Folgenden wird zunächst der Aufbau des Versuchsstandes skizzenhaft dargestellt.

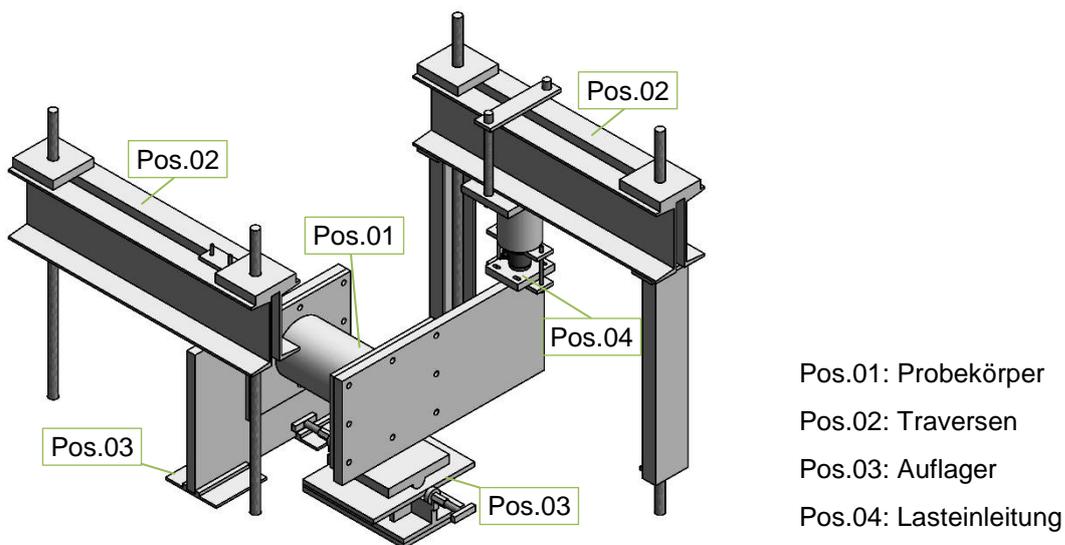


Abbildung 6-21: Skizze Versuchsaufbau  
 Figure 6-21: Draft experimental setup

Der Aufbau ist auf dem Spannfeld mit Gewindestangen verspannt. Das Außenrohr wird an der Festseite gehalten, während das darin verpresste Innenrohr an der Lastseite verdreht wird. In der Abbildung 6-22 sind die maßgebenden Details des Versuchsstands dargestellt.

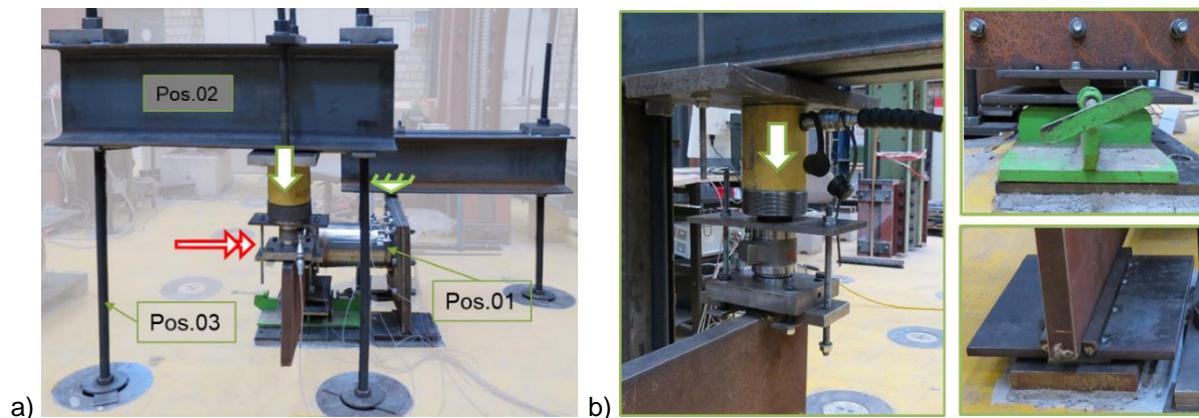


Abbildung 6-22: a) Versuchsaufbau, b) Lasteinleitung und Auflager  
 Figure 6-22: a) Experimental setup, b) load introduction and support

Unter Position 01 ist der Probekörper abgebildet. Im Vordergrund ist die Lastseite mit der Traverse unter Position 02 und mit Position 03, den M36 Gewindestangen zu erkennen. Die Lasteinleitung des Torsionsmomentes erfolgt über eine Lasteinleitungsplatte, die mit dem Probekörper fest verschraubt wird. Die Schrauben müssen entsprechend vorgespannt werden, um als eine gleitfeste Verbindung zu wirken. Über einen Öldruckzylinder wird auf das eine Ende der Platte eine Einzellast eingeleitet. Dies geschieht über ein Kugellager, das zwischen Öldruckzylinder und Lasteinleitungsplatte sitzt. Um das Kugellager fixiert auf der Platte zu halten, ist auf der Lasteinleitungsplatte ein Verbindungselement aufgeschweißt. Auf diesem wird der untere Teil des Kugellagers befestigt. Dadurch, dass der Punkt des Kugellagers fixiert

ist, wird der Lasteinleitungspunkt immer den gleichen Abstand zum Drehpunkt besitzen. Somit bleibt der Hebelarm bei jedem Versuch gleich.

An der Lasteinleitungsstelle ist der Öldruckzylinder mit der Traverse verbunden. Wird eine Kraft durch den Öldruck erzeugt, stützt sich dieser gegen die Traverse, die die Last aufnehmen muss. Die Traverse ist mit zwei M36 Gewindestangen in dem Hallenboden verankert.

Die Lasteinleitungsplatte ist gelenkig und horizontal verschieblich gelagert. Diese wird durch eine Rolle in Form eines halben Zylinders umgesetzt. Diese Rolle ist auf einer Platte gelagert, die auf einem Rollensystem liegt, welches die Platte sich in horizontaler Richtung bewegen lässt. Der Halbzylinder sitzt vertikal unter der Mittelachse des Probekörpers und ist mit Schweißpunkten fixiert, sodass der horizontale Abstand zur Lasteinleitung immer zur Probekörperachse derselbe bleibt. Daraus ergibt sich ein gleichbleibender Hebelarm von 649mm.

Die Kopfplatte an der Festseite ist gegen Verdrehung verhindert und unverschieblich. Damit ist der Probekörper in Kopfplattenebene eingespannt. Um diese Randbedingung zu gewährleisten, ist eine Verteilungsplatte mit der Kopfplatte gleitfest verschraubt. Diese Verteilungsplatte ist auf zwei kleineren Lagerplatten, auf denen Metallstreifen aufgeschweißt sind, gelagert. Das Auflager hindert die Verteilungsplatte daran, sich horizontal zu verschieben. Gegen die Verdrehung ist am anderen Ende der Verteilungsplatte eine weitere Traverse vorhanden. Diese ist, genau wie die Traverse auf der gegenüberliegenden Seite, mit M36 Gewindestangen im Boden des Spannungsfeldes verankert. Um die Steifigkeit der Einspannung möglichst hoch zu halten, wird die Gewindestange gegen die Traverse vorgespannt. Für eine ebene Lagerung auf dem Boden dienen Mörtelbette unter den Elementen, die den Boden berühren, als Auflage. Diese werden vor Ort gegossen.

Zur Analyse des Verhaltens der Probekörper wurden umfangreiche Beobachtungen mithilfe von Messtechniken festgehalten. Der Fokus liegt dabei auf der Torsionsbelastung der Kegelpressverbindung, allerdings sind auch die Einflüsse aus dem Versuchseinbau wichtig, um die Versuche einordnen zu können. In der Abbildung 6-23 ist die während der Versuche benutzte Messeinrichtung abgebildet. Zur Aufzeichnung der Verschiebung der Versuchskörperteile gegeneinander wurden ein Dehnungsaufnehmer (WA3) und zur Kontrolle ein Wegaufnehmer (WA2) an dem Spalt angebracht. Um die Bewegungen in Längsrichtung der Probe zu beobachten, wurde ein Wegaufnehmer positioniert.



Abbildung 6-23: Messeinrichtung  
Figure 6-23: Measuring system

Zur Messung der Schubdehnung an den maßgebenden Stellen wurden die für die Versuchsserie Verpressen benutzten Dehnmessungstreifen benutzt. Die Anordnung dieser DMS wurde ursprünglich mit dieser Absicht konfektioniert.

Nachdem alles ausgerichtet und die Werte in der Messeinrichtung auf null gesetzt wurden, konnte der Versuch gestartet werden. Der Probekörper wurde gleichmäßig belastet, bis der Innenkörper zum ersten Mal rutschte. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde, soweit es mit dem Öldruckzylinder möglich war, bei etwa 0,5kN/s gehalten. Bis zum ersten Durchrutschen dauerte es etwa sieben Minuten. Bei einigen Versuchen wurde noch weiter belastet, um mehrere Rutschvorgänge zu beobachten. Diese sind für die Tragfähigkeit allerdings nicht relevant. Anschließend wurde der Öldruck langsam abgelassen und der Versuchskörper konnte ausgebaut werden.

Der Schwerpunkt der Versuche lag auf der einmaligen Erstbelastung der Verbindung und der Kraft, bei der diese endgültig versagt. Mit diesen Ergebnissen kann eine Aussage über die Qualität des Widerstandes gegen äußerliche Einwirkung herausgearbeitet werden.

### **6.3.3.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse** ***Evaluation and results of the experiment***

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht der Zustand, bei dem das Grenzmoment erreicht wird und die Verbindung von Haftung in Gleiten übergeht. Die Kraftmessdose gibt die Kraft an, die von dem Zylinder auf Lastverteilerplatte eingeleitet wird. Um das Torsionsmoment zu berechnen, muss diese Kraft mit dem Hebelarm multipliziert werden. Der Hebelarm ist durch den Versuchsaufbau immer gleich 0,69m.

Für die Messdaten des Wegaufnehmers in Axialrichtung des Probekörpers ist keine Umrechnung der Werte nötig. Der Wegaufnehmer WA3 in die Umfangsrichtung misst einen linearen Weg von der Konterplatte zum Wegaufnehmer, weswegen sein Weg auf den Umfang des Körpers radial umgerechnet werden muss, um die Verdrehung um den Mittelpunkt zu erfassen. Dieser Wegaufnehmer wurde lediglich zur Kontrolle der Daten des zweiten Wegaufnehmers benutzt.

Um das Verhalten der untersuchten Pressverbindung zu untersuchen, wird ein Momenten-Weg-Diagramm erstellt, in dem der Zusammenhang zwischen der Verdrehung in Umfangsrichtung und dem einwirkenden Moment aufgezeichnet ist. An den Diagrammen in Abbildung 6-24 ist das Verhalten der Verbindung unter Torsionsbelastung beispielhaft anhand des Versuchs V109\_1 sehr gut zu erkennen.

In dem Torsionsmoment-Umfangverschiebungs-Diagramm unter b) ist bei diesem Versuchskörper eine anfangs starke Steigung zu erkennen. Bei steigendem Moment nimmt die Umfangverschiebung (WA2) nur geringfügig zu (bis  $u = 0,269\text{mm}$ ). Ist ein gewisses Grenzmoment (99,25kNm) erreicht, fällt die Momentenaufnahme bei relativ starker Verschiebung ( $\Delta u = 0,286\text{mm}$ ) ab. Die Kurve fällt linear etwa um 10% bis zu einem Punkt ab. Darin ist eindeutig das Durchrutschen der Versuchskörperteile gegeneinander zu verzeichnen.

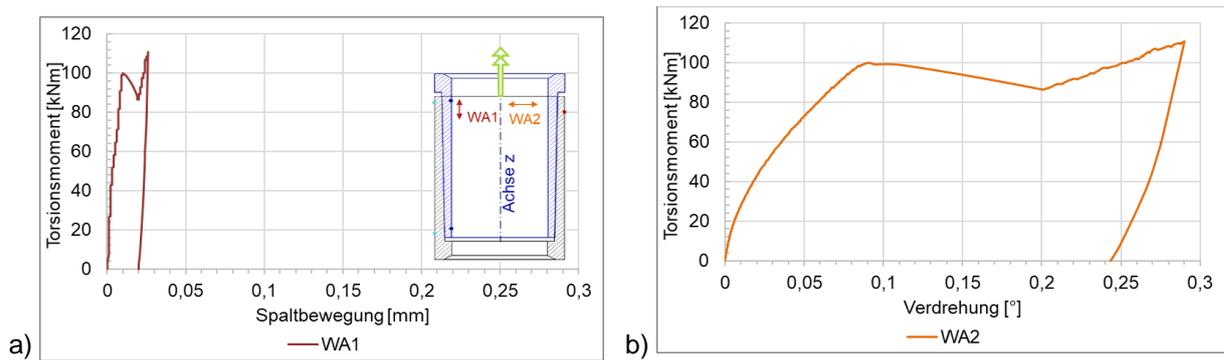


Abbildung 6-24: Versuchsreihe Torsion – V1T09\_1: a) Spaltverformung Meridian, b) Torsionsmoment-Verdrehungsbeziehung  
 Figure 6-24: Experimental run torsion – VT09\_1: a) gap deformation meridian, b) torsional moment-rotation relationship

Bei der weiteren Laststeigerung steigt die Kurve wieder an, nun aber mit einer geringeren Steigung als bei dem ersten Anstieg. Anhand des Torsionsmoment-Meridianverschiebungs-Diagramms unter a) ist zu erkennen, dass das Herausdrehen des Innenkörpers vernachlässigbar klein ist. Dies deutet darauf hin, dass bei dem Versuchsaufbau die Last ohne Exzentrizität eingeleitet wird. Deswegen gibt es auch keine horizontale Komponente, die das Innenrohr aus dem Außenrohr heraushebeln oder herausdrehen könnte.

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Analyse des Verhaltens ist die Übertragung der Kräfte innerhalb des Probekörpers. In der Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26 sind die gemessenen Werte der Dehnmessungstreifen im Verhältnis zum aufgetragenen Torsionsmoment dargestellt.

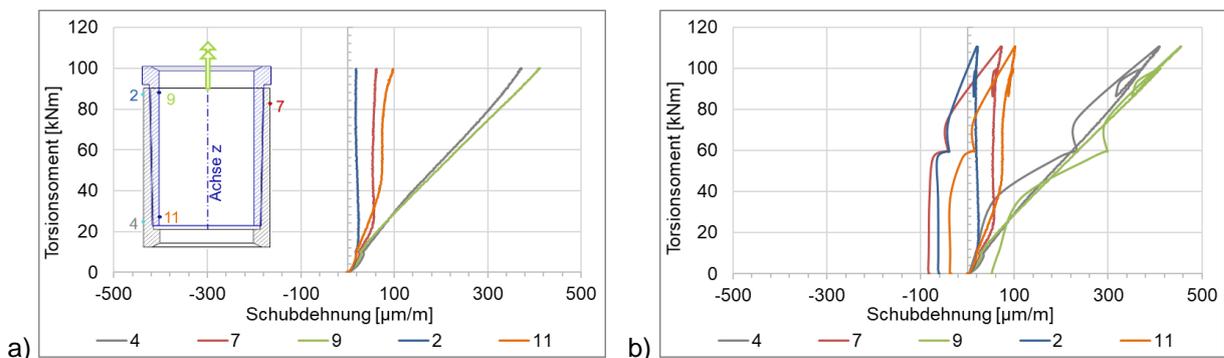


Abbildung 6-25: Versuchsreihe Torsion – V1T09\_1 Torsionsmoment-Schubdehnungs-Diagramm: a) Vor dem ersten Durchrutschen, b) Nach dem ersten Durchrutschen  
 Figure 6-25: Experimental run torsion – VT09\_1 torsional moment- shear strain-diagram: a) before the first sliding through, b) after the first sliding through

Die Dehnungen aus Schubspannungen schräg (gemessen in 45° Richtung) zur Axialrichtung des Probekörpers entstehen dadurch, dass das eingeleitete Moment vom Lasteinleitungspunkt an das andere Ende der Verbindung übertragen werden muss. Deutlich wird der Mechanismus, wenn man die Verformungen eines Stahlrohrs unter Torsionsbelastung betrachtet. Bei derartigen Belastung verdreht sich das Rohr schraubenförmig, sodass sich die Linien der Mantelfläche über die Achse verschieben. Dadurch verlaufen die Dehnungen des Körpers schräg an der Oberfläche, was sich in den Messergebnissen der DMS widerspiegelt. Die maßgebenden Stellen sind dabei an

der Lasteinleitungsseite die Stelle 4 und an der Auflagerseite die Stelle 9. Zum freien Rand der Körperteile ist kaum Verformung festzustellen. Damit lässt sich die kontinuierliche Übertragung des Torsionsmoments über der Pressfuge erklären.

Nach dem Durchrutschen der Versuchskörperteile gegeneinander und der anschließenden Laststeigerung ist ein weiterer Anstieg der Dehnungen sichtbar. Diese verbleiben in dem Körper auch nach der Entlastung, was auf ein Haftenbleiben der Oberflächen in der Fuge hindeutet.

Die Abbildung 6-26 stellt Diagramme mit Torsionsmoment-Dehnungsbeziehungen in Meridian- und Umfangsrichtung dar.

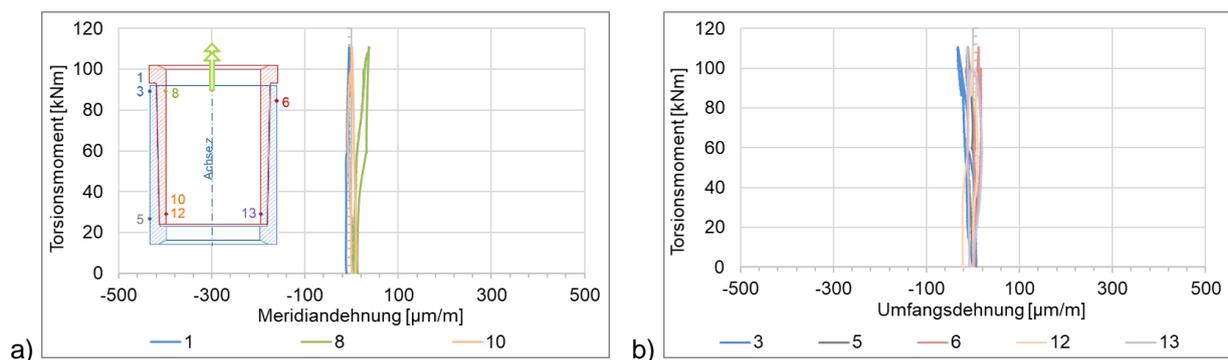


Abbildung 6-26: Versuchsreihe Torsion – V1T09\_1: a) Torsionsmoment-Meridiandehnungs-Diagramm, b) Torsionsmoment-Umfangsdehnungs-Diagramm  
 Figure 6-26: Experimental run torsion – VT09\_1: a) torsional moment – meridian stretching – diagram, b) torsional moment – circumferential stretching – diagram

Darin sind die vernachlässigbar kleinen Dehnungen in beide Richtungen zu erkennen. Diese deuten darauf hin, dass die Torsionsbeanspruchung keine Auswirkung auf den Eigenspannungszustand der Pressverbindung zur Folge hat und die nach dem Verpressen vorhandenen Dehnungen etwa gleichbleiben.

Zusammenfassende Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Abbildung 6-27 a) abgebildet. Hier wird die für die Verpressung der Versuchskörperteile benötigte Kraft dem aufgenommenen Torsionsmoment gegenübergestellt. Mit steigender Verpresskraft wird ein größeres Übermaß aufgebaut. Daraus resultiert wiederum in der Fuge ein größerer Fugendruck. Damit steigt auch das aufnehmbare Torsionsmoment in etwa proportional.

Im Weiteren wird die ganze Versuchsreihe betrachtet und die Ergebnisse der einzelnen Versuche miteinander verglichen, um Unterschiede und Zusammenhänge herauszuarbeiten. Anhand dieser Versuche lassen sich Einflüsse auf die Tragfähigkeit der Stahlrohrverbindung untersuchen. So werden von Versuch zu Versuch nur bestimmte Kennwerte, die ihre Wirkung auf das Rutschmoment erkennbar werden lassen, geändert.

Beim Vergleich der Versuche mit unterschiedlichem Aufschubweg lässt sich festhalten, dass bei gleichen Abmessungen aus dem Aufschubweg resultierende Werte für wirksames Übermaß und damit die Fugendrucke eine entscheidende Rolle für die Tragfähigkeit liefern. Der Einfluss der Variablenänderung auf das aufnehmbare Torsionsmoment ist der Abbildung 6-27 b) zu entnehmen.

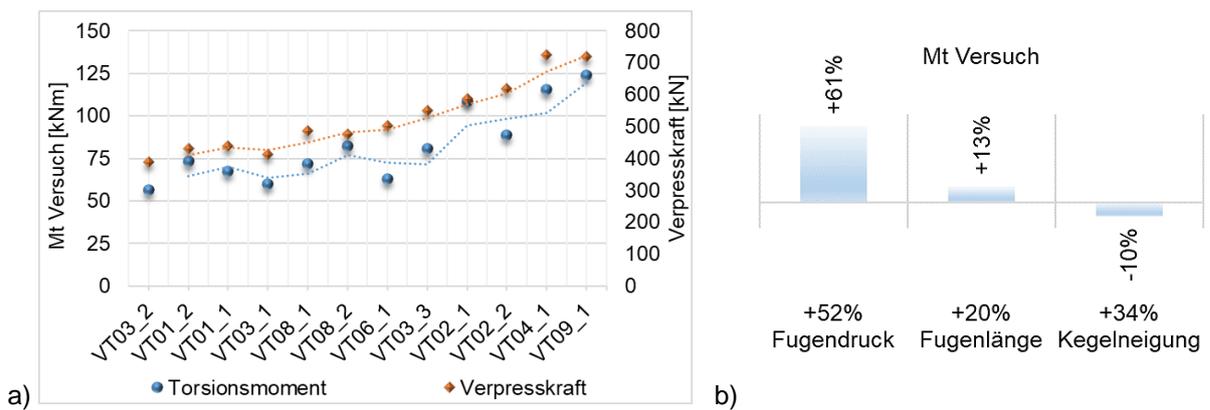


Abbildung 6-27: Versuchsreihe Torsion: a) Zusammenfassende Ergebnisse, b) Einfluss der Variablenänderung auf das Torsionsmoments

Figure 6-27: Experimental run torsion: a) summarized results, b) influence of the variable change on the torsional moments

Aus dem Vergleich ist außerdem hervorgegangen, dass die Fugenlänge einen kleineren Einfluss im Vergleich zu dem Einfluss infolge der Übermaßvariation auf die Versagenslast hat. Jedoch besteht bei gleichem Fugendruck über die größere Fläche, die durch die Fugenlänge entsteht, eine größere Kraft zwischen den Wirkflächen der Verbindung. Die Auswertung der Versuche zeigte außerdem, dass die Steigerung des Kegelverhältnisses das Rutschmoment sogar abmindert.

Das Rutschverhalten hat sich als schwer vorhersehbar herausgestellt. Nach dem ersten Rutschen haben sich immer wieder Laststeigerungen nach kleinen Rutschbewegungen gezeigt. Dieses Verhalten ist allerdings nicht für das Versagen der Verbindung relevant, da dies bereits vorher eintritt.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Untersuchungen anhand eines FE-Modells mit ANSYS WB 15.0 durchgeführt. Die Auszüge aus den Ergebnissen dieser sind in der Abbildung 6-28 zusammengestellt.

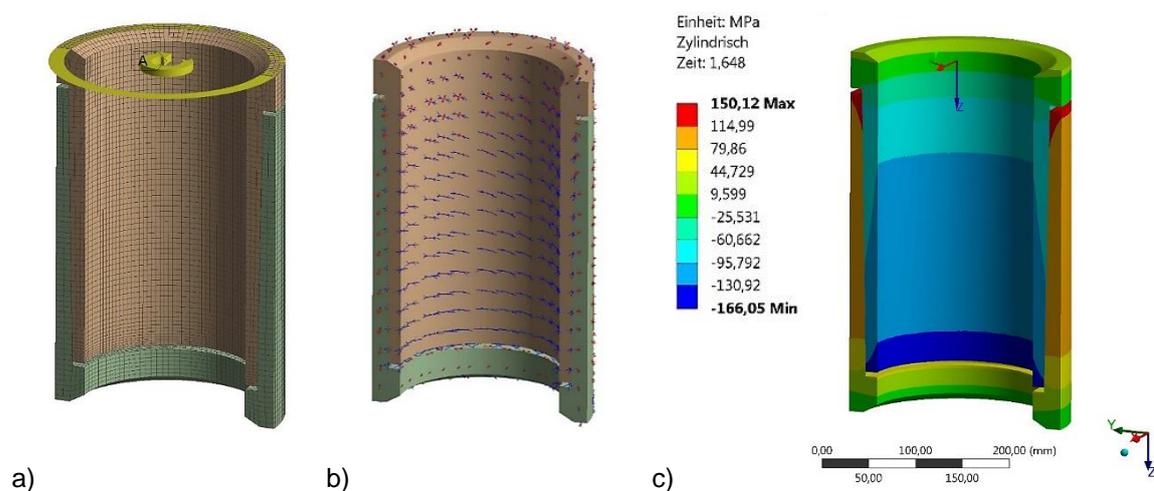


Abbildung 6-28: FE-Ergebnisse, Versuchsreihe Torsion: a) Randbedingungen, b) Hauptspannungsvektor, c) Umfangsspannungen

Figure 6-28: FE- results, experimental run torsion: a) edge condition, b) principal stress vector, c) circumferential stresses

Das analytische Modell für die Kegelpressverbindung mit reiner Torsion wurde mit dem numerischen Modell verifiziert. Im Vergleich zu dem gefügten Zustand der Verbindung lassen sich im FE-Modell sehr geringe Änderungen der Membranspannungen infolge Verdrehung feststellen. Zusätzlich lässt sich die vorwiegende Schubbeanspruchung der Pressverbindung zeigen. Die Versuchsergebnisse werden damit bestätigt. Lediglich unterschiedlich zu den Versuchsergebnissen ist der Zeitpunkt der Verdrehung der Körperteile gegeneinander. Im Modell sind Abweichungen von +0,1 mm beim ersten Rutschen zu beobachten, was auf die Ungenauigkeiten der Fertigung hinweist. Die Untersuchung der Toleranzeinflüsse ist somit auch hierbei unumgänglich. Für die Anwendung der entwickelten Pressverbindung im Freileitungsmastbau ist ein Vergleich zu einem Referenzrohr nötig. Der Anteil der Tragfähigkeit der untersuchten Pressverbindungskörper im Vergleich zum jeweiligen Referenzrohr ist in der Abbildung 6-29 a) abgebildet.

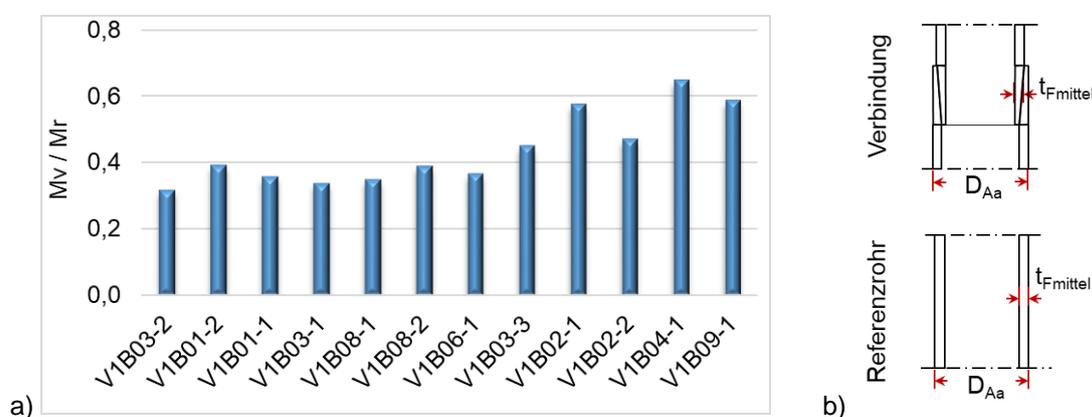


Abbildung 6-29: a) Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Torsionsmoment eines Referenzrohres, b) Skizze Referenzrohr und Pressverbindung  
 Figure 6-29: Comparison of the test results with the torsional moment of a reference tube, b) sketch of the reference tube and press connection

Dabei wurde die Tragfähigkeit dieses Referenzrohres mit den etwa gleichen Abmessungen wie die eines Versuchs körperteils der Pressverbindung bestimmt. Unberücksichtigt ist jedoch die Überlagerung der Versuchs körperteile in der Fuge, die die Tonnage der Pressverbindung beeinflusst und im Vergleich zum Referenzrohr negativ erscheint. Im Vergleich der Tragfähigkeiten bestätigt sich der Einfluss der Übermaßvariation. Mit steigendem Pressdruck in der Fuge steigt der Torsionswiderstand der Verbindung, was zum Anstieg des Tragfähigkeitsverhältnisses zum Referenzrohr führt.

### 6.3.4 Versuchsreihe Biegung Test sequence bending

#### 6.3.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung Experimental setup and execution

In dieser Versuchsreihe wird an dem gefügten Probekörper untersucht, wie dieser sich unter reiner Biegebeanspruchung verhält. Hierzu wird ein Vierpunktbiegeversuch

durchgeführt. Die Versuchsanordnung zur Aufbringung der Biegebelastung auf die Pressverbindung kann der Abbildung 6-30 entnommen werden.

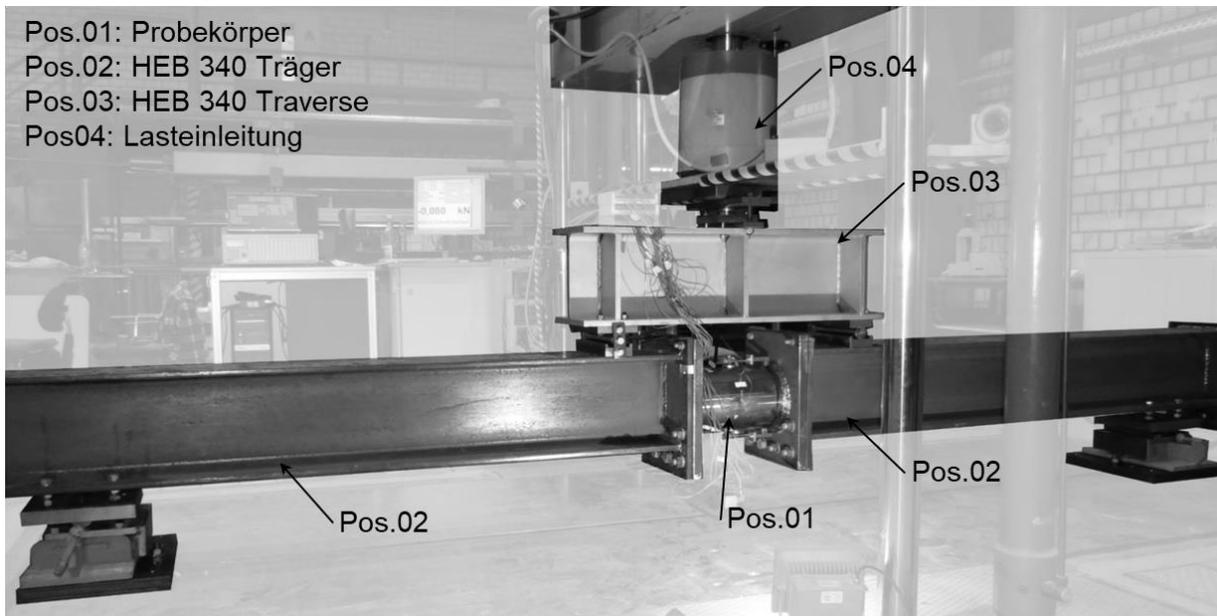


Abbildung 6-30: Versuchsaufbau - Versuchsreihe Biegung  
Figure 6-30: Experimental setup – experimental run bending

Der Probekörper wird an zwei Kopfplatten geschweißt, die jeweils über einen Kopfplattenstoß mit einem HEB-Profil biegesteif verbunden sind. Beim dem Kopfplattenstoß wurde eine gleitfest vorgespannte Verbindung geschaffen, um die Einwirkung der Dehnsteifigkeit der Schrauben bei dem Versuch zu verhindern. Die HEB-Träger sind an ihren Enden aufgelagert, sodass es sich bei dem statischen System der Konstruktion um einen Einfeldträger unter Vierpunkt-Biegung handelt.

Die detaillierte Darstellung der Versuchsaufbauelemente ist der Abbildung 6-31 zu entnehmen.

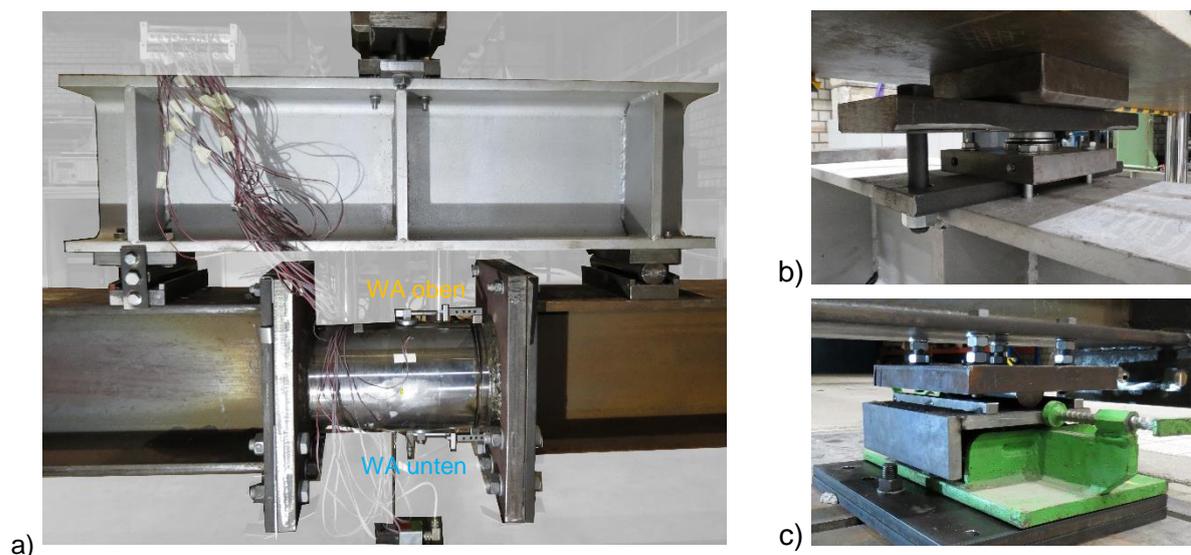


Abbildung 6-31: Versuchsaufbau - Versuchsreihe Biegung: a) Lastverteilung, b) Lasteinleitung, c) Auflagerkonstruktion

Figure 6-31: Experimental setup – experimental run bending: a) load distribution, b) load application, c) support construction

Die Lasteinleitung aus der Viersäulen-Scheiteldruckmaschine erfolgt durch eine gelenkige Verbindung mit der lastverteilenden Traverse. Um die Exzentrizität der Einleitung zu gewährleisten, wird ein Axialgelenk-Lager GE30-AW mit Zentrierplatte dazwischen angeordnet. Mithilfe der Traverse erfolgt die symmetrische Aufbringung von zwei Einzellasten, die im Bereich der Pressverbindung ein konstantes Biegemoment erzeugen. Durch die Verbindung der Probe mit der Verlängerung an beiden Seiten wird ein Hebelarm für das Entstehen der Biegemomentenbeanspruchung generiert. Die Auflagerung dieser Verlängerungsträger ist gelenkig und in Längsrichtung verschieblich.

Die Kraft wurde mit einer Geschwindigkeit von 1,2 mm/min weggesteuert aufgebracht. Bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit an den maßgebenden Stellen dauerte der Versuch etwa 25 Minuten. Analog zum Fügevorgang werden während der Aufbringung der Biegebelastung die Dehnungen mit Dehnungsmessstreifen an den gekennzeichneten Stellen gemessen. Zusätzlich wurden zur Messung der aus der konstanten Biegebelastung resultierenden Verschiebung der Körperteile Wegaufnehmer angebracht.

### 6.3.4.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse Evaluation and results of the experiment

Gemäß der Theorie der Wellen-Naben-Verbindungen mit reiner Biegung erfolgt die Übertragung des Moments über die Kombination mehrerer Mechanismen. Zum Teil wird das Biegemoment formschlüssig durch die Normalkräfte in der Fuge der Verbindung abgetragen. Dazu ist abhängig vom Pressdruck ein reibschlüssiger Anteil in der Fuge vorhanden, mit Reibkräften zwischen den Fügeflächen in Längsrichtung und Reibkräften in Umfangsrichtung der Fügefläche.

Der Versuchsaufbau wurde für einen Einfeldträger unter Vier-Punkt-Biegung konzipiert. Aus der konstanten Biegung bekommt die Probe auf der einen Seite, im Versuchsaufbau oben, die Belastung aus der Druckkomponente, auf der anderen Seite, im Versuchsaufbau unten, wirkt die Zugkraft. Dieses ist in der Verschiebung des Spalts in Abbildung 6-32 anhand des Versuchskörpers V1B03 erkennbar.

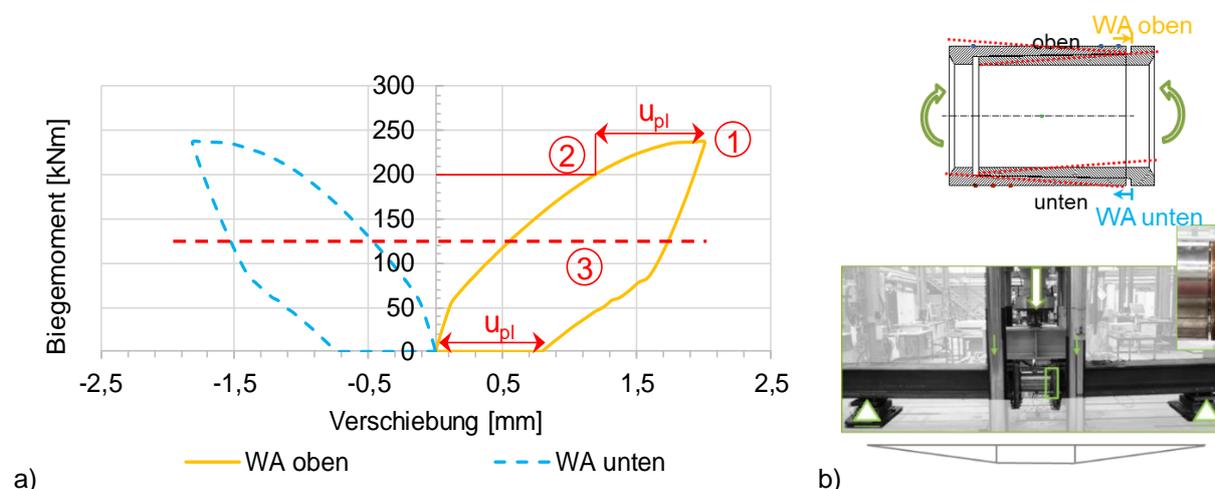


Abbildung 6-32: Versuchsreihe Biegung – V01B03: a) Momenten-Verschiebungsbeziehung, b) Anordnung der Wegaufnehmer

Figure 6-32: Experimental run bending – V01B03: a) moment – displacement relationship, b) Arrangement of the displacement sensor

Zu erkennen ist die gleichmäßige, konstante Biegebeanspruchung über die Höhe des Querschnitts. Der Spalt oben verringert sich infolge der Druckkomponente im gleichen Maße wie sich dieser unten wegen der Zugbelastung aufweitet. Die Momenten-Verschiebungsbeziehung spiegelt das Tragverhalten der Pressverbindung wieder. Die Belastung der Probe wurde bis zu dem Plastizieren des Materials an den maßgebenden Stellen fortgeführt. Die Aufnahme des Torsionsmoments verringerte sich, was in der horizontal verlaufenden Kurve zu erkennen ist. Nach der Entlastung ist der plastische Anteil der Verschiebungen in dem Versuchskörper erkennbar. Zur Bestimmung des Bemessungsmoments wurde die Auswertung wie folgt vorgenommen. Von dem maximalen Wert der Verschiebung (Punkt 1 im Diagramm Abbildung 6-32 a)) wurde der plastizierte Anteil abgezogen ( $u_{pl} = 1,8\text{mm}$  – Punkt 2). Auf den dazugehörigen Wert des Biegemoments ( $M_{el} = 203\text{kNm}$ ) wurden 25 Prozent für die Sicherheit des Verbindungsbauteils abgezogen und damit das Bemessungsmoment der Pressverbindung mit  $M_b = 163\text{kNm}$  bestimmt.

Das genaue Tragverhalten der Versuchskörper infolge der Biegebeanspruchung ist in den folgenden Diagrammen zu erkennen.

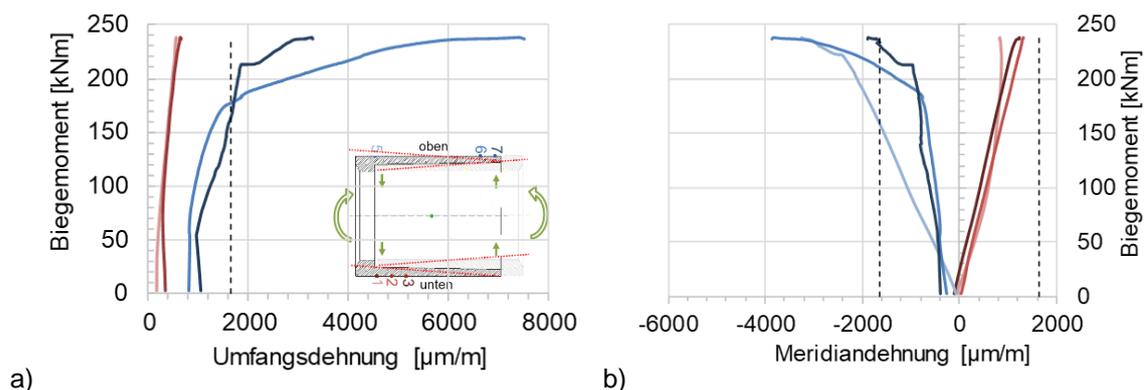


Abbildung 6-33: Versuchsreihe Biegung – V01B03 Außenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen

Figure 6-33: Experimental run bending – V01B03 external body: a) circumferential stretches, b) meridian stretches

Am Außenteil des Probekörpers werden im unteren Bereich, dort wo die Zugkomponente des Biegemomentes eingeleitet wird, drei DMS-Streifen an der Außenoberfläche angeordnet. Hier sind auch positive Meridiandehnungen aus der Zugbelastung zu verzeichnen. Eine Rosette liegt am Wanddickensprung und eine weitere etwas oberhalb. Bei dem dritten DMS-Streifen handelt es sich um einen linearen Messstreifen. Auf der gegenüberliegenden Seite am Dickensprung wird ein weiterer linearer DMS-Typ angeordnet. Dieser misst die Stauchungen aus der direkt eingeleiteten Druckkomponente. Das Biegemoment wirkt konstant über die Höhe des Querschnitts. Der Versuchskörper reagiert typisch einem „Biegeträger“. Der Nulldurchgang der Spannungsverteilung spiegelt sich auch in den Dehnungen am DMS, der in der Mittellinie angeordnet wurde. In der Fuge der Pressverbindung lässt sich das Moment über den Hebelarm – Höhe der Fuge, in Zug- und Druckkomponente aufteilen. Am freien oberen Randbereich werden zwei Rosetten untereinander angebracht. An der schwächeren Stelle der Verbindung ist auch die größere Aufweitung des Außenrohrs infolge der inneren Druckkomponente erkennbar, worauf auch die

größeren Umfangsdehnungen hindeuten. An dem Verlauf dieser Dehnungen ist eine Steigungsänderung der Kurven im annähernd gleichen Bereich des Biegemoments erkennbar. Dieser kann auf die Überwindung der Haftreibung hindeuten. Danach wird in der Verbindung vermutlich ein rein formschlüssiges Übertragungsverhalten aktiviert. Die Anordnung der Messstreifen am Innenkörper (siehe Abbildung 6-34) erfolgt an der Innenoberfläche.

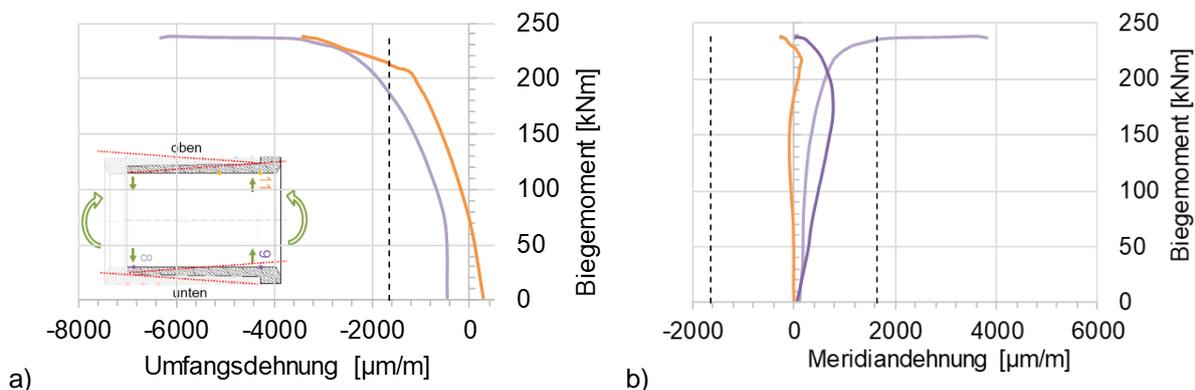


Abbildung 6-34: Versuchsreihe Biegung – V01B03 Innenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen  
 Figure 6-34: Experimental run bending – V01B03 internal body: a) circumferential stretches, b) meridian stretches

Ähnlich dem Außenteil werden zwei Messpunkte am Dickensprung angebracht. Im unteren Bereich ist eine Rosette vorzufinden. Am Punkt 11 und 8 bildet sich die Stauchung in Umfangsrichtung, hervorgerufen von der inneren Druckkomponente, aus. Hier drückt sich der Innenkörper an den Außenkörper an.

Die Ergebnisse aus den einzelnen Vierpunktbiegeversuchen befinden sich im Anhang B3. Zusammenfassende Ergebnisse sind der Abbildung 6-35 zu entnehmen. Neben dem Bemessungsmoment ist auch das Geometrieverhältnis von dem Außendurchmesser zur Fugenlänge für jeden Versuchskörper aufgetragen. Hier ist der Einfluss der Fugenlänge weniger eindeutig zu vermuten. Bei Versuchskörpern hat ein größerer Hebelarm, also ein kleineres Geometrieverhältnis, einen leichteren Anstieg des aufnehmbaren Biegemoments zur Folge. Bei einigen Versuchskörpern, die mit größeren Toleranzen hergestellt sind, fallen die Abweichungen größer aus. Der zu berücksichtigende Einfluss der Toleranzen spiegelt sich auch bei dem Vergleich der Tragfähigkeit der untersuchten Pressverbindungskörper zum jeweiligen Referenzrohr mit  $D_m$  und  $t_m$  wieder (vgl. Versuchsreihe Torsion).

## Experimentelle Untersuchungen der Pressverbindung Experimental investigations of steel pipe press connection

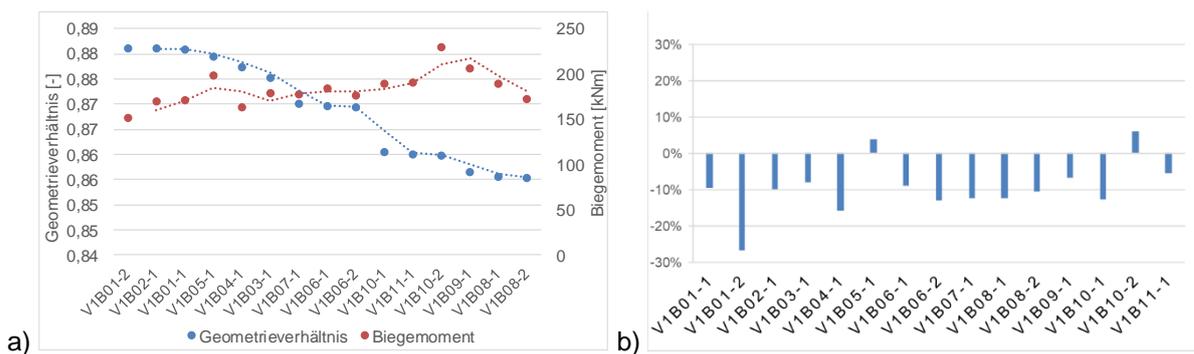


Abbildung 6-35: Ergebnisse der Versuchsreihe Biegung a) in Abhängigkeit vom Geometrieverhältnis, b) als Verhältnis bezogen auf ein Referenzrohr

Figure 6-35: Results of the experimental run bending: a) depending on the geometric relationship, b) as a ratio related to a reference tube

Zusätzlich zu den experimentellen wurden numerische Untersuchungen anhand eines FE-Modells mit ANSYS WB 15.0 am Beispiel des Versuchs V0B03 durchgeführt. Im Modell wurden SOLID186 und SOLID187 Elementtypen für die 3D Elemente verwendet. In der Kontaktfuge wurden reibungsbehaftete Oberflächen mit der Haftzahl von  $\mu=0,2$  und den Elementtypen CONTA174 und TARGE170 generiert.

Grundsätzlich zeigt der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen beim Außenkörper eine gute Übereinstimmung. Jedoch weichen am Innenkörper, abgesehen von den Meridiandehnungen, die Ergebnisse aus der FE-Simulation von den ermittelten Werten aus den experimentellen Untersuchungen deutlich ab. Das Simulationsmodell wurde jedoch mit den Nennmaßen modelliert und beinhaltet somit nicht den tatsächlichen Aufschubweg sowie die herstellungsbedingten Toleranzen, die möglicherweise die Ursache der vorliegenden Abweichungen sein könnten.

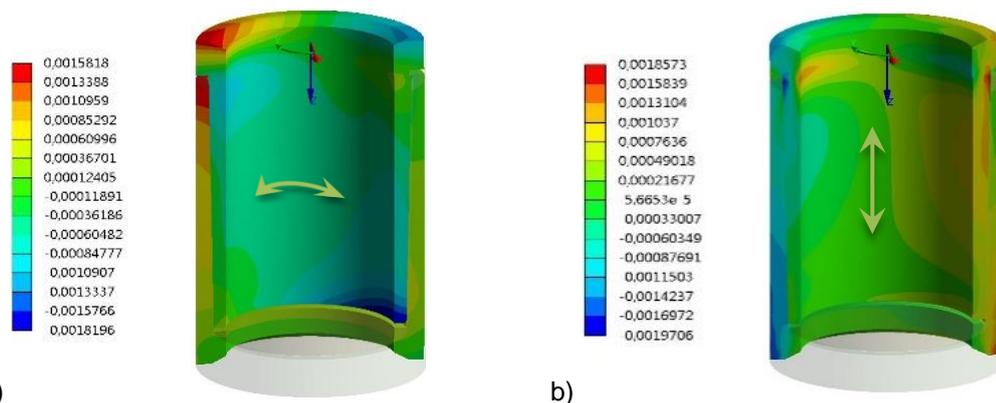


Abbildung 6-36: FE-Ergebnisse Versuchsreihe Biegung – V01B03: a) Umfangsdehnungen in mm/mm, b) Meridiandehnungen in mm/mm

Figure 6-36: FE- results of the experimental run bending – V01B03: a) circumferential stretches, b) meridian stretches

Mit Hilfe des numerischen Modells wurden Parameterstudien durchgeführt. In Abbildung 6-37 sind die Verläufe der bezogenen Umfangsspannungen in Abhängigkeit des einwirkenden Biegemomentes für die verschiedenen variierten Fugenlängen im Außenteil dargestellt.

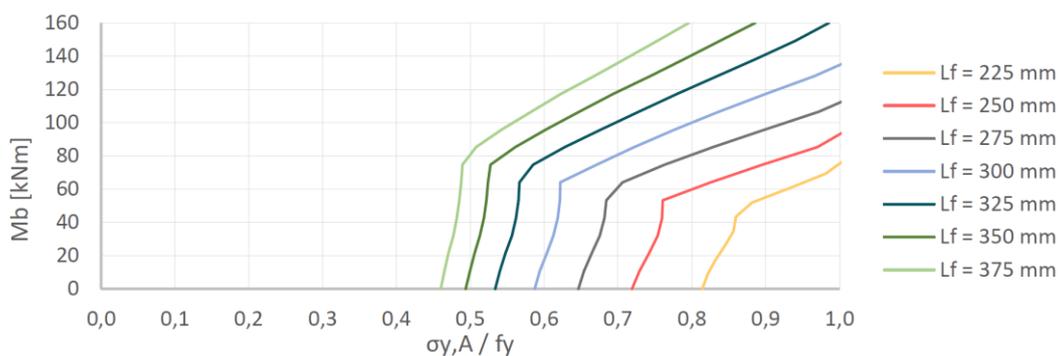


Abbildung 6-37: Verlauf der bezogenen Umfangsspannungen im Außenteil  $\sigma_{y,A}/f_y$  in Abhängigkeit des Biegemoments  $M_b$  (Parameter Fugenlänge)

Figure 6-37: Curve of the related circumferential stresses in the outdoor component  $\sigma_{y,A}/f_y$  depending on the bending moment  $M_b$  (joint length parameter)

Auffallend sind hier die Änderungen in den Steigungen der Kurven, die den Übergang des reibschlüssigen zum formschlüssigen Übertragungsverhalten implizieren. Je größer die Fugenlänge, desto mehr kann bei Ausnutzung der Streckgrenze an Biegebeanspruchung aufgenommen werden. Für den betrachteten Momentenbereich wird jedoch bei den Fugenlängen 325mm – 375mm nicht die komplette Streckgrenze ausgenutzt. Um aussagekräftigere Ergebnisse zur Momententragfähigkeit für diese Parameter zu erhalten, muss in einer weiterführenden Untersuchung ein Simulationsmodell mit größerer Biegebeanspruchung aufgestellt werden. Für die Auswertung der vorliegenden Ergebnisse wird angenommen, dass bei weiterer Biegebeanspruchung sich die Verläufe von 325mm – 375mm bis zum Erreichen der Streckgrenze linear verhalten. Basierend auf dieser Annahme wird durch lineare Extrapolation die maximale Biegebeanspruchbarkeit dieser Fugenlängen, die im Rahmen der Umfangsspannungen möglich ist, ermittelt. Ausgehend davon, dass die maximale Momententragfähigkeit der Konfiguration mit  $L_F = 375\text{mm}$  100% entsprechen, ergibt sich für 350mm 87,8% und für 325mm 77,3%. Weiterhin kann mit der Variation von 300mm 63,7% des Biegemomentes übertragen werden sowie bei 275mm etwa 53%. Für die Fugenlänge  $L_F = 250\text{mm}$  beträgt die Tragfähigkeit 44% und für die kleinste Länge mit 225mm beträgt sie 35,6%.

Grundsätzlich ist die Stellschraube für das Beeinflussen der Biegebeanspruchbarkeit neben der Variation des Übermaßes hauptsächlich die Größe der Fugenlänge. Die Abhängigkeit der Tragfähigkeit von den Toleranzen ist in weiteren Studien zu erörtern.

## 6.4 Großteilversuchsserie, Maßstab 1:2 Test series of big components, measuring unit 1:2

### 6.4.1 Allgemeines General

Zur Verifizierung der Kleinteilserie wurde eine Großteil-Versuchsserie mit einem Maßstab von 1:2 zu den realen Abmessungen der Mastkonstruktion durchgeführt.

Dabei sollte auch der Maßstabeffekt untersucht werden.

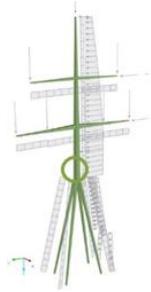
Beim Festlegen der Probekörpergeometrie wurden einerseits die halbierten Abmessungen des Mastschaftsdurchmessers an der für die Pressverbindung

vorgesehenen Stelle übernommen. Andererseits wurden mit Hilfe der Analogie zu der Wellen-Naben-Verbindung für die halbierten Schnittgrößen des Masts das für die Aufnahme dieser Beanspruchungen notwendige Übermaß ermittelt. Zusätzlich wurde von der Kleinteilserie das Geometrieverhältnis der Fugenlänge zu dem Außendurchmesser von  $Q=L_f/D_a=1,25$  übernommen.

Die Tabelle 6-3 zeigt die Schnittgrößen an der für die Pressverbindung vorgesehenen Stelle des Mastschafts und die halbierten Beanspruchungen, für die die Versuchskörper konstruiert wurden.

Tabelle 6-3 : Schnittgrößen an der Pressverbindung, Variante 4F-Mast  
 Table 6-3: Overview of the internal forces at the press connection, variant 4F-mast

maßgebende Schnittgrößen						
Maßstab	Rohr Durchmesser	N	Abspann Mbieg	Abspann Mtors	Trag Mbieg	Trag Mtors
	mm	kN	kNm	kNm	kNm	kNm
1:1	1300	-500	4000	1500	3000	350
1:2	650	-250	2000	750	1500	175



Somit wurde für die Fertigung der Pressverbindung im Maßstab 1:2 ein Rohr mit Durchmesser mindestens 650mm nötig. Anhand der konstruierten Probekörpergeometrie wurden für die vorgegebene Beanspruchung vier Versuchskörper gefertigt. Zwei davon wurden auf Torsions-, zwei auf Biegebeanspruchbarkeit geprüft. In der Tabelle 6-4 ist die Versuchsmatrix beider Versuchsreihen für eine Konfiguration dargestellt.

Tabelle 6-4 : Übersicht der untersuchten Versuchskörper  
 Table 6-4: Overview of the investigated samples

Versuch	Durchmesser D	Wanddicke t	Fugenlänge Lf	Kegelneigung $\alpha/2$
	[mm]	[mm]	[mm]	[°]
V2B01	653,5	44,85	820	1,00
V2B02	653,5	44,85	820	1,00
V2T01	653,5	44,85	820	1,00
V2T02	653,5	44,85	820	1,00

## 6.4.2 Versuchsreihe Verpressen Test sequence pressing

### 6.4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung, Messtechnik Experimental setup and execution, technique of measurement

Der Fügevorgang erfolgt in einer Viersäulen-Universalprüfmaschine mit einer maximalen Prüflast von +/- 2500 kN. Nach dem Reinigen und Entölen der Fugenoberflächen wird zunächst das Innenteil in das äußere Formteil eingesetzt. Der Spalt, der zwischen den beiden Formteilen vorliegt, setzt sich aus dem Aufschubweg und dem nach dem Verpressen einzuhaltenden Spaltmaß zusammen. Danach folgt das Einschieben und Ausrichten des Probekörpers unter die Prüfmaschine. Das Zusammenfügen erfolgt über kaltes Aufpressen, bei dem die Fügekraft weggesteuert

aufgebracht wird. Wichtig ist hierbei eine zentrische Krafteinleitung. In Abbildung 6-38 ist der Versuchsstand mit dem Probekörper abgebildet.

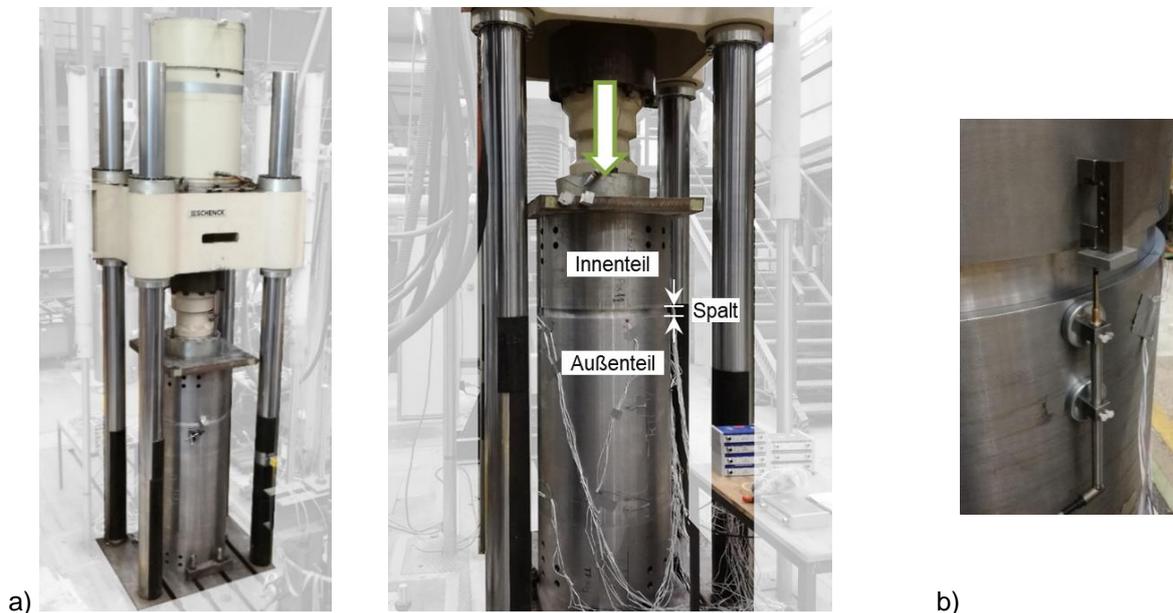


Abbildung 6-38: a) Versuchsstand - Versuchsreihe Verpressen b) Wegaufnehmer am Probekörper  
Figure 6-38: a) Test stand – experimental run pressing b) displacement transducer on samples

Durch die Aufbringung der Einpresskraft werden Innen- und Außenteil zu einem Probekörper auf der Länge des Aufschubwegs axial aufgepresst, bis ein vordefinierter Spalt zwischen den Stirnflächen von Außen- und Innenteil verbleibt. Dies soll garantieren, dass sich das erforderliche Übermaß einstellt und die Verbindung unter Biegebelastung weiterhin als Steckverbindung wirkt. In Abbildung 6-38 b) ist die Messung des Spalts, der im nachträglichen Vermessen kontrolliert wurde, abgebildet. Mittels Wegaufnehmer WTG 20/LR/M wurde der Aufschubweg an mehreren Achsen des Versuchskörpers aufgenommen und daraus das tatsächliche Übermaß ermittelt.

Das Einpressen erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 2,4mm/s bei V2B01 bzw. 10mm/s bei den restlichen Probekörpern, um den Slip-Stick-Effekt zu vermeiden. Dabei wurde die maximale Einpresskraft für den gleichen Pressdruck in allen Probekörpern begrenzt.

Zur Erfassung der Dehnungen während des Fügens der Formteile kommt die DMS-Messtechnik zum Einsatz. An ausgewählten Stellen werden unterschiedliche DMS-Streifen vorgesehen. Dazu zählen sowohl die linearen Dehnungsmessstreifen mit integrierten Lötflächen unterhalb des Messgitters, wie die Kantenrosetten mit drei Messgittern in 0°/45°/90° Anordnung.

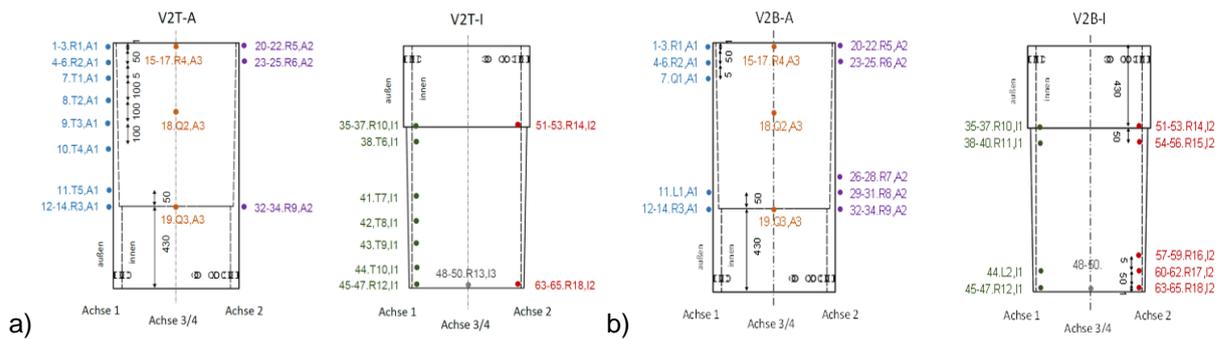


Abbildung 6-39: Position der Dehnmessungstreifen am Probekörper: a) Versuchsreihe Torsion, b) Versuchsreihe Biegung

Figure 6-39: Position of the strain gauge on the sample: a) experimental run torsion, b) experimental run bending

Während der Versuchsdurchführung wurde ein starkes gleichmäßiges Knackgeräusch beim ruckartigen Verpressen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit beobachtet. Eventuelle Ursachen könnten entweder in dem Slip-Stick-Effekt liegen, oder in der Oberflächenrauheit mit spürbaren Riefen in der Pressfuge, die beim Verpressen ruckartig überwunden und dabei eingeebnet wurden.

#### 6.4.2.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse Evaluation and results of the experiment

Das während des Versuchs beobachtete hörbare und ruckartige Verpressen spiegelt sich in den aufgezeichneten Verläufen der Verschiebung wieder (siehe Abbildung 6-40). Zu erkennen sind die sowohl gleichen Verläufe der Verschiebungen an beiden Achsen der Probe, als auch annähernd gleiche Aufschubwege. Dieses deutet auf die zentrische Lasteinleitung hin und darauf, dass die Probe beim Verpressen sich nicht verkantet hat.

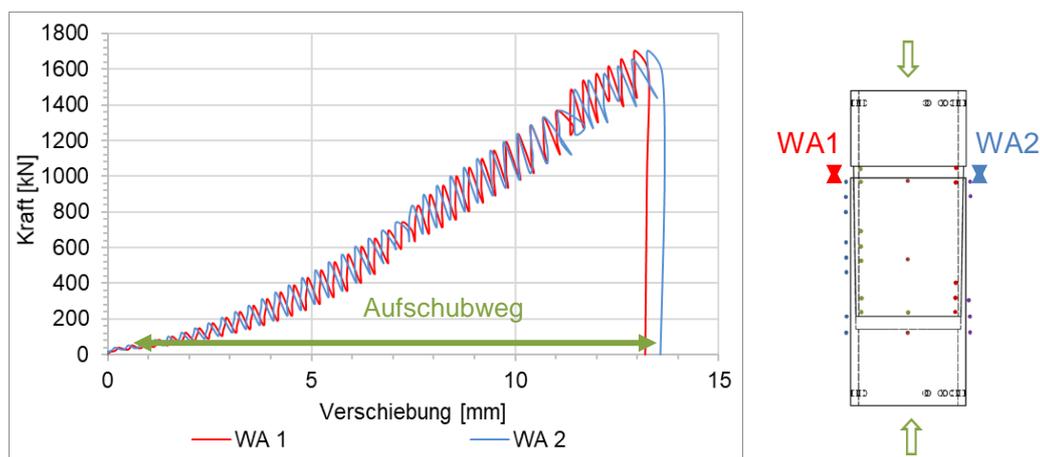


Abbildung 6-40: Kraft - Verformungskurve  
Figure 6-40: Force - deformation curve

Bei der Auswertung der Kraft-Verformungskurve fällt auf, dass die für den benötigten Aufschubweg von etwa 13mm notwendige Kraft mit 1700kN deutlich höher ist, als es nach dem Überführen der Ergebnisse der Kleinteilserie vordimensioniert wurde (1350kN). Dies deutet auf eine deutlich größere Rauheit der Oberfläche im Vergleich zu den kleinteiligen Versuchskörpern hin. Der ermittelte Haftbeiwert der Großteilserie beträgt somit  $\mu = 0,18$ . Der Verlauf der Kraftverformungskurve steigt insgesamt

kontinuierlich an, da vermutlich die Fugenflächen von Beginn an aufeinanderliegen. Dadurch kann die Kraft direkt aufgenommen und weitergeleitet werden.

Durch den Fügevorgang sind an allen Messpunkten des Außenkörpers positive Umfangsdehnungen und negative Meridiandehnungen zu verzeichnen. Durch das geometrische Übermaß wird der Außenkörper während des Verpressvorgangs aufgeweitet. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist den folgenden Diagrammen zu entnehmen.

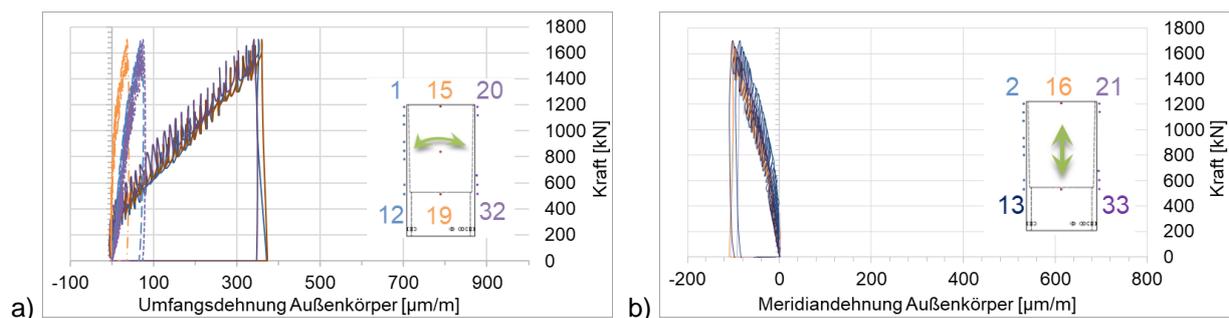


Abbildung 6-41: Versuchskörper V2B02 Außenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen

Figure 6-41: Sample V2B02 external body: a) circumferential stretches, b) meridian stretching

Beim Verlauf der Kraft-Dehnungskurve fallen ebenfalls die ruckartigen Bewegungen entsprechend der Knackgeräusche bei der Versuchsdurchführung auf. Dass der Verpressvorgang ohne Verkanten stattgefunden hat, ist anhand der gleichen Verläufe der Dehnungen an verschiedenen Achsen zu erkennen. Lediglich an der Stelle 19 ist die Verformung des Außenkörpers wegen des unsymmetrischen Lochbilds abweichend.

Beim Innenkörper sind negative Umfangsdehnungen an den DMS-Stellen vorzufinden, welche eine Stauchung des Innenkörpers implizieren. Meridiandehnungen sind hier kaum vorhanden.

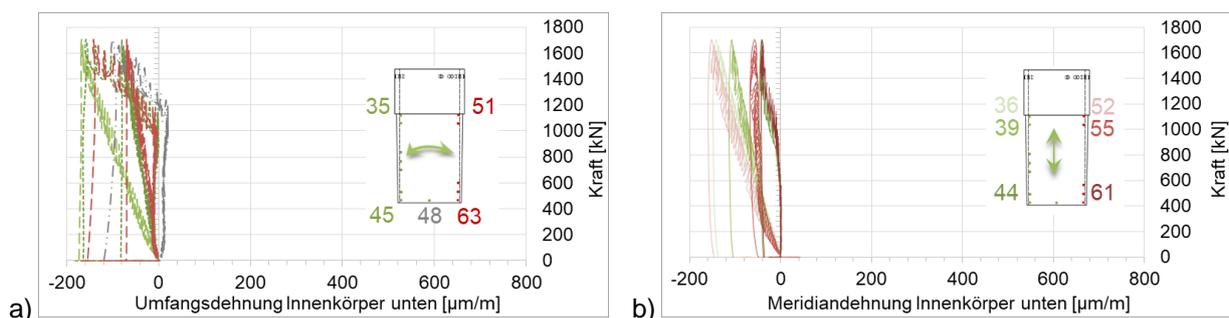


Abbildung 6-42: Versuchskörper V2B02 Innenkörper: a) Umfangsdehnungen, b) Meridiandehnungen

Figure 6-42: Samples V2B02 internal body: a) circumferential stretches, b) meridian stretches

Vergleichend mit der Kleinteilversuchsserie ist hier das Tragverhalten der Pressverbindung. Kennzeichnend ist der Verlauf der Dehnungen im unteren Bereich der Verbindung. Diese steigen erst an, wenn das Innenrohr unten angekommen ist. Ebenfalls liegen an den Stellen mit den geringsten Steifigkeiten die höchsten Spannungen vor. Entsprechend der Steifigkeit des Rohres sinken auch die Dehnungen

zum Dickensprung hin ab. Nach der Entlastung sind bleibende Dehnungen enthalten, da das Innenrohr im Außenrohr selbsthemmend verpresst ist.

Zusammenfassende Ergebnisse der Versuchsreihe Verpressen sind in der Abbildung 6-43 dargestellt.

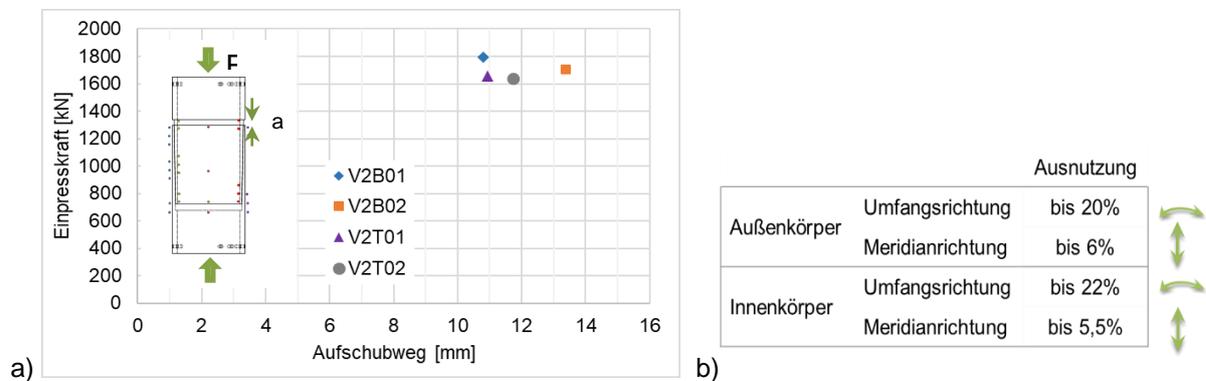


Abbildung 6-43: a) Zusammenfassende Ergebnisse,  
 b) Ausnutzungsgrad der Pressverbindungen infolge Verpressen

Figure 6-43: a) Summarized results, b) utilisation level of the press connection as a result of pressing

Hier werden die Ergebnisse untereinander verglichen. Es handelt sich dabei um eine Konfiguration, trotzdem betragen die Abweichungen der aufgebrauchten Einpresskräfte untereinander etwa fünf bis neun Prozent. Dabei wurden auch ungleiche Aufschubwege zurückgelegt. Die Unterschiede sind zwischen 12 und 22 Prozent. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass hier größere Streuungen der Ergebnisse im Vergleich zu den Untersuchungen der Kleinteilproben vorhanden sind, was mit der höheren Toleranz in Verbindung gebracht werden kann. Vor allem der Außenkörper reagiert sensibel auf geometrische Imperfektionen. Ein größeres Übermaß und stärkster Presssitz wie bei V2B02 führen zu der größeren Aufweitung des Außenkörpers am freien Rand. Generell sind die Umfangsspannungen dominant und prägen die Werte der Vergleichspannung, die den Eigenspannungszustand darstellen.

### 6.4.3 Versuchsreihe Torsion *Test sequence torsion*

#### 6.4.3.1 Versuchsaufbau und –durchführung *Experimental setup and execution*

Nach dem Verpressen der Probekörper wurden zwei davon auf Torsionstragfähigkeit untersucht. Dabei sind der Versagenszeitpunkt und ebenso die zurückgelegte Verdrehung der Körperteile gegeneinander infolge des zum Versagen führenden Torsionsmoments am wichtigsten. Das erste Durchrutschen definiert dabei das sogenannte Rutschmoment, das auch als Tragfähigkeitsgrenze zu deuten ist.

In der Abbildung 6-44 sind neben dem Versuchsaufbau selbst die wichtigsten Detailpunkte dargestellt. Für das Auslösen des Torsionsmoments nimmt der Versuchsstand nicht eine Achse ein, sondern verteilt sich mehraxial über das Spannungsfeld. Der Probekörper (Position 1) wurde für den Einbau in den Versuchstand bei seiner Fertigung schon mit vordefinierten Lochbildern versehen.

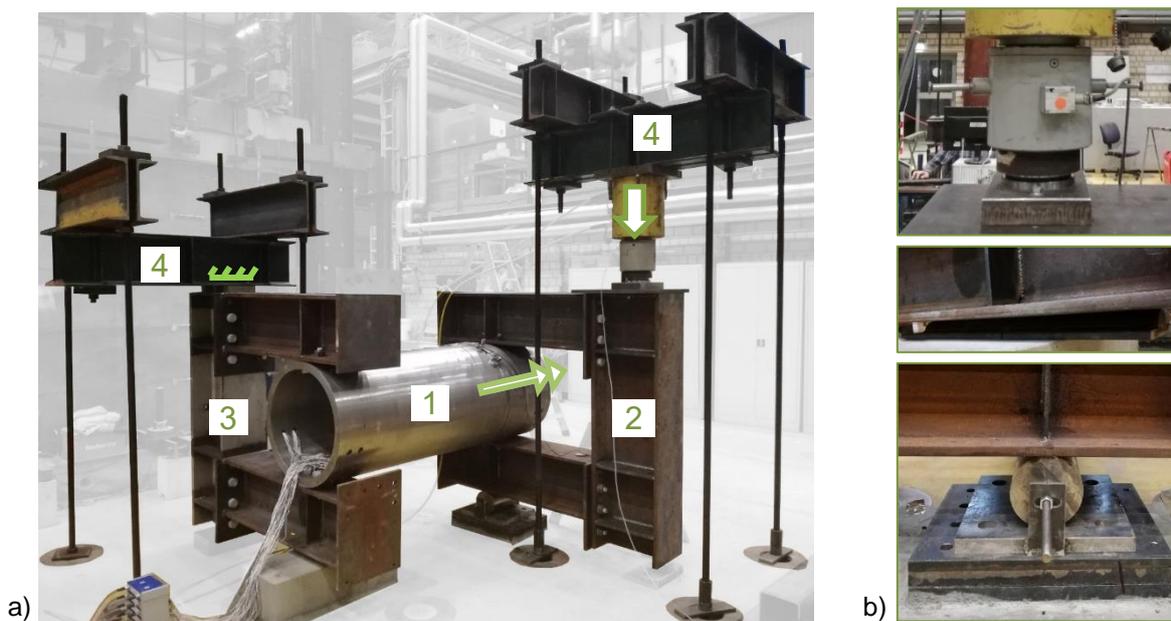


Abbildung 6-44: a) Versuchsaufbau, b) Lasteinleitung und Auflager  
 Figure 6-44: a) Experimental setup, b) load application and support construction

Dadurch konnte die Verbindung der Probe zu einem Lasteinleitungsrahmen (Position 2), auf der einen Seite, und einem Auflagerrahmen (Position 3), auf der anderen, geschaffen werden. In einem Abstand von einem Meter zu der Längsachse der Probe werden die Rahmen mit Traversenkonstruktionen gegen das Spannfeld verankert. Dieser Abstand definiert auch den Hebelarm, der bei der Einleitung der Last eine Torsionsbeanspruchung der Probe hervorruft. Die Lasteinleitung findet durch einen Enerpac-Hydraulik-Zylinder, der mit einer Handpumpe betrieben wird, statt.

Zur Gewährleistung einer gelenkigen und verschieblichen Lagerung der Probe wurde unterhalb des Lasteinleitungsrahmens eine Rolle angeordnet. Dabei ist die Achse der Auflagerrolle zu der Achse des Versuchskörpers parallel. An der festen Auflagerseite war eine feste aber senkrecht der Rohrachse gelenkige Lagerung nötig. Dafür wurde unterhalb des Auflagerrahmens in der Stegachse des Trägers ein Halbzylinder angeordnet. Beide Auflager wurden unter Berücksichtigung der Hertzschen Pressung auf 1000kN dimensioniert.

Zur Messung der Verdrehung der Probekörperteile gegeneinander wurden Wegaufnehmer (WA1) und Dehnungsaufnehmer (DD1) am Spalt angebracht.

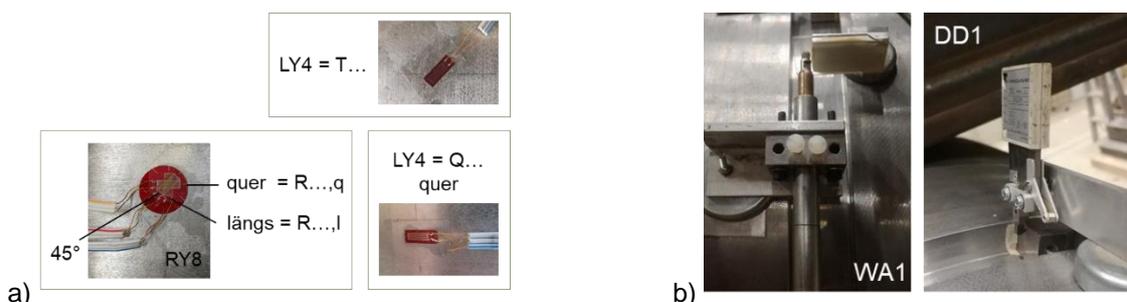


Abbildung 6-45: a) Ausrichtung der Dehnmessungstreifen auf dem Versuchskörper, b) Messeinrichtung  
 Figure 6-45: a) Position of the strain gauge on the sample, b) measuring system

Für die Messung und Aufzeichnung der aufgetragenen Last wurde eine Kraftmessdose C6B von HBM unterhalb des Zylinders angebracht. Zur Zentrierung der Lasteinleitung wurde ein Axialgelenk-Lager GE50-AW mit Zentrierplatte unterhalb der Kraftmessdose angeordnet. Die Dehnungsmessung fand mit Hilfe der Dehnungsmessstreifen, die schon für die Versuchsreihe Verpressen angebracht worden sind, statt.

Die Versuche wurden mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,8kNm/s, soweit es mit einer Handpumpe möglich war, durchgeführt. Bis zum ersten Durchrutschen dauerte es etwa 5,4 Minuten. Danach wurde die Kraft bei beiden Versuchen noch zweimal gesteigert.

#### 6.4.3.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse Evaluation and results of the experiment

Die Versuchsdurchführung mit dem mehrmaligen Belasten der Probe ist in dem Diagramm in der Abbildung 6-46 ersichtlich. Die erste Laststeigerung der beiden Versuche überlagert sich, bis bei der ersten Probe V2T01 bei einem Torsionsmoment von 210kNm zuerst deutliche Verformungen zu erkennen sind.

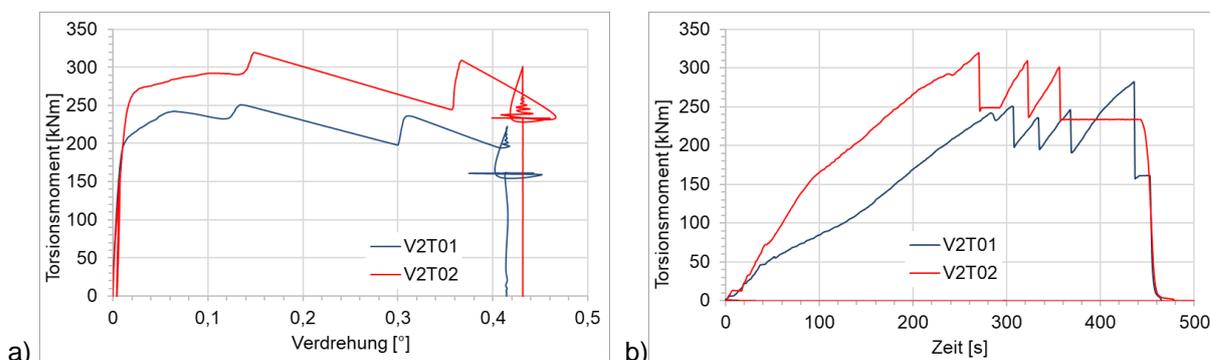


Abbildung 6-46: Versuchsreihe Torsion: a) Torsionsmoment-Verdrehungs-Diagramm,  
b) Torsionsmoment-Zeit-Diagramm

Figure 6-46: Experimental run torsion: a) torsional moment-rotation diagram,  
b) torsional moment-time diagram

Die Probe V1T02 zeigt bei dem Torsionsmoment von 275kNm die ersten Anzeichen für eine Verdrehung. Dabei wird bei beiden Versuchen die Last immer noch aufgenommen. Dies geschieht mit unterschiedlichem Widerstand, bis bei beiden Versuchen bei etwa gleichen zurückgelegten Verformungen ein Durchrutschen der Körperteile gegeneinander stattfindet. Bei dem Versuchskörper V2T02 wird diese Verdrehung schneller zurückgelegt, sodass er auch schneller versagt. Nach dem mehrmaligen Belasten und Durchrutschen wird die Probe entlastet. Zu erkennen ist eine bleibende Verdrehung der Versuchskörperteile gegeneinander nach dem Entlasten.

Das maßgebende Torsionsmoment beim ersten Durchrutschen des Versuchskörpers V2T02 ist in etwa 28 Prozent größer als das des Versuchskörpers V2T01. Dies kann an dem größeren Übermaß von etwa +9 Prozent liegen. Grundsätzlich kann hier die Streuung der Ergebnisse trotz der gleichen Probekörpergeometrien festgestellt werden.

Das Tragverhalten der Pressverbindung infolge der Torsionsbeanspruchung lässt sich anhand der folgenden Diagramme beurteilen.

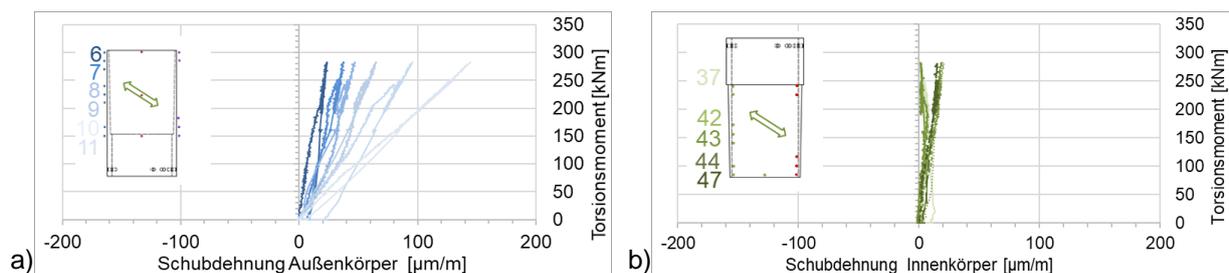


Abbildung 6-47: Versuchsreihe Torsion – V02T01: a) Schubdehnung Außenkörper,  
 b) Schubdehnung Innenkörper

Figure 6-47: Experimental run torsion – V02T01: a) shear strain external body,  
 b) shear strain internal body

Anhand der geringen Schubdehnungen am Innenkörper ist die direkte Weiterleitung der Torsionsbeanspruchung über die Fuge vom Innenkörper in den Außenkörper zu erkennen. So steigen auch die Schubdehnungen am Außenkörper über die Höhe der Fuge zum Auflagerrand hin gleichmäßig an. Nach der Entlastung gehen die Schubdehnungen zurück.

Die Verläufe der Umfangs- und Meridiandehnungen der Pressverbindung ist den folgenden Diagrammen in der Abbildung 6-48 zu entnehmen.

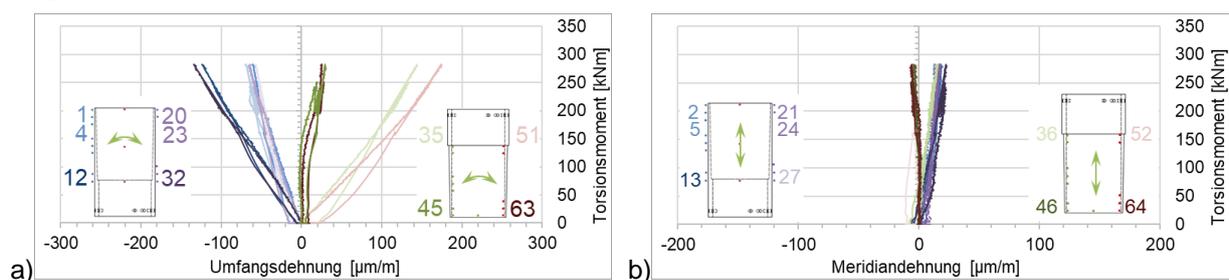


Abbildung 6-48: Versuchsreihe Torsion – V02T01: a) Umfangsdehnung,  
 b) Meridiandehnung

Figure 6-48: Experimental run torsion – V02T01: a) circumferential stretches,  
 b) meridian stretches

Erkennbar sind sehr geringe Dehnungen in Meridianrichtung, die maximale Spannungen von  $3,6\text{N/mm}^2$  hervorrufen. Die Dehnungen in Umfangsrichtung sind an den freien Enden der Körperteile ebenfalls gering. Dies bestätigt die Feststellung nach der Auswertung der Kleinteilversuchsserie, dass die Torsionsbeanspruchung keine Auswirkung auf den Eigenspannungszustand der Pressverbindung hat. Lediglich die Stellen am Dickensprung der Körperteile weisen in Umfangsrichtung eine leichte Änderung der Dehnungen auf. Dies lässt vermuten, dass bei der Verdrehung die Fugenoberfläche eingeebnet wurde und die Pressverbindung etwas entspannt wurde.

Im Weiteren wurde die Tragfähigkeit der untersuchten Pressverbindungskörper mit den in der Mastkonstruktion vorhandenen Schnittgrößen verglichen. Die notwendige Torsionsmomentbeanspruchbarkeit der Pressverbindung sollte bei einem Tragmast  $175\text{kNm}$  nicht unterschreiten. Beide Versuchskörper wurden so konzipiert, dass sie eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Der erste Versuchskörper trägt mit  $248\text{kNm}$  etwa 42 Prozent mehr Torsionsmoment ab. Bei der zweiten Probe sind es mit  $291\text{kNm}$  Rutschmoment sogar 66 Prozent mehr Tragfähigkeit. Hier wirkt sich der höhere in der Fuge geschaffene Pressdruck positiv aus.

Grundsätzlich werden hier die Ergebnisse der Kleiteilversuchsserie trotz der großen Streuung bestätigt. Die Variation des Übermaßes kann somit als Stellschraube für das Beeinflussen der Torsionsbeanspruchbarkeit benutzt werden. Um bei der Verwendung der Pressverbindung an einem Abspannmast mehr Sicherheit zu bekommen, wird eine zusätzliche Formschlussverbindung nötig.

Für den Einsatz der Pressverbindung in der Vollwandmastkonstruktion sind ebenso Auswirkungen der Verformungen auf die Gebrauchstauglichkeit der ganzen Konstruktion zu klären. Beim Tordieren des Mastchafts infolge des ersten Durchrutschens der Pressverbindung, das einen Verdrehungswinkel von etwa  $0,35^\circ$  verursacht und für den Maßstab 1:1 auf  $1^\circ$  hochgerechnet werden kann, würde sich die Lage der Seilpunkte an den Traversen (siehe Abbildung 6-49) ändern.

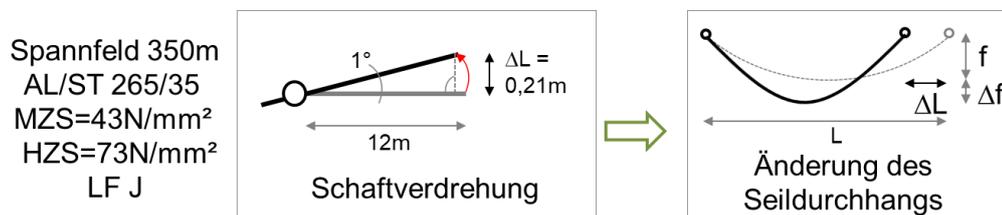


Abbildung 6-49: Skizze zur Verdeutlichung der Mastchaftsverdrehung eines Vollwandmastes  
Figure 6-49: Sketch to illustrate the shaft twist of a solid tube mast

Der Seilaufhängepunkt verschiebt sich infolge Mastchaftsverdrehung um 20cm horizontal. Bei einem Spannfeld von 350 Meter und der Verwendung von Seilen des Typs AL/ST 265/35, die eine definierten Zugspannung aufweisen, ändert sich der Seildurchhang von 12,14 auf 13,06 Meter. Verglichen mit einem Gittermast sind dort ähnliche Mastchaftstorsionswinkel von etwa  $1^\circ$  und ähnliche Verschiebungen der Traversenspitze zu erwarten.

#### 6.4.4 Versuchsreihe Biegung *Test sequence bending*

##### 6.4.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung *Experimental setup and execution*

Die weiteren zwei Versuchskörper dieser Versuchsserie wurden auf Biegebeanspruchung untersucht. Dafür vorgesehen ist ein Vier-Punkt-Biegeversuch, da dabei der Probekörper mit einem konstanten Moment belastet wird. Der auf den Kopf gestellte Versuchsaufbau ist in der Abbildung 6-50 dargestellt.

In diesem Vier-Punkt-Biegeversuch wird ein Einfeldträger von zwei Lasten mittig in einem Abstand von 2,6 Meter voneinander von unten beansprucht.

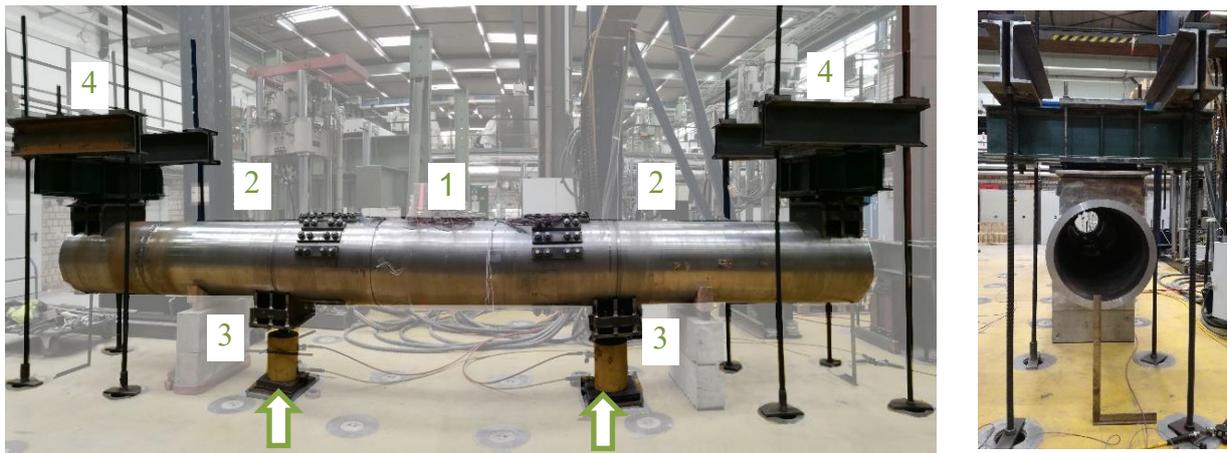


Abbildung 6-50: Versuchsaufbau  
 Figure 6-50: Experimental setup

Der Einfeldträger wird hier aus der Probe (Position 1) und den an beiden Seiten anschließenden Verlängerungsrohren (Position 2) zusammengesetzt. Für die gleitfest vorgespannte Laschenverbindung wurde der Versuchskörper bei der Fertigung mit beidseitigem Lochbild versehen. Zur gleichmäßigen Lastweiterleitung wurden die Rohre auf die dafür angepassten Lastsättel gelagert (siehe Abbildung 6-51).



Abbildung 6-51: Versuchsaufbau: a) Lasteinleitung, b) Auflagersattel,  
 c) Laschenverbindung zum Verlängerungsrohr  
 Figure 6-51: Experimental setup: a) load application b) support construction,  
 c) tab connection to the extension tube

Für die Zentrierung der Einleitungspunkte wurden Axialgelenk-Lager GE50-AW mit Zentrierplatte unterhalb der Sättel positioniert. Dadurch konnte auch die horizontale Belastung der lasteinleitenden Enerpac-Hydraulik-Zylinder (Position 3) vermieden werden. Zur Erzeugung der Last wurden die beiden auf Elastomerlager positionierten Prüfzylinder mit Schläuchen zu einem Kreis verbunden und konnten so von einer Handpumpe bedient werden.

Der Abstand der Lasten von den Auflagern, der auch den Hebelarm zur Bildung des Biegemoments darstellt, beträgt jeweils 1,85 Meter. Die Auflagerkonstruktion (Position 4) besteht aus einem Lagersattel, der für die gleichmäßige Auflagerung an die Rundung des Rohrs exakt angepasst wurde, und einer Traversenkonstruktion, die die Lasten durch eine Verankerung mit je vier Gewindestangen in das Spannfeld weiterführt.

Die Messeinrichtung, die bei diesem Versuchsstand verwendet wurde, ist aus der Abbildung 6-52 ersichtlich.

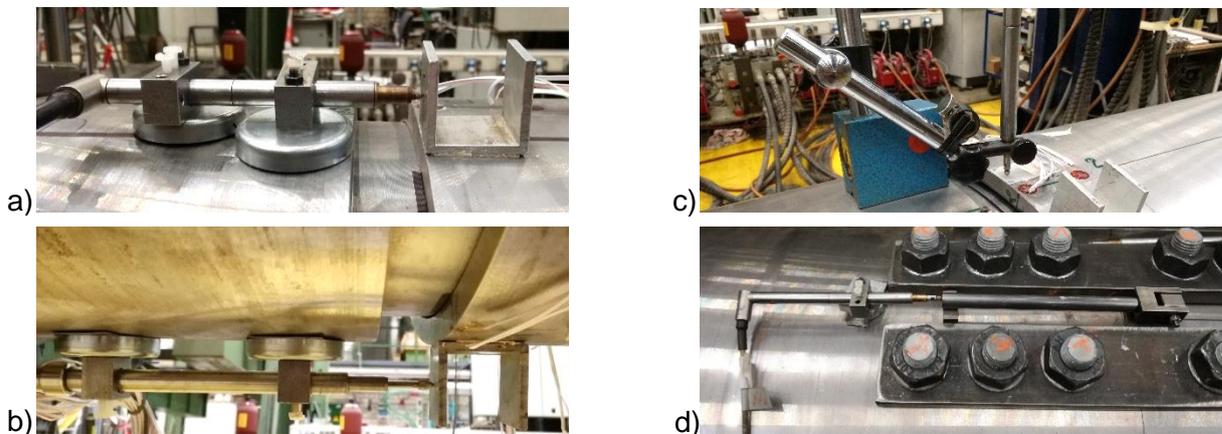


Abbildung 6-52: Messeinrichtung: a) Wegaufnehmer am Spalt oben, b) Wegaufnehmer am Spalt unten, c) Wegaufnehmer Klaffen, d) Wegaufnehmer Laschenverbindung  
Figure 6-52: Measuring system: a) way sensor at the gap above, b) way sensor at the gap below, c) way sensor gap, d) way sensor connection

Durch die Biegung des Trägers nach oben entstehen Bewegungen der Versuchskörperteile gegeneinander, die an dem Spalt zu erkennen waren. Zur Messung der Spaltschließung, die sich unten einstellt, wurde ein Wegaufnehmer WA1 benutzt. Mit dem Wegaufnehmer WA2 wurde oben die Schließung des Spalts gemessen. Ein Klaffen der Fuge am Spalt im Zugbereich wurde mit einem vertikal ausgerichteten Wegaufnehmer WA3 aufgenommen. Die Bewegungen der Laschenverbindung in vertikale Richtung wurden am Spalt mit Wegaufnehmer WA4 gemessen. Die Last wurde über den Druckregler mit zuvor kalibrierten Zylindern gemessen, beziehungsweise aus dem Druck in die Kraft umgerechnet. Auch hier konnten zur Aufnahme der Dehnungen die vor der Versuchsreihe Verpressen angebrachten Dehnmessungstreifen benutzt werden.

Die Versuchsdurchführung fand kraftgesteuert mit einer, soweit es mit einer Handpumpe möglich war, eingestellten Geschwindigkeit von 0,7kN/s statt. Die Dauer der Belastung war bis zum Erreichen der Fließgrenze des Materials an maßgebenden Stellen. Während der Versuchsdurchführung wurden Knackgeräusche beobachtet. Die vermutliche Ursache dafür könnte entweder in der Oberflächenrauheit mit spürbaren Riefen in der Pressfuge, die beim Verpressen ruckartig überwunden und dabei eingebnet wurden, oder im Slip-Stick-Effekt, dem Wechsel zwischen einem Haften und einem Gleiten in der Fuge, liegen.

#### **6.4.4.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse** **Evaluation and results of the experiment**

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse fiel auf, dass die bei der Versuchsdurchführung beobachteten Knackgeräusche sich in dem Verlauf der Momenten-Verschiebungsbeziehung widerspiegeln. Je höher die Versuchsgeschwindigkeit, desto weniger hörbar sind die Knackgeräusche und desto gleichmäßiger ist der Verlauf der Verschiebung. Die aus der Biegebelastung resultierenden Verformungen im Spalt der Pressverbindung sind in dem Diagramm in

der Abbildung 6-53 dargestellt. Diese zeigen, wie gleichmäßig die Probe auf die Biegebeanspruchung reagiert und die Kraftumlagerung innerhalb des Versuchskörpers stattfindet, sodass die Verläufe kontinuierlich ansteigen. Beim Erreichen der Fließgrenze des Materials an einigen Stellen werden die Kurven der Verformungen flacher, da die Kraft sich umlagern muss. Als diese gar nicht mehr aufgenommen werden kann, werden die Verläufe annähernd horizontal.

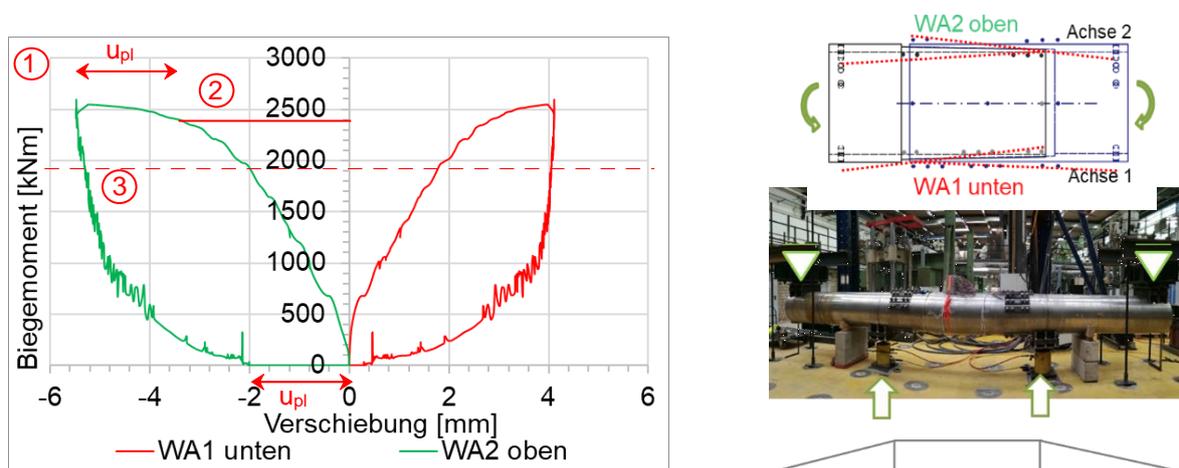


Abbildung 6-53: Versuchsreihe Biegung – V02B02: Momenten-Verschiebungsbeziehung  
 Figure 6-53: Experimental run bending – V02B02: moment – displacement relationship.

Der dabei entstandene plastische Bereich wird nach der Entlastung der Pressverbindung deutlich und kann bei der Bestimmung des Grenzbiegemoments der Verbindung verwendet werden. Von der sich maximal einstellenden Verschiebung wird dieser plastische Anteil abgezogen und dabei das elastische Grenzmoment abgelesen. Zur Gewährleistung von mehr Sicherheit wird dieses Moment um 25 Prozent abgemindert. Damit kann das Bemessungsmoment der Pressverbindung definiert werden.

Die Ergebnisse beider Versuche sind in der Tabelle 6-5 zusammengefasst. Vergleicht man diese miteinander, beträgt der Unterschied etwa sechs Prozent. Dabei bestätigt sich die Hypothese, dass der nach dem Verpressen geschaffene Eigenspannungszustand für den Abtrag der Torsionsbeanspruchung zur Verfügung steht. Der Restanteil kann bei der Biegebelastung verbraucht werden.

Tabelle 6-5 : Zusammenfassende Ergebnisse der Versuchsreihe  
 Table 6-5: Summarized results of the experimental run

		V02B01	V02B02
maximale Verschiebung	mm	3,76	5,48
plastischer Anteil der Verschiebung	mm	0,43	2,00
elastisches Grenzmoment Pressverbindung	kNm	2560	2407
Bemessungsmoment Pressverbindung	kNm	<b>1920</b>	<b>1805</b>

So auch bei dieser Versuchsserie wurde der Probekörper V01B02 gemäß dem Aufschubweg mehr verpresst und konnte deswegen nur weniger zusätzliche Biegung aufnehmen.

Das Tragverhalten, das bei beiden Versuchskörpern annähernd gleich war, kann anhand der Dehnungsverläufe in den folgenden Abbildungen erläutert werden. Wie erwartet liegt hier ein dreidimensionaler Spannungszustand vor.

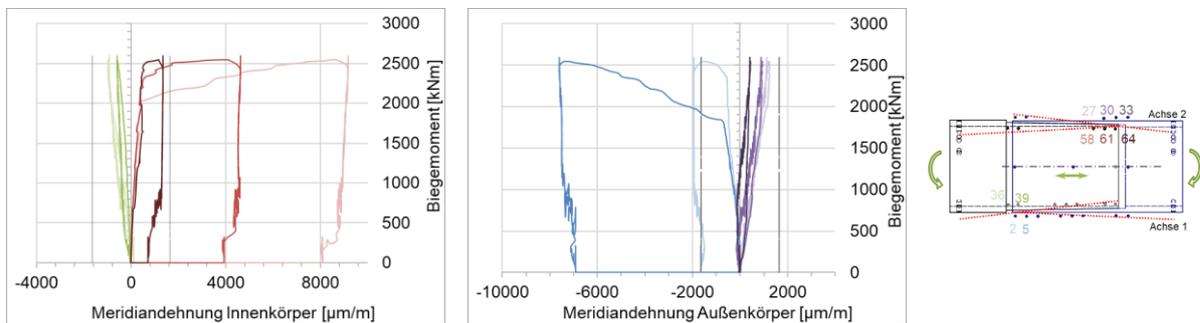


Abbildung 6-54: Versuchsreihe Biegung – V02B02: Meridiandehnungen  
 Figure 6-54: Experimental run bending – V02B02: meridian stretches

Zur Erfassung der tatsächlich vorliegenden Dehnungen wurden die nach der Entlastung verbleibenden Dehnungen aus dem Verpressen mit den gemessenen Dehnungen aus dem Vierpunktbiegeversuch überlagert. Die maßgebenden Messstellen sowohl für den gefügten Zustand als auch bei der Biegebeanspruchung sind die Stellen am freien Rand der Körperteile. Diese Stellen haben auch die geringste Steifigkeit.

Über die Höhe des Querschnitts trägt die Pressverbindung analog eines Biegeträgers das Biegemoment ab. Im Versuch wirkt die Last nach oben. Dadurch wirken oben Zugkräfte, die positive Dehnungen in Meridianrichtung (Innenkörper Stelle: 58, 61, 64; Außenkörper Stelle: 27, 30, 33) der Probe hervorrufen. Unten am Außenkörper an den Stellen 2 und 5, am Innenkörper an den Stellen 36 und 39 sind negative Meridiandehnungen erkennbar. Diese resultieren aus der Druckkraft.

Die Verläufe der Dehnungen in die Umfangsrichtung sind den Diagrammen in der Abbildung 6-55 zu entnehmen.

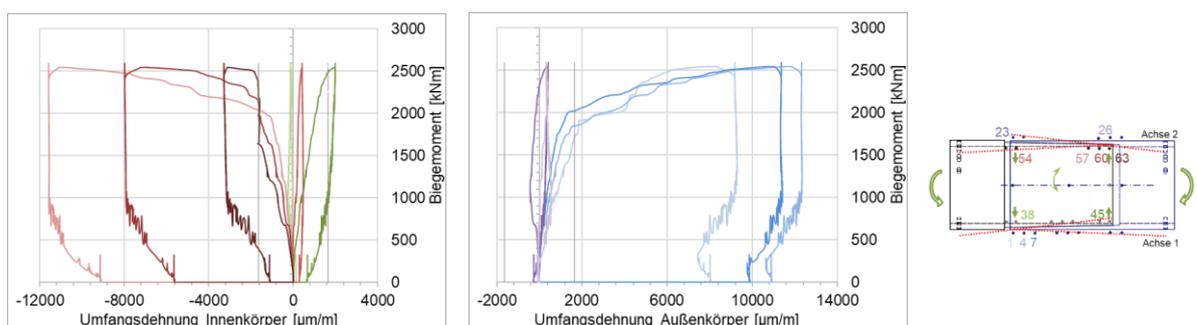


Abbildung 6-55: Versuchsreihe Biegung – V02B02: Umfangsdehnungen  
 Figure 6-55: Experimental run bending – V02B02: circumferential stretches

Das Biegemoment kann über der Fuge der Pressverbindung in Zug- und Druckkraftkomponente aufgeteilt werden. Der Hebelarm ist gleich der Höhe der Fuge. Am Außenkörper an den Stellen 1, 4, 7 ist infolge der Druckkomponente eine Aufweitung durch positive Umfangsdehnungen erkennbar. Bei der Betrachtung der Umfangsdehnungen am Innenkörper wird deutlich, dass an den Messstellen 57, 60 und 63 auf die die Druckkomponente wirkt, negative Dehnungen vorliegen, während an der

Stelle 45 der gegenüberliegenden Seite, positive Dehnungen infolge der Zugkomponente zu beobachten sind. Dieses kann außerdem auf die Ovalisation des Querschnitts hindeuten.

Neben dem teilweise „Zurückrutschen“ der Körperteile in Ursprungslage werden nach dem Entlasten der Pressverbindung die bleibenden plastischen Dehnungen sichtbar.

In der Tabelle 6-6 werden die maximal aufnehmbaren Bemessungsmomente der Pressverbindungen den halbierten Schnittgrößen der Mastkonstruktion gegenübergestellt.

Tabelle 6-6 : Tragfähigkeit im Vergleich zu den Schnittgrößen der Mastkonstruktion  
 Table 6-6: Load capacity compared to the internal forces of the mast construction

		V02B01	V02B02
Bemessungsmoment Pressverbindung	kNm	<b>1920</b>	<b>1805</b>
Anteil an Schnittgrößen, ½ Tragmast 1500kNm	%	+28,0	+20,3
Anteil an Schnittgrößen, ½ Abspannmast 2000kNm	%	-4,0	-9,75
Referenzrohr Ø 609 x 22,7mm; $M_{el} = 2040\text{kNm}$		-5,9	-11,5

Vorerst ist der Unterschied der Tragfähigkeiten untereinander von etwa sieben Prozent zu erwähnen. Der Probekörper V02B01 konnte mehr Biegemomentbeanspruchung abtragen. Bei der Pressverbindung für den Tragmast ist bis zu 28 Prozent mehr Sicherheit vorhanden. Bei der Verwendung der Verbindung im Abspannmast wären eventuell mechanische Verstärkungen nötig. Beim Vergleich der Tragfähigkeiten der untersuchten Pressverbindungskörper mit dem jeweiligen Referenzrohr ist ebenfalls ein bis zu 11,5 Prozent kleineres Biegemoment vorhanden.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Profitability contemplation

### Kurzfassung

In diesem Kapitel wird der wirtschaftliche Vorteil der neuentwickelten Konstruktion unter Berücksichtigung von Materialeinsatz und Konstruktionsgewichten, Anschlussdetails, Fertigung und Montage abgeschätzt.

### Abstract

This chapter assesses the economic benefits of new developments, taking into account material usage and design weights, connection details, manufacturing and assembly.

### 7.1 Vergleich der Entwürfe Comparison of the designs

Im Anschluss an die Konzeptphase wurden die Vorentwürfe für die entwickelten Mastkonstruktionen unter den maßgebenden Einwirkungen bemessen und optimiert. Als Grundlage ist ein Freileitungsmast einer 380 kV Spannungsebene mit zwei Stromkreisen in Donaufarm untersucht worden. Neben der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden sehr früh die Konstruktionen im Hinblick auf das sich ergebende Gewicht verglichen. Das Diagramm in Abbildung 7-1 stellt diesen Vergleich dar.

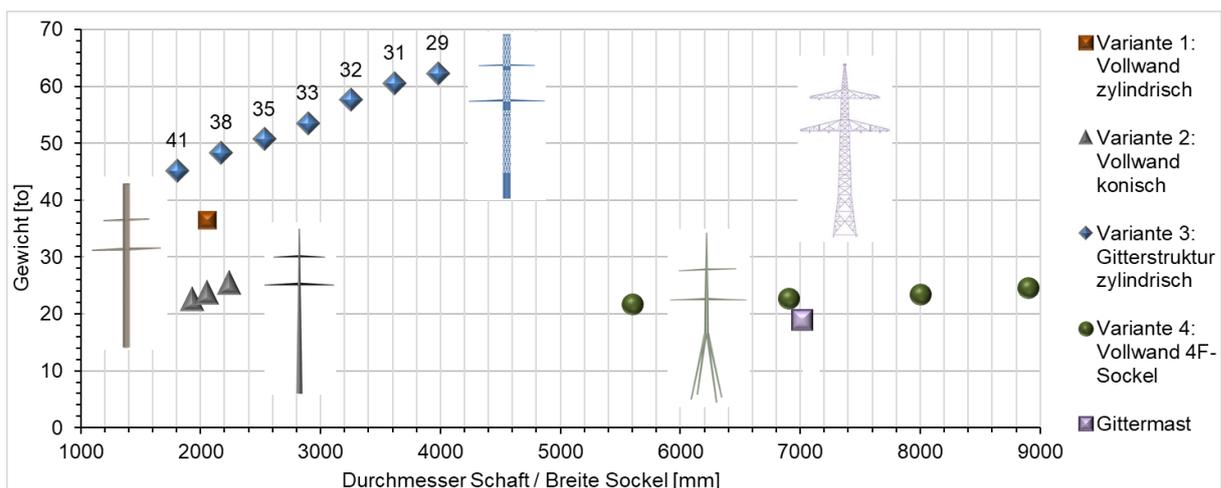


Abbildung 7-1: Vergleich der Konstruktionen  
Figure 7-1: Comparison of the constructions

Die Mastschaftkonstruktion mit der Gitterstruktur weicht wegen der gestörten Membrantragwirkung des Rohres deutlich von den anderen ab. Die Vorteile der konischen Form, die dem Biegemomentenverlauf angepasst wurde, werden hier auch ersichtlich. Unter der Berücksichtigung der Fundamentierung wurde die vierte Variante

entwickelt, die dennoch im Hinblick auf die Tonnage vergleichbar mit der leichten Struktur der Gittermastkonstruktion ist.

Trotz aller Bewertungssystematik können Aussagen bezüglich der Ästhetik nicht immer absolut objektiv getroffen werden, sondern enthalten oft auch die subjektive Meinung der beteiligten Personen.

## 7.2 Gegenüberstellung Gittermast – Vollwandmast *Comparison of lattice tower - Solid tube tower*

### 7.2.1 Baukosten *Building-costs*

Nach der Grobbewertung und der Auswahl der Mastkonstruktion wurde die Variante 4 weiterentwickelt. Zunächst wurden generelle Gesichtspunkte geprüft. Der Detaillierungsgrad soll erst im Verlauf weiterer Prüfungen schrittweise erhöht werden. Der gesamte Entwicklungsprozess fand mit der Prämisse, den Aufwand in der Fertigung, der Montage und der Instandsetzung zu minimieren, statt. Durch einen schnellen Baufortschritt und kurze Wegebauzeiten kann die Leitung schneller in Betrieb genommen werden. Im Weiteren wird die favorisierte Variante der typischen Gittermastkonstruktion gegenübergestellt.

Zu den wichtigsten Kennzeichen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse zählen die bauwirtschaftlichen Kriterien der Freileitungsmastkonstruktion. Gemäß [12] sind die Investitionskosten von Freileitungen von vielen Einflussgrößen abhängig, wobei die Übertragungsspannung, die Zahl der Stromkreise und der Leiterquerschnitt den größten Einfluss haben. Weitere Faktoren sind das Gelände, die Masthöhen, das Verhältnis der Anzahl von Trag- und Abspannmasten und die Höhe der anzusetzenden Lasten (abhängig von den klimatischen Bedingungen). Auch die Kosten für mögliche Entschädigungen durch das Bauen auf einem privaten Grundstück können sehr unterschiedlich sein.

Im Weiteren werden Preise für einen Streckenabschnitt von einem Kilometer verglichen. Bei der Gittermastkonstruktion wurden für den exemplarischen Kostenvergleich Daten aus [12] vom Jahr 2001 verwendet. Dabei wurden unter Berücksichtigung der historischen Inflation von 2001 bis heute, die aus dem Verbraucherpreisindex für Deutschland, ausgewertet vom statistischen Bundesamt, resultiert, eine Preissteigerung von etwa 30% miteinberechnet. Die prozentuale Aufteilung der Kosten für eine Freileitung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 7-2: Kostenstellen der Freileitung [eigene Darstellung in Anlehnung an [12]]  
Figure 7-2: Cost types for the overhead power line [own representation according to [12]]

Die Kosten für die Planung der Konstruktion und die der Stromkreise, sowie Armaturen und Leiterseile werden bei der Gegenüberstellung der Konstruktionen nicht berücksichtigt. Die erwarteten Kosten aus der Nutzung der elektrotechnischen Anlagen sind in die Untersuchungen über die Wirtschaftlichkeit nicht einbezogen, da es sich unabhängig von der Mastkonstruktion um einen gleichen Aufwand handelt. Somit werden lediglich die Gesamtkosten für die Errichtung der Konstruktion beider Masten (Gitter und Vollwand) und ihrer Gründung gegenübergestellt. Als Referenz gilt dabei die Stahlgitterkonstruktion mit einem Durchschnittsgewicht von etwa 55 Tonnen Stahl pro Kilometer Freileitungstrasse.

Der konische Vollwandmast mit 4F-Sockel, der als Tragmast in Donauanordnung mit zwei Stromkreisen konzipiert wurde, weist pro Kilometer Trasse ein deutlich höheres Gewicht auf. Im Vergleich zu dem Stahlgittermast entspricht dies sogar einem Anstieg von 39%. Für die Vollwandmastkonstruktion erfolgte eine Kalkulation der Material- und Lohnkosten der Mastmontage (-fertigung) durch eine Stahlbaufirma. Die Kalkulation wurde unter der Berücksichtigung der Serienfertigung von etwa 1500 Masten und unter der Annahme idealer Fertigungsbedingungen durchgeführt. Daraus ergibt sich die Voraussetzung, dass für dieses Projekt eigene Fertigungsstraßen mit abgestimmten Fertigungsmaschinen, bzw. Bearbeitungszentren entworfen und umgesetzt werden. Die gesamten Errichtungskosten der Stahlkonstruktion sind aus mehreren Positionen zusammengestellt. Die einzelnen Anteile an den Gesamtkosten sind der Tabelle 7-1 zu entnehmen.

Tabelle 7-1 : Kostenstellen der Variante 4: Vollwandrohr konisch-Vierfußsockel  
Table 7-1: Cost types for the variant 4: Grid structure conical with four-foot pedestal

Pos.		Menge	ME	Anteil
01.	Mastschaft	1	Stück	9%
02.	Traverse 1	2	Stück	4%
03.	Traverse 2	2	Stück	6%
04.	Sockelfuß	4	Stück	33%
05.	Pressverbindung	3	Stück	3%
06.	Guss-Knoten	1	Stück	2%
07.	Ankerkonstruktion Fuß	4	Stück	1%
08.	Korrosionsschutz	2x400	m <sup>2</sup>	26%
09.	Lieferung und Montage	1	Pauschal	16%

Dabei betreffen die Positionen 01 bis 06 die Errichtung der Konstruktion (57 Prozent) ab Oberkante Fundament. Diese Errichtungskosten werden durch einen hohen Anteil (26 Prozent) für den Korrosionsschutz ergänzt. Zusätzlich wurde die Lieferung und die schussweise Montage der Konstruktion (16 Prozent) auf der Baustelle inklusive der Baustelleneinrichtung berücksichtigt. Die Errichtungskosten des Stahlbaus lassen sich in vier wichtige Kostenarten unterteilen, siehe Abbildung 7-3.

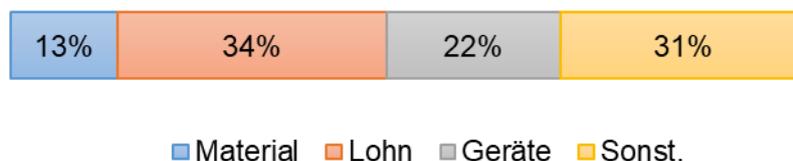


Abbildung 7-3: Kostenartensummen der Errichtungskosten der Variante 4  
Figure 7-3: Cost element totals of the construction costs of variant 4

Zu den Materialkosten zählen hauptsächlich die Blechkosten der Rohre. Die Fertigung dieser im Werk ist in die Lohnkosten hauptsächlich bei den Schweißarbeiten, und in die Kosten für die Maschinen aufgeteilt. Ebenso werden die Kosten der Pressverbindung durch Gerätekosten geprägt. Da einige Arbeiten nur von anderen Unternehmen erledigt werden können, werden diese Leistungen zu den sonstigen Kosten gezählt. Diese sind beispielhaft für die Fertigung des Gussknotens und der Ankerkonstruktion sowie für die Baustelleneinrichtung. Bei den sonstigen Kosten dominiert der Aufwand für den Korrosionsschutz.

Die Kosten für die Herstellung der Gründung betragen im Schnitt 11 Prozent der Gesamterrichtungskosten. Diese sind von den geographischen und geologischen Randbedingungen abhängig. Wie in Kapitel 4.2.5 erläutert, wurden zwei typische Modellböden betrachtet. Je nach Tragfähigkeit der Böden resultieren für die vorgeschlagenen Gründungsvarianten unterschiedliche Abmessungen der Pfähle und Pfahlkopfplatten. Diese beeinflussen wiederum unmittelbar die Baustoffmenge und damit die Materialkosten. Dazu wirkt sich der große Herstellungsaufwand direkt negativ auf die Gesamtkosten der Gründung aus. Bei der Gründung mit Großbohrpfählen wird mit etwa 40 Prozent mehr Kosten, als für die Herstellung der Gründung mit den Micropfählen notwendig wäre, geplant. Ferner kann auch die Baustelleneinrichtung für die kleineren Bohrgeräte auch kleiner dimensioniert werden und wird generell auch weniger Kosten fordern. Es werden Mittelwerte betrachtet. Die Pfahleinbindungen im Fels verursachen Mehrkosten und werden hier nicht berücksichtigt. Im Vergleich zu den typischen nach [12] ermittelten Gründungskosten des Stahlgittermastes, die unter Berücksichtigung der Inflation aktualisiert wurden, sind für die Gründung der Vollwandkonstruktion etwa 54 Prozent weniger Kosten notwendig.

Die Vollwandvariante hat auch andere Vorteile gegenüber der Stahlgitterkonstruktion. Bei der Verwendung des Vollwandmasteschaftes wird die Trassenbreite geringer. Damit sinken im Vergleich zu der Gittermastkonstruktion ebenso die zu leistenden Entschädigungszahlungen. In dieser Hinsicht kann auch das Bodenaustrittsmaß der Fußkonstruktion variiert werden. Die Konstruktionshöhe kann durch niedrigere Traversenprofile verkleinert werden. Ebenso besteht die Möglichkeit die Höhe durch den Einsatz von geraden Mastsegmenten zu verändern. Dadurch kann auch die Gelegenheit zur Umnutzung gegeben werden, wodurch die Übertragungsleistung auf bestehenden Trassen erhöht werden kann.

Zusammenfassend lässt sich bei der Gegenüberstellung der Gesamterrichtungskosten beider Konstruktionen trotz des hohen Gewichtsunterschieds keine Kostendifferenz feststellen. Ausschlaggebend ist die viel aufwendigeren Montage der kleinteiligen aber leichteren Gitterkonstruktion, die einen hohen Anteil an den Lohnkosten hervorruft.

Zusätzlich bringt die Entwicklung einer wirtschaftlichen und ökologischen Lösung der Fundamentierung mit Mikropfählen bei der Vollwandvariante wirtschaftliche Vorteile mit sich.

Durch die zunehmende Durchdringung des Marktes, die eventuell neu entwickelten Normungskriterien und durch die weiter optimierte Bauweise können die Gesamtkosten der Vollwandkonstruktion gesenkt werden. Zudem wird die hier vorgestellte Variante 4 vor allem in sensiblen Regionen als schonende, akzeptanzfördernde Alternative beim Netzausbau bestehen können.

### **7.2.2 Bauzeit** ***Construction period***

Der nächste wichtige Aspekt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Vergleich der Montagezeit und somit die Aussicht zur einer schnellen Inbetriebnahme der Freileitung. Die Gittermastkonstruktion wird laut [19] auf der Baustelle aus einzelnen Profilen zu Schüssen des Mastes vormontiert. Erst danach werden die einzelnen Schüsse aufeinandergesetzt und miteinander verschraubt. Die Bauzeit einer Mastkonstruktion inklusive der Gründung variiert dabei zwischen vier und sechs Wochen [19], also zwischen 20 und 30 Arbeitstagen.

Bei der Vollwandvariante hingegen wird durch den hohen Anteil der Vormontage im Werk ein schneller Baufortschritt gewährleistet. Die Stahlbleche werden durch Laserschneiden vorgefertigt. Die konischen Segmente werden nach dem Walzvorgang zu Stahlrohrabschnitten verschweißt. Die Konstruktion besteht aus höchstens neun Einzelementen und kann mit etwa drei Taillierungen auf die Baustelle gebracht werden. Die Höhe der Elemente ist durch die Lieferlängen bestimmt. Die Konstruktion kann dann mittels der Pressverbindung auf der Baustelle innerhalb von fünf Arbeitstagen zusammengesetzt werden. Mit Berücksichtigung von Gründungsarbeiten kann der Vollwandmast innerhalb von 18 Arbeitstagen fertiggestellt werden. Demzufolge kann die Beseilung der Vollwandkonstruktion bei 28 Prozent schnellerer Fertigstellung gegenüber der eines Gittermasts auch früher beginnen.

### **7.2.3 Instandhaltung** ***Maintenance***

Nach der DIN EN 50341-1 [31] ist die geplante Lebensdauer von Freileitungen im Allgemeinen auf 50 Jahre festgelegt. Dies ist die Zeit, für die der Mast seine Funktion der Energieweiterleitung ohne die Notwendigkeit einer wesentlichen Reparatur aber mit der vorgesehenen Instandhaltung erfüllen kann. Die Betriebsdauer beträgt jedoch meistens um die 80 Jahre und länger. Die DIN EN 50341-1 legt drei übergeordnete Ansprüche an die Konstruktion und Bemessung fest. Diese sind die Zuverlässigkeitsanforderung, also die Gewährleistung einer zuverlässigen und wirtschaftlichen Übertragung der Energie, die Betriebssicherheitsanforderung und die Anforderung an die Personensicherheit, die für die vorgesehene Lebensdauer einzuhalten sind.

Dafür wird die Gittermastkonstruktion jährlich und nach schweren Stürmen begangen und befliegen, um visuell erkennbare Veränderungen am Tragwerk festzustellen. Alle fünf Jahre, angefangen nach den ersten zehn Jahren, wird die Konstruktion neben der Sichtprüfung handnah also mechanisch auf Standsicherheit geprüft. Bei 80 Jahren Betriebsdauer wird das Tragwerk 15-mal der Hauptprüfung unterzogen. Die Kleinteiligkeit des Tragwerks und damit die hohe Anzahl an zu prüfenden Schrauben bedingt einen sehr hohen Aufwand.

Die Vollwandkonstruktion ist im Lebenszyklus hingegen wartungsarm und dauerhaft. Durch das Fehlen von mechanischen Verbindungen werden lediglich Sichtprüfungen notwendig sein. Auch die geringe Anzahl von Verbindungspunkten minimiert den Instandhaltungsaufwand.

Eine der wichtigsten Maßnahmen bei der Instandsetzung einer Stahlkonstruktion ist der Korrosionsschutz. Dafür ist die Kleinteiligkeit der Gitterkonstruktion sehr ungünstig. Dies wird beim Vergleich der Mantelflächen beider Konstruktionen deutlich. Die Vollwandkonstruktion hat um 55 Prozent weniger Mantelfläche als die Gitterkonstruktion, die dreimal verteilt über die Betriebsdauer des Mastes, erneuert werden muss. Zusätzlich ist die komplexe Geometrie der Winkelprofile der Gitterkonstruktion im Vergleich zu der glatten Oberfläche der Vollwandkonstruktion klar im Nachteil.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick** ***Summary and outlook***

Der vorliegende Forschungsbericht beinhaltet Untersuchungen zu den vorhandenen Konstruktionen des Freileitungsbaus und stellt innovative Konstruktionen als eine akzeptanzfördernde Alternative dar.

Als Stand der Forschung wurden vorab Grundlagen des Freileitungsbaus erarbeitet. Das vorliegende Projekt wurde interdisziplinär von Ingenieuren und Architekten der Lehrstühle Stahlbau und Städtebau an der TU Dortmund bearbeitet. Im Einzelnen wurden daher sowohl die technischen als auch die architektonischen Anforderungen zur Konstruktion von Freileitungsmasten definiert und zusammengestellt.

Die Technologie der Gittermasttürme wurde beurteilt und dabei anhand eines Referenzobjekts Potenziale der Konstruktion im Hinblick auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit herausgearbeitet. Dazu wurden unterschiedliche Optimierungsansätze untersucht und vorgestellt. Es ist besonders in den Ansätzen einer veränderlichen Konizität des Mastschaftes, einer Anpassung des Fachwerks sowie einer Verwendung der Stahlgüteklasse S460M für die Konstruktion in Kombination mit Schrauben der Güteklasse 8.8 ein Optimierungspotential vorhanden.

Zur Festlegung der Mastart und -form wurde eine Studie zur Typisierung der vorhandenen Freileitungsmaste vorgeschaltet. Dabei wurde das bestehende Freileitungsnetz analysiert. Es folgten Festlegungen über die typische Art und Funktion der Maste, die als Grundlage für die nachfolgenden Entwürfe galten. Die Analyse ergab, dass besonders das Höchstspannungsnetz ausgebaut werden soll. Dabei ist der Donaumast die meist angewandte Bauart für die Übertragung von zwei Stromkreisen und der Tragmast der meist verbreitete Typus.

Parallel dazu konnten Untersuchungen von modernen Bauverfahrensvarianten für neue Freileitungsmasten mit Berücksichtigung unterschiedlicher Einsatzorte durchgeführt werden. Dabei wurden mehrere Entwürfe entwickelt, die elektrotechnischen, statischen und architektonisch-konstruktiven Anforderungen entsprachen. Die Konstruktion wurde im Sinne einer technisch-wirtschaftlich effizienten Gesamtlösung als Systembauweise für die Serienfertigung entwickelt. Daraus ging die favorisierte Variante 4 hervor, die den oben erwähnten Anforderungen nachkommt und sogar die Wechselwirkung zwischen dem Baugrund und der Konstruktion des Freileitungsmastes berücksichtigt. Dieser neuartige Freileitungsmast als Vollwandkonstruktion mit Vier-Fuß-Sockel wurde im Detail weiterentwickelt. Die vorhandenen Anschlusskonfigurationen wurden statisch vordimensioniert und im Einzelnen auch mit ersten Ansätzen mit Hilfe von FE-Methoden optimiert. Die Optimierungsansätze lagen in der Verringerung des Fertigungs-, des Montage- und Instandsetzungsaufwands.

Zur zügigen Montage des Mastes auf der Baustelle wurde eine Rohr-in-Rohr Pressverbindung entwickelt. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden diese Montageverbindungen der Schaftsegmente untersucht. Die Kleinteilversuchsserie lieferte mit der generellen Analyse des Trag- und Verformungsverhalten der Pressverbindungen die Basis für die nachfolgenden Großversuche. Die maßgebenden

Einflussgrößen der Pressverbindungs-Geometrie wurden dabei durch gezielte Variationen einzelner Parameter analysiert.

Es erfolgte die Variation folgender Parameter:

- Konizität der Verbindung (Neigung der Kontaktfläche zwischen innerem und äußerem Formteil)
- Höhe der Verbindung (Überlappungslänge der Formteile)
- Wanddicken (Dicke des Verbindungs-Formteils)
- Übermaß

Die neu entwickelte Verbindung des Schaftquerschnitts wurde neben Drucknormalkräften auch unter einer Beanspruchung durch Biegemomente und Torsionsmomente geprüft. Durch die reibschlüssige Verbindung können die Kräfte und die Momente über Haftreibung übertragen werden. Durch die hohe Anzahl der Variablen und der begrenzten Anzahl der Versuchskörper konnte leider keine statistische Auswertung durchgeführt werden.

Dennoch stellte es sich heraus, dass die Stellschraube für das Beeinflussen der Biegebeanspruchbarkeit, neben der Variation des Übermaßes, vorwiegend die Größe der Fugenlänge ist. Der Torsionswiderstand der Verbindung steigt mit steigendem Pressdruck in der Fuge. Die Abhängigkeit der Tragfähigkeit der Pressverbindung von den Toleranzen wurde in kleinen Studien erörtert und muss in ausgedehnteren Untersuchungen vertieft werden.

Die Großteilversuchsserie diente der Bestätigung der Kleinteilserie und der Ermittlung des Maßstabeffekts auf die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten der neu entwickelten Montageverbindungen des Schaftes. Die Versuchskörper wiesen einen Durchmesser von 650 cm auf. Damit lagen realitätsnahe Abmessungen vor, bei denen eine Versuchsdurchführung mit den technischen Möglichkeiten noch durchführbar und praktikabel war. Zur Abbildung realitätsnaher Bedingungen erfolgte die Festlegung der Prüflasten durch eine Analyse der statischen Berechnungen vom Freileitungsmast.

Die Pressverbindung wies für den Einsatz an einem Tragmast mehr Biege- und Torsionstragfähigkeit als notwendig auf. Dabei wirkte sich der hohe in der Fuge geschaffene Pressdruck positiv aus. Somit konnten die Ergebnisse der Kleinteilversuchsserie trotz der großen Streuung bestätigt werden. Die Variation des Übermaßes kann somit als Stellschraube für das Beeinflussen der Torsionsbeanspruchbarkeit verwendet werden. Um bei der Verwendung der Pressverbindung an einem Abspannmast mehr Sicherheit zu bekommen, wird eine zusätzliche Formschlussverbindung nötig.

Die Forschungsarbeiten umfassten umfangreiche architektonische, statisch-konstruktive, experimentelle und numerische Untersuchungen, um die wesentlichen, die Trag- und Gebrauchsfähigkeit sowie die Gestaltung von Freileitungsmasten aus Stahl beeinflussenden Faktoren grundlegend zu erfassen und ganzheitlich optimierte Konstruktionen zu entwickeln. Im letzten Kapitel wurden wirtschaftliche Vorteile der Neuentwicklung unter Berücksichtigung von Materialeinsatz und Konstruktionsgewichten, Anschlussdetails, Fertigung und Montage abgeschätzt. Dabei wurden baubetriebliche Aspekte wie Baukosten und Bauzeit sowie die Instandhaltung im Laufe der Betriebsdauer analysiert und die neu entwickelte Konstruktion mit dem

typischen Stahlgittermast verglichen. Bei dieser Gegenüberstellung lässt sich trotz des hohen Gewichtsunterschieds keine Kostendifferenz beider Konstruktionen feststellen. Im Gegenteil wird bei der Vollwandvariante durch den hohen Anteil der Vormontage im Werk sogar ein schneller Baufortschritt gewährleistet. Zudem ist diese Konstruktion im Lebenszyklus durch die kleinere Anzahl der Elemente wartungsärmer und infolge des Fehlens von mechanischen Verbindungen dauerhafter.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der neuentwickelte Freileitungsmast als Mast der Energiewende neben der gestalterischen Eleganz statisch-konstruktive Vorteile, die bei gleichen Errichtungskosten zu schnelleren Montagezeiten und geringeren Unterhaltungsaufwendungen führen, bietet. Zusätzlich konnte durch die Mitarbeit einer Stahlbaufirma gesichert werden, dass die Fertigung und Montage auf die Belange der modernen Stahlbauindustrie abgestimmt sind.

Folgend sind weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Konstruktion im Hinblick auf die technische Ausführung der Mastmontage sinnvoll. Im Detail sind die einzelnen Verbindungspunkte ausführungsfähig auszuarbeiten. Dafür sollte unter anderem in ausgedehnteren Untersuchungen die Abhängigkeit der Tragfähigkeit der Pressverbindung von den Toleranzen vertieft werden. Auch für die statistische Auswertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Verbindung sind weitere experimentelle Untersuchungen notwendig.

Außerdem sollte die Entwicklung einer optisch und tragkonstruktiv einheitlichen Mastfamilie für die Serienfertigung anhand der erarbeiteten Forschungsergebnisse durchgeführt werden. Mit der Weiterentwicklung der Energietechnik und der Stromnetzführung wird sich ein großes Potential für Optimierungen und Weiterentwicklungen von Gittermast- und Vollwandkonstruktionen für größere Leiterspannungen und Bauhöhen ergeben.

Die oben vorgestellten Forschungen waren ein notwendiger Baustein, um zukünftig moderne, wirtschaftliche und gleichzeitig architektonisch hochwertige Freileitungsmasten in Stahl anbieten zu können und damit die Energiewende voranzutreiben. Nur so kann die notwendige Akzeptanz der Bevölkerung für den Bau neuer Freileitungstrassen erzielt werden. Nur so können verloren gegangene Marktanteile des deutschen Stahlbaus in einem zukünftig großen Marktsegment mit Entwicklungspotenzial zurückgewonnen, gestärkt und ausgebaut werden. Nur so kann es gelingen, auch in größere Dimensionen des Freileitungsmastbaus vorzustoßen, um auch langfristig den gestiegenen Anforderungen der Energietechnik gerecht werden zu können.

## **9 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen**

### ***List of publications related to the project***

Bereits veröffentlichte Dokumente:

Ungermann, Dieter; Patschin, Alena; Brune, Bettina; Mäckler, Christoph; Kaune, Michael (2015): Innovative Freileitungsmaste für die Energiewende. In: Stahlbau 84 (12), S. 998–1003.

Kemper, Frank; Schillo, Nicole; Feldmann, Markus; Ungermann, Dieter; Patschin, Alena (2017): Türme und Maste. In: Ulrike Kuhlmann (Hg.): Stahlbau Kalender 2017. Dauerhaftigkeit Ingenieurtragwerke, Bd. 2. Berlin: Wiley-VCH Verlag (Stahlbau Kalender, 19), S. 499–566.

110 Jahre DAST und 21. DAST-Forschungskolloquium an der Technischen Universität Kaiserslautern. Unter Mitarbeit von Volker Hüller, Gregor Machura und Benjamin Schöfer. Düsseldorf: Deutscher Ausschluß für Stahlbau DAST, 2018. Beitrag: Innovative Freileitungsmaste für die Energiewende, Patschin, A., TU Dortmund

Masterarbeit, Schmalz, A.: Optimierung von Stahlgittermasten für den Freileitungsbau durch den Einsatz hochfester Stähle. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2015

Bachelorarbeit, Winkelmann, D.: Typisierung von Freileitungsmasten, Beschreibung des Lastabtrags und Anforderungen an die Konstruktion der Masten. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2015

Bachelorarbeit, Clasen, S.: Modellierung und Optimierung eines Stahlgitter-Tragmastes für den Freileitungsbau. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2015

Bachelorarbeit, Edler, M.: Analyse und Optimierung eines Freileitungsmastes unter verschiedenen klimatischen Aspekten. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2015

Masterarbeit, Kina, S.: Entwurf und Optimierung von Vollwandmasten für den Freileitungsbau in Stahl-GFK Hybridbauweise. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2015

Masterarbeit, Goschko, J.: Konstruktive Durchbildung eines Knotenpunktes für einen innovativ gestalteten Freileitungsmast unter numerischer Betrachtung. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2017

Bachelorarbeit, Bender, I.: Untersuchungen zum Fügeprozess einer Stahlrohr-Pressverbindung. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2018

Masterarbeit, Fernando, T.: FE-Analyse einer Stahlrohr-Pressverbindung unter Biegebelastung. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau. Dortmund, 2018

## 10 Ergebnistransfer in die Wirtschaft *Transfer to economy*

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss PbA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PbA ausführlich diskutiert.	<b>A1</b> 1. PbA-Sitzung in Dortmund	16.04.2015
	<b>A2</b> 2. PbA-Sitzung in Düsseldorf	28.10.2015
	<b>A3</b> 3. PbA-Sitzung in Linz	14.04.2016
	<b>A4</b> 4. PbA-Sitzung in Dortmund	01.12.2016
	<b>A5</b> 5. PbA-Sitzung in Dortmund	30.05.2017
	<b>A6</b> 6. PbA-Sitzung in Dortmund	05.12.2017
	<b>A7</b> 7. PbA-Sitzung in Dortmund	05.09.2018

Maßnahme B: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	<b>B1:</b> Veröffentlichung in „Stahlbau“	12.2015
	<b>B2:</b> Veröffentlichung im „Stahlbau Kalender 2017“	2017
	<b>B3:</b> Veröffentlichung im Tagungsband vom 21. DAST-Forschungskolloquium	März 2018

Maßnahme C: Publikation der Ergebnisse auf Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	<b>C1:</b> Vorstellung des Themas auf der FOSTA Fachtagung	18.11.2015
	<b>C2:</b> Vorstellung des Themas beim 21. DAST-Forschungskolloquium	06.03.2018

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	<b>D1</b> Präsentation des Forschungsthemas auf der Homepage des Lehrstuhls Stahlbau	seit Januar 2015
---	--	------------------

Maßnahme E: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die TU Dortmund bildet Bauingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Bachelor- und Masterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	<b>E1:</b> Übernahme in die akademische Lehre (Vorlesungen) - Forschung und Entwicklung (F&E) im Stahlbau	WS 16
	<b>E2:</b> Masterarbeit: - „Optimierung von Stahlgittermasten für den Freileitungsbau durch den Einsatz hochfester Stähle“	März 2015
	<b>E3:</b> Bachelorarbeit: - „Modellierung und Optimierung eines Stahlgitter-Tragmastes für den Freileitungsbau	März 2015
	<b>E4:</b> Bachelorarbeit: - „Typisierung von Freileitungsmasten, Beschreibung des Lastabtrags und Anforderungen an die Konstruktion der Masten“	Juni 15
	<b>E5:</b> Bachelorarbeit: - „Analyse und Optimierung eines Freileitungsmastes unter verschiedenen klimatischen Aspekten“	Juli 2015
	<b>E6:</b> Masterarbeit: - „Entwurf und Optimierung von Vollwandmasten für den Freileitungsbau in Stahl-GFK Hybridbauweise	November 2015

	<p><b>E7:</b> Masterarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Konstruktive Durchbildung eines Knotenpunktes für einen innovativ gestalteten Freileitungsmast unter numerischer Betrachtung“</li> </ul> <p><b>E8:</b> Bachelorarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Untersuchungen zum Fügeprozess einer Stahlrohr–Pressverbindung“</li> </ul> <p><b>E9:</b> Masterarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „FE-Analyse einer Stahlrohr-Pressverbindung unter Biegebelastung“</li> </ul>	<p>März 2017</p> <p>März 2018</p> <p>Juli 2018</p>
--	---	--

Maßnahmen (F) Nutzung und Industrialisierung der Projektergebnisse

<p>Bereitstellung der Ergebnisse an die Industriepartner, die die Ergebnisse zur Verbesserung Ihrer Produkte nutzen können</p>	<p><b>F1</b> Weitergabe der Ergebnisse im Rahmen von PbA Treffen</p>	<p>seit Jan. 15</p>
--	--	---------------------

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss PbA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PbA ausführlich diskutiert.	<b>A8</b> 8. PbA-Sitzung in Dortmund	15.05.2019
	<b>A9</b> 9. PbA-Sitzung in Dortmund	03.09.2019

Maßnahme E: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die TU Dortmund bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Bachelor- und Masterarbeiten im Verlauf des Projekts erstellt.	<b>E10</b> Dissertation zum Thema Pressverbindung	Nach 2019
--	---	-----------

## **11 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts** ***Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept***

In Hinblick auf die Vielzahl der neu zu errichtenden Stromtrassen und Freileitungsmasten wird die Umsetzung der neuartigen Turmmastkonstruktion in Serienfertigung mit deutlichen Vorteilen in Materialeinsatz einerseits sowie Gestalt, Ästhetik und der Lebensdauerbetrachtung andererseits seitens der Netzbetreiber und der Stahlbauindustrie als machbar und wünschenswert eingestuft.

Durch den Einsatz von modernen, aber bewährten Feinkornbaustählen sowie der Übertragung wesentlicher Prinzipien aus dem Maschinenbau als auch des Einsatzes moderner, aber nicht gänzlich neuer Fertigungsverfahren, ergeben sich in diesen Bereichen mit höchster Wahrscheinlichkeit keine wesentlichen Neuerungen in der Stahlbauweise und ihrer Herstellung und Ausführung. Die modernen Verfahren und Prinzipien werden für den Freileitungsbau nunmehr sinnvoll angepasst und in neue Freileitungskonstruktionen aus Stahl umgesetzt. Daher steht einer direkten industriellen Umsetzung aus technischer Sicht nichts im Wege.

Zudem sind aufgrund der architektonisch ansprechenden Planungs- und Konstruktionslösungen, die im Forschungsvorhaben erarbeitet wurden, zusätzliche Weiterentwicklungspotentiale im Freileitungsmastbau zu erwarten. Dies unterstützt die Zielsetzung des Bundes, auch zukünftig den Netzausbau im Sinne einer moderneren Energietechnik, akzeptiert von der Bevölkerung in Deutschland, vorantreiben zu können.

Die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. sichert die breite Veröffentlichung der Forschungsergebnisse. Die FOSTA wird in Verbindung mit dem Lehrstuhl Stahlbau die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes den technischen Gremien des Stahlbaus zugänglich machen.

Es sind Publikationen in den einschlägigen Architekturzeitschriften, sowie darüberhinausgehende in einer deutschen überregionalen Abonnement-Tageszeitung „Frankfurter Allgemeine Zeitung“ und Internetpublikationen der FOSTA vorgesehen, um die Stahlbau-Praxis und die Netzbetreiber über die Vorzüge der neuen Bauart von Freileitungsmasten und deren Nachhaltigkeit zu informieren.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economic

---

**12 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten**  
***Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry***

Die durchgeführten Forschungsarbeiten liefern konkrete System-Lösungen für neue Freileitungsmasten aus Stahl mit Rundrohrquerschnitt inklusive der Anschluss-Konstruktionen für Verbindungen, die für übliche Stahlbau-Unternehmen interessant sein dürften. Die Forschungsergebnisse sind ausführlich dokumentiert und dienen als Planungshilfe für individuelle, firmenspezifische, optimierte Konzepte. So werden Entwicklungszeiten verkürzt und die Kosten der KMU im Bereich Stahlbau gesenkt.

Zudem wird die tragkonstruktive Planung und Bemessung von Stahlbaustrukturen in Deutschland in der Regel von spezialisierten Ingenieur- oder Planungsbüros, ebenfalls fast ausnahmslos KMU, ausgeführt. Die Forschungsergebnisse liefern damit auch den planenden KMU nunmehr die notwendige Grundlage, um im Sinne der Stahlbauer die neuartigen, zukunftsfähigen Freileitungsmasttürme zu entwerfen und zu dimensionieren. Diese mögliche Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der nationalen KMU gilt auch bei den aktuellen, (inter)nationalen Großbauvorhaben von Stromtrassen, die maßgeblich von den Netzbetreibern initiiert und federführend projektiert werden. Denn durch die im Baugewerbe allgemein übliche Verkettung von Hauptauftragnehmern mit Unterauftragnehmern werden KMU von den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens profitieren, auch wenn die Netzbetreiber und die Stahlproduzenten selbst sicherlich nicht den KMU zuzuordnen sind.

In der Summe ergibt sich neben dem offensichtlich großen wirtschaftlichen Vorteil für alle am Stromtrassenbau beteiligten Firmen insbesondere ein immenser ganzheitlicher Nutzen, weil die erforderliche Energiewende in Deutschland schneller vorangetrieben und umgesetzt werden kann.

### 13 Literaturverzeichnis *Bibliography*

- [1] © *GeoBasis-DE / BKG 2018*, © *Übertragungsnetzbetreiber*: Stand der Vorhaben aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) und dem Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) nach dem zweiten Quartal 2018: Bundesnetzagentur, 30.06.2018.
- [2] *50Hertz, Giftge Consult GmbH*: Technische Besonderheiten einer realen Trasse mit Freileitung und Kabel am Beispiel SuedOstLink.
- [3] *Alexrk2*: Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-3.0-de: URL: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- [4] Badische Zeitung, Kreis Lörrach 01.07.2010.
- [5] Bestätigung des Netzentwicklungsplans: Strom für die Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom für das Zieljahr 2030, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Dezember 2017.
- [6] Bewertungstabelle OECOS GmbH.
- [7] *Bin im Garten*: Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-3.0-de.
- [8] *Bürgerinitiative Garbsen*: Garbsen gegen Suedlink.
- [9] *DYWIDAG-Systems International GmbH*: DYWIDAG Geotechnische Systeme. <https://www.dywidag-systems.de/fileadmin/downloads/dywidag-systems.de/dsi-dywidag-geotechnische-systeme-de.pdf>.
- [10] *Francis McLloyd*: Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-3.0-de: URL: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- [11] *kainet/Germán*: Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-2.0-de. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>.
- [12] *Kießling, F., Nefzger, P., Kaintzyk, U.*: Freileitungen – Planung, Berechnung, Ausführung.: Springer Verlag, 2001.
- [13] *Kießling, F., Wichura, B.*: Eislasten an Freileitungen, meteorologische Vorhersagen und Beobachtungen an Leitungen. *Elektrizitätswirtschaft* 108. S. 54–60.
- [14] *Kollmann, F. G.*: Welle-Nabe-Verbindungen: Gestaltung, Auslegung, Auswahl. Berlin: Springer, 1984.
- [15] *Kreuzschnabel*: Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-3.0-de. <https://de.wikipedia.org/wiki/Winkeltragmast#/media/Datei:Tragmast-Eckmast.jpg>.
- [16] Leitfaden zur Bundesfachplanung nach §4ff. des Netzausbaubeschleunigungsgesetzes: Übertragungsnetz (NABEG), Bundesnetzagentur, 2012.

- [17] *Mannesmannröhren-Werke AG, K.-H. Breusing, B. S.:* Herstellverfahren für Stahlrohre.
- [18] NTP Products AS from Wikimedia Commons.
- [19] *TenneT TSO GmbH:* Freileitungen im Bau: Der Bauablauf einer Freileitung in wenigen Schritten erklärt.
- [20] *Winkelmann, D.:* Bachelorarbeit: Typisierung von Freileitungsmasten, Beschreibung des Lastabtrags und Anforderungen an die Konstruktion der Masten. TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2015.
- [21] *XXIV. FEM-Kongreß (Hg.):* Profilierte Pressverbindungen ohne Spannungsspitzen., Baden-Baden, 1997.
- [22] DIN 4020: 2010-12, Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke - Ergänzende Regelungen zu DIN\_EN\_1997-2. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [23] DIN 7190-1: 2017-02: Pressverbände - Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [24] DIN 7190-2: 2017-02: Pressverbände – Teil 2: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für kegelige, selbsthemmende Pressverbände. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [25] DIN EN 1991-1-4: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten: Beuth Verlag. Ausgabe Dezember 2010.
- [26] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode\_2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil\_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [27] DIN EN 1992-1-1: 2011-01, Eurocode\_2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil\_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1992-1-1:2004\_+ AC:2010. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [28] DIN EN 1993-3-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 3-1: Türme, Maste und Schornsteine – Türme und Maste: Beuth Verlag. Ausgabe Dezember 2010.
- [29] DIN EN 1997-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik: Beuth Verlag. Ausgabe März 2014.
- [30] DIN EN 50182: 2001-12, Leiter für Freileitungen - Leiter aus konzentrisch verseilten runden Drähten; Deutsche Fassung EN\_50182:2001. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [31] DIN EN 50341-1: Freileitungen über AC 45 kV - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und gemeinsame Festlegungen: Beuth Verlag. Ausgabe April 2010.
- [32] DIN EN 50341-2-4: Freileitungen über AC 1 kV – Teil 2-4: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für Deutschland (basierend auf EN 50341-1:2012): Beuth Verlag. Ausgabe April 2016.

- [33] DIN EN ISO 286-1: 2010-11: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Toleranzsystem Für Längenmaße - Teil 1- Grundlagen Für Toleranzen, Abmaße und Passungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [34] ANSYS Workbench 18.2: CADFEM GmbH.
- [35] RSTAB. *Dlubal Software GmbH*, 2015.
- [36] RSTAB. *Dlubal Software GmbH*, 2017.
- [37] FMS. *GA Hochspannung-Leitungsbau*, 2015.
- [38] InfoGraph: Software für die Tragwerksplanung: InfoGraph GmbH, 2015.
- [39] Inventor®: 3D-CAD-Modellierungssoftware: Autodesk.

## **14 Danksagung** ***Acknowledgement***

Die Lehrstühle Stahlbau und Städtebau der TU Dortmund bedanken sich bei den Mitgliedern des Arbeitskreises für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen zu diesem Vorhaben. Insbesondere gilt der Dank folgenden Firmen:

ArcelorMittal Global R&D, Zelzate  
ENS Architekten BDA, Berlin  
Fachverband Mobilfunktechnik e.V., Düsseldorf  
KINA Ingenieure, Bochum  
IHT Ingenieur-, Hoch- und Tiefbau GmbH, Bochum  
J.J.Brühl Stahlbau GmbH & Co. KG, Koblenz  
Poetsch GmbH CNC Dreh- und Fräsbearbeitung  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg  
Schulz und Schulz Architekten GmbH, Leipzig  
Stahlbau Raulf GmbH, Duisburg  
ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg  
Vallourec Deutschland GmbH, Düsseldorf  
voestalpine Grobblech GmbH, Linz

## 15 Anhang A Appendix A

Tabelle 15-1: Eingabemaske für Optimierung der Gittermastkonstruktion  
Table 15-1: Input mask for the optimization of the grid structured tower construction

Parameter zur Mast-Implementierung	$\alpha$ -Version	
<b>Mastgeometrie</b>		
	Zielmast	Referenzmast
(Maximal-)Gesamthöhe [m]	<input type="text" value="52,70"/>	41,75 <i>ohne ES-Stütze</i>
<small>Anm.: volle Implementierung nur bis H=52,70</small>		
Grundfläche oben - Länge A [m]	<input type="text" value="1,20"/>	1,80
- Breite B [m]	<input type="text" value="1,20"/>	1,80
Konizität K - Schuss 1 [cm/m]	<input type="text" value="5,86"/>	6,62
- Schuss 2 [cm/m]	<input type="text" value="7,61"/>	6,84
- Schuss 3 [cm/m]	<input type="text" value="9,90"/>	6,82
- Schuss 4 [cm/m]	<input type="text" value="12,87"/>	6,54
Höhenzunahme/Zusatzmodul Hf [cm/N]	<input type="text" value="10,00"/>	10,0
Höhe Erdseillager (Seilpunkt 1) [m]	<input type="text" value="8,00"/>	8,00/5,00
Typ Erdseillager (1: Stütze; 2: Horn)	<input type="text" value="1"/>	1/2
<i>falls 2, Auskragung</i>	<input type="text" value="7,00"/>	7,00
Abstand z. Nullpunkt - Seilpunkte 2/3 [m]	<input type="text" value="10,75"/>	10,75
- Seilpunkte 5/6 [m]	<input type="text" value="8,00"/>	8,00
- Seilpunkte 4/7 [m]	<input type="text" value="14,50"/>	14,50
<b>Trasseneigenschaften</b>		
Masttyp	<input type="text" value="Tragmast"/>	Tragmast
Seilwinkel [°]	<input type="text" value="180,0"/>	180,0
Spannweiten - L1 [m]	<input type="text" value="400,0"/>	variabel
- L2 [m] ( $\geq L1$ )	<input type="text" value="450,0"/>	"
Windspannweite [m]	<input type="text" value="425,0"/>	"
ideelle Spannweite	<input type="text" value="427,2"/>	"
Leiter:		
- Anzahl Teilleiter (Seilplätze 2-7)	<input type="text" value="4"/>	4
- Durchmesser [mm]	<input type="text" value="22,4"/>	22,4
- Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="297,7"/>	297,7
- Referenz-Seilzugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="52,0"/>	52,0
- Eigengewicht [kg/m]	<input type="text" value="0,994"/>	0,994
- Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="74000"/>	74000
- Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K]	<input type="text" value="1,96E-05"/>	1,96E-05
<small>264-AL1/34-ST1A</small>		
Erdseil:		
- Durchmesser [mm]	<input type="text" value="21,0"/>	21,0
- Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="260,8"/>	260,8
- Referenz-Seilzugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="52,0"/>	52,0
- Eigengewicht [kg/m]	<input type="text" value="0,871"/>	0,871
- Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="74000"/>	74000
- Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K]	<input type="text" value="1,96E-05"/>	1,96E-05
<small>231-AL1/30-ST1A</small>		
Isolatoren:		
- Länge [m]	<input type="text" value="5,00"/>	5,00
- Eigengewicht [kg/m]	<input type="text" value="60,0"/>	60,0
- windbeanspruchte Fläche [m <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="1,4"/>	1,4
<b>Umwelteigenschaften</b>		
Windzone	<input type="text" value="2"/>	2
Eislastzone	<input type="text" value="1"/>	1
Temperatur [°C]	<input type="text" value="-5,0"/>	variabel
<input type="checkbox"/> = Eingabefeld <input type="checkbox"/> = Rechenfeld <input checked="" type="checkbox"/> = nicht implementiert		

Anhang A  
Appendix A

Tabelle 15-2: Vergleich der Optimierung in S355J2 mit dem Programmvorschlag  
Table 15-2: Comparison of the optimization in S355J2 and the program proposal

Optimierung	S355				Vorschlag	Programm	S355		
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S355)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L70*8 (S355)	3	2	M24 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*8 (S355)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S355)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S355)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S355)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S355)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L100*10 (S355)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L150*12 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S355)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L150*15 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*15 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L150*18 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L150*18 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L150*18 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L150*18 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L180*17 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*18 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L180*19 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L180*18 (S355)	6	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L180*19 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L180*18 (S355)	6	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*20 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*20 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L180*19 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L180*19 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*20 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*20 (S355)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*20 (S355)	5	2	M30 -5.6

Tabelle 15-3: Vergleich der Optimierung in S355J2 mit dem Grundtyp derselben Stahlgüte  
Table 15-3: Comparison of the optimization in S355J2 and the base type of the same grade of steel

Optimierung	S355				Grundtyp	S355			
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L70*7 (S355)	4	1	M16 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L110*12 (S355)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L180*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L180*18 (S355)	8	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L200*20 (S355)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L200*20 (S355)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L200*20 (S355)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L180*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L200*20 (S355)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L200*22 (S355)	10	2	M27 -5.6

Anhang A  
Appendix A

Tabelle 15-4: Vergleich der Optimierung in S460M mit dem Programmvorschlag  
Table 15-4: Comparison of the optimization in S460M and the program proposal

Optminierung	S460				Vorschlag	Programm	S460		
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L65*6 (S460)	3	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S460)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S460)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S460)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L90*9 (S460)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L120*12 (S460)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L150*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L150*15 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L180*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L180*15 (S460)	6	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S460)	6	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L160*15 (S460)	6	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L180*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L180*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*18 (S460)	5	2	M30 -5.6

Tabelle 15-5: Vergleich der Optimierung in S355J2 mit der Optimierung in S460M  
Table 15-5: Comparison of the optimization in S355J2 and the optimization in S460M

Optminierung	S355				Optimierung	S460			
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L65*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L65*6 (S460)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6

Anhang A  
Appendix A

Tabelle 15-6: Vergleich der Optimierung in S690M mit dem Programmvorschlag  
Table 15-6: Comparison of the optimization in S690M and the program proposal

Optimierung	S690				Vorschlag	Programm	S690		
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	1	1	M20 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L85*6 (S690)	2	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L80*10 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L80*10 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L80*10 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L80*10 (S690)	2	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L110*12 (S690)	3	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L110*12 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L110*12 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*13 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L140*15 (S690)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L140*15 (S690)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L140*15 (S690)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L140*15 (S690)	5	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6
Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L140*15 (S690)	4	2	M30 -5.6

Tabelle 15-7: Vergleich der Optimierung in S355J2 mit der Optimierung in S690M  
Table 15-7: Comparison of the optimization in S355J2 and the optimization in S690M

Optimierung	S355				Optimierung	S690			
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S355)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S355)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L160*15 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*17 (S355)	8	2	M24 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L180*18 (S355)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6

Anhang A  
Appendix A

Tabelle 15-8: Vergleich der Optimierung in S460M mit der Optimierung S690M  
Table 15-8: Comparison of the optimization in S460M and the optimization in S690M

Optimierung	S460				Optimierung	S690			
Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube	Stab	Profil	N-Sch	N-S	Schraube
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel ES	L85*6 (S460)	2	1	M16 -5.6	Eckstiel ES	L85*6 (S690)	2	1	M16 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S1	L100*10 (S460)	6	2	M20 -5.6	Eckstiel S1	L90*9 (S690)	4	2	M20 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S2	L140*15 (S460)	6	2	M24 -5.6	Eckstiel S2	L140*13 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S3	L160*15 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S3	L140*15 (S690)	6	2	M24 -5.6
Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S4	L160*17 (S460)	6	2	M27 -5.6	Eckstiel S4	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S5	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S5	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6
Eckstiel S6	L160*17 (S460)	8	2	M27 -5.6	Eckstiel S6	L150*15 (S690)	6	2	M27 -5.6







## 16 Anhang B Appendix B

Tabelle 16-1: Zusammenstellung der Lastfälle  
Table 16-1: Compilation of load cases

Lastfälle
LF 1: Eigengewicht - Maststruktur
LF 2: Eigengewicht – Leiterkabel 300m
LF 3: Eigengewicht – Leiterkabel 300m – halbe Belegung
LF 4: Eigengewicht – Leiterkabel 500m
LF 5: Eigengewicht – Leiterkabel 500m – halbe Belegung
LF 6: Windlast – 0° – Maststruktur
LF 7: Windlast – 45° – Maststruktur
LF 8: Windlast – 90° – Maststruktur
LF 9: Windlast – 0° – Leiter 300m
LF 10: Windlast – 0° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 11: Windlast – 0° – Leiter 500m
LF 12: Windlast – 0° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 13: Windlast – 45° – Leiter 300m
LF 14: Windlast – 45° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 15: Windlast – 45° – Leiter 500m
LF 16: Windlast – 45° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 17: Windlast – 90° – Leiter 300m
LF 18: Windlast – 90° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 19: Windlast – 90° – Leiter 500m
LF 20: Windlast – 90° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 21: Eislasten – Leiter 300m
LF 22: Eislasten – Leiter 500m
LF 23: Eislasten – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 24: Eislasten – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 25: Wind-/Eislast-Kombination 0° – Leiter 300m
LF 26: Wind-/Eislast-Kombination 0° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 27: Wind-/Eislast-Kombination 0° – Leiter 500m
LF 28: Wind-/Eislast-Kombination 0° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 29: Wind-/Eislast-Kombination 45° – Leiter 300m
LF 30: Wind-/Eislast-Kombination 45° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 31: Wind-/Eislast-Kombination 45° – Leiter 500m
LF 32: Wind-/Eislast-Kombination 45° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 33: Wind-/Eislast-Kombination 90° – Leiter 300m
LF 34: Wind-/Eislast-Kombination 90° – Leiter 300m – halbe Belegung
LF 35: Wind-/Eislast-Kombination 90° – Leiter 500m
LF 36: Wind-/Eislast-Kombination 90° – Leiter 500m – halbe Belegung
LF 37: Eisabwurf – Torsion – 300m – Traverse 1
LF 38: Eisabwurf – Torsion – 300m – Traverse 2
LF 39: Eisabwurf – Torsion – 500m – Traverse 1
LF 40: Eisabwurf – Torsion – 500m – Traverse 2
LF 41: Eisabwurf – Biegung – 300m
LF 42: Eisabwurf – Biegung – 500m
LF 43: Isolatorkettenriss – T1 – 300m
LF 43: Isolatorkettenriss – T2.1 – 300m
LF 43: Isolatorkettenriss – T2.2 – 300m
LF 43: Isolatorkettenriss – T1 – 500m
LF 43: Isolatorkettenriss – T2.1 – 500m
LF 43: Isolatorkettenriss – T2.2 – 500m

Tabelle 16-2: Zusammenstellung der Lastkombinationen  
Table 16-2: Compilation of load combinations

Lastkombination	Variationen	Kombinationsbeiwert	Lastfälle
Lastkombination A	Ständige Lasten und Wind 0°	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Wind 0° - Maststruktur
		1,35	Wind 0° - Leiterkabel
Lastkombination B	Ständige Lasten und Wind 90° - 300m	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Wind 90° - Maststruktur
		1,35	Wind 90° - Leiterkabel
Lastkombination C	Ständige Lasten und Wind 45° - 300m	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Wind 90° - Maststruktur
		1,35	Wind 90° - Leiterkabel
Lastkombination D	Ständ. Lasten, Eislasten und Windlasten 0° abgemindert	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Eislasten - Leiterkabel
		0,65	Wind 0° - Maststruktur
		0,65	Wind 0° - Leiterkabel
Lastkombination E	Ständ. Lasten, Eislasten und Windlasten 90° abgemindert	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Eislasten - Leiterkabel
		0,65	Wind 90° - Maststruktur
		0,65	Wind 90° - Leiterkabel
Lastkombination F	Ständ. Lasten, Eislasten und Windlasten 45° abgemindert	1,35	Eigengewicht - Maststruktur
		1,35	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,35	Eislasten - Leiterkabel
		0,65	Wind 45° - Maststruktur
		0,65	Wind 45° - Leiterkabel
Lastkombination G	<i>Vernachlässigt da keine Hochzüge berücksichtigt</i>		
Lastkombination H	<i>Vernachlässigt da nur bei Abspannmasten notwendig</i>		
Lastkombination I	<i>Vernachlässigt da Rechenaufwand sehr hoch</i>		
Lastkombination J	Ständ. Lasten, Eislasten und einseitiger Eisabwurf am Einzelleiter	1,00	Eigengewicht - Maststruktur
		1,00	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,00	Eislasten - Leiterkabel
		1,00	Eisabwurf - Torsion
Lastkombination K	Ständ. Lasten, Eislasten und einseitiger Eisabwurf	1,00	Eigengewicht - Maststruktur
		1,00	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,00	Eislasten - Leiterkabel
		1,00	Eisabwurf - Biegung
Lastkombination L	Ständ. Lasten, Eislasten und Lasten aus Isolatorversagen	1,00	Eigengewicht - Maststruktur
		1,00	Eigengewicht - Leiterkabel
		1,00	Eislasten - Leiterkabel
		1,00	Isolatorversagen

Anhang B  
Appendix B

Tabelle 16-3: Bemessungssituation A: Windlasten aus Beseilung mit Eislast Windzone 4, Eiszone 2  
Table 16-3: Design situation A: Wind loads from roping with ice load, wind zone 4, ice zone 2

Seilpunkt	Windrichtung $\varphi$ [°]	Spannweite L [m]	Einzelleiterlast [kN]	Anzahl der Einzelleiter	Gesamtlast $Q_{Wcx}$ [kN]
Erdseilstütze	0	300	7,046	1	7,046
	0	500	10,298	1	10,298
	45	300	3,523	1	3,523
	45	500	5,149	1	5,149
	90	300	0,000	1	0,000
	90	500	0,000	1	0,000
Traverse 1	0	300	6,683	4	26,732
	0	500	9,768	4	39,072
	45	300	3,342	4	13,366
	45	500	4,884	4	19,536
	90	300	0,000	4	0,000
	90	500	0,000	4	0,000
Traverse 2	0	300	5,991	4	23,964
	0	500	8,757	4	35,028
	45	300	2,996	4	11,982
	45	500	4,379	4	17,514
	90	300	0,000	4	0,000
	90	500	0,000	4	0,000

Tabelle 16-4 : Bemessungssituation B: Windlasten aus Beseilung mit Eislast Windzone 1, Eiszone 2  
Table 16-4: Design situation B: Wind loads from roping with ice load, wind zone 1, ice zone 2

Seilpunkt	Windrichtung $\varphi$ [°]	Spannweite L [m]	Einzelleiterlast [kN]	Anzahl der Einzelleiter	Gesamtlast $Q_{Wcx}$ [kN]
Erdseilstütze	0	300	5,032	1	5,032
	0	500	7,355	1	7,355
	45	300	2,516	1	2,516
	45	500	3,678	1	3,678
	90	300	0,000	1	0,000
	90	500	0,000	1	0,000
Traverse 1	0	300	4,774	4	19,096
	0	500	6,977	4	27,908
	45	300	2,387	4	9,548
	45	500	3,489	4	13,954
	90	300	0,000	4	0,000
	90	500	0,000	4	0,000
Traverse 2	0	300	4,280	4	17,120
	0	500	6,256	4	25,024
	45	300	2,140	4	8,560
	45	500	3,128	4	12,512
	90	300	0,000	4	0,000
	90	500	0,000	4	0,000

Tabelle 16-5: Bemessungssituation C: Windlasten aus Beseilung mit Eislast Windzone 2, Eiszone 4  
Table 16-5: Design situation C: Wind loads from roping with ice load, wind zone 2, ice zone 4

Seilpunkt	Windrichtung $\varphi$ [°]	Spannweite L [m]	Einzelleiterlast [kN]	Anzahl der Einzelleiter	Gesamtlast $Q_{Wcx}$ [kN]
Erdseilstütze	0	300	8,366	1	<b>8,366</b>
	0	500	12,227	1	<b>12,227</b>
	45	300	4,183	1	<b>4,183</b>
	45	500	6,114	1	<b>6,114</b>
	90	300	0,000	1	<b>0,000</b>
	90	500	0,000	1	<b>0,000</b>
Traverse 1	0	300	7,883	4	<b>31,532</b>
	0	500	11,521	4	<b>46,084</b>
	45	300	3,942	4	<b>15,766</b>
	45	500	5,761	4	<b>23,042</b>
	90	300	0,000	4	<b>0,000</b>
	90	500	0,000	4	<b>0,000</b>
Traverse 2	0	300	7,064	4	<b>28,256</b>
	0	500	10,324	4	<b>41,296</b>
	45	300	3,532	4	<b>14,128</b>
	45	500	5,162	4	<b>20,648</b>
	90	300	0,000	4	<b>0,000</b>
	90	500	0,000	4	<b>0,000</b>

Tabelle 16-6: Leiterzugkräfte aus Gewichtskräften  
Table 16-6: Conductor tensile forces from weight forces

Seilpunkt	Spannweite L [m]	Lastart	Einzelleiterlast [kN]	Anzahl der Einzelleiter	Gesamtlast [kN]
Erdseilstütze	300	Eigengewicht	2,348	1	<b>2,348</b>
	500	Eigengewicht	3,912	1	<b>3,912</b>
	300	Eislast EZ 2	4,172	1	<b>4,172</b>
	500	Eislast EZ 2	6,952	1	<b>6,952</b>
	300	Eislast EZ 4	8,340	1	<b>8,340</b>
	500	Eislast EZ 4	13,900	1	<b>13,900</b>
Traversen	300	Eigengewicht	2,994	4	<b>11,976</b>
	500	Eigengewicht	4,990	4	<b>19,960</b>
	300	Eislast EZ 2	4,344	4	<b>17,376</b>
	500	Eislast EZ 2	7,420	4	<b>29,680</b>
	300	Eislast EZ 4	8,688	4	<b>34,752</b>
	500	Eislast EZ 4	14,480	4	<b>57,920</b>

Tabelle 16-7: Resultierende Leiterzugkräfte für den Lastfall J  
Table 16-7: Resulting conductor tensile forces for load case J

Seilpunkt	Variation	Temperatur Last [kN]	Eigengewicht [kN]	Eislast [kN]	Abminderung Lastfall J	Lastfall J Gesamtlast [kN]
Erdseilstütze	EZ 2, 300m	1,547	2,348	4,172	65%	<b>5,244</b>
	EZ 2, 500m	1,547	3,912	6,952	65%	<b>8,067</b>
	EZ 4, 300m	1,547	2,348	8,340	65%	<b>7,953</b>
	EZ 4, 500m	1,547	3,912	13,900	65%	<b>12,583</b>
Traversen	EZ 2, 300m	25,916	11,976	17,376	35%	<b>19,344</b>
	EZ 2, 500m	25,916	19,960	29,680	35%	<b>26,445</b>
	EZ 4, 300m	25,916	11,976	34,752	35%	<b>25,425</b>
	EZ 4, 500m	25,916	19,960	57,920	35%	<b>36,329</b>

Tabelle 16-8: Resultierende Leiterzugkräfte für den Lastfall K  
Table 16-8: Resulting conductor tensile forces for load case K

Seilpunkt	Variation	Temperatur Last [kN]	Eigengewicht [kN]	Eislast [kN]	Abminderung Lastfall J	Lastfall K Gesamtlast [kN]
Erdseilstütze	EZ 2, 300m	1,547	2,348	4,172	40%	<b>3,227</b>
	EZ 2, 500m	1,547	3,912	6,952	40%	<b>4,964</b>
	EZ 4, 300m	1,547	2,348	8,340	40%	<b>4,894</b>
	EZ 4, 500m	1,547	3,912	13,900	40%	<b>7,744</b>
Traversen	EZ 2, 300m	25,916	11,976	17,376	20%	<b>11,054</b>
	EZ 2, 500m	25,916	19,960	29,680	20%	<b>15,111</b>
	EZ 4, 300m	25,916	11,976	34,752	20%	<b>14,529</b>
	EZ 4, 500m	25,916	19,960	57,920	20%	<b>20,759</b>

# 16.1 Anhang B1

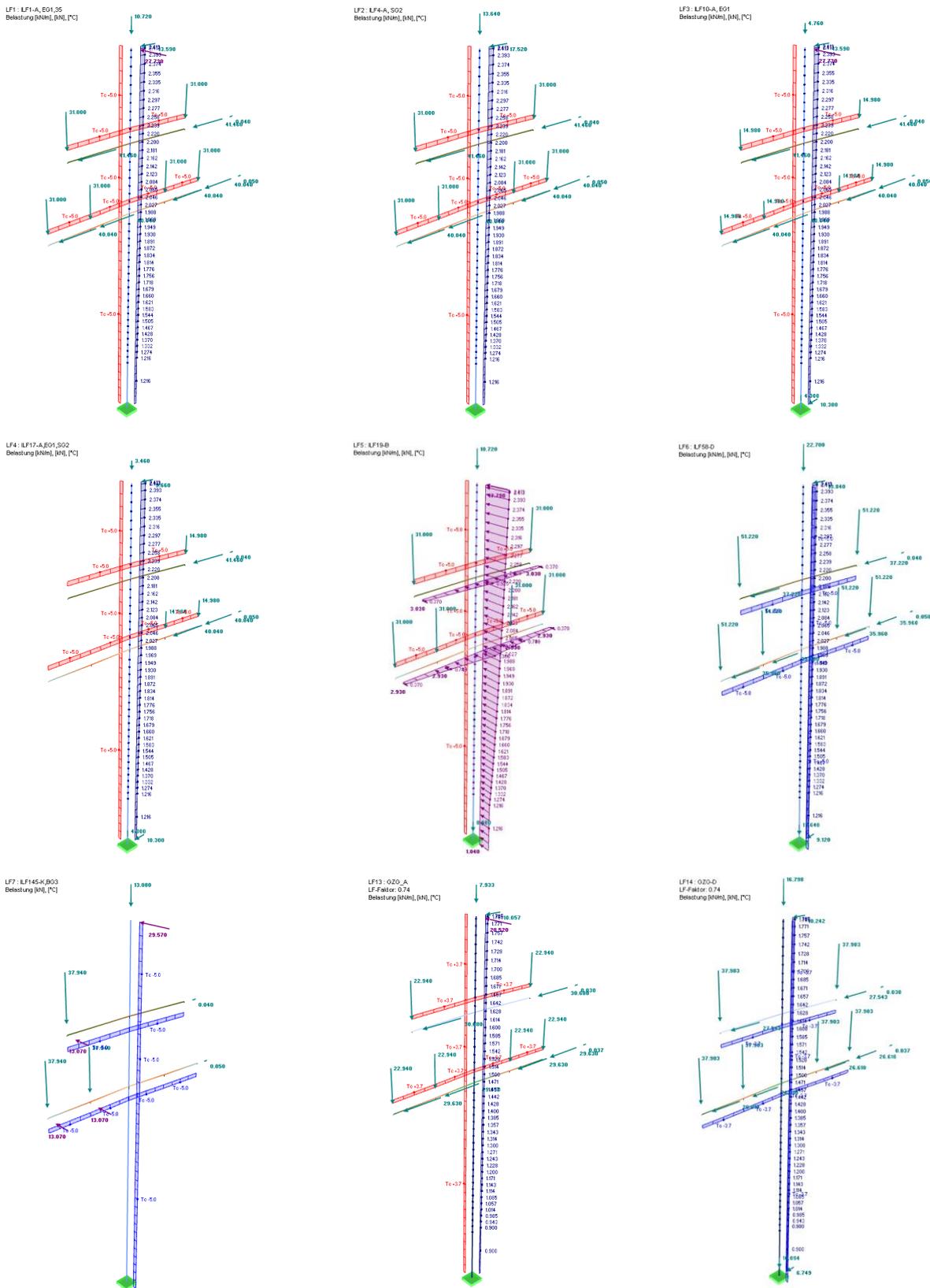
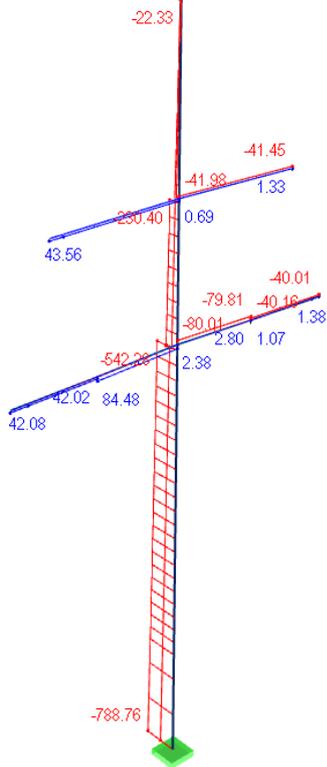


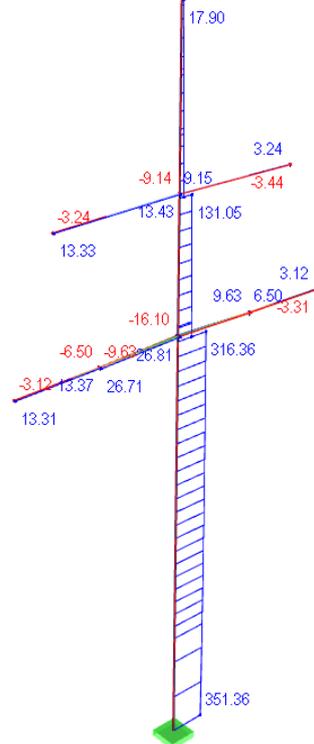
Abbildung 16-1: Variante 1, maßgebende Lastkombinationen  
Figure 16-1: Variant 1, decisive load combination

# Anhang B Appendix B

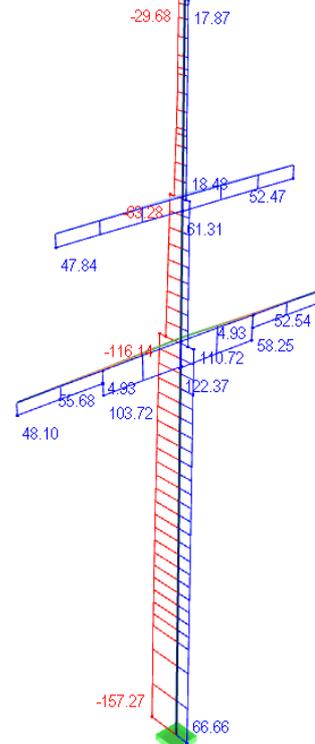
Schnittgrößen N [kN]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



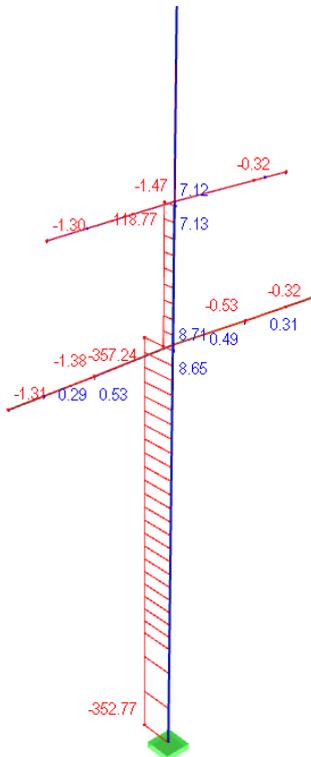
Schnittgrößen V-y [kN]  
Lagerreaktionen [kN], [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



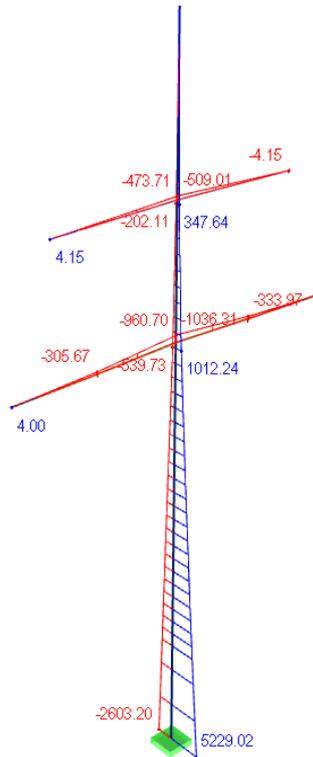
Schnittgrößen V-z [kN]  
Lagerreaktionen [kN], [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-T [kNm]  
Lagerreaktionen [kN], [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-y [kNm]  
Lagerreaktionen [kN], [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-z [kNm]  
Lagerreaktionen [kN], [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit

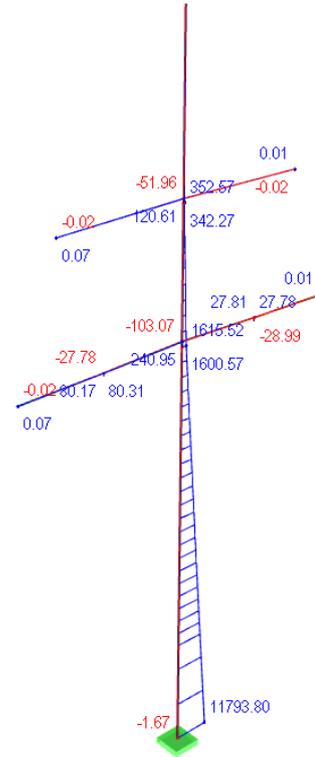


Abbildung 16-2: Variante 1: Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit  
Figure 16-2: Variant 1: Internal forces in ultimate limit state

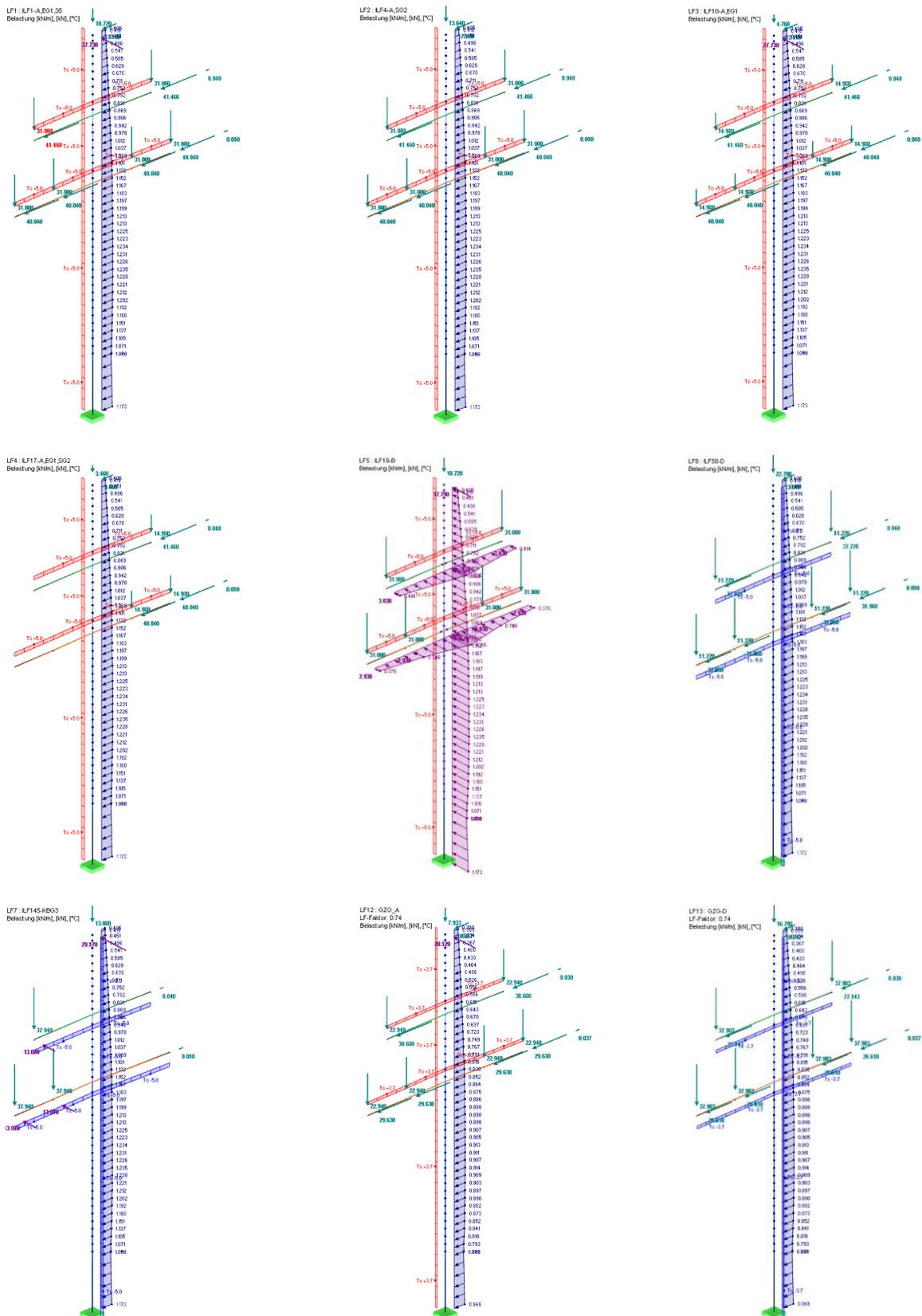
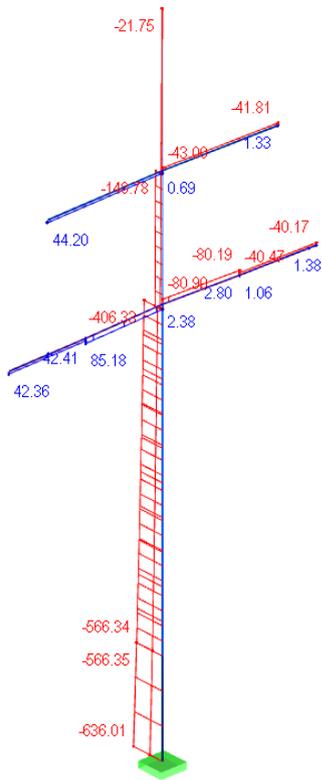


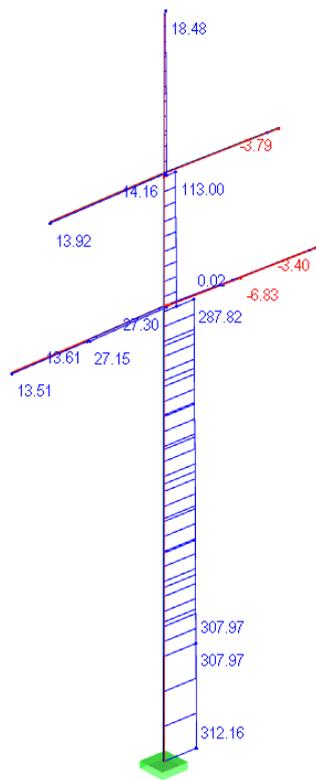
Abbildung 16-3: Variante 2, maßgebende Lastkombinationen  
Figure 16-3: Variant 2, decisive load combination

# Anhang B Appendix B

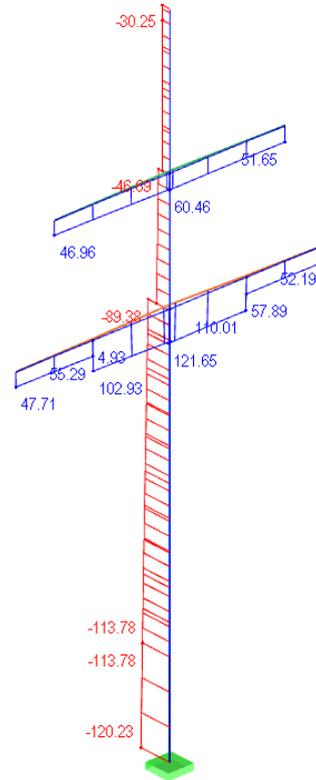
Schnittgrößen N [kN]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



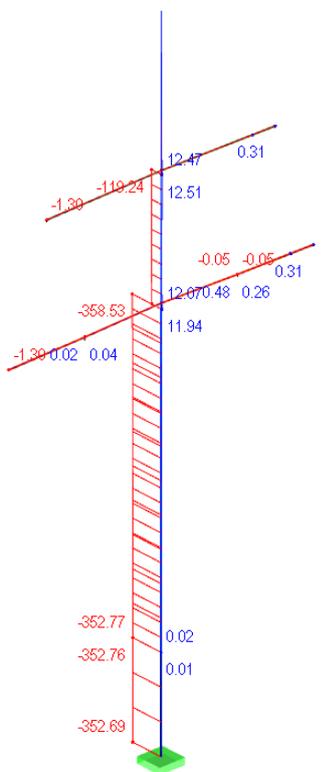
Schnittgrößen V-y [kN]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



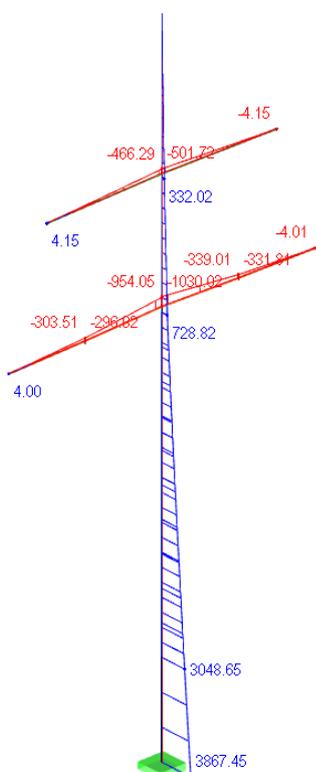
Schnittgrößen V-z [kN]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-T [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-y [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit



Schnittgrößen M-z [kNm]  
EK1 : Grenzzustand der Tragfähigkeit

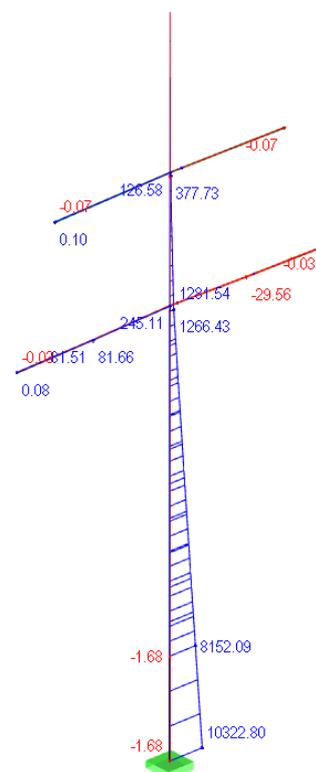


Abbildung 16-4: Variante 2: Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit  
Figure 16-4: Variant 2: Internal forces in ultimate limit state

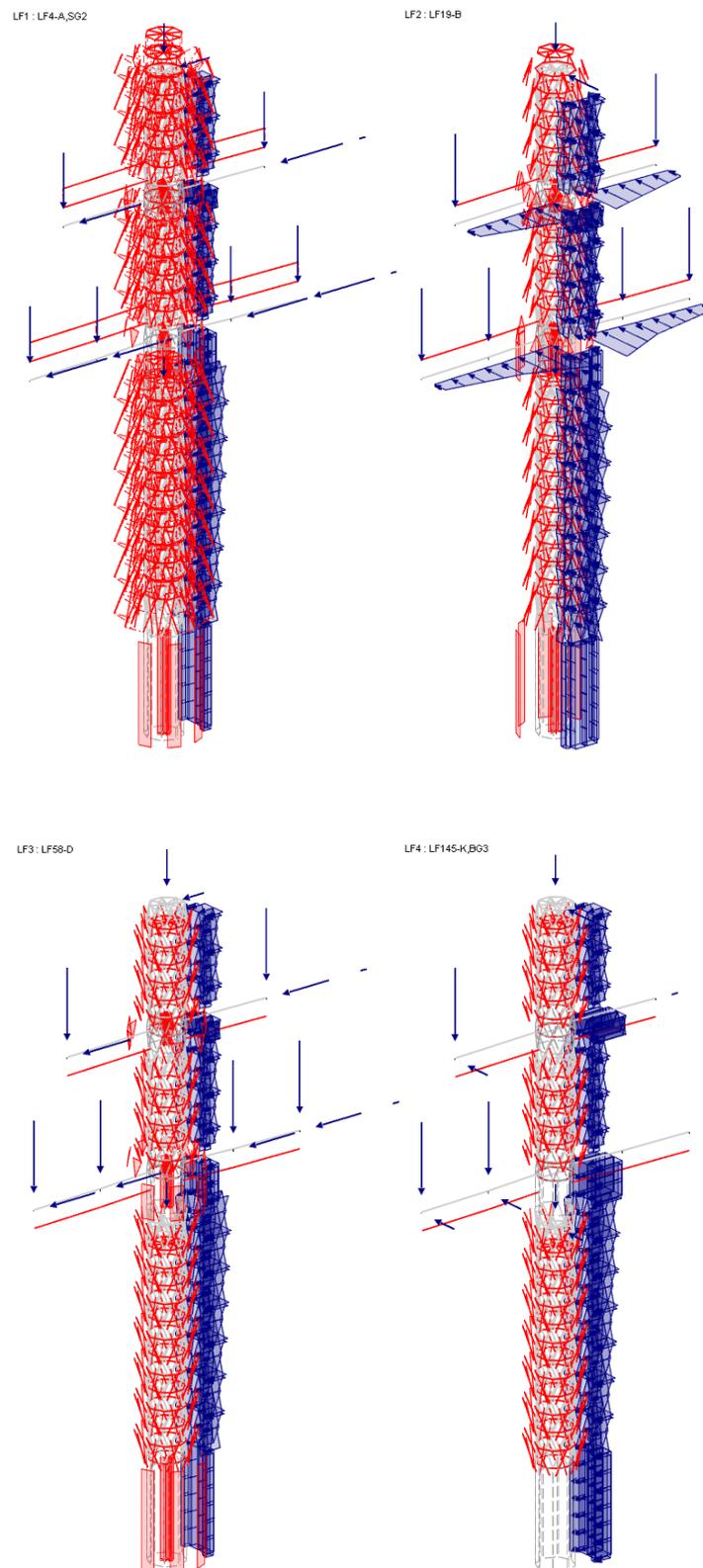
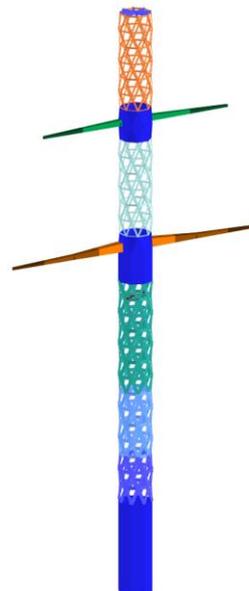


Abbildung 16-5: Variante 3, maßgebende Lastkombinationen  
Figure 16-5: Variant 3, decisive load combination

Tabelle 16-9: Variante 3, Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für ausgewählte Querschnitte

Table 16-9: Variant 13: Internal forces in ultimate limit state for selected cross sections

Lage x [m]		Kräfte [kN]			Momente [kNm]			Zugehörige Lastfälle
		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>T</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	
0,000	MAX N	731,11	-0,27	9,64	0,03	-9,12	-0,05	LF 2
	MIN N	-817,56	0,08	12,51	0,00	-7,21	0,08	LF 2
	MAX V <sub>y</sub>	118,98	0,37	-1,64	0,02	0,34	-0,10	LF 2
	MIN V <sub>y</sub>	130,69	-0,38	-8,97	-0,03	5,25	-0,10	LF 4
	MAX V <sub>z</sub>	-765,15	0,08	29,60	0,00	-24,18	0,07	LF 1
	MIN V <sub>z</sub>	-765,15	-0,08	-29,60	0,00	-24,18	0,07	LF 2
	MAX M <sub>T</sub>	498,24	-0,32	16,07	0,04	-12,97	-0,06	LF 2
	MIN M <sub>T</sub>	497,82	-0,37	-15,59	-0,04	10,56	-0,09	LF 4
	MAX M <sub>y</sub>	191,14	-0,11	-27,47	0,02	25,49	-0,06	LF 4
	MIN M <sub>y</sub>	-280,23	-0,02	-29,45	-0,01	-26,86	0,02	LF 2
	MAX M <sub>z</sub>	-1,31	0,23	1,33	0,00	-0,82	0,12	LF 4
	MIN M <sub>z</sub>	-0,46	0,20	7,76	0,00	3,45	-0,15	LF 4
1,487	MAX N	857,17	-1,06	79,14	0,05	-52,17	-0,50	LF 2
	MIN N	-939,04	1,07	-82,23	0,17	-69,34	-0,91	LF 1
	MAX V <sub>y</sub>	-937,94	1,07	-81,79	0,17	52,60	0,68	LF 1
	MIN V <sub>y</sub>	-9,38	-2,92	59,53	0,04	-56,20	-1,09	LF 4
	MAX V <sub>z</sub>	-939,04	-1,07	82,23	-0,17	-69,34	-0,91	LF 2
	MIN V <sub>z</sub>	-939,04	1,07	-82,23	0,17	-69,34	-0,91	LF 1
	MAX M <sub>T</sub>	-937,94	1,07	-81,79	0,17	52,60	0,68	LF 1
	MIN M <sub>T</sub>	-939,04	-1,07	82,23	-0,17	-69,34	-0,91	LF 1
	MAX M <sub>y</sub>	856,16	-0,51	78,49	0,05	65,02	0,67	LF 1
	MIN M <sub>y</sub>	-10,31	0,00	-2,16	0,00	-144,73	0,00	LF 2
	MAX M <sub>z</sub>	-9,38	-2,92	58,68	0,04	29,50	3,15	LF 4
	MIN M <sub>z</sub>	-9,38	-2,92	60,39	0,04	-143,15	-5,33	LF 4
1,450	MAX N	40,64	-0,04	-1,70	0,00	1,18	-0,03	LF 2
	MIN N	-41,81	0,04	1,87	0,00	-1,21	0,03	LF 4
	MAX V <sub>y</sub>	-37,85	0,05	-1,72	0,00	1,18	0,03	LF 3
	MIN V <sub>y</sub>	-37,85	-0,05	-1,72	0,00	1,18	-0,03	LF 3
	MAX V <sub>z</sub>	-41,81	0,04	1,87	0,00	-1,21	0,03	LF 3
	MIN V <sub>z</sub>	-37,85	0,05	-1,88	0,00	-1,22	-0,04	LF 3
	MAX M <sub>T</sub>	27,72	-0,01	1,38	0,00	-0,89	0,00	LF 2
	MIN M <sub>T</sub>	-20,07	-0,02	-1,01	0,00	0,72	-0,01	LF 3
	MAX M <sub>y</sub>	-41,81	0,04	1,71	0,00	1,18	-0,03	LF 4
	MIN M <sub>y</sub>	-37,85	0,05	-1,88	0,00	-1,22	-0,04	LF 3
	MAX M <sub>z</sub>	-37,85	-0,05	-1,88	0,00	-1,22	0,04	LF 3
	MIN M <sub>z</sub>	-37,85	0,05	-1,88	0,00	-1,22	-0,04	LF 3
1,336	MAX N	203,42	-0,20	-0,91	0,01	0,27	-0,04	LF 2
	MIN N	-154,50	0,04	0,10	-0,02	0,17	0,04	LF 2
	MAX V <sub>y</sub>	-18,17	0,28	-1,51	0,02	-0,75	-0,08	LF 2
	MIN V <sub>y</sub>	-18,17	-0,28	1,51	-0,02	-0,75	-0,08	LF 3
	MAX V <sub>z</sub>	2,82	0,01	9,68	0,00	-0,39	0,00	LF 2
	MIN V <sub>z</sub>	2,82	-0,01	-9,68	0,00	-0,39	0,00	LF 2
	MAX M <sub>T</sub>	58,29	0,02	-6,23	0,03	0,63	0,04	LF 4
	MIN M <sub>T</sub>	-29,27	-0,08	0,82	-0,03	-1,00	-0,08	LF 4
	MAX M <sub>y</sub>	130,88	-0,24	-3,01	0,00	2,75	-0,08	LF 2
	MIN M <sub>y</sub>	41,07	0,03	-2,63	0,00	-2,44	0,00	LF 2
	MAX M <sub>z</sub>	0,39	0,20	0,72	0,00	-0,39	0,11	LF 4
	MIN M <sub>z</sub>	0,39	0,20	0,60	0,00	0,28	-0,09	LF 4
1,025	MAX N	74,61	-0,23	-0,61	0,01	0,25	-0,05	LF 2
	MIN N	-64,34	-0,03	-0,73	0,00	0,71	0,00	LF 2
	MAX V <sub>y</sub>	18,80	0,27	-0,28	0,00	-0,18	-0,07	LF 2
	MIN V <sub>y</sub>	18,80	-0,27	0,28	0,00	-0,18	-0,07	LF 4
	MAX V <sub>z</sub>	22,58	-0,01	13,86	-0,01	-1,23	-0,01	LF 1
	MIN V <sub>z</sub>	22,58	0,01	-13,86	0,01	-1,23	-0,01	LF 3
	MAX M <sub>T</sub>	42,29	-0,02	-7,73	0,02	1,37	0,04	LF 4
	MIN M <sub>T</sub>	7,50	-0,02	10,53	-0,02	1,02	0,02	LF 1
	MAX M <sub>y</sub>	-7,80	0,04	-7,52	0,02	3,90	0,04	LF 4
	MIN M <sub>y</sub>	8,48	-0,02	9,51	0,00	-2,48	-0,05	LF 4
	MAX M <sub>z</sub>	0,27	-0,10	-0,32	0,00	-0,11	0,05	LF 4
	MIN M <sub>z</sub>	47,57	-0,26	-1,49	0,00	1,37	-0,07	LF 3
1,020	MAX N	534,28	-0,33	7,01	0,01	-6,36	-0,07	LF 2
	MIN N	-632,87	0,05	8,64	0,00	-4,76	0,04	LF 2
	MAX V <sub>y</sub>	63,41	0,46	18,08	0,00	13,34	-0,14	LF 2
	MIN V <sub>y</sub>	63,41	-0,46	-18,08	0,00	13,34	-0,14	LF 3
	MAX V <sub>z</sub>	-183,89	0,02	23,20	0,00	-21,06	0,01	LF 2
	MIN V <sub>z</sub>	-183,89	-0,02	-23,20	0,00	-21,06	0,01	LF 2
	MAX M <sub>T</sub>	412,58	-0,35	16,93	0,02	-11,28	-0,08	LF 2
	MIN M <sub>T</sub>	412,03	-0,36	-17,03	-0,02	13,97	-0,09	LF 1
	MAX M <sub>y</sub>	119,94	-0,10	-20,43	0,01	18,68	-0,05	LF 3
	MIN M <sub>y</sub>	-183,89	-0,02	-23,20	0,00	-21,06	0,01	LF 2
	MAX M <sub>z</sub>	-1,27	0,12	2,33	0,00	-1,20	0,07	LF 4
	MIN M <sub>z</sub>	63,41	-0,46	-18,08	0,00	13,34	-0,14	LF 3



- Strebe 12/300
- Strebe 25/300
- FL 45x25
- TO 750/750/9/9/9/9
- TO 400/400/9/9/9/9
- TO 200/200/9/9/9/9
- TO 500/500/8/8/8/8
- TO 200/200/8/8/8/8
- Strebe 10/150
- Strebe 8/150
- Strebe 10/300

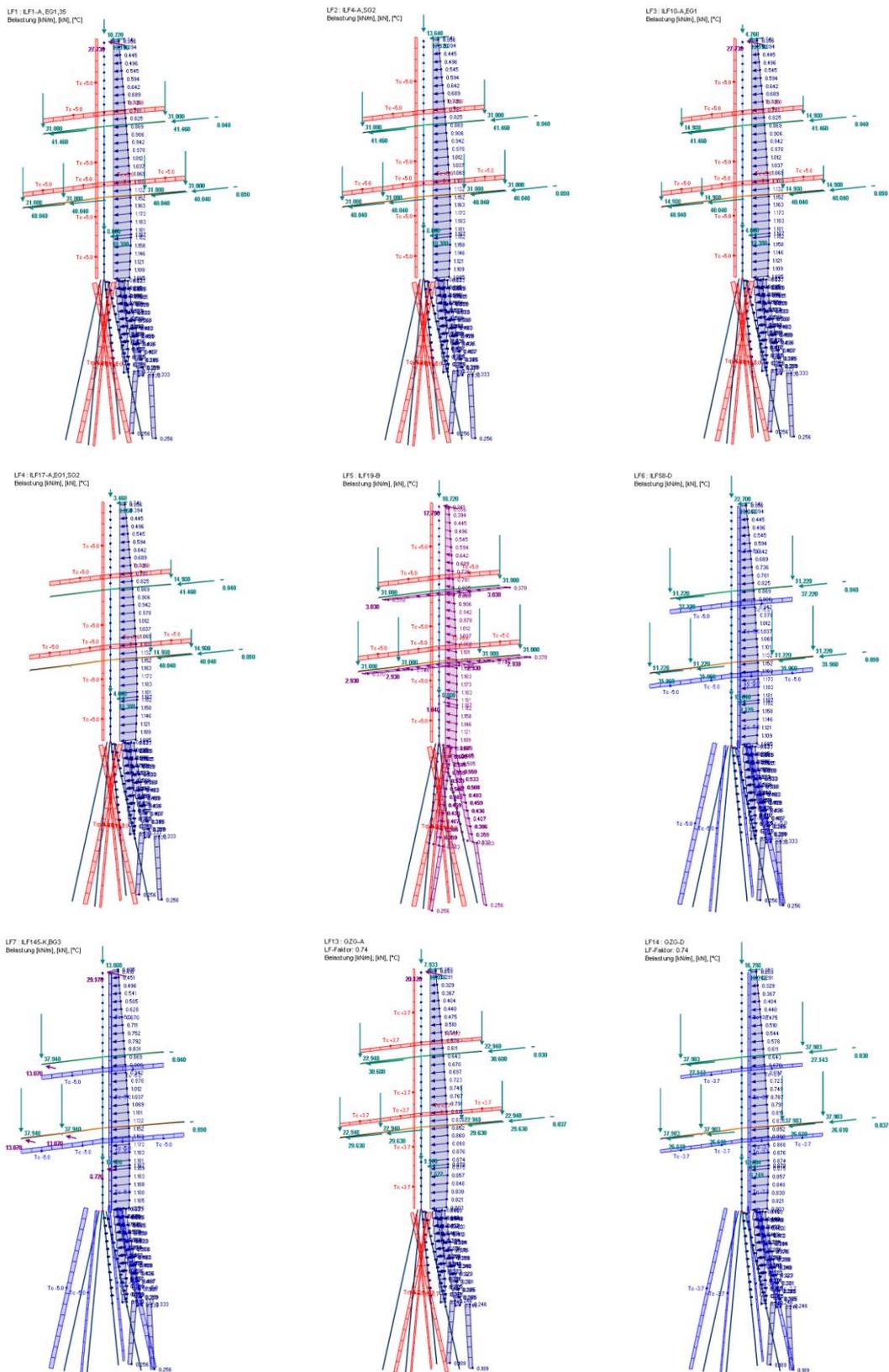


Abbildung 16-6: Variante 4, maßgebende Lastkombinationen  
Figure 16-6: Variant 4, decisive load combination

# Anhang B Appendix B

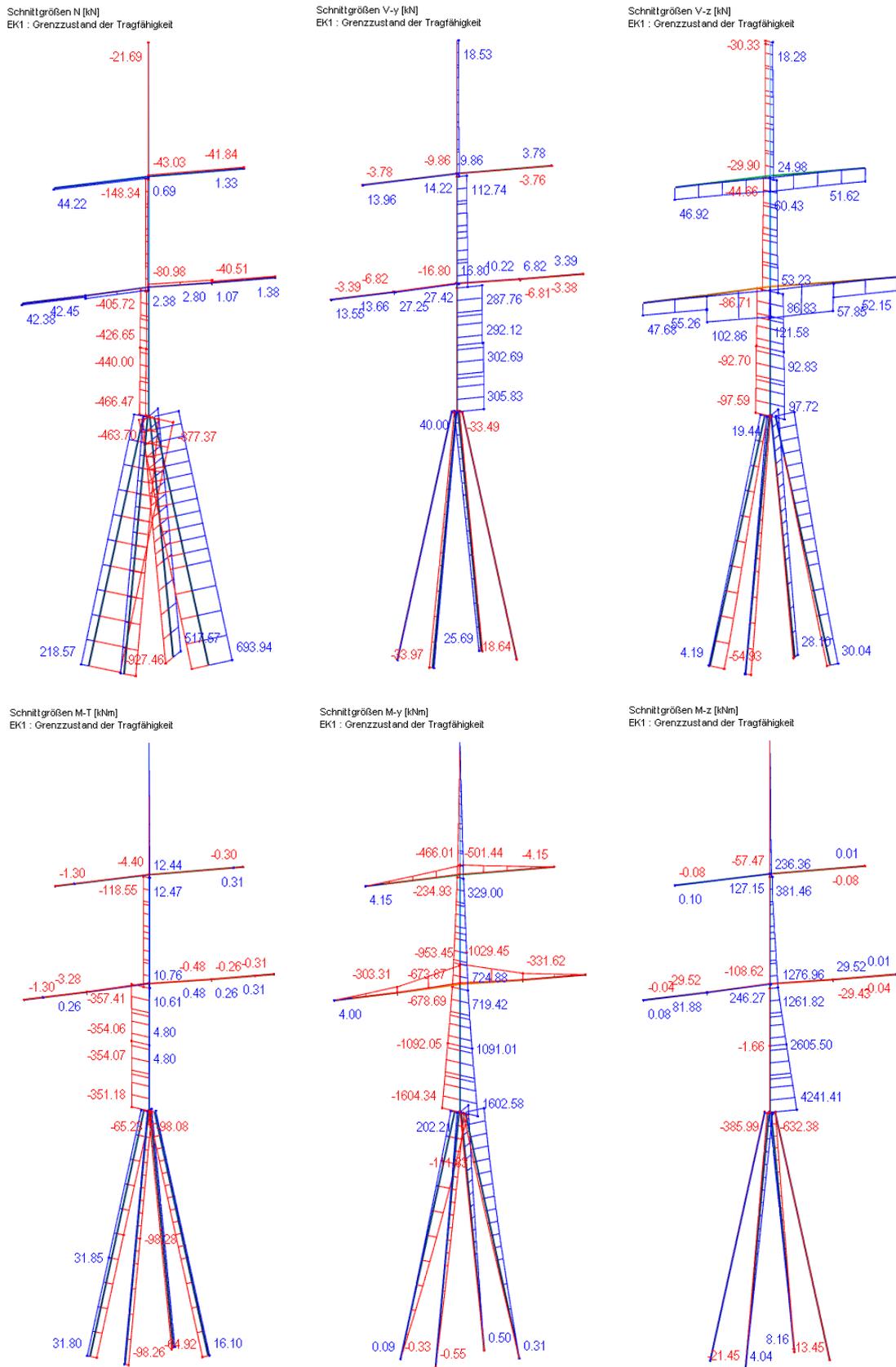
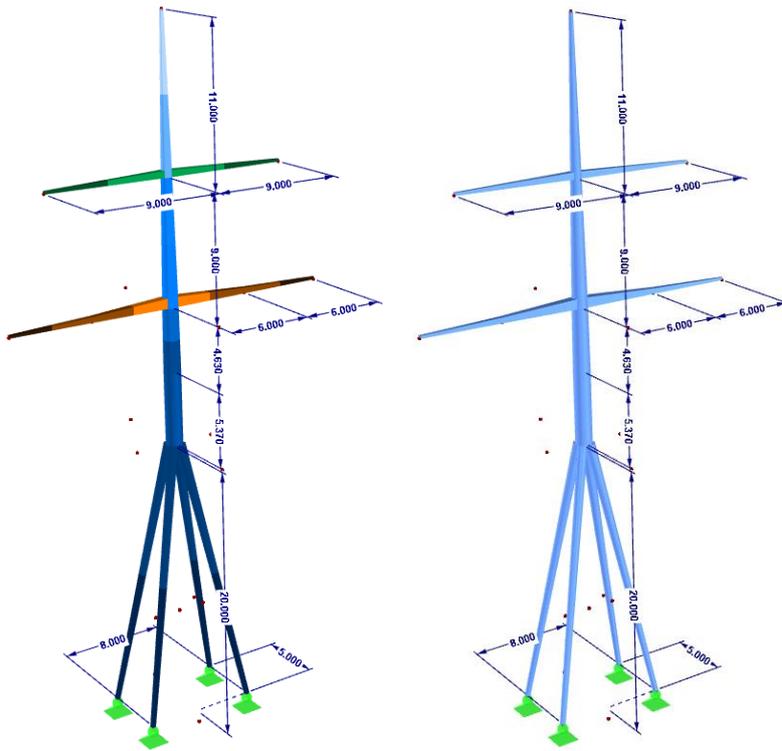


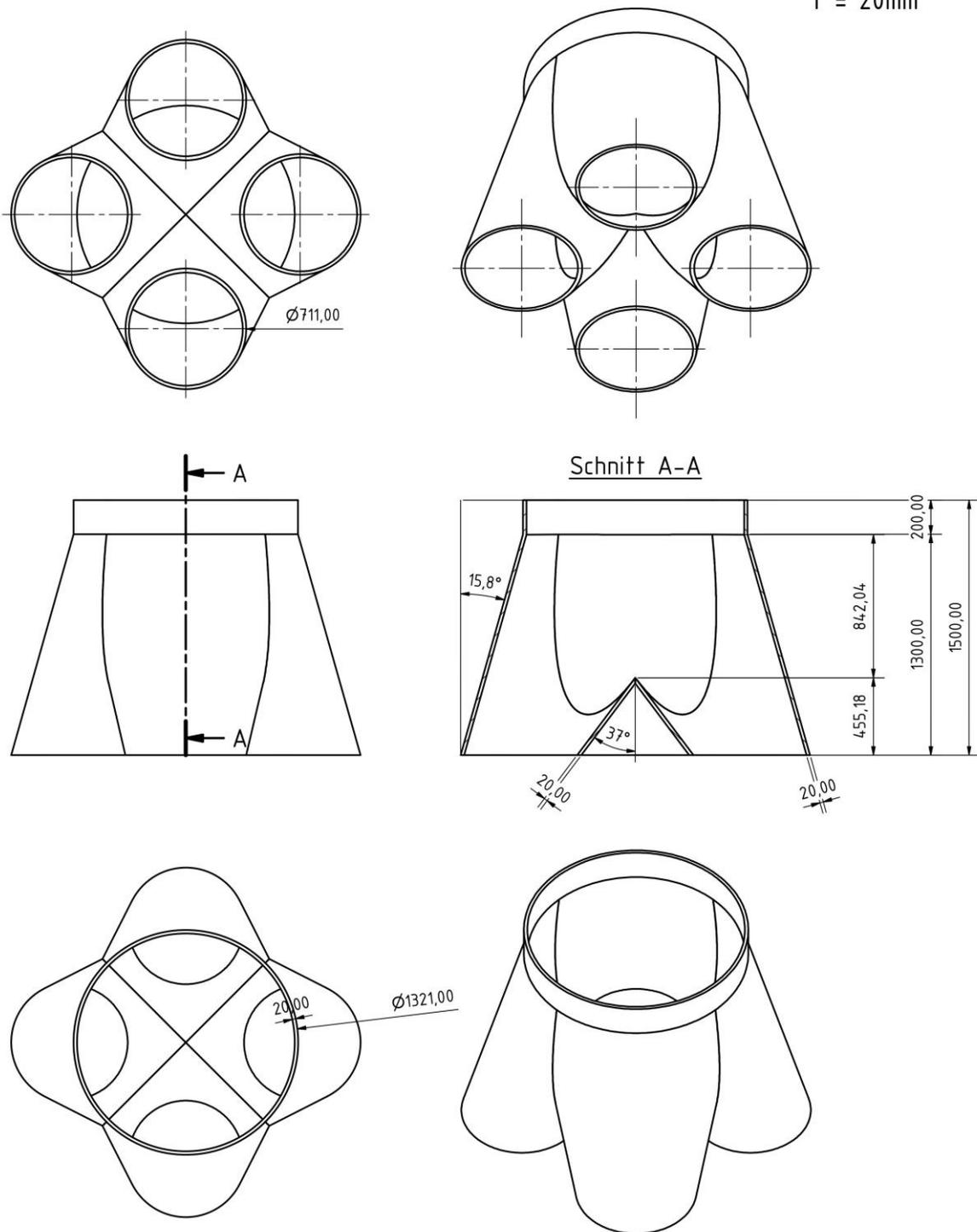
Abbildung 16-7: Variante 4: Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit  
Figure 16-7: Variant 4: Internal forces in ultimate limit state

## 16.2 Anhang B2



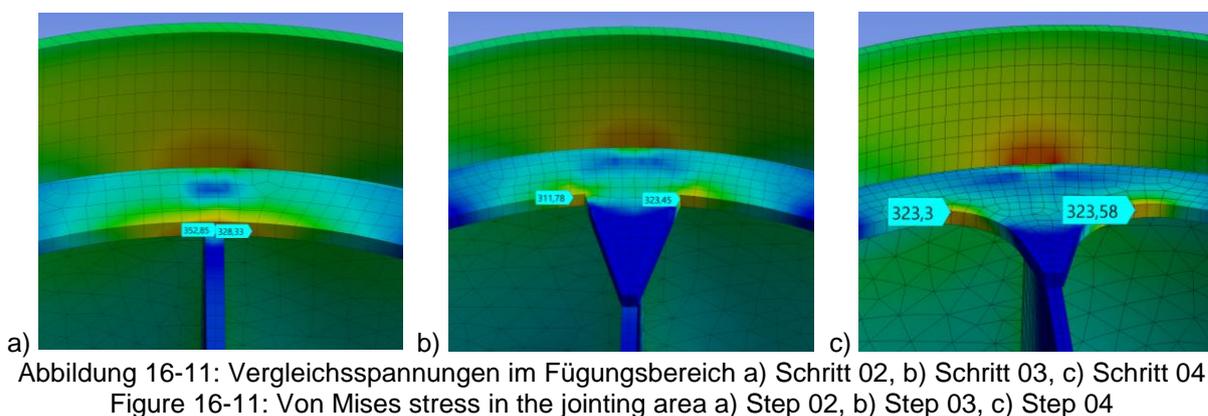
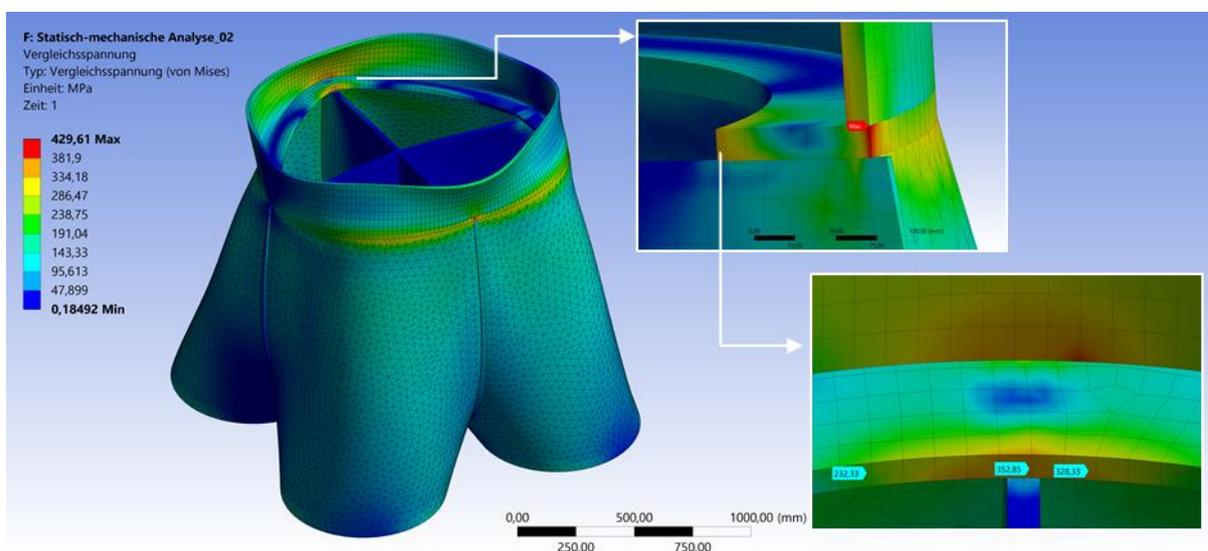
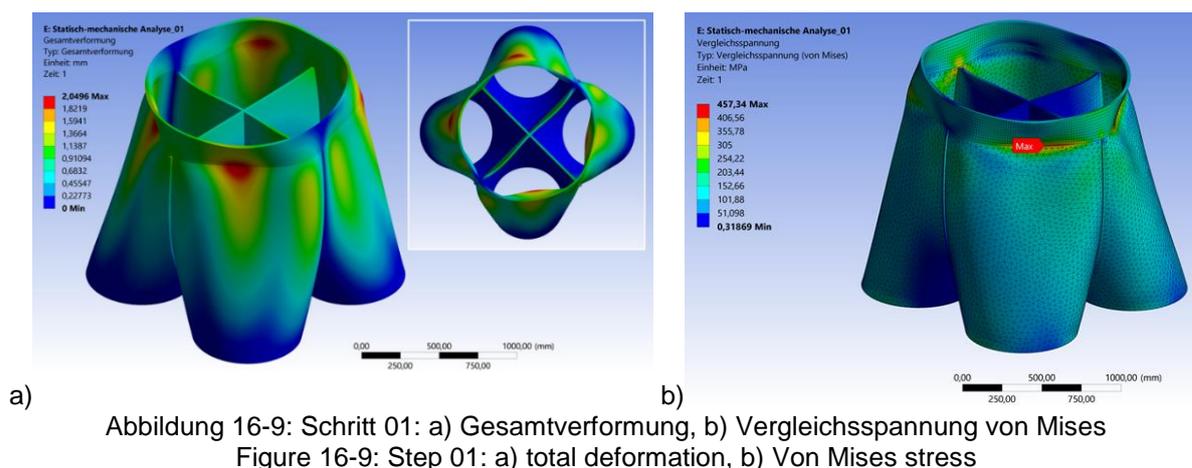
**Geschweißte Variante der Übergangskonstruktion**

Knotenpunkt  
Stahl S355 J2  
t = 20mm



[Alle Maße in mm]

Abbildung 16-8: Entwurfszeichnung der Ursprungsgeometrie  
Figure 16-8: Draft of the original geometry



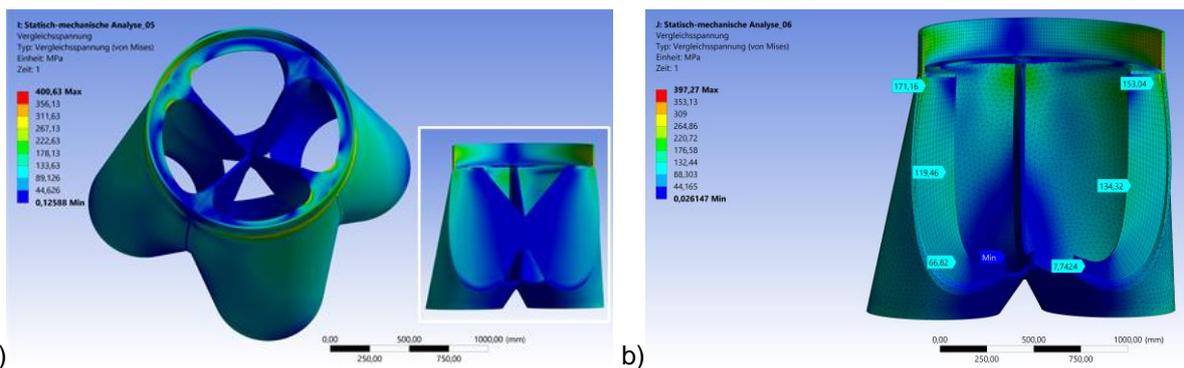


Abbildung 16-12: Vergleichsspannungen a) Schritt 05, b) Schritt 06  
Figure 16-12: Von Mises stress a) Step 05, b) Step 06

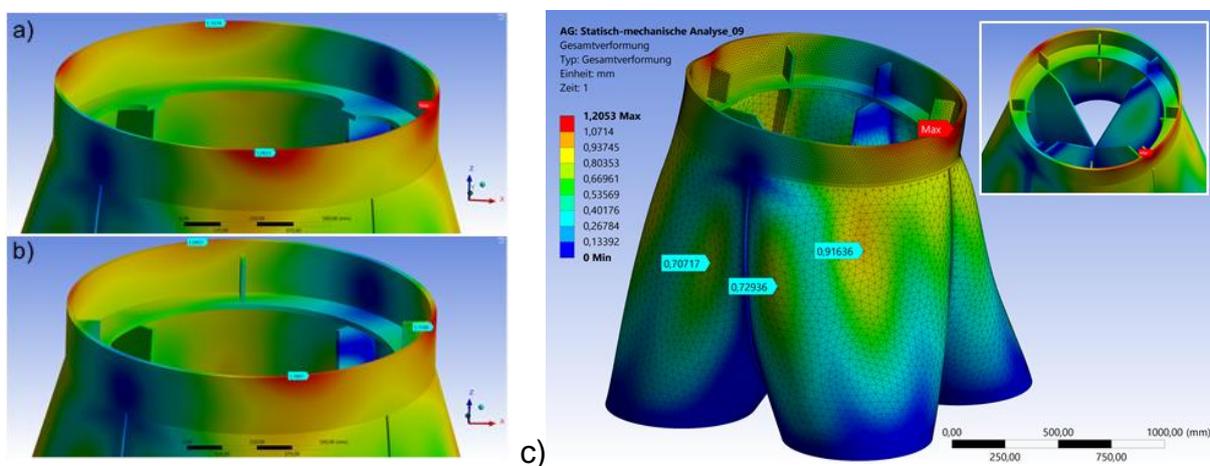


Abbildung 16-13: Verformung a) Schritt 07, b) Schritt 08, c) Schritt 09  
Figure 16-13: Deformation a) Step 07, b) Step 08, c) Step 09

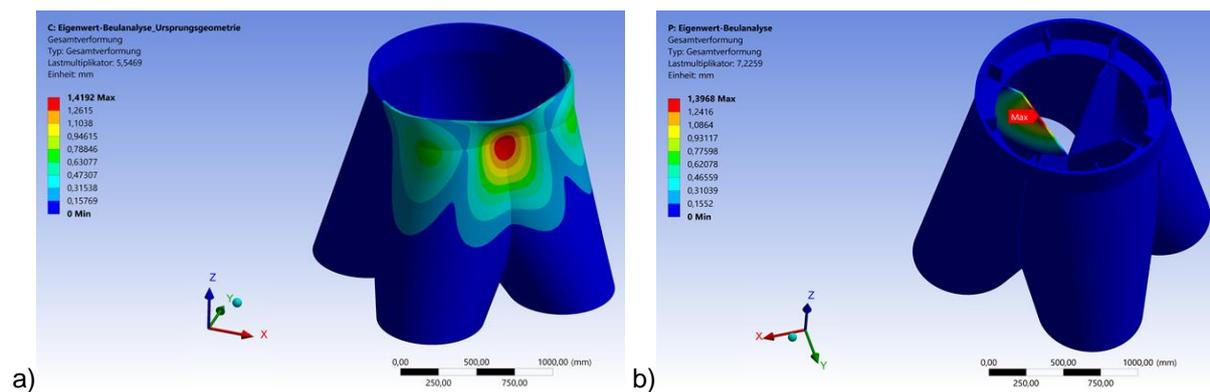
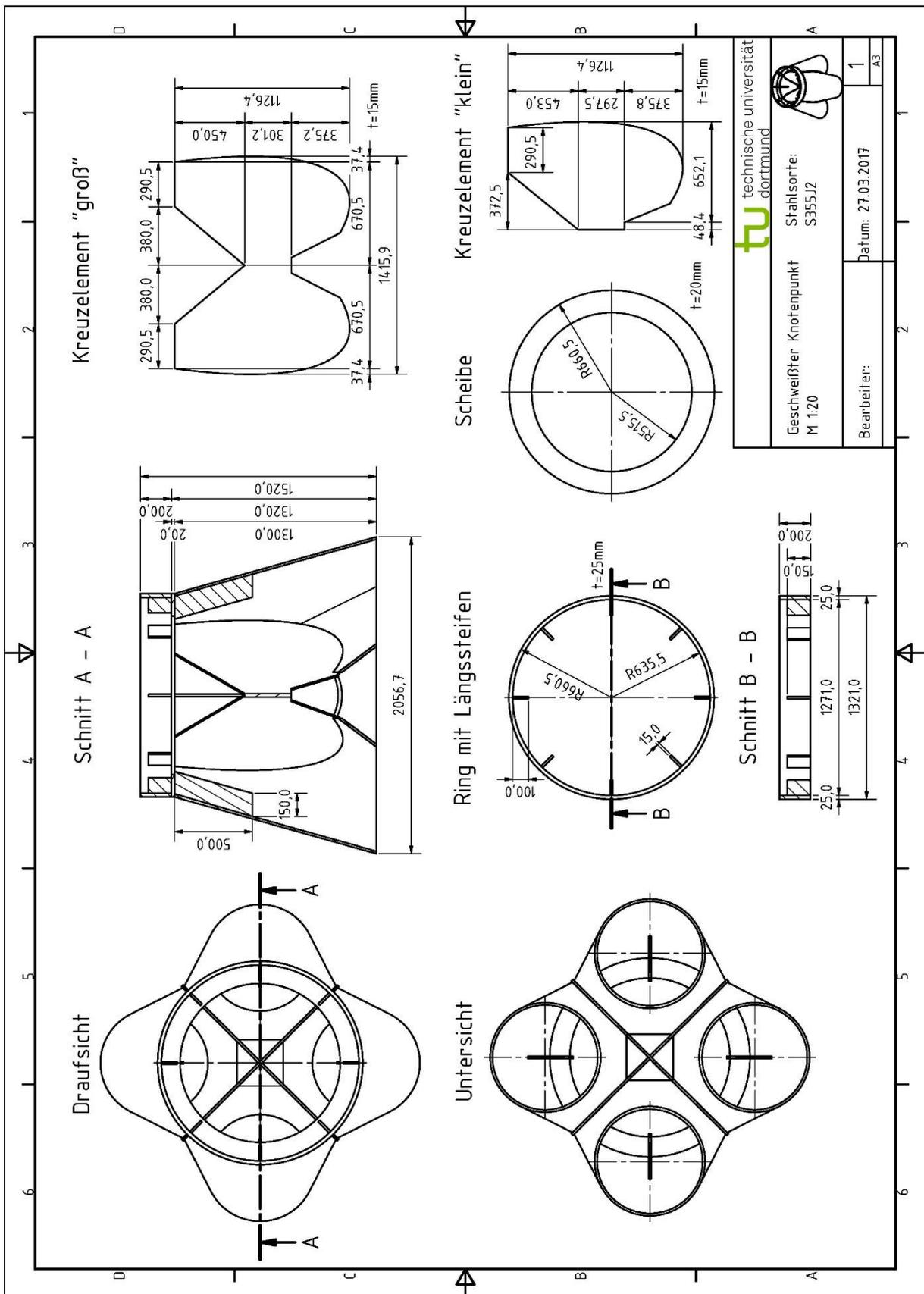


Abbildung 16-14: Eigenwertbeulanalyse der a) Ursprungsvariante, b) Optimierungsvariante  
Figure 16-14: Intrinsic dent analysis of a) the original variant, b) the optimization variant



**Übergangskonstruktion als Stahlgussknoten**

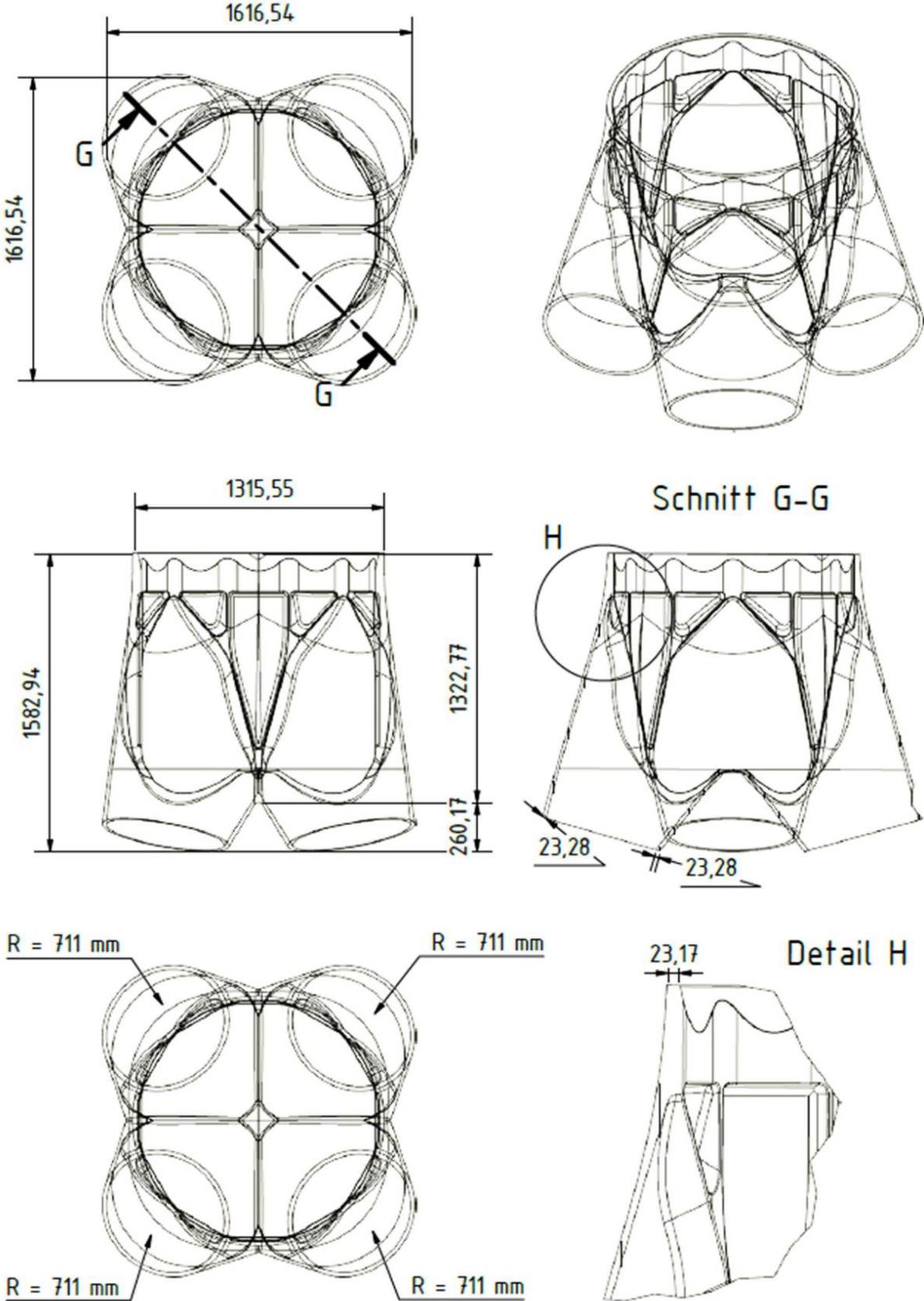


Abbildung 16-15: Entwurfszeichnung Variante E  
Figure 16-15: Draft of the variant E

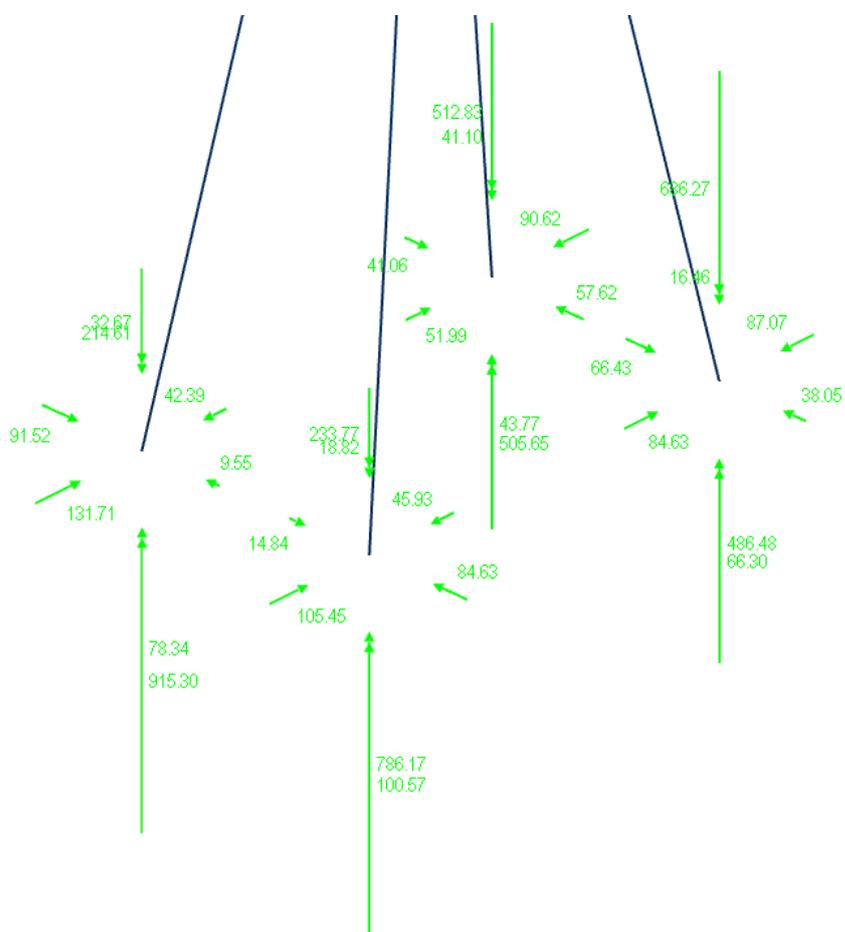


Abbildung 16-16: Auflagerlasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Variante 4  
Figure 16-16: Reaction loads at the ultimate limit state of variant 4

### 16.3 Anhang B3

#### Kleinteilversuchsserie: Versuchsreihe Torsion

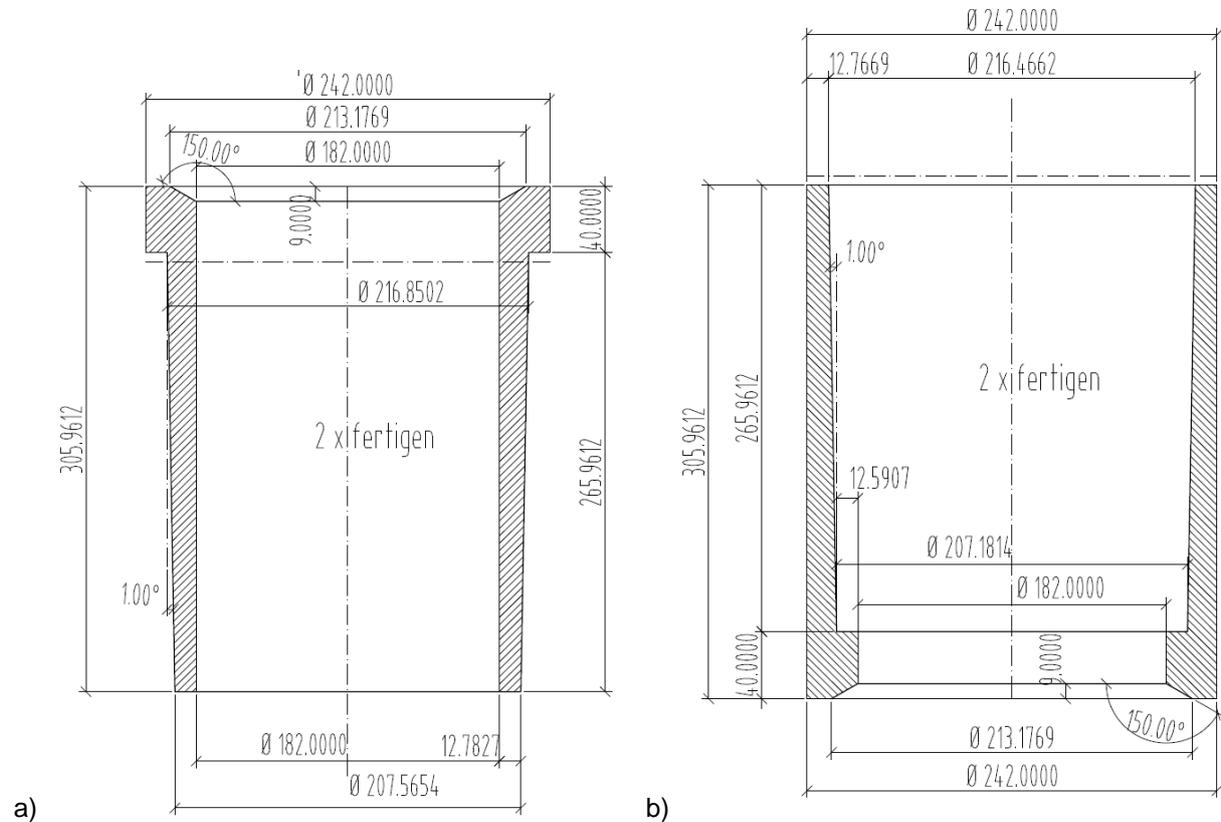


Abbildung 16-17: V1T01-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-17: V1T01 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

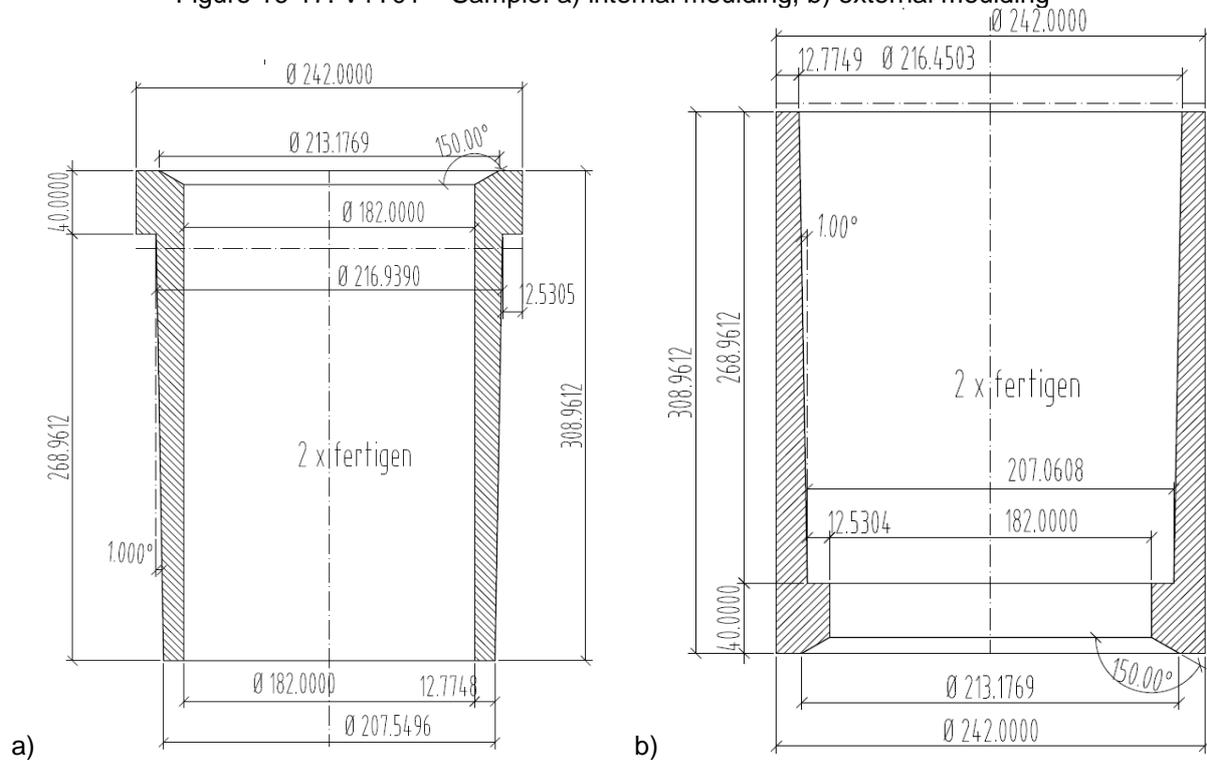


Abbildung 16-18: V1T02-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-18: V1T02 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

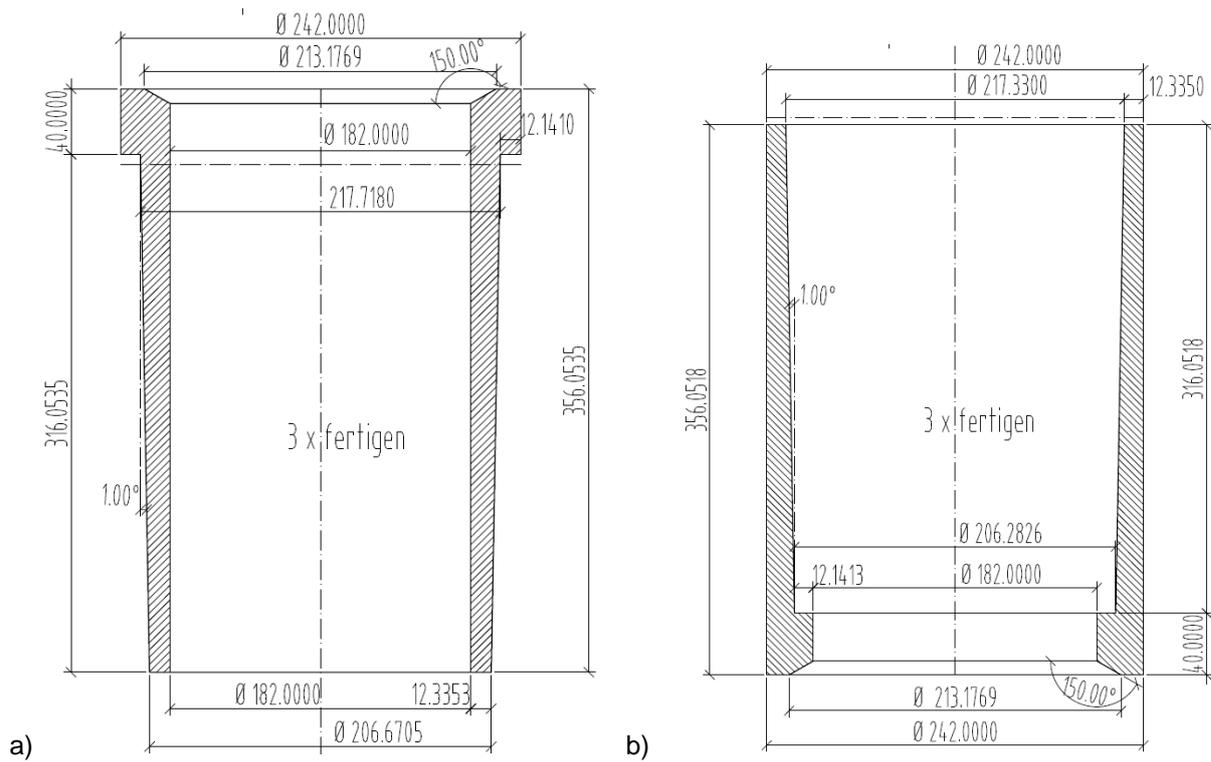


Abbildung 16-19: V1T03-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-19: V1T03 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

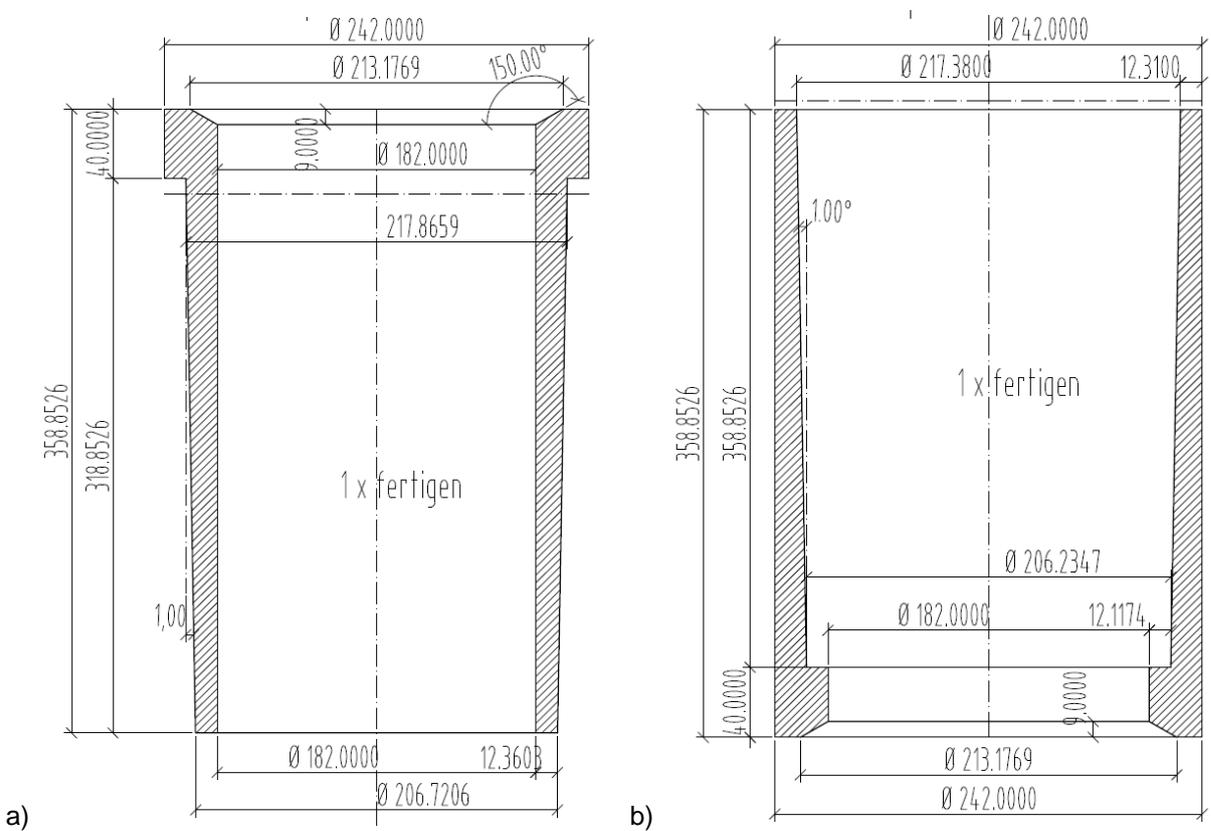


Abbildung 16-20: V1T04-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-20: V1T04 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

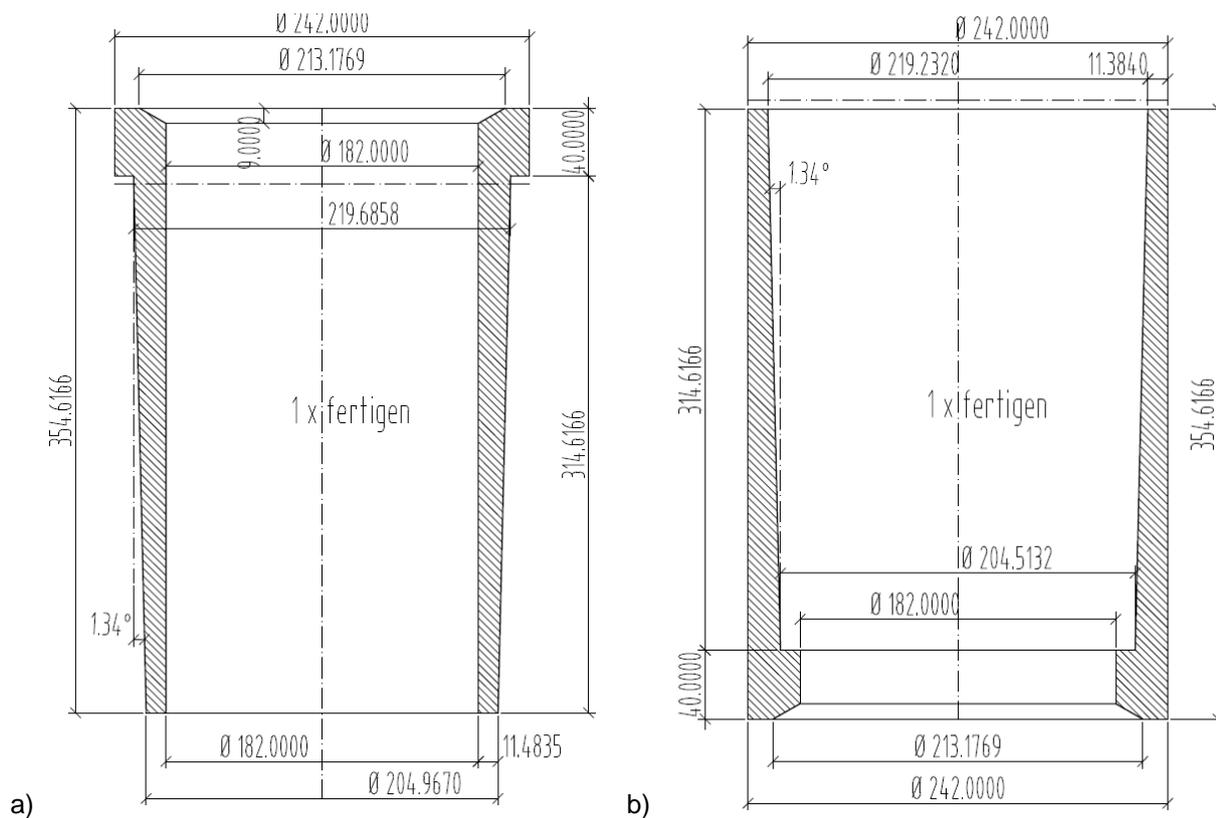


Abbildung 16-21: V1T06-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-21: V1T06 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

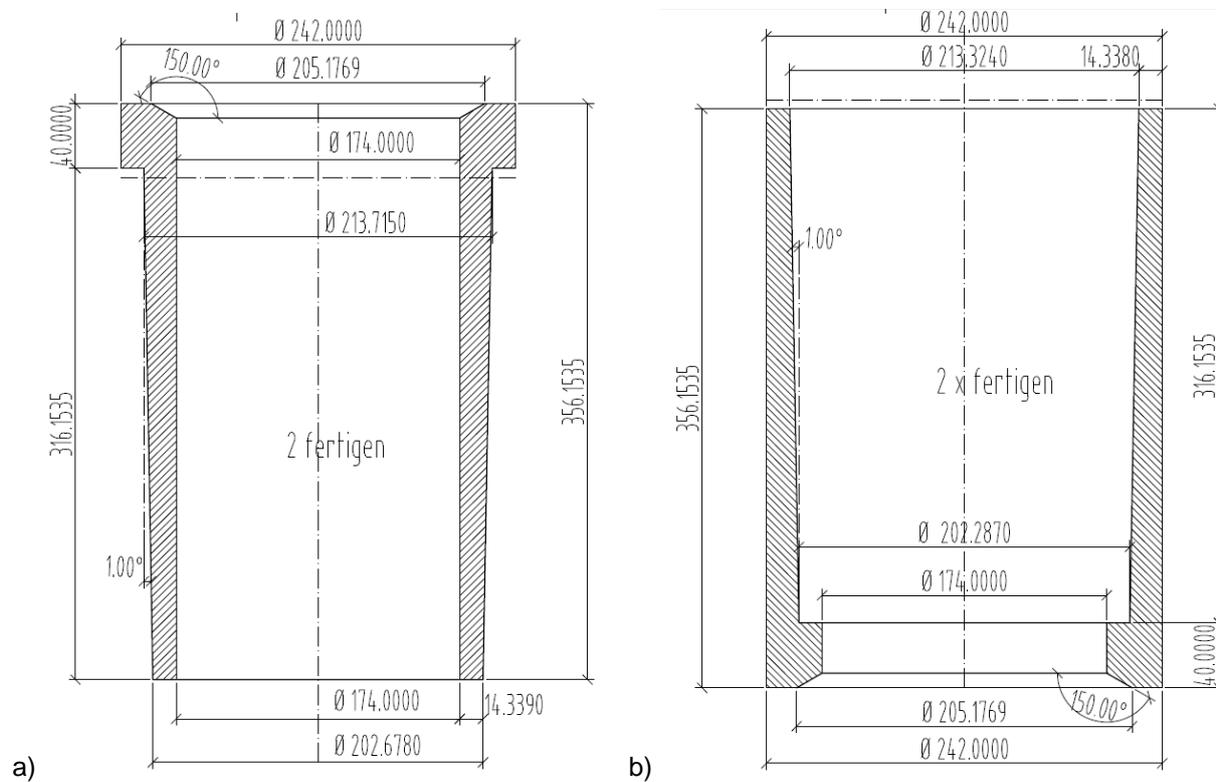


Abbildung 16-22: V1T08-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-22: V1T08 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

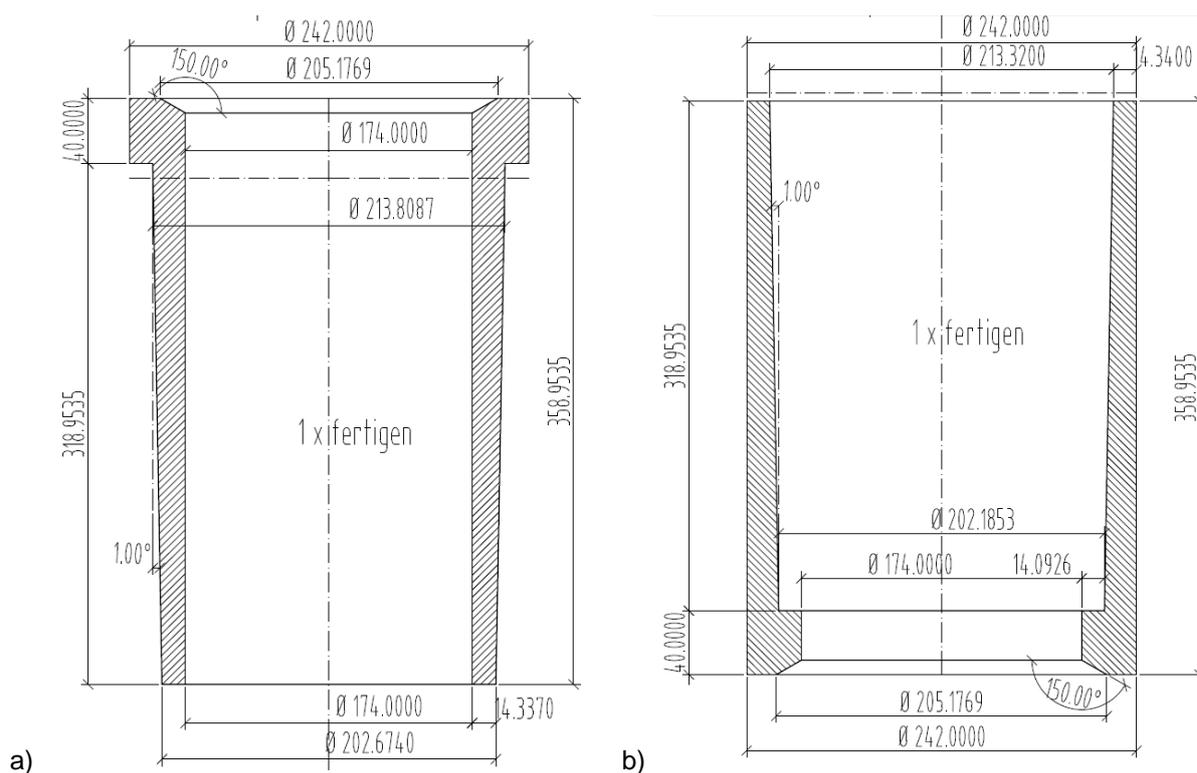


Abbildung 16-23: V1T09-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-23: V1T09 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

**Kleinteilversuchsserie: Versuchsreihe Biegung**

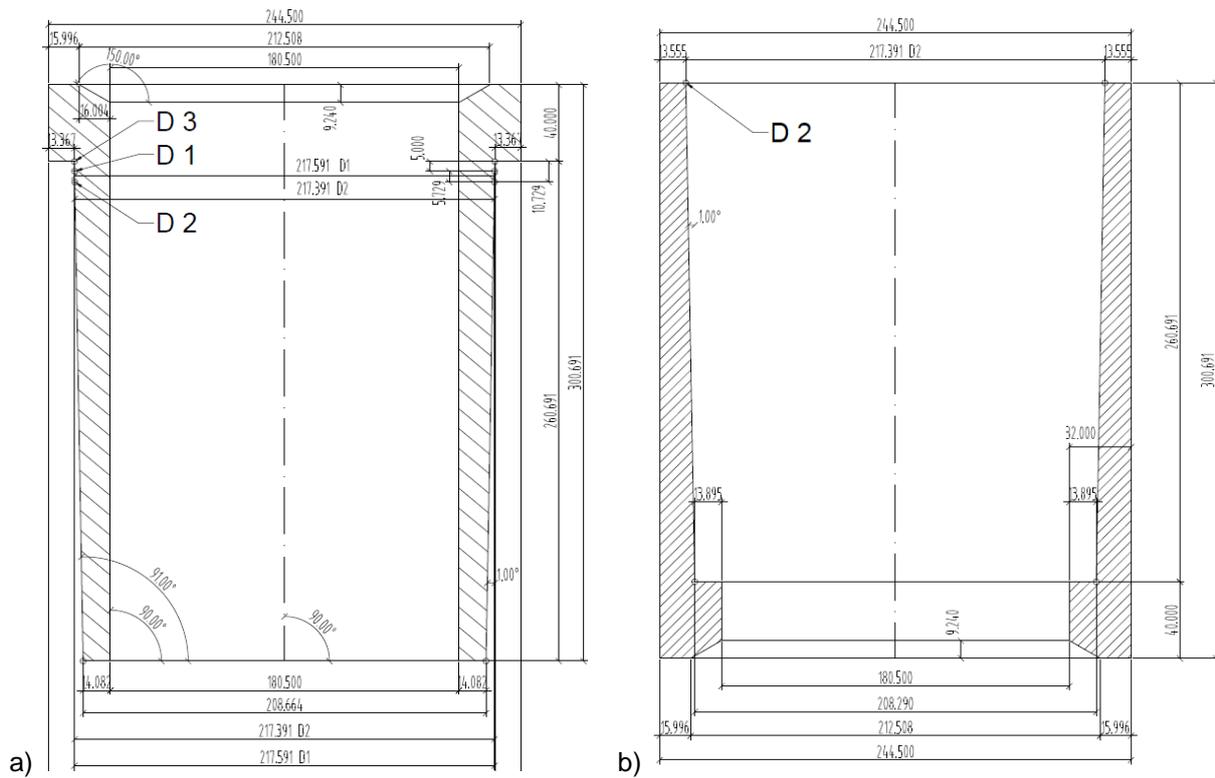


Abbildung 16-24: V1B01-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-24: V1B01 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

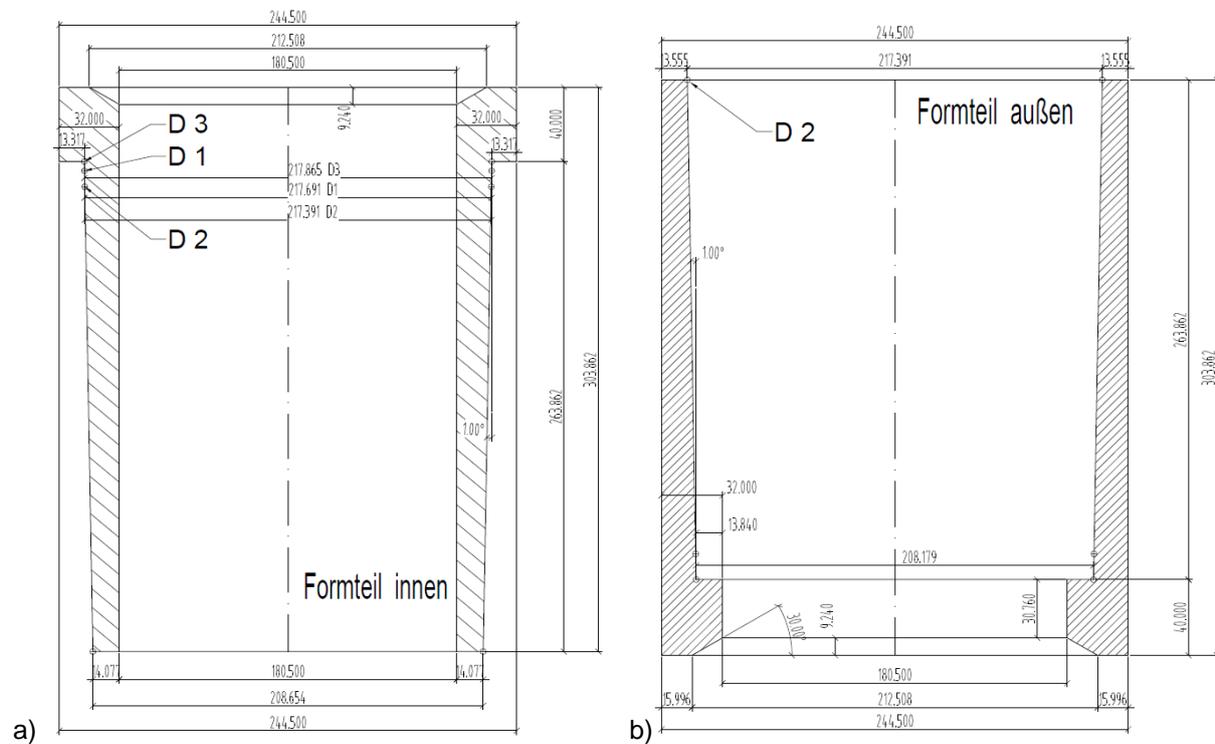


Abbildung 16-25: V1B02-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-25: V1B02 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

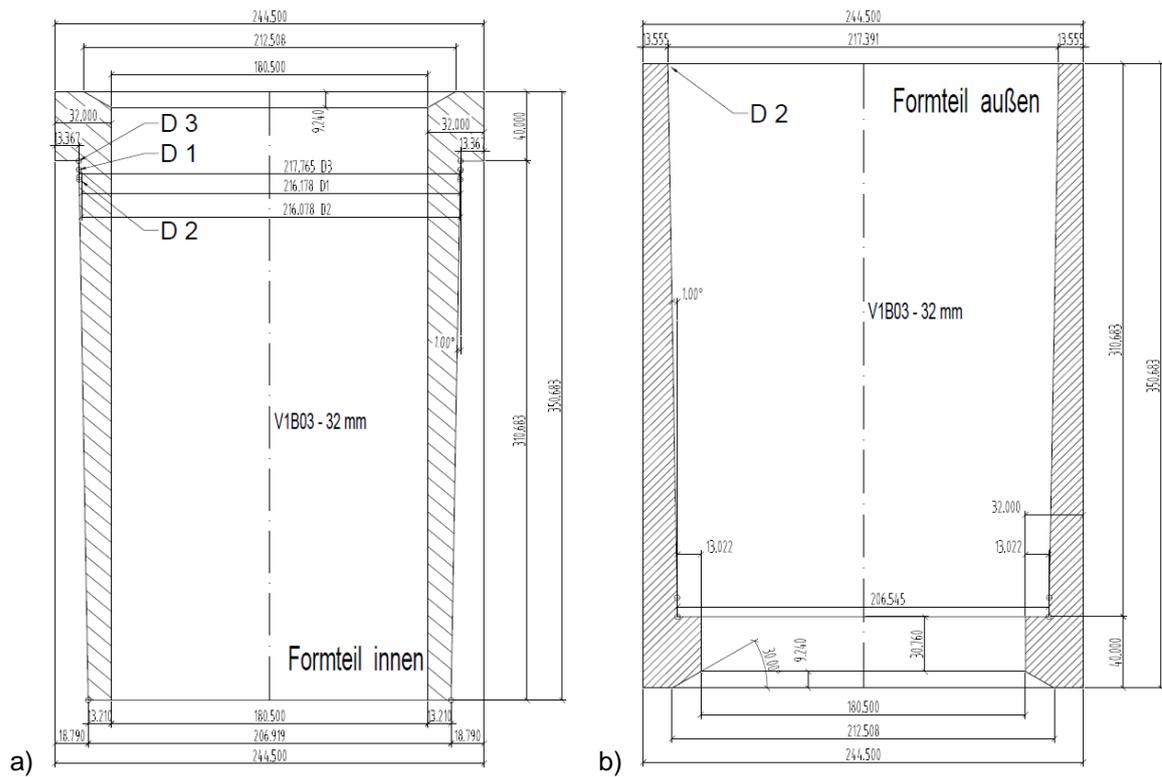


Abbildung 16-26: V1B03-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-26: V1B03 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

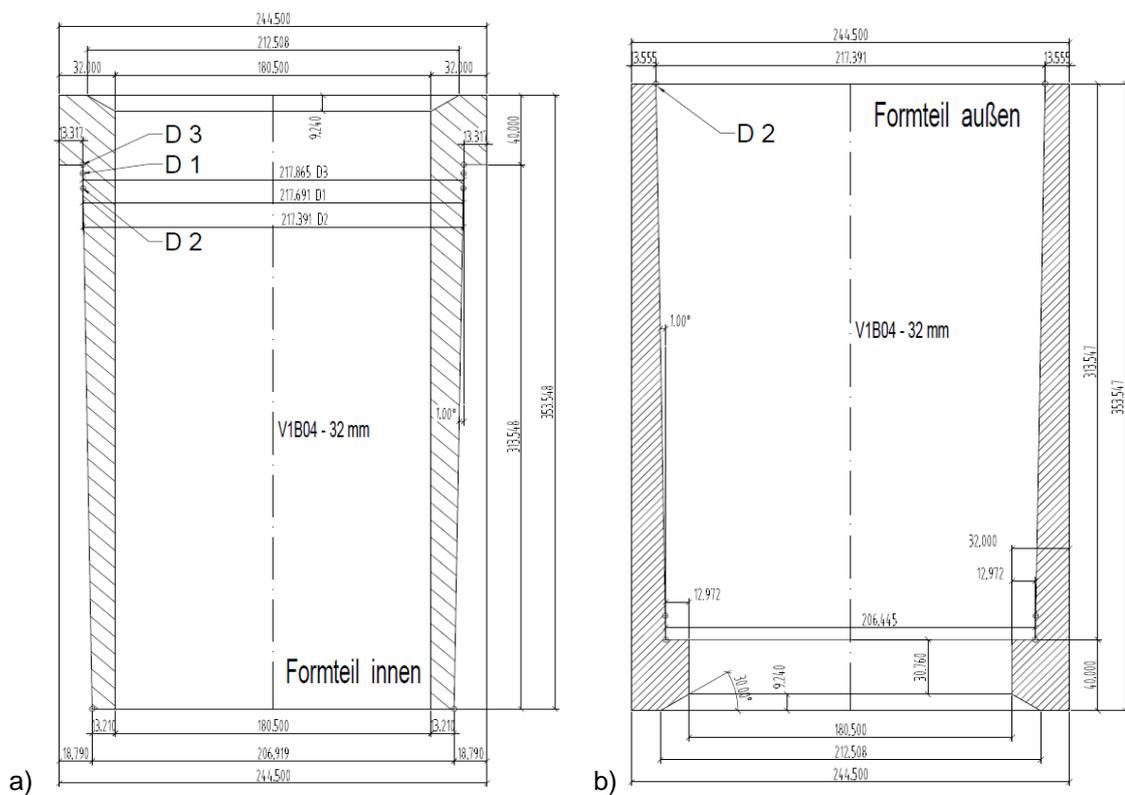


Abbildung 16-27: V1B04-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-27: V1B04 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

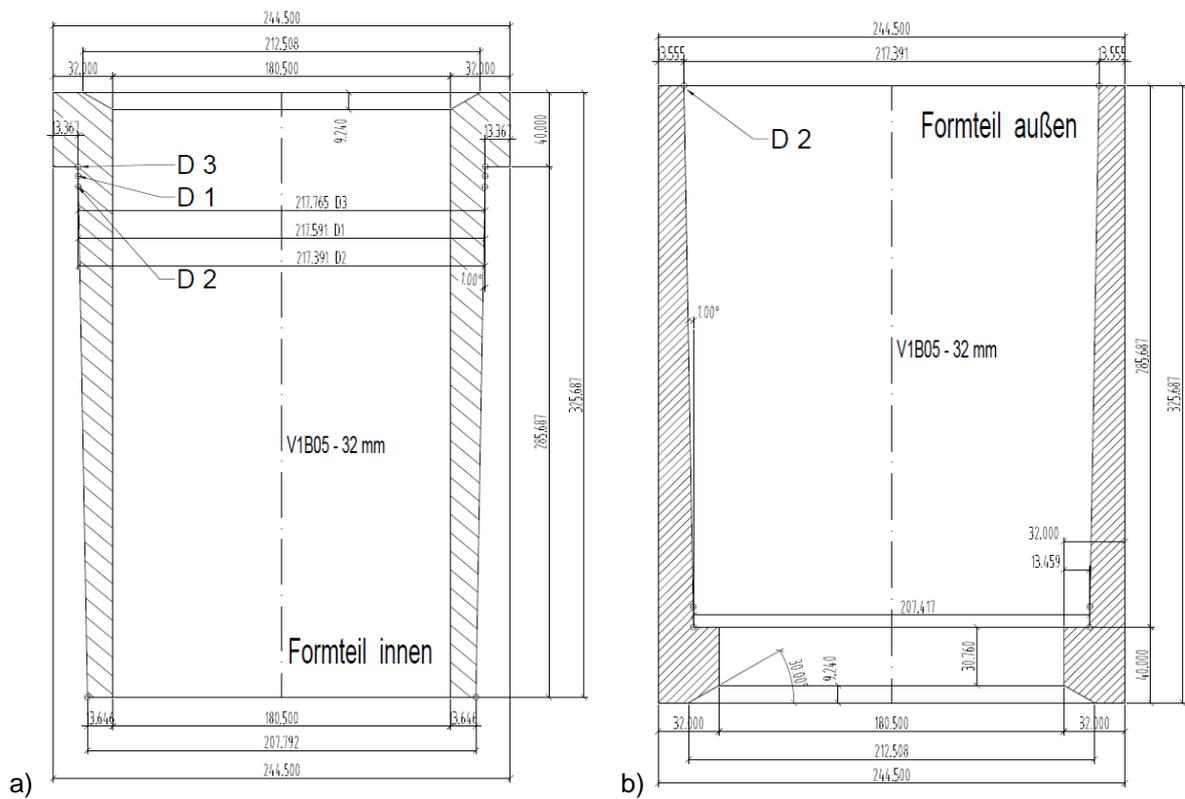


Abbildung 16-28: V1B05-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-28: V1B05 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

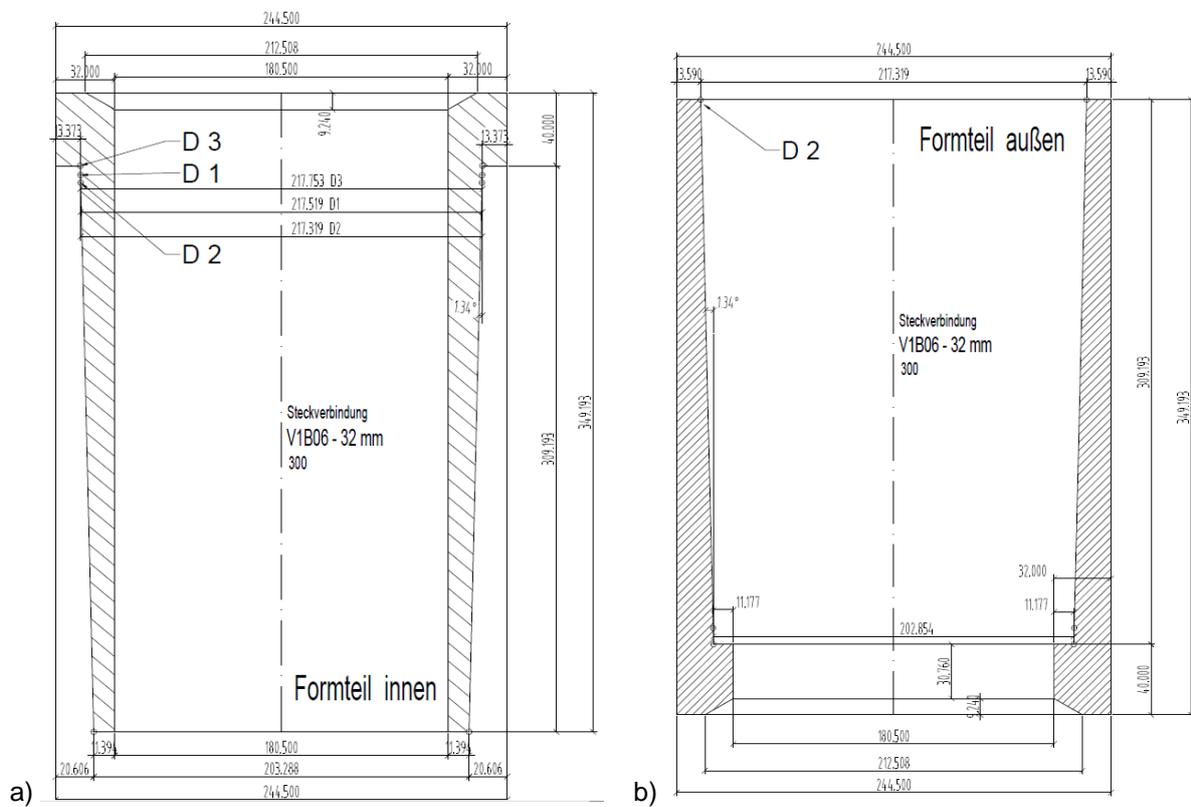


Abbildung 16-29: V1B06-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-29: V1B06 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

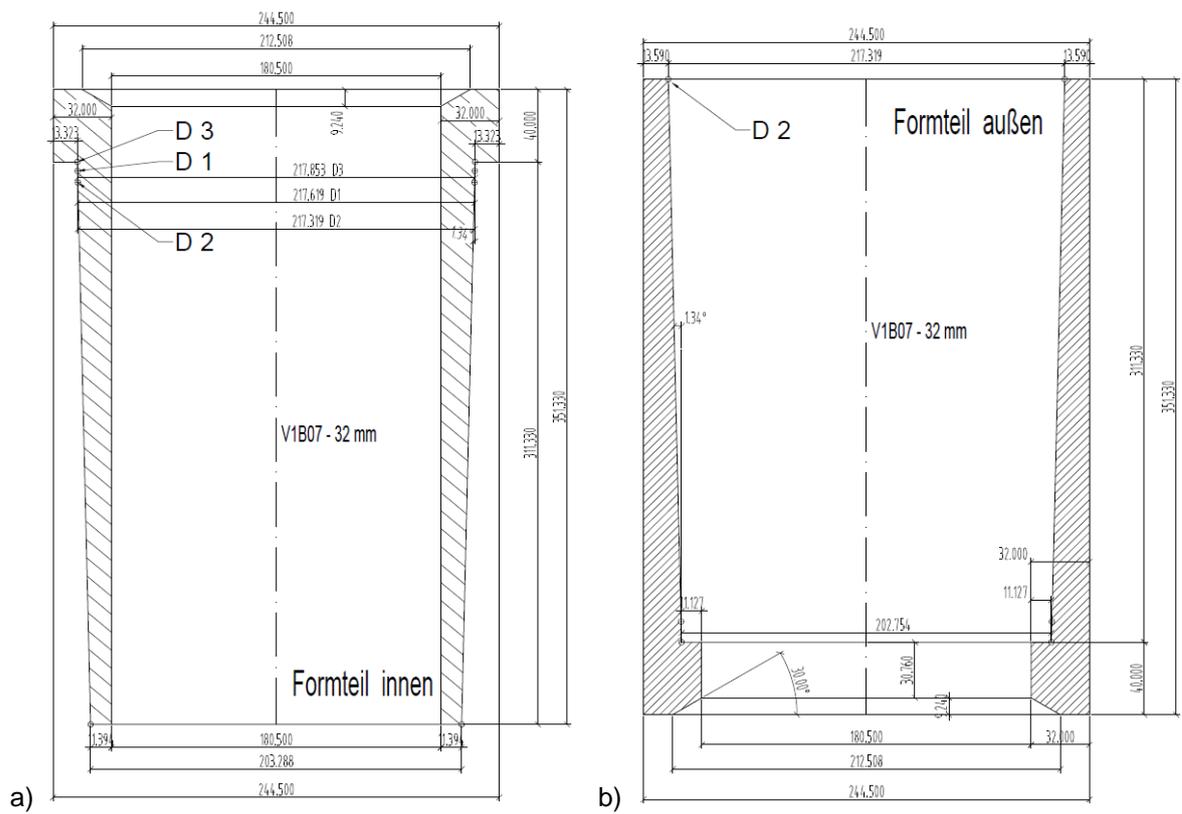


Abbildung 16-30: V1B07-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-30: V1B07 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

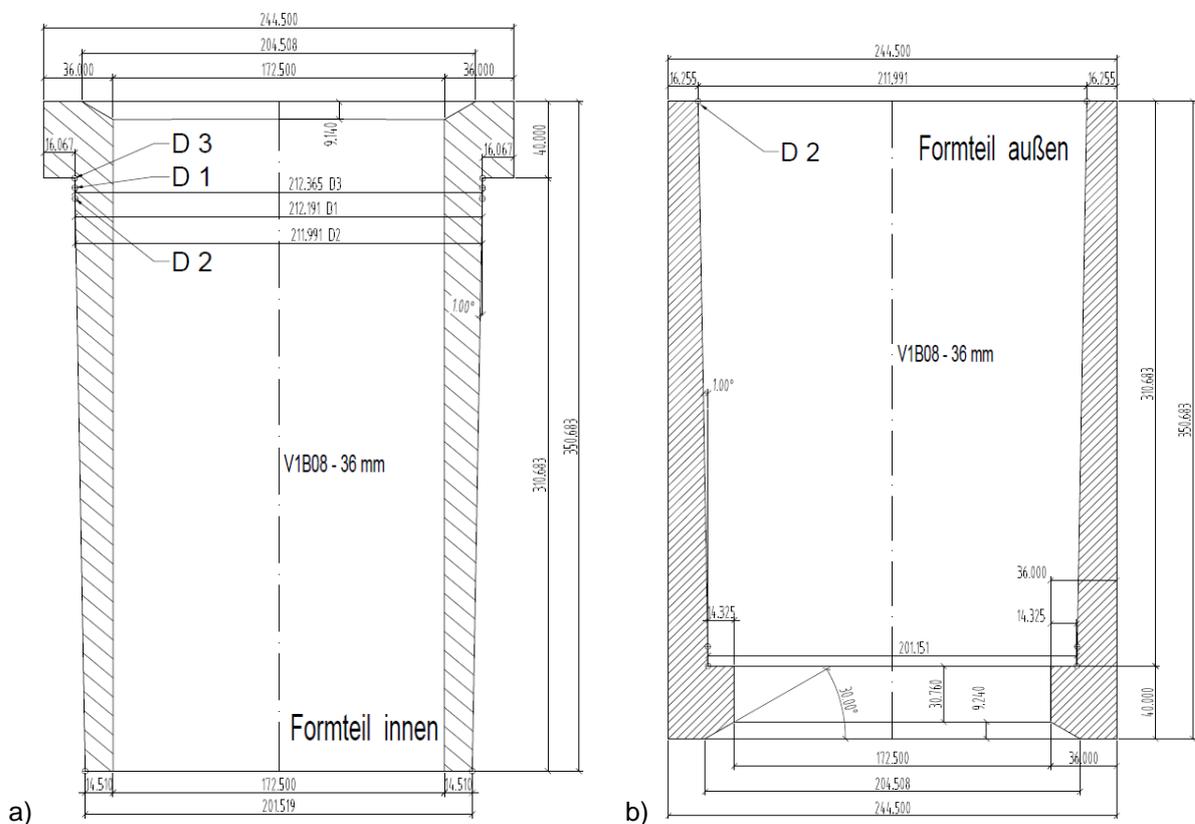


Abbildung 16-31: V1B08-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-31: V1B08 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

Anhang B  
Appendix B

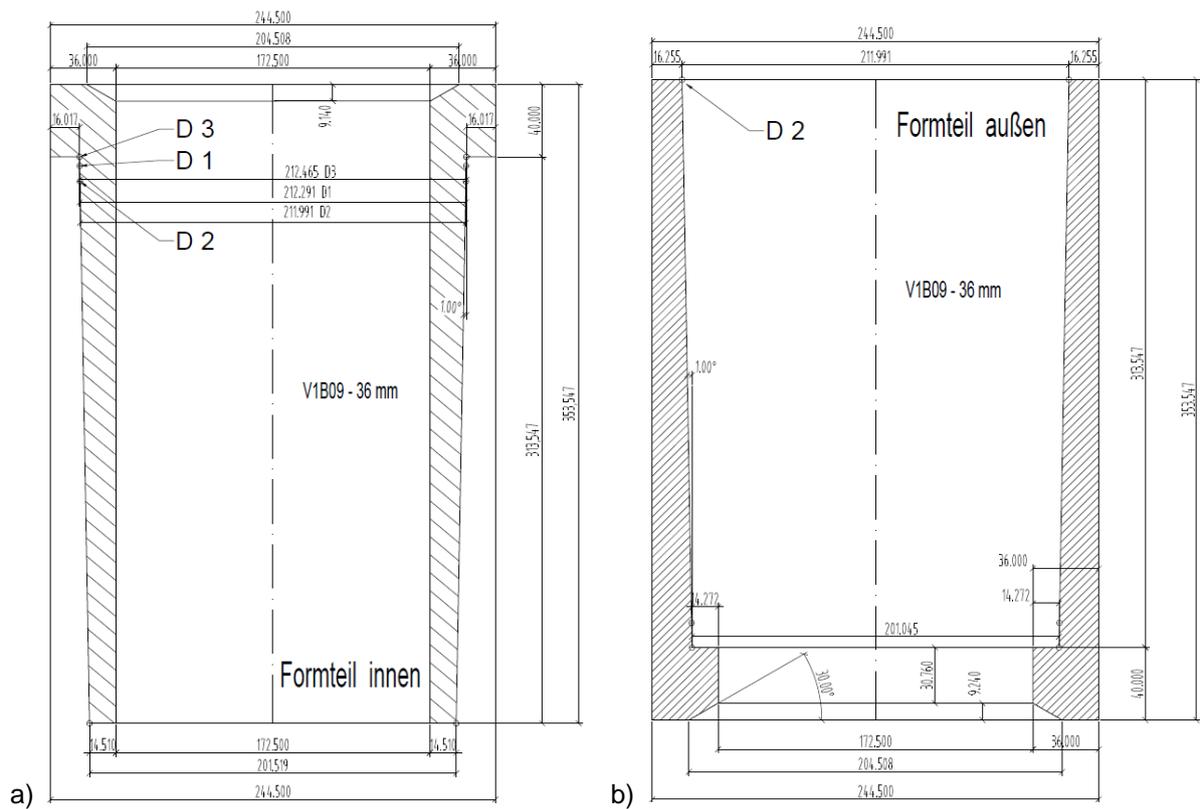


Abbildung 16-32: V1B09-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-32: V1B09 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

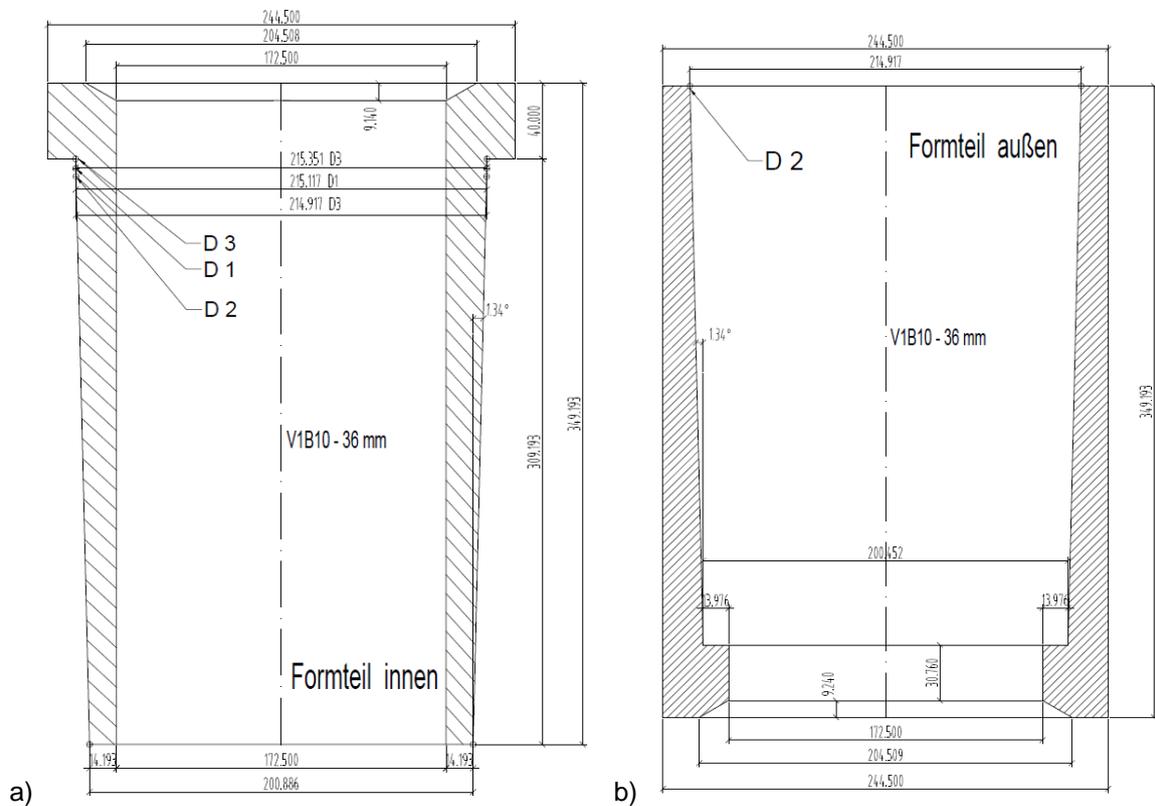


Abbildung 16-33: V1B10-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-33: V1B10 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

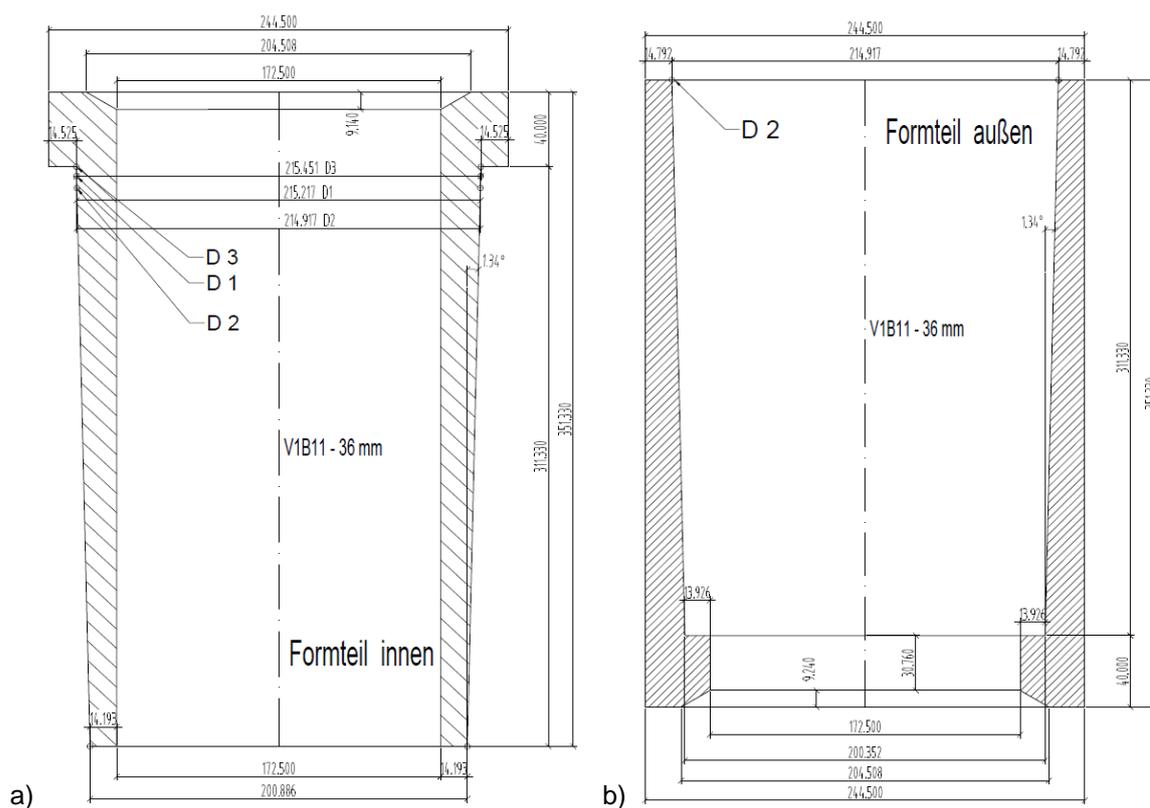


Abbildung 16-34: V1B11-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
 Figure 16-34: V1B11 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

**Großteilversuchsserie**

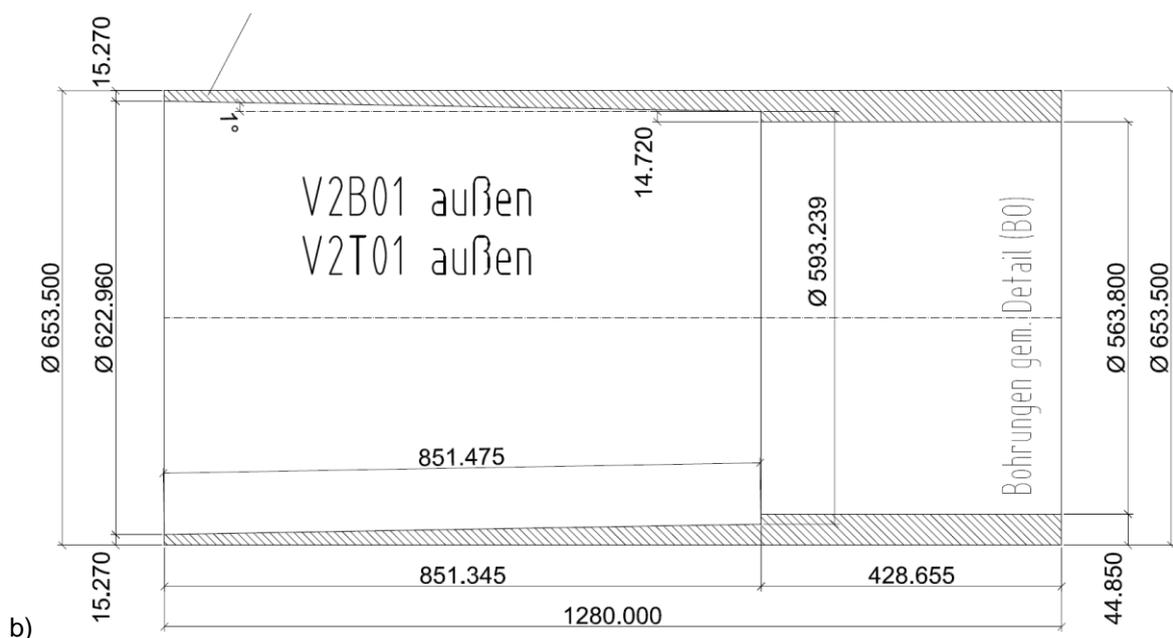
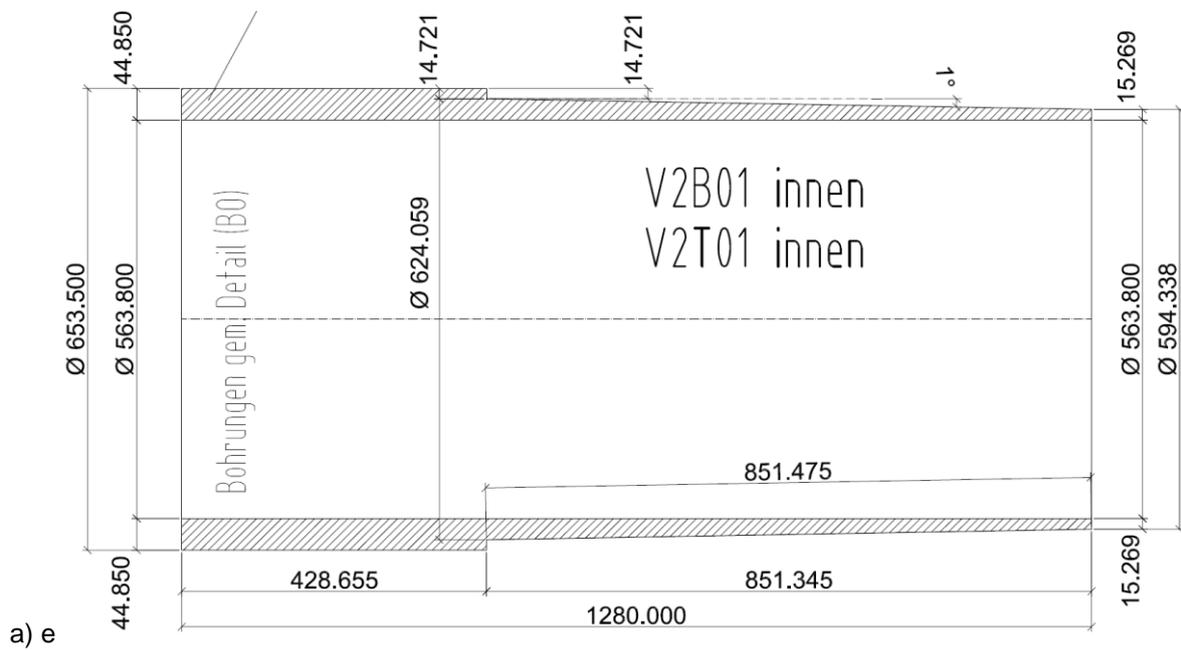


Abbildung 16-35: V2B01- und V2T01-Versuchskörper: a) Inneres Formteil, b) äußeres Formteil  
Figure 16-35: V2B01 – and V2T01 – Sample: a) internal moulding, b) external moulding

### Toleranzuntersuchung

Tabelle 16-10: Zusammenfassende Ergebnisse der Geometriemessung Maßstab 1:5  
Table 16-10: Summary results of the geometry measurement scale 1:5.

		o-da/ o-dal mm	o-di/ o-dil mm	u-da/ u-dal mm	u-di/ u-dil mm	t/ tl mm	tmin/ tminl mm	u-df/ o-dfl mm	αf / αfl °	LfA / Lfl mm	alfa/2 αerech °
01.1	V1T01-A1-P01	241,75	216,38	241,77	181,71	30,01	12,90	207,13	90,95	265,50	0,997
01.2	V1T01-A2-P01	241,78	216,38	241,83	182,16	29,84	12,72	207,14	91,00	265,50	0,997
02.1	V1T01-I1-P02	241,84	181,98	207,36	182,19	29,91	12,58	217,23	91,00	265,50	1,065
02.2	V1T01-I2-P02	241,93	181,24	207,71	181,77	29,98	12,47	216,83	91,00	265,50	0,983
03.1	V1T02-A1-P03	241,86	216,30	241,82	182,12	29,86	12,81	206,89	90,95	268,50	1,004
03.2	V1T02-A1-P03	241,72	216,15	241,75	181,82	29,96	12,80	206,91	91,00	268,50	0,986
04.1	V1T02-I1-P04	241,83	181,74	207,34	182,26	30,05	12,52	216,85	90,90	268,50	1,015
04.2	V1T02-I2-P04	242,08	181,49	207,66	181,18	30,03	12,76	216,80	91,00	268,50	0,976
05.1	V1T03-A1-P05	241,80	217,42	241,50	182,01	29,74	12,18	206,19	90,95	315,50	1,020
05.2	V1T03-A2-P05	241,72	217,37	241,78	182,05	29,88	12,18	205,77	90,95	316,50	1,049
05.3	V1T03-A3-P05	241,69	217,11	241,52	182,05	29,75	12,28	206,20	91,00	316,50	0,988
06.1	V1T03-I1-P06	241,80	181,88	206,41	181,91	29,98	12,25	217,70	90,95	315,60	1,025
06.2	V1T03-I2-P06	242,00	181,55	206,45	181,92	30,06	12,11	217,63	90,90	315,50	1,015
06.3	V1T03-I3-P06	241,74	181,80	206,41	181,96	29,97	12,18	217,88	91,00	315,50	1,041
07.1	V1T04-A1-P07	241,88	217,19	241,79	181,95	29,92	12,34	206,20	91,00	318,50	0,989
08.1	V1T04-I1-P08	241,82	181,80	206,66	182,06	29,98	12,28	218,00	90,95	318,50	1,020
09.1	V1T06-A1-P09	242,95	218,80	242,10	182,00	30,14	11,63	204,10	90,90	313,96	1,341
10.1	V1T06-I1-P10	241,92	182,01	204,87	182,00	29,98	11,29	219,50	91,00	314,50	1,333
11.1	V1T08-A1-P11	241,73	213,26	242,06	174,09	34,10	14,19	202,22	90,00	315,80	1,002
11.2	V1T08-A2-P11	242,04	212,13	242,12	173,39	33,99	14,50	202,40	91,00	316,50	0,881
12.1	V1T08-I1-P12	241,79	174,26	202,47	174,28	33,74	14,13	213,55	91,00	315,80	1,005
12.2	V1T08-I2-P12	241,27	174,03	202,63	174,37	33,77	14,12	213,80	91,00	316,02	1,012
13.1	V1T09-A1-P13	241,79	213,25	241,86	174,21	33,87	14,15	201,62	91,00	319,41	1,043
14.1	V1T09-I1-P14	241,76	174,41	202,48	174,45	33,91	14,10	213,58	91,00	319,21	0,997

		da/ dal mm	di/ dil mm	tmin/t minl mm	dfmin/ dfminl mm	dfmax/ dfmaxl mm	LfA+5/ Lfl+5 mm	alfa/2 °
01.1	V1B01-A1-P01	241,94	180,4	12,2	206,62	216,94	260	1
01.2	V1B01-A2-P01	241,93	180,49	12,25	206,87	216,98	260	
01.1	V1B01-I1-P02	242		14,03	209,02	217,64	259	1
01.2	V1B01-I2-P02	241,97		14	208,85	217,69	260	
02.1	V1B02-A1-P03	241,94	180,35	12,3	206,54	217,15	263	1
02.1	V1B02-I1-P04	242,01		14	209,01	217,75	263	
03.1	V1B03-A1-P05	242,13	180,35	12,31	204,8	217,15	311	1
03.2	V1B03-A2-P05	242,25	-	12,34	205,83	217,15	311	
03.1	V1B03-I1-P06	242,03		12,3	206,9	217,75	311	1
03.2	V1B03-I2-P06	242,06		12,54	206,91	217,75	309	
04.1	V1B04-A1-P07	241,96	181,79	12,21	206,41	217,37	312	1
04.1	V1B04-I1-P08	242,05		12,21	207,1	217,74	313	
05.1	V1B05-A1-P09	241,96	180,48	12,22	207,39	217,15	285	1
05.1	V1B05-I1-P10	242,02		13,61	208	217,74	285	
06.1	V1B06-A1-P11	242,05	181,5	12,1	202,96	216,67	309	1,34
06.2	V1B06-A2-P11	242	180,24	12,23	202,66	215,95	309	
06.1	V1B06-I1-P12	242,06		11,44	203,37	217,69	309	1,34
06.2	V1B06-I2-P12	242,1		11,36	203,31	217,6	309	
07.1	V1B07-A1-P13	242,01	180,47	12,31	203,04	216,26	310	1,34
07.1	V1B07-I1-P14	242,1		11,01	203,36	217,81	309	
08.1	V1B08-A1-P15	241,88	180,09	14,98	201,17	212,16	310	1
08.2	V1B08-A2-P15	241,98	173,66	14,96	201,21	212,26	310	
08.1	V1B08-I1-P16	242,03		14,1	201,61	212,37	310	1
08.2	V1B08-I2-P16	242,02		14,2	201,63	212,41	310	
09.1	V1B09-A1-P17	241,9	173,34	14,97	200,81	213,26	312	1
09.1	V1B09-I1-P18	241,99		14,16	201,61	212,64	313	
10.1	V1B10-A1-P19	241,86	173,41	13,58	199,26	215,33	310	1,34
10.2	V1B10-A2-P19	242,01	173,41	13,49	200,4	214,91	310	
10.1	V1B10-I1-P20	242,01		13,87	200,59	215,35	309	1,34
10.2	V1B10-I2-P20	242,07		13,93	201,11	215,3	310	
11.1	V1B11-A1-P21	242,02	173,81	13,74	200,41	215,25	309	1,34
11.1	V1B11-I1-P22	241,99		14,09	201,03	215,4	310	

Anhang B  
Appendix B

Tabelle 16-11: Zusammenfassende Ergebnisse der Geometriemessung Maßstab 1:2  
Table 16-11: Summary results of the geometry measurement scale 1:2.

	Pos.	Formteil	daA/	diA/	s-diA/	s-daA/	tA/	tminA/	tfA /	LfA /	LA /	afA /	dfA/	
			dal	dil	s-dil	s-dal	tl	tminl	tfl	Lfl	LI	αfl	dfI	
			653,50	563,80	622,96	653,50	44,85	15,27	14,72	851,34	1280,0	1,00	593,24	
			mm	mm	563,80	594,34	44,85	mm	mm	mm	mm	°	624,06	
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
V2B01-A1-P1.1	1.1	Achse 1	außen(A)	653,40	563,60	<b>622,20</b>	653,60	45,10	15,40	14,90	851,5	1280,0		593,40
Körper 4	Achse 2							45,10	15,50	14,90			1,00	
	Achse 3			653,40	563,50	<b>622,30</b>	653,40	45,00	15,40	14,90				
V2B01-I1-P1.2	1.2	Achse 1	innen(I)	653,60	564,00	563,50	<b>594,40</b>	44,97	15,53	14,90	851,5	1279,0		623,90
Körper 4	Achse 2							44,90	15,31	14,80			0,90	
	Achse 3			653,30	563,40	564,00	<b>594,30</b>	44,72	15,20	15,00				
V2B02-A2-P2.1	2.1	Achse 1	außen(A)	653,40	563,80	<b>622,00</b>	653,00	44,80	15,40	15,00	851,5	1279,5		593,70
Körper 1	Achse 2							44,80	15,50	14,90			0,98	
	Achse 3			653,40	563,50	<b>622,10</b>	653,40	44,80	15,50	15,00				
V2B02-I2-P2.2	2.2	Achse 1	innen(I)	653,40	563,00	563,50	<b>593,60</b>	45,10	15,30	14,90	851,5	1280,0		623,60
Körper 1	Achse 2							44,90	15,40	14,90			1,00	
	Achse 3			653,50	563,90	563,60	<b>593,60</b>	45,00	15,40	14,90				
V2T01-A1-P3.1	3.1	Achse 1	außen(A)	653,30	563,50	<b>622,30</b>	653,30	45,10	15,40	14,90	851,5	1280,0	1,05	593,30
Körper 2	Achse 2							45,00	15,10	14,90				
	Achse 3			653,30	563,60	<b>622,20</b>	653,30	45,10	15,20	14,90				
V2T01-I1-P3.2	3.2	Achse 1	innen(I)	653,40	563,80	563,40	<b>594,70</b>	45,00	15,40	15,00	851,5	1279,5		623,40
Körper 2	Achse 2							44,90	15,40	15,00			1,00	
	Achse 3			653,30	563,70	564,40	<b>594,60</b>	45,00	15,00	14,90				
V2T02-A2-P4.1	4.1	Achse 1	außen(A)	653,30	563,40	<b>622,20</b>	653,85	45,00	15,60	15,00	851,5	1280,0		593,30
Körper 3	Achse 2							45,00	15,60	14,90			1,00	
	Achse 3			653,50	563,80	<b>622,20</b>	653,50	45,00	15,50	14,80				
V2T02-I2-P4.2	4.2	Achse 1	innen(I)	653,30	563,60	564,40	<b>594,60</b>	44,90	15,30	15,00	851,5	1279,5		623,20
Körper 3	Achse 2							44,90	14,60	15,00			1,00	
	Achse 3			653,40	563,80	563,40	<b>594,60</b>	45,00	16,00	15,10				

Tabelle 16-12: Ergebnisse der Toleranzuntersuchung der Probekörper im Maßstab 1:2  
Table 16-12: Results of the tolerance analysis of the samples scale 1:2.

	Pos.		Formteil	Innenkörper		Außenkörper		Gesamttoleranz je Prüfkörper			
				Fuge 1 dfl	Fuge 2 s-dal	Fuge 1 s-diA	Fuge 2 dfA	TK ges. min	TK ges. max	TK Tor- sion	IT Bie- gung
V2B01-A1-P1.1 Körper 4	1.1	Achse 1 Achse 2 Achse 3	außen(A)			U13 U12	D9	D9	U13	-	+1
V2B01-I1-P1.2 Körper 4	1.2	Achse 1 Achse 2 Achse 3	innen(I)	d9	n7			d9	n7	-	-12
V2B02-A2-P2.1 Körper 1	2.1	Achse 1 Achse 2 Achse 3	außen(A)			U13 U13	D12	D12	U13	-	-10
V2B02-I2-P2.2 Körper 1	2.2	Achse 1 Achse 2 Achse 3	innen(I)	d12	d13			d12	d13	-	-12
V2T01-A1-P3.1 Körper 2	3.1	Achse 1 Achse 2 Achse 3	außen(A)			U12 U13	F7	F7	U13	U12	-
V2T01-I1-P3.2 Körper 2	3.2	Achse 1 Achse 2 Achse 3	innen(I)	d12	s11			d12	s11	r10	-
V2T02-A2-P4.1 Körper 3	4.1	Achse 1 Achse 2 Achse 3	außen(A)			U13 U13	F7	F7	U13	U13	-
V2T02-I2-P4.2 Körper 3	4.2	Achse 1 Achse 2 Achse 3	innen(I)	d13	r10			d13	r10	r10	-
				Grenzwerte der Tabellen, d.h. eigentlich nicht definiert				ungünstigster Fall der geometrischen Abmessung	ungünstigster Fall der geometrischen Abmessung	ungünstigster Durchmesser an Steckseite	ungünstigste Abmessung aus Dicke und Länge (+/-)

**Ergebnisse Kleinteilversuchsserie**

Tabelle 16-13: Zusammenfassende Ergebnisse der Versuchsreihe Verpressen im Maßstab 1:2  
Table 16-13: Summarized results of test sequence pressing of the samples scale 1:2.

	VT03_2	VT01_2	VT01_1	VT03_1	VT08_1	VT08_2	VT06_1	VT03_3	VT02_1	VT02_2	VT04_1	VT09_1
Aufschubweg	5,45	7,40	6,90	5,90	6,19	5,92	5,17	7,24	10,00	9,94	10,26	8,47
Spalt	4,79	4,45	4,78	5,04	4,83	4,84	5,14	5,04	5,07	5,20	5,33	5,75
Übermaß	0,19	0,26	0,24	0,21	0,22	0,21	0,24	0,25	0,35	0,35	0,36	0,30
Neigung	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,34	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fugenlänge	311,71	261,05	260,73	310,46	310,97	260,66	309,36	311,46	260,43	260,30	313,17	259,75
Geometrie-verhältnis Lf/D	1,29	1,08	1,08	1,28	1,29	1,08	1,28	1,29	1,08	1,08	1,29	1,07
Durchmesser aussen	241,86	241,86	241,79	241,80	241,76	241,65	242,44	241,72	241,84	241,90	241,85	241,77
Nabenverhältnis	0,88	0,88	0,88	0,88	0,86	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,86
Durchmesser Fuge innen	206,62	207,31	206,89	206,60	200,94	202,63	203,77	206,29	207,13	207,21	206,50	202,76
tmin außen	12,18	12,72	12,90	12,18	14,98	14,96	12,10	12,28	12,81	12,80	12,21	14,97
Verpresskraft	396,4	452,22	452,66	465,90	489,80	495,90	505,75	560,6	589,30	638,8	750,77	750,90
Mü parallel	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,23	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Fugendruck	11,22	15,23	15,30	13,24	14,28	17,11	10,91	15,91	19,91	21,59	21,16	25,99
Umfangsdehn. maßg. Stelle	694,00	832,00	800,00	662,00	870,00	840,00	1063,00	935,00	1304,00	1094,00	1306,00	1236,00
Ausnutzung Verpressen	0,42	0,51	0,49	0,40	0,53	0,51	0,65	0,57	0,79	0,67	0,79	0,75
Mt Versuch	56,1839	73,12	67,37	59,82	71,95	82,10	62,72	80,6162	108,44	88,4866	115,44	123,91
Torsion Rohr	178,25	187,40	189,28	178,22	207,35	210,57	172,23	179,14	188,40	188,41	178,48	210,98
Vergleich zum Referenzrohr	0,32	0,39	0,36	0,34	0,35	0,39	0,36	0,45	0,58	0,47	0,65	0,59

	V1B01-1	V1B01-2	V1B02-1	V1B03-1	V1B04-1	V1B05-1	V1B06-1	V1B06-2	V1B07-1	V1B08-1	V1B08-2	V1B09-1	V1B10-1	V1B10-2	V1B11-1
Aufschubweg	8,16	7,93	10,70	6,99	9,55	7,87	6,52	6,52	8,79	6,20	8,94	11,70	6,40	6,59	8,11
Übermaß	0,24	0,23	0,34	0,22	0,32	0,23	0,26	0,28	0,36	0,24	0,25	0,36	0,26	0,27	0,34
Neigung	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,34	1,34	1,00	1,00	1,00	1,00	1,34	1,34	1,34
Fugenlänge	260,00	260,00	263,00	311,00	312,00	285,00	309,00	309,00	310,00	310,00	310,00	312,00	310,00	310,00	310,00
Geometrie-verhältnis Lf/D	1,06	1,05	1,06	1,26	1,27	1,16	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,27	1,26	1,26	1,26
Durchmesser aussen	241,94	241,93	241,94	242,13	241,96	241,96	242,05	242,00	242,01	241,88	241,98	241,90	241,86	242,01	242,02
Nabenverhältnis	0,881	0,881	0,881	0,875	0,877	0,879	0,869	0,869	0,870	0,856	0,855	0,856	0,861	0,860	0,860
Durchmesser Fuge innen	213,33	213,27	213,38	212,03	212,42	212,87	210,53	210,46	210,59	206,99	207,02	207,13	207,97	208,21	208,22
tmin außen	12,20	12,25	12,30	12,31	12,21	12,22	12,10	12,23	12,31	14,98	14,96	14,97	13,58	13,49	13,74
Verpresskraft	465,88	464,97	680,37	393,18	638,56	500,05	658,49	636,32	848,75	659,85	692,87	948,58	636,26	661,16	964,32
Mü parallel	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,23	0,23	0,17	0,17	0,17	0,17	0,23	0,23	0,23
Fugendruck	15,22	15,21	23,29	11,40	18,37	15,71	19,20	18,02	23,99	19,10	20,06	28,02	16,93	17,63	27,60
Umfangsdehn. maßg. Stelle	782,9	793,8	1156,0	694,8	1066,0	798,4	845,3	843,1	1103,0	856,1	859,4	1132,0	874,7	979,1	1145,0
Ausnutzung Verpressen	0,48	0,48	0,70	0,42	0,65	0,49	0,51	0,51	0,67	0,52	0,52	0,69	0,53	0,60	0,70

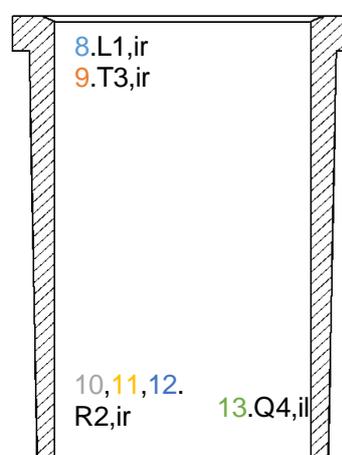
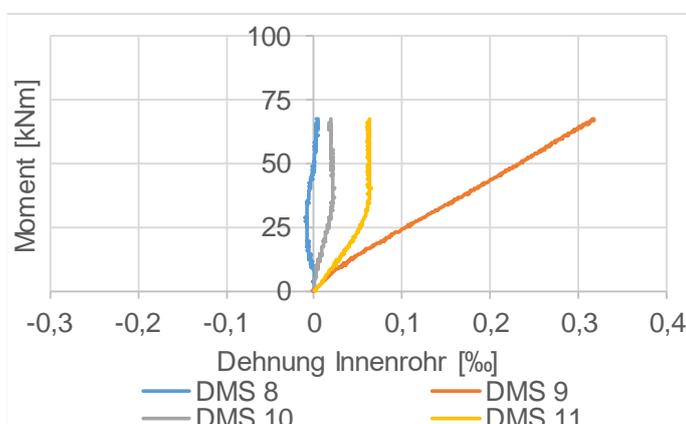
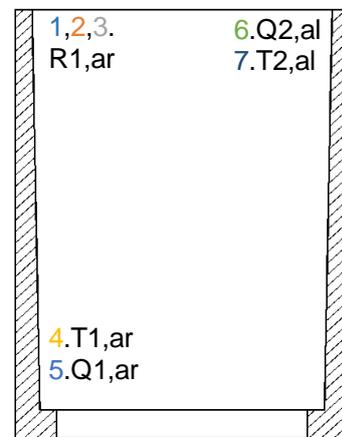
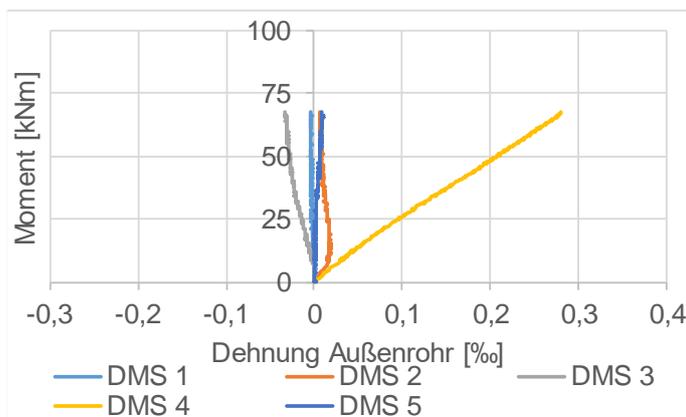
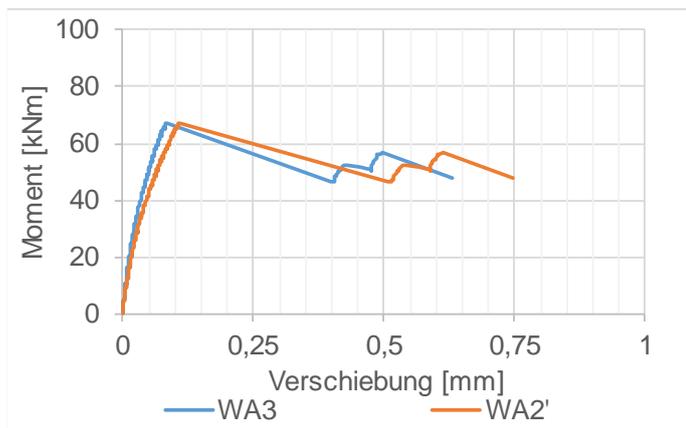
Versuchsreihe Torsion:

**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT01_1
Verpresskraft:	452,66 kN
Verpressweg:	6,9 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	67,37 kNm
max. u_ umf:	0,086 mm

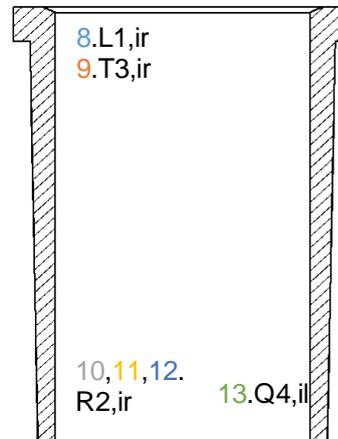
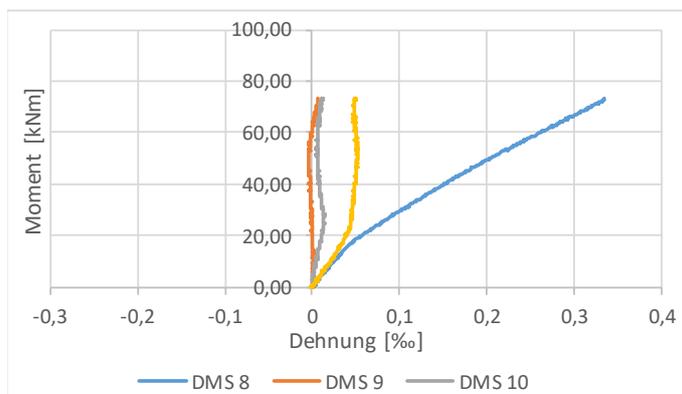
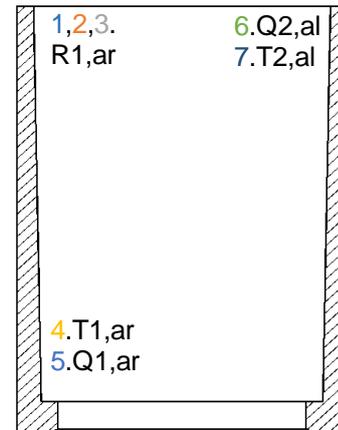
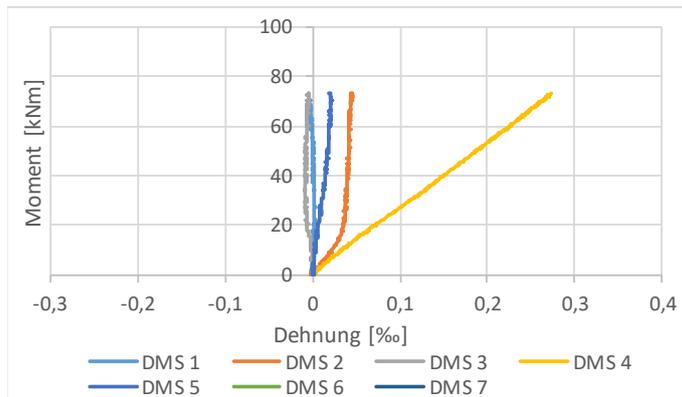
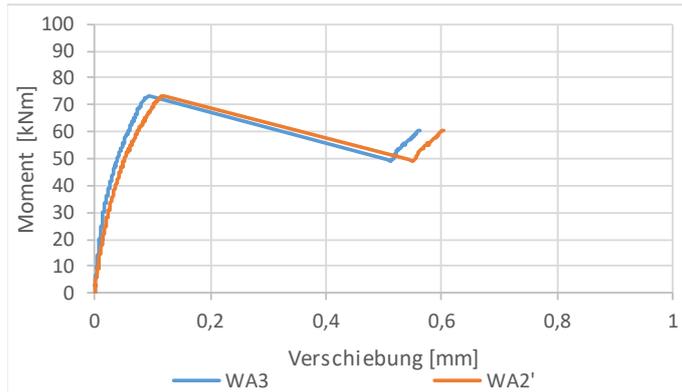


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT01_2
Verpresskraft:	452,22 kN
Verpressweg:	7,4 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	73,12 kNm
max. u_ umf:	0,093 mm

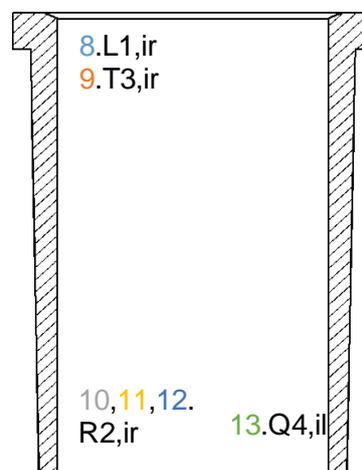
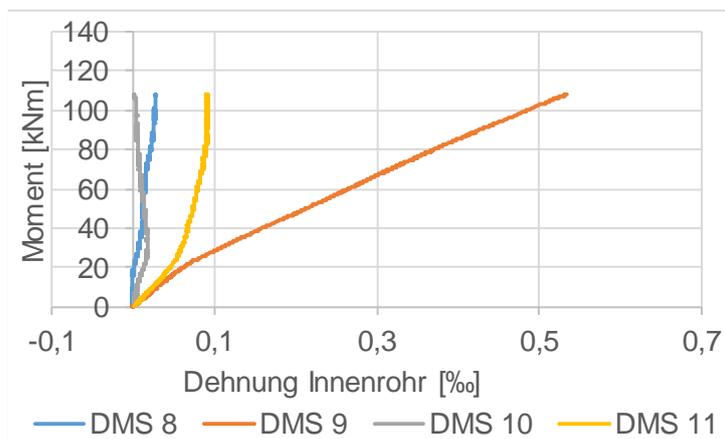
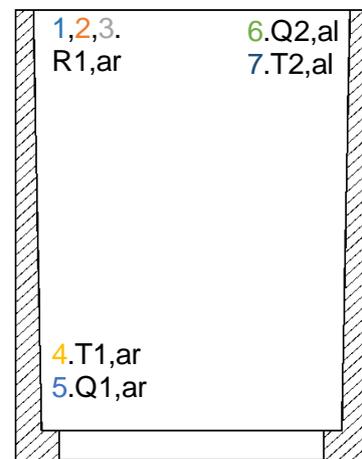
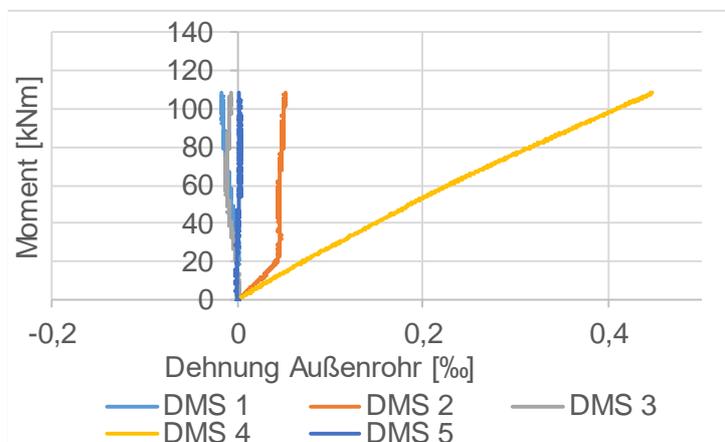
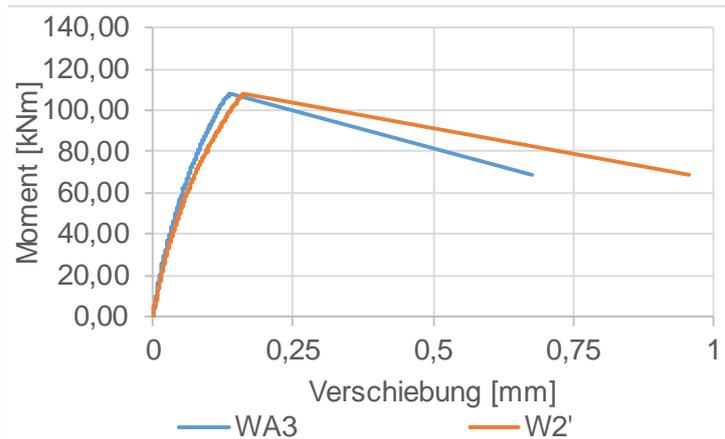


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT02_1
Verpresskraft:	589,3 kN
Verpressweg:	10 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	108,44 kNm
max. u_ umf:	0,139 mm

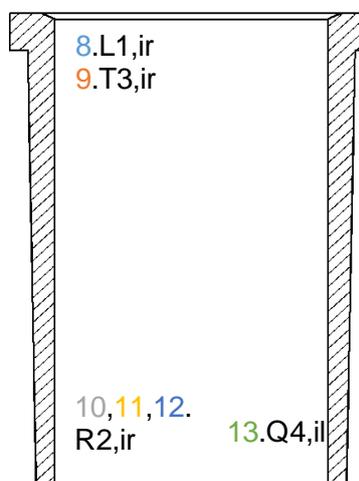
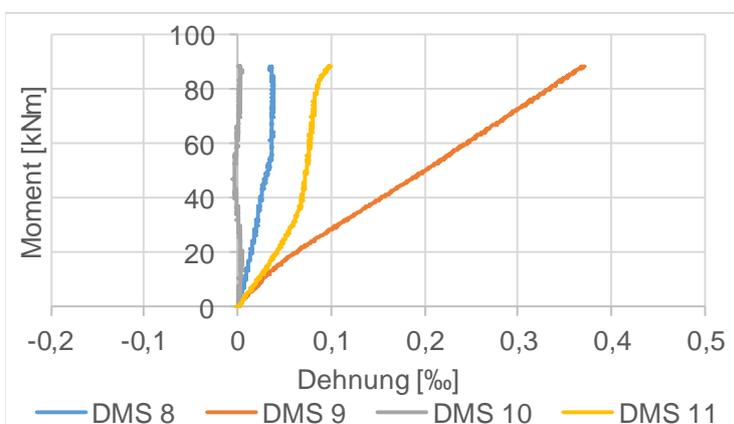
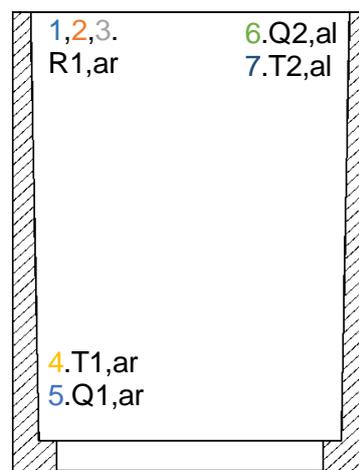
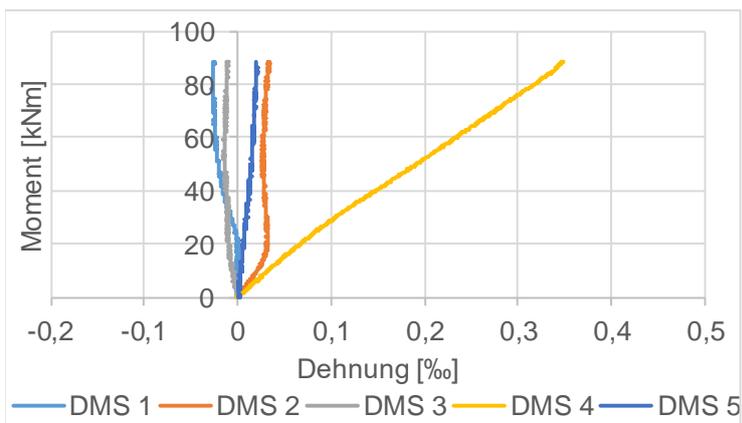
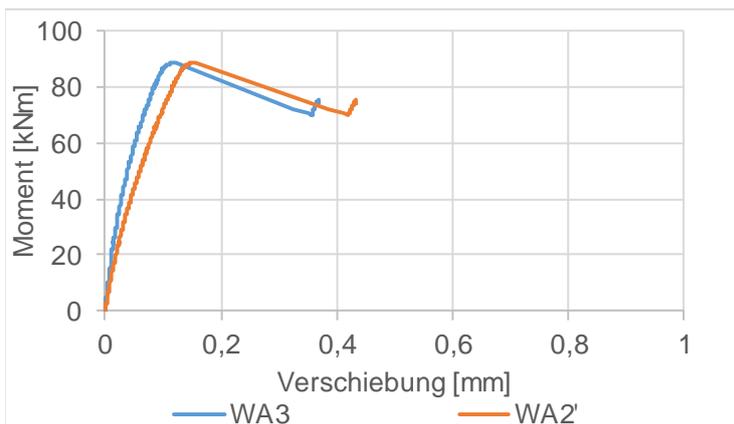


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT02_2
Verpresskraft:	638,8 kN
Verpressweg:	9,94 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	88,49 kNm
max. u_ umf:	0,118 mm

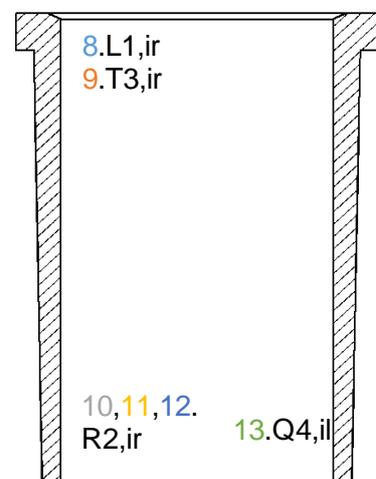
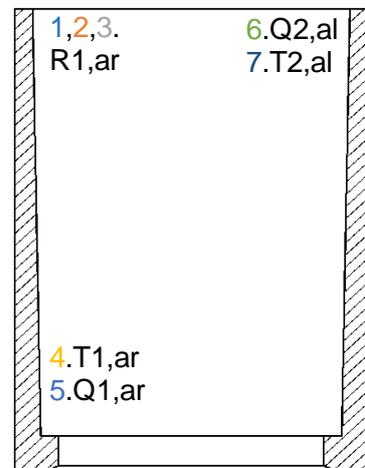
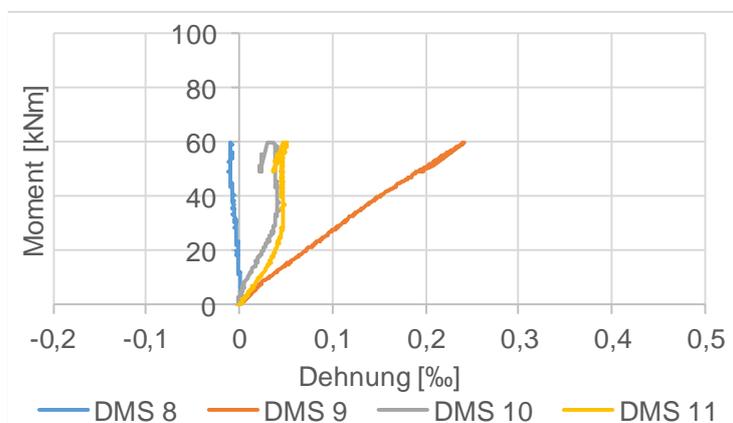
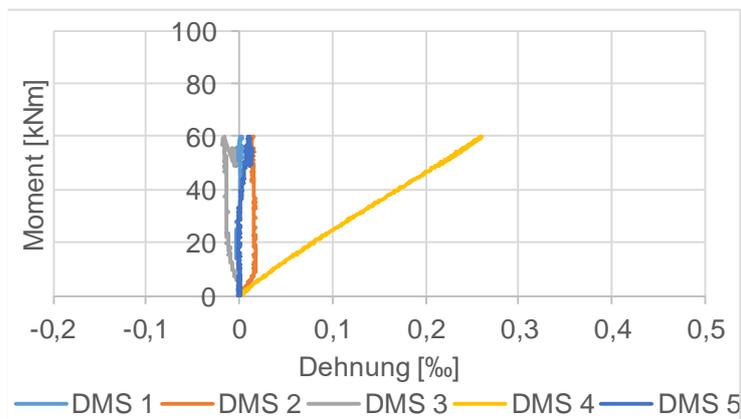
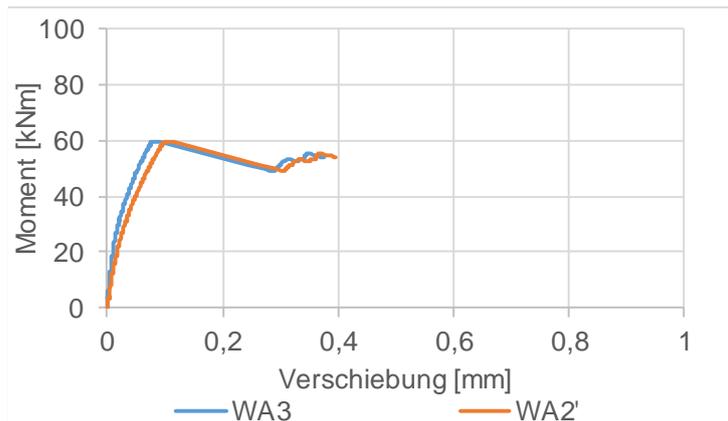


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT03_1
Verpresskraft:	465,9 kN
Verpressweg:	5,9 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	59,82 kNm
max. u_umf:	0,085 mm

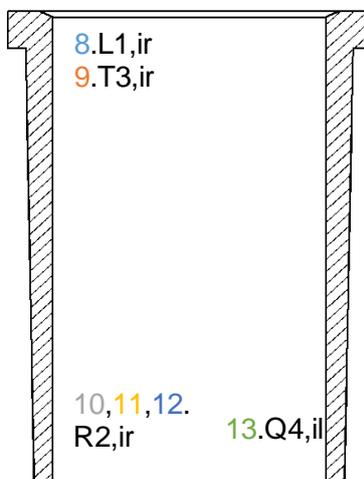
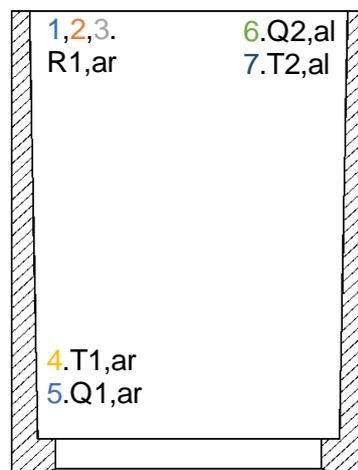
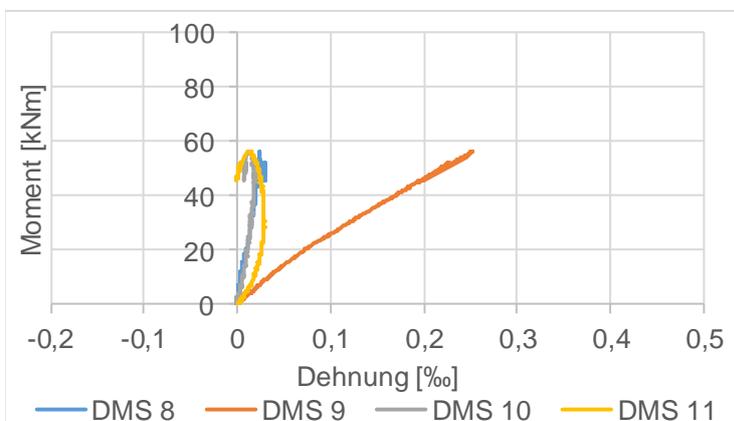
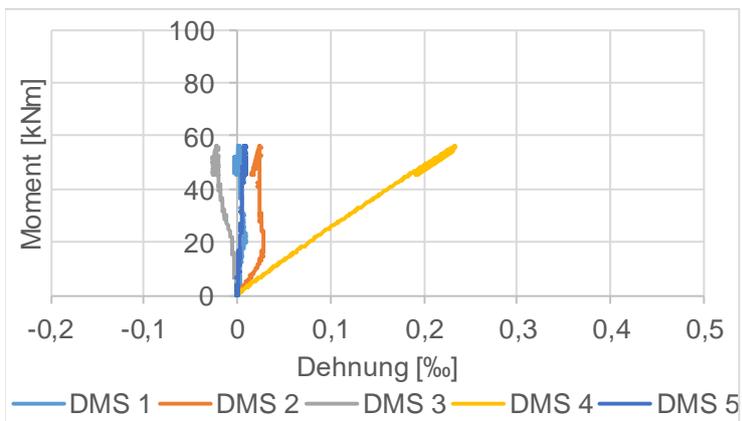
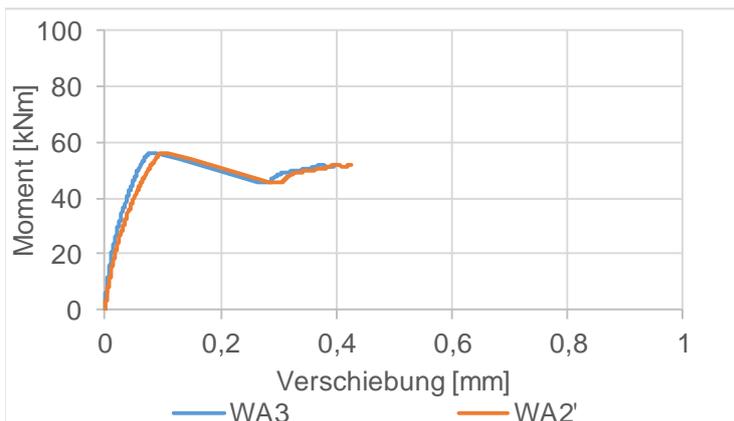


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT03_2
Verpresskraft:	396,4 kN
Verpressweg:	5,45 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	56,18 kNm
max. u_ umf:	0,076 mm

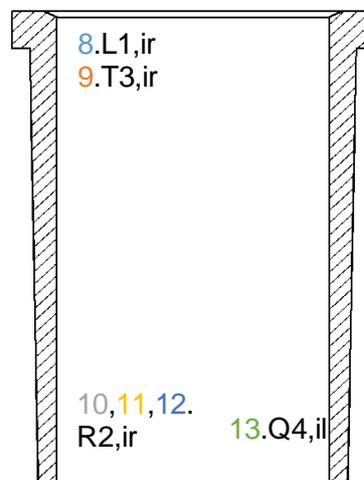
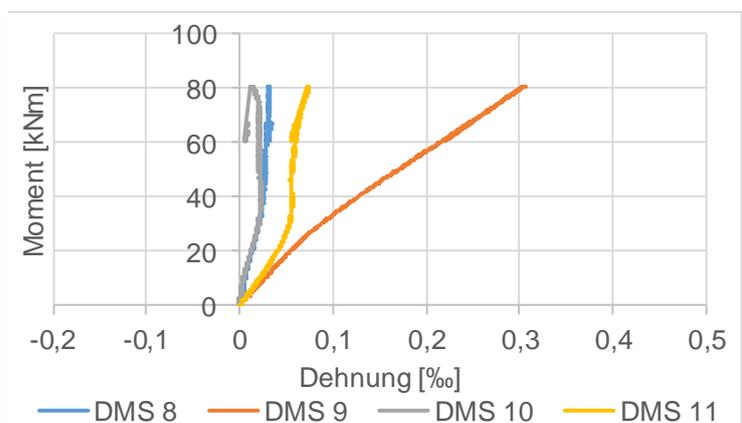
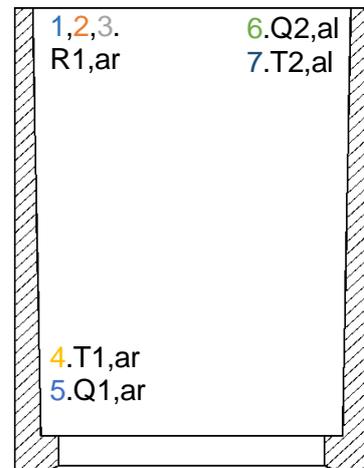
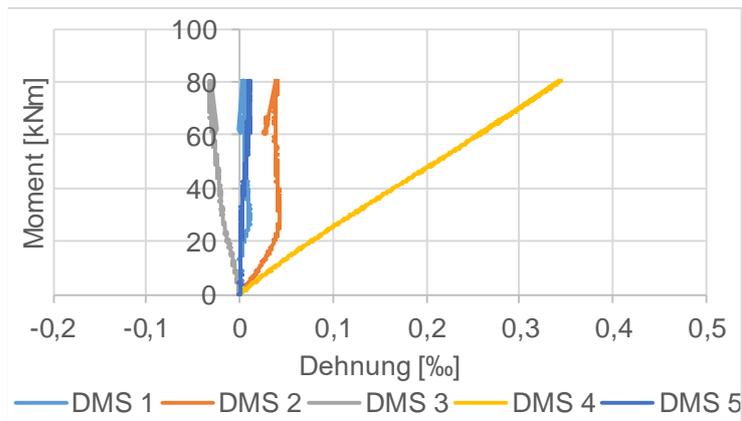
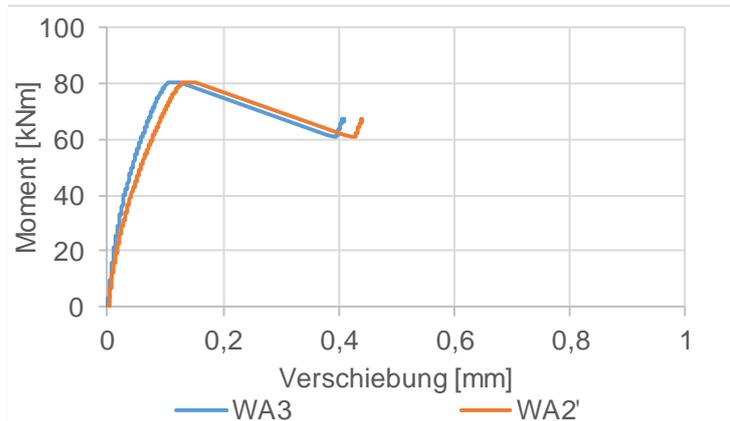


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT03_3	
Verpresskraft:	560,6	kN
Verpressweg:	7,24	mm
analyt. max M:		

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	80,62	kNm
max. u_umf:	0,11	mm

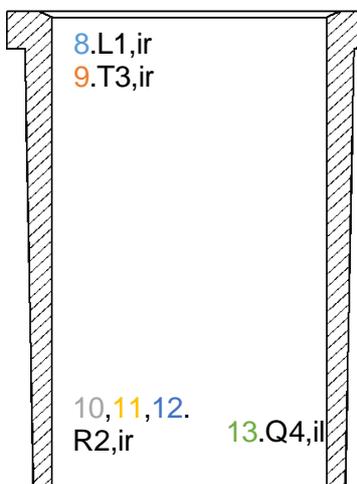
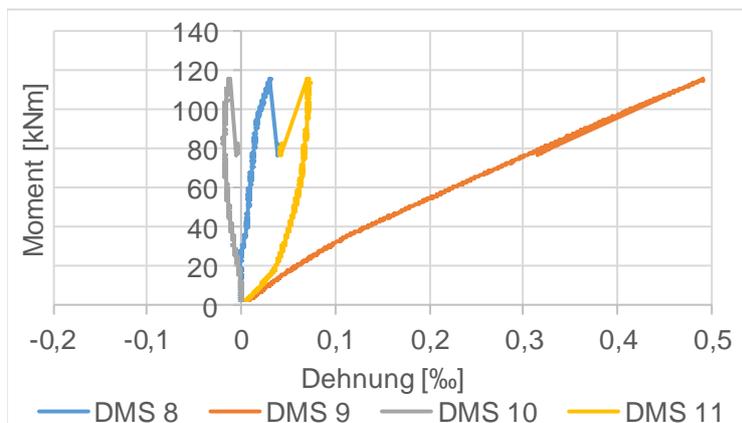
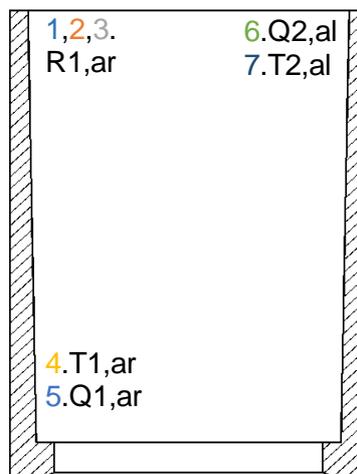
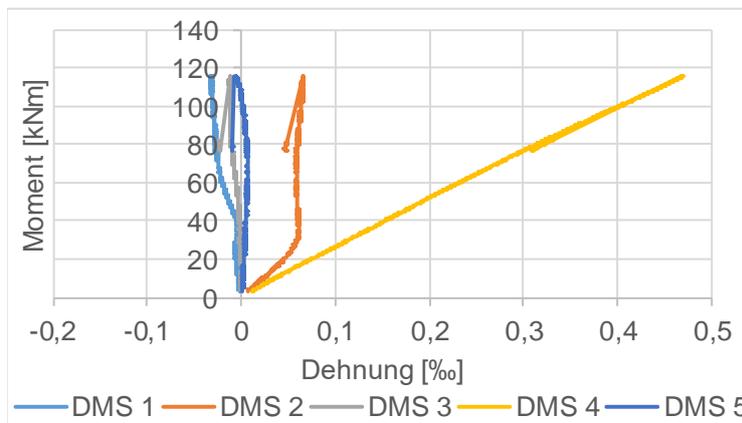
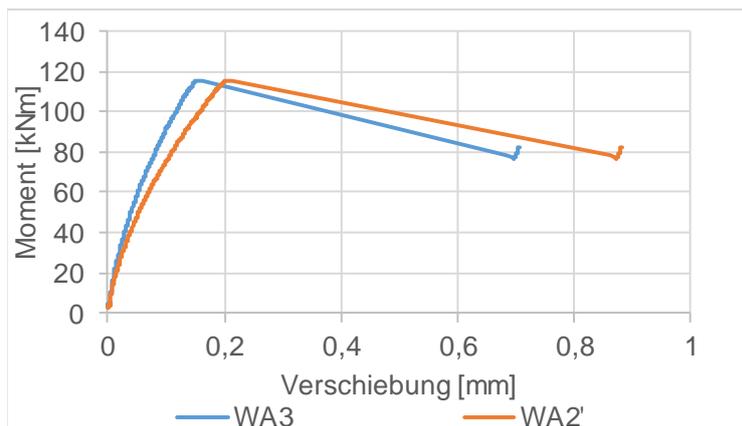


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT04_1	
Verpresskraft:	750,77	kN
Verpressweg:	10,26	mm
analyt. max M:		

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	115,34	kNm
max. u_umf:	0,153	mm

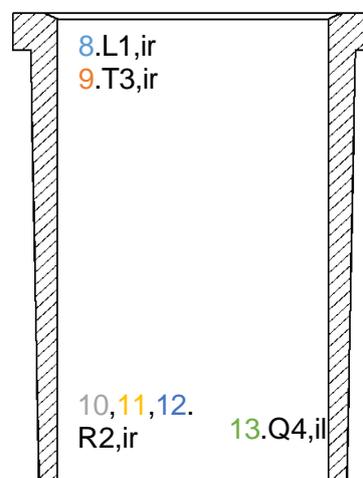
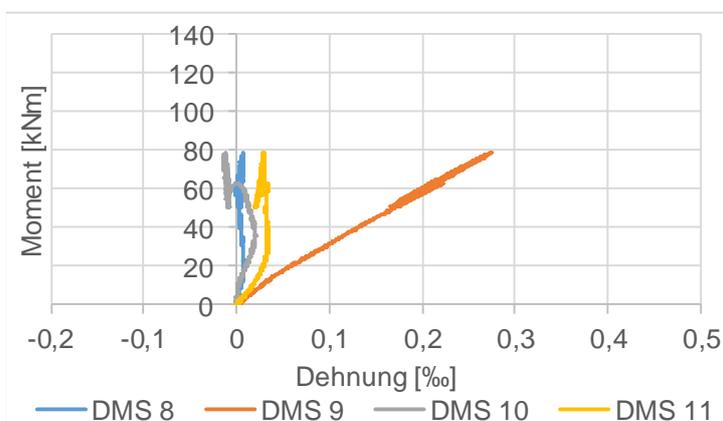
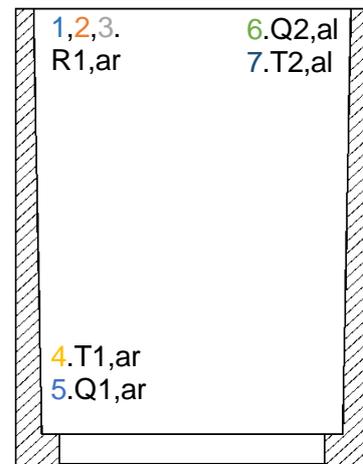
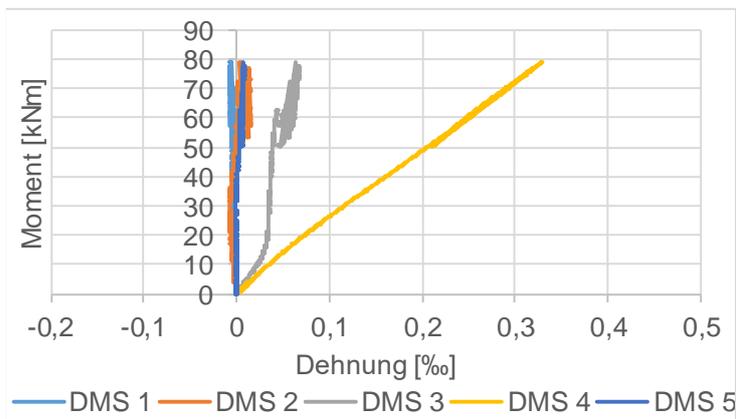
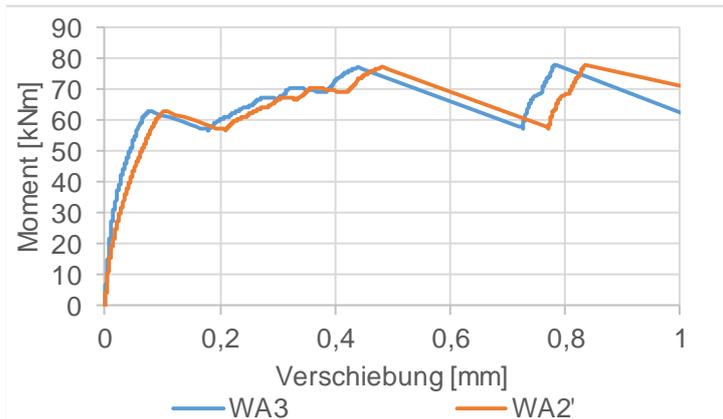


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT06_1
Verpresskraft:	505,75 kN
Verpressweg:	5,17 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	63,45 kNm
max. u_ umf:	0,235 mm

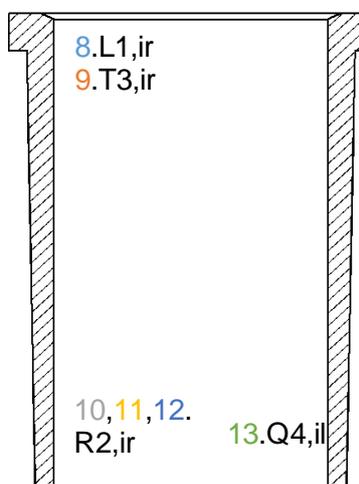
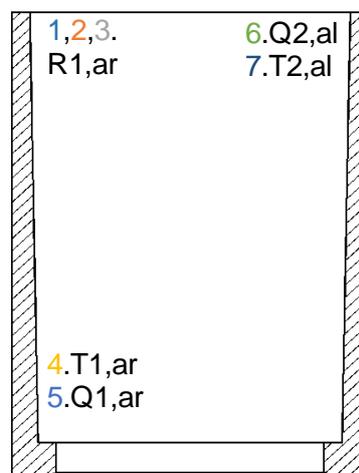
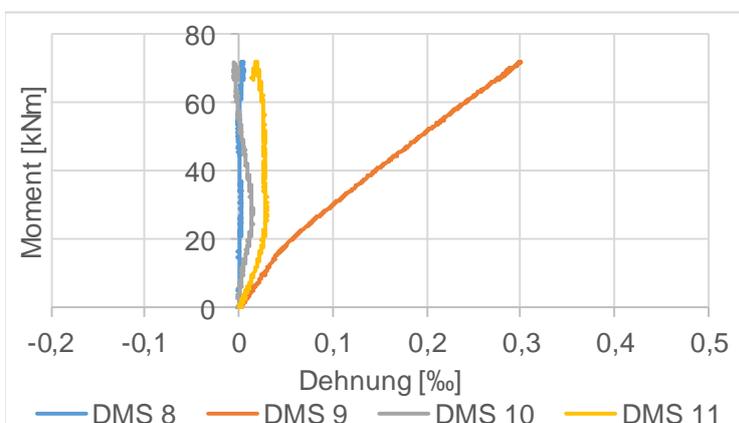
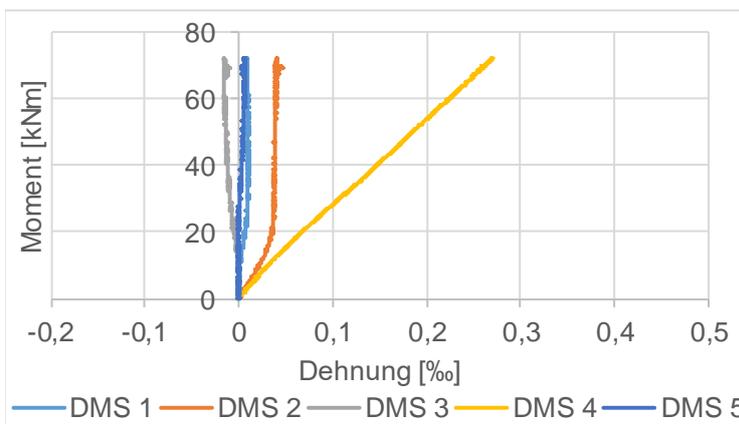
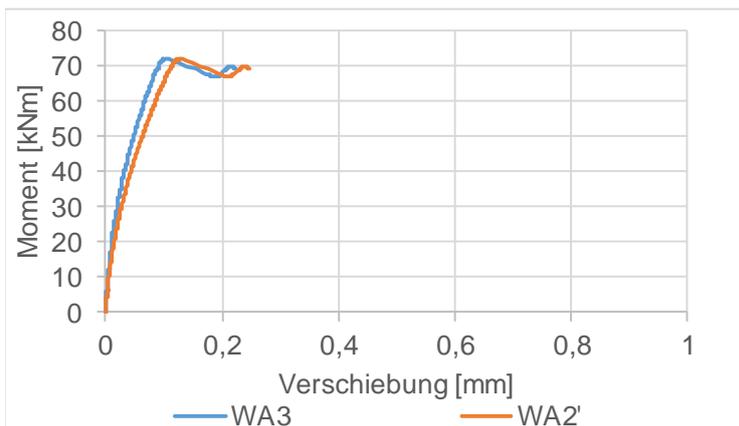


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT08_1	
Verpresskraft:	489,8	kN
Verpressweg:	6,19	mm
analyt. max M:		

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	71,95	kNm
max. u_ umf:	0,104	mm

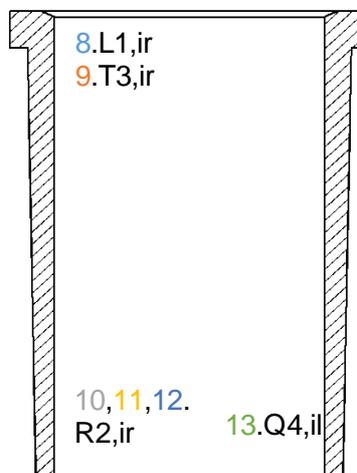
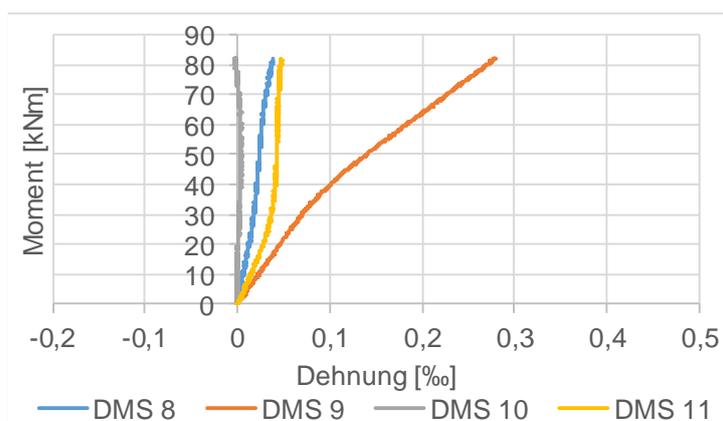
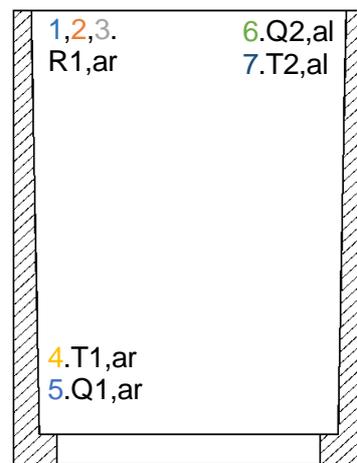
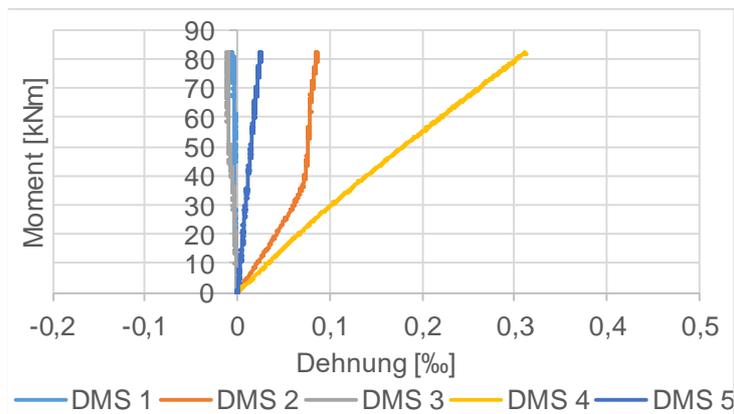
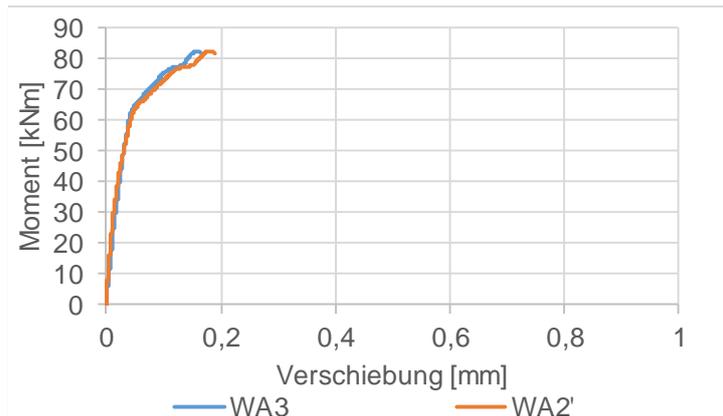


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT08_2
Verpresskraft:	495,9 kN
Verpressweg:	5,92 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	82,10 kNm
max. u_umf:	0,157 mm

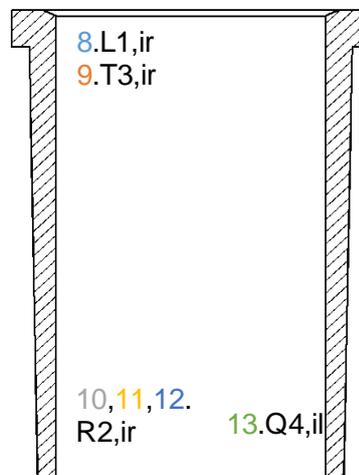
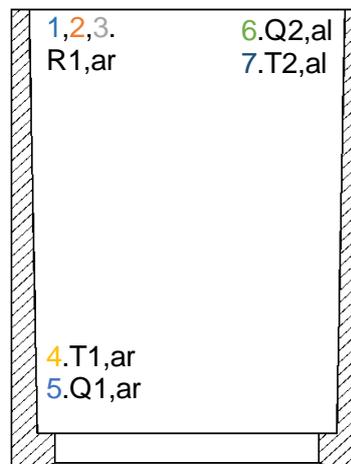
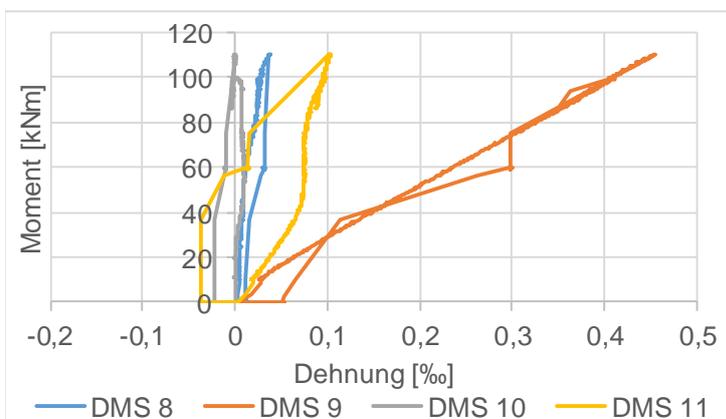
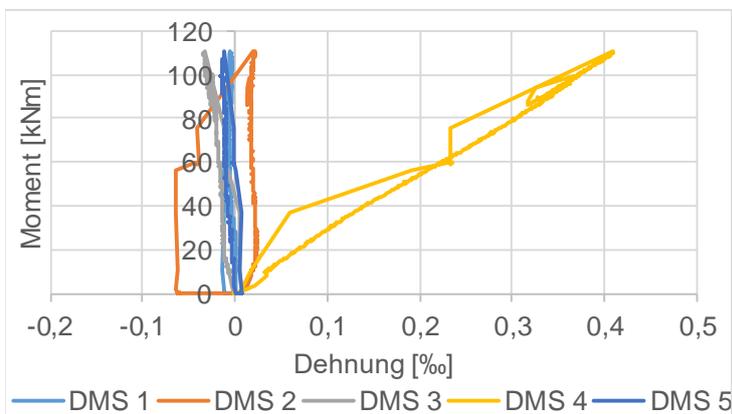
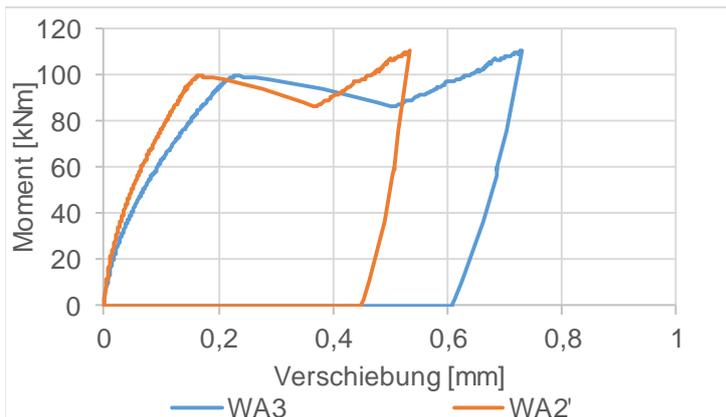


**Grunddaten**

Versuchsnr.:	VT09_1
Verpresskraft:	750 kN
Verpressweg:	8,47 mm
analyt. max M:	

**Werte bis zum ersten Rutschen**

max. M:	110,57 kNm
max. u_ umf:	0,731 mm



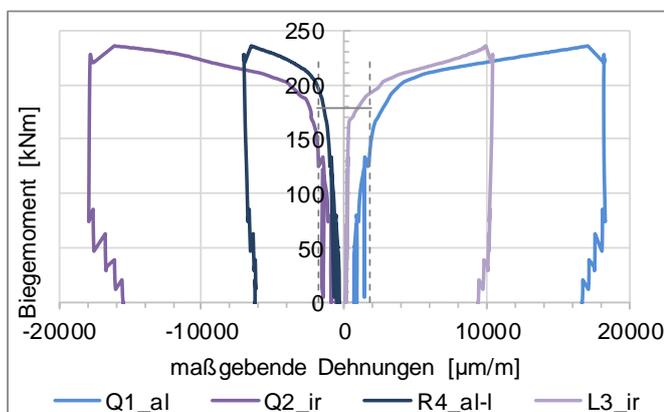
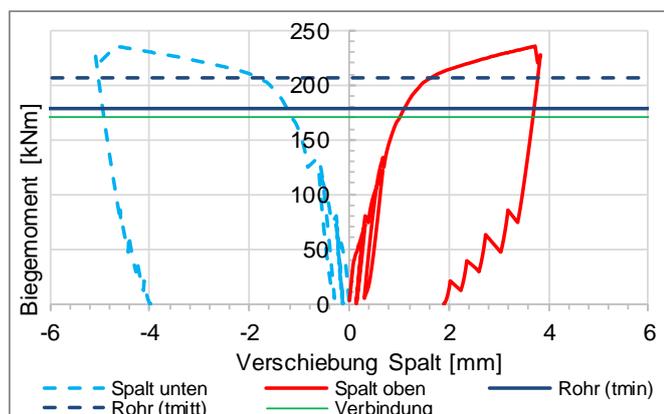
Versuchsreihe Biegung:

Pressverbindung V01B01-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub- weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>465,87632</b>	0,28	8,16	Grenze des elastischen Bereichs		<b>170,6882</b>
Ausnutzung		0,017515	1,93427	-1,09793	max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
43,44%			max	min	
			3,83297	-5,08858	
			Rest nach Entlasten		
			1,8987	-3,99065	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,200	<b>178,489</b>	95,63%	0,95629481	
tmitte außen	14,479	<b>206,607</b>	82,62%	0,82615068	
Dicke	31,000	<b>362,736</b>	47,06%	0,4705572	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
f <sub>y</sub>	378,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1800,00	µm/m
L fuge	260,00	mm
Durchmesser	241,94	mm
R außen	120,97	mm
D innen	206,62	mm
r max innen	109,05	mm
r mitte innen	106,77	mm
r min innen	90,25	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,20	mm
tmitte außen	14,48	mm
A außen	9428,04	mm <sup>2</sup>
W außen	472193,48	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	546578,46	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	959620,15	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,03	mm
Fugenlänge	260,00	mm
Neigung	1,00	°
Restfuge	4,68	mm
dm	211,16	mm
Mü reib	0,16	
max. el. Dehnung	1800,00	µm/m
Fugendruck	<b>15,22</b>	N/mm <sup>2</sup>

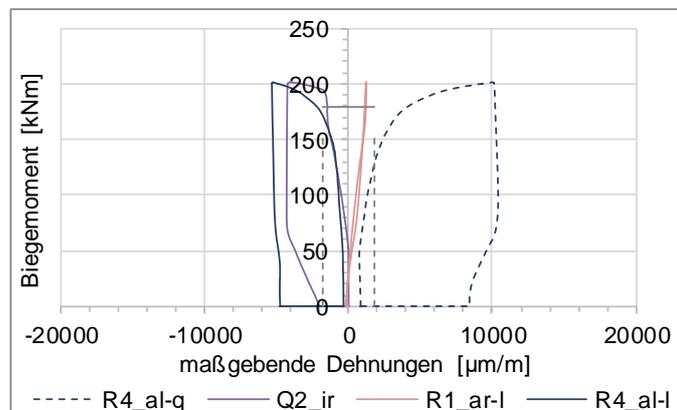
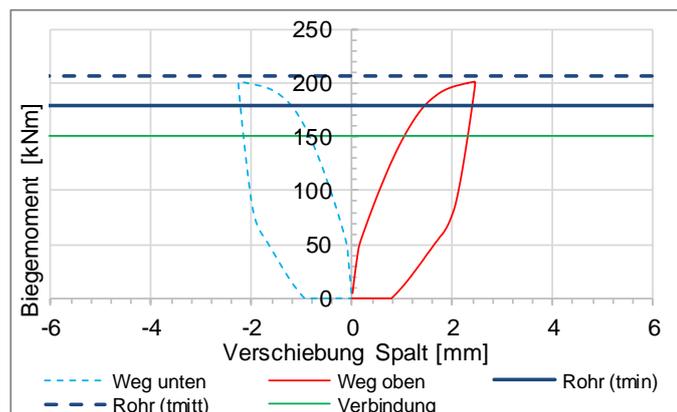


Pressverbindung V01B01-2					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	Wegoben CH=2	Wegunten CH=3	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>464,96746</b>	0,28	7,93	Grenze des elastischen Bereichs		<b>150,9537</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,017055	1,67971	-1,32747	
			max	min	
43,94%			2,4533	-2,26397	
			Rest nach Entlasten		
			0,77359	-0,9365	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,250	<b>179,109</b>	84,28%	0,84280202	
tmitte außen	14,479	<b>206,588</b>	73,07%	0,73069896	
Dicke	31,000	<b>362,701</b>	41,62%	0,41619362	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
f <sub>y</sub>	378,00	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1800,00	µm/m
L fuge	260,00	mm
Durchmesser	241,93	mm
R außen	120,97	mm
D innen	206,41	mm
r innen	109,00	mm
r mitte innen	106,77	mm
r min innen	90,25	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,25	mm
tmitte außen	14,48	mm
A außen	9434,41	mm <sup>2</sup>
W außen	473834,11	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	546529,24	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	959525,40	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,00	mm
Fugenlänge	260,00	mm
Neigung	1,00	°
Restfuge	4,92	mm
dm	210,95	mm
Mü reib	0,16	
max. ei.	1800,00	µm/m
Dehnung		
Fugendruck	<b>15,21</b>	N/mm <sup>2</sup>

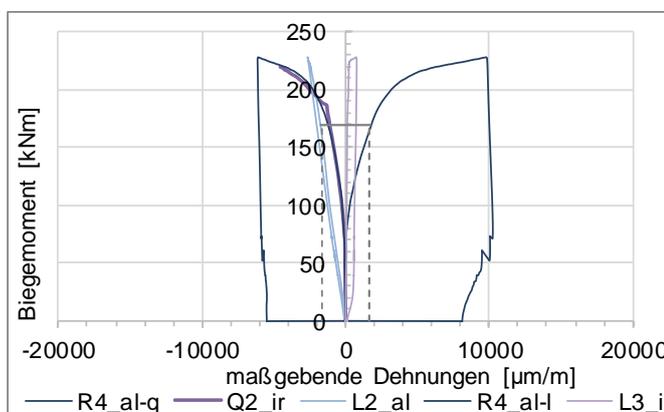
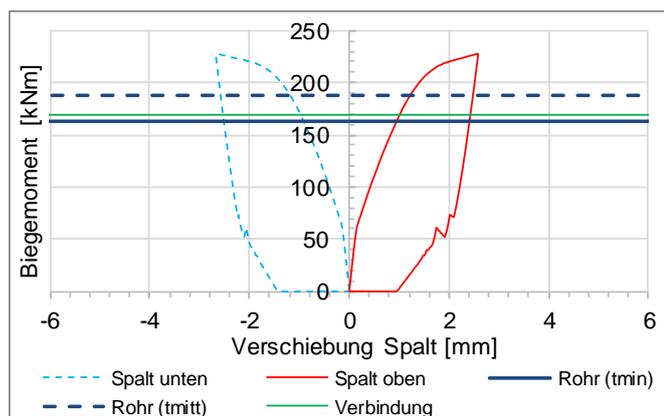


Pressverbindung V01B02-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>680,36981</b>	0,37	10,7	Grenze des elastischen Bereichs		<b>169,261</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,015727	1,64311	-1,24896	
			max	min	
70,30%			2,58355	-2,67375	
			Rest nach Entlasten		
			0,94044	-1,42479	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,300	<b>163,023</b>	103,83%	1,03826491	
tmitte außen	14,505	<b>187,873</b>	90,09%	0,90093308	
Dicke	31,000	<b>330,475</b>	51,22%	0,51217436	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	263,00	mm
Durchmesser	241,94	mm
R außen	120,97	mm
D innen	206,62	mm
r max innen	109,04	mm
r mitte innen	106,83	mm
r min innen	90,34	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,30	mm
tmitte außen	14,51	mm
A außen	9451,76	mm <sup>2</sup>
W außen	472530,21	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	544559,36	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	957899,44	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,00	mm
Fugenlänge	263,00	mm
Neigung	1,00	°
Restfuge	5,18	mm
dm	211,21	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>23,29</b>	N/mm <sup>2</sup>

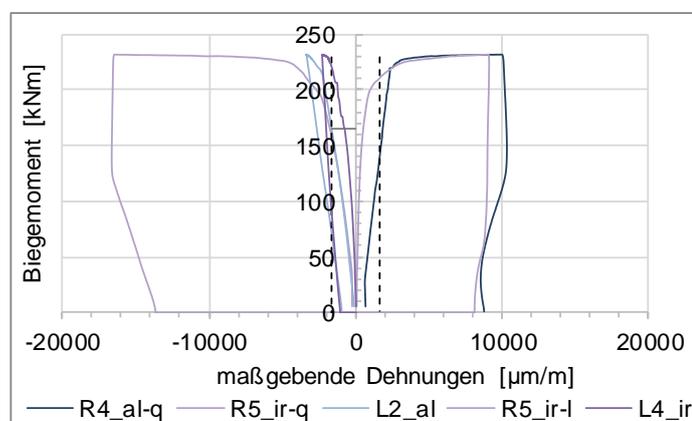
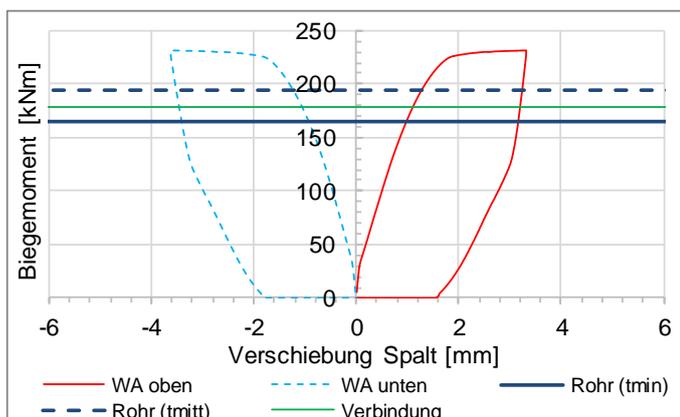


Pressverbindung V01B03-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	Wegoben CH=2	Wegunten CH=3	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>393,1823</b>	0,24	6,99	Grenze des elastischen Bereichs		<b>178,5095</b> max. aufnehm. Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung			<b>1,75837</b> max	<b>-1,82876</b> min	
42,03%			3,31973	-3,62554	
			Rest nach Entlasten		
			1,56136	-1,79678	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,310	<b>164,924</b>	108,24%	1,08237223	
tmitte außen	14,933	<b>194,251</b>	91,90%	0,91896438	
Dicke	31,000	<b>331,954</b>	53,78%	0,53775342	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
v	0,3	
f <sub>y</sub>	345	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1642,85714	µm/m
L fuge	312	mm
Durchmesser	242,13	mm
R außen	121,065	mm
D innen	204,8	mm
r max innen	108,995	mm
r mitte innen	106,37201	mm
r min innen	90,305	mm
Dicke	31	mm
tmin außen	12,31	mm
tmitte außen	14,9329901	mm
A außen	8884,41342	mm <sup>2</sup>
Wmin außen	478041,569	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	563045,671	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	962186,2	mm <sup>3</sup>
tmin innen	12,3	mm
Fugenlänge	311	mm
Neigung	1	°
Restfuge	5,5	mm
dm	210,24598	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,85714	µm/m
Fugendruck	<b>11,3954</b>	N/mm <sup>2</sup>

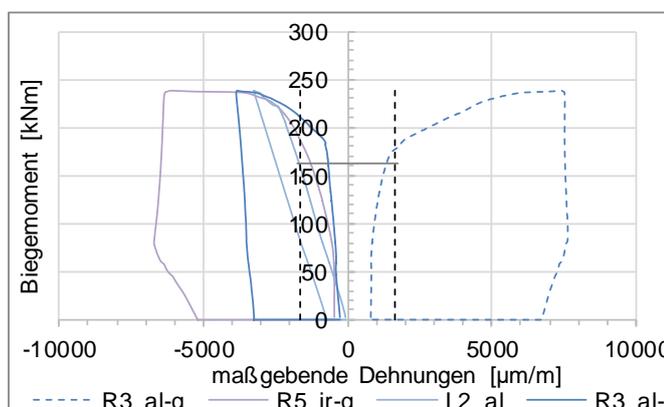
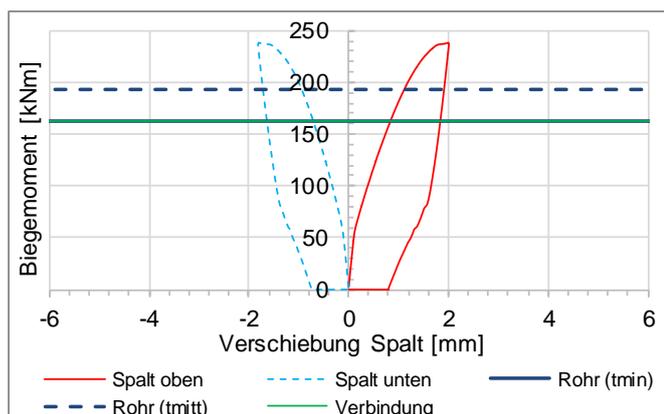


Pressverbindung V01B04-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpresskraft	Übermaß	Aufschubweg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kNm
<b>638,56382</b>	0,33	9,55	Grenze des elastischen Bereichs		<b>162,5212</b> max. aufnehmb. Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung			1,22255	-1,08127	
63,85%			max 2,01002	min -1,81619	
			Rest nach Entlasten		
			0,78747	-0,73492	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,210	<b>162,471</b>	100,03%	1,00031143	
tmitte außen	14,933	<b>192,984</b>	84,22%	0,8421507	
Dicke	31,000	<b>330,805</b>	49,13%	0,49129052	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
v	0,3	
f <sub>y</sub>	345	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1642,85714	µm/m
L fuge	312	mm
Durchmesser	241,96	mm
R außen	120,98	mm
D innen	206,41	mm
r max innen	109,1	mm
r mitte innen	106,37701	mm
r min innen	90,31	mm
Dicke	31	mm
tmin außen	12,21	mm
tmitte außen	14,9329901	mm
A außen	8812,94494	mm <sup>2</sup>
W <sub>min</sub> außen	470929,266	mm <sup>3</sup>
W <sub>mitt</sub> außen	559372,485	mm <sup>3</sup>
W <sub>max</sub> außen	958854,108	mm <sup>3</sup>
tmin innen	12,21	mm
Fugenlänge	313	mm
Neigung	1	°
Restfuge	5,75	mm
dm	211,85598	mm
Mü reib	0,2	
max. el. Dehnung	1642,85714	µm/m
Fugendruck	<b>14,14346</b>	N/mm <sup>2</sup>

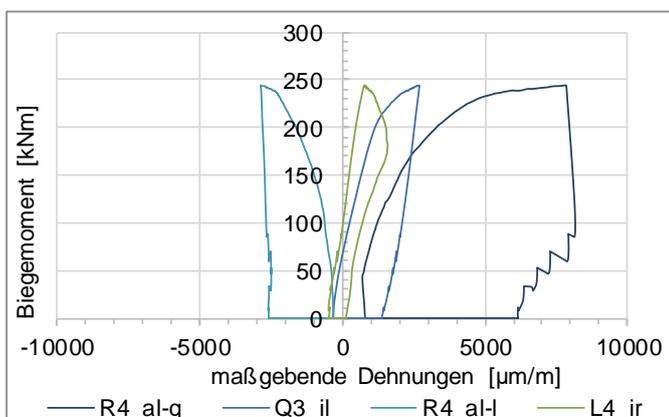
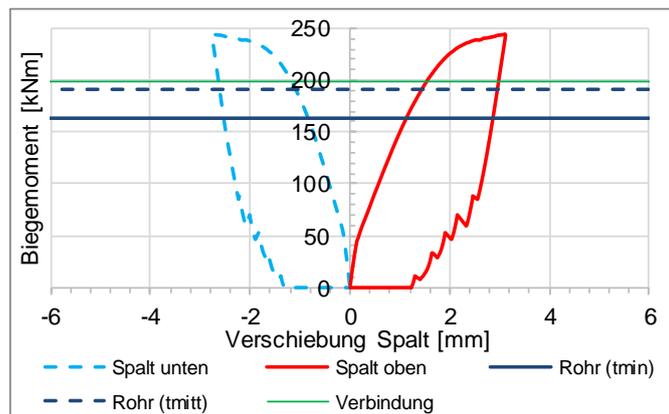


Pressverbindung V01B05-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpresskraft	Übermaß	Aufschubweg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>500,0521</b>	0,27	7,87	Grenze des elastischen Bereichs		<b>198,6458</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,015738	1,89289	-1,4523	
48,51%			max	min	
			3,11742	-2,76583	
			Rest nach Entlasten		
			1,22453	-1,31353	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,22	<b>163,284</b>	121,66%	1,21656489	
tmitte außen	14,69735	<b>191,085</b>	103,96%	1,03957006	
Dicke	31,000	<b>331,200</b>	59,98%	0,59977566	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
v	0,3	
f <sub>y</sub>	345	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,85714	µm/m
L fuge	285	mm
Durchmesser	241,96	mm
R außen	120,98	mm
D innen	207,39	mm
r max innen	109,03	mm
r mitte innen	106,552653	mm
r min innen	90,25	mm
Dicke	31	mm
tmin außen	12,22	mm
tmitte außen	14,6973468	mm
A außen	8816,36197	mm <sup>2</sup>
W außen	473287,52	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	553868,378	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	960000,577	mm <sup>3</sup>
tmin innen	12,21	mm
Fugenlänge	300	mm
Neigung	1	°
Restfuge	4,65	mm
dm	212,364694	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,85714	µm/m
Fugendruck	<b>15,70746</b>	N/mm <sup>2</sup>

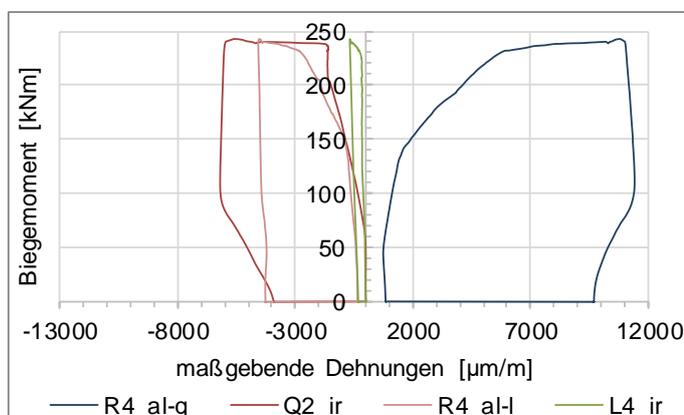
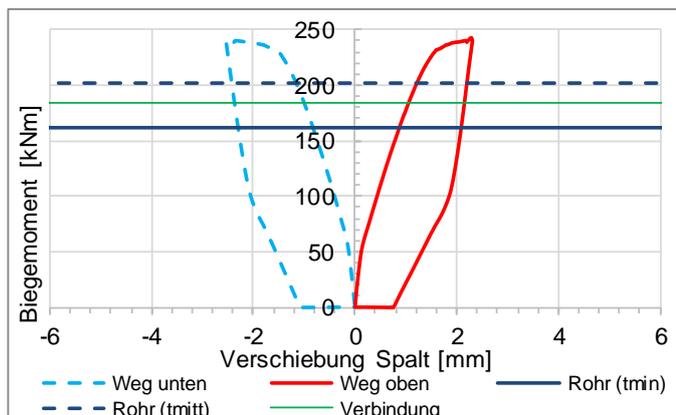


Pressverbindung V01B06-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	Wegoben CH=2	Wegunten CH=3	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>658,4896</b>	0,3	6,52	Grenze des elastischen Bereichs		<b>184,0507</b>
Ausnutzung		0,009901	1,5674	-1,46851	max. aumenmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
51,32%			2,30886	-2,53279	
			Rest nach Entlasten		
			0,74146	-1,06428	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,100	<b>161,668</b>	113,84%	1,13844879	
tmitte außen	15,719	<b>201,845</b>	91,18%	0,91184161	
Dicke	31,000	<b>333,267</b>	55,23%	0,55226244	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	300,00	mm
Durchmesser	242,05	mm
R außen	121,03	mm
D innen	202,96	mm
r max innen	109,23	mm
r mitte innen	105,61	mm
r min innen	90,03	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,10	mm
tmitte außen	15,72	mm
A außen	8514,96	mm <sup>2</sup>
W außen	468602,78	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	585058,05	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	965990,50	mm <sup>3</sup>
tmin innen	11,44	mm
Fugenlänge	305,00	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	4,60	mm
dm	209,98	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>19,20</b>	N/mm <sup>2</sup>



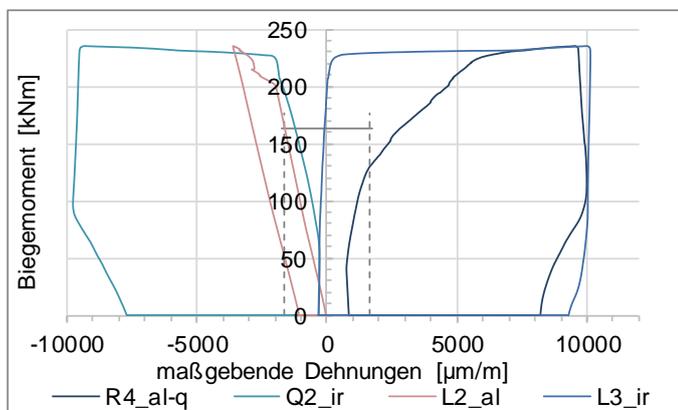
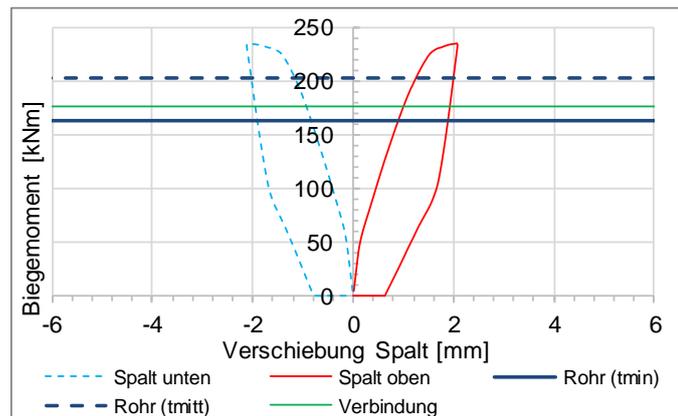
Anhang B  
Appendix B

Pressverbindung V01B06-2					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>636,32033</b>	0,3	6,52	Grenze des elastischen Bereichs		<b>176,3924</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,010246	1,45415	-1,3408	
51,21%			max	min	
			2,07751	-2,12161	
			Rest nach Entlasten		
			0,62336	-0,78081	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,230	<b>163,110</b>	108,14%	1,08143293	
tmitte außen	15,824	<b>202,862</b>	86,95%	0,86952065	
Dicke	31,000	<b>331,133</b>	53,27%	0,53269302	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	309,00	mm
Durchmesser	242,00	mm
R außen	121,00	mm
D innen	202,66	mm
r max innen	109,07	mm
r mitte innen	105,48	mm
r min innen	90,30	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,23	mm
tmitte außen	15,82	mm
A außen	8530,27	mm <sup>2</sup>
W außen	472782,19	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	588004,70	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	959806,52	mm <sup>3</sup>
tmin innen	11,36	mm
Fugenlänge	309,00	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	4,90	mm
dm	209,89	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>18,02</b>	N/mm <sup>2</sup>

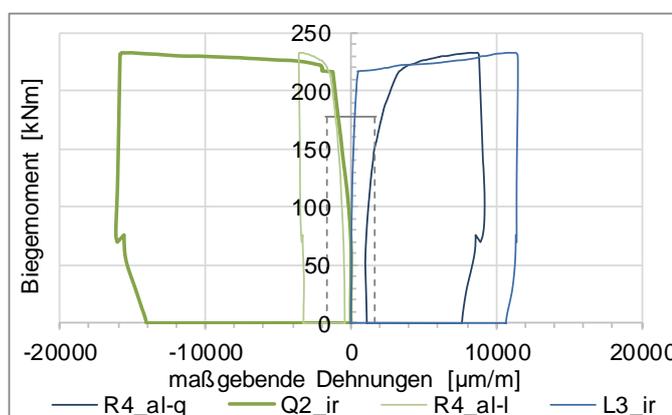
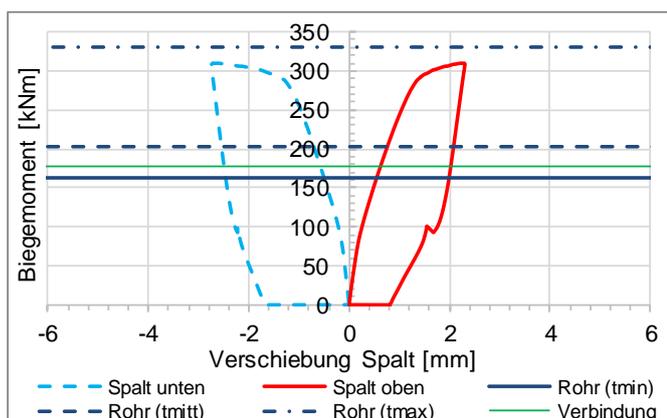


Pressverbindung V01B07-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>848,74742</b>	0,41	8,79	Grenze des elastischen Bereichs		<b>177,4997</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,010356	1,50012	-2,604	
67,02%			max	min	
			2,30633	-2,74366	
			Rest nach Entlasten		
			0,80621	-0,13966	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,310	<b>162,761</b>	109,06%	1,09055424	
tmitte außen	15,924	<b>202,756</b>	87,54%	0,87543306	
Dicke	31,000	<b>330,406</b>	53,72%	0,53721638	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	309,00	mm
Durchmesser	242,00	mm
R außen	121,00	mm
D innen	203,04	mm
r max innen	109,10	mm
r mitte innen	105,49	mm
r min innen	90,41	mm
Dicke	31,00	mm
tmin außen	12,31	mm
tmitte außen	15,92	mm
A außen	8437,58	mm <sup>2</sup>
W außen	471771,12	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	587699,99	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	957699,76	mm <sup>3</sup>
tmin innen	11,01	mm
Fugenlänge	309,00	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	4,95	mm
dm	210,27	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>23,99</b>	N/mm <sup>2</sup>



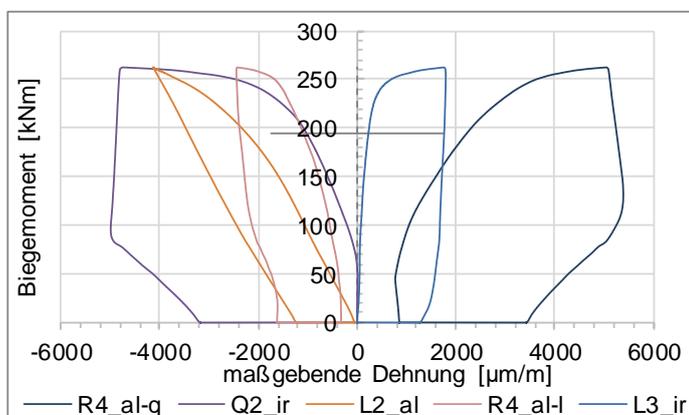
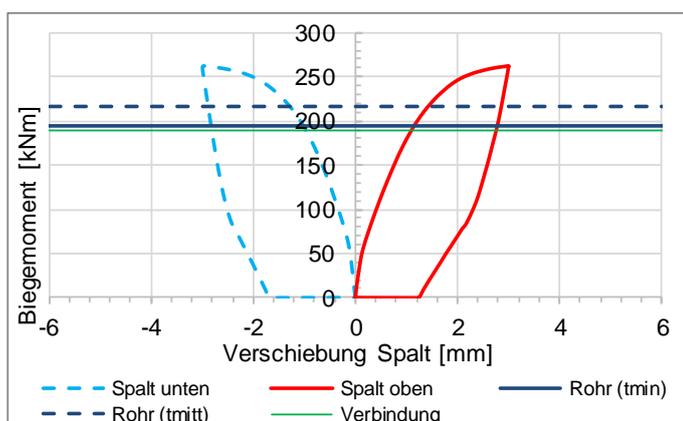
Anhang B  
Appendix B

Pressverbindung V01B08-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub- weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>659,84507</b>	0,22	6,2	Grenze des elastischen Bereichs		<b>189,2394</b> max. außenmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung			1,77204	-1,31134	
			max	min	
51,92%			3,00957	-2,99136	
			Rest nach Entlasten		
			1,23753	-1,68002	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	14,980	<b>194,392</b>	97,35%	0,97349509	
tmitte außen	17,090	<b>216,348</b>	87,47%	0,87469991	
Dicke	35,000	<b>355,555</b>	53,22%	0,53223596	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
v	0,3	
f <sub>y</sub>	345	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1642,85714	µm/m
L fuge	310	mm
Durchmesser	241,8	mm
R außen	120,9	mm
D innen	206,41	mm
r max innen	106,14	mm
r mitte innen	104,029683	mm
r min innen	86,12	mm
Dicke	35	mm
tmin außen	14,98	mm
tmitte außen	17,0903173	mm
A außen	10380,9544	mm <sup>2</sup>
W <sub>min</sub> außen	563454,303	mm <sup>3</sup>
W <sub>mitt</sub> außen	627095,061	mm <sup>3</sup>
W <sub>max</sub> außen	1030595,52	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,1	mm
Fuglänge	305	mm
Neigung	1	°
Restfuge	4,78	mm
dm	211,82107	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,85714	µm/m
Fugendruck	<b>19,10421</b>	N/mm <sup>2</sup>

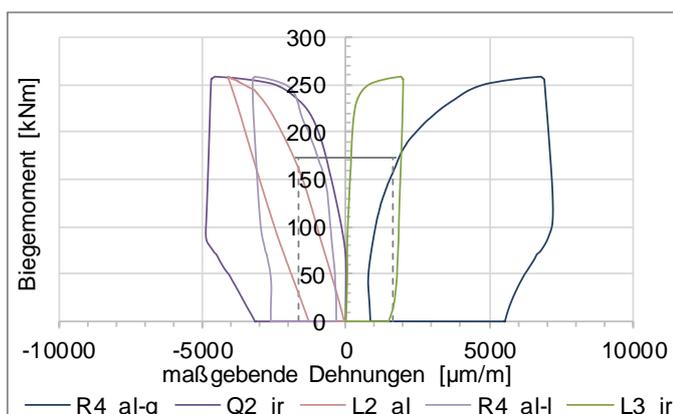
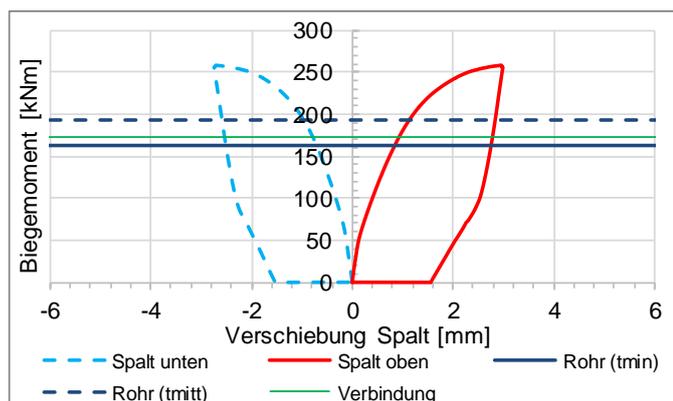


Pressverbindung V01B08-2					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpresskraft	Übermaß	Aufschubweg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kNm
<b>692,86721</b>	0,31	8,94	Grenze des elastischen Bereichs		<b>172,8204</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,012903	1,43676	-1,21927	
			max	min	
51,92%			2,98882	-2,7444	
			Rest nach Entlasten		
			1,55206	-1,52513	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,210	<b>162,761</b>	106,18%	1,06180466	
tmitte außen	14,916	<b>193,081</b>	89,51%	0,89506862	
Dicke	35,000	<b>357,532</b>	48,34%	0,48337101	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
f <sub>y</sub>	345,00	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1642,86	µm/m
L fuge	310,00	mm
Durchmesser	242,00	mm
R außen	121,00	mm
D innen	206,41	mm
r max innen	109,10	mm
r mitte innen	106,39	mm
r min innen	86,00	mm
Dicke	35,00	mm
tmin außen	12,21	mm
tmitte außen	14,92	mm
A außen	9491,50	mm <sup>2</sup>
W außen	471771,12	mm <sup>3</sup>
W <sub>mitt</sub> außen	559654,04	mm <sup>3</sup>
W <sub>max</sub> außen	1036323,56	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,20	mm
Fugenlänge	310,00	mm
Neigung	1,00	°
Restfuge	4,88	mm
dm	211,82	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>20,06</b>	N/mm <sup>2</sup>



# Anhang B

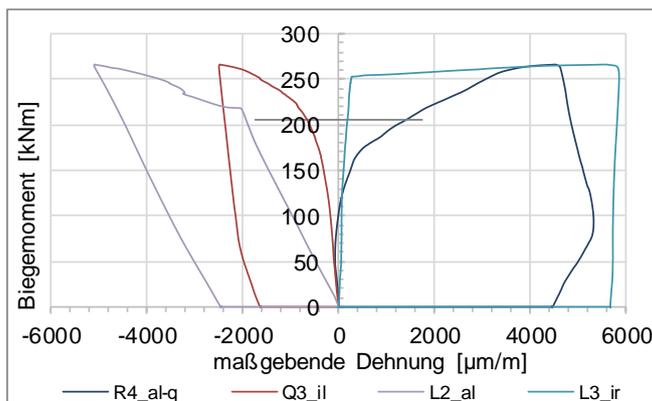
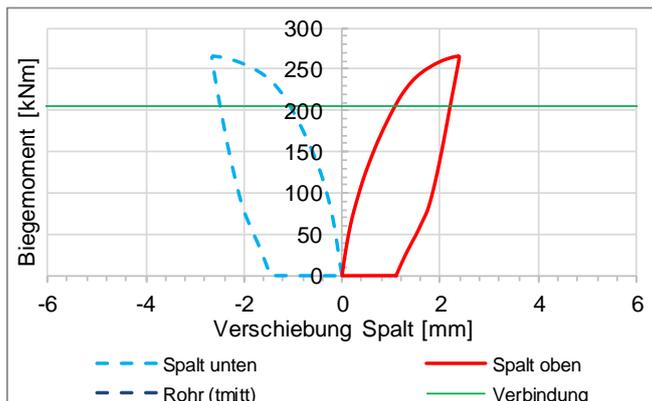
## Appendix B

Pressverbindung V01B09-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpresskraft	Übermaß	Aufschubweg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>948,58206</b>	0,41	11,7	Grenze des elastischen Bereichs		<b>205,42567</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,0123342	1,29435	-1,20609	
			max	min	
68,17%			2,38775	-2,65078	
			Rest nach Entlasten		
			1,0934	-1,44469	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	14,970	<b>192,415</b>	106,76%	1,06761566	
tmitte außer	17,693	<b>220,690</b>	93,08%	0,93083173	
Dicke	35,000	<b>354,821</b>	57,90%	0,57895527	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	312,00	mm
Durchmesser	241,90	mm
R außen	120,95	mm
D innen	200,81	mm
r max innen	106,39	mm
r mitte innen	103,67	mm
r min innen	86,36	mm
Dicke	35,00	mm
tmin außen	14,97	mm
tmitte außen	17,69	mm
A außen	10402,24	mm <sup>2</sup>
W außen	557725,74	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	639682,46	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	1028467,59	mm <sup>3</sup>
tmin innen	14,16	mm
Fugenlänge	312,00	mm
Neigung	1,00	°
Restfuge	5,02	mm
dm	206,26	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>28,02</b>	N/mm <sup>2</sup>

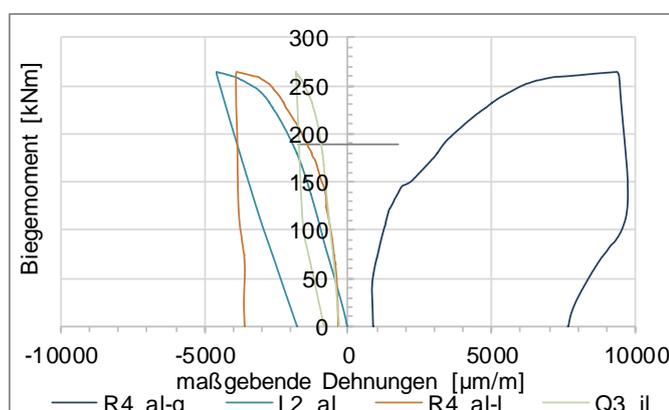
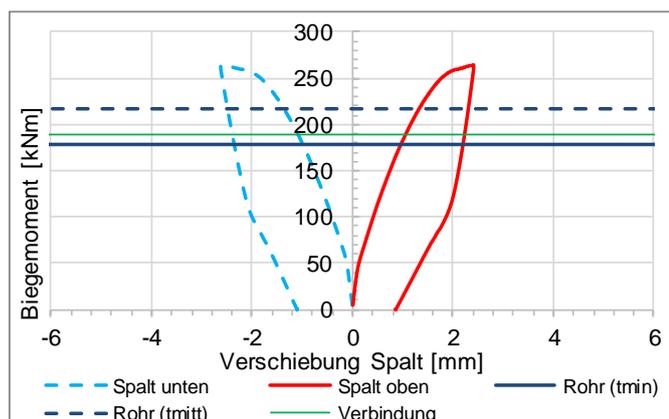


Pressverbindung V01B10-1						
Verpresszustand			Biegezustand			
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	WA oben	WA unten	Moment	
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m	
<b>636,25913</b>	0,3	6,4	Grenze des elastischen Bereichs		<b>189,0289</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit	
Ausnutzung		0,0100588	<b>1,55616</b>	<b>-1,52619</b>		
52,89%			max	min		
			2,41116	-2,6253		
			Rest nach Entlasten			
			0,855	-1,0911		

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]		Verbindung zu Rohr	
tmin außen	13,580	<b>178,288</b>		106,02%	1,060247
tmitte außen	17,206	<b>216,824</b>		87,18%	0,871808
Dicke	35,000	<b>355,312</b>		53,20%	0,532009

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
fy	345,00	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,86	µm/m
L fuge	310,00	mm
Durchmesser	241,86	mm
R außen	120,93	mm
D innen	215,33	mm
r max innen	107,65	mm
r mitte innen	104,02	mm
r min innen	86,23	mm
Dicke	35,00	mm
tmin außen	13,58	mm
tmitte außen	17,21	mm
A außen	9836,81	mm <sup>2</sup>
W außen	516775,63	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	628474,97	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	1029888,88	mm <sup>3</sup>
tmin innen	13,87	mm
Fugenlänge	310,00	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	4,90	mm
dm	222,58	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	µm/m
Fugendruck	<b>16,93</b>	N/mm <sup>2</sup>



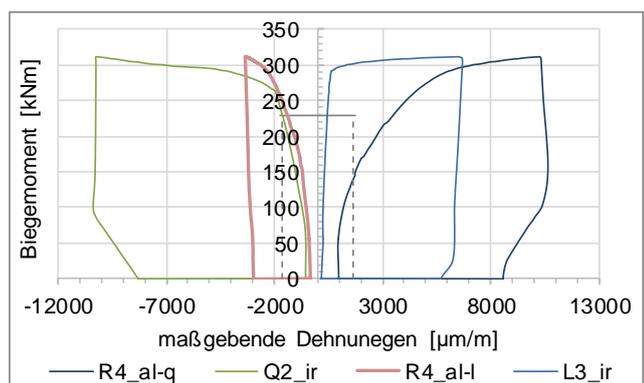
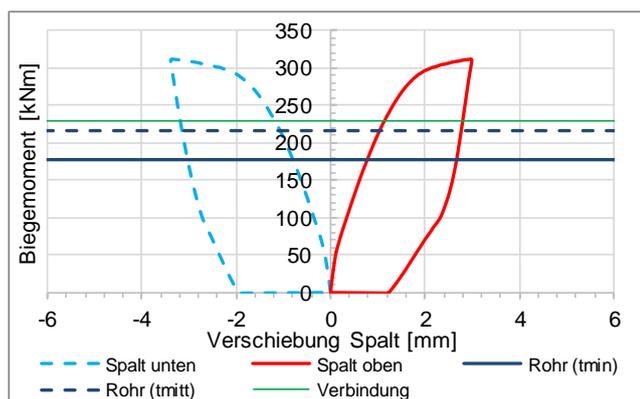
# Anhang B Appendix B

Pressverbindung V01B10-2					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpress-kraft	Übermaß	Aufschub-weg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>661,16408</b>	0,31	6,59	Grenze des elastischen Bereichs		<b>229,19557</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,0099673	<b>1,77479</b> max	<b>-1,45893</b> min	
59,45%			2,99228	-3,38663	
			Rest nach Entlasten		
			1,21749	-1,9277	

Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	13,490	<b>177,406</b>	129,19%	1,29192678	
tmitte außen	17,116	<b>216,110</b>	106,06%	1,06055192	
Dicke	35,000	<b>355,792</b>	64,42%	0,64418471	

Eingangsdaten Verbindung		
E	210000,00	N/mm <sup>2</sup>
v	0,30	
f <sub>y</sub>	345,00	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>ps</sub>	1642,86	μm/m
L fuge	310,00	mm
Durchmesser	242,01	mm
R außen	121,01	mm
D innen	214,91	mm
r max innen	107,83	mm
r mitte innen	104,20	mm
r min innen	86,32	mm
Dicke	35,00	mm
tmin außen	13,49	mm
tmitte außen	17,12	mm
A außen	9833,16	mm <sup>2</sup>
W außen	514220,31	mm <sup>3</sup>
W <sub>mitt</sub> außen	626404,97	mm <sup>3</sup>
W <sub>max</sub> außen	1031280,29	mm <sup>3</sup>
tmin innen	13,93	mm
Fugenlänge	310,00	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	5,00	mm
dm	222,16	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,86	μm/m
Fugendruck	<b>17,63</b>	N/mm <sup>2</sup>

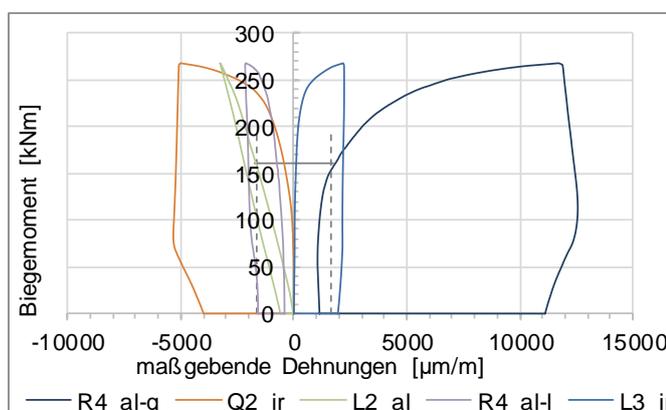
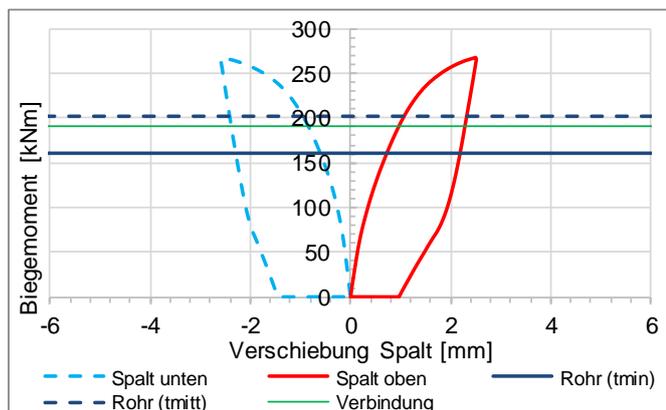


Pressverbindung V01B11-1					
Verpresszustand			Biegezustand		
Einpresskraft	Übermaß	Aufschubweg	WA oben	WA unten	Moment
kN	mm	mm	mm	mm	kN/m
<b>964,31643</b>	0,38	8,11	Grenze des elastischen Bereichs		<b>190,9376</b> max. aufnehmbares Moment der Verbindung mit 25% Sicherheit
Ausnutzung		0,0084101	1,55412	-1,14654	
51,32%			max	min	
			2,51432	-2,59188	
			Rest nach Entlasten		
			0,9602	-1,44534	

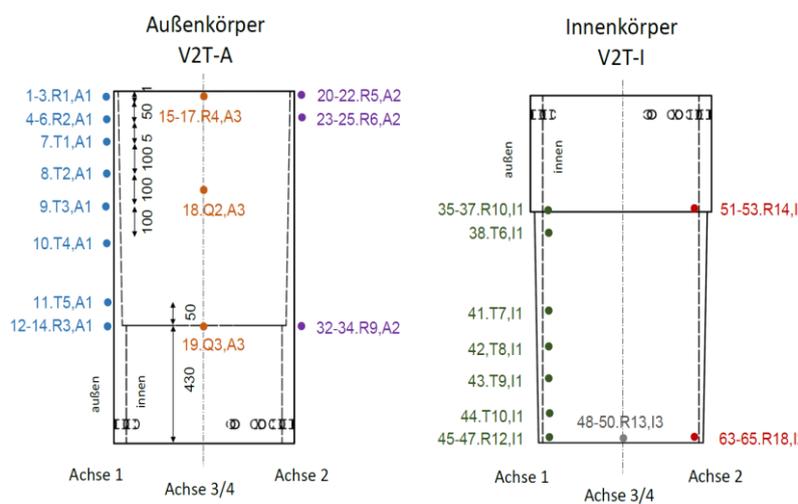
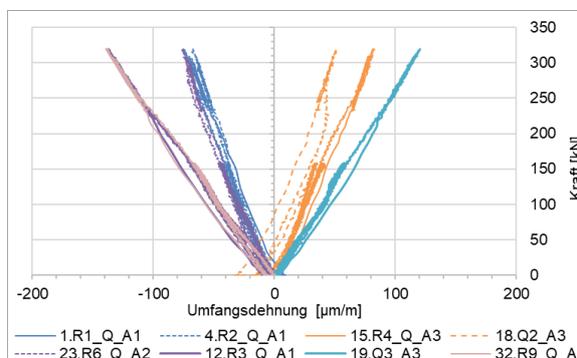
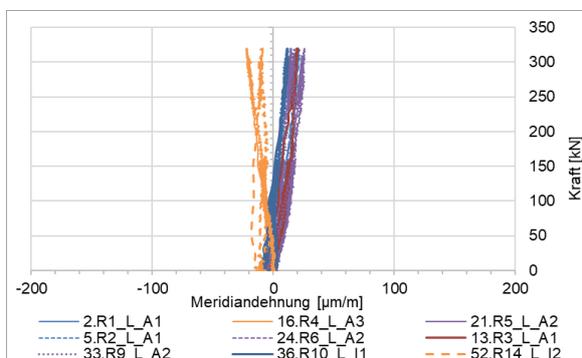
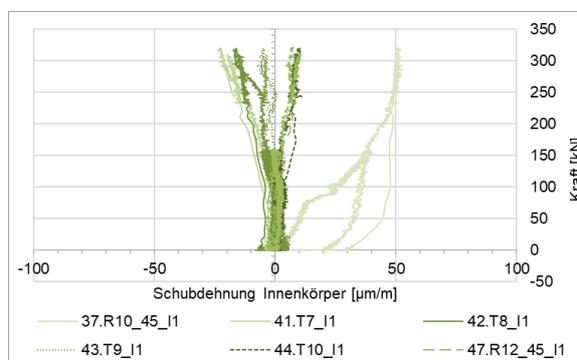
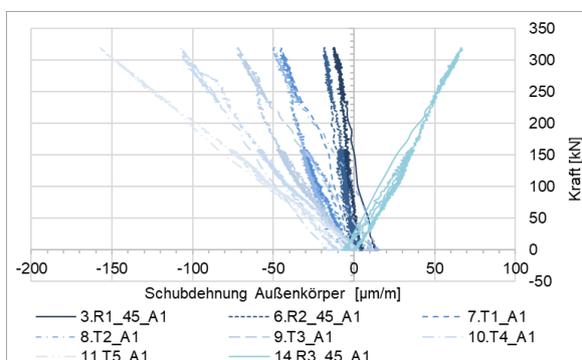
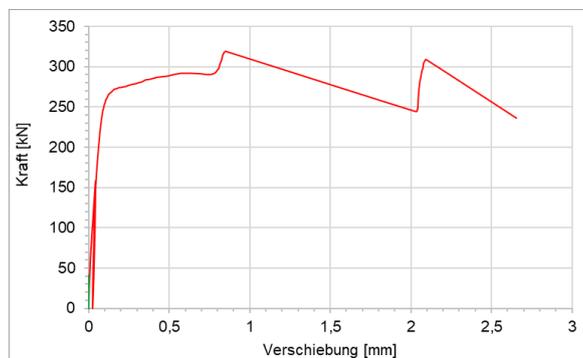
Referenzrohr					
		max. Mbieg (tx) [kNm]	Verbindung zu Rohr		
tmin außen	12,100	<b>160,691</b>	118,82%	1,18823129	
tmitte außen	15,824	<b>202,056</b>	94,50%	0,94497158	
Dicke	31,000	<b>330,670</b>	57,74%	0,57742612	

Eingangsdaten		
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
v	0,3	
fy	345	N/mm <sup>2</sup>
Eps	1642,85714	µm/m
L fuge	309	mm
Durchmesser	242,02	mm
R außen	121,01	mm
D innen	200,41	mm
r max innen	109,29	mm
r mitte innen	105,565986	mm
r min innen	90,39	mm
Dicke	31	mm
tmin außen	12,1	mm
tmitte außen	15,8240141	mm
A außen	8513,84961	mm <sup>2</sup>
Wmin außen	465769,81	mm <sup>3</sup>
Wmitt außen	585670,799	mm <sup>3</sup>
Wmax außen	958464,188	mm <sup>3</sup>
tmin innen	11,44	mm
Fugenlänge	305	mm
Neigung	1,34	°
Restfuge	5,15	mm
dm	207,638028	mm
Mü reib	0,15	
max. el. Dehnung	1642,85714	µm/m
Fugendruck	<b>27,599096</b>	N/mm <sup>2</sup>



### Ergebnisse Großteilversuchsserie

Versuchsreihe Torsion: V02T02



Versuchsreihe Biegung: V02B01

