

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Postfach 10 48 42

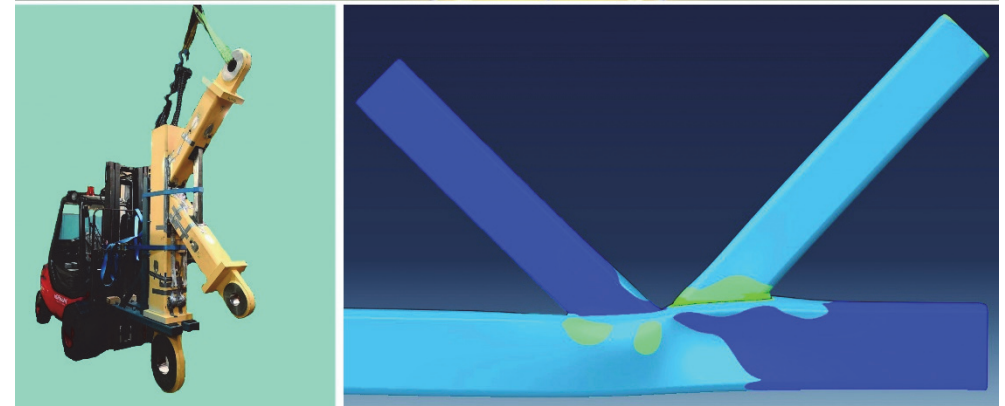
40039 Düsseldorf

Sohnstr. 65

40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de

www.stahlforschung.de



## Erweiterung der Ermüdungsbemessung von K-Knoten mit Spalt aus RHP und KHP auf hochfeste Stähle und dickwandige Profile

Fatigue behaviour of hollow sections joints and high strength steel

Forschung für die Praxis P 1132

# **Forschungsvorhaben P 1132 / S 024/10225/15**

## **Erweiterung der Ermüdungsbemessung von K-Knoten mit Spalt aus RHP und KHP auf hochfeste Stähle und dickwandige Profile**

Fatigue behaviour of hollow sections joints and high strength steel

**KoRoH GmbH Kompetenzzentrum Rohre und Hohlprofile, Karlsruhe**

Dr.-Ing. S. Herion

Dr.-Ing. J. Hrabowski

**Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruher Institut für Technologie**

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Dipl.-Ing. Philipp Ladendorf

**TNO - Buildings, Infrastructure & Maritime - Structural Reliability, Delft**

Dr. ir. Richard Pijpers

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Das Forschungsvorhaben wurde am Kompetenzzentrum Rohre und Hohlprofile, Karlsruhe, an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe sowie bei TNO, Delft mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen sowie vom Internationalen Komitee für die Weiterentwicklung und Erforschung von Rohrkonstruktionen (CIDECT) durchgeführt.

## **Beteiligte Unternehmen:**

ArcelorMittal Global R&D  
Baier-Consulting  
Forschungszentrum Ultraschall gGmbH  
Gothaer Fahrzeugtechnik GmbH  
Ingenieurbüro Stengel GmbH  
Ingenieurgruppe Bauen GbR  
Konecranes GmbH  
KoRoh GmbH  
Kranbau Köthen GmbH  
Liebherr Werk Biberach GmbH  
Maurer SE  
Meyer + Schubart  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH  
Sennebogen Maschinenfabrik GmbH  
SSAB Europe Oy  
SSF Ingenieure AG  
Tata Steel International (Germany) GmbH  
Tata Steel Nederland Tubes B.V.  
Terex Cranes Germany GmbH  
Vallourec Deutschland GmbH  
voestalpine KREMS GmbH  
voestalpine Tubulars GmbH & Co. KG  
WELDEX GmbH  
XCMG European Research Center GmbH

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1132  
ISBN 978-3-946885-73-3

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

Zur Umsetzung des Leichtbaus werden zunehmend auch ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen aus hochfesten Stählen hergestellt. Im Fachwerkbau ist dabei der K-Knoten mit Spalt die bevorzugte Knotenkonfiguration. Zur leichteren Anwendung und Bemessung solcher Knoten aus hochfesten Stahlgüten und mit größeren Wanddicken müssen die bestehenden Bemessungsregeln angepasst und erweitert werden.

Das zu diesem Zweck durchgeführte Versuchsprogramm umfasst insgesamt 55 Ermüdungsversuche an K-Knoten aus Rechteckhohlprofilen (RHP) und Kreishohlprofilen (KHP) unterschiedlicher Abmessungen aus S355, S500 und S700. K-Knoten kleinerer Abmessungen werden bei TNO in Delft, Niederlande auf einem Versuchsstand mit Einzelzylindern geprüft. K-Knoten mit großen Abmessungen werden am KIT in Karlsruhe auf einem eigens angefertigten Prüfrahmen geprüft. Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erfolgt nach dem Nennspannungskonzept der EN 1993-1-9 (2010) durch die Erstellung von Wöhlerkurven.

Insbesondere die Versuche an kleinen KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit neben den Knotenabmessungen und den geometrischen Parametern auch von der Schweißnahtausführung und -geometrie abhängt. Dies wird in den Bemessungsregeln nicht berücksichtigt, kann jedoch für die Konstruktion von ermüdungsgerechten Strukturen genutzt werden. So kann bei den KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt die Ermüdungsfestigkeit um zwei Kerbklassen von 71 auf 90 erhöht werden.

Im Gegensatz dazu werden die untersuchten kleinen RHP K-Knoten mit Schweißanfangs- und Schweißendpunkten in den Ecken der Strebenprofile hergestellt, wodurch die Schwachstelle der Schweißnaht mit dem Hot-Spot der Geometrie zusammenfällt. Die Versuchsergebnisse dieser Probekörper stellen damit eine Untergrenze für die Ermüdungsfestigkeit dar. Die Ermüdungsfestigkeit von K-Knoten hängt stark von der Wanddicke der Bauteile und deren Verhältniswert  $\tau$  ab. Die Klassifizierung für den Nennspannungsansatz erfolgt daher zu Recht anhand des inversen Wanddickenverhältnis  $1/\tau = t_0 / t_i$ .

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen RHP und KHP K-Knoten aus S355 und S700 mit 20 mm Wandstärke passen gut in die vorhandenen Kerbklassen und können ohne Wandstärkenreduzierung nach CIDECT Design Guide 8 oder EN 1993-1-9 (2010) eingestuft werden. Parallel dazu werden numerische Berechnungen angestellt, die zur Ausweitung des Gültigkeitsbereichs dienen. Die Finite-Elemente-Modelle werden anhand von Dehnungsmessungen in Verifikationsversuchen

kalibriert. Dafür werden Volumenelemente verwendet und die Schweißnähte mit abgebildet, um eine exakte Abbildung der lokalen Spannungen in der Schweißnaht zu ermöglichen.

Eine Parameterstudie wird durchgeführt, um den betrachteten Parameterbereich zu erweitern und den Einfluss einzelner geometrischer Parameter, wie Gurtschlankheit  $2\gamma$ , Wanddickenverhältnis  $\tau$ , Breiten- bzw. Durchmesser Verhältnis  $\beta$  oder Strebenneigungswinkel  $\Theta$  zu identifizieren. Für RHP K-Knoten werden 72 verschiedene Knotenkonfigurationen mit jeweils 4 getrennten Lastfällen berechnet. KHP K-Knoten werden in 16 unterschiedlichen Abmessungen mit jeweils 3 Lastfällen berechnet, so dass insgesamt 336 FE-Modelle innerhalb der Parameterstudie erstellt, berechnet und ausgewertet werden. Zudem werden anhand der Dehnungsmessungen im Versuch Spannungskonzentrationsfaktoren ermittelt. Diese dienen dann zusammen mit den Ergebnissen numerischer Parameterstudien zur Validierung bzw. Anpassung vorhandener SCF-Formeln.

Für RHP K-Knoten wird eine Neubewertung früherer und neuer Daten für den Lastfall „Axiale Belastung der Strebe (AX)“ durchgeführt und geeignete Formeln mit einer geringfügigen Modifikation vorhandener CIDECT-Formeln bereitgestellt. Für RHP K-Knoten mit Spalt unter Strebenbiegung in der Ebene (IPB) sind in CIDECT keine Formeln angegeben. Hierfür ist ein neuer Satz von Gleichungen entwickelt worden.

Die Auswertung der Strukturspannungen von KHP K-Knoten unter axialer Belastung der Streben zeigt, dass die SCFs nach CIDECT-Formeln im Vergleich zu den SCFs nach DNV GL-PR-C203 (2016) und aus FEA häufig sehr konservative Werte liefern. Da DNV GL-PR-C203 (2016) einen größeren Anwendungsbereich hat und SCF-Formeln für die Lastfälle IPB und Out-of-Plane-Bending (OPB) bereitstellt, ist es sinnvoll, diese Formeln zu verwenden. Lediglich die Formel für SCFs für den Gurt unter IPB wird derart modifiziert, so dass die SCFs auf der sicheren Seite liegen.

Da die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilverbindungen stark von den dimensionslosen Parametern abhängt, sollte dies bereits bei der Planung durch Auswahl geeigneter Parameter berücksichtigt werden. Durch sorgfältige Planung und Ausführung können ermüdungsgerechte Hohlprofilkonstruktionen realisiert werden, auch bei Verwendung hochfester Stähle.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

März 2020

## Abstract

To enable lightweight design, also fatigue loaded structures are more and more made of high strength steels. The K-joint with gap is the favored joint configuration in lattice girder design. Therefore, existing design rules must be extended by larger wall thicknesses and high strength steel grades to facilitate the application and design of such joints.

The experimental test program comprehends a total of 55 fatigue tests on K-joints made of rectangular hollow sections (RHS) and circular hollow sections (CHS) of different dimensions made of S355, S500 and S700. Small scale specimens are examined at TNO, Delft on a test frame with single acting load cylinders. Test on large scale specimens are carried out at KIT in Karlsruhe on a specially made rigid test frame.

The evaluation of the experimental investigations is carried out according to the nominal stress concept of EN 1993-1-9 (2010) by the preparation of S-N-curves.

In particular, the experiments on small CHS K-joints with over-welded gap show that the fatigue strength depends not only on the joints' dimensions and the geometric parameters but also on the weld seam design and geometry. This is not considered in the design rules but can be used to build fatigue-proof structures. So, for the CHS K-joints with over-welded gap the fatigue strength can be used by two notch classes from 71 to 90. In contrast, the examined small RHS K-joints are made with weld start and weld end points in the corners of the brace profiles, which makes the weak point of the weld coincide with the geometric hot spot. The test results of these specimens thus represent a lower limit for the fatigue strength. The fatigue strength of K-joints strongly depends on the wall thickness of the chord and the braces and their ratio  $\tau$ . The classification for the nominal stress approach is therefore rightly based on the inverse wall thickness ratio  $1 / \tau = t_0 / t_i$ .

The results of the fatigue tests on large RHS and CHS K-joints made of S355 and S700 with 20 mm wall thickness fit well into the existing notch classes and can be classified without reduction due to wall thickness according to CIDECT Design Guide 8 or EN 1993-1-9 (2010). At the same time, numerical calculations are made to extend the scope. The finite element models are calibrated using strain measurements in verification tests. For this purpose, volume elements are used, and the welds are modelled to allow an accurate determination of the local stresses in the weld seam.

Parametric studies are carried out to enlarge the investigated dimensional range and to identify the influence of the different geometric parameters, such as the chord slenderness  $2\gamma$ , thickness ration  $\tau$ , width ratio  $\beta$  or the brace angle  $\Theta$ . For RHS K-joints

72 different joints configurations, each under 4 load configurations have been calculated. For CHS K-joints 16 joints under 3 different load conditions have been considered, so that a total number of 336 models was analyzed for the parametric study. For the design recommendations by nominal stress approach as well as for the structural stress approach recent research is considered. Beneath that, also SCFs are calculated based on the strain gauge measurements within the tests. Together with the results of the numerical investigations revised SCF formulae are developed.

For RHS K-joints, a reevaluation of previous and new data is performed for the load case “Balanced axial Load on the braces” (AX) and appropriate formulas provided with a minor modification of existing CIDECT formulas. For RHS K-joints under “In-plane bending of the braces” (IPB) no formulas are given in CIDECT. For this a new set of equations has been developed.

The evaluation of the structural stresses of CHS K-joints under “Balanced axial loads on the braces (AX) shows, that the SCFs according to CIDECT formulas often provide very conservative values in comparison to the SCFs according to DNV GL-PR-C203 (2016) and FEA. Since DNV GL-PR-C203 (2016) has a wider scope and provides SCF formulas also for the load cases IPB and Out-of-Plane Bending (OPB), it makes sense to use these formulas. Only the formula for SCFs for the chord under IPB is slightly modified, so that all SCFs are on the safe side.

Since the fatigue strength of hollow section joints strongly depends on the dimensionless parameters, this should already be considered in the planning by selecting appropriate parameters. By careful planning and execution, fatigue-proof hollow-section constructions can be realized easily, which is also valid when using high strength steels.

FOSTA - Research Association for Steel Application

March 2020

## Inhaltsverzeichnis Content

1	Einleitung	1
	Introduction .....	1
	1.1 Anlass	
	Scope .....	1
	1.2 Zielsetzung	
	Objective .....	2
2	Stand der Technik	4
	State of the art .....	4
	2.1 Historischer Rückblick	
	Historical review .....	4
	2.2 Allgemeines	
	General.....	6
	2.3 Nennspannungsmethode	
	Nominal stress approach.....	7
	2.4 Strukturspannungsmethode	
	Structural stress approach.....	7
	2.5 Hohlprofil K-Knoten in der Normung	
	Standardization of hollow section K-joints .....	8
3	Experimentelle Untersuchungen	12
	Experimental investigation .....	12
	3.1 Einleitung	
	Introduction.....	12
	3.2 Durchzuführende Untersuchungen	
	Test program .....	13
	3.3 Herstellung der Probekörper	
	Fabrication of specimens.....	14
	3.4 Versuchsaufbau für große K-Knoten am KIT	
	Test setup at KIT for large K-joints .....	17
	3.5 Versuchsaufbau bei TNO für kleine K-Knoten	
	Test setup at TNO for small K-joints.....	18
	3.6 Ermüdungsversuche	
	Fatigue tests.....	19
	3.6.1 Versagenskriterium	
	Failure criterion.....	19
	3.6.2 Nomenklatur	
	Nomenclature.....	20
	3.6.3 Experimentelle Untersuchungen an kleinen RHP K-Knoten	
	Fatigue tests on small RHS K-joints.....	20



---

3.6.4	Experimentelle Untersuchungen an großen RHP K-Knoten Fatigue tests on large RHS K-joints.....	21
3.6.5	Experimentelle Untersuchungen an kleinen KHP K-Knoten Fatigue tests on small CHS K-joints .....	22
3.6.6	Experimentelle Untersuchungen an großen KHP K-Knoten Fatigue tests on large CHS K-joints.....	24
3.6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Ermüdungsversuche Summary of fatigue test results .....	25
3.7	Dehnungsmessungen Strain gauge measurements.....	26
4	Numerische Untersuchungen Numerical investigation .....	31
4.1	Einleitung Introduction .....	31
4.2	Vorüberlegungen Preliminary considerations.....	31
4.2.1	Ausbildung der Schweißnaht Welding details .....	32
4.2.2	Extrapolationsbereiche Extrapolation limits.....	36
4.2.3	Bestimmung der Nennspannung Determination of nominal stress .....	38
4.3	FE-Modell FE-model .....	38
4.3.1	Validierung kleiner RHP K-Knoten Validation of small RHS K-joints.....	41
4.3.2	Validierung großer RHP K-Knoten Validation of large RHS K-joints .....	43
4.3.3	Validierung kleiner KHP K-Knoten Validation of small CHS K-joints.....	46
4.3.4	Validierung großer KHP K-Knoten Validation of large CHS K-joints .....	48
5	Parameterstudie Parameteric study .....	51
5.1	Allgemeines General.....	51
5.2	Parameterstudie RHP K-Knoten mit Spalt Parametric study of RHS K-joints with gap .....	52
5.2.1	Allgemeines General.....	52

5.2.2	Modellierung der Schweißnaht bei RHP K-Knoten mit Spalt Modelling of the weld seam for RHS K-joints with gap .....	52
5.2.3	Untersuchter Parameterbereich für RHP K-Knoten Parameter range for RHS K-joints.....	53
5.2.4	Positionen der SCFs Positions of SCFs.....	54
5.2.5	Im Gleichgewicht stehende Normalkräfte auf den Streben (AX) Balanced axial loads (AX) on the braces.....	55
5.2.6	Biegung in der Ebene auf den Streben (IPB) In-plane bending (IPB) of the braces.....	57
5.2.7	Schlussfolgerungen der Parameterstudie an RHP K-Knoten mit Spalt Conclusions of parametric study on RHS K-joints with gap.....	58
5.3	Parameterstudie KHP K-Knoten mit Spalt Parametric study of CHS K-joints with gap.....	59
5.3.1	Allgemeines General .....	59
5.3.2	Schweißnahtdiskretisierung für KHP K-Knoten Modelling of welds for CHS K-joints .....	59
5.3.3	Parameterbereich für KHP K-Knoten Parameter range for CHS K-joints.....	60
5.3.4	Positionen der SCFs Positions of SCFs.....	61
5.3.5	Einfluss des Wanddickenverhältnisses $\tau$ und der Gurtschlankheit $2\gamma$ Influence of wall thickness ratio $\tau$ and chord slenderness $2\gamma$ .....	62
5.3.6	Einfluss des Breitenverhältnisses $\beta$ Influence of width ratio $\beta$ .....	65
5.3.7	Einfluss des Strebenneigungswinkels $\Theta$ Influence of brace angle $\theta$ .....	67
5.3.8	Zusammenfassung der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt Conclusions of parameter study on CHS K-joints with gap .....	68
6	Auswertung und Bemessungsempfehlung Evaluation and design recommendations .....	70
6.1	Einleitung Introduction.....	70
6.2	Nennspannungsmethode Nominal stress approach.....	71
6.2.1	Allgemeines General .....	71
6.2.2	Klassifizierung Classification .....	71

6.2.3	Literaturdaten für RHP K-Knoten Data from literature for RHS K-joints .....	72
6.2.4	Auswertung der Ermüdungsversuche an RHP K-Knoten Evaluation of fatigue tests on RHS K-joints .....	73
6.2.5	Literaturdaten für KHP K-Knoten Data from literature for CHS K-joints .....	75
6.2.6	Auswertung der Ermüdungsversuche an KHP K-Knoten Evaluation of fatigue tests on CHS K-joints .....	76
6.2.7	Schlussfolgerungen für die Bewertung nach Nennspannungsmethode Conclusions for nominal stress evaluation.....	78
6.3	Strukturspannungsmethode Structural stress approach .....	78
6.3.1	Allgemeines General.....	78
6.3.2	Parametrische SCF-Formeln für RHP K-Knoten mit Spalt Parametric SCF formulae for RHS K-joints with gap .....	79
6.3.3	Parametrische SCF-Formeln für KHP K-Knoten mit Spalt Evaluation of parametric SCF-formulae for CHS K-joints with gap .....	91
6.3.4	Vergleich der Bruchlastspielzahlen aus Versuch und mit Formel Comparison of load cycles to failure from tests and by function .....	96
6.3.5	Schlussfolgerungen für die Bewertung nach dem Strukturspannungskonzept Conclusions for structural stress evaluation .....	97
7	Zusammenfassung Summary .....	99
8	Ausblick Outlook.....	103
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 .....	104
10	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	105
10.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit .....	105
10.2	Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens .....	105
11	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten .....	106
12	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	107
13	Literaturverzeichnis References .....	109
14	Danksagung Acknowledgement.....	111

**ANHANG A – Herstellung der Probekörper**

- A1 – Material
- A2 – Nomenklatur
- A3 – Schweißen
- A4 – Abmessungen

**ANHANG B – Versuchsdokumentation**

- B1 – Versuchsaufbau am KIT
- B2 – Dehnungsmessungen
- B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

**ANHANG C – Numerik**

- C1 – Voruntersuchungen
- C2 – Vorgehen
- C3 – Parameterstudie

**ANHANG D – Literaturstudie**

- D1 – Ermüdungsversuche FOSTA P815 [15]
- D2 – Ermüdungsuntersuchungen EPFL, Lausanne [29]
- D3 – Spannungskonzentrationsfaktoren aus CIDECT 7P [34]

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Brücke über die Enz bei Markgröningen .....	2
Abbildung 2-1: Auszug aus EN 1993-1-9 mit den Kerbfallklassen für K-Knoten mit Spalt und den zulässigen Geometrieparametern.....	8
Abbildung 3-1: Hohlprofil K-Knoten mit Spalt [39].....	12
Abbildung 3-2: Heftschweißung bei kleinen KHP K-Knoten.....	14
Abbildung 3-3: Mehrlagenschweißung bei kleinen KHP K-Knoten .....	15
Abbildung 3-4: Schweißen der kleinen RHP K-Knoten .....	16
Abbildung 3-5: Herstellung der großen K-Knoten (Konecranes GmbH) .....	17
Abbildung 3-6: Versuchsrahmen am KIT für große K-Knoten.....	17
Abbildung 3-7: Versuchsrahmen bei TNO für kleine K-Knoten.....	18
Abbildung 3-8: Unterschiedliche Schweißnähte im Spaltbereich .....	20
Abbildung 3-9: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an kleinen RHP K-Knoten.....	21
Abbildung 3-10: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen RHP K-Knoten .....	22
Abbildung 3-11: Bruchfläche Probekörper K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700-8 .....	23
Abbildung 3-12: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an kleinen KHP K-Knoten.....	23
Abbildung 3-13: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen KHP K-Knoten.....	24
Abbildung 3-14: Drauf- und Seitenansicht Probekörper K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 .....	26
Abbildung 3-15: Auswertung der Hot-Spot-Dehnung der Serie K45-RHP-130x4-80x4 – Strebe Spalt. ....	27
Abbildung 3-16: Auswertung der Hot-Spot-Dehnung der Serie K45-RHP-130x4-80x4 – Gurt Spalt ....	28
Abbildung 3-17: Position der DMS bei KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt .....	28
Abbildung 3-18: Auswertung der Hot-Spot-Spannung der Serie K45-RHP-300x20-220x20– Gurt Spalt .....	29
Abbildung 4-1: Kehl- und Stumpfnähte in RHP-Anschlüssen nach CIDECT [39].....	32
Abbildung 4-2: Kehl- und Stumpfnähte in KHP-Anschlüssen nach CIDECT [39].....	33
Abbildung 4-3: Extrapolation beim Modell eines RHP K-Knoten ohne Schweißnaht .....	34
Abbildung 4-4: Definition des Extrapolationsbereiches nach CIDECT [39] .....	37
Abbildung 4-5: Problematische Position für die Extrapolation im Spalt- und Eckbereich bei RHP-Knoten .....	37
Abbildung 4-6: Hexaeder-Elemente mit 8 Knoten (links) und 20 Knoten (rechts) .....	38
Abbildung 4-7: Lagetoleranz der master-Fläche [1] .....	39
Abbildung 4-8: FE-Netz eines KHP K-Knotens, monolithisch (links) und mit tie constraints (rechts)....	40
Abbildung 4-9: Vergleich der Dehnungen im Spalt kleiner RHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt) .....	42
Abbildung 4-10: Vergleich der Dehnungen im Spalt kleiner RHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe) .....	42
Abbildung 4-11: Messstellen für die Extrapolation beim FE-Modell (links) und am Probekörper (rechts) .....	43
Abbildung 4-12: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer RHP K-Knoten aus FEA und Versuch.....	45
Abbildung 4-13: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an Gurtsattel .....	46
Abbildung 4-14: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an der Zugstrebe im Spaltbereich .....	47

Abbildung 4-15: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an der Druckstrebe im Spaltbereich.....	47
Abbildung 4-16: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt) .....	48
Abbildung 4-17: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe) .....	49
Abbildung 4-18: Vergleich der Dehnunge am Sattel großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt) .....	49
Abbildung 4-19: Vergleich der Dehnungen am Sattel großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe) .....	50
Abbildung 5-1: Modell eines halben RHP K-Knotens mit lokalem Koordinatensystemen .....	52
Abbildung 5-2: Diskretisierung der Schweißnaht bei RHP K-Knoten.....	53
Abbildung 5-3: Positionen der SCFs bei ebenen RHP K-Knoten mit Spalt [39] .....	55
Abbildung 5-4: K-Knoten mit im Gleichgewicht stehenden Normalkräften auf den Streben (AX) .....	56
Abbildung 5-5: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs nach CIDECT [39] und FEA.....	56
Abbildung 5-6: K-Knoten mit nach außen gerichteten Momenten in der Ebene (IPB-out) .....	57
Abbildung 5-7: K-Knoten mit nach innen gerichteten Momenten in der Ebene (IPB-in).....	57
Abbildung 5-8: K-Knoten mit gleichgerichteten Momenten in der Ebene (IPB-conc) .....	57
Abbildung 5-9: FE-Model des KHP K-Kntoens: monolithisch (links) und mit Tie constraints (rechts) .....	59
Abbildung 5-10: Schweißnahtdiskretisierung für KHP K-Knoten .....	60
Abbildung 5-11: Abmessungen des Basisknotens und SCF-Positionen für KHP K-Knoten mit Spalt ..	61
Abbildung 5-12: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierender Gurtschlankheit $2\gamma$ an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	62
Abbildung 5-13: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Wanddickenverhältnis $\tau$ an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	63
Abbildung 5-14: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierender Gurtschlankheit $2\gamma$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	63
Abbildung 5-15: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Wanddickenverhältnis $\tau$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	64
Abbildung 5-16: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierender Gurtschlankheit $2\gamma$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	64
Abbildung 5-17: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Wanddickenverhältnis $\tau$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	65
Abbildung 5-18: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Durchmesser Verhältnis $\beta$ an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	65
Abbildung 5-19: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Durchmesser Verhältnis $\beta$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	66
Abbildung 5-20: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Durchmesser Verhältnis $\beta$ am Sattelpunkt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	66
Abbildung 5-21: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Strebenneigungswinkel $\Theta$ an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	67
Abbildung 5-22: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Strebenneigungs- winkel $\Theta$ an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	68
Abbildung 5-23: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Strebenneigungs- winkel $\Theta$ am Sattelpunkt für Strebe (links) und Gurt (rechts) .....	68
Abbildung 6-1: Kerbklassen für K-Knoten mit Spalt in CIDECT [39].....	72

## Verzeichnisse

### Lists

---

Abbildung 6-2: S-N-Kurve für RHP K-Knoten mit Spalt und $t_0/t_i = 1,0$ .....	74
Abbildung 6-3: S-N-Kurve für RHP K-Knoten mit Spalt und $t_0/t_i > 1,0$ .....	75
Abbildung 6-4: S-N-Kurve für KHP K-Knoten mit Spalt und $t_0/t_i = 1,6$ .....	76
Abbildung 6-5: S-N-Kurve für KHP K-Knoten mit Spalt und $t_0/t_i = 1,0$ .....	77
Abbildung 6-6: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für AX .....	80
Abbildung 6-7: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus CIDECT [39] und aus Formel für AX.....	80
Abbildung 6-8: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Streben aus FEA und aus Formel für AX .....	81
Abbildung 6-9: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Streben aus CIDECT 108[39] und aus modifizierte Formel für AX .....	82
Abbildung 6-10: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus Formel für IPB .....	83
Abbildung 6-11: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB .....	84
Abbildung 6-12: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Streben aus CIDECT-Daten 108[34] und aus Formel für IPB.....	85
Abbildung 6-13: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Streben aus neuen FE-Daten und aus Formel für IPB .....	86
Abbildung 6-14: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus Formel für IPB-out.....	87
Abbildung 6-15: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB-out.....	88
Abbildung 6-16: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus Formel für IPB-out.....	89
Abbildung 6-17: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB-out.....	89
Abbildung 6-18: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus modifizierter Formel mit $SCF \geq 1,0$ für IPB-out.....	90
Abbildung 6-19: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach CIDECT [39] für den Gurt für AX.....	91
Abbildung 6-20: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für den Gurt für AX .....	91
Abbildung 6-21: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach CIDECT [39] für die Strebe für AX .....	92
Abbildung 6-22: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für die Strebe für AX.....	92
Abbildung 6-23: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS für den Gurt aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für IPB.....	93
Abbildung 6-24: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS für den Gurt aus FEA mit SCFs nach modifizierter DNVGL-Formel für IPB .....	94
Abbildung 6-25: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS für die Streben aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für IPB.....	94
Abbildung 6-26: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS für den Gurt aus FEA mit SCFs nach DNVGL-Formel für OPB .....	95

Abbildung 6-27: KHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFS für die Streben aus FEA mit SCFs nach  
DNVGL-Formel für OPB ..... 96

Abbildung 6-28: Vergleich der Bruchlastspielzahlen  $N_f$  aus dem Versuch mit berechneten  
Bruchlastspielzahlen  $N_{f,calc}$  nach neuen Formeln für den Gurt (links) und die Strebe (rechts)..... 96



## List of figures

Figure 1-1: Bridge over the Enz near Markgröningen, Germany	2
Figure 2-1: Extract from EN 1993-1-9 with detail categories for K-joints with gap and validity range	8
Figure 3-1: Hollow section K-joint with gap [39]	12
Figure 3-2: Tack welding of small CHS K-joints	14
Figure 3-3: Multi-pass welding of small CHS K-joints	15
Figure 3-4: Welding of small RHS K-joints	16
Figure 3-5: Fabrication of large K-joints (Konecranes GmbH)	17
Figure 3-6: Test frame at KIT for large K-joints	17
Figure 3-7: Test frame at TNO for small K-joints	18
Figure 3-8: Varying welds in the gap	20
Figure 3-9 Fatigue test results of small RHS K-joints	21
Figure 3-10 Fatigue test results of large RHS K-joints	22
Figure 3-11 Fracture surface specimen K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700-8	23
Figure 3-12 Fatigue test results of small CHS K-joints	23
Figure 3-13 Fatigue test results of large CHS K-joints	24
Figure 3-14 Top and side view of specimen K45-RHS-130x4-80x4-S700-2	26
Figure 3-15 Hot spot strain evaluation for series K45-RHS-130x4-80x4 – Brace gap	27
Figure 3-16 Hot spot strain evaluation for series K45-RHS-130x4-80x4 – Chord gap	28
Figure 3-17: Strain gauge position for CHS K-joints with over-welded gap	28
Figure 3-18 Hot spot stress evaluation for series K45-RHS-300x20-220x20 – Chord gap	29
Figure 4-1: Fillet and butt welds for RHS-joints according to CIDECT [39]	32
Figure 4-2: fillet and butt welds for KHS-joints according to CIDECT [39]	33
Figure 4-3: Extrapolation for RHS K-joint without modelling the weld seam	34
Figure 4-4: Definition of the extrapolation area according to CIDECT [39]	37
Figure 4-5: Problematic positions for extrapolation in the gap and corner of RHS-joints	37
Figure 4-6: Hexahedral 8-node element (left) and 20-node element (right)	38
Figure 4-7: Position tolerance of master surface [1]	39
Figure 4-8: FE-mesh of CHS K-joint, monolithic (left) and tie constraints (right)	40
Figure 4-9: Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests (chord)	42
Figure 4-10: Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests (brace)	42
Figure 4-11 Measuring points of FE-model (left) and specimen (right)	43
Figure 4-12 Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests	45
Figure 4-13 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement at the saddle for the chord	46
Figure 4-14 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement in the gap of the tension brace	47
Figure 4-15 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement in the gap of the compression brace	47
Figure 4-16 Comparison of strains in the gap of large CHS K-joints from FEA and tests (chord)	48
Figure 4-17 Comparison of strains in the gap of large CHS K-joints from FEA and tests (brace)	49
Figure 4-18 Comparison of strains at the saddle of large CHS K-joints from FEA and tests (chord)	49
Figure 4-19 Comparison of strains at the saddle of large CHS K-joints from FEA and tests (brace)	50
Figure 5-1 Model of half RHS K-joint with local coordinate systems	52
Figure 5-2 Weld seam discretization for RHS K-joints	53

Figure 5-3 SCF positions for uniplanar RHS K-joints with gap [39]	55
Figure 5-4 K-joint with balanced axial loads of the braces (AX)	56
Figure 5-5 RHS K joints with gap: Comparison of SCFs of CIDECT [39] and FEA	56
Figure 5-6 K-joint with outwards oriented in-plane bending (IPB-out)	57
Figure 5-7 K-joint with inwards oriented in-plane bending (IPB-in)	57
Figure 5-8 K-joint with concordantly oriented in-plane bending (IPB-conc)	57
Figure 5-9: FE-Model of CHS K-joint: monolithic (left) and with tie constraints (right)	59
Figure 5-10: Weld seam discretization for CHS K-joints	60
Figure 5-11: Basic joint dimension and SCF positions for CHS K-joint with gap	61
Figure 5-12: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying chord slenderness $2\gamma$ at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)	62
Figure 5-13: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying wall thickness ratio $\tau$ at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)	63
Figure 5-14: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying chord slenderness $2\gamma$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	63
Figure 5-15: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying wall thickness ratio $\tau$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	64
Figure 5-16: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying chord slenderness $2\gamma$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	64
Figure 5-17: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying wall thickness ratio $\tau$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	65
Figure 5-18: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying diameter ratio $\beta$ at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)	65
Figure 5-19: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying diameter ratio $\beta$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	66
Figure 5-20: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying diameter ratio $\beta$ at the saddle for brace (left) and chord (right)	66
Figure 5-21: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying brace angle $\Theta$ at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)	67
Figure 5-22: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying brace angle $\Theta$ at the crown heel for brace (left) and chord (right)	68
Figure 5-23: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying brace angle $\Theta$ at the saddle for brace (left) and chord (right)	68
Figure 6-1: Detail categories for K-joints with gap in CIDECT [39]	72
Figure 6-2: S-N-curve for RHS K-joints with gap and $t_o/t_i = 1.0$	74
Figure 6-3: S-N-curve for RHS K-joints with gap and $t_o/t_i > 1.0$	75
Figure 6-4: S-N-curve for CHS K-joints with gap and $t_o/t_i = 1.6$	76
Figure 6-5: S-N-curve for CHS K-joints with gap and $t_o/t_i = 1.0$	77
Figure 6-6: RHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from FEA with SCFs of modified formula) for the chord for AX	80
Figure 6-7: RHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from CIDECT with SCFs of CIDECT modified formula for the chord for AX	80
Figure 6-8: RHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from FEA with SCFs of modified formula for the brace for AX	81
Figure 6-9: RHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from CIDECT [39] with SCFs of CIDECT modified formula for the brace for AX	82

## Verzeichnisse

### Lists

---

Figure 6-10: RHS K-joints with gap: Comparison of the chord SCFs from FEA with chord SCFs of formula for IPB	83
Figure 6-11: RHS K-joints with gap: Comparison of the chord SCFs from FEA with chord SCFs of modified formula for IPB	84
Figure 6-12: RHS K-joints with gap: Comparison of the brace SCFs from CIDECT [34] with brace SCFs of formula for IPB	85
Figure 6-13: RHS K-joints with gap: Comparison of the brace SCFs of new FEA data with brace SCFs of formula for IPB	86
Figure 6-14: RHS K-joints with gap: Comparison of the chord SCFs (FEA) with chord SCFs (formula) for IPB (opening moments)	87
Figure 6-15: RHS K-joints with gap: Comparison of the chord SCFs (FEA) with chord SCFs (modified formula) for IPB (opening moments)	88
Figure 6-16: RHS K-joints with gap: Comparison of the brace SCFs (FEA) with brace SCFs calculated for IPB (opening moments)	89
Figure 6-17: RHS K-joints with gap: Comparison of the brace SCFs from FEA with brace SCFs calculated by modified formula for IPB-out	89
Figure 6-18: RHS K-joints with gap: Comparison of the brace SCFs from FEA with brace SCFs calculated by modified formula and $SCF \geq 1.0$ for IPB-out	90
Figure 6-19: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from FEA with SCFs from CIDECT [39] for the chord for AX	91
Figure 6-20: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs by FEA with SCFs of DNVGL [3] for the chord for AX	91
Figure 6-21: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs from FEA with SCFs from CIDECT [39] for the brace for AX	92
Figure 6-22: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs by FEA with SCFs of DNVGL [3] for the brace for AX	92
Figure 6-23: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of DNVGL [3] for IPB	93
Figure 6-24: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of modified DNVGL formula for IPB	94
Figure 6-25: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs of the brace by FEA with SCFs of DNVGL [3] for IPB	94
Figure 6-26: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of DNVGL formula for OPB	95
Figure 6-27: CHS K-joints with gap: Comparison of SCFs of the brace by FEA with SCFs of DNVGL formula for OPB	96
Figure 6-28: Comparison of numbers of load cycles to failure from tests $N_f$ and calculated by new formulae $N_{f,calc}$ for the chord (left) and the brace (right)	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Historische Übersicht über SCF-formeln für Hohlprofilknoten .....	5
Tabelle 2-2: Allgemeingültige Norm für die Ermüdungsbemessung von Hohlprofil-K-Knoten .....	9
Tabelle 2-3: Fachnorm für die Ermüdungsbemessung von Hohlprofil-K-Knoten .....	10
Tabelle 3-1: Geometrien der Probekörper .....	13
Tabelle 3-2: Versuchsprogramm .....	14
Tabelle 3-3: Vergrößerungsfaktoren MF zur Berücksichtigung von sekundären Biegemomenten bei K-Knoten mit Spalt .....	19
Tabelle 3-4: Versuchsserien für kleine RHP K-Knoten .....	20
Tabelle 3-5: Versuchsserien für große RHP K-Knoten .....	21
Tabelle 3-6: Versuchsserien für kleine KHP K-Knoten .....	22
Tabelle 3-7: Versuchsserien für große KHP K-Knoten .....	24
Tabelle 3-8: Ergebnisse der Ermüdungsversuche .....	25
Tabelle 3-9: SCFs für kleine RHP K-Knoten und aus Dehnungsmessungen .....	27
Tabelle 3-10: SCFs für kleine KHP K-Knoten und aus Dehnungsmessungen .....	29
Tabelle 3-11: Vergleich der SCFs nach CIDECT [40] und DNGL [3] und aus Dehnungsmessungen für K-Knoten mit Axiallast auf den Streben .....	30
Tabelle 4-1: Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) für unterschiedliche Schweißnahtmodelle .....	35
Tabelle 4-2: Grenzen für den Extrapolationsbereich nach CIDECT [40] .....	36
Tabelle 4-3: Statisches System für Axiallast und Biegung in der Ebene auf die Streben .....	40
Tabelle 4-4: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen im Gurt .....	43
Tabelle 4-5: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen in der Zugstrebe .....	44
Tabelle 4-6: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen in der Druckstrebe .....	45
Tabelle 5-1: Parameterbereich für SCFS von RHP K-Knoten mit Spalt (AX) .....	53
Tabelle 5-2: Empfehlungen für die Parameterauswahl für RHP K-Knoten mit Spalt .....	58
Tabelle 5-3: Parameterbereich für SCFs von ebenen KHP K-Knoten mit Spalt (AX) .....	60
Tabelle 5-4: Empfehlungen basierend auf der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt .....	69
Tabelle 6-1: Versuchsdaten von Ermüdungsversuchen an RHP K-Knoten mit Spalt aus der Literatur	73
Tabelle 6-2: Versuchsdaten von Ermüdungsversuchen an KHP K-Knoten mit Spalt aus der Literatur	75
Tabelle 6-3: Vergleich der SCFs für RHP K-Knoten mit Spalt unter ausgeglichener Strebenaxiallast .	82

## List of tables

Table 2-1: Historical review of SCF-formulae for hollow section joints .....	5
Table 2-2: General standards for fatigue design of hollow section K-joints .....	9
Table 2-3: Specialist standards for fatigue design of hollow section K-joints .....	10
Table 3-1: Specimen dimension .....	13
Table 3-2: Test program .....	14
Table 3-3 Magnification factors MF to account for secondary bending moments in K-Joints with gap .	19
Table 3-4 Test series for small RHS K-joints .....	20
Table 3-5 Intermediate Test series for large RHS K-joints.....	21
Table 3-6 Intermediate Test series for small CHS K-joints .....	22
Table 3-7 Intermediate Test series for large CHS K-joints.....	24
Table 3-8 Fatigue test results .....	25
Table 3-9 SCFs for small RHS K-joints by means of strain gauges .....	27
Table 3-10 SCFs for small CHS K-joints by means of strain gauges .....	29
Table 3-11 Comparison of SCFs according to CIDECT [40] and DNGL [3] and found by measurements for K-joint with axially loaded braces .....	30
Table 4-1 Stress concentration factors (SCF) for different FE modelling of the weld .....	35
Table 4-2: Extrapolation limits according to CIDECT [40].....	36
Table 4-3 Static system for axially and in-plane-bending loaded joints .....	40
Table 4-4 Comparison of strains from measurement and FEA for the chord .....	43
Table 4-5 Comparison of strains from measurement and FEA for the tension brace .....	44
Table 4-6 Comparison of strains from measurement and FEA for the compression brace .....	45
Table 5-1 Parameter range for SCFs of RHS K-joints with gap (AX) .....	53
Table 5-2 Recommendations for the choice of parameters for RHS K-joints .....	58
Table 5-3 Parameter range for SCFs of uniplanar CHS K-joints with gap (AX).....	60
Table 5-4 Recommendations based on parametric study on CHS K-joints.....	69
Table 6-1 Fatigue test data for RHS K-joints with gap from literature.....	73
Table 6-2 Fatigue test data for CHS K-joints with gap from literature.....	75
Table 6-3 Comparison of SCFs for RHS K-joints with gap for balanced axial load on the braces .....	82

## Abkürzungsverzeichnis Abbreviations and symbols

A	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
C	Parameter zur Berücksichtigung der Gurtauf Lagerung
E	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
F	Kraft [kN]
FEA	Finite Element Analyse
IPB	Biegung in der Ebene (In-plane bending)
KG	Kerbgruppe oder Kerbfall
KHP	Kreishohlprofil
L <sub>0</sub>	Gurtlänge [m]
L <sub>i</sub>	Strebenlänge mit $i = 1,2$ [m]
L <sub>r</sub>	Abstand vom Schweißnahtfuß [mm]
LC	Lastfall
M	Moment [kNm]
MF	Vergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung sekundärer Biegemomente
N	Lastwechselzahl [-]
N <sub>f</sub>	Bruchlastwechselzahl [-]
OPB	Biegung aus der Ebene (out-of-plane bending)
QHP	Quadratisches Hohlprofil
R	Spannungsschwingbreitenverhältnis [-]
RHP	Rechteckiges Hohlprofil
QHP	Quadratisches Hohlprofil
SCF	Spannungskonzentrationsfaktor
SNCF	Dehnungskonzentrationsfaktor
W	Widerstandsmoment [cm <sup>3</sup> ]
b <sub>0</sub>	Gurtbreite [mm]
b <sub>i</sub>	Strebenbreite mit $i = 1,2$ [mm]

## Verzeichnisse

### Lists

---

$d_0$	Außendurchmesser des KHP-Gurts [mm]
$d_i$	Außendurchmesser der KHP-Strebe mit $i = 1,2$ [mm]
$e$	Exzentrizität [mm]
$f_y$	Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$g$	Spaltlänge [mm]
$g'$	= $g/t_0$ dimensionslose Spaltgröße [-]
$h_0$	Gurthöhe RHP [mm]
$h_i$	Strebenhöhe RHP mit $i = 1,2$ [mm]
$i$	Trägheitsradius [mm]
$m$	Steigung der S-N-Kurve [-]
$r_0$	Ausrundungsradius des RHP Gurtes [mm]
$r_i$	Ausrundungsradius der RHP Strebe mit $i = 1,2$ [mm]
$t_0$	Gurtwanddicke [mm]
$t_i$	Strebenwanddicke mit $i = 1,2$ [mm]
$\beta$	= $d_i/d_0$ oder = $b_i/b_0$ Durchmesser- oder Breitenverhältnis [-]
$\Delta$	Differenz
$\varepsilon$	Dehnung [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$2\gamma$	= $d_0/t_0$ oder $b_0/t_0$ Gurtschlankheit [-]
$\gamma_{M5}$	Teilsicherheitsbeiwert für Hohlprofile [-]
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\Theta$	Strebenneigungswinkel zwischen Streben- und Gurtachse [°]
$\sigma_{hs}$	Spitzenspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{nom}$	Nominalspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau$	= $t_i/t_0$ Wanddickenverhältnis [-]

# 1 Einleitung Introduction

## *Kurzfassung*

*Zunehmend werden auch ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen, wie z.B. Windenergieanlagen, Brücken, Kräne und fliegende Bauten aus hoch- und höherfestem Stahl gefertigt, um eine leichtere Bauweise zu ermöglichen. Im Fachwerkbau ist dabei der K-Knoten mit Spalt die bevorzugte Knotenkonfiguration. Zur leichteren Anwendung und Bemessung solcher Knoten aus hochfesten Stahlgüten und mit größeren Wanddicken müssen die bestehenden CIDECT-Bemessungsregeln (Grundlage für alle weitere Normung) angepasst und erweitert werden.*

## *Abstract*

*To facilitate lightweight design, also fatigue loaded structures, such as wind energy converters, cranes, bridges or amusement rides, are more and more made of high strength steels. The K-joint with gap as typically used in lattice girder design is the favored joint configuration. Therefore, existing design rules developed by CIDECT must be extended by larger wall thicknesses and high strength steel grades.*

## 1.1 Anlass Scope

In den letzten Jahren hat der Bedarf an Leichtbaustrukturen aus Stählen mit höheren Festigkeiten als S355 immer mehr zugenommen, und das nicht nur bei statisch, sondern auch bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen. Dies spiegelt sich in den umfangreichen Untersuchungen an Blechverbindungen vor allem aus Stählen mit Streckgrenzen im Bereich von 460 MPa bis zu 700 MPa wider, was zu deren erfolgreichem Einsatz in allen Arten von Maschinen, Apparaten und Kranstrukturen geführt hat.

Daneben gewinnen aber auch neue Anwendungsbereiche an Bedeutung, wie zum Beispiel der Einsatz von Hohlprofilen im Bereich der Windenergie. Aufgrund der extremen Lasten kommen hier vor allem dickwandige Profile zum Einsatz wie dies auch für den Brückenbau gilt. Der am häufigsten eingesetzte Knotentyp ist bei allen genannten Fällen der K-Knoten mit Spalt, wie er üblicherweise in Fachwerkkonstruktionen eingesetzt wird.

Sowohl für hochfeste Stähle als auch für Profile mit großer Wanddicke gibt es bisher nur sehr vereinzelte Informationen zu deren Ermüdungsverhalten. Alle existierenden anerkannten Bemessungsregeln gehen auf die CIDECT Bemessungsempfehlungen [39] zurück. Die dort angegebenen Regeln beruhen alle auf experimentellen Untersuchungen an Knoten mit kleinen Wanddicken (Rechteckhohlprofile RHP bis max. 12 mm, Kreishohlprofile KHP bis max. 16 mm) aus S355.





Abbildung 1-1: Brücke über die Enz bei Markgröningen

Figure 1-1: Bridge over the Enz near Markgröningen, Germany

Wie Voruntersuchungen gezeigt haben [10], ist es mehr als fraglich, ob diese Bemessungsregeln entsprechend auch für die hier beschriebenen Profile angewendet werden können, da diese einerseits zu sehr konservativen und unwirtschaftlichen oder andererseits auch zu unsicheren Lösungen führen können.

Daher werden mit diesem Vorhaben die Grundlagen für eine Erweiterung des Anwendungsbereichs bzw. eine Neuformulierung der Bemessungsregeln geschaffen, um eine anerkannte sichere und auch wirtschaftliche Auslegung dieser Knoten zu ermöglichen.

## **1.2 Zielsetzung Objective**

Dieses Vorhaben verfolgt zwei Ziele: Zum einen soll überprüft werden, ob der Parameterbereich der bestehenden Bemessungsformeln für K-Knoten aus KHP und RHP auf große und dickwandige Profile erweitert werden kann oder ob eine Anpassung der aktuellen Bemessungsfunktionen erforderlich ist.

Das zweite Ziel besteht in der Erweiterung der bestehenden Ermüdungsfestigkeitskennlinien, sowohl nach dem Nennspannungskonzept als auch nach dem Strukturspannungskonzept auf Profile mit Streckgrenzen bis 700 MPa.

Beide Ziele bilden damit gleichzeitig die Grundlage für eine spätere Erweiterung der CIDECT Bemessungsempfehlungen [39].

Mit den angestrebten Forschungsergebnissen und der Erweiterung der bestehenden Bemessungsregeln auf die genannten Bereiche sollen sowohl Anwendungen im Leichtbau als auch im schweren Stahlbau gefördert werden. Da der sichere Einsatz dieser Profile bzw. Verbindungen bisher immer nur mit einer gesonderten baurechtlichen Zustimmung oder durch eigene mit hohem zeitlichen und finanziellem

Aufwand verbundenen experimentellen Untersuchungen belegt werden muss, gibt es bisher nur wenige realisierte Anwendungen.

Mit dem Einsatz von hochfesten Hohlprofilen werden neue Anwendungsbereiche erschlossen, was insbesondere den KMUs zu Gute kommen wird, die bisher aus den aufgeführten Gründen dem Einsatz dieser Profile eher zurückhaltend gegenüberstehen. Als Beispiele sind hier Fördereinrichtungen, Hubeinrichtungen, Geräte im Landmaschinenbau und ähnliche Anwendungen zu nennen, Anwendungsbereiche in denen sowohl in der Fertigung als auch in der Konstruktion und Bemessung viele KMUs tätig sind.

Ähnliches gilt für die dickwandigen Profile. Hier kann neben dem Brückenbau und dem Kranbau insbesondere auf den Bereich der on- und offshore Windenergie verwiesen werden, der bisher dem Einsatz von KHP in den Tragstrukturen eher ablehnend gegenübersteht, da keine anerkannten Bemessungsregeln für den benötigten Abmessungsbereich zur Verfügung stehen. Dieses Vorhaben hilft damit, ein ganz neues Anwendungsgebiet zu erschließen. Auch hier sind sowohl bei der Planung, der Konstruktion als auch bei der Bemessung viele KMUs tätig.

Da in diesem Vorhaben sowohl Profile kleiner Abmessungen als auch Profile mit großen Wanddicken untersucht werden sollen, werden die erzielten Ergebnisse sowohl den Herstellern von kalt hergestellten längsgeschweißten Profilen, sowie den Herstellern von warm gewalzten längsgeschweißten Rohren, als auch den Herstellern von warm gewalzten nahtlosen Rohren helfen neue Märkte zu erschließen.

Insgesamt wird damit die vorgesehene Erweiterung der Bemessungsregeln auf diese Bereiche auch zu deutlich wirtschaftlicheren und wettbewerbsfähigeren Produkten führen.

## 2 Stand der Technik State of the art

### *Kurzfassung*

*Bis in die neunziger Jahre wurden umfassende Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Hohlprofilknoten durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im Jahr 2000 im CIDECT Design Guide 8 zusammengefasst. Dieser bildet die Grundlage für alle weiteren Richtlinien und Normen zur Ermüdungsbemessung von geschweißten Hohlprofilknoten. Seither wurden nur vereinzelte Untersuchungen gemacht und die bestehenden Formeln weder weiterentwickelt noch der Gültigkeitsbereich erweitert. Daher werden hoch- und höherfeste Stähle sowie große Wanddicken bisher nicht in den Bemessungsregeln berücksichtigt.*

### *Abstract*

*Till the nineties the fatigue behavior of welded hollow section joints has been widely investigated. The results of the research were summarized in the CIDECT Design Guide 8 in the year 2000, which is also the basis for recent standardization. Since then no further efforts have been made to develop new formulae or to extend the validity range. So, thick-walled profiles or higher strength steel grades are not covered by recent design recommendations.*

### 2.1 Historischer Rückblick Historical review

Ausgehend von ersten Untersuchungen an genieteten Verbindungen in den 40er Jahren, formulierte Thum die Lehre von der „Gestaltfestigkeit“ [31]. Auf Basis dieser Untersuchungen kommt Neuber 1973 schließlich zur „Kerbspannungslehre“ [22].

Diese und weitere Arbeiten ([39], [9]) formulieren das Auftreten lokaler Spannungsspitzen an Kerben, abrupten Formänderungen oder anderen Unregelmäßigkeiten.

Die Entwicklung der modernen Prüf- und Messtechnik sowie die computergestützte Berechnung ermöglichen bis heute eine systematische Untersuchung dieser Spannungskonzentrationen und deren Auswirkung auf die Dauerfestigkeit von Bauteilen, siehe Tabelle 1.

Bis in die 90er Jahre wurden dabei Formeln zur Bestimmung der SCFs erarbeitet, die eine allgemeingültige Bemessung innerhalb angegebener Parametergrenzen ermöglichen. Ab ca. 2000 jedoch wurden keine weiteren Formeln entwickelt oder an der Ausweitung der Anwendungsgrenzen gearbeitet, sondern lediglich SCFS für exakte Knoten- und Belastungskonfigurationen bestimmt. Allgemeine Aussagen oder eine Übertragbarkeit auf andere Geometrien wurde dabei nicht systematisch verfolgt.

Tabelle 2-1: Historische Übersicht über SCF-formeln für Hohlprofilknoten  
Table 2-1: Historical review of SCF-formulae for hollow section joints

Jahr	Autor	Thema
1967	Toprac und Beale	Erste SCF-Parameterformeln anhand von Versuchsreihen an Probestücken aus Stahl
1972 1974	Reber Visser	Finite-Elemente-Methode basierend auf zylindrischen Schalenmodellen
1977	Kuang	Finite-Elemente-Methode, Versuche an Knoten mit kurzen Gurtstäben und eingespannten Gurtenden
1978	Gibstein (DNV)	Finite-Elemente-Methode basierend auf zylindrischen Schalenmodellen
1978	Wordsworth und Smedley (Lloyd's)	Dehnungsmessanalysen am Acrylmodellen ohne Schweißnähte
1985	Efthymiou und Durkin	Finite-Elemente-Methode mit dreidimensionalen Schalenelementen
1989	Efthymiou	Überarbeitung der Formeln von 1985
1989	Wardenier und Mang	Veröffentlichung von Parameterformeln für ebene T-, X- und K- Knoten aus RHP, CIDECT E+F
1989	Ai-Kah Soh / Chee Kiong-Soh (Singapur)	Parameterformeln für quadratische an quadratische und runde an quadratische Hohlprofile
1991	Smedley und Fischer	Versuchsreihen an Acryl- und Stahlproben
1992	Van Wingerde / Wardenier / Dutta	Fatigue Strength of uniplanar T- an X-Joints between square hollow sections, CIDECT 7K
1993	Mang / Bucak / Herion	Parameterformeln für räumliche K-Knoten aus RHP und KHP, CIDECT 7J
1994	Romejn	SCFs of welded multiplanar joints
1996	Van Wingerde et al.	The fatigue behavior of K-joints made of square hollow sections, ausführliche SCF-Formeln
1997	Dijkstra et al	CHS & RHS multiplanar joints, TNO-Report
1998	Herion	Räumlich RHP-K-Knoten, vereinfachte SCF-Formeln
1998	Van Wingerde / Wardenier / Packer	Simplified design graphs for the fatigue design of multiplanar K-joints with gap, CIDECT 7R, vereinfachte SCF-Formeln
2001	Zhao et al	CIDECT Design Guide 8; umfassende Formelsammlung + Diagramme, CIDECT 7M
2003	Schumacher	CHS-joints in Bridges, einzelne SCFs
2008	Borges	KHP-K-Knoten Size Effect, einzelne SCFs
2010	Kuhlmann, Euler	Empfehlungen für KK-Knoten im Straßenbrückenbau
2015	Kuhlmann et al	Fachwerke aus KHP mit dickwandigen Gurten (P815) umfassende Untersuchungen, keine SCF-Formeln

## 2.2 Allgemeines General

Erste systematische Untersuchungen über die Ermüdungsfestigkeit und das Verhalten von ebenen T-, X- und K-Knoten aus Rechteck-Hohlprofilen (RHP) wurden 1987 eingeleitet. In einem gemeinsamen europäischen EGKS-Forschungsprojekt der Universität Karlsruhe, der TU Delft und von IBBC TNO Delft wurden entsprechende parametrische Formeln auf Basis der Strukturspannungsmethode entwickelt [20], [18]. Die aus diesen Untersuchungen resultierenden parametrischen Formeln zur Berechnung von Spannungskonzentrationsfaktoren SCF für ebene K-Knoten mit Spalt und mit Überlappung wurden 1989 von Mang veröffentlicht [16].

Aufbauend auf den oben beschriebenen Arbeiten veröffentlichte van Wingerde 1992 [33] neue Formelsätze für T- und X-Knoten. Über die Ergebnisse eines weiteren Europäischen Forschungsprojekts zum Ermüdungsverhalten räumlicher Knoten aus RHP berichteten Mang et al 1993 [19]. Die ersten parametrischen Formelsätze zum Ermüdungsverhalten räumlicher K-Knoten aus RHP wurden in der Dissertation von Herion 1994 [9] vorgestellt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen 2000 in die Bemessungsempfehlungen von CIDECT [39] ein, die bis heute weltweit als Grundlage für die Ermüdungsbemessung von geschweißten Hohlprofilverbindungen dient. Aus diesen Richtlinien ging dann 2008 die ISO 14347 [13] hervor.

Etwa zur gleichen Zeit wurden im Rahmen der in der Entstehung befindlichen EN 1993, Teil 1.9 [1] die in der Zwischenzeit erarbeiteten Ergebnisse internationaler Untersuchungen zusammengefasst und berücksichtigt. Allerdings sind aufgrund der wenigen systematischen Untersuchungen, die bis dahin an Hohlprofilknoten durchgeführt wurden, nur wenige Details im Kerbfallkatalog der EN 1993-1-9 [1] erfasst. Außerdem hat sich gezeigt, dass aufgrund der Komplexität dieser Verbindungen die Klassifikationsmethode nicht geeignet ist, eine wirtschaftliche und sichere Ermüdungsbemessung durchzuführen.

Seit dem Erscheinen der Bemessungsempfehlungen von CIDECT [39] wurden nur wenige weitere experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von K-Knoten mit Spalt veröffentlicht. So untersuchte Ann Schumacher 2003 [29] im Rahmen ihrer Dissertation vier K-Knoten aus KHP mit Gurten aus KHP 273 x 20 und Streben aus KHP 139,7 x 12,5 in kompletten Fachwerkträgern. In dem gerade erschienenen FOSTA-Bericht P815 [7] wurden weitere Versuche an K-Knoten aus KHP mit Lasteinleitung über die Streben durchgeführt. Hier kamen KHP 177,8 x 20 mm mit Streben aus KHP 88,9 x 5,0 und KHP 88,9 x 12,5 mm zum Einsatz. Bei weiteren Versuchen mit größeren Abmessungen wurden die Kräfte immer im Gurt eingeleitet. Darüber hinaus wurden Parameterstudien durchgeführt und graphische Bemessungstabellen erstellt. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sollen zur Verbreiterung der statistischen Basis dieses Projekts mit herangezogen werden.

Daneben gibt es vereinzelte Veröffentlichungen zu experimentellen Untersuchungen an KHP K-Knoten aus China, die aber nicht so dokumentiert sind, dass sie mit herangezogen werden könnten.

Zum Ermüdungsverhalten an normal- oder hochfesten RHP K-Knoten ist nur wenig veröffentlicht worden, wobei die meisten Publikationen auf reinen FEM Studien beruhen. Eines der wenigen Projekte, bei denen Ermüdungsversuche an RHP Knoten aus hochfestem Stahl durchgeführt wurde, ist ein ECCS Projekt aus dem Jahr 1993, das ebenfalls in Karlsruhe bearbeitet wurde [20]. Hierbei kamen allerdings heute nicht mehr genormte Werkstoffe zu Einsatz und auch die Dokumentation der Experimente ist leider nicht vollständig. An der Universität Lappeenranta wurden im Rahmen des CIDECT Projekts 7X [14] spezielle Untersuchungen an ermüdungsbeanspruchten Eckbereichen von kalt hergestellten RHP aus hochfesten Stählen durchgeführt. Das Ermüdungsverhalten von sehr dünnwandigen RHP ( $t < 4\text{mm}$ ) wurde in Australien an der Universität von Melbourne untersucht. Allerdings kamen hier spezielle Werkstoffe nach australischer Norm zum Einsatz.

Im Rahmen des CIDECT Projekts 7Y [32] wurden in Karlsruhe X-Knoten aus warmgewalzten nahtlosen Rohren untersucht. Dabei stellten sich die Bemessungsformeln nach CIDECT als sehr konservativ heraus.

Wie bereits erwähnt kann die Bemessung von Hohlprofilknoten auf unterschiedliche Weisen erfolgen:

- nach der Nennspannungsmethode (Klassifizierungsmethode) oder
- nach dem Strukturspannungskonzept.

### **2.3 Nennspannungsmethode Nominal stress approach**

Bei der Nennspannungs- oder Klassifizierungsmethode werden die Anschlussdetails in verschiedene Kerbfallklassen eingeteilt, die etwa die gleiche Lebensdauer besitzen. Jede Kerbfallklasse korrespondiert mit einer Spannungsschwingbreite, bei welcher der Anschluss mindestens 2 Millionen Lastzyklen ertragen wird, wobei jeder Kerbfallklasse eine Wöhlerlinie zugeordnet ist. Die Zuordnung der Anschlussdetails zu den jeweiligen Kerbfallklassen erfolgt auf Basis von Ermüdungsversuchen. Dementsprechend sind auch nur experimentell untersuchte Details in den Kerbfallkatalogen aufgeführt.

Abbildung 2-1 zeigt den entsprechenden Auszug aus dem Eurocode [1] mit den zulässigen Geometrieparametern, welche den Anwendungsbereich erheblich einschränken.

### **2.4 Strukturspannungsmethode Structural stress approach**

Bei der Strukturspannungsmethode (international auch SCF-Methode genannt) wird die Lebensdauer eines Anschlusses mit einer lokalen Bezugsspannung am Anschluss abgeschätzt. Dabei wird die ungleichförmige Spannungsverteilung über den Umfang der angeschlossenen Profile berücksichtigt. Die Ermüdungsfestigkeitskennlinien ergeben sich aus der Strukturspannung und den Bruchlastwechselzahlen. Eine Klassifizierung wie beim Nennspannungskonzept ist nicht notwendig. Allerdings muss in allen Fällen die Wanddicke der Profile unmittelbar berücksichtigt werden.

DIN EN 1993-1-9:2010-12  
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.7 — Geschweißte Knoten von Fachwerkträgern

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderungen
90 $m = 5$	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 1): K- und N-Knoten, Rundhohlprofile:</p>	<p><u>Kerbfälle 1) und 2):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen.</li> <li>- Bei Zwischenwerten von <math>t_0/t_1</math> ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren.</li> <li>- Bei Diagonalen mit <math>t \leq 8</math> mm sind Kehlnähte erlaubt.</li> <li>- <math>t_0</math> und <math>t_1 \leq 8</math> mm</li> <li>- <math>35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ</math></li> <li>- <math>b_0/t_0 \cdot t_0/t_1 \leq 25</math></li> <li>- <math>d_0/t_0 \cdot t_0/t_1 \leq 25</math></li> <li>- <math>0,4 \leq b_0/b_1 \leq 1,0</math></li> <li>- <math>0,25 \leq d_0/d_1 \leq 1,0</math></li> <li>- <math>b_0 \leq 200</math> mm</li> <li>- <math>d_0 \leq 300</math> mm</li> <li>- <math>-0,5h_0 \leq e_{ip} \leq 0,25h_0</math></li> <li>- <math>-0,5d_0 \leq e_{ip} \leq 0,25d_0</math></li> <li>- <math>e_{o,ip} \leq 0,02b_0</math> oder <math>\leq 0,02d_0</math></li> </ul> <p>[<math>e_{o,ip}</math>: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p> <p><u>Kerbfall 2):</u>  <math>0,5(b_0 - b_1) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_1)</math>  und <math>g \geq 2t_0</math></p>
45 $m = 5$		
71 $m = 5$	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 2): K- und N-Knoten, Rechteckprofile:</p>	<p>[<math>e_{o,ip}</math>: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p> <p><u>Kerbfall 2):</u>  <math>0,5(b_0 - b_1) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_1)</math>  und <math>g \geq 2t_0</math></p>
36 $m = 5$		

Abbildung 2-1: Auszug aus EN 1993-1-9 mit den Kerbfallklassen für K-Knoten mit Spalt und den zulässigen Geometrieparametern

Figure 2-1: Extract from EN 1993-1-9 with detail categories for K-joints with gap and validity range

Die Spannungskonzentrationsfaktoren können über parametrisierte Gleichungen bestimmt werden, die über FE-Studien ermittelt wurden. Daher ist der Gültigkeitsbereich dieser Gleichungen auch auf den in diesen Studien untersuchten Parameterbereich beschränkt. Ähnliches gilt für den Nachweis des Gültigkeitsbereichs der experimentell bestimmten Ermüdungsfestigkeitskennlinien.

Heute hat sich daher die Strukturspannungsmethode in fast allen Bereichen, in den Hohlprofilverbindungen auf Ermüdung beansprucht werden, durchgesetzt, so zum Beispiel im gesamten Bereich der Offshore Technik (Öl und Gas und Offshore-Wind), im Brückenbau und im Anlagenbau.

## 2.5 Hohlprofil K-Knoten in der Normung Standardization of hollow section K-joints

Die Ermüdungsbemessung von Hohlprofil K-Knoten erfolgt in der Normung entweder nach den Nennspannungs- oder dem Strukturspannungskonzept. Beide Methoden werden im CIDECT Design Guide 8 [39] erläutert. Für das Nennspannungskonzept ist der Anwendungsbereich stark eingeschränkt. So gilt es z.B. nur für Profile mit Wanddicken bis zu 8 mm. Mit dem Strukturspannungskonzept können RHP mit Wanddicken bis zu 16 mm und KHP mit Wanddicken bis zu 50 mm bemessen werden. Die für die Anwendung des Nennspannungskonzepts angegebenen

Kerbfallklassen in DIN EN 1993-1-9 [1] entsprechen dabei denen im CIDECT Design Guide 8 [39]. Sie gelten für Stähle bis zu 700 N/mm<sup>2</sup> Streckgrenze.

Tabelle 2-2: Allgemeingültige Norm für die Ermüdungsbemessung von Hohlprofil-K-Knoten

Table 2-2: General standards for fatigue design of hollow section K-joints

Regelwerk	CIDECT DG 8		DIN EN 1993-1-9	ISO 14347
Methode	Nennspannung	Strukturspannung	Nennspannung	Strukturspannung
Gültigkeitsbereich	<p>- RHP und KHP K-Knoten mit Spalt und Überlappung</p> <p>- Getrennter Nachweis für Gurt und Streben erforderlich</p> <p>- Kehlnähte erlaubt für Streben mit Wanddicken <math>t &lt; 8</math> mm</p> <p>- nur RHP:  <math>0,5(b_o - b_i) \leq g \leq 1,1(b_o - b_i)</math>                      and <math>g \geq 2t_o</math></p> <p>- KHP und RHP:  <math>t_o</math> and <math>t_i \leq 8</math> mm  <math>35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ</math>  <math>b_o/t_o \times t_o/t_i \leq 25</math>  <math>d_o/t_o \times t_o/t_i \leq 25</math>  <math>0,4 \leq b_i/b_o \leq 1,0</math>  <math>0,25 \leq d_i/d_o \leq 1,0</math>  <math>b_o \leq 200</math> mm  <math>d_o \leq 300</math> mm  <math>-0,5h_o \leq e_{ip} \leq 0,25h_o</math>  <math>-0,5d_o \leq e_{ip} \leq 0,25d_o</math>  <math>e_{op} \leq 0,02b_o</math> or <math>\leq 0,02d_o</math></p>	<p>- K-Knoten mit Spalt</p> <p>- RHP:  <math>4 \text{ mm} \leq t \leq 16</math> mm                      Equal braces  <math>0,35 \leq \beta \leq 1,0</math>  <math>10 \leq 2\gamma \leq 35</math>  <math>0,25 \leq \tau \leq 1,0</math>  <math>30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ</math>  <math>2\tau \leq g'</math>  <math>-0,55 \leq e/h_o \leq 0,25</math></p> <p>- KHP:  <math>4 \text{ mm} \leq t \leq 50</math> mm                      No eccentricity                      Equal braces  <math>0,3 \leq \beta \leq 0,6</math>  <math>24 \leq 2\gamma \leq 60</math>  <math>0,25 \leq \tau \leq 1,0</math>  <math>30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ</math></p>	- siehe Nennspannung CIDECT	- siehe Strukturspannung CIDECT
Axial	ja	ja	ja	ja
IPB	nein	nein	nein	nein
OPB	nein	nein	nein	nein
Steel	240 - 360 MPa und höher <sup>1)</sup>		bis 700 MPa	Alle solange Qualitätsstandards erfüllt sind

<sup>1)</sup> "Höherfeste Stähle können verwendet werden, ohne Schweißnahtnachbehandlungsmethoden wird dadurch die Ermüdungsfestigkeit jedoch nicht erhöht."



Die ISO 14347 hat die Empfehlungen für das Strukturspannungskonzept aus dem CIDECT Design Guide 8 [39] übernommen. Daher gilt derselbe Parameterbereich und auch die Empfehlung für die Stahlgütenwahl entspricht dem CIDECT Design Guide 8 [39], wobei höherfeste Stähle verwendet werden dürfen, solange gewisse Qualitätsstandards, (wie z.B. nach EN 10025) erfüllt sind, siehe Tabelle 2-2.

In Bezug auf die Lastfälle werden hier "Gleichmäßige Normalkraftbeanspruchung der Streben" zusammen mit Gurtbelastung (Normalkraft und Biegung) berücksichtigt.

Tabelle 2-3: Fachnorm für die Ermüdungsbemessung von Hohlprofil-K-Knoten

Table 2-3: Specialist standards for fatigue design of hollow section K-joints

Regelwerk	DNVGL-RP-C203	DIN EN 13001-3-1
Methode	Strukturspannung	Nennspannung
Gültigkeitsbereich	<p>- KHP K-Knoten mit Spalt und Überlappung</p> $0,2 \leq \beta \leq 1,0$ $8 \leq \gamma \leq 32$ $0,2 \leq \tau \leq 1,0$ $20^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ $-\frac{0,6\beta}{\sin \theta} \leq \zeta = \frac{g}{d_0} \leq 1,0$	<p>- alle Knotentypen</p> <p><math>d_0 \leq 120\text{mm}</math>; wenn <math>d_0 &gt; 120\text{mm} \Rightarrow</math> mit Beiwert <math>f_s = \sqrt[3]{120/d_0}</math> multipliziert werden</p> <p><math>t_0 \leq 12,5\text{mm}</math></p> <p>Schweißnahtdicke <math>a = \min t</math></p> <p><math>35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ</math></p> <p><math>2\gamma = d_0/t_0 &lt; 25</math></p> <p><math>1/\tau = t_0/t_i &gt; 1</math></p> <p><math>0,6 \leq \beta \leq 1</math></p> <p>Exzentrizität:</p> <p>1) in der Ebene des Gitterwerks: <math>-0,5 \leq e/d_0 \leq 0,25</math></p> <p>2) senkrecht zur Ebene des Gitterwerks: <math>\leq 0,02d_0</math></p> <p>Berücksichtigung der Biegebeanspruchung einzelner Bauteile</p> <p>Schweißen unter Werkstattbedingungen. Beim Schweißen auf der Baustelle: mit Beiwert 0,9 abgemindert bei <math>\Delta\sigma_c</math></p> <p>- K-Knoten mit Spalt</p> <p><math>0,6 \leq \beta \leq 1</math></p> <p><math>t_0/t_i = 1</math> und <math>t_0/t_i \geq 2</math></p> <p><math>1 &lt; t_0/t_i &lt; 2 \rightarrow</math> interpolieren</p> <p><math>g \leq 0,3d_0</math></p> <p><math>g \leq 2/3d_i</math></p>
Axial	ja	ja
IPB	ja	nein
OPB	ja	nein
Stahl	bis 960 MPa	bis 960 MPa

Für die Ermüdungsbemessung bei Offshore-Konstruktionen, sowie im Kranbau werden häufig Fachwerke aus Hohlprofilen verwendet. Daher ist in den entsprechenden Fachnormen die Ermüdungsbemessung von Hohlprofilachswerken ebenfalls aufgeführt.

Die Offshore-Richtlinie DNVGL-RP-C203 [3] ermöglicht die Anwendung des Strukturspannungskonzepts für einen größeren Parameterbereich. Außerdem beinhaltet sie auch die Lastfälle „Biegung in der Ebene“ (IPB) und „Biegung aus der Ebene“ (OPB) und Stähle bis 960 N/mm<sup>2</sup> Streckgrenze können verwendet werden.

Die Kranbaunorm EN 13001-3-1 [7] beinhaltet Stähle nach EN 10025 oder EN 10149, also ebenfalls Stähle bis maximal 960 N/mm<sup>2</sup> Streckgrenze. Die Ermüdungsbemessung erfolgt hier aber auf Basis von Nennspannungen. Daher ist der Parameterbereich auf den Anwendungsbereich des Kranbaus beschränkt und gilt z.B. nur für Wanddicken bis 12,5 mm, siehe Tabelle 2-3.

### 3 Experimentelle Untersuchungen Experimental investigation

#### *Kurzfassung*

*Das Versuchsprogramm umfasst Dauerschwingversuche an K-Knoten unterschiedlicher Abmessungen aus S355, S500 und S700. Die Versuche werden unter konstanter Lastamplitude und mit Axiallast in den Streben gefahren. K-Knoten kleinerer Abmessungen werden bei TNO in Delft, Niederlande auf einem Versuchsstand mit Einzelzylindern geprüft. K-Knoten mit großen Abmessungen werden am KIT in Karlsruhe auf einem eigens angefertigten Prüfraumen geprüft. Dehnungsmessungen werden an jeweils zwei Proben je Abmessung und Stahlgüte vorgenommen.*

#### *Abstract*

*The experimental tests program comprehends fatigue tests with constant amplitudes and axially loaded braces on RHS and CHS K-joints made of S355, S500 and S700. Small scale specimens are examined at TNO, Delft on a test frame with single acting load cylinders. Test on large scale specimens are carried out at KIT in Karlsruhe on a rigid test frame. Strain gauge measurements are made on two specimens of each test series and steel grade.*

#### 3.1 Einleitung Introduction

Innerhalb der experimentellen Untersuchungen werden Ermüdungsversuche und Verifikationsversuche an K-Knoten mit Spalt aus Rechteckhohlprofilen (RHP) und Kreishohlprofilen (KHP) durchgeführt, Abbildung 3-1.

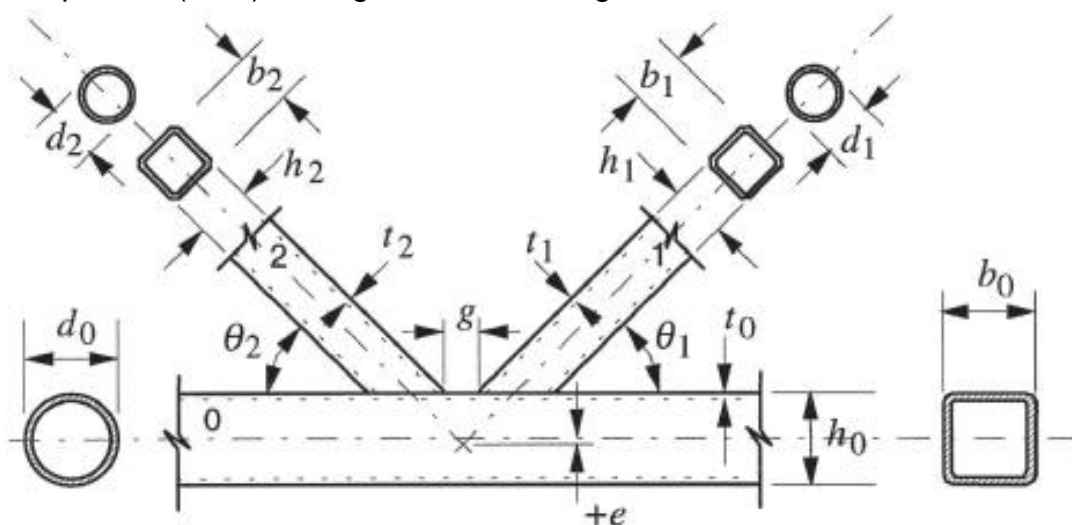


Abbildung 3-1: Hohlprofil K-Knoten mit Spalt [39]

Figure 3-1: Hollow section K-joint with gap [39]

Die Versuche werden mit konstanter Amplitude und axialbelasteten Streben durchführt. Das Versagenskriterium wird wie im Hohlprofilbau üblich als "Riss durch die Wand" definiert.

Zur Validierung des Versuchsaufbaus und zur Verifikation der Finiten-Elemente-Modelle werden jeweils zwei Probekörper je Abmessung und Stahlgüte mit Dehnungsmessstreifen präpariert und statische Messungen durchgeführt.

Für die Auswertung der Ermüdungsversuche ist zunächst die Nennspannungsschwingbreite im maßgebenden Bauteil zu bestimmen. Dafür wird die Spannung durch die eingeleitete Last im ungestörten Bauteilquerschnitt berechnet. Sekundäre Biegemomente, die aufgrund exzentrischer Lasteinleitung entstehen, werden zusätzlich durch Vergrößerungsfaktoren berücksichtigt.

### 3.2 Durchzuführende Untersuchungen Test program

Das Versuchsprogramm beinhaltet K-Knoten mit Spalt in großen Abmessungen (Wanddicke 20 mm) und kleinen Abmessungen (Wanddicken zwischen 4 und 10 mm) jeweils aus RHP und KHP. Maßgeblich werden die Stahlgüten S355 und S700 untersucht, wobei einzelne Proben auch aus S500 gefertigt werden, siehe Tabelle 3-1. Der Strebenöffnungswinkel beträgt für alle Proben 45°.

Tabelle 3-1: Geometrien der Probekörper

Table 3-1: Specimen dimension

K-Knoten	RHP - klein		KHP - klein	RHP - groß	KHP - groß
Gurt $b_0 \times h_0 \times t_0$ [mm]	130×130×4	100×100×6	193.7×10	300×300×20	323.9×20
Strebe $b_1 \times h_1 \times t_1$ [mm]	80×80×4	80×80×4	114.3×6.3	220×220×20	244.5×20
Spalt g [mm]	25	25	25,2	40	40
Exzentrizität e [mm]	4,2	19,1	-3,4	25,6	30,9
Wanddickenverhältnis $\tau = t_1/t_0$	1,0	0,67	0,63	1,0	1,0
Breitenverhältnis $\beta = b_1/b_0$	0,62	0,8	0,59	0,73	0,75
Gurtschlankheit $2\gamma = b_0/t_0$	32,5	16,7	19,4	15	16,2
Bezogene Spaltgröße $g' = g/t_0$	6,3	4,2	2,52	2,0	2,0
Bezogene Exzentrizität $e/h_0$ or $e/d_0$	0,03	0,19	0,02	0,09	0,10
Werkstoffe	S355, S500 and S700	S355 and S700	S355 and S700	S355 and S700	S355 and S700

Je Serie werden ein bis zwei Proben mit Dehnmesstreifen versehen und dadurch die Dehnungen im Bauteil unter statischer Last verifiziert (Verifikationsversuche). Diese Messungen dienen auch der Kalibrierung des Finite-Elemente-Modells. Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Ermüdungs- und Verifikationsversuche.

Tabelle 3-2: Versuchsprogramm

Table 3-2: Test program

K-Knoten	Abmessung mm]	Ermüdungsversuche			Verifikationsversuche		
		S355	S500	S700	S355	S500	S700
RHP groß	300x300x20 200x200x20	4		2	2		2
RHP klein	100x100x6 80x80x4	8		8	2		2
RHP klein	130x130x4 80x80x4		4	4		1	1
KHP groß	323.9x20 244.5x20	4	-	2	2	-	2
KHP klein	193.7x10 114.3x6.3	8	-	8	2	-	2
<b>Summe</b>		<b>24</b>	<b>4</b>	<b>24</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>9</b>

### 3.3 Herstellung der Probekörper Fabrication of specimens

Für die Fertigung der geplanten Probekörper kommen sowohl warmgefertigte, nahtlose Rohre, warmgefertigte längsnahtgeschweißte sowie kaltgeformte und längsnahtgeschweißte Profile zum Einsatz, siehe Anhang A1.

Um eine einheitliche Fertigung der Knoten zu gewährleisten wurden Herstellungs- und Schweißanweisungen ausgearbeitet. Das gezeigte Vorgehen berücksichtigt eine geeignete Schweißnahtausführung und ausreichende Fertigungsqualität sowie die Fertigungsabläufe in der Praxis. Die vollständige Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte sowie die zugehörigen Schweißparameter sind in Anhang A3 aufgeführt.

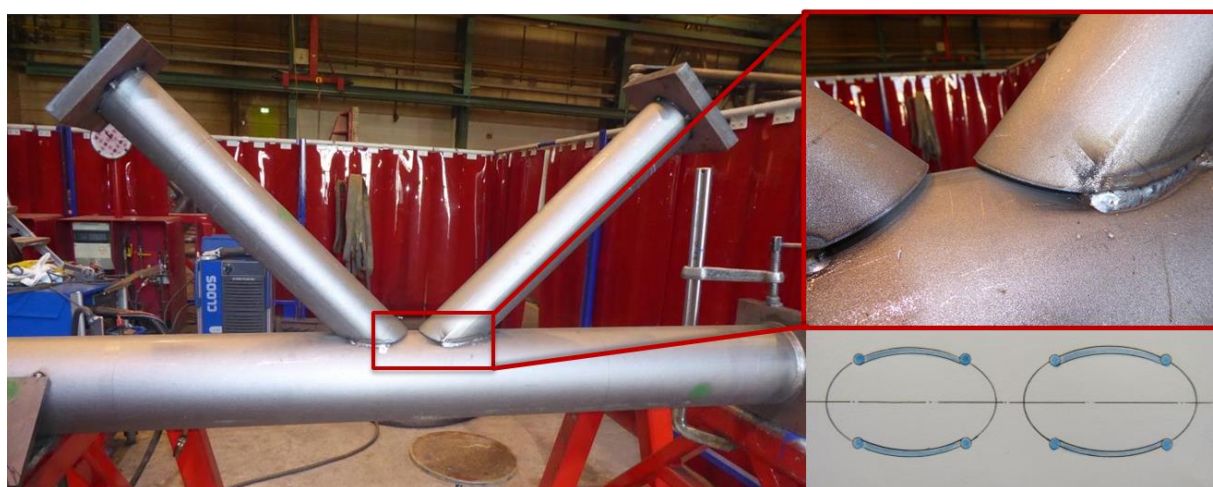


Abbildung 3-2: Heftschweißung bei kleinen KHP K-Knoten

Figure 3-2: Tack welding of small CHS K-joints

In Abbildung 3-2 ist die Heftschweißung bei kleinen KHP K-Knoten dargestellt. Diese ist etwa 40 cm lang und verläuft seitlich der Strebe an der sog. Sattelposition. Die Kantenvorbereitung sieht eine HV-Naht über etwa 2/3 des Strebenumfangs mit Übergang in eine Kehlnaht an der Rückseite der Strebe vor. Die Schweißnaht wird bei 10mm Wanddicke mit einer Wurzellage und drei Decklagen ausgeführt. Bei kleinen Spaltweiten ist es im Kranbau üblich den Spalt zu überschweißen, wie in Abbildung 3-4 dargestellt. Hierbei liegt der Nahtansatzpunkt an der sog. Kronenferse und läuft in einem Zug über den Sattel zum Kronenfuß über den Spalt zum Kronenfuß der zweiten Strebe, dort weiter über den Sattel zum Nahtendpunkt an der Kronenferse der zweiten Diagonale. Dieses Vorgehen bei Kranfachwerkträgern hat den Vorteil, dass im hochbeanspruchten Spaltbereiche keine Schweißnahtansatz- bzw. -endpunkte vorliegen.

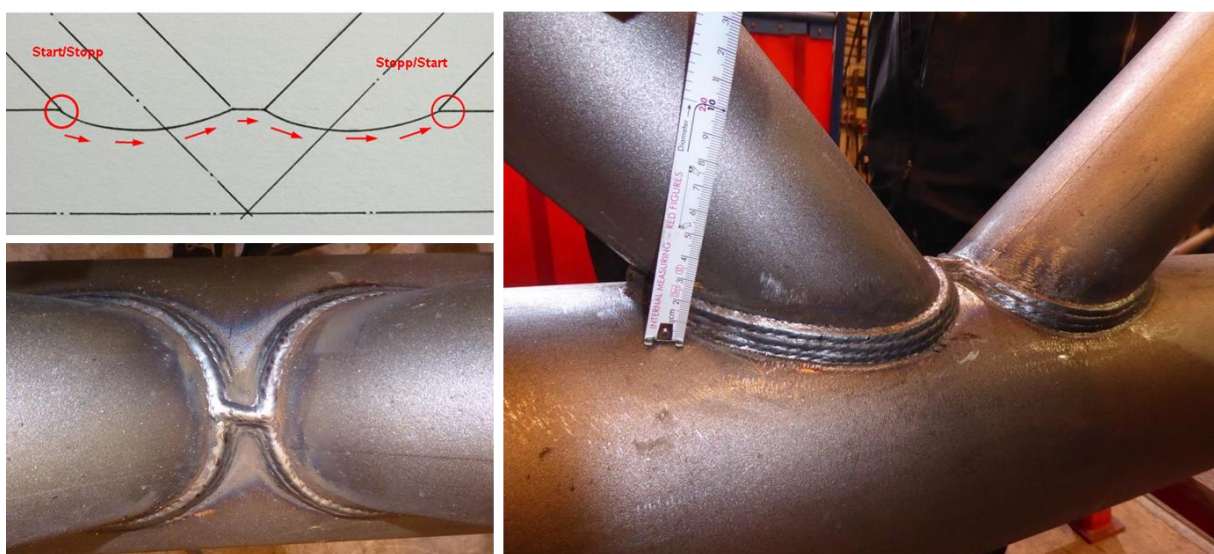


Abbildung 3-3: Mehrlagenschweißung bei kleinen KHP K-Knoten

Figure 3-3: Multi-pass welding of small CHS K-joints

Die Schweißanweisung für kleine RHP K-Knoten ist ebenfalls in Anhang A3 zu finden. Hierfür ist am vorderen Ende der Streben ein Fasenwinkel von  $50^\circ$  vorgesehen. Die Heftpunkte liegen an den Enden der Eckradien der RHP-Streben, Abbildung 3-4.

Die Lage des Schweißnahtansatzpunktes in der Mitte des Eckradius der Strebe ist ebenfalls nach der praxisnahen Vorgehensweise im Kranbau gewählt. Die Schweißnahtfolge ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Nach DIN EN 1090-2 [1] und früheren Untersuchungen [9],[18] ist ein Startpunkt im Eckradius grundsätzlich zu vermeiden. Hier wird jedoch derart argumentiert, dass das Schweißen im Spaltbereich häufig schwerer umzusetzen ist, als ein Überschweißen der Eckbereiche. Zudem wird durch das Überschweißen des Ansatzpunktes die Kerbe entschärft. Die Versuchsergebnisse liegen dann in jedem Fall auf der sicheren Seite.

Die großen RHP und KHP K-Knoten wurden bei Konecranes GmbH (früher Terex MHPS GmbH) in Düsseldorf gefertigt. Die Ausführung der Schweißnähte erfolgte hierbei nach den Vorgaben der DIN EN 1090-2 [1].

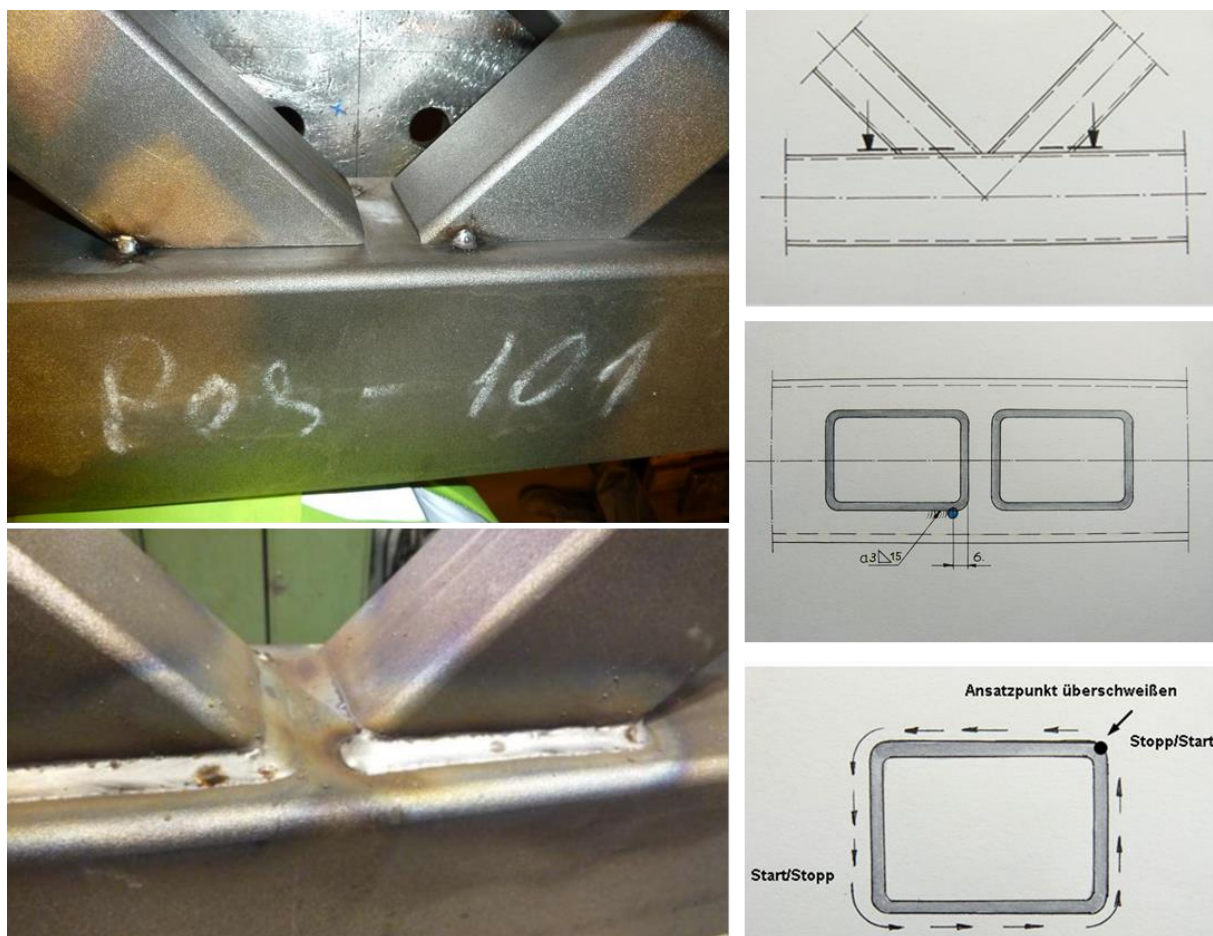


Abbildung 3-4: Schweißen der kleinen RHP K-Knoten

Figure 3-4: Welding of small RHS K-joints

Aufgrund der komplexen Versuchseinrichtung (vgl. hierzu Abschnitt 3.4) sind für die großen Knoten enge Toleranzen bei den Abmessungen und den Bohrungen an den Laschen für die Lastaufnahme einzuhalten. Daher wurde bereits für die Fertigung der großen K-Knoten ein Rahmen verwendet, der die Abmessung der Versuchseinrichtung abbildet und somit das Einhalten der Toleranzen ermöglicht, siehe Abbildung 3-5.

Die Schweißnahtvorbereitung erfolgte entsprechend wie für die kleinen K-Knoten mit einer Fase für eine HV-Naht über  $2/3$  des Strebumfangs bei KHP Streben, und einer  $50^\circ$  Fase an der Stirnseite für die RHP-Streben, vgl. Anhang A3. Schweißnahtansatzpunkte wurden bei diesen Knoten in den Bereichen zwischen Krone und Sattel angesetzt und besonders unebene Bereiche der Schweißnaht im Anschluss überarbeitet. Der Spaltbereich bleibt bei großen Knoten frei und die Streben werden getrennt voneinander angeschweißt.

Alle Proben wurden vor der Versuchsdurchführung vermessen und dokumentiert, siehe Anhang A. Jeweils zwei Proben je Serie werden mit Dehnmessstreifen (DMS) versehen und für die geplanten Verifikationsversuche herangezogen.



Abbildung 3-5: Herstellung der großen K-Knoten (Konecranes GmbH)

Figure 3-5: Fabrication of large K-joints (Konecranes GmbH)

### 3.4 Versuchsaufbau für große K-Knoten am KIT Test setup at KIT for large K-joints

Die Versuche an großen K-Knoten mit 20 mm Nennwanddicke wurden an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Aufgrund der großen erforderlichen Prüfkräfte kommt eine 6.300 kN Universalprüfmaschine in stehender Viersäulenbauweise der Firma Schenck zum Einsatz. Die Prüfmaschine besitzt eine maximale statische Prüfkraft von 6.300 kN sowie eine maximale dynamische Prüfkraft von 5.000 kN. Die Versuchsdurchführung erfolgt zugschwellend bei einem Spannungsverhältnis von  $R=\sigma_u/\sigma_o=+0,2$ .

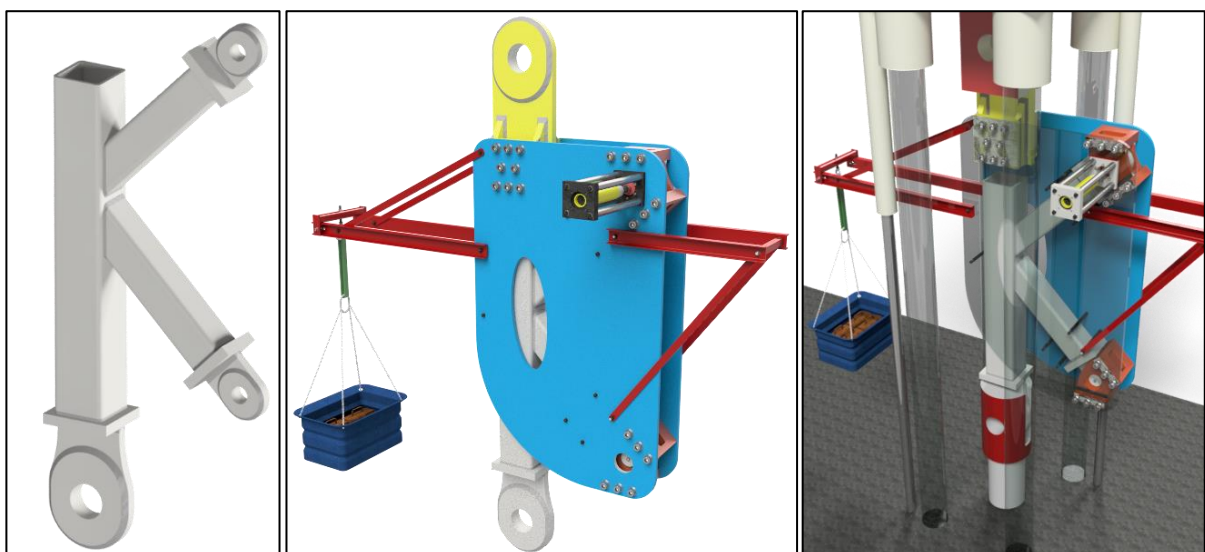


Abbildung 3-6: Versuchsrahmen am KIT für große K-Knoten

Figure 3-6: Test frame at KIT for large K-joints



Die Versuche an den großen Probekörpern (Abbildung 3-6 links) werden mit Hilfe eines scheibenartigen Prüfrahmens durchgeführt (Abbildung 3-6 Mitte). Um den Rissfortschritt visuell zu überwachen, befindet sich in den Scheiben im Bereich des Knotenzentrums ein elliptischer Ausschnitt. Während die Prüfvorrichtung samt Auslegern im oberen Bereich (gelbe Lasteinleitung) gelenkig mit der oberen Aufnahme der Prüfmaschine verbunden ist (Abbildung 3-6 rechts), erfolgt die gelenkige Lagerung der Lasteinleitungslaschen beider Strebenenden des Knotens durch Bolzen  $\varnothing 100$  mm an den orangefarbenen Lasteinleitungen. Die Verbindung zwischen der Lasteinleitungslasche des Gurtes mit der unteren Maschinenaufnahme erfolgt ebenfalls gelenkig. Zwischen dem oberen Ende des Gurtprofils und der oberen Lasteinleitung der Prüfmaschine besteht keine Verbindung. Durch eine kraftgesteuerte Vertikalverschiebung der unteren Maschinenaufnahme werden die Prüfkräfte in das Gurtprofil eingeleitet. Durch das statische System innerhalb des Prüfrahmens ergeben sich gegengleiche Strebenkräfte. Der Knotentausch erfolgt durch händisches Entfernen des unteren Strebenbolzens sowie durch hydraulischen Verschiebung des oberen Strebenbolzens. Die iterative Konzeption des Prüfrahmens mit Hilfe von FE-Berechnungen sowie die detaillierte Beschreibung des Knotentauschs ist in Anhang B1 dargestellt.

### 3.5 Versuchsaufbau bei TNO für kleine K-Knoten Test setup at TNO for small K-joints

Die Versuche an kleinen K-Knoten bei TNO, Delft werden auf einem eigens für diese Untersuchungen hergestellten Prüfrahmens durchgeführt werden. Die Lasteinleitung erfolgt hierbei über Einzelzylinder an beiden Streben, siehe Abbildung 3-7.



Abbildung 3-7: Versuchsrahmen bei TNO für kleine K-Knoten

Figure 3-7: Test frame at TNO for small K-joints

Die Versuche werden last- und frequenzgesteuert gefahren.

Statische Verifikationsversuche zur SCF-Bestimmung und zur Kalibrierung des FE-Modells werden bei insgesamt 9 Probekörpern durchgeführt.

### 3.6 Ermüdungsversuche Fatigue tests

Für die Auswertung der Ermüdungsversuche muss zunächst die Nennspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{nom}$  im belasteten Bauteil bestimmt werden. Dafür wird die Spannung durch die einleitete Kraft  $F$  und den ungestörten Bauteilquerschnitt  $A$  berechnet.

Sekundäre Biegemomente, die durch die exzentrische Lasteinleitung in den Knoten hervorgerufen werden, werden durch den Vergrößerungsfaktor  $MF$  („magnification factor“) berücksichtigt, vgl. Gleichung (1).

$$\Delta\sigma_{nom} = MF \cdot \frac{F_{max} - F_{min}}{A} \quad (1)$$

Eine Abschätzung für den Vergrößerungsfaktor  $MF$  gibt sowohl CIDECT [39] als auch die EN 1993-1-9 [6] an. Demnach wird für Streben von KHP K-Knoten mit Spalt die Nennspannungsschwingbreite mit einem Faktor von  $MF = 1,3$  beaufschlagt, Streben von RHP K-Knoten mit Spalt mit  $MF = 1,5$  (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Vergrößerungsfaktoren  $MF$  zur Berücksichtigung von sekundären Biegemomenten bei K-Knoten mit Spalt

Table 3-3 Magnification factors  $MF$  to account for secondary bending moments in K-Joints with gap

Knotentyp	Gurt	Strebe
KHP K-Knoten mit Spalt	1.5	1.3
RHP K-Knoten mit Spalt	1.5	1.5

Für jeden einzelnen Ermüdungsversuch wird ein eigenes Datenblatt angefertigt, in dem übersichtlich die Geometrie, Belastung und Versagensart zusammen mit den maßgeblichen Lastspielzahlen dargestellt wird. Diese sind in Anhang B3 aufgeführt.

#### 3.6.1 Versagenskriterium Failure criterion

Im Allgemeinen wird zwischen den folgenden vier unterschiedlichen Definitionen für die Bruchlastspielzahl, die zum Versagen führt, unterschieden:

- N<sub>1</sub>: Lastspielzahl bei 15% Änderung in der Dehnungsmessung nahe des Rissausgangspunktes
- N<sub>2</sub>: Lastspielzahl beim ersten sichtbaren Anriss
- N<sub>3</sub>: Lastspielzahl bei Riss durch die Wand
- N<sub>4</sub>: Lastspielzahl bei Verlust der Tragfähigkeit

Die Ermüdungsversuche werden grundsätzlich bis zum Durchriss durch die gesamte Wanddicke  $N_3$  durchführt, wenn möglich auch noch darüber hinaus bis  $N_4$  erreicht wird. Die Dokumentation beinhaltet soweit möglich auch die Bestimmung der Lastspielzahlen  $N_1$  und  $N_2$ .

### 3.6.2 Nomenklatur Nomenclature

Die Bezeichnung der Testserien folgt im weiteren Bericht diesem Schema:

“Knotentyp $\Theta$ - $b_0 \times t_0$ - $b_i \times t_i$ -g-Werkstoff” mit “K” für K-Knoten, Strebenöffnungswinkel  $\Theta$ , Gurtbreite  $b_0$  bzw. Gurtdurchmesser  $d_0$  und Gurtwanddicke  $t_0$ , Strebenbreite  $b_i$  bzw. Strebendurchmesser  $d_i$  und Strebenwanddicke  $t_i$ , Spaltweite  $g$  und Werkstoff.

### 3.6.3 Experimentelle Untersuchungen an kleinen RHP K-Knoten Fatigue tests on small RHS K-joints

Insgesamt 18 Ermüdungsversuche an kleinen K-Verbindungen mit rechteckigen Hohlprofilen aus Stahl der Güte S500 und S700 werden in drei verschiedenen Versuchsreihen durchgeführt, siehe Tabelle 3-4. Die Abmessungen werden entsprechend der früheren CIDECT-Versuche gewählt. Während für die Versuchsreihe K45-100x6-80x4-g25-S700 neun Probekörper aus S700 getestet werden, werden innerhalb der Serien K45-130x4-80x4-g25-S500 und K45-130x4-80x4-g25-S700 4 Proben aus S500 und 5 Proben aus S700 geprüft.

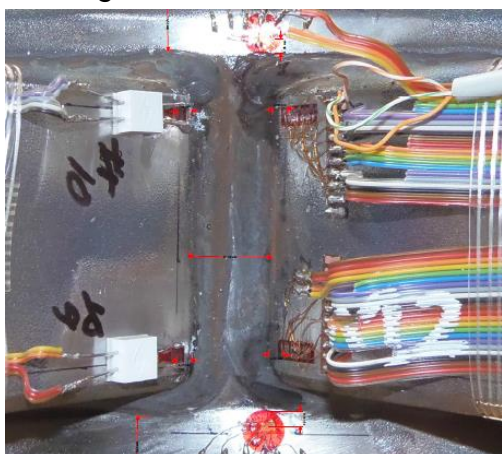
Tabelle 3-4: Versuchsserien für kleine RHP K-Knoten

Table 3-4 Test series for small RHS K-joints

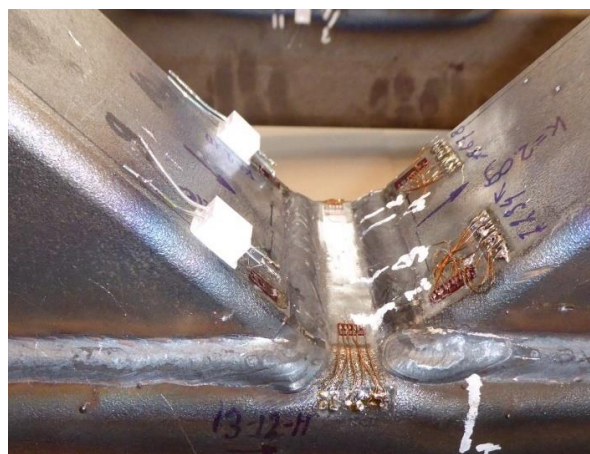
	Anzahl	Gurt [mm]		Strebe [mm]		Spalt [mm]	Winkel [°]	Stahl
	Versuche	$b_0$	$t_0$	$b_i$	$t_i$	$g$	$\Theta$	
K45-100x6-80x4-g25-S700	9	100	6	80	4	25	45	S700
K45-130x4-80x4-g25-S500	4	130	4	80	4	25	45	S500
K45-130x4-80x4-g25-S700	5	130	4	80	4	25	45	S700

Da die Stahlfestigkeit keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, wie sich im weiteren Verlauf der Untersuchungen herausstellt, werden gleich große Proben mit unterschiedlichen Stählen gemeinsam ausgewertet.

Die lokale Geometrie der Schweißnaht ist bei den einzelnen Proben insbesondere im Spaltbereich sehr unterschiedlich (Abbildung 3-8), was zu einer ungleichmäßigen Spannungskonzentration in Gurt und in den Streben führt.



Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-3



Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-2

Abbildung 3-8: Unterschiedliche Schweißnähte im Spaltbereich

Figure 3-8: Varying welds in the gap

In Abbildung 3-9 sind die Versuchsergebnisse an kleinen RHP K-Knoten in einem Wöhlerdiagramm dargestellt. Die orangene Mittelwertkurve gilt für die Serien K45-130x4-80x4-g25-S500 und K45-130x4-80x4-g25-S700 mit  $t_0 / t_1 = 1,0$ . Die Mittelwertkurve in grün für die Versuchsserie K45-100x6-80x4-g25-S700 mit  $t_0 / t_1 = 1,5$  ergibt eine vergleichsweise größere Ermüdungsfestigkeit. Für beide Kurven wird die Neigung  $m = 5,0$  vorgegeben, da diese üblicherweise für Hohlprofilverbindungen verwendet wird.

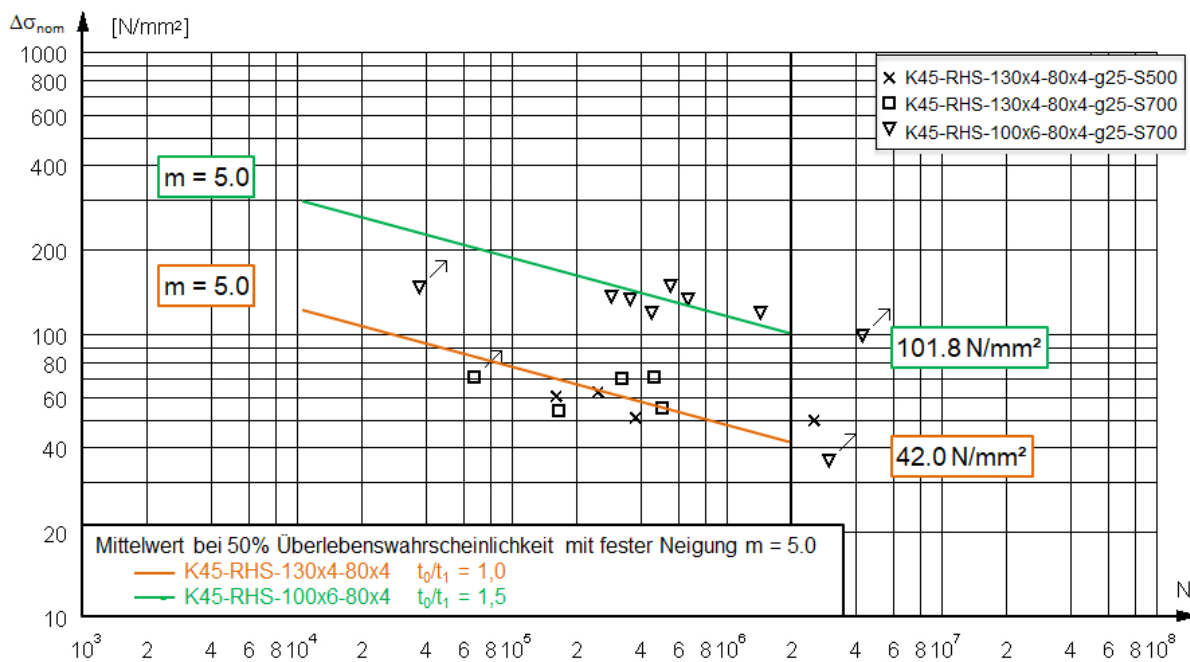


Abbildung 3-9: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an kleinen RHP K-Knoten

Figure 3-9 Fatigue test results of small RHS K-joints

### 3.6.4 Experimentelle Untersuchungen an großen RHP K-Knoten Fatigue tests on large RHS K-joints

Für die Testreihen an großen RHP K-Knoten werden sechs Probekörper geprüft: vier aus S355 und zwei aus S700, siehe Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Versuchsserien für große RHP K-Knoten

Table 3-5 Intermediate Test series for large RHS K-joints

Serie	Anzahl Versuche	Gurt [mm]		Strebe [mm]		Spalt [mm] g	Winkel [°] Θ	Stahl
		$b_0$	$t_0$	$b_i$	$t_i$			
K45-300x20-220x20-g40-S355	4	300	20	220	20	40	45	S355
K45-300x20-220x20-g40-S700	2	300	20	220	20	40	45	S700

Auch hier führen Unterschiede in der Schweißnahtform zu einer Streuung der Ergebnisse. An einer Probe aus S700 versagte zudem die Schweißnaht an der Lasche zur Lastaufbringung, so dass dieses Ergebnis (mit Pfeil gekennzeichnet) für die Auswertung nicht berücksichtigt werden kann. Grundsätzlich reichen fünf Versuche für eine repräsentative statistische Auswertung nicht aus. Im

Wöhlerdiagramm in Abbildung 3-10 ist die Mittelwertkurve mit vorgegebener Neigung  $m = 5.0$  dargestellt.

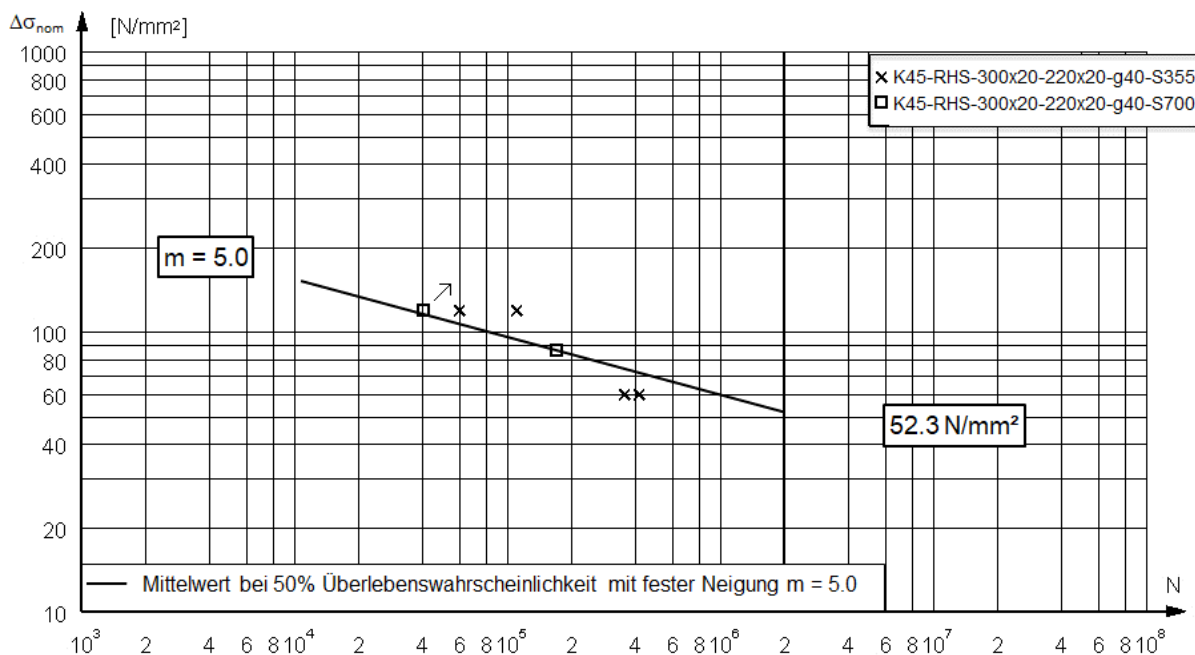


Abbildung 3-10: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen RHP K-Knoten

Figure 3-10 Fatigue test results of large RHS K-joints

### 3.6.5 Experimentelle Untersuchungen an kleinen KHP K-Knoten Fatigue tests on small CHS K-joints

Es werden 16 Ermüdungsversuche an kleinen K-Knoten mit kreisförmigen Hohlprofilen aus Stahl S355 und S700 durchgeführt, siehe Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Versuchsserien für kleine KHP K-Knoten

Table 3-6 Intermediate Test series for small CHS K-joints

Serie	Anzahl Versuche	Gurt [mm]		Strebe [mm]		Spalt [mm] g	Winkel [°] Θ	Stahl
		$d_0$	$t_0$	$d_i$	$t_i$			
K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S355	8	193.7	10	114.3	6.3	25	45	S355
K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700	8	193.7	10	114.3	6.3	25	45	S700

Auch hier wird zunächst eine starke Streuung der Versuchsergebnisse, insbesondere der Proben aus S700, beobachtet. Bei näherer Betrachtung kann man feststellen, dass bei den Proben mit relativ geringen Lastwechselzahlen der erste Riss auf der Oberfläche in der Mitte der Schweißnaht auftritt. Da die Rissentstehung in der Regel an der Schweißspitze erfolgt, deutet ein Riss in der Mitte der Schweißnaht auf eine Rissentstehung von der Schweißwurzel aus hin. Beim Öffnen der Proben 4, 5, 7 und 8 durch Inspektion der Bruchfläche kann eine nicht voll durchgeschweißte Naht als Ursache für die Wurzelrisse festgestellt werden, siehe Abbildung 3-11. Diese 4 Proben mit Wurzelrisse werden im Weiteren nicht berücksichtigt, so dass für die Auswertung 12 Prüfergebnisse verbleiben.

Beim Vergleich der einzelnen Prüfwerte erreichen Probekörper aus S355 und S700 in Versuchen mit gleichem Spannungsniveau eine nahezu identische Anzahl von Lastwechseln bis zum Versagen. Dies bestätigt die These, dass die Stahlsorte keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat.



Abbildung 3-11: Bruchfläche Probekörper K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700-8

Figure 3-11 Fracture surface specimen K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700-8

Die Darstellung der Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm in Abbildung 3-12 zeigt eine geringe Streuung und eine sehr hohe Ermüdungsfestigkeit der Mittelwertkurve mit fester Neigung  $m = 5.0$ .

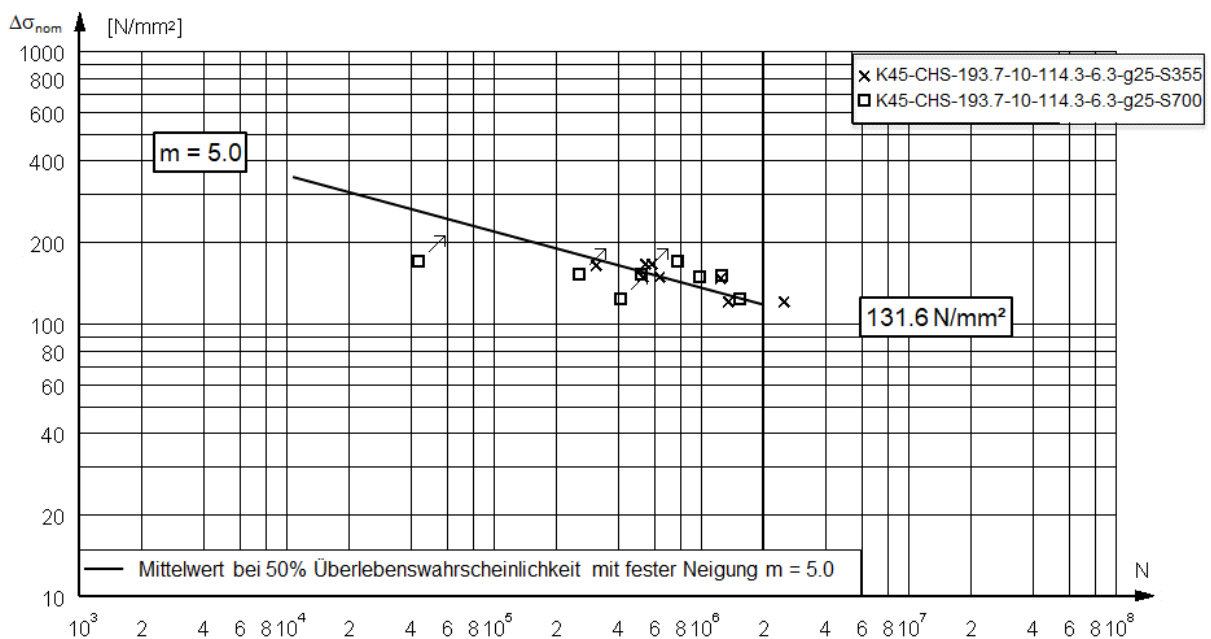


Abbildung 3-12: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an kleinen KHP K-Knoten

Figure 3-12 Fatigue test results of small CHS K-joints

### 3.6.6 Experimentelle Untersuchungen an großen KHP K-Knoten Fatigue tests on large CHS K-joints

Insgesamt werden sechs Probekörper aus S355 und S700 in zwei verschiedenen Versuchsreihen für große KHP K-Knoten geprüft, siehe Tabelle 3-7.

Tabelle 3-7: Versuchsserien für große KHP K-Knoten  
Table 3-7 Intermediate Test series for large CHS K-joints

Serie	Anzahl Versuche	Gurt [mm]		Strebe [mm]		Spalt [mm] g	Winkel [°] ⊙	Stahl
		d <sub>0</sub>	t <sub>0</sub>	d <sub>i</sub>	t <sub>i</sub>			
K45-323.9x20-244.5x20-g40-S355	4	323.9	20	244.5	20	40	45	S355
K45-323.9x20-244.5x20-g40-S700	2	323.9	20	244.5	20	40	45	S700

In der graphischen Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 3-13 zeigt sich ein erheblicher Unterschied zwischen den beiden aus S700 gefertigten K-Knoten. Ursächlich dafür ist die unterschiedlichen Formen der Schweißnaht und des Spalts, da ein Probekörper mit Stichraupentechnik und einer mit Steignahnt verschweißt wurde, siehe Anhang B3.

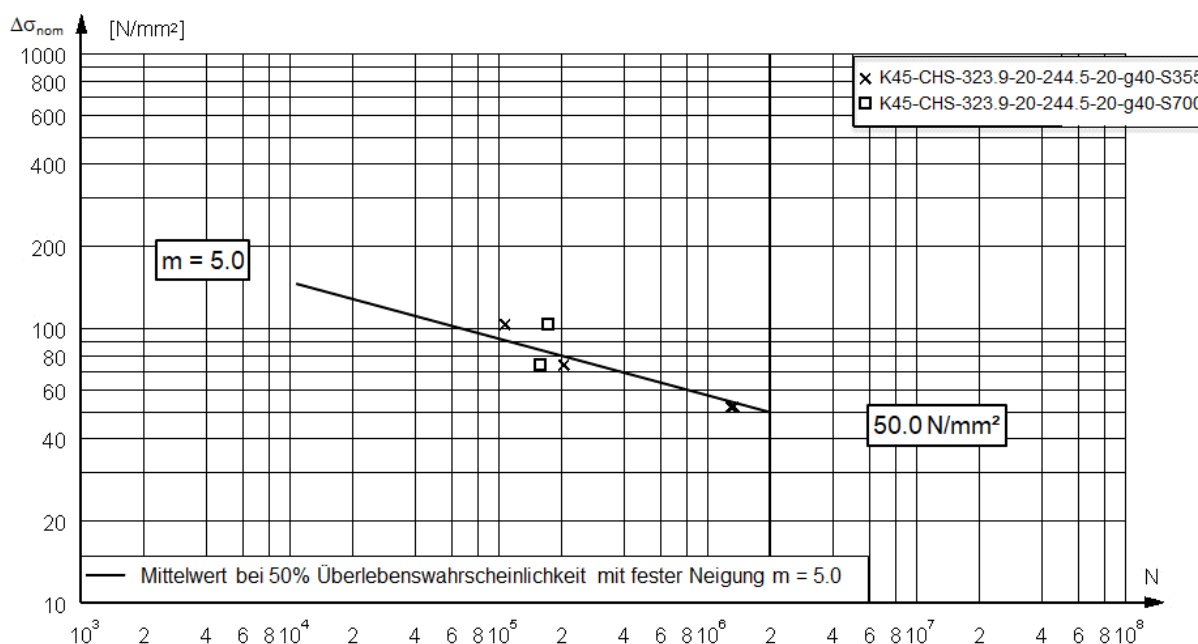


Abbildung 3-13: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen KHP K-Knoten

Figure 3-13 Fatigue test results of large CHS K-joints

Ein genauerer Blick auf die Proben der Serie K45-323.9x20-244.5x20-g40-S355 zeigt, dass die Gurtprofile ein Untermaß aufweisen. Durch Schweißen der Proben in dem in Abbildung 3-5 gezeigten Rahmen wurden die Streben nicht mittig auf den Gurt geschweißt. Infolgedessen werden die K-Knoten während der Versuchsdurchführung durch den Versatz mit einem zusätzlichen Moment belastet. Dadurch wird die Spannung im Knoten zusätzlich erhöht, was in der Auswertung in Abbildung 3-5 nicht berücksichtigt ist.

### 3.6.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Ermüdungsversuche Summary of fatigue test results

Bei der graphischen Darstellung der Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Abbildung 3-9, für die Testreihen K45-100x6-80x4-g25 und K45-130x4-80x4-g25 zeigt sich eine breite Streuung der Testergebnisse, die aus der unterschiedlichen Ausführung der Schweißnaht resultiert. Dies hat zur Folge, dass eine weiterführende statistische Auswertung nicht sinnvoll ist. Für Versuchsreihen an großen K-Knoten K45-300x20-220x20-g40 (Abbildung 3-10) und K45-323.9x20-244.5x20-g40 (Abbildung 3-13) ist die statistische Auswertung aufgrund der geringen Anzahl der Versuchsergebnisse nicht repräsentativ.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Tabelle 3-8 werden daher auf Basis von Mittelwertkurven dargestellt. Zunächst werden für die jeweilige Serie die verwendeten Werkstoffe und die Anzahl der durchgeführten Versuche aufgelistet. Die Zahl in Klammer gibt darin die Anzahl der Versuche an, die für die Auswertung nicht berücksichtigt werden können (in den Diagrammen mit Pfeil gekennzeichnet).

In der nächsten Spalte ist die freie Neigung der Wöhlerkurve angegeben, die sich für die Mittelwertkurve aus den Versuchen ergibt. Dazu wird dann in der folgenden Spalte die mittlere Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,m\text{-frei}}$  bei 2 Millionen Lastspielen und 50% Überlebenswahrscheinlichkeit für die genannte freie Neigung bestimmt. In der darauffolgenden Spalte wird dann die mittlere Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,m=5}$  bei 2 Millionen Lastspielen und 50% Überlebenswahrscheinlichkeit für die Neigung  $m = 5,0$  bestimmt, wie sie für Hohlprofilknoten verwendet wird. Die sehr viel steilere, freie Neigungen mit kleineren Werten resultieren daher, dass im niedrigen Lastspielzahlbereich  $< 10^5$  keine Versuchsergebnisse vorhanden sind.

In der letzten Spalte der Tabelle 3 wird die Wöhlerkurve mit  $m = 5,0$  in den untersten Versuchspunkt verschoben und dann die Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,m=5}$  bei 2 Millionen Lastspielen bestimmt. Diese Kurve bildet damit die so genannte untere Hüllkurve mit fester Neigung für die Versuchsergebnisse.

Tabelle 3-8: Ergebnisse der Ermüdungsversuche

Table 3-8 Fatigue test results

Serie	Stahl	Anzahl Versuche (n.b.)	Freie Neigung	$\Delta\sigma_{c,m\text{-frei}}$	$\Delta\sigma_{c,m=5}$	Hüllkurve
				$P_{\bar{U}} = 50\%$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$P_{\bar{U}} = 50\%$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$m = 5.0$ [N/mm <sup>2</sup> ]
K45-100x6-80x4-g25	S700	9 (3)	2,6	80,2	101,8	89,2
K45-130x4-80x4-g25	S500, S700	9 (1)	2,4	30,1	42,0	33,4
K45-300x20-220x20-g40	S355, S700	5 (1)	2,2	28,8	52,3	42,5
K45-193.7x10-114.3x6.3-g25	S355, S700	16 (4)	3,7	118,3	131,6	113,5
K45-323.9x20-244.5x20-g40	S355, S700	6	3,3	42,3	50,0	44,6



Für die Klassifizierung und die statistische Auswertung werden Versuchsdaten aus der Literatur hinzugezogen. Diese Auswertung wird innerhalb der Bemessungsempfehlung nach dem Nennspannungskonzept in Kapitel 6.2 vorgenommen.

### 3.7 Dehnungsmessungen Strain gauge measurements

Je Serie werden zwei Probenkörper mit DMS versehen. Die Dehnungsmessungen dienen zunächst zur experimentellen Bestimmung von Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF), siehe Abbildung 3-14. Des Weiteren wird anhand der Messungen das Finite-Elemente Modell (FEM) validiert, so dass weitere SCFs mittels FEM berechnet und zur Verfügung gestellt werden können.

Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen sind in Anhang B2 aufgeführt.



Abbildung 3-14: Drauf- und Seitenansicht Probekörper K45-RHS-130x4-80x4-S700-2

Figure 3-14 Top and side view of specimen K45-RHS-130x4-80x4-S700-2

In Anhang B2 sind die gemessenen Dehnungen für jede Probe angegeben. Nach Möglichkeit werden die Dehnungskonzentrationsfaktoren (SNCF) durch lineare (CHS) oder quadratische (RHS) Extrapolation berechnet. Die Grafiken in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 zeigen exemplarisch die Auswertung der Hot-Spot-Dehnungen für die Versuchsreihe K45-130x4-80x4 an den maßgeblichen Positionen der Strebe ("Brace Gap") und des Gurts ("Chord Gap"). Die Werte in den Diagrammen basieren auf den Durchschnittswerten der Messungen an verschiedenen Proben. Die Trendlinien basieren auf ähnlichen Messorten.

Die SNCFs werden nach Gl. (2) für RHP K-Knoten und Gl. (3) für KHP K-Knoten [36] in SCFs umgerechnet:

$$SCF_{RHP} = 1,1 \cdot SNCF_{RHP} \quad (2)$$

$$SCF_{KHP} = 1,2 \cdot SNCF_{KHP} \quad (3)$$

Die über DMS-Messung ermittelten SCFs sind für kleine RHP K-Knoten in Tabelle 3-9 zusammenfasst.

Tabelle 3-9: SCFs für kleine RHP K-Knoten und aus Dehnungsmessungen  
Table 3-9 SCFs for small RHS K-joints by means of strain gauges

Probekörper	Position	$\delta\varepsilon_{nom}$	$\delta\varepsilon_{h.s.}$	SNCF	SCF
K45-RHS-130x4-80x4-S700-2	Gurt Spalt	186.43	1260	6.76	7.44
K45-RHS-130x4-80x4-S700-2	Strebe Spalt	225.71	2530	11.21	12.33
K45-RHS-130x4-80x4-S700-3	Strebe Spalt	225.30	2530	11.23	12.35
K45-RHS-100x6-80x4-S700-1	Gurt Spalt	246.70	1039	4.21	4.63
K45-RHS-100x6-80x4-S700-1	Strebe Spalt	316.65	2866	9.05	9.96
K45-RHS-130x4-80x4-S500-1	Gurt Ferse	169.09	419	2.48	2.73
K45-RHS-130x4-80x4-S500-1	Strebe Spalt	215.45	2530	11.74	12.91

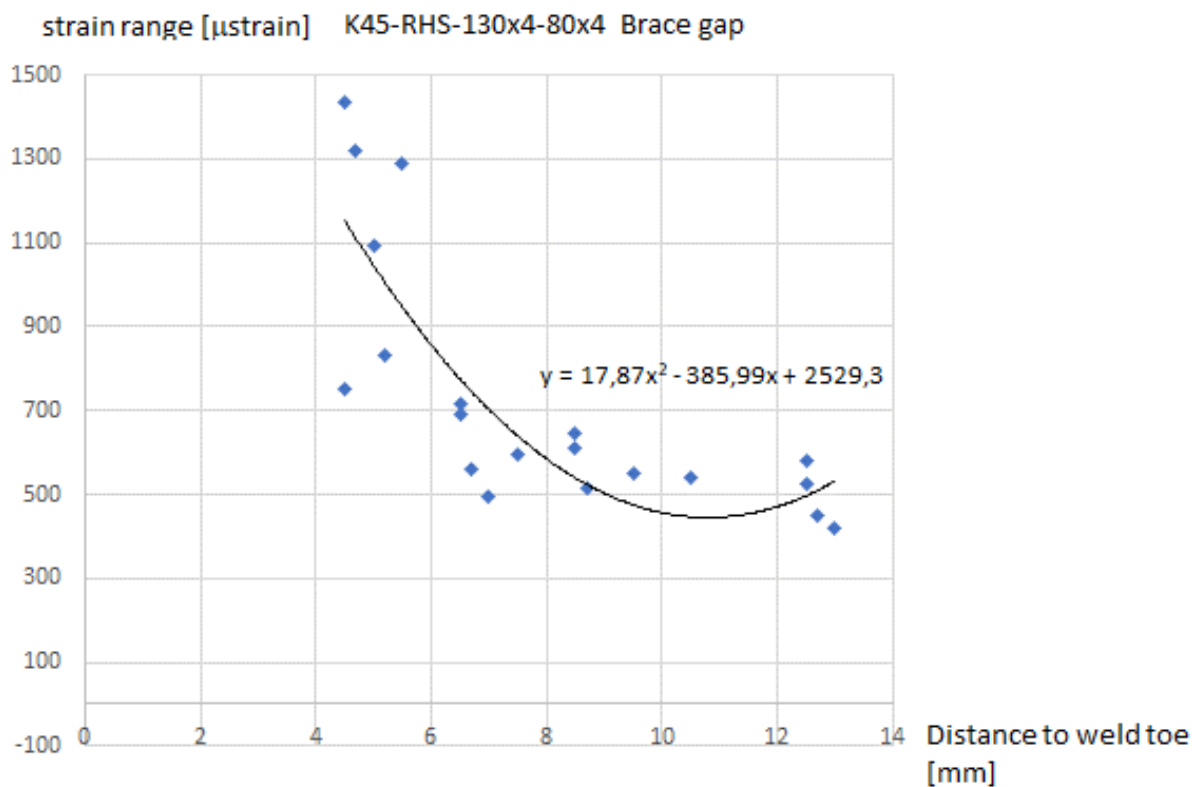


Abbildung 3-15: Auswertung der Hot-Spot-Dehnung der Serie K45-RHP-130x4-80x4 – Strebe Spalt  
Figure 3-15 Hot spot strain evaluation for series K45-RHS-130x4-80x4 – Brace gap

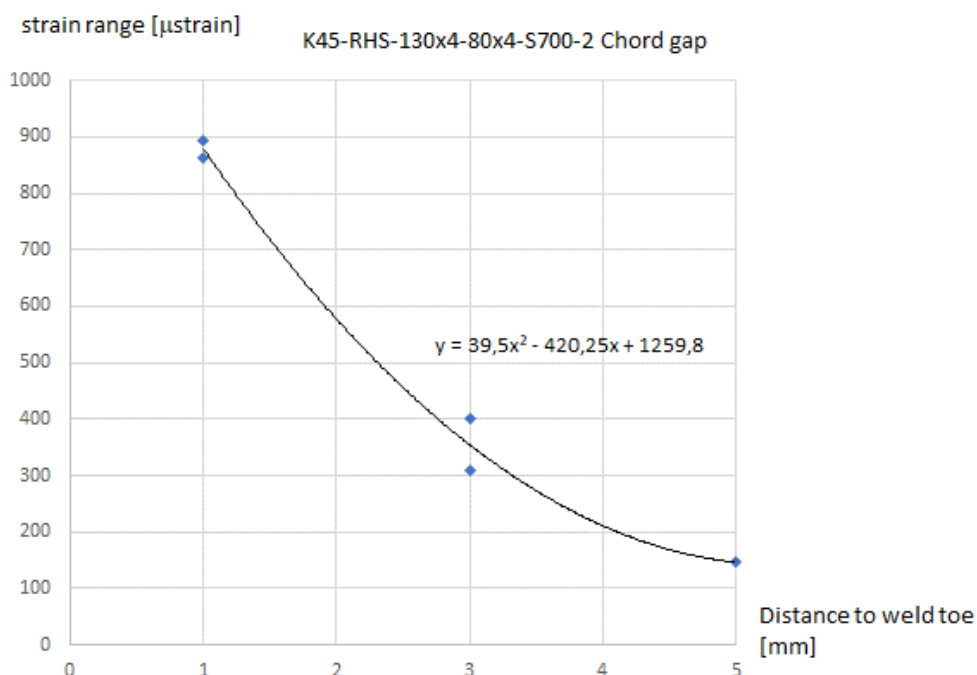


Abbildung 3-16: Auswertung der Hot-Spot-Dehnung der Serie K45-RHP-130x4-80x4 – Gurt Spalt  
Figure 3-16 Hot spot strain evaluation for series K45-RHS-130x4-80x4 – Chord gap

Da die kleinen KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt ausgeführt sind, können an der Position im Spalt auf dem Gurt keine Dehnungsmessstreifen appliziert werden. Die FEA in Abbildung 3-17 zeigt, dass die maximale Spannung an der Strebe auftritt, so dass hier die DMS-Kette anliegt. Die entscheidende Hot-Spot-Spannung im Gurt wird mit einem Versatz von ca. 20 Grad um den Strebenumfang erwartet und die Dehnungsmessstreifen werden entsprechend appliziert.

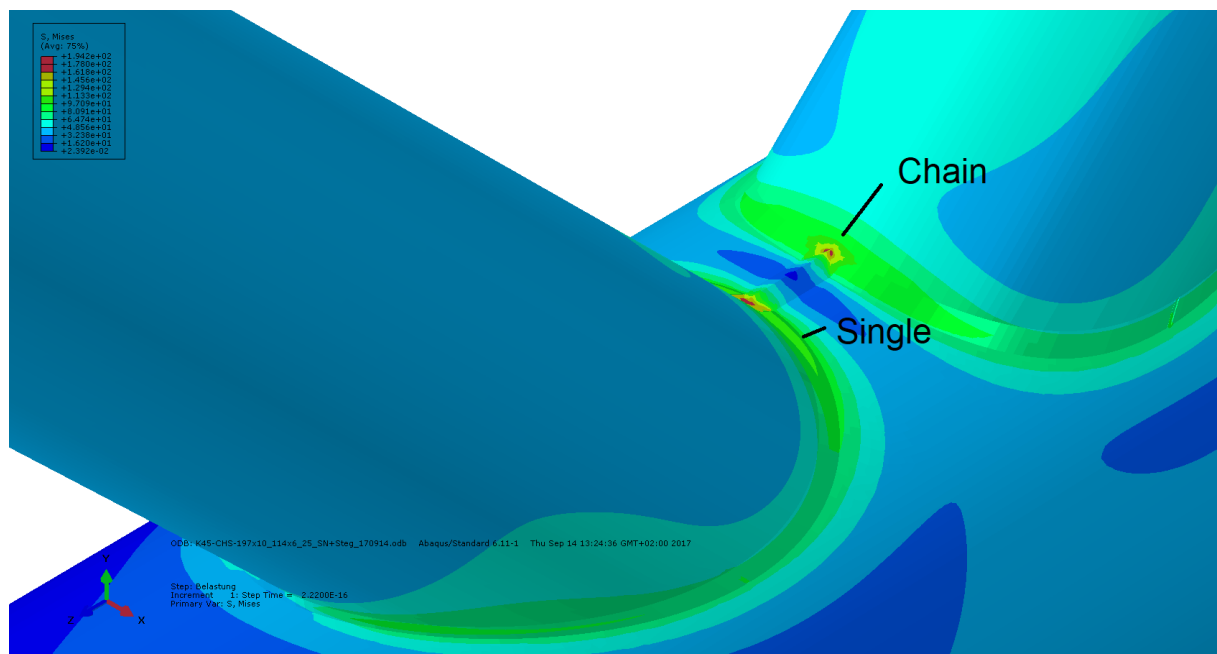


Abbildung 3-17: Position der DMS bei KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt  
Figure 3-17: Strain gauge position for CHS K-joints with over-welded gap

In Tabelle 3 9 sind die SCFs für kleine KHP K-Knoten aufgeführt. Die Werte basieren auf den Durchschnittswerten der Messungen an verschiedenen Proben. Die Extrapolation der Hot-Spot-Dehnung erfolgt mit linearen Trendlinien, die in Anhang B2 zu finden sind und auf ähnlichen Messorten basieren. Die SCFs werden aus den SNCFs mit Gl. (3) bestimmt.

Tabelle 3-10: SCFs für kleine KHP K-Knoten und aus Dehnungsmessungen

Table 3-10 SCFs for small CHS K-joints by means of strain gauges

Serie	Position	$\delta\varepsilon_{nom}$	$\delta\varepsilon_{h.s.}$	SNCF	SCF
K45-193.7x10-114.3x6.3-g25 S355 und S700	Kronenferse Strebe	538	1003	1.9	2.28
	Strebensattel	538	850	1.6	1.29
	Druckstrebe Spalt	538	930	1.7	2.04
	Zugstrebe Spalt	538	1099	2.0	2.40
	Gurtsattel	278	657	2.4	2.88

Auch an großen K-Knoten wurden Dehnungsmessungen vorgenommen. Exemplarisch ist in Abbildung 3-18 die Auswertung der Hot-Spot-Spannung für große RHP K-Knoten im Gurtspalt dargestellt. Dabei werden die Messungen aus verschiedenen Probekörpern zusammengefasst und der Mittelwert über eine Regression für die Bestimmung des SCFs mittels quadratischer Extrapolation gebildet. Die entsprechenden Diagramme für die Streben und für große KHP K-Knoten sind in Anhang B2 zu finden.

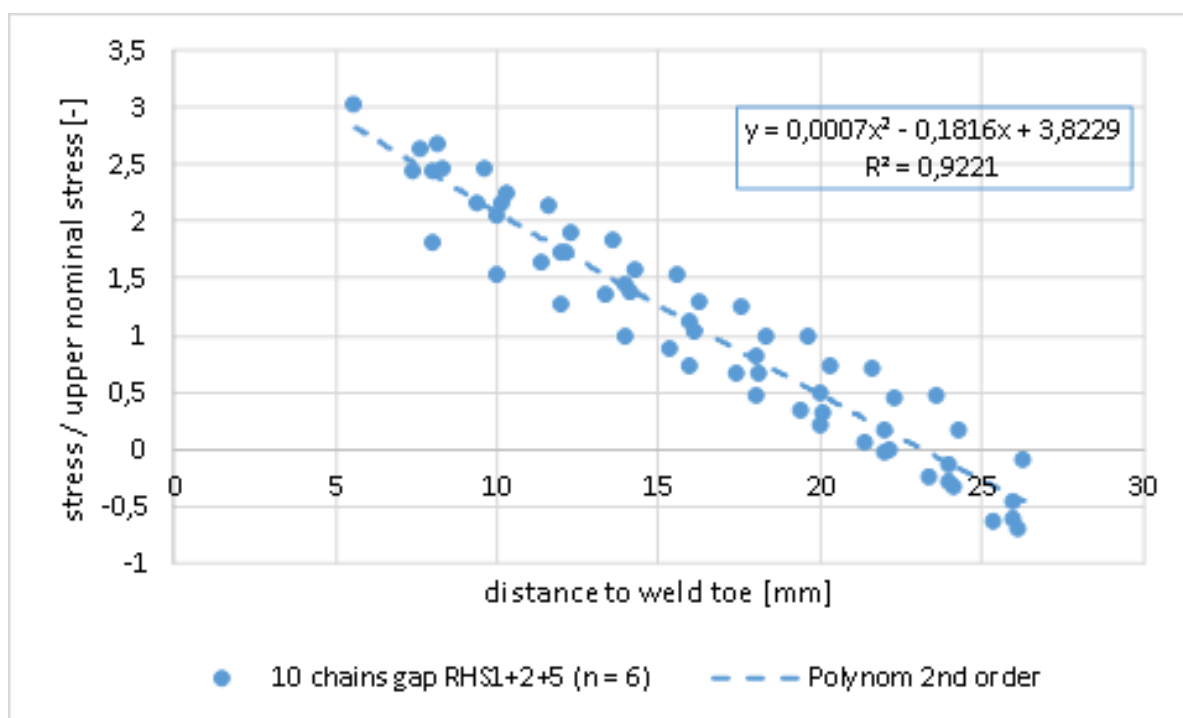


Abbildung 3-18: Auswertung der Hot-Spot-Spannung der Serie K45-RHP-300x20-220x20– Gurt Spalt

Figure 3-18 Hot spot stress evaluation for series K45-RHS-300x20-220x20 – Chord gap

In Tabelle 3-11 sind die aus Dehnungsmessungen bestimmten SCFs zusammengefasst. Zum Vergleich werden die SCFs nach Formeln oder Diagrammen von CIDECT [39] und DNVGL [3] angegeben, wobei DNVGL [3] SCF-Formeln nur für KHP-Knoten bereitstellt.

Aus Tabelle 3-11 geht hervor, dass DNVGL [3] kleinere SCFs für den Gurt von KHP K-Knoten mit Spalt vorhersagt als CIDECT [39]. Die SCFs der Serie K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-g25 passen gut zur Empfehlung nach CIDECT [39], wobei hier eigentlich zu erwarten wäre, dass der SCF im Gurt kleiner und in der Strebe etwas größer ist, da diese Proben einen überschweißten Spalt aufweisen. Zudem sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Auflagerbedingung, die den SCF-Formeln zugrunde liegen, von den im Versuch umgesetzten Auflagerbedingungen abweichen, da der Gurt im Versuch nur an einer Seite aufgelagert ist, vgl. Abschnitt 4.3.

Tabelle 3-11: Vergleich der SCFs nach CIDECT [39] und DNVGL [3] und aus Dehnungsmessungen für K-Knoten mit Axiallast auf den Streben

Table 3-11 Comparison of SCFs according to CIDECT [39] and DNVGL [3] and found by measurements for K-joint with axially loaded braces

Serie	CIDECT [39]		DNVGL [3]		DMS-Messungen	
	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe
K45-CHS-193,7x10-114,3x6,3-g25*	3,25	2,30	2,67	2,33	2,88	2,40
K45-CHS-323,9x20-224,5x20-g40	4,78	2,30	3,62	2,44	3,63	2,25
K45-RHS-100x6-80x4-g25	3,08	5,15	**	**	4,63	9,96
K45-RHS-130x4-80x4-g25	24,65	10,20	**	**	7,44	12,91
K45-RHS-300x20-220x20-g40	4,27	3,54	**	**	3,83	3,26

\* Probekörper mit überschweißtem Spalt  
\*\*keine SCFs für RHP-Knoten in DNVGL [3]

## 4 Numerische Untersuchungen Numerical investigation

### *Kurzfassung*

*Die numerischen Untersuchungen dienen zur Ausweitung des Gültigkeitsbereichs und um eine umfassende Bemessungsempfehlung zu ermöglichen. Die Finite-Elemente-Modelle werden anhand der Dehnungsmessungen innerhalb der Verifikationsversuche kalibriert. Es werden Volumenelemente verwendet und die Schweißnähte werden abgebildet und eine exakte Abbildung der lokalen Spannungen in der Schweißnaht zu ermöglichen.*

### *Abstract*

*Numerical investigations are carried out to cover an enlarged dimensional range which cannot be examined in the context of the fatigue tests and to enable a general design recommendation. Finite element models are validated by strain gauge measurements within the verification tests. Volume elements are used, and the welds are modelled for an exact determination of local stresses in the area of the weld seam.*

### 4.1 Einleitung Introduction

Zunächst wird ein geeignetes Finite-Elemente-Modell entwickelt. Für die exakte Bestimmung der Spannungs- und Dehnungsverteilung im Schweißnahtfuß ist eine Modellierung der Schweißnaht erforderlich. Insbesondere bei K-Knoten aus Kreishohlprofilen ist dies aufgrund der ungleichmäßigen Verschneidungskurve mit einigem Aufwand verbunden.

Die Elementwahl, die Lage der Partitionen und die Netzfeinung werden nach den CIDECT-Empfehlungen [39] ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden dann auf Plausibilität geprüft und anhand der Dehnungsmessungen im Versuch verifiziert. Gegebenenfalls wird die Finite-Elemente Berechnung dann angepasst und das endgültige Modell wird als Grundlage für die nun folgende Parameterstudie verwendet.

### 4.2 Vorüberlegungen Preliminary considerations

Vor der Modellierung der K-Knoten müssen zunächst einige grundlegende Überlegungen und Definitionen bezüglich der Abmessungsbereiche, der Schweißnahtausbildung und der notwendigen Partitionen und zu definierenden Parametern im Modell angestellt werden. Ausgegangen wird hierbei zunächst von den Empfehlungen im CIDECT Design Guide 8 [39].

Eine grundsätzliche Validierung des gesamten Vorgehens für die numerische Berechnung von K-Knoten wurde innerhalb einer numerischen Voruntersuchung durchgeführt [10]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Anhang C1 zu finden.

#### 4.2.1 Ausbildung der Schweißnaht Welding details

Die in Abbildung 4-1 dargestellten Schweißdetails für RHP-Anschlüsse und in Abbildung 4-2 für KHP-Anschlüsse dienen als Grundlage der Schweißnahtausbildung innerhalb der Finite-Elemente-Berechnung. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den vorgegebenen Fasenwinkeln, und insbesondere bei KHP-Knoten im Übergangsbereich zwischen Kehlnaht und Stumpfnah an den Strebenenden, die für größer werdende Wanddicken zum Tragen kommen.

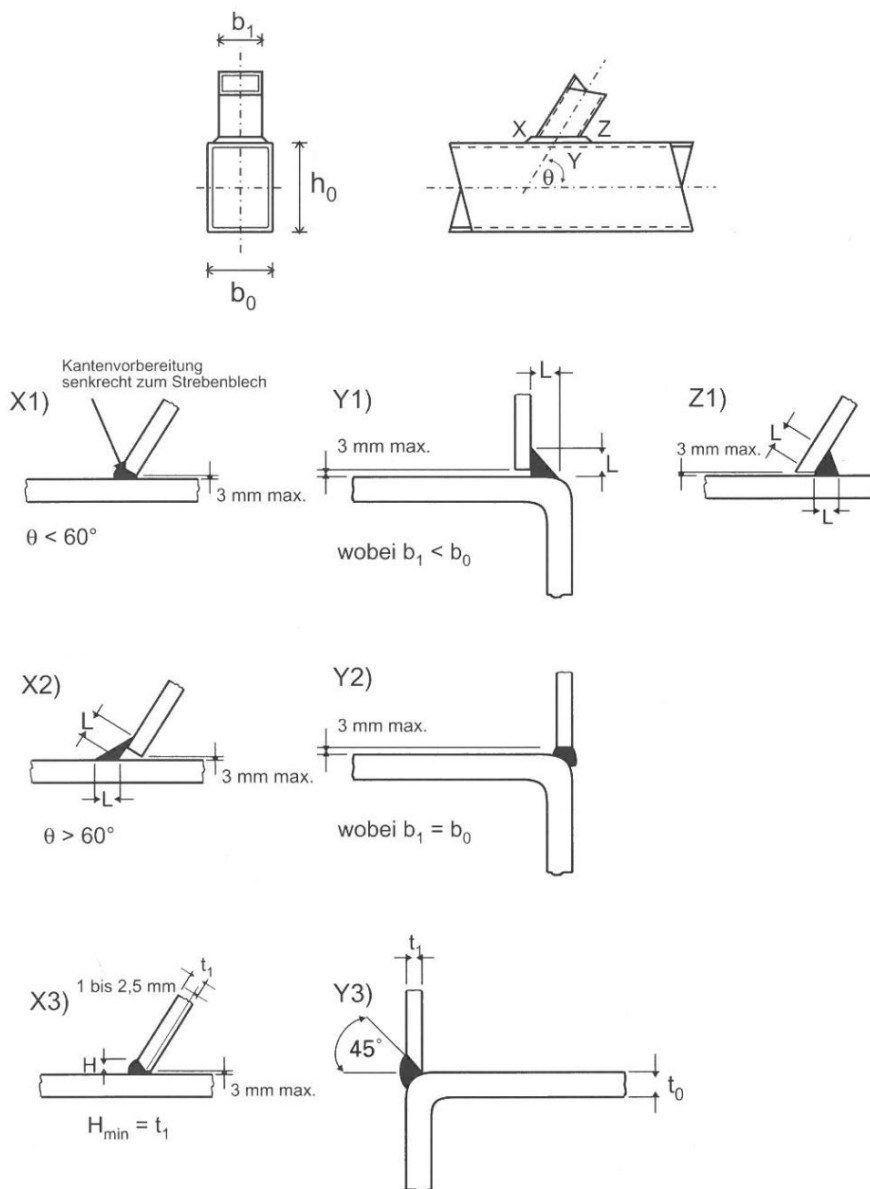


Abbildung 4-1: Kehlnaht- und Stumpfnähte in RHP-Anschlüssen nach CIDECT [39]

Figure 4-1: Fillet and butt welds for RHS-joints according to CIDECT [39]

Tatsächlich erfüllt die ausgeführte Schweißnaht von Hohlprofilverbindungen nur selten die Vorgaben. Die Ausführung einer Umfangsschweißung erfordert häufig ein intermittierendes oder Überkopfschweißen und ist über den Umfang nicht gleichmäßig. Um einen exakten Vergleich zwischen Experimenten und numerischen Analysen zu ermöglichen, ist die Modellierung der Schweißnaht unerlässlich. In einem ersten Schritt wird die vorhandene Schweißnahtgeometrie modelliert und simuliert. Dies ist zur Überprüfung der FEA durch DMS-Messungen erforderlich. Die parametrische Untersuchung wird dann mit Nennmaßen durchgeführt. Bei großen Abweichungen werden auch vorhandene Schweißnahtgeometrien modelliert und numerisch analysiert.

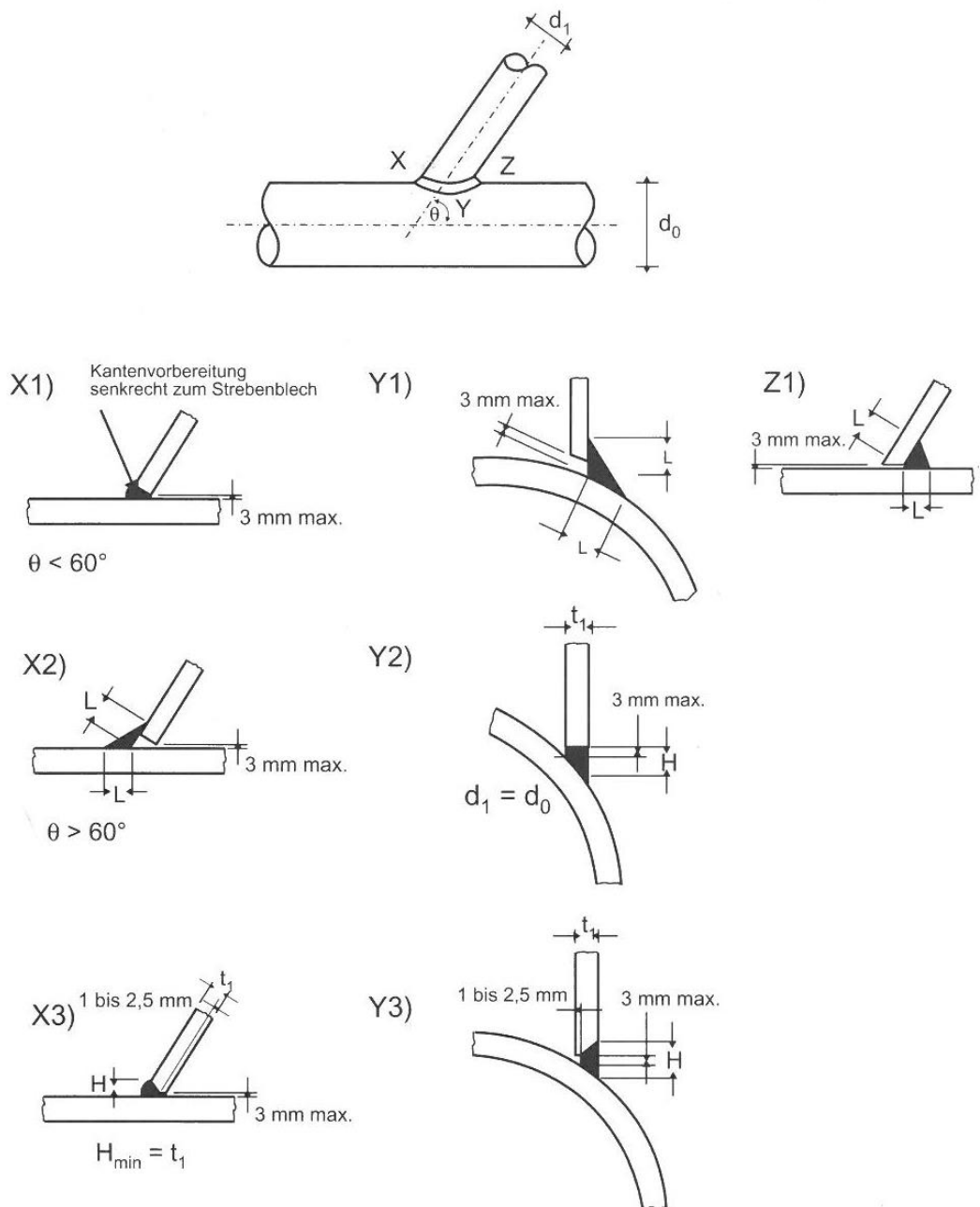


Abbildung 4-2: Kehl- und Stupfnähte in KHP-Anschlüssen nach CIDECT [39]

Figure 4-2: fillet and butt welds for KHS-joints according to CIDECT [39]



Aufgrund sehr stark unterschiedlich ausgeprägter Schweißnähte, insbesondere der der kleinen RHP K-Knoten (Abbildung 3-8) wird an dieser Stelle eine Studie zum Einfluss der Schweißnahtausbildung durchgeführt. Dies dient auch zur genaueren Erkenntnis für den späteren Abgleich der FE-Modelle mit den DMS-Messungen.

Folgende drei FE-Modelle auf Basis eines RHP-Knotens K45-RHP-130x4-80x4-g25 werden generiert und verglichen:

- Ohne Modellierung der Schweißnaht
- Mit Modellierung einer ideellen Naht mit  $a = 4\text{ mm}$
- Mit Modellierung der vorhandenen Naht der Probe K45-RHP-130x4-80x4-g25-S700-2 mit 7,5 mm Höhe und 11 mm Breite



Die Extrapolation beim ersten Modell ohne Schweißnaht wird so durchgeführt, dass der erste Extrapolationspunkt in 4 mm Abstand zum theoretischen Schweißnahtfuß liegt, siehe Abbildung 4-3. Das heißt, der Abstand zur Strebe ist der Gleiche wie für das Modell mit Schweißnaht  $a = 4\text{ mm}$ . Unterschiede sind nur aufgrund der Knotensteifigkeit zu erwarten.

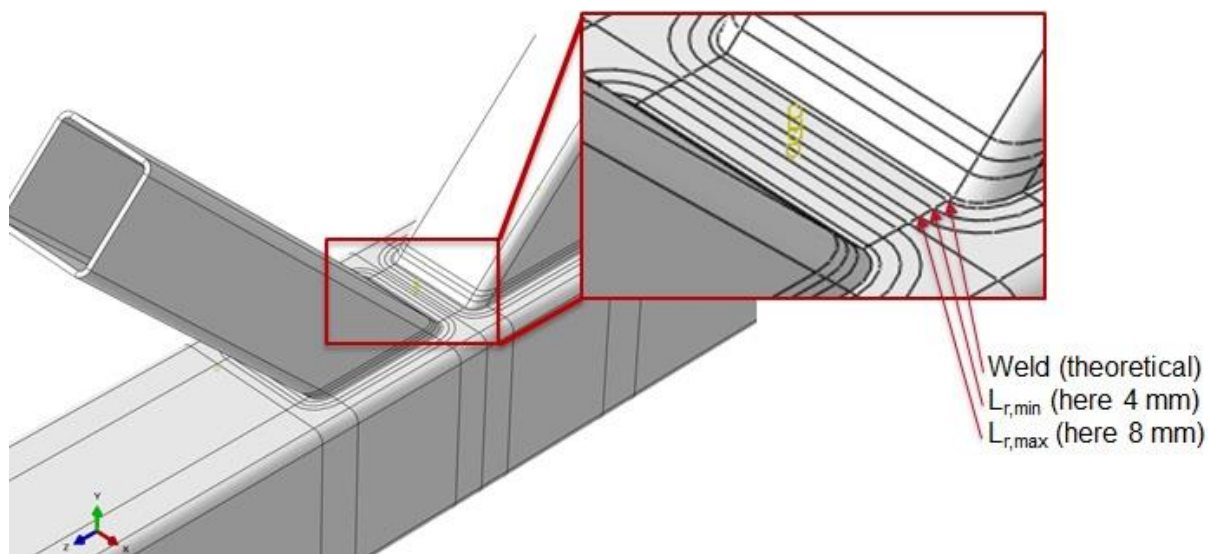


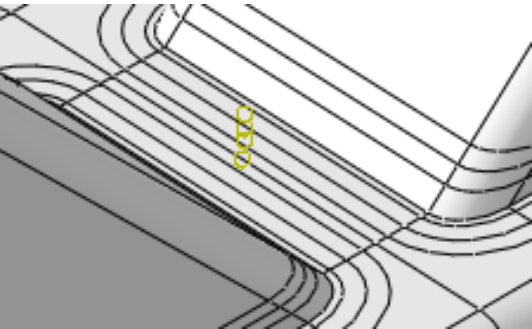
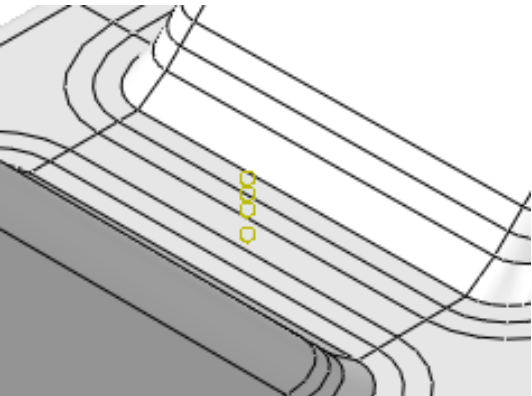
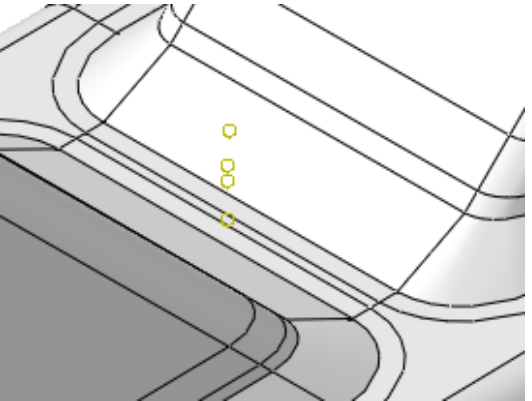
Abbildung 4-3: Extrapolation beim Modell eines RHP K-Knoten ohne Schweißnaht

Figure 4-3: Extrapolation for RHS K-joint without modelling the weld seam

In Tabelle 4-1 sind die Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) aufgeführt, die mit quadratischer Extrapolation der Spannungen senkrecht zum Schweißfuß berechnet wurden. Zum Vergleich werden die nach der in CIDECT [36] angegebenen Formel berechneten SCFs tabellarisch aufgeführt. Zudem ist in Prozentwerten das Verhältnis der SCFs aus der CIDECT-Formel und aus den FE-Modellen angegeben.

Der SCF für den Gurt des FE-Modells ohne Modellierung der Schweißnaht führt zu einem erheblich niedrigeren Wert als nach CIDECT DG 8 [39] (53% des von CIDECT empfohlenen SCF). Auch der SCF für die Streben ist mit 78% Auslastung klar auf der sicheren Seite.

Tabelle 4-1: Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) für unterschiedliche Schweißnahtmodelle  
Table 4-1 Stress concentration factors (SCF) for different FE modelling of the weld

K45-RHP-130x4-80x4-g25 Strebenaxiallast (AX)	Gurt		Strebe	
	SCF	$\frac{SCF_{CIDECT}}{SCF_{FEM}}$	SCF	$\frac{SCF_{CIDECT}}{SCF_{FEM}}$
SCF nach CIDECT [39] Formel	24,6	100 %	10,2	100 %
 FE-Modell ohne Schweißnaht	13,0	53 %	8,0	78 %
 FE-Modell mit Schweißnaht a = 4 mm	10,6	43 %	6,9	68 %
 FE-Modell mit Schweißnaht 7.5 x 11 mm	5,5	22 %	4,3	42 %

Die Berechnung eines Modells mit einer idealen Kehlnaht mit einem a-Maß von 4 mm führt im Vergleich zum Modell ohne Schweißnähte zu kleineren SCFs sowohl im Gurt

als auch in den Streben. Die SCFs für das Modell mit einer realistischen Schweißnaht, wie sie beim Probekörper K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 vorliegt, sind noch etwas kleiner, was durch den weicheren Übergang zur Strebe mit geringerem Nahtanstiegswinkel der Schweißnaht erklärt werden kann.

Die Finite-Elemente-Berechnung des Modells mit realen Schweißnahtgrößen ergibt SCFs, die nur ein Viertel der SCFs für den Gurt ausmachen, die mit CIDECT DG 8 [39] berechnet wurden, und weniger als die Hälfte des SCF-Wertes für die Streben. Vergleicht man die Modelle mit idealer Schweißnaht und mit tatsächlich vorhandener Schweißnaht, so sind die SCFs des Modells des Probekörpers K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 für den Gurt etwa halb so hoch und für die Streben etwa zwei Drittel des Wertes des Modells mit Schweißnaht  $a = 4 \text{ mm}$  (Tabelle 4-1).

Für die numerische Parameterstudie wird die Naht zwar modelliert, jedoch wird der Überstand in Spalt und an den Strebenflanken mit 2 mm verhältnismäßig klein gewählt, was wirtschaftlicher ist als ein Modell ohne Schweißnaht, aber mit einem kleinen Überstand und steilem Nahtanstieg auf der sicheren Seite liegt.

#### 4.2.2 Extrapolationsbereiche Extrapolation limits

Die Bestimmung von SCFs mithilfe von Versuchen und der Finite-Elemente-Methode ist im Anhang C des CIDECT DG 8 [39] beschrieben.

Tabelle 4-2: Grenzen für den Extrapolationsbereich nach CIDECT [39]

Table 4-2: Extrapolation limits according to CIDECT [39]

Abstand vom Schweißnaht-übergang		Gurt		Strebe	
		Sattel	Krone	Sattel	Krone
KHP	$L_{r,min}^{*)}$	$0,4 \cdot t_0$		$0,4 \cdot t_1$	
	$L_{r,max}^{**)}$	$0,09 r_0$	$0,4 \cdot \sqrt[4]{r_0 t_0 r_1 t_1}$	$0,65 \sqrt{r_1 t_1}$	
RHP	$L_{r,min}^{*)}$	$0,4 \cdot t_0$		$0,4 \cdot t_1$	
	$L_{r,max}$	$L_{r,min} + t_0$		$L_{r,min} + t_1$	

\*) Mindestwert für  $L_{r,min}$  ist 4 mm

\*\*\*) Mindestwert für  $L_{r,max}$  ist  $L_{r,min} + 0,6 \cdot t_1$

Hierbei werden die in Tabelle 4-2 angegebenen Bereichsgrenzen für die Extrapolationsbereiche vorgegeben. Die aus Versuchen mittels DMS gemessenen oder in der FE-Analyse bestimmten Dehnungen innerhalb dieser festgelegten Bereiche werden dann in Spannungen umgerechnet und entweder quadratisch (RHP) oder linear (KHP) zum Schweißnahtfuß hin extrapoliert, siehe Abbildung 4-4.

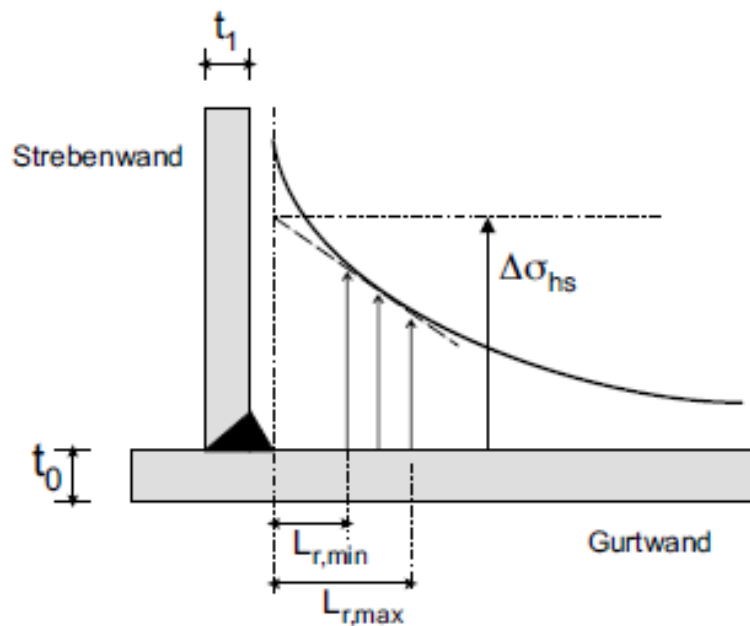


Abbildung 4-4: Definition des Extrapolationsbereiches nach CIDECT [39]

Figure 4-4: Definition of the extrapolation area according to CIDECT [39]

Die so extrapolierte Spannung am Schweißnahtfuß variiert sehr stark in Abhängigkeit des Abstands des Extrapolationsbereiches zum Schweißnahtfuß, der Größe des Bereiches und der Anzahl der ausgelesenen Spannungspunkte. Das Vorgehen ist auf die untersuchten Parameterbereiche und Wanddicken des CIDECT DG8 [39] kalibriert. Zudem sind die Überschneidungsbereiche bei der Extrapolation im Spalt der K-Knoten zu beachten.

Eine Extrapolation im Spaltbereich und auch im Eckbereich von RHP-Knoten mit großen  $\beta$ -Werten kann problematisch sein, da vordefinierte Positionen nicht mit Dehnungsmessstreifen versehen werden und auch die Spannungen an diesen Stellen nicht aus einem FE-Modell abgelesen werden können, wie in Abbildung 4-5 dargestellt ist.

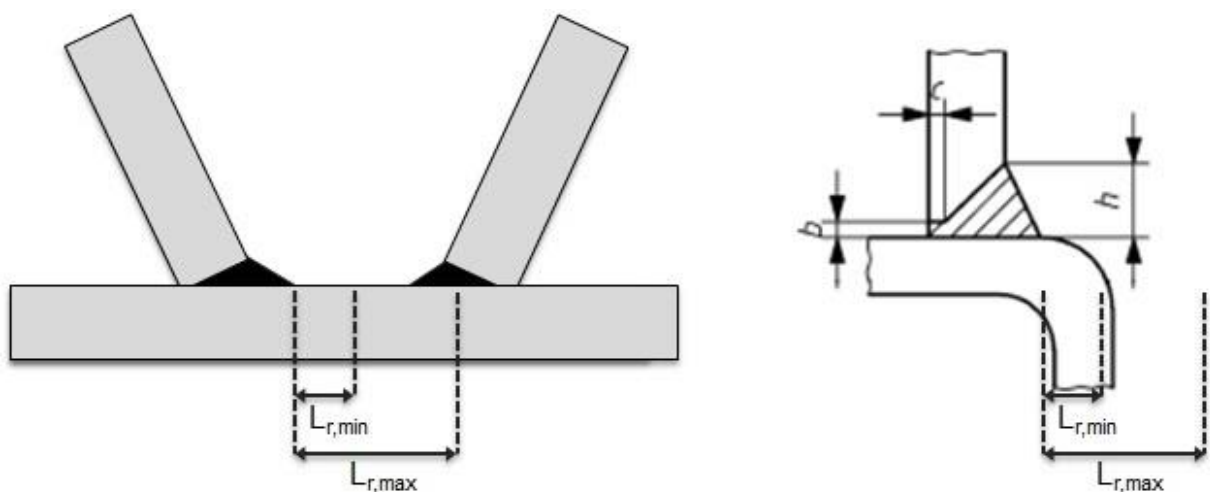


Abbildung 4-5: Problematische Position für die Extrapolation im Spalt- und Eckbereich bei RHP-Knoten

Figure 4-5: Problematic positions for extrapolation in the gap and corner of RHS-joints

### 4.2.3 Bestimmung der Nennspannung Determination of nominal stress

Trotz einer reinen axialen Belastung der Streben können Biegespannungen in den Streben nachgewiesen werden. Diese treten aufgrund von Knotenexzentrizitäten und sogenannten sekundären Biegemomenten auf. Die sekundären Biegemomente resultieren aus der Nachgiebigkeit des Knotens und der exzentrischen Lasteinleitung aufgrund von geometrischen Imperfektionen [9]. Letzteres stellt bei der FE-Berechnung kein Problem dar.

Grundsätzlich kann die Nennspannung auf zwei Arten definiert werden: Entweder durch Vernachlässigung der sekundären Biegemomente und nur unter Berücksichtigung der Spannung aus der axialen Belastung der Strebe. Oder die zusätzlichen Biegespannungen werden ermittelt und berücksichtigt.

Je nach Knotengeometrie ist der Einfluss auf die Größe des SCF nicht unerheblich. Mang et al. [18] verwenden für ihre experimentellen und numerischen Untersuchungen die Definition der Nennspannung ohne sekundäre Biegespannungen. Van Wingerde et al. [35] hingegen ermitteln die Nennspannungen unter Berücksichtigung der Biegespannungen zur Ermittlung der SCF.

Innerhalb der FEA und der Parameterstudie werden SCFs ohne Berücksichtigung von sekundären Biegemomenten berechnet, d.h. für axial belastete Streben gemäß Gl. (2) und für Streben unter Biegung in der Ebene nach Gl. (3).

$$\sigma_{nom,AX} = \frac{F}{A_i} \quad (2)$$

$$\sigma_{nom,IPB} = \frac{M}{W_i} \quad (3)$$

### 4.3 FE-Modell FE-model

Für die numerischen Untersuchungen wird das Programmpaket ABAQUS 6.11-1 [1] verwendet. Die Knoten werden mit nominellen Abmessungen modelliert. Für die Bestimmung von Dehnungen und zur Berechnung von Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) im elastischen Bereich ist ein lineares Materialgesetz mit E-Modul  $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  und Poissonzahl  $\nu = 0.3$  ausreichend. Geometrische Nichtlinearität wird nicht berücksichtigt.

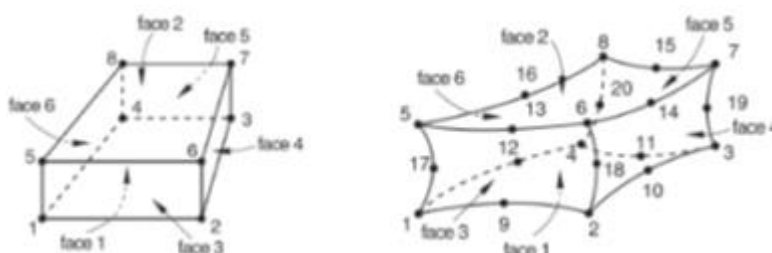


Abbildung 4-6: Hexaeder-Elemente mit 8 Knoten (links) und 20 Knoten (rechts)

Figure 4-6: Hexahedral 8-node element (left) and 20-node element (right)

Im Knotenbereich treten dreidimensionale Spannungszustände auf. Diese können am besten mit 3D-Elementen wiedergegeben werden. ABAQUS bietet hierfür viele verschiedene Elemente an. Hexaedrische Elemente werden nach Wagners Empfehlungen gegenüber tetraedrischen bevorzugt [33]. Hexaedrische Elemente sind weniger steif und verformen sich daher besser. Je nach Grad der Annäherungsfunktionen gibt es lineare oder quadratische Elemente. Abbildung 4 6 zeigt die Struktur der Elemente und die mögliche Verformung der Kanten. Bei Elementen mit 8 Knoten sind sie linear, bei Elementen mit 20 Knoten quadratisch.

Im Allgemeinen werden lineare Volumenelemente (Hexaeder) mit reduzierter Integration verwendet, die in der ABAQUS Element-Bibliothek C3D8R heißen.

Um den Einfluss der Lasteinleitung auf die Spannungsverteilung im Knotenbereich zu vermeiden, werden die Streben und der Gurt in einer Länge von etwa 5-mal dem Durchmesser modelliert. Im Bereich der Schweißnaht und den Knoten beeinflusst die Elementgröße bzw. die Netzfeinheit das Ergebnis der FE-Berechnungen. Herion [9] empfiehlt eine maximale Elementgröße im Bereich von  $\frac{1}{2}$  mal der Wanddicke. Hierbei sind Elemente mit einem Seitenverhältnis von 0,8 bis 1,0 anzustreben. In Bereichen außerhalb des Knotens können die Elemente größer gewählt werden.

Erste Untersuchungen werden mit einem monolithischen Modell durchgeführt, bei dem Streben und Gurt verbunden sind und in einem Teil modelliert werden. Dies ist Stand der Technik, erfordert jedoch zeitaufwendige Vorarbeiten durch Partitionierungen. Häufig sind verzerrte Netze, insbesondere bei dreidimensionalen Verschneidungskurven, wie z.B. in den Eckbereichen bei RHP-Knoten, nicht zu vermeiden. Eine einfachere und schnellere Lösung ist die Verwendung von so genannten „tie constraints“. Hier werden die Streben und der Gurt getrennt voneinander modelliert und vernetzt. Die zu verbindenden Flächen werden als Master- bzw. Slave-Fläche definiert. Alle Knoten der "Slave-Oberfläche" sind in einem vorgegebenen Abstand (Toleranzbereich) mit der "Master-Oberfläche" verbunden und die Freiheitsgrade aneinandergesekoppelt. Abbildung 4-7 verdeutlicht das Prinzip.

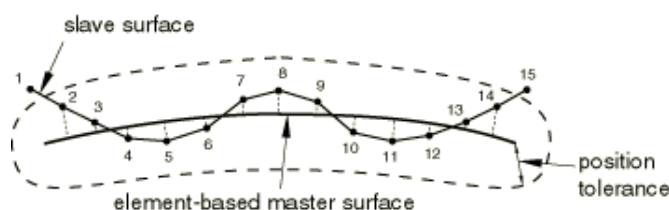


Abbildung 4-7: Lagetoleranz der master-Fläche [1]

Figure 4-7: Position tolerance of master surface [1]

Der Vorteil der Verwendung von „tie constraints“ ist in zu sehen. Bei einem monolithischen Modell des Knotens muss der Schnittbereich der Streben mit dem Gurt partitioniert werden. Diese häufig komplizierte Partitionierung entfällt bei Verwendung von „tie constraints“. Lediglich zur genaueren Definition der zu verbindenden Flächen sind diese durch Partitionen in Gurtlängsrichtung und quer dazu beschrieben.

Sowohl für RHP K-Knoten als auch für KHP K-Knoten wurde ein monolithisches Modell mit einem Modell mit „tie constraints“ für die Verbindung der Streben mit dem

Gurt verglichen. Die maximale Abweichung beträgt 0,3% für die Strukturspannung im Gurt und 0,5% für die Strukturspannung der Zugstrebe. Wie rechts in Abbildung 4-8 für das Modell mit „tie constraints zu sehen ist, ist das Netz des Gurtes sehr gleichmäßig und die Elemente sind im Gegensatz zum monolithischen Modell links in Abbildung 4-8 nicht verzerrt.

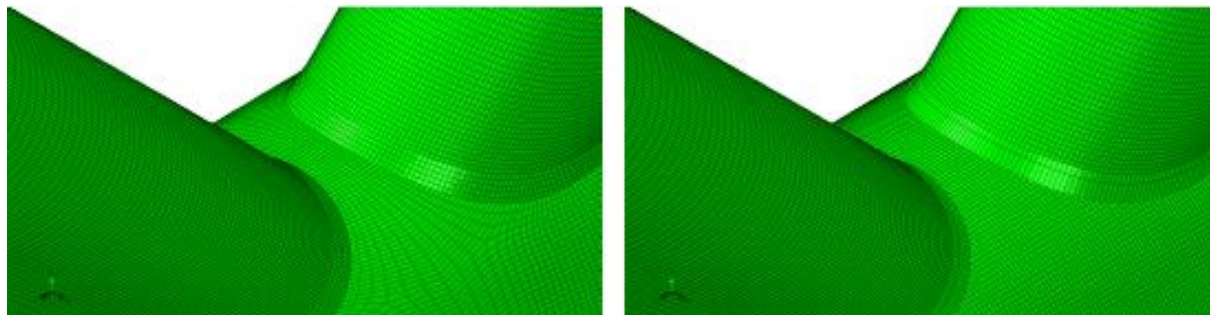


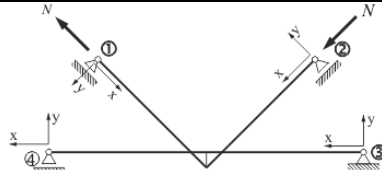
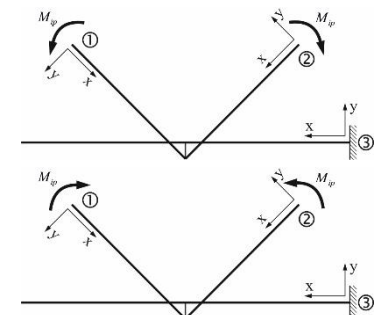
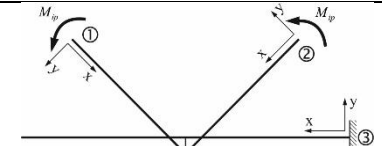
Abbildung 4-8: FE-Netz eines KHP K-Knotens, monolithisch (links) und mit tie constraints (rechts)

Figure 4-8: FE-mesh of CHS K-joint, monolithic (left) and tie constraints (right)

Symmetriebedingungen werden zunächst nicht angewendet und die Knoten werden als Ganzes modelliert. Die Freiheitsgrade an den Auflagern und der Lasteinleitung werden an Referenzpunkten aufgebracht, die dann wiederum mit den Enden der Bauteile gekoppelt werden. Die statischen Systeme für die unterschiedlichen Lastfälle sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Statisches System für Axiallast und Biegung in der Ebene auf die Streben

Table 4-3 Static system for axially and in-plane-bending loaded joints

Nr.	Lastfall	
LC1	Axialbelastung der Streben (AX)	
LC2	Entgegengesetzte Strebenbiegung in der Ebene a) nach außen (IPB-out) b) nach innen (IPB-in)	
LC3	Gleichgerichtete Strebenbiegung in der Ebene (IPB-conc)	

Bei Knoten unter Axialbelastung der Streben ist die Rotation entlang der lokalen z-Achse frei, so dass weder in den Streben noch im Gurt Endmomente auftreten. Mit Ausnahme der Lasteinleitung, bei der die Verschiebung in lokaler x-Richtung zugelassen werden muss, um die Last aufzubringen, sind die Verschiebungen der Streben in alle lokalen Richtungen verhindert. Bei Knoten unter Biegebeanspruchung der Streben ist das Gurtauflager eingespannt und alle Verschiebungen und Verdrehungen hier behindert. Da die Streben keinen Auflagerbedingungen unterliegen, treten aufgrund des Gleichgewichts keine Reaktionskräfte oder Momente auf (Tabelle 4-3).

#### 4.3.1 Validierung kleiner RHP K-Knoten Validation of small RHS K-joints

Die Validierung des FE-Modells von kleinen RHP K-Knoten wurde mit Hilfe der Dehnungsmessungen an Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 vorgenommen. Eine erste Berechnung mit einer Kehlnaht mit  $a = 4$  mm lieferte insbesondere im Spaltbereich keine gute Übereinstimmung. Daher wurde eine zweite Berechnung durchgeführt, bei der das Modell mit einem Schweißnahtmaß von 7,5 mm Höhe und 11 mm der tatsächlich vorhandenen Schweißnaht der Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 angepasst wurde, siehe auch Abschnitt 4.2.1.



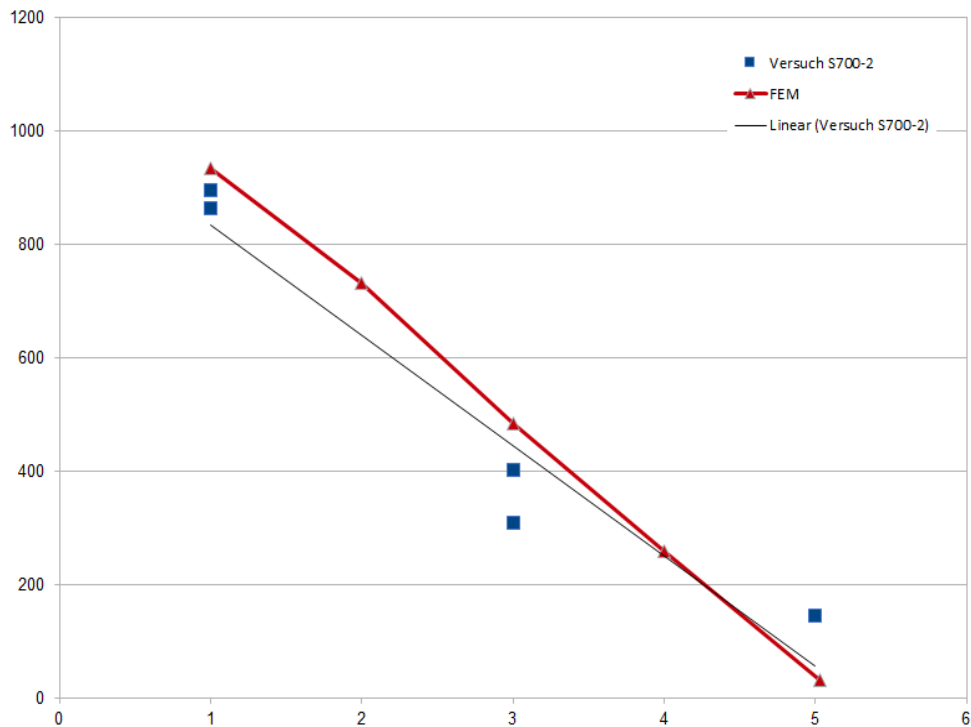


Abbildung 4-9: Vergleich der Dehnungen im Spalt kleiner RHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt)

Figure 4-9: Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests (chord)

Die Dehnungen im Spalt der FE-Berechnung sind in Abbildung 4-9 den Dehnungsmessungen aus dem Versuch an Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 gegenübergestellt. Die Messungen der Dehnmessketten liefern vor allem bei Betrachtung der schwarzen Trendlinie eine gute Übereinstimmung mit den FE-Berechnungen.

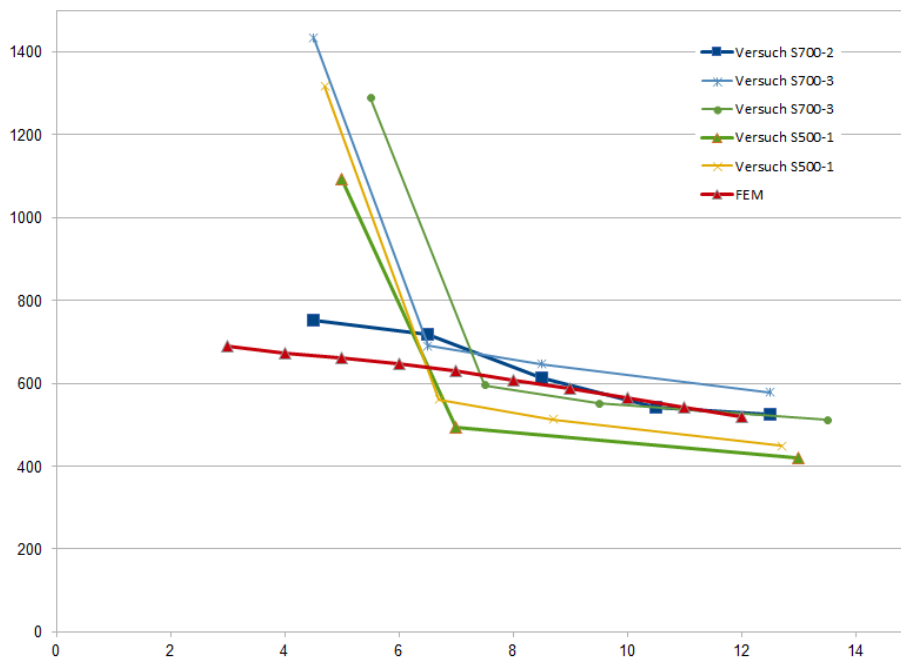


Abbildung 4-10: Vergleich der Dehnungen im Spalt kleiner RHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe)

Figure 4-10: Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests (brace)

Der Vergleich der gemessenen Dehnungen in blau an Position E im Spalt der Zugstrebe der Probe K45-RHS-130x4-80x4-S700-2 mit den Dehnungen aus FEA in Rot in Abbildung 4-10 zeigt zwischen 8 und 12 mm Abstand zur Schweißnaht eine sehr gute Übereinstimmung. Bei kleineren Abständen zum Schweißnahtfuß wird bereits der Einfluss aus der Schweißnahtgeometrie ersichtlich, wodurch in einem Abstand zwischen 4 und 6 mm die gemessenen Dehnungen stark ansteigen.

#### 4.3.2 Validierung großer RHP K-Knoten Validation of large RHS K-joints

Die Validierung der großen RHP K-Knoten wird anhand der Messungen an Probekörper K45-RHS-300x20-220x20-S355-1 durchgeführt. Dehnungsmessstreifen werden hierbei an den entsprechenden Stellen in für die Extrapolation appliziert. Der Versuchskörper K45-RHS-300x20-220x20-S355-1 wird mit einer nominellen Spannungsschwingbreite von  $\sigma_{N,R} = 80$  MPa beansprucht.

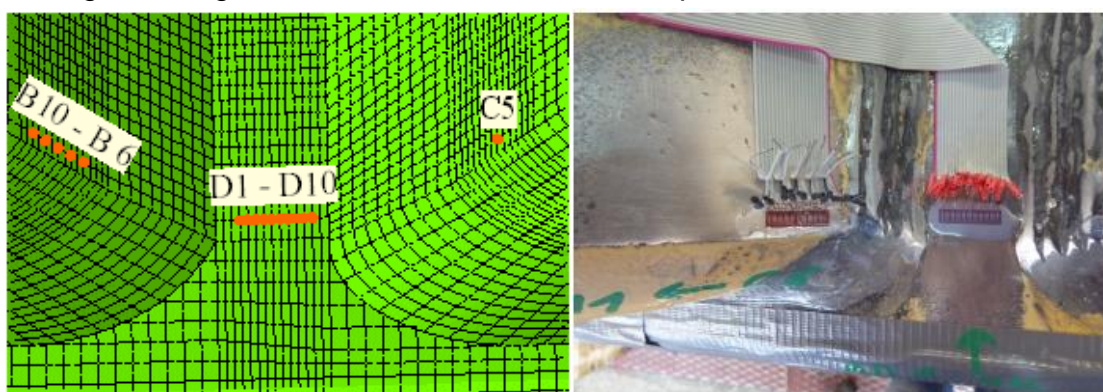


Abbildung 4-11: Messstellen für die Extrapolation beim FE-Modell (links) und am Probekörper (rechts)

Figure 4-11 Measuring points of FE-model (left) and specimen (right)

In Tabelle 4-4 werden die Dehnungen aus Messungen und FEA im Gurt verglichen. Diese weichen zwischen 2,6 und 6,8% voneinander ab. Der Unterschied in den Dehnungen der gegenüberliegenden Seiten ist für das FE-Modell signifikant geringer als im Versuch. Dies bedeutet, dass die Probe im Versuch durch ein Moment in der Ebene (in-plane, IPB) und aus der Ebene (out-of-plane, OPB) beansprucht wird. Diese zusätzliche Beanspruchung resultiert aus einem Versatz oder einer Imperfektion der Streben, die im FE-Modell nicht abgebildet ist. Die gemittelte Axialspannung zeigt eine gute Übereinstimmung mit einer maximalen Abweichung von 1,2%.

Tabelle 4-4: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen im Gurt

Table 4-4 Comparison of strains from measurement and FEA for the chord

	D1 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	D2 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	D3 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	D4 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Axial- spannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	Biegung in der Ebene [kNcm]	Biegung aus der Ebene [kNcm]
Versuch	512,2	438,1	482,3	455,1	99,1	1135	-430
FEA – linear	485,8	469,9	469,9	484,0	100,3	36	
Abweichung [%]	-5,4	6,8	-2,6	6,0	1,1		
FEA – quadratisch	486,8	469,0	169,0	484,7	100,2	42	

Abweichung [%]	-5,2	6,1	-2,8	6,1	1,2		
----------------	------	-----	------	-----	-----	--	--

In Tabelle 4-5 sind die Dehnungen der Zugstrebe aufgeführt. Die Abweichung der FEA zu den DMS-Messpunkten B1 und B4 liegt bei etwa zwei Prozent. Die Messpunkte B2 und B3 weisen dagegen eine Abweichung von 8,4 bzw. -12,2% auf. Dies bestätigt ein vorhandenes Biegemoment aus der Ebene heraus (out-of-plane) in der Zugstrebe der Probe. Der Vergleich der gemittelten Axialspannung ergibt eine Abweichung von 1,5%.

Tabelle 4-5: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen in der Zugstrebe

Table 4-5 Comparison of strains from measurement and FEA for the tension brace

	B1 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	B2 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	B3 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	B4 [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Axial- spannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	Biegung in der Ebene [ $\text{kNcm}$ ]	Biegung aus der Ebene [ $\text{kNcm}$ ]
Versuch	544,8	442,4	519,0	420,1	101,1	1213	-746
FEA – linear	538,4	482,8	462,8	412,2	99,6	1231	194
Abweichung [%]	-1,1	8,4	-12,1	-1,9	-1,5		
FEA – quadratisch	540,3	482,6	462,7	410,9	99,6	1260	194
Abweichung [%]	-0,8	8,3	-12,2	-2,2	-1,5		

In der Druckstrebe weichen die FEA-Werte um bis zu 15% von den im Versuch gemessenen Werten ab, siehe Table 4-6. Auch hier fällt auf, dass das Biegemoment aus der Ebene in der FEA viel kleiner ist als das im Versuch gemessen. Der über den Querschnitt gemittelte Wert für axiale Spannungen weist eine geringe Differenz von 2,7% auf.

Tabelle 4-6: Vergleich der Dehnungen aus FEA und DMS-Messungen in der Druckstrebe  
Table 4-6 Comparison of strains from measurement and FEA for the compression brace

	C1 [ $\mu\text{m/m}$ ]	C2 [ $\mu\text{m/m}$ ]	C3 [ $\mu\text{m/m}$ ]	C4 [ $\mu\text{m/m}$ ]	Axial- spannung [ $\text{N/mm}^2$ ]	Biegung in der Ebene [ $\text{kNcm}$ ]	Biegung aus der Ebene [ $\text{kNcm}$ ]
Versuch	-573,1	-425,6	-538,4	-400,7	-101,7	-1378	1098
FEA – linear	-528,8	-470,8	-469,5	-417,0	-99,0	-1088	-13
Abweichung [%]	-8,4	9,6	-14,7	3,9	2,7		
FEA – quadratisch	-529,9	-470,5	-469,4	-416,1	-99,0	-1108	-11
Abweichung [%]	-8,4	9,6	-14,7	3,9	2,7		

Das Diagramm in Abbildung 4-12 zeigt eine gute Übereinstimmung insbesondere für das FE-Modell mit quadratischen Elementen mit den DMS-Messungen im Spaltbereich. Die Abweichung ist akzeptabel unter Berücksichtigung der OPB, die aus nicht exzentrisch angeschlossenen Streben resultieren. Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus der Form der Schweißnaht. Obwohl die tatsächlichen Schweißnahtabmessungen zur Überprüfung der RHS-K-Verbindungen herangezogen werden, verläuft die Schweißnaht nicht gleichmäßig über den gesamten Strebenumfang, was zu geringfügigen Abweichungen führen kann. Unter diesen Bedingungen sind die Ergebnisse ausreichend genau und das FE-Modell verifiziert.

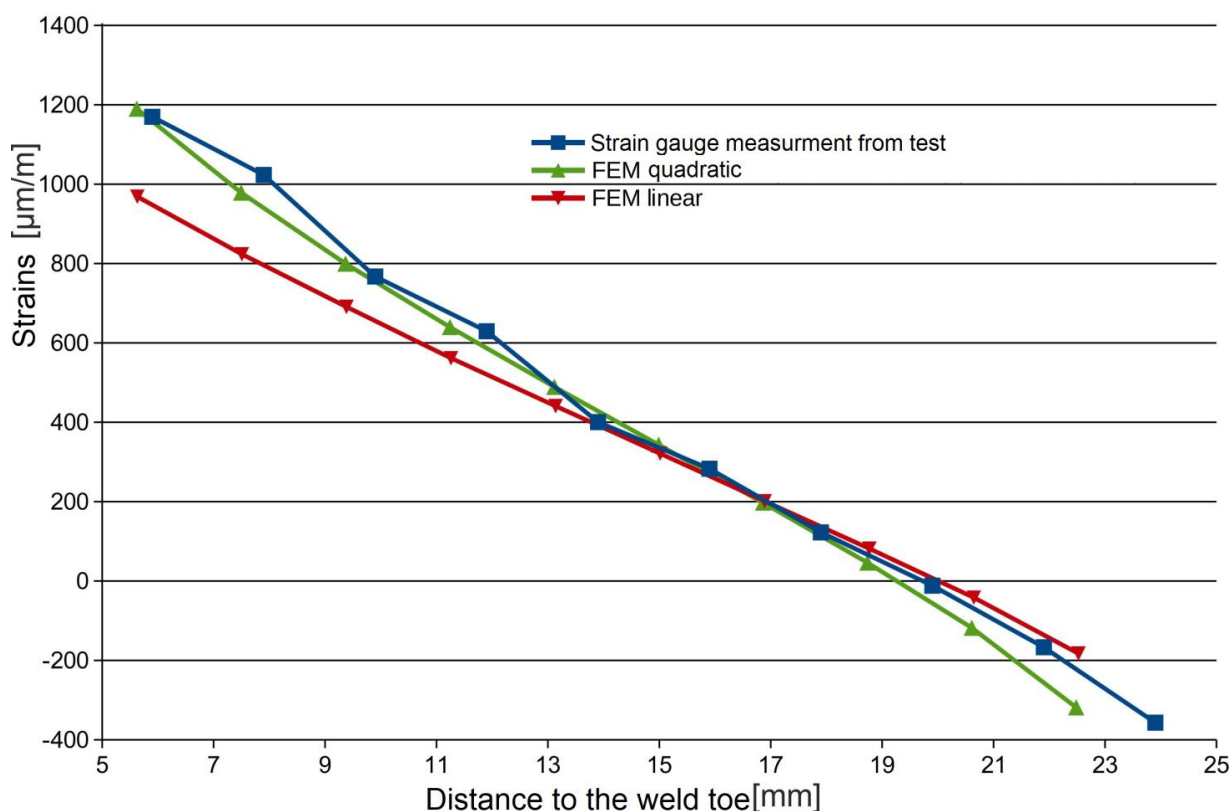


Abbildung 4-12: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer RHP K-Knoten aus FEA und Versuch  
Figure 4-12 Comparison of strains in the gap of small RHS K-joints from FEA and tests

### 4.3.3 Validierung kleiner KHP K-Knoten Validation of small CHS K-joints

Wie schon in Abschnitt 3.7 gezeigt, werden für das Modell der kleinen KHP K-Knoten mit überweißtem Spalt andere Positionen maßgebend als üblicherweise für KHP K-Knoten definiert. So können z.B. an der Position im Spalt auf dem Gurt keine Dehnungsmessstreifen appliziert werden. Außerdem ändert sich durch die höhere Steifigkeit im Spalt durch die Schweißnaht auch die Spannungsverteilung im Knotenbereich. Die gezeigten Vergleiche zwischen Dehnungen aus dem FE-Modell und Dehnungsmessungen im Versuch sind hier nur rein informativ, da für die Parameterstudie das Modell mit überweißtem Spalt nicht zum Tragen kommt.

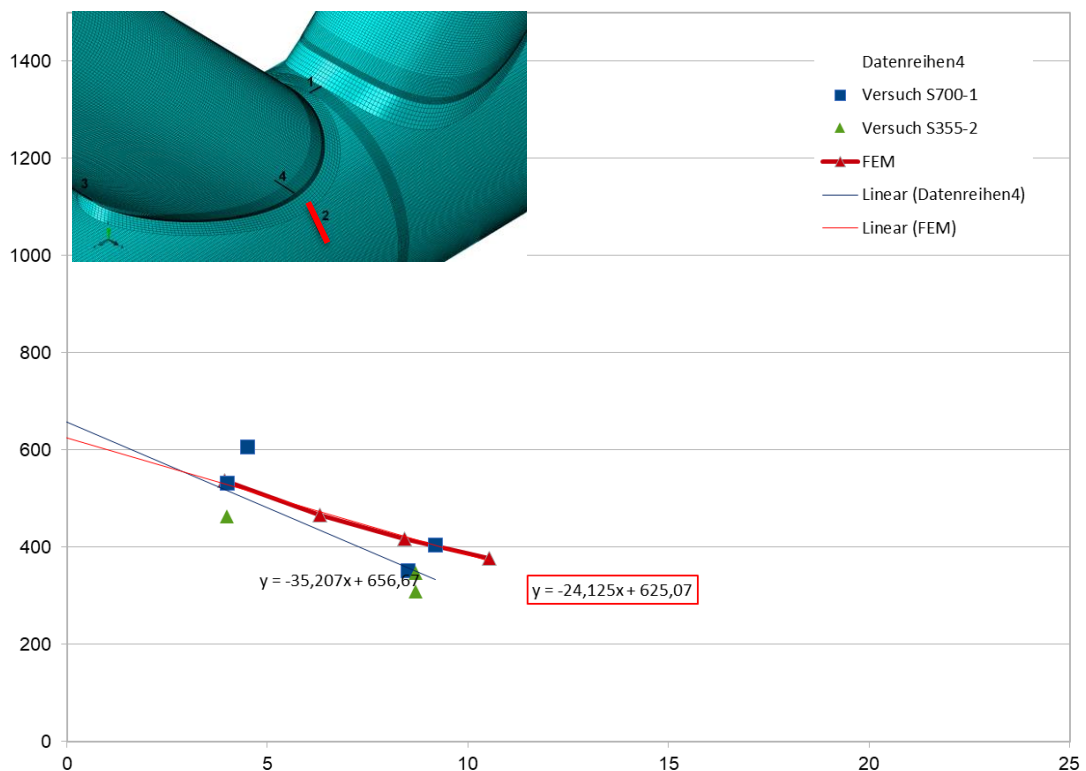


Abbildung 4-13: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an Gurtsattel

Figure 4-13 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement at the saddle for the chord

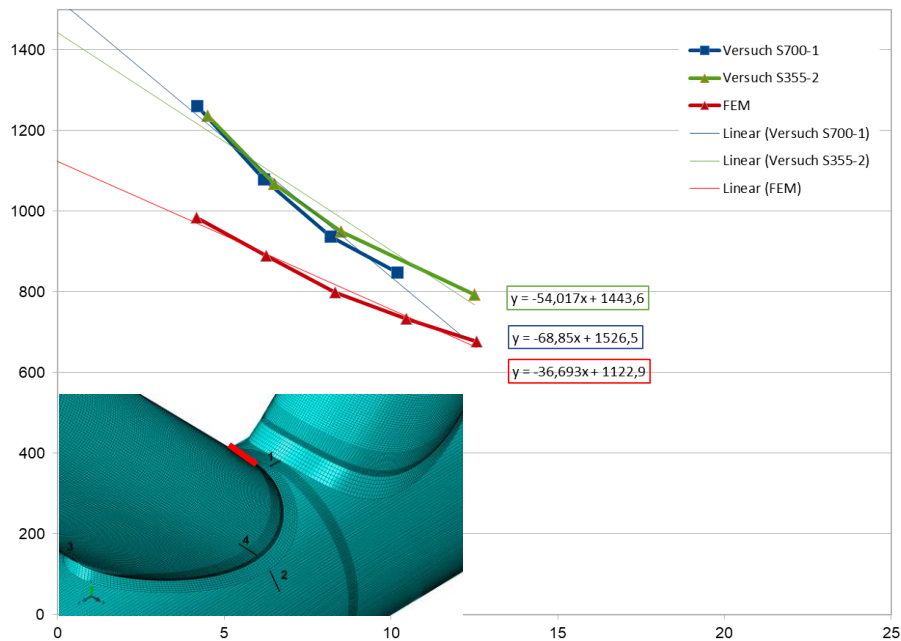


Abbildung 4-14: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an der Zugstrebe im Spaltbereich

Die Tatsache, dass die gemessenen Spannungen höher sind als die Spannungen aus der FE-Berechnung, kann auf die nicht voll durchgeschweißte Naht des Probekörpers an dieser Stelle zurückgeführt werden.

Figure 4-14 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement in the gap of the tension brace

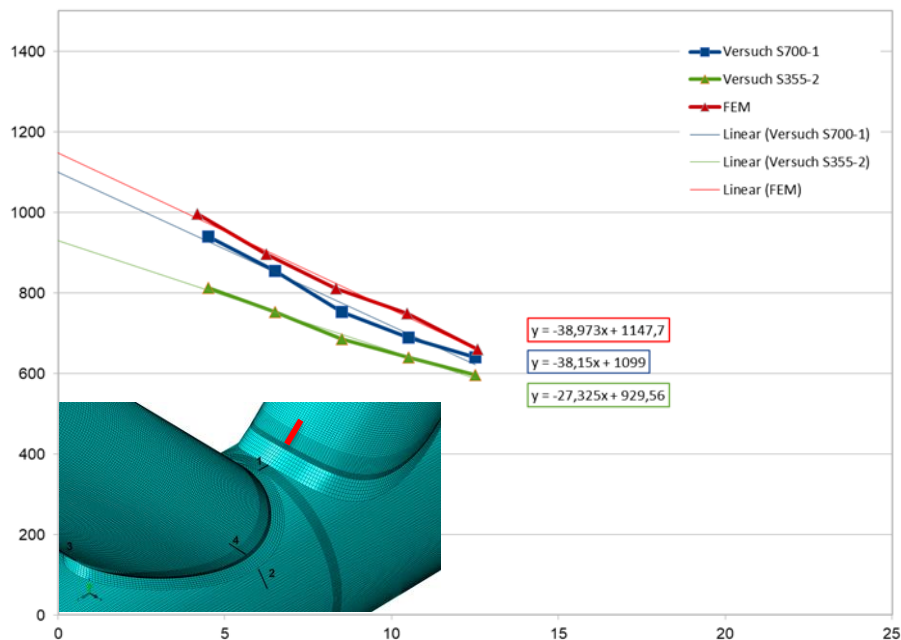


Abbildung 4-15: Vergleich der Dehnungen kleiner KHP K-Knoten aus FEA und Versuch an der Druckstrebe im Spaltbereich

Figure 4-15 Comparison of strains of small CHS K-joints from FEA and measurement in the gap of the compression brace

#### 4.3.4 Validierung großer KHP K-Knoten Validation of large CHS K-joints

Für die Validierung der FE-Modelle an großen KHP K-Knoten wird zusätzlich zu den Dehnungen aus dem Versuch (blau) und dem FE-Modell mit Schweißnaht (rot), die Dehnungen aus einem FE-Modell ohne Modellierung der Schweißnaht (grün) verglichen. Die Gegenüberstellung in Abbildung 4-16 der Dehnungen im Spaltbereich des Gurtes zeigt, dass ein FE-Modell mit Schweißnaht bzw. aus dem Versuch kleinere Dehnungen als ein FE-Modell ohne Modellierung der Schweißnaht aufweist. Ein FE-Modell ohne Schweißnaht führt also zu konservativen Ergebnissen, was auch in Abbildung 4-17 für den Vergleich der Dehnungen in der Strebe bestätigt wird.

Beim Vergleich der Dehnungen aus dem Versuch (blau) und des FE-Modells mit Schweißnaht (rot) zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für den Gurt (Abbildung 4-16) als auch für die Strebe (Abbildung 4-17). Der unterschiedliche Gradient der Vergleichskurven für den Gurt und die etwas größeren Dehnungen aus dem Versuch in der Strebe ergeben sich aus den exzentrisch angeschlossenen Streben, die im FE-Modell nicht abgebildet sind. Diese Exzentrizität ergibt sich für alle großen KHP K-Knoten aus S355 aufgrund des Untermaßes der Gurtprofile, siehe auch Abschnitt 3.6.6.

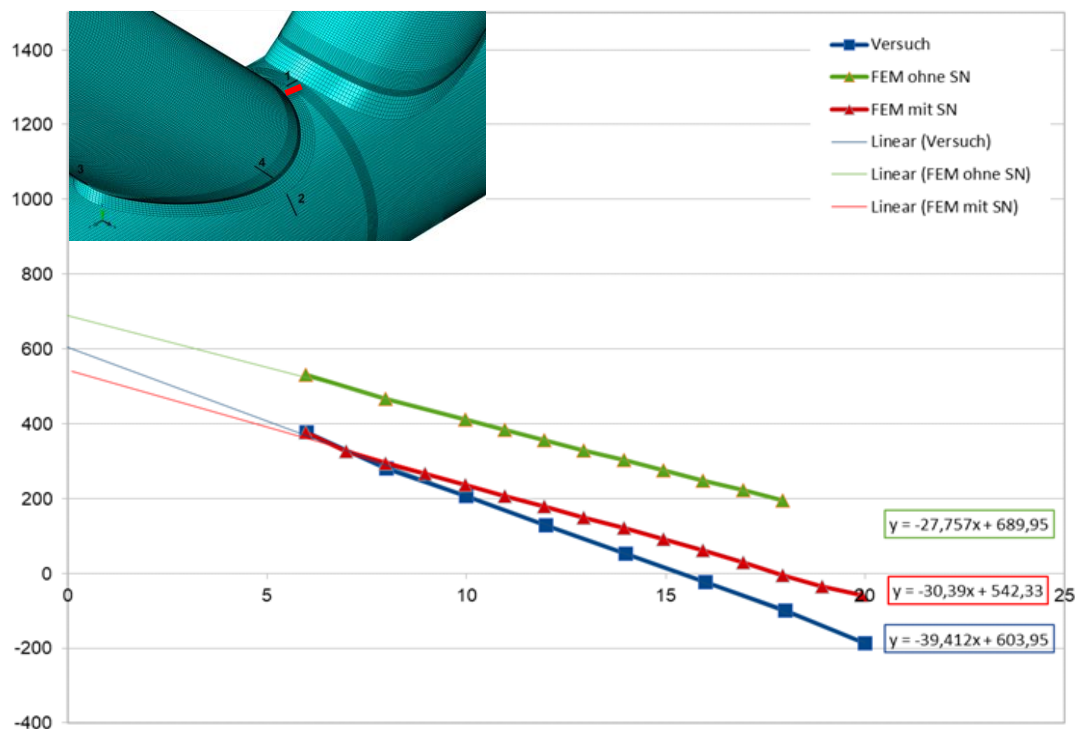


Abbildung 4-16: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt)

Figure 4-16 Comparison of strains in the gap of large CHS K-joints from FEA and tests (chord)

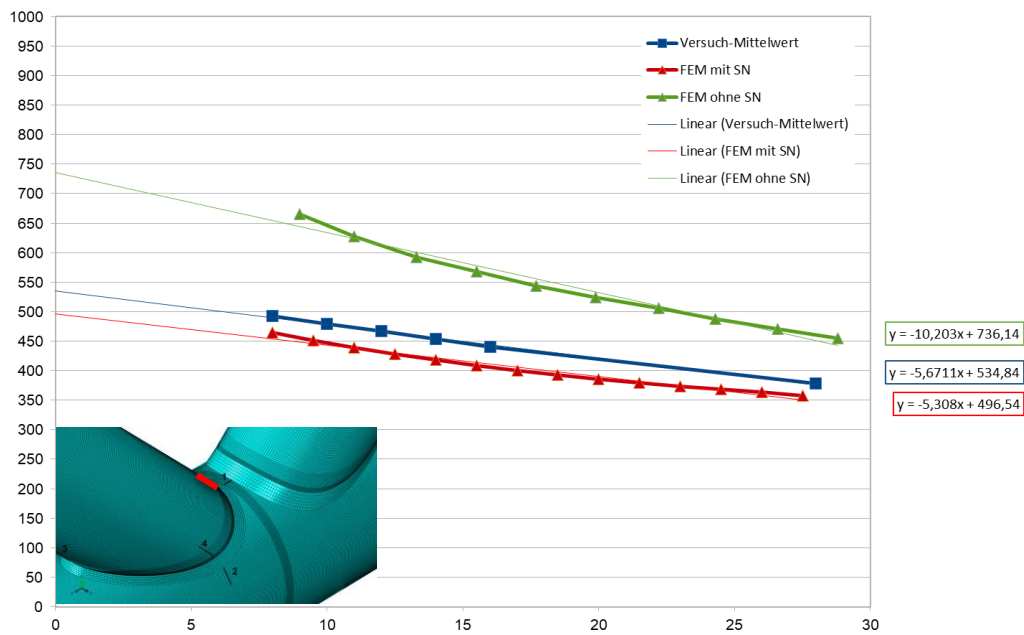


Abbildung 4-17: Vergleich der Dehnungen im Spalt großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe)

Figure 4-17 Comparison of strains in the gap of large CHS K-joints from FEA and tests (brace)

Aufgrund der exzentrisch angeschlossenen Streben ergeben sich an der Sattelposition auf der Vorderseite (orange) und auf der Rückseite (hellblau) des Gurtes unterschiedliche Belastungen. Die Mittelung dieser Werte in der dunkelblauen Linie führt zu einer sehr genauen Übereinstimmung der Dehnungen aus dem FE-Modell sowohl für den Gurt in Abbildung 4-18 als auch für die Streben in Abbildung 4-19.

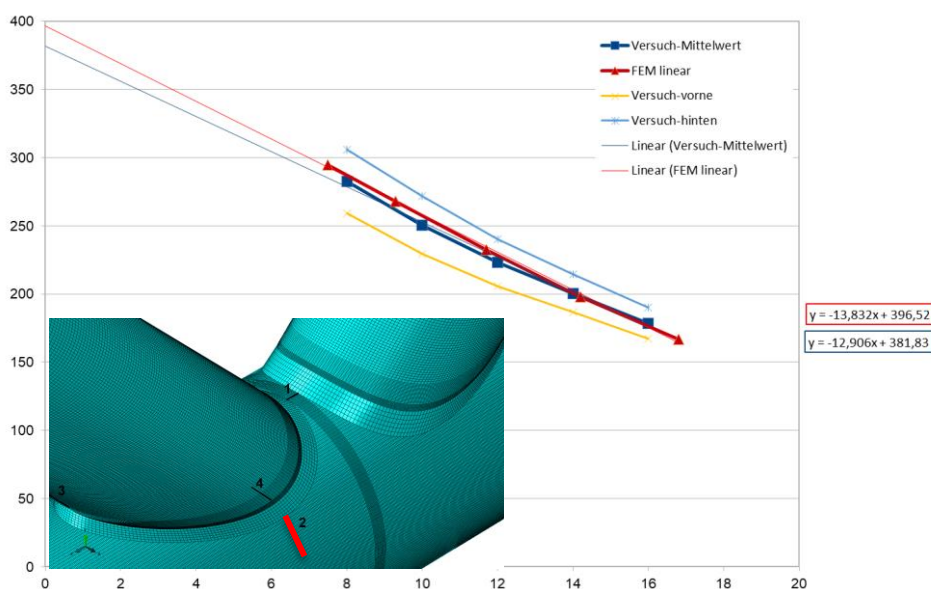


Abbildung 4-18: Vergleich der Dehnunge am Sattel großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Gurt)

Figure 4-18 Comparison of strains at the saddle of large CHS K-joints from FEA and tests (chord)



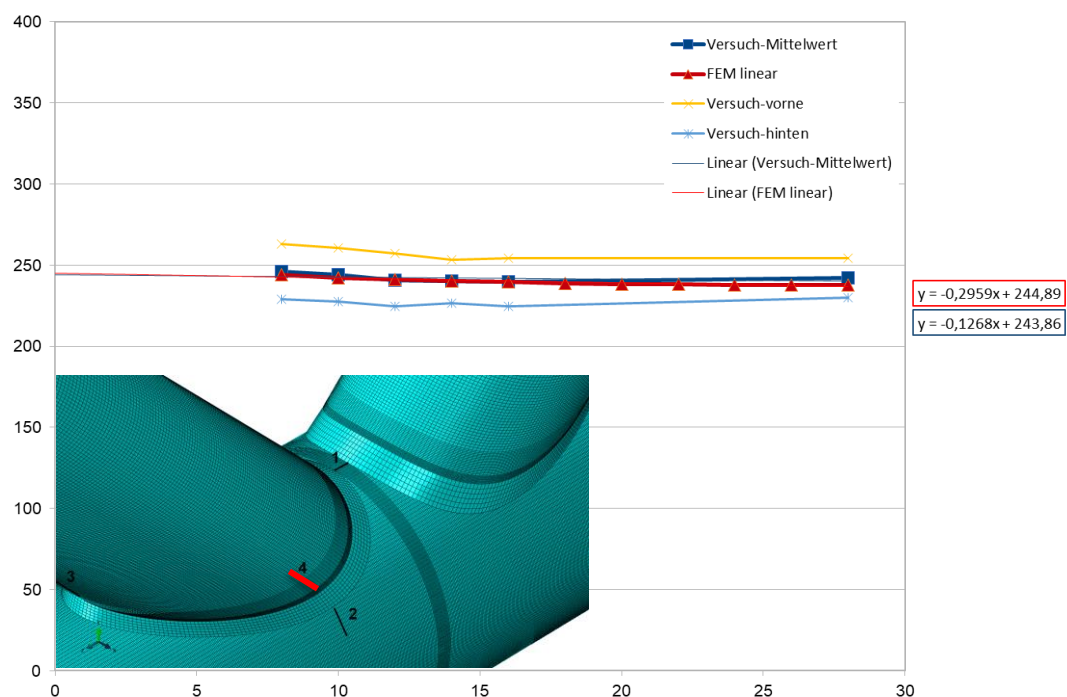


Abbildung 4-19: Vergleich der Dehnungen am Sattel großer KHP K-Knoten aus FEA und Versuch (Strebe)

Figure 4-19 Comparison of strains at the saddle of large CHS K-joints from FEA and tests (brace)

Unter den gegebenen Voraussetzungen gilt das FE-Modell für KHP K-Knoten damit aus ausreichend genau und verifiziert.

## 5 Parameterstudie Parameteric study

### *Kurzfassung*

*Die Parameterstudie wird durchgeführt, um den betrachteten Parameterbereich zu erweitern und den Einfluss einzelner geometrischer Parameter, wie Gurtschlankheit  $2\gamma$ , Wanddickenverhältnis  $\tau$ , Breiten- bzw. Durchmesser Verhältnis  $\beta$  oder Strebeneigungswinkel  $\Theta$  zu identifizieren. Für RHP K-Knoten werden 72 verschiedene Knotenkonfigurationen mit jeweils 4 getrennten Lastfällen berechnet. KHP K-Knoten werden in 16 unterschiedlichen Abmessungen mit jeweils 3 Lastfällen berechnet, so dass insgesamt 336 FE-Modelle innerhalb der Parameterstudie erstellt, berechnet und ausgewertet werden.*

### *Abstract*

*Parametric studies are carried out to enlarge the investigated dimensional range and to identify the influence of the different geometric parameters, such as the chord slenderness  $2\gamma$ , thickness ration  $\tau$ , width ratio  $\beta$  or the brace angle  $\Theta$ . For RHS K-joints 72 different joints configurations, each under 4 load configurations are calculated. For CHS K-joints 16 joints under 3 different load conditions have been considered, so that a total number of 336 models are analyzed for the parametric study.*

### 5.1 Allgemeines General

Auf Grundlage des validierten FE-Modells wird eine Parameterstudie unter Verwendung nomineller Abmessungen durchgeführt. Die Parameterstudie dient zur Erweiterung des untersuchten Parameterbereichs, um zu umfassenden Erkenntnissen für die Bemessungsempfehlungen zu kommen. Dafür werden folgende Parameter variiert und ihr Einfluss untersucht und bewertet:

- Gurtschlankheit  $2\gamma = b_0 / t_0$  bzw.  $d_0 / t_0$
- Wanddickenverhältnis  $\tau = t_1 / t_0$
- Breiten bzw. Durchmesser Verhältnis  $\beta = b_1 / b_0$  (RHS) bzw.  $d_1 / d_0$  (CHS)
- Dimensionslose Exzentrizität  $e/h_0$
- Lastfälle:
  - LC1: Axialbelastung der Streben (AX),
  - LC2a: Stremenmoment in der Ebene nach außen (IPB-out)
  - LC2b: Stremenmoment in der Ebene nach innen (IPB-in)
  - LC3: Gleichgerichtetes Stremenmoment in der Ebene (IPB-conc)
  - LC4: Stremenmoment aus der Ebene (OPB).

RHP K-Knoten werden in 72 verschiedene geometrischen Konfigurationen unter 4 verschiedenen Belastungsarten untersucht (LC1, LC2a und b sowie LC3). Für KHP K-Knoten werden 16 Knotenkonfigurationen mit 3 Lastfällen variiert. (LC1, LC3 und

LC4). Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 336 FE-Modellen. Für jedes Modell werden alle maßgebenden Positionen berücksichtigt und die SCFs an den entsprechenden Stellen bestimmt.

## 5.2 Parameterstudie RHP K-Knoten mit Spalt Parametric study of RHS K-joints with gap

### 5.2.1 Allgemeines General

Es gibt verschiedene Faktoren, die die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen beeinflussen, wie z. B. Netzfeinung, Elementtyp, Belastungs- und Randbedingungen. Diese Einflussfaktoren werden vorab für RHP K-Knoten untersucht und das Ergebnis für die Diskretisierung des FE-Modells in Abschnitt 4.3 berücksichtigt.

Für die Parameterstudie werden die Knoten mit nominellen Abmessungen modelliert. Da die Knoten in Längsrichtung symmetrisch sind, wird diese Symmetrie genutzt, um Berechnungszeiten zu verkürzen, und halbe Knoten analysiert (Abbildung 5-1).

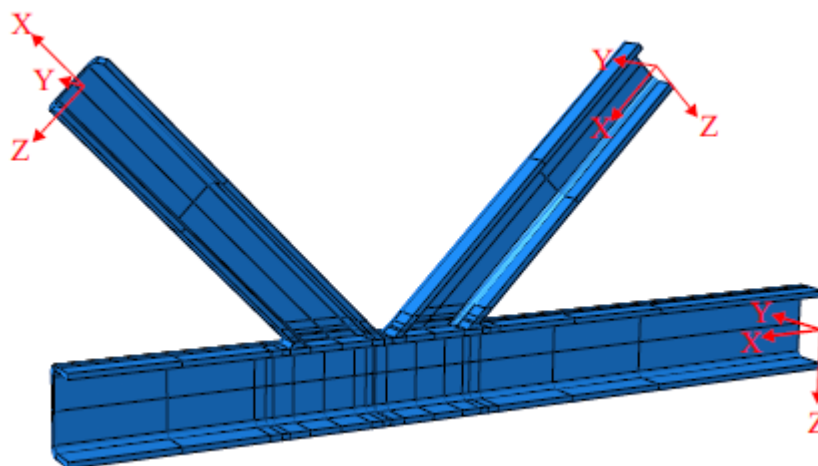


Abbildung 5-1: Modell eines halben RHP K-Knotens mit lokalem Koordinatensystemen

Figure 5-1 Model of half RHS K-joint with local coordinate systems

Da bei der Validierung über die DMS-Messungen das FE-Modell mit quadratischen Elementen zu geringfügig genaueren Ergebnissen führte, werden für die parametrische Untersuchung der RHP K-Knoten quadratische Elemente verwendet. Modelle mit linearen Elementen und entsprechend feineren Netzen können ebenfalls für ausreichend genaue Ergebnisse verwendet werden.

### 5.2.2 Modellierung der Schweißnaht bei RHP K-Knoten mit Spalt Modelling of the weld seam for RHS K-joints with gap

Im Rahmen der Parameterstudie wird die Schweißnaht in Abhängigkeit von der Wandstärke der Strebe nach den Empfehlungen von CIDECT [39] mit Nennmaßen ausgeführt. Am Schweißnahtfuß im Spalt und an den Strebenseiten wird eine HV-Naht, an der Ferse eine Kehlnaht ausgeführt (Abbildung 5-2).

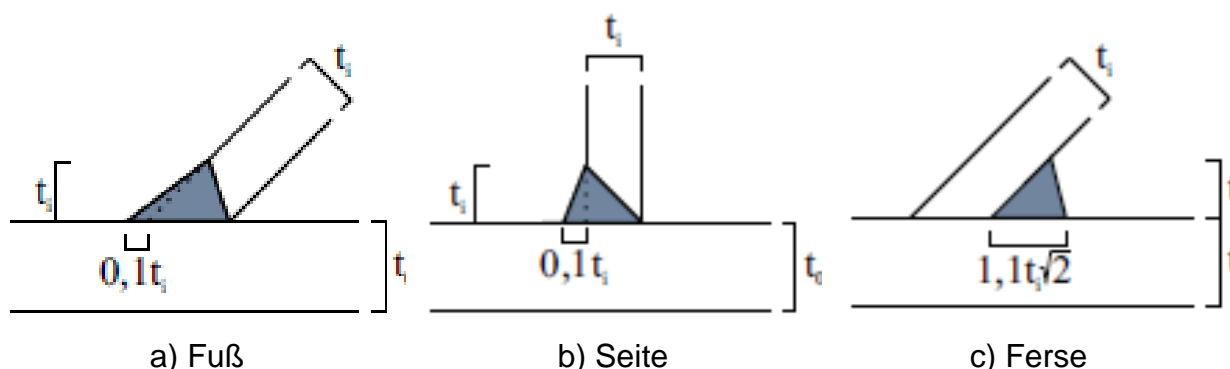


Abbildung 5-2: Diskretisierung der Schweißnaht bei RHP K-Knoten

Figure 5-2 Weld seam discretization for RHS K-joints

Für die Schweißnaht gilt die gleiche Materialdefinition wie für das Grundmaterial der RHP. Eine separate Modellierung ist daher nicht erforderlich. Die Schweißnaht und die Strebe werden als Einheit modelliert. Dies erleichtert das partitionieren und strukturierte Vernetzen in diesem Bereich.

Van Wingerde hat in seinen Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von T- und X-Knoten aus RHP gezeigt, dass der Einfluss einer voll durchgeschweißten Kehlnaht auf die SCF im Vergleich zu nicht voll durchgeschweißten Kehlnaht unerheblich ist [33]. Innerhalb der Parameterstudie wird nicht zwischen der Querschnittsfläche der Strebe und der Schweißnaht unterschieden, sondern die gesamte Querschnittsfläche mit dem Gurt verbunden.

### 5.2.3 Untersucher Parameterbereich für RHP K-Knoten Parameter range for RHS K-joints

Die Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) hängen von der Knotengeometrie ab. In Tabelle 5-1 sind die maßgebenden geometrischen Parameter und ihr Geltungsbereich nach CIDECT [39] aufgeführt. Dieser gilt für den Lastfall Axialbelastung der Streben (AX). Für Biegebeanspruchung der Streben sehen in CIDECT [39] keine SCF-Formeln oder Diagramme zur Verfügung. Zudem ist der in numerisch untersuchte Parameterbereich (FEA) für RHP K-Knoten gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Parameterbereich für SCFS von RHP K-Knoten mit Spalt (AX)

Table 5-1 Parameter range for SCFs of RHS K-joints with gap (AX)

Parameter	Gültigkeit nach CIDECT	Parameterbereich FEA
Gurtschlankheit $2\gamma = b_0 / t_0$	10 - 35	10 - 33
Wandickenverhältnis $\tau = t_1 / t_0$	0,25 - 1,0	0,32 - 1,0
Breitenverhältnis $\beta = b_1 / b_0$ (RHS)	0,35 - 1,0	0,37 - 0,73
Strebenneigungswinkel $\theta$	30° - 60°	30° - 60°
Dimensionslose Spaltgröße $g' = g / t_0$	$2 \cdot \tau$	1,33 - 6,25
Dimensionslose Exzentrizität $e / h_0$	-0,55 - 0,25	-0,25 - 0,35

Grundsätzlich gibt es zwei Methoden, um die maßgeblichen Parameter zu variieren. Die einfachere Methode besteht darin, mit einem Grundmodell zu beginnen, bei dem

ein einzelner Parameter selektiv variiert wird. Der Vorteil dieser Methode liegt in der geringen Anzahl von Modellen. Die Anzahl steigt linear mit den Modellvariationen pro Parameter. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Parametern nicht berücksichtigt wird. Diese Methode findet für die numerischen Untersuchungen an KHP K-Knoten Anwendung.

Die kompliziertere Methode bietet einen besseren Überblick über den Einfluss der Parameter, erfordert jedoch eine komplexe Untersuchung, indem alle Einflussgrößen untereinander variiert werden. Diese deckt nahezu den gesamten Parameterbereich ab. Für die numerischen Untersuchungen an RHP K-Knoten wird die zweite Methode befolgt.

Zu diesem Zweck werden 72 RHP K-Knoten mit unterschiedlichen Abmessungen definiert. Zunächst werden die Parameter  $2\gamma = 15$  und  $g' = 2,0$  konstant gehalten. Daraus ergeben sich 54 RHP K-Knoten mit demselben Gurt, wobei die Nennmaße des Gurts entsprechend den großen RHP K-Knoten aus den Ermüdungsversuchen in Kapitel 3.6.4 gewählt wurden ( $b_0 = 300$  mm,  $t_0 = 20$  mm,  $g = 40$  mm). Die Anforderungen der DIN EN 1993-1-8 [5] an die Mindestspaltbreite werden dabei nicht für alle Verbindungen erfüllt, da dies nicht vermieden werden kann, ohne die oben genannten Parameter zu ändern.

Die Auswahl der RHP-Profile für die K-Knoten richtet sich nach den tatsächlich verfügbaren Abmessungen. Die Breite der Streben variiert für die ersten 54 Knoten zunächst von  $b_i = 110$  mm - 220 mm mit Zwischengrößen von  $b_i = 140$  mm und  $b_i = 180$  mm mit Wandstärken der Streben von  $t_i = 20,0$  mm,  $t_i = 17,5$  mm,  $t_i = 14,2$  mm,  $t_i = 10,0$  mm und  $t_i = 6,3$  mm. Für die Strebenbreite  $b_i = 140$  mm und  $b_i = 110$  mm liegen die Wandstärken  $t_i = 20,0$  mm und  $t_i = 17,5$  mm nicht vor und werden in der Parameterstudie nicht berücksichtigt. Zudem wird der Strebenneigungswinkel  $\theta$  variiert. Untersucht werden die Winkel  $\theta = 30^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  und  $\theta = 60^\circ$ .

Anschließend werden 18 weitere RHP K-Knoten mit unterschiedlich dimensioniertem Spalt modelliert, um den Parameterbereich weiter zu erweitern und die Abmessungen früherer Untersuchungen einzubeziehen. Die betrachteten Parameterbereiche sind in Tabelle 5-1 angegeben. Anhang C3 gibt einen Überblick über alle berechneten RHP K-Knoten mit ihren jeweiligen Abmessungen und Parametern.

Die dimensionslose Exzentrizität überschreitet mit  $e/h_0 = 0,35$  für fünf Knoten den Grenzwert nach CIDECT [39], der für die vereinfachte Modellierung von Fachwerken gilt, bei denen sekundäre Biegemomente vernachlässigt werden können. Die anderen Grenzwerte sind für den Anwendungsbereich eingehalten, siehe Tabelle 5-1.

#### 5.2.4 Positionen der SCFs Positions of SCFs

Nach CIDECT [39] werden fünf Positionen für die Bestimmung der SCFs für RHP K-Knoten mit Spalt maßgebend, siehe Abbildung 5-3.

Diese Positionen geben nicht unbedingt den Ort der maximalen Spannungskonzentration wieder. Der Vorteil der festen Position ist jedoch die

Vergleichbarkeit und die Möglichkeit der Überlagerung von Spannungen aus verschiedenen Lastfällen.

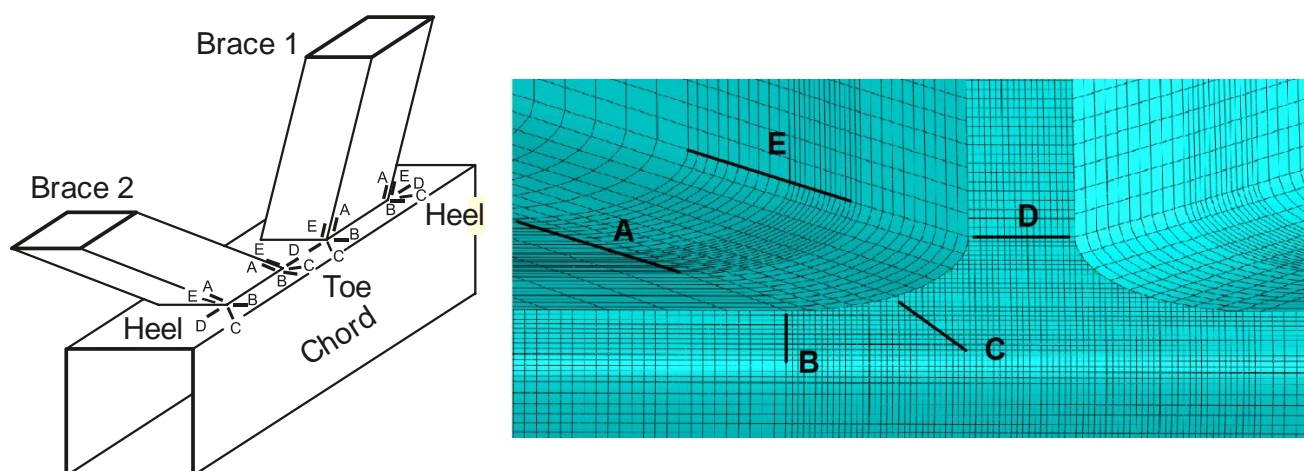


Abbildung 5-3: Positionen der SCFs bei ebenen RHP K-Knoten mit Spalt [39]

Figure 5-3 SCF positions for uniplanar RHS K-joints with gap [39]

Alle Positionen A bis E werden ausgewertet. Position B und D befinden sich am Anfang der Eckradien der Streben. Diese Positionen sind orthogonal zur Schweißnaht und der Abstand ist einfach zu definieren. Die Linie C verläuft orthogonal zur Tangente an dem Punkt, an dem die Schweißnaht einen Winkel von 45 Grad zur Längsachse der Strebe aufweist. Die Entfernung wird von diesem Punkt aus gemessen. Um dies zu erreichen, werden die Positionen A und E der Strebe ebenfalls am Anfang des Radius positioniert. Die festen Positionen erhöhen die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Modellen. Spannungen werden an sechs Punkten pro Position aufgenommen. Mit Ausnahme von Position C sind diese im Bereich zwischen  $L_{r,min}$  und  $L_{r,max}$  nach Tabelle 4-2 äquidistant. Für Position C wird der nächstmögliche Elementknoten im Extrapolationsbereich ausgewählt und dessen Abstand zur Extrapolation herangezogen. Die anderen fünf Punkte liegen in geringerem Abstand, so dass der am weitesten entfernte Punkt für  $L_{r,max}$  in einem Bereich von 1,1 bis 1,2 t liegt. Gemäß der Empfehlung von CIDECT [37] für RHP-Knoten werden die Strukturspannungen durch quadratische Extrapolation bestimmt.

### 5.2.5 Im Gleichgewicht stehende Normalkräfte auf den Streben (AX) Balanced axial loads (AX) on the braces

Zunächst wird der Lastfall für im Gleichgewicht stehende Normalkräfte (AX) auf die Streben untersucht, siehe Abbildung 5-4. Alle zehn Positionen werden einzeln untersucht und betrachtet, siehe Anhang C3. Dies ermöglicht eine genauere Betrachtung der Auswirkungen der Parameter an jeder Position. Anschließend wird der SCF für den maßgeblichen Punkt des Gurts und der Strebe berücksichtigt und ein Vergleich mit den SCF-Werten gemäß den CIDECT-Formeln durchgeführt. Unter axialer Normalkraftbeanspruchung der Streben tritt die höchste Spannungskonzentration im Gurt häufig an der Position D im Spalt auf. Für die Streben ist die Position E maßgebend, entweder an der Ferse oder im Spalt, abhängig von den Abmessungsparametern des Knotens.

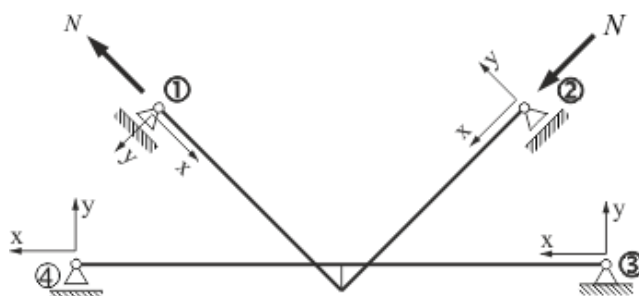


Abbildung 5-4: K-Knoten mit im Gleichgewicht stehenden Normalkräften auf den Streben (AX)

Figure 5-4 K-joint with balanced axial loads of the braces (AX)

Im Allgemeinen ergeben sich die größten SCFs für mittlere  $\beta$ -Werte von  $\beta = 0,50 - 0,60$  für den Gurt und die Streben. Es ist daher ratsam, wenn keine statischen Gründe dagegensprechen, die  $\beta$ -Werte größer oder kleiner zu wählen. Bei sehr großen Knotenexzentrizitäten mit  $e / h_0 = 0,35$  ergeben sich kleinere SCFs.

Der Einfluss von  $\tau$  ist für den Gurt und die Streben gegenläufig: Für SCFs im Gurt sind kleine Wanddickenverhältnisse  $\tau$  günstig, für die Streben jedoch größere. Für den Strebenwinkel sind kleine Werte von  $\theta$  vorzuziehen, da die SCFs hier im Allgemeinen niedriger sind als für größere Winkel. Für den Parameter  $2\gamma$  sind kleine Werte für die Gurtschlankheit vorteilhaft.

Innerhalb des untersuchten Parameterbereichs sind die vereinfachten Parameterformeln nach CIDECT [39] mehrheitlich konservativ und können daher auf der sicheren Seite angewendet werden. In Abbildung 5-5 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen mit den Ergebnissen des CIDECT-Projekts 7P (van Wingerde et al. [34]) ausgewertet. Wie zu sehen ist, sind die Ergebnisse für die Streben in vielen Fällen sehr konservativ. Die Ergebnisse für die Gurt scheinen besser zu passen, auch wenn einige auf der unsicheren Seite liegen. Der nächste Schritt besteht darin, zu prüfen, ob eine Änderung der vorhandenen CIDECT-Formeln diesen Vergleich verbessern kann. Dies geschieht in Kapitel 6.3.

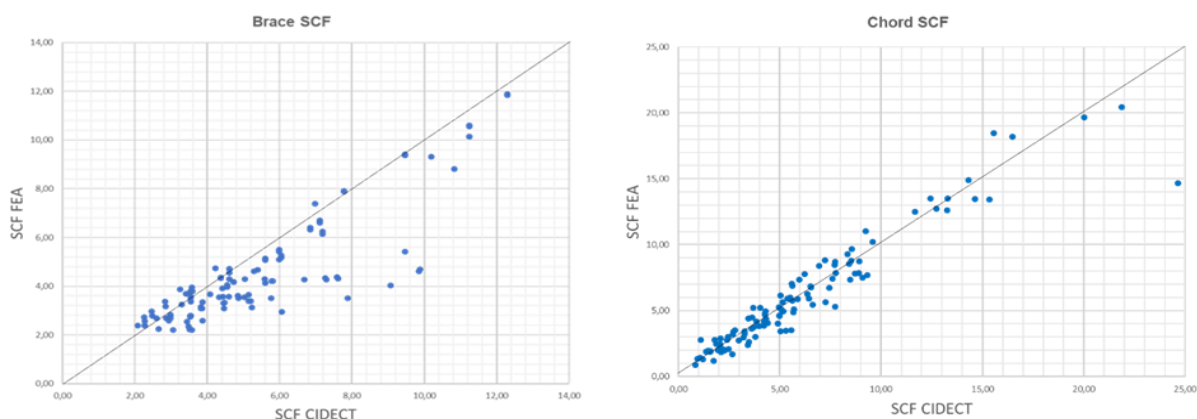


Abbildung 5-5: RHP K-Knoten mit Spalt: Vergleich der SCFs nach CIDECT [39] und FEA

Figure 5-5 RHS K joints with gap: Comparison of SCFs of CIDECT [39] and FEA

### 5.2.6 Biegung in der Ebene auf den Streben (IPB) In-plane bending (IPB) of the braces

Für den Lastfall Strebenbiegung in der Ebene werden die drei folgenden Lastkonfigurationen unterschieden:

LC2a: nach außen entgegengesetzt vom Spalt nach außen (Abbildung 5-6)

LC2a: nach innen entgegengesetzt zum Spalt hin nach innen (Abbildung 5-7)

LC3: gleich gleichgerichtet in eine Richtung (Abbildung 5-8)

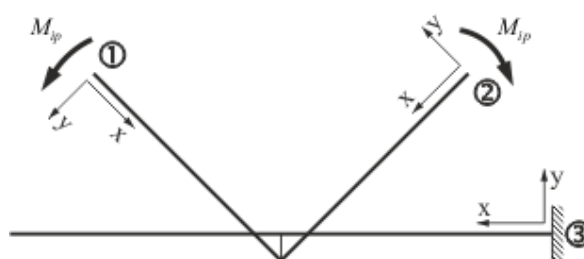


Abbildung 5-6: K-Knoten mit nach außen gerichteten Momenten in der Ebene (IPB-out)

Figure 5-6 K-joint with outwards oriented in-plane bending (IPB-out)

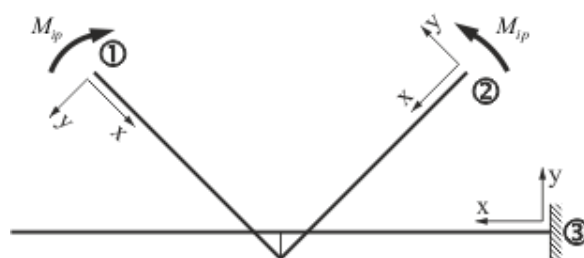


Abbildung 5-7: K-Knoten mit nach innen gerichteten Momenten in der Ebene (IPB-in)

Figure 5-7 K-joint with inwards oriented in-plane bending (IPB-in)

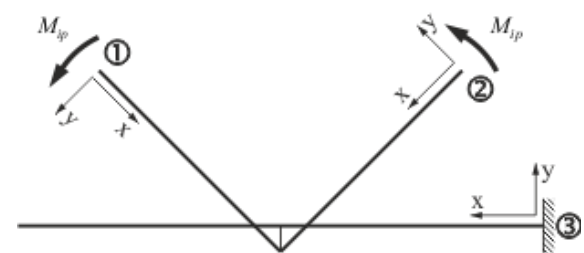


Abbildung 5-8: K-Knoten mit gleichgerichteten Momenten in der Ebene (IPB-conc)

Figure 5-8 K-joint with concordantly oriented in-plane bending (IPB-conc)

Auch für den Lastfall Biegung in der Ebene auf den Streben werden alle zehn Positionen aus Abbildung 5-3 untersucht und einzeln betrachtet. Dies ermöglicht eine genauere Betrachtung des Parametereinflusses an jeder Position. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Anhang C3 aufgeführt.

Bei gleichgerichteter Strebenbiegung in der Ebene (IPB-conc) sowie bei nach innen ausgerichteter Biegung in der Ebene (IPB-in) tritt die höchste



Spannungskonzentration an der Ferse an Position E für die Strebe und normalerweise an Position C am Gurt auf.

Bei nach außen gerichteten Momenten (IPB-out) ist der Spaltbereich der am höchsten beanspruchte Bereich. Durch die gleichgerichtete Spannung im Spalt ist die Auswertung mittels Extrapolation in Position D nicht wirksam, wodurch hier Position C oder B maßgebend wird. Wie bei IPB-conc und IPB-in sind an Position E für die Streben die SCFs am größten, jedoch für IPB-out immer im Spaltbereich.

Die größten SCFs ergeben sich auch bei IPB für mittlere  $\beta$ -Werte von  $\beta = 0,50 - 0,60$  für den Gurt, wobei für die Streben kleinere  $\beta$ -Werte etwas vorteilhafter sind. Es ist daher insgesamt ratsam, kleinere  $\beta$ -Werte von  $\beta < 0,5$  anzustreben. Der Einfluss von  $\tau$  ist wie schon für den Axiallastfall gegenläufig für den Gurt und Streben: Für SCFs der Streben sind kleine Wanddickenverhältnisse  $\tau$  günstig, für den Gurt größere.

Bei Strebenbiegung in der Ebene ist der Einfluss des Strebenwinkels  $\Theta$  für den untersuchten Bereich von  $30^\circ - 60^\circ$ . Vernachlässigbar. Wie bereits für den Lastfall AX festgestellt, ist auch unter IPB eine geringe Gurtschlankheit  $2\gamma$  vorteilhaft.

Für K-Knoten unter Strebenbiegung in der Ebene gibt es in CIDECT [39] oder einer anderen Literatur keine Formeln zur Berechnung der maximalen SCF, sodass ein Vergleich nicht möglich ist. In Kapitel 6.3 wird eine neue Parameterformel ausgewertet.

### 5.2.7 Schlussfolgerungen der Parameterstudie an RHP K-Knoten mit Spalt Conclusions of parametric study on RHS K-joints with gap

Für die konstruktive Auslegung der RHP K-Knoten unter Ermüdungsbeanspruchung wird empfohlen, die Wandstärke der Strebe im Verhältnis zur Gurtwandstärke dünn (kleiner  $\tau$ -Wert) zu wählen und das Gurtprofil dickwandig zu gestalten (kleiner  $2\gamma$ -Wert). Je kleiner die Parameter  $\tau$  und  $2\gamma$  sind, desto niedriger sind die SCFs für den Gurt, was normalerweise für die Rissentstehung entscheidend ist. Bezüglich des Breitenverhältnisses  $\beta$  empfiehlt es sich, kleine  $\beta$ -Werte zu wählen, was für alle Lastfälle vorteilhaft ist. Die SCF-Werte des Gurts verringern sich mit abnehmendem Stebenneigungswinkel  $\theta$ . Für die Streben ist der Einfluss von  $\theta$  eher gering. Vorteilhafter ist also ein kleiner Winkel  $\theta$  zwischen Gurt und Strebe, jedoch unter Berücksichtigung der Exzentrizität, die möglichst klein gewählt werden sollte.

Die zusammengefassten Empfehlungen der Parameterstudie für RHP K-Knoten mit Spalt sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5-2: Empfehlungen für die Parameterauswahl für RHP K-Knoten mit Spalt

Table 5-2 Recommendations for the choice of parameters for RHS K-joints

Lastfall	Gurt				Strebe			
	$\tau$	$2\gamma$	$\beta$	$\theta$	$\tau$	$2\gamma$	$\beta$	$\theta$
AX	klein	klein	groß oder klein	klein	groß	klein	klein	-
IPB								

### 5.3 Parameterstudie KHP K-Knoten mit Spalt Parametric study of CHS K-joints with gap

#### 5.3.1 Allgemeines General

Es gibt verschiedene Faktoren, die die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen beeinflussen, z. B. die Netzverfeinerung, den Elementtyp und die Belastung sowie die Randbedingungen. Diese Einflussfaktoren wurden vorab für KHP K-Knoten untersucht [23], und das Ergebnis für die Diskretisierung des FE-Modells berücksichtigt.

Im Allgemeinen wird das Modell wie in Abschnitt 4.3 beschrieben generiert. Es werden lineare hexaedrische Elemente vom Typ C3D8R verwendet und ein ganzer Knoten ganzes modelliert. Wie bereits bei RHP K-Knoten wird auch für KHP K-Knoten die Verbindung zwischen dem Gurt und den Streben mit Hilfe von sog. Tie constraints hergestellt. Dies ermöglicht im Gegensatz zu einem monolithischen Modell (Abbildung 5-9, links) ein gleichmäßiges Netz mit konstanten Elementseitenlängen von 4 mm für den Gurt (Abbildung 5-9, rechts).

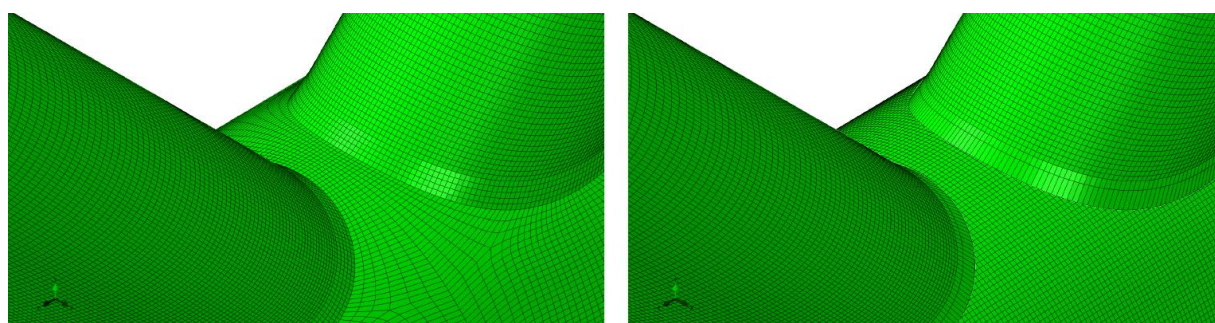


Abbildung 5-9: FE-Model des KHP K-Knotens: monolithisch (links) und mit Tie constraints (rechts)

Figure 5-9: FE-Model of CHS K-joint: monolithic (left) and with tie constraints (right)

#### 5.3.2 Schweißnahtdiskretisierung für KHP K-Knoten Modelling of welds for CHS K-joints

Im Rahmen der Parameterstudie wird die Schweißnaht in Abhängigkeit von der Wandstärke der Strebe nach den Empfehlungen von CIDECT [39] mit Nennmaßen ausgeführt. An der Krone und am Sattel der Strebe wird eine HV-Naht und an der Ferse eine Kehlnaht ausgeführt, siehe Abbildung 5-10.

Der Einfluss eines übergeschweißten Spalts wird innerhalb der Parameterstudie nicht weiter untersucht. Da für die Schweißnaht gilt die gleiche Eigenschaftsdefinition wie für das Grundmaterial gilt, ist eine separate Modellierung nicht erforderlich. Die Schweißnaht wird zusammen mit der Strebe als Einheit modelliert. Dies erleichtert das Partitionieren und Vernetzen in diesem Bereich.

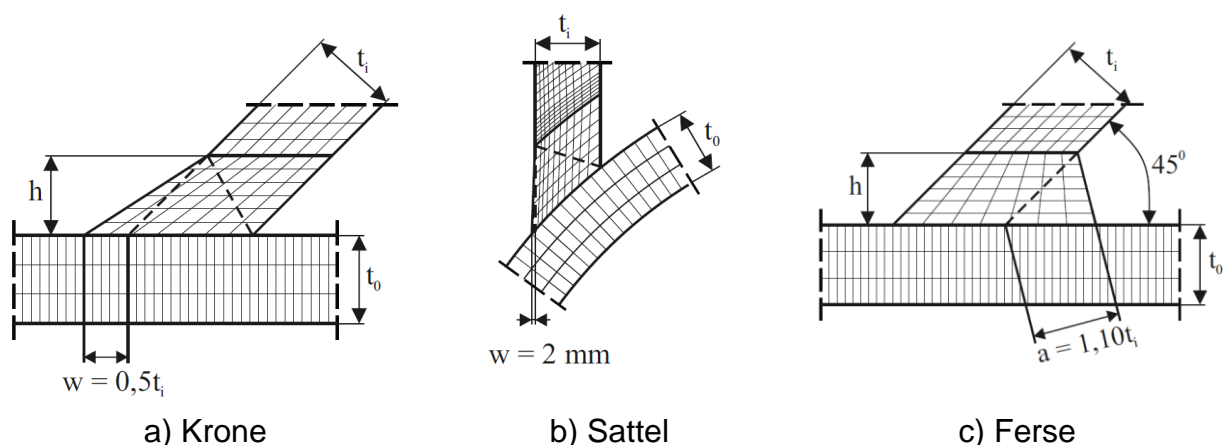


Abbildung 5-10: Schweißnahtdiskretisierung für KHP K-Knoten

Figure 5-10: Weld seam discretization for CHS K-joints

Vorab wurde untersucht, ob eine durchgehende Kehlnaht an der Ferse die SCFs im Vergleich zu einer Kehlnaht ohne Durchschweißung beeinflusst [23]. Der SCF an der maßgebenden Position im Spalt ist für das Modell mit voller Durchschweißung etwa 1% höher und liegt damit auf der sicheren Seite. Da der Einfluss eher gering ist, der Aufwand für die Modellierung jedoch viel höher ist, wird innerhalb der Parameterstudie nicht zwischen der Querschnittsfläche der Strebe und der Kehlnaht unterschieden. Der gesamte Bereich ist mit dem Gurt verbunden.

### 5.3.3 Parameterbereich für KHP K-Knoten Parameter range for CHS K-joints

Die SCFs von Hohlprofilverbindungen hängen von der Knotengeometrie ab. Die Parameter und deren Anwendungsgrenzen für die Verwendung der SCF-Formeln nach CIDECT [39] für KHP K-Knoten mit Spalt sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Diese gelten für den Lastfall im Gleichgewicht stehende Axiallasten der Strebe (AX). Die Lastfälle Biegung in der Ebene (IPB) und Biegung aus der Ebene (OPB) der Streben sind nicht in der CIDECT-Konstruktionsanleitung enthalten.

Tabelle 5-3: Parameterbereich für SCFs von ebenen KHP K-Knoten mit Spalt (AX)

Table 5-3 Parameter range for SCFs of uniplanar CHS K-joints with gap (AX)

Parameter	Anwendungsbereich CIDECT	Parameterbereich FEA
Gurtschlankheit $2\gamma = d_0 / t_0$	24 - 60	6,5 - 30,7
Wanddickenverhältnis $\tau = t_1 / t_0$	0,25 - 1,0	0,4 - 1,67
Breitenverhältnis $\beta = d_1 / d_0$	0,3 - 0,6	0,39 - 0,75
Strebenneigungswinkel $\theta$	30° - 60°	35° - 55°
Dimensionslose Exzentrizität $e / h_0$	0	-0,02 - 0,25

Die Parameterstudie basiert auf der in Abbildung 5-11 gezeigten grundlegenden Geometrie der KHP K-Knoten mit den Nennmaßen großer KHP K-Knoten. Auf Grundlage dieses Modells werden die Parameter  $2\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  und  $\theta$  selektiv variiert.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der geringen Anzahl von Modellen. Die Abmessungen der einzelnen KHP K-Knoten für die Parameterstudie sind in Anhang C3 aufgeführt.

Da für KHP K-Knoten mit Spalt in CIDECT [37] keine Bemessungsformeln, sondern Diagramme angegeben sind, und der Ursprung oder die Datenbasis für die Formeln in DNV-GL [2] bisher nicht geklärt werden konnten, werden die SCFs aus der Parameterstudie in Diagrammen mit den bestehenden Normen verglichen.

### 5.3.4 Positionen der SCFs Positions of SCFs

Nach CIDECT [39] wird der Spannungskonzentrationsfaktor (SCF) für KHP K-Knoten mit Spalt an vier maßgeblichen Stellen bestimmt, siehe Abbildung 5-11. Diese Positionen geben nicht unbedingt den Ort der maximalen Spannungskonzentration wieder. Der Vorteil der festen Position ist jedoch die Vergleichbarkeit und die Möglichkeit der Überlagerung von Spannungen aus verschiedenen Lastfällen.

Laut CIDECT [39] ist die entscheidende Position für den Gurt bei Axialbelastung der Streben (AX) entweder Position 1 (Kronenspitze) oder Position 2 (Gurtsattel). Bei den Streben hängt die entscheidende Position von den Knotenparametern ab. Vor allem Position 3 an der Kronenferse und Position 4 am Strebensattel sind die maßgeblichen Hot Spots [39].

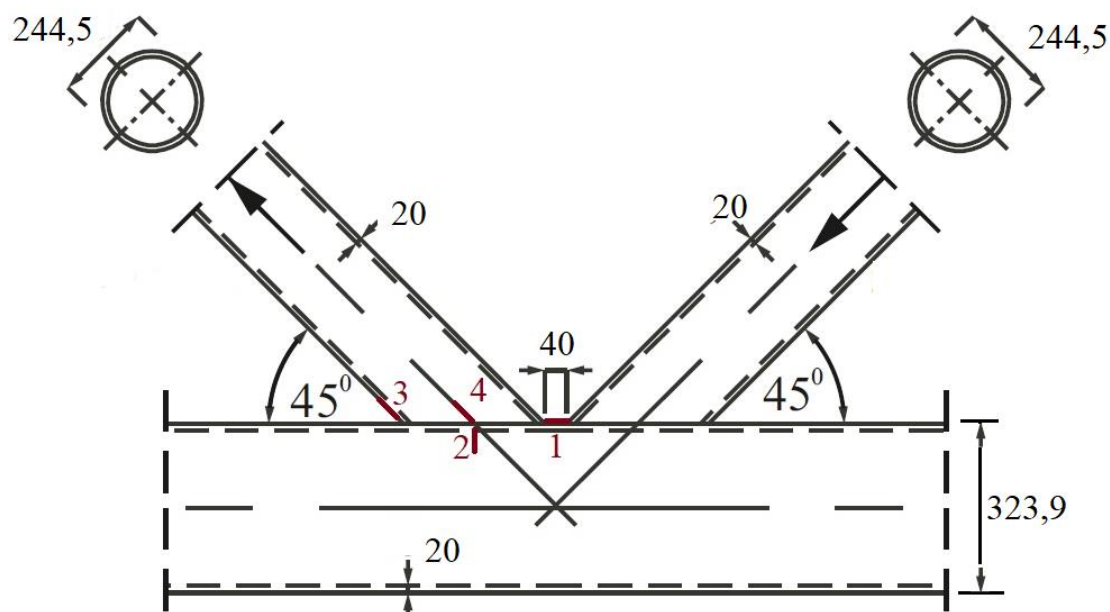


Abbildung 5-11: Abmessungen des Basisknotens und SCF-Positionen für KHP K-Knoten mit Spalt  
 Figure 5-11: Basic joint dimension and SCF positions for CHS K-joint with gap

### 5.3.5 Einfluss des Wanddickenverhältnisses $\tau$ und der Gurtschlankheit $2\gamma$ Influence of wall thickness ratio $\tau$ and chord slenderness $2\gamma$

Zur Untersuchung des Einflusses von Wanddickenverhältnis  $\tau$  und der Gurtschlankheit  $2\gamma$  wird die Wanddicke des Gurtes  $t_0$  variiert, während der Gurtdurchmesser  $d_0$  und die Abmessung der Strebe konstant bleiben.

Für den Gurt treten die größten SCFs an der Krone im Spaltbereich auf. Mit zunehmender Gurtschlankheit  $2\gamma$  und zunehmendem Wanddickenverhältnis  $\tau$  steigen die SCFs für die Strebe signifikant an (Abbildung 5-12 (rechts) und Abbildung 5-13 (rechts)). Das heißt, je dicker die Gurtwanddicke  $t_0$  ist, desto kleiner sind die SCFs. Dies gilt für SCFs nach CIDECT DG 8 [39], DNVGL-RP-C203 [3] und den Scfs aus den numerischen Berechnungen. Im Vergleich zu DNVGL-RP-C203 [3] und den numerischen Untersuchungen weist CIDECT DG 8 [37] die höchsten SCFs auf. Dies ist hauptsächlich auf einen festen Minimalwert von  $SCF_{b,ax} = 2,3$  für K-Knoten mit Strebenneigungswinkeln  $\Theta = 45^\circ$  zurückzuführen. Darüber hinaus steigen die SCFs nach CIDECT DG 8 [39] und DNVGL-RP-C203[3] mit steigenden  $\tau$ - oder  $2\gamma$ -Werten stark an, während die Zunahme der SCFs aus den numerischen Berechnungen geringer ist.

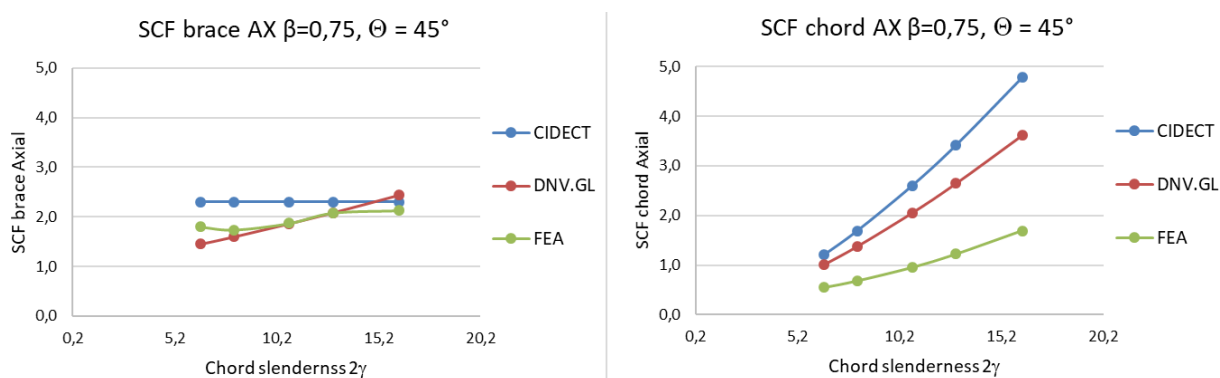


Abbildung 5-12: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierender Gurtschlankheit  $2\gamma$  an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-12: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying chord slenderness  $2\gamma$  at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)

Im Vergleich dazu sind die SCF-Werte der Streben deutlich kleiner als die des Gurtes (Abbildung 5-12 (links) und Abbildung 5-13 (links)). Nach dem Bemessungskonzept aus CIDECT DG 8 [39] gilt der konstante Mindestwert  $SCF_{b,ax} = 2,30$  für die Streben mit zunehmenden  $\tau$ - oder  $2\gamma$ -Werten. Auch laut FEA sind die SCF nahezu konstant. Ebenso zeigen die SCFs von DNVGL-RP-C203 [3] mit zunehmendem  $\tau$  und  $2\gamma$  einen nur leichten Anstieg. Wie bei den SCFs des Gurtes tritt der größte SCF dabei für große  $\tau$ - und  $2\gamma$ -Werte auf.

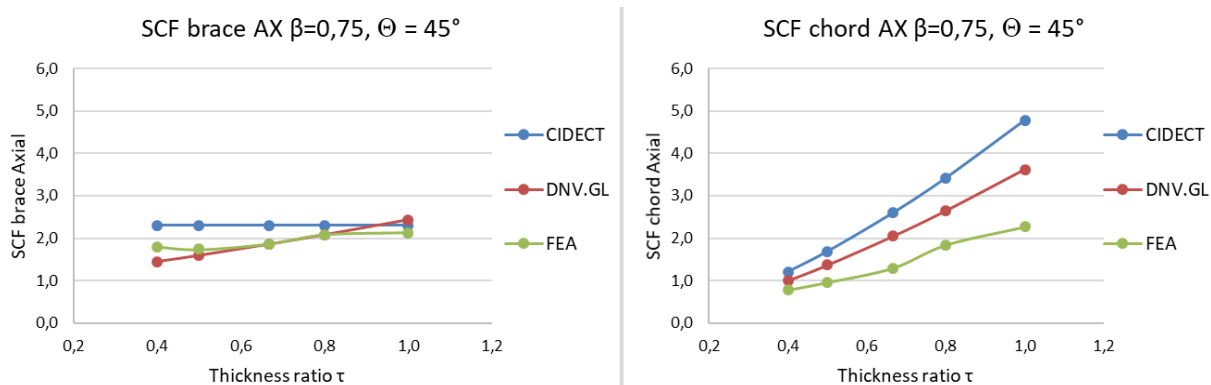


Abbildung 5-13: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Wanddickenverhältnis  $\tau$  an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-13: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying wall thickness ratio  $\tau$  at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)

Da in CIDECT DG 8 [39] keine Formeln oder Diagramme für Momentenbelastung der Streben bereitgestellt werden, erfolgt der Vergleich der numerischen Berechnungen nur mit den SCFs aus DNVGL-RP-C203 [3].

Bei mit Momenten in der Ebene (IPB) belasteten Streben liegt der entscheidende Hot Spot an der Kronenferse. Ähnlich wie unter AX nehmen die SCFs des Gurts mit zunehmendem  $\tau$  und  $2\gamma$  zu (Abbildung 5-14 (rechts) und Abbildung 5-15 (rechts)). Dies bedeutet, dass mit zunehmender Gurtwanddicke  $t_0$  die SCF-Werte abnehmen. Dies gilt auch für SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3]. Die SCFs in der Strebe in DNVGL-RP-C203 [3] nehmen ebenfalls zu, wobei für FEA der Wert konstant unter 2,0 liegt (Abbildung 5-14 (links) und Abbildung 5-15 (links)).

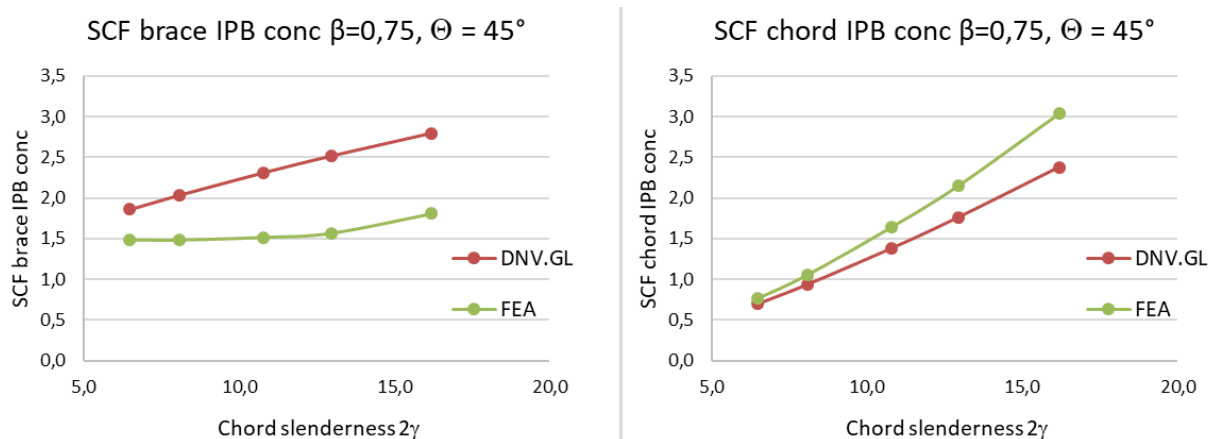


Abbildung 5-14: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierender Gurtschlankheit  $2\gamma$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-14: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying chord slenderness  $2\gamma$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

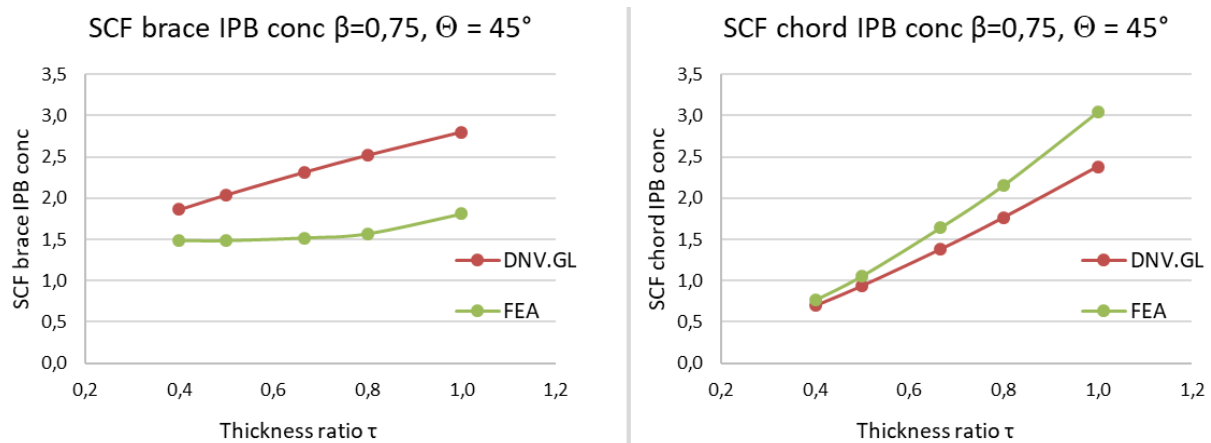


Abbildung 5-15: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Wanddickenverhältnis  $\tau$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-15: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying wall thickness ratio  $\tau$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

Interessanterweise sind die numerisch berechneten SCF höher als die nach DNVGLRP-C203 [3]. Der Unterschied zwischen den SCF-Werten von DNVGL-RP-C203 [3] und FEA kann durch die Bestimmung des SCF nach DNVGL-RP-C203 [3] erklärt werden: Für IPB basiert die SCF-Formel auf T-Knotenverbindungen, die von den Knotenparametern  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $2\gamma$  und  $\theta$  ab. K-Knoten mit einem kleinen Spalt verhalten sich jedoch nicht wie T-Knoten. In der vorliegenden Studie haben alle betrachteten Knoten einen kleinen Spalt, daher muss der Einfluss der zweiten Strebe auf das Ermüdungsverhalten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund weichen die Ergebnisse von DNVGL-RP-C203 [3] von denen nach der Finite-Elemente-Methode ab.

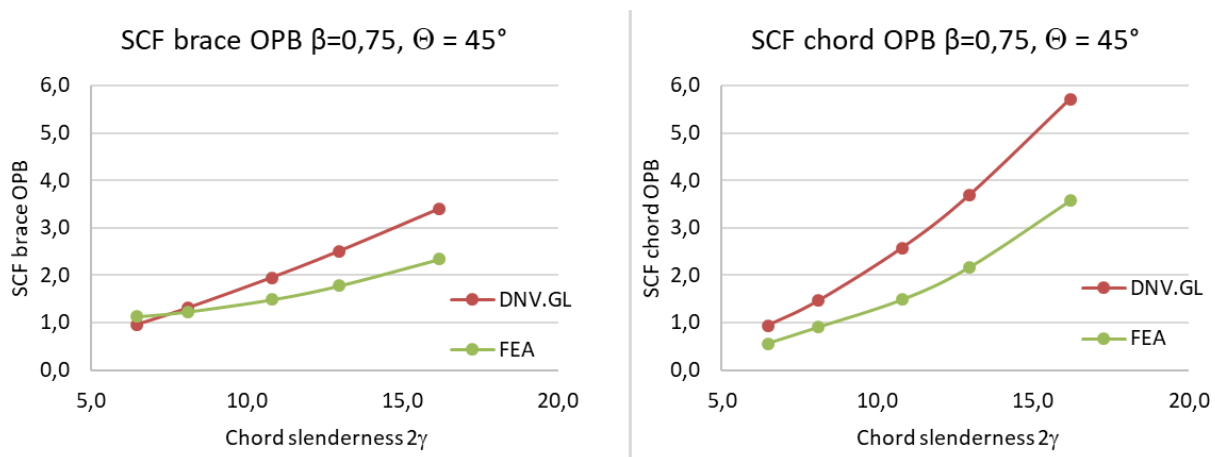


Abbildung 5-16: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierender Gurtschlankheit  $2\gamma$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-16: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying chord slenderness  $2\gamma$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

Für den Lastfall Biegung aus der Ebene (OPB) konzentriert sich die lokale maximale Spannung auf die Sattelpunkte der Strebe und des Gurts. Analog zum Lastfall AX erhöhen sich die SCFs am Gurt auch für OPB mit zunehmendem  $\tau$  und  $2\gamma$  (Abbildung 5-16 (rechts) und Abbildung 5-17 (rechts)). Dies gilt auch für die SCFs der

Streben, wobei diese kleiner sind als für den Gurt (Abbildung 5-16 (links) und Abbildung 5-17 (links)). Die SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] sind größer als die aus der FEA, wobei die Abweichung mit zunehmenden  $\tau$ - und  $2\gamma$ -Werten zunimmt, wie schon für den Lastfall AX gezeigt.

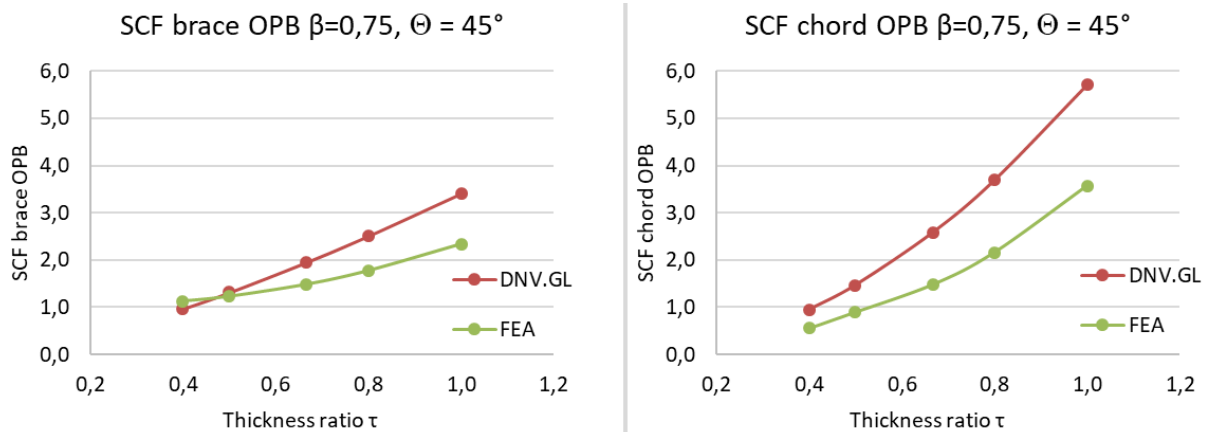


Abbildung 5-17: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Wanddickenverhältnis  $\tau$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-17: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying wall thickness ratio  $\tau$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

### 5.3.6 Einfluss des Breitenverhältnisses $\beta$ Influence of width ratio $\beta$

Der Einfluss des Durchmesserverhältnisses  $\beta$  auf die Ermüdungsfestigkeit wird durch die Variation des Durchmessers der Streben von  $d_i = 139,7$  mm bis  $d_i = 244,5$  mm untersucht, was  $\beta = 0,4$  bis  $0,75$  entspricht. Der Gurtdurchmesser bleibt mit  $d_o = 323,9$  mm unverändert wie beim "Basisknoten" in Abbildung 5-11. Die Abmessungen und Parameter der numerisch berechneten KHP K-Knoten sind Anhang C3 zu finden.

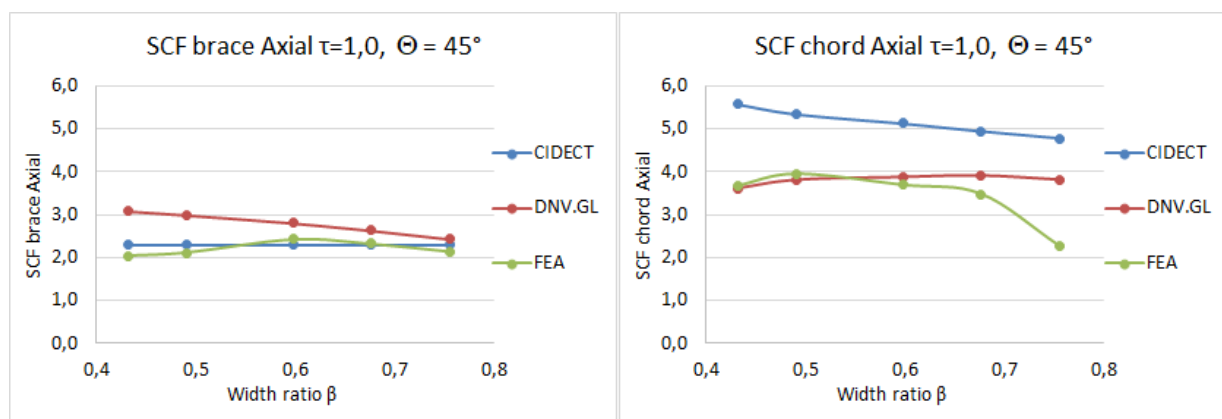


Abbildung 5-18: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Durchmesserverhältnis  $\beta$  an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-18: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying diameter ratio  $\beta$  at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)



In Abbildung 5-18 (links) ist zu sehen, dass sich die SCFs für den Lastfall AX nach CIDECT DG 8 [39], DNVGL-RP-C203 [3] und aus FEA ergeben. Die SCF-Kurve in der Zugstrebe ist nach CIDECT DG 8 [39] konstant, da hier ein Mindestwert von  $SCF_{b,ax} = 2,30$  definiert ist. Die Kurve für die numerisch berechneten SCFs liegt für unterhalb der Normkurven. Auch für den Gurt sind die SCFs nahezu konstant und nehmen bei größeren Werten von  $\beta$  (Abbildung 5-18 (rechts)) nur geringfügig ab, nach DNVGL-RP-C203 [3] leicht zu. Für den Gurt, der üblicherweise maßgeblich wird, sind die SCFs gemäß den Standards deutlich höher als die über FEA berechneten, und liegen damit auf der sicheren Seite.

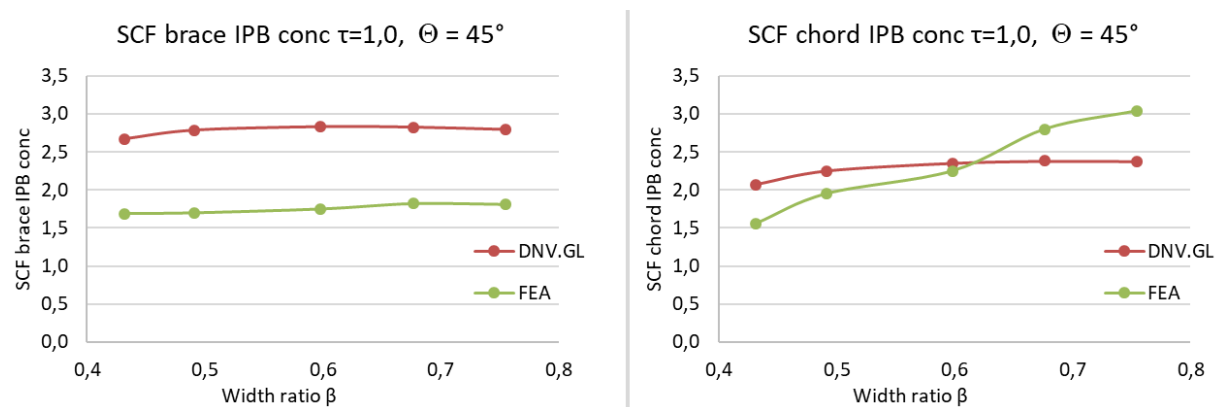


Abbildung 5-19: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Durchmesser Verhältnis  $\beta$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-19: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying diameter ratio  $\beta$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

Dies gilt auch für SCFs in der Strebe unter IBP (Abbildung 5-19 (links)), wonach die SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] deutlich auf der sicheren Seite liegen. Im Gurt weicht der Kurvenverlauf für numerisch bestimmte SCFs von der nach SCFs ab (Abbildung 5 19 (rechts)). Dies liegt an der Vernachlässigung des Einflusses der zweiten Strebe für K-Knoten im Vergleich zu T-Knoten, siehe Abschnitt 5.3.5. Demnach liegen die SCFs für K-Knoten mit großen Verhältniswerten  $\beta > 0,6$  nicht mehr auf der sicheren Seite im Vergleich zu den SCFs aus FEA:

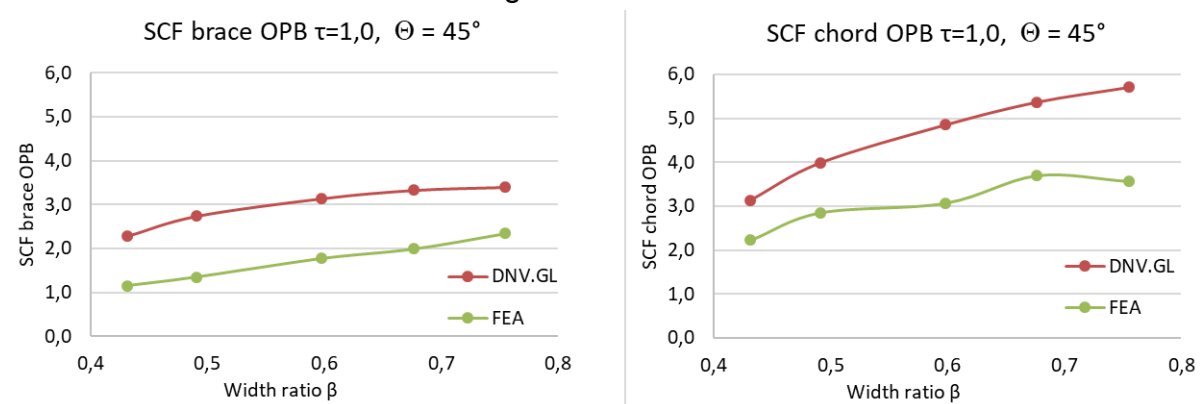


Abbildung 5-20: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Durchmesser Verhältnis  $\beta$  am Sattelpunkt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-20: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying diameter ratio  $\beta$  at the saddle for brace (left) and chord (right)

Die maßgebende Position für die SCFs für durch Biegung aus der Ebene (OPB) belastete Streben ist der Sattel. Im Vergleich zu den nahezu konstant verlaufenden SCF-Kurven für die Zugstrebe unter IPB, nehmen die SCF-Kurven für OPB leicht zu (Abbildung 5-20 (links)). Dieser leichte Anstieg ist auch bei SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] zu beobachten, deren Werte insgesamt aber höher sind. In ähnlicher Weise steigt die Kurve für numerisch berechnete SCFs mit zunehmendem Durchmesser Verhältnis  $\beta$  sowohl in der Strebe als auch im Gurt an.

### 5.3.7 Einfluss des Strebenneigungswinkels $\Theta$ Influence of brace angle $\theta$

Für alle drei Lastfälle werden drei unterschiedliche Strebenneigungswinkel  $\theta = 35^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $55^\circ$  zwischen Gurt und Strebe untersucht. Für die anderen Knotenabmessungen werden dieselben wie für den Basisknoten in Abbildung 5-11 (siehe auch Anhang C3).

Abbildung 5-21 zeigt die SCFs für den Lastfall AX. Die SCFs für die Streben steigen nach gemäß FEA und DNVGL-RP-C203 [3] mit zunehmendem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  leicht an und nehmen nach CIDECT DG 8 [39] leicht ab. Bei der Kurve nach CIDECT handelt es sich dabei um vorgegebene Mindestwerte, mit  $SCF_{b,ax} = 2,64, 2,30$  und  $2,0$  für  $\Theta = 30^\circ, 45^\circ$  und  $60^\circ$ . Insgesamt liegen die SCFs für die Streben auf ähnlichem Niveau. (Abbildung 5-21 (links)).

Die SCFs für den Gurt steigen stärker an, wobei die SCFs nach CIDECT DG 8 [39] deutlich höher sind als nach DNVGL-RP-C203 [3] und aus FEA (Abbildung 5-21 (rechts)). Die SCFs aus FEA zeigen ein Minimum für  $\theta = 45^\circ$ . Dies ist auf den Einfluss der Knotenexzentrizität zurückzuführen, die in diesem Fall bei  $\theta = 35^\circ$  und  $\theta = 55^\circ$  größer ist. Bei der Betrachtung des Einflusses des Strebenneigungswinkels  $\Theta$  muss daher auch die Exzentrizität des Knotens berücksichtigt werden.

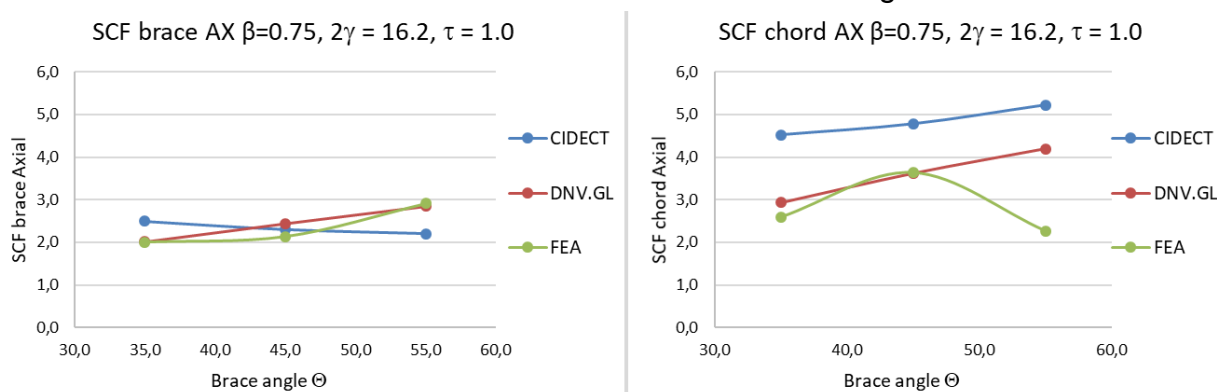


Abbildung 5-21: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter AX mit variierendem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  an der Krone im Spalt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-21: SCFs from FEA for CHS K-joint under AX with varying brace angle  $\Theta$  at the crown in the gap for brace (left) and chord (right)

In Abbildung 5-22 sind die SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] und aus FEA für den Lastfall Biegung in der Ebene (IPB) dargestellt. Sowohl für die Strebe als auch für den Gurt sind die SCFs für unterschiedliche Strebenneigungswinkel  $\Theta$  nahezu konstant. Während für die Strebe die SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] größer sind als aus FEA,

ergeben sich für den Gurt kleinere Werte nach DNVGL-RP-C203 [3]. Diese liegen damit nicht mehr auf der sicheren Seite.

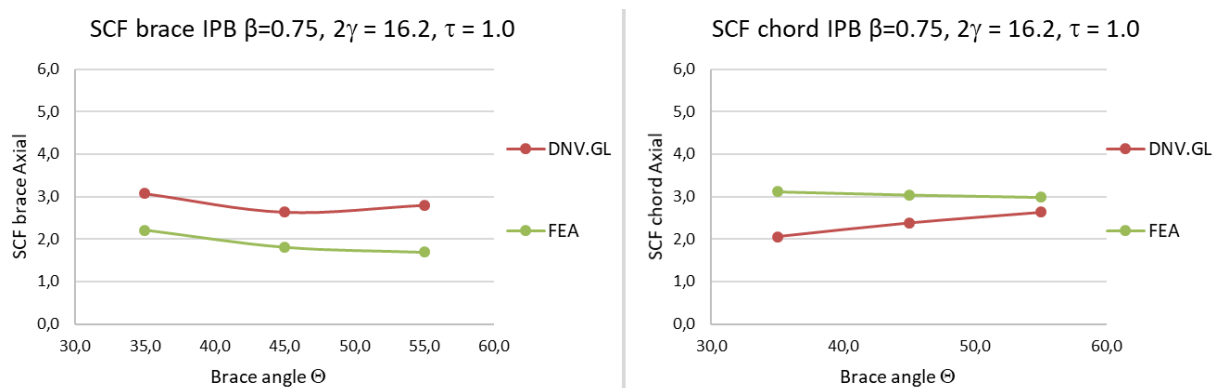


Abbildung 5-22: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter IPB mit variierendem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  an der Kronenferse für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-22: SCFs from FEA for CHS K-joint under IPB with varying brace angle  $\Theta$  at the crown heel for brace (left) and chord (right)

Für den Lastfall Biegung aus der Ebene (OPB) ist in Abbildung 5-23 sowohl für die Strebe als auch für den Gurt ein Anstieg der SCFs mit zunehmendem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  zu erkennen. Dies bedeutet, dass bei kleinerem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  die Ermüdungsfestigkeit zunimmt. Die SCFs nach DNVGL-RP-C203 [3] sind dabei größer als die aus den numerischen Untersuchungen und liegen auf der sicheren Seite.

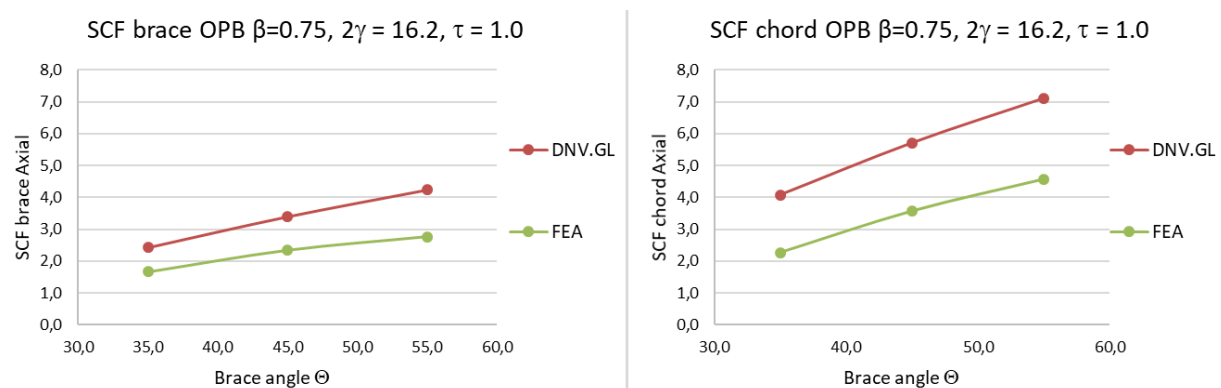


Abbildung 5-23: SCFs aus FEA für KHP K-Knoten unter OPB mit variierendem Strebenneigungswinkel  $\Theta$  am Sattelpunkt für Strebe (links) und Gurt (rechts)

Figure 5-23: SCFs from FEA for CHS K-joint under OPB with varying brace angle  $\Theta$  at the saddle for brace (left) and chord (right)

### 5.3.8 Zusammenfassung der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt Conclusions of parameter study on CHS K-joints with gap

Aus der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt geht hervor, dass sich nach CIDECT DG 8 [39] häufig sehr konservative SCFs ergeben. Da DNVGL-RP-C203 [3] einen größeren Anwendungsbereich und zusätzliche die Lastfälle IPB und OPB abdeckt, ist es grundsätzlich ratsam, diese Formeln zu verwenden. Eine Anpassung der Formel für die SCFs für den Gurt unter den Lastfall IPB wird in Kapitel 6.3

vorgenommen, diese Werte bisher nicht auf der sicheren Seite liegen. Die allgemeinen Empfehlungen für die Parameterauswahl in Tabelle 5-4 stimmen mit denen in CIDECT DG 8 [39] und DNVGL-RP-C203 [3] überein.

Für die konstruktive Auslegung von KHP K-Knoten mit Spalt unter Ermüdungsbeanspruchung wird empfohlen, die Wanddicke der Strebe  $t_i$  im Verhältnis zur Gurtwanddicke  $t_0$  dünner (kleiner  $\tau$ -Wert) zu wählen und das Gurtprofil dickwandig zu gestalten (kleiner  $2\gamma$ -Wert). Je kleiner die Parameter  $\tau$  und  $2\gamma$  sind, desto niedriger sind die SCFs und somit günstiger für die Ermüdungsbemessung für die drei Lastfälle AX, IPB und OPB. Bezüglich des Breitenverhältnisses  $\beta$  empfiehlt es sich, für den Lastfall AX große  $\beta$ -Werte und für die Lastfälle IPB und OPB kleine  $\beta$ -Werte zu wählen. Außerdem nehmen die SCF-Werte mit kleiner werdendem Strebenwinkel  $\theta$  ab, so dass ein kleiner Winkel zwischen Strebe und Sehne vorteilhafter ist, jedoch unter Berücksichtigung der Exzentrizität, die so klein wie möglich gewählt werden sollte.

Im Allgemeinen führt die FEA zu kleineren SCFs als den Richtlinien CIDECT DG 8 [39] und DNVGL-RP-C203 [3], was auf Imperfektionen der Versuchskörper und Sicherheitsreserven in den Normen zurückzuführen ist. Für den Lastfall IPB sind die FEA-Ergebnisse im Vergleich zu DNVGL-RP-C203 [3] inkonsistent. Der Grund wird im Ursprung der SCF-Formeln für T-Knoten gesehen. Dies muss erneut überprüft werden.

Die Empfehlungen zur Auswahl der Geometrieparameter sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Empfehlungen basierend auf der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt

Table 5-4 Recommendations based on parametric study on CHS K-joints

Belastung	$\tau$	$2\gamma$	$\beta$	$\theta$
AX	klein <sup>1)</sup>	klein <sup>2)</sup>	groß	-
IPB	klein <sup>1)</sup>	klein <sup>2)</sup>	klein	-
OPB	klein <sup>1)</sup>	klein <sup>2)</sup>	klein	klein

<sup>1)</sup> Strebenwanddicke  $t_i$  dünn und Gurtwanddicke  $t_0$  dick

<sup>2)</sup> Strebenwanddicke  $t_i$  dünn

## 6 Auswertung und Bemessungsempfehlung Evaluation and design recommendations

### *Kurzfassung*

*Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erfolgt nach EN 1993-1-9 (2010) durch die Erstellung von Wöhlerkurven. Zudem werden anhand der Dehnungsmessungen während der Ermüdungsversuche Spannungskonzentrationsfaktoren ermittelt. Diese dienen dann zusammen mit den Ergebnissen numerischer Parameterstudien zur Validierung bzw. Anpassung vorhandener SCF-Formeln. Sowohl für die Bemessungsempfehlungen nach der Nennspannungsmethode als auch nach Strukturspannungsmethode werden aktuelle, verfügbare und gut dokumentierte Forschungsergebnisse miteinbezogen.*

### *Abstract*

*The evaluation of the fatigue test results is done according to EN 1993-1-9 (2010) and S-N-curves for nominal stress approach are provided. Beneath that, also SCFs are calculated based on the strain gauge measurements within the tests. Together with the results of the numerical investigations revised SCF formulae are developed. For the design recommendations by nominal stress approach as well as for the structural stress approach recent research is considered.*

### 6.1 Einleitung Introduction

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche nach dem Nennspannungskonzept in Kapitel 3 werden zusammen mit vorhandenen, gut dokumentierten Ergebnissen aus der Literatur in Ermüdungsfestigkeitskurven für KHP- und RHP K-Knoten mit Spalt neu bewertet. Diese beinhalten dann dickwandige Profile und hochfeste Stähle.

Zusammen mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen und der parametrischen Untersuchung in Kapitel 4 und 5 wird der Parameterbereich für den Strukturspannungsansatz erweitert und neben dem vorhandenen Lastfall „Axiallast auf den Streben“ (AX) auch „Biegung in der Ebene“ (IPB), sowie für KHP K-Knoten zusätzlich „Biegung aus der Ebene“ (OPB) berücksichtigt.

Die Ergebnisse können in die Neuauflage des CIDECT DG 8 [39] sowie in die nächste Ausgabe von EN 1993-1-9 [6] und ISO 14347 [13] aufgenommen werden.

## 6.2 Nennspannungsmethode Nominal stress approach

### 6.2.1 Allgemeines General

Bei der Nennspannungsmethode, die auch als Klassifizierungsmethode bezeichnet wird, wird die Ermüdungsbemessung auf der Grundlage von Nennspannungsschwingbreiten durchgeführt. Es ist die gebräuchlichste und einfachste Ermüdungsbemessungsmethode für Stahlbaukonstruktionen, die in Normen verwendet wird. Hierfür werden unterschiedliche Kerbdetails in Kerbklassen eingeteilt. Die Definition der Kerbkategorie basiert auf der Auswertung von Versuchsergebnissen. Die Kerbkategorie selbst definiert die Nennspannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln in der S-N-Kurve. Jeder Kerbkategorie ist also eine Ermüdungsfestigkeitskurve zugeordnet.

Die experimentellen Versuchsergebnisse aus Kapitel 3 werden hierfür statistisch ausgewertet und in einer entsprechenden Kerbkategorie zugeordnet. Gut dokumentierte Daten aus der Literatur werden dabei hinzugezogen, um die Datenbasis zu erweitern und zu fundierten Aussagen zu gelangen.

### 6.2.2 Klassifizierung Classification

CIDECT DG 8 [39] sowie EN 1993-1-9 [6] geben Kerbkategorieklassen für Hohlprofilanschlüsse (Abbildung 6-1) vor. Da die Kerbkategorieklassen für EN 1993-1-9 [6] aus dem CIDECT DG 8 [39] übernommen wurden, ist der Inhalt derselbe. Die Einteilung richtet sich in CIDECT DG 8 [39] nach dem Wanddickenverhältnis  $\tau$ , das in EN 1993-1-9 [6] durch den Kehrwert  $1 / \tau = t_0 / t_i$  gegeben ist. Bei größeren Werten von  $1 / \tau$  erhöht sich die Ermüdungsfestigkeit. Zwischen den absoluten Grenzen von  $1.0 \leq 1 / \tau \leq 2.0$  können die Werte für die Detailklasse interpoliert werden. Bei RHP K-Knoten liegt die Kerbkategorie zwischen 36 und 71 und es müssen spezielle Anforderungen an die Spaltgröße erfüllt werden (Abbildung 6-1). Bei KHP K-Knoten liegen die Kerbkategorie mit 45 bis 90 etwas höher.

Entgegen der üblicherweise für die Ermüdungsfestigkeitskurven vorgegebene feste inverse Neigung  $m = 3$ , gilt für Hohlprofilknoten im Allgemeinen  $m = 5$ .

Details belastet durch Längsspannungen			
Kerbgruppe m = 5	Konstruktionsdetail		Beschreibung
90	$t_0/t_1 = 2,0$		Anschlüsse mit Spalt Rundhohlprofile, K- und N-Anschlüsse
45	$t_0/t_1 = 1,0$		
71	$t_0/t_1 \geq 2,0$		Anschlüsse mit Spalt Rechteckhohlprofile, K- und N-Anschlüsse  Anforderungen: • $0,5 (b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_0 - b_i)$ • $g \geq 2 t_0$
36	$t_0/t_1 = 1,0$		
<b>Allgemeine Anforderungen:</b>  $4 \leq t_0 \leq 8 \text{ mm}^*$ $4 \leq t_1 \leq 8 \text{ mm}^*$ $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ $0,4 \leq b_1/b_0 \leq 1,0$ $-0,5 h_0 \leq e \leq 0,25 h_0$ $(b_0/t_0) \cdot (t_0/t_1) \leq 25^*$ $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ $0,25 \leq d_1/d_0 \leq 1,0$ $-0,5 d_0 \leq e \leq 0,25 d_0$ $(d_0/t_0) \cdot (t_0/t_1) \leq 25^*$  Ausmittigkeit rechtwinklig zur Ebene: $\leq 0,02 b_0$ oder $\leq 0,02 d_0$ Bei Füllstäben mit Wanddicken $\leq 8 \text{ mm}$ sind Kehlnähte erlaubt			

- Für Zwischenwerte  $t_0/t_1$  ist eine lineare Interpolation zwischen den benachbarten Kerbfällen erlaubt.
- Für Streben und Gurte sind verschiedene Ermüdungsnachweise erforderlich.

Abbildung 6-1: Kerbklassen für K-Knoten mit Spalt in CIDECT [39]

Figure 6-1: Detail categories for K-joints with gap in CIDECT [39]

### 6.2.3 Literaturdaten für RHP K-Knoten Data from literature for RHS K-joints

Gut dokumentierte Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an RHP K-Knoten mit Spalt sind in den Schlussberichten zu dem CIDECT-Projekten 7A [24], 7E/F [37] und 7L [20] zu finden. Ein Überblick über die hier verwendeten Versuchsserien und den Knotenabmessungen ist in Tabelle 6-1 zu finden.

Die größte Profilabmessung beträgt in Serie RK25 200 x 200 x 8 mm für den Gurt und 120 x 120 x 4 mm für die Strebe. Die höchste Streckgrenze beträgt 600 N/mm<sup>2</sup> für den FeE600 im CIDECT-Projekt 7L [19].

Da die Einteilung der Detailkategorien vom inversen Wanddickenverhältnis  $1/\tau$  abhängt, ist in der letzten Spalte der Tabelle 6-1 auch das Wanddickenverhältnis  $\tau$  angegeben.

Tabelle 6-1: Versuchsdaten von Ermüdungsversuchen an RHP K-Knoten mit Spalt aus der Literatur

Table 6-1 Fatigue test data for RHS K-joints with gap from literature

Series Original	Literature	No. of tests	Dimension [mm]		Gap [mm]	Steel	$\tau$
			Chord	Brace			
RK3	CIDECT 7A (1981)	7	100x100x4	60x60x4	25,2	St52	1,00
RK5	CIDECT 7A (1981)	5	100x100x8	60x60x2.9	25,2	St37	0,36
RK6	CIDECT 7A (1981)	5	100x100x6.3	60x60x2.9	25,2	St37	0,46
RK8	CIDECT 7A (1981)	3	100x100x4	60x60x4	25,2	St37	1,00
RK16	CIDECT 7A (1981)	6	100x100x4	60x60x4	25,2	St37	1,00
RK23	CIDECT 7A (1981)	5	100x100x3.6	80x80x3.2	20,0	St37	0,89
RK24	CIDECT 7A (1981)	5	150x150x8	90x90x4	36,0	St37/42	0,50
RK25	CIDECT 7A (1981)	5	200x200x8	120x120x4	39,6	ST37/42	0,50
RK26	CIDECT 7A (1981)	2	100x100x4	60x60x4	35,4	Fe430	1,00
K20S32	CIDECT 7E/F (1989)	4	100x100x8	40x40x4	25,4	St37	0,50
K20S33	CIDECT 7E/F (1989)	6	100x100x8	40x40x2.9	25,4	St37	0,36
K20S34	CIDECT 7E/F (1989)	6	100x100x4	40x40x4	43,4	St37	1,00
K20S35	CIDECT 7E/F (1989)	4	100x100x8	60x60x4	15,1	St37	0,50
K20S36	CIDECT 7E/F (1989)	4	100x100x4	80x80x4	25,4	St37	1,00
K2WH2	CIDECT 7L (1996)	7	100x80x8	50x50x4	25,4	FeE600	0,50

#### 6.2.4 Auswertung der Ermüdungsversuche an RHP K-Knoten Evaluation of fatigue tests on RHS K-joints

In Abbildung 6-2 sind die Versuchsergebnisse für RHP K-Knoten mit Spalt und umgekehrtem Wanddickenverhältnis  $1/\tau = t_0/t_1 = 1,0$  aufgetragen. Zum Vergleich ist die S-N-Kurve für die Kerbfallklasse 36 in Rot angegeben, die die gültige Kerbfallklasse nach Norm darstellt. Die ausgefüllten Symbole stehen für die neu gewonnenen Versuchsdaten aus Kapitel 3.6. Darin stehen die blauen Symbole für die Ergebnisse der am KIT getesteten großen K-Knoten mit 20 mm Wandstärke.

Die Versuchsdaten aus der Literatur weisen eine breite Streuung um die S-N-Kurve für die Kerbfallklasse 36 auf. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Auswertung der Ergebnisse nicht einheitlich erfolgt. So werden z.B. bei den Ergebnissen aus dem Wöhlerlinienkatalog [17] nur Nennspannungen ausgewertet, ohne einen Hinweis auf die Berücksichtigung von sekundären Biegemomenten oder Momenten aus Knotenexzentrizitäten. Dies gilt nicht für die neuen Versuchsergebnisse innerhalb dieser Arbeit, die unter Berücksichtigung der sekundären Biegemomente gemäß Tabelle 3-3 ausgewertet werden.

Die neu gewonnenen Ergebnisse an kleinen RHP K-Knoten mit 4 mm Wanddicke in schwarz befinden sich zumeist knapp oberhalb der Normkurve in Rot. Da diese Knoten mit Anfangs- und Endpunkten der Schweißnaht in der Ecke des Strebenprofils hergestellt wurden, was sich generell ungünstig auf den Ermüdungswiderstand auswirkt, stellen sie eine Untergrenze für die Ermüdungsfestigkeit dar. Nichtsdestotrotz wird die Detailklasse 36 erfüllt, mit Ausnahme eines Probekörpers,



bei dem die Risse an beiden Seiten gleichzeitig an den Ecken auftraten (siehe Anhang B3).

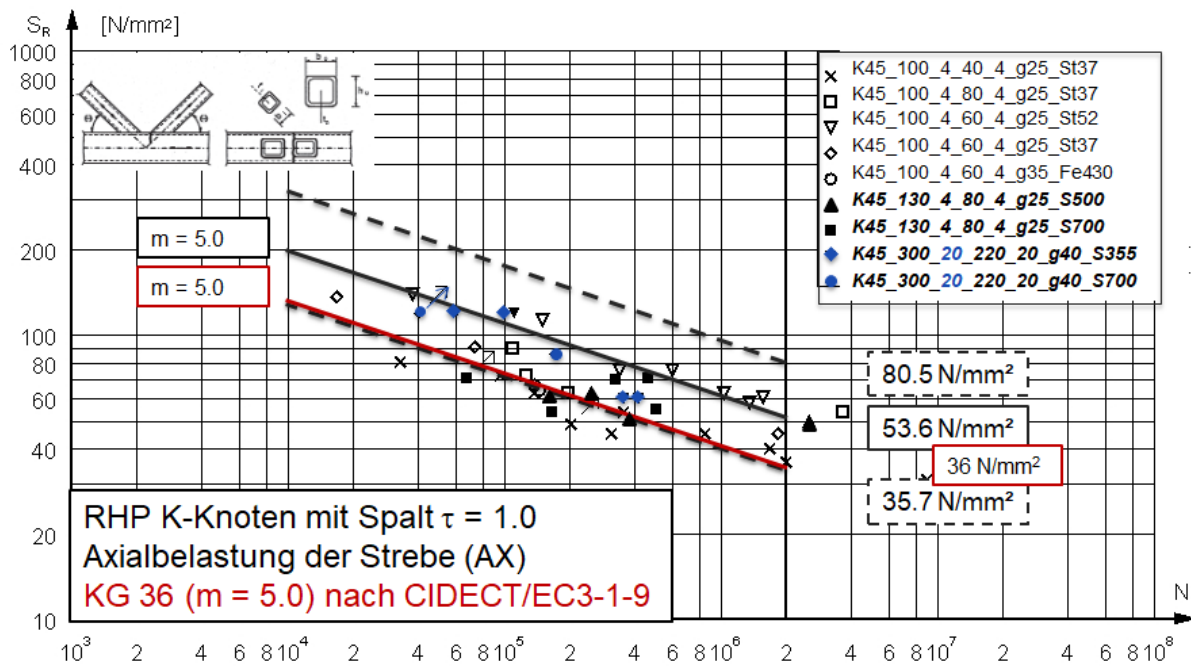


Abbildung 6-2: S-N-Kurve für RHP K-Knoten mit Spalt und  $t_o/t_i = 1,0$

Figure 6-2: S-N-curve for RHS K-joints with gap and  $t_o/t_i = 1.0$

Die statistische Auswertung aller Versuchsergebnisse mit vorgegebener Neigung  $m = 5.0$  wird durch die gestrichelten Linien in Abbildung 6-2 dargestellt, wobei die untere Linie eine Ermüdungsfestigkeit von  $35,7 \text{ N/mm}^2$  bei 95% Überlebenswahrscheinlichkeit darstellt. Diese gibt die bereits gültige Kerbfallklasse von 36 sehr gut wieder und beinhaltet dabei Knoten mit 20 mm Wanddicke sowie aus S700 und S500.

Die Versuchsergebnisse der großen RHP K-Knoten mit einer Wandstärke von 20 mm erfüllen die Kerbfallklasse 36 mit ausreichendem Sicherheitsabstand, wie die blauen Punkte in Abbildung 6-2 zeigen.

In Abbildung 6-3 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an RHP K-Knoten mit Spalt und umgekehrtem Wanddickenverhältnis von  $t_o/t_i > 1,0$  dargestellt. Die Datenpunkte aus der Literatur mit  $t_o/t_i \geq 2,0$  erfüllen alle die Kerbfallklasse 71, obwohl sie ebenfalls eine breite Streuung aufweisen. Die ausgefüllten Symbole für die neuen Testergebnisse der hier gezeigten Untersuchungen liegen geringfügig unter der Normkurve für die Kerbfallklasse 71, die für  $t_o / t_i = 2,0$  gilt. Die Testreihe K45-100x6-80x4-g25 hat ein Verhältnis von  $t_o/t_i = 1,5$ . Kerbfallklassen für Werte von  $t_o/t_i$  zwischen 1,0 und 2,0 können interpoliert werden, so dass hier die Kerbfallklasse 54 gültig ist. Diese ist durch die grüne Linie in Abbildung 6-3 dargestellt. Für eine statistische Auswertung liegen nicht genug Versuchsdaten vor, da neben den hier gezeigten Versuchen keine Daten mit demselben Verhältnis  $t_o/t_i = 1,5$  gefunden werden konnten. Die neuen Versuchsergebnisse in den schwarz ausgefüllten Symbolen

erfüllen alle die Kerbfallklasse 71 unter Berücksichtigung des Vergrößerungsfaktors MF, wobei Punkte mit Pfeilen für Durchläufer stehen und nicht für die Auswertung berücksichtigt werden. Ohne MF erfüllen die Versuchspunkte die Kerbklasse 54.

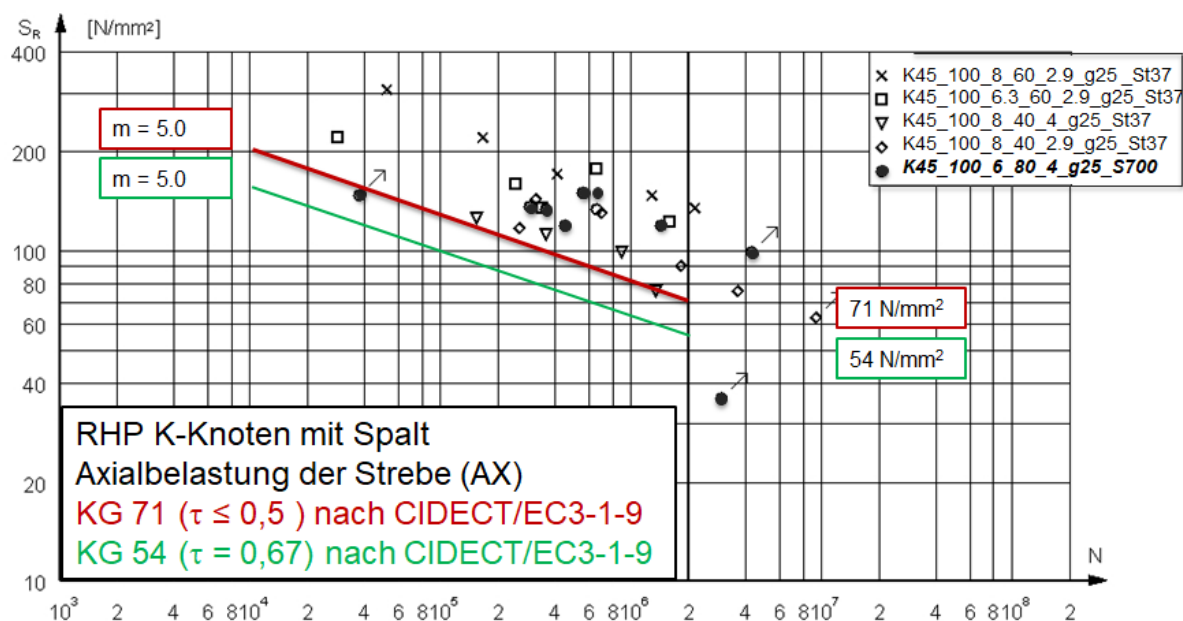


Abbildung 6-3: S-N-Kurve für RHP K-Knoten mit Spalt und  $t_o/t_i > 1,0$

Figure 6-3: S-N-curve for RHS K-joints with gap and  $t_o/t_i > 1.0$

## 6.2.5 Literaturdaten für KHP K-Knoten Data from literature for CHS K-joints

Für KHP K-Knoten mit Spalt wurden wesentlich mehr Untersuchungen durchgeführt als für RHP K-Knoten. Erste gut dokumentierte Ermüdungstestdaten für KHP K-Knoten mit Spalt stammen aus der Doktorarbeit von Rainer Zirn [38].

Tabelle 6-2: Versuchsdaten von Ermüdungsversuchen an KHP K-Knoten mit Spalt aus der Literatur

Table 6-2 Fatigue test data for CHS K-joints with gap from literature

Series Original	Literatur	Anzahl Versuche	Dimension [mm]		Spalt [mm]	Stahl	$\tau$
			Gurt	Strebe			
S1	Schumacher [29]	4	273 x 20	139,7 x 12,5	40	S355J2H	0,63
S2	Schumacher [29]	4	273 x 20	139,7 x 12,5	40	S355J2H	0,63
S3	Schumacher [29]	4	168,3 x 12,5	88,9 x 8	40	S355J2H	0,63
P815	Kuhlmann et al. [15]	8	177,8 x 20	88,9 x 12,5	52	S355J2H	0,63
K10S1	Zirn [38]	5	177,8 x 8	88,9 x 4,5	52	St37	0,56
K10S4	Zirn [38]	3	177,8 x 5	88,9 x 4,5	52	St37	0,9
K10S7	Zirn [38]	4	177,8 x 8	88,9 x 4,5	52	St37	0,56
K10S9	Zirn [38]	4	177,8 x 8	88,9 x 4,5	52	St37	0,56
K10S23	Zirn [38]	4	177,8 x 5	88,9 x 4,5	16	St37	0,9

Einen guten Überblick über Ermüdungsversuche an Hohlprofilverbindungen gibt der Wöhlerlinienkatalog für Hohlprofilverbindungen [17], in dem 1987 alle verfügbaren Ermüdungsversuchsdaten für Hohlprofilverbindungen zusammengefasst wurden.

Neuere Untersuchungen an KHP K-Knoten wurden 2003 von Schumacher [29] und 2014 von Kuhlmann et al. [15] durchgeführt. In Tabelle 6-2 sind die am besten zum Vergleich geeigneten Versuchsreihen aufgeführt.

Auch für KHP K-Knoten hängt die Einteilung in die Kerbfallklasse vom umgekehrten Wanddickenverhältnis  $1/\tau$  ab, sodass in der letzten Spalte von Tabelle 6-2 das Wanddickenverhältnis  $\tau$  angegeben ist.

### 6.2.6 Auswertung der Ermüdungsversuche an KHP K-Knoten Evaluation of fatigue tests on CHS K-joints

In Abbildung 6-4 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an KHP K-Knoten mit Spalt und umgekehrtem Wanddickenverhältnis  $t_o/t_i = 1,6$  dargestellt. Die maßgebende Kerbfallklasse 71 ist in der S-N-Kurve in Rot gegeben, die durch Interpolation zwischen Kerbgruppe 45 (KG) für  $t_o/t_i = 1,0$  und KG 90 für  $t_o/t_i = 2,0$  bestimmt wird, siehe Abbildung 6-1. Die ausgefüllten Symbole zeigen die neuen Ermüdungsergebnisse aus Kapitel 3.6.

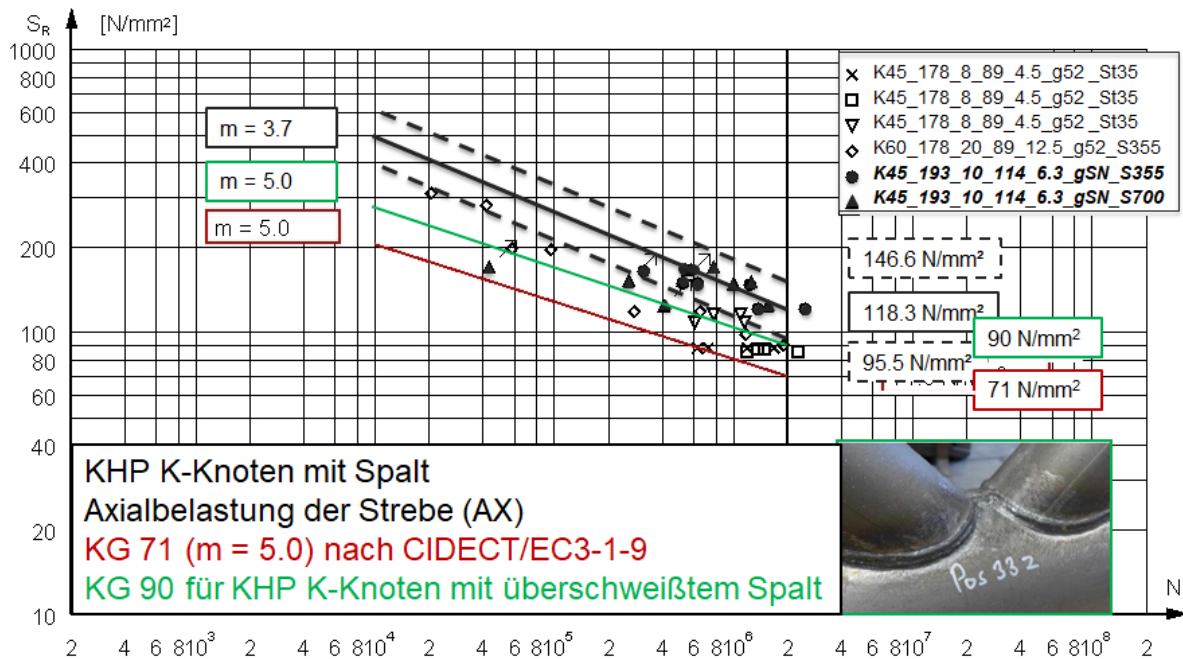


Abbildung 6-4: S-N-Kurve für KHP K-Knoten mit Spalt und  $t_o/t_i = 1,6$

Figure 6-4: S-N-curve for CHS K-joints with gap and  $t_o/t_i = 1.6$

Die Symbole mit Pfeilen stehen für Probekörper mit nicht voll durchgeschweißter Naht in der Serie K45-193.7x10-114.3x6.3-g25-S700 dar und werden für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt, siehe Abschnitt 3.6.5. Die anderen neuen Versuchsergebnisse liegen weit oberhalb der roten Normkurve für KG 71, was auf den günstigen Einfluss des überschweißten Spalts auf die Ermüdungsfestigkeit zurückzuführen ist. Daher wird die statistische Auswertung ohne bereits vorhandene Versuchsdaten, sondern nur für die neun neuen Probekörper mit überschweißtem Spalt durchgeführt. Bei freier Neigung von  $m = 3,7$  ergibt sich dann eine Ermüdungsfestigkeit von  $95,5 \text{ N/mm}^2$  bei 2 Millionen Lastspielen mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit. Eine Auswertung mit fester Neigung  $m = 5,0$  ergibt eine Ermüdungsfestigkeit von  $106,3 \text{ N/mm}^2$  bei 2 Millionen Lastspielen mit 95 %

Überlebenswahrscheinlichkeit. Da hier im Bereich der Wöhlerkurve unterhalb  $2 \cdot 10^5$  Lastspielen keine Versuchsergebnisse vorliegen, kann hier keine Aussage über die richtige Wahl der Kurvenneigung getroffen werden. Da die erhöhte Steifigkeit im Spalt das Tragverhalten des Knotens verändert, kommt hier möglicherweise eine andere Neigung als für Hohlprofilknoten üblich in Frage. An dieser Stelle wird auf eine neues Forschungsvorhaben verwiesen, das im Kapitel 8 beschrieben wird.

In jedem Fall aber können die KHP K-Knoten mit überschweißten Spalt in die Kerbklasse 90 eingestuft werden, wie die grüne Linie in Abbildung 6-4 zeigt.

Die Ergebnisse für große KHP K-Knoten mit einer Wandstärke von 20 mm sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Das Wandstärkenverhältnis von  $t_0/t_i = 1,0$  wirkt sich eher ungünstig auf den Ermüdungswiderstand aus und es gilt die Kerbklasse 45. Die ausgefüllten Symbole in Abbildung 6-5 zeigen eine gewisse Streuung, die hauptsächlich auf die unterschiedliche Schweißnahtausführung und den teilweise exzentrischen Anschluss der Streben zurückzuführen ist, vgl. Abschnitt 3.6.6. Demnach ergibt auch die statistische Auswertung aller Versuchsdaten, dargestellt durch die gestrichelten Linien, eine etwas geringere Ermüdungsfestigkeit von 43,2 N/mm<sup>2</sup> bei 95% Überlebenswahrscheinlichkeit. Unter der Voraussetzung, dass die neuen Probekörper einer Bewertung nach DIN EN 1090-2 [4] nicht standgehalten hätten, die Kerbklasse 45 aber durch die neuen Versuchspunkte gerade noch so erfüllt wird, kann diese auch für Wanddicken  $t = 20$  mm und hochfesten Stahl S700 angesetzt werden.

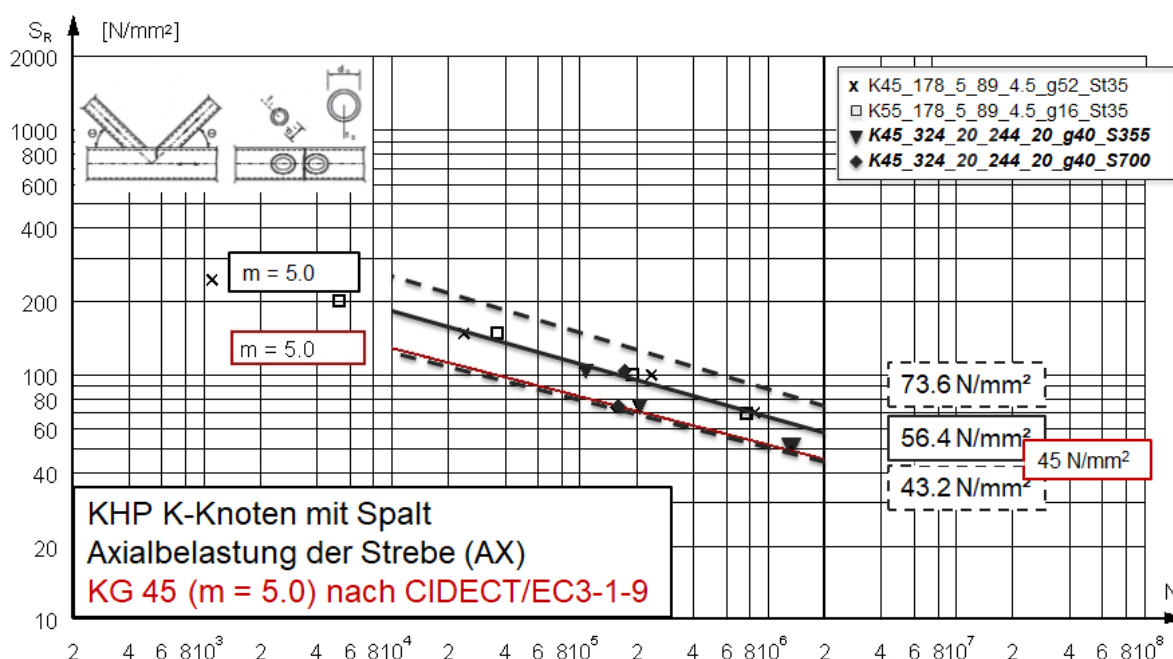


Abbildung 6-5: S-N-Kurve für KHP K-Knoten mit Spalt und  $t_0/t_i = 1,0$

Figure 6-5: S-N-curve for CHS K-joints with gap and  $t_0/t_i = 1.0$

### 6.2.7 Schlussfolgerungen für die Bewertung nach Nennspannungsmethode Conclusions for nominal stress evaluation

Die Ermüdungsfestigkeit von K-Knoten hängt stark von der Wanddicke der Bauteile und deren Verhältniswert  $\tau$  ab. Die Klassifizierung für den Nennspannungsansatz erfolgt daher zu Recht anhand des inversen Wanddickenverhältnis  $1/\tau = t_0 / t_i$ .

Da die untersuchten kleinen RHP K-Knoten mit Schweißanfangs- und Schweißendpunkten in den Ecken der Strebenprofile hergestellt wurden, stellen die Versuchsergebnisse dieser Probekörper eine Untergrenze für die Ermüdungsfestigkeit dar.

Insbesondere die Versuche an kleinen KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit neben den Knotenabmessungen und den geometrischen Parametern auch von der Schweißnahtausführung und -geometrie abhängt. Dies wird in den Bemessungsregeln nicht berücksichtigt, kann jedoch für die Konstruktion von ermüdungsgerechten Strukturen ausgenutzt werden. So kann bei den KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt die Ermüdungsfestigkeit um zwei Klassen von KG 71 auf KG 90 erhöht werden.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an großen RHP und KHP K-Knoten aus S355 und S700 mit 20 mm Wandstärke passen gut in die vorhandenen Kerbklassen und können ohne Wandstärkenreduzierung nach CIDECT [39] oder EN 1993-1-9 [6] eingestuft werden.

Während es für die Strukturspannungsmethode in CIDECT [39] die Ermittlung der Nennspannung erläutert wird (Kapitel 6.3), gibt es für den Nennspannungsnachweis Unsicherheiten. Es ist offensichtlich nicht ausreichend, die Nennspannung nur aus der während des Ermüdungsversuchs aufgebrachten Last zu bestimmen. Vielmehr muss hier eine Spannungserhöhung erfolgen, um die sekundären Biegemomente zu berücksichtigen, was mittels Vergrößerungsfaktoren MF gemäß Tabelle 3-3 erfolgen kann.

Die gezeigten Versuchsergebnisse für Hohlprofil-K-Knoten aus den Stahlsorten S355, S500 und S700 stimmen gut mit den Kerbfallklassen des Eurocode 3-1-9 [6] bzw. CIDECT [39] überein.

## 6.3 Strukturspannungsmethode Structural stress approach

### 6.3.1 Allgemeines General

Die Nennspannungsmethode wird häufig der komplexen Spannungsverteilung innerhalb eines Hohlprofilknotens nicht gerecht. Zudem werden von den aktuellen Kerbfallkatalogen lange nicht alle erforderlichen Details angeboten und abgedeckt. Daher bevorzugen CIDECT [39] und das IIW [12] genauso wie die Offshore-Industrie die Strukturspannungsmethode zur Ermüdungsbemessung von Hohlprofilknoten.

Die Strukturspannungsmethode berücksichtigt die ungleichmäßige Spannungsverteilung in Hohlprofilverbindungen. Die strukturelle Beanspruchung an der entscheidenden Stelle, dem sogenannten Hot Spot, beinhaltet Einflüsse aus der

Knotengeometrie und -steifigkeit, sowie aus dem Lastfall. Der Einfluss der lokalen Schweißgeometrie wird auch hier nicht berücksichtigt.

Der Spannungskonzentrationsfaktor (SCF) ist definiert als die Strukturspannung  $\sigma_{hs}$  geteilt durch die Nennspannung  $\sigma_{nom}$  in Gl. (4).

$$SCF = \sigma_{hs} / \sigma_{nom} \quad (4)$$

Die Hot-Spot-Spannung kann durch DMS-Messungen in Versuchen oder aus FE-Berechnungen über lineare (KHP) oder quadratische (RHP) Extrapolation bestimmt werden, wie in Kapitel 3.7 und 5 beschrieben.

Zudem liefern z.B. CIDECT [39], ISO 14347 [13] oder DNV GL [3] Formeln oder Diagramme zur Bestimmung von SCFs, mit denen dann die Strukturspannung aus der Nennspannung berechnet werden kann.

### 6.3.2 Parametrische SCF-Formeln für RHP K-Knoten mit Spalt Parametric SCF formulae for RHS K-joints with gap

Zur Überprüfung und möglichen Verbesserung der CIDECT-Formeln werden alle verfügbaren FE-Ergebnisse aus dieser Studie und aus dem CIDECT-Projekt 7A (Grundlage der CIDECT-Formeln von van Wingerde et al. [34]) gemeinsam ausgewertet. Die verwendeten Eingabedaten von van Wingerde sind in Anhang D aufgeführt. Dabei wird eine nichtlineare Regressionsanalyse durchgeführt, bei der die Versuchsdaten durch eine Funktion abgebildet werden, die eine nichtlineare Kombination der Modellparameter (SCFs aus FEA) und unabhängiger Variablen (geometrische Parameter) ist. Die Formeln werden dabei mit schrittweiser Näherung angepasst.

Dafür kommt das Open-Source-Statistik-Softwarepaket R zusammen mit der RStudio-Schnittstelle zum Einsatz. In diesem Paket werden die Parameter mithilfe eines nichtlinearen Ansatzes der kleinsten Quadrate (Funktion NLS in R) abgeschätzt, bei dem die nichtlineare Funktion im Wesentlichen durch eine lineare approximiert wird, und die besten Parameterwerte iterativ bestimmt werden.

#### 6.3.2.1 RHP K-Knoten – im Gleichgewicht stehende Normalkräfte in den Streben RHS K-joints – balanced axial load in the braces

Basierend auf den ursprünglichen CIDECT-Formeln wird eine Neubewertung mit R und RStudio durchgeführt. Die Eingabedaten sind die ursprünglichen, für die Formelgenerierung verwendeten FE-Ergebnisse von van Wingerde et al. [34], sowie die neuen Ergebnisse dieser Untersuchungen. Für diesen Datensatz wird die modifizierte Formel (Gl. 5) mit einem Bestimmungskoeffizienten  $R^2 = 0,977$  abgeleitet.

$$SCF_{ch,ax} = \left( 0,84 * \beta - 0,84 * \beta^2 + \frac{0,044}{\beta} + \frac{0,09}{g'} \right) * 2\gamma^{1,61} * (-0,66 * \tau^2 + \tau^{1,44}) * g'^{0,21} * \sin(\theta)^{1,8} \quad (5)$$

Die grafische Auswertung dieser Formel ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Die Korrelation für diese Funktion wird durch  $R^2 = 0,977$  bestimmt. Die Mehrheit der

berechneten SCFs liegt im Bereich von  $\pm 15\%$  im Vergleich zu den FE-Ergebnissen. Nur zwei Datenpunkte zeigen eine höhere Abweichung auf der unsicheren Seite. Beide stehen für RHP K-Knoten mit einem sehr kleinem Dickenverhältnis von  $\tau = 0,32$  bei einem sehr kleinen Winkel zwischen Gurt und Strebe von  $30^\circ$ .

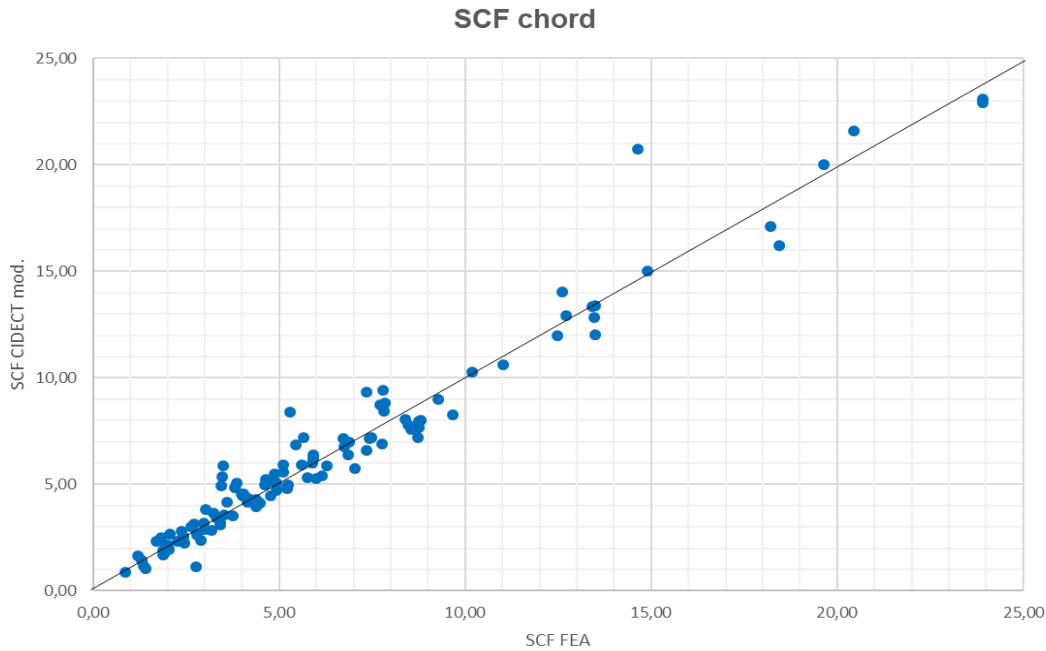


Abbildung 6-6: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für AX

Figure 6-6: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs from FEA with SCFs of modified formula) for the chord for AX

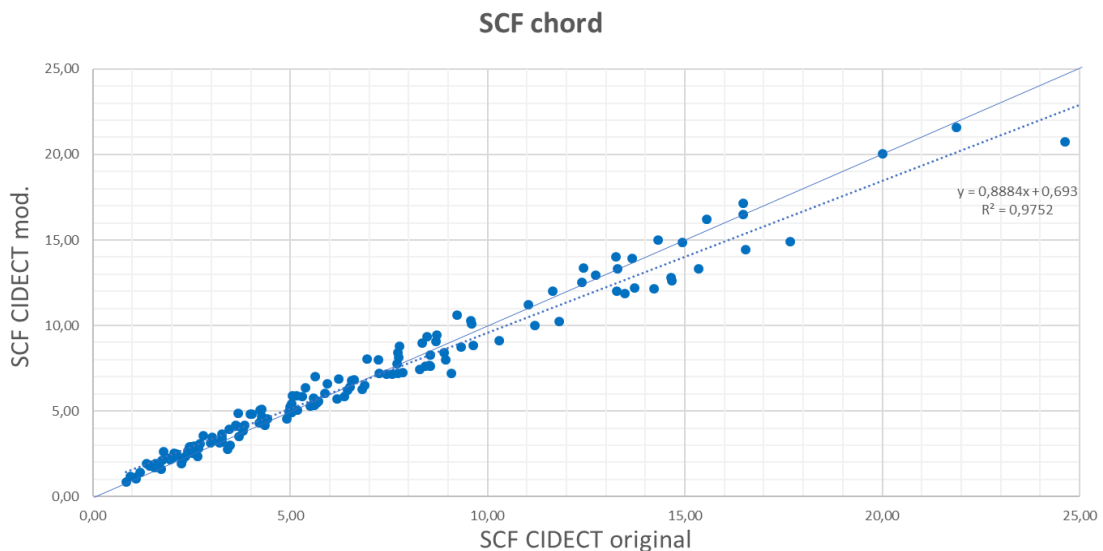


Abbildung 6-7: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für den Gurt aus CIDECT [39] und aus Formel für AX

Figure 6-7: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs from CIDECT with SCFs of CIDECT modified formula for the chord for AX

Ein grafischer Vergleich zwischen der ursprünglichen und der neuen CIDECT-Formel für den Gurt ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass die SCFs der

alten und der neuen Formel sehr gut zusammenpassen, wobei die neue Formel geringfügig niedrigere SCFs ergibt.

Das gleiche Verfahren wird für die maximalen SCFs für die Streben durchgeführt. Hier sind die Abweichungen im Vergleich zum Gurt höher, was bereits für die ursprüngliche Formel der Fall ist (Abbildung 5-5). Dies spiegelt sich auch im Bestimmtheitsmaß von  $R = 0,943$  wider. Da die Formel aufgrund der breiten Streuung der Ergebnisse auch viele Werte auf der unsicheren Seite enthält, wird die Formel um 0,5 in Gl. (6) verschoben.

$$SCF_{b,ax} = 0,5 + \left( 0,3 - \frac{0,06}{\beta} - 0,13 * \beta^2 + \left( \frac{t_i}{b_i} \right)^2 * 1,554 \right) * 2\gamma^{1,63} * (-0,7 * \tau + \tau^{0,25}) * \sin(\theta)^{1,07} \quad (6)$$

In Abbildung 6-8 werden die modifizierte Formel und die SCFs aus der neuen FEA verglichen. Mit Ausnahme von 2 Datenpunkten sind alle berechneten Ergebnisse mit einer maximalen Abweichung von weniger als 15% im Vergleich zur FEA auf der sicheren Seite, darunter einige mit einer Abweichung von 30% bis 45% sehr konservativ. Einer der SCFs auf der unsicheren Seite gilt wiederum für einen RHP K-Knoten mit sehr kleinem Dickenverhältnis von  $\tau = 0,32$ . Der andere Punkt steht für ein sehr großes Dickenverhältnis von  $\tau = 1,33$ .

Der Vergleich zwischen der ursprünglichen Formel und dem vollständigen Satz von neuen SCFs (Abbildung 5-5), der modifizierten Formel (Abbildung 6-8) und den beiden Formeln untereinander (Abbildung 6-9) zeigt, dass die neuen Formeln nicht nur einen erweiterten Bereich von Parametern abdecken, sondern auch weniger konservativ ausfallen.

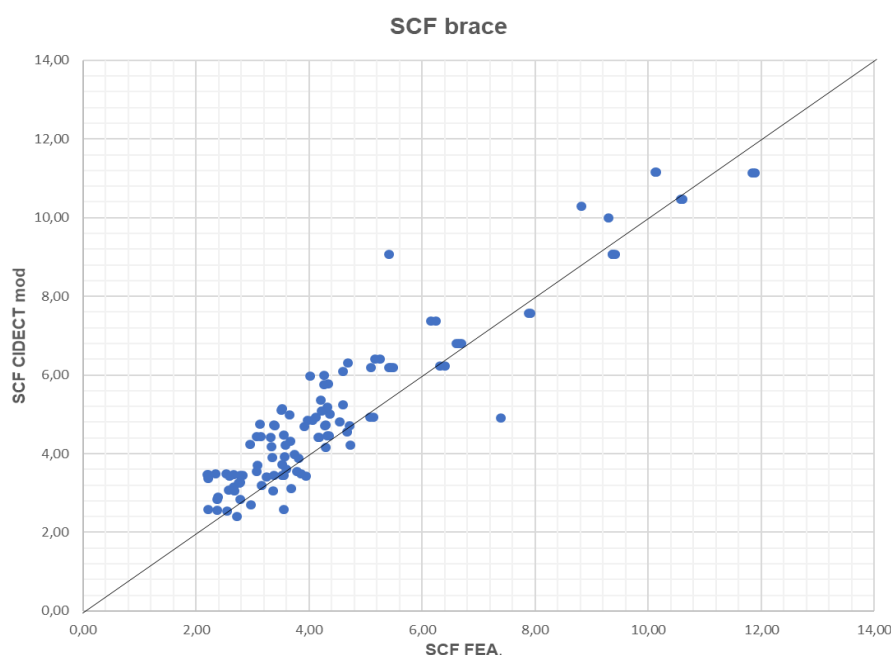


Abbildung 6-8: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für die Streben aus FEA und aus Formel für AX

Figure 6-8: RHS K-joints with gap:  
Comparison of SCFs from FEA with SCFs of modified formula for the brace for AX



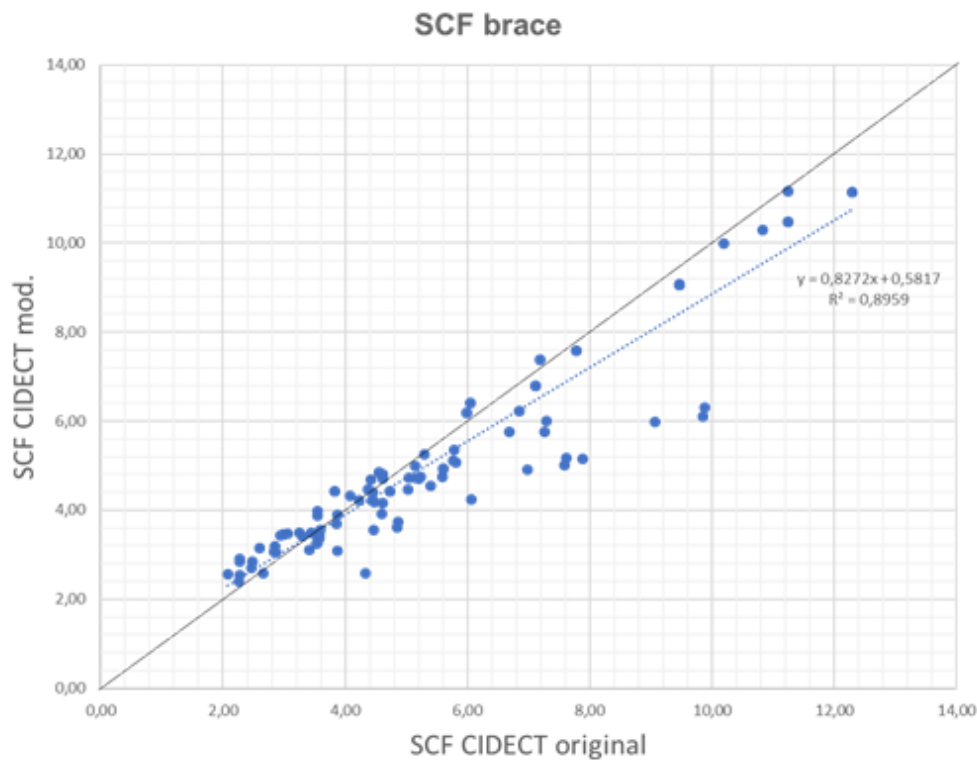


Abbildung 6-9: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für die Streben aus CIDECT 110[39] und aus modifizierte Formel für AX

Figure 6-9: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs from CIDECT [39] with SCFs of CIDECT modified formula for the brace for AX

In Tabelle 6-3 sind die mit den ursprünglichen CIDECT-Formeln berechneten SCFs, SCFs aus Dehnungsmessungen während der Versuche, SCFs aus FEA zusammen mit den SCF-Werten angegeben, die mit den neuen Formeln in Gl. 5 für den Gurt und in Gl. (6) für die Strebe berechnet wurden.

Da die Auflagerbedingungen im Versuch von den zugrunde gelegten Auflagerbedingungen der Formeln und der FEA abweichen, ist der Vergleich letztendlich nicht aussagekräftig.

Die mit der neuen Formel berechneten SCFs liegen zwischen den sehr konservativen SCFs nach CIDECT und den vergleichsweise kleineren SCFs aus FEA.

Tabelle 6-3: Vergleich der SCFs für RHP K-Knoten mit Spalt unter ausgeglichener Strebenaxiallast

Table 6-3 Comparison of SCFs for RHS K-joints with gap for balanced axial load on the braces

Series	CIDECT [39]		DMS-Messungen		FEA		Neue Formel	
	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe
K45-RHP-100x6-80x4-g25	3,08	5,15	4,63	9,96	3,19	3,94	3,74	4,81
K45-RHP-130x4-80x4-g25	24,65	10,20	7,44	12,91	14,66	9,30	20,71	9,98
K45-RHP-300x20-220x20-g40	4,27	3,54	3,83	3,26	4,78	2,78	4,44	3,26

### 6.3.2.2 RHP K-Knoten mit Spalt – Biegung in der Ebene der Streben (IPB) RHS K-joints with gap – in-plane bending (IPB) on the braces

Für den Lastfall Strebenbiegung in der Ebene (IPB) von RHP K-Knoten mit Spalt sind in CIDECT keine Formeln angegeben. Daher wird für diesen Fall ein neuer Satz von Gleichungen entwickelt. Die Eingabedaten für die statistische Bestimmung der SCF-Formeln für Gurt und Streben stammen zunächst aus der Parameterstudie aus Kapitel 5. Zusätzlich werden die Daten aus dem CIDECT-Bericht 7P [34] verwendet und die dort angegebenen SCFs in die nachfolgende Bestimmung der Spannungskonzentrationsfaktoren miteinbezogen.

Momente in den Streben können als schließende, öffnende oder gleichgerichtete Momente auf beide Streben gleichzeitig wirken. Dies wird nach den in Tabelle 4-3 angegebenen Definitionen berücksichtigt: Streben werden vom Spalt weg nach außen belastet (IPB-out), siehe Abbildung 5-6, Streben werden zum Spalt hin nach innen belastet (IPB-in), siehe Abbildung 5-7 und beide Streben werden gleichzeitig in einer Richtung belastet (IPB-conc), siehe Abbildung 5-8.

In dem CIDECT-Bericht 7P [34] werden die Momente getrennt nacheinander aufgebracht und später mit einem mechanischen Modell überlagert. Wie die Parameterstudie gezeigt hat, sind die Unterschiede in den SCFs des Gurtes für die verschiedenen eingeführten Momententypen eher gering, wenn man die Maximalwerte betrachtet. Daher wird für den Lastfall IPB eine Gleichung entwickelt, die die unterschiedlichen Momente abdeckt.

In einem ersten Schritt wird untersucht, in wie weit die Formel für Axiallast (AX) beanspruchte K-Knoten auch für den Lastfall IPB passt. In einem zweiten Schritt wird diese Formel (Gl. 5) etwas modifiziert, wodurch mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R = 0,96$  ein genaueres Ergebnis erzielt werden kann (Abbildung 6-10).

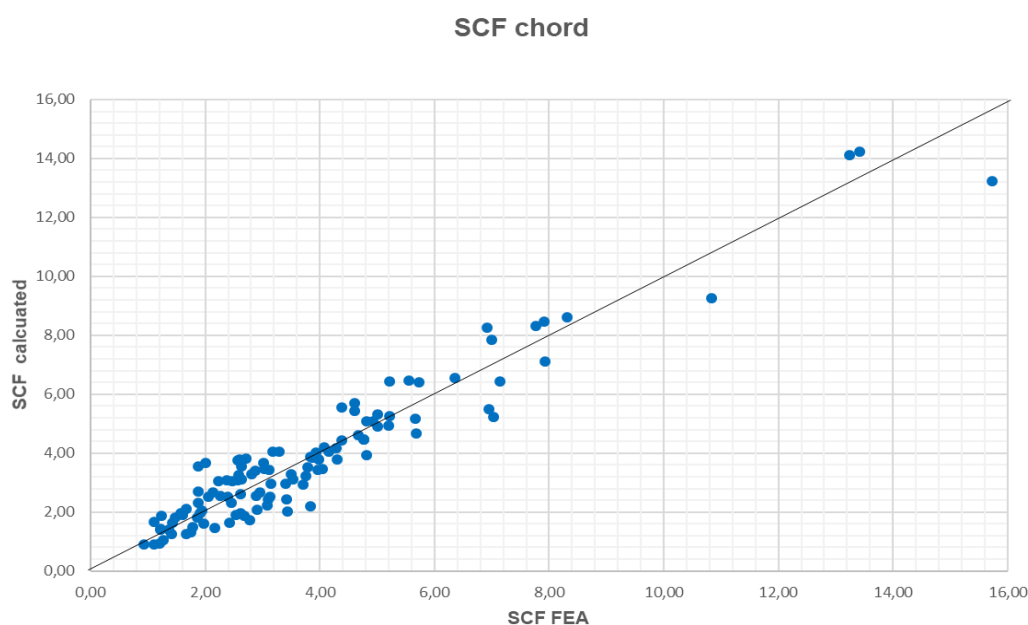


Abbildung 6-10: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus Formel für IPB

Figure 6-10: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of the chord SCFs from FEA with chord SCFs of formula for IPB

Wie in Abbildung 6-10 zu sehen ist, bildet die Mittelwertkurve die Daten mit einer Streuung von  $\pm 20\%$  im Allgemeinen gut ab. Um eine zuverlässige und sichere SCF-Gleichung zu erzielen werden die Ergebnisse auf die sichere Seite verschoben. Dies führt zu Gl. 7, die in Abbildung 6-11 grafisch dargestellt wird.

$$SCF_{ch,IPB} = 0,5 + \left( -1,26 + 2,61 * \beta - 1,64 * \beta^2 + \frac{0,21}{\beta} + \frac{0,05}{g'} \right) * 2\gamma^{1,52} * \left( -0,015 / \frac{g}{b_i} + \tau^{0,66} \right) * g'^{0,21} * \sin(\theta)^{1,27} \quad (7)$$

Mit dieser Verschiebung der von RStudio gefundenen Originalkurve bleibt das Bestimmtheitsmaß von  $R = 0,96$  unverändert. Jetzt liegen noch drei der berechneten SCFs zwischen 20% und 30% über den von der FEA ermittelten SCFs. Die Abweichungen zur unsicheren Seite liegen unter 15%.

Wie zu sehen ist, gibt es auch einige konservative Ergebnisse, bei denen die berechneten SCFs fast doppelt so hoch sind wie die FEA-Ergebnisse. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass dies meist bei sehr kleinen SCFs unter 1,5 der Fall ist. Diese konservativen Ergebnisse stammen hauptsächlich aus dem CIDECT-Bericht 7P [34]. Es scheint also einen wenn auch geringen Einfluss auf die SCFs durch die Randbedingungen und die Art und Ausrichtung der aufgetragenen Momente zu geben. Eine gemeinsame Bestimmung der SCFs unabhängig von der Ausrichtung der Momente in der Ebene und der Art und Weise, wie die Momente aufgebracht werden, wird jedoch angestrebt und kann mit Gl. 7 für den Gurt umgesetzt werden.

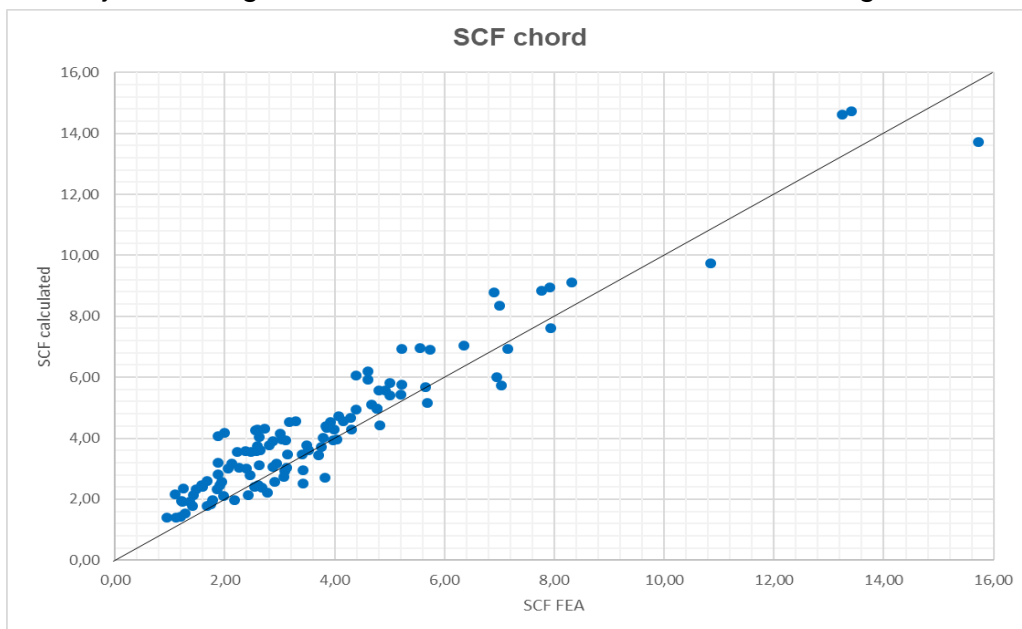


Abbildung 6-11: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB

Figure 6-11: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of the chord SCFs from FEA with chord SCFs of modified formula for IPB

Für die SCFs der Streben ist dieser Effekt jedoch nicht mehr zu vernachlässigen. Obwohl viele verschiedene Modelle mit dem Softwarepaket R und RStudio analysiert werden, ist es nicht möglich, eine zufriedenstellende Gleichung für den Datensatz des

CIDECT-Berichts 7P [34] und die in dieser Untersuchung gefundenen neuen Daten zu finden, da der Einfluss der Momentorientierung bei den Streben viel ausgeprägter auftritt als beim Gurt.

Dies führt zu zwei unterschiedlichen SCF-Gleichungen für diese beiden Datensätze: Die Gleichung für den Packer-Datensatz aus dem CIDECT-Bericht 7P (Gl. 8) und die Gleichung für den neuen Datensatz (Gl. 9).

$$SCF_{br,IPB,Packer} = (-0,04+0,32*\beta-0,26*\beta^2)*2\gamma^{1,4}*\tau^{-0,18}*\sin(\theta)^{1,35} \quad (8)$$

$$SCF_{br,IPB,CCTH} = (-0,025+0,22*\beta-0,12*\beta^2 - 0,00125 * \frac{b_i}{t_i}) * 2\gamma^{1,6} * g'^{-0,22} * (-0,27 * (\frac{g}{b_i})^2 + 0,05 * \tau + \tau^{-1,08}) * \sin(\theta)^{0,41} \quad (9)$$

Offensichtlich ist Gl. 9 komplexer und beinhaltet mehr Parameter als Gl. 8. Dies liegt hauptsächlich daran, dass Gl. 9 einen größeren Parameterbereich abdeckt und gleichzeitig unterschiedliche Ausrichtungen der IPB-Momente beinhaltet sind.

Der grafische Vergleich beider Gleichungen mit den entsprechenden berechneten SCFs nach den Formeln ist in Abbildung 6-12 (Gl. 8) und Abbildung 6-13 (Gl. 9) dargestellt.

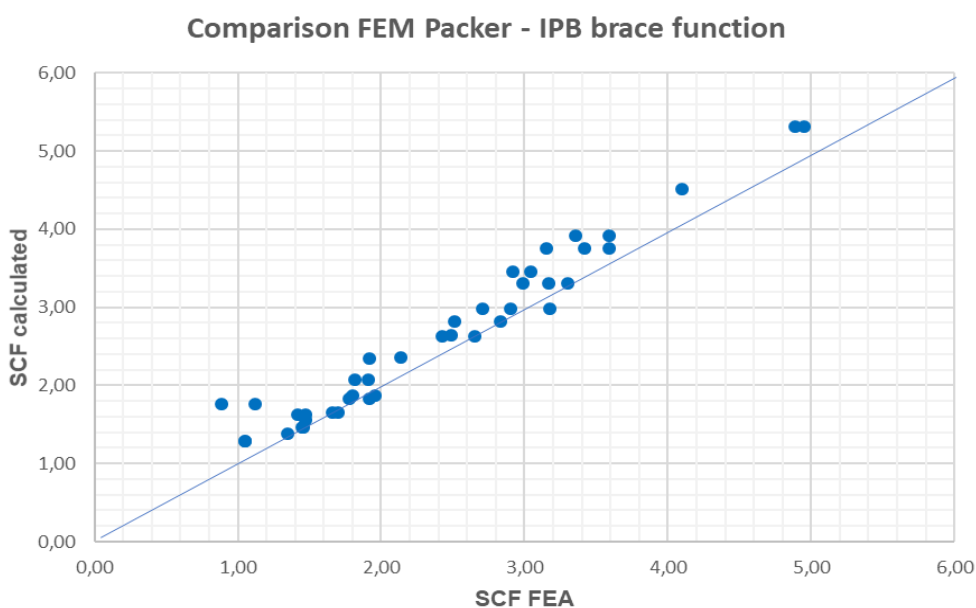


Abbildung 6-12: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für die Streben aus CIDECT-Daten 110[34] und aus Formel für IPB

Figure 6-12: RHS K-joints with gap:  
Comparison of the brace SCFs from CIDECT [34] with brace SCFs of formula for IPB

Nahezu alle Datenpunkte der für den Datensatz aus dem CIDECT-Bericht 7P [34] gefundenen Gl. 8 liegen mit einer Überschätzung von max. 25% auf der sicheren Seite. Die Ausnahme bilden zwei Datenpunkte mit sehr kleinen SCFs, die deutlich konservativer sind.

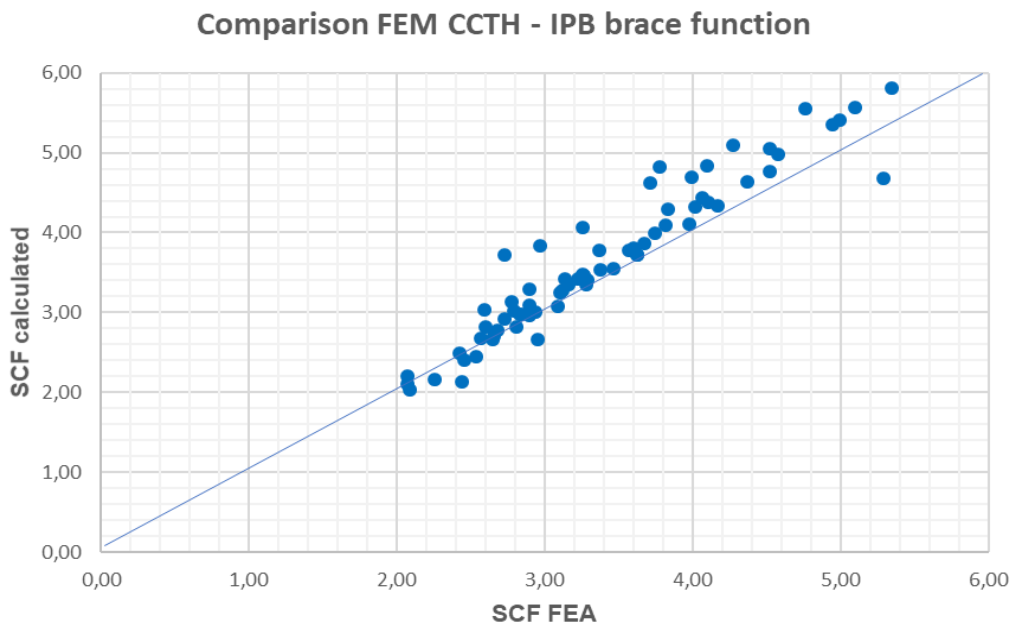


Abbildung 6-13: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für die Streben aus neuen FE-Daten und aus Formel für IPB

Figure 6-13: RHS K-joints with gap:  
Comparison of the brace SCFs of new FEA data with brace SCFs of formula for IPB

Für die Auswertung der neuen FE-Daten in Gl. 9 ergibt sich ein ähnliches Bild: Mit Ausnahme eines Datenpunkts liegt die Überschätzung unter 25%. Die im Diagramm (Abbildung 6-13) gezeigten Unterschätzungen liegen in drei Fällen unter 15% und in allen anderen Fällen unter 10% im Vergleich zu den FEA-Ergebnissen.

### **6.3.2.3 RHP K-Knoten mit Spalt – Biegung in der Ebene mit öffnenden Momenten (OPB-out)**

#### ***RHS K-joints with gap – in-plane bending with opening moments (IPB-out) on the braces***

Wie bereits erwähnt, sind für den Lastfall Streben unter Biegung in der Ebene (IPB) von RHP K-Knoten mit Spalt in CIDECT [39] keine Formeln angegeben. Daher wird für diesen Fall ein neuer Satz von Gleichungen entwickelt. Wie die ersten statistischen Durchläufe mit RStudio zeigen, passen die SCFs für sich öffnende Strebenmomente (IPB-out) nicht zu den entwickelten Funktionen für gleichgerichtete und sich schließende Momente aus Abschnitt 6.3.2.2. Auch die im CIDECT-Bericht 7P [34] angegebenen Daten decken diesen Fall nicht ab. Die folgende Untersuchung verwendet daher nur den im Rahmen der Parameterstudie in Kapitel 5 entwickelten Datensatz.

Zunächst werden die SCFs aus FEA für IBP-out der für IPB entwickelten Formel für den Gurt (Gl. 7) gegenübergestellt (Abbildung 6-14). Dieser Vergleich eine zufriedenstellende Streuung bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R = 0,97$ .

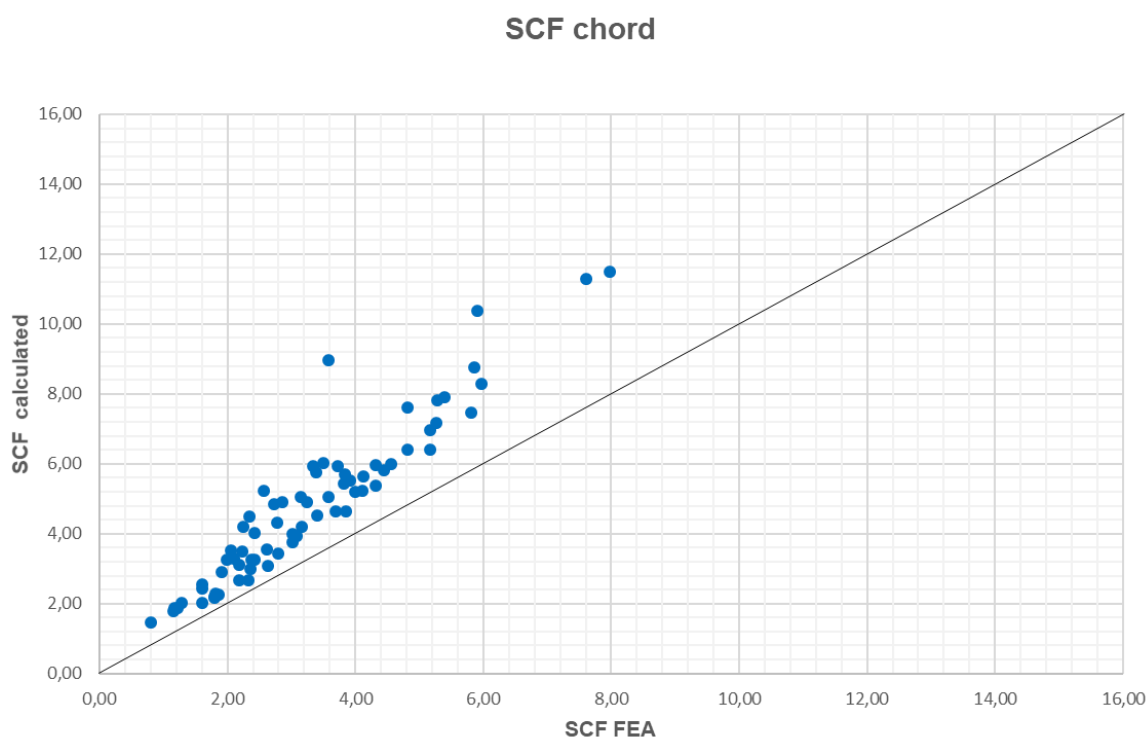


Abbildung 6-14: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus Formel für IPB-out

Figure 6-14: RHS K-joints with gap:  
Comparison of the chord SCFs (FEA) with chord SCFs (formula) for IPB (opening moments)

Die SCFs, die mit dieser Funktion berechnet werden, liegen aber bei weitem auf der sicheren Seite. Da keine bessere Übereinstimmung zwischen der FEA und dem Modell gefunden werden kann, wird das Gleichungsmodell hin zu einer wirtschaftlicheren, aber dennoch sicheren Lösung modifiziert. Dabei liefert eine Reduzierung der berechneten Ergebnisse um 20% zufriedenstellende SCFs im Sinne eines Vergleichs von FEA und berechneten Werten. Daraus resultiert die in Gl. 10 angegebene Formel mit graphischer Auswertung in Abbildung 6-15. Das Bestimmtheitsmaß bleibt durch diese Transformation unverändert ( $R = 0,97$ ). Mit Ausnahme von sehr wenigen Datenpunkten liegen alle Ergebnisse zwischen + 5% und + 25% im Vergleich zur FEA. Die Unterschätzung liegt bis auf einen Fall mit 9 % bei unter 5%.

SCF chord

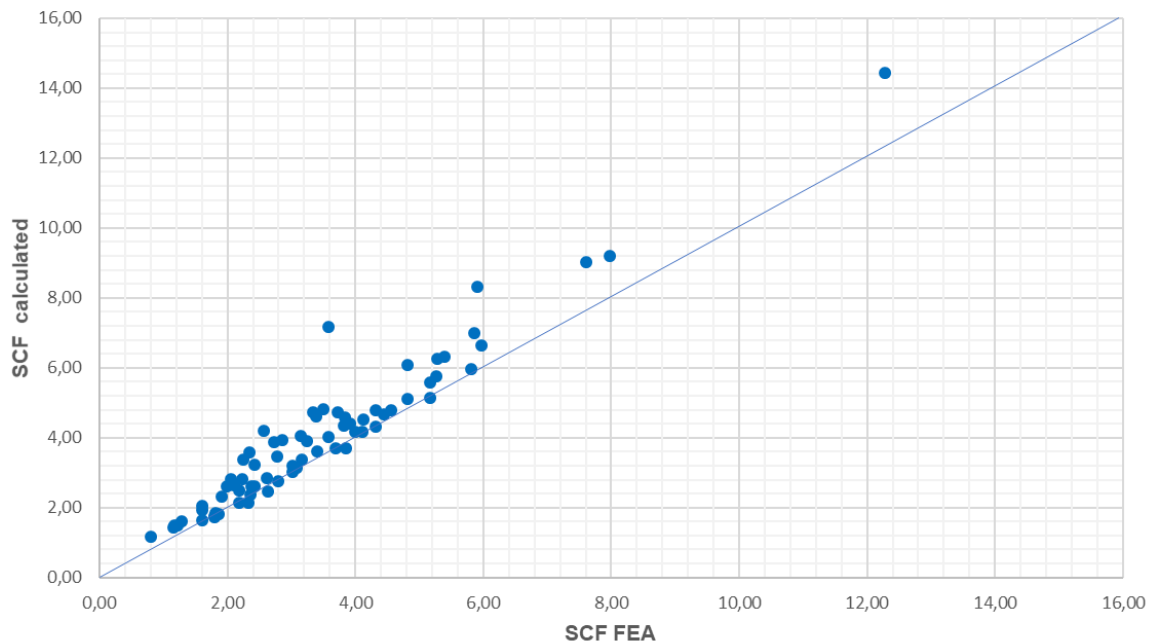


Abbildung 6-15: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB-out

Figure 6-15: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of the chord SCFs (FEA) with chord SCFs (modified formula) for IPB (opening moments)

$$SCF_{ch,IPB-out} = 0,8 * \left( -0,0075 + 0,028 * \beta - 0,02 * \beta^2 + \frac{0,0025}{g'} \right) * 2\gamma^{2,97} * \left( 13,6 * \left(\frac{g}{b_i}\right)^2 + \tau^{1,4} \right) * g'^{-1,18} * \sin(\theta)^{1,60} \quad (10)$$

Die Bestimmung der SCFs für die Streben unter Verwendung der Formeln für schließende und gleichgerichtete Momente (Gl. 8 und Gl. 9) führt zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Dafür liefert Gl. 6 für axiale Belastungen der Streben eine gute Grundlage für die statistische Analyse, auch wenn die Streuung im Vergleich zu den anderen Lastfällen höher ist. Dies zeigt sich auch im Bestimmtheitsmaß  $R = 0,94$ .

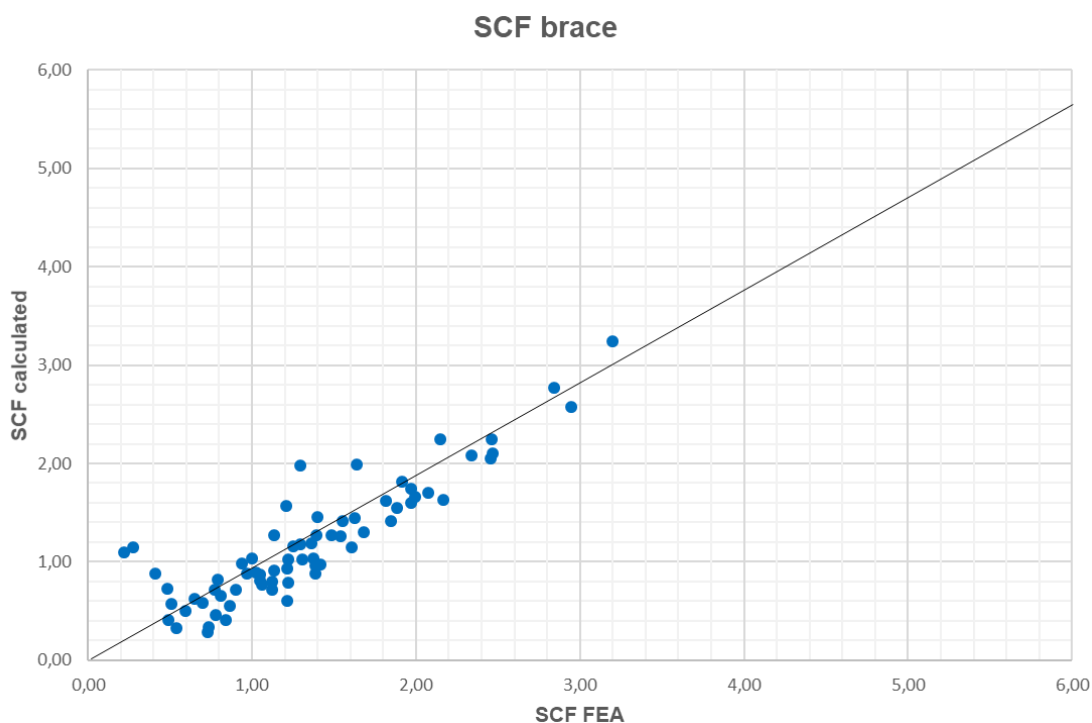


Abbildung 6-16: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus Formel für IPB-out

Figure 6-16: RHS K-joints with gap:  
Comparison of the brace SCFs (FEA) with brace SCFs calculated for IPB (opening moments)

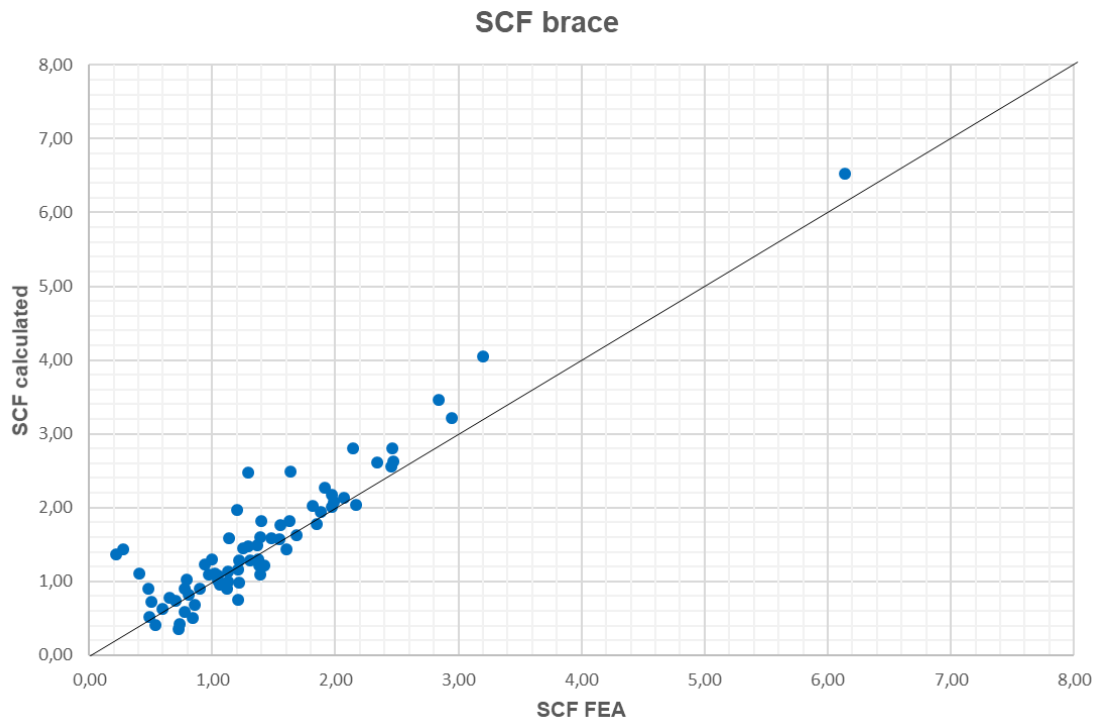


Abbildung 6-17: RHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus modifizierter Formel für IPB-out

Figure 6-17: RHS K-joints with gap:  
Comparison of the brace SCFs from FEA with brace SCFs calculated by modified formula for IPB-out



Die grafische Auswertung ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Darin zeigt sich ein akzeptabler Mittelwert bei einer größeren Streuung der Ergebnisse.

In vielen Fällen liegen die mittels Formel berechneten SCFs noch auf der unsicheren Seite. Um eine zuverlässige und sichere SCF-Gleichung zu erhalten, wird daher eine Modifikation der Formel mit einem Faktor von 1,25 durchgeführt. Daraus ergibt sich Abbildung 6-17 und Gl. 11.

$$SCF_{br,IPB-out,mod.} = 1,25 * \left( 0,018 - \frac{0,004}{\beta} - 0,004 * \beta^2 - \frac{0,029}{\frac{g}{b_i}} \right) * 2\gamma^{1,97} * (-0,0806/\tau + \tau^{-0,77}) * \sin(\theta)^{1,035} \quad (11)$$

Wie das Diagramm in Abbildung 6-17 zeigt, liegen immer noch viele Datenpunkte auf der unsicheren Seite, Dies gilt insbesondere für SCFs <1.0. (Abbildung 6-18).

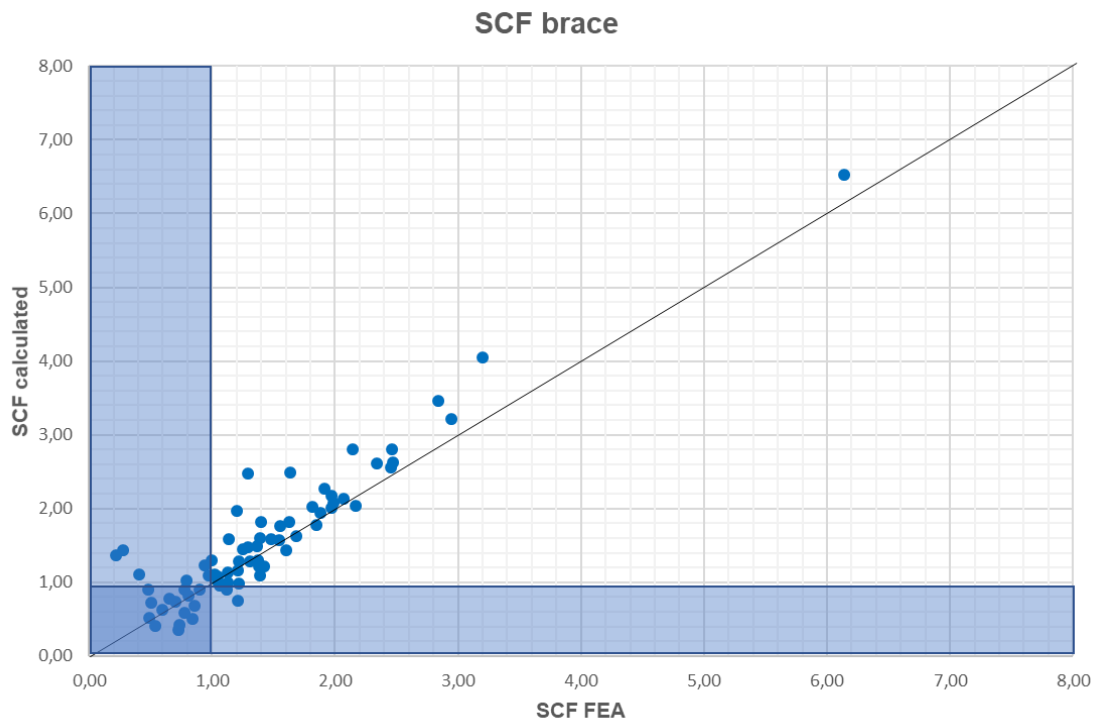


Abbildung 6-18: RHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und aus modifizierter Formel mit SCF ≥1,0 für IPB-out

Figure 6-18: RHS K-joints with gap:  
 Comparison of the brace SCFs from FEA with brace SCFs calculated by modified formula and SCF ≥1.0 for IPB-out

Mit der zusätzlichen Anforderung, dass der minimale SCF nicht unter 1,0 liegen darf, führt die gefundene SCF-Gleichung (Gl. 11) zu akzeptablen Ergebnissen für diesen Lastfall. Einer der berechneten Datenpunkte unterschätzt die FEA-Ergebnisse um 21%, zwei weitere um 18%. Die meisten Datenpunkte weichen jetzt weniger als ± 5% von den FEA-Daten ab. Auf der anderen Seite überschätzen 9 Datenpunkte die FEA um 30% und mehr.

### 6.3.3 Parametrische SCF-Formeln für KHP K-Knoten mit Spalt Evaluation of parametric SCF-formulae for CHS K-joints with gap

Die Auswertung der Parameterstudie zu KHP K-Knoten in Kapitel 5.3 hat gezeigt, dass die CIDECT-Formeln [39] im Vergleich zu DNVGL [3] und den SCFs der FEA häufig sehr konservative Ergebnisse liefern.

#### 6.3.3.1 KHP K-Knoten – im Gleichgewicht stehende Strebennormalkräfte CHS K-joints – balanced axial load in the braces

Dies geht auch aus Abbildung 6-19 hervor, in der die SCFs für den Gurt der FEA mit den SCFs verglichen werden, die mit der CIDECT-Formel berechnet wurden.

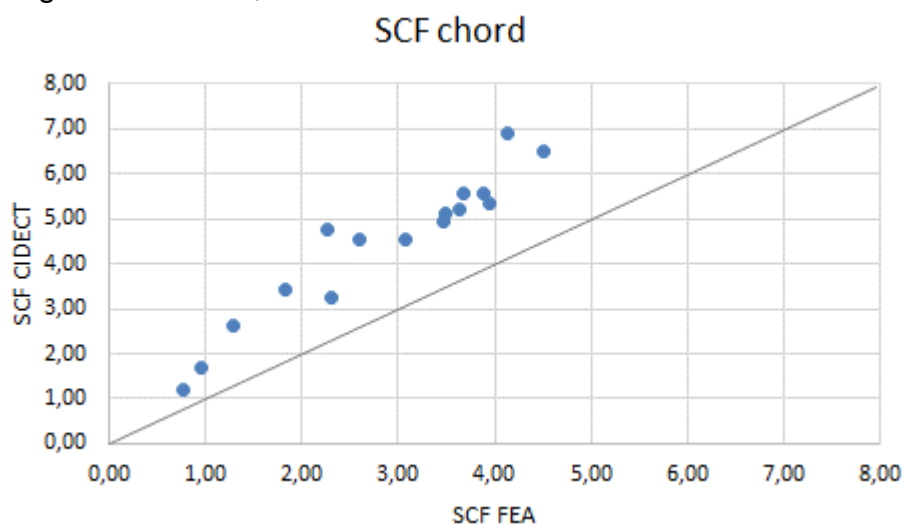


Abbildung 6-19: KHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach CIDECT [39] für den Gurt für AX

Figure 6-19: CHS K-joints with gap:  
Comparison of SCFs from FEA with SCFs from CIDECT [39] for the chord for AX

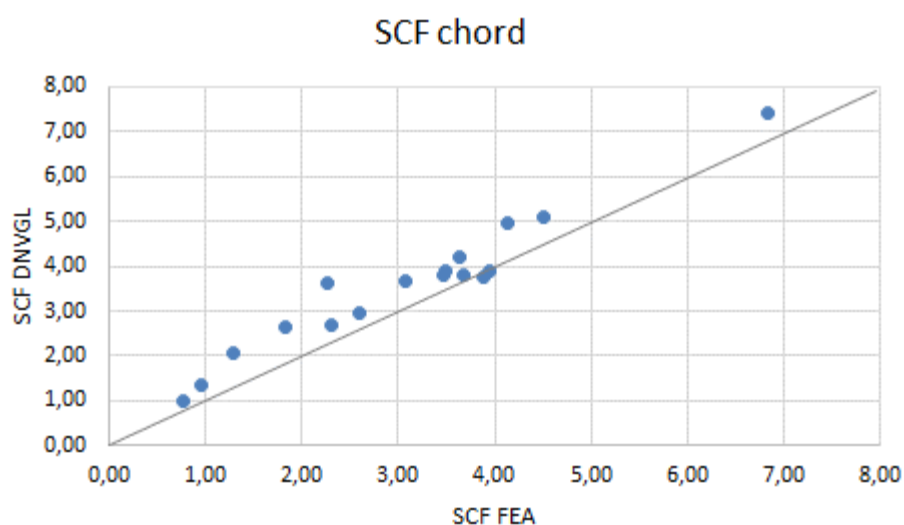


Abbildung 6-20: KHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFS aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für den Gurt für AX

Figure 6-20: CHS K-joints with gap:  
Comparison of SCFs by FEA with SCFs of DNVGL [3] for the chord for AX

Die SCFs von CIDECT [39] sind weit auf der sicheren Seite. Der gleiche Vergleich von SCFs für den Gurt aus der FEA mit SCFs, berechnet nach der DNVGL-Formel [3] in Abbildung 6-20, zeigt eine viel bessere Übereinstimmung, wobei die Werte immer noch auf der sicheren Seite liegen.

In Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 wird für die SCFs der Streben dieselbe Bewertung vorgenommen. Der Vergleich der SCFs aus FEA mit den nach der CIDECT-Formel berechneten SCFs in Abbildung 6-21 zeigt eine ausgeprägte horizontale Streuung, die sich aus dem Mindestwert für die Strebe-SCF als Funktion des Strebenwinkels  $\Theta$  ergibt ( $SCF_{Min} = 2,3$  für  $\Theta = 45^\circ$ ).

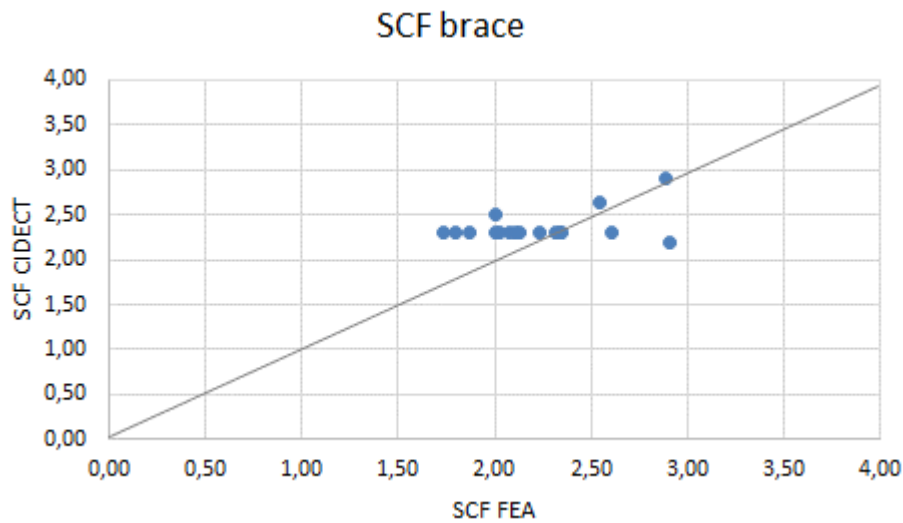


Abbildung 6-21: KHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs aus FEA mit SCFs nach CIDECT [39] für die Strebe für AX

Figure 6-21: CHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs from FEA with SCFs from CIDECT [39] for the brace for AX

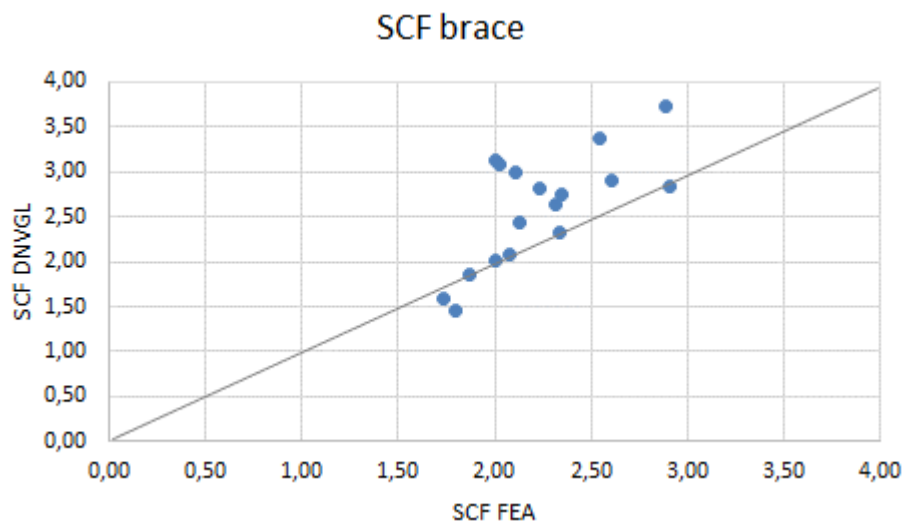


Abbildung 6-22: KHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für die Strebe für AX

Figure 6-22: CHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs by FEA with SCFs of DNVGL [3] for the brace for AX

Der Vergleich der SCFs aus FEA mit den SCFs gemäß DNVGL in Abbildung 6-22 für die Streben zeigt ebenfalls eine gewisse Variabilität, sie liegen jedoch größtenteils auf der sicheren Seite.

Aufgrund der hinreichend guten Übereinstimmung und des größeren Geltungsbereichs der DNVGL-Formeln [3] wird die Anwendung dieser Formeln für die Berechnung der SCFs für den Gurt nach Gl. 12 und für die Streben nach Gl. (13) für Knoten unter ausgeglichener Strebennormalkraft (AX) empfohlen.

$$SCF_{ch,ax} = \gamma^{0,5} * \tau^{0,9} * (0,67 - \beta^2 + 1,16\beta) * (\sin\theta)^{1,6} * (1,64 + 0,29\beta^{-0,38}\arctan(8\frac{g}{d_0})) \quad (12)$$

$$SCF_{br,ax} = 1 + (1,97 - 1,57\beta^{0,25})\tau^{-0,14} (\sin\theta)^{0,7} * SCF_{ch,ax} + \sin^{0,8} * 2\theta \left(0,131 - 0,084 \arctan\left(14\frac{g}{d_0} + 4,2\beta\right)\right) * C * \beta^{1,5}\gamma^{0,5}\tau - 1,22 \quad (13)$$

Mit C = Parameter für das Gurtauflager, typischerweise C = 0,7 [3]

### 6.3.3.2 KHP K-Knoten – Strebenbiegung in der Ebene (IPB) CHS K-joints with gap – in-plane bending (IPB) on the braces

CIDECT [39] bietet keine SCF-Formel für den Lastfall IPB an, so dass hier der Vergleich für die SCFs aus FEA mit der SCF-Formel nach DNVGL [3] erfolgt. Die Auswertung in Abbildung 6-23 zeigt, dass die meisten SCFs aus FEA im Vergleich zu den nach DNVGL-Formel berechneten SCFs auf der unsicheren Seite liegen.

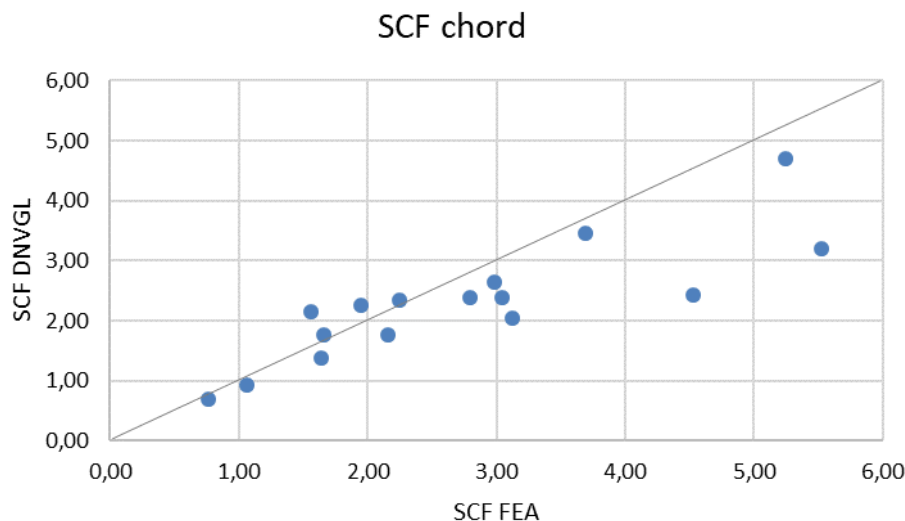


Abbildung 6-23: KHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für IPB

Figure 6-23: CHS K-joints with gap:  
Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of DNVGL [3] for IPB

Daher erfolgt in Gl. 14 eine Modifikation der DNVGL-Formel für die SCFs des Gurts durch Multiplikation mit dem Faktor 1,35.

$$SCF_{ch,IPB,mod} = 2,0 * \beta * \tau^{0,85} * \gamma^{(1-0,68\beta)} * (\sin\theta)^{0,7} \quad (14)$$

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-24 dargestellt, worin die meisten Werte jetzt auf der sicheren Seite sind. Die Werte rechts von der Mittellinie stehen für KHP K-Knoten mit einem Wanddickenverhältnis  $\tau > 1,0$ . Dieser Verhältniswert fällt nicht in den Gültigkeitsbereich der Formel und wirkt sich insbesondere unter Strebenbiegung ungünstig aus.

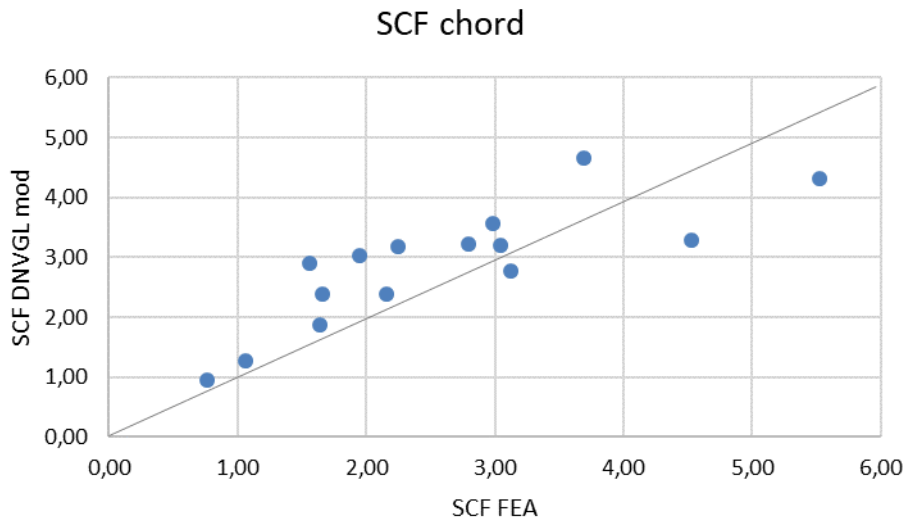


Abbildung 6-24: KHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFS für den Gurt aus FEA mit SCFs nach modifizierter DNVGL-Formel für IPB

Figure 6-24: CHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of modified DNVGL formula for IPB

Die Auswertung der SCFs für die Strebe unter IPB ist in Abbildung 6-25 dargestellt. Es zeigt sich eine breite Streuung. Die Drei Datenpunkte links stehen für K-Knoten mit Wanddickenverhältnis  $\tau > 1,0$ , die wie schon für den Gurt außerhalb des Gültigkeitsbereichs liegen.

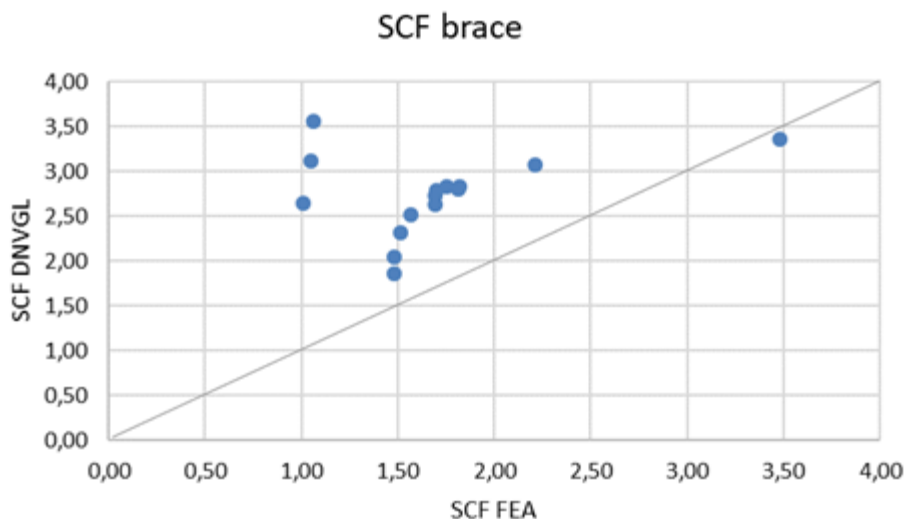


Abbildung 6-25: KHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFS für die Streben aus FEA mit SCFs nach DNVGL [3] für IPB

Figure 6-25: CHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs of the brace by FEA with SCFs of DNVGL [3] for IPB

Da die Werte auf der sicheren Seite liegen, wird an dieser Stelle die Formel von DNVGL [3] in Gl. 15 wird übernommen.

$$SCF_{br,IPB} = 1 + 0.65 * \beta * \tau^{0.4} * \gamma^{(1.09-0.77\beta)} * (\sin\theta)^{(0.07\gamma-1.16)} \quad (15)$$

Die gezeigten Ergebnisse für den Lastfall IPB mit teilweise unsicheren Ergebnissen für den Gurt und konservativen SCFs für die Strebe erfordern aber genauere Untersuchungen.

### 6.3.3.3 KHP K-Knoten – Strebenbiegung aus der Ebene (OPB) CHS K-joints – out-of-plane bending (OPB) on the braces

Die Formel nach Gl. 16 für die SCFs des Gurtes nach DNVGL [3] ist sehr komplex und wurde für ungleichmäßige Belastung von unterschiedlichen Streben konfiguriert.

$$\begin{aligned} SCF_{ch,OPB} = & \gamma * \tau * \beta * (1.7 - 1.05 * \beta^3) * (\sin\theta)^{1.6} * (1 - 0.08(\beta * \gamma)^{0.5}) \\ & * \exp\left(-0.8 * \left(1 + \frac{g/d_0 * \sin\theta}{\beta}\right)\right) + \gamma * \tau * \beta * (1.7 - 1.05 * \beta^3) \\ & * (\sin\theta)^{1.6} * (1 - 0.08(\beta * \gamma)^{0.5}) * \exp\left(-0.8 * \left(1 + \frac{g/d_0 * \sin\theta}{\beta}\right)\right) \\ & * (2.05 * \beta^{0.5} * \exp\left(-1.3 * \left(1 + \frac{g/d_0 * \sin\theta}{\beta}\right)\right)) \end{aligned} \quad (16)$$

Der Vergleich der SCFs für den Gurt aus FEA und der DNVGL-Formel nach Gl. 16 ist in Abbildung 6-26 dargestellt. Darin zeigt sich, dass die Werte gut auf der sicheren Seite liegen. Grundsätzlich wäre eine Anpassung zu weniger konservativen Ergebnissen möglich. Aufgrund der geringen Datenbasis wird aber an dieser Stelle auf eine Modifikation der Formel verzichtet und die Anwendung der ursprünglichen DNVGL-Formel nach Gl. 16 empfohlen.

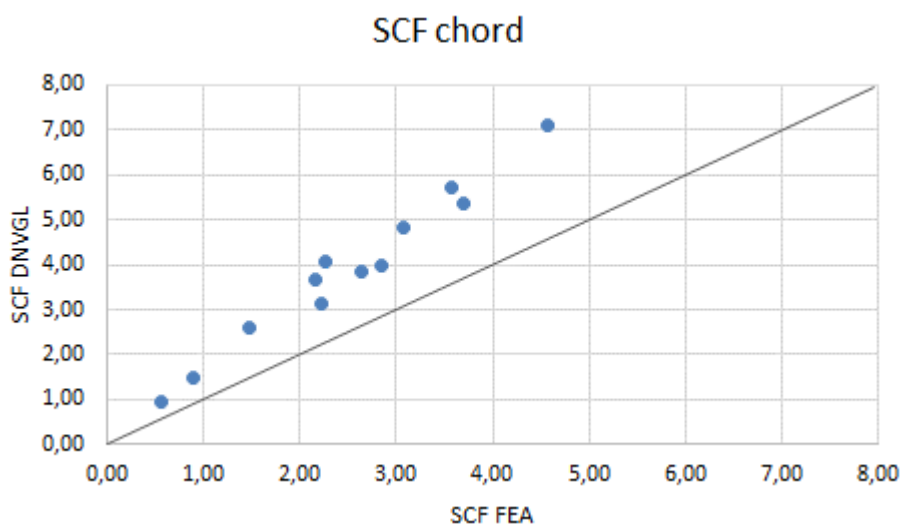


Abbildung 6-26: KHP K-Knoten mit Spalt:  
Vergleich der SCFS für den Gurt aus FEA mit SCFs nach DNVGL-Formel für OPB

Figure 6-26: CHS K-joints with gap:  
Comparison of SCFs of the chord by FEA with SCFs of DNVGL formula for OPB

Analog erfolgt der Vergleich der SCFs für die Strebe aus FEA und der DNVGL-Formel für den Lastfall OPB in Abbildung 6-27.

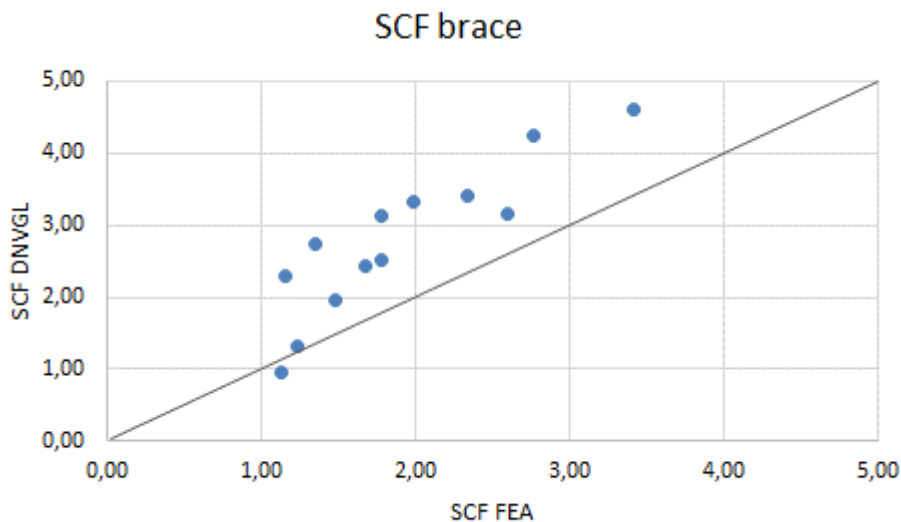


Abbildung 6-27: KHP K-Knoten mit Spalt:  
 Vergleich der SCFs für die Streben aus FEA mit SCFs nach DNVGL-Formel für OPB

Figure 6-27: CHS K-joints with gap:  
 Comparison of SCFs of the brace by FEA with SCFs of DNVGL formula for OPB

Auch hier ist eine gewisse Streuung der Datenpunkte zu erkennen. Da sie aber größtenteils auf der sicheren Seite liegen wird auch hier die Anwendung der original Formel aus DNVGL [3] nach Gl. 17 für OPB der Streben empfohlen.

$$SCF_{br,OPB} = \tau^{-0.54} * \gamma^{-0.05} (0.99 - 0.47 * \beta + 0.08 * \beta^4) * SCF_{ch,OPB} \quad (17)$$

### 6.3.4 Vergleich der Bruchlastspielzahlen aus Versuch und mit Formel Comparison of load cycles to failure from tests and by function

In Abbildung 6-28 werden die im Versuch erzielten Bruchlastspielzahlen  $N_f$  aus den experimentellen Untersuchungen, den mittels neuer Formeln berechneten Bruchlastspielzahlen  $N_{f,calc}$  gegenübergestellt.

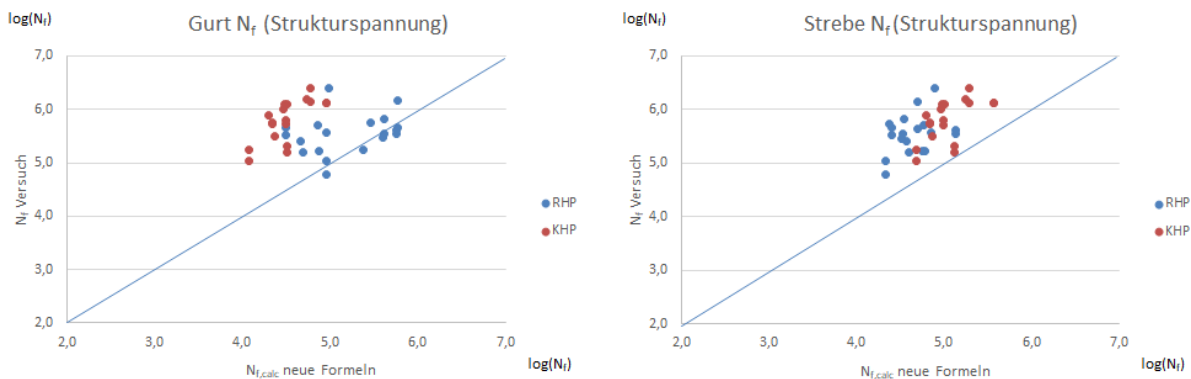


Abbildung 6-28: Vergleich der Bruchlastspielzahlen  $N_f$  aus dem Versuch mit berechneten Bruchlastspielzahlen  $N_{f,calc}$  nach neuen Formeln für den Gurt (links) und die Strebe (rechts)

Figure 6-28: Comparison of numbers of load cycles to failure from tests  $N_f$  and calculated by new formulae  $N_{f,calc}$  for the chord (left) and the brace (right)

Dabei wird ein für Hohlprofilknoten allgemein üblicher minimaler SCF von 2,0 vorausgesetzt [39]. Das teilweise geringe Unterschreiten einiger Versuche an RHP K-Knoten für den Gurt in blau ist auf die ungünstige Schweißnahtführung mit Start- und Endpunkten in den Eckbereichen der Streben zurückzuführen. Diese stellen eine untere Grenze für die Ermüdungsfestigkeit dar.

Im Gegenzug dazu übertreffen die erzielten Bruchlastspielzahlen der KHP K-Knoten im Gurt in den roten Punkten die berechneten Lastspielzahlen deutlich, was auf die positiven Effekte des überschweißten Spaltes zurückzuführen ist.

### **6.3.5 Schlussfolgerungen für die Bewertung nach dem Strukturspannungskonzept Conclusions for structural stress evaluation**

Für die Bewertung nach dem Strukturspannungskonzept wird ein Vergleich der Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) aus der Parameterstudie mit Werten aus Regelwerken durchgeführt. Die Randbedingungen während der Ermüdungsversuche unterscheiden von den Randbedingungen, auf denen die SCF-Formel und die Diagramme in den Normen basieren. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Randbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die SCFs der Streben haben, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Aus diesem Grund werden für den Vergleich mit den Regelwerken nur die FEA-Daten aus der Parameterstudie herangezogen, für die die Auflagerbedingungen entsprechend angepasst sind.

Für RHP K-Knoten wird eine Neubewertung mit R und RStudio basierend auf den ursprünglichen CIDECT-Formeln durchgeführt. Die Eingabedaten enthalten die ursprünglich verwendeten FEA-Ergebnisse von van Wingerde et al. [34] und die neu berechneten Ergebnisse der Parameterstudie. Für den Lastfall „Axiale Belastung der Strebe (AX)“ werden entsprechende Formeln mit einer geringfügigen Modifikation der ursprünglichen CIDECT-Formeln hergeleitet.

Für Strebenbiegung in der Ebene (IPB) von RHP K-Knoten mit Spalt sind in CIDECT [39] keine Formeln angegeben. Die DNVGL-RP-C203 [3] behandelt insgesamt keine RHP-Knoten. Daher wird für diesen Fall ein neuer Satz von Gleichungen entwickelt. Neben den Eingangsdaten der Parameterstudie werden hierfür auch SCF-Daten aus dem CIDECT-Bericht 7P [34] mit einbezogen.

Bei IPB von RHP K-Knoten zeigt sich, dass die SCFs für sich öffnende Momente (IPB-out) nicht zu den entwickelten Funktionen für gleichgerichtete und sich schließende Strebenmomente passen. Auch die im CIDECT-Bericht 7P [34] angegebenen Daten decken diesen Fall nicht ab. Für RHP K-Knoten unter IPB-out wird daher ein zusätzlicher Formelsatz entwickelt.

Die Auswertung der Parameterstudie an KHP K-Knoten unter Axialbelastung (AX) der Strebe zeigt, dass die CIDECT-Formeln [39] im Vergleich zu DNVGL [3] und den SCFs der FEA häufig sehr konservative SCFs liefern. Da DNVGL [3] einen größeren Anwendungsbereich hat und SCF-Formeln für die Lastfälle IPB und Out-of-Plane-Bending (OPB) bereitstellt, ist es sinnvoll, diese Formeln zu verwenden. Der Vergleich mit den SCFs für den Gurt aus der Parameterstudie zeigt eine gute Übereinstimmung auf der sicheren Seite für die Lastfälle AX und OPB. Da die SCFs



für den Gurt unter IPB teilweise nicht auf der sicheren Seite sind, wird diese Formel angepasst.

Einige KHP K-Knoten mit Spalt wurden ebenfalls mit einem Dickenverhältnis  $\tau > 1,0$  untersucht, das vom Gültigkeitsbereich der Formeln nicht erfasst wird. Es stellt sich heraus, dass insbesondere unter IPB die durch die Formeln berechneten SCFs für den Gurt weit außerhalb der Streuung liegen. Daher kann der Geltungsbereich nicht über  $\tau = 1,0$  hinaus erweitert werden.

Die SCF-Werte für die Streben weisen für alle Lastfälle AX, IPB und OPB eine gewisse Streuung auf, was die Auswertung in einer Gleichung erschwert. Da die SCFs von DNVGL [3] auf der sicheren Seite sind, ist es akzeptabel und empfehlenswert, diese Formeln zu verwenden.

## 7 Zusammenfassung Summary

### *Kurzfassung*

*Zur Umsetzung des Leichtbaus werden zunehmend auch ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen aus hochfesten Stählen hergestellt. Daher werden die Bemessungsregeln für RHP und KHP K-Knoten mit Spalt für den Einsatz von hochfesten Stählen sowie für Profile mit großer Wandstärke erweitert. Da die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilverbindungen stark von den dimensionslosen Parametern abhängt, sollte dies bereits bei der Planung durch Auswahl geeigneter Parameter berücksichtigt werden. Durch sorgfältige Planung und Ausführung können ermüdungsgerechte Hohlprofilkonstruktionen realisiert werden, auch bei Verwendung hochfester Stähle.*

### *Abstract*

*To facilitate lightweight design, also fatigue loaded structures are more and more made of high strength steels. So, the design rules for RHS and CHS K-joints with gap are extended for the application of high strength steels as well as for sections with large wall thickness. Since the fatigue strength of hollow section joints strongly depends on the dimensionless parameters, this should already be considered in the planning by selecting appropriate parameters. By careful planning and execution, fatigue-proof hollow-section constructions can be realized easily, which is also valid when using high strength steels.*

Zunehmend werden auch ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen, wie z.B. Windenergieanlagen, Brücken, Krane und fliegende Bauten aus hoch- und höherfestem Stahl gefertigt, um eine leichtere Bauweise zu ermöglichen. Im Fachwerkbau ist dabei der typische K-Knoten mit Spalt die bevorzugte Knotenkonfiguration. Daher werden bestehende Bemessungsregeln auf größere Wandstärken und hochfeste Stahlsorten ausgeweitet.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden 23 K-Knoten mit Spalt aus rechteckigen Hohlprofilen (RHP) und 22 K-Knoten mit Spalt aus kreisförmigen Hohlprofilen (KHP) geprüft. Die Ermüdungsversuche werden mit konstanter Amplitude und axial belasteten Streben durchgeführt. Das Versagenskriterium ist ein durchgehender Riss durch die gesamte Wanddicke, wie es üblicherweise für Hohlprofile definiert ist.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an Hohlprofil-K-Knoten stimmen gut mit den angegebenen Kerbfallklassen im Eurocode 3-1-9 (2010) überein, der auch für Verbindungen aus höherfesten Stahlsorten S500 und S700 gilt. Da einige der Proben eine schlechte Schweißnaht aufweisen, stellen die Ermüdungsfestigkeitskurven eine Untergrenze für die Ermüdungsbemessung dar.

Versuche sowie numerische Analysen zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit neben den Abmessungen und den geometrischen Parametern auch von der Ausführung und Form der Schweißnaht abhängt. Dies wird in den Bemessungsregeln nicht berücksichtigt, kann jedoch verwendet werden, um ermüdungsbelastete Konstruktionen mit höherem Widerstand zu bauen. So konnte z.B. bei den KHP K-Knoten mit überschweißstem Spalt die Ermüdungsfestigkeit um zwei Klassen von 71 auf 90 erhöht werden. Einige Proben zeigten hierbei jedoch eine unzureichende Durchschweißung. Daher muss darauf geachtet werden, dass die Schweißnaht ordnungsgemäß ausgeführt wird.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen werden Finite-Elemente-Modelle entwickelt und durch DMS-Messungen validiert. Hierbei werden Volumenelemente verwendet und die Schweißnähte werden zur genauen Bestimmung lokaler Spannungen im Bereich der Schweißnaht modelliert. Auf dieser Basis wird eine Parameterstudie aufgebaut, um den untersuchten Abmessungsbereich zu erweitern und zu aussagekräftigen Schlussfolgerungen für die Bemessungsempfehlungen zu gelangen. Als Ergebnis der Parameterstudie werden jeweils Empfehlungen für KHP und RHP K-Knoten mit Spalt für die Wahl geeigneter Parameter gegeben.

Die Auswertung der Ermüdungsversuche sowie eine Neubewertung vorhandener, gut dokumentierter Ergebnisse für den Nennspannungsansatz ergeben Ermüdungskurven bzw. Kerbklassen für KHP und RHP K-Knoten. Darin sind nun dickwandige Profile bis  $t = 20$  mm und hochfeste Stähle bis S700 eingearbeitet.

Kerb-klasse $m = 5$	Konstruktionsdetail Belastet durch Längsspannungen		Beschreibung
90	$t_i / t_0 = 0,5$		<u>K-Knoten mit Spalt aus Kreishohlprofilen</u> $g \geq t_1 + t_2$
45	$t_i / t_0 = 1,0$		
71	$t_i / t_0 = 0,5$		<u>K-Knoten mit Spalt aus Rechteckhohlprofilen mit</u> $0,5(b_0 - b_1) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_1)$ und $g \geq 2t_0$
36	$t_i / t_0 = 1,0$		
Allgemeine Anforderungen: Für Zwischenwerte $t_0/t_i$ ist eine lineare Interpolation zwischen den benachbarten Kerbfällen erlaubt Für Streben und Gurte sind getrennte Ermüdungsnachweise erforderlich $4 \leq t_0 \leq 20$ mm $4 \leq t_i \leq 20$ mm $35^\circ \leq \Theta \leq 50^\circ$ $b_0 \leq 300$ mm $0,4 \leq b_1/b_0 \leq 1,0$ $-0,5 h_0 \leq e \leq 0,25h_0$ $(b_0/t_0) \times (t_0/t_1) \leq 32,5$ $d_0 \leq 325$ mm $0,25 \leq d_1/d_0 \leq 1,0$ $-0,5 d_0 \leq e \leq 0,25d_0$ $(d_0/t_0) \times (t_0/t_1) \leq 25$ Ausmittigkeit rechtwinklig zur Ebene: $\leq 0,02 b_0$ oder $\leq 0,02 d_0$ Bei Streben mit Wanddicken $\leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt			

Für die Bemessung nach der Strukturspannungsmethode werden SCF-Formeln bereitgestellt. Für RHP K-Knoten wird eine Neubewertung früherer und neuer Daten für den Lastfall „Axiale Belastung der Strebe (AX)“ durchgeführt und geeignete Formeln mit einer geringfügigen Änderung der ursprünglichen CIDECT-Formeln werden bereitgestellt.

Für RHP K-Knoten mit Spalt unter Strebenbiegung in der Ebene (IPB) sind in CIDECT keine Formeln angegeben. Hierfür ist ein neuer Satz von Gleichungen entwickelt worden.

Die Auswertung der Strukturspannungen von KHP K-Knoten unter axialer Belastung der Streben zeigt, dass die SCFs nach CIDECT-Formeln im Vergleich zu den SCFs nach DNVGL und aus FEA häufig sehr konservative Werte liefern. Da DNVGL einen größeren Anwendungsbereich hat und SCF-Formeln für die Lastfälle IPB und Out-of-Plane-Bending (OPB) bereitstellt, ist es sinnvoll, diese Formeln zu verwenden. Lediglich die Formel für SCFs für den Gurt unter IPB wird in dieser Untersuchung hier modifiziert, da die SCFs nach der DNVGL-Formel ansonsten nicht auf der sicheren Seite liegen würden.

Da die Parameterformeln für die Bestimmung der SCFs empfindlich auf die geometrischen Parameter reagieren, sind die Ergebnisse der SCF-Funktionen in einigen Fällen sehr konservativ. Für ein wirtschaftliches Design, insbesondere wenn viele ähnliche Knotenanschlüsse geplant sind, wird empfohlen, eine qualifizierte FE-Analyse mit einer geeigneten Finite-Elemente-Software durchzuführen. Dies sollte nur von erfahrenen Anwendern durchgeführt werden.

Die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilverbindungen hängt stark von den dimensionslosen Parametern ab, was bereits bei der Planung durch die Auswahl geeigneter Parameter berücksichtigt werden sollte. Durch sorgfältige Planung und Ausführung können ermüdungsgerechte Hohlprofilkonstruktionen auch aus hochfesten Stählen realisiert werden.

Die wichtigsten Erkenntnisse sind im Folgenden nochmals stichpunktartig zusammengefasst:

#### Experimentelle Untersuchungen:

- Ergebnisse passen gut zu Kerbklassen in Eurocode 3-1-9 (2010)
  - für  $t \leq 20$  mm
  - für S500 und S700
- 23 RHP K-Knoten mit Spalt
  - Einige Proben haben schlechte Schweißnähte: untere Grenze für Ermüdungsbemessung
- 22 KHP K-Knoten mit Spalt
  - Für K-Knoten mit überschweißtem Spalt Erhöhung um zwei Kerbklassen

Nennspannungskonzept:

- Erheblicher Einfluss der Schweißnaht → Mindestanforderung!
- Kerbklassen aus CIDECT DG8 / EN 1993-1-9 übertragbar auf Knoten mit  $t = 20$  mm und aus S700

Strukturspannungskonzept:

- Gute Übereinstimmung mit Regelwerken für Gurtbemessung (für die untersuchten Fälle maßgebend)
- Teilweise Abweichung bei Strebenbemessung
- Neu: Empfehlung für RHP K-Knoten unter Momentenbeanspruchung

Numerik und Parameterstudie:

- FE-Modelle werden entwickelt und durch DMS-Messungen validiert
- Modellierung der Schweißnaht
- RHP K-Knoten mit Spalt
  - Quadratische C3D20 Elemente, quadratische Extrapolation
- KHP K-Knoten mit Spalt
  - Lineare C3D8 Elemente, lineare Extrapolation

Entwicklung parametrisierter Formeln:

- RHP K-Knoten mit Spalt:
  - AX                                      modifizierte CIDECT-Formeln
  - IPB-conc and IPB-in                neue Formeln
  - IPB-out                                 neue Formeln
- KHP K-Knoten mit Spalt:
  - AX                                      DNV-GL Formeln
  - IPB-conc                                modifizierte DNV-GL Formeln
  - OPB                                      DNV-GL Formeln

Schlussbemerkungen:

- Parametrische SCF-Formeln reagieren sehr empfindlich auf geometrische Parameter
  - Die Ergebnisse des SCF sind in einigen Fällen sehr konservativ.
  - Für ein wirtschaftliches Design wird eine qualifizierte FE-Analyse empfohlen
  - Sollte nur von erfahrenen Benutzern durchgeführt werden.
- Die Ermüdungsfestigkeit hängt stark von den dimensionslosen Parametern ab
  - Sollte bereits in der Planung berücksichtigt werden
- Ermüdungsgerechte Hohlprofilkonstruktionen auch aus hochfesten Stählen

## 8 Ausblick Outlook

Die Untersuchungen innerhalb dieses Vorhabens haben erneut gezeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit der K-Knoten durch sekundäre Biegemomente herabgesetzt wird, die durch die ungleichförmige Lasteinleitung von den Streben in den Gurt entstehen. Bei der Ausführungsvariante der KHP K-Knoten mit überschweißtem Spalt hingegen, konnte durch die Verstärkung im Spaltbereich der Ermüdungswiderstand maßgeblich verbessert werden. Dies zeigt, dass durch entsprechende Ausführungen die Ermüdungsfestigkeiten geschweißter Knoten deutlich erhöht werden kann.

Ein ähnliches Ergebnis wird auch für eine Ausführung mit Knotenblechen erwartet. In einer von KoRoH durchgeführten Vorstudie wurden K-Knoten mit verschiedenen Ausführungsformen von aufgeschweißten bzw. eingesteckten Knotenblechen numerisch untersucht und es konnte aufgezeigt werden, dass damit eine gleichmäßigere Lasteinleitung von den Streben in den Gurt ermöglicht wird, was eine Reduktion der SCFs zur Folge hat. [11].

Obwohl die Vorteile von lokal verstärkten Hohlprofilknoten schon seit längerem bekannt sind und auch in unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, fehlen doch grundlegende Untersuchungen zum Tragverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung. Ein neu beantragtes Forschungsvorhaben mit dem Titel „Erhöhung der Ermüdungsfestigkeiten von Hohlprofilanschlüssen aus hochfesten Stählen durch formoptimierte Knotenbleche“ soll dazu beitragen, diese Lücke zu schließen.

Darin werden als Referenz für ermüdungsgerecht geschweißte Hohlknoten ohne Knotenbleche, RHP K-Knoten mit Gurten 100x100x6 und Streben 80x80x4 aus S355 mit geschliffenen Schweißnahten geprüft. Diese werden dann, um die Brücke zu den nicht optimal geschweißten RHP K-Knoten in diesem Vorhaben zu schlagen, diesen gegenübergestellt.



Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen  
List of publications related to the project

---

## **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:

- Herion, S.: Fatigue of hollow section structures - Current research and developments. In Tubular Structures XVI, 2018
- Hrabowski, J., Herion, S., Fatigue of K-joints – Review and Outlook, 1<sup>st</sup> Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering (VSOE 2018), 1 - 3 November 2018, Hanoi, Vietnam
- Hrabowski, J., Herion, S., Design recommendations for fatigue loaded hollow section K joints with gap, 8<sup>th</sup> International Fatigue Design Conference, Senlis, France, 20<sup>th</sup> & 21<sup>st</sup> November 2019
- Hrabowski, J., Herion, S.: Fatigue design of circular hollow section K-joints with gap, 17<sup>th</sup> International Symposium on Tubular Structures (ISTS17), 09 - 12 December 2019, Singapore

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Hrabowski, J., Herion, S., New developments in the fatigue design of circular hollow section K-joints, 30th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2020), Shanghai, China, June 14 - 19, 2020
- Veröffentlichung der Projektergebnisse in der Fachzeitschrift Stahlbau (voraussichtlich Mitte – Ende 2020)

## 10 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 10.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Arbeitskreissitzungen im projektbegleitenden Ausschuss	Informationsaustausch und Diskussion zum Projektfortschritt, ggf. gemeinsames Abstimmen von Maßnahmen zur Zielerreichung	pbA-Sitzung	17.03.2016 Düsseldorf 16.11.2016 Biberach 06.04.2017 Delft 05.10.2017 Zwijndrecht 10.04.2018 Karlsruhe 22.01.2019 Karlsruhe 09.10.2019 Karlsruhe
Vorstellung und Diskussion der bisherigen Ergebnisse	Informationsaustausch und Diskussion zum Projektfortschritt, ggf. gemeinsames Abstimmen von Maßnahmen zur Zielerreichung	CIDECT Annual Meeting	München, August 2015 Chicago, August 2016 Helsinki, August 2017 Kenia, August 2018 Barcelona, August 2019
Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten	Vermittlung von Kenntnissen und Methoden zum selbständigen, wissenschaftlichen Arbeiten	KIT Studienschwerpunkt Stahlbau	Christian Doskocil Na Nguyen

### 10.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Bekanntmachung von Forschungsergebnissen für Anwender aus der Praxis	Stahlbau und Steel Construction	6 und 12 Monate nach Projektende
Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen	Ermöglichung der Zugänglichkeit von Forschungsergebnissen für einen größeren Interessentenkreis	IABSE, Eurosteel ISTS, ISOPE	Gegen Projektende und fortlaufend für 24 Monate
Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	Wissensvermittlung	Lehrveranstaltungen des Konstruktiven Ingenieurbaus	Fortlaufend nach Projektende
Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	Wissensvermittlung	Wissensvermittlung in Weiterbildungsveranstaltungen des Konstruktiven Ingenieurbaus	Fortlaufend nach Projektende
Ergebnisdiskussion in europäischen Normungsausschüssen	Ergebnistransfer in die Normung	ECCS TC6 und Evolution Group für EN 1993-1-9	Fortlaufend nach Projektende
Beitrag zur Revision der CIDECT Bemessungsempfehlungen	Ergebnistransfer in Regelwerke	CIDECT DG 8	Fortlaufend nach Projektende



## **11 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept**

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

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**

Da die Untersuchungen des Forschungsvorhabens fachübergreifend ausgerichtet sind, können die Forschungsergebnisse in vielen Anwendungsgebieten genutzt werden:

Fachgebiet: Konstruktion  
Teilgebiete: Hochbau (Maste, Kranbahnen), Stahlbrückenbau, Kranbau, Windenergieanlagen  
Wirtschaftszweig: Baugewerbe, Metallerzeugung/–verarbeitung, Maschinenbau

Für alle diese Anwendungen werden Ingenieurbüros benötigt, die sich mit der Konstruktion und Bemessung derartiger Anlagen beschäftigen. In der Regel handelt es sich hierbei um KMUs.

Die Forschungsergebnisse können unmittelbar und ohne weitere Kosten umgesetzt werden. Für eine breite Anwendung und Anerkennung sollten die Ergebnisse in einem Regelwerk aufgenommen werden. Am schnellsten wird dies über eine Revision des CIDECT DG 8 geschehen können, die für das Jahr 2020 / 2021 geplant ist. Da CIDECT unmittelbar an diesem Projekt beteiligt war und fortlaufend über die Ergebnisse informiert wurde, können die Ergebnisse direkt in die Revision mit einfließen.

Parallel dazu werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Normenausschuss für die Neuauflage des Eurocode 3-1-9 vorgestellt und diskutiert, so dass sie für den bestehenden Entwurf berücksichtigt werden können.



## 13 Literaturverzeichnis References

- [1] Beale, Luther A, and A A. Toprac. *Analysis of In-Plane T, Y, and K Welded Tubular Connections*. New York: Welding Research Council of the Engineering Foundation, 1967
- [2] Dassault Systems, Simulia. Abaqus 6.11 Analysis User's Guide
- [3] DNV GL-PR-C203: Fatigue Design of offshore steel structures, Recommended Practice C203, Det Norske Veritas, 2016
- [4] DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Oktober 2011
- [5] DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Dezember 2010
- [6] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung, Dezember 2012
- [7] EN 13001-3-1: Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken: Deutsche Fassung EN 13001-3-1:2012+A1:2013
- [8] Gaber, E. Versuche und Betrachtungen über die Sicherheit von Stahlbrücken, Die Technik, Band 1 (1964), Nr. 2
- [9] Herion, S.: "Räumliche K-Knoten aus Rechteck-Hohlprofilen", Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994
- [10] Herion, S., Fleischer, O., König, D.: „Comparison of different configurations of thick-walled K-joints with gap made of RHS and CHS”, Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference. Busan, Korea, June 15-20, 2014
- [11] Herion, S., Fleischer, O., Hrabowski, J., Raso, S., Valli, A., Mastropasqua, A., Bononi, E. (2017) Laser Tube Cutting – comparison of new types of K-joints and their SCF with standard solutions. 16<sup>th</sup> International Symposium on Tubular Structures (ISTS 2017), Melbourne, Australia. CRC Press Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 215-222.
- [12] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW-1823-07/XIII-2151-07/XV-1254-07, International Institute of Welding, June 2008.
- [13] ISO 14347: Fatigue - Design procedure for welded hollow-section joints – Recommendations (2008)
- [14] Kokkonen, J., Björk, T.: "Fatigue of high strength cold-formed RHS", Lappeenranta University, CIDECT 7X 7X-9/06, 2006
- [15] Kuhlmann, U. et al: „Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundhohlprofilen mit dickwandigen Gurten: *Fatigue-resistant trusses of circular hollow sections with thickwalled chords*". Forschungsvereinigung für Stahlanwendung e.V., FOSTA / AiF ZUTECH Forschungsprojekt P815, Düsseldorf, ISBN 978-3-942541-51-0, 2014, 2014
- [16] Mang, F., Bucak, Ö., Herion, S.: „Zeit- und Dauerfestigkeit von geschweißten unversteiften Rechteck-Hohlprofilen von Fachwerken und Vierendeelträgern, K-Knoten mit Spalt und Überlappung“, Schlussbericht Teile 1 und 2, ECCS 7210-SA/111, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe (1987 und 1989)
- [17] Mang, F., Bucak, Ö., Klingler, J.: „Wöhlerlinienkatalog für Hohlprofilverbindungen“, Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., 1987
- [18] Mang, F., Herion, S., Bucak, Ö., Dutta, D.: "Fatigue behaviour of K-joints with gap and with overlap made of rectangular hollow sections", International Symposium on Tubular Structures ISTS, Lappeenranta, Finland (1990)
- [19] Mang, F., Bucak, Ö., Herion, S.: „Zeit- und Dauerfestigkeit von räumlichen, geschweißten unversteiften Rund- und Rechteck-Hohlprofilverbindungen sowie Verstärkungsmaßnahmen“, Schlussbericht Teil 3, ECCS 7210-SA/114, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe, 1993
- [20] Mang, F., Bucak, Ö., Stauf, H.: "Fatigue behaviour of welded hollow section joints and their connections made of high-strength steels", Conference Proceedings ISOPE-93, Singapore, 1993
- [21] Mang, F., Bucak, Ö., Herion, S.: „Fatigue behaviour of hollow section joints of high-tensile steel, Final report CIDECT 7L, 1996
- [22] Neuber, H. Kerbspannungslehre, Springer Verlag, 1. Aufl., 1973

- [23] Nguyen, T.H.N.: „Vergleichende Untersuchungen zur Eingruppierung der Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofil K-Knoten auf der Grundlage gängiger Normen“, Master Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2018
- [24] Noordhoek, C., Wardneier, J., Dutta, D.: „The fatigue behaviour of welded joints in square hollow sections“, CIDECT 7A, Technical steel research EUR 7401, Commission of the European Communities, Luxemburg, 1981
- [25] Puthli, R.S., Wardenier, J., de Koning, C.H.M., van Wingerde, A.M., vanDooren, F.J.: “Numerical and experimental determination of strain (stress) concentration factors of welded joints between square hollow sections”, Heron Vol. 33 No. 2, 1988
- [26] Puthli, R.: “Fatigue strength of welded unstiffened RHS-joints in latticed structures and vierendeel girders”, Final Report, Part IV: Design Recommendations, ECCS 7210-SA/111, TU Delft (1989)
- [27] Puthli, R., Herion, S., Bergers, J.: Influence of wall thickness and steel grade on the fatigue strength of towers of offshore wind energy converters, Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2006.
- [28] Puthli, R., Herion, S.: Wirtschaftliches Bauen von Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahlhohlprofilen, Abschlussbericht Forschung für die Praxis P 591, voraussichtliche Veröffentlichung September 2009, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf.
- [29] Schumacher, A.: “Fatigue behavior of welded circular hollow section joints in bridges”, Ph.D. Thesis EPFL 2727 Lausanne, 2003
- [30] Steinhardt, O. Die Nietverbindung im Lichte moderner Forschung. Aus Lehre und Forschung – Abhandlungen und berichte, Schwerdtfeger-Verlag, Karlsruhe, 1948
- [31] Thum, A. Die Entwicklung der Lehre von der Gestaltfestigkeit, VDI-Z 88, Nr. 45/46, S.609-615, 1944
- [32] Ummenhofer, T., Herion, S., Weidner, P., Hrabowski, J., Schneider, M., Josat, O.: “Extension of the fatigue life of existing and new welded hollow section joints”, Karlsruhe Institute for Technology, CIDECT 7Y 7Y-7/11, 2011
- [33] Van Wingerde, A.M.: “The fatigue behavior of T- and X-joints made of square hollow sections” Ph.D., Delft University of Technology, 1992
- [34] Van Wingerde, A.M, Packer, J.A., Wardenier, J., Dutta, D.: „The fatigue behaviour of K-joints made of square hollow sections“. CIDECT 7P, Final report 7P-19/96, 1996
- [35] Van Wingerde, A.M, Packer, J.A., Wardenier, J.: „SCF formulae for fatigue design of K-connections between square hollow sections“, Journal of Constructional Steel Research 43.1-3, 1997, 87–118.
- [36] Wagner, W.: „Computergestützte Tragwerksmodellierung“, Vorlesungsmanuskript, Karlsruhe Institute of Technology, 2016
- [37] Wardenier, J., Mang, F., Dutta, D.: „Fatigue strength of welded, unstiffened RHS joints in lattice structures and Vierendeel girders“, CIDECT 7E/7F, Final report 720-SA/111, Commission of the European Communities, 1989
- [38] Zirn, R.: “Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Rohrknotenpunkte und Rohrlaschenverbindungen“, Dissertation Universität Stuttgart, 1975
- [39] Zhao, X.-L., Herion, S., Packer, J.A., Puthli, R.S., Sedlacek, G., Wardenier, J., Weynand, K., v. Wingerde, A., Yeomans, N.F: „Geschweißte Anschlüsse von runden und rechteckigen Hohlprofilen unter Ermüdungsbelastung“, CIDECT Konstruieren mit Hohlprofilen 8, TÜV Verlag GmbH, Köln 2002, ISBN 3-8249-0688-0

## **14 Danksagung Acknowledgement**

Unser herzlicher Dank gilt den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises unter Leitung von Dr. Gregor Nüsse der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen zu diesem Vorhaben.

Als Unternehmen mit den aktiv an den Sitzungen teilnehmenden Arbeitskreismitgliedern seien dazu erwähnt:

Kirstin Bach, Tata Steel International (Germany) GmbH

Erhard Baier, Baier Consulting

Julius Beyß, Terex Cranes Germany GmbH

Simon Bove, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart

Björn Eichler, Konecranes GmbH

Christoph Eiwand, Liebherr Werk Biberach GmbH

Walter Gundel, SFI

Susanne Höhler; Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

Hans Holtkamp, Tata Steel International (Germany) GmbH

Christian Remde, Vallourec Deutschland GmbH

Harald Riedinger, XCMG Europe GmbH

Boris Straetmans, Vallourec Deutschland GmbH

Jörg Stötzel, Konecranes GmbH

# **ANHANG A**


## **Herstellung der Probekörper**

- A1 – Materialzeugnisse**
- A2 – Nomenklatur**
- A3 – Schweißen**
- A4 – Abmessungen**

## A1 Materialzeugnisse

### Große KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 323.9x20 mm

		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83458RS16 (A03) Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

		(A06.2) <b>Suborder / Unterauftrag</b>
		(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr. H. STRAETMANN, TEL.: 3475 Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	HOT FINISHED SEAMLESS STEEL TUBES SEAMLESS PLAIN UNMACHINED ENDS INSIDE AND OUTSIDE WITHOUT RUST PROTECTION  NAHTLOSE STAHLROHRE, WARMGEFERTIGT NAHTLOS ENDEN GLATT, UNBEARBEITET INNEN UND AUSSEN OHNE ROSTSCHUTZ  EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 S355J2H	
(A14)  16 0769-CPR-VAS-00484-1		

	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
1			O.D. 323,9 MM X WTH. 20 MM A.D. 323,9 MM X WD. 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 11000 - 13000 MM HL 11000 - 13000 MM



**Große KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83458RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
1		1	11,18	1.642

	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
1	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-
max	-	0.220	0.550	1.60	0.030	0.0300	-	-	-	-	-
258859	Oxygen (BOF)	0.120	0.180	1.35	0.015	0.0010	0.028	0.010	0.030	0.020	0.010

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	CQ 03 %	EF 11 %					
min	-	-	-	-	-	2.000					
max	-	-	-	-	.47	-					
258859	0.090	0.007	0.001	0.0130	.37	5.906					

CQ 03	$CEV/CE = C + MN/6 + (CR+MO+V)/5 + (NI+CU)/15$
EF 11	$EF = (AL + TI/2 + V/2 + 2 * NB/7) / N$

Heats fully killed  
Beruhigter Stahl

$$N \leq (AL/2 + TI/4 + V/4 + NB/7)$$

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	TUBE STRIP TEST SPECIMEN / ROHRSTREIFENPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83458RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.						
		mm	ReH MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -						
min		-	345	470	22.0	-						
max		-	-	630	-	-						
258859	6347	25.08X20.46	370	519	32.0	0.71						

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 20 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41)	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.						
		qcm	J	J	J	J						
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0						
max		-	-	-	-	-						
258859	6347	0.800	194	182	175	184						

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	NORMALIZED FINISH-ROLLED >850 DEGREES C/AIR NORMALISIEREND ENDGEWALZT >850 GRAD C/LUFT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA S355J2H
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA S355J2H

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83458RS16 Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(ZD1)  
 The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, ZD2, ZD3)


Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168  
 Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Streben 244x20 mm**

	(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			No. / Nr. : 83459RS16 (A03) Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

	(A08.2) Suborder / Unterauftrag
	(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr. H. STRAETMANN, TEL.: 3475 Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	<p>HOT FINISHED SEAMLESS STEEL TUBES SEAMLESS PLAIN UNMACHINED ENDS INSIDE AND OUTSIDE WITHOUT RUST PROTECTION</p> <p>NAHTLOSE STAHLROHRE, WARMGEFERTIGT NAHTLOS ENDEN GLATT, UNBEARBEITET INNEN UND AUSSEN OHNE ROSTSCHUTZ</p> <p>EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 S355J2H</p>
(A14) 	

Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
2			O.D. 244,5 MM X WTH. 20 MM A.D. 244,5 MM X WD. 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 11000 - 13000 MM HL 11000 - 13000 MM

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Streben 244x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83459RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
	2	1	10,94	1.214

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
2	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-
max	-	0.220	0.550	1.60	0.030	0.0300	-	-	-	-	-
256262	Oxygen (BOF)	0.120	0.190	1.34	0.014	0.0020	0.025	0.020	0.020	0.020	0.010

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	CQ 03 %	EF 11 %						
min	-	-	-	-	-	2.000						
max	-	-	-	0.0120	.47	-						
256262	0.090	0.004	0.001	0.0110	.37	6.571						

CQ 03	$CEV/CE = C + MN/6 + (CR+MO+V)/5 + (NI+CU)/15$
EF 11	$EF = (AL + Ti/2 + V/2 + 2 * NB/7) / N$

Heats fully killed Beruhigter Stahl
--

AL >= 2 X N
-------------

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	TUBE STRIP TEST SPECIMEN / ROHRSTREIFENPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Streben 244x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83459RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.						
		mm	ReH MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -						
min		-	345	470	22.0	-						
max		-	-	630	-	-						
256262	6090	25.03X20.11	379	517	29.0	0.73						

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 20 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41)	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.						
		qcm	J	J	J	J						
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0						
max		-	-	-	-	-						
256262	6090	0.800	175	146	181	167						

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	NORMALIZED FINISH-ROLLED >850 DEGREES C/AIR NORMALISIEREND ENDGEWALZT >850 GRAD C/LUFT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA S355J2H
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA S355J2H

**Große KHP-K-Knoten S355J2H Streben 244x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83459RS16 (A03) Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(Z01)  
 The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168

Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83460RS16 Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(A01)	(A08.1)
	(A08.2) <b>Suborder / Unterauftrag</b>
(A06.1)	
(A06.2) Orderer / Besteller	(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.  Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	HOT FINISHED SEAMLESS STEEL TUBES SEAMLESS PLAIN UNMACHINED ENDS INSIDE AND OUTSIDE WITHOUT RUST PROTECTION  NAHTLOSE STAHLROHRE, WARMGEFERTIGT NAHTLOS ENDEN GLATT, UNBEARBEITET INNEN UND AUSSEN OHNE ROSTSCHUTZ

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
3			O.D. 323,9 MM X WTH. 20 MM A.D. 323,9 MM X WD. 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 10000 - 12000 MM HL 10000 - 12000 MM



**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			No. / Nr. : 83460RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
3		1	9,69	1.422

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
3	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	0.140	0.200	1.20	-	-	0.015	-	-	-	0.200
max	-	0.180	0.500	1.70	0.025	0.0150	0.050	0.250	0.800	0.400	0.400
204157	Oxygen (BOF)	0.150	0.280	1.50	0.013	0.0020	0.023	0.010	0.670	0.100	0.200

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	W %	B %						
min	0.050	-	-	-	0.100	-						
max	0.120	0.050	0.050	0.0200	0.350	0.0008						
204157	0.060	0.003	0.027	0.0047	0.100	0.0001						

Heats fully killed  
Beruhigter Stahl

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	ROUND TEST SPECIMEN / RUNDPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Gurte 323.9x20 mm**

(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83460RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Diameter Durchmesser	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.					
		mm	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -					
min		-	690	770	16.0	-					
max		-	-	960	-	-					
204157	31A	09.99	798	850	17.0	0.94					

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 50 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41) qcm	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.				
		qcm	J	J	J	J				
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0				
max		-	-	-	-	-				
204157	31A	0.800	119	139	142	133				

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	QUENCHED HAERTEN	12 MIN 940 DEGREES C WATER 12 MIN 940 GRAD C WASSER	
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	TEMPERED ANLASSEN	24 MIN 670 DEGREES C AIR 24 MIN 670 GRAD C LUFT	
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSACHVERSTAENDIGEN: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Gurte 323.9x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83460RS16 Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(Z01)  
 The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168  
 Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 244x20 mm**

	(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			No. / Nr. : 83461RS16 (A03) Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

	(A08.1)
	(A08.2) Suborder / Unterauftrag
(A06.1) Customer / Kunde	
(A06.2) Orderer / Besteller	(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.  Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	<p>HOT FINISHED SEAMLESS STEEL TUBES SEAMLESS PLAIN UNMACHINED ENDS INSIDE AND OUTSIDE WITHOUT RUST PROTECTION</p> <p>NAHTLOSE STAHLROHRE, WARMGEFERTIGT NAHTLOS ENDEN GLATT, UNBEARBEITET INNEN UND AUSSEN OHNE ROSTSCHUTZ</p>

(A13) Vallourec Item Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
4			O.D. 244,5 MM X WTH. 20 MM A.D. 244,5 MM X WD. 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 10000 - 12000 MM HL 10000 - 12000 MM

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 244x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83461RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
4		1	9,56	1.060

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
4	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	0.140	0.200	1.20	-	-	0.015	-	-	-	0.200
max	-	0.180	0.500	1.70	0.025	0.0150	0.050	0.250	0.800	0.400	0.400
358247	Oxygen (BOF)	0.150	0.280	1.52	0.012	0.0010	0.022	0.030	0.670	0.110	0.210

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	W %	B %					
min	0.050	-	-	-	0.100	-					
max	0.120	0.050	0.050	0.0200	0.350	0.0008					
358247	0.060	0.004	0.027	0.0042	0.100	0.0003					

Heats fully killed

Beruhigter Stahl

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (c10.1)	ROUND TEST SPECIMEN / RUNDPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (c03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (c02)	longitudinal / längs

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 244x20 mm**

	(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			No. / Nr. : 83461RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Diameter Durchmesser	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.					
		mm	ReH MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -					
min		-	690	770	16.0	-					
max		-	-	960	-	-					
358247	41A	10.00	818	865	17.5	0.95					

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 50 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41) qcm	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.					
		qcm	J	J	J	J					
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0					
max		-	-	-	-	-					
358247	41A	0.800	145	152	156	151					

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	QUENCHED HAERTEN	12 MIN 940 DEGREES C WATER 12 MIN 940 GRAD C WASSER	
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	TEMPERED ANLASSEN	24 MIN 670 DEGREES C AIR 24 MIN 670 GRAD C LUFT	
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50

**Große KHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 244x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83461RS16 Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(Z01)  
 The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)


Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168  
 Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83462RS16 (A03) Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

	(A08.1)  (A08.2) <b>Suborder / Unterauftrag</b>
(A06.1) Customer / Kunde	
(A06.2) Orderer / Besteller	(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.  Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 S355J2H
(A14)  16 0769-CPR-VAS-00484-1	

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
5			300 MM X 300 MM X 20 MM 300 MM X 300 MM X 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 11000 - 13000 MM HL 11000 - 13000 MM



**Große RHP-K-Knoten S355J2H Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)		(A02)
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	
		No. / Nr. : 83462RS16 Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(A13)	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
5		2	24,80	4.245

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
5	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-
max	-	0.220	0.550	1.60	0.030	0.0300	-	-	-	-	-
220278	Oxygen (BOF)	0.120	0.180	1.34	0.015	0.0020	0.038	0.020	0.040	0.030	0.010
257813	Oxygen (BOF)	0.130	0.190	1.33	0.012	0.0030	0.034	0.020	0.050	0.030	0.010

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	CQ 03 %	EF 11 %					
min	-	-	-	-	-	2.000					
max	-	-	-	0.0120	.47	-					
220278	0.090	0.005	0.001	0.0110	.37	7.798					
257813	0.100	0.004	0.001	0.0120	.39	7.190					

CQ 03	$CEV/CE = C + MN/6 + (CR+MO+V)/5 + (NI+CU)/15$
EF 11	$EF = (AL + TI/2 + V/2 + 2 * NB/7) / N$

Heats fully killed Beruhigter Stahl
--

AL >= 2 X N
-------------

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83462RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.						
		mm	ReH MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -						
min		-	345	470	22.0	-						
max		-	-	630	-	-						
220278	6379	25.12X19.95	391	524	29.5	0.75						
257813	6378	25.10X19.95	400	523	29.0	0.76						

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 20 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41)	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.						
		qcm	J	J	J	J						
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0						
max		-	-	-	-	-						
220278	6379	0.800	161	168	165	165						
257813	6378	0.800	173	164	160	166						

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	HOT ROLLED WARMGEWALZT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**

	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA S355J2H
--	---

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83462RS16 (A03) Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A04, B06)



**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**

ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA S355J2H
---

(Z01)

The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	_____
	_____
@	_____
Stamp / Stempel	


Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168

Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Streben 220x220x20 mm**

		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83463RS16 (A03) Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A01)	(A08.1)
	(A08.2) Suborder / Unterauftrag
(A06.1) Customer / Kunde	
(A06.2) Orderer / Besteller	(A07.2) Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.  Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04) Description of the product Erzeugnisbeschreibung	EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 S355J2H
(A14)  16 0769-CPR-VAS-00484-1	

(A13) Vallourec Item Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
6			220 MM X 220 MM X 20 MM 220 MM X 220 MM X 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 11000 - 13000 MM HL 11000 - 13000 MM

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Streben 220x220x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83463RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
6		1	11,30	1.330

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
6	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-
max	-	0.220	0.550	1.60	0.030	0.0300	-	-	-	-	-
358409	Oxygen (BOF)	0.130	0.190	1.36	0.015	0.0020	0.035	0.010	0.030	0.020	0.010

(B07.1) Heat Schmelze	V %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	CQ 03 %	EF 11 %						
min	-	-	-	-	-	2.000						
max	-	-	-	0.0120	.47	-						
358409	0.090	0.004	0.001	0.0120	.38	6.857						

CQ 03	$CEV/CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$
EF 11	$EF = (Al + Ti/2 + V/2 + 2 * Nb/7) / N$

Heats fully killed  
Beruhigter Stahl

AL >= 2 X N

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	FLAT TEST SPECIMEN / FLACHPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Streben 220x220x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83463RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.					
		mm	ReH MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -					
min		-	345	470	22.0	-					
max		-	-	630	-	-					
358409	6135	25.10X19.34	392	511	30.5	0.77					

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 20 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41) qcm	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.					
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0					
max		-	-	-	-	-					
358409	6135	0.800	162	159	162	161					

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	HOT ROLLED WARMGEWALZT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**

	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA S355J2H
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA S355J2H

(Z01)



The supplied products are in compliance with the requirements of the order

**Große RHP-K-Knoten S355J2H Streben 220x220x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83463RS16 (A03) Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168

Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 770 Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83464RS16 Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(A01)	(A08.1)
(A06.1)	(A08.2)
Customer / Kunde	Suborder / Unterauftrag
(A06.2)	(A07.2)
Orderer / Besteller	Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.  Date / Datum 29.06.2016
(B01, B02, B04)	
Description of the product Erzeugnisbeschreibung	EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 FINEXCELL® 770 IMPACTFIT 50 MATERIAL DATA SHEET FIN-20 (REV. 0, 10.07.2013)

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
7			300 MM X 300 MM X 20 MM 300 MM X 300 MM X 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 9780 MM HL 9780 MM

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
7		1	9,78	1.670



**Große RHP-K-Knoten FineXcell 770 Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			No. / Nr. : 83464RS16 (A03) Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
7	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	0.140	0.250	1.50	-	-	0.015	-	0.650	0.100	0.200
max	-	0.160	0.350	1.60	0.015	0.0050	0.030	0.200	0.750	0.180	0.300
214055	Oxygen (BOF)	0.150	0.280	1.54	0.011	0.0040	0.019	0.070	0.660	0.110	0.200

(B07.1) Heat Schmelze	V %	As %	Sn %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	H PPM	W %	B %	Ca %		
min	0.060	-	-	-	0.025	-	-	0.100	-	-		
max	0.080	0.0200	0.0150	0.010	0.035	0.0100	5.0000	0.200	0.0008	0.0050		
214055	0.060	0.0030	0.0030	0.004	0.027	0.0046	1.6000	0.120	0.0002	0.0016		

Heats fully killed  
Beruhigter Stahl

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	FLAT TEST SPECIMEN / FLACHPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 770 Gurte 300x300x20 mm**

(A01)		INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83464RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.						
		mm	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -						
min		-	730	820	15.0	-						
max		-	-	1000	-	-						
214055	3310A	25.13X20.88	773	832	15.0	0.93						

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 50 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41)	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.						
		qcm	J	J	J	J						
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0						
max		-	-	-	-	-						
214055	3310A	0.800	64.0	47.0	49.0	53.3						

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	NORMALIZED FINISH-ROLLED >850 DEGREES C/AIR NORMALISIEREND ENDGEWALZT >850 GRAD C/LUFT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA FINEXCELL® 770 IMPACTFIT 50
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA FINEXCELL® 770 IMPACTFIT 50

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 770 Gurte 300x300x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83464RS16 Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

(Z01)  
The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168

Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäss EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.

Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 220x220x20 mm**

	(A01)		(A02)
			INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
			(A03)
			No. / Nr. : 83465RS16 Page/Seite: 1 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(A01)	(A08.1)
	(A08.2) <b>Suborder / Unterauftrag</b>
(A06.1)	
(A06.2)	(A07.2)
<b>Orderer / Besteller</b> VALLOUREC DEUTSCHLAND GMBH / WERK RATH - STO	<b>Orderer Order-No. / Besteller Bestell-Nr.</b> H. STRAETMANN, TEL.: 3475 <b>Date / Datum</b> 29.06.2016
(B01, B02, B04) <b>Description of the product</b> <b>Erzeugnisbeschreibung</b>	
	EN 10210-1:2006 EN 10210-2:2006 FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50 MATERIAL DATA SHEET FIN-02 (REV. 0, 14.06.2012)

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B14) Item text Positionstext	(B09) Dimensions Abmessung	(B10) Single length Einzellänge
8			220 MM X 220 MM X 20 MM 220 MM X 220 MM X 20 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 6530 MM HL 6530 MM

(A13) Position	(A09) Cust. Item Position	(B08) Quantity Stück	(B11) Total length Gesamtlänge m	(B13) Weight Gewicht kg
8		1	6,53	795

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 220x220x20 mm**

	(A01)		
		INSPECTION CERTIFICATE ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004	(A02)
		No. / Nr. : 83465RS16 Page/Seite: 2 / 4 Date/Datum: 28.11.2016	(A03)

Position	Delivery Note-No Lieferschein-Nr.	Packing list-No Packlisten-Nr.
8	27611	

(C71)

**HEAT CHEMICAL ANALYSIS / SCHMELZANALYSE**

(B07.1) Heat Schmelze	(B15) Process Erschmelz.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	0.140	0.250	1.50	-	-	0.015	-	0.650	0.100	0.200
max	-	0.160	0.350	1.60	0.015	0.0050	0.030	0.200	0.750	0.180	0.300
242754	Oxygen (BOF)	0.160	0.310	1.50	0.010	0.0020	0.025	0.040	0.670	0.100	0.200

(B07.1) Heat Schmelze	V %	As %	Sn %	Ti %	Nb(Cb) %	N %	H PPM	W %	B %	Ca %		
min	0.060	-	-	-	0.025	-	-	0.100	-	-		
max	0.080	0.0200	0.0150	0.010	0.035	0.0100	5.0000	0.200	0.0008	0.0050		
242754	0.060	0.0030	0.0030	0.004	0.029	0.0049	2.5000	0.110	0.0003	0.0018		

Heats fully killed  
Beruhigter Stahl

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

Type / Form (C10.1)	FLAT TEST SPECIMEN / FLACHPROBE
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	ROOM TEMPERATURE / RAUMTEMPERATUR
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 220x220x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83465RS16 (A03) Page/Seite: 3 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

**TENSILE TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES ZUGVERSUCHS**

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C10) Dimension Abmessung	(C11) YS Streckgr.	(C12) TS Zugfest.	(C13) Elong. Dehnung	(C14.1) Ratio Verhältn.					
		mm	R <sub>p0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	5,65√S <sub>0</sub> %	R/R <sub>m</sub> -					
min		-	650	700	14.0	-					
max		-	-	960	-	-					
242754	7245	25.07X19.34	863	909	14.0	0.95					

**IMPACT TEST RESULTS / ERGEBNISSE DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS**

Type / Form (C40)	Charpy-V / Charpy-V
Test temperature / Prüftemperatur (C03)	- 50 DEGREES C
Direction / Richtung (C02)	longitudinal / längs

(B07.1) Heat Schmelze	(C00.1) Test Piece Prüfstück	(C41)	(C42.1) Impact1 Arbeit1	(C42.1) Impact2 Arbeit2	(C42.1) Impact3 Arbeit3	(C43.3) Mean Mittelw.					
		qcm	J	J	J	J					
min		-	19.0	19.0	19.0	27.0					
max		-	-	-	-	-					
242754	7245	0.800	37.0	40.0	147	74.6					

(D55)

**OTHER TESTS ON PIPE / SONSTIGE PRUEFUNGEN**

Test Prüfung	Conditions Prüfbedingungen	Test rate Prüfumfang	Result Ergebnis
HEAT TREATMENT WAERMEBEHANDLUNG	NORMALIZED FINISH-ROLLED >850 DEGREES C/AIR NORMALISIEREND ENDGEWALZT >850 GRAD C/LUFT		
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01) OBERFLAECHEBESCHAFFEN- HEIT UND MASSE (D01)		EACH PIPE/ TUBE JE ROHR	SATISFACTORY BESTANDEN

(A04, B06)

**MARKING, IDENTIFICATION / KENNZEICHNUNG, IDENTIFIKATION**



	MANUFACTURER'S BRAND: VAD 41 INSPECTOR'S STAMP: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50
	ZEICHEN DES HERSTELLERS: VAD 41 STEMPEL DES WERKSSACHVERSTAENDIGEN: WA FINEXCELL® 690 IMPACTFIT 50

**Große RHP-K-Knoten FineXcell 690 Streben 220x220x20 mm**

	(A01)	INSPECTION CERTIFICATE (A02) ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204:2004
		No. / Nr. : 83465RS16 (A03) Page/Seite: 4 / 4 Date/Datum: 28.11.2016

(Z01)  
 The supplied products are in compliance with the requirements of the order  
 Die gelieferten Erzeugnisse stimmen mit den Anforderungen des Auftrages überein

(A05, Z02, Z03)

Date / Datum	28.11.2016
Validated by Bestätigt durch	Inspection Representative Abnahmebeauftragter
	
	
@	log@finecell.com
Stamp / Stempel	

Indication in parentheses correspond to attributes according to EN 10168

Die Bezeichnungen in Klammern entsprechen den Kennnummern gemäß EN 10168

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

**Kleine RHP K-Kntoen S355J2H Streben 80x80x4 mm**

A01

Seite: 1 / 1

A03	Zertifikat-Nr. 52782/000
A02	Bescheinigung APZ EN 10204-3.1
A06	Besteller ;
B07	Fertigungsauftrag-Nr. 7189925
A11	Lieferschein-Nr. 1496498
B01	
B02	Werkstoff S355J2H EN10219-1:2006

B03 / B10 Ausführungsnorm / Zeichnungsnummer / Kerbhöhprüfung  
zusätzliche Anforderungen Ausführung lt. EN 10219 Teil 1 + 2 / -- /

A08	A10	A07	A09	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	D01
Kd-Aufnr.	Pos.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnummer	Fert.Charge	Abmessung	Länge	Gesamtsumme	Gewicht	Oberfläche			
924865	6	Projekt FOSTA.F1132	F345713106000	0001011068	VPEP 80/ 80X 4,00	6.000,00 mm	24,0 m	211 kg	ungebeizt			

**Schmelzanalyse [%]**

B07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C87	C88	C89	
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Nb	Zr	N	B				CEV
631431	0,0700	0,2190	1,0400	0,0090	0,0040	0,0340	0,0300	0,0140	0,0040	0,0500	0,0050	0,0190	0,0254	0,0022	0,0056	0,0002				0,2554

**Mechanische Eigenschaften**

B07	C02	C11	C12	C13	C14	C20	C30	C40	C41	C42	C43
Coilcharge/Probennummer	Probenrichtung längs	Streckgrenze ReH/Rp0,2 [MPa]	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Bruchdehnung A5/A80 [%]	Re/Rm	Prüftemp. [°C]	Probenform	Probenbreite	1.	2.	3.
952627/0000	20160519	0000	409	492	0,83				[J]	[J]	[J]

**Sonstige Prüfungen**

B07	D02	D51
Fertigungscharge	Schweißnahtprüfung	Querfaltversuch
0001011068	100 % Wirbelstrom geprüft	entspricht

Z01  
Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Z02/Z03  
Datum/Abnahmebeauftragter 19.05.2016 / Hindinger Tel.: +43/50304/14-504



**Kleine RHP K-Knoten S500MC Gurte 130x130x4 mm**

A01

Seite: 1 / 1

A03	Zertifikat-Nr.	29737/000
A02	Bescheinigung	APZ EN 10204-3.1
A05	Besteller	
B07	Fertigungsauftrag-Nr.	7084862
A11	Lieferschein-Nr.	1496498
B02	Werkstoff	S500MC EN10149-2:2013

B03 / B10 Ausführungsschem. / Zeichnungsnummer / Kreisbeschäftigung  
zusätzliche Anforderungen / 10-1448--- /

A08	A10	A07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	B13	D01
Kd-Aufnr.	Pos.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnnummer	Fert.Charge	Abmessung	Länge	Gesamtsumme	Gewicht	Oberfläche											
924865	2	ProJEKt_F087A_P1132	X580223	0000393946	VHP08-716 130/130x4	6.000,00 mm	24,0 m	358 kg	un gebeizt											

**Schmelzanalyse [%]**

B07	Schmelze	27-8376
C71	C	0,0640
C72	Si	0,1800
C73	Mn	1,5000
C74	P	0,0130
C75	S	0,0020
C76	Al	0,0420
C77	Cr	0,0400
C78	Ni	0,0300
C79	Mo	0,0100
C80	Cu	0,0100
C81	V	0,0500
C82	Ti	0,0000
C83	Nb	0,0330
C84	Zr	0,0000
C85	N	0,0120
C86	B	0,0003
C93	CEV	0,3367

**Mechanische Eigenschaften**

B07	Coilcharge/Probennummer	250007/0001
C02	Probenrichtung	längs
C11	Streckgrenze	573
C12	Zugfestigkeit	649
C13	Bruchdehnung	24,8
C14	Re/Rm	0,88
C40	Prüftemp.	
C41	Probenform	
C42	Probenbreite	
C43	Av	

**Sonstige Prüfungen**

B07	Fertigungscharge	0000393946
D02	Schweißnahtprüfung	100 % Wirbelstrom geprüft
D51	Querfaltversuch	entspricht

Z01

Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Z02/Z03 Datum/Abnahmebeauftragter 18.12.2012 / Hindinger Tel.: +43/50304/14-504

**Kleine RHP K-Knoten S500MC Streben 80x80x4 mm**

A03	Zertifikat-Nr.	29787/000
A02	Fertigungsauftrag-Nr.	7189919
A06	Bescheinigung	APZ EN 10204-3.1
A06	Lieferschein-Nr.	1496498
A06	Besteller	voestalpine Hohlprofile
B03 / B10	Werkstoff	S500MC EN10149-2:2013
zusätzliche Anforderungen <b>Ausführg. lt. EN 10219 Teil 1 + 2 / -- /</b>		

A08	A10	A07	A09	B07	B06	B09	B08	B13	D01
Kd-Aufnr.	Pos.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnummer	Fert.Charge	Abmessung	Länge	Gesamtsumme	Gewicht	Oberfläche
924855	4	Projekt FOSTA_P1132	K242613	0001011061	VFP 80 / 80x 4,00	6.000,00 mm	24,0 m	211 kg	ungebeizt

**Schmelzeanalyse [%]**

B07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C93
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Nb	Zr	N	B	CEV
56-3025	0,0640	0,1800	1,4800	0,0100	0,0030	0,0390	0,0300	0,0300	0,0100	0,0100	0,0500	0,0000	0,0290	0,0000	0,0120	0,0002	0,3313

**Mechanische Eigenschaften**

B07	C02	C11	C12	C13	C14	C03	C40	C41	C42	C42	C42	C43
Coilcharge/Probennummer	Probenrichtung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Re/Rm	Prüftemp.	Probenform	Probenbreite	1.	2.	3.	Av
251753/0001_20130109_0000	längs	ReH/ReL/2lMPa	Rm(MPa)	A5/A80 [%]	0,88	[°C]		[J]	[J]	[J]	[J]	[J]

**Sonstige Prüfungen**

B07	D02	D01
Fertigungscharge	Schweißnahtprüfung	Querfallversuch
0001011061	100 % Wirbelstrom geprüft	entspricht

Seite: 1 / 1

Z01  
Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Z02/Z03  
Datum/Abnahmebeauftragter 09.01.2013 / Hindinger Tel.: +43(0)304/14-504

**Kleine RHP K-Knoten S700MC Gurte 130x130x4 mm**

A01

Seite: 1 / 1

A03	Zertifikat-Nr.	29738/000
A02	Beschreibung	APZ EN 10204-3.1
A06	Besteller	
B07	Fertigungsauftrag-Nr.	7084863
A11	Lieferschein-Nr.	1496498
B01	voestalpine Hohlprofile	
B02	Werkstoff	
Z04		

B03 / B10 Ausführungsm. / Zeichnungsnummer / Karlsruheprüfung  
zusätzliche Anforderungen / 10-1448--- /

A08	A10	A07	A09	B06	B08	B13	D01
Kd.-Aufnr.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnnummer	Fert.Charge	Abmessung	Länge	Gesamtsumme	Oberfläche
924865	1	Projekt POSTA P1132 K580223	0000393947	YHPO8-716 130/130x4	6.000,00 mm	24,0 m	358 kg Ungebildet

Schmelzanalyse [%]

B07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C88	C93
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Nb	Zr	N	B		CEV
56-2992	0,0600	0,2400	1,8500	0,0100	0,0030	0,0310	0,0300	0,1000	0,0200	0,0100	0,0100	0,1100	0,0610	0,0000	0,0070	0,0002		0,3877

Mechanische Eigenschaften

B07	C02	C11	C12	C13	C14	C40	C41	C42	C42	C42	C43	
Coilcharge/Probenummer	Probenrichtung längs	Streckgrenze ReH/Rp0,2[MPa]	Zugfestigkeit Rm[MPa]	Bruchdehnung A5/A80 [%]	Re/Rm	Prüftemp. [°C]	Probenform	Probenbreite	1.	2.	3.	Av
250045/0001	20121217 0000	0001 längs	743	849	0,88				[J]	[J]	[J]	[J]

Sonstige Prüfungen

B07	D02	D51
Fertigungscharge	Schweißnahtprüfung	Querfaltversuch
0000393947	100 % Wirbelstrom geprüft	entspricht

Z01  
Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Z02/Z03 Datum/Abnahmebeauftragter 18.12.2012 / Hindinger Tel.: +43/50304/14-504

**Kleine RHP K-Knoten S700MC Gurte 100x100x6 mm**

A01

Seite: 1 / 1

A03	Zertifikat-Nr.	29785/000
A02	Bescheinigung	APZ EN 10204-3.1
A06	Besteller	
B07	Fertigungsauftrag-Nr.	7189917
A11	Lieferschein-Nr.	1496498
B01	voestalpine Hohlprofile	
B02	Werkstoff	S700MC EN10149-2:2013

Z04

B03 / B10	Ausführungsform / Zeichnungsnummer / Nachschichtprüfung	
zusätzliche Anforderungen Ausführung lt. EN 10219 Teil 1 + 2 / -- /		

A08	A10	A07	A09	B06	B07	B08	B13	D01
Kd-Auftr. Pos.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnummer	Fert.Charge	Abmessung	Länge	Gesamtsumme	Gewicht	Oberfläche
924865	3	PROJEKT POSTA P1132 K242613	9001011055	VTP 80 / 80x 4,00	6.000,00 mm	24,0 m	211 kg	ungebeizt

**Schmelzanalyse [%]**

B07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C93
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mg	Cu	V	Ti	Nb	Zr	N	B	CEV
56-2992	0,0600	0,2400	1,8500	0,0100	0,0030	0,0310	0,0300	0,1000	0,0200	0,0100	0,0100	0,1100	0,0610	0,0000	0,0070	0,0002	0,3877

**Mechanische Eigenschaften**

B07	C02	C11	C12	C13	C14	C03	C40	C41	C42	C42	C42	C43
Coilcharge/Probennummer	Problemrichtung längs	Streckgrenze ReH/Rp0,2 [MPa]	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Bruchdehnung A5/A80 [%]	Re/Rm	Prüftemp. [°C]	Probenform	Probenbreite	1.	2.	3.	Av
250045/0001 20130109 0000	0001 längs	741	803	22,8	0,92				[J]	[J]	[J]	[J]

**Sonstige Prüfungen**

B07	D02	D51
Fertigungscharge	Schweißnahtprüfung	Querfaltversuch
0001011055	100 % Wirbelstrom geprüft	entspricht

Z01

Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Z02/Z03	Datum/Abnahmebeauftragter	09.01.2013 / Hindinger	Tel.:	+43/50304/14-504
---------	---------------------------	------------------------	-------	------------------

**Kleine RHP K-Knoten S700MC Streben 80x80x4 mm**

A01

Seite: 1 / 1

<b>A03</b> Zertifikat-Nr.	30801/000
<b>A02</b> Bescheinigung	APZ EN 10204-3.1
<b>A06</b> Besteller	voestalpine Hohlprofile
<b>B07</b> Fertigungsauftrag-Nr.	7189921
<b>A11</b> Lieferschein-Nr.	1496498
<b>B01</b> voestalpine Hohlprofile	
<b>B02</b> Werkstoff	S700MC EN10149-2:2013

**B03 / B10** Auflösungsform / Zeichnungsnummer / Kertschlagprüfung  
zusätzliche Anforderungen / 10-1238--A /

<b>A08</b>	<b>A10</b>	<b>A07</b>	<b>A09</b>	<b>B06</b>	<b>B08</b>	<b>B13</b>	<b>D01</b>
Kd-Aufnr.	Pos.	Bestellnummer	Sach-/Kundenartikelnnummer	Fert.Charge	Abmessung	Gesamtsumme	Oberfläche
924865	S	Projekte POSTA_P1132	K433323	0001011062	VHP08-537 100/100x6	24,0 m	391 kg ungebeizt

**Schmelzanalyse [%]**

<b>B07</b>	<b>C71</b>	<b>C72</b>	<b>C73</b>	<b>C74</b>	<b>C75</b>	<b>C76</b>	<b>C77</b>	<b>C78</b>	<b>C79</b>	<b>C80</b>	<b>C81</b>	<b>C82</b>	<b>C83</b>	<b>C84</b>	<b>C85</b>	<b>C86</b>	<b>C89</b>
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Nb	Zr	N	B	CEV
56-2529	0,0580	0,2600	1,8600	0,0120	0,0030	0,0290	0,0300	0,0300	0,0100	0,0100	0,0100	0,1100	0,0630	0,0000	0,0050	0,0004	0,3807

**Mechanische Eigenschaften**

<b>B07</b>	<b>C02</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>	<b>C13</b>	<b>C14</b>	<b>C03</b>	<b>C40</b>	<b>C41</b>	<b>C42</b>	<b>C42</b>	<b>C42</b>	<b>C43</b>
Coilcharge/Probennummer	Probenrichtung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Re/Rm	Prüftemp.	Probenform	Probenbreite	1.	2.	3.	AV
243821/0001	0001 längs	ReH/Rp0,2[MPa]	Rm[MPa]	A5/A80 [%]	0,89	[°C]			[J]	[J]	[J]	[J]
		759	855	22,2								


**Sonstige Prüfungen**

<b>B07</b>	<b>D02</b>	<b>D01</b>
Fertigungscharge	Schweißnahtprüfung	Querfaltversuch
0001011062	100 % Wirbelstrom geprüft	entspricht

**Z01**  
Es wird bestätigt, dass die Prüfungen den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen.  
Dieses Werkzeugzeugnis wurde von einer DV-Anlage erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

**Z02/Z03**  
Datum/Abnahmebeauftragter: 27.02.2013 / Hindinger      Tel.: +43/50304/14-504


**Kleine KHP K- Knoten S355J2H Gurte 193.7 x 10 mm**

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>EN 10204:2004-10</b> (A02)			<b>Nr. (A03)</b>	<b>70682</b>
Nr. (A07) Besteller (A06)			Seite	1/4
Erzeugnis (B01)			Datum	14.11.2016
Leitungsrohre, maschinell HPW-HFI-längsnahtgeschweisst		Werkauftrags-Nr. (A08)	1000031959	
Werkstoff und Lieferbedingung (B02-B03)		Lieferschein-Nr.	0080141427	
S355J2H (1.0576) EN 10210-1 (04/06)		Abnahme (A05)	11.05.2016 WA	
Ausführung innen (B06) rohschwarz				
Ausführung außen (B06) rohschwarz				
Enden (B06) glatte Enden, Endenschutz: ohne Kunststoffkappen				
Kennzeichnung des Materials (B06) Innenmarkierung an einem Ende: Rohrnummer Rohreinzellänge (mm)  Längsmarkierung aussen an einem Ende: MW-SI 193,7 x 10,00 EN10210 Schmelznummer  Stempelung aussen an einem Ende: Rohrnummer Zeichen des Abnahmebeauftragten Herstellerzeichen EN10210 S355J2H				

Materialdaten (B01-B99)									
Pos.	Schmelzen-Nr. (B07)	Anzahl (B08)	Lieferzustand (B04)	D x T x Länge (B09-B11)	mm x mm x m	Länge (B09-B11)	m	Gewicht (B12)	kg
002	023598	2	U	193,7 x 10,00 x 12,000		24,077		1.091	
Σ		2	U: unbehandelt			24,077		1.091	
Die angegebene Länge und das Gewicht beziehen sich auf das Produkt im Auslieferungszustand									

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
(Z01)

**Kleine KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 193.7 x 10 mm**

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>EN 10204:2004-10</b> (A02)			Nr. (A03)	<b>70682</b>
Nc. (A07) Besteller (A06)			Seite	2/4
Erzeugnis <b>Leitungsrohre, maschinell</b> (B01) <b>HPW-HFI-längsnahtgeschweisst</b>		6	Datum	14.11.2016
Werkstoff und Lieferbedingung <b>S355J2H (1.0576)</b> (B02-B03) <b>EN 10210-1 (04/06)</b>		Werksauftrags-Nr. <b>1000031959</b> (A08)		
		Lieferschein-Nr. <b>0080141427</b> 11.05.2016		
		Abnahme <b>WA</b> (A05)		

<b>Schmelzenanalyse (C70-C99)</b>										
Schmelzen-Nr. (B07)	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
023598	≤ 0,22	≤ 0,55	≤ 1,60	≤ 0,030	≤ 0,030	≥ 0,020				
023598	0,14	0,18	1,40	0,011	0,001	0,048	0,02	0,04	0,04	0,01
Schmelzen-Nr. (B07)	V %	Ti %	Nb %	N %	B %	Al/N %	EV2 2) %			
023598	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,000	≥ 2	≤ 0,43			
023598	0,003	0,002	0,03	0,006	0,000	8	0,39			

2) EV2: CEV=C+Mn/6+Mo/5+Ni/15+Cr/5+V/5+Cu/15

Erschmelzungsverfahren: Sauerstoffaufblasverfahren  
(C70)

Stahlhersteller (A01):  
Salzgitter Flachstahl GmbH, Eisenhüttenstr. 99, 38239 Salzgitter

Coilhersteller (A01):  
Salzgitter Flachstahl GmbH, Eisenhüttenstr. 99, 38239 Salzgitter

<b>Zugversuch (C10-C29)</b> nach EN										
Proben-Nr. (C00)	Schmelzen-Nr. (B07)	Ort (C01)	Richt. (C02)	Zustand (B05)	Art	Dehngrenze (C11) Rt0,5 MPa ≥ 355	Zugfestigkeit (C12) Rm MPa 470 - 630	Bruchdehnung (C13) A5 5) %	Probenbreite	Probindicke
1001680394	023598	GW	L	U	L	518	582	26	19,95	9,75

1) GW: Grundwerkstoff  
2) L: längs  
3) U: unbehandelt  
4) L: Losprüfung  
5) A5: Lo=5,65√So

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
(Z01)

**Kleine KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 193.7 x 10 mm**

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b>			<b>Nr. (A03)</b>	<b>70682</b>
<b>EN 10204:2004-10</b>			Seite	3/4
(A02)			Datum	14.11.2016
Nr. (A07)				
Besteller				
(A05)				
Erzeugnis			Werksauftrags-Nr.	1000031959
(B01) Leitungsröhre, maschinell			(A08)	
HFV-HFI-längsnahtgeschweisst			Lieferschein-Nr.	0080141427
				11.05.2016
Werkstoff und Lieferbedingung			Abnahme	WA
(B02-B03) S355J2H (1.0576)			(A05)	
EN 10210-1 (04/06)				

Kerbschlagbiegeversuch (C40-C49)											
Proben-Nr. (C00)	Schmelzen-Nr. (B07)	Ort (C01)	Richt. (C02)	Zustand (B05)	Art (C03)	Probenform (C40-C41)	Temp. (C03)	Schlagarbeit (C42-C43)			
								1	2	3	MW 6)
		1)	2)	3)	4)	5)	°C	J 1/1			J 1/1
								≥19			≥27
1001680394	023598	GW	L	U	L	Charpy-V/10,0	-020	219	207	211	212
1) GW: Grundwerkstoff					4) L: Losprüfung						
2) L: längs					5) 10,0: Vollprobe						
3) U: unbehandelt					6) MW: Mittelwert						

Rohrliste (B01-B99)										
Pos.	Abnahme-Nr. (B07)	Rohrnummer (B07)	Erzeugnis-Nr. (B07)	Schmelzen-Nr. (B07)	Lieferzustand (B04)	Länge (B09-B11)	m	Gewicht (B12)	kg	
002	0	1001680392	94140609	023598	U	12,042		546		
002	0	1001680394	94140610	023598	U	12,035		545		
Anzahl (B08)	2	U: unbehandelt					24,077		1.091	

Besichtigung und Maßkontrolle: Bestanden

Ultraschallprüfung der Schweißnaht  
gem. EN ISO 10893-11: Bestanden


Konformitätserklärung  
Die Erzeugnisse wurden bestellungsgemäß geprüft und für in  
Ordnung befunden.

Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung darf weder verändert  
noch für andere Erzeugnisse verwendet werden. Zuwiderhandlungen  
werden als Urkundenfälschung und Betrug strafrechtlich verfolgt.

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
(Z01)



**Kleine KHP-K-Knoten S355J2H Gurte 193.7 x 10 mm**

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>EN 10204:2004-10</b> <small>(A02)</small>	<b>Nr. (A03)</b> 70692 <b>Seite</b> 4/4 <b>Datum</b> 14.11.2016
 0045	
0045-CPR-0854	
<b>EN 10210-1</b> Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels Profils creux pour la construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins	
Die Leistungserklärung (DoP) gemäß EU-Verordnung 305/2011, Anhang III ist verfügbar unter <a href="http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php">http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php</a> The Declaration of Performance (DoP) in acc. with EU-Regulation 305/2011, Annex III is available under <a href="http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php">http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php</a> La Déclaration des Performances (DoP) conformément au règlement Européen No 305/2011, Annexe III est disponible sous <a href="http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php">http://www.smlp.eu/deutsch/Zertifikate_und_Zulassungen.php</a>	



**Kleine KHP-K-Knoten S700MLH Gurte 193.7 x 10 mm und Streben 114.3 x 6 mm**

INSPECTION CERTIFICATE

No. AD170973.DAT  
904320-001-001

EN 10204-3.1

Date  
05.01.2017

Page

1

Buyer 0003094 Consignee 7813801

Confirmation of Order 904320 Your Order

Your Reference SAMPLE Consignment 904320-001 05.01.2017

MARKING  
Mark of the Manufacturer Inspector's Stamp Steel Grade Cast No. Pipe No. Other Stamps

STRENX 700MLH XXXXX-XX

Product  
COLD-FORMED WELDED EXTRA HIGH STRENGTH STEEL TUBE  
Steel Grade  
STRENX TUBE 700MLH  
S700MC EN 10149-2

Technical Terms of Delivery  
CFCHS TOLERANCES OF DIMENSIONS AND SHAPE EN 10219

Inspection  
ULTRASONIC INSPECTION OF THE WELD SEAM

SPECIFICATION			Pos	m	kg	Bundle Pcs
Cast No.	Test No.	Bundle No.				
Item 1 D 193.7		10.00 X 12000				
61525	61525030020	49021196				
Item in total			3	36	1631	1
Item 2 D 114.3		6.00 X 12000				
63254	63254050273	49021197				
Item in total			3	36	576	1
Items in total			6	72	2207	2

We hereby certify that the products described above have been tested and comply with the terms of the Order contract.



PHOTO I UTTERBARENTHU  
Telefax

Postal Address Telephone

Company name Registered Office Business ID

**Kleine KHP-K-Knoten S700MLH Gurte 193.7 x 10 mm und Streben 114.3 x 6 mm**

INSPECTION CERTIFICATE

No.  
904320-001-001

EN 10204-3.1

Date  
05.01.2017

Page  
2

Item	Cast No.	CEV	Cast analysis %														
			C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Cr	N	Ti	Mo	Ni	B
1	61525	,39	,06	,19	1,82	,011	,002	,040	,083	,014	,017	,057	,004	,113	,008	,035	,0004
2	63254	,38	,05	,19	1,75	,010	,003	,031	,050	,043	,203	,053	,004	,099	,015	,083	,0002

Item	Test Number	Tensile Test				Impact test					
		P2	Rp0.2 N/mm2	Rm N/mm2	A %	P3	oC	1(J)	2(J)	3(J)	AVG(J)
1	61525030020	11	773	843	14	117	-40	117	130	122	123
2	63254050273	11	802	867	12	117	-40	083	081	077	080

Visual inspection and dimensional control has been performed in compliance with the terms of the order contract- No objection.

CEV:  $C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$   
 P2: 11-Pipe body, longitudinal  
 P3: 117-impact test CV t x 10 mm, pipe body, longitudinal

## A2 Nomenklatur

### Nomenklatur für große RHP-K-Knoten mit 45 Grad Strebenneigungswinkel

Joint	Profile	Chord	Brace	Material	No.
K45	RHS	300x20	220x20	S700	1
K45	RHS	300x20	220x20	S700	2
K45	RHS	300x20	220x20	S355	1
K45	RHS	300x20	220x20	S355	2
K45	RHS	300x20	220x20	S355	3
K45	RHS	300x20	220x20	S355	4

### Nomenklatur für kleine RHP-K-Knoten mit 45 Grad Strebenneigungswinkel

Joint	Profile	Chord	Brace	Material	No.
K45	RHS	130x4	80x4	S700	1
K45	RHS	130x4	80x4	S700	2
K45	RHS	130x4	80x4	S700	3
K45	RHS	130x4	80x4	S700	4
K45	RHS	130x4	80x4	S500	1
K45	RHS	130x4	80x4	S500	2
K45	RHS	130x4	80x4	S500	3
K45	RHS	130x4	80x4	S500	4
K45	RHS	100x6	80x4	S700	1
K45	RHS	100x6	80x4	S700	2
K45	RHS	100x6	80x4	S700	3
K45	RHS	100x6	80x4	S700	4
K45	RHS	100x6	80x4	S700	5
K45	RHS	100x6	80x4	S700	6
K45	RHS	100x6	80x4	S700	7
K45	RHS	100x6	80x4	S700	8
K45	RHS	100x6	80x4	S355	1
K45	RHS	100x6	80x4	S355	2
K45	RHS	100x6	80x4	S355	3
K45	RHS	100x6	80x4	S355	4
K45	RHS	100x6	80x4	S355	5
K45	RHS	100x6	80x4	S355	6
K45	RHS	100x6	80x4	S355	7
K45	RHS	100x6	80x4	S355	8

**Nomenklatur für große KHP-K-Knoten mit 45 Grad Strebenneigungswinkel**

<b>Joint</b>	<b>Profile</b>	<b>Chord</b>	<b>Brace</b>	<b>Material</b>	<b>No.</b>
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S700	1
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S700	2
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S355	1
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S355	2
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S355	3
K45	CHS	323.9x20	244.5x20	S355	4

**Nomenklatur für kleine KHP-K-Knoten mit 45 Grad Strebenneigungswinkel**

<b>Joint</b>	<b>Profile</b>	<b>Chord</b>	<b>Brace</b>	<b>Material</b>	<b>No.</b>
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	1
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	2
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	3
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	4
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	5
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	6
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	7
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S700	8
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	1
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	2
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	3
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	4
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	5
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	6
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	7
K45	CHS	139.7x10	114.3x6.3	S355	8

## A3 Schweißparameter

### Schweißanweisung für kleine RHP-K-Knoten aus S355

#### Arbeitsfolge:

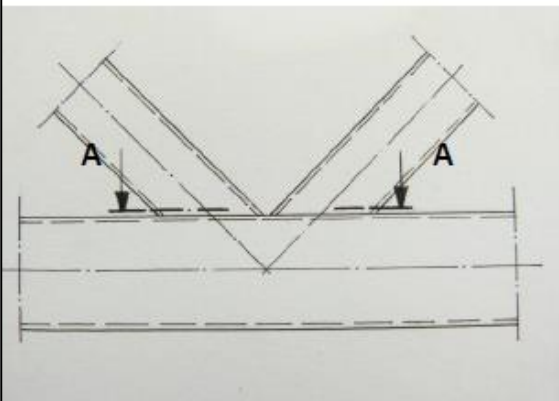
#### Nahtvorbereitung an den Streben:

Nahtvorbereitung (mechanisch – „Fräsen“) bei Rohrwanddicken bis einschließlich 4 mm, nur an der Stirnseite. Nahtöffnungswinkel 50°.

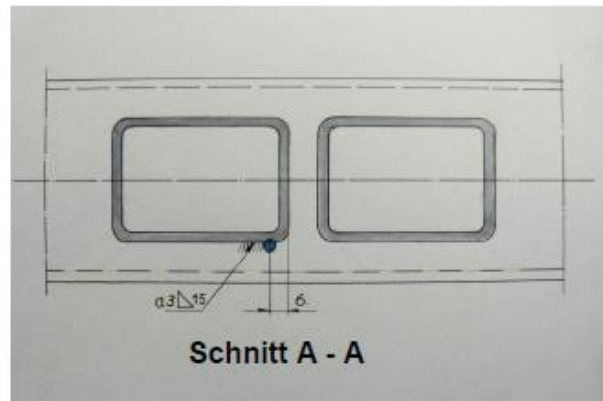
#### Heften der Streben:

Gurtrohr an beiden Enden auf dem Arbeitstisch festspannen.  
 Streben in vertikaler Position, entsprechend der Zeichnungs-Maße fixieren.  
 Max. Mitterversatz der Streben zum Gurtrohr : 1 mm !  
 Adapterlaschen heften.  
 Heft- und Schweißvorrichtung verwenden!  
 Spaltmaß „g“ = 25 mm.

Heftpunkt 6 – 8 mm vor der Stirnseite an beiden Streben setzen . (s. Skizze 2)  
 Kurze Kehlnaht a = 3 nach dem Heftpunkt schweißen.



Skizze 2: Heften der Streben- RHP



#### Schweißen der Nähte am Strebenanschluss:

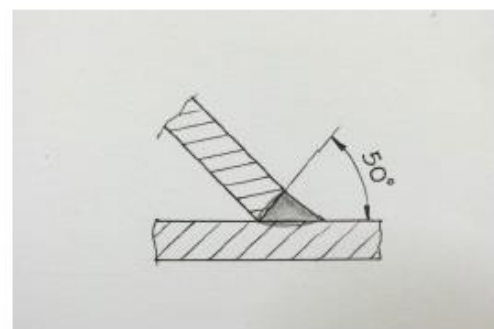
Vorab Kontrolle der Heftnähte - mind. „VT“, „MT“ auf Risse.

Kehlnähte seitlich und an der Hohlkehle:

Kehlnahtdicke bei Wanddicken bis 4 mm:  
 Mind. 1,0 x Rohrwanddicke-Strebe.

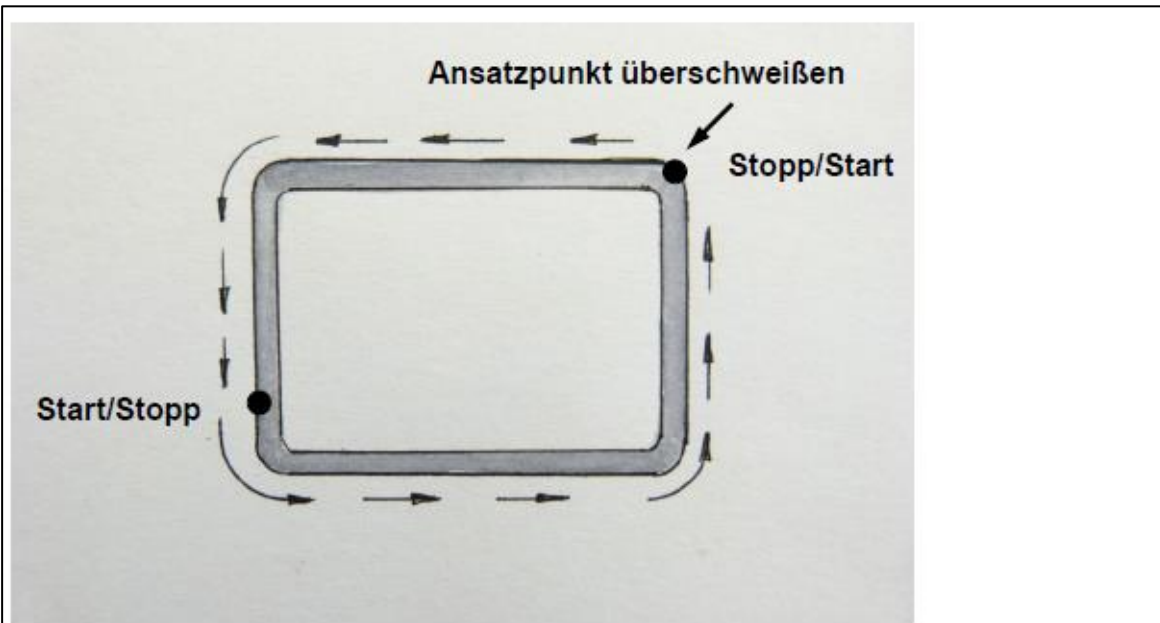
An der Stirnseite des Rechteckprofils HV-Naht  
 (s. Skizze 3).

Schweißfolge s. Skizze 4



Skizze 3: HV-Naht an der Stirnseite

**Schweißanweisung für kleine RHP-K-Knoten aus S355 (fortgesetzt)**



**Skizze 4:** Schweißfolge bei den Nähten am Strebenanschluss

**Schweißzusatz (SZW) :**

Heftpunkte, Heftnähte, Kehlnaht- u. HV-Naht- Bereich, sowie HV-Nähte am Anschluss Adapter-Gurt/Streben:

G4Si1 n. DIN EN ISO 14341- A, Ø1,0 mm

**Schutzgas:** Mischgas M21 n. DIN EN ISO 14175

**Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP)**

ZfP sämtlicher Nähte am fertigen Probekörper, frühestens nach 48 h durchführen:  
„VT“, „MT“

**Bewertungsgruppe:** ISO 5817, „B“

Dabei ist besonderes Augenmerk auf konvexe Nähte und Einbrandkerben zu legen!

**Freimaßtoleranzen für Schweißkonstruktionen:** DIN EN ISO 13920

Messprotokoll auf Maßhaltigkeit und Geradheit in Abhängigkeit der Prüfeinrichtung.

**Schweißerprüfung:** DIN EN ISO 9606-1

W. Gundel, IWE

Öpfingen, 29.05.2016



**Schweißanweisung für kleine RHP-K-Knoten aus S700**

**Arbeitsfolge:**

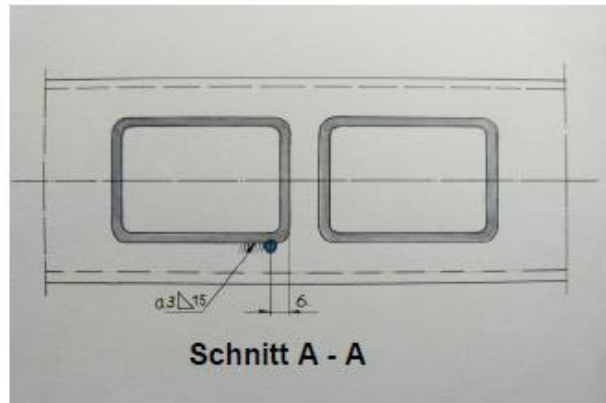
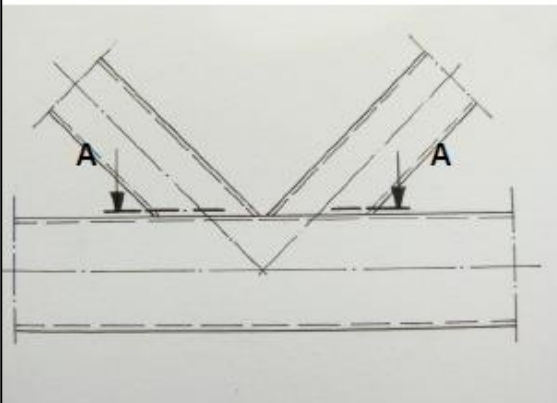
**Nahtvorbereitung an den Streben:**

Nahtvorbereitung (mechanisch – „Fräsen“) bei Rohrwanddicken bis einschließlich 4 mm, nur an der Stirnseite. Nahtöffnungswinkel 50°.

**Heften der Streben:**

Gurtrohr an beiden Enden auf dem Arbeitstisch festspannen.  
 Streben in vertikaler Position, entsprechend der Zeichnungs-Maße fixieren.  
 Max. Mittenversatz der Streben zum Gurtrohr : 1 mm !  
 Adapterlaschen heften.  
 Heft- und Schweißvorrichtung verwenden!  
 Spaltmaß „g“ = 25 mm.

Heftpunkt 6 – 8 mm vor der Stirnseite an beiden Streben setzen . (s. Skizze 2)  
 Kurze Kehlnaht a = 3 nach dem Heftpunkt schweißen (gilt für beide Streben).



Skizze 2: Heften der Streben- RHP

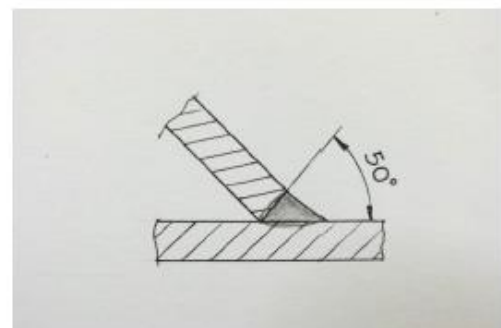
**Schweißen der Nähte am Strebenanschluss:**

Vorab Kontrolle der Heftnähte - mind. „VT“, „MT“ auf Risse.

Kehlnähte seitlich und an der Hohlkehle:

Kehlnahtdicke bei Wanddicken bis 4 mm:  
 Mind. 1,0 x Rohrwanddicke-Strebe.

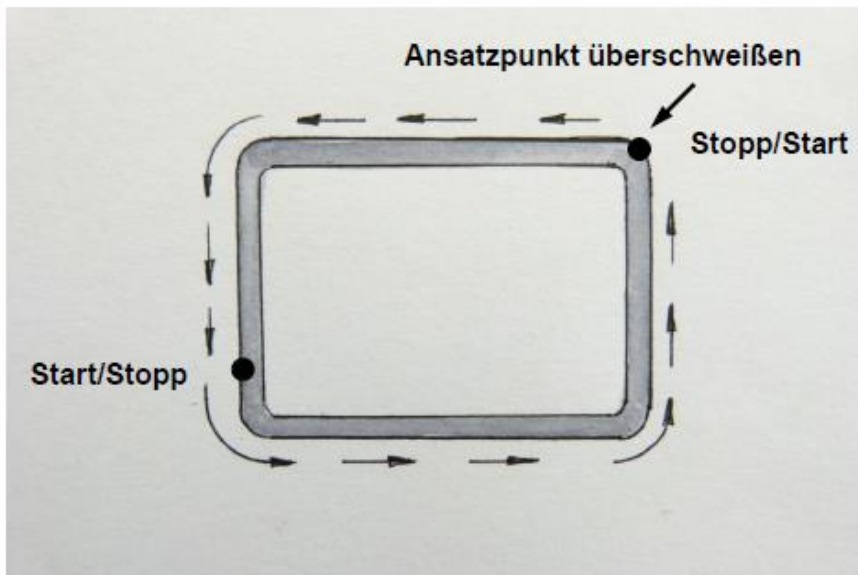
An der Stirnseite des Rechteckprofils HV-Naht (s. Skizze 3).



Skizze 3: HV-Naht an der Stirnseite

### Schweißanweisung für kleine RHP-K-Knoten aus S700 (fortgesetzt)

Schweißfolge s. Skizze 4



Skizze 4: Schweißfolge bei den Nähten am Strebenanschluss

**Schweißzusatz (SZW) :**

Heftpunkte, Heftnähte: G4Si1 n. DIN EN ISO 14341- A, Ø1,0 mm

Kehlnaht- u. HV-Naht- Bereich, sowie HV-Nähte am Anschluss Adapter-  
Gurt/Streben: DIN EN ISO 16834 - A G 69 6 M Mn 4Ni1,5CrMo, Ø1,0 mm

**Schutzgas:** Mischgas M21 n. DIN EN ISO 14175

**Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP)**

ZfP sämtlicher Nähte am fertigen Probekörper, frühestens nach 48 h durchführen:  
„VT“, „MT“

**Bewertungsgruppe:** ISO 5817, „B“

Dabei ist besonderes Augenmerk auf konvexe Nähte und Einbrandkerben zu legen!

**Freimaßtoleranzen für Schweißkonstruktionen:** DIN EN ISO 13920

Messprotokoll auf Maßhaltigkeit und Geradheit in Abhängigkeit der Prüfeinrichtung.

**Schweißerprüfung:** DIN EN ISO 9606-1

W. Gundel, IWE

Öpfingen, 05.06.2016

## Schweißanweisung für kleine KHP-K-Knoten aus S355

### Arbeitsfolge:

#### Nahtvorbereitung an den Streben:

2/3 des Umfangs HV-Naht, Rest Kehlnaht (Plasma-Rohrbrennschneidmaschine)  
Anhaftenden Zunder an der Innenseite der Rohre im Bereich der zu schweißenden Nähte mit Rundschleifer entfernen.

#### Heften der Streben:

Gurtrohr an beiden Enden auf dem Arbeitstisch festspannen.

Streben in vertikaler Position, entsprechend der Zeichnungs-Maße fixieren.

Max. Mitterversatz der Streben zum Gurtrohr : 1 mm !

Adapterlaschen heften.

Heft- und Schweißvorrichtung verwenden!

Spaltmaß „g“ = 25 mm.

Heftpunkte an beiden Seiten setzen (s. Skizze 2)

#### Heftnähte schweißen:

Länge der Heftnähte von

Heftpunkt zu Heftpunkt mind. 40 mm

(s. Skizze 3).

#### Schweißen der Nähte am Strebenanschluss:

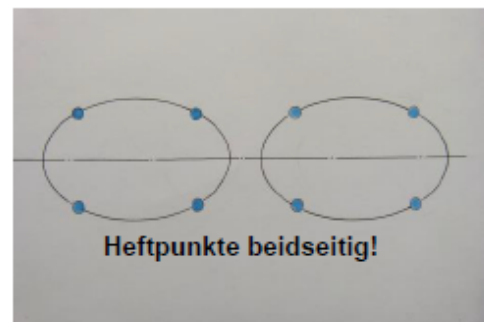
Vorab Kontrolle der Heftnähte - mind. „VT“, „MT“ auf Risse.

Kehlnaht 1/3 des Umfangs

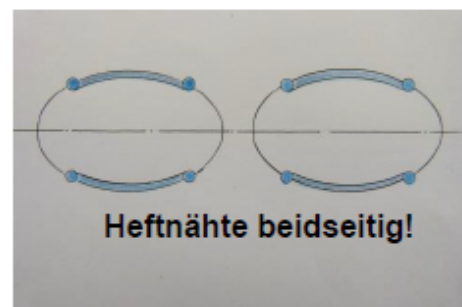
Kehlnahtdicke: Mind. 1,0 x Rohrwanddicke-Strebe

HV-Naht mind. 2/3 des Umfangs

Schweißfolge s. Skizze 4

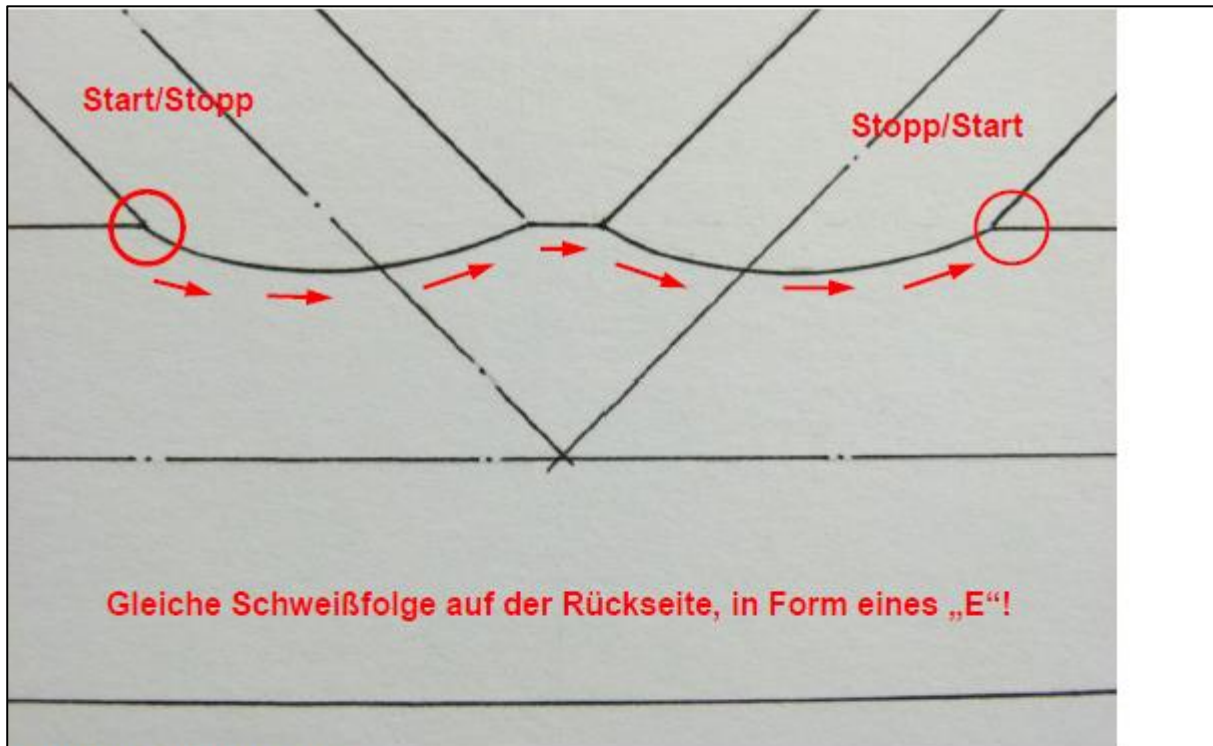


Skizze 2: - Lage der Heftpunkte



Skizze 3: Heftnähte

**Schweißanweisung für kleine KHP-K-Knoten aus S355 (fortgesetzt)**



**Schweißzusatz (SZW) :**

Heftpunkte, Heftnähte, Kehlnaht- u. HV-Naht- Bereich, sowie HV-Nähte am Anschluss Adapter-Gurt/Streben :

G4Si1 n. DIN EN ISO 14341- A, Ø1,0 mm

**Schutzgas:** Mischgas M21 n. DIN EN ISO 14175

**Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP)**

ZfP sämtlicher Nähte am fertigen Probekörper, frühestens nach 48 h durchführen:  
„VT“, „MT“

**Bewertungsgruppe:** ISO 5817, „B“

Dabei ist besonderes Augenmerk auf konvexe Nähte und Einbrandkerben zu legen!

**Freimaßtoleranzen für Schweißkonstruktionen:** DIN EN ISO 13920

Messprotokoll auf Maßhaltigkeit und Geradheit in Abhängigkeit der Prüfeinrichtung.

**Schweißerprüfung:** DIN EN ISO 9606-1 135 T BW FM1 S s10 D193 ss nb

## Schweißanweisung für kleine KHP-K-Knoten aus S700

### Arbeitsfolge:

#### Nahtvorbereitung an den Streben:

2/3 des Umfangs HV-Naht, Rest Kehlnaht (Plasma-Rohrbrennschneidmaschine)  
Anhaftenden Zunder an der Innenseite der Rohre im Bereich der zu schweißenden Nähte mit Rundschleifer entfernen.

#### Heften der Streben:

Gurtrohr an beiden Enden auf dem Arbeitstisch festspannen.  
Streben in vertikaler Position, entsprechend der Zeichnungs-Maße fixieren.  
Max. Mittensversatz der Streben zum Gurtrohr : 1 mm !  
Adapterlaschen heften.  
Heft- und Schweißvorrichtung verwenden!  
Spaltmaß „g“ = 25 mm.

Heftpunkte an beiden Seiten setzen (s. Skizze 2)

#### Heftnähte schweißen:

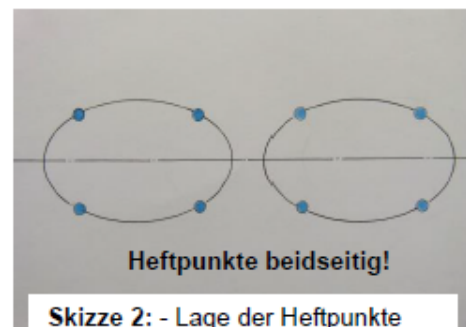
Länge der Heftnähte von Heftpunkt zu Heftpunkt mind. 40 mm (s. Skizze 3).

#### Schweißen der Nähte am Strebenanschluss:

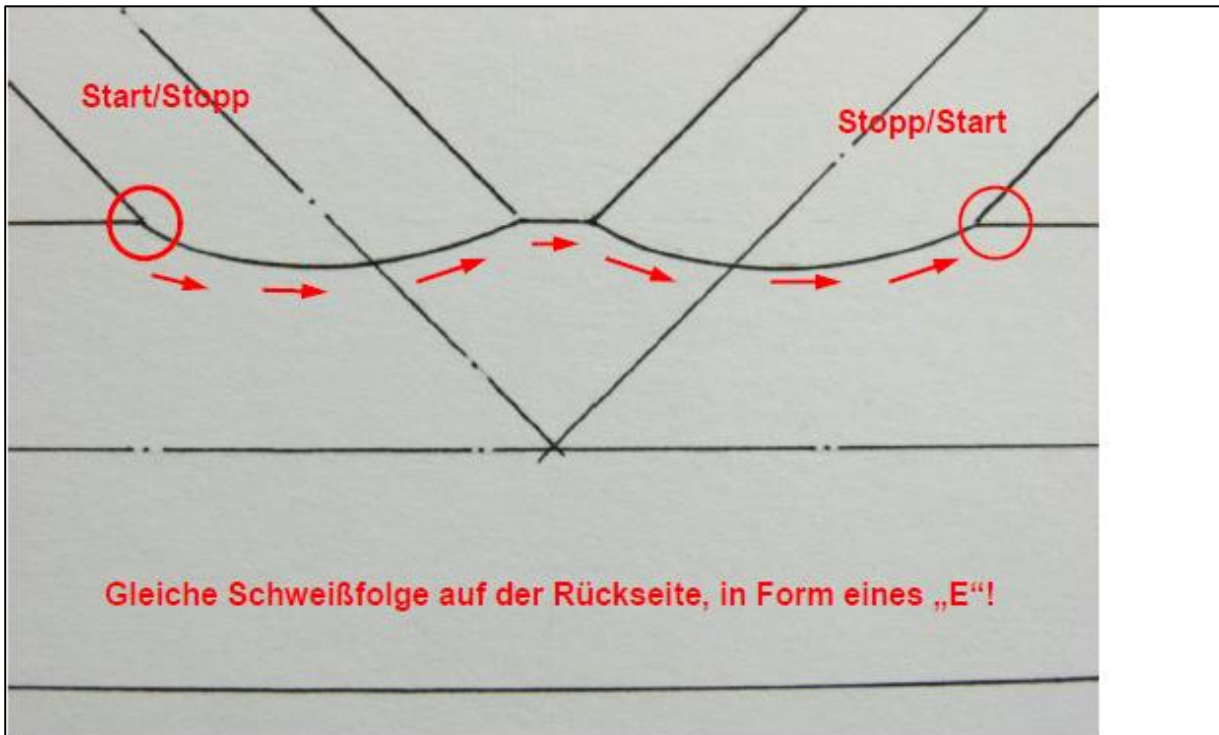
Vorab Kontrolle der Heftnähte - mind. „VT“, „MT“ auf Risse.

Kehlnaht 1/3 des Umfangs  
Kehlnahtdicke: Mind. 1,0 x Rohrwanddicke-Strebe

HV-Naht mind. 2/3 des Umfangs  
Schweißfolge s. Skizze 4



### Schweißanweisung für kleine KHP-K-Knoten aus S700 (fortgesetzt)



**Schweißzusatz (SZW) :**

Heftpunkte, Heftnähte: G4Si1 n. DIN EN ISO 14341- A, Ø1,0 mm

Kehlnaht- u. HV-Naht- Bereich, sowie HV-Nähte am Anschluss Adapter-Gurt/Streben : DIN EN ISO 16834 - A G 69 6 M Mn 4Ni1,5CrMo, Ø1,0 mm

**Schutzgas:** Mischgas M21 n. DIN EN ISO 14175

**Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP)**

ZfP sämtlicher Nähte am fertigen Probekörper, frühestens nach 48 h durchführen: „VT“, „MT“

**Bewertungsgruppe:** ISO 5817, „B“

Dabei ist besonderes Augenmerk auf konvexe Nähte und Einbrandkerben zu legen!

**Freimaßtoleranzen für Schweißkonstruktionen:** DIN EN ISO 13920

Messprotokoll auf Maßhaltigkeit und Geradheit in Abhängigkeit der Prüfeinrichtung.

**Schweißerprüfung:** DIN EN ISO 9606-1 135 T BW FM2 S s10 D193 ss nb

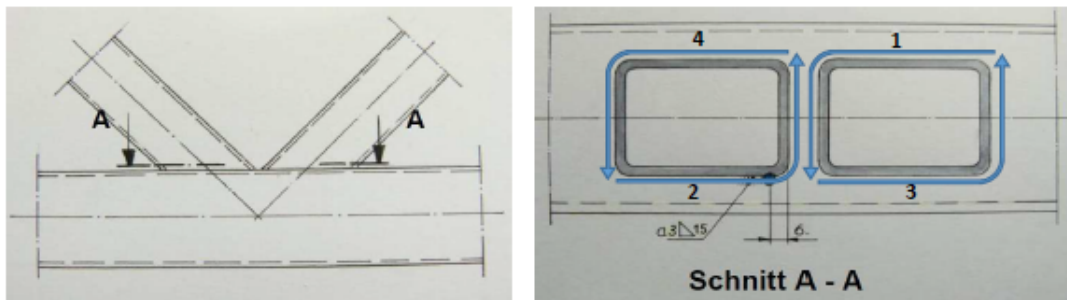
**Schweißprotokoll für kleine RHP-K-Knoten, 130x130x4 und 80x80x4 mm, S500**

Schweißaufgabe: FOSTA P1132

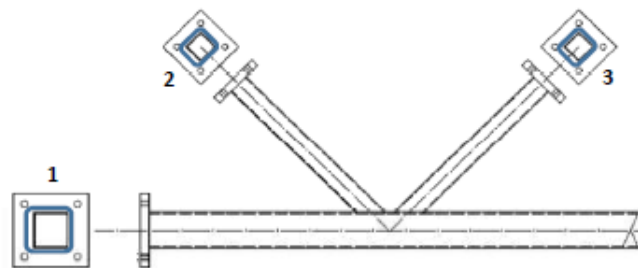
16.11.2016

Probe Nr.: <u>SS500</u>	Roboter: <u>—</u>	Bediener: <u>          </u>
Verfahren: <u>MAG</u>	Gerät: <u>Cloos QIneo tronic</u>	Schweißer: <u>          </u>
Gasdurchfluß: <u>12,0 l/min</u>	<u>Pulse 450</u>	Schweißaufsicht: <u>Mast</u>
Draht-Ø: <u>1,0 mm</u>	Drahtanzahl: <u>1</u>	SFI: <u>Hänsler</u>
Schw.-draht: <u>ISO 14341-A: G46 4 M G4Si1</u> <u>ISO 16834-A: G69 6 M Mn4Ni1,5CrMo</u>	Pulver: <u>—</u>	WPS-Nr.: <u>—</u>
Brennerhaltung: <u>neutral/ leicht stechend</u>		Vorwärmtemp.: <u>120°C</u>

Lageaufbau-skizze:



Raupe Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung [V]	Stromstärke [A]	Nahtlänge [cm]	Schweißzeit [sec]	Drahtvorschub [m/min]	Geschw. eingestellt [cm/min]	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie E=η·U·I·V [kJ/mm]	Schweißdraht [-]
1	Wurzel	135	27	230	20,0	28,0	13,0	42,9	0,8	0,70	G46
2	Wurzel	135	26	234	20,0	27,0	13,0	44,4	0,8	0,66	G46
3	Wurzel	135	28	210	20,0	31,0	13,0	38,7	0,8	0,73	G46
4	Wurzel	135	27	225	20,0	33,0	13,0	36,4	0,8	0,80	G46
1	2	135	28	228	20,0	29,0	13,0	41,4	0,8	0,74	G46
2	2	135	28	230	20,0	32,0	13,0	37,5	0,8	0,82	G46
3	2	135	27	226	20,0	30,0	13,0	40,0	0,8	0,73	G46
4	2	135	26	229	20,0	31,0	13,0	38,7	0,8	0,74	G46
1	3	135	28	232	20,0	28,0	13,0	42,9	0,8	0,73	G46
2	3	135	28	227	20,0	31,0	13,0	38,7	0,8	0,79	G46
3	3	135	27	228	20,0	30,0	13,0	40,0	0,8	0,74	G46
4	3	135	27	231	20,0	32,0	13,0	37,5	0,8	0,80	G46



Raupe Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung [V]	Stromstärke [A]	Nahtlänge [cm]	Schweißzeit [sec]	Drahtvorschub [m/min]	Geschw. eingestellt [cm/min]	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie E=η·U·I·V [kJ/mm]	Schweißdraht [-]
1	Wurzel	135	27	217	52,0	60,0	13,0	52,0	0,8	0,54	G69
1	2	135	27	220	52,0	58,0	9,0	53,8	0,8	0,53	G69
1	3	135	28	218	52,0	61,0	9,0	51,1	0,8	0,57	G69
2	Wurzel	135	27	219	32,0	39,0	13,0	49,2	0,8	0,58	G46
2	2	135	28	220	32,0	41,0	9,0	46,8	0,8	0,63	G69
2	3	135	28	220	32,0	42,0	9,0	45,7	0,8	0,65	G69
3	Wurzel	135	27	218	32,0	40,0	13,0	48,0	0,8	0,59	G46
3	2	135	28	221	32,0	38,0	9,0	50,5	0,8	0,59	G69
3	3	135	27	220	32,0	39,0	9,0	49,2	0,8	0,58	G69

Schweißprotokoll für kleine RHP-K-Knoten, 100x100x6 und 80x80x4 mm, S700

Schweißaufgabe: FOSTA P1132 17.11.2016

Probe Nr.: S700 (Gurt 100x100) Roboter: --- Bediener: \_\_\_\_\_

Verfahren: MAG Gerät: Cloos Qineo tronic Schweißer: \_\_\_\_\_

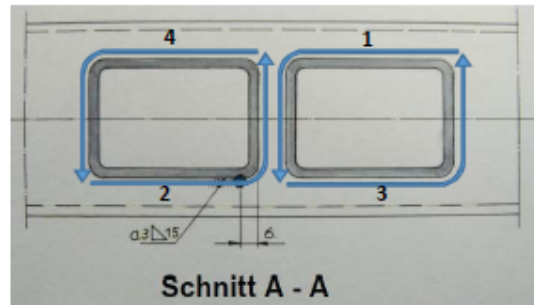
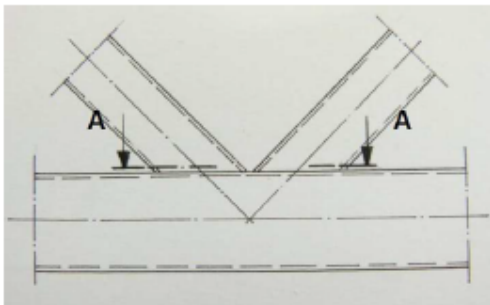
Gasdurchfluß: 12,0 l/min Pulse 450 Schweißaufloht: Mast

Draht-Ø: 1,0 mm Drahtanzahl: 1 RF: Hänsler

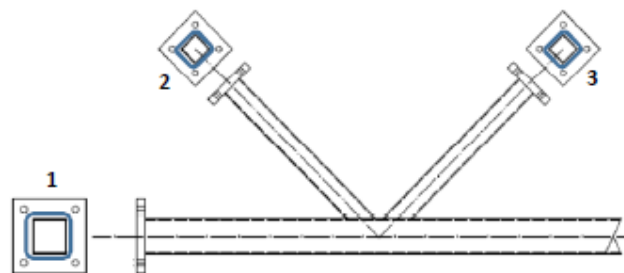
Schweißdraht: ISO 14341-A: G46 4 M G46H1 Pulver: --- WPS-Nr.: ---

ISO 15834-A: G69 6 M Mh4N1,5CrMo Brennerhaltung: neutral/ leicht stechend Vorwärtemp.: 120°C

Lageaufbauskizze:



Raue Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung	Stromstärke	Nahtlänge	Schweißzeit	Drahtvorschub	Geschw. eingestellt	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie $E_w \cdot U/Vv$	Schweißdraht
[-]	[-]	[-]	[V]	[A]	[cm]	[sec]	[mm/min]	[cm/min]	[-]	[kJ/mm]	[-]
1	Wurzel	135	28	232	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,75	G46
2	Wurzel	135	27	234	20,0	28,0	12,5	42,8	0,8	0,71	G46
3	Wurzel	135	28	226	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,76	G46
4	Wurzel	135	28	227	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,76	G46
1	2	135	27	230	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,72	G69
2	2	135	28	230	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,77	G69
3	2	135	27	231	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,72	G69
4	2	135	27	229	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,72	G69
1	3	135	27	232	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,75	G69
2	3	135	28	230	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,75	G69
3	3	135	28	228	20,0	31,0	12,5	38,7	0,8	0,79	G69
4	3	135	27	230	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,75	G69



Raue Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung	Stromstärke	Nahtlänge	Schweißzeit	Drahtvorschub	Geschw. eingestellt	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie $E_w \cdot U/Vv$	Schweißdraht
[-]	[-]	[-]	[V]	[A]	[cm]	[sec]	[mm/min]	[cm/min]	[-]	[kJ/mm]	[-]
1	Wurzel	135	28	218	40,0	50,0	12,5	48,0	0,8	0,61	G46
1	2	135	27	221	40,0	51,0	9,0	47,1	0,8	0,61	G69
1	3	135	27	219	40,0	50,0	9,0	48,0	0,8	0,59	G69
2	Wurzel	135	28	218	32,0	39,0	12,5	49,2	0,8	0,60	G46
2	2	135	27	220	32,0	41,0	9,0	46,8	0,8	0,61	G69
2	3	135	29	221	32,0	40,0	9,0	48,0	0,8	0,64	G69
3	Wurzel	135	28	218	32,0	41,0	12,5	46,8	0,8	0,63	G46
3	2	135	29	220	32,0	39,0	9,0	49,2	0,8	0,62	G69
3	3	135	27	219	32,0	39,0	9,0	49,2	0,8	0,59	G69



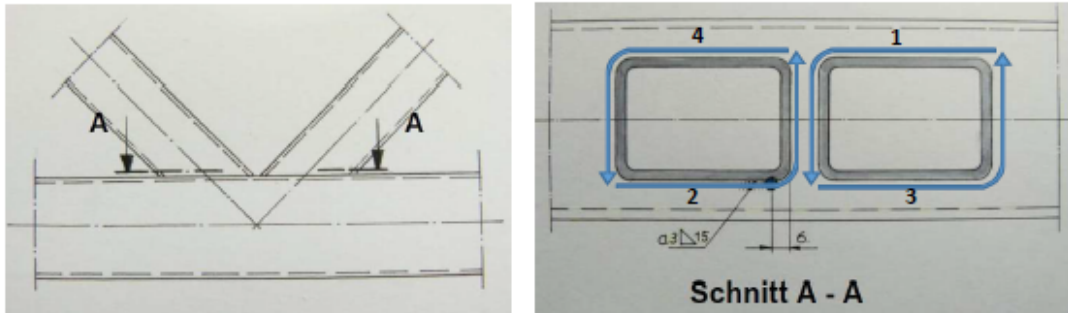
**Schweißprotokoll für kleine RHP-K-Knoten, 130x130x4 und 80x80x4 mm, S700**

Schweißaufgabe: FGSTA P1132

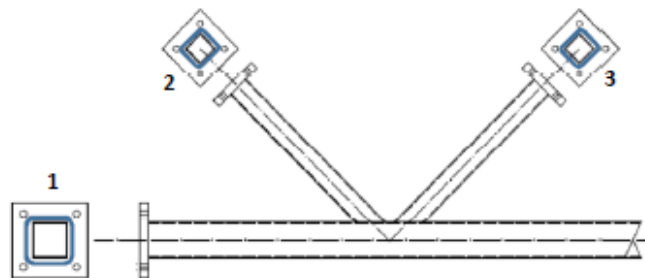
15.11.2016

Probe Nr.: <u>8700 (Gurt 130x130)</u>	Roboter: <u>---</u>	Bediener: <u>          </u>
Verfahren: <u>MAG</u>	Gerät: <u>Cloos Qneo tronic</u>	Schweißer: <u>          </u>
Gasdurchfluß: <u>12,0 l/min</u>	Pulse <u>450</u>	Schweißaufsicht: <u>Mast</u>
Draht-Ø: <u>1,0 mm</u>	Drahtanzahl: <u>1</u>	SR: <u>Hänsler</u>
Schweißdraht: <u>ISO 14341-A: G46 4 M G46H</u> <u>ISO 16834-A: G69 6 MMh4N1,SCMo</u>	Pulver: <u>---</u>	WPS-Nr.: <u>---</u>
Brennerhaltung: <u>neutral/leicht stechend</u>	Vorwärmtemp.: <u>120°C</u>	

Lageaufbauzeichnung:



Raue Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung	Stromstärke	Nahtlänge	Schweißzeit	Drahtvorschub	Geschw. eingestellt	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie E=η·U·I·t/v	Schweißdraht
[-]	[-]	[-]	[V]	[A]	[cm]	[sec]	[mm/min]	[cm/min]	[%]	[kJ/mm]	[-]
1	Wurzel	135	30	215	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,77	G46
2	Wurzel	135	29	220	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,74	G46
3	Wurzel	135	30	218	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,76	G46
4	Wurzel	135	31	220	20,0	31,0	12,5	38,7	0,8	0,85	G46
1	2	135	28	221	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,72	G69
2	2	135	29	219	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,74	G69
3	2	135	27	220	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,71	G69
4	2	135	30	220	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,77	G69
1	3	135	29	218	20,0	28,0	12,5	42,9	0,8	0,71	G69
2	3	135	28	217	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,73	G69
3	3	135	29	219	20,0	29,0	12,5	41,4	0,8	0,74	G69
4	3	135	28	220	20,0	30,0	12,5	40,0	0,8	0,74	G69

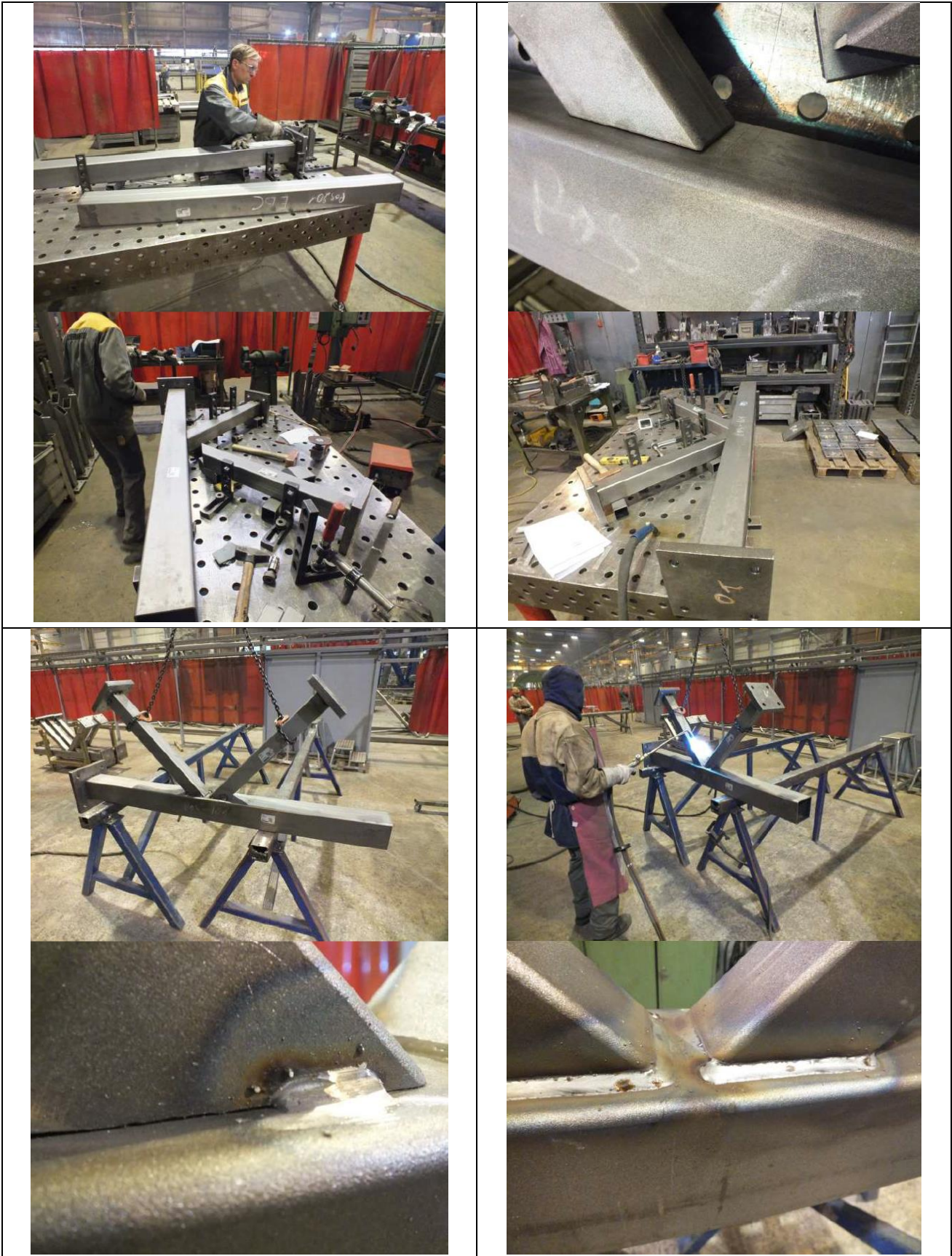


Raue Nr.	Lage	Schweißverfahren	Spannung	Stromstärke	Nahtlänge	Schweißzeit	Drahtvorschub	Geschw. eingestellt	thermischer Wirkungsgrad η	Streckenergie E=η·U·I·t/v	Schweißdraht
[-]	[-]	[-]	[V]	[A]	[cm]	[sec]	[mm/min]	[cm/min]	[%]	[kJ/mm]	[-]
1	Wurzel	135	27	228	52,0	61,0	12,5	51,1	0,8	0,58	G46
1	2	135	28	220	52,0	60,0	9,0	52,0	0,8	0,57	G69
1	3	135	28	217	52,0	61,0	9,0	51,1	0,8	0,57	G69
2	Wurzel	135	28	220	32,0	40,0	12,5	48,0	0,8	0,62	G46
2	2	135	27	221	32,0	42,0	9,0	45,7	0,8	0,63	G69
2	3	135	27	219	32,0	41,0	9,0	45,8	0,8	0,61	G69
3	Wurzel	135	28	222	32,0	39,0	12,5	49,2	0,8	0,61	G46
3	2	135	28	220	32,0	40,0	9,0	48,0	0,8	0,62	G69
3	3	135	28	218	32,0	38,0	9,0	50,5	0,8	0,58	G69

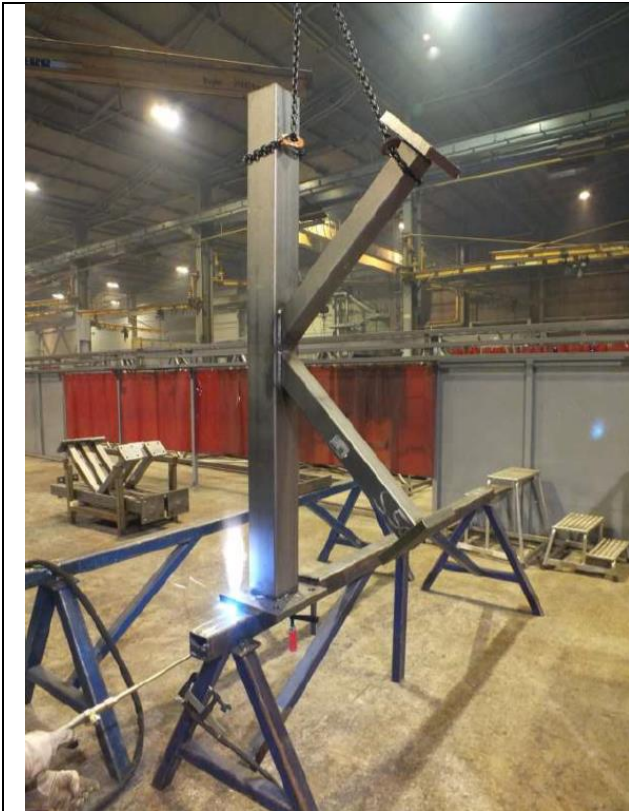
Fertigungsablauf für kleine RHP-K-Knoten



Fertigungsablauf für kleine RHP-K-Knoten (fortgesetzt)



Fertigungsablauf für kleine RHP-K-Knoten (fortgesetzt)



**Schweißprotokoll für kleine KHP-K-Knoten S355****Datenerfassung: Rohrknoten S 355 SZW: SG 3 d:1,2**

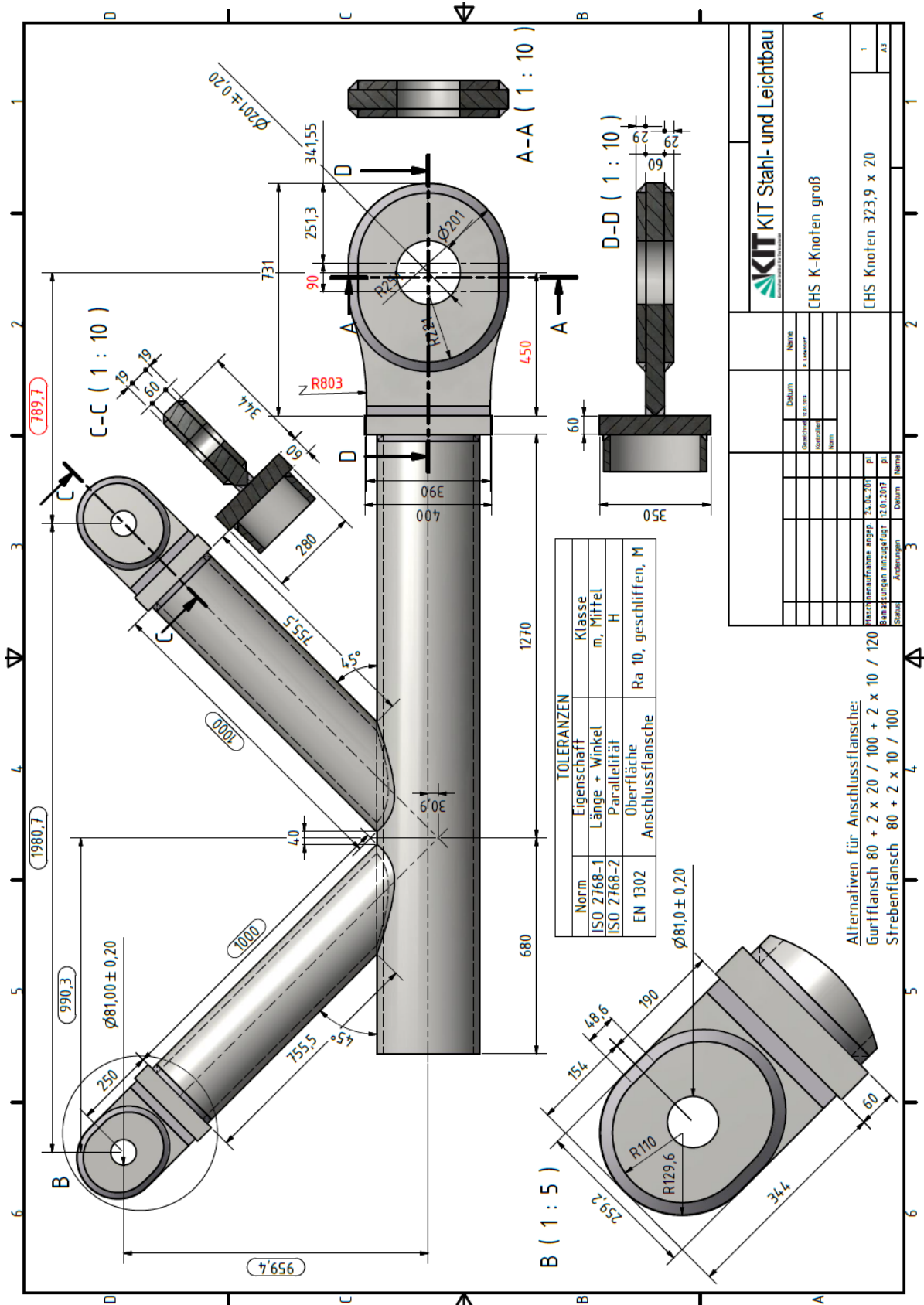
Raupe Nr.	t mm	T0/Ti* °C	I A	U V	v cm/min	Zeit h:min:sec	v <sub>D</sub> m/min	Lichtbogen
Wurzel	10/6,3	120 / 150	190	19,3	43cm / min		5,2	
DL – 1. Raupe	10/6,3	130 / 160	195	19,0	38cm / min		5,2	
DL – 2. Raupe	10/6,3	140 / 160	195	19,0	38cm / min		5,2	
DL – 3. Raupe	10/6,3	120 / 150	195	19,0	38cm / min		5,2	

**Schweißprotokoll für kleine KHP-K-Knoten S700****Datenerfassung: Rohrknoten S 700 SZW: Union X 77 d: 1,0**

Raupe Nr.	t mm	T0/Ti* °C	I A	U V	v cm/min	Zeit h:min:sec	v <sub>D</sub> m/min	Lichtbogen
Wurzel	10/6,3	110 / 140	200	24,5	43cm / min		9	
DL – 1. Raupe	10/6,3	130 / 155	195	25	43cm / min		7,0	
DL – 2. Raupe	10/6,3	140 / 150	195	25	43cm / min		6,9	
DL – 3. Raupe	10/6,3	140 / 150	195	25	43cm / min		6,9	

# A4 Abmessungen

## Konstruktionszeichnung für große KHP-K-Knoten

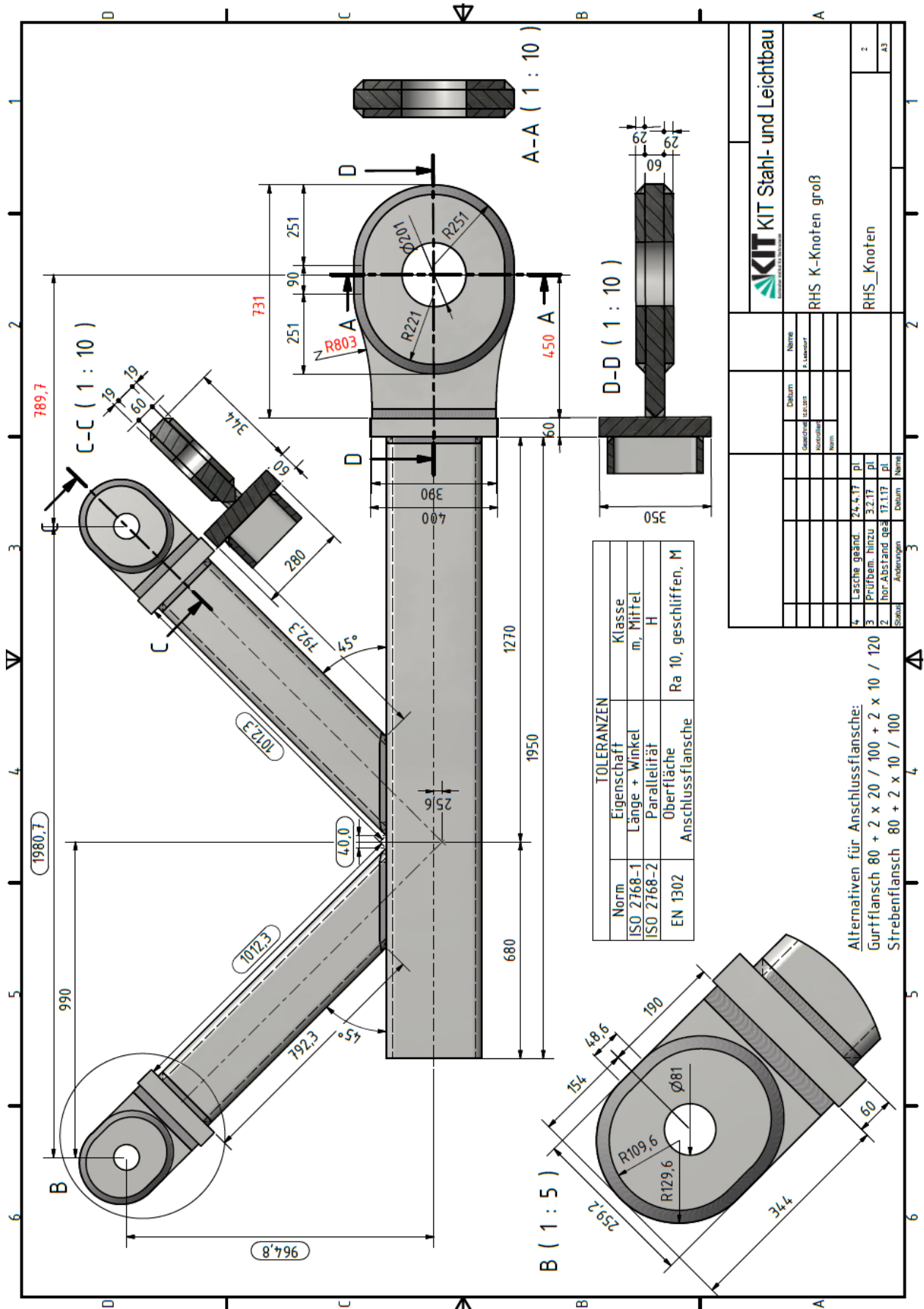




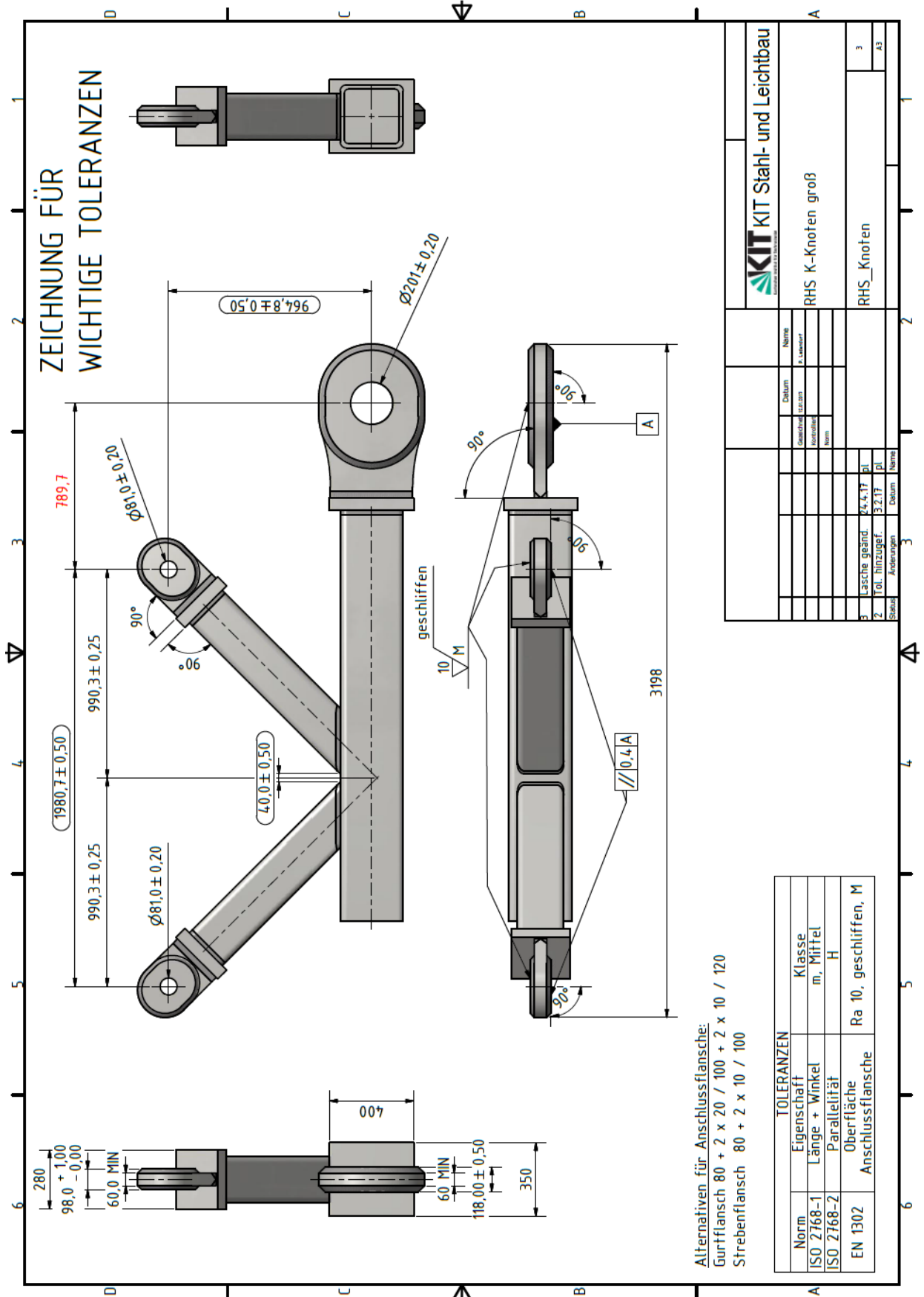




Konstruktionszeichnung für große RHP-K-Knoten

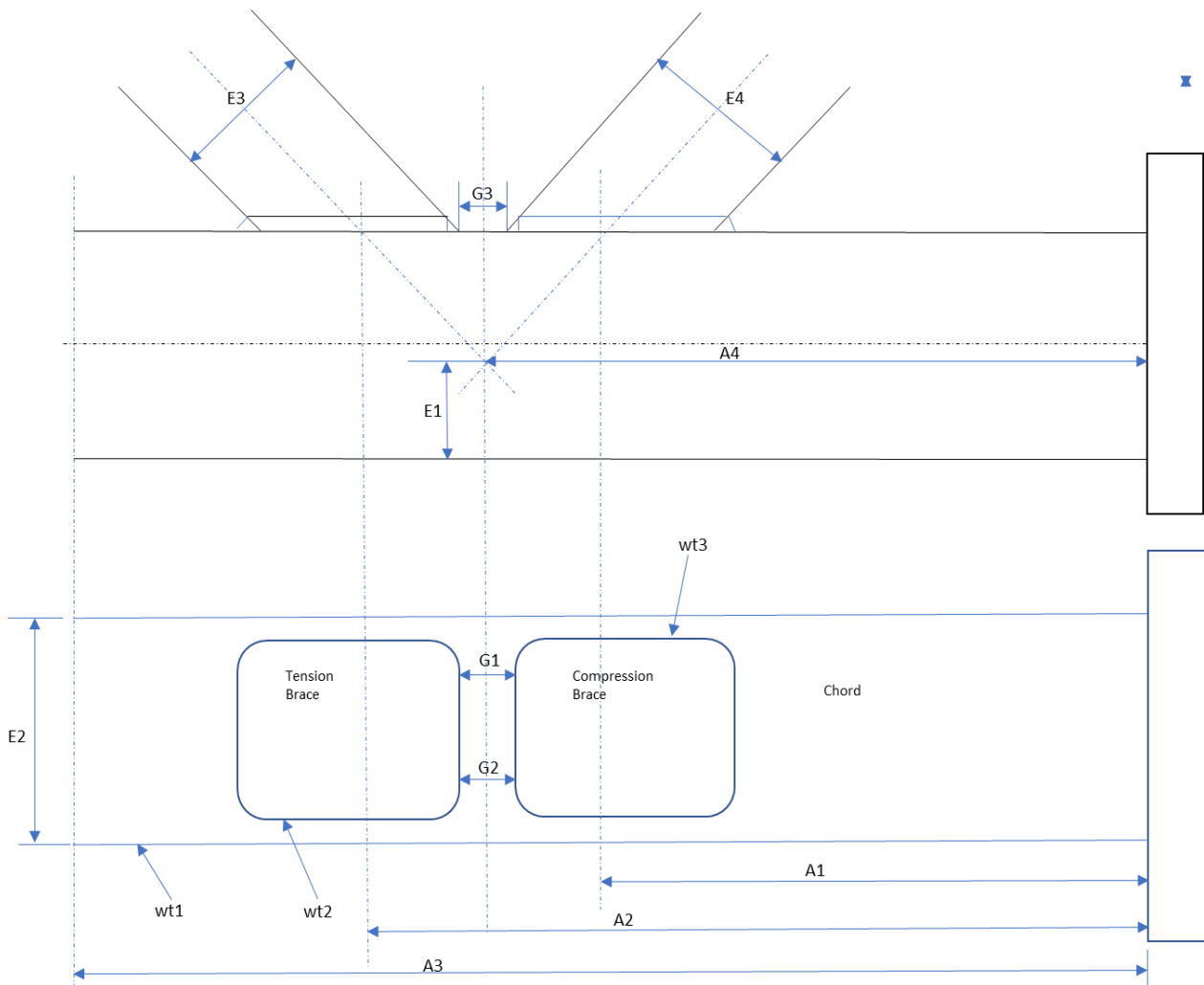


Konstruktionszeichnung für große RHP-K-Knoten





**Probekörperabmessungen kleine RHP K-Knoten**



							ch	b_t	b_c	
Probekörper	L	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	wt <sub>1</sub>	wt <sub>2</sub>	wt <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>
K45-RHS-130x4-80x4-S700-1	1805	837	957	0	0	18	3.8	3.8	3.8	71
K45-RHS-130x4-80x4-S700-2	1797	825	970	10	9	25	3.8	3.8	3.8	63
K45-RHS-130x4-80x4-S700-3	1795	825	970	0	0	18	3.8	3.8	3.9	61
K45-RHS-130x4-80x4-S700-4		840	960	13.5	10	30	3.96	3.92	4.02	67.3
K45-RHS-130x4-80x4-S700-5		840	961	11	13.5	30	3.94	3.95	3.97	65.5
K45-RHS-130x4-80x4-S500-1	1800	837	957	10	10	27.5	4.28	4.31	4.34	66.5
K45-RHS-130x4-80x4-S500-2	1800	841	962	7	7.5	24	4.37	4.37	4.34	71
K45-RHS-130x4-80x4-S500-3	1800	838	961	6.5	8	24.5	4.36	4.33	4.35	66
K45-RHS-130x4-80x4-S500-4	1800	833	965	15.4	12.7	31	4.17	4.18	4.31	65
K45-RHS-130x4-80x4-S500-5	1800	834	968	11	11	29.1	4.33	4.28	4.25	67
K45-RHS-130x4-80x4-S500-6	1800	831	968	11.3	10.4	30.2	4.34	4.33	4.32	65
K45-RHS-130x4-80x4-S500-7	1800	835	968	10.1	11.1	28.8	4.33	4.32	4.27	67

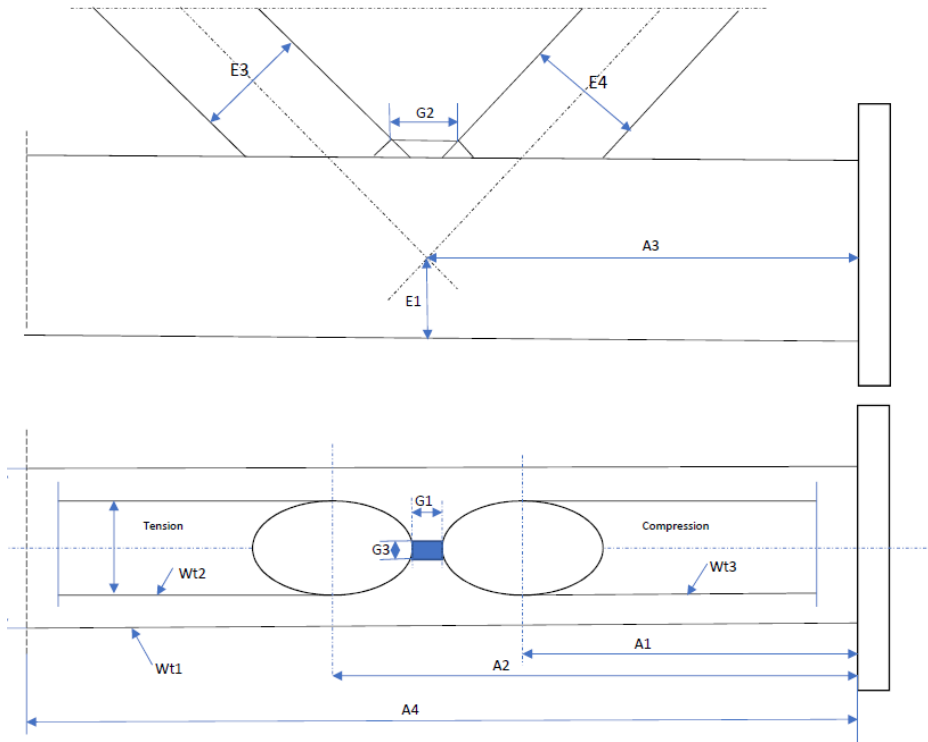
ANHANG A4 – Abmessungen

ANNEX A4 – Measuring and Dimension

K45-RHS-130x4-80x4-S500-8	1800	832	967	12.6	10.2	28.8	4.32	4.32	4.3	65
							ch	b_t	b_c	
Probekörper	L	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	wt <sub>1</sub>	wt <sub>2</sub>	wt <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>
K45-RHS-100x6-80x4-S700-1	1800	837	961	11.5	12.5		6	4	4	35
K45-RHS-100x6-80x4-S700-2	1800	835	962	12.5	12.5		5.84	4.02	4.02	38.7
K45-RHS-100x6-80x4-S700-3	1799	835	961	11.5	9.5		5.7	3.8	4.03	38
K45-RHS-100x6-80x4-S700-4	1800	837	962	13.4	12	29.5	5.81	3.82	3.94	37
K45-RHS-100x6-80x4-S700-5							5.79	3.94	3.96	
K45-RHS-100x6-80x4-S700-6	1800	837	962	14.5	12	29	5.83	4.06	4	
K45-RHS-100x6-80x4-S700-7	1800	836	964	11	8.7	29.6	5.79	3.97	3.97	36.5
K45-RHS-100x6-80x4-S700-8	1800	837	966	11.2	9.3	28.8	5.73	3.92	3.92	36

Probekörper	b <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	t <sub>0</sub>	A <sub>chord</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	A <sub>brace</sub>
K45-RHS-130x4-80x4-S700-1	130	130	3.8	1918	80	80	3.8	1158.24
K45-RHS-130x4-80x4-S700-2	130	130	3.8	1918	80	80	3.8	1158.24
K45-RHS-130x4-80x4-S700-3	130	130	3.8	1918	80	80	3.8	1158.24
K45-RHS-130x4-80x4-S700-4	130	130	3.96	1996	80	80	3.92	1192.934
K45-RHS-130x4-80x4-S700-5	130	130	3.94	1987	80	80	3.95	1201.59
K45-RHS-130x4-80x4-S700-6	130	130	4	2016	80	80	4	1216
K45-RHS-130x4-80x4-S700-7	130	130	4	2016	80	80	4	1216
K45-RHS-130x4-80x4-S700-8	130	130	4	2016	80	80	4	1216
K45-RHS-130x4-80x4-S500-1	130	130	4.28	2152	80	80	4.31	1304.896
K45-RHS-130x4-80x4-S500-2	130	130	4.37	2196	80	80	4.37	1322.012
K45-RHS-130x4-80x4-S500-3	130	130	4.36	2191	80	80	4.33	1310.604
K45-RHS-130x4-80x4-S500-4	130	130	4.17	2099	80	80	4.18	1267.71
K45-RHS-130x4-80x4-S500-5	130	130	4.33	2177	80	80	4.28	1296.326
K45-RHS-130x4-80x4-S500-6	130	130	4.34	2181	80	80	4.33	1310.604
K45-RHS-130x4-80x4-S500-7	130	130	4.33	2177	80	80	4.32	1307.75
K45-RHS-130x4-80x4-S500-8	130	130	4.32	2172	80	80	4.32	1307.75
K45-RHS-100x6-80x4-S700-1	100	100	6	2256	80	80	4	1216
K45-RHS-100x6-80x4-S700-2	100	100	5.84	2200	80	80	4.02	1221.758
K45-RHS-100x6-80x4-S700-3	100	100	5.7	2150	80	80	3.8	1158.24
K45-RHS-100x6-80x4-S700-4	100	100	5.81	2189	80	80	3.82	1164.03
K45-RHS-100x6-80x4-S700-5	100	100	5.79	2182	80	80	3.94	1199.427
K45-RHS-100x6-80x4-S700-6	100	100	5.83	2196	80	80	4.06	1233.266
K45-RHS-100x6-80x4-S700-7	100	100	5.79	2182	80	80	3.97	1207.356
K45-RHS-100x6-80x4-S700-8	100	100	5.73	2161	80	80	3.92	1192.934

**Probekörperabmessungen kleine KHP K-Knoten**



Probekörper	$d_0$	$t_0$	$A_{\text{chord}}$	$d_1$	$t_1$	$A_{\text{brace}}$
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-1	194	10	5781	114.5	6.08	2071
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-2	194	9.92	5737	114.4	6.12	2082
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-3	194	9.85	5698	115	6.02	2061
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-4	194	9.79	5672	114.3	6.09	2070
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-5	194	9.82	5682	114.3	6.06	2060
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-6	194	9.93	5742	114.1	6.1	2069
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-7	194	9.82	5682	114.3	6.08	2066
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-8	194	9.81	5677	114.5	6.05	2061
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-1	194	10.2	5884	114.1	6.27	2124
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-2	194	10.1	5820	114.1	6.27	2124
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-3	194	10	5801	114.4	6.26	2126
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-4	194	10.4	6012	114.4	6.4	2171
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-5	194	10.1	5853	114.5	6.35	2156
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-6	195	10.1	5829	114.4	6.31	2142
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-7	194	10.1	5859	114.4	6.37	2162
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-8	194	10	5815	114.4	6.31	2142

ANHANG A4 – Abmessungen

ANNEX A4 – Measuring and Dimension

Probekörper	L	A1	A2	G1	G2	G3	wt1	wt2	wt3	E1
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-1	1800	838	973	31.5	31.5	31	10	6.08	6.12	101
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-2	1800	840	978	31.5	31.5	34	9.92	6.12	6.17	100
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-3	1800	835	978	30.8	30.8	30	9.85	6.02	6.03	101
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-4	1800	837	973	30.5	30.5	33	9.79	6.09	6.12	106
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-5	1800	835	976	34	34	33	9.82	6.06	6.09	100
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-6	1800	838	977	36.8	36.8	36	9.93	6.1	6.09	103
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-7	1800	835	970	35	35	35	9.82	6.08	6.09	106
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-8	1800	838	970	34.4	34.4	29	9.81	6.05	6.03	103
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-1	1800	830	968	10.2/8.8	29.7	27.5	10.2	6.27	6.4	90
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-2	1800	833	967	12.88/11.48	31.4	28.9	10.1	6.27	6.27	102
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-3	1800	835	967	12.4/8.5	32.6	29.9	10	6.26	6.43	95
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-4	1800	835	963	9	34.7	28.5	10.4	6.4	6.4	94
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-5	1800	831	969	9.1/8.36	30.5	31.8	10.1	6.35	6.34	97
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-6	1800	833	971	9.66	29.5	29.9	10.1	6.31	6.23	97
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-7	1800	838	973	8.02/9.02	33	28	10.1	6.37	6.3	94
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-8	1800	834	969	9.1/10.2	31.5	35.9	10	6.31	6.57	97

# **ANHANG B**

## **Versuchsdokumentation**

**B1 – Versuchsaufbau am KIT**

**B2 – Dehnungsmessungen**

**B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche**



## B1 Versuchsaufbau am KIT

Aufgrund der Größe der Probekörper und des resultierenden Raumbedarfs wurde ein Unterstand zur Lagerung der Knoten konstruiert und im Labor der Versuchsanstalt hergestellt. Als festes Auflager für die Dachkonstruktion dient dabei ein quadratisches Hohlprofil, welches an den ISO-Gussecken eines Hochsee-Containers durch ein adaptiertes Twist-Lock-System befestigt wurde (siehe Abbildung B1-1). Die Dacheindeckung besteht aus Stehfalzprofilen. Die Reihenfolge der Knotensortierung entsprach dabei der Prüfreihenfolge.

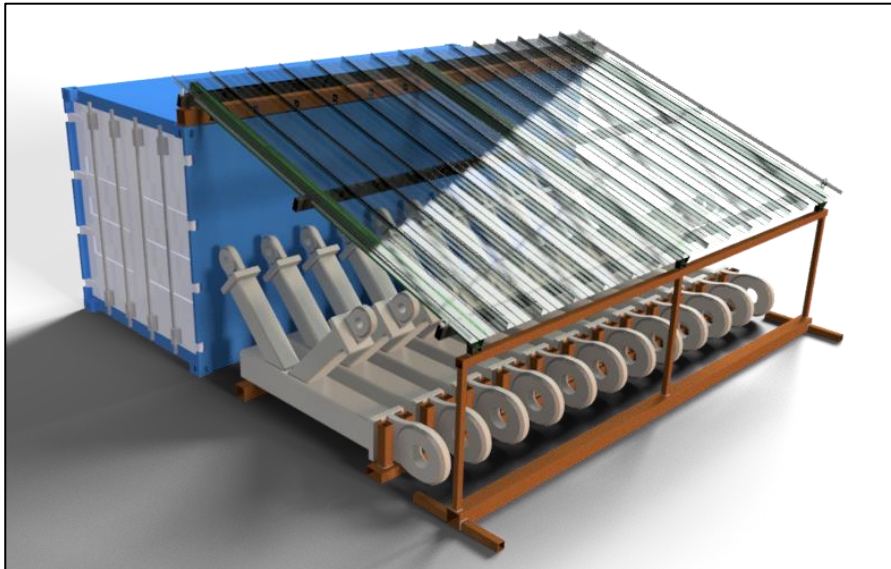


Abbildung B1-1

### Konstruktion des Prüfrahmens

#### 1. Ursprüngliches Konzept

Das ursprüngliche Konzept zur Einleitung gleicher Strebenkräfte bei K-Knoten wurde im Rahmen vom EGKS-Projekt 7210-SA/111 u.a. an der Versuchsanstalt in den 1980er Jahren entwickelt und ist in Abbildung B1-2a dargestellt. Durch eine gelenkige Verbindung der beiden Strebenenden mit scheibenartigen Seitenteilen entstehen durch das entstandene statische System bei einer Gurtbelastung gegengleiche, betragsmäßig gleich große Strebenkräfte.

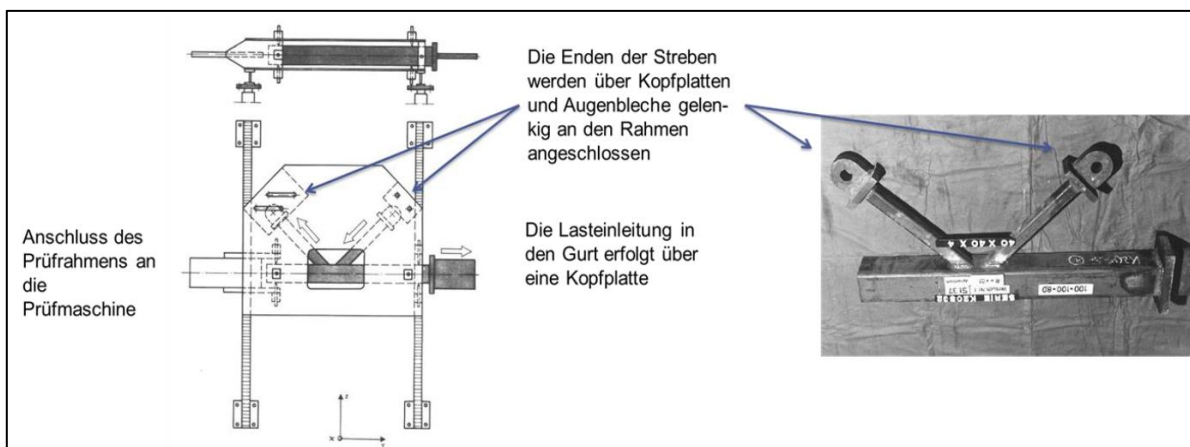


Abbildung B1-2a: erstes Konzept Prüfvorrichtung

## 2. Erste Adaption des originalen Konzeptes

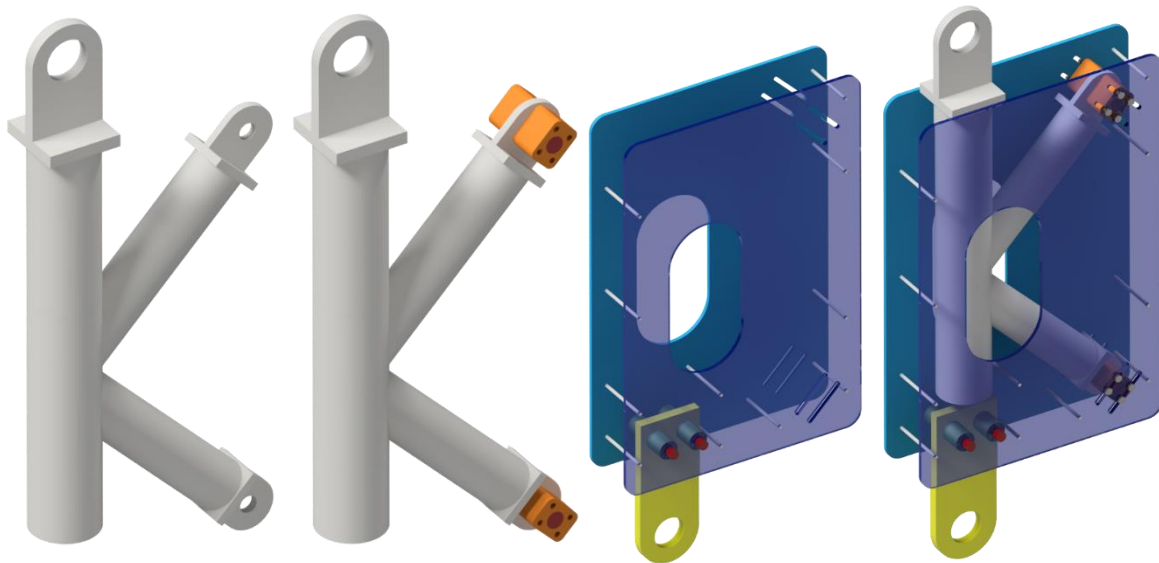


Abbildung B1-2b: erstes Konzept Prüfvorrichtung

Die orangefarbenen Strebenaufnahmen in Abbildung B1-2b werden mit Hilfe je eines  $\varnothing 60$  mm Bolzens gelenkig an die Strebenlaschen angeschlossen. Die scheibenartige Vorrichtung befindet sich für den Knoteneinbau in aufrechter Position außerhalb der Prüfmaschine. Der Knoten wird mit Hilfe eines Hallenkrans von oben in die Vorrichtung eingehoben. Nachdem die orangenen Strebenaufnahmen im Bereich der Langlöcher ausgerichtet sind, erfolgt das Vorspannen gegen die Seitenteile mit Hilfe von Schrauben der Größe M27 10.9. Beide blaufarbenen Seitenteile werden mit Hilfe von gegen Hülsen vorgespannte Gewindestangen in einem definierten Abstand gehalten. Die gelbe Maschinenlasche wird mit Hilfe von zwei Bolzen  $\varnothing 60$  mm (rot) mit den Scheiben verbunden. Hülsen (grün) gewährleisten eine Zentrierung mittig zwischen den Scheiben. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt einerseits im niedrigen Gesamtgewicht von lediglich 2350 kg und andererseits in der Möglichkeit eines Einbaus in die Prüfmaschine mit Hilfe des institutseigenen Gabelstaplers.

Der Aufbau wurde in einer numerischen Analyse untersucht. Als maximale in den Versuchen zu erwartende Prüfkraft wird eine Last von 2.500 kN angenommen. Die Diskretisierung des Modells erfolgt mit Hilfe von hexaederförmigen Volumenelementen mit quadratischer Elementansatzfunktion (Solid 186/187). Die Laschen des CHS-K-Knotens und der Vorrichtung (gelb) werden in den Bohrungscentren jeweils an einen Pilotknoten gekoppelt, der im oberen Bereich ein festes Lager und im unteren Bereich ein vertikal verschiebliches Lager idealisiert (Abbildung B1-3). Zwischen den Strebenbolzen, -laschen und -aufnahmen sowie der Maschinenlasche und beiden zugehörigen Bolzen wird ein reibungsbehafteter Kontakt ( $\mu = 0,2$ ) angenommen. Die Strebenaufnahmen (orange) sind mit den Scheiben fest verbunden. Um den Einfluss der Gewindestangen auf die Scheibenverformung qualitativ mit zu untersuchen, wird eine Einspannung in den Scheiben angenommen.

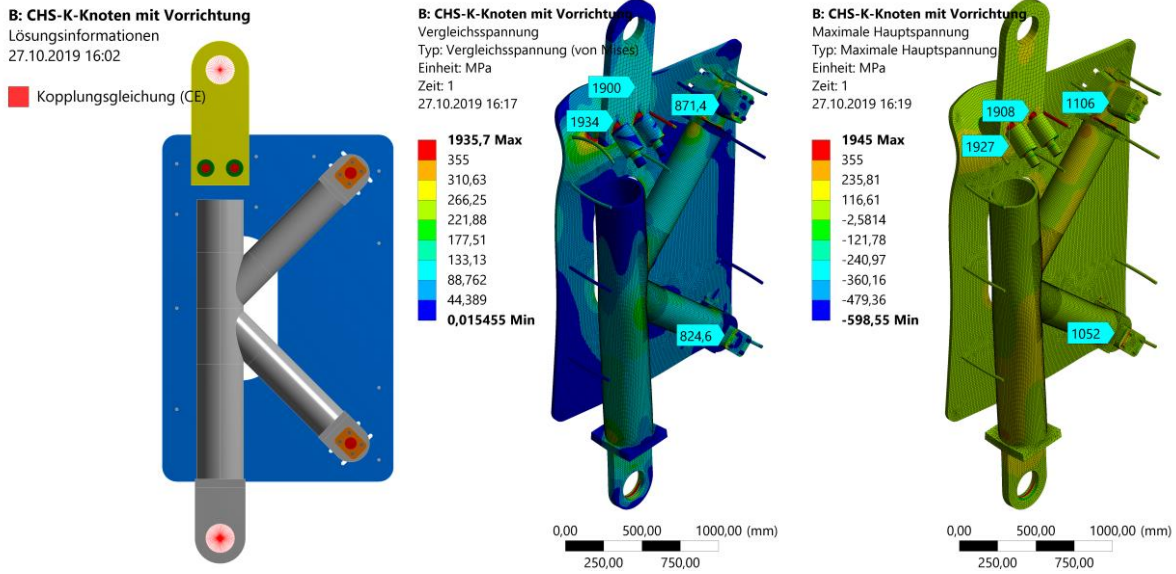


Abbildung B1-3: Ergebnisse der numerischen Untersuchung des ersten Konzepts

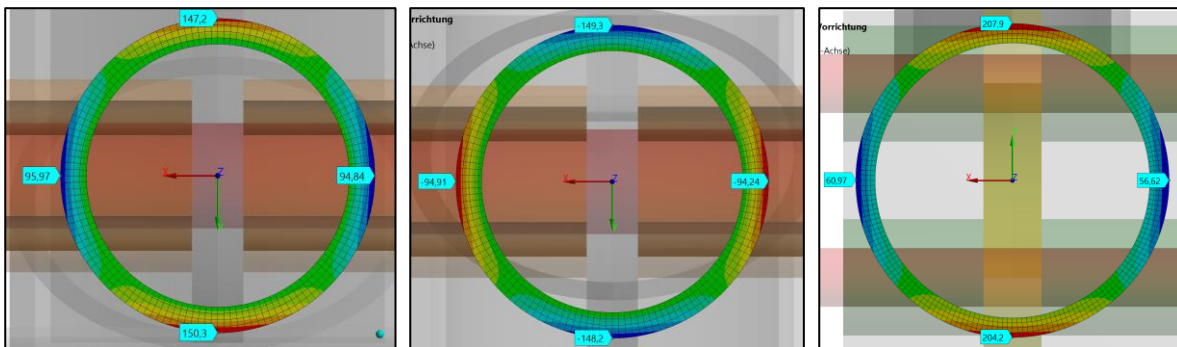


Abbildung B1-4: Ergebnisse Normalspannung in Profilrichtung (v.l.n.r: Zugstrebe, Druckstrebe, Gurt)

Die Auswertung der Normalspannung in Axialrichtung der Profile zeigt, dass ein starker Einfluss der Ovalisierung aus der Kraffteinleitung an den Lasteinleitungslaschen in Kombination mit den gewählten Kopfplattendicken von 40 mm in einem Abstand von  $3 \times D_0$  bzw.  $3 \times D_0$  zum Knotenzentrum sichtbar ist. Um die Spannungsverteilung homogener zu gestalten, sind dickere Kopfplatten notwendig, um die Spannung gleichmäßiger um den Umfang zu verteilen.

Die Vergleichs- und maximalen Hauptspannungen der Vorrichtung zeigen, dass die Bolzen im Bereich der Maschinenlasche eine hohe Auslastung besitzen (ca. 1.900 N/mm<sup>2</sup>). Da die Hülsten lediglich aufgesteckt sind, können sie keinen Beitrag zur Verringerung des Bolzenbiegemomentes liefern. Zur Verringerung der Spannungen wären deutlich größere Bolzen notwendig.

Des Weiteren beträgt die maximale Hauptspannung an den Strebenbolzen für das gewählte, höchste zu erwartende Niveau der Oberlast ca. 1.100 N/mm<sup>2</sup>. Um eine Austauschbarkeit des Bolzens gewährleisten zu können, ist hier ebenfalls ein größerer Bolzendurchmesser notwendig. Darüberhinaus führt die je einseitige Verschraubung der Strebenaufnahmen an die Scheiben zu einer Verformung außerhalb der Scheibenebene.

Die im Bereich der Strebenaufnahmen angeordneten Gewindestangen können keinen ausreichenden Beitrag zur Verhinderung der Scheibenverformung aus der Ebene leisten. Die Anordnung einer größeren Anzahl Gewindestangen würde dazu führen, dass bei jedem Knotentausch neben dem Ausbau der gesamten Vorrichtung Gewindestangen aus- und wieder eingebaut werden müssten.

Folgende Probleme müssen somit in der nächsten Iterationsschleife gelöst werden:

- Beibehaltung des niedrigen Gewichts
- Reduzierung
  - o der Ausnutzung der Maschinen- und Strebenbolzen
  - o der Scheibenverformung außerhalb der Scheibenebene
  - o der Ovalisierung infolge der Lasteinleitungen

### 3. Weiterentwicklung des ersten Konzeptes

Um die vorgenannten Punkte zu optimieren, steht zunächst die Reduzierung der Scheibenverformung im Bereich der Maschinen- und Strebenaufnahmen im Vordergrund. Die Krafteinleitung in die Scheibenebene wird mit einem flächigen, gleitfesten Verbund zwischen den Maschinen- und Strebenaufnahmen und den Scheiben angestrebt, der im Kontaktbereich keine Verformungen senkrecht zur Scheibenebene zulässt. In den Abbildungen B1-5 und B1-6 sind die überhöht dargestellten Verformungen infolge der Knotenbelastung an den Streben- bzw. der Maschinenlasche abgebildet.

- Maschinenlasche: Um die Last aus der Maschine einzuleiten, wird statt der Bolzen eine gleitfeste Verbindung mit voll vorgespannten Schrauben verwendet. Die Last wird ausgehend von der Bohrung in die Lasche eingeleitet und durch insgesamt 4 Längssteifen mit keilförmiger Anschrägung in die Kontaktbleche übertragen. Die voll vorgespannten Schrauben führen zu einer ermüdungsgerechten Kraftübertragung durch die Aktivierung von Reibkräften. Als Schrauben werden Maschinenbauschrauben der Güte 12.9 verwendet. Zur Erhöhung der Reibzahl kommt ein Alkali-Zink-Silikat Anstrich zum Einsatz (strichlierte Linie in Abbildung B1-5).
- Strebenlasche: Zum Anschluss der Strebenlaschen ist eine Aussparung in der Mitte der Strebenaufnahmen erforderlich. Zur Aufnahme des aus der Bolzenbiegung resultierenden Kräftepaars werden Zug- bzw. Druckstege angeordnet (siehe Abbildung B1-6).

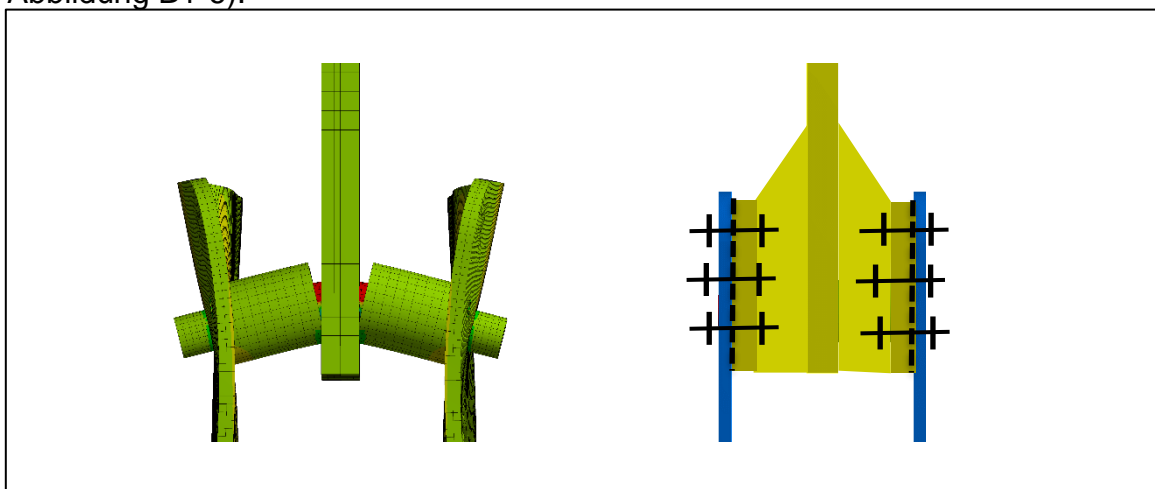


Abbildung B1-5, Überhöhte Darstellung der Verformungen der Maschinenlasche (12x) und Änderungsansatz

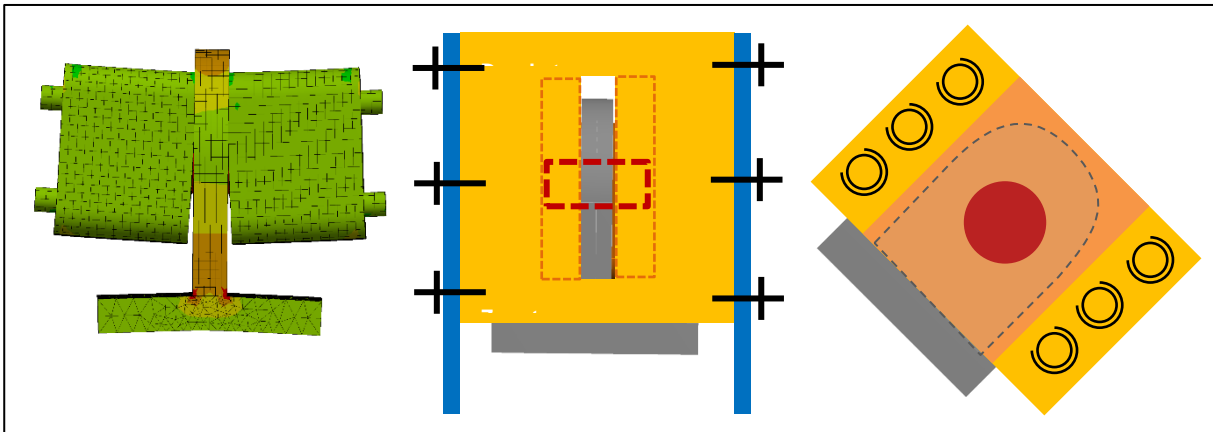


Abbildung B1-6: Überhöhte Darstellung der Verformungen der Strebenaufnahmen (25x) und abgeleiteter Änderungsansatz

Um den Knotenaustausch zu gewährleisten, ist jedoch eine Änderung des in Abbildung B1-6 gewählten Ansatzes erforderlich. Die Weiterentwicklung der Strebenaufnahme führt zu der in Abbildung B1-7 dargestellten, finalen Variante. Der Bohrungsdurchmesser zur Aufnahme des Bolzens beträgt 100 mm. Die beiden Strebenaufnahmen besitzen einen Öffnungswinkel von 45°. Der Knotenaustausch wird nun in horizontaler Richtung durchgeführt (Abbildung B1-8). Der Prüfrahmen verbleibt währenddessen in der Prüfmaschine.

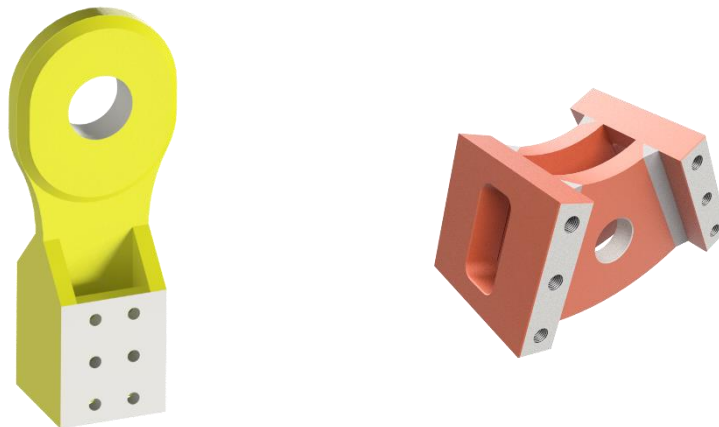


Abbildung B1-7: Angepasste Maschinenaufnahme, finale Strebenaufnahme

Da die Streben- und die Maschinenaufnahme im Vergleich zur ersten Variante deutlich schwerer ausfallen, steigt das Prüfrahmengewicht trotz einer stark optimierten Form der Scheiben auf ca. 2.150 kg. Die nun ebenfalls ermüdungssicher konstruierten Laschen an den Streben und dem Gurt führen zu einer Steigerung des Knotengewichts auf ca. 1.000 kg.



Abbildung B1-8: gewichtsoptimiertes, nahezu finales Konzept

Dieser Aufbau wurde ebenfalls einer numerischen Analyse unterzogen (Abbildung B1-9). Wie beim ersten Konzept wird auch hier eine maximale Oberlast von 2.500 kN angesetzt. Im Bereich der Maschinenaufnahme ist trotz grober Elementierung am Ergebnis der maximalen Hauptspannung zu erkennen, dass die Form noch optimiert werden muss, um im Bereich der angeschrägten Längssteifen eine niedrigere Spannung zu gewährleisten. Die Scheiben weisen im Ausschnitt im Bereich des Knotenzentrums eine maximale Hauptspannung von 172 N/mm<sup>2</sup> auf. Im Hinblick auf die Ermüdungssicherheit der Scheiben ist hier für zukünftige Versuche ein niedrigerer Wert anzustreben. Die Form des Ausschnittes wird im Folgenden ebenfalls noch einmal optimiert. Die Strebenaufnahmen weisen hingegen eine zufriedenstellende Spannungsverteilung auf. Da die Schrauben zwischen Strebenaufnahmen und Scheiben voll vorgespannt werden und dies auch im FE-Modell so berücksichtigt wurde, können die hohen Spannungen im Bereich der Schrauben vernachlässigt werden, da diese Maxima aus der statischen Vorspannkraft resultieren.

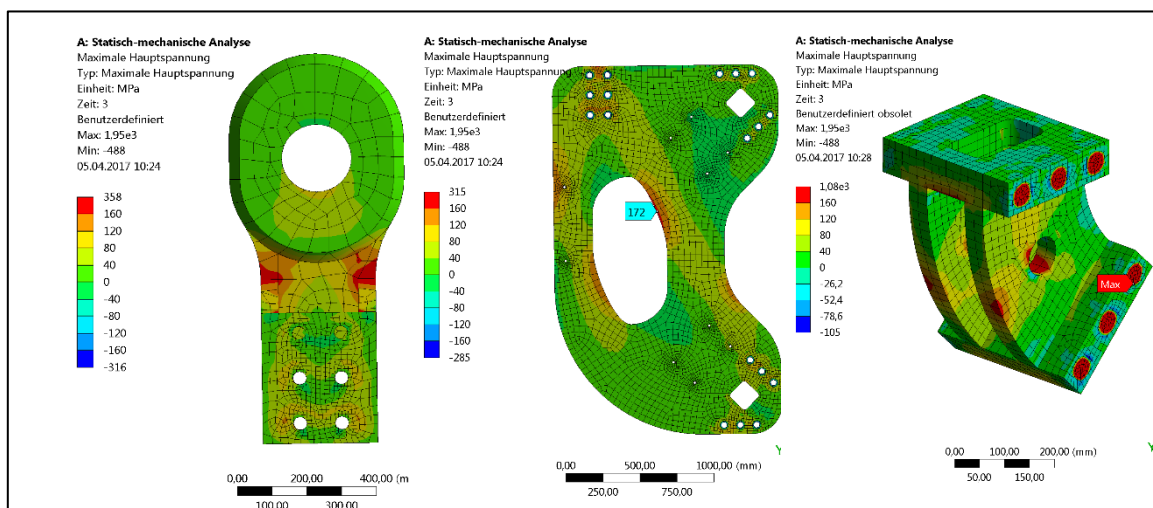


Abbildung B1-9: Numerische Analyse des zweiten Konzepts

#### 4. Finales Konzept mit Bolzenschieber und Auslegern mit Gegengewichten

##### 4.1 Optimierung der Maschinenaufnahme

Die numerische Untersuchung der Maschinenaufnahme hat gezeigt, dass eine Optimierung der geschweißten Details notwendig ist, um für die Versuche eine ausreichende Ermüdungssicherheit zu gewährleisten. Die in Abbildung B1-7 und B1-9 dargestellte, stark optimierte Variante wird durch eine deutlich konservativere, ermüdungssichere Variante ersetzt (siehe Abbildung B1-10). Die berechnete charakteristische Lebensdauer liegt unter Ansatz der quadratischen Extrapolation (Lastschwingbreite 2500 kN,  $\Delta\sigma_{ref.} = 100 \text{ N/mm}^2$ ) bei 1,84 Mio. Schwingspielen. Zusätzlich wird der Nahtübergang durch HFH nachbehandelt.

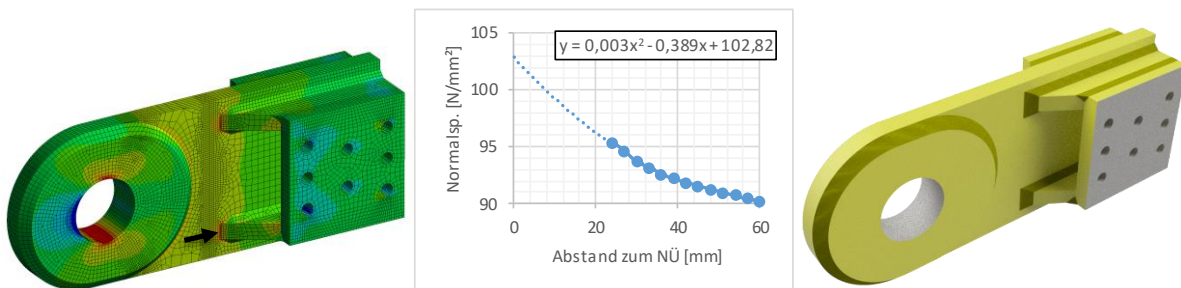


Abbildung B1-10: Numerische Untersuchung der Maschinenaufnahme

##### 4.2 Konstruktion des Bolzenschiebers

Durch die Veränderung der Einbausituation verbleibt die Prüfvorrichtung jederzeit in der Prüfmaschine. Der Knoten kann somit einzeln ausgetauscht werden. Neben dem obligatorischen Herausziehen des Verbindungsbolzens der Prüfmaschine müssen ebenfalls die beiden Strebenbolzen an den Strebenlaschen entfernt werden. Während das Herausziehen des unteren Bolzens an der Druckstrebe händisch möglich ist, befindet sich der Bolzen der Zugstrebe in einer Höhe von ca. 3,50 m. Aus Gründen des Arbeitsschutzes ist dies nur mit Hilfe eines Gerüsts möglich. Um das Aufstellen eines Gerüsts zu vermeiden, erfolgt die Bolzenverschiebung mit Hilfe eines an der Vorrichtung adaptierten, doppelwirkenden hydraulischen Zylinders, auf dessen Kolbenstangenende der Zugstrebenbolzen aufgeschraubt ist (Abbildung B1-11, links).

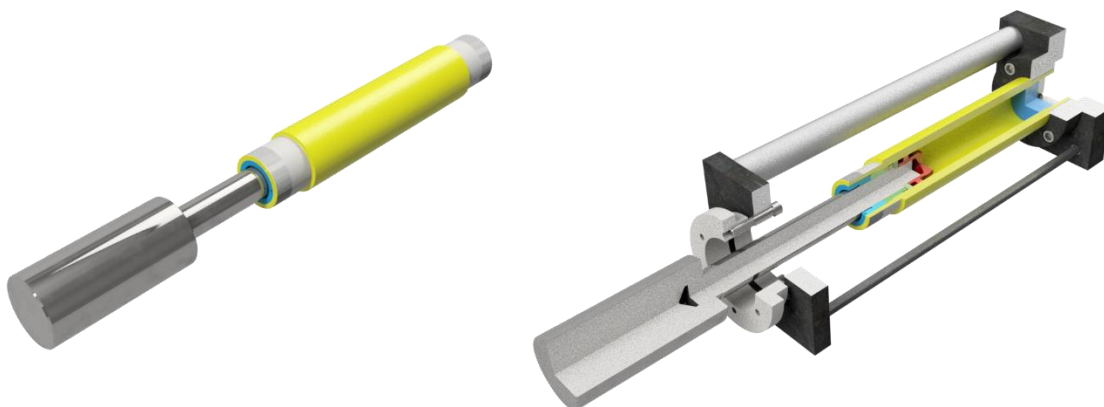


Abbildung B1-11: hydraulischer Zylinder (links) und konstruierter Bolzenschieber (rechts)

Aufgrund des geringen Lochspiels zwischen Bolzen und Strebenlaschenbohrung von 1 mm kann es beim Herein- oder Herausziehen des Bolzens zu großen Reibungskräften kommen. Während durch das Hereindrücken des Bolzens eine abhebende

Kraftkomponente entsteht, muss beim Herausziehen des Bolzens eine abstützende Kraftkomponente von außen gegen die Scheiben der Vorrichtung aufgenommen werden. Der Zylinder ist am Fußpunkt mit einer Fußplatte verschraubt. Gewindestangen verspannen vier Rundhohlprofile  $\text{Ø}48,3 \times 5$  mm zwischen der Fußplatte und einer Kopfplatte. Die Gewindestangen können die zuvor beschriebene abhebende Kraftkomponente in der Fußplatte aufnehmen und in die Kopfplatte leiten. Zur Befestigung der Kopfplatte an der Außenseite der Scheibe ist eine Änderung des quadratischen Ausschnittes im Bereich der Strebenaufnahme zu einem kreisförmigen Ausschnitt notwendig. Dies ermöglicht die Weiterleitung der Zugkraft durch ein kreisförmiges Lochbild in einen gegen den runden Ausschnitt gespannten Ringflansch. Die Aufnahme der Druckkraft beim Herausziehen des Bolzens erfolgt durch die Abstützung der Fußplatte an den Rundhohlprofilen  $\text{Ø}48,3 \times 5$  mm, die sich wiederum an der Kopfplatte abstützen. Da die Kopfplatte bereits gegen die Scheibe gespannt ist, wird die abstützende Kraft durch einen flächigen Kontakt abgetragen. Der fertige Zusammenbau ist in Dreiviertel-Schnitten in Abbildung B1-11 rechts, bzw. Abbildung B1-12 sowie in der ausgeführten Form in Abbildung B1-13 dargestellt.

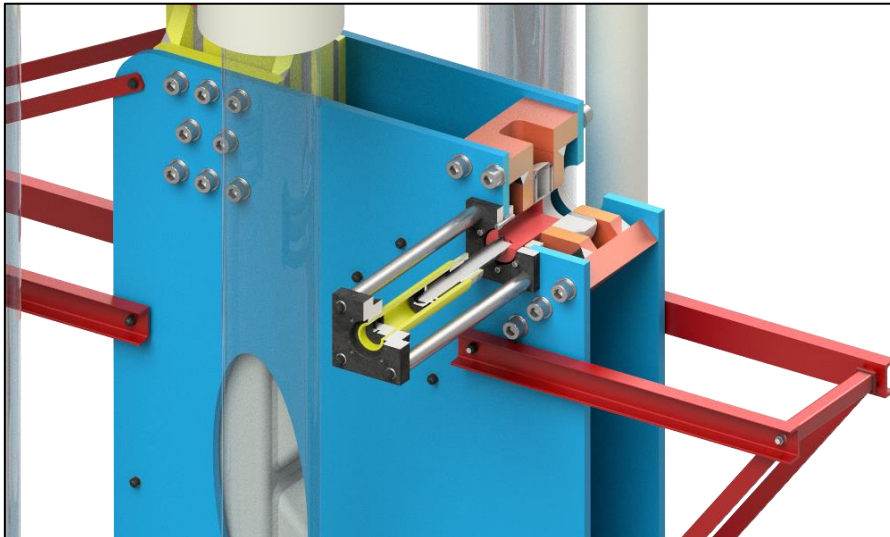


Abbildung B1-11: Dreiviertel-Schnitt Bolzenschieber und Vorrichtung



Abbildung B1-12: Ausgeführter Bolzenschieber



#### 4.3 Ausleger mit Gegengewichten

Aufgrund der Asymmetrie des K-Knotens in der Knotenebene ergibt sich auch für die Prüfvorrichtung ein asymmetrisches Konzept, welches zu einer Exzentrizität des Schwerpunktes bezogen auf den Verankerungspunkt der Vorrichtung an der oberen Maschinenaufnahme führt.

Der Ausgleich der Schwerpunktexzentrizität ist aus zwei Gründen erforderlich:

1. Die resultierende Querkraft auf den Kolben der Prüfmaschine muss vermieden werden.
2. Die Vorrichtung muss beim Ein- und Ausbau des Knotens lotrecht ausgerichtet sein.

Das Gegengewicht darf jedoch beim Ein- und Ausbau nicht den Weg versperren.

Aus diesem Grund wird für die Situationen „Prüfung“ und „Knotentausch“ auf beiden Seiten je ein Ausleger im oberen Teil der Prüfvorrichtung angeordnet (siehe Abbildung B1-13). An den Ausleger auf der linken Seite der Vorrichtung wird im Prüfzustand ein Behälter mit Stahl-Gewichten von ca. 500 kg angebracht. Im Zustand Knotentausch wird auf der rechten Seite der Vorrichtung der Hallenkran eingehängt, um die Vorrichtung für den Knotentausch exakt ausrichten zu können.

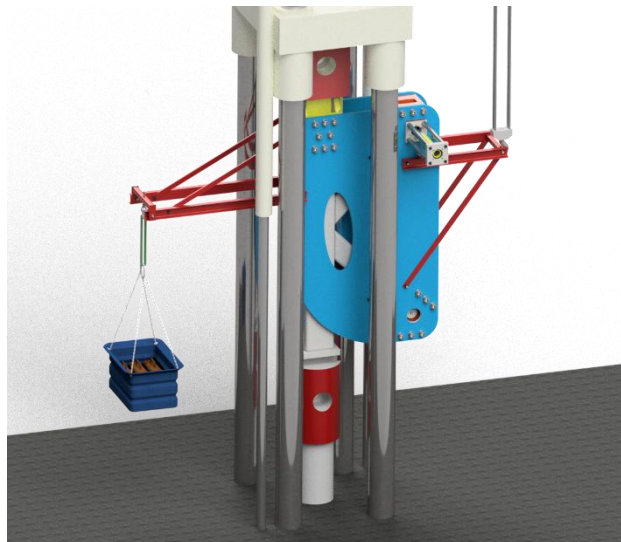


Abbildung B1-13: links torseitiger Ausleger, rechts hallenseitiger Ausleger mit Kran

#### 4.4 Ermüdungssichere Scheiben

Aufgrund des gestiegenen Gewichtes der finalen Maschinenaufnahme ist der Einbau mit dem Gabelstapler nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wird auch für die Scheiben ein konservativerer Ansatz gewählt. Die endgültige Variante ist in Abbildung B1-14 dargestellt. Der kleinere, leicht gedrehte, elliptische Ausschnitt am Knotenzentrum ermöglicht dabei weiterhin die visuelle Inspektion des Strebenanschlussbereichs. Die errechnete Lebensdauer liegt dabei für das Grundmaterial bei 6,9 Mio. Lastwechseln bei einer Lastschwingbreite von 2500 kN.

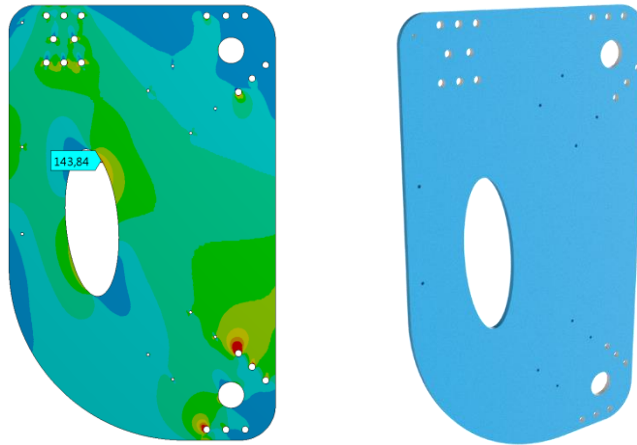


Abbildung B1-14: Maximale Hauptzugspannung Ellipse und finale Scheibengeometrie

#### 4.5 Einbau Vorrichtung

Der Einbau der Vorrichtung ist den folgenden Abbildung zu entnehmen.

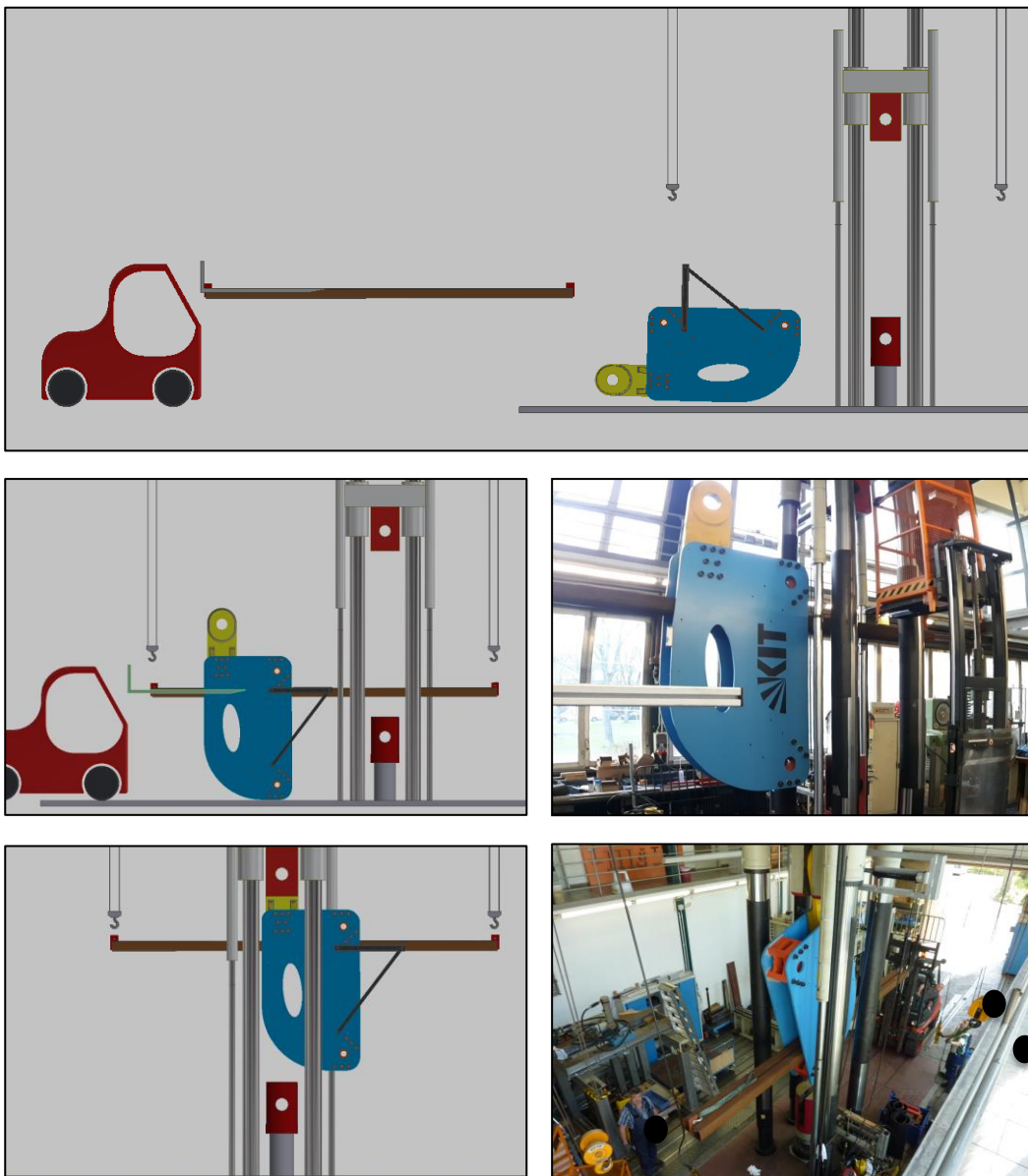


Abbildung B-15: Vorgehen zum Einbau der Vorrichtung in die Prüfmaschine

Die Vorrichtung wird zunächst vom Hallenkran in den Bereich vor der Prüfmaschine bewegt. Nach der vertikalen Aufrichtung der Vorrichtung wird mit Hilfe des Gabelstaplers ein Zwillingsquadrathohlprofil zwischen die Scheiben unterhalb der Maschinenaufnahme bewegt. Die links- und rechtsseitigen Hallenkrane werden jeweils an einer Lasche befestigt und im Gleichschritt nach rechts bewegt, um die Vorrichtung in der Prüfmaschine auszurichten. Durch Einfahren des oberen Maschinenbolzens wird die Vorrichtung mit der Prüfmaschine verbunden. Danach erfolgt das Herausziehen des Zwillingsprofils und alle Anbauteile werden an der Prüfvorrichtung montiert (Ausleger, Bolzenschieber).

#### 4.6 Knotenaustausch

Der auf dem Boden befindliche Knoten wird mit Hilfe des Hallenkrans an der Zugstrebe nach oben gezogen, bis er frei an der roten Schlaufe schwingt. Der Blechgreifer am offenen Knotenende wird mit Hilfe der violetten Schlaufe am Haken des Kettenzugs befestigt. Durch Verkürzung des Kettenzugs wird der Knoten in der Vertikale positioniert (siehe Abbildung B-16).

Für den Knotentausch wird das Gegenwicht entfernt und die Vorrichtung durch den rechtsseitigen Kran in der Vertikale stabilisiert. Mit Hilfe einer Hebevorrichtung wird der mit Spanngurten befestigte Knoten in die Prüfmaschine eingeschoben. Durch Kommandos einer Person, die sich auf der Galerie befindet, erfolgt die Positionierung der oberen Knotenlasche innerhalb der oberen Strebenaufnahme. Unter Gewährleistung der Fluchtung der Bohrungen der Strebenaufnahme und –lasche wird mit Hilfe des hydraulischen Bolzenschiebers der Bolzen eingeschoben (Abbildung B-17). Abhängig vom Knotentyp (CHS oder RHS) werden verschiedene Anschlagbleche verwendet (siehe Abbildung B-18).

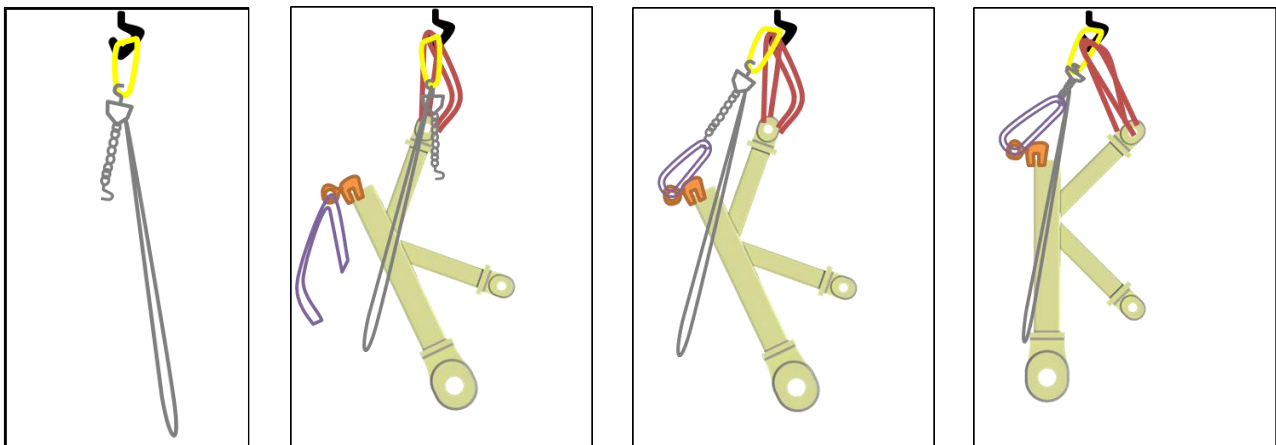


Abbildung B-16: Vertikale Ausrichtung des Knotens zur Transportvorbereitung

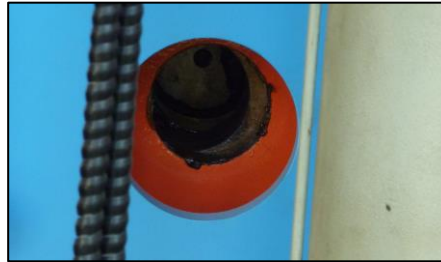
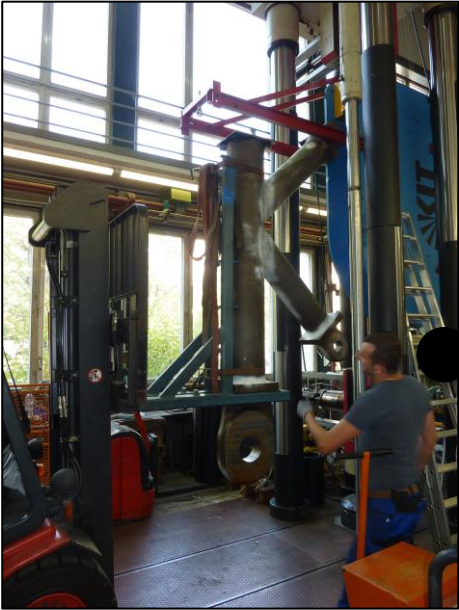


Abbildung B-17: Knoteneinbau

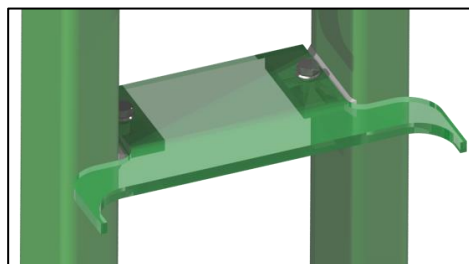
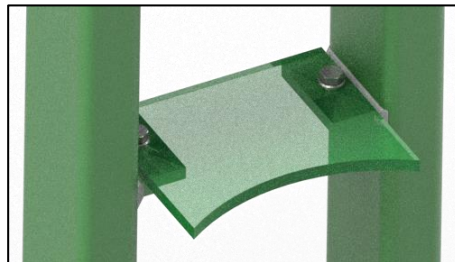
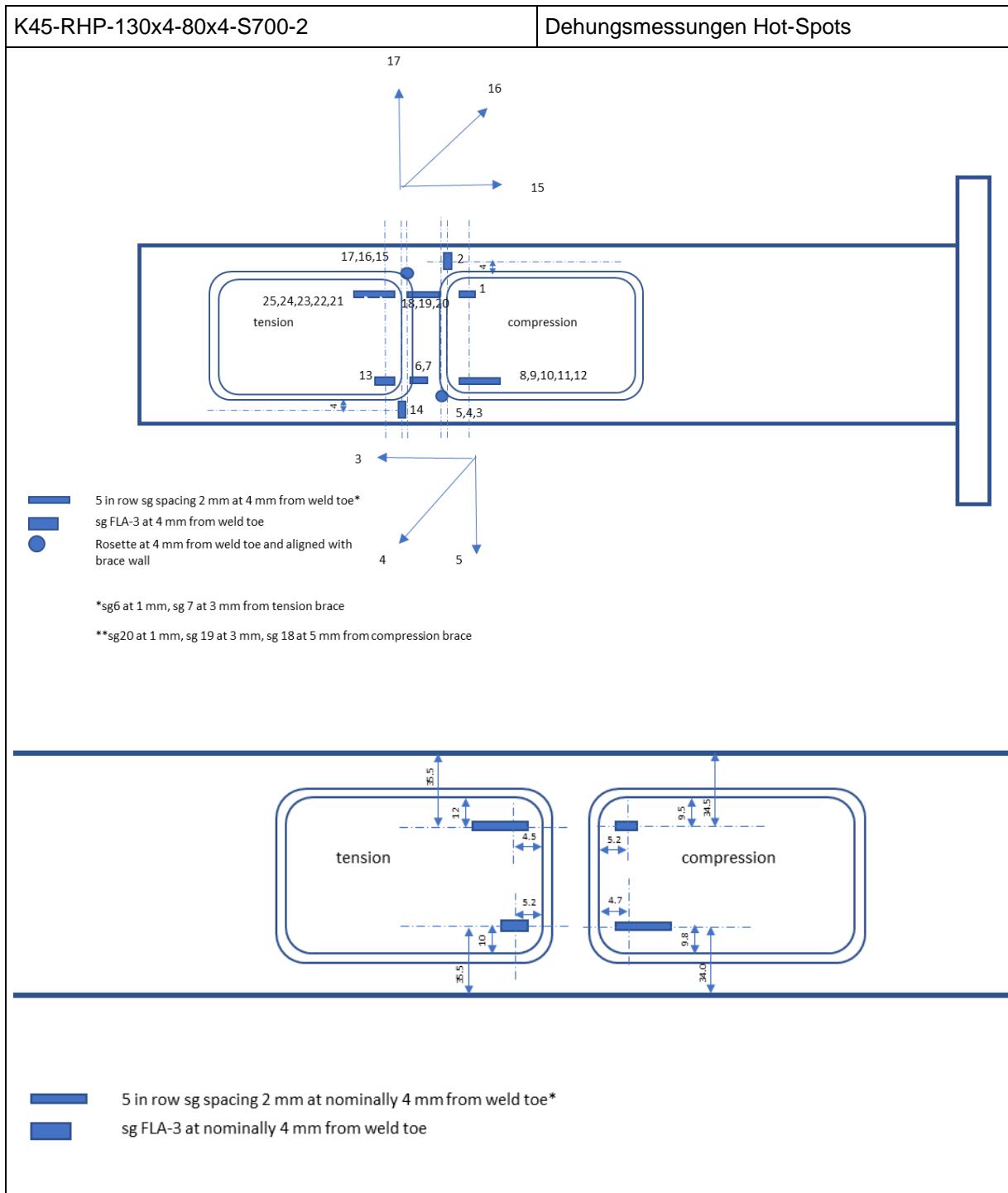


Abbildung B-18: Hilfsmittel zum Knotenaustausch

## B2 Dehnungsmessungen



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

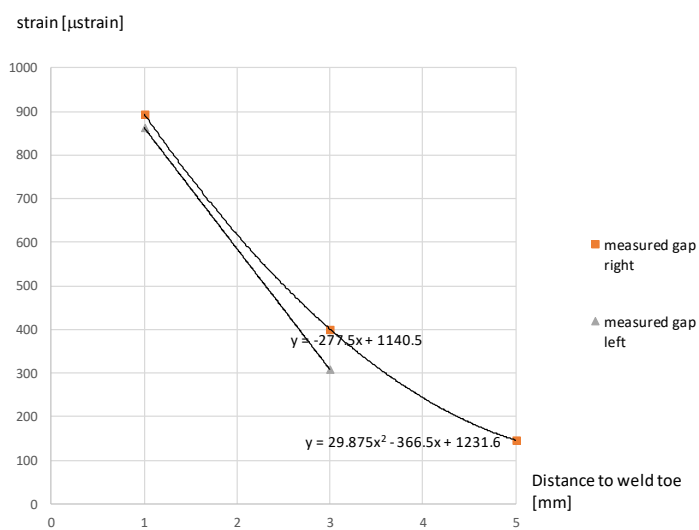
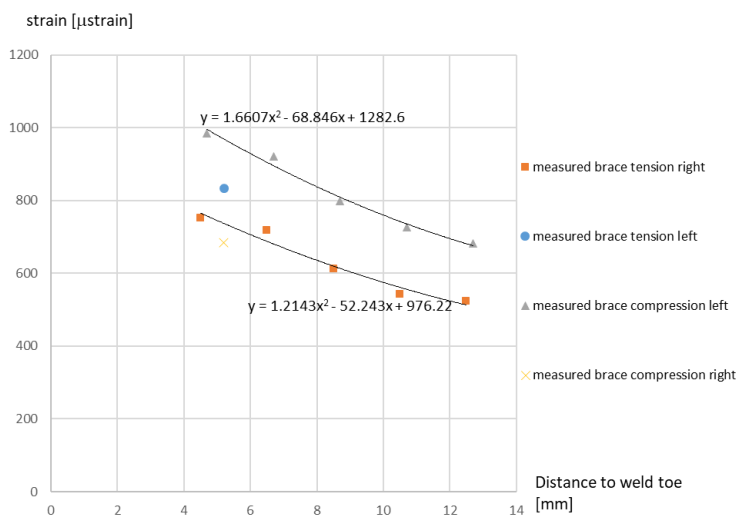
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-130x4-80x4-S700-2			Dehnungsmessungen an den Hot spots	
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
	51.5	54.9	75.1	
DMSs	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS 21	4.5	1	752	Zugstrebe
DMS 22	6.5	1	718	Zugstrebe
DMS 23	8.5	1	612	Zugstrebe
DMS 24	10.5	1	542	Zugstrebe
DMS 25	12.5	1	524	Zugstrebe
DMS 13	5.2	3	834	Zugstrebe
DMS 1	5.2	3	684	Druckstrebe
DMS 8	4.7	1	985	Druckstrebe
DMS 9	6.7	1	921	Druckstrebe
DMS 10	8.7	1	798	Druckstrebe
DMS 11	10.7	1	726	Druckstrebe
DMS 12	12.7	1	683	Druckstrebe
DMS 18	5	1	146	Gurt Spalt
DMS 19	3	1	401	Gurt Spalt
DMS 20	1	1	895	Gurt Spalt
DMS 6	1	1	863	Gurt Spalt
DMS 7	3	1	308	Gurt Spalt
DMS 17	4	3	437	Rosette
DMS 16	4	3	486	Rosette
DMS 15	4	3	670	Rosette
DMS 2	4	3	819	Zugstrebe
DMS 5	4	3	60	Rosette
DMS 4	4	3		Rosette
DMS 3	4	3	28	Rosette
DMS 14	4	3	164	Druckstrebe

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-130x4-80x4-S700-2

Dehnungsmessungen an den Hot spots

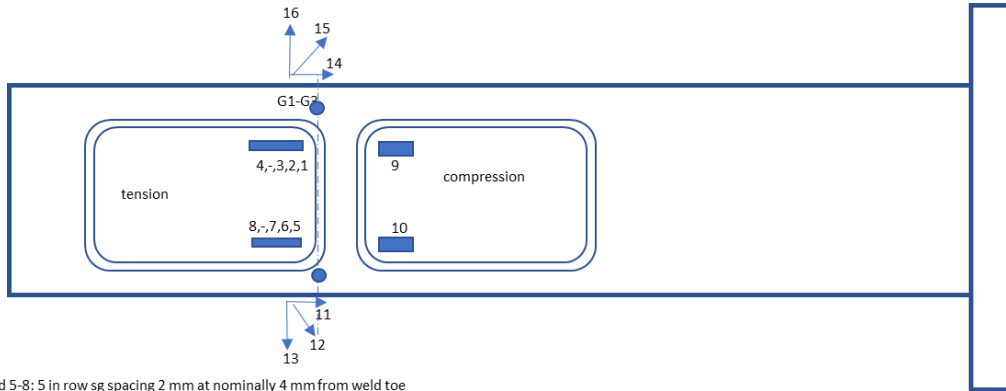


ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

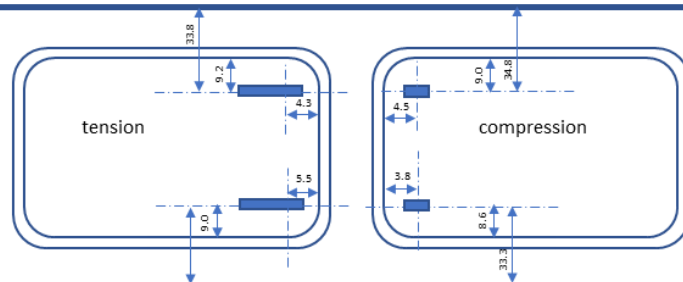
K45-RHP-130x4-80x4-S700-3

Dehnungsmessungen an den Hot spots

Bottom view



- 1-4 and 5-8: 5 in row sg spacing 2 mm at nominally 4 mm from weld toe
- 9 and 10: sg FLA-3 at nominally 4 mm from weld toe
- 11-13 and 14-16 Rosette at 4 mm from weld toe and aligned with brace wall



- 5 in row sg spacing 2 mm at nominally 4 mm from weld toe\*
- sg FLA-3 at nominally 4 mm from weld toe



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

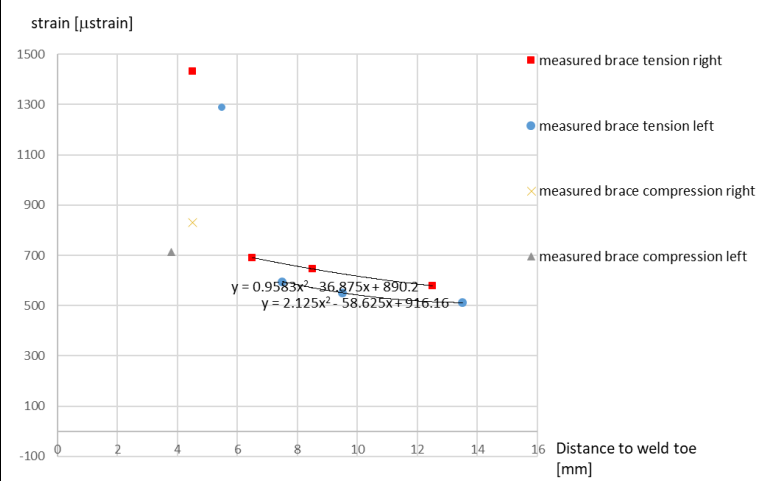
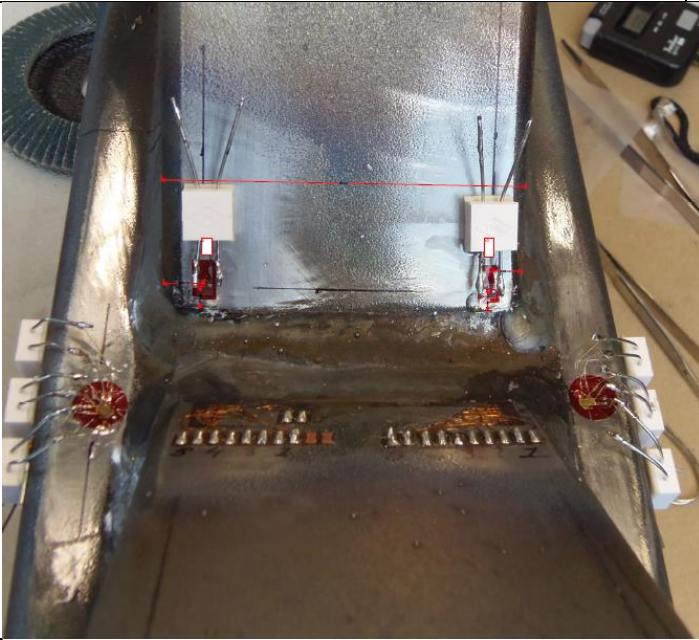
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-130x4-80x4-S700-3			Dehnungsmessungen an den Hot spots	
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
DMSs	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS 1	4.5	1433	1	Zugstrebe
DMS 2	6.5	691	1	Zugstrebe
DMS 3	8.5	646	1	Zugstrebe
DMS 4	12.5	579	1	Zugstrebe
DMS 5	5.5	1289	1	Zugstrebe
DMS 6	7.5	596	1	Zugstrebe
DMS 7	9.5	551	1	Zugstrebe
DMS 8	13.5	512	1	Zugstrebe
DMS 9	4.5	830	3	Druckstrebe
DMS 10	3.8	713	3	Druckstrebe
DMS 11	4	280	3	Rosette
DMS 12	4	417	3	Rosette
DMS 13	4	521	3	Rosette
DMS 14	4	368	3	Rosette
DMS 15	4	270	3	Rosette
DMS 16	4	473	3	Rosette

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-130x4-80x4-S700-3

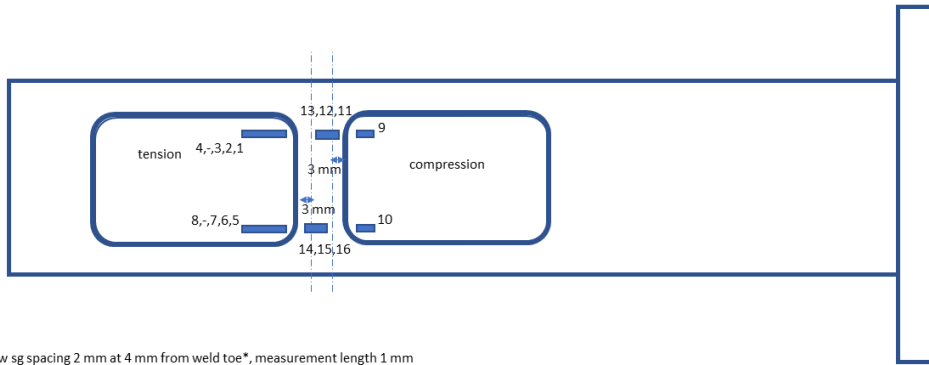
Dehnungsmessungen an den Hot spots



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

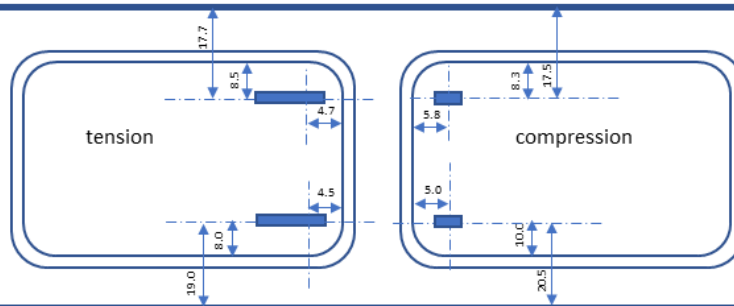
K45-RHP-100x6-80x4-S700-1 Dehnungsmessungen an den Hot spots

Bottom view



- 5 in row sg spacing 2 mm at 4 mm from weld toe\*, measurement length 1 mm
- sg at 4 mm from weld toe, measurement length 3 mm
- 3 in row sg spacing 2 mm at 3 mm from weld toe, measurement length 1 mm

\*no read out at 10 mm from weld toe



- 5 in row sg spacing 2 mm at nominally 4 mm from weld toe\*
- sg FLA-3 at nominally 4 mm from weld toe

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-100x6-80x4-S700-1			Dehnungsmessungen an den Hot spots	
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
		78.82	80.86	112.74
DMSs	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS1	1326	1	4.7	Zugstrebe
DMS2	582	1	6.7	Zugstrebe
DMS3	548	1	8.7	Zugstrebe
DMS4	520	1	12.7	Zugstrebe
DMS5	1024	1	4.5	Zugstrebe
DMS6	493	1	6.5	Zugstrebe
DMS7	499	1	8.5	Zugstrebe
DMS8	504	1	12.5	Zugstrebe
DMS9	738	3	5.8	Druckstrebe
DMS10	808	3	5.0	Druckstrebe
DMS11	589	1	3	Gurt Spalt
DMS12	395	1	5	Gurt Spalt
DMS13	250	1	7	Gurt Spalt
DMS14	616	1	3	Gurt Spalt
DMS15	141	1	5	Gurt Spalt
DMS16	259	1	7	Gurt Spalt

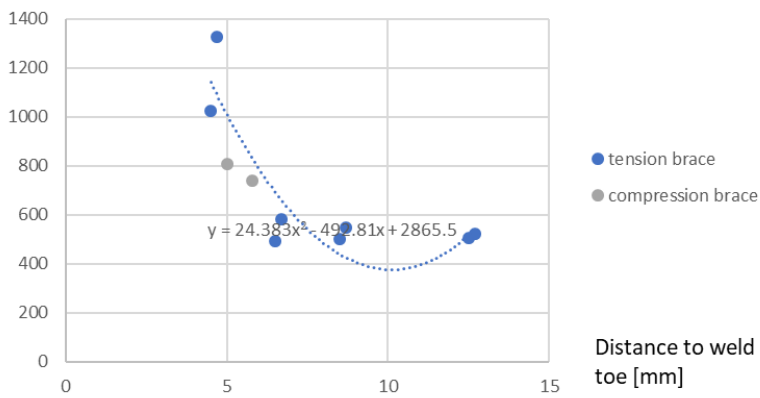
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-100x6-80x4-S700-1

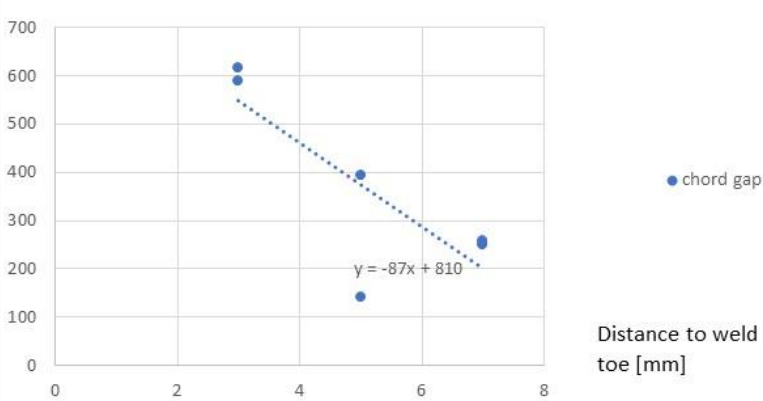
Dehnungsmessungen an den Hot spots



strain range [ $\mu$ strain]

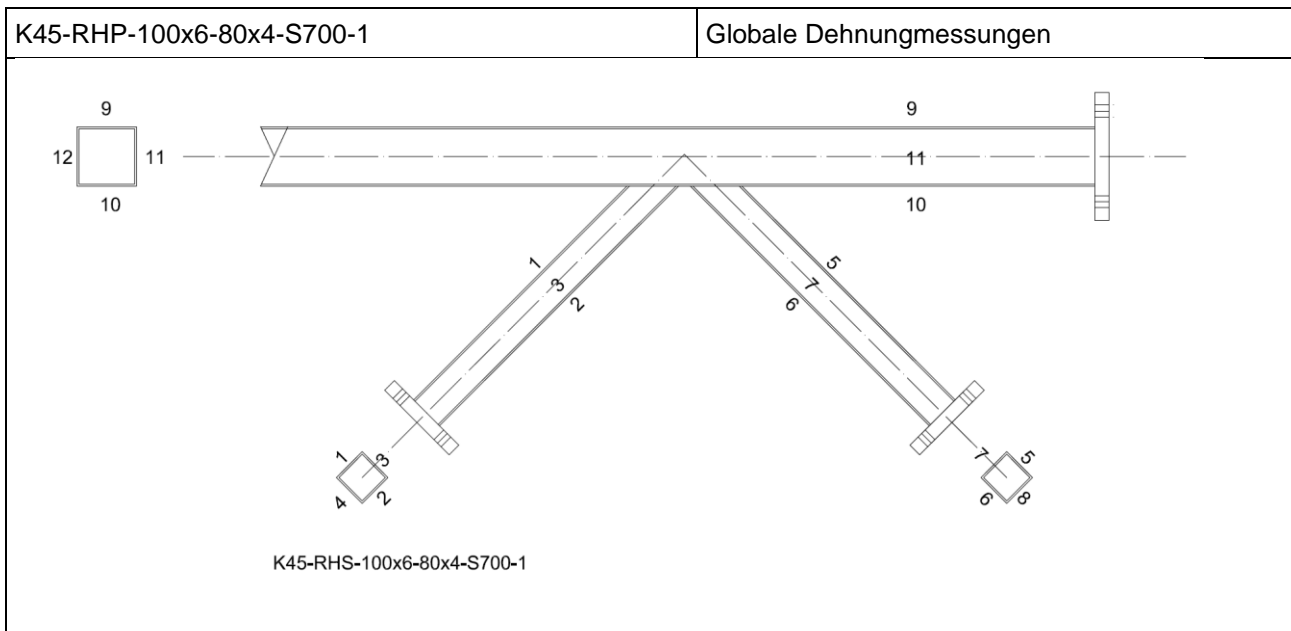


strain range [ $\mu$ strain]



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

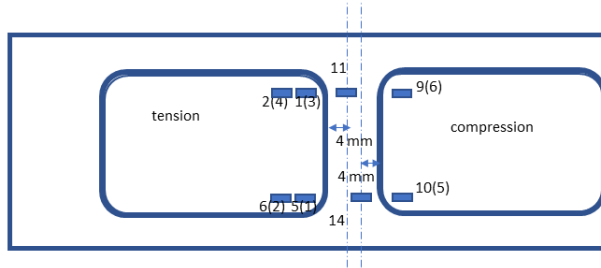


DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]		Position	Prüfkraftbereich [kN]
DMS 1	209	3		Zugstrebe	87
DMS 2	489	3			
DMS 3	339.7	3			
DMS 4	321	3			
DMS 5	270	3		Druckstrebe	83
DMS 6	376	3			
DMS 7	325	3			
DMS 8	332	3			
DMS 9	278	3		Gurt	121
DMS 10	253	3			
DMS 11	256	3			
DMS12	273	3			

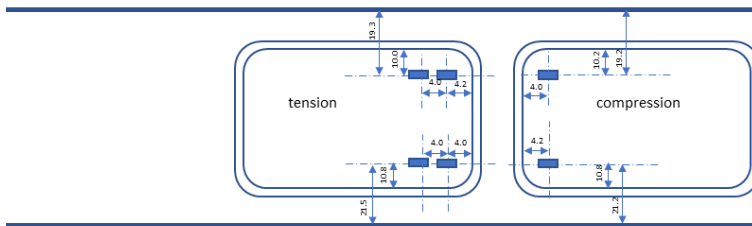
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-100x6-80x4-S700-2	Dehnungsmessungen an den Hot spots
---------------------------	------------------------------------

Bottom view



■ sg at 4 mm from weld toe, measurement length 2 mm  
(x) Terminal number

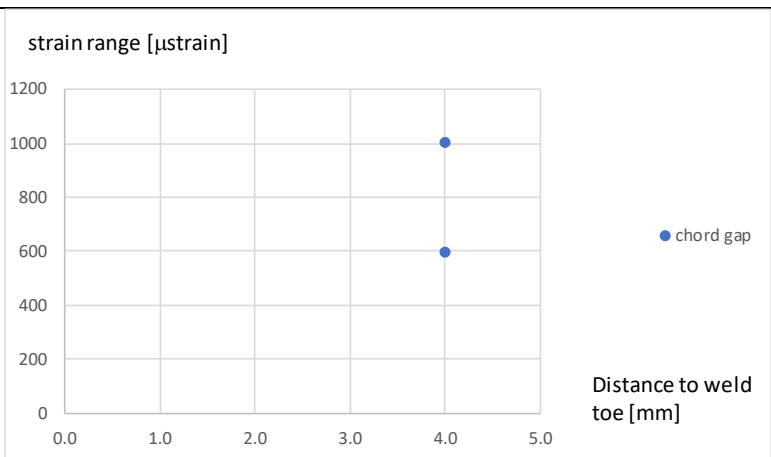
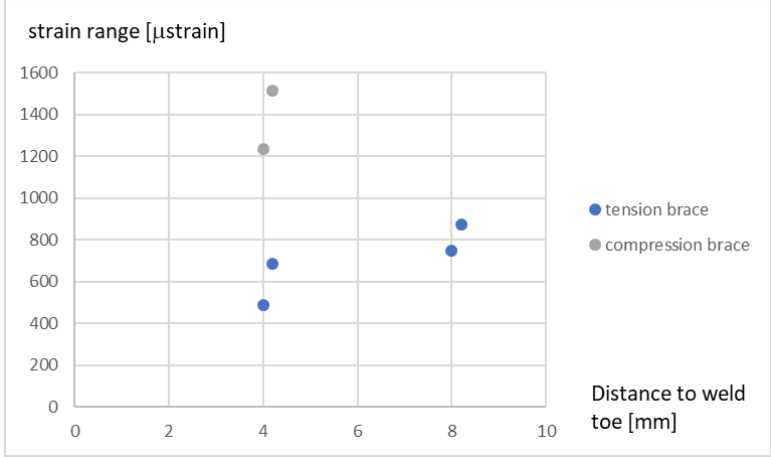


■ 5 in row sg spacing 2 mm at nominally 4 mm from weld toe\*  
■ sg FLA-3 at nominally 4 mm from weld toe

Last-schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
		116.8	120.8	167.6
DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS 1	684	2	4.2	Zugstrebe
DMS 2	872	2	8.2	Zugstrebe
DMS5	489	2	4.0	Zugstrebe
DMS6	748	2	8.0	Zugstrebe
DMS9	1236	2	4.0	Druckstrebe
DMS10	1516	2	4.2	Druckstrebe
DMS11	1003	2	4.0	Gurt Spalt
DMS14	597	2	4.0	Gurt Spalt

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

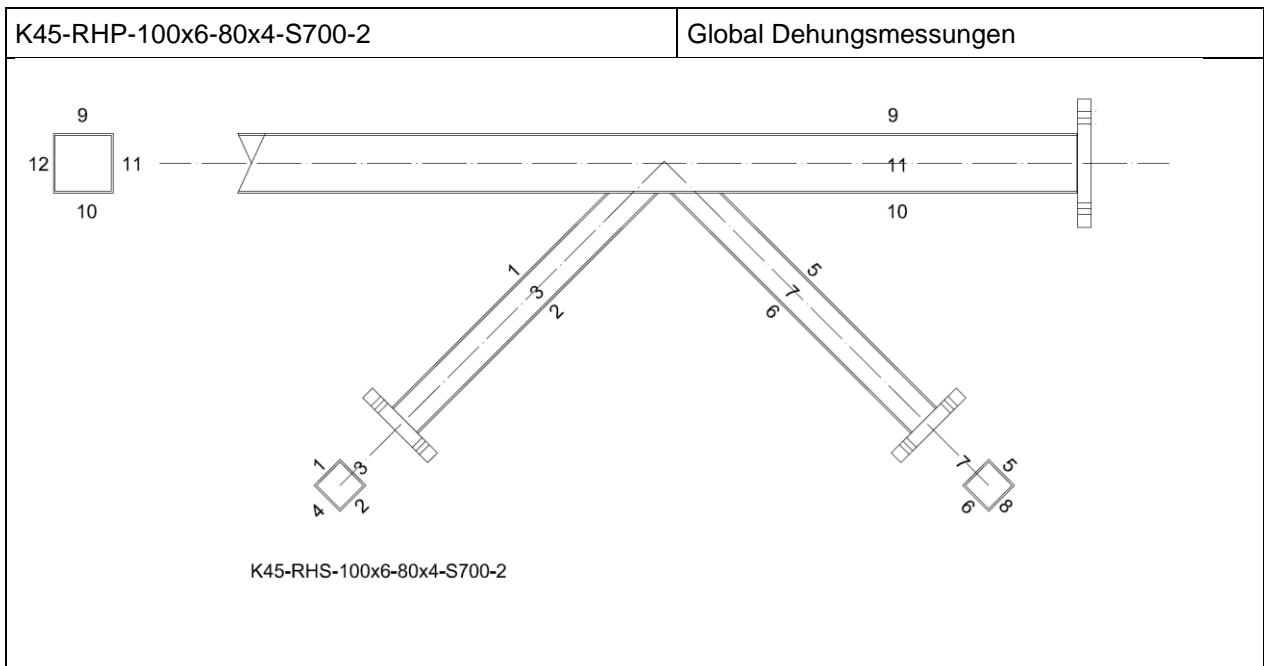
K45-RHP-100x6-80x4-S700-2 Dehnungsmessungen an den Hot spots





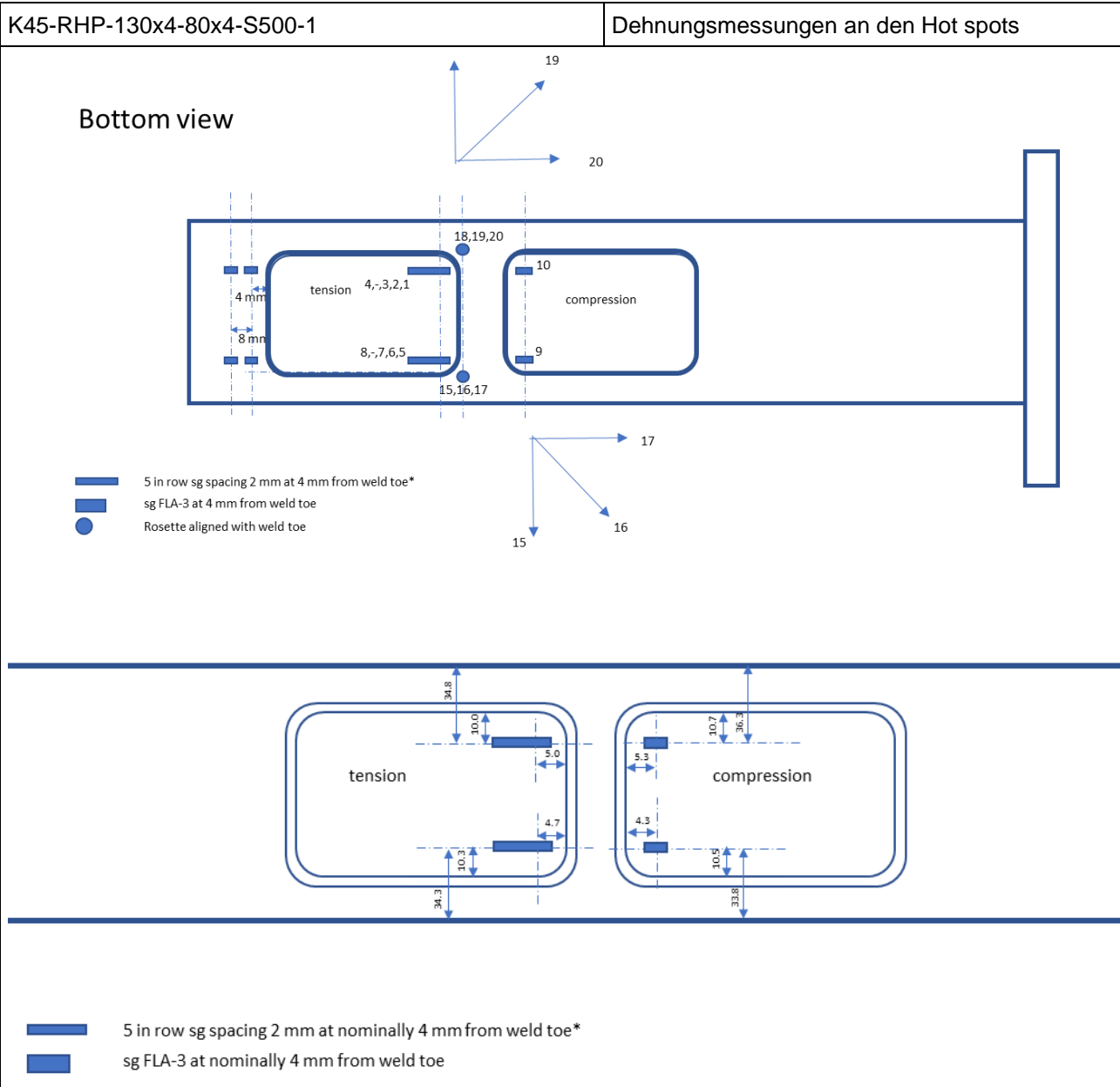
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements



DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]		Position	Lastschingbreite [kN]
DMS1	117	3		Druck	127
DMS2	893	3			
DMS3	483	3			
DMS4	500	3			
DMS5	391	3		Druck	122
DMS6	562	3			
DMS7	473	3			
DMS8	487	3			
DMS9	354	3		Gurt	176
DMS10	416	3			
DMS11	394	3			
DMS12	378	3			

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

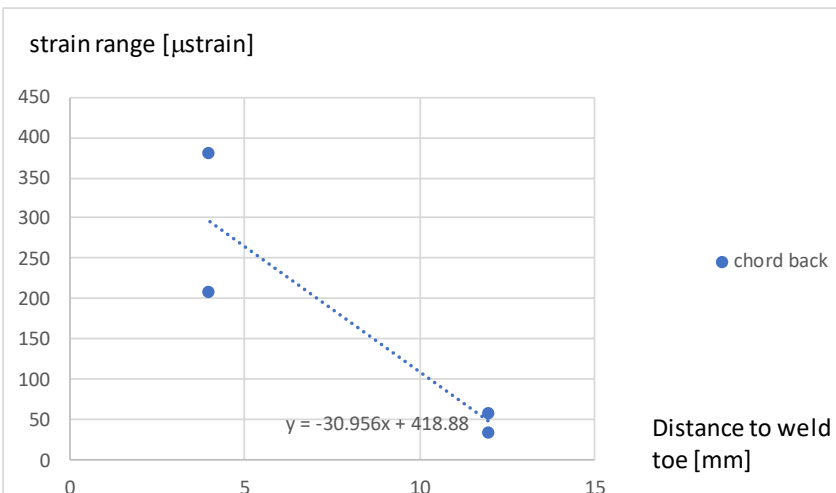
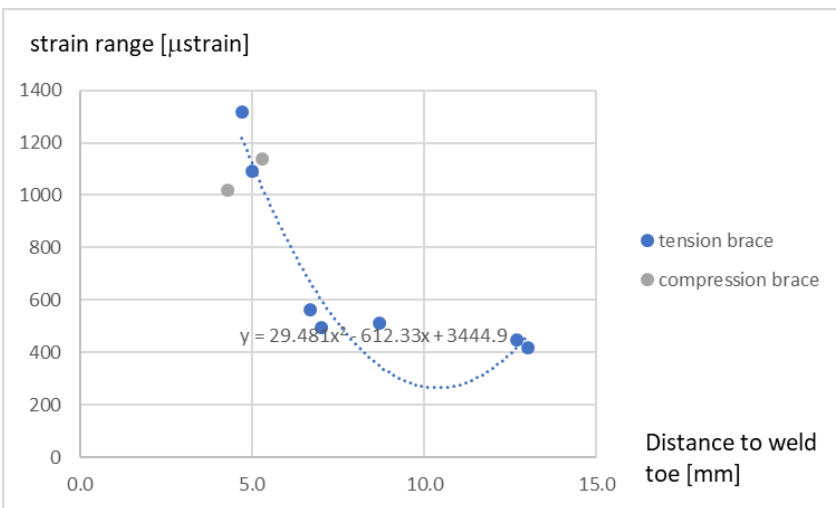
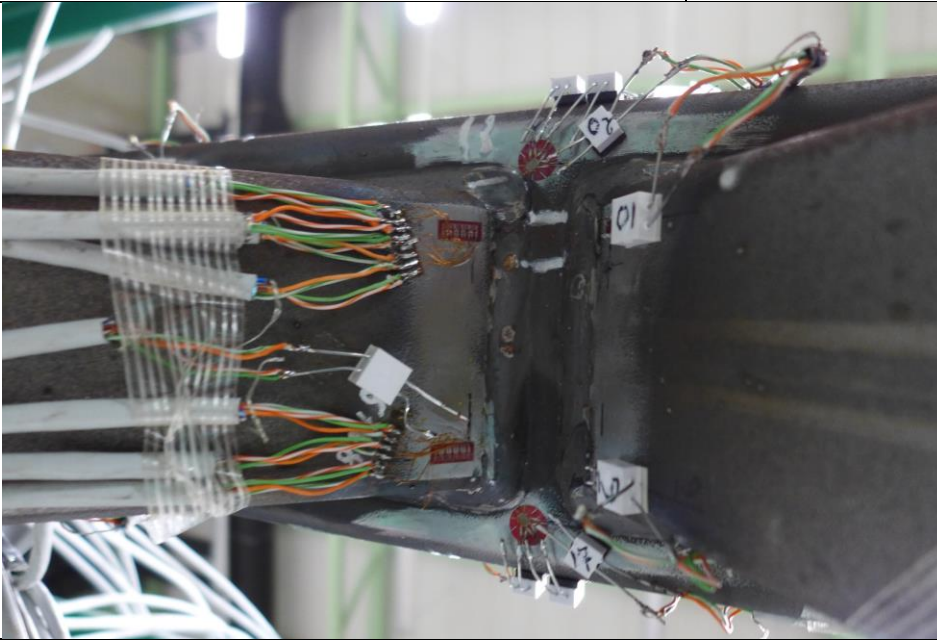
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-RHP-130x4-80x4-S500-1			Dehnungsmessungen an den Hot spots	
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
		53.67	55.02	76.43
DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS1	1092.3	1	5.0	Zugstrebe
DMS2	493.9	1	7.0	Zugstrebe
DMS3	-	1	9.0	Zugstrebe
DMS4	419.4	1	13.0	Zugstrebe
DMS5	1317	1	4.7	Zugstrebe
DMS6	562	1	6.7	Zugstrebe
DMS7	513	1	8.7	Zugstrebe
DMS8	449	1	12.7	Zugstrebe
DMS9	1017	3	4.3	Druckstrebe
DMS10	1140	3	5.3	Druckstrebe
DMS11	209	3	4	Gurrückseite
DMS12	36	3	12	Gurrückseite
DMS13	381.1	3	4	Gurrückseite
DMS14	58.8	3	12	Gurrückseite
DMS15	350.5	3		Rosette
DMS16	371.1	3		Rosette
DMS17	472.4	3		Rosette
DMS18	376.1	3		Rosette
DMS19	484.6	3		Rosette
DMS20	509.5	3		Rosette

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

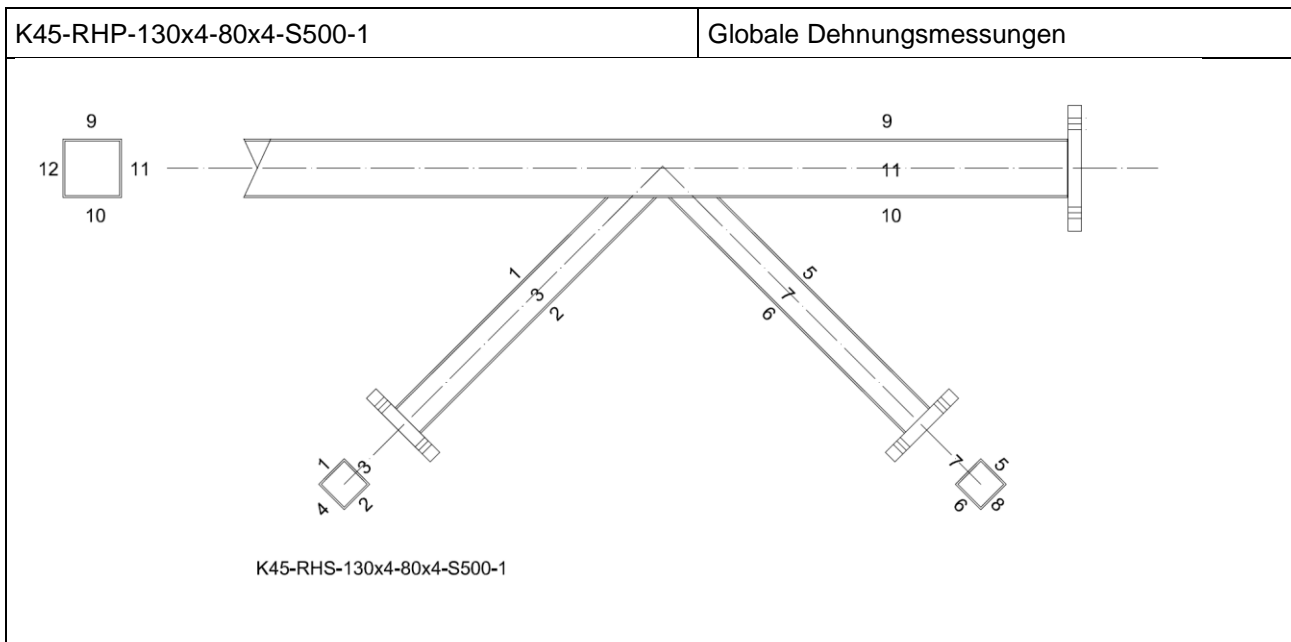
K45-RHP-130x4-80x4-S500-1

Dehnungsmessungen an den Hot spots



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

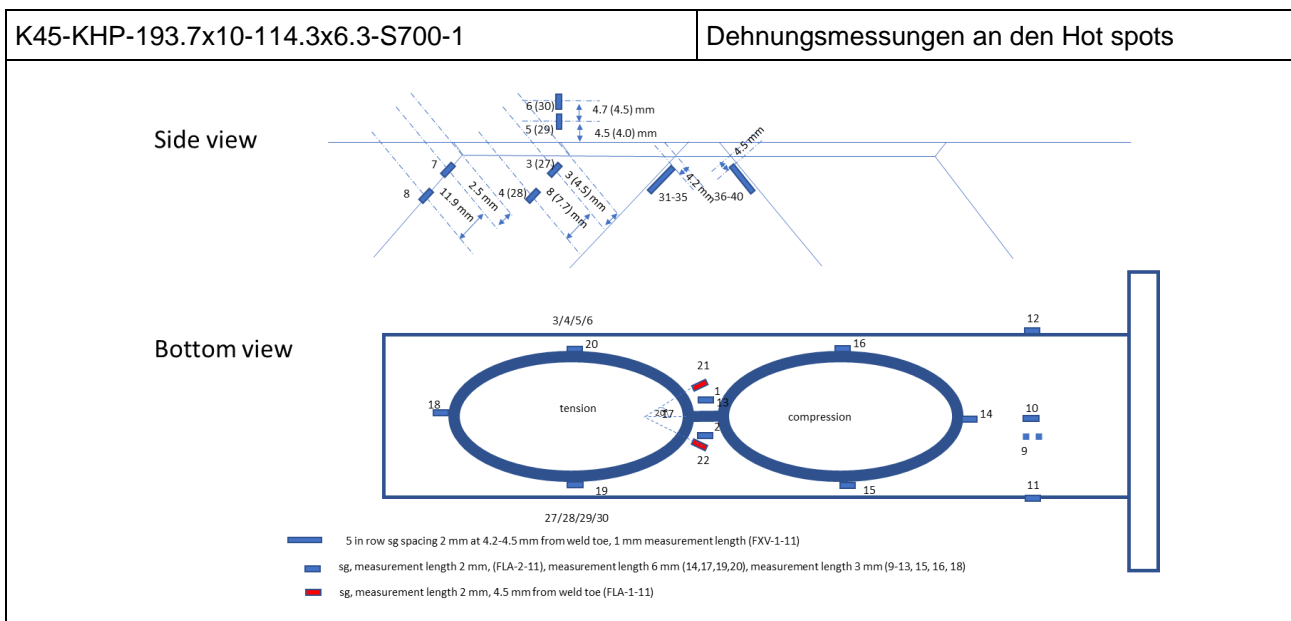
ANNEX B2 – Strain gauge measurements



DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]		Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS1	165.4	3		Druck	56.0
DMS2	282.8	3			
DMS3	202.9	3			
DMS4	226.6	3			
DMS5	165.7	3		Druck	53.8
DMS6	261.9	3			
DMS7	192.5	3			
DMS8	222	3			
DMS9	162	3		Gurt	79.9
DMS10	197	3			
DMS11	162	3			
DMS12	186	3			

# ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

## ANNEX B2 – Strain gauge measurements



Last-schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
		242	241	342
DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS 1	472	2	2.0	Gurt Spalt
DMS 2	553	2	2.0	Gurt Spalt
DMS 3	977	2	3	Strebensattel
DMS 4	744	2	11	Strebensattel
DMS 27	727	2	4.5	Strebensattel
DMS 28	697	2	12.2	Strebensattel
DMS 5	606	2	4.5	Gurtsattel
DMS 6	404	2	9.2	Gurtsattel
DMS 29	531	2	4.0	Gurtsattel
DMS 30	351	2	8.5	Gurtsattel
DMS 7	769	2	2.5	Strebenkrone
DMS 8	498	2	11.5	Strebenkrone
DMS 21	832	2	4.5	20 Grad
DMS 22	923	2	4.5	20 Grad
DMS 31	1260	1	4.2	Zugstrebenspalt
DMS 32	1078	1	6.2	Zugstrebenspalt
DMS 33	937	1	8.2	Zugstrebenspalt
DMS 34	848	1	10.2	Zugstrebenspalt
DMS 35		1	12.2	Zugstrebenspalt
DMS 36	939	1	4.5	Zugstrebenspalt
DMS 37	854	1	6.5	Zugstrebenspalt
DMS 38	752	1	8.5	Zugstrebenspalt
DMS 39	688	1	10.5	Zugstrebenspalt
DMS 40	641	1	12.5	Zugstrebenspalt

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-1

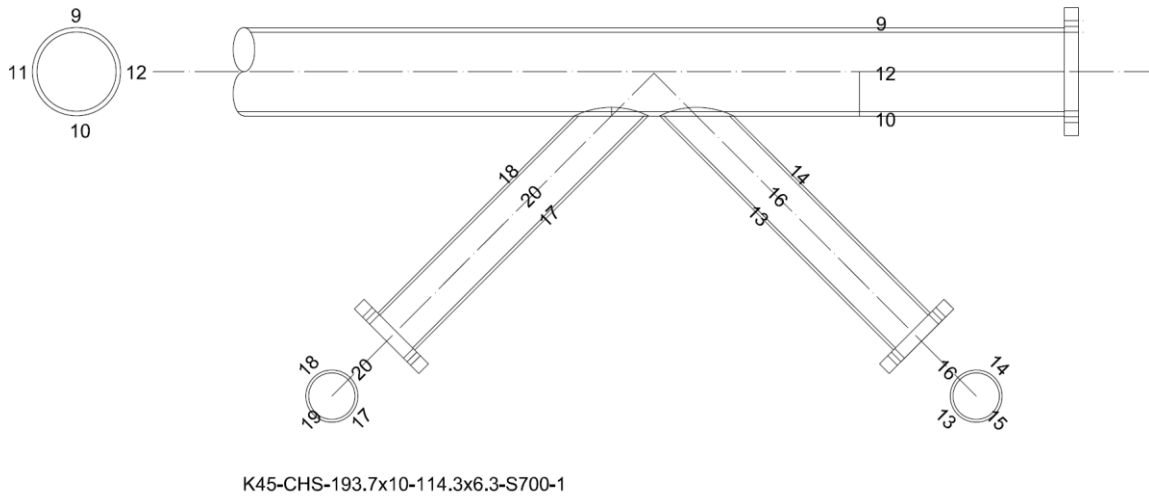
Dehnungsmessungen an den Hot spots



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-1	Globale Dehnungsmessungen
-----------------------------------	---------------------------

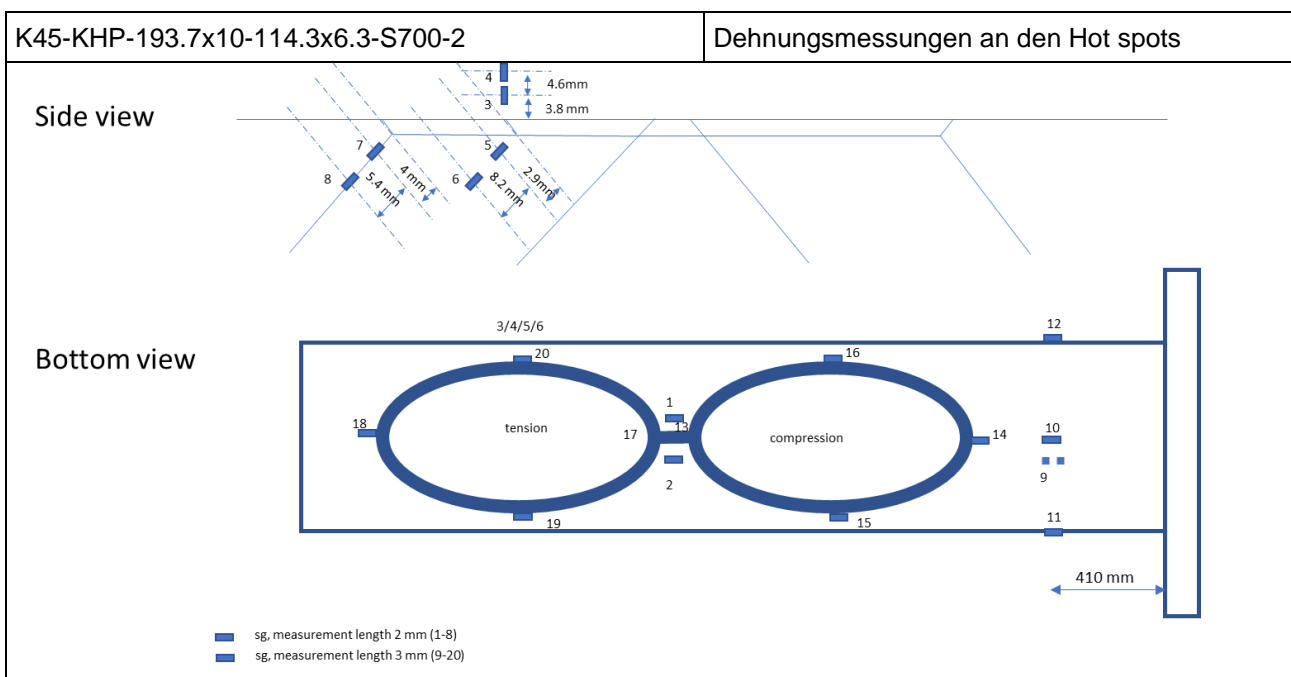


DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]		Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS 9	295	3		Gurt	347
DMS 10	343	3			
DMS 11	247	3			
DMS 12	257	3			
DMS 13	478	3		Druck	248
DMS 14	648	6			
DMS 15	548	3			
DMS 16	553	3			
DMS 17	601	6		Druck	248
DMS 18	569	3			
DMS 19	543	6			
DMS 20	563	6			



# ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

## ANNEX B2 – Strain gauge measurements

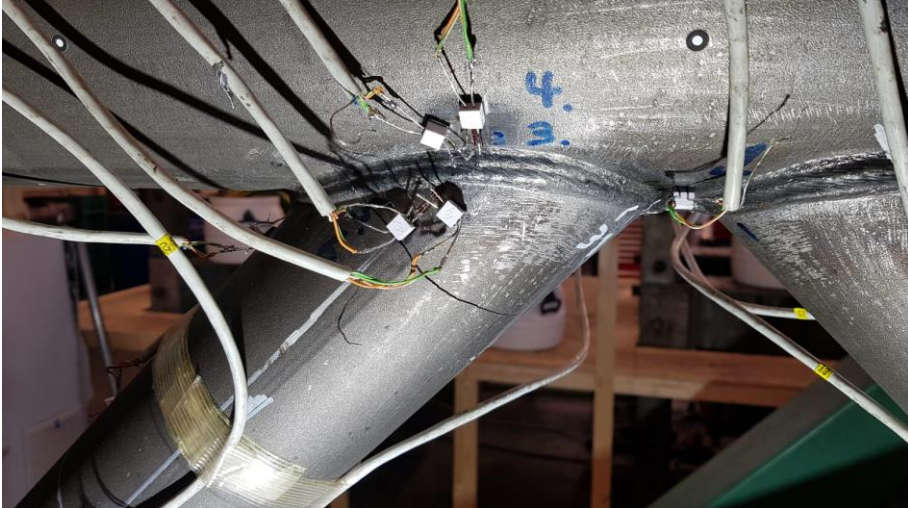
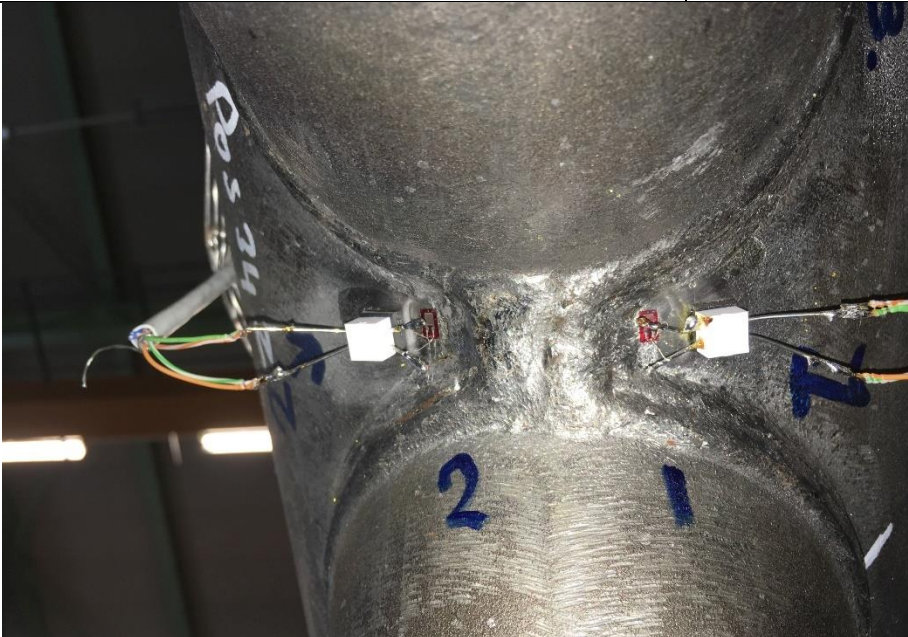


Kraft- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	
	239	241.5		
DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Abstand zum Schweißnahtfuß [mm]	Position
DMS1	709	2	2.8	Gurt Spalt
DMS2	361	2	3.9	Gurt Spalt
DMS5	1518	2	2.9	Strebensattel
DMS6	721	2	11.1	Strebensattel
DMS3	480	2	3.8	Gurtsattel
DMS4	318	2	8.4	Gurtsattel
DMS7	1079	2	4.0	Strebenkrone
DMS8	786	2	9.4	Strebenkrone

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-2

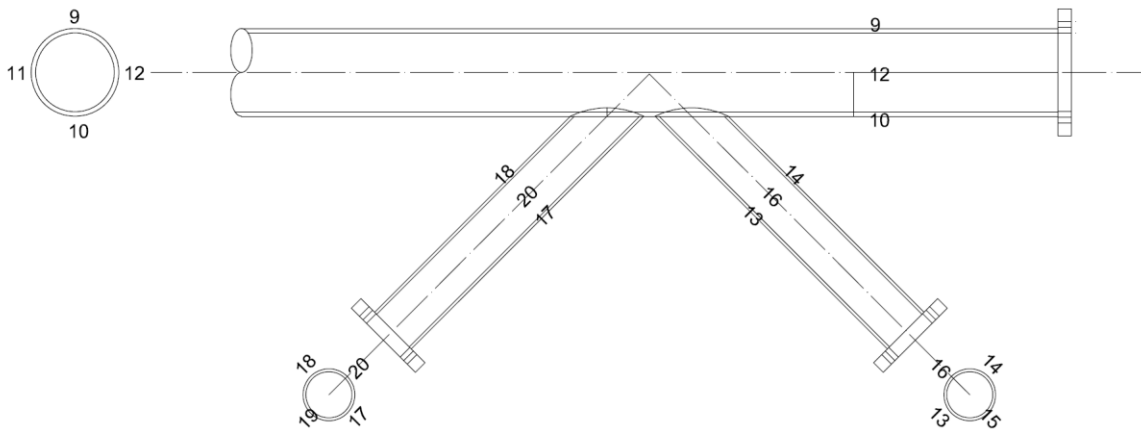
Dehnungsmessungen an den Hot spots



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-2	Globale Dehnungsmessungen
-----------------------------------	---------------------------



K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-2

DMS Nr.	$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]		Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS9	641	3		Gurt	-*
DMS10	614	3			
DMS11	252	3			
DMS12	237	3			
DMS13	491	3		Druck	244
DMS14	629	3			
DMS15	543	3			
DMS16	547	3			
DMS17	484	3		Druck	245
DMS18	659	3			
DMS19	538	3			
DMS20	572	3			

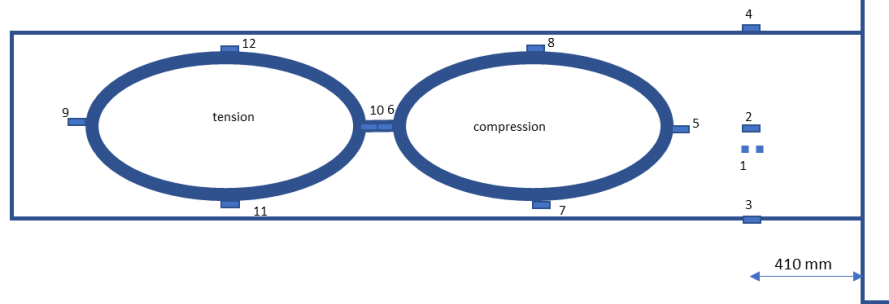
\*Ovalisierungseffekte

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

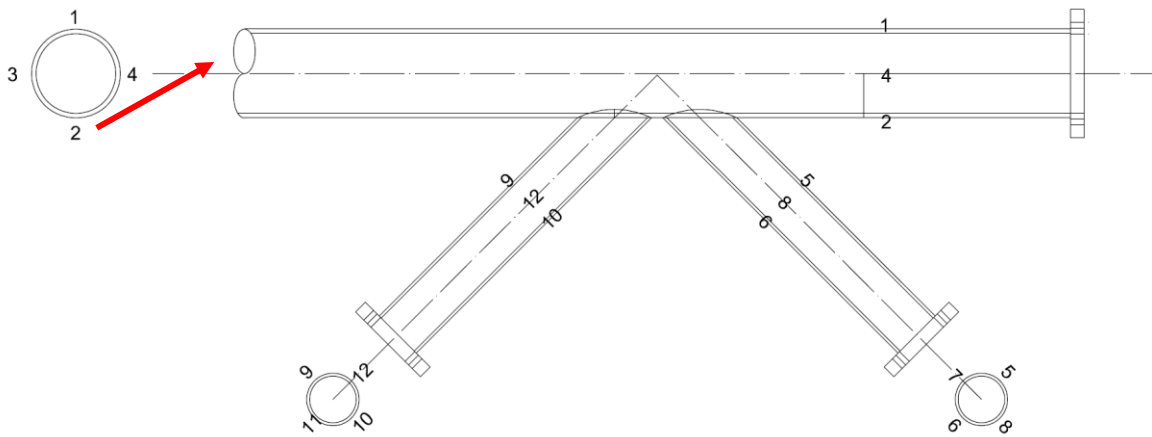
K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-3

Globale Dehnungsmessungen

Bottom view



Hinge installed to prevent failure in cylinder due to bending stresses



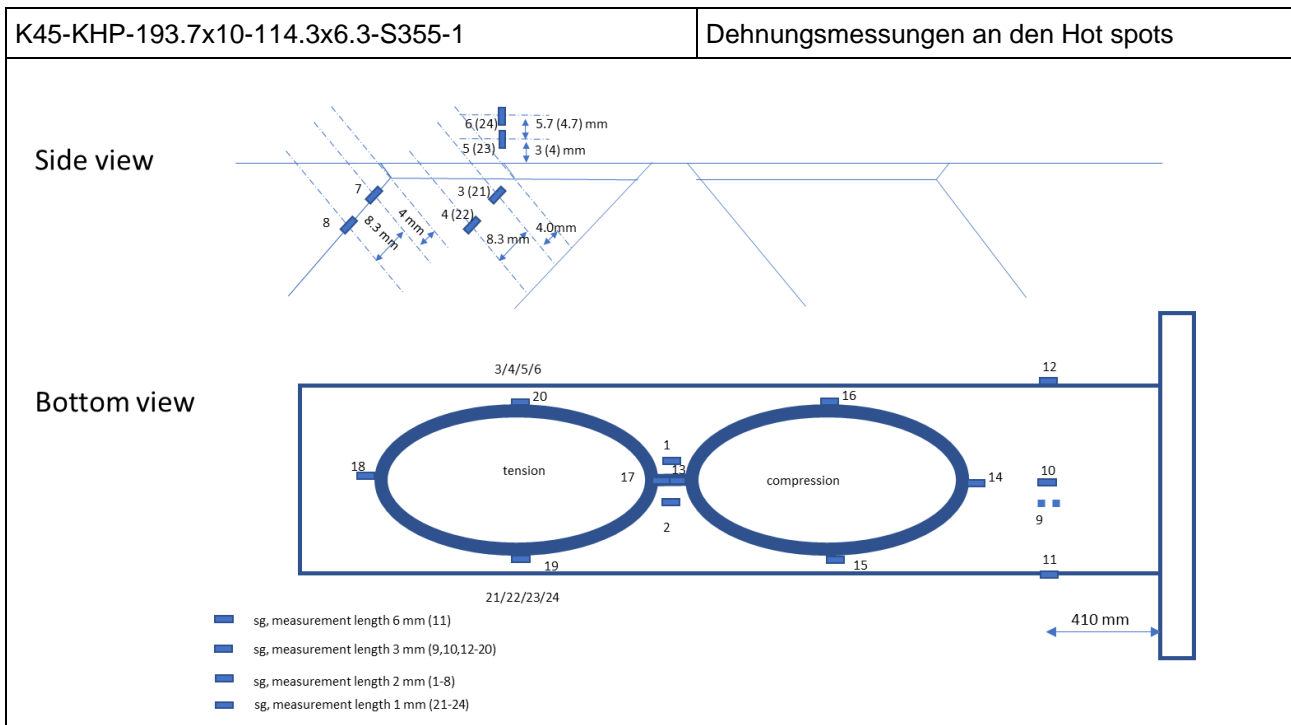
K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S700-3

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-3			Globale Dehnungsmessungen		
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]		
		196	199	270	
DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Gemessene Länge [mm]	Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS1	444	544	3	Gurt	-*
DMS2	290	355	3		
DMS3	193	236	3		
DMS4	203	249	3		
DMS5	(969)**	(1187)**	3	Druck	193
DMS6	<b>425</b>	<b>520</b>	3		
DMS7	<b>439</b>	<b>538</b>	3		
DMS8	<b>447</b>	<b>547</b>	3		
DMS9	(689)**	(844)**	3	Druck	196
DMS10	(1178)**	(1442)**	3		
DMS11	<b>400</b>	<b>490</b>	3		
DMS12	<b>511</b>	<b>626</b>	3		
*skaliert auf Kraftschwingbreite 300kN-60kN					
**unrealistisch					

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements



Kraft- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	Abstand zum Schweißnaht fuß [mm]	Position
	197	199	274		
DMSs	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]*	Gemessene Länge [mm]		
DMS1	734	899	2		Gurt Spalt
DMS2	401	491	2		Gurt Spalt
DMS3	671	821	2	4.0	Strebensattel
DMS4	594	728	2	12.3	Strebensattel
DMS21	518	634	1	4.0	Strebensattel
DMS22	491	602	1	12.3	Strebensattel
DMS5	882	1080	2	3.0	Gurtsattel
DMS6	283	347	2	8.7	Gurtsattel
DMS23	378	463	1	4.0	Gurtsattel
DMS24	252	309	1	8.7	Gurtsattel
DMS7	648	794	2	4.0	Strebenverse
DMS8	469	574	2	12.3	Strebenverse

\*skaliert auf Lastschwingbreite 300kN-60kN

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-1

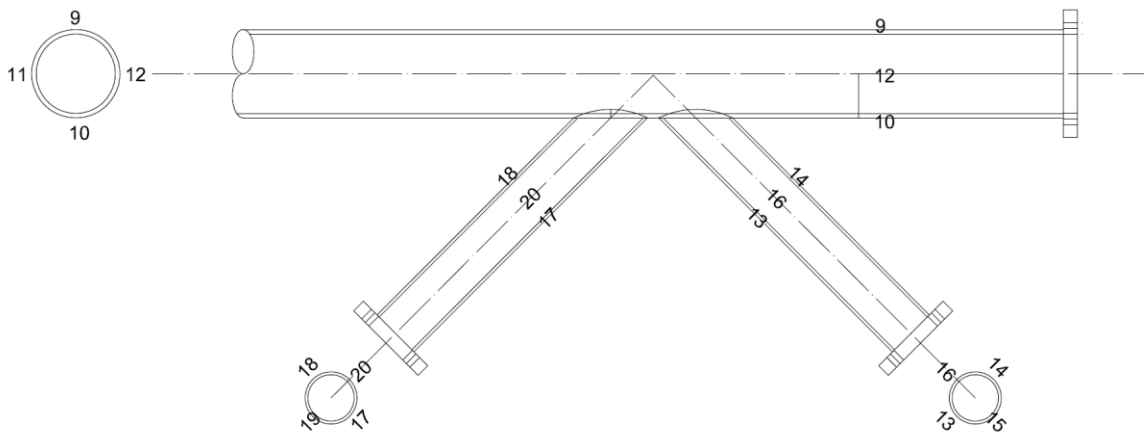
Globale Dehnungsmessungen



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-1	Globale Dehnungsmessungen
-----------------------------------	---------------------------



K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-1

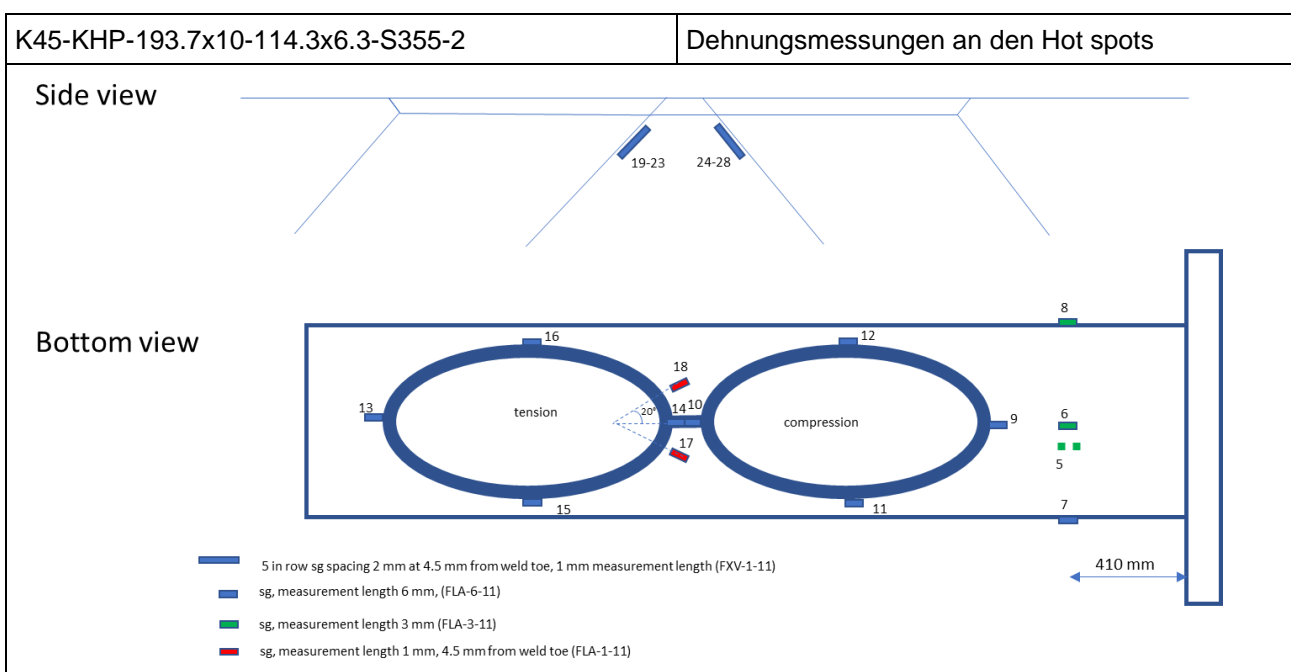
DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]*	Gemessene Länge [mm]	Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS9	461	565	3	Gurt	-*
DMS10	547	670	3		
DMS11	209	255	6		
DMS12	205	251	3		
DMS13	424	519	3	Druck	200
DMS14	469	574	3		
DMS15	428	525	3		
DMS16	437	535	3		
DMS17	413	506	3	Druck	196
DMS18	472	577	3		
DMS19	418	512	3		
DMS20	455	557	3		

\*skaliert auf Kraftbereich 300kN-60kN



# ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

## ANNEX B2 – Strain gauge measurements



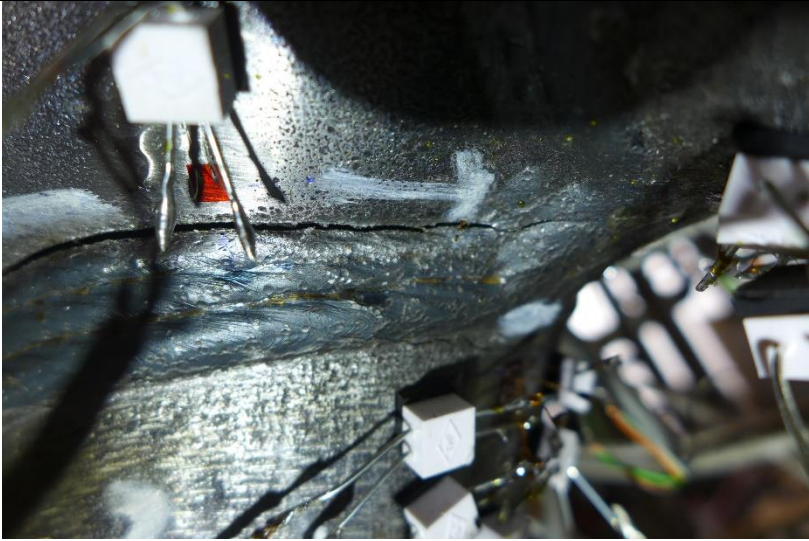
Last- schwingbreite	Druckstrebe [kN]	Zugstrebe [kN]	Horizontalkraft [kN]	Abstand zum Schweißnaht- fuß [mm]	Position
	197	199	280		
DMSs	[µm/m]	[µm/m]*	Gemessene Länge [mm]		
DMS17	722	884	1	4.5	20 Grad
DMS18	826	1011	1	4.5	20 Grad
DMS19	1010	1237	1	4.5	Zugstrebenspalt
DMS20	872	1068	1	6.5	Zugstrebenspalt
DMS21	775	949	1	8.5	Zugstrebenspalt
DMS23			1	10.5	Zugstrebenspalt
DMS24	647	792	1	12.5	Zugstrebenspalt
DMS25	664	813	1	4.5	Zugstrebenspalt
DMS26	614	752	1	6.5	Zugstrebenspalt
DMS27	560	686	1	8.5	Zugstrebenspalt
DMS28	522	639	1	10.5	Zugstrebenspalt
DMS29	487	596	1	12.5	Zugstrebenspalt

\*skaliert auf Kraftschwingbreite 300kN-60kN

\*\*unrealistisch

ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
ANNEX B2 – Strain gauge measurements

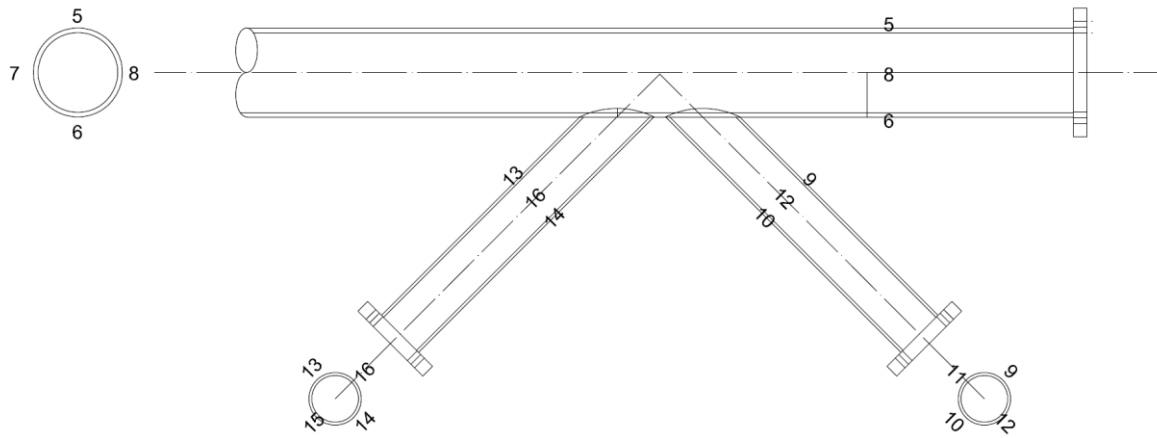
K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-2	Dehnungsmessungen an den Hot spots
-----------------------------------	------------------------------------



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen

ANNEX B2 – Strain gauge measurements

K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-2	Globale Dehnungsmessungen
-----------------------------------	---------------------------



K45-CHS-193.7x10-114.3x6.3-S355-2

DMS Nr.	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]*	Gemessene Länge [mm]	Position	Kraftschwingbreite [kN]
DMS5	470	576	6	Gurt	-*
DMS6	278	340	6		
DMS7	181	222	6		
DMS8	226	277	6		
DMS9	(703)**	(861)**	1	Druck	190
DMS10	(697)**	(853)**	1		
DMS11	396	485	1		
DMS12	456	558	1		
DMS13	403	493	1	Druck	194
DMS14	490	600	1		
DMS15	351	430	1		
DMS16	496	607	1		

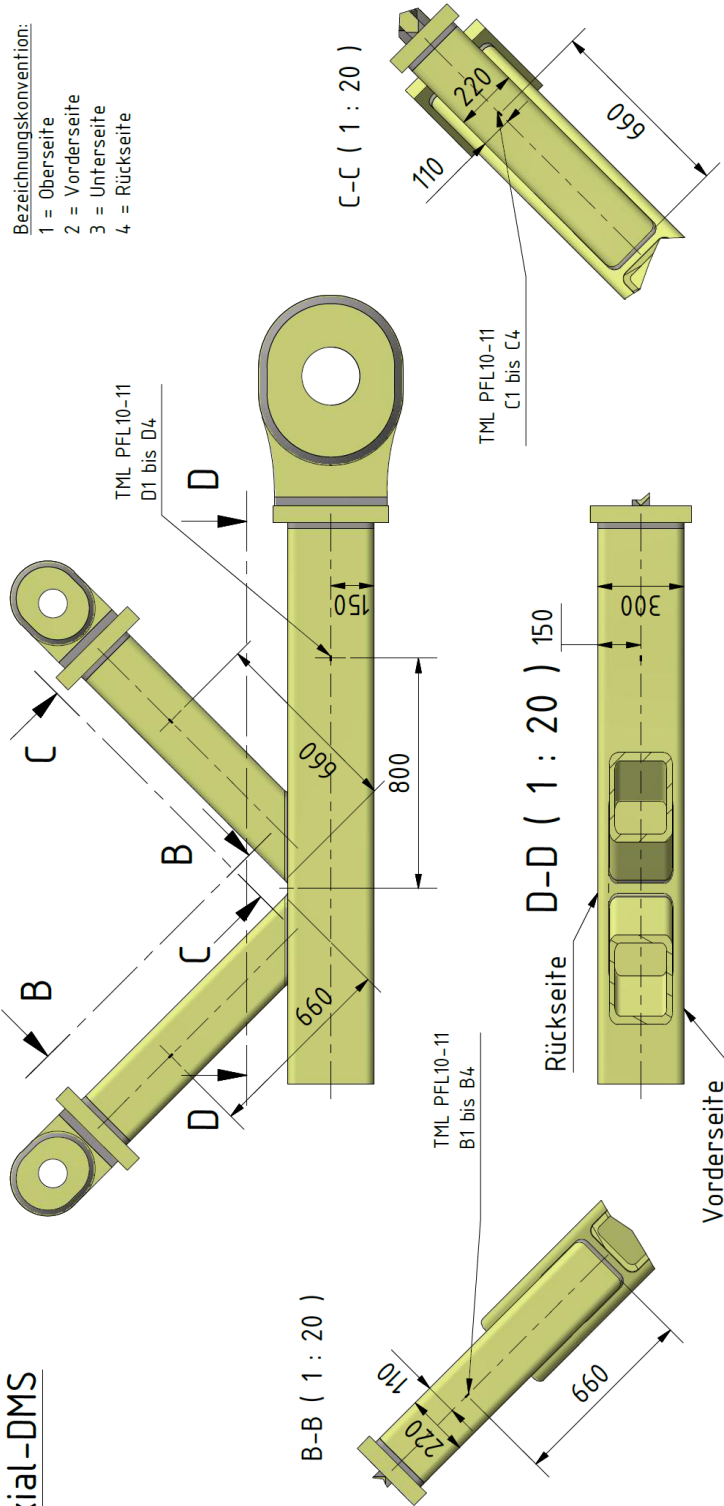
\*skaliert auf Kraftschwingbreite 300kN-60kN

\*\*unrealistisch

K45-RHP-300x200-220x20-S355-1

DMS Positionen - Übersicht

**Axial-DMS**



DMS Typ: PFL-10-11-5L

Alle DMS umlaufend, jeweils 1 x pro Seite, an beiden Ströben und am Gurt applizieren

Alle Angaben beziehen sich auf die Mitte des Messgitters

An Probekörper RHS 1 S355

Gezeichnet		Datum		Name	
P. Ladendorfer		29.03.2018		P. Ladendorfer	
Kontrolliert					
Norm					
<b>151504-6a K-Knoten</b>					
<b>RHS1 - DMS</b>					
<b>1</b>					
A4					

Status	Änderungen	Datum	Name

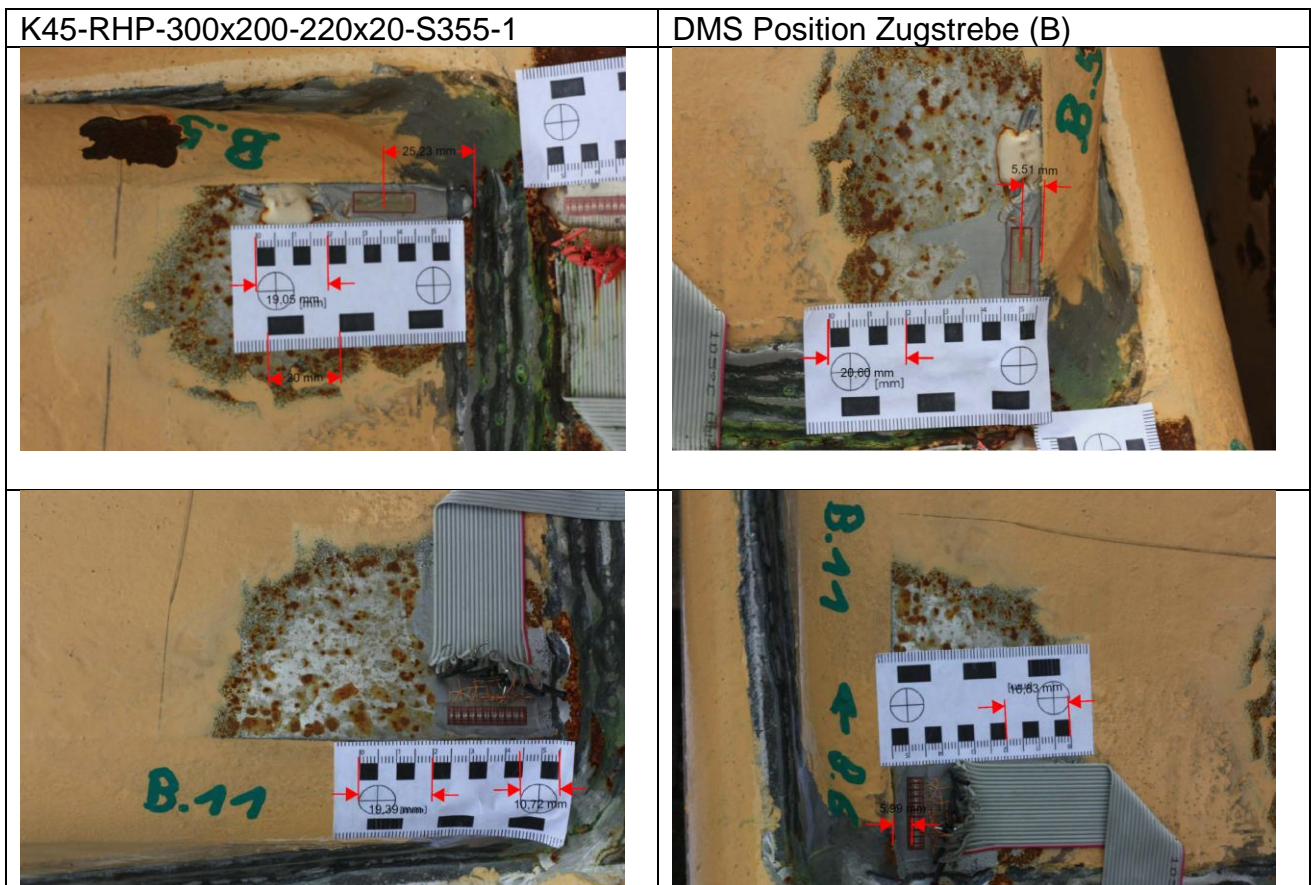




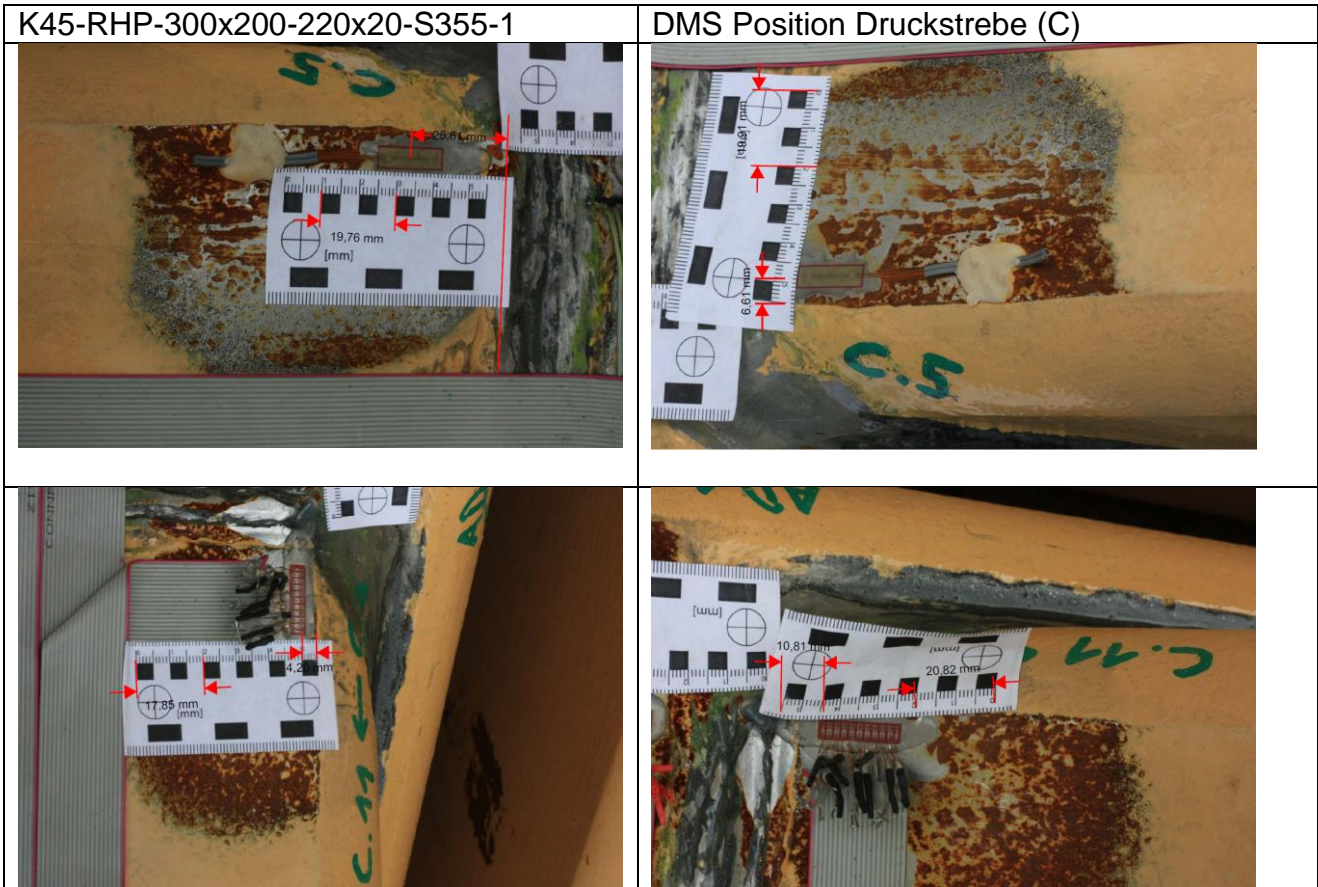
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

Verwendete Dehnmessstreifen

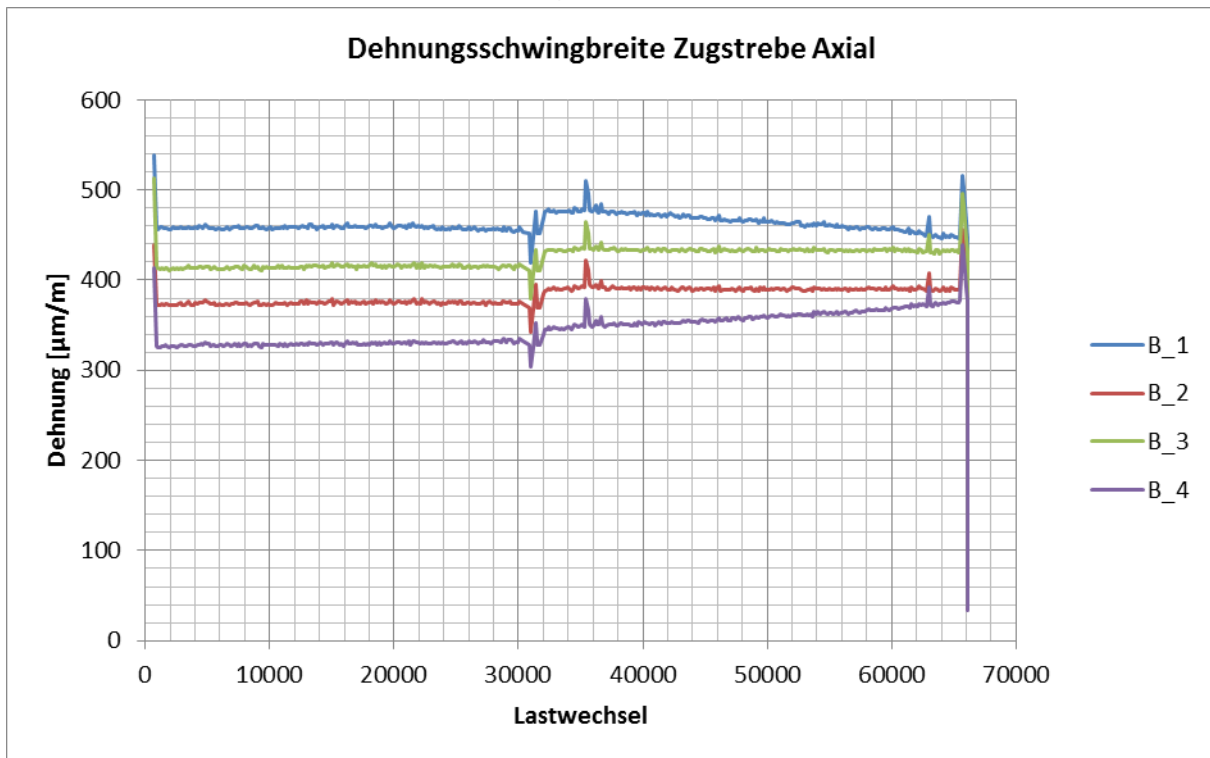
Typ	Art	Hersteller	Träger*)			Messgitter*)			Kanalbezeichnung
			Anz. DMS	Länge	Breite	Länge	Breite	Abstand	
FXV1-11	Kette	TML	10	21,7	5	1	1,3	2	AZ1-AZ10, AD1-AD10, B6-B10, C6-C10
PFL10-11	Einzel-DMS	TML	1	17,5	5	10	0,9	-	B1-B5, C1-C5, D1-D4



ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

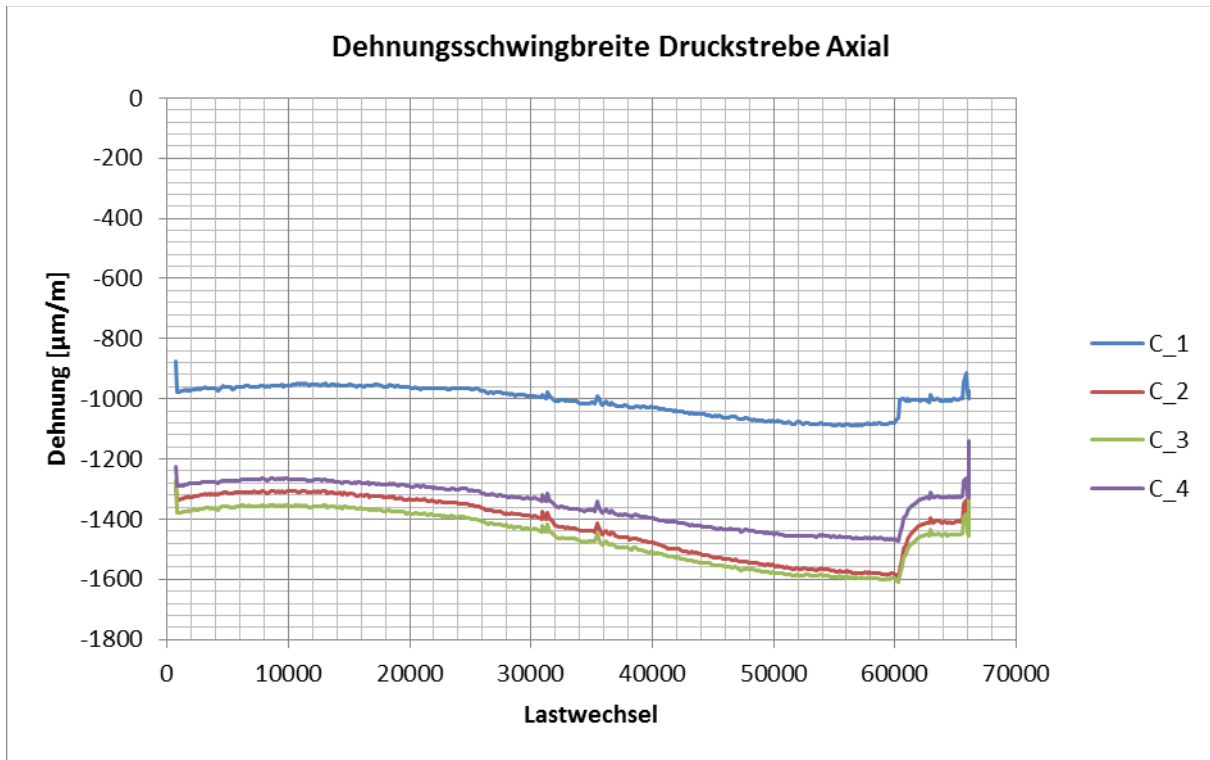


K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Zugstrebe (B), axial

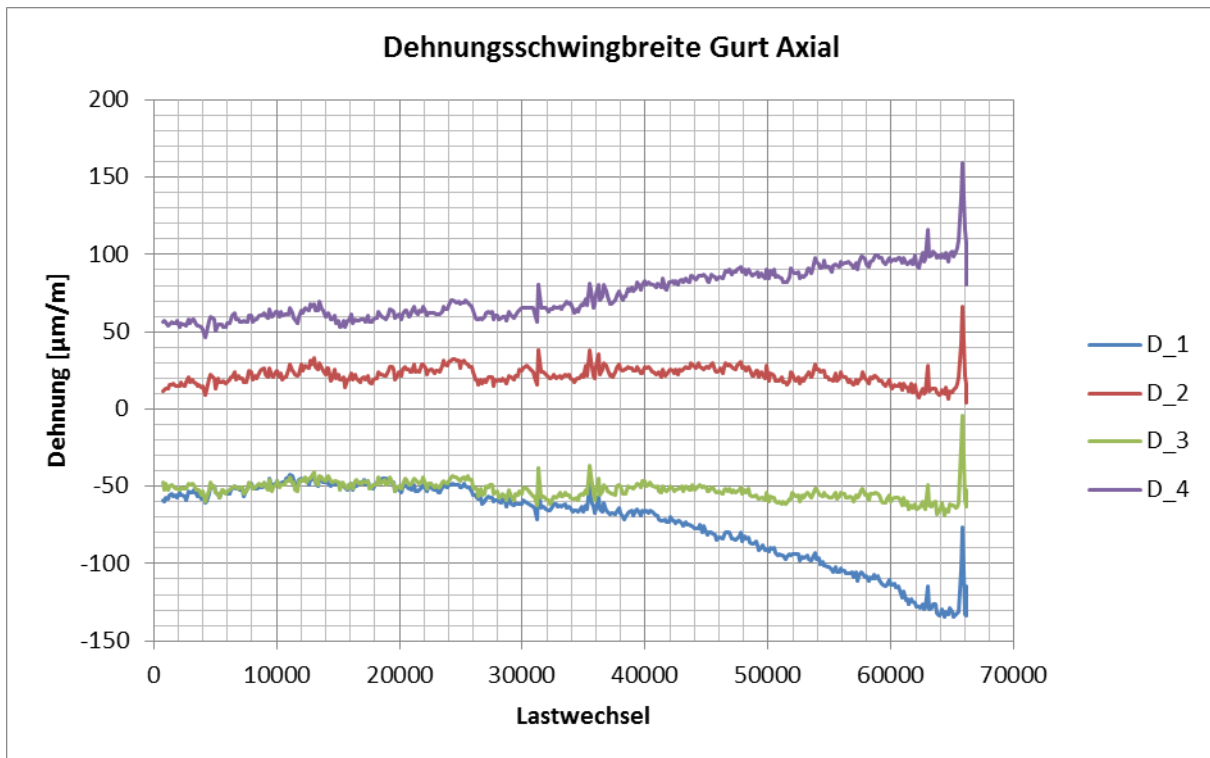




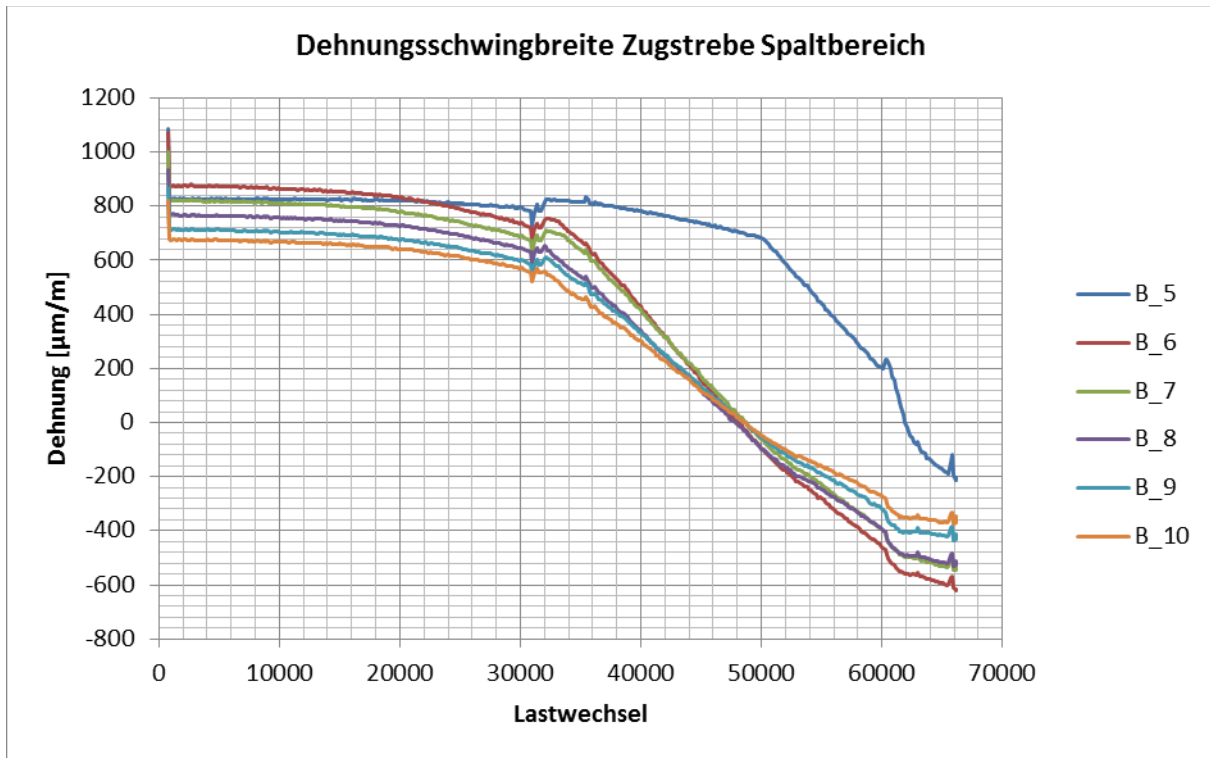
K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Druckstrebe (C), axial



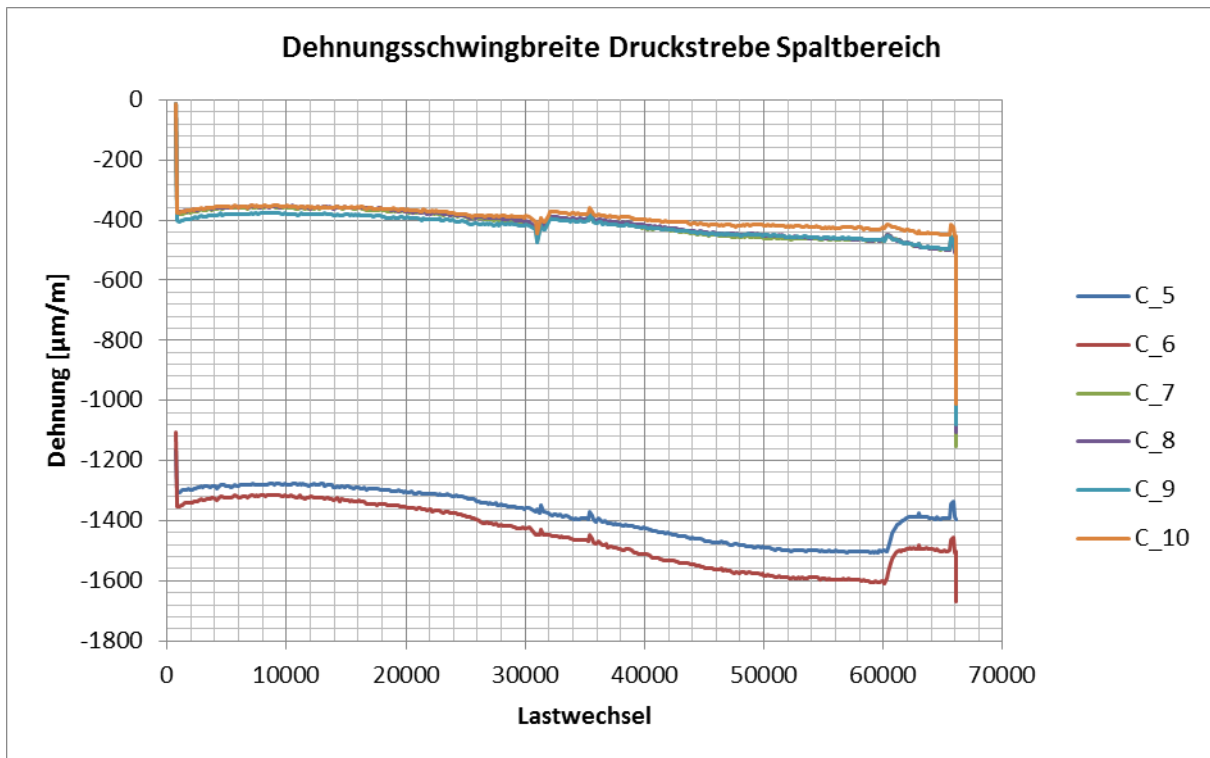
K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Gurt (AD), axial



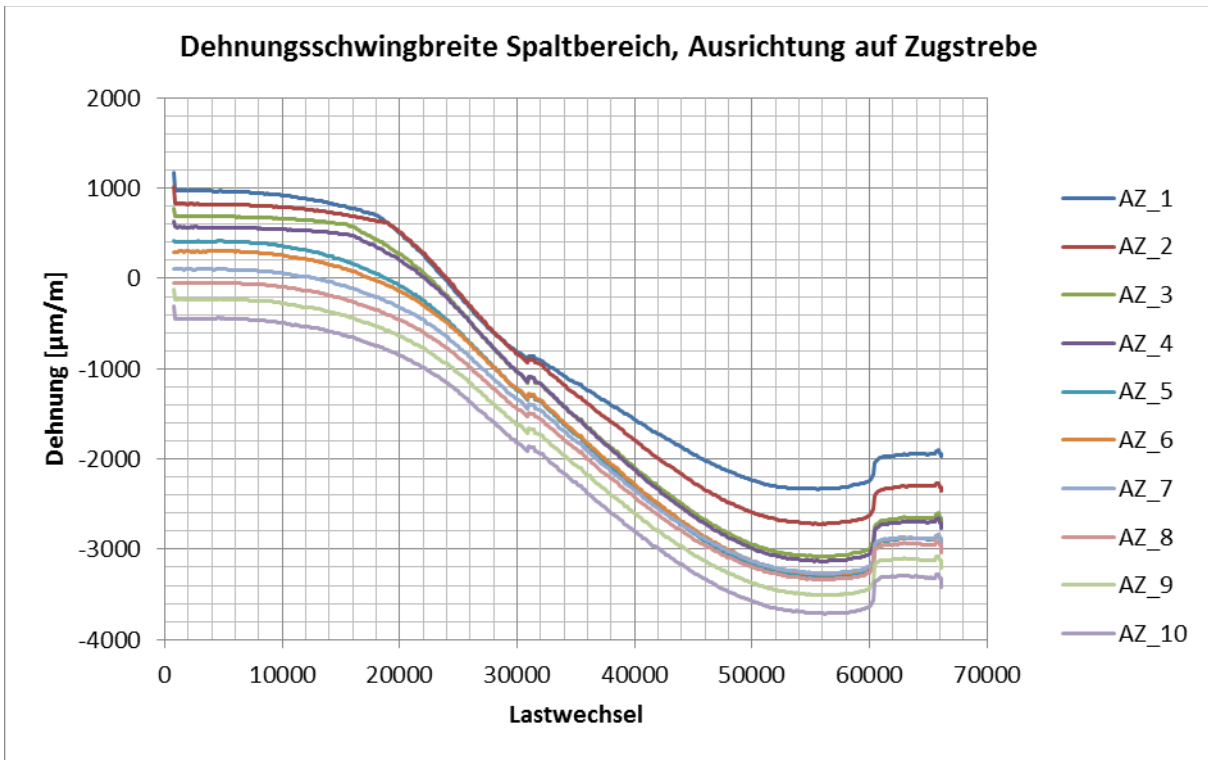
K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Zugstrebe (B), Spalt



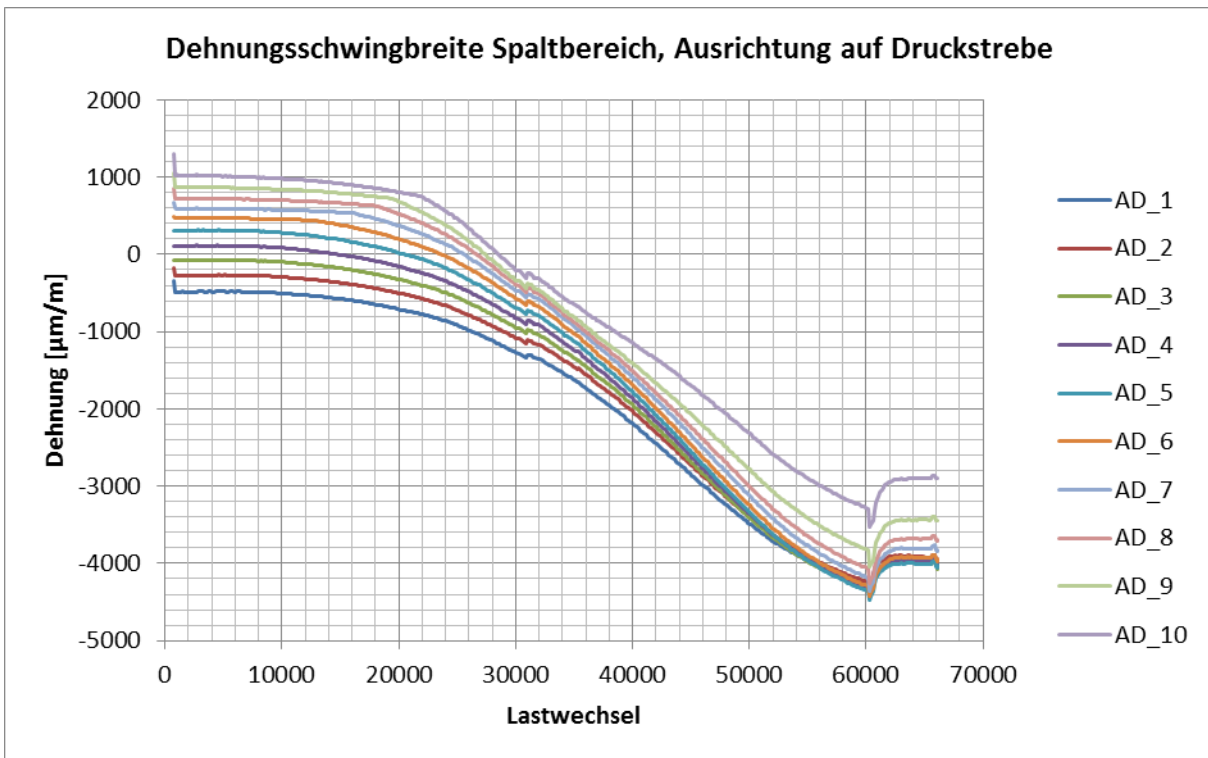
K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Druckstrebe (C), Spalt



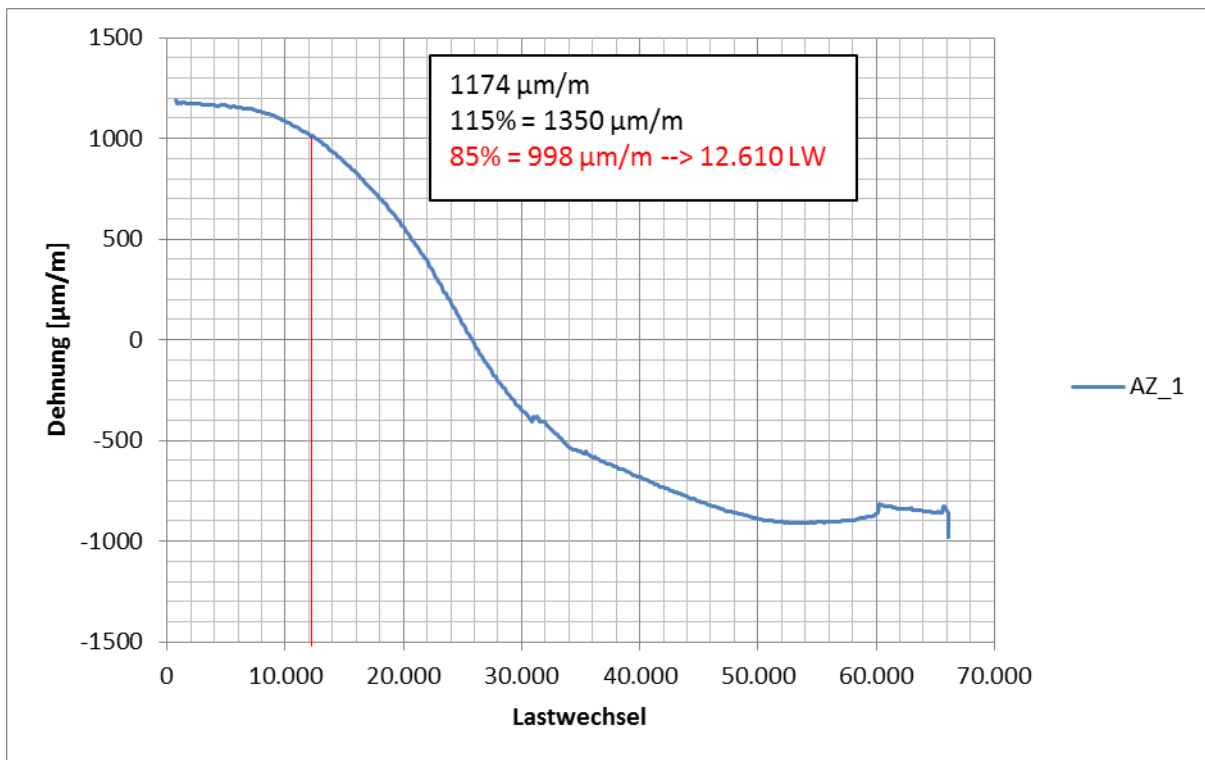
K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Spalt (AZ)



K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Spalt (AD)

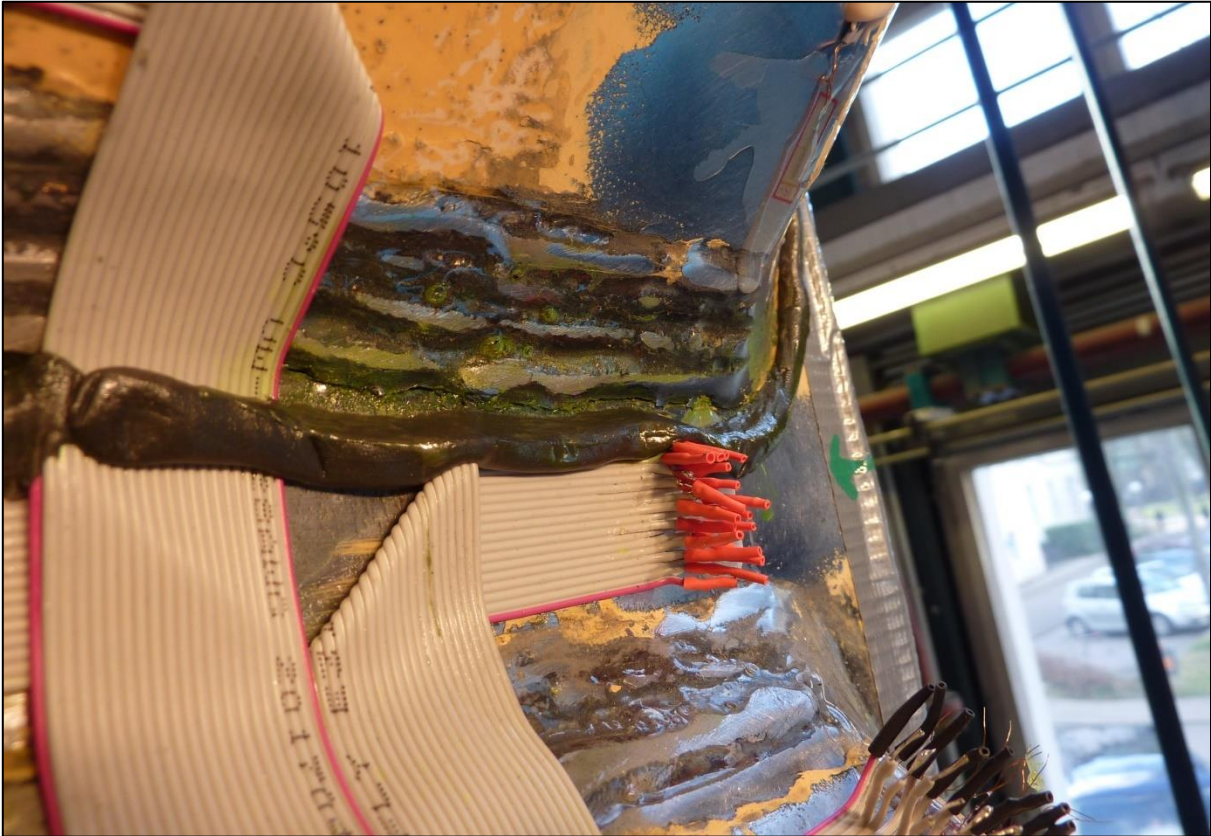


K45-RHP-300x200-220x20-S355-1 Lastspielzahl N1 (AZ1)

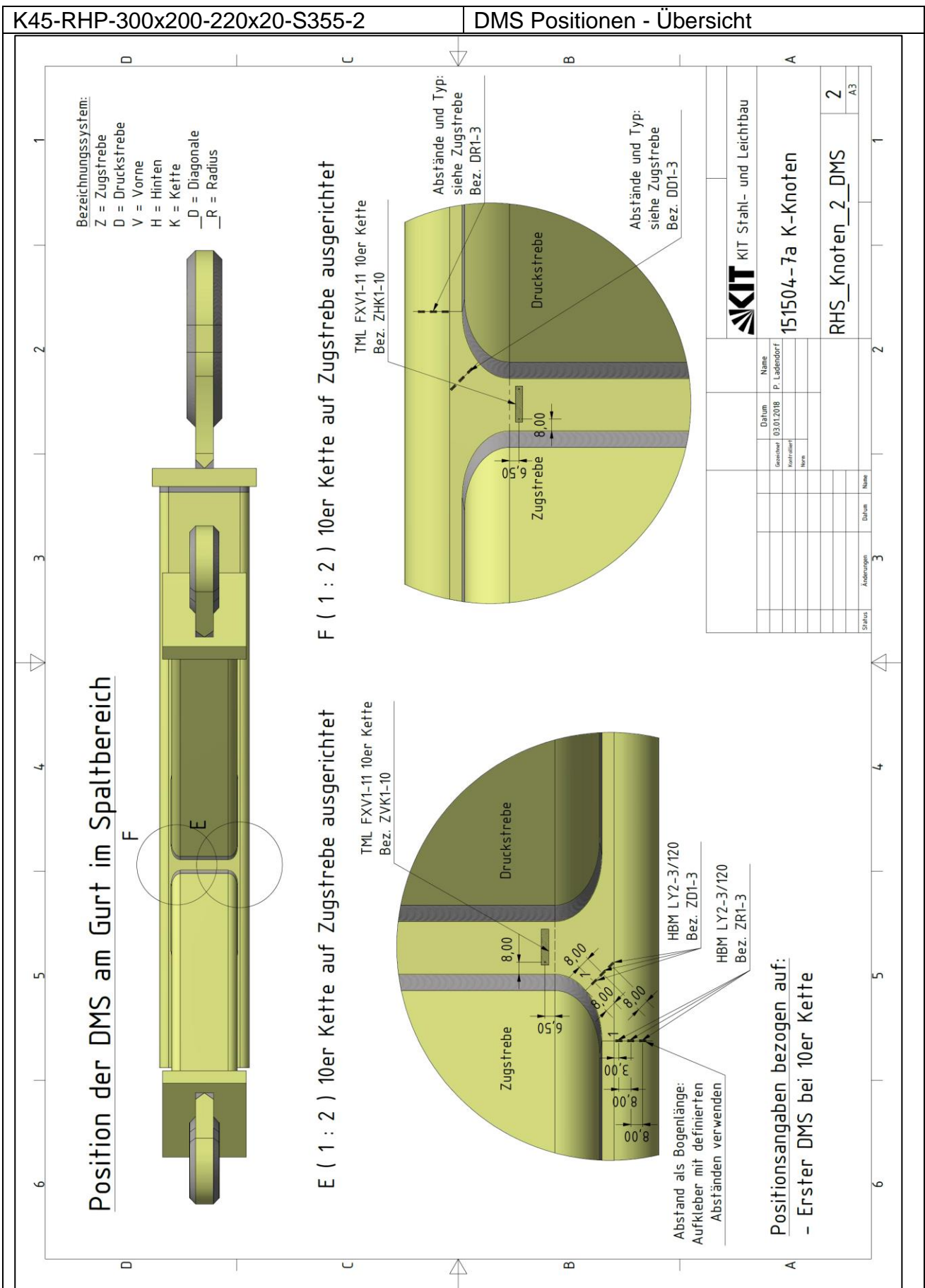


K45-RHP-300x200-220x20-S355-1, Riss im Gurt an der Zugstrebe









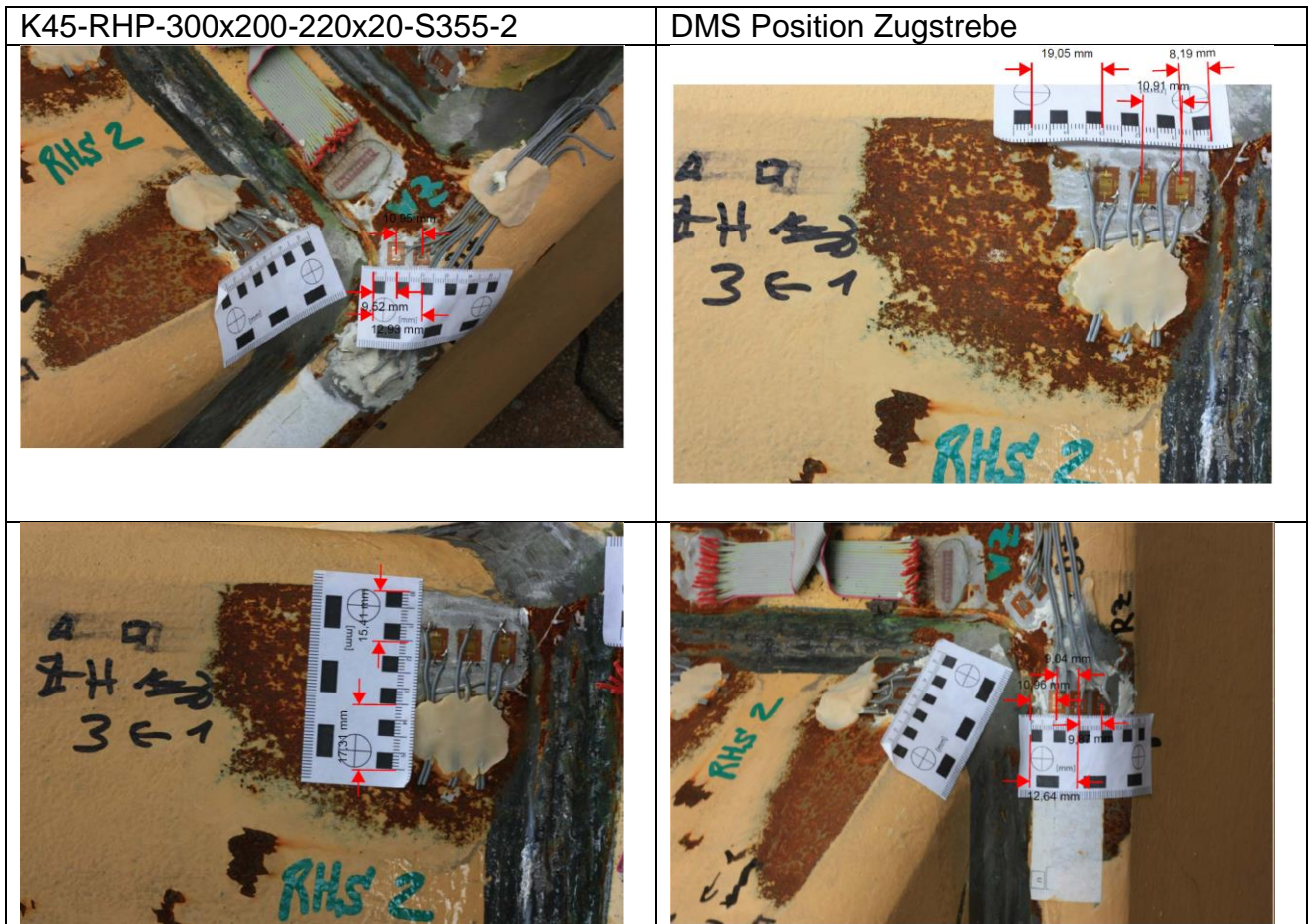




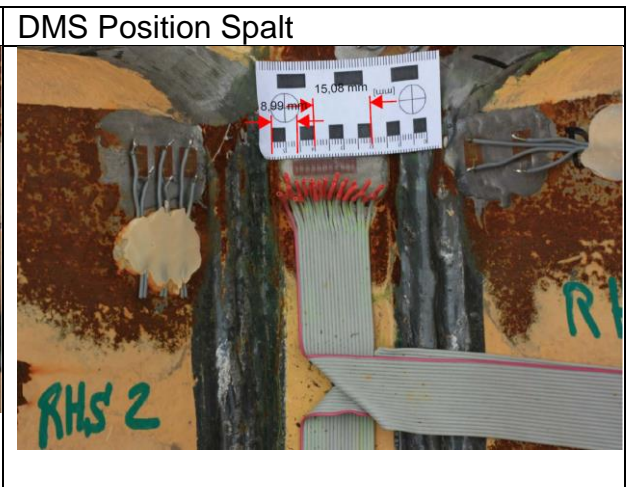
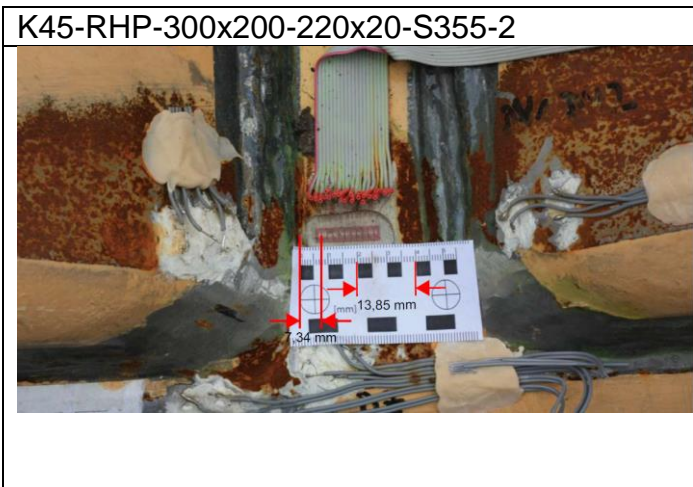
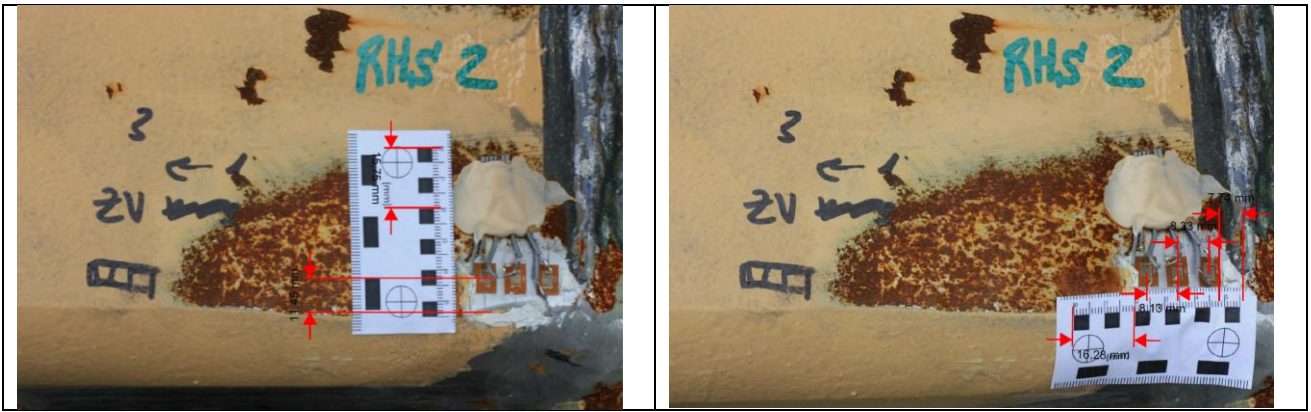
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements

Verwendete Dehnmessstreifen

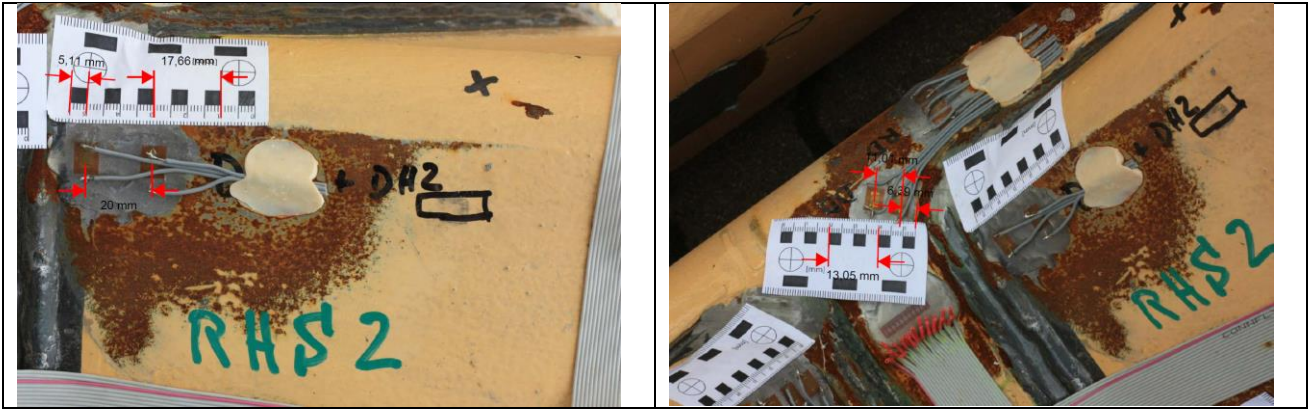
Typ	Art	Hersteller	Träger*)			Messgitter*)			Kanalbezeichnung
			Anz. DMS	Länge	Breite	Länge	Breite	Abstand	
FXV1-11	Kette	TML	10	21,7	5	1	1,3	2	ZVK1-10, ZHK1-10
PFL10-11	Einzel-DMS	TML	1	17,5	5	10	0,9	-	B1-B5, C1-C5, D1-D4
LY2/120	Einzel-DMS	HBM	1	7,5	10	3	2,8	-	ZD1-3, ZR1-3, DR1-3, DD1-3, ZV1-3, ZH1-3, DH1-2, DV1-2



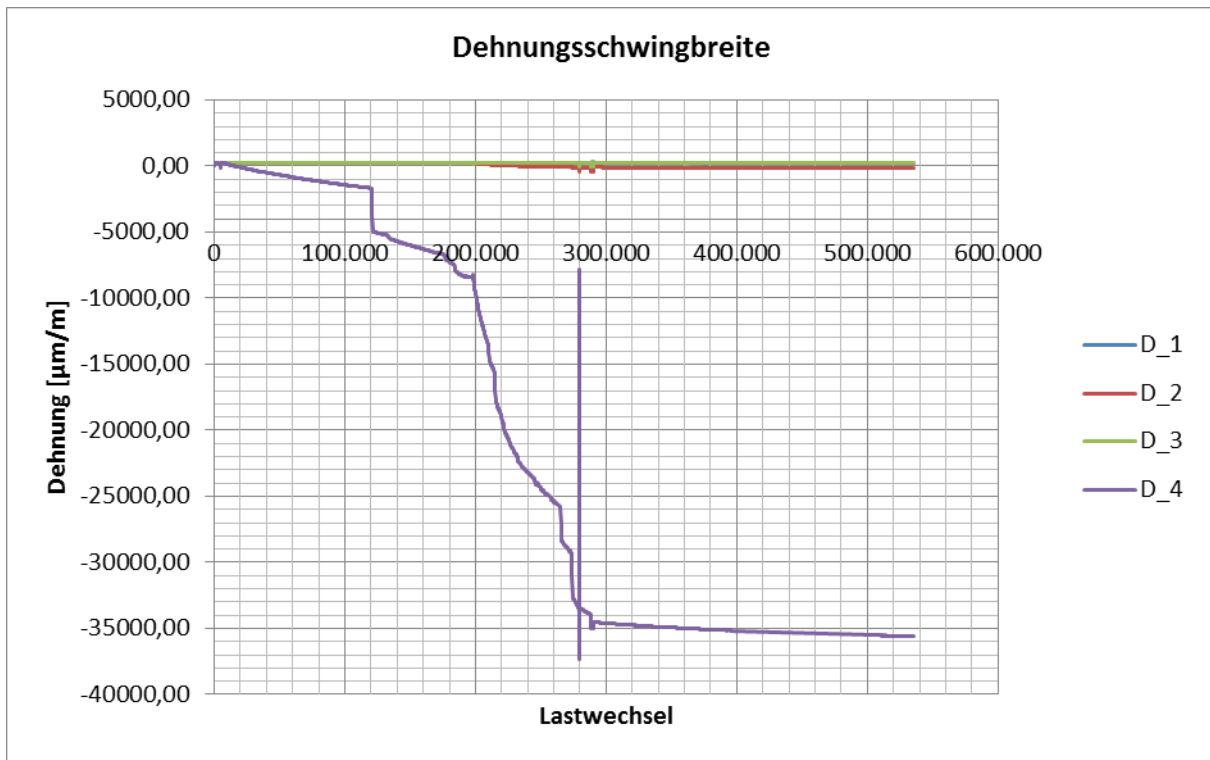
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements



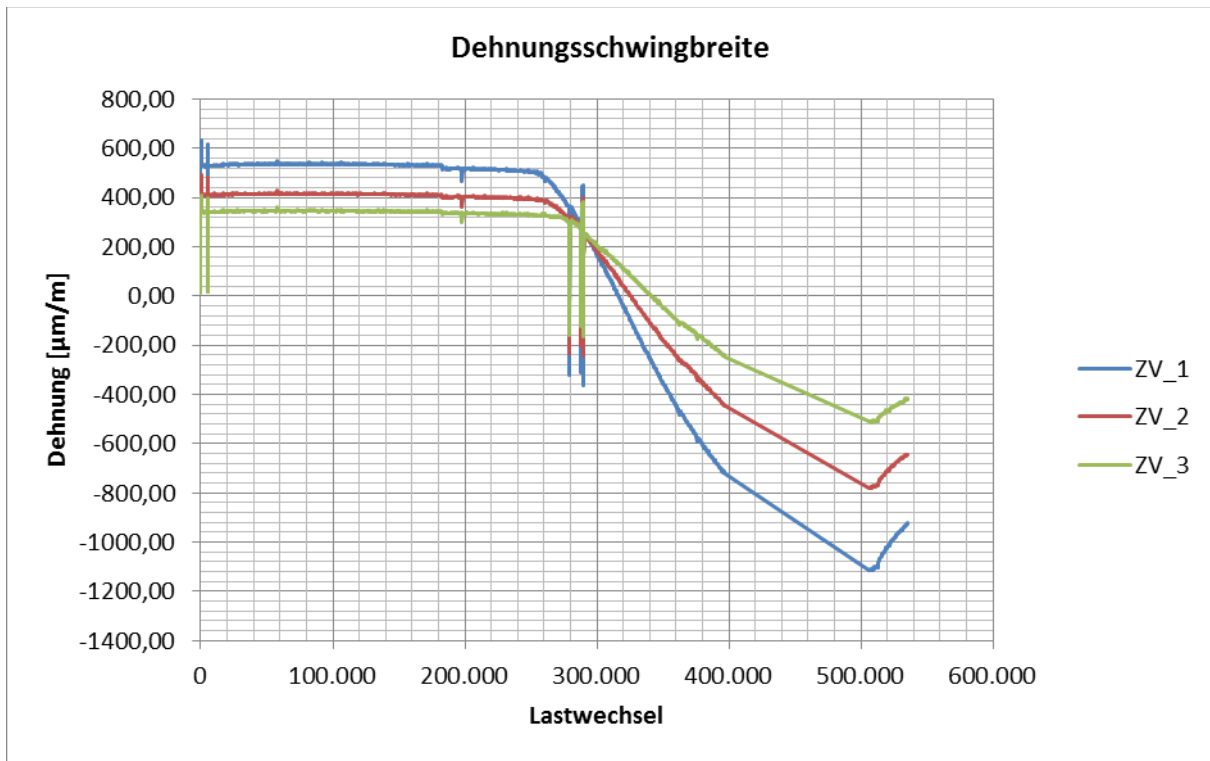
ANHANG B2 – Dehnungsmessungen  
 ANNEX B2 – Strain gauge measurements



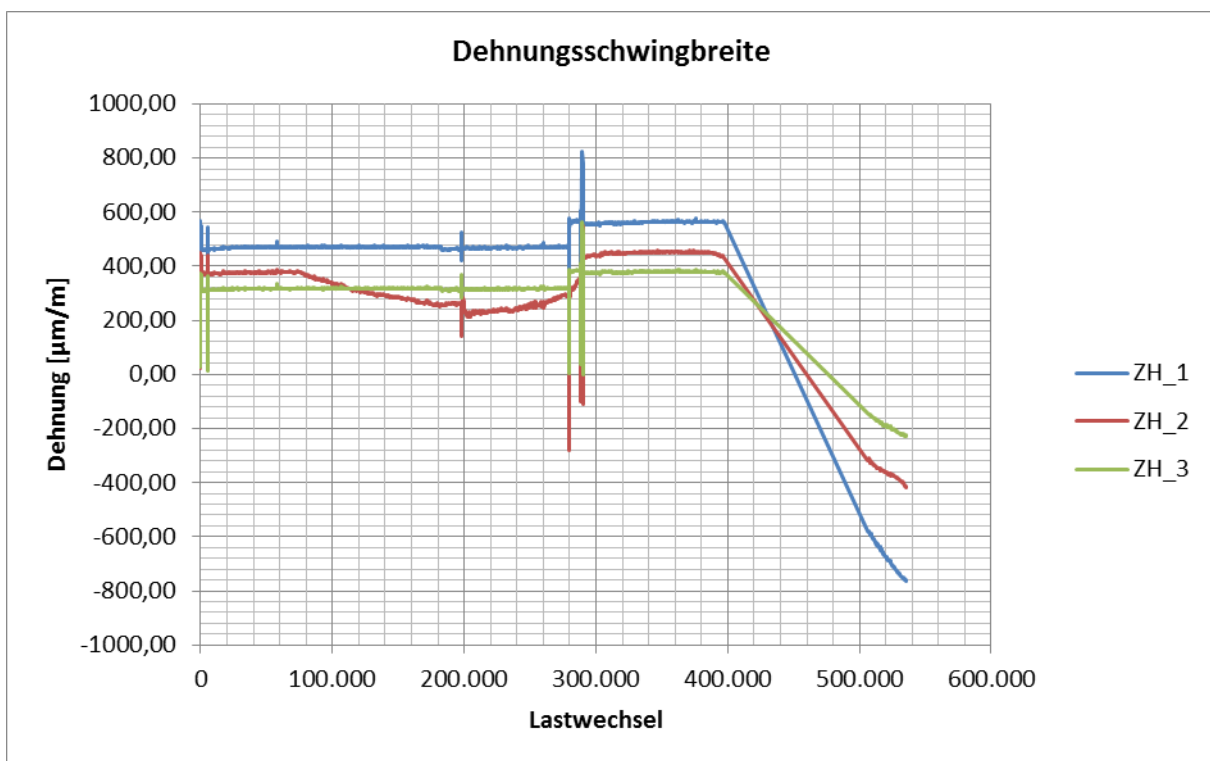
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 axial Gurt



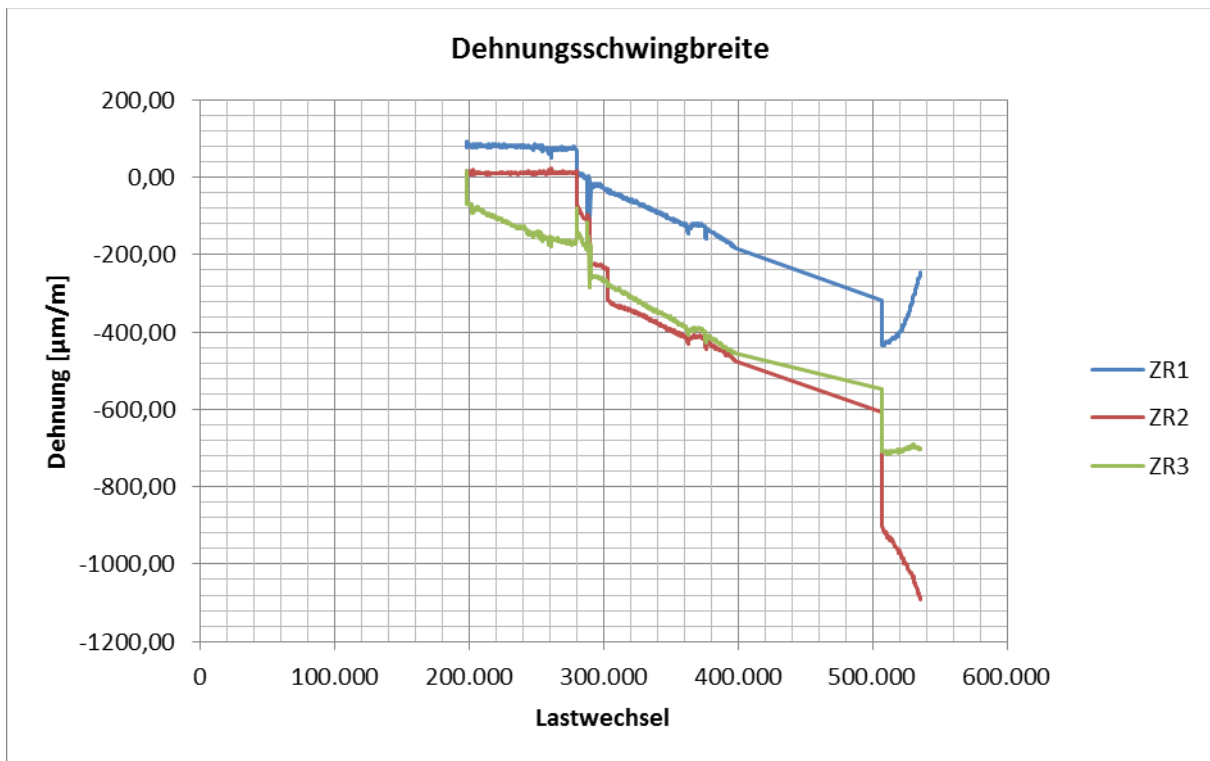
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Zugstrebe, Spalt



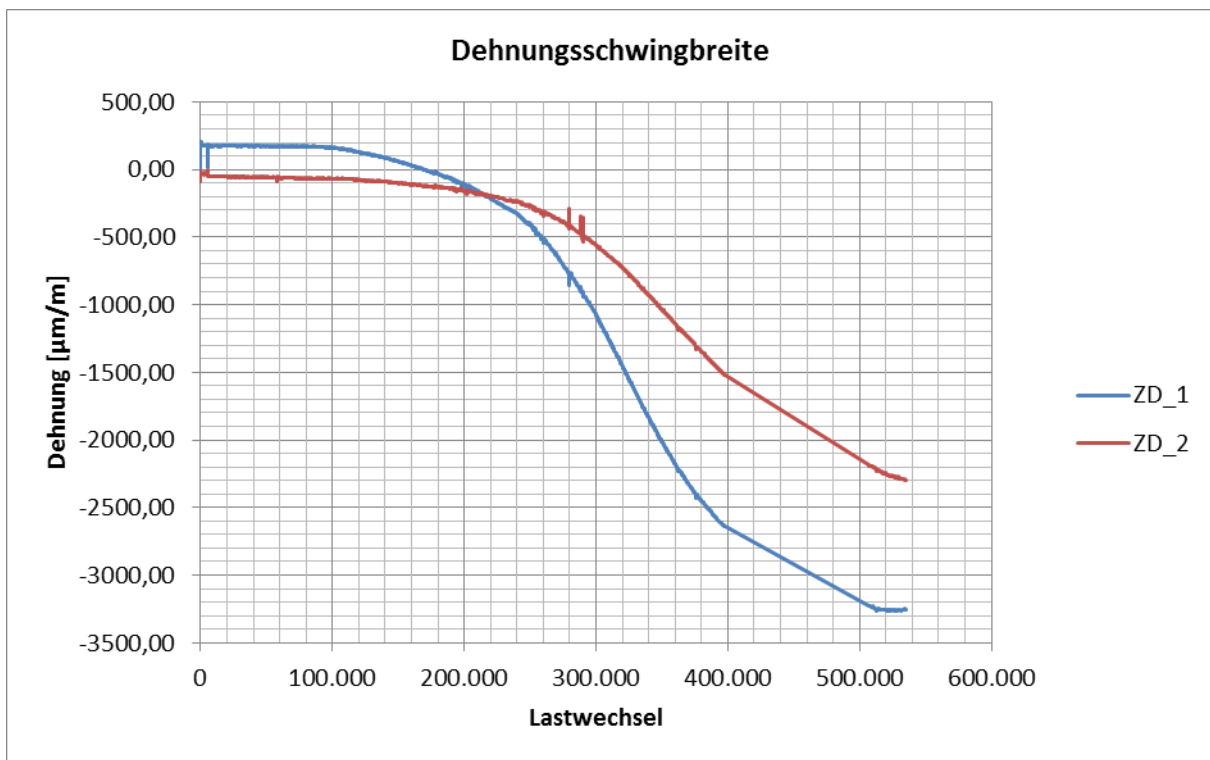
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Zugstrebe, Spalt



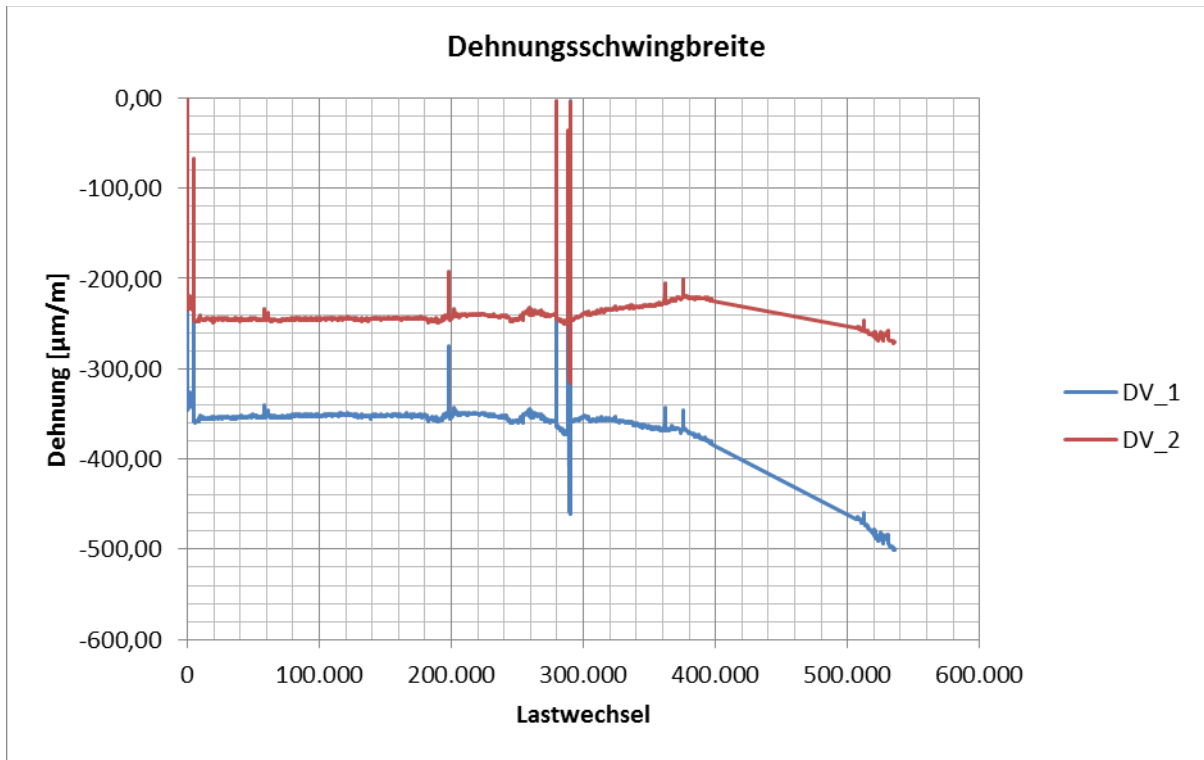
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Zugstrebe



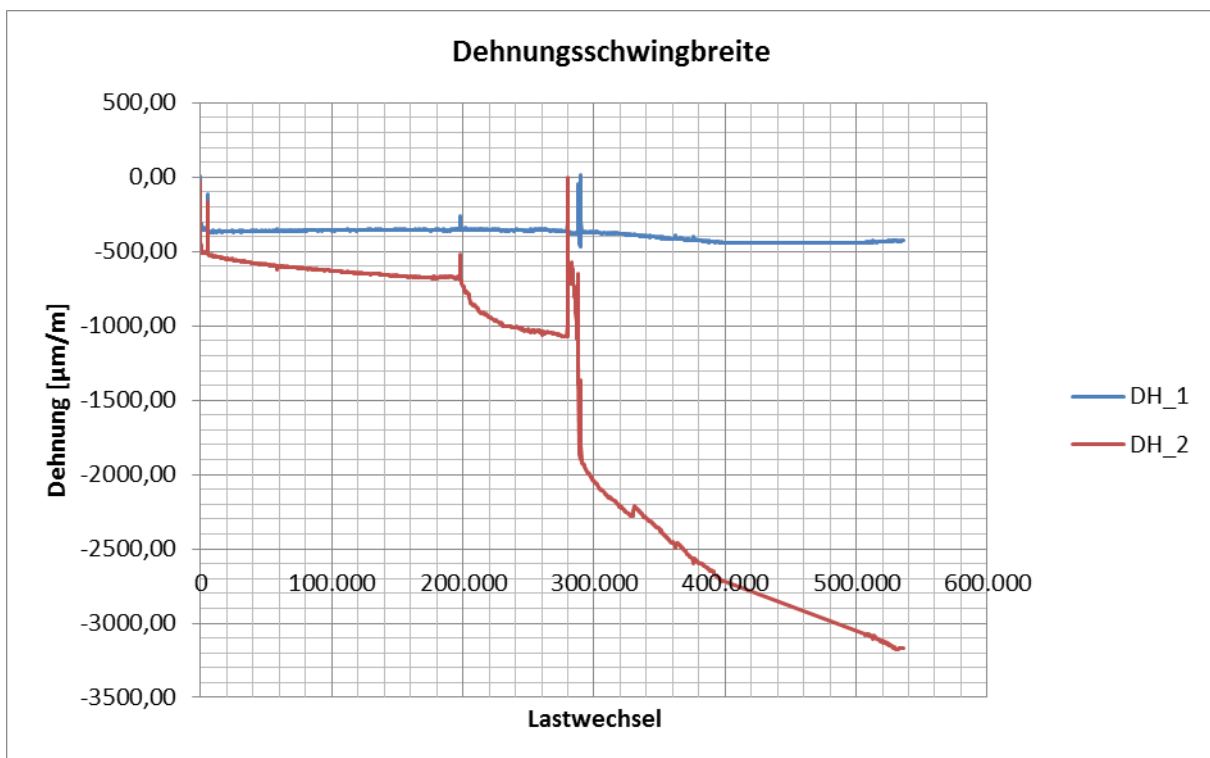
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Zugstrebe



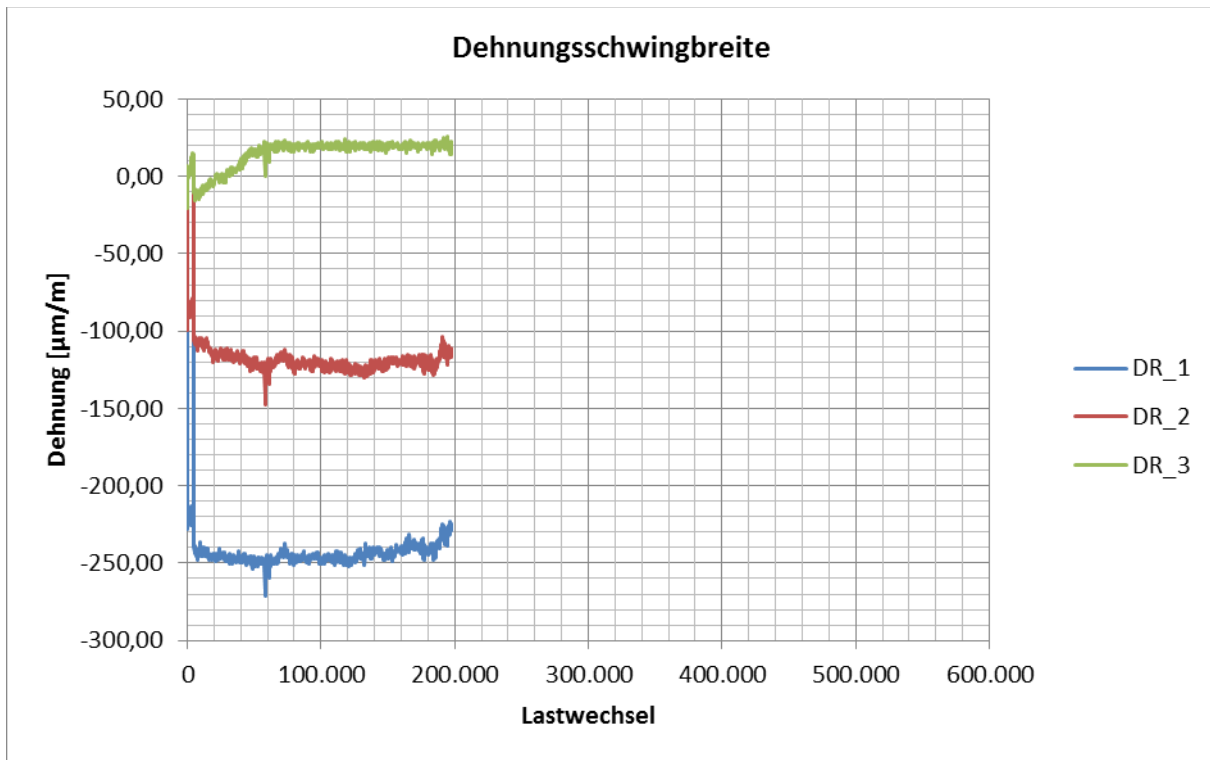
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Druckstrebe



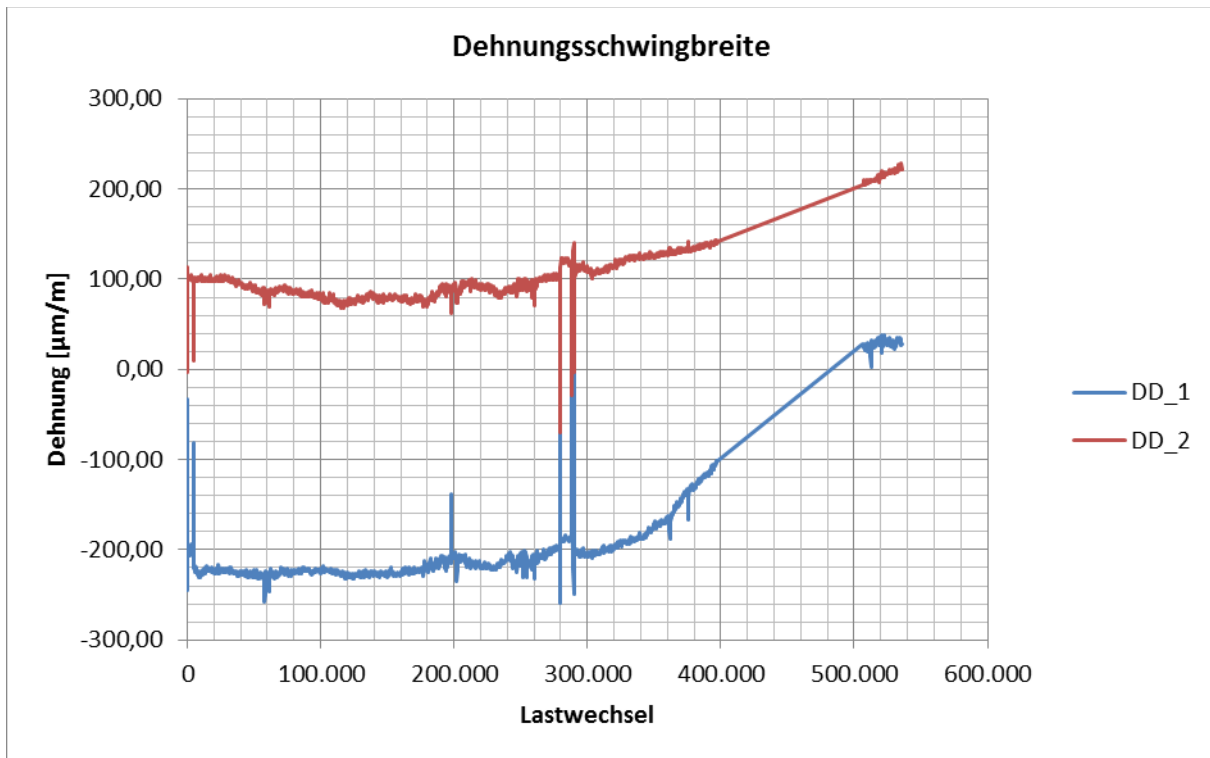
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Druckstrebe



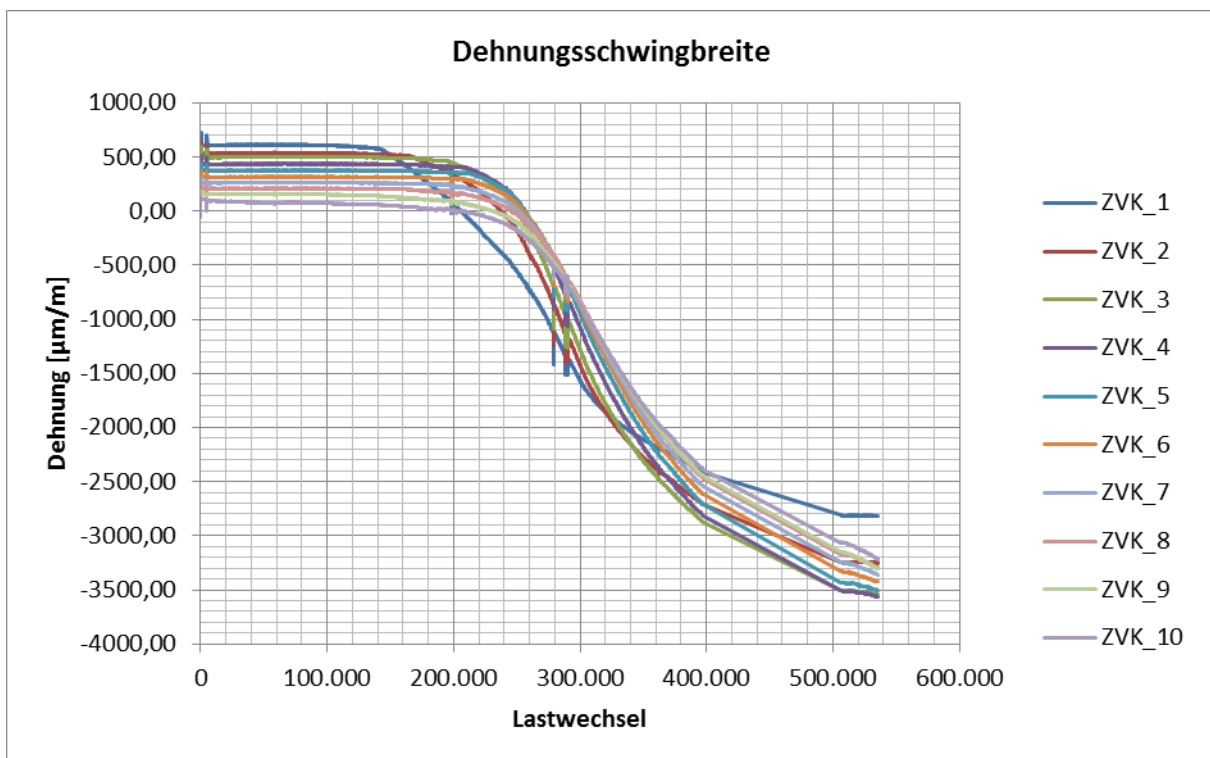
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Druckstrebe



K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Druckstrebe

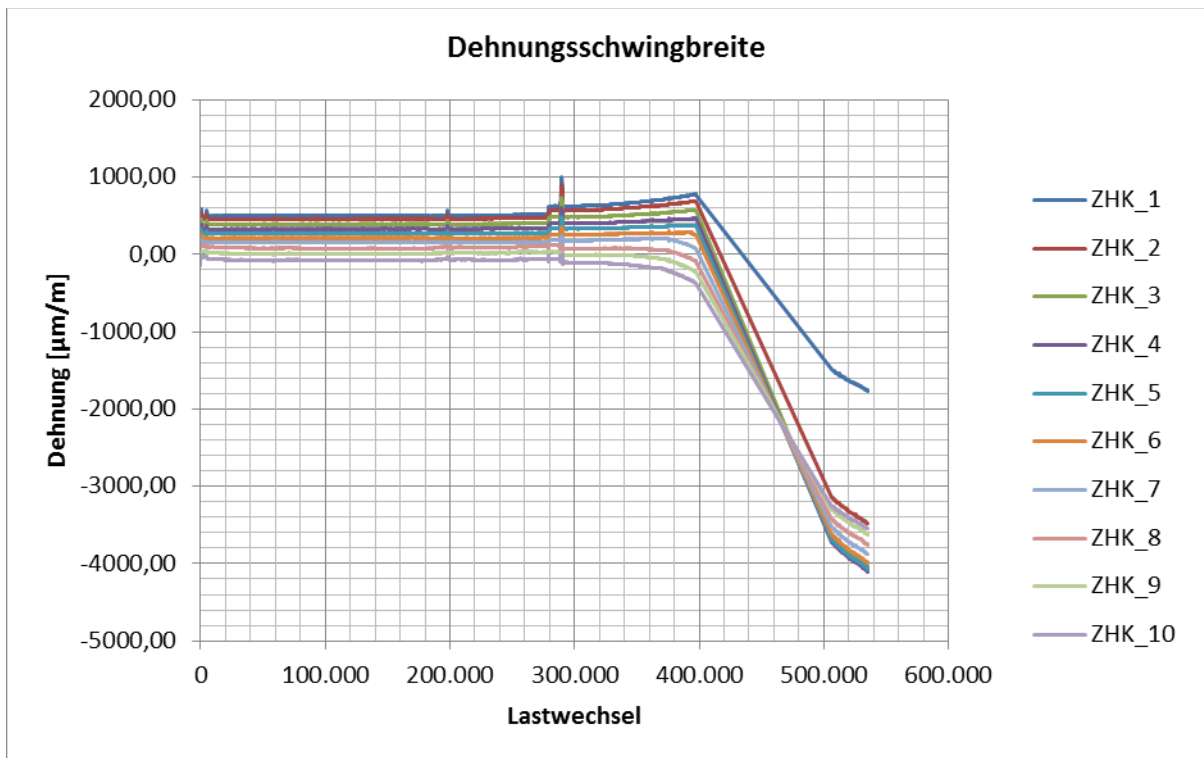


K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Gurt, Spalt

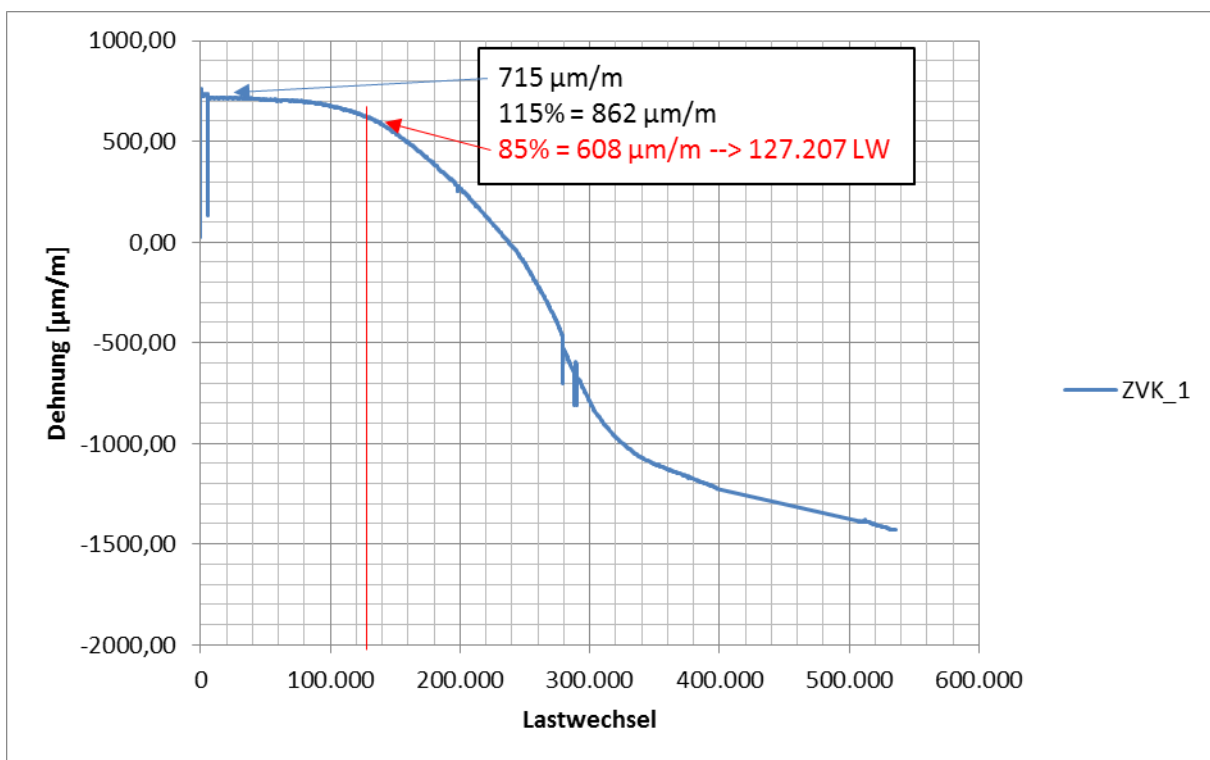


K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Gurt, Spalt

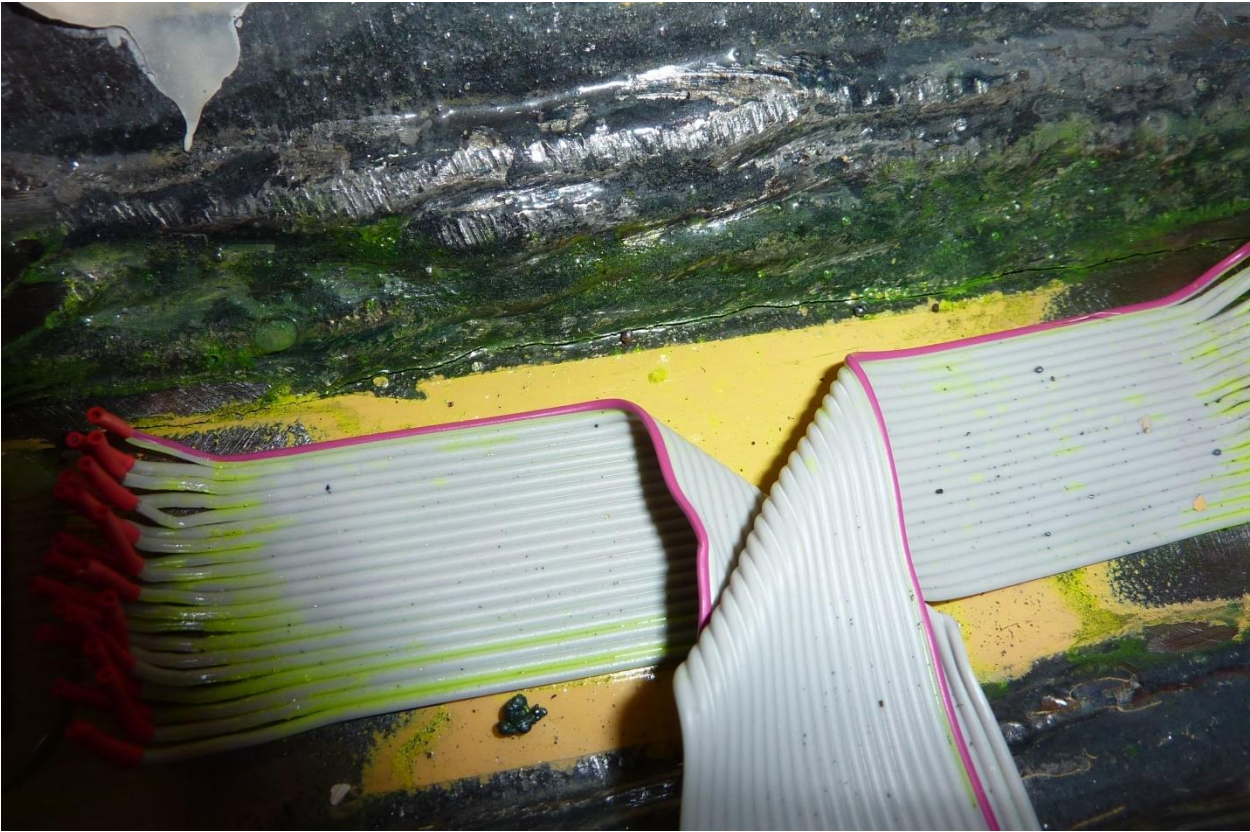




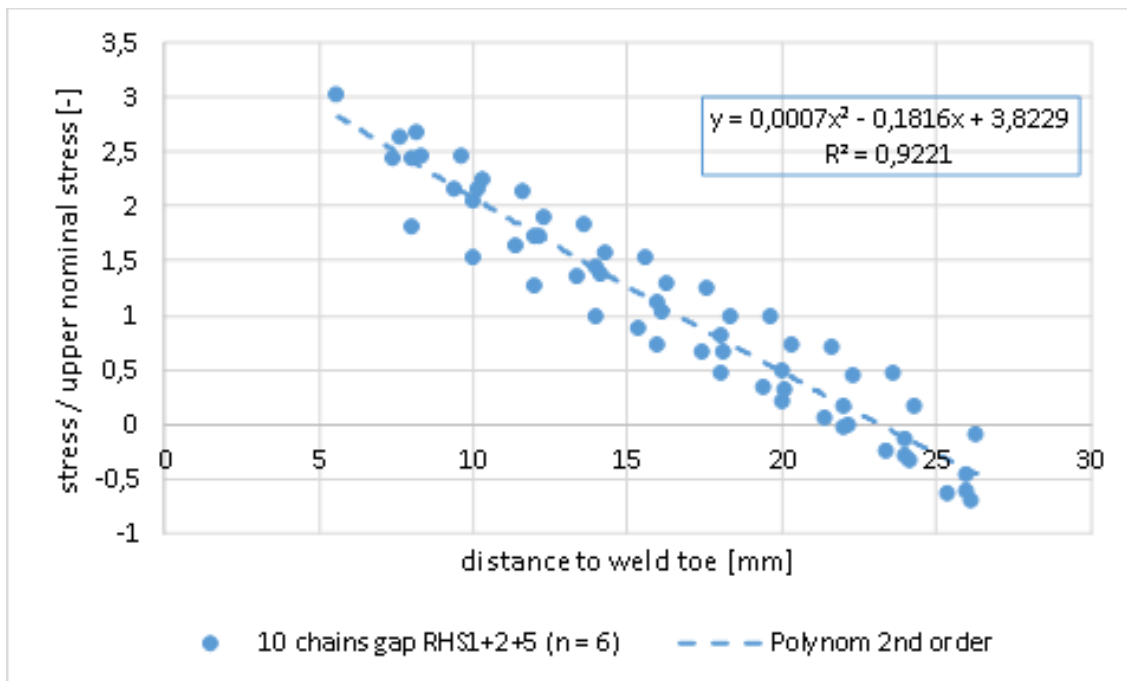
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Lastspielzahl N1



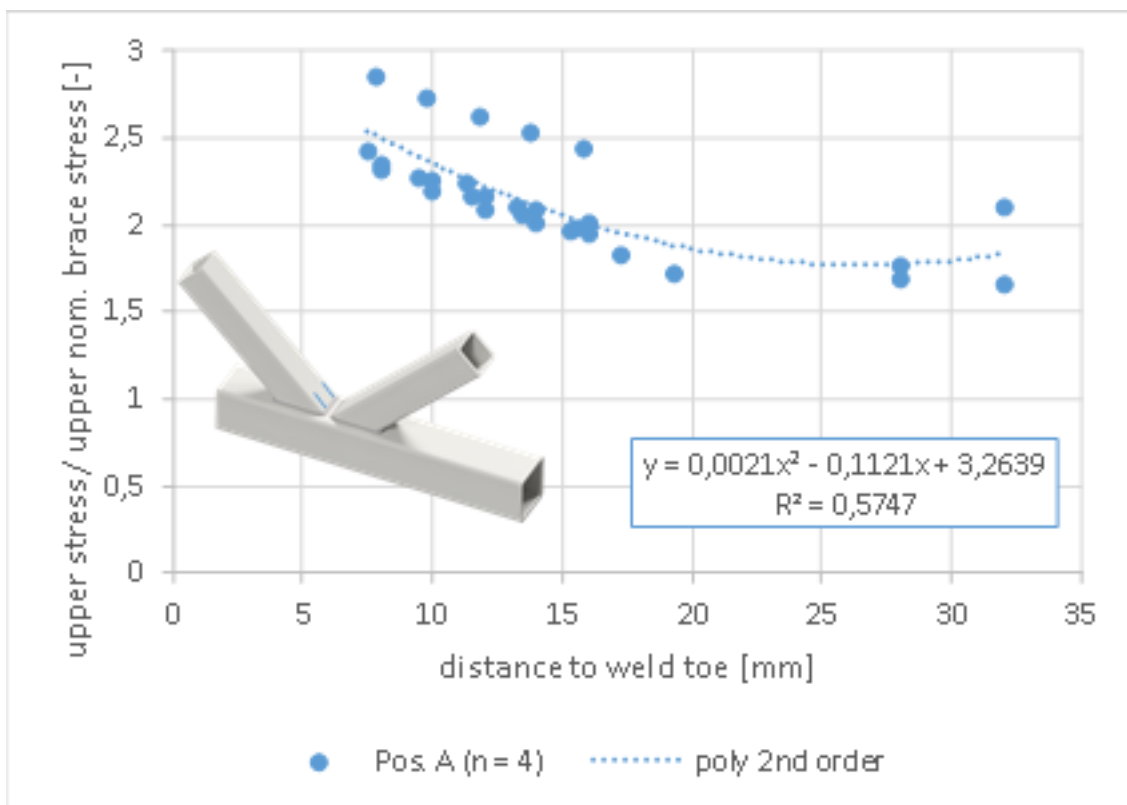
K45-RHP-300x200-220x20-S355-2 Riss im Gurt am Schweißnahtfuß zur Zugstrebe



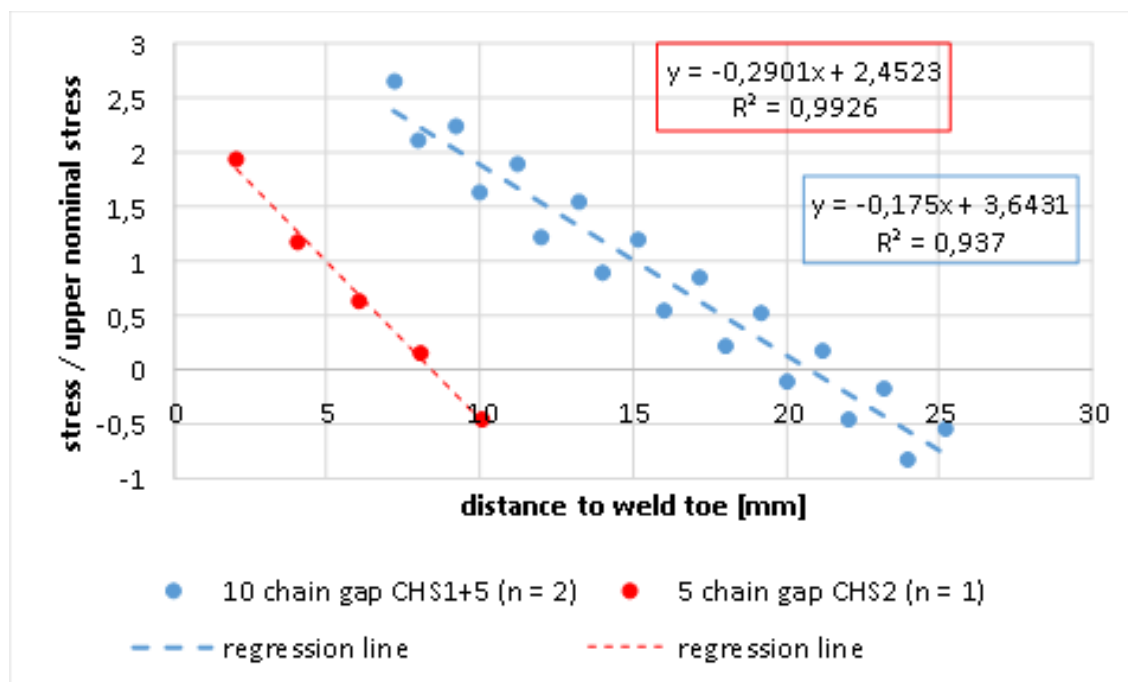
K45-RHS-300x20-220x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Gurt Spalt



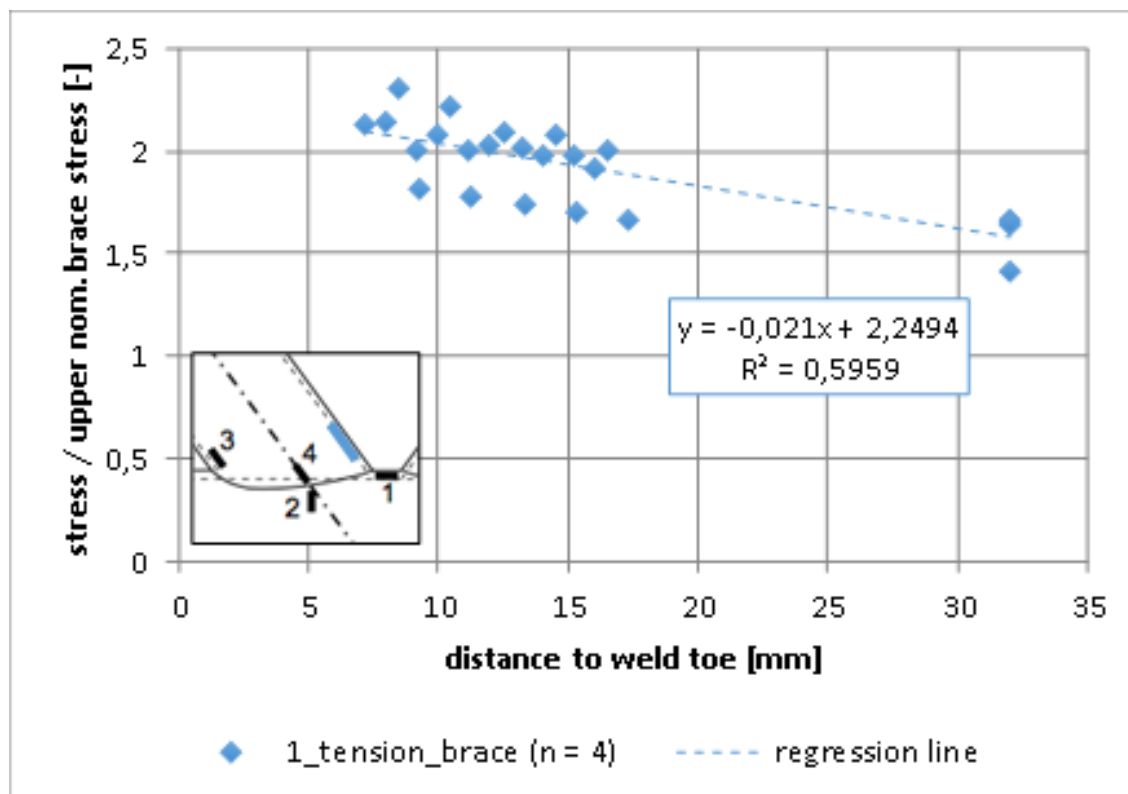
K45-RHS-300x20-220x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Strebe Spalt



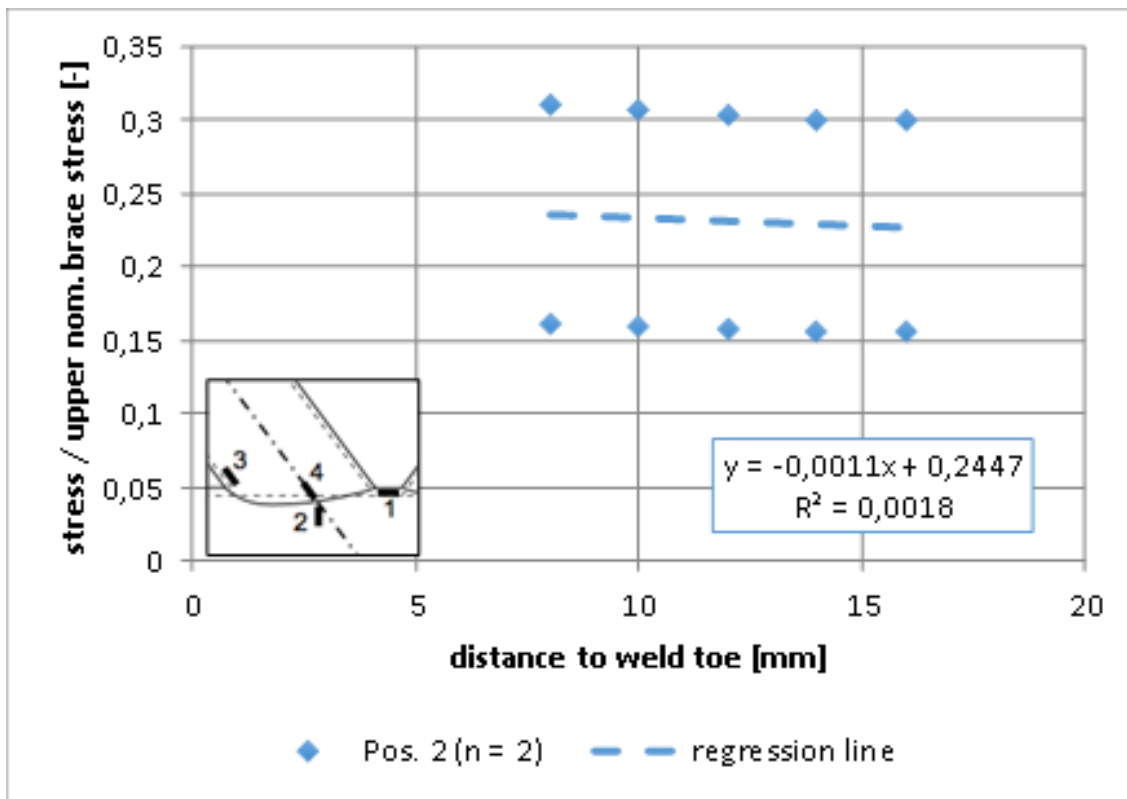
K45-CHS-323.9x20-244.5x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Gurt Spalt



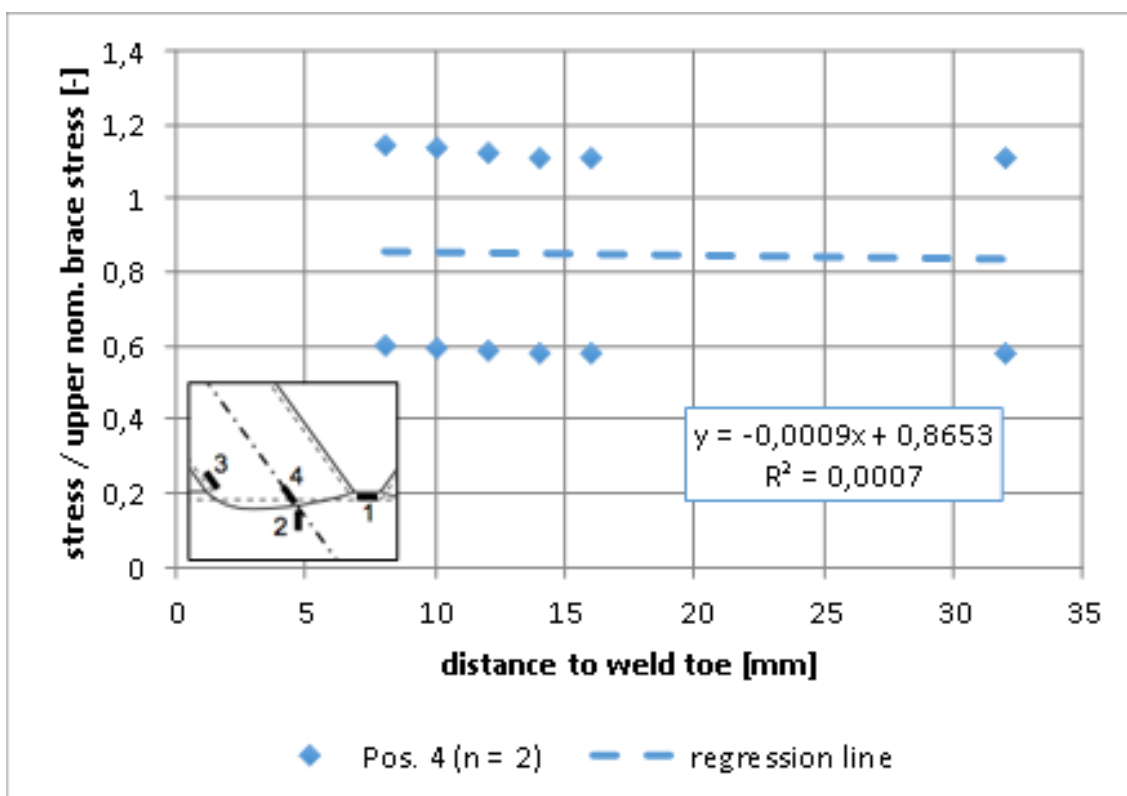
K45-CHS-323.9x20-244.5x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Strebe Spalt



K45-CHS-323.9x20-244.5x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Strebe Pos. 2



K45-CHS-323.9x20-244.5x20 Auswertung der Hot-Spot-Spannung – Strebe Pos. 4



# ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

## ANNEX B3 – Fatigue test results

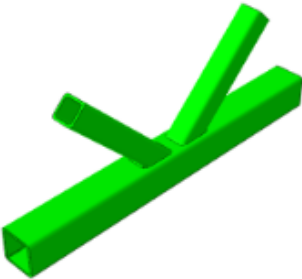

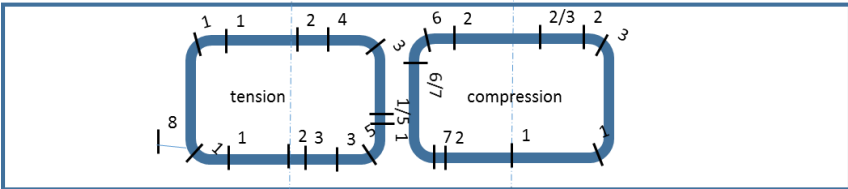
### Ergebnisse der Ermüdungsversuche

Probekörper	Nennspannung Gurt	MF*Nennspannung Gurt	Nennspannung Strebe	MF*Nennspannung Strebe	Bruchlast- spielzahl  N <sub>f</sub>
	$\Delta\sigma_{nom,C}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{nom,C,MF}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{nom,B}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{nom,B,MF}$ [MPa]	
K45-RHP-130x4-80x4-S700-1	40,5	60,8	47,4	71,1	461.577
K45-RHP-130x4-80x4-S700-2	40,5	60,8	47,4	71,1	67096*
K45-RHP-130x4-80x4-S700-3	40,4	60,6	47,3	70,95	330.000
K45-RHP-130x4-80x4-S700-4	29,6	44,4	36,8	55,2	502.181
K45-RHP-130x4-80x4-S700-5	29,6	44,4	36,6	54,9	167.315
K45-RHP-100x6-80x4-S700-1	50,0	75,0	66,5	99,75	4330644*
K45-RHP-100x6-80x4-S700-2	76,4	114,6	98,9	148,35	37447*
K45-RHP-100x6-80x4-S700-3-1	18,3	27,5	24	36	3006682*
K45-RHP-100x6-80x4-S700-3-2	71,4	107,1	89,4	134,1	662.080
K45-RHP-100x6-80x4-S700-4	69,6	104,4	90,9	136,35	292.487
K45-RHP-100x6-80x4-S700-5	79,1	118,7	100,2	150,3	553.783
K45-RHP-100x6-80x4-S700-6	69,6	104,4	89,6	134,4	358.302
K45-RHP-100x6-80x4-S700-7	62,6	93,9	80,2	120,3	447.266
K45-RHP-100x6-80x4-S700-8	63,6	95,4	80,3	120,45	1.437.367
K45-RHP-130x4-80x4-S500-1	35,7	53,6	42,2	63,3	254.299
K45-RHP-130x4-80x4-S500-2	34,6	51,9	41,3	61,95	161.106
K45-RHP-130x4-80x4-S500-3	28,3	42,5	33,9	50,85	2.553.857
K45-RHP-130x4-80x4-S500-4	29,3	44,0	34,6	51,9	378.761
K45-RHP-300x20-220x20-S355-1	80,0	120,0	100	150	60.115
K45-RHP-300x20-220x20-S355-2	40,0	60,0	53,3	79,95	356.753
K45-RHP-300x20-220x20-S355-3	40,0	60,0	53,3	79,95	419.100
K45-RHP-300x20-220x20-S355-4	80,0	120,0	100	150	111.283
K45-RHP-300x20-220x20-S700-1	57,0	85,5	71,7	107,55	171.150
K45-RHP-300x20-220x20-S700-2	80,0	120,0	53,3	79,95	40.600
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S355-1	40,0	60,0	50	65	1.310.000
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S355-2	40,0	60,0	50	65	1.347.194
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S355-3	57,0	85,5	71,2	92,56	206.599
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S355-4	80,0	120,0	100	130	107.877
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S700-1	57,0	85,5	71,2	92,56	158.500
K45-KHP-323,9x20-244,5x20-S700-2	80,0	120,0	100	130	173.300
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-1	59,5	89,3	117,9	153,27	997.416
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-2	59,8	89,7	116,1	150,93	1.259.086
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-3	48,8	73,2	96,3	125,19	1.554.015
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-4	49,9	74,9	96,7	125,71	411.728*
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-5	66,0	99,0	133,3	173,29	43.607*
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-6	66,0	99,0	132,6	172,38	780.953
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-7	60,0	90,0	119,6	155,48	580.930*
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S700-8	60,0	90,0	119,9	155,87	259.236*
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-1	47,6	71,4	93,7	121,81	2.531.241
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-2	48,1	72,2	93,5	121,55	1.363.311
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-3	67,4	101,1	129	167,7	539.992
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-4	66,0	99,0	126,3	164,19	315.853
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-5	60,0	90,0	115,1	149,63	632.105
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-6	66,0	99,0	128,4	166,92	579.836
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-7	60,0	90,0	113,7	147,81	1.245.457
K45-KHP-193,7x10-114,3x6,3-S355-8	60,0	90,0	115,5	150,15	524.958

\*Durchläufer

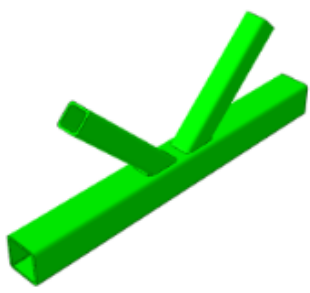

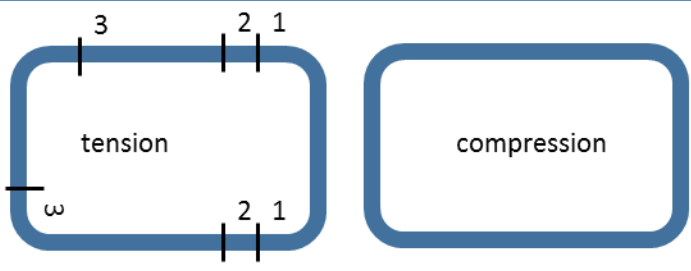
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 010617-260617		
Probekörper (S700n130801) K45-RHP-130x4-80x4-S700-1		Wöhlerserie		
Gurt [mm] 130x130x4	Strebe [mm] 80x80x4	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>40.5/47.4</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 4
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 67		Oberlast Druckstrebe -66.6		
Unterlast Zugstrebe: 13		Unterlast Druckstrebe -15.1		
Prüfmaschine: TNO				
				
N1: 50000	N5: 160287			
N2: 80287	N6: 230287			
N3: 90287	N7: 300287			
N4: 120287	N8: 461577			
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 50000 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 461577 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper ohne DMS				
-überschweißter Spalt,				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

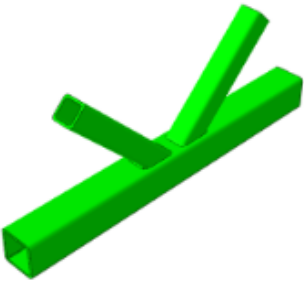
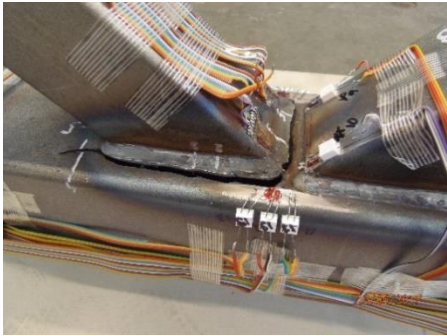
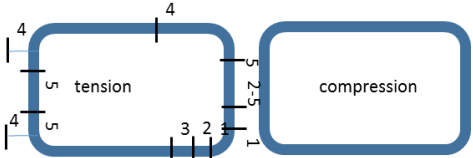
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 140317-110517		
Probekörper (S700n130802) K45-RHP-130x4-80x4-S700-2		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>40.5/47.4</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 4
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 67.9		Oberlast Druckstrebe -66.6		
Unterlast Zugstrebe: 13		Unterlast Druckstrebe -15.1		
Probekörperform: TNO				
				
Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = TBD (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 34328 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = 67096 (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 88355 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: -Probekörper ohne DMS				



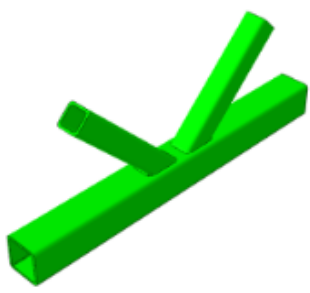
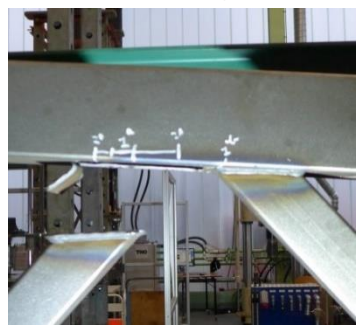
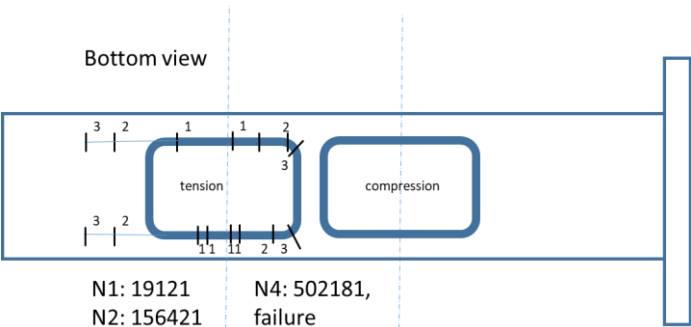
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 100517-310517								
Probekörper (S700n130803) K45-RHP-130x4-80x4-S700-3		Wöhlerserie								
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>40.4/47.3</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 4						
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 								
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>								
Oberlast max Zugstrebe: 67.9		Oberlast max Druckstrebe -66.7								
Unterlast min Zugstrebe: 13.1		Unterlast min Druckstrebe -14.6								
Probekörperform: TNO  <table border="0"> <tr> <td>N1: 119383</td> <td>N4: 216989</td> </tr> <tr> <td>N2: 161595</td> <td>N5: 234487</td> </tr> <tr> <td>N3: 181595</td> <td>N6: 330000</td> </tr> </table> <p>Erreichte Lastspiezahl:  N<sub>1</sub> = TBD (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)  N<sub>2</sub> = 119303 (erster sichtbarer Riss)  N<sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)  N<sub>4</sub> = 330000 (Bauteilabriss)</p>					N1: 119383	N4: 216989	N2: 161595	N5: 234487	N3: 181595	N6: 330000
N1: 119383	N4: 216989									
N2: 161595	N5: 234487									
N3: 181595	N6: 330000									
Bemerkungen: -Probekörper ohne DMS - überschweißter Spalt										

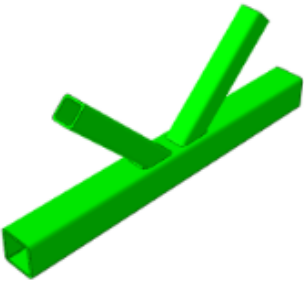
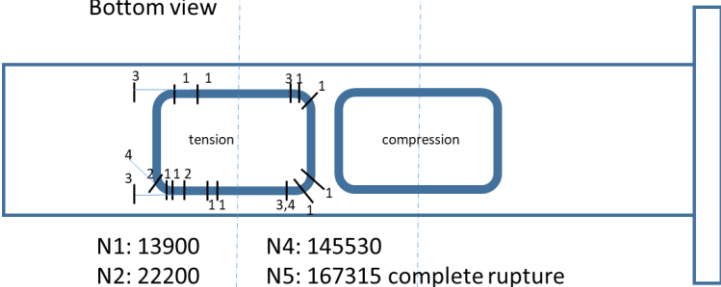
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 190118-220118		
Probekörper K45-RHP-130x4-80x4-S700-4		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>29.6/36.6</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast max Zugstrebe: 54.3		Oberlast max Druckstrebe -53.9		
Unterlast min Zugstrebe: 10.4		Unterlast min Druckstrebe -10.7		
Prüfmaschine: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 19121      N4: 502181, N2: 156421      failure N3: 487174</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 19121 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = TBD (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 502181 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 220118-230118		
Projekt K45-RHP-130x4-80x4-S700-5		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>29.6/36.6</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen  TBD		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 54.3		Oberlast Druckstrebe -54		
Unterlast Zugstrebe: 10.4		Unterlast Druckstrebe -11		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 13900      N4: 145530  N2: 22200      N5: 167315 complete rupture  N3: 123900</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 13900 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = TBD (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 167315 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 250717-110917		
Probekörper (S700n100801) K45-RHP-100x6-80x4-S700-1		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>50/66.5</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 100.4		Oberlast Druckstrebe -101.5		
Unterlast Zugstrebe: 19.5		Unterlast Druckstrebe -20.8		
Prüfmaschine: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 984131    N4: 3330624 N2: 2398712    N5: 4330644 N3: 2448722</p>				
<p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p>N<sub>1</sub> = ... (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)</p> <p>N<sub>2</sub> = 984131 (erster sichtbarer Riss)</p> <p>N<sub>3</sub> = ... (Riss durch die Wand)</p> <p>N<sub>4</sub> = ... (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>N = 4.330.644 Lastspiele, Durchläufer</p> <p>-Probekörper mit DMS</p> <p>Anrisse vorhanden, nicht durch die Wand; sehr langsamer Rissfortschritt.</p>				

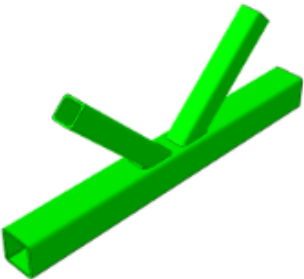

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 280617-240717		
Probekörper (S700n100802) K45-RHP-100x6-80x4-S700-2		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>76.4/98.9</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 150.4		Oberlast Druckstrebe -150		
Unterlast Zugstrebe: 29.6		Unterlast Druckstrebe -30		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1: 3000      N4: 37447 (crack in brace side wall)  N2: 33300      N3: 35500 (crack in brace side wall)</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = ... (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 3000 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = 33300 (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 37447 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: Risse an Gurt und Strebe				

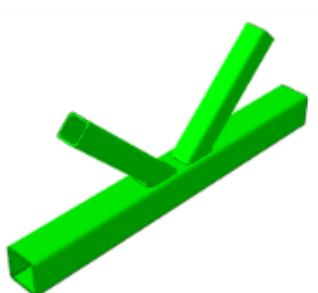

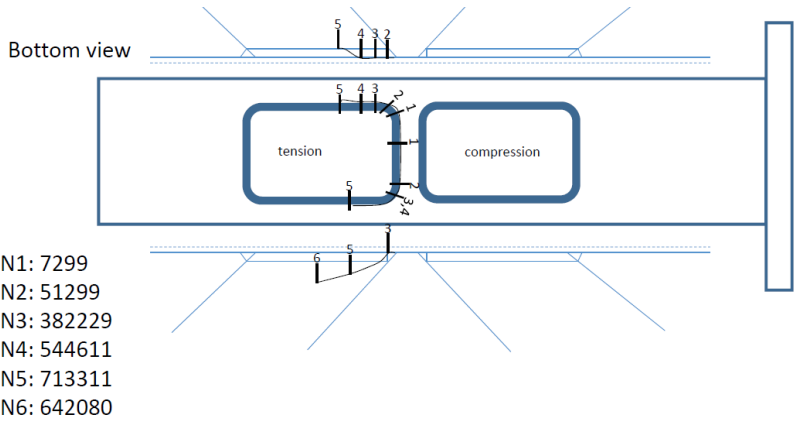
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 280617-240717		
Probekörper (S700n100803) K45-RHP-100x6-80x4-S700-3-1		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>18.3/24</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 35		Oberlast Druckstrebe -35.9		
Unterlast Zugstrebe: 7.2		Unterlast Druckstrebe -5.5		
Probekörperform: TNO Bottom view Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = ... (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = ... (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = ... (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = ... (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: N = 3.006.682 Lastspiele, Druchläufer -Probekörper ohne DMS -Test verlief ohne Riss, wird unter höherer Beanspruchung erneut getestet				

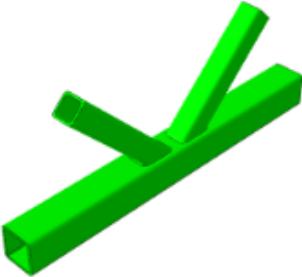

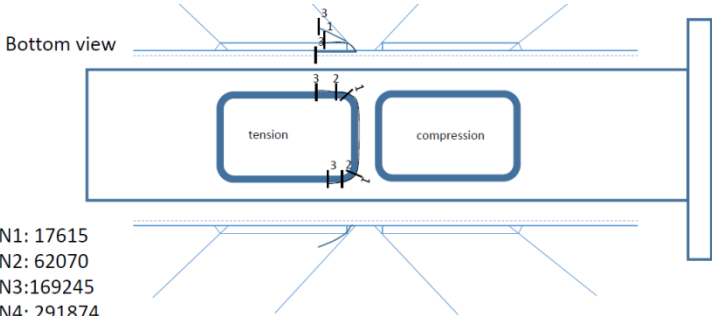
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 280917-091017		
Probekörper (S700n100803) K45-RHP-100x6-80x4-S700-3-2		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>71.4/89.4</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 135.8		Oberlast Druckstrebe 134.2		
Unterlast Zugstrebe: 26.3		Unterlast Druckstrebe 26.7		
Probekörperform: TNO				
 <p>Bottom view</p> <p>tension</p> <p>compression</p> <p>N1: 7299 N2: 51299 N3: 382229 N4: 544611 N5: 713311 N6: 642080</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 7299 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = 642080 (Riss durch die Wand Gurt)				
N <sub>4</sub> = 662080 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper bei niedrigerer Last ohne Versagen (K45-RHP-100x6-80x4-S700-3-1)				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

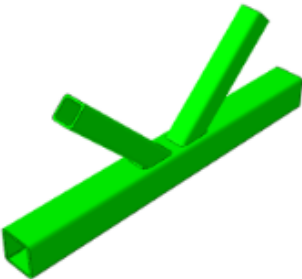
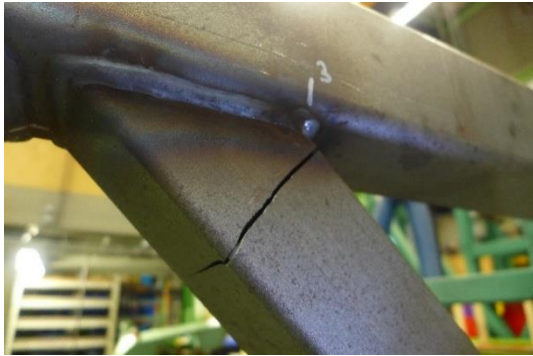
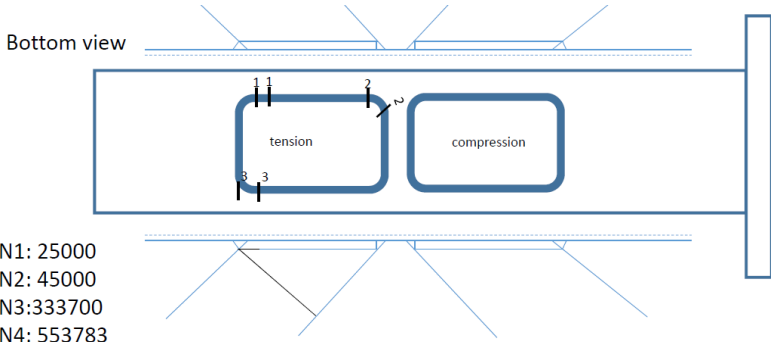
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 111017-161017		
Probekörper K45-RHP-100x6-80x4-S700-4		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>69.9/90.9</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 135.5		Oberlast Druckstrebe 135.5		
Unterlast Zugstrebe: 26.5		Unterlast Druckstrebe 27.1		
Probekörperform: TNO  N1: 17615 N2: 62070 N3: 169245 N4: 291874 N5: 292487 Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 17615 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = 291874 (Riss durch die Wand Gurt) N <sub>4</sub> = 292487 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: -Probekörper ohne DMS -Risse in Strebe und Gurt. Gurtversagen.				



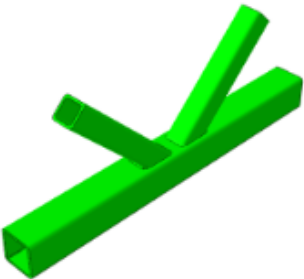
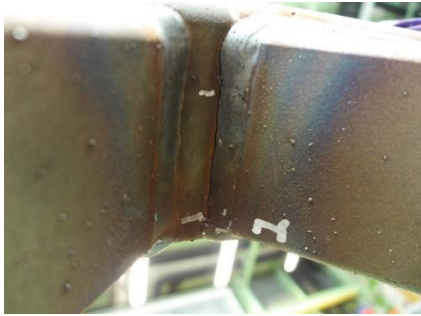
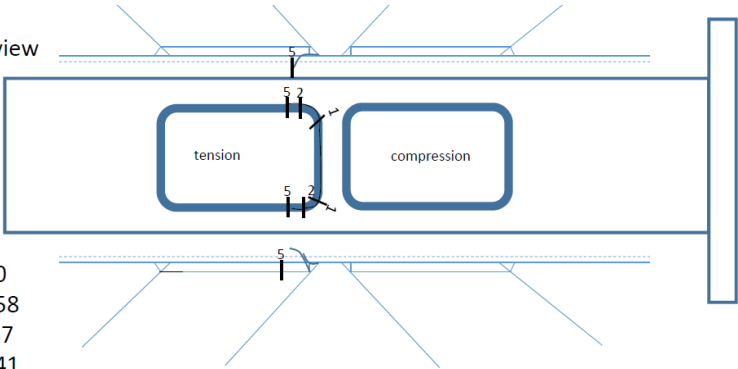
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 221117-261117		
Probekörper K45-RHP-100x6-80x4-S700-5		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>79.1/100.2</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 150.7		Oberlast Druckstrebe 151.7		
Unterlast Zugstrebe: 30.1		Unterlast Druckstrebe 28.3		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 25000 N2: 45000 N3: 333700 N4: 553783</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 25000 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 553783 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper ohne DMS				
-Risse in Gurt und Strebe, Strebenversagen				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 171017-241017		
Probekörper K45-RHP-100x6-80x4-S700-6		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>69.2/89.6</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 135.6		Oberlast Druckstrebe 134.		
Unterlast Zugstrebe: 26.6		Unterlast Druckstrebe 27.2		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view </p> <p>N1: 10530 N2: 102058 N3: 152387 N4: 204341 N5: 353993 N6: 358302</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 10530 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = 353993 (Riss durch die Wand Gurt)				
N <sub>4</sub> = 358302 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper ohne DMS				
-Risse im Gurt, Gurtversagen				

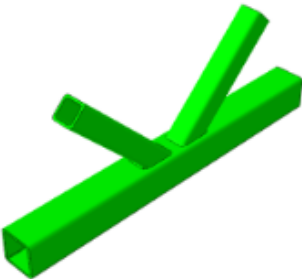

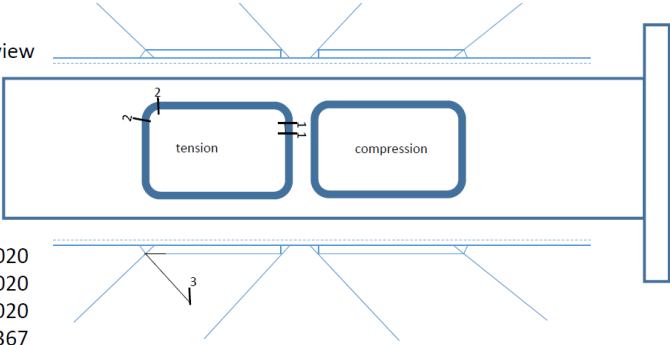
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 301017-021117		
Probekörper K45-RHP-100x6-80x4-S700-7		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>61.6/80.2</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 120.7		Oberlast Druckstrebe 120.2		
Unterlast Zugstrebe: 23.9		Unterlast Druckstrebe 23.8		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view </p> <p>N1: 13750 N2: 299600 N3: 447266</p>				
<p>Bottom view</p> <p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p>N<sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)</p> <p>N<sub>2</sub> = 13750 (erster sichtbarer Riss)</p> <p>N<sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)</p> <p>N<sub>4</sub> = 447266 (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>-Probekörper ohne DMS</p> <p>-Risse in Strebe, Strebenversagen</p>				

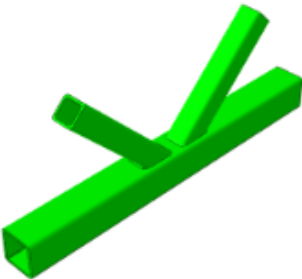

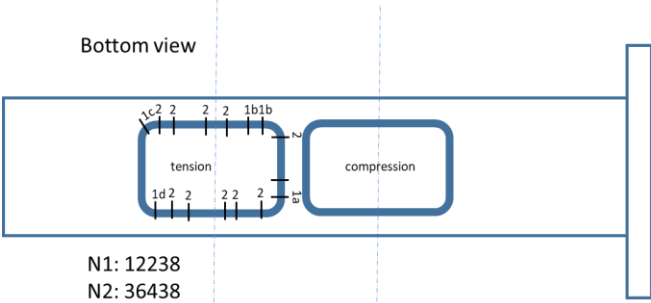
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 071117-161117		
Probekörper K45-RHP-100x6-80x4-S700-8		Wöhlerserie		
Gurt 100x100x6	Strebe 80x80x4	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>63.6/80.3</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 120.2		Oberlast Druckstrebe 121.2		
Unterlast Zugstrebe: 24.4		Unterlast Druckstrebe 22.8		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 1000020 N2: 1000020 N3: 1000020 N4: 1437367</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 1000020 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 1437567 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper ohne DMS				
-Risse in Strebe, Strebenversagen				

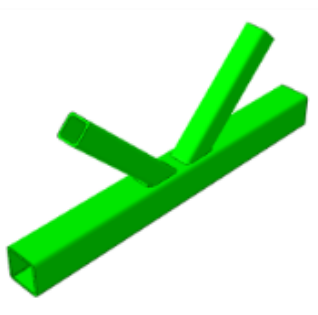
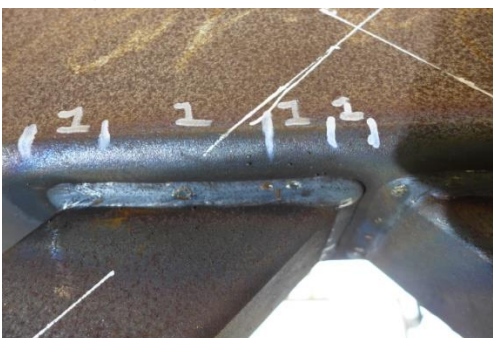
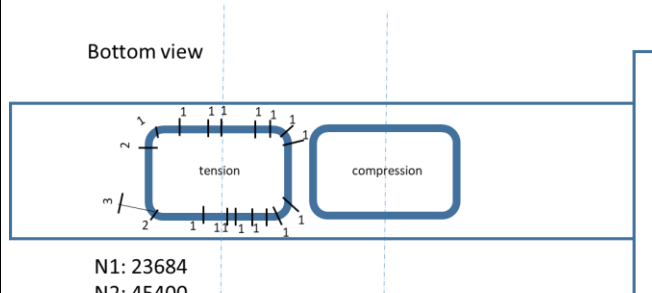
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 301117-021217		
Probekörper K45-RHP-130x4-80x4-S500-1		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>35.7/42.2</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S500</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 68		Oberlast Druckstrebe 67.3		
Unterlast Zugstrebe:13		Unterlast Druckstrebe 13.4		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 12238 N2: 36438 N3: 254299 failure</p>				
<p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p>N<sub>1</sub> = ... (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)</p> <p>N<sub>2</sub> =12238 (erster sichtbarer Riss)</p> <p>N<sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)</p> <p>N<sub>4</sub> = 254299 (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>-Probekörper mit DMS</p> <p>-Risse in Gurt, Gurtversagen</p>				

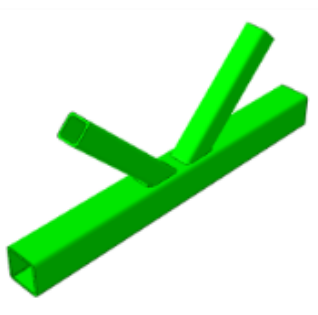

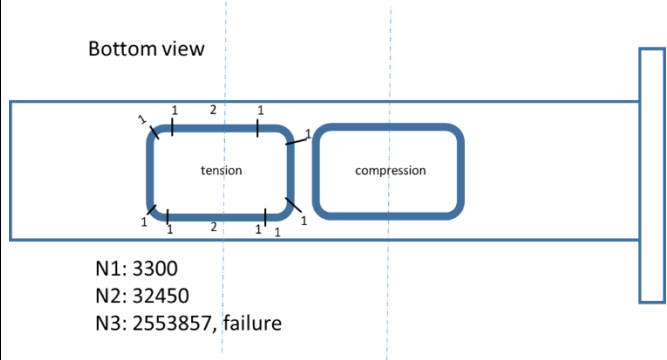
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 141217-201217		
Probekörper K45-RHP-130x4-80x4-S500-2		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>34.6/41.3</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S500</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 67.7		Oberlast Druckstrebe -67.8		
Unterlast Zugstrebe:13.4		Unterlast Druckstrebe -12.9		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 23684 N2: 45400 N3: 90400 N4: 138250, tt chord N5: 161106, failure</p>				
<p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p><math>N_1 = -</math> (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)  <math>N_2 = 23684</math> (erster sichtbarer Riss)  <math>N_3 = TBD</math> (Riss durch die Wand)  <math>N_4 = 161106</math> (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>-Probekörper ohne DMS          -Risse in Gurt, Gurtversagen</p>				

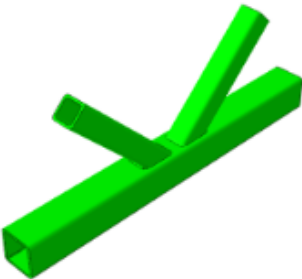
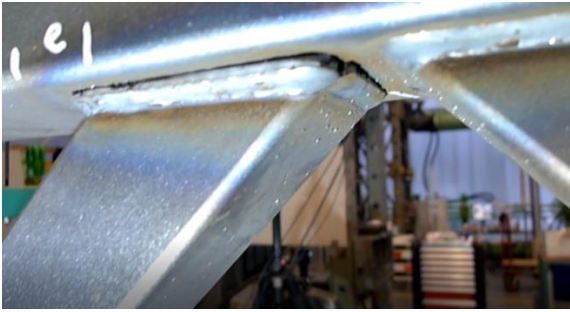
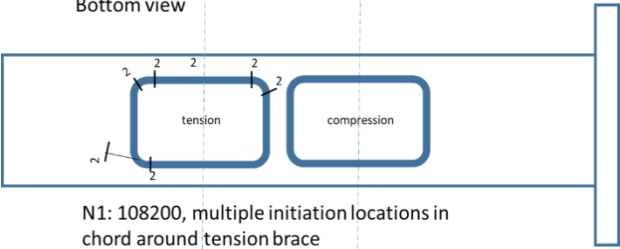
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 211217-150118		
Probekörper K45-RHP-130x4-80x4-S500-3		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>28.3/33.</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,2</b>	[Hz] 2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S500</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 54.4		Oberlast Druckstrebe -10.7		
Unterlast Zugstrebe:10		Unterlast Druckstrebe -53.9		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 3300 N2: 32450 N3: 2553857, failure</p>				
<p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p><math>N_1 = -</math> (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)</p> <p><math>N_2 = 3300</math> (erster sichtbarer Riss)</p> <p><math>N_3 = TBD</math> (Riss durch die Wand)</p> <p><math>N_4 = 2553857</math> (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>-Probekörper ohne DMS</p> <p>-Risse im Gurt, Gurtversagen</p>				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche



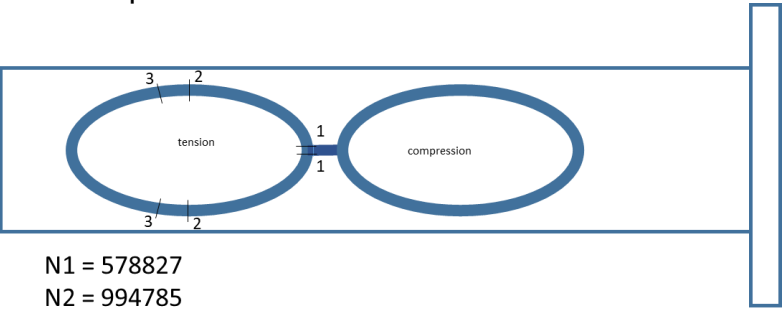
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 150118-180118		
Probekörper K45-RHP-130x4-80x4-S500-4		Wöhlerserie		
Gurt 130x130x4	Strebe 80x80x4	SR [N/mm <sup>2</sup> ]  <b>Gurt/Strebe</b>	R  <b>+0,2</b>	[Hz]  2
Probekörperform 		Versagensart 		
Material: <b>S500</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 54.3		Oberlast Druckstrebe -10.7		
Unterlast Zugstrebe: 10.4		Unterlast Druckstrebe -53.9		
Probekörperform: TNO				
<p>Bottom view</p>  <p>N1: 108200, multiple initiation locations in chord around tension brace N2: 278800 N3: 378761, failure</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = 108200 (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = - (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = TBD (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 378761 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper ohne DMS				
-Risse in Gurt, Gurtversagen				



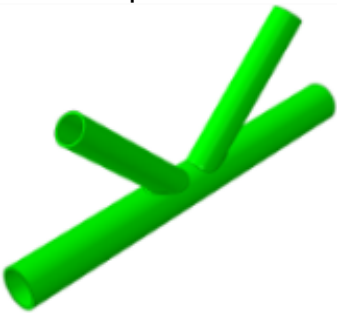
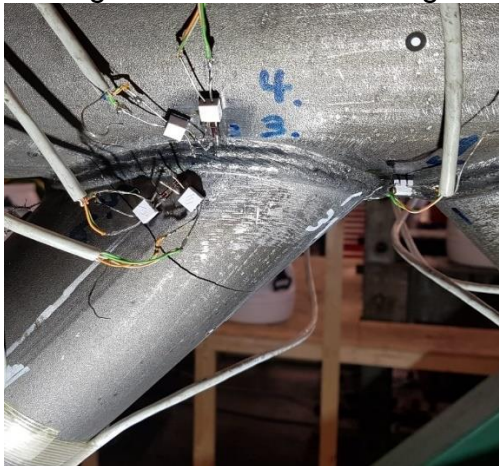
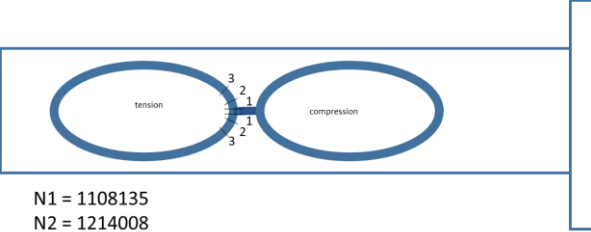
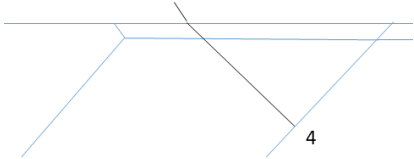
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 250118-270118/211118-181218		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-1		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>59.5/118</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1
Probekörperform 		Versagensart: Strebe failure 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.7		Oberlast Druckstrebe -301.2		
Unterlast Zugstrebe: 57.5		Unterlast Druckstrebe -58.8		
Probekörperform: TNO  N1 = 578827 N2 = 994785 N3 = 997416 Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 578827 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 997416 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: -Probekörper mit DMS -Versuch angehalten aufgrund von Problemen in der Lasteinleitung; später Neustart -Rissausgang im Schweißnahtfuß an der Zugstrebenkrone				



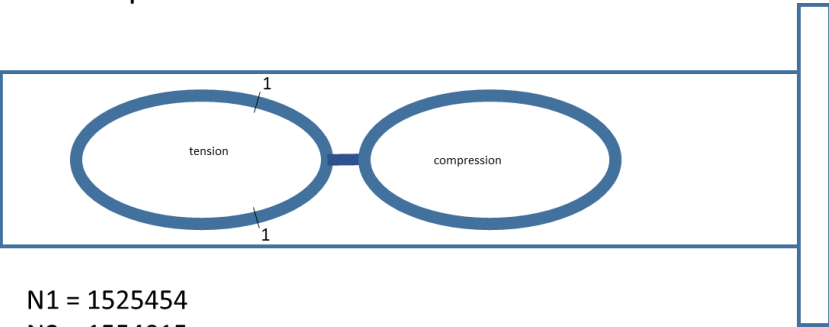
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 150218-240418/241018-131118		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-2		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe . 114.3x6.3	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>59.8/116</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1.0-1.2
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 300.8		Oberlast Druckstrebe -302		
Unterlast Zugstrebe:59.2		Unterlast Druckstrebe -58.4		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 1108135 N2 = 1214008 N3 = 1259086</p>		 <p>Seitenansicht Zugstrebe</p>		
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = TBD (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 1108135 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 1259086 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
-Probekörper mit DMS				
-Versuch angehalten aufgrund von Problemen im Versuchsrahmen.				
-Rissausgang am Schweißnahtfuß zum Zugstrebensattel, Rissfortschritt zunächst in der Strebe				



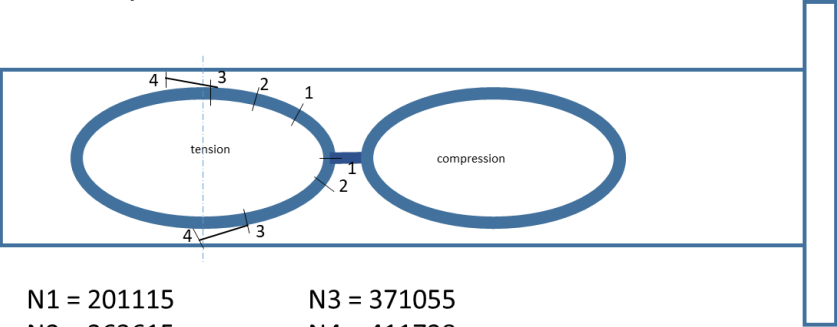
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 010718-270718		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-3		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>48.8/96.3</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 245.9		Oberlast Druckstrebe -243.9		
Unterlast Zugstrebe: 47.4		Unterlast Druckstrebe -48.8		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 1525454 N2 = 1554015</p> <p>Erreichte Lastspielzahl:  N<sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)  N<sub>2</sub> = 1525454 (erster sichtbarer Riss)  N<sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)  N<sub>4</sub> = 1554015 (Bauteilabriss)</p>				
Bemerkungen: -Probekörper mit DMS an Strebe und Gurt, nicht am Hotspot -Rissausgang im Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkrone				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 070818-140818		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-4		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe . 114.3x6.3	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>49.9/96.7</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1.2
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 246.7		Oberlast Druckstrebe -246.8		
Unterlast Zugstrebe: 46.4		Unterlast Druckstrebe -46.6		
Probekörperform: TNO 				
N1 = 201115		N3 = 371055		
N2 = 263615		N4 = 411728		
Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 201115 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 411728 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: Rissausgang am Schweißnahtfuß im Bereich der nicht durchgeschweißten Naht				



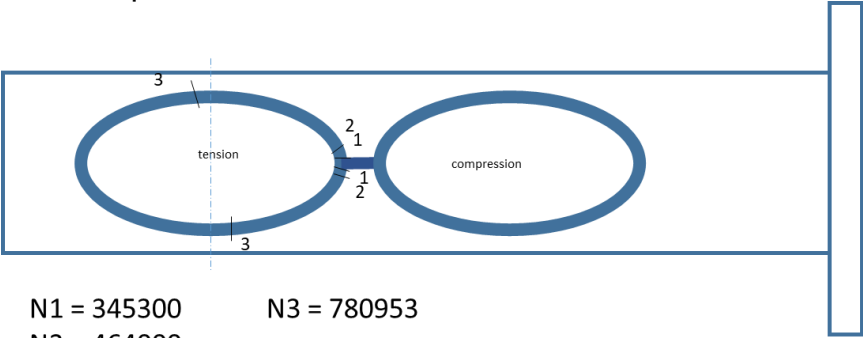
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 210219 - 250219		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-5		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>68.1/133.3</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebeversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.8		Oberlast Druckstrebe -301.4		
Unterlast Zugstrebe: 27.2		Unterlast Druckstrebe -28.4		
Probekörperform: TNO  N1 = 25000 N2 = 43607 Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 25000 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 43607 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: Rissausgang am Schweißnahtfuß im Bereich der nicht durchgeschweißten Naht				



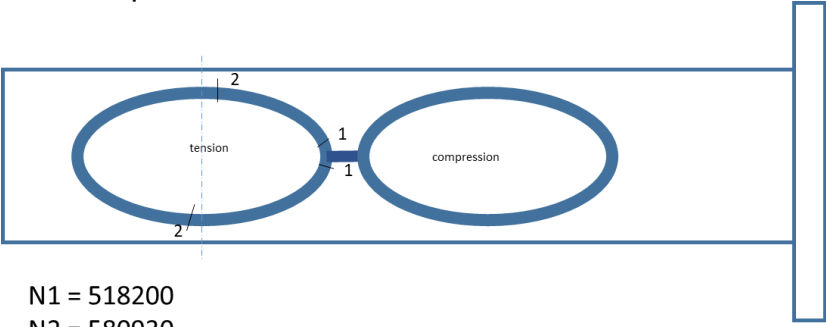
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 280219 - 090319		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-6		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>67.4/132.6</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.8		Oberlast Druckstrebe -301.3		
Unterlast Zugstrebe: 27.4		Unterlast Druckstrebe -28.2		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 345300      N3 = 780953 N2 = 464000</p>				
<p>Erreichte Lastspielzahl:</p> <p>N<sub>1</sub> = -      (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)</p> <p>N<sub>2</sub> = 345300 (erster sichtbarer Riss)</p> <p>N<sub>3</sub> = -      (Riss durch die Wand)</p> <p>N<sub>4</sub> = 780953 (Bauteilabriss)</p>				
<p>Bemerkungen:</p> <p>Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkrone</p>				

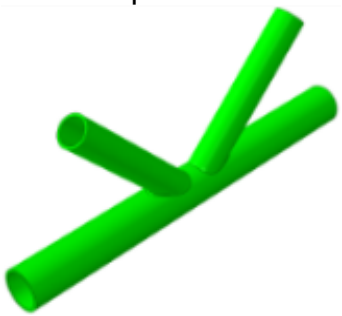

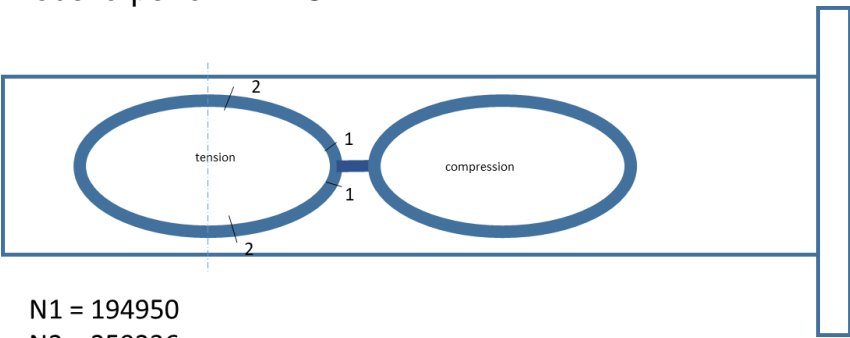
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 110319 - 190319		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-7		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>61.4/119.6</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 271.5		Oberlast Druckstrebe -271.5		
Unterlast Zugstrebe: 24.4		Unterlast Druckstrebe -25.4		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 518200 N2 = 580930</p> <p>Erreichte Lastspielzahl:  <math>N_1 = -</math> (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)  <math>N_2 = 518200</math> (erster sichtbarer Riss)  <math>N_3 = -</math> (Riss durch die Wand)  <math>N_4 = 580930</math> (Bauteilabriss)</p>				
Bemerkungen: - Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkronen - Nicht durchgeschweißte Naht, weniger gravierend als bei K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-4 und K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-5				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

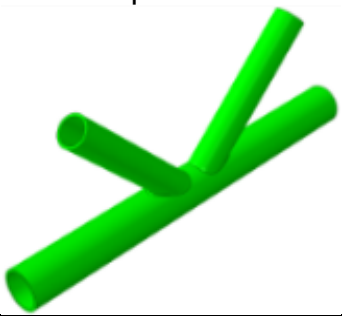

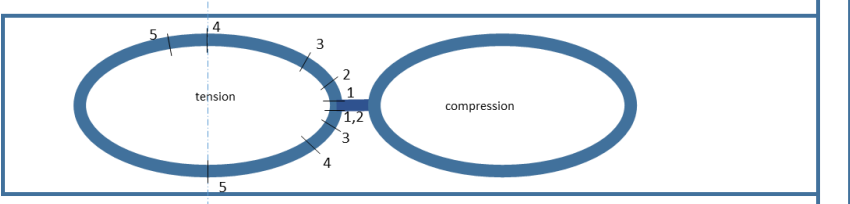
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 080419 - 110419		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S700-8		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe. 114.3x6.3	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>61.4/119.9</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversgen 		
Material: <b>S700</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 271.5		Oberlast Druckstrebe -271.3		
Unterlast Zugstrebe: 24.4		Unterlast Druckstrebe -25.4		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 194950 N2 = 259236</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 194950 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 259236 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
- Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkron				





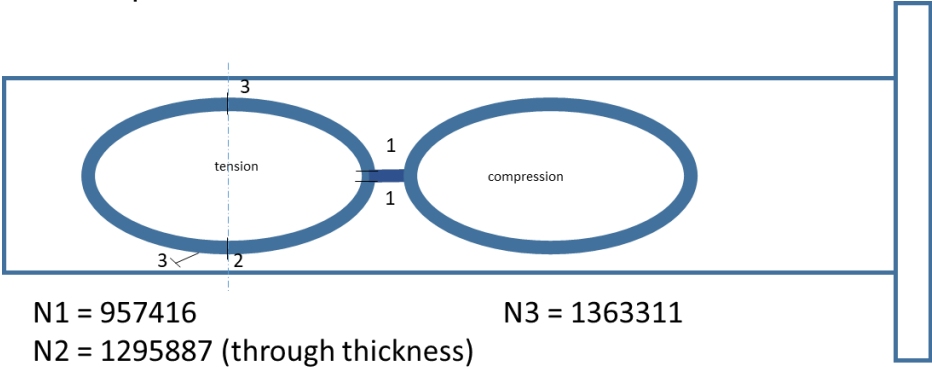
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 150818 - 250918		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-1		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe. 114.3x6.3	SR [N/mm <sup>2</sup> ] <b>47.6/93.7</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1.2
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 246.2		Oberlast Druckstrebe -245.4		
Unterlast Zugstrebe: 47.1		Unterlast Druckstrebe -48		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 97518                      N3 = 2237357 N2 = 1771557                  N4 = 2490241    N5 = 2531241</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = -                      (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 97518                (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = -                      (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 2531241 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
- Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkronen				
- Rissfortschritt durch die Schweißnaht hin zum Gurtsattel.				



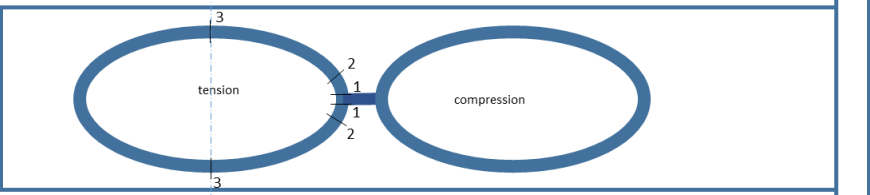
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 270918 – 171018		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-2		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	$S_R$ [N/mm <sup>2</sup> ] <b>48.1/93.5</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,2</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 245.8		Oberlast Druckstrebe -245.2		
Unterlast Zugstrebe: 47.1		Unterlast Druckstrebe -48.2		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 957416                      N3 = 1363311 N2 = 1295887 (through thickness)</p>				
Top view				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = -                      (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 957416 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = 1295887 (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 1363311 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
- Rissausgang und -fortschritt an der Gurtkrone				
- Rissausgang an der Zugstrebenkrone				



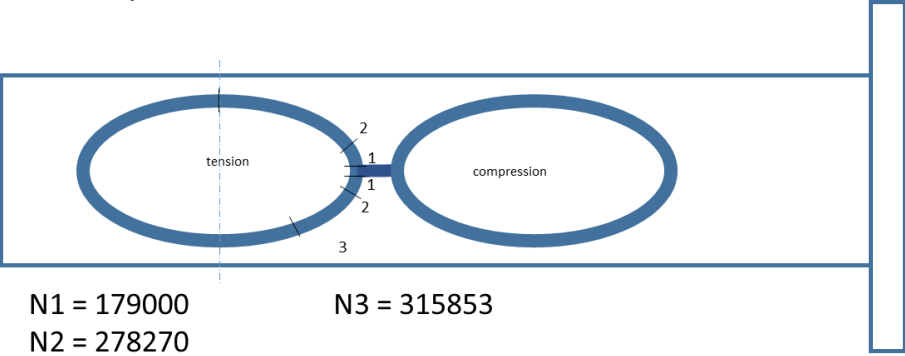
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 100119 - 170119		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-3		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>66.8/129</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.7		Oberlast Druckstrebe -301.7		
Unterlast Zugstrebe: 27.5		Unterlast Druckstrebe -28.1		
Probekörperform: TNO				
				
N1 = 321500		N3 = 539992		
N2 = 430730				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 321500 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 539992 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
- Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkrone				
- Rissfortschritt durch die Schweißnaht hin zum Gurtsattel.				



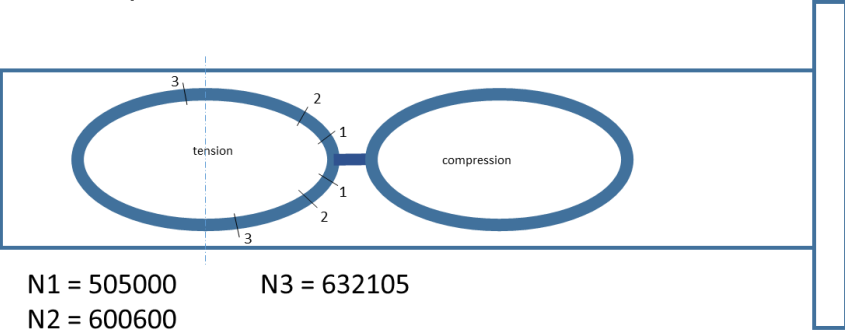
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 220119 - 280119		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-4		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>64.4/126</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.7		Oberlast Druckstrebe -301.5		
Unterlast Zugstrebe: 27.5		Unterlast Druckstrebe -28.2		
Probekörperform: TNO				
 <p>N1 = 179000      N3 = 315853 N2 = 278270</p>				
Erreichte Lastspielzahl:				
N <sub>1</sub> = -      (15% Dehnungsänderung am Rissausgang)				
N <sub>2</sub> = 179000 (erster sichtbarer Riss)				
N <sub>3</sub> = -      (Riss durch die Wand)				
N <sub>4</sub> = 315853 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen:				
- Rissausgang und -fortschritt an der Gurtkrone				
- Rissausgang an der Zugstrebenkrone				



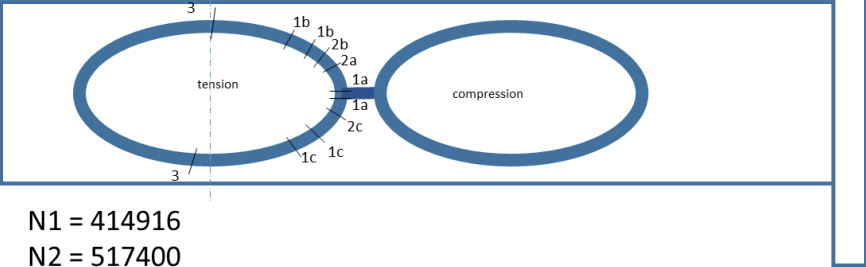
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 060219 - 120219		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-5		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>60/115.1</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.2
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 272.3		Oberlast Druckstrebe -272.3		
Unterlast Zugstrebe: 24.1		Unterlast Druckstrebe -23.9		
Probekörperform: TNO  N1 = 505000      N3 = 632105 N2 = 600600				
Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = -      (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 505000 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = -      (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 632105 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: - Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkrone - Rissfortschritt durch die Schweißnaht hin zum Gurtsattel.				

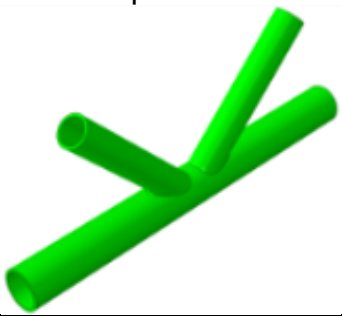

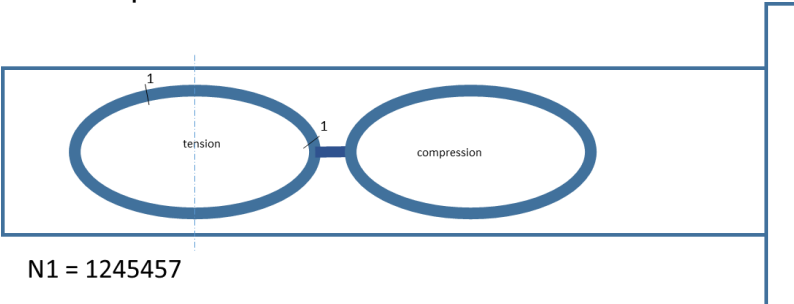
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 030719 - 100719		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-6		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>66.5/128</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 301.9		Oberlast Druckstrebe -301.4		
Unterlast Zugstrebe: 27.0		Unterlast Druckstrebe -28.4		
Probekörperform: TNO  N1 = 414916 N2 = 517400 N3 = 579836 Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 414916 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 579836 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: - Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkrone und Gurt - Rissfortschritt durch die Schweißnaht hin zum Gurtsattel				



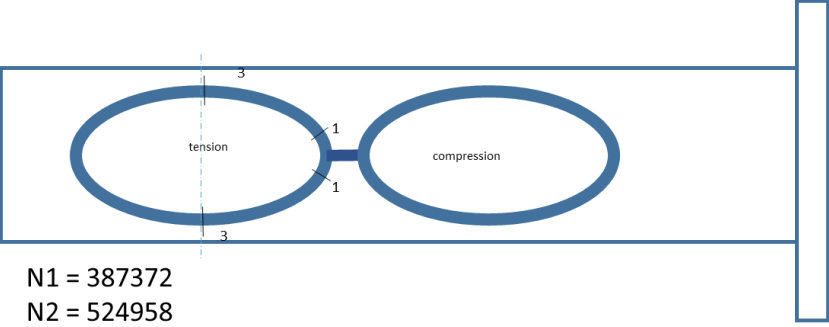
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 180419 - 060519		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-7		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>59.6/113.7</b> <b>Gurt/Strebe</b>	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Gurtversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 271.2		Oberlast Druckstrebe -272.4		
Unterlast Zugstrebe: 25.3		Unterlast Druckstrebe -24.4		
Probekörperform: TNO  N1 = 1245457				
Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 1245457 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 1245457 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: -Rissausgang und Fortschritt am Schweißnahtfuß zum Gurtsattel				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

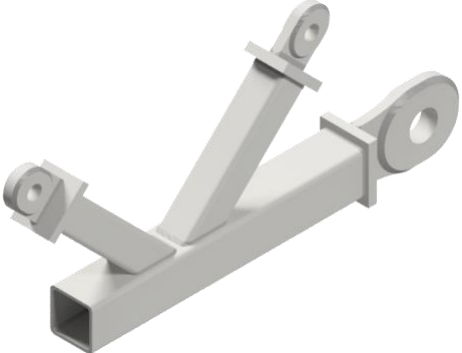
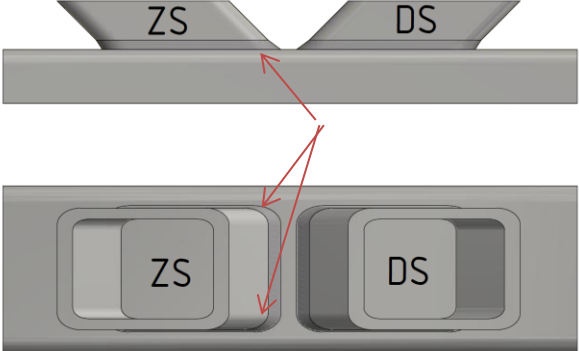
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum TNO, Delft, 150519 - 070719		
Probekörper K45-KHP-193.7x10-114.3x6.3-S355-8		Wöhlerserie		
Gurt 193.4x10	Strebe 114.3x6.3	S <sub>R</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] <b>59.9/115.5</b> Gurt/Strebe	R <b>+0,1</b>	[Hz] 1.0
Probekörperform 		Versagensart: Strebenversagen 		
Material: <b>S355</b>		Schweißnaht: <b>Schweißzustand</b>		
Oberlast Zugstrebe: 271.6		Oberlast Druckstrebe -270.8		
Unterlast Zugstrebe: 24.2		Unterlast Druckstrebe -25.6		
Probekörperform: TNO  N1 = 387372 N2 = 524958 Erreichte Lastspielzahl: N <sub>1</sub> = - (15% Dehnungsänderung am Rissausgang) N <sub>2</sub> = 387372 (erster sichtbarer Riss) N <sub>3</sub> = - (Riss durch die Wand) N <sub>4</sub> = 524958 (Bauteilabriss)				
Bemerkungen: - Rissausgang am Schweißnahtfuß zur Zugstrebenkronen und Gurt - Rissfortschritt durch die Schweißnaht hin zum Gurtsattel				



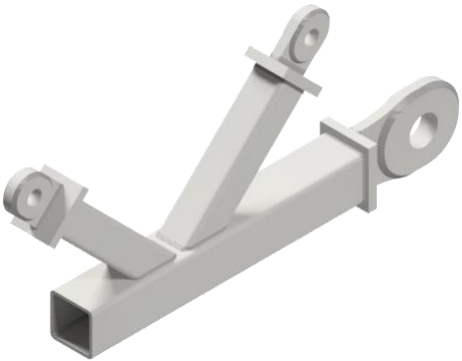
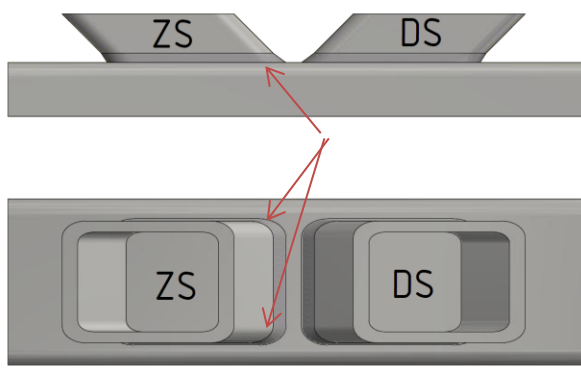
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 15.01.2018 – 16.01.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S355-1		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 80,0 Strebe/brace: 79,8	R [-] +0,20	f [Hz] 0,5
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S700</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S355</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S700</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		2197	kN	
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		439	kN	
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		1318	kN	
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		879	kN	
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 12.610 N2 = 54.697 N3 = 60.115 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

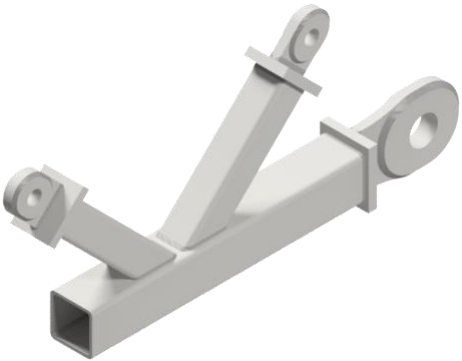
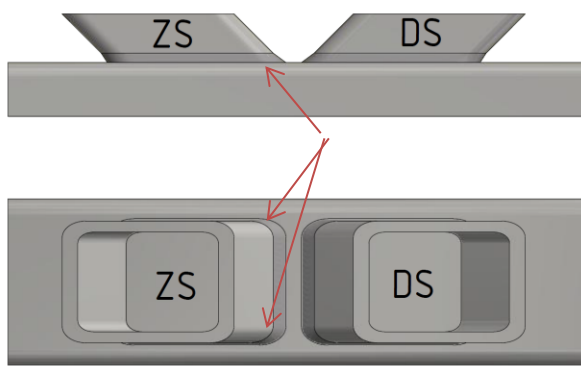
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 26.01.2018 – 05.02.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S355-2		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 40,0 Strebe/brace: 39,9	R [-] +0,20	f [Hz] 0,75
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S700</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S355</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1099	kN	
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		220	kN	
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		659	kN	
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		439	kN	
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 127.207 N2 = --- Riss auf Video nicht erkennbar   <i>crack on video not recognizable</i> N3 = 356.753 Fluoreszieren auf Video   <i>fluorescing area on video</i> N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

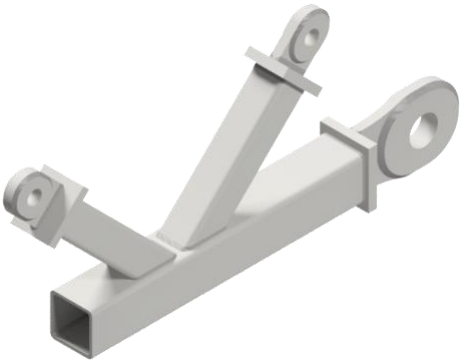
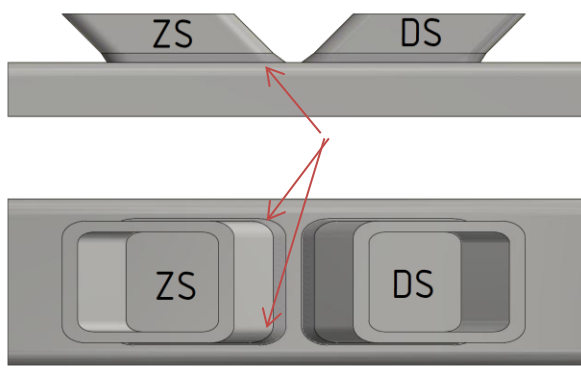
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 24.08.2018 – 29.08.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S355-3		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 40,0 Strebe/brace: 39,9	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S355</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S355</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1099	kN	
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		220	kN	
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		659	kN	
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		439	kN	
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = --- N2 = 243.000 (Risslänge = Breite Zugstrebe   <i>cracksize = width tension brace</i> ) N3 = 419.100 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

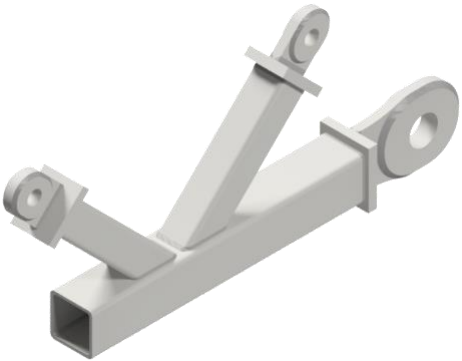
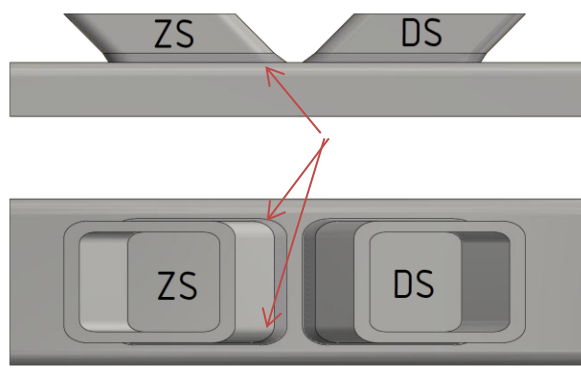
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 31.08.2018 – 03.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S355-4		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 57,0 Strebe/brace: 56,9	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S355</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S355</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1565	kN	
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		313,1	kN	
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		939,3	kN	
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		626,2	kN	
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = --- N2 = 45.374 N3 = 111.283 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

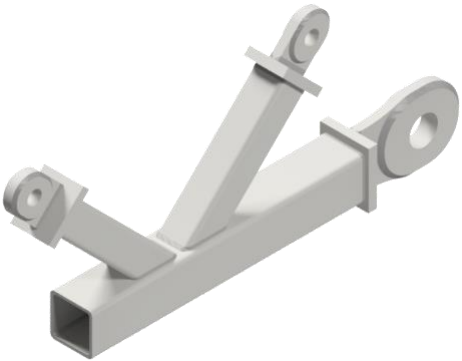
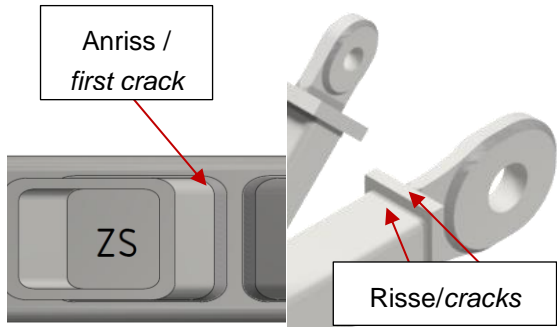
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 21.08.2018 – 24.08.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S700-1		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> x 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> x 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 57,0 Strebe/brace: 56,9	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S355</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S355</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S700</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1565 kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		313,1 kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		939,3 kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		626,2 kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = --- N2 = 52.800 N3 = 171.150 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

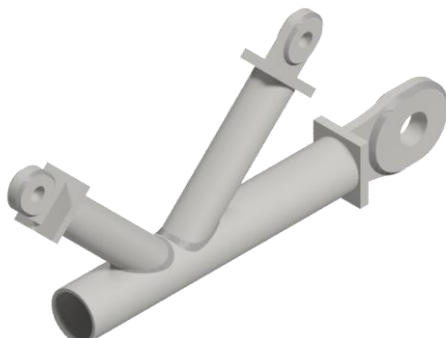
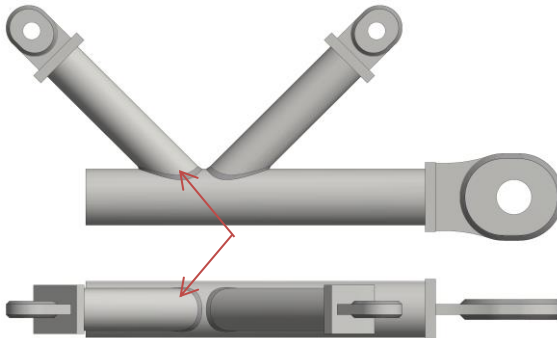
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 13.09.2018 – 14.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-RHS-300x20-220x20-S700-2		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 300 <sup>2</sup> × 20 Ist   <i>act.</i> : 300 <sup>2</sup> × 20	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 200 <sup>2</sup> × 20 Ist   <i>act.</i> : 220 <sup>2</sup> × 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 80,0 Strebe/brace: 79,8	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Riss an Kopfplatte   <i>crack at cover plate</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : Gurt   <i>chord</i> : <b>S355</b> Zugstrebe   <i>tension brace</i> : <b>S700</b> Druckstrebe   <i>compr. brace</i> : <b>S700</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		2197 kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		439,4 kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		1318 kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		878,8 kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 23.300 Zugstrebe Pos. A Probekörper Rückseite   <i>tension brace Pos. A specimen backside</i> N2 = 58.117 Zugstrebe Pos. A Probekörper Rückseite   <i>tension brace Pos. A specimen backside</i> N3 = 40.600 Druckverlust, Riss zw. Gurt & Kopfpl.   <i>loss of pressure, thr. thickness crack cover plate</i> N4 = 78.647 Stopp des Versuchs vor Abriss der Kopfplatte   <i>abort of test before cover plate failure</i>				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

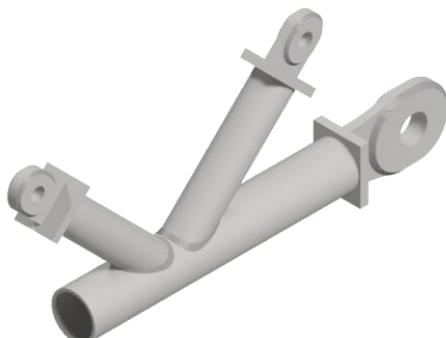
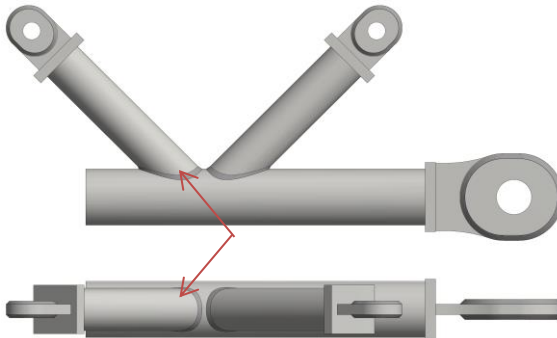
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 26.01.2018 – 05.02.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S355-1		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 313,5 x 20,3	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,5 x 20	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 41,8 Strebe/brace: 40,1	R [-] +0,16	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		954,7 kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		155,7 kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		555,2 kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		399,5 kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 891.195 N2 = 1.163.500 N3 = 1.310.000 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

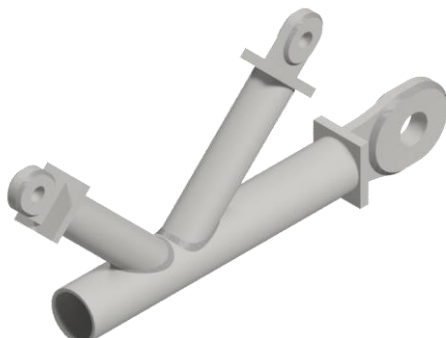
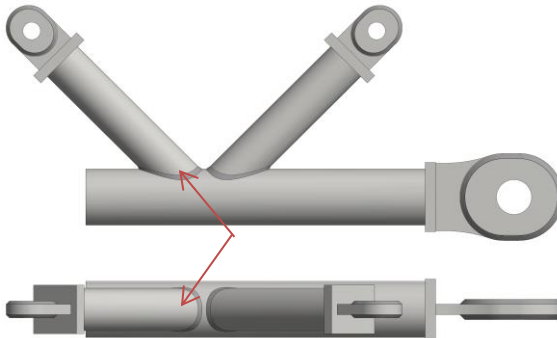
ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 31.07.2018 – 17.08.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S355-2		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 313,5 x 20,3	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,2 x 19,9	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 40,0 Strebe/brace: 38,3	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grinding at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		954,7    kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		190,9    kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		572,8    kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		381,9    kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 800.000 N2 = 491.600 N3 = 1.347.194 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				



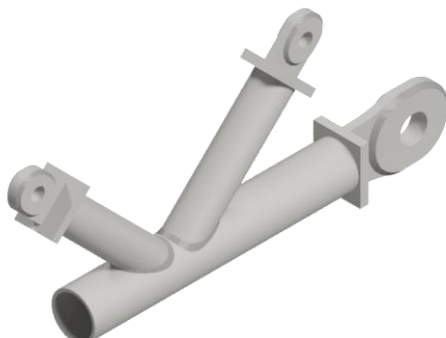
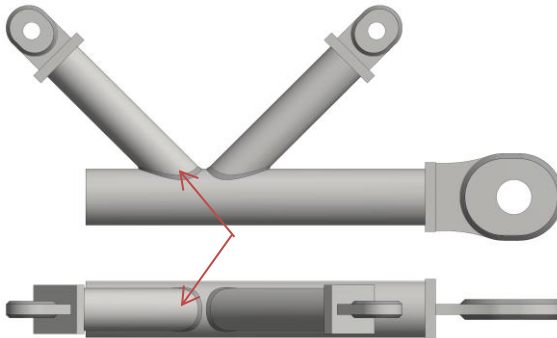
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 04.09.2018 – 07.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S355-3		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 313,7 x 20,3	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,3 x 19,9	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 57,0 Strebe/brace: 54,6	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grindet at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1360    kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		272,1    kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		816,2    kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		544,2    kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = --- N2 = 79.190 N3 = 206.599 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

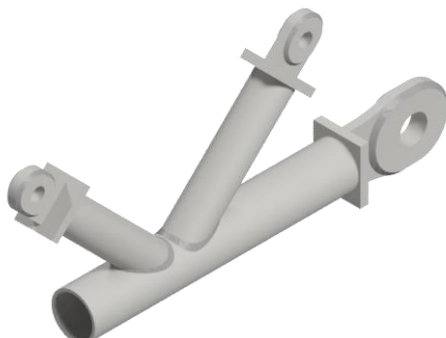
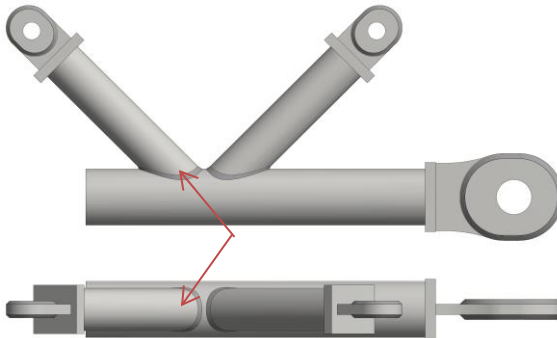
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 19.09.2018 – 21.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S355-4		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 313,7 x 20,3	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,3 x 19,9	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 80,0 Strebe/brace: 76,6	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S355</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grindet at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1909 kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		381,9 kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		1146 kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		763,8 kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = --- N2 = 75.000 N3 = 107.877 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

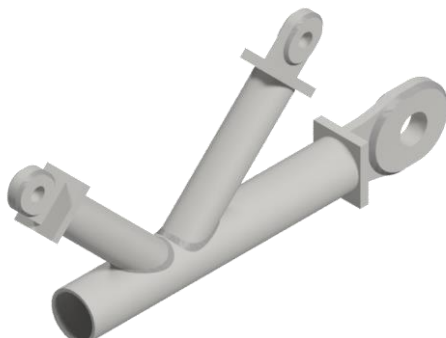
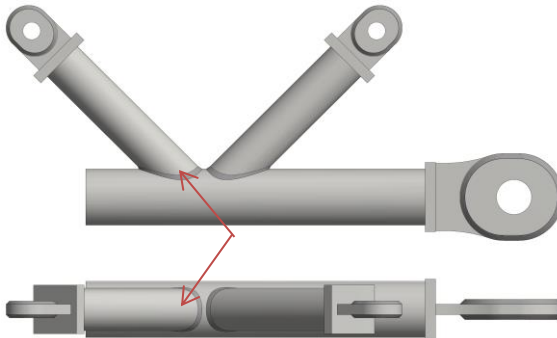
ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 26.09.2018 – 28.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S700-1		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 322,5 x 19,7	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,5 x 19,7	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 57,0 Strebe/brace: 54,6	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S700</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grindet at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1360    kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		272,1    kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		816,3    kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		544,2    kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 62.000 N2 = 57.608 N3 = 158.500 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

ANHANG B3 – Ergebnisse der Ermüdungsversuche

ANNEX B3 – Fatigue test results

Projekt   <i>project</i> FOSTA P1132 / CIDECT 7AB		Ort, Datum   <i>place, date</i> KIT VAKA, 26.09.2018 – 28.09.2018		
Probe   <i>specimen</i> K45-CHS-323.9x20-244.5x20-S700-2		Wöhler-Serie   <i>Wöhler-series</i>		
Gurt   <i>chord</i> Nenn   <i>nom.</i> : 323,9 x 20 Ist   <i>act.</i> : 322,5 x 19,7	Strebe   <i>brace</i> Nenn   <i>nom.</i> : 244,5 x 20 Ist   <i>act.</i> : 245,5 x 19,9	$\Delta\sigma_{nom}$ [N/mm <sup>2</sup> ] Gurt/chord: 80,0 Strebe/brace: 76,6	R [-] +0,20	f [Hz] 1
Probekörperform   <i>type of joint</i> 		Versagensart   <i>Failure mode</i> Wandungsdurchriss Gurt an NÜ Zugstrebe <i>through thickness crack chord weld toe tens. brace</i> 		
Werkstoff   <i>material</i> : <b>S700</b>		Naht: wie geschweißt, Ansatzstellen beschliffen <i>weld: AW, grindet at start/stop-positions</i>		
Einzustellender Lastbereich   <i>loads</i>		Werte   <i>value</i>		
Oberlast P <sub>o</sub>   <i>upper load</i> .....		1909    kN		
Unterlast P <sub>u</sub>   <i>lower load</i> .....		381,9    kN		
Mittellast P <sub>m</sub>   <i>mid-load</i> .....		1146    kN		
Amplitude P <sub>a</sub>   <i>amplitude</i> .....		763,8    kN		
Prüfmaschine   <i>test rig</i> : 6300 kN Schenck				
Lastwechsel   <i>Number of load cycles</i> : N1 = 176.500 an 1.DMS 5er Kette Pos. 1 ZS   <i>at 1st DMS of 5 chain Pos. tension brace</i> N2 = 33.200 N3 = 173.300 N4 = ---				
Bemerkungen   <i>Remarks</i> : N1: Erster Anriss (15% Dehnungsänderung an DMS)   <i>first crack (15 % strain change)</i> N2: Sichtbarer Riss   <i>visible crack</i> N3: Riss durch die Wand   <i>through thickness crack</i> N4: Bauteilabriss   <i>complete loss of static strength</i>				

# **ANHANG C – Numerik**

**C1 – Voruntersuchungen**

**C2 – Vorgehen**

**C3 – Parameterstudie**

## C1 Voruntersuchungen

Veröffentlicht in “Comparison of different configurations of thick-walled K-joints with gap made of RHS and CHS”, Herion et al. (2014)

Innerhalb der Voruntersuchungen wurden RHP und KHP-K-Knoten mit einem Spalt von  $g = 100$  mm und Strebenöffnungswinkel  $\Theta = 45^\circ$  untersucht. Dabei wurden die mittels Finite-Elemente Berechnungen bestimmten Spannungskonzentrationsfaktoren (SCFs) den SCFs aus den Formeln des CIDECT Design Guide 8 (Zhao et al, 2001) vergleichend gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle C1 aufgeführt.

**Tabelle C1 Ergebnisse der Voruntersuchungen**

Symmetrischer K-Knoten		RHP K-Knoten		KHP K-Knoten	
Spalt $g = 100$ mm		Gurt [mm]	Strebe [mm]	Gurt [mm]	Strebe [mm]
Strebenwinkel $\Theta = 45^\circ$		300x300x20	200x200x20	323.9x20	244.5x20
Lastfall	Berechnung	SCF <sub>max,Gurt</sub>	SCF <sub>max,Strebe</sub>	SCF <sub>max,Gurt</sub>	SCF <sub>max,Strebe</sub>
LC1 - axial	FEA	4,67	3,16	3,43	1,96*
	CIDECT	5,79	3,58	1,83*	1,62*
LC2 - IPB invers	FEA	3,69	2,56	1,75*	1,84*
	CIDECT	n,a,**	n,a,**	n,a,**	n,a,**
LC3 - IPB gleich	FEA	2,63	2,24	2,22	1,97*
	CIDECT	n,a,**	n,a,**	n,a,**	n,a,**

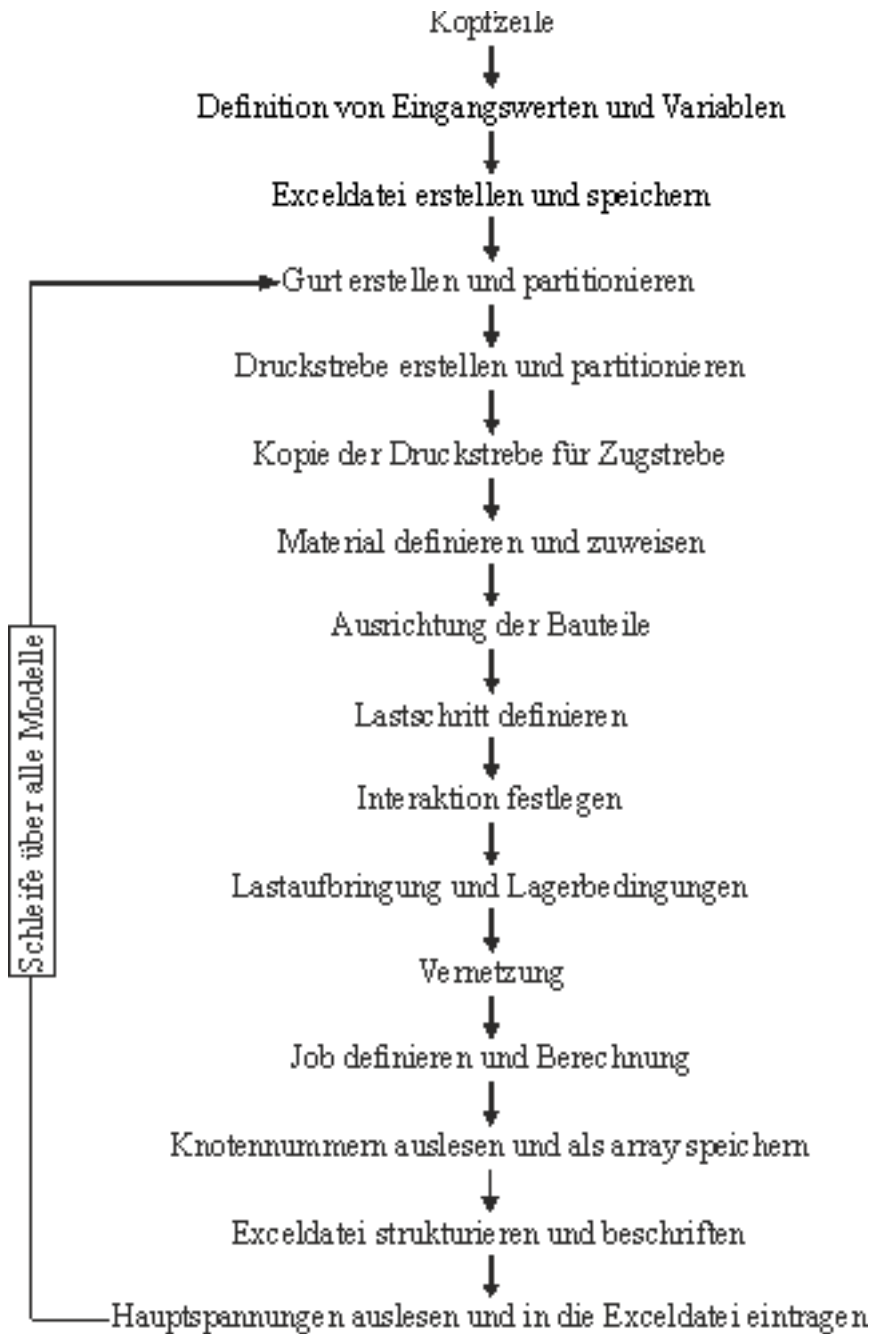
\* nach (Zhao et al, 2001) minimum SCF = 2.0

\*\* keine verfügbare Formel

Für die untersuchte Knotenkonfiguration führte die Ermüdungsbemessung nach CIDECT (Zhao et al; 2001) für axialbelastete K-Knoten aus dickwandigen Quadrathohlprofilen zu sehr konservativen Ergebnissen, was Letzen Endes zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führt. Im Gegensatz dazu wurden die Ermüdungsfestigkeiten für K-Knoten aus Kreishohlprofilen überschätzt, was zu unsicheren Konstruktionen führt.

Zur Ermittlung der SCFs für K-Knoten mit Spalt unter Biegung in der Ebene (IPB) stellt CIDECT (Zhao et al, 2001) keine Formeln oder Diagramme zur Verfügung. Die mittels Finite-Elemente Berechnung ermittelten SCFs für IPB sind kleiner als für den Axiallastfall. Demnach sind die geplanten Ermüdungsversuche unter Strebenaxiallast der ungünstigere Lastfall.

## C2 Vorgehen für die Parameterstudie mittels Python Script



**C3 Parameterstudie****Parameterbereich innerhalb der Parameterstudie an RHP K-Knoten mit Spalt**

Parameter		CIDECT	RHP			
			Lastfall			
			LC1 AX	LC2a IPB-out	LC2b IPB-in	LC3 IPB-conc
Gurtschlankheit	$2\gamma = b_0/t_0$	10 ÷ 35	10	10	10	10
			15	15	15	15
			20	20	20	20
			25	25	25	25
			33	33	33	33
Wanddickenverhältnis	$\tau = t_1/t_0$	0,25 ÷ 1,0	0,32	0,32	0,32	0,32
			0,5	0,5	0,5	0,5
			0,71	0,71	0,71	0,71
			0,88	0,88	0,88	0,88
			1,0	1,0	1,0	1,0
Breitenverhältnis	$\beta = b_1/b_0$	0,35 ÷ 1,0	0,37	0,37	0,37	0,37
			0,47	0,47	0,47	0,47
			0,6	0,6	0,6	0,6
			0,73	0,73	0,73	0,73
			-	-	-	-
Dimensionslose Exzentrizität	$e/h_0$	-0,55 ÷ 0,25	-0,01 ÷ - 0,25	-0,01 ÷ - 0,25	-0,01 ÷ - 0,25	-0,01 ÷ - 0,25
			0,08 ÷ 0,09	0,08 ÷ 0,09	0,08 ÷ 0,09	0,08 ÷ 0,09
			0,22	0,22	0,22	0,22
			0,35	0,35	0,35	0,35
Strebenneigungswinkel	$\theta$	30° ÷ 60°	30	30	30	30
			45	45	45	45
			60	60	60	60



**Abmessungen der mit FEA berechneten RHP K-Knoten mit Spalt**

Nr.	RHP K-Knoten mit Spalt Profil b <sub>0</sub> , t <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , t <sub>1</sub> , q	Gurt			Strebe			Knotengeometrie			Parameter			
		b <sub>0</sub> mm	h <sub>0</sub> mm	t <sub>0</sub> mm	b <sub>1</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	t <sub>1</sub> mm	Θ °	g mm	e mm	β	2γ	τ	e/h <sub>0</sub>
1	RHP_300_20_220_20_40	300	300	20	220	220	20,0	30	40	-11	0,73	15	1,00	-0,04
2	RHP_300_20_220_17.5_40	300	300	20	220	220	17,5	30	40	-11	0,73	15	0,88	-0,04
3	RHP_300_20_220_14.2_40	300	300	20	220	220	14,2	30	40	-11	0,73	15	0,71	-0,04
4	RHP_300_20_220_10_40	300	300	20	220	220	10,0	30	40	-11	0,73	15	0,50	-0,04
5	RHP_300_20_220_6.3_40	300	300	20	220	220	6,3	30	40	-11	0,73	15	0,32	-0,04
6	RHP_300_20_180_20_40	300	300	20	180	180	20,0	30	40	-35	0,60	15	1,00	-0,12
7	RHP_300_20_180_17.5_40	300	300	20	180	180	17,5	30	40	-35	0,60	15	0,88	-0,12
8	RHP_300_20_180_14.2_40	300	300	20	180	180	14,2	30	40	-35	0,60	15	0,71	-0,12
9	RHP_300_20_180_10_40	300	300	20	180	180	10,0	30	40	-35	0,60	15	0,50	-0,12
10	RHP_300_20_180_6.3_40	300	300	20	180	180	6,3	30	40	-35	0,60	15	0,32	-0,12
11	RHP_300_20_140_20_40	300	300	20	140	140	20,0	30	40	-58	0,47	15	1,00	-0,19
12	RHP_300_20_140_17.5_40	300	300	20	140	140	17,5	30	40	-58	0,47	15	0,88	-0,19
13	RHP_300_20_140_14.2_40	300	300	20	140	140	14,2	30	40	-58	0,47	15	0,71	-0,19
14	RHP_300_20_140_10_40	300	300	20	140	140	10,0	30	40	-58	0,47	15	0,50	-0,19
15	RHP_300_20_140_6.3_40	300	300	20	140	140	6,3	30	40	-58	0,47	15	0,32	-0,19
16	RHP_300_20_110_14.2_40	300	300	20	110	110	14,2	30	40	-75	0,37	15	0,71	-0,25
17	RHP_300_20_110_10_40	300	300	20	110	110	10,0	30	40	-75	0,37	15	0,50	-0,25
18	RHP_300_20_110_6.3_40	300	300	20	110	110	6,3	30	40	-75	0,37	15	0,32	-0,25
19	RHP_300_20_220_20_40	300	300	20	220	220	20,0	45	40	26	0,73	15	1,00	0,09
20	RHP_300_20_220_17.5_40	300	300	20	220	220	17,5	45	40	26	0,73	15	0,88	0,09
21	RHP_300_20_220_14.2_40	300	300	20	220	220	14,2	45	40	26	0,73	15	0,71	0,09
22	RHP_300_20_220_10_40	300	300	20	220	220	10,0	45	40	26	0,73	15	0,50	0,09
23	RHP_300_20_220_6.3_40	300	300	20	220	220	6,3	45	40	26	0,73	15	0,32	0,09
24	RHP_300_20_180_20_40	300	300	20	180	180	20,0	45	40	-3	0,60	15	1,00	-0,01
25	RHP_300_20_180_17.5_40	300	300	20	180	180	17,5	45	40	-3	0,60	15	0,88	-0,01
26	RHP_300_20_180_14.2_40	300	300	20	180	180	14,2	45	40	-3	0,60	15	0,71	-0,01
27	RHP_300_20_180_10_40	300	300	20	180	180	10,0	45	40	-3	0,60	15	0,50	-0,01
28	RHP_300_20_180_6.3_40	300	300	20	180	180	6,3	45	40	-3	0,60	15	0,32	-0,01
29	RHP_300_20_140_20_40	300	300	20	140	140	20,0	45	40	-31	0,47	15	1,00	-0,10
30	RHP_300_20_140_17.5_40	300	300	20	140	140	17,5	45	40	-31	0,47	15	0,88	-0,10
31	RHP_300_20_140_14.2_40	300	300	20	140	140	14,2	45	40	-31	0,47	15	0,71	-0,10
32	RHP_300_20_140_10_40	300	300	20	140	140	10,0	45	40	-31	0,47	15	0,50	-0,10
33	RHP_300_20_140_6.3_40	300	300	20	140	140	6,3	45	40	-31	0,47	15	0,32	-0,10
34	RHP_300_20_110_14.2_40	300	300	20	110	110	14,2	45	40	-52	0,37	15	0,71	-0,17
35	RHP_300_20_110_10_40	300	300	20	110	110	10,0	45	40	-52	0,37	15	0,50	-0,17
36	RHP_300_20_110_6.3_40	300	300	20	110	110	6,3	45	40	-52	0,37	15	0,32	-0,17
37	RHP_300_20_220_20_40	300	300	20	220	220	20,0	60	40	105	0,73	15	1,00	0,35
38	RHP_300_20_220_17.5_40	300	300	20	220	220	17,5	60	40	105	0,73	15	0,88	0,35
39	RHP_300_20_220_14.2_40	300	300	20	220	220	14,2	60	40	105	0,73	15	0,71	0,35
40	RHP_300_20_220_10_40	300	300	20	220	220	10,0	60	40	105	0,73	15	0,50	0,35
41	RHP_300_20_220_6.3_40	300	300	20	220	220	6,3	60	40	105	0,73	15	0,32	0,35
42	RHP_300_20_180_20_40	300	300	20	180	180	20,0	60	40	65	0,60	15	1,00	0,22
43	RHP_300_20_180_17.5_40	300	300	20	180	180	17,5	60	40	65	0,60	15	0,88	0,22
44	RHP_300_20_180_14.2_40	300	300	20	180	180	14,2	60	40	65	0,60	15	0,71	0,22
45	RHP_300_20_180_10_40	300	300	20	180	180	10,0	60	40	65	0,60	15	0,50	0,22
46	RHP_300_20_180_6.3_40	300	300	20	180	180	6,3	60	40	65	0,60	15	0,32	0,22
47	RHP_300_20_140_20_40	300	300	20	140	140	20,0	60	40	25	0,47	15	1,00	0,08
48	RHP_300_20_140_17.5_40	300	300	20	140	140	17,5	60	40	25	0,47	15	0,88	0,08
49	RHP_300_20_140_14.2_40	300	300	20	140	140	14,2	60	40	25	0,47	15	0,71	0,08
50	RHP_300_20_140_10_40	300	300	20	140	140	10,0	60	40	25	0,47	15	0,50	0,08
51	RHP_300_20_140_6.3_40	300	300	20	140	140	6,3	60	40	25	0,47	15	0,32	0,08
52	RHP_300_20_110_14.2_40	300	300	20	110	110	14,2	60	40	-5	0,37	15	0,71	-0,02
53	RHP_300_20_110_10_40	300	300	20	110	110	10,0	60	40	-5	0,37	15	0,50	-0,02
54	RHP_300_20_110_6.3_40	300	300	20	110	110	6,3	60	40	-5	0,37	15	0,32	-0,02
55	RHP_300_30_220_20_40	300	300	30	220	220	20,0	45	40	26	0,73	10	0,67	0,09
56	RHP_300_15_220_20_40	300	300	15	220	220	20,0	45	40	26	0,73	20	1,33	0,09
57	RHP_300_15_220_15_40	300	300	15	220	220	15,0	45	40	26	0,73	20	1,00	0,09
58	RHP_100_6_80_4_25	100	100	6	80	80	4,0	45	25	19	0,80	17	0,67	0,19
59	RHP_300_20_160_20_40	300	300	20	160	160	20	45	40	-17	0,53	15	1,00	-0,06
60	RHP_300_20_120_20_40	300	300	20	120	120	20	45	40	-45	0,40	15	1,00	-0,15
61	RHP_400_20_300_20_40	400	400	20	300	300	20	45	40	32	0,75	20	1,00	0,08
62	RHP_400_20_220_20_40	400	400	20	220	220	20	45	40	-24	0,55	20	1,00	-0,06
63	RHP_400_20_160_20_40	400	400	20	160	160	20	45	40	-67	0,40	20	1,00	-0,17
64	RHP_180_12_130_12_24	180	180	12	130	130	12	45	24	14	0,72	15	1,00	0,08
65	RHP_180_12_100_12_24	180	180	12	100	100	12	45	24	-7	0,56	15	1,00	-0,04
66	RHP_180_12_70_12_24	180	180	12	70	70	12	45	24	-29	0,39	15	1,00	-0,16
67	RHP_130_4_80_4_25	130	130	4	80	80	4	45	25	4	0,62	33	1,00	0,03
68	RHP_120_8_80_8_16	120	120	8	80	80	8	45	16	5	0,67	15	1,00	0,04
69	RHP_120_8_70_8_16	120	120	8	70	70	8	45	16	-3	0,58	15	1,00	-0,02
70	RHP_120_8_50_8_16	120	120	8	50	50	8	45	16	-17	0,42	15	1,00	-0,14
71	RHP_200_8_80_8_25	200	200	8	80	80	8	45	25	-31	0,40	25	1,00	-0,15
72	RHP_200_8_80_4_25	200	200	8	80	80	4	45	25	-31	0,40	25	0,50	-0,15

**Spannungskonzentrationsfaktoren aus FEA für RHP K-Knoten mit Spalt**

Nr.	RHP K-Knoten mit Spalt Profil_b0_b1_f_g	SCF axial		SCF AX		SCF IPB-conc		SCF IPB-in		SCF IPB-out	
		CIDECT		FEA		FEA		FEA		FEA	
		Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe
1	RHP_300_20_220_20_40	2,07	2,26	2,91	2,73	3,83	2,60	2,81	2,84	2,11	1,12
2	RHP_300_20_220_17.5_40	2,00	2,47	2,46	2,97	3,43	2,92	2,39	3,12	1,91	0,79
3	RHP_300_20_220_14.2_40	2,00	2,84	1,92	3,36	2,78	3,45	2,07	3,60	1,61	0,94
4	RHP_300_20_220_10_40	2,00	3,58	1,30	3,95	1,75	4,32	1,43	4,37	1,22	1,14
5	RHP_300_20_220_6.3_40	2,00	4,85	0,86	3,60	1,20	4,10	0,93	4,09	0,81	1,21
6	RHP_300_20_180_20_40	2,67	2,27	3,19	2,55	3,43	2,33	3,20	2,57	2,79	0,65
7	RHP_300_20_180_17.5_40	2,41	2,48	2,79	2,78	3,08	2,60	2,85	2,83	2,63	0,77
8	RHP_300_20_180_14.2_40	2,05	2,85	2,28	3,16	2,47	3,04	2,54	3,27	2,33	0,97
9	RHP_300_20_180_10_40	2,00	3,59	1,89	3,79	1,76	3,81	1,78	4,02	1,80	1,25
10	RHP_300_20_180_6.3_40	2,00	4,87	1,42	3,52	1,28	3,64	1,19	3,78	1,15	1,40
11	RHP_300_20_140_20_40	2,71	2,08	3,41	2,37	2,84	2,09	2,91	2,26	2,42	0,49
12	RHP_300_20_140_17.5_40	2,44	2,27	3,01	2,37	2,61	2,28	2,67	2,46	2,36	0,59
13	RHP_300_20_140_14.2_40	2,08	2,61	2,45	2,68	2,26	2,63	2,44	2,82	2,19	0,81
14	RHP_300_20_140_10_40	2,00	3,29	1,90	3,25	1,53	3,26	1,68	3,46	1,81	1,13
15	RHP_300_20_140_6.3_40	2,00	4,46	2,77	3,08	1,11	3,12	1,10	3,26	1,28	1,36
16	RHP_300_20_110_14.2_40	2,00	2,27	2,79	2,39	1,79	2,30	1,98	2,44	1,86	0,54
17	RHP_300_20_110_10_40	2,00	2,86	1,89	2,68	1,23	2,81	1,41	2,96	1,60	0,86
18	RHP_300_20_110_6.3_40	2,00	3,88	1,35	2,58	0,94	2,69	0,87	2,79	1,17	1,13
19	RHP_400_20_220_20_40	4,27	3,54	4,78	2,78	3,97	2,81	3,67	3,23	3,84	1,37
20	RHP_300_20_220_17.5_40	3,85	3,86	4,16	3,08	3,53	3,16	3,39	3,57	3,58	1,29
21	RHP_300_20_220_14.2_40	3,27	4,44	3,24	3,58	2,95	3,72	2,61	4,11	3,16	1,56
22	RHP_300_20_220_10_40	2,49	5,59	2,08	4,30	1,94	4,61	1,70	4,94	2,38	1,91
23	RHP_300_20_220_6.3_40	2,00	7,58	1,21	4,37	1,22	4,86	1,02	5,09	1,60	2,15
24	RHP_300_20_180_20_40	5,52	3,55	5,98	3,38	4,12	2,50	4,30	2,90	4,56	1,02
25	RHP_300_20_180_17.5_40	4,97	3,88	5,24	3,35	3,98	2,81	4,04	3,22	4,32	1,22
26	RHP_300_20_180_14.2_40	4,22	4,45	4,19	3,32	3,36	3,32	3,41	3,74	3,86	1,54
27	RHP_300_20_180_10_40	3,21	5,61	2,97	4,12	2,12	4,16	2,46	4,58	3,01	1,99
28	RHP_300_20_180_6.3_40	2,24	7,61	2,04	4,32	1,43	4,43	1,42	4,77	2,19	2,34
29	RHP_300_20_140_20_40	5,60	3,25	7,03	3,86	3,33	2,13	3,75	2,42	4,13	0,70
30	RHP_300_20_140_17.5_40	5,04	3,55	6,16	3,82	3,34	2,38	3,71	2,68	4,00	0,90
31	RHP_300_20_140_14.2_40	4,29	4,08	4,94	3,67	3,09	2,80	3,13	3,10	3,69	1,21
32	RHP_300_20_140_10_40	3,26	5,14	3,31	3,38	2,62	3,53	2,49	3,81	3,02	1,68
33	RHP_300_20_140_6.3_40	2,27	6,97	1,97	7,39	1,26	3,80	1,36	5,29	2,23	2,07
34	RHP_300_20_110_14.2_40	3,69	3,55	5,20	3,74	2,25	2,34	2,39	2,53	3,08	0,78
35	RHP_300_20_110_10_40	2,80	4,47	3,52	3,34	1,81	2,93	1,91	3,08	2,62	1,22
36	RHP_300_20_110_6.3_40	2,00	6,07	2,01	2,95	1,06	3,19	1,22	3,25	1,99	1,61
37	RHP_300_20_220_20_40	6,52	4,60	6,85	3,56	4,19	2,98	4,39	3,63	5,40	1,39
38	RHP_300_20_220_17.5_40	5,88	5,02	5,89	3,55	3,57	3,34	3,93	3,98	5,16	1,62
39	RHP_300_20_220_14.2_40	4,99	5,76	4,64	3,51	3,04	3,90	2,96	4,52	4,44	1,97
40	RHP_300_20_220_10_40	3,80	7,26	3,02	4,33	2,13	4,78	1,97	5,34	3,40	2,46
41	RHP_300_20_220_6.3_40	2,65	9,85	1,69	4,61	1,24	5,09	1,08	5,53	2,05	2,84
42	RHP_300_20_180_20_40	8,43	4,61	8,56	4,30	4,90	2,67	5,00	3,28	5,97	0,22
43	RHP_300_20_180_17.5_40	7,59	5,04	7,43	4,29	4,77	3,00	4,58	3,63	5,81	1,48
44	RHP_300_20_180_14.2_40	6,45	5,78	5,93	4,20	3,77	3,54	3,86	4,17	5,16	1,88
45	RHP_300_20_180_10_40	4,91	7,29	4,00	4,27	2,63	4,41	3,14	4,99	4,12	2,45
46	RHP_300_20_180_6.3_40	3,42	9,88	2,38	4,69	1,45	4,76	1,67	5,22	2,78	2,94
47	RHP_300_20_140_20_40	8,55	4,23	9,67	4,74	3,79	2,23	4,29	2,66	5,29	0,48
48	RHP_300_20_140_17.5_40	7,71	4,62	8,46	4,71	3,84	2,50	3,98	2,94	5,27	0,41
49	RHP_300_20_140_14.2_40	6,55	5,30	6,75	4,61	3,49	2,96	3,41	3,38	4,82	0,28
50	RHP_300_20_140_10_40	4,98	6,68	4,61	4,27	2,82	3,73	2,88	4,06	3,91	1,97
51	RHP_300_20_140_6.3_40	3,47	9,06	2,64	4,02	1,47	4,09	1,86	4,27	2,72	2,47
52	RHP_300_20_110_14.2_40	5,63	4,61	6,89	4,55	2,59	2,42	2,57	2,65	3,82	0,51
53	RHP_300_20_110_10_40	4,28	5,81	4,69	4,22	2,27	3,03	2,20	3,16	3,24	1,39
54	RHP_300_20_110_6.3_40	2,99	7,88	2,73	3,52	1,40	3,37	1,47	3,33	2,34	1,85
55	RHP_300_30_220_20_40	2,00	2,66	1,95	2,23	2,18	2,77	0,99	2,90	1,80	1,22
56	RHP_300_15_220_20_40	9,09	4,33	7,49	3,55	6,77	2,76	7,15	3,68	9,48	1,61
57	RHP_300_15_220_15_40	7,26	5,23	5,66	3,13	7,03	3,41	5,91	3,99	3,58	1,29
58	RHP_100_6_80_4_25	3,08	5,15	3,19	3,94	3,10	2,45	2,64	2,97	2,24	2,76
59	RHP_300_20_160_20_40	5,71	3,44	5,10	2,54	2,61	2,27	2,63	2,60	3,72	1,06
60	RHP_300_20_120_20_40	5,16	2,99	5,63	2,67	2,26	1,89	2,58	2,08	3,15	0,74
61	RHP_400_20_300_20_40	6,62	5,20	5,46	3,39	5,20	3,83	4,26	4,52	7,97	1,64
62	RHP_400_20_220_20_40	9,33	5,14	7,71	3,65	5,83	3,21	6,95	3,83	7,61	1,82
63	RHP_400_20_160_20_40	8,47	4,42	7,34	3,91	4,89	2,46	5,68	2,78	5,86	1,39
64	RHP_180_12_130_12_24	4,42	3,55	4,05	2,78	3,79	2,94	3,03	3,29	3,38	1,31
65	RHP_180_12_100_12_24	5,68	3,49	4,88	2,35	3,00	2,40	3,01	2,73	4,32	1,05
66	RHP_180_12_70_12_24	5,06	2,94	5,11	2,59	2,15	1,90	2,38	2,09	2,85	0,73
67	RHP_130_4_80_4_25	24,65	10,20	14,66	9,30	12,84	6,01	15,73	6,78	12,29	6,14
68	RHP_120_8_80_8_16	5,03	3,58	4,98	2,64	2,60	2,42	2,11	2,90	3,34	1,42
69	RHP_120_8_70_8_16	5,59	3,53	4,57	2,57	2,57	2,28	2,29	2,60	3,51	1,05
70	RHP_120_8_50_8_16	5,30	3,06	3,96	2,59	1,99	1,86	2,23	2,07	2,57	0,84
71	RHP_200_8_80_8_25	13,26	5,99	9,56	5,92	4,86	2,39	5,73	2,73	5,90	2,17
72	RHP_200_8_80_4_25	7,72	9,47	5,29	5,42	4,82	3,56	4,79	3,71	4,82	3,20

**Parameterbereich innerhalb der Parameterstudie an KHP K-Knoten mit Spalt**

Parameter		CIDECT	KHP		
			Lastfall		
			LC1 - AX	LC3 - IPB	LC4 - OPB
Gurtschlankheit	$2\gamma = b_0/t_0$	24 ÷ 60	6,5, 8,1	6,5, 8,1	6,5, 8,1
			10,8	10,8	10,8
			13	13	13
			16,2, 19,4	16,2, 19,4	16,2, 19,4
			20,2 ÷ 30,7	20,2 ÷ 30,7	20,2 ÷ 30,7
Wanddickenverhältnis	$\tau = t_1/t_0$	0,25 ÷ 1,0	0,4	0,4	0,4
			0,5	0,5	0,5
			0,63 ÷ 0,79	0,63 ÷ 0,79	0,63 ÷ 0,79
			0,8	0,8	0,8
			1,0 ÷ 1,67	1,0 ÷ 1,67	1,0 ÷ 1,67
Durchmesserverhältnis	$\beta = d_1/d_0$	0,30 ÷ 0,60	0,39 ÷ 0,49	0,39 ÷ 0,49	0,39 ÷ 0,49
			0,6, 0,68	0,6, 0,68	0,6, 0,68
			0,75	0,75	0,75
Dimensionslose Exzentrizität	$e/h_0$	0	-0,02	-0,02	-0,02
			0,08 ÷ 0,1	0,08 ÷ 0,1	0,08 ÷ 0,1
			0,25	0,25	0,25
Strebenneigungswinkel	$\theta$	30° ÷ 60°	35	35	35
			45	45	45
			55	55	55

## Abmessungen der mit FEA berechneten KHP K-Knoten mit Spalt

KHP K-Knoten mit Spalt		Gurt		Strebe		Knotengeometrie			Parameter				
Nr.	Profil_b <sub>0</sub> _t <sub>0</sub> _b <sub>1</sub> _t <sub>1</sub> _g	d <sub>0</sub>	t <sub>0</sub>	d <sub>i</sub>	t <sub>i</sub>	Θ <sub>i</sub>	g <sub>min</sub>	e	β	2γ	2γ <sub>i</sub>	τ	e/d <sub>0</sub>
		mm	mm	mm	mm	°	mm	mm					
1	KHP_323,9_20_244,5_20_40	323,9	20	244,5	20	45	40	31	0,75	16,2	12,2	1,00	0,10
2	KHP_323,9_25_244,5_20_40	323,9	25	244,5	20	45	40	31	0,75	13,0	12,2	0,80	0,10
3	KHP_323,9_30_244,5_20_40	323,9	30	244,5	20	45	40	31	0,75	10,8	12,2	0,67	0,10
4	KHP_323,9_40_244,5_20_40	323,9	40	244,5	20	45	40	31	0,75	8,1	12,2	0,50	0,10
5	KHP_323,9_50_244,5_20_40	323,9	50	244,5	20	45	40	31	0,75	6,5	12,2	0,40	0,10
6	KHP_323,9_20_127_20_200	323,9	20	127,0	20	45	40	28	0,39	16,2	6,4	1,00	0,09
7	KHP_323,9_20_139,7_20_40	323,9	20	139,7	20	45	40	27	0,43	16,2	7,0	1,00	0,08
8	KHP_323,9_20_159,0_20_40	323,9	20	159,0	20	45	40	25	0,49	16,2	8,0	1,00	0,08
9	KHP_323,9_20_193,7_20_40	323,9	20	193,7	20	45	40	30	0,60	16,2	9,7	1,00	0,09
10	KHP_323,9_20_219,1_20_40	323,9	20	219,1	20	45	40	28	0,68	16,2	11,0	1,00	0,09
11	KHP_323,9_20_244,5_20_40	323,9	20	244,5	20	35	40	1	0,75	16,2	12,2	1,00	0,00
12	KHP_323,9_20_244,5_20_40	323,9	20	244,5	20	55	40	80	0,75	16,2	12,2	1,00	0,25
13	KHP_323,9_16_244,5_20_40	323,9	16	244,5	20	45	40	31	0,75	20,2	12,2	1,25	0,10
14	KHP_323,9_12_244,5_20_40	323,9	12	244,5	20	45	40	31	0,75	27,0	12,2	1,67	0,10
15	KHP_193,7_10_114,3_6,3_25	193,7	10	114,3	6	45	13	-4	0,59	19,4	18,1	0,63	-0,02
16	KHP_193,7_8_114,3_6,3_25	193,7	8	114,3	6	45	13	-4	0,59	24,2	18,1	0,79	-0,02
17	KHP_193,7_6,3_114,3_6,3_2	193,7	6	114,3	6	45	13	-4	0,59	30,7	18,1	1,00	-0,02

## Spannungskonzentrationsfaktoren aus FEA für KHP K-Knoten mit Spalt

KHP K-Knoten mit Spalt		LC1 - AX						LC3 - IPB				LC4 - OPB			
Nr.	Profil_b <sub>0</sub> _t <sub>0</sub> _b <sub>1</sub> _t <sub>1</sub> _g	CIDECT		DNVGL		FEA		DNVGL		FEA		DNVGL		FEA	
		Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe
1	KHP_323,9_20_244,5_20_40	4,78	2,30	3,62	2,44	2,27	2,13	2,38	2,80	3,04	1,81	5,71	3,40	3,57	2,34
2	KHP_323,9_25_244,5_20_40	3,42	2,30	2,65	2,09	1,84	2,08	1,76	2,52	2,15	1,57	3,69	2,51	2,16	1,78
3	KHP_323,9_30_244,5_20_40	2,60	2,30	2,05	1,86	1,30	1,87	1,38	2,31	1,64	1,51	2,58	1,95	1,48	1,49
4	KHP_323,9_40_244,5_20_40	1,69	2,30	1,37	1,60	0,96	1,74	0,94	2,04	1,06	1,48	1,46	1,31	0,90	1,23
5	KHP_323,9_50_244,5_20_40	1,21	2,30	1,00	1,45	0,78	1,80	0,70	1,86	0,76	1,48	0,94	0,96	0,56	1,13
6	KHP_323,9_20_127_20_200	5,59	2,30	3,75	3,14	3,89	2,01	2,15	2,73	1,56	1,69	3,92	2,79	2,22	1,15
7	KHP_323,9_20_139,7_20_40	5,59	2,30	3,81	3,09	3,67	2,03	2,25	2,79	1,95	1,70	4,42	3,04	2,85	1,35
8	KHP_323,9_20_159,0_20_40	5,35	2,30	3,88	2,99	3,95	2,11	2,35	2,83	2,25	1,75	5,18	3,35	3,07	1,77
9	KHP_323,9_20_193,7_20_40	5,13	2,30	3,91	2,81	3,49	2,23	2,38	2,83	2,80	1,82	5,55	3,44	3,70	1,99
10	KHP_323,9_20_219,1_20_40	4,94	2,30	3,82	2,63	3,48	2,32	2,05	3,07	3,12	2,21	4,11	2,45	2,27	1,67
11	KHP_323,9_20_244,5_20_40	4,52	2,50	2,94	2,01	2,59	2,00	2,63	2,63	2,98	1,69	7,18	4,28	4,57	2,76
12	KHP_323,9_20_244,5_20_40	5,22	2,20	4,19	2,85	3,63	2,91	3,20	3,11	5,53	1,05	8,83	4,61	10,07	3,41
13	KHP_323,9_16_244,5_20_40	6,91	2,30	4,95	2,91	4,13	2,61	4,70	3,55	5,25	1,06	15,45	6,81	10,00	3,39
14	KHP_323,9_12_244,5_20_40	10,64	2,90	7,40	3,74	6,84	2,89	1,77	2,65	1,66	1,01	3,83	3,17	2,63	2,60
15	KHP_193,7_10_114,3_6,3_25	3,25	2,30	2,67	2,33	2,30	2,34	2,44	2,98	4,53	6,14	5,93	4,30	13,32	11,64
16	KHP_193,7_8_114,3_6,3_25	4,55	2,30	3,65	2,76	3,07	2,35	3,45	3,37	3,69	3,48	9,45	5,95	16,44	9,72

## **ANHANG D – Literaturstudie**

**D1 – Ermüdungsversuche FOSTA P815 [14]**

**D2 – Ermüdungsuntersuchungen EPFL, Lausanne [28]**

**D3 – Spannungskonzentrationsfaktoren CIDECT 7P [33]**



**KHP-K-Knoten  $t_0 = 20$  mm, Gurtaxiallast,  $R = 0.2$**

Construction detail K-Knoten		S-N curve	
Literatur Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundholprofilen mit dickwandigen Gurten Schlussbericht P815, 2015 Kuhnmann et al			
Material Delivery code: S355J2H Delivery code: EN 10210 Plate thickness: 20 mm Mech. properties $R_{p0.2}$ : ca. 380 MPa $R_m$ : ca. 540 MPa Fabrication Welding process: MAG Welding material: -- Post weld treatment: -- Fatigue loading Stress ratio R: 0.2 [-] Type of loading: Axial chord load, sine-wave Type of collective: constant amplitude			
Sketch and dimension of test specimen and loading		Statistical evaluation of test data according to EN 1993-1-9:2005	
Versuchsergebnisse		slope mean S-N curve ( $P_0 = 50\%$ ) $\Delta\sigma_{50\%}$ : 154,4 characteristic S-N curve ( $P_0 = 95\%$ ) $\Delta\sigma_c$ : 93,8	
Origin and type of fatigue failure		m = variable = 12,9 $\Delta\sigma_{50\%}$ : 70,7 m = fix = 3 $\Delta\sigma_{50\%}$ : 106,2 m = fix = 5 $\Delta\sigma_c$ : 4,7	
Comments		* use "0" for a run-out that should not be taken into account for the statistical evaluation, "1" elsewhere	











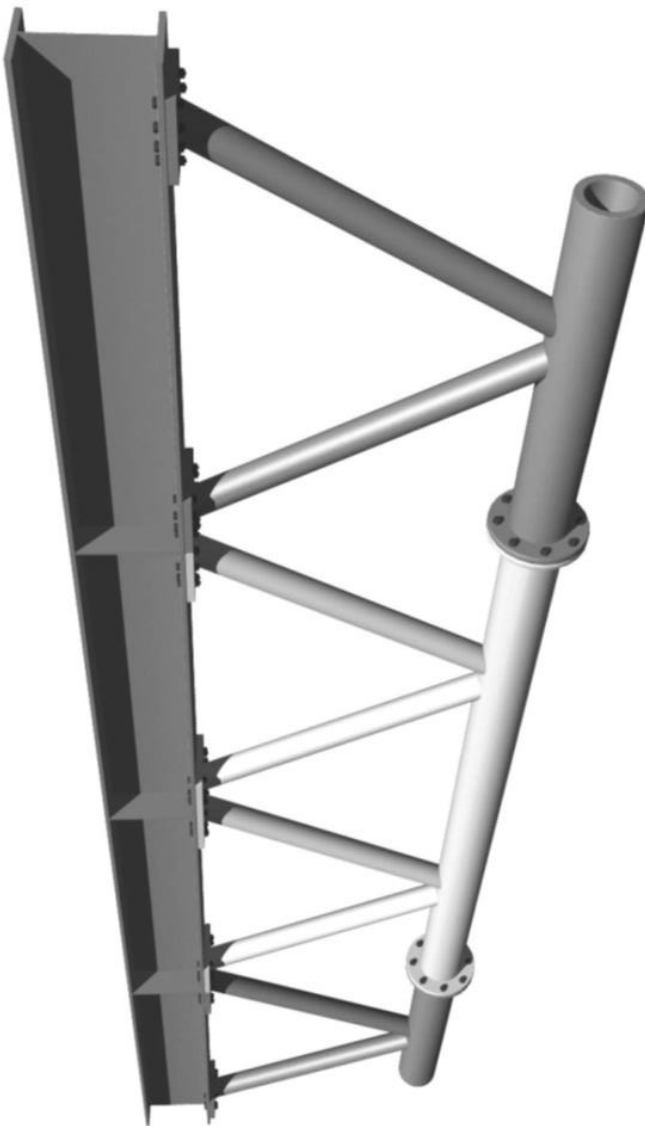






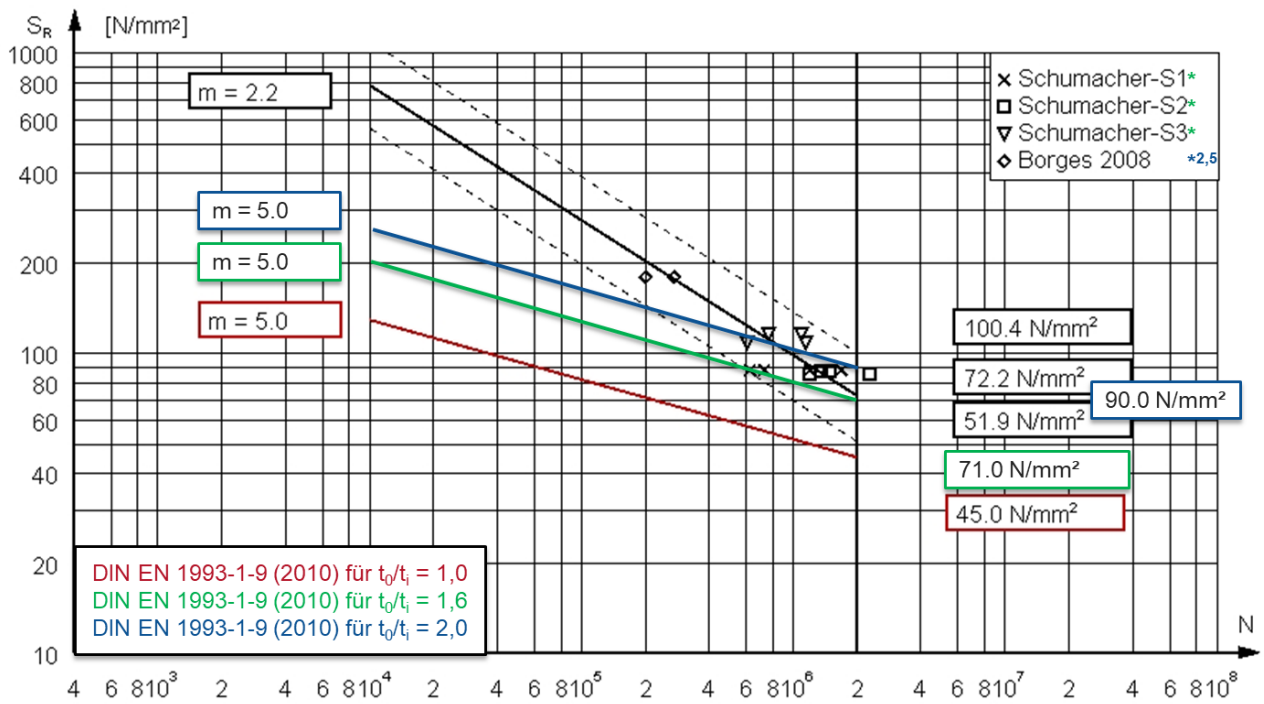
**D2 Ermüdungsuntersuchungen EPFL, Lausanne [14]**

**KHP K-Knoten Fachwerkträger EPFL**

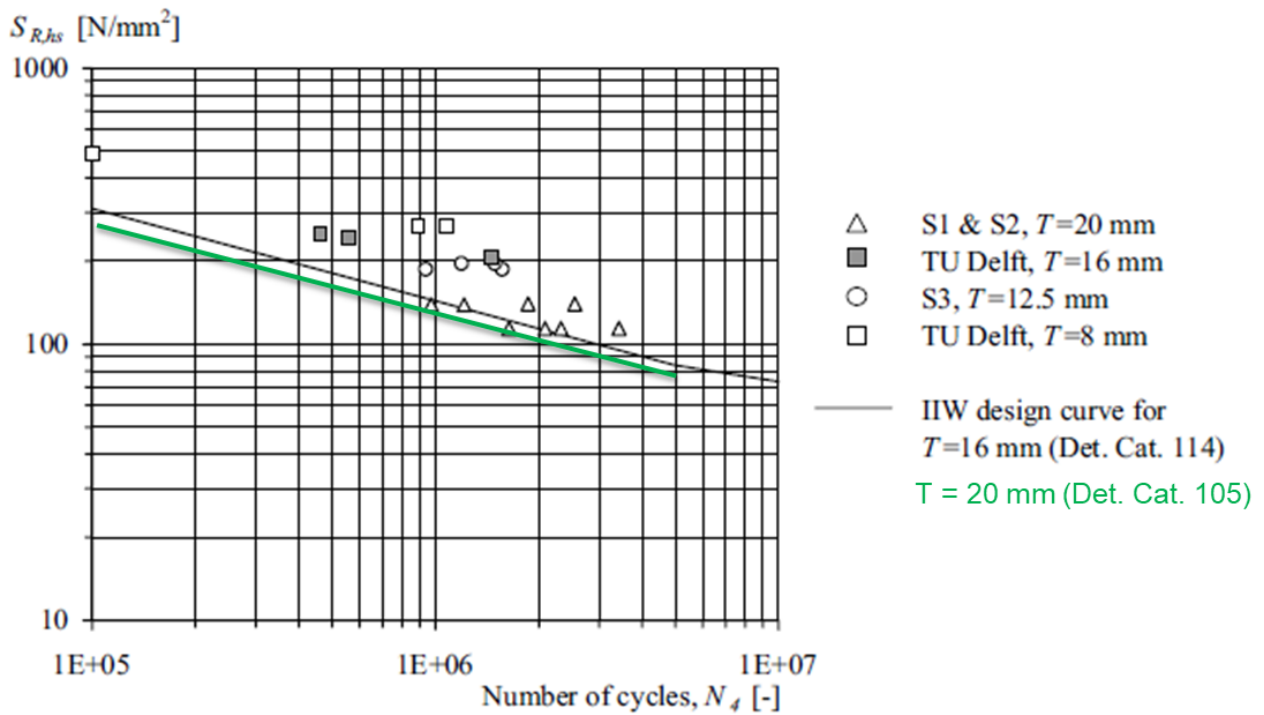


Series	Investig. param.	Nom. Dimensions [mm]		$\theta$ [°]	$\beta$ [-]	$\gamma$ [-]	$\tau$ [-]	Weld [mm]
		Chord	Brace					
S1	Base	273 x 20	139.7 x 12.5	60	0.51	6.83	0.63	FP, BR
S2	Backing ring	273 x 20	139.7 x 12.5	60	0.51	6.83	0.63	FP
S3	Scale	168.3 x 12.5	88.9 x 8	60	0.53	6.73	0.64	FP, BR
S5	Borges	168.3 x 20	88.9 x 8	60	0.53	4.21	0.40	FP, BR

**Nennspannungskonzept für KHP K-Knoten Fachwerkträger EPFL**



**Strukturspannungskonzept für KHP K-Knoten Fachwerkträger EPFL**





**D3 Spannungskonzentrationsfaktoren aus CIDECT 7P [33]**

Probekörper	Gurt			Strebe			Knotengeometrie			Parameter			SCF-AX		SCF-IPB	
	$b_0$	$h_0$	$t_0$	$b_1$	$h_1$	$t_1$	$\Theta_1$	$g$	$e$	$\beta$	$2\gamma$	$\tau$	Gurt	Strebe	Gurt	Strebe
K411e04	200	200	13,33	80	80	13,33	45	86,8	0,0	0,4	15	1	7,76	2,82	2,64	1,05
K411g54	200	200	13,33	80	80	13,33	45	66,7	-10,1	0,4	15	1	7,36	2,79	2,48	1,05
K415e04	200	200	13,33	80	80	6,67	45	86,8	0,0	0,4	15	0,5	4,49	4,17	1,57	1,46
K415g54	200	200	13,33	80	80	6,67	45	66,7	-10,1	0,4	15	0,5	4,39	4,18	1,6	1,45
K421e03	200	200	8	80	80	8	30	186	0,0	0,4	25	1	11,02	3,08	5,66	1,7
K421e04	200	200	8	80	80	8	45	86,9	0,0	0,4	25	1	18,20	5,42	7,93	2,65
K421e06	200	200	8	80	80	8	60	23,1	0,0	0,4	25	1	19,64	7,89	6,91	2,92
K421g24	200	200	8	80	80	8	45	16	-35,4	0,4	25	1	13,50	5,49	5,22	2,43
K421g53	200	200	8	80	80	8	30	40	-42,3	0,4	25	1	8,39	3,14	4,08	1,66
K421g54	200	200	8	80	80	8	45	40	-23,4	0,4	25	1	14,90	5,45	6,35	2,49
K421g56	200	200	8	80	80	8	60	40	14,6	0,4	25	1	20,44	7,91	7,92	3,04
K425e03	200	200	8	80	80	4	30	186	0,0	0,4	25	0,5	5,91	5,17	2,81	1,96
K425e04	200	200	8	80	80	4	45	86,9	0,0	0,4	25	0,5	10,19	9,37	4,77	3,18
K425e06	200	200	8	80	80	4	60	23,1	0,0	0,4	25	0,5	12,48	11,84	4,92	3,36
K425g24	200	200	8	80	80	4	45	16	-35,4	0,4	25	0,5	8,80	9,37	3,84	2,71
K425g53	200	200	8	80	80	4	30	40	-42,3	0,4	25	0,5	5,22	5,26	2,62	1,8
K425g54	200	200	8	80	80	4	45	40	-23,4	0,4	25	0,5	9,29	9,42	4,16	2,9
K425g56	200	200	8	80	80	4	60	40	14,6	0,4	25	0,5	12,72	11,89	5,22	3,59
K611e04	200	200	13,33	120	120	13,33	45	30,3	0,0	0,6	15	1	5,76	3,55	2,72	1,42
K611g54	200	200	13,33	120	120	13,33	45	66,7	18,2	0,6	15	1	6,28	3,53	3,18	1,47
K615e04	200	200	13,33	120	120	6,67	45	30,3	0,0	0,6	15	0,5	3,43	5,14	1,88	1,78
K615g54	200	200	13,33	120	120	6,67	45	66,7	18,2	0,6	15	0,5	3,76	5,08	2,06	1,92
K621e03	200	200	8	120	120	8	30	106	0,0	0,6	25	1	7,83	3,98	5,56	1,91
K621e04	200	200	8	120	120	8	45	30,3	0,0	0,6	25	1	13,46	6,65	7,77	3,17
K621g24	200	200	8	120	120	8	45	16	-7,2	0,6	25	1	13,50	6,7	7	2,99
K621g53	200	200	8	120	120	8	30	40	-19,2	0,6	25	1	6,73	4,06	4,39	1,82
K621g54	200	200	8	120	120	8	45	40	4,9	0,6	25	1	13,42	6,61	8,31	3,3
K625e03	200	200	8	120	120	4	30	106	0,0	0,6	25	0,5	4,93	6,15	3,29	2,14
K625e04	200	200	8	120	120	4	45	30,3	0,0	0,6	25	0,5	8,76	10,6	4,81	3,42
K625g24	200	200	8	120	120	4	45	16	-7,2	0,6	25	0,5	8,72	10,59	4,67	3,15
K625g53	200	200	8	120	120	4	30	40	-19,2	0,6	25	0,5	4,37	6,25	2,88	1,92
K625g54	200	200	8	120	120	4	45	40	4,9	0,6	25	0,5	8,75	10,57	5	3,59
K631e04	200	200	5,71	120	120	5,71	45	30,3	0,0	0,6	35	1	23,90	10,13	13,41	4,95
K631e54	200	200	5,71	120	120	5,71	45	28,6	-0,9	0,6	35	1	23,90	10,14	13,24	4,89
K811g54	200	200	13,33	160	160	13,33	45	66,7	46,5	0,8	15	1	3,61	3,69	1,88	1,35
K815g54	200	200	13,33	160	160	6,67	45	66,7	46,5	0,8	15	0,5	1,84	4,68	1,1	1,47
K821e03	200	200	8	160	160	8	30	26,4	0,0	0,8	25	1	3,81	4,35	1,88	0,89
K821g24	200	200	8	160	160	8	45	16	21,1	0,8	25	1	7,85	6,41	4,61	2,51
K821g53	200	200	8	160	160	8	30	40	3,9	0,8	25	1	3,86	4,33	2	1,12
K821g54	200	200	8	160	160	8	45	40	33,1	0,8	25	1	7,80	6,32	4,61	2,83
K831g54	200	200	5,71	160	160	5,71	45	28,6	27,4	0,8	35	1	18,45	8,82	10,84	4,1