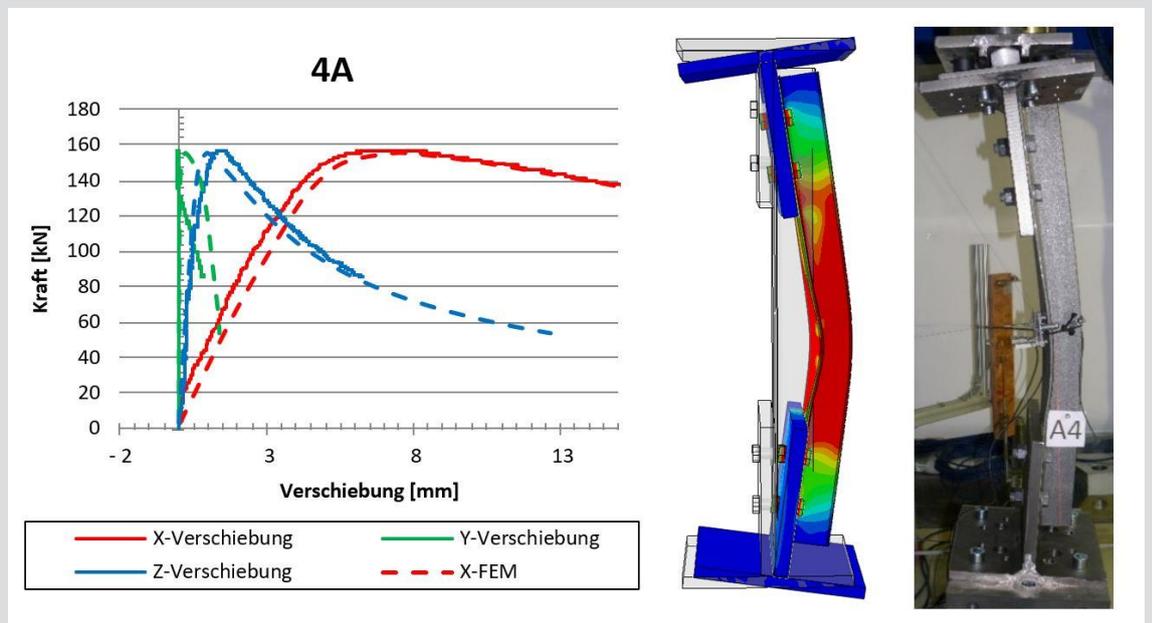


# Laborversuche und begleitende FE-Berechnungen zur Knicktragfähigkeit geschraubter Winkelprofile mit verschiedenen Lagerungsbedingungen



D-5-64/2018

Lichtl Gerit  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz





Laborversuche und begleitende FE-Berechnungen zur  
Knicktragfähigkeit geschraubter Winkelprofile mit verschiedenen  
Lagerungsbedingungen

**Masterarbeit**

verfasst von

**Gerit Lichtl**

eingereicht am

Institut für Stahlbau

Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler

Graz, Mai 2018



## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

Unterschrift: .....



## Widmung

*...dem interessierten Leser...*



## Kurzfassung

Aufgrund der einfachen Herstellung und schnellen Montagemöglichkeit werden Stahlwinkel oft als aussteifende Elemente in Gebäuden (Verbandsstäbe) oder als Fachwerkstäbe bei Freileitungsmasten verwendet. Die Problemstellung bei der Ermittlung der zutreffenden Drucktragfähigkeit ist dabei die durch die Schraubverbindungen an nur einem Winkelschenkel induzierte exzentrische Lasteinleitung. Dadurch entstehen zusätzliche Biegemomente welche zu beachten sind, speziell bei druckbeanspruchten Stäben. Bei größeren Schlankheitsgraden wird angenommen, dass dieser Traglast mindernde Effekt durch die Endeinspannung kompensiert wird. Aktuelle Bemessungsgrundlagen berücksichtigen diesen Effekt durch effektive Schlankheitsgrade, wodurch sich deutliche Unterschiede je nach verwendeter Bemessungsnorm ergeben. Um den Einfluss der Randbedingungen (Lagerungsbedingungen des anschließenden Knotenblechts) und Schraubenzahl genauer erfassen zu können, wurde eine Testreihe mit unterschiedlichen Endeinspannungen und Schlankheitsgraden untersucht. In insgesamt 27 Versuchen wurden unterschiedlichste Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen getestet. Folgende Endeinspannungen wurden untersucht: Die erste Randbedingung (BC1) beinhaltet eine vollständig eingespannte Lagerung. Als zweite Randbedingung (BC2) wurde eine Scharnierlagerung, mit drehbarer Lagerung aus der Knotenblechebene, implementiert. Die dritte Randbedingung (BC3) stellt eine vollständig gelenkige Lagerung an den Enden der Knotenbleche dar. Begleitend zu den Versuchen wurden die geometrischen Imperfektionen und die Materialkennwerte der Winkel bestimmt, um eine Gegenüberstellung mit einschlägigen Normenwerken vornehmen zu können. Zusätzlich zu den Tests wurden FE-Modelle generiert, die ebenso die gemessenen Materialkennwerte und die Imperfektionen beinhalten. Diese wurden den Tests gegenübergestellt um weitere Parameteruntersuchungen durchführen zu können. Die FE-Rechnungen und die Tests weisen sehr ähnliche Tragfähigkeiten und Verformungen auf. Signifikante Unterschiede der Tragfähigkeit zwischen Normenwerken und Testreihe zeigen sich jedoch in den verwendeten Randbedingungen. Diese haben einen weitaus größeren Einfluss, als die verwendete Anzahl an Schrauben je Verbindung. In den aktuellen Bemessungsnormen wird dieser Sachverhalt derzeit nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.



## Abstract

Because of the easy manufacturing and quick installation, steel angles are often used as stiffening elements in buildings or as truss members. However, the problem for calculation of the member capacity is the eccentric load application induced by the bolt connection. This results in additional bending moments which must be considered. For larger slenderness ratios, it is believed that this effect is compensated by the clamping at the end. Current design standards account this effect via modification of effective slenderness ratios, which results in significant differences depending on the design standard used. In order to examine the influence of the boundary conditions of the gusset plates and the number of bolts used, a test series with varying end supports and slenderness ratios was examined. A total of 27 experiments, with a variety of single- and two-bolt connections, were tested. The following end constraints have been investigated: The first boundary condition (BC1) includes a fully clamped support. As a second boundary condition (BC2), a hinged support with rotation only out of the plane of the gusset plate was implemented. The third boundary condition (BC3) represents a fully hinged support. In addition to the angular tests, imperfections were measured and the material characteristics were determined in order to be able to compare the member capacities with different design standards. Furthermore, finite element models were generated including the determined imperfections and material data. These were compared with the tests in order to make additional parametric studies in the future. Both, the theory and the FE-models show similar results. Significant differences between current design standards and the test series are shown by using different boundary conditions. These have a much bigger influence than the number of bolts used per connection. This situation is insufficiently reflected in the current design code regulations.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick .....	1
2	Versuchsdurchführung .....	3
2.1	Grundlegendes Vorgehen .....	3
2.2	Geometrie und Materialkennwerte .....	5
2.2.1	Ermittlung der Imperfektionen und Querschnittsdaten .....	5
2.2.2	Ermittlung der Materialkennwerte .....	9
2.3	Versuchsaufbau .....	14
2.3.1	Anschlussbleche und Lagerungsbedingungen .....	14
2.3.2	Vorspannen der Schrauben .....	16
2.3.3	Messeinrichtungen in Stabmitte anbringen .....	17
2.4	Auswertung der Messschnurverformungen .....	18
3	FE-Berechnung zu den Versuchen .....	25
3.1	Bauteile im FE-Modell .....	26
3.1.1	Kopfplatte .....	26
3.1.2	Anschlussblech .....	26
3.1.3	Schrauben .....	27
3.1.4	Solid-Objekt als Teile des Winkelprofils .....	27
3.1.5	Shell-Objekt als mittlerer Teil des Winkelprofils .....	28
3.2	Abbildung des Materialverhaltens .....	29
3.2.1	Schrauben .....	29
3.2.2	Stahl – elastisch-plastisches Materialverhalten .....	29
3.2.3	Stahl – rein elastisches Materialverhalten .....	29
3.3	Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Bauteilen .....	30
3.4	Lagerungsbedingungen an den Stabenden .....	31
3.5	Implementierung der zutreffenden Imperfektionen jedes Einzelversuches .....	32
3.6	Lastaufbringung .....	34
4	Ergebnisse der Versuche und Gegenüberstellung mit der FE-Simulation .....	35
4.1	Versuchsreihe A – Winkel 80x8 .....	37
4.1.1	Laborversuch 1A .....	37
4.1.2	Laborversuch 2A .....	39
4.1.3	Laborversuch 3A .....	41
4.1.4	Laborversuch 4A .....	43
4.1.5	Laborversuch 5A .....	45
4.1.6	Laborversuch 6A .....	47
4.2	Versuchsreihe B – Winkel 80x8 .....	49

4.2.1	Laborversuch 1B .....	49
4.2.2	Laborversuch 2B .....	51
4.2.3	Laborversuch 3B .....	53
4.2.4	Laborversuch 4B .....	55
4.2.5	Laborversuch 5B .....	57
4.3	Versuchsreihe C – Winkel 80x8 .....	59
4.3.1	Laborversuch 1C .....	59
4.3.2	Laborversuch 2C .....	61
4.3.3	Laborversuch 3C .....	63
4.3.4	Laborversuch 4C .....	65
4.3.5	Laborversuch 5C .....	67
4.4	Versuchsreihe D – Winkel 80x8 .....	69
4.4.1	Laborversuch 1D .....	69
4.4.2	Laborversuch 2D .....	71
4.4.3	Laborversuch 3D .....	73
4.4.4	Laborversuch 4D .....	75
4.4.5	Laborversuch 5D .....	77
4.4.6	Laborversuch 6D .....	79
4.4.7	Laborversuch 7D .....	81
4.4.8	Laborversuch 8D .....	83
4.5	Versuchsreihe E – Winkelprofil 120x12 .....	85
4.5.1	Laborversuch 1E .....	85
4.5.2	Laborversuch 2E .....	87
4.5.3	Laborversuch 3E .....	89
5	Zusammenfassung .....	91
6	Ausblick .....	95
7	Anhang A .....	97
8	Anhang B .....	99
9	Literaturverzeichnis .....	101

# 1 Einleitung und Überblick

Die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von Winkelprofilen unter Druckbelastung ist sehr komplex, speziell bei der hier untersuchten Ausführung mit geschraubten Verbindungen. Bereits in der Vergangenheit wurden Studien zu diesem Thema durchgeführt. Die für die Versuchsreihe in dieser Arbeit verwendeten Winkelprofile beschränken sich auf warmgewalzten Baustahl (S235), somit wird auch nur dieser in allen Vergleichen dargestellt. Abb. 1-1 zeigt einen Vergleich der bisherigen Bemessungsgrundlagen der europäischen (EN 1993-1-1, [3]), der amerikanischen (ASIC 360-16, [9]) und kanadischen Normen (CSA S16-14, [10]). Die beigefügte Skizze eines Winkelquerschnitts zeigt den Schwerpunkt und die durch die Verschraubung entstehende exzentrische Belastungsanordnung. Verglichen mit einem zentrisch belasteten Winkel (Knickspannungslinie b, EN 1993-1-1, [3]) zeigt sich, speziell bei geringeren Schlankheitsgraden, eine deutliche Reduktion der Tragfähigkeit. Der positive Einfluss der Endeinspannung bei höheren Schlankheitsgraden ist hier deutlich erkennbar.

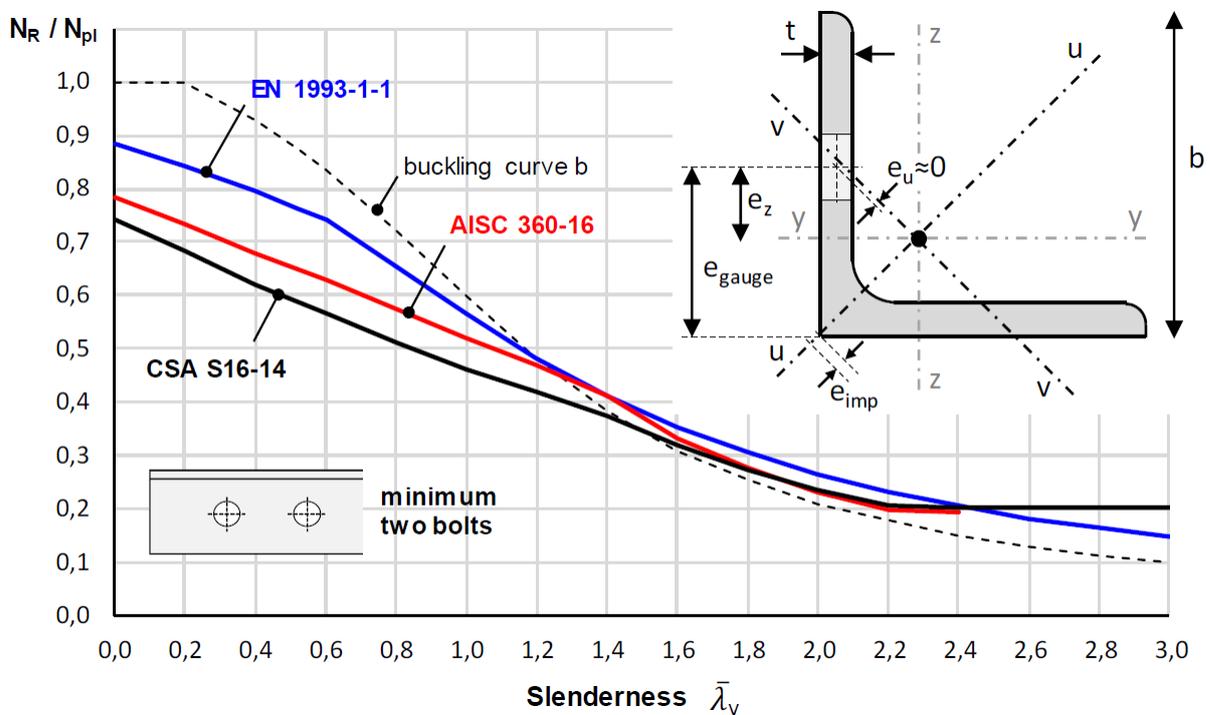


Abb. 1-1: Vergleich der unterschiedlichen Tragfähigkeiten von Winkelprofilen, abhängig von der verwendeten Norm, mit mindestens zwei Schrauben je Verbindung, [1]

Im Jahr 1974 wurde bereits eine der größten Versuchsreihen zum Thema druckbelastete Winkel durchgeführt. Diese fand in England, Spanien und Deutschland (C.I.G.R.E. (1974), [11]) statt und umfasste 153 Versuchskörper (104 mit Zwei-Schrauben-Verbindungen und 49 mit einer Schraube je Verbindung). Das Hauptziel der Versuchsreihe war die Ermittlung von brauchbaren ULS-Tragfähigkeiten von Fachwerken, im Speziellen für Mastbauten (z.B.: Freileitungsmasten). Für diesen Fall wurden die Aussteifungen als gekreuzte, verbundene Diagonalen realisiert und auch im Versuch als solche umgesetzt. Durch die Belastung ergeben sich Zug- bzw. Druckdiagonalen. Die unter Druck stehenden Stäbe werden jedoch durch die Verbindung in der Mitte des Stabes gehalten und es ergibt sich lediglich eine Exzentrizität an einer Seite des Stabes. Aktuelle europäische Bemessungsgrundlagen für Mastbauten beziehen sich auf die Ergebnisse dieser Forschungsstudie und die dadurch entwickelte Bemessungsgrundlage (ECCS 1985, [12]).

Adluri et. al. (1996, [13]) starteten eine weitere Versuchsreihe im Umfang von 26 zentrisch belasteten Winkelprofilen mit gelenkigen Endanschlüssen an der Universität von Windsor (Canada). In den folgenden Jahren wurden zwei weitere Versuchsreihen an dieser Universität getestet (Haidar 1996 [14], 197 Versuchskörper mit Zwei-Schrauben-Verbindungen und Shani 1998 [23], 47 Versuchskörper mit je einer Schraube im angeschlossenen Winkelschenkel).

Auch Schneider (2003, [15]) führte eine Reihe an Versuchen mit warmgewalzten Winkelprofilen durch. Davon waren 20 mit zwei Schrauben je Anschluss versehen und 13 bei denen der belastete Schenkel an das Anschlussblech angeschweißt worden war.

Reininghaus et. al. (2005, [16]) veröffentlichte eine Testreihe mit 40 Winkelprofilen, mit je einer Schraube pro Anschluss.

Eigenspannungen an warmgewalzten Winkelprofilen haben, im Gegensatz zu I-Profilen, nur einen geringen Einfluss auf die Knicktragfähigkeit. Die in ECCS (1976, [17]) dargestellte ideale Spannungsverteilung – die auch in amerikanischen und chinesischen Bemessungsgrundlagen in ähnlicher Form Anwendung findet – wurde in Versuchsreihen mit hochfesten Winkelprofilen (Ban et. al. 2012, [18]) bzw. großen warmgewalzten Winkelprofilen (Moze et. al. (2014), [19]) überprüft und gegenübergestellt. Diese Versuchsreihen liefern eher konservative Herangehensweisen zur Berücksichtigung der Eigenspannungen, da eine breite Streuung der Messdaten vorliegt. Weiters werden zusätzliche Forschungen in diesem Gebiet nahegelegt um detailliertere Ergebnisse zu erhalten.

Weiters wurde ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Drucktragfähigkeit von Stützen aus warmgewalzten Winkelprofilen, basierend auf der Direct-Strength-Method (DSM siehe z.B. Schafer 2008, [20]), vorgestellt (Dinis et. al. 2017, [21]). Die Arbeit umfasst die Versagensform *Biegeknicken* bzw. *Biegedrillknicken* von symmetrischen Winkelprofilen mit eingespannten oder gelenkigen Anschlüssen und kurzen bis mittleren Längen.

Der Inhalt dieser Arbeit konzentriert sich auf den Einfluss der Randbedingungen (Lagerungsbedingungen des Knotenblechs) auf die Tragfähigkeit der Winkelprofile. Obwohl die Anzahl an Versuchsreihen bzw. Forschungsprojekten zum Thema Tragfähigkeit von Winkelprofilen bereits sehr groß ist, gibt es bis dato keine detaillierten Versuchsreihen die gezielt den Einfluss der Randbedingungen auf die Tragfähigkeit untersuchten. Diese Arbeit behandelt die Versuchsauswertung und begleitende FE-Berechnung von insgesamt 27 Versuchsdurchführungen.

## 2 Versuchsdurchführung

### 2.1 Grundlegendes Vorgehen

Diese Studie beinhaltet 27 experimentelle Versuche, davon 14 mit zwei Schrauben und 13 mit einer Schraube je Verbindung. Weiters wurden verschiedene Längen und Lagerungsbedingungen untersucht. Die Versuche wurden am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Für die Winkel wurde ein baupraktisch häufiges Profil aus warmgewalztem Stahl mit dem Querschnitt L80x8 ( $h=b=80\text{mm}$ ,  $t=8\text{mm}$ ) verwendet. Zusätzlich wurden drei Zwei-Schrauben-Versuche mit einem Querschnitt von L120x12 ( $h=b=120\text{mm}$ ,  $t=12\text{mm}$ ) ausgeführt. In Abb. 2-1 ist eine Übersicht der verwendeten Profile vor und in Abb. 2-2 nach der Versuchsdurchführung ersichtlich. Die Profile wurden aus den Stahlsträngen A - E geschnitten. Die Bezeichnungen und Längen der einzelnen Profile sind in der angeführten Tabelle 2-1 ersichtlich. Fünf der Proben (Abb. 2-1 ,links oben, Bezeichnung A-E) wurden nur zur Ermittlung der Materialkennwerte verwendet (Fließgrenze, E-Modul).

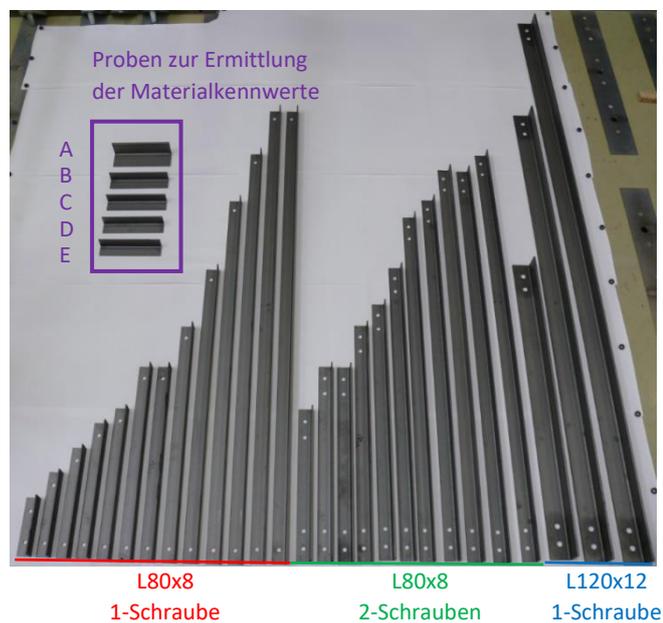


Abb. 2-1: Versuchskörper vor Versuchsdurchführung

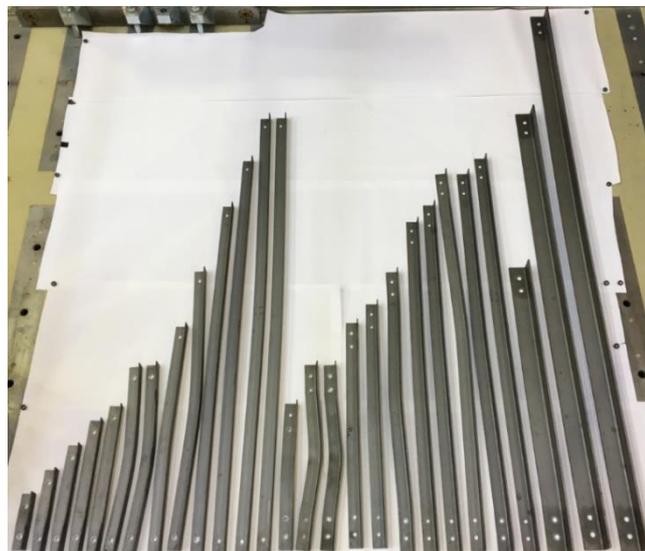


Abb. 2-2: Versuchskörper nach Versuchsdurchführung

Die Tabelle. 2-1 zeigt die genaue Bezeichnung der einzelnen Probekörper und deren unterschiedliche Parameter. Für Profile mit dem Querschnitt L80x8 wurden M20 Schrauben und für Profile mit Querschnitt L120x12 - M27 Schrauben, jeweils der Stahlgüte 10.9, verwendet. Die Lagerungstypen der Endeinspannungen sind mit eingespannt (BC1), Scharnier (BC2) und gelenkig (BC3) definiert. Darauf wird in Detail noch eingegangen (siehe Abb. 2-11). Die Schrauben wurden entweder lt. Hersteller, nach dem modifiziertem Drehmomentverfahren (EN 1993-1-8, [4]) oder „handfest“ angezogen. Details diesbezüglich siehe Abschnitt 2.3.2.

Tabelle. 2-1: Tabellarische Übersicht der Probekörper und dessen verwendete Parameter

Typ	Profilkennung	Querschnitt	L_Stab	S_Anzahl	S_Typ	Lagerungstyp	Vorspannung	
							Typ	Drehmoment M
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[Nm]
A	1A	80x8	1140	2	M20	BC1	2-stufig	340
A	2A	80x8	1820	2	M20	BC1	2-stufig	340
A	3A	80x8	2630	2	M20	BC1	2-stufig	340
A	4A	80x8	870	2	M20	BC2	lt. Hersteller	500
A	5A	80x8	1550	2	M20	BC2	2-stufig	340
A	6A	80x8	2360	2	M20	BC2	2-stufig	340
B	1B	80x8	1410	2	M20	BC3	lt. Hersteller	450
B	2B	80x8	2220	2	M20	BC3	2-stufig	340
B	3B	80x8	2770	2	M20	BC3	2-stufig	340
B	4B	80x8	1140	1	M20	BC1	2-stufig	340
B	5B	80x8	1820	1	M20	BC1	2-stufig	340
C	1C	80x8	3170	1	M20	BC1	2-stufig	340
C	2C	80x8	870	1	M20	BC2	lt. Hersteller	500
C	3C	80x8	2360	1	M20	BC2	2-stufig	340
C	4C	80x8	1410	1	M20	BC3	lt. Hersteller	450
C	5C	80x8	2770	1	M20	BC3	2-stufig	340
D	1D	80x8	1140	2	M20	BC1	handfest	60
D	2D	80x8	2630	2	M20	BC1	handfest	60
D	3D	80x8	1140	1	M20	BC1	handfest	60
D	4D	80x8	3170	1	M20	BC1	handfest	60
D	5D	80x8	320	1	M20	BC3	lt. Hersteller	500
D	6D	80x8	470	1	M20	BC3	lt. Hersteller	500
D	7D	80x8	620	1	M20	BC3	lt. Hersteller	500
D	8D	80x8	770	1	M20	BC3	lt. Hersteller	450
E	1E	120x12	1850	2	M27	BC1	2-stufig	940
E	2E	120x12	3170	2	M27	BC1	2-stufig	940
E	3E	120x12	4200	2	M27	BC1	2-stufig	940

1. Anmerkung: BC1 - eingespannte Lagerung, BC2 - Scharnierlagerung, BC3 - gelenkige Lagerung

## 2.2 Geometrie und Materialkennwerte

Um einen bestmöglichen Vergleich zwischen dieser Studie und anderen numerischen oder bereits vorhandenen literarischen Forschungsprojekten erzielen zu können, müssen die tatsächlichen geometrischen und materialspezifischen Kenngrößen erfasst werden. Erstere entsprechen den Ist-Abmessungen der Winkelprofile sowie den vorhandenen geometrischen Imperfektionen. Letztere beinhalten die Arbeitslinie zum Materialverhalten und insbesondere Fließgrenze und E-Modul.

### 2.2.1 Ermittlung der Imperfektionen und Querschnittsdaten

Die Querschnittsdaten (Ist-Abmessungen des Querschnitts) wurden anhand eines digitalen Messschiebers an beiden Enden jedes Versuchskörpers festgestellt. Dabei wurde je Schenkel zweimal die Dicke  $t$  (für außen  $a$  und innen  $i$ , siehe Abb. 2-3) und einmal die Schenkellänge  $b$  gemessen. Um die Imperfektionen bestimmen zu können, wurden die Versuchskörper auf eine plangeschliffene Metallauflagefläche (Teil des Aufspannfeldes im LKI) gelegt und mittels Fühlerlehre die Abstände zwischen Auflagefläche und Winkel gemessen (Stichmaß der Stabkrümmung). Abb. 2-4 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise der Messungen. Alle Messdaten wurden nummeriert bzw. bezeichnet (Abb. 2-3) und in Tabelle. 2-2 und Tabelle. 2-3 zusammengefasst.

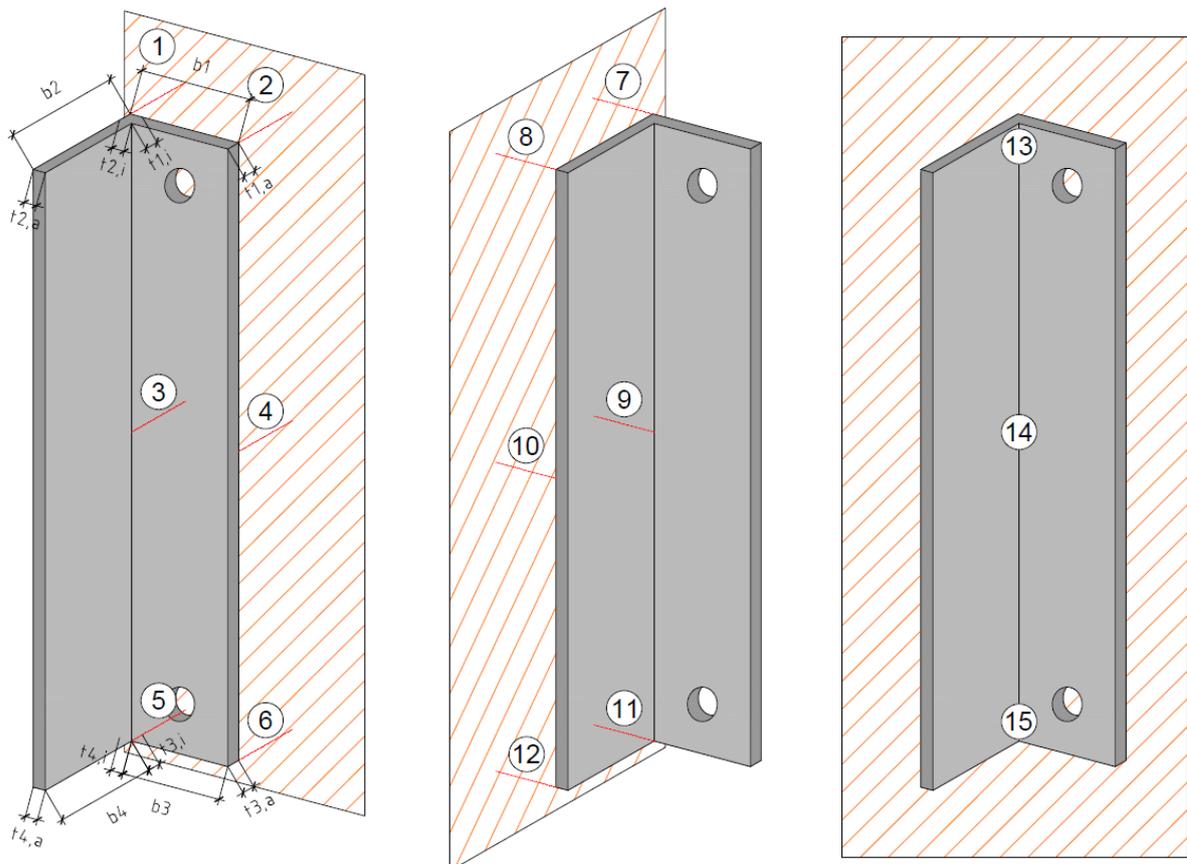


Abb. 2-3: Legende für das Messprotokoll der Imperfektionen und der Geometrie eines Versuchskörpers

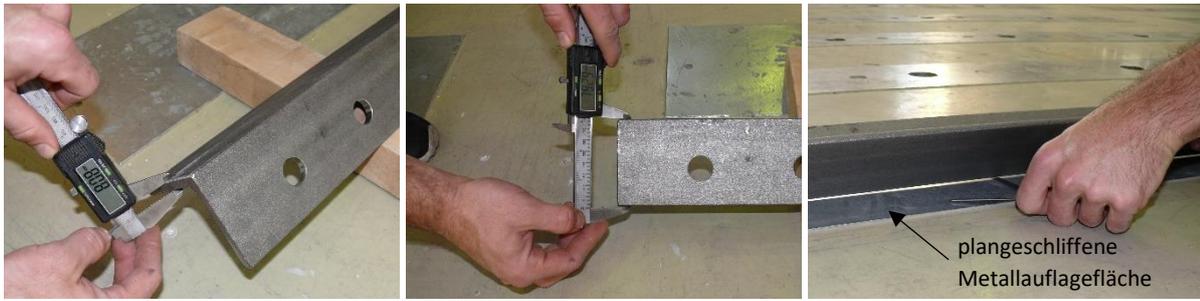


Abb. 2-4: Querschnittsmessung mit Messschieber (links und mittig); Imperfektionsmessung mit Fühlerlehre, Stichmaß in Stabmitte (rechts)

Um einheitliche Querschnittsdaten mit konstanter Schenkeldicke für jeden Versuchskörper zu erhalten, wurden die Messergebnisse an beiden Stabenden gemittelt. Die Dicken  $t_1$  und  $t_3$  wurden zu  $t_{1/3, m}$  und  $t_2$  bzw.  $t_4$  zu  $t_{2/4, m}$  gemittelt. Auch für die Schenkelbreiten wurde das arithmetische Mittel gebildet. So ergeben sich für  $b_1$  und  $b_3$  –  $b_{1/3, m}$  und für  $b_2$  und  $b_4$  –  $b_{2/4, m}$ . Beispielsweise ergibt sich für die Schenkeldicke  $t_{1/3, m}$  bzw. die Schenkelbreite  $b_{1/3, m}$ :

$$t_{1/3, m} = \frac{t_{1,a} + t_{1,i} + t_{3,a} + t_{3,i}}{4} \quad (1)$$

$$b_{1/3, m} = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (2)$$

Tabelle. 2-2: Tabellarische Darstellung der gemessenen Querschnittsabmessungen und deren Mittelwerte sowie der errechneten Querschnittswerte A und  $I_v$

Typ	Profilkennung	Abmessungen															A [cm <sup>2</sup> ]	$I_v$ [cm <sup>4</sup> ]	
		$t_{1,a}$ [mm]	$t_{1,i}$ [mm]	$t_{3,a}$ [mm]	$t_{3,i}$ [mm]	$t_{1/3, m}$ [mm]	$t_{2,a}$ [mm]	$t_{2,i}$ [mm]	$t_{4,a}$ [mm]	$t_{4,i}$ [mm]	$t_{2/4, m}$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_{1/3, m}$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_4$ [mm]			$b_{2/4, m}$ [mm]
A	1A	8.2	8.1	8.3	8.1	<b>8.2</b>	8.2	8.2	8.2	8.3	<b>8.2</b>	80.4	80.7	<b>80.6</b>	80.3	80.2	<b>80.3</b>	12.6	31.0
A	2A	8.2	8.0	8.1	8.0	<b>8.1</b>	8.2	8.2	8.2	8.2	<b>8.2</b>	80.7	80.5	<b>80.6</b>	80.0	80.1	<b>80.1</b>	12.5	30.7
A	3A	8.3	8.0	8.4	8.1	<b>8.2</b>	8.3	8.3	8.3	8.3	<b>8.3</b>	80.6	80.5	<b>80.6</b>	80.2	80.3	<b>80.3</b>	12.7	31.2
A	4A	8.3	8.1	8.2	8.0	<b>8.2</b>	8.2	8.2	8.2	8.2	<b>8.2</b>	80.5	80.5	<b>80.5</b>	80.2	80.0	<b>80.1</b>	12.6	30.8
A	5A	8.2	8.0	8.2	8.0	<b>8.1</b>	8.2	8.2	8.2	8.2	<b>8.2</b>	80.4	80.4	<b>80.4</b>	80.0	80.2	<b>80.1</b>	12.5	30.7
A	6A	8.3	8.1	8.3	8.1	<b>8.2</b>	8.3	8.2	8.2	8.2	<b>8.2</b>	80.3	80.5	<b>80.4</b>	80.3	80.2	<b>80.3</b>	12.6	31.0
B	1B	7.8	7.8	7.8	7.7	<b>7.8</b>	7.8	7.8	7.9	7.8	<b>7.8</b>	79.4	79.4	<b>79.4</b>	79.5	79.6	<b>79.6</b>	11.9	28.6
B	2B	7.9	7.7	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.7	7.8	7.8	<b>7.8</b>	79.4	79.4	<b>79.4</b>	79.7	79.6	<b>79.7</b>	11.9	28.7
B	3B	7.9	7.7	7.9	7.8	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.9	<b>7.9</b>	79.4	79.4	<b>79.4</b>	79.6	79.6	<b>79.6</b>	12.0	28.8
B	4B	7.9	7.7	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.3	79.3	<b>79.3</b>	79.5	79.5	<b>79.5</b>	11.9	28.6
B	5B	7.9	7.7	8.0	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.4	79.4	<b>79.4</b>	79.5	79.6	<b>79.6</b>	11.9	28.7
C	1C	7.9	7.7	7.9	7.8	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.3	79.2	<b>79.3</b>	79.5	79.5	<b>79.5</b>	11.9	28.6
C	2C	7.9	7.8	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.7	<b>7.8</b>	79.2	79.3	<b>79.3</b>	79.4	79.5	<b>79.5</b>	11.9	28.5
C	3C	7.9	7.7	7.9	7.8	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.4	79.3	<b>79.4</b>	79.5	79.5	<b>79.5</b>	11.9	28.7
C	4C	7.9	7.8	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.8	7.8	7.9	7.8	<b>7.8</b>	79.4	79.4	<b>79.4</b>	79.6	79.6	<b>79.6</b>	11.9	28.7
C	5C	7.9	7.8	8.0	7.8	<b>7.9</b>	7.9	7.8	7.9	7.9	<b>7.9</b>	79.4	79.3	<b>79.4</b>	79.6	79.7	<b>79.7</b>	12.0	28.9
D	1D	7.9	7.7	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.8	7.8	7.9	7.8	<b>7.8</b>	79.3	79.3	<b>79.3</b>	79.5	79.6	<b>79.6</b>	11.9	28.6
D	2D	7.9	7.7	7.9	7.8	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.9	<b>7.9</b>	79.3	79.3	<b>79.3</b>	79.6	79.6	<b>79.6</b>	12.0	28.7
D	3D	7.9	7.7	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.3	79.3	<b>79.3</b>	79.6	79.8	<b>79.7</b>	11.9	28.7
D	4D	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	7.9	7.8	7.9	7.9	<b>7.9</b>	79.3	79.3	<b>79.3</b>	79.6	79.5	<b>79.6</b>	12.0	28.8
D	5D	7.8	7.6	7.8	7.8	<b>7.8</b>	7.8	7.7	7.8	7.8	<b>7.8</b>	79.4	79.1	<b>79.3</b>	79.6	79.3	<b>79.5</b>	11.8	28.3
D	6D	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	7.9	7.8	7.9	7.8	<b>7.9</b>	79.2	79.2	<b>79.2</b>	79.5	79.4	<b>79.5</b>	11.9	28.6
D	7D	7.8	7.7	7.8	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.8	7.9	7.7	<b>7.8</b>	79.1	79.2	<b>79.2</b>	79.5	79.4	<b>79.5</b>	11.8	28.4
D	8D	7.9	7.7	7.9	7.7	<b>7.8</b>	7.9	7.7	7.9	7.8	<b>7.8</b>	79.3	79.4	<b>79.4</b>	79.4	79.5	<b>79.5</b>	11.9	28.6
E	1E	12.2	11.9	12.2	11.9	<b>12.1</b>	12.2	11.9	12.1	11.8	<b>12.0</b>	120.3	120.4	<b>120.4</b>	120.2	120.2	<b>120.2</b>	27.6	153.0
E	2E	12.2	12.0	12.2	11.9	<b>12.1</b>	12.1	11.8	12.1	11.9	<b>12.0</b>	120.2	120.1	<b>120.2</b>	120.0	120.0	<b>120.0</b>	27.6	152.2
E	3E	12.1	11.9	12.2	11.9	<b>12.0</b>	12.2	11.8	12.1	11.8	<b>12.0</b>	120.3	120.4	<b>120.4</b>	120.2	120.2	<b>120.2</b>	27.6	152.7

Die geometrischen Imperfektionen der Winkelprofile sind in Tabelle. 2-3 zusammengefasst. Werte in den Spalten M1-M15 entsprechen den Messpunkten 1-15 aus Abb. 2-3. Bei den Angaben zu den Messwerten ist die Lage des Winkelprofils zur „perfekten“ Bezugsebene nach Abb. 2-3 zu beachten. Für die Messungen M1-M6 lag einer der Schenkel auf, für die Messungen M7-M12 der andere und für die Messungen M13-M15 lag nur die Winkelkante auf. Punkte bei denen keine Verformung feststellbar war (an diesen Punkten lag das Profil auf der ebenen Fläche direkt auf), wurden zur besseren Übersicht grau hinterlegt.

Tabelle. 2-3: Messwerte der Imperfektionen der Vorverformungen bzw. Vorkrümmungen

Typ	Profilkennung	Imperfektionen - Vorverformungen														
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A	1A	0.00	0.55	0.40	0.70	0.00	0.20	0.00	0.10	0.35	0.45	0.00	0.45	0.00	0.35	0.00
A	2A	0.00	0.15	1.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.10	1.20	1.55	0.00	0.30	0.00	1.45	0.00
A	3A	0.00	0.45	1.35	1.80	0.00	0.00	0.05	0.05	1.15	1.20	0.00	0.50	0.00	1.60	0.00
A	4A	0.00	0.30	0.20	0.30	0.00	0.20	0.00	0.15	0.25	0.55	0.00	0.10	0.00	0.25	0.00
A	5A	0.00	0.35	0.90	1.20	0.00	0.05	0.00	0.10	0.70	0.95	0.00	0.45	0.00	1.15	0.00
A	6A	0.00	0.05	1.45	1.40	0.00	0.05	0.00	0.10	1.10	1.30	0.00	0.15	0.00	1.20	0.00
B	1B	0.00	0.25	0.55	0.70	0.00	0.10	0.05	0.25	0.50	0.70	0.00	0.30	0.00	0.65	0.00
B	2B	0.00	0.15	1.10	1.05	0.00	0.05	0.00	0.20	1.20	1.40	0.00	0.25	0.00	1.35	0.00
B	3B	0.00	0.20	2.10	2.05	0.00	0.05	0.10	0.15	1.05	1.25	0.00	0.20	0.00	1.85	0.00
B	4B	0.00	0.20	0.30	0.45	0.00	0.20	0.05	0.25	0.25	0.55	0.00	0.35	0.00	0.35	0.00
B	5B	0.00	0.25	0.85	0.80	0.00	0.10	0.00	0.20	1.15	1.45	0.00	0.25	0.00	1.15	0.00
C	1C	0.00	0.10	1.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.15	1.10	1.25	0.00	0.15	0.00	1.05	0.00
C	2C	0.00	0.15	0.20	0.35	0.00	0.20	0.00	0.35	0.20	0.40	0.10	0.15	0.00	0.25	0.00
C	3C	0.00	0.20	1.05	1.20	0.00	0.05	0.00	0.15	0.70	0.90	0.00	0.10	0.00	1.05	0.00
C	4C	0.00	0.10	0.45	0.55	0.00	0.05	0.00	0.10	0.15	0.35	0.00	0.20	0.00	0.30	0.00
C	5C	0.00	0.15	0.80	0.65	0.00	0.20	0.00	0.15	0.75	0.85	0.00	0.15	0.00	0.70	0.00
D	1D	0.00	0.25	0.55	0.60	0.00	0.10	0.05	0.20	0.30	0.60	0.00	0.30	0.00	0.60	0.00
D	2D	0.00	0.90	1.55	2.10	0.00	0.60	0.05	0.15	1.00	1.20	0.00	0.20	0.00	1.35	0.00
D	3D	0.00	0.30	0.45	0.85	0.00	0.15	0.15	0.30	0.25	0.35	0.00	0.45	0.00	0.40	0.00
D	4D	0.00	0.25	2.55	2.15	0.00	0.00	0.05	0.10	0.65	0.85	0.00	0.20	0.00	1.45	0.00
D	5D	0.00	0.75	0.05	0.60	0.05	0.55	0.00	0.25	0.00	0.15	0.00	0.30	0.00	0.05	0.00
D	6D	0.00	0.30	0.10	0.25	0.10	0.25	0.00	0.25	0.00	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00
D	7D	0.00	0.20	0.10	0.20	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15	0.35	0.05	0.10	0.00	0.10	0.00
D	8D	0.00	0.15	0.25	0.45	0.00	0.05	0.00	0.20	0.10	0.30	0.00	0.30	0.00	0.20	0.00
E	1E	0.00	0.10	0.75	0.60	0.00	0.00	0.05	0.30	0.80	1.00	0.00	0.20	0.00	1.10	0.00
E	2E	0.00	0.00	2.85	2.75	0.00	0.00	0.10	0.00	1.95	1.95	0.00	0.10	0.00	2.70	0.00
E	3E	0.00	0.00	1.30	1.40	0.00	0.00	0.00	0.10	2.65	2.70	0.05	0.25	0.00	2.60	0.00

Die maximale Imperfektion in Form einer Verkrümmung der Längsachse  $e_{imp}$  wurde mit nachfolgender Gl. (3) nach Abb. 3-10 ermittelt und in Tabelle. 2-4 dargestellt. Die Parameter M3 und M9 der Formel beziehen sich auf die Messwerte aus Tabelle. 2-3. Die Interpolation der Größe  $e_{imp}$  zeigt die Abb. 3-10.

$$e_{imp} = \sqrt{M3^2 + M9^2} * \cos\left(\frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\frac{M9}{M3}\right) \quad (3)$$

Die Werte  $e_{imp}$  stimmen weitgehend mit dem Stichmaß der Profilkante (Messwert M14) überein. Das Verhältnis zur Profillänge wurde mit  $L_{System}/e_{imp}$  dargestellt. Die maximale Vorkrümmung liegt bei lediglich  $L_{System}/946$  und ist somit deutlich geringer als die erlaubte Verformung von  $e_0 = L/750$  (lt. EN 1090-2, [7]). Die Endergebnisse zu den Querschnittsabmessungen und den Imperfektionen sind in Tabelle. 2-4 ersichtlich.

Tabelle. 2-4: Tabellarische Zusammenfassung der Querschnittsimperfektionen und Vorkrümmungen

Typ	Profilkennung	Querschnitt	$L_{stab}$	$L_{system}^2$	Lagerungstyp	$t_{1/3,m}$	$t_{2/4,m}$	$b_{1/3,m}$	$b_{2/4,m}$	$e_{imp}$	$L_{system}/e_{imp}$
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
A	1A	80x8	1140	1180	BC1	8.2	8.2	80.6	80.3	0.53	2225
A	2A	80x8	1820	1860	BC1	8.1	8.2	80.6	80.1	1.56	1196
A	3A	80x8	2630	2670	BC1	8.2	8.3	80.6	80.3	1.77	1510
A	4A	80x8	870	1085	BC2	8.2	8.2	80.5	80.1	0.32	3410
A	5A	80x8	1550	1765	BC2	8.1	8.2	80.4	80.1	1.13	1560
A	6A	80x8	2360	2575	BC2	8.2	8.2	80.4	80.3	1.80	1428
B	1B	80x8	1410	1490	BC3	7.8	7.8	79.4	79.6	0.74	2007
B	2B	80x8	2220	2300	BC3	7.8	7.8	79.4	79.7	1.63	1414
B	3B	80x8	2770	2850	BC3	7.8	7.9	79.4	79.6	2.23	1280
B	4B	80x8	1140	1180	BC1	7.8	7.9	79.3	79.5	0.39	3034
B	5B	80x8	1820	1860	BC1	7.8	7.9	79.4	79.6	1.41	1315
C	1C	80x8	3170	3210	BC1	7.8	7.9	79.3	79.5	1.48	2162
C	2C	80x8	870	1085	BC2	7.8	7.8	79.3	79.5	0.28	3836
C	3C	80x8	2360	2575	BC2	7.8	7.9	79.4	79.5	1.24	2081
C	4C	80x8	1410	1490	BC3	7.8	7.8	79.4	79.6	0.42	3512
C	5C	80x8	2770	2850	BC3	7.9	7.9	79.4	79.7	1.10	2600
D	1D	80x8	1140	1180	BC1	7.8	7.8	79.3	79.6	0.60	1963
D	2D	80x8	2630	2670	BC1	7.8	7.9	79.3	79.6	1.80	1481
D	3D	80x8	1140	1180	BC1	7.8	7.9	79.3	79.7	0.49	2384
D	4D	80x8	3170	3210	BC1	7.9	7.9	79.3	79.6	2.26	1419
D	5D	80x8	320	400	BC3	7.8	7.8	79.3	79.5	0.04	11314
D	6D	80x8	470	550	BC3	7.9	7.9	79.2	79.5	0.07	7778
D	7D	80x8	620	700	BC3	7.8	7.8	79.2	79.5	0.18	3960
D	8D	80x8	770	850	BC3	7.8	7.8	79.4	79.5	0.25	3435
E	1E	120x12	1850	1890	BC1	12.1	12.0	120.4	120.2	1.10	1724
E	2E	120x12	3170	3210	BC1	12.1	12.0	120.2	120.0	3.39	946
E	3E	120x12	4200	4240	BC1	12.0	12.0	120.4	120.2	2.79	1518

1. Anmerkung: BC1 - eingespannte Lagerung, BC2 - Scharnierlagerung, BC3 - gelenkige Lagerung
2.  $L_{system\_BC1} = L_{stab} + 40$  mm;  $L_{system\_BC2} = L_{stab} + 215$  mm;  $L_{system\_BC3} = L_{stab} + 80$  mm (Näherungswerte)

## 2.2.2 Ermittlung der Materialkennwerte

In weiterer Folge wurden die Materialparameter ermittelt. Es wurde aus jedem Versuchsstrang (A – E) ein Teilstück zur Bestimmung dieser Werte vorbehalten (siehe Abb. 2-5, links). Aufgrund der Annahme, dass sich die Festigkeitsparameter im Eck- bzw. Schenkelbereich unterscheiden könnten, wurden drei Flächen A1-A3 definiert (siehe Abb. 2-5, mittig). Diese wurden dann für die Zugversuche (nach EN ISO 6892-1, [6]) zugeschnitten. Pro Teilstück wurden somit eine Rundprobe aus dem Eckbereich und zwei Flachzugproben, eine je Schenkel, verwendet. Die fertigen Probenkörper sind in Abb. 2-5 - rechts ersichtlich.

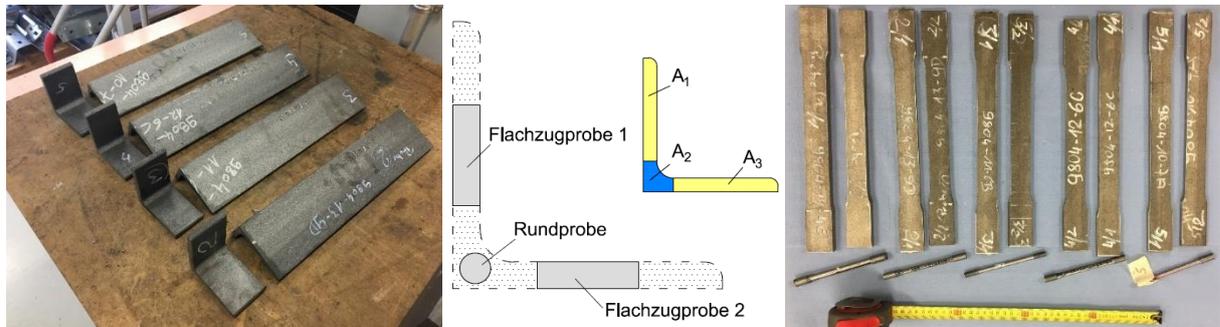


Abb. 2-5: Übersicht der Proben A bis E (links), Flächenaufteilung (mittig), fertige Probenkörper für Zugproben (rechts)

Aufgrund der unterschiedlichen Probenstärken wurden die Zugversuche an verschiedenen Maschinen durchgeführt (Durchführung am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung). Für die Rundproben wurde die kleinere Maschine mit Gewindeaufnahme verwendet. Um die Materialkennwerte messen zu können, wurde ein induktiver Dehnungsmesser aufgebracht. Das linke Bild in Abb. 2-6 zeigt den Versuchsaufbau vor der Durchführung, das Bild rechts in Abb. 2-6 danach. Im Anschluss sind alle Rundproben nach Versuchsdurchführung (Abb. 2-7) und die zugehörige Auswertung (Diagramm 2-1/Tabelle. 2-5) ersichtlich. Die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Verläufe wurden für alle 5 Proben in ein Diagramm eingetragen (Diagramm 2-1) und die erreichten Maximalwerte in Tabelle. 2-5 zusammengefasst. Die Laststeigerung in den Zugversuchen wurde mit 1mm/min festgelegt.



Abb. 2-6: Versuchsaufbau Zugversuch mit Rundprobe (links), Probekörper nach Versagen (rechts)



Abb. 2-7: Rundproben nach Versuchsdurchführung der Zugversuche

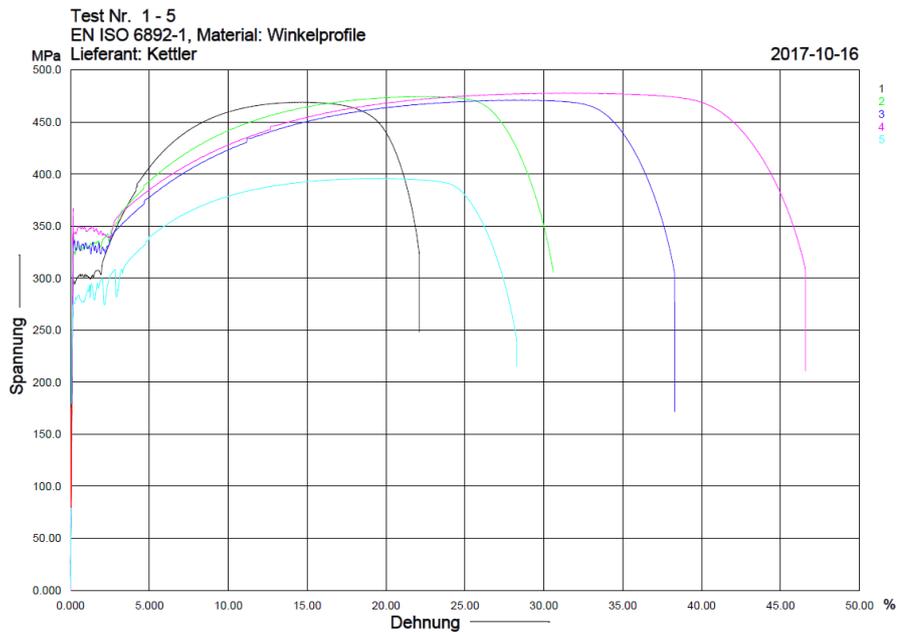


Diagramm 2-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugversuche mit Rundproben

Tabelle. 2-5: Tabellarische Zusammenfassung der Materialparameter zu den Zugversuchen der Rundproben

**Legende**

d.....Durchmesser  
 S0.....Querschnittsfläche  
 Fm.....Höchstkraft  
 Rm.....Zugfestigkeit  
 ReH.....Obere Streckgrenze  
 Rp0.2.....0.2% Dehngrenze  
 E.....E-Modul  
 Agt.....Gesamte Dehnung bei Höchstkraft  
 Kommentar.....Kommentar  
 Stahlgüte.....S235

<b>Probe E</b> Richtung: Probe 1, 9804-14-4E									
Test Nr.	d mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	Rm MPa	ReH MPa	Rp0.2 MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
1	8.620	58.36	27.38	469.1	296.1	297.6	200.0	14.72	Probe Nr.: 1, A5= 40,00 %
<b>Probe D</b> Richtung: Probe 2, 9804-13-9D									
Test Nr.	d mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	Rm MPa	ReH MPa	Rp0.2 MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
2	6.930	37.72	17.90	474.5	340.7	327.0	210.7	22.50	Probe Nr.: 2, A5= 32,71 %
<b>Probe B</b> Richtung: Probe 3, 9804-11-6B									
Test Nr.	d mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	Rm MPa	ReH MPa	Rp0.2 MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
3	6.070	28.94	13.63	471.1	340.7	327.6	186.8	28.60	Probe Nr.: 3, A5= 34,90 %
<b>Probe C</b> Richtung: Probe 4, 9804-12-6C									
Test Nr.	d mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	Rm MPa	ReH MPa	Rp0.2 MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
4	7.230	41.06	19.62	477.9	367.0	342.4	217.7	31.82	Probe Nr.: 4, A5= 39,66 %
<b>Probe A</b> Richtung: Probe 5, 9804-10-7A									
Test Nr.	d mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	Rm MPa	ReH MPa	Rp0.2 MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
5	6.550	33.70	13.33	395.7	281.7	281.0	232.6	19.49	Probe Nr.: 5, A5= 34,66 %

Die Zugversuche der Flachzugproben wurden an der größeren Maschine mit Backenaufnahme durchgeführt. Es wurden ebenso Dehnmessmer aufgebracht. Das Bild links in Abb. 2-8 zeigt den Versuchsaufbau mit aufgebrachtem Dehnmessmer. Die Teilstriche sind in einem Abstand von 10mm aufgebracht. Die mittige Darstellung in Abb. 2-8 zeigt die Brucheinschnürung des Versuchskörpers kurz vor Versagenseintritt. Der eigentliche Bruch tritt dann schlagartig auf. In der rechten Abbildung (Abb. 2-8, rechts) ist das Bruchbild der Zugprobe deutlich erkennbar.

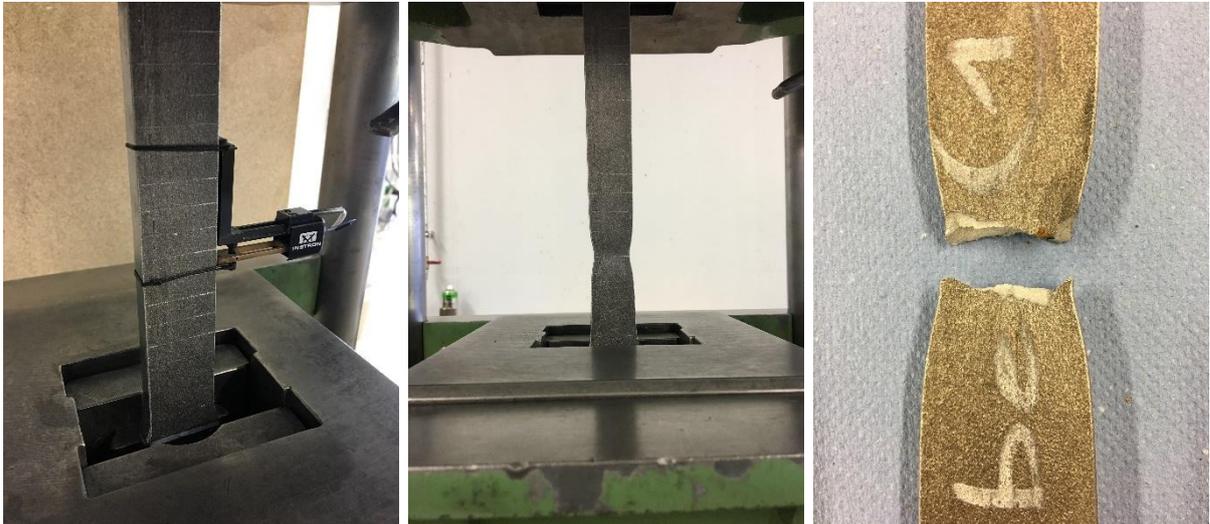


Abb. 2-8: Versuchsaufbau der Flachzugprobe (links), Brucheinschnürung kurz vor Versagenseintritt (mittig), Probekörper mit Bruchbild nach Versagen (rechts)

In der unten angeführten Grafik sind noch einmal zur Übersicht alle Flachzugproben nach deren Versuchsdurchführung ersichtlich (Abb. 2-9, links). Ein detailliertes Bruchbild mit Brucheinschnürung ist ebenso dargestellt (siehe Abb. 2-9, rechts, Test Nr. 1 – Probe E). Diagramm 2-2 zeigt die Arbeitslinie für Test Nr. 1 – Probe E. Tabelle. 2-6 zeigt die Auswertung aller Flachzugproben.



Abb. 2-9: Flachzugproben nach Versuchsdurchführung, Proben A-E (links), detailliertes Bruchbild (rechts)

**Test Nr. 1**  
**EN ISO 6892-1, Material: Winkelprofile**

2017-10-16

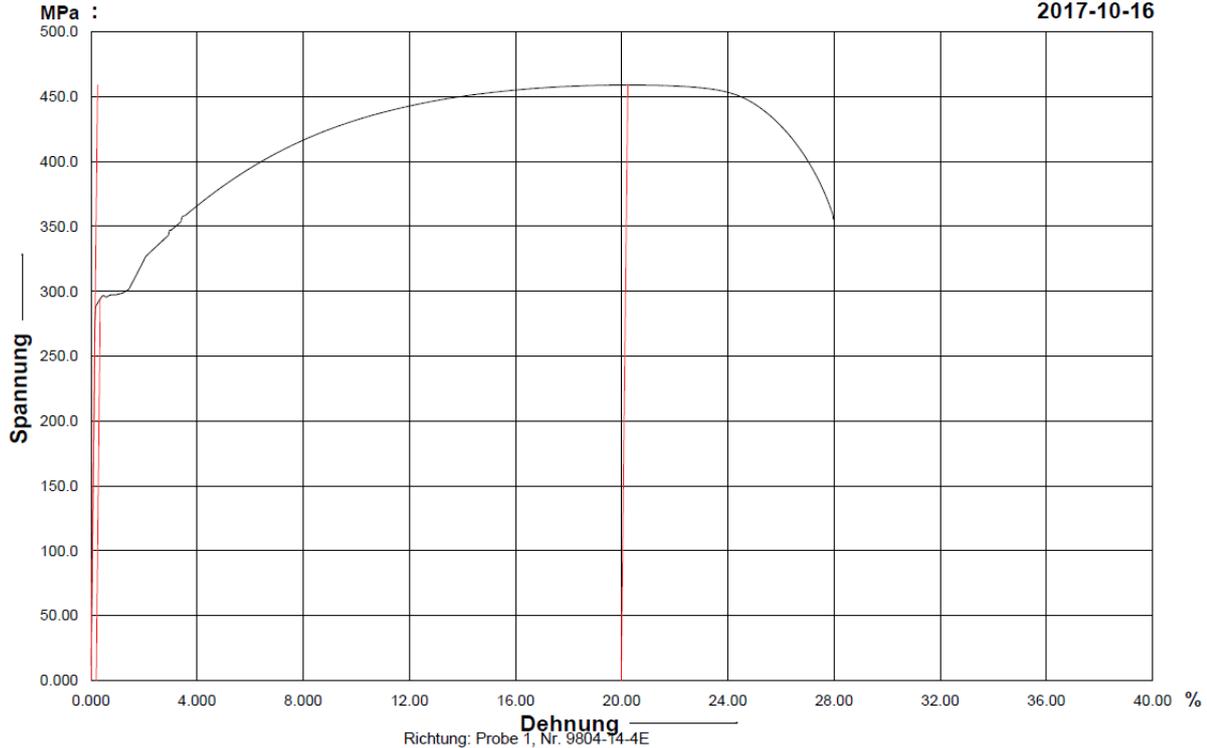


Diagramm 2-2: Auswertung Zugversuch Flachprobe in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm (für Test Nr. 1 – Probe E exemplarisch)

Tabelle. 2-6: Tabellarische Zusammenfassung der Materialparameter für alle 10 Flachzugproben

**Legende**

a.....	Dicke	Rp0.2.....	0.2% Dehngrenze
b.....	Breite	Rm.....	Zugfestigkeit
S0.....	Querschnittsfläche	E.....	E-Modul
Fm.....	Höchstkraft	Agt.....	Gesamte Dehnung bei Höchstkraft
ReH.....	Obere Streckgrenze	Kommentar.....	Kommentar

**Probe E** Richtung: Probe 1, Nr. 9804-14-4E

Test Nr.	a mm	b mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	ReH MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
1	12.15	32.54	395.4	181.5	n.a.	294.2	459.0	185.3	20.23	Probe Nr.: 1/1, A5= 31,57 %
2	11.85	27.15	321.7	151.2	n.a.	303.7	469.9	195.7	17.25	Probe Nr.: 1/2, A5= 31,17 %

**Probe D** Richtung: Probe 2, Nr. 9804-13-9D

Test Nr.	a mm	b mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	ReH MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
3	7.880	28.64	225.7	103.9	319.3	317.7	460.4	197.0	19.33	Probe Nr.: 2/1, A5= 33,67 %
4	7.900	28.64	226.3	104.0	316.4	318.3	459.7	184.8	19.31	Probe Nr.: 2/2, A5= 34,81 %

**Probe B** Richtung: Probe 3, Nr. 9804-11-6B

Test Nr.	a mm	b mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	ReH MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
5	7.890	28.60	225.7	105.5	321.9	321.5	467.6	201.1	19.27	Probe Nr.: 3/1, A5= 33,01 %
6	7.880	28.50	224.6	104.4	324.8	324.7	464.8	204.1	19.05	Probe Nr.: 3/2, A5= 33,44 %

**Probe C** Richtung: Probe 4, Nr. 9804-12-6C

Test Nr.	a mm	b mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	ReH MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
7	7.900	28.80	227.5	106.4	325.6	325.4	467.8	208.1	19.46	Probe Nr.: 4/1, A5= 35,10 %
8	7.920	28.35	224.5	104.7	325.7	321.6	466.1	206.3	18.71	Probe Nr.: 4/2, A5= 34,91 %

**Probe A** Richtung: Probe 5, Nr. 9804-10-7A

Test Nr.	a mm	b mm	S0 mm <sup>2</sup>	Fm kN	ReH MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	E GPa	Agt %	Kommentar
9	8.290	28.29	234.5	92.81	297.0	297.8	395.8	210.1	23.20	Probe Nr.: 5/1, A5= 37,99 %
10	8.300	28.30	234.9	92.37	286.9	277.6	393.2	204.6	20.77	Probe Nr.: 5/2, A5= 36,55 %

Die unten angeführte Tabelle. 2-7 fasst die signifikanten Materialkennwerte aus den Zugversuchen zusammen sowie die daraus abgeleiteten Kennwerte für jedes Einzelprofil (A-E). Nach dem Anteil der Flächen A1-A3 (siehe Abb. 2-5, mittig) wurde die Fließgrenze und der E-Modul für jedes Profil arithmetisch gemittelt. Die in den letzten beiden Spalten dargestellten Werte wurden dann in den durchgeführten FE-Berechnungen als Materialkennwerte des Profils implementiert.

Tabelle. 2-7: Tabellarische Zusammenfassung der E-Module und der Fließgrenzen je Profiltyp A-E

## Materialkennwerte

Proben_Nr	Versuchstyp	Typ <sup>2</sup>	Höchstkraft	Fließgrenze	0.2% Dehngrenze	Zugfestigkeit	E-Modul	Flächen anteilig			E-Modul	Fließgrenze
			Fm	ReH	Rp0.2	Rm	E	A1	A2	A3	gewichtet Mittel	gewichtet Mittel
[-]	[-]	[-]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1/1	Flachzug		181.5	296 <sup>1</sup>	294	459	185 300	1 141				
1/2	Flachzug	E	151.2	304 <sup>1</sup>	304	470	195 700		486		192 156	299
1	Rundstab		27.4	296	298	469	200 000			1 132		
2/1	Flachzug		103.9	319	318	460	197 000	474				
2/2	Flachzug	D	104.0	316	318	460	184 800		237		194 818	322
2	Rundstab		17.9	341	327	475	210 700			479		
3/1	Flachzug		105.5	322	322	468	201 100	477				
3/2	Flachzug	B	104.4	325	325	465	204 100		238		199 458	327
3	Rundstab		13.6	341	328	471	186 800			479		
4/1	Flachzug		106.4	326	325	468	208 100	475				
4/2	Flachzug	C	104.7	326	322	466	206 300		237		209 284	334
4	Rundstab		19.6	367	342	478	217 700			480		
5/1	Flachzug		92.8	297	288	396	210 100	502				
5/2	Flachzug	A	92.4	287	278	393	204 600		250		212 368	290
5	Rundstab		13.3	282	281	396	232 600			506		

1. Anmerkung: Die Messwerte wurden händisch aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermittelt

2. Anmerkung: Vgl. Tabelle 2-4

## 2.3 Versuchsaufbau

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf den Aufbau und die Durchführung der Versuche eingegangen. Die Vorgänge sind grundsätzlich bei allen Versuchen identisch.

### 2.3.1 Anschlussbleche und Lagerungsbedingungen

Die 27 Versuche wurden, wie bereits erwähnt, in 14 Versuche mit zwei Schrauben je Stabende und 13 Versuche mit je einer Schraube unterteilt (siehe Tabelle. 2-1). Des Weiteren wurden drei verschiedene Lagerungsbedingungen (Abb. 2-11) definiert. Es wurden Kopfplatten mit einer Stärke von 20mm an die jeweiligen Knotenbleche mit einer Stärke von 25mm angeschweißt (die genauen Abmessungen können aus Abb. 2-10 entnommen werden). Die Stärke der Knotenbleche wurde speziell aufgrund der Lagerungsbedingung BC1 (eingespannt) auf 25mm festgelegt, um eine gewisse Stabilität und Steifigkeit der Anschlussbleche zu erzielen und rein elastisches Verhalten im Knotenblech zu garantieren. Für die beiden anderen Lagerungsbedingungen (BC2-Scharnier und BC3-gelenkig) ist die hohe Biegesteifigkeit des Anschlussblechs nicht so entscheidend, aber ebenfalls gegeben.

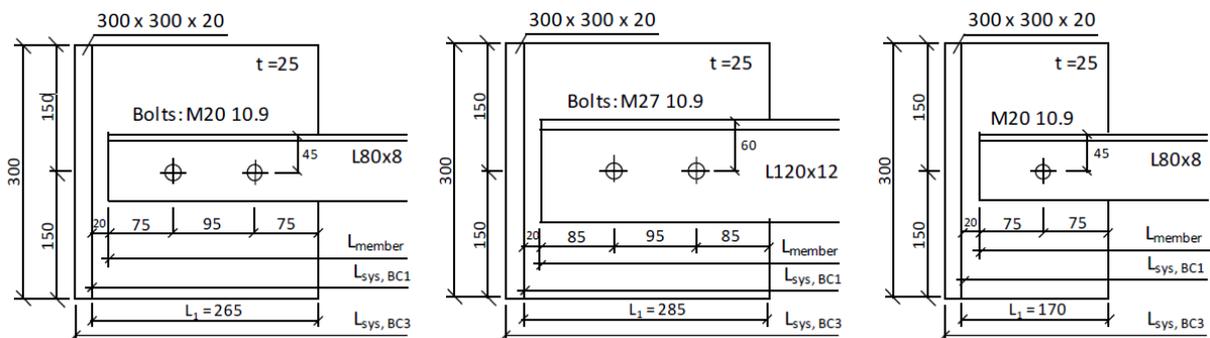
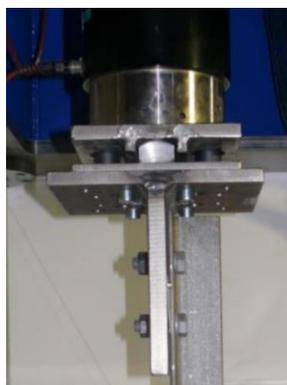


Abb. 2-10: Geometrische Abmessungen der Anschlussbleche



BC1 - eingespannt



BC2 - Scharnier



BC3 - gelenkig

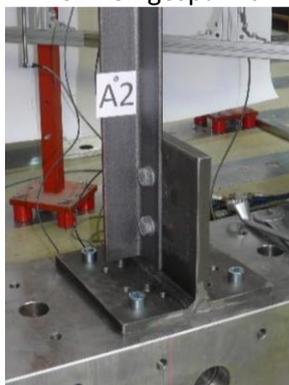


Abb. 2-11: Darstellung der Verschiedenen Lagerungsbedingungen: BC1 – eingespannt, BC2 – Scharnier, BC3 - gelenkig

Für die eingespannte Lagerung (BC1) wurden die Anschlusssteile (Knotenblech und Endplatte) lediglich an den oben angeordneten Druckzylinder bzw. den unten liegenden Auflagerblock angeschraubt. Der Gelenkpunkt für die Systemlänge ergibt sich bei eingespannter Lagerung somit am Ende des Anschlussbleches. Bei der Scharnierlagerung (BC2) und der gelenkigen Lagerung (BC3) wurden spezielle Zwischenstücke verwendet. Die Scharnierlagerung wurde oben mittels einer geschweißten Kippleiste (siehe Abb. 2-12) bewerkstelligt. An dieses Zwischenstück wurden dann die Anschlusssteile befestigt.

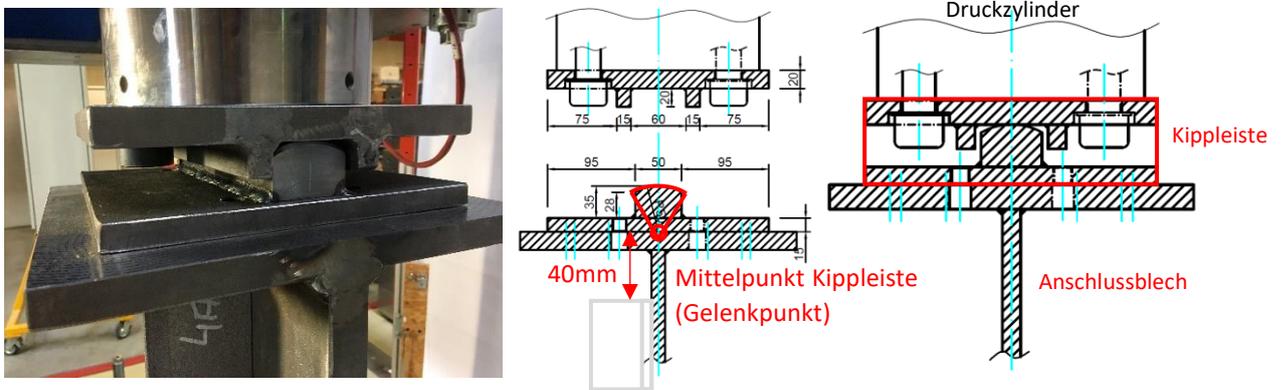


Abb. 2-12: Darstellung der Kippleiste am Druckzylinder oben - BC2 - Scharnier

Unten wurde eine spezielle Scharnierlagerung (siehe Abb. 2-13) verwendet. Diese ermöglicht die Drehung um einen genau vordefinierten Drehpunkt. Zur Verbesserung der Drehbarkeit wurde die Auflagerschale mit einer Schmierpaste eingefettet.

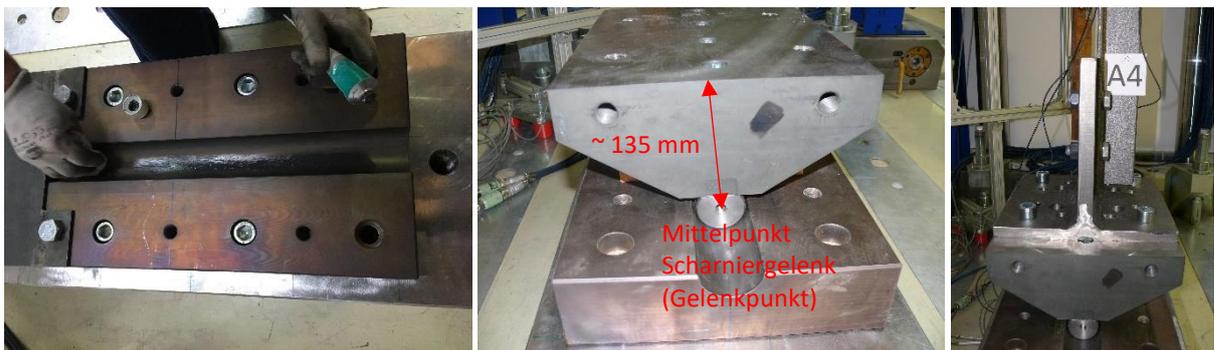


Abb. 2-13: Darstellung der Scharnierlagerung unten - BC2 - Scharnier

Die gelenkige Lagerung (BC3) erfolge über sphärische Druckplatten (siehe Abb. 2-14). Diese sollten eine freie Verdrehung der Anschlussprofile um alle drei Achsen ermöglichen.

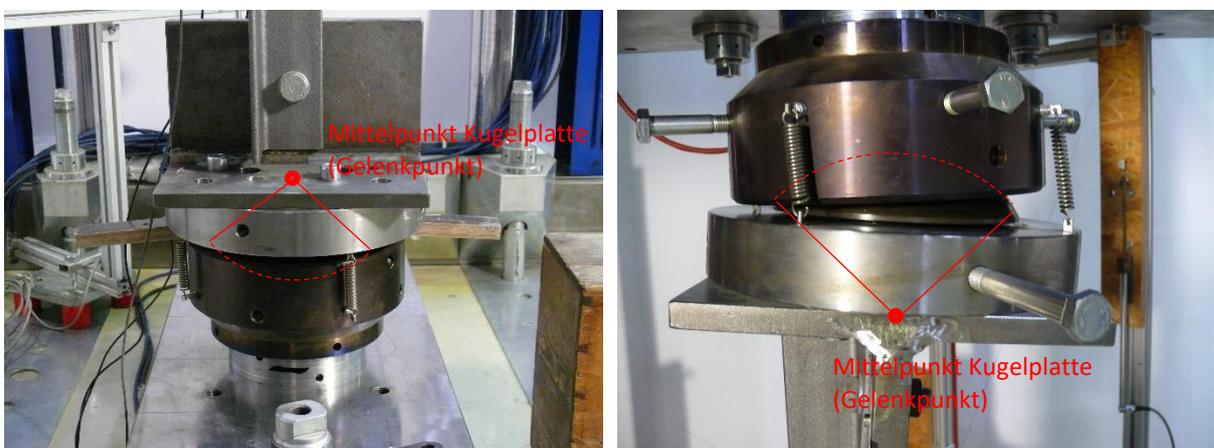


Abb. 2-14: Darstellung der sphärischen Druckplatten oben und unten - BC3 - gelenkig

Durch die spezifische Ausführung der eingespannten Lagerung (BC1), Scharnierlagerung (BC2) und der Gelenklagerung (BC3) ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen Stablänge  $L_{\text{Stab}}$  des Winkelprofils und der Systemlänge  $L_{\text{System}}$ :

- BC1:  $L_{\text{System}} = L_{\text{Stab}} + 2 \times 20 \text{ mm}$   $= L_{\text{Stab}} + 40 \text{ mm}$
- BC2:  $L_{\text{System}} = L_{\text{Stab}} + 2 \times 20 \text{ mm} + 2 \times 20 \text{ mm} + 135 \text{ mm}$   $= L_{\text{Stab}} + 215 \text{ mm}$
- BC3:  $L_{\text{System}} = L_{\text{Stab}} + 2 \times 20 \text{ mm} + 2 \times 20 \text{ mm}$   $= L_{\text{Stab}} + 80 \text{ mm}$

### 2.3.2 Vorspannen der Schrauben

Die Schrauben wurden nach den vorgegebenen Drehmomenten  $M$  (siehe Tabelle. 2-1) vorgespannt. Vorweg wurden die Schrauben mit einem Gabelschlüssel angezogen, um ein Verrutschen bzw. Verdrehen des Winkels zu verhindern. Danach wurden das erforderliche Drehmoment am Drehmomentschlüssel eingestellt und aufgebracht.



Abb. 2-15: Aufbringen der Vorspannkraft mittels Drehmomentschlüssel

Folgende unterschiedliche Anziehverfahren der Schrauben wurden angewendet: Für die „handfeste“ Vorspannung wurde lt. Norm (EN 1090-2, [7]) ein Drehmoment von 60Nm verwendet. Bei der Vorspannung „lt. Hersteller“ (siehe Tabelle. 2-1) wurde das vorgegebene Drehmoment (Angabe auf der Verpackung der Schrauben) auf einmal (einstufig) aufgebracht. Ansonsten wurde – entsprechend der Vorgaben für vollständige Vorspannung nach EN 1090-2, [7] - „2-stufig“ vorgespannt. Dabei wurde lt. Norm (EN 1090-2, [7]) das dafür vorgesehene kombinierte Verfahren angewendet. Zunächst wird ein Drehmoment von 340Nm (M20) bzw. 940Nm (M27) aufgebracht. Im zweiten Schritt wird die Mutter um 60° (Weiterdrehwinkel) weitergedreht. Um dies zu messen wurden vorweg Markierungen (siehe Abb. 2-16) an den Muttern und dem Knotenblech angebracht und die Mutter anschließend um 60° weitergedreht. Idealerweise entsprechen die 60° genau dem Verdrehen um eine Kante der Sechskantmutter.



Abb. 2-16: Kombiniertes Vorspannverfahren – links vor, rechts nach dem Weiterdrehen

### 2.3.3 Messeinrichtungen in Stabmitte anbringen

Ein sehr entscheidender Teil um zutreffende Ergebnisse zu erhalten, ist die ordnungsgemäße Messung während der Versuchsdurchführung. Die Dehnungen bzw. Stauchungen der Profile wurden mittels DD1 Dehnmessern (Abb. 2-17, rechts - DD1) und die Verformungen mittels induktiver Wegaufnehmer (Abb. 2-17, rechts -  $w_1$ - $w_3$  und  $w_\varphi$ ) in Stabmitte gemessen. Die Dehnmessern wurden mit Spannklemmen am Profil befestigt. Diese messen die Längsdehnung im Stahlwinkel über die Längenänderung eines vorgegebenen Messbereiches. Die Toleranz der Messeinrichtungen beträgt für die Wegaufnehmer etwa  $\pm 0.2\text{mm}$  und für die Dehnmessern etwa  $\pm 0.00125\text{mm}$ . Um die Verformung des Winkelprofils in alle Richtungen messen zu können, wurde eine spezielle Konstruktion angebracht. Am Eck des Winkels wurde ein rechtwinkeliges Metallstück mit zusätzlichem Stäbchen starr befestigt. An der Oberseite dieses Metallstücks wurden dehnstarre Schnüre befestigt, welche die Achsen ( $w_1$ - $w_3$ ) darstellen. Diese Schnüre führen über starre Umlenkrollen im Raum zu den Wegaufnehmern und messen so die räumliche Verformung des Winkels. Die Achsen  $w_1$  und  $w_2$  sind genau orthogonal zu den Winkelschenkeln angeordnet. Die Achse  $w_3$  weist genau eine Neigung von  $45^\circ$  zur horizontalen Ebene (aufgespannt durch  $w_1$  und  $w_2$ ) und einen Winkel von  $45^\circ$  zu den beiden anderen Achsen  $w_1$  bzw.  $w_2$  auf. Somit kann nun die Stabverschiebung im Punkt  $P$  gemessen werden. Die Verdrehung des Winkels wird über das zusätzliche Stäbchen gemessen (Messwert  $w_\varphi$ ). Dies liegt in der horizontalen Ebene mit einem Winkel von  $45^\circ$  zu den beiden Achsen  $w_1$  bzw.  $w_2$ .

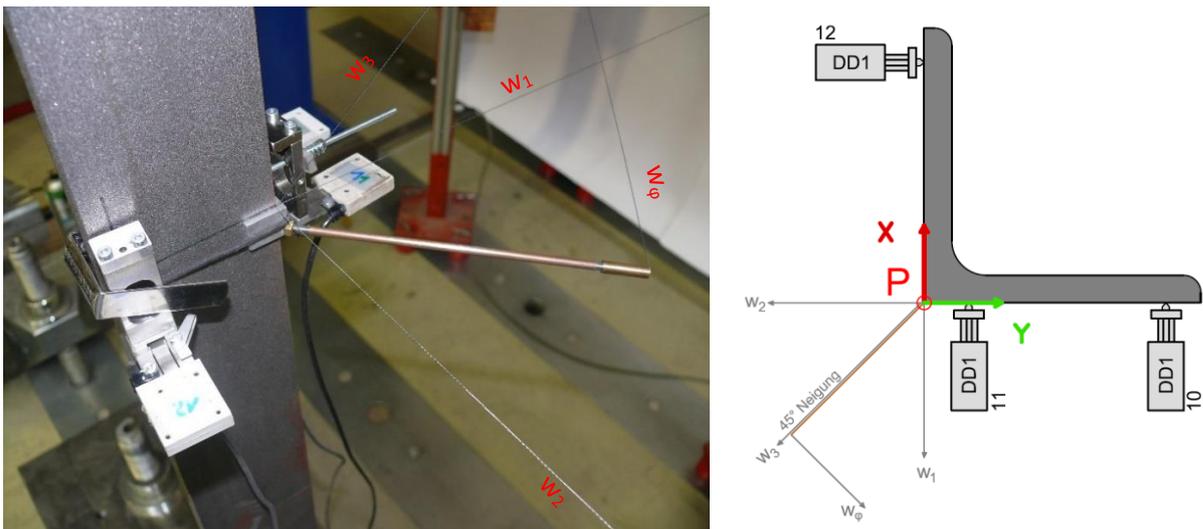


Abb. 2-17: Darstellung der Messeinrichtungen für die Verformungs- und Dehnungsmessung eines Winkels (Lage in Stabmitte des Winkelprofils)

## 2.4 Auswertung der Messschnurverformungen

### a. Allgemein

Die vier in Abb. 2-17 dargestellten Messschnüre dienen dazu, die verformte Lage des Profilquerschnitts in Stabmitte genau zu bestimmen. Es sind dies die Längenänderungen des Winkelquerschnittes in Punkt  $P$  (Bezeichnung mit  $P_x, P_y, P_z$ , siehe Abb. 2-21) sowie die Verdrehung des Profils  $\varphi$  (Achsen  $x / y$  parallel zu den Schenkeln; Achse  $z$  entspricht Stablängsachse, siehe Abb. 2-17). Mit jeder Messschnur wird jeweils die Längenänderung der Distanz zwischen der starren Umlenkrolle (Bezeichnung  $M_x, M_y, M_z, M_\varphi$ , siehe Abb. 2-18 bis Abb. 2-21) und dem Punkt  $P$  am Winkelprofil gemessen. Die anfängliche Distanz beträgt jeweils  $r_i$ .

### b. Gewählte Bezeichnungen

- Gesuchte Verschiebungen vom Punkt  $P$  in Richtung  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Achse:  $P_x, P_y, P_z$
- Gesuchte Verdrehung des Winkels:  $\varphi$
- Anfangsdistanz der Messschnüre:
  - o Wegaufnehmer  $w_1$ : Distanz zwischen  $M_x$  und Punkt  $P = r_1$
  - o Wegaufnehmer  $w_2$ : Distanz zwischen  $M_y$  und Punkt  $P = r_2$
  - o Wegaufnehmer  $w_3$ : Distanz zwischen  $M_z$  und Punkt  $P = r_3$
  - o Wegaufnehmer  $w_\varphi$ : Distanz zwischen  $M_\varphi$  und Punkt  $P = r_4$
- Aktuelle Messdistanz der Messschnüre, bei verformter Lage von  $P$  ( $P_x, P_y, P_z, \varphi$ ), sowie die Distanzänderungen zu den Koordinatensystemen  $x, y, z$ 
  - o Wegaufnehmer  $w_1$ : Länge  $r_1'$ , mit Distanzänderung  $\Delta x$
  - o Wegaufnehmer  $w_2$ : Länge  $r_2'$ , mit Distanzänderung  $\Delta y$
  - o Wegaufnehmer  $w_3$ : Länge  $r_3'$
  - o Wegaufnehmer  $w_\varphi$ : Länge  $r_4'$

### c. Ermittlung der Profilverformungen in Punkt $P$ ( $P_x, P_y, P_z$ ) und die Profilverdrehung $\varphi$

Die während den Versuchen aufgezeichneten Messwerte zu den Stabverformungen (siehe 2.3.3) wurden in Excel-Tabellen gespeichert. Die induktiven Wegaufnehmer messen nur den Weg, den die Messschnur zurücklegt, unabhängig von einer möglichen Winkeländerung der Schnur. Da diese Winkeländerung sehr komplex im Raum stattfindet (bestimmt durch Verankerungspunkt am Winkelprofil und Lage der Umlenkrolle der einzelnen Messschnur), die gesuchten Verformungen jedoch anhand eines definierten Koordinatenursprungs gemessen werden sollen, stehen die Wegaufnehmer in Zusammenhang zueinander. Dies bedeutet, dass beispielsweise die gesuchte  $x$ -Verformung des Stahlwinkels, nicht nur von einem Messwert  $w_i$  abhängt. Dadurch ist eine spezielle Auswertung der Daten notwendig. Zum besseren Verständnis kann dies anhand eines Beispiels erklärt werden:

Der Koordinatenursprung ist am äußeren Eckpunkt in der Mitte des Winkels (Punkt  $P$  in Abb. 2-18) definiert. Die  $X$ - bzw.  $Y$ -Achse läuft entlang des jeweiligen Winkelschenkels und die  $Z$ -Achse ist parallel zur Winkellängsachse (siehe Abb. 2-18). Bewegt sich nun Punkt  $P$  des Winkels nur entlang der  $X$ -Achse, wird jedoch auch der Wegaufnehmer in  $y$ -Richtung eine Änderung messen. Da die Verformungen des Winkels aber tatsächlich räumlich stattfinden, beeinflussen sich somit alle Wegaufnehmer gegenseitig, einschließlich der Messwerte für die Verdrehung.

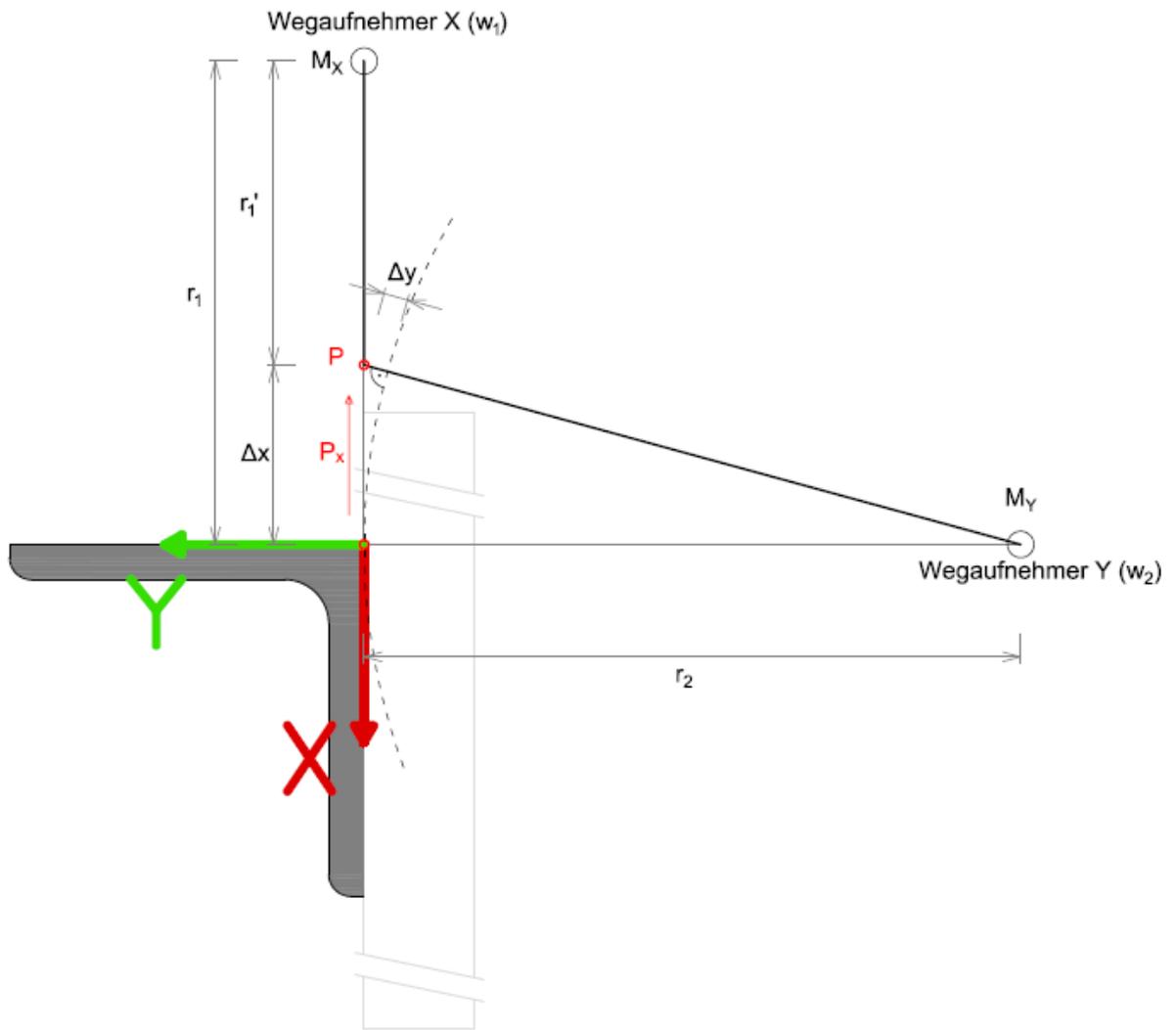


Abb. 2-18: Allgemeine Profilverformung  $P_x$  führt auch zu Messschnuränderung in Wegaufnehmer  $w_2$  in  $y$ -Richtung

Die genaue Berechnung der X/Y/Z-Koordinaten eines Messpunktes  $P$  erfolgt nach folgenden Überlegungen, dargestellt in Abb. 2-19 bis Abb. 2-21:

Der Messpunkt  $P$  ist einerseits definiert durch die gesuchten Verschiebungskordinaten ( $P_x/P_y/P_z$ ) und andererseits durch die bekannten aktuellen Messschnurlängen bzw. Radien ( $r_1'/r_2'/r_3'$ , siehe Abb. 2-19) der Wegaufnehmer. Ein Radius wird, wie bereits erläutert, definiert durch den aktuellen Abstand zwischen starrer Umlenkrolle (Fixpunkt) des Wegaufnehmers und Messpunkt  $P$ . Um die Koordinaten ( $P_x/P_y/P_z$ ) berechnen zu können, wird wie folgt vorgegangen: Die Achsen  $X$  und  $Y$  spannen die Ebene  $E_{XY}$  auf. Eine Verbindungslinie zwischen den beiden Fixpunkten (Umlenkrollen) der Wegaufnehmer  $M_X$  und  $M_Y$  ergibt eine Strecke  $d$  ( $\overline{M_X M_Y}$ ), die in dieser Ebene  $E_{XY}$  liegt. Nun wird eine weitere Ebene  $E_P$  definiert, welche auf die Schnittgerade  $d$  und damit auch auf  $E_{XY}$  normal ist. Diese Ebene wird genau durch den Punkt  $P$  gelegt. Der Schnittpunkt von Ebene  $E_P$  und Gerade  $d$  ist definiert als  $M'$ . In Ebene  $E_P$  wird nun ein Kreis definiert, der den Mittelpunkt  $M'$  besitzt und durch Punkt  $P$  schneidet (siehe Abb. 2-20). Der Radius dieses Kreises ist damit durch  $r' = \overline{M'P}$  definiert. Durch schneiden dieses Kreises mit der Ebene  $E_{XY}$  ergibt sich der Punkt  $P_0$ . Durch die Projektion des Punktes  $P$  auf die Ebene  $E_{XY}$  entsteht der Punkt  $P'$  und ein rechtwinkeliges Dreieck ist definierbar (siehe Abb. 2-20). Dieses Dreieck hat die Seitenlängen  $r' = \overline{M'P}$ ,  $x'' = \overline{M'P'}$  und  $z'' = \overline{P'P}$ . Da der Messpunkt  $P$  sowohl durch seine Verschiebungskordinaten ( $P_x/P_y/P_z$ ), als auch durch die drei Radien ( $r_1'/r_2'/r_3'$ ) definiert ist, müssen diese voneinander abhängig sein. Durch eine in Excel durchgeführte Zielwertsuche können nun die gesuchten Verschiebungskordinaten ( $P_x/P_y/P_z$ ) bestimmt werden. Gleiches Vorgehen gilt für die Verdrehung  $\varphi$  des Punktes  $P$ .

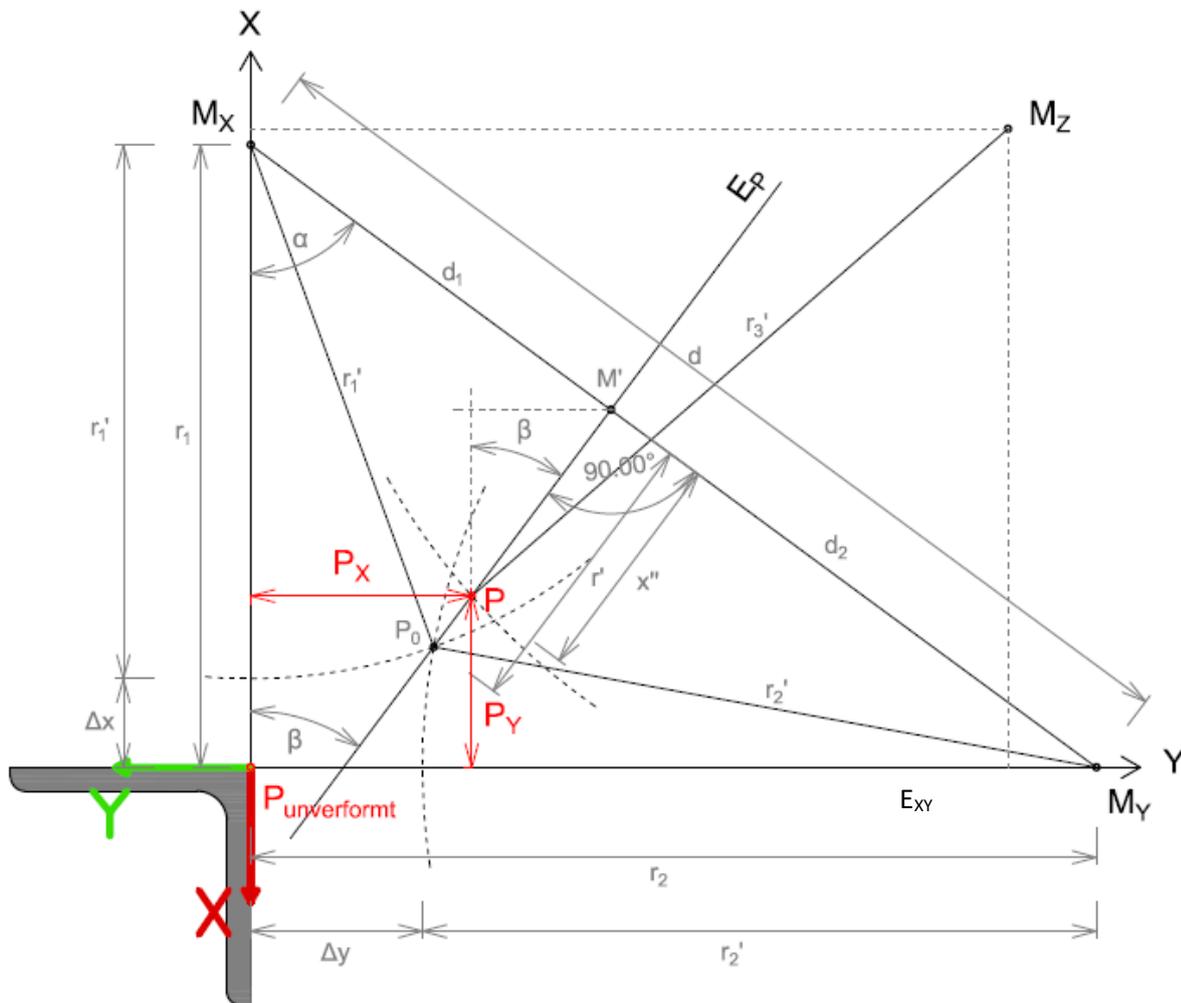


Abb. 2-19: Draufsicht auf Ebene  $E_{XY}$  für die horizontale Punktbestimmung (Größen  $P_x, P_y$ )

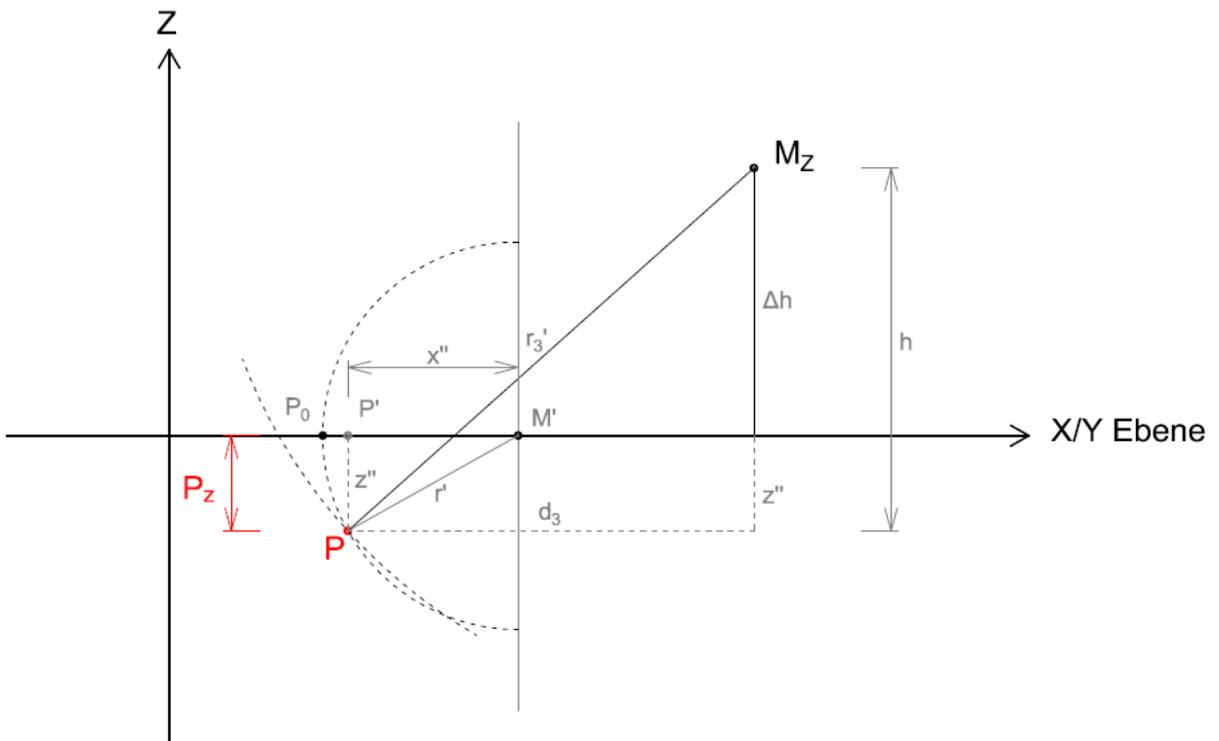


Abb. 2-20: Ansicht vertikale Schnittebene  $E_P$  für die vertikale Punktbestimmung (Größe  $P_z$ )

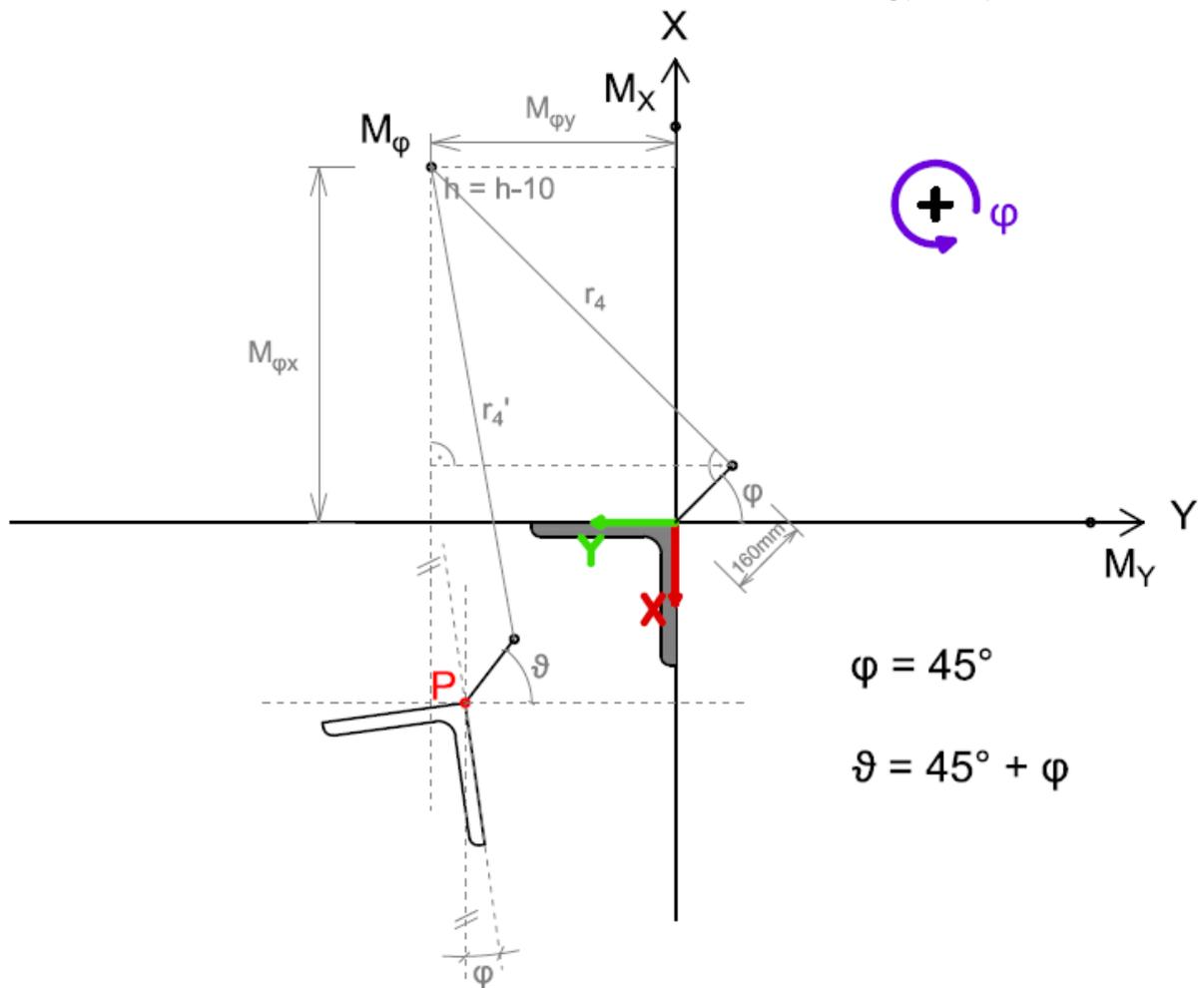


Abb. 2-21: Draufsicht auf den verformten Stabquerschnitt (Ebene  $E_{XV}$ ) und Rechenschema für die Bestimmung der Verdrehung  $\varphi$

Die Festpunkte der Wegaufnehmer (ident zur Lage der Umlenkrollen) sind wie folgt definiert:

$$Mx = \begin{pmatrix} Mx_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad My = \begin{pmatrix} 0 \\ My_y \\ 0 \end{pmatrix}; \quad Mz = \begin{pmatrix} Mz_x \\ Mz_y \\ Mz_z \end{pmatrix}; \quad M\varphi = \begin{pmatrix} M\varphi_x \\ M\varphi_y \\ M\varphi_z \end{pmatrix} \quad (4)^1$$

Die Abstände zum Winkelprofil mit Punkt P ergeben sich damit zu:

$$r_1 = |Mx_x|; \quad r_2 = |My_y|; \quad r_3 = \sqrt{\Delta h^2 + Mz_x^2 + Mz_y^2}; \quad r_4 = \sqrt{M\varphi_x^2 + M\varphi_y^2} \quad (5)^2$$

Für eine beliebige Verformung des Punktes P im Raum ergeben sich folgende geänderte Distanzen bzw. Radien:

$$r'_1 = r_1 - \Delta x \quad (6)^3$$

$$r'_2 = r_2 - \Delta y \quad (7)$$

$$r'_3 = r_3 - \Delta z \quad \text{bzw.} \quad (8)$$

$$r'_3 = \sqrt{(|Mz_x| - P_x)^2 + (|Mz_y| - P_y)^2 + (|Mz_z| - z'')^2} \quad (9)$$

$$r'_4 = r_4 - \Delta\varphi \quad \text{bzw.} \quad (10)$$

$$r'_4 = \sqrt{(|M\varphi_x| - P_x - L_{Stab} * \sin(\vartheta))^2 + (|M\varphi_y| + P_y + L_{Stab} * \cos(\vartheta))^2} \quad (11)^4$$

$$\text{mit: } \vartheta = \frac{\pi}{4} - \varphi$$

Die Definition der Strecke  $d$  ergibt sich mit

$$d = \overline{MxMy} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad (12)$$

$$\text{bzw.} \quad d = d_1 + d_2 \quad (13)$$

<sup>1</sup> Anm.: Die Abstände der Festpunkte der Wegaufnehmer zum Punkt P am Winkel wurden im Labor gemessen

<sup>2</sup> Anm.: Die Höhendifferenz  $\Delta h$  des Fixpunktes des Wegaufnehmers  $w_3$  zur XY-Ebene wurde im Labor gemessen

<sup>3</sup> Anm.: Für die Längenänderungen ( $\Delta x/\Delta y/\Delta z/\Delta\varphi$ ) des Wegaufnehmers ist die „Dehnung“ als NEGATIV! und die „Stauchung“ als POSITIV! definiert

<sup>4</sup> Anm.:  $L_{Stab}$  ist die Länge des Messstabes (siehe Abb. 2-21) am Winkel und ist fix definiert mit 160mm

Der Radius des Kreises in Ebene  $E_P$  ist definiert durch

$$r' = \sqrt{r_1'^2 - d_1^2} = \sqrt{r_2'^2 - d_2^2} \quad (14)$$

Formt man nun Gl. (13) auf  $d_2$  um und setzt sie in Gl. (14) ein, so erhält man

$$d_1 = \frac{r_1'^2 + d^2 - r_2'^2}{2d} \quad (15)$$

Dadurch kann nun auch  $r'$  berechnet werden mit Gl. (14).

Anschließend wird der Mittelpunkt  $M' = \begin{pmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{pmatrix}$  und die gesuchten Verschiebungskordinaten des Punktes  $P$  definiert durch

$$M'_x = r_1 - d_1 * \cos(\alpha) \quad \text{mit: } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (16)^5$$

$$M'_y = d_1 * \sin(\alpha) \quad \text{mit: } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (17)$$

$$P_x = M'_x - x'' * \cos(\beta) \quad \text{mit: } \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (18)$$

$$P_y = M'_y - x'' * \sin(\beta) \quad (19)$$

$$P_z = z'' \quad (20)$$

Die Länge  $x''$  ist definiert durch

$$x'' = \sqrt{r'^2 - z''^2} \quad (21)$$

Durch die Überlegung, dass die Werte für  $r_3'$  in Gl. (9) bzw.  $r_4'$  in Gl. (11) übereinstimmen müssen, können mittels Zielwertsuche in Excel die Werte  $z''$  und  $\varphi$  bestimmt werden. Somit sind für Punkt  $P$  die gesuchten Verschiebungskordinaten ( $P_x/P_y/P_z$ ) und dessen Verdrehung  $\varphi$  bekannt.

---

<sup>5</sup> Anm.: Hier nicht angeführt:  $M'_z = 0$ , da der Punkt in der Ebene  $E_{xy}$  liegt



### 3 FE-Berechnung zu den Versuchen

Ziel der FE-Berechnung ist eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Laborversuche zu erreichen. Hierbei wurde das Programm Simulia Abaqus CAE verwendet. Die unten angeführte Ansicht (siehe Abb. 3-1) zeigt eine Übersicht über alle Bauteile der FE-Simulation. Die genauere Beschreibung erfolgt exemplarisch anhand Modell 1A (siehe Tabelle. 2-1, Zeile 1). Alle weiteren FE-Modelle sind nahezu identisch. Es gibt lediglich Unterschiede bezüglich der Schrauben (Anzahl und Größe), der Lagerungsbedingung (wird in Kap. 3.4 näher erläutert) und der Stablänge. Bei den Versuchen 5D-7D wurde, aufgrund der äußerst kurzen Länge des Winkelprofils, auf das Bauteil „Shell“ (siehe Kap. 3.1.5) verzichtet und die beiden Solid Objekte (siehe Kap. 3.1.4) des Winkels direkt miteinander verbunden.

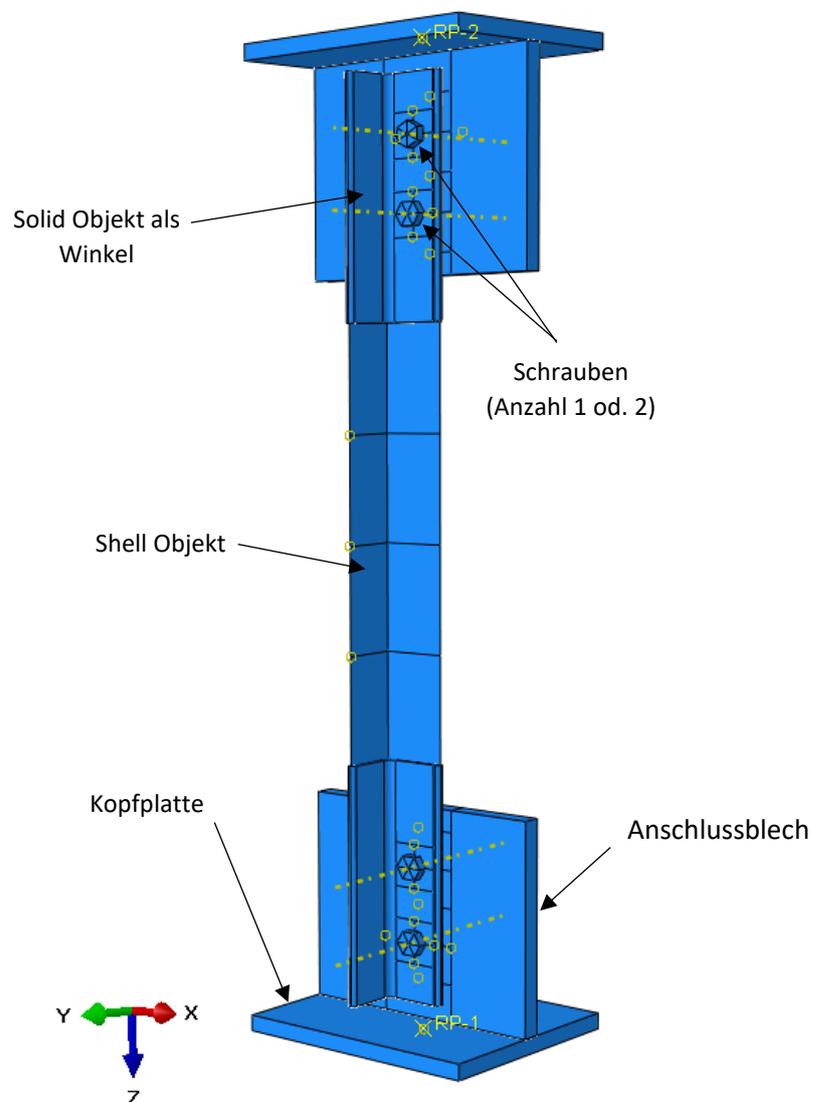


Abb. 3-1: Exemplarische Darstellung eines FE-Modells und dessen Bauteile

### 3.1 Bauteile im FE-Modell

In weiterer Folge werden alle Bauteile exemplarisch an Modell 1A dargestellt.

#### 3.1.1 Kopfplatte

Die Kopfplatte dient als Anschlussbauteil an den Druckzylinder der Versuchsmaschine. Um diese an den Zylinder anschrauben zu können, wurden Löcher in die Platte gebohrt. Diese wurden jedoch in der FE-Berechnung vernachlässigt und nicht abgebildet, da sie keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben. Die Kopfplatte und das Anschlussblech sind durch eine Schweißnaht miteinander verbunden, die als starre Verbindung modelliert wurde. Als Material wurde *Stahl\_elastisch* zugewiesen (siehe Kap. 3.2.3). Das FE-Netz ist mit einer Maschenweite von 10mm eingestellt und verwendet Volumenelemente vom Typ C3D8R<sup>6</sup>.

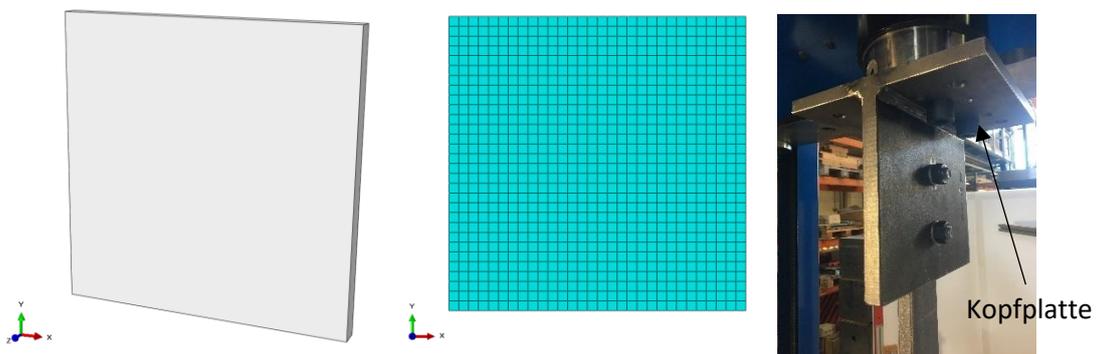


Abb. 3-2: Übersicht Kopfplatte (links), FE-Netz (mittig), reale Ausführung (rechts)

#### 3.1.2 Anschlussblech

Am Anschlussblech werden die Winkelprofile mittels Schraubverbindung befestigt. Wie bereits in Kap. 3.1.1 erwähnt wurde, ist die Kopfplatte mit dem Anschlussblech verschweißt und auch durch eine starre Kopplung im FE-Modell realisiert. Als Material wurde dem Anschlussblech *Stahl\_elastisch* (siehe Kap 3.2.3) zugewiesen. Das FE-Netz ist mit 8mm Maschenweite eingestellt und als FE-Netz-Typ wurde C3D8R verwendet. Im Bereich der Bohrlöcher ist eine Netzverfeinerung mit 3mm vorgesehen um eine stabilere Berechnung und detailliertere Ergebnisse zu erhalten.

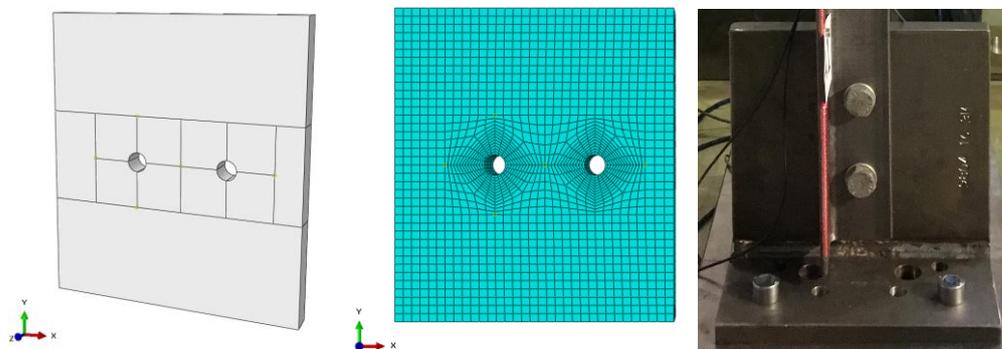


Abb. 3-3: Übersicht Anschlussblech (links), FE-Netz (mittig), reale Ausführung (rechts)

<sup>6</sup> C3D8R: Linearer 3D-Elementtyp mit 8 Knoten – geeignet für die Berechnung von Festkörperelementen

### 3.1.3 Schrauben

Wie bereits erwähnt gibt es Unterschiede in der Anzahl und Größe der Schrauben (1 oder 2 Schrauben, Größe M20 oder M27). Es sind alle Schrauben im FE-Modell identisch modelliert, nur die Abmessungen differieren zwischen M20 und M27. Die Schrauben bestehen aus zwei sechseckigen Körpern als Schraubenkopf bzw. -mutter und einem Zylinder als Schraubenschaft. Den Schrauben wurde im FE-Modell das Material *Schraube* (siehe Kap. 3.2.1), mit ebenfalls rein elastischer Charakteristik, zugewiesen. Die Maschenweite des FE-Netzes beträgt 3mm und es werden Volumenelemente vom Typ C3D8R verwendet.

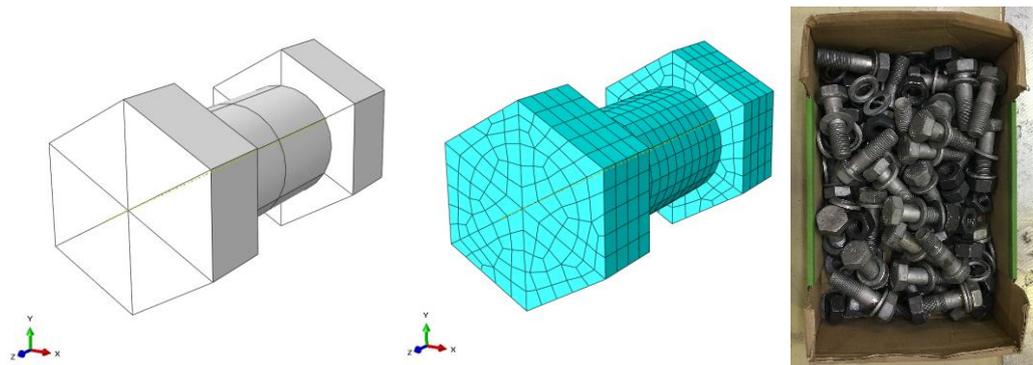


Abb. 3-4: Übersicht Schraube (links), FE-Netz (mittig), reale Ausführung der HV-Schrauben (rechts)

### 3.1.4 Solid-Objekt als Teile des Winkelprofils

Der Winkel besteht aus drei Teilobjekten (bei 5D-8D nur zwei). Die beiden äußeren Objekte sind definiert durch Solid-Elemente, mit einer fixen Länge von 300mm und der mittige Teil als Shell-Element (siehe Kap. 3.1.5). Als Material wurde den Solid-Objekten *Stahl* (siehe Kap. 3.2.2), d.h. elastisch-plastisches Materialverhalten, zugewiesen. Die Maschenweite des FE-Netzes beträgt 4mm und für die FE-Elemente wurde der Typ C3D8R verwendet. Für genauere Rechenergebnisse und eine stabilere Berechnung wurde im Bereich der Löcher eine Netzverfeinerung mit 2mm eingestellt.

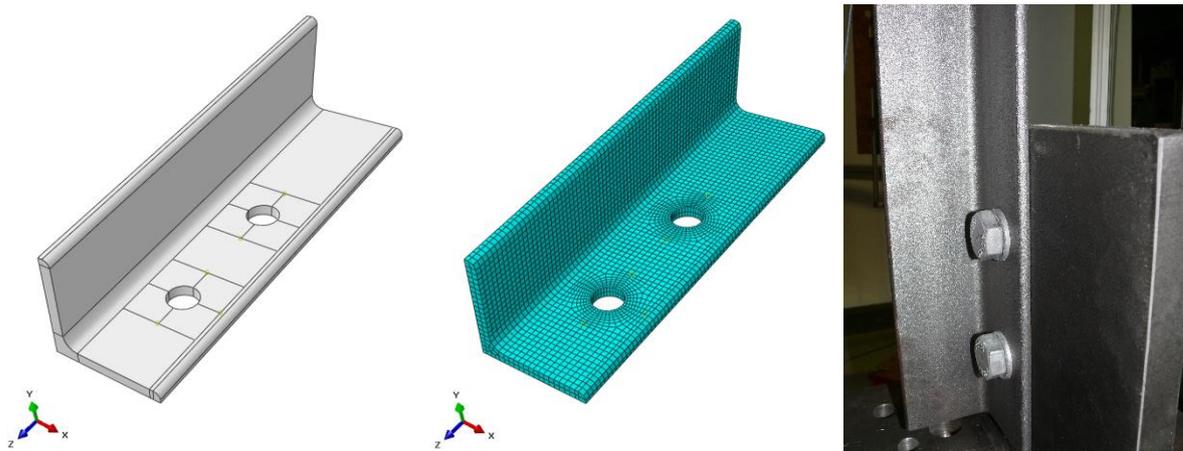


Abb. 3-5: Übersicht Solid Objekt-Winkel (links), FE-Netz (mittig), realer Bauteil (rechts)

### 3.1.5 Shell-Objekt als mittlerer Teil des Winkelprofils

Das Shell-Objekt stellt den mittleren Teil des Winkels dar und wurde mittels Schalenelementen modelliert, nicht mit Volumenelementen wie die restlichen Bauteile. Die gewünschte Dicke der Winkelschenkel kann auch nachträglich noch eingestellt bzw. verändert werden, angepasst an die Ist-Abmessungen. Diese Art des Objektes wurde gewählt, da dadurch die Rechendauer verringert wird und raschere Ergebniskonvergenz auftritt. Als Material wurde den Objekten ebenso *Stahl* (siehe Kap. 3.2.2), mit elastisch-plastischem Materialverhalten, zugewiesen. Die FE-Netz Größe beträgt bei diesem Bauteil 6mm und als Elementtyp wurde S4R<sup>7</sup> verwendet.

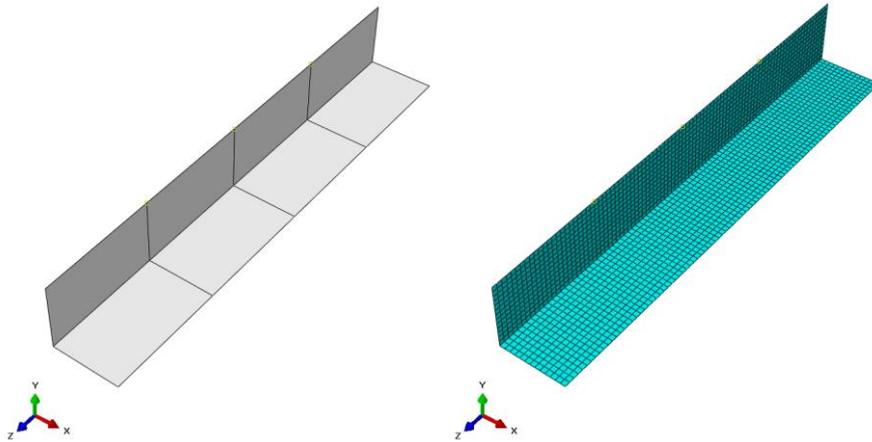


Abb. 3-6: Übersicht Shell-Objekt (links), FE-Netz (rechts)

---

<sup>7</sup> S4R: 2D-Elementtyp mit 4 Knoten – für die Berechnung von schalenförmigen Körpern geeignet

## 3.2 Abbildung des Materialverhaltens

Um die ermittelten Kennwerte aus den Zugversuchen implementieren zu können, wurden für jeden Versuch drei verschiedene Materialien definiert und dann den einzelnen Bauteilen zugewiesen. Dadurch ergibt sich eine realitätsnahe Abbildung der Materialparameter.

### 3.2.1 Schrauben

Alle in den Versuchen verwendeten Schrauben waren HV-Schrauben der Güte 10.9 (siehe Abb. 3-7). Die dafür erforderlichen Materialkennwerte wurden dem Material *Schraube* zugewiesen. Es wurden folgende Kennwerte, für rein elastisches Materialverhalten, verwendet:

Materialverhalten:	linear elastisch
E-Modul <sub>elastisch</sub> :	$E = 210\,000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Poisson Zahl:	$\nu = 0.3 \quad [-]$



Abb. 3-7: Schraubenkennung

### 3.2.2 Stahl – elastisch-plastisches Materialverhalten

Für das Material *Stahl* wurden die aus den Zugversuchen ermittelten Kennwerte verwendet. Diese wurden als Konstant über die gesamte Winkelprofilfläche angesehen (siehe Tabelle. 2-7). Es wurden folgende Kennwerte im FE-Programm implementiert:

Materialverhalten:	linear elastisch – ideal plastisch
E-Modul <sub>elastisch</sub> :	Mittelwert des Versuchsstrangs (siehe Tabelle. 2-7, vorletzte Spalte)
Poisson Zahl:	$\nu = 0.3 \quad [-]$
Fließgrenze:	Mittelwert des Versuchsstrangs (siehe Tabelle. 2-7, letzte Spalte)

### 3.2.3 Stahl – rein elastisches Materialverhalten

Das Material *Stahl\_elastisch* ist nur durch elastische Materialparameter definiert, da im Versuch keine plastischen Verformungen in den betroffenen Bauteilen zu erwarten waren. Es wurden folgende Kennwerte im FE-Programm verwendet:

Materialverhalten:	linear elastisch
E-Modul <sub>elastisch</sub> :	$E = 210\,000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Poisson Zahl:	$\nu = 0.3 \quad [-]$

### 3.3 Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Bauteilen

Alle verwendeten Bauteile wurden bereits im Werk sandgestrahlt. Dadurch ergibt sich ein höherer Reibungskoeffizient zwischen jenen Bauteilen, die nicht starr miteinander verbunden sind (Schraube-Winkel, Schraube-Anschlussblech, Winkel-Anschlussblech), speziell zwischen Winkel und Anschlussblech. Die Reibungswiderstände wirken sich positiv auf die Steifigkeit bzw. damit auch auf die Tragfähigkeit des Winkels aus. Auch die Vorspannung der Schrauben hat einen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Winkels, da dadurch eine erhöhte Pressung auf die Kontaktflächen stattfindet und somit die Reibungswiderstände deutlich erhöht werden. Daher wurde auch die Vorspannkraft der Schraube im FE-Modell abgebildet. Um die oben genannten Effekte nun im FE-Programm implementieren zu können wurden Kontaktbedingungen festgelegt. Es wurden zwischen folgenden Bauteilen Kontaktbedingungen definiert:

- *Anschlussblech – Winkel*
- *Anschlussblech – Schraubenkopf (Rückseite)*
- *Anschlussblech – Schraubenschaft (Bohrloch)*
- *Winkel – Schraubenkopf (Vorderseite)*
- *Winkel – Schraubenschaft (Bohrloch)*

Folgende Kennwerte wurden dafür herangezogen:

Reibbeiwert Stahl-Stahl:	$\mu = 0.5$	[-] lt. EN 1090-2, [7]
Kontaktsteifigkeit (Druck):	1E+06	[N/mm <sup>2</sup> ]

Zusätzlich wurde eingestellt, dass das Abheben der Bauteile ungehindert stattfinden kann, wenn kein Anpressdruck mehr vorliegt. Dadurch können beispielsweise auch Klaffungen zwischen den Bauteilen abgebildet werden. Im FE-Modell wurde bei den Schrauben ein Lochspiel von 2mm (M20) bzw. 3mm (M27) vorgesehen und eine zentrische Lage des Bolzens. Bei vereinzelt Modellen wurde aufgrund von Simulationsproblemen das Lochspiel verringert bzw. komplett weggelassen. Weiters bestätigte sich die Annahme, dass auch Schlupf in der FE-Berechnung auftritt. Dieser Sachverhalt ist in den Versuchen 1A, 4B und 6D deutlich erkennbar. Auch die Endverdrehung der Winkelprofile ist demnach möglich (siehe Versuch 4B, 5B, 1C, 3D, 4D).

### 3.4 Lagerungsbedingungen an den Stabenden

Die Auflager im FE-Modell wurden über Referenzpunkte (RP) definiert. Diese Punkte wurden mit den Mittelpunkten der außen liegenden Flächen der Kopfplatten gekoppelt und damit starr verbunden (siehe Abb. 3-8). Am jeweiligen Referenzpunkt können dann die zutreffenden Freiheitsgrade eingestellt werden (z.B.: Scharnier - freie Verdrehung um die X-Achse).

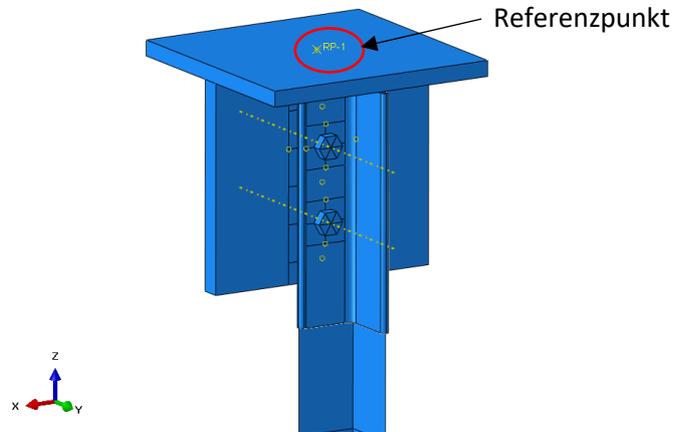


Abb. 3-8: Darstellung der Lagerungsbedingung mittels Referenzpunkt

Für die eingespannte Lagerung (BC1) wurden am unteren RP alle Verformungen und Verdrehungen gesperrt und am oberen RP lediglich die Verdrehung um die Z-Achse freigegeben (entspricht der freien Verdrehung des Druckzylinders um dessen Längsachse).

Für die Scharnierlagerung (BC2) wurde der untere RP, aufgrund der Verwendung des Scharnierlagers (siehe Abb. 2-13), in einem Abstand von genau 135 mm zur Außenfläche der Kopfplatte angebracht. Dieser Abstand entspricht dem Drehpunkt des Scharnierlagers. Anschließend wurde für die Achse parallel zum Anschlussblech (in Abb. 3-8 wäre das die X-Achse) die freie Verdrehung, entsprechend der Wirkung der Kippleiste, eingestellt. Für den oberen RP ist kein Abstand zur Fläche der Kopfplatte nötig, da der Mittelpunkt des Radius der an der Kopfplatte befestigten Kippleiste genau so gewählt wurde, dass dieser in der besagten Fläche liegt (siehe Abb. 3-9). Somit ist die Außenfläche der Kopfplatte horizontal unverschieblich. Dadurch wurde nur die freie Verdrehung um die Achse eingestellt (wie unten).

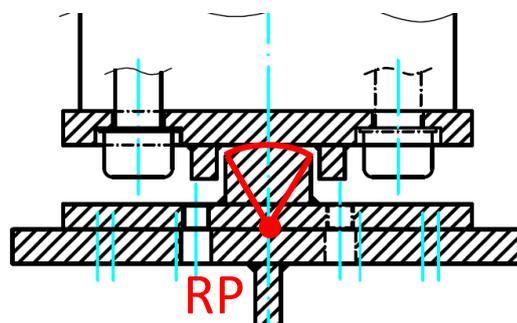


Abb. 3-9: Darstellung Scharnierlagerung unmittelbar unter dem Druckzylinder - Referenzpunkt Kippleiste

Für die gelenkige Lagerung (BC3) wurde eine freie Verdrehung um beide parallelen Achsen der Schenkel eingestellt. Der obere RP ist zusätzlich um die Z-Achse frei verdrehbar. Die Referenzpunkte liegen hier in den äußeren Oberflächen der Kopfplatten.

### 3.5 Implementierung der zutreffenden Imperfektionen jedes Einzelversuches

Die richtige Einarbeitung der geometrischen Imperfektionen ist Voraussetzung für eine realitätsnahe numerische Simulation. Um dies sicherstellen zu können, wurden alle drei Längskanten des Shell-Objektes (siehe Kap. 3.1.5) nach den ermittelten Imperfektionen in Stabmitte verformt. Dies bedeutet, dass der aufgemessene imperfekte Stabquerschnitt in Stabmitte exakt wiedergegeben wurde (bestimmt durch Messwerte M4 und M10 an den Außenrändern und M14 an der Außenkante; siehe Abb. 2-3). Wegen der sehr geringen gemessenen Stabvorkrümmungen wurde der sehr steife Anschlussbereich, im Bereich des Anschlussbleches, vorerst mit der Soll-Geometrie belassen. Wegen der in Kapitel 3.6 dargestellten speziellen Art der Imperfektionseinprägung kommt es jedoch bei Lagerungsbedingung BC2 und BC3 anschließend doch zu einer Verdrehung dieses Einleitungsbereiches. Die Verformungsfigur wurde vereinfacht als Parabelfunktion mit der maximalen Verformung in der Stabmitte des Winkelprofils (siehe Diagramm 3-1) angenommen. Da nur das Shell-Objekt mit einer Vorkrümmung verformt wird, wurde von der Stablänge die Länge der Solid-Objekte (siehe Kap. 3.1.4) abgezogen und die restliche Länge (die des Shell-Objektes) durch vier geteilt. Damit ergeben sich fünf Schnittebenen in Stablängsrichtung (1-5) für die an drei Querschnittspunkten in Stabmitte (4, 10, 14\*) die Verformung vorgegeben wird (siehe Abb. 3-10). Für die Berechnung einer Schnittebene wurde wie folgt vorgegangen:

Der Querschnittspunkt 14\* (siehe Abb. 3-10) wird identisch wie  $e_{imp}$  nach Gl. (22) (siehe auch Tabelle. 2-4, bzw. Gl. (3)) berechnet. Dies stellt die Hauptverformung dar und wurde aufgrund von Vereinfachungen auf einen Winkel in der Winkelhalbierenden von  $45^\circ$  umgerechnet (siehe Abb. 3-10, rechts oben bzw. Gl. (22)). Damit ergibt sich der in Abaqus verwendete Querschnittspunkt 14\* (siehe Diagramm 3-1) mit einer Verschiebung von  $14*_y$  (für die Y-Richtung) und  $14*_x$  (für die X-Richtung). Für den Querschnittspunkt 4 (siehe Diagramm 3-1) wurden in Y-Richtung ( $4_y$ ) die Werte von  $14*_y$  und für die X-Richtung ( $4_x$ ) die Werte der Parabel von den Imperfektionsmessungen in M4 verwendet. Bei Querschnittspunkt 10 (siehe Diagramm 3-1) wurden für die X-Richtung ( $10_x$ ) ebenso die Werte von  $14*_x$  und für die Y-Richtung ( $10_y$ ) die Werte der Parabel von den Imperfektionsmessungen in M10 verwendet.

$$14^* = \sqrt{M3^2 + M9^2} * \cos\left(\frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\frac{M9}{M3}\right) \quad (22)$$

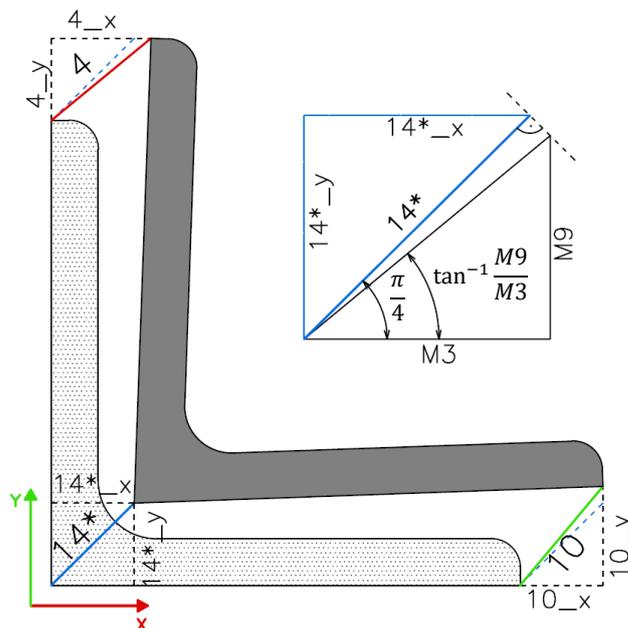


Abb. 3-10: Lage des Winkelquerschnitts zur Implementierung der geometrischen Imperfektionen

# Verformungsdaten 1A

Kennwort 1234

Punkte_14*	x [mm]	y [mm]
Anfangspunkt	0.0	0.00
Mittelpunkt	570.0	0.53
Endpunkt	1140.0	0.00

Parabelfunktion

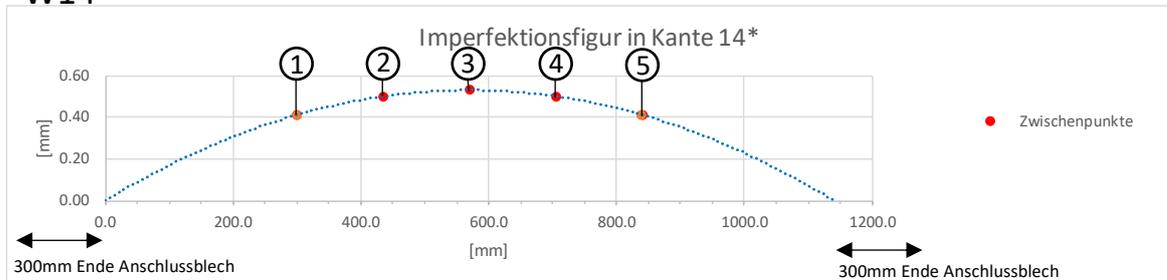
$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

$a = -0.0000016323$   
 $b = 0.0018608073$   
 $c = 0.0000000000$

Anzahl Zwischenwerte **5** (135 mm)

14*	[mm]	[mm]
	14*_y	14*_x
RP_14*_1	0.29	0.29
RP_14*_2	0.35	0.35
RP_14*_3	0.37	0.37
RP_14*_4	0.35	0.35
RP_14*_5	0.29	0.29

W14\*



Punkte_Schenkel 4	x [mm]	y [mm]
Anfangspunkt	0.0	0.00
Mittelpunkt	570.0	0.70
Endpunkt	1140.0	0.00

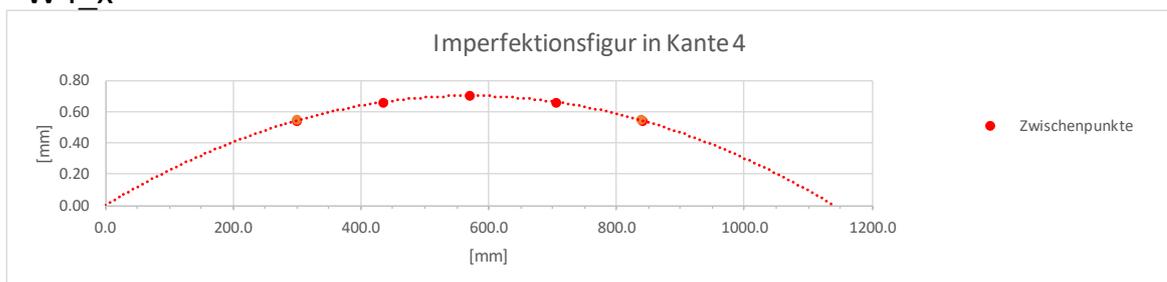
Parabelfunktion

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

$a = -0.0000021545$   
 $b = 0.0024561404$   
 $c = 0.0000000000$

4	[mm]	[mm]
	4_y	4_x
RP_4_1	0.29	0.54
RP_4_2	0.35	0.66
RP_4_3	0.37	0.70
RP_4_4	0.35	0.66
RP_4_5	0.29	0.54

W4\_x



Punkte_Schenkel 10	x [mm]	y [mm]
Anfangspunkt	0.0	0.00
Mittelpunkt	570.0	0.45
Endpunkt	1140.0	0.00

Parabelfunktion

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

$a = -0.0000013850$   
 $b = 0.0015789474$   
 $c = 0.0000000000$

10	[mm]	[mm]
	10_y	10_x
RP_10_1	0.35	0.29
RP_10_2	0.42	0.35
RP_10_3	0.45	0.37
RP_10_4	0.42	0.35
RP_10_5	0.35	0.29

W10\_y

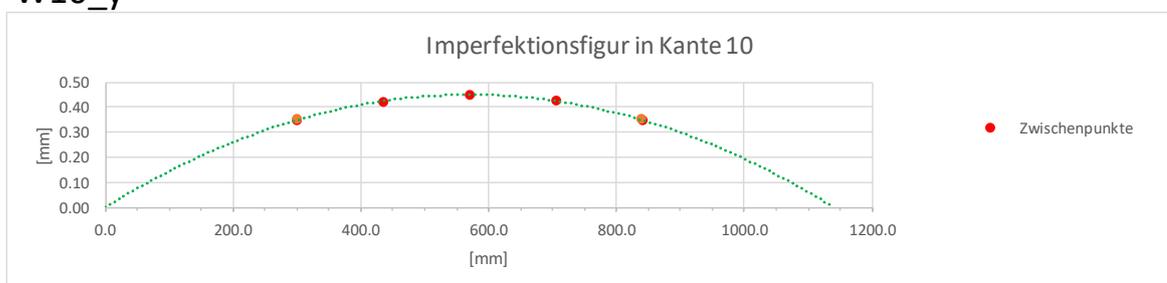


Diagramm 3-1: Beispielhafte Darstellung der Berechnung der einzelnen X-/Y-Imperfektionswerte der Querschnittspunkte eines Winkels für Versuch 1A

### 3.6 Lastaufbringung

Die geometrischen Imperfektionen nach Abschnitt 3.5 wurden als eingeprägte Verformungen vorweg aufgebracht und die sich an jedem Einzelstab einstellenden Verformungen wurden dann als geänderte Geometriedaten für das FE-Modell genutzt. Für diese Vorberechnungen wurden die korrekten Randbedingungen gewählt, sodass sich für die Lagerungsbedingungen BC2 und BC3 dann auch eine leichte Verdrehung der Anschlussbleche einstellt. Die Lasten in Abaqus wurden in zwei Schritten aufgebracht.

Der erste Schritt war das Aufbringen der Vorspannkraft der Schrauben. Hierfür wurden zunächst alle Kontaktbedingungen als „fest verbunden“ eingestellt. Auch die Auflagerbedingungen wurden zunächst vernachlässigt und alles als „eingespannt“ betrachtet. Dies ist jedoch für diesen Lastschritt ohne Bedeutung. Anschließend wurde die Vorspannkraft im Schraubenschaft in Form einer von Abaqus vordefinierten „Bolt Load“ aufgebracht. Um ein Erreichen der geforderten Vorspannkraft gewährleisten zu können, wurden die Vorspannkraften nach EN 1993-1-8 [4] wie folgt berechnet:

$$F_{p,C} = 0.7 * f_{ub} * A_s \quad (23)$$

mit:  $f_{ub} = 1000N$  bei Schrauben 10.9  
 $A_s = 245mm^2$  (M20)  
 $A_s = 459mm^2$  (M27)

Damit ergeben sich für M20 -  $F_{p,C} = 171.5kN$  und für M27 -  $F_{p,C} = 321.3kN$ . Durch die vorherige Fixierung der Flächen läuft die Berechnung stabiler und schneller.

Im zweiten Schritt wurden die Kontaktbedingungen (siehe Kap. 3.3) in den jeweiligen Flächen wieder aktiviert und auch die Auflagerbedingungen wurden entsprechend den Randbedingungen (BC 1-3) eingestellt. Anschließend wurde die Einzellast des Prüfzylinders im Versuch durch verschieben des oberen Auflagerpunktes in Z-Richtung (bewirkt Druckbeanspruchung im Winkelprofil) aufgebracht. Die nominelle Größe dieser Referenz-Stauchung beträgt immer mehr als die maximal gemessene Z-Verformung des jeweiligen Versuches. Durch die Verwendung einer eingepprägten Vertikalverformung anstatt einer Kraft lässt sich das reale Last-Verformungs-Verhalten besser abbilden, da die Verformung auch nach Erreichen der Maximallast noch ersichtlich ist. Abb. 3-11 zeigt exemplarisch eine solche Last-Verformungskurve für den Versuch 1A.

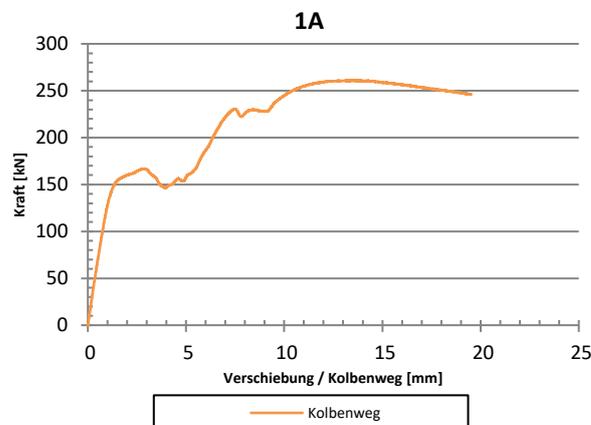


Abb. 3-11: Last-Verformungs-Diagramm mit Überschreitung der Maximallast für Versuch 1A

## 4 Ergebnisse der Versuche und Gegenüberstellung mit der FE-Simulation

Nachfolgend werden die Traglastergebnisse der Laborversuche und der FE-Berechnungen gegenübergestellt und interpretiert. Weiters werden die am Winkelquerschnitt auftretenden Verformungen sowie die Versagensformen detailliert analysiert und der Sachverhalt für das jeweilige Verhalten begründet. Die Abweichungen der FE-Berechnungen zu den Laborversuchen sind ebenfalls in Tabelle. 4-1 ersichtlich. Eine grafische Übersicht ist in Abb. 4-1 zusammengestellt. Zusätzlich wurden bei den meisten Tests Messungen während des Versuchs durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kontrollmessungen sind in Anhang B ersichtlich. Die angeführte Versagensform konnte sowohl im Versuch, als auch in der FE-Berechnung beobachtet werden. Anzumerken ist, dass bei allen FE-Berechnungen nur die reinen geometrischen Imperfektionen abgebildet wurden. Es wurden keine Eigenspannungen berücksichtigt.

Tabelle. 4-1: Abweichung der FE-Berechnungen zu den Laborergebnissen – Traglasten und Versagensformen

<b>Abweichung zwischen FE und Laborversuch</b>				
Profilkennung (Versuchsbezeichnung)	$N_{\max,LABOR}$ [kN]	$N_{\max,FEM}$ [kN]	$\frac{N_{FEM} - N_{LABOR}}{N_{LABOR}}$ [%]	Versagensform [-]
1A	261	261	0,0%	$K_{y-y}$ & LPV
2A	239	236	-1,3%	$K_{x-x}$ & $K_{y-y}$
3A	215	202	-6,0%	$K_{x-x}$
4A	157	155	-1,3%	$K_{y-y}$ & LPV
5A	118	118	0,0%	$K_{y-y}$
6A	72	81	12,5%	$K_{x-x}$
1B	148	140	-5,4%	$K_{x-x}$
2B	86	85	-1,2%	$K_{x-x}$ & BDK
3B	61	62	1,6%	$K_{x-x}$ & BDK
4B	163	166	1,8%	$K_{y-y}$
5B	132	141	6,8%	$K_{y-y}$
1C	98	106	8,2%	$K_{y-y}$
2C	121	117	-3,3%	LPV
3C	66	79	19,7%	$K_{x-x}$ & BDK
4C	131	139	6,1%	$K_{x-x}$ & BDK
5C	63	65	3,2%	$K_{x-x}$ & BDK
1D	260	274	5,4%	$K_{y-y}$ & LPV
2D	177	205	15,8%	$K_{y-y}$
3D	155	151	-2,6%	$K_{y-y}$
4D	73	90	23,3%	$K_{y-y}$
5D	145	146	0,7%	LPV
6D	151	155	2,6%	LPV
7D	149	153	2,7%	LPV
8D	145	151	4,1%	LPV
1E	488	512	4,9%	$K_{x-x}$ & BDK
2E	357	410	14,8%	$K_{x-x}$ & BDK
3E	267	327	22,5%	$K_{x-x}$ & BDK

1. K = Knicken um die jeweilige Achse
2. BDK = Biegedrillknicken um die jeweilige Achse
3. LPV = lokales plastisches Verformen

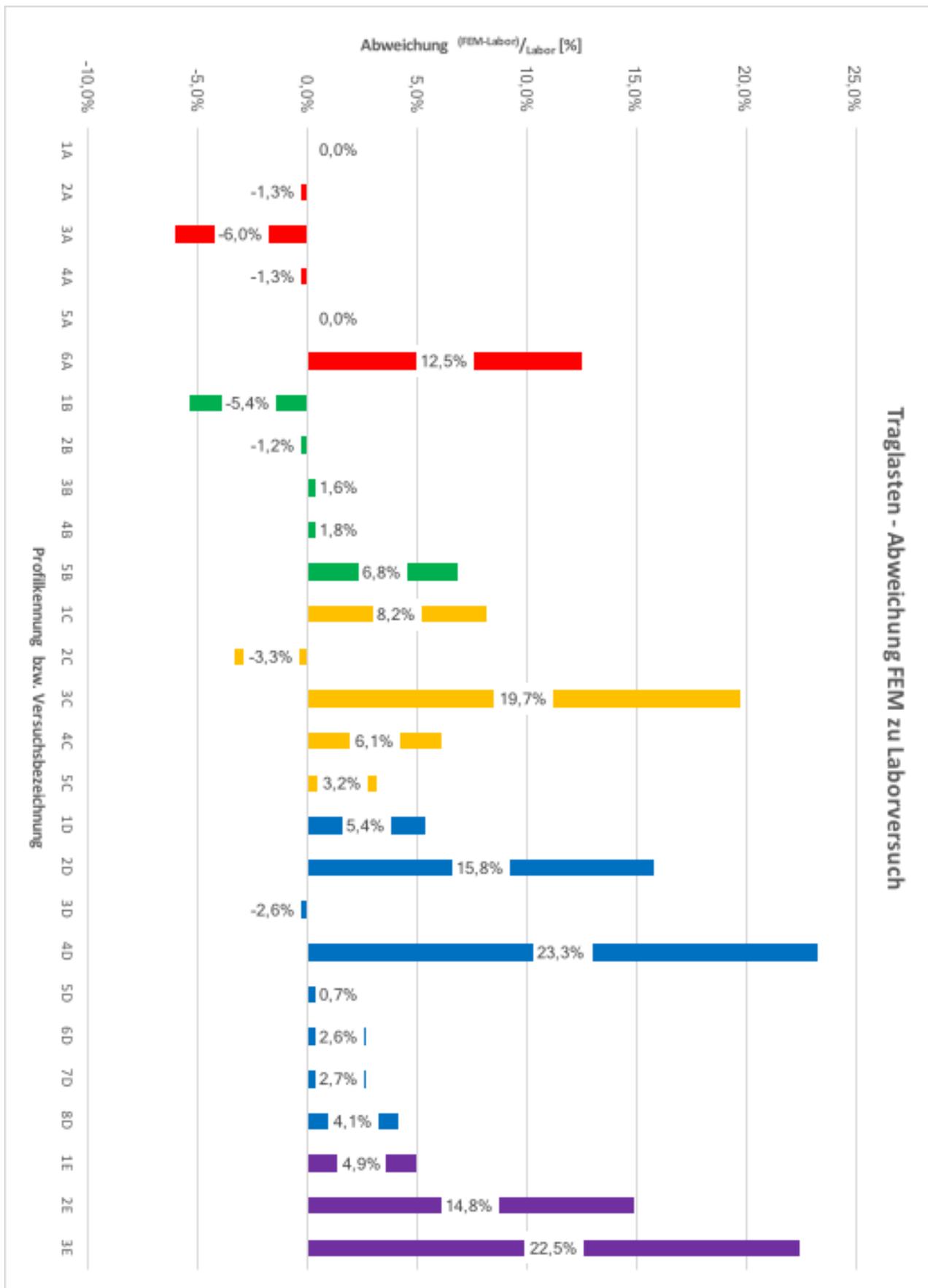


Abb. 4-1: Übersicht der Abweichungen zwischen den FE-Berechnungen und den Laborergebnissen – maximale Traglasten

## 4.1 Versuchsreihe A – Winkel 80x8

### 4.1.1 Laborversuch 1A

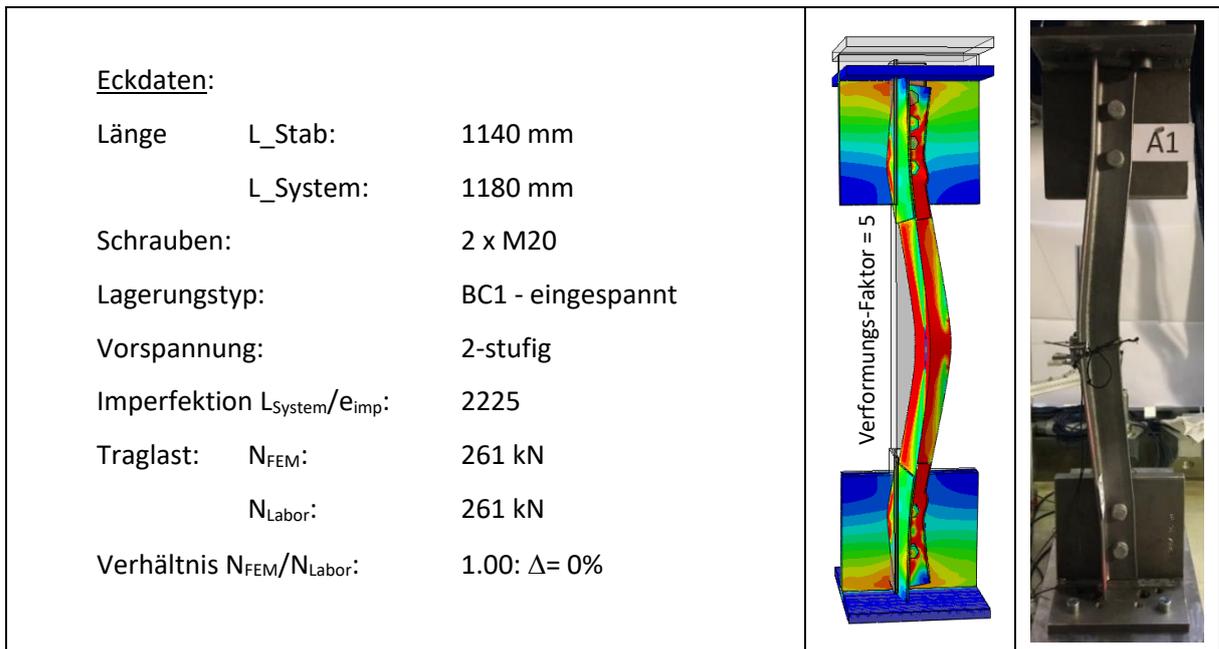


Abb. 4-2: Eckdaten links, Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Wie in Abb. 4-2 und den folgenden Diagrammen ersichtlich ist, verformt sich der Winkel 1A im FE- Modell in X-Richtung positiv, hingegen im Laborversuch negativ. Die maximale Traglast bleibt jedoch gleich. Weiters ist in Diagramm 4-1 gut erkennbar, dass bei etwa 150kN das obere Schraubenpaar und bei 230kN Belastung das untere Schraubenpaar nachrutschen. Dies ist dadurch begründbar, da durch das Nachrutschen des oberen Schraubenpaares bei 150kN keine Z-Verformung in Stabmitte stattfindet. Nachdem beide Schraubverbindungen nachgerutscht sind, steigt die Last wieder an und erreicht das Traglastmaximum. Dieser Sachverhalt tritt auch in der FE-Berechnung auf (siehe Z-FEM, Diagramm 4-3). Weiters ist eine extreme Stauchung des Winkels (siehe Diagramm 4-4) mit lokalem Beulen (siehe Abb. 4-3) erkennbar. Die Verdrehung des Winkels fluktuiert sehr stark, was auf das Nachrutschen rückschließen lässt, ist aber in ihrer Größe verhältnismäßig eher klein.



Abb. 4-3: lokales Beulen am verschraubten Schenkel in Stabmitte

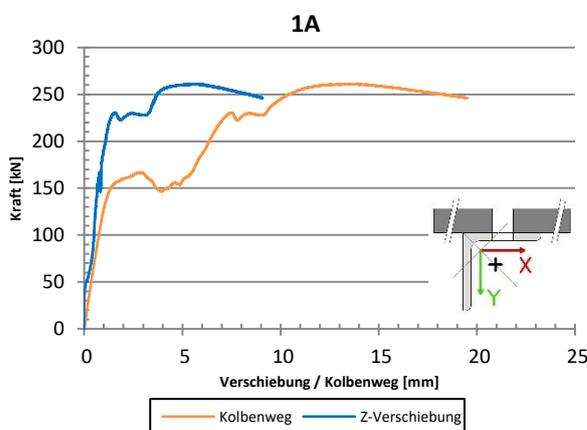


Diagramm 4-1: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

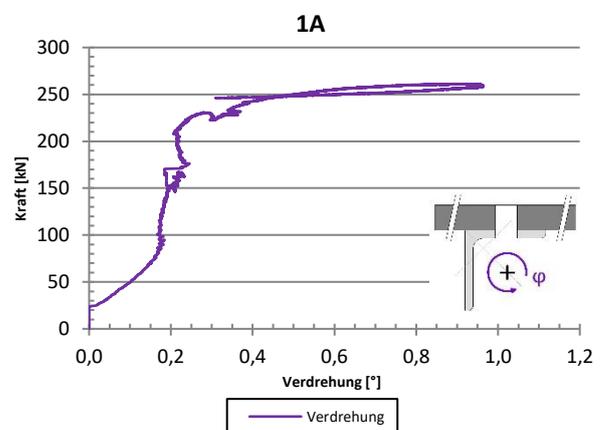


Diagramm 4-2: Kraft/Verdrehung

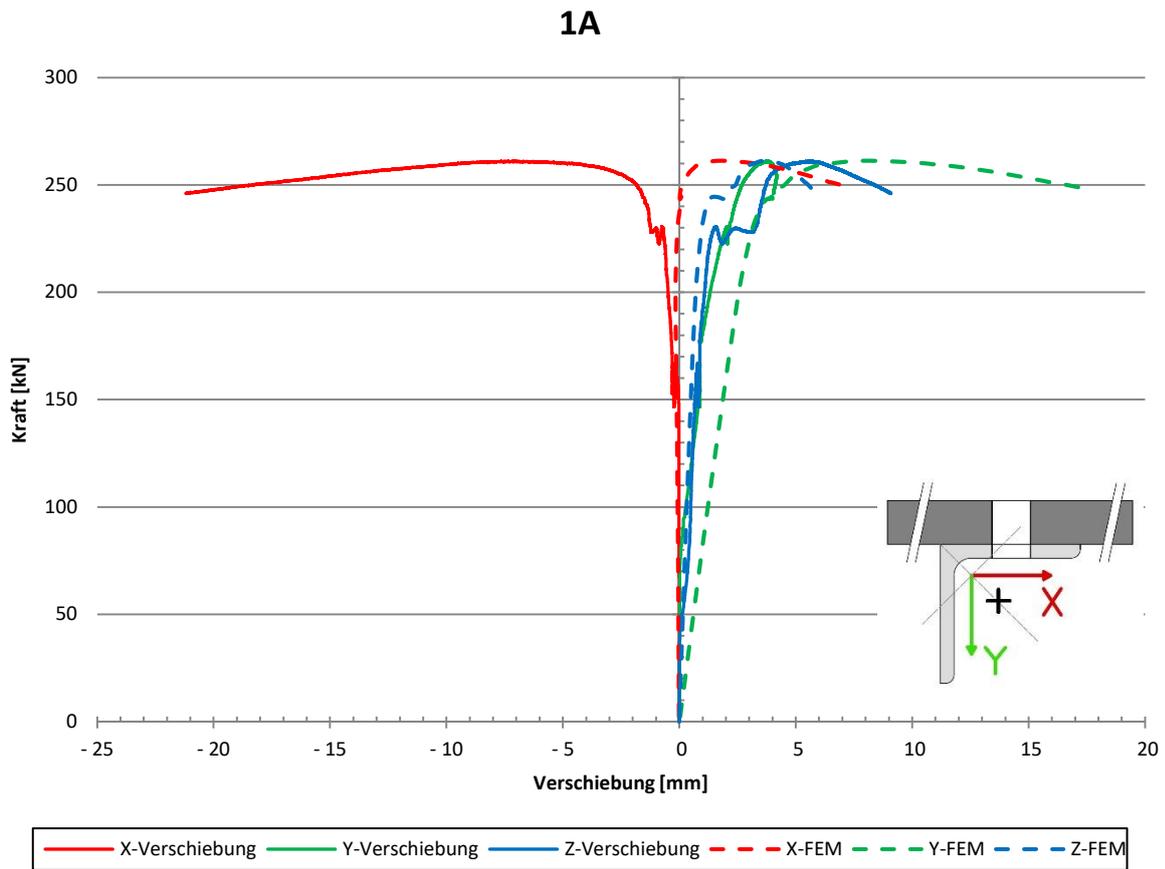


Diagramm 4-3: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

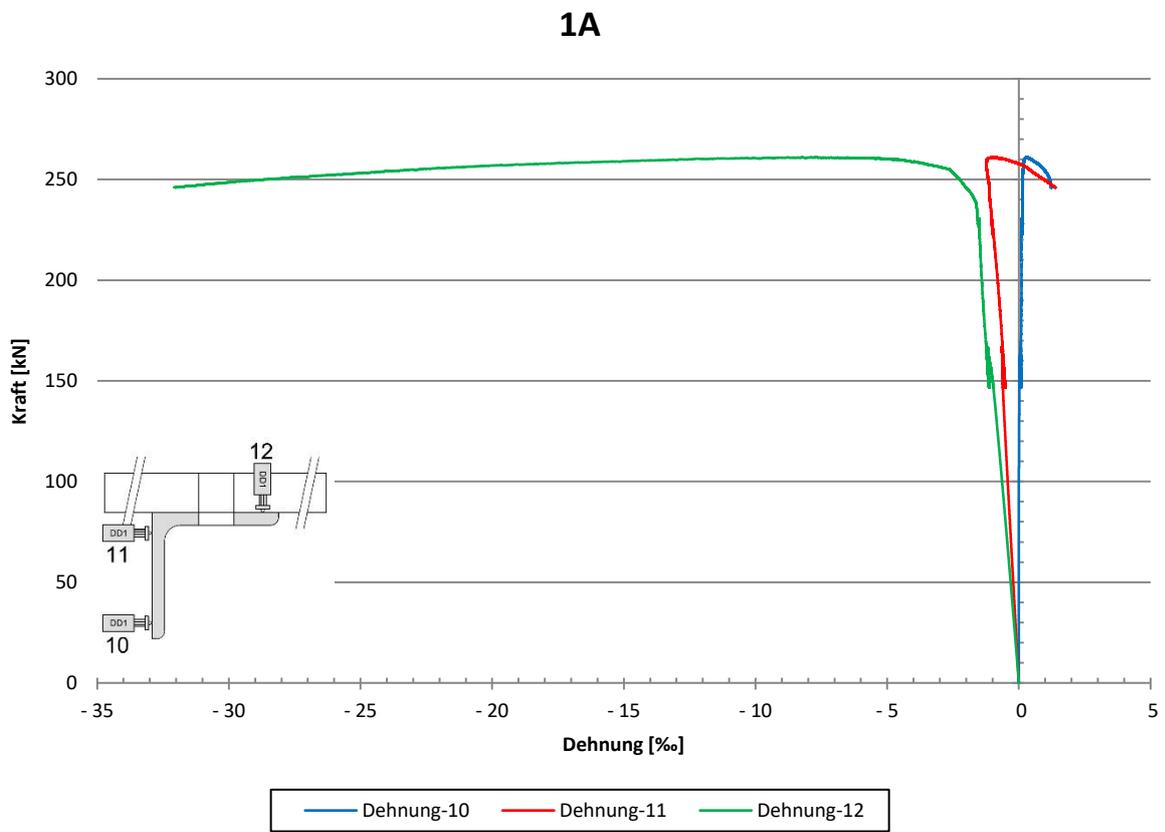


Diagramm 4-4: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.1.2 Laborversuch 2A

<b>Eckdaten:</b>		
Länge	L_Stab:	1820 mm
	L_System:	1860 mm
Schrauben:		2 x M20
Lagerungstyp:		BC1 - eingespannt
Vorspannung:		2-stufig
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		1196
Traglast:	$N_{FEM}$ :	236 kN
	$N_{Labor}$ :	239 kN
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		0.99: $\Delta = -1.3\%$

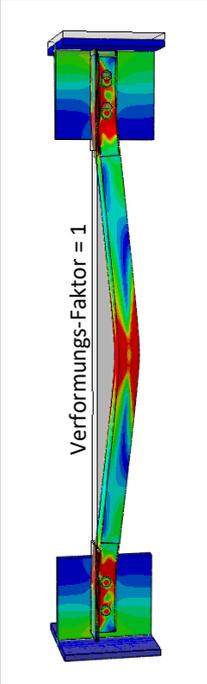



Abb. 4-4: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungen zwischen FE-Berechnung und Laborversuch sind hier nahezu identisch. Auch die Verformungsfiguren stimmen überein. Das Nachrutschen der Schrauben zeigt sich in den Diagrammen deutlich. Dies findet bei etwa 200kN statt (siehe Diagramm 4-5) und lässt auch auf eine gleichzeitige Translation (siehe Diagramm 4-7, X-Richtung) schließen. Grund für diese Translation könnte die Lage der Schrauben im Schraubenloch sein. Wenn die Schrauben eher am äußersten Rand in X-Richtung angeordnet sind bewegen sich diese beim Nachrutschen entlang des Bohrlochkreises (siehe Abb. 4-5). Somit erfolgt bei vertikaler Translation auch eine horizontale. Die maximale Stauchung erfährt der Winkel im Eckbereich, was auch gut mit der Verformung übereinstimmt. Die Verdrehung des Winkels fluktuiert aufgrund des Nachrutschens sehr stark, ist aber auch hier verhältnismäßig klein.



Abb. 4-5: Schematische Darstellung des Nachrutschens der Schrauben

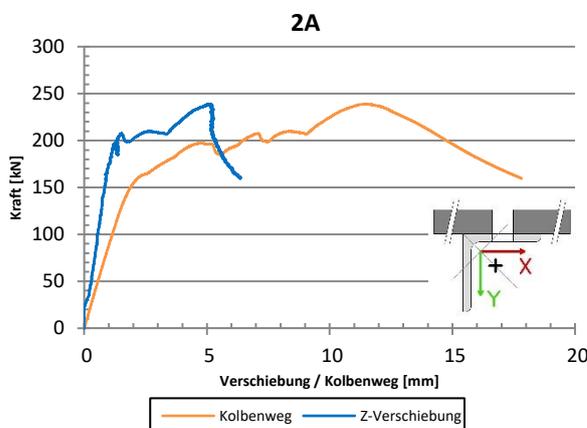


Diagramm 4-5: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

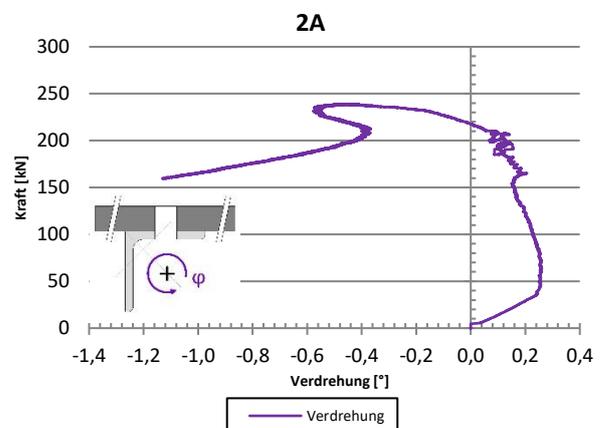


Diagramm 4-6: Kraft/Verdrehung

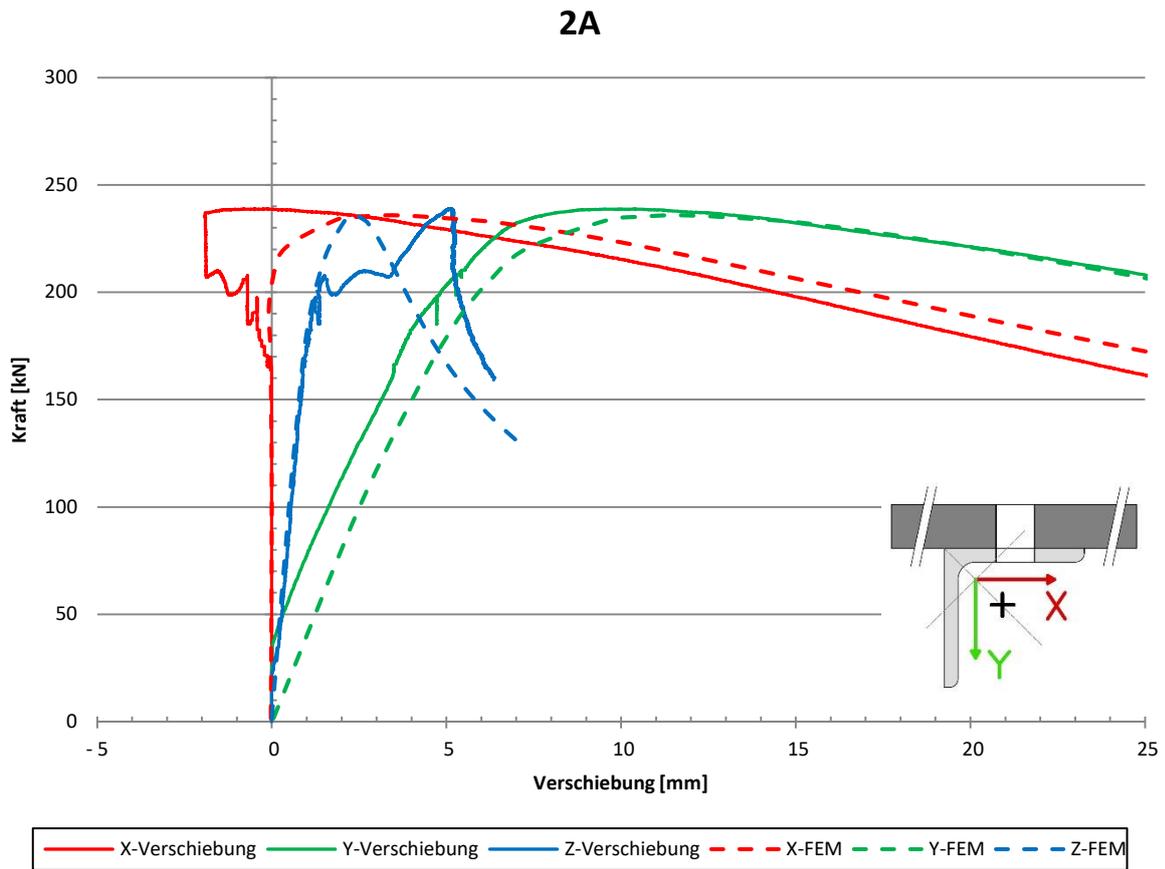


Diagramm 4-7: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

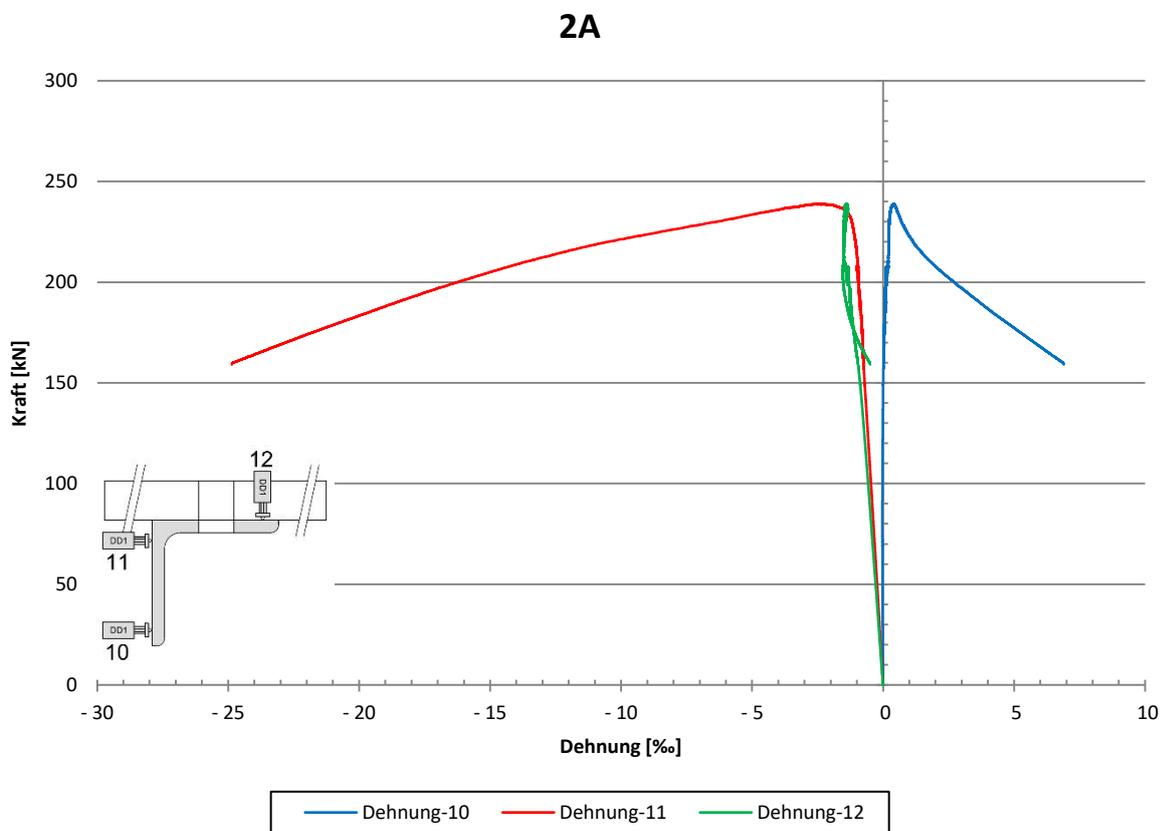


Diagramm 4-8: Dehnungen des Querschnittes

### 4.1.3 Laborversuch 3A

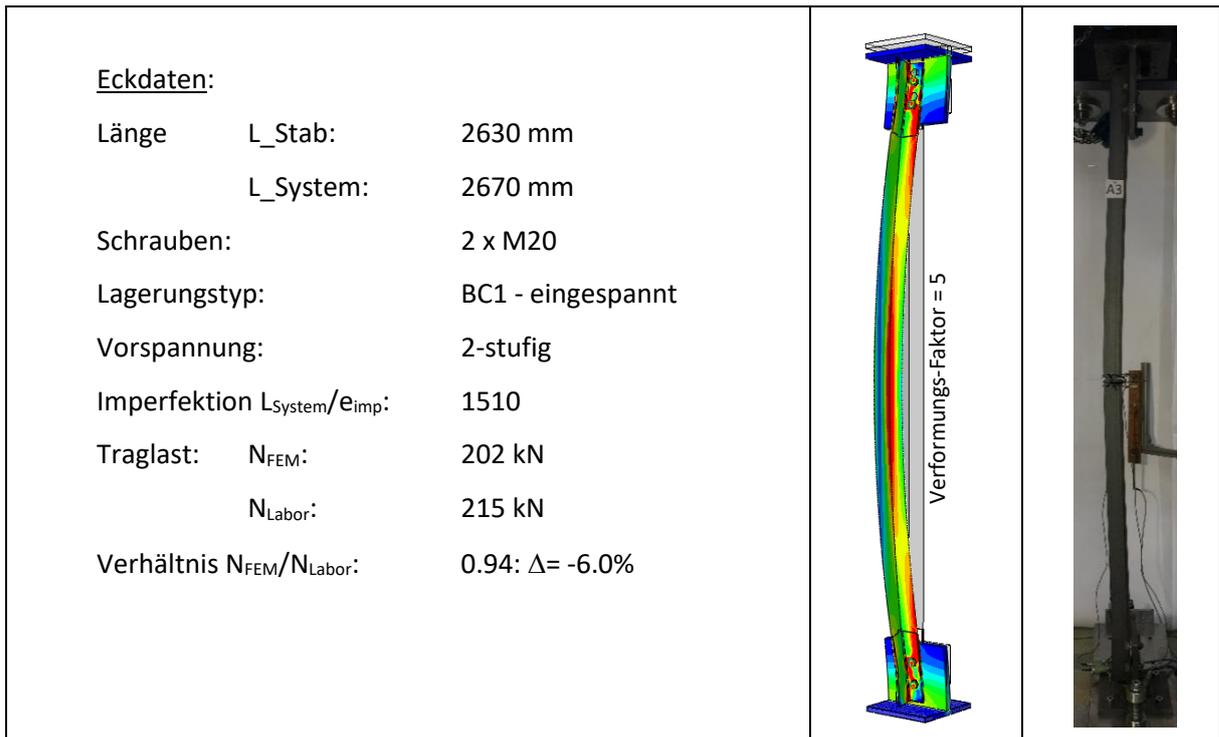


Abb. 4-6: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungen stimmten hier nahezu überein. Erkennbar ist jedoch eine anfängliche Verformung des Winkels im Labor in negative X-Richtung (siehe Abb. 4-11). Kurz vor Erreichen der Traglast ändert sich die Verformungsrichtung und der Winkel verschiebt sich in die positive X-Richtung. Ein Nachrutschen der Schrauben ist hier nicht erkennbar. Die maximale Stauchung erfährt der Winkel auch hier im Eckbereich (siehe Diagramm 4-12). Ansonsten sind keine besonderen Vorkommnisse ersichtlich. Die Verdrehung des Winkels ist auch hier sehr klein.

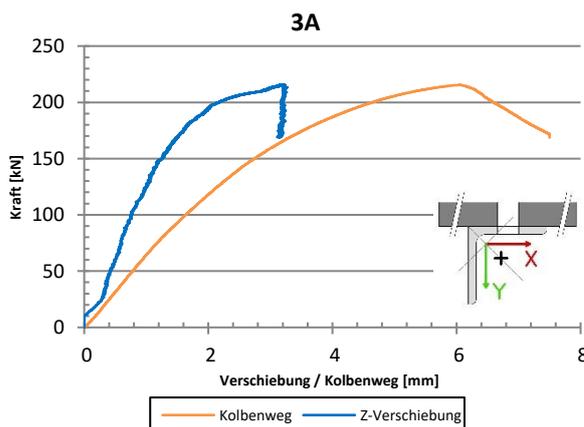


Diagramm 4-9: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

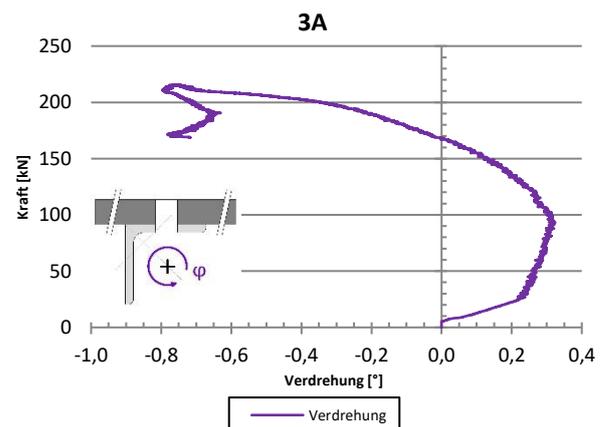
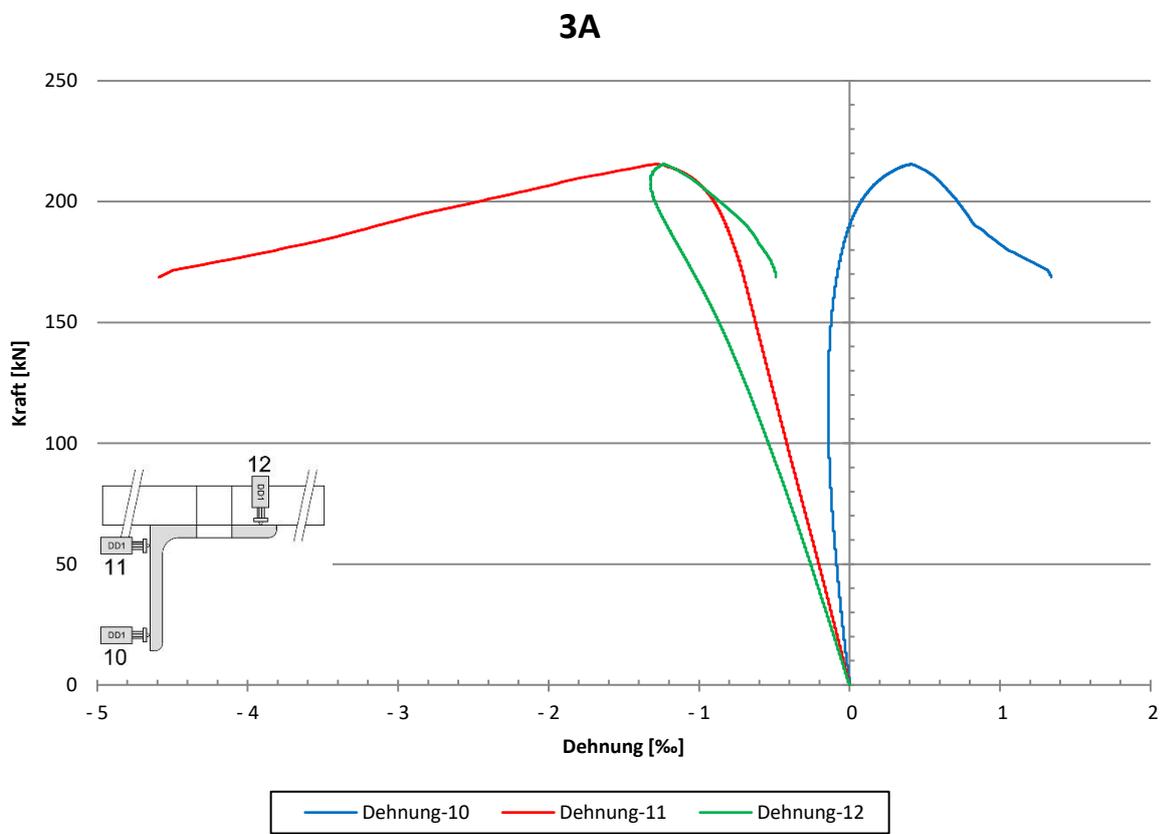
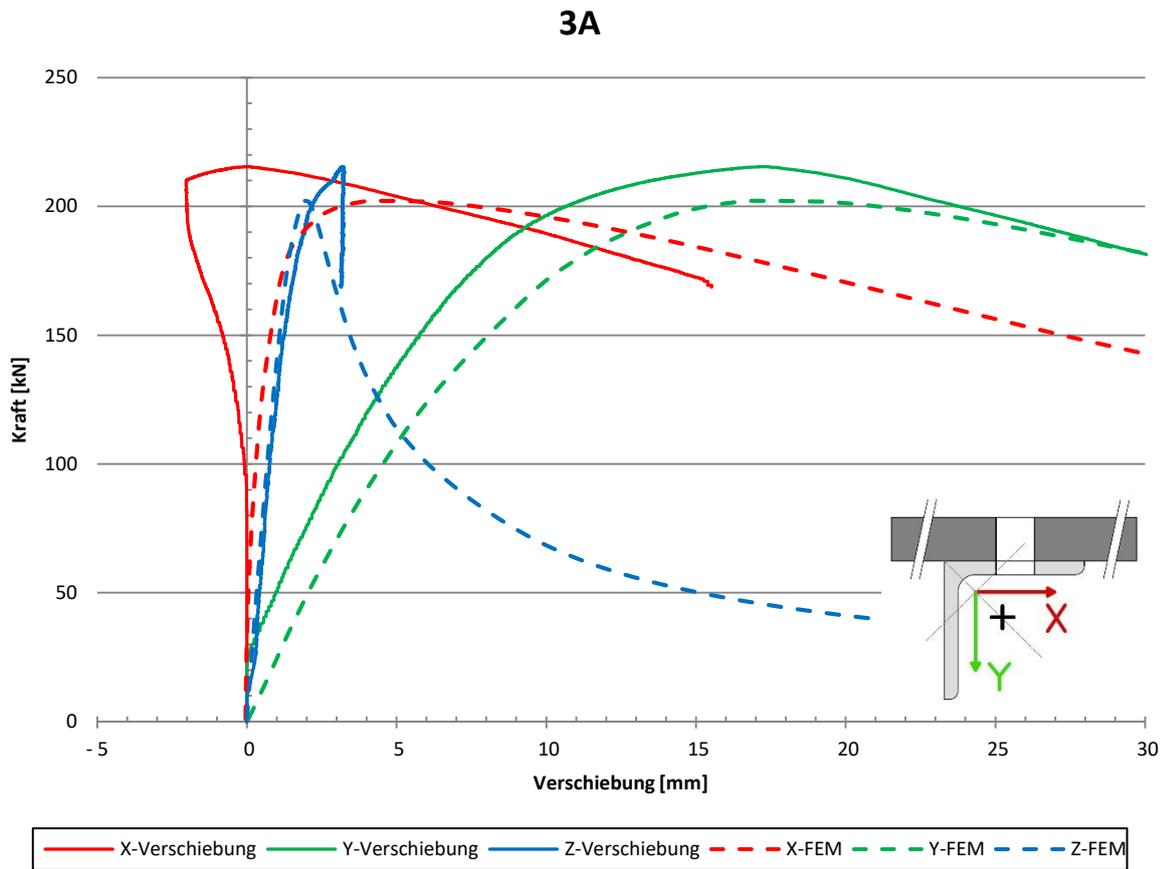


Diagramm 4-10: Kraft/Verdrehung



#### 4.1.4 Laborversuch 4A

Eckdaten:		
Länge	L_Stab:	870 mm
	L_System:	1005 mm
Schrauben:		2 x M20
Lagerungstyp:		BC2 - Scharnier
Vorspannung:		lt. Hersteller
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	3158
Traglast:	$N_{FEM}$ :	155 kN
	$N_{Labor}$ :	157 kN
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	0.98: $\Delta = -1.3\%$

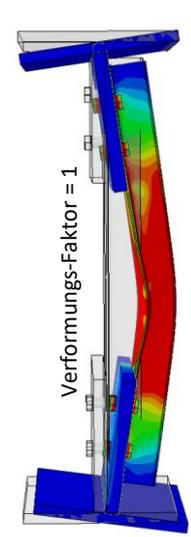



Abb. 4-7: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei diesem Versuch wurde, aufgrund von ansonsten aufwändigen Umbauarbeiten der Messeinrichtungen, der Winkel um 180° um die Y-Achse (siehe Abb. 3-1) gedreht eingebaut. Dies liegt an dem hier verwendeten Lagerungstyp (BC2-Scharnier). Die Anschlussbleche sind 90° um die Z-Achse gedreht. Wie in Diagramm 4-13 sehr gut erkennbar ist, sind auch hier die oberen Schrauben nachgerutscht. Die Begründung hierfür ist, dass keine Z-Verformung in Stabmitte während dem Nachrutschen stattfindet. Weiters ist interessant, dass hier als Vorspannkraft lediglich das empfohlene Drehmoment des Herstellers aufgebracht wurde. Dies könnte die Begründung für das etwas frühere Nachrutschen der Schrauben bei etwa 80kN sein. Die Verformungen des Winkels stimmen sehr gut mit den FE-Berechnungen überein. Die maximale Dehnung liegt hier aufgrund der Scharnierlagerung im nicht verschraubten Schenkel bei Punkt 12 (siehe Diagramm 4-16) vor. Die Verdrehung des Winkels ist anfangs eher klein und steigt nach Erreichen des Traglastmaximums erheblich an. Die Drehmomente der Schrauben nach Versuchsdurchführung zum Lösen der Schrauben sind in Abb. 4-8 ersichtlich.

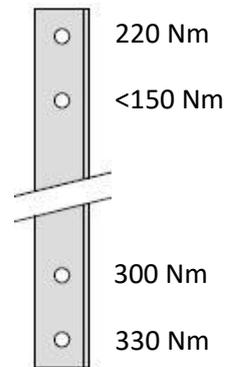


Abb. 4-8: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

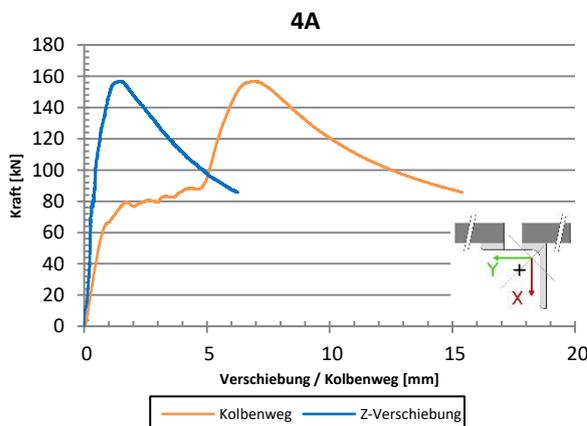


Diagramm 4-13: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

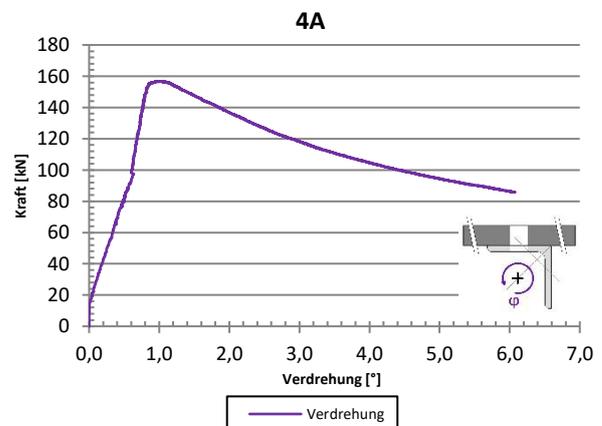


Diagramm 4-14: Kraft/Verdrehung

### 4A

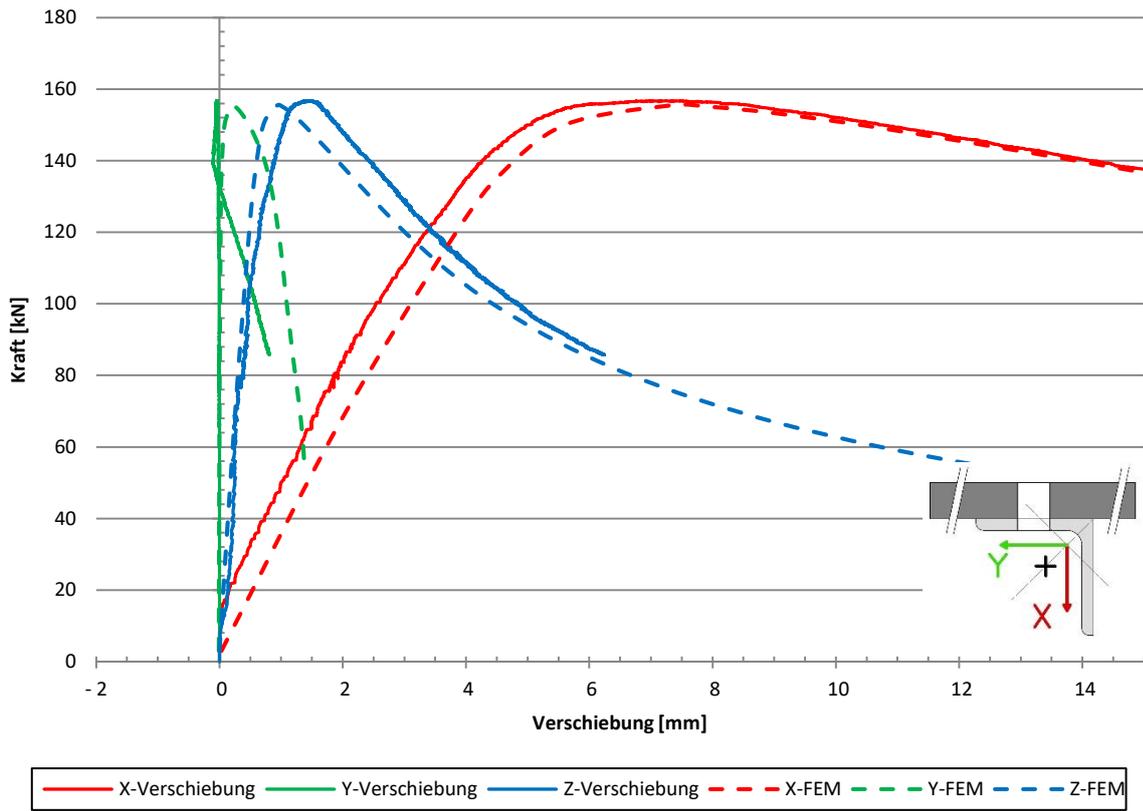


Diagramm 4-15: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 4A

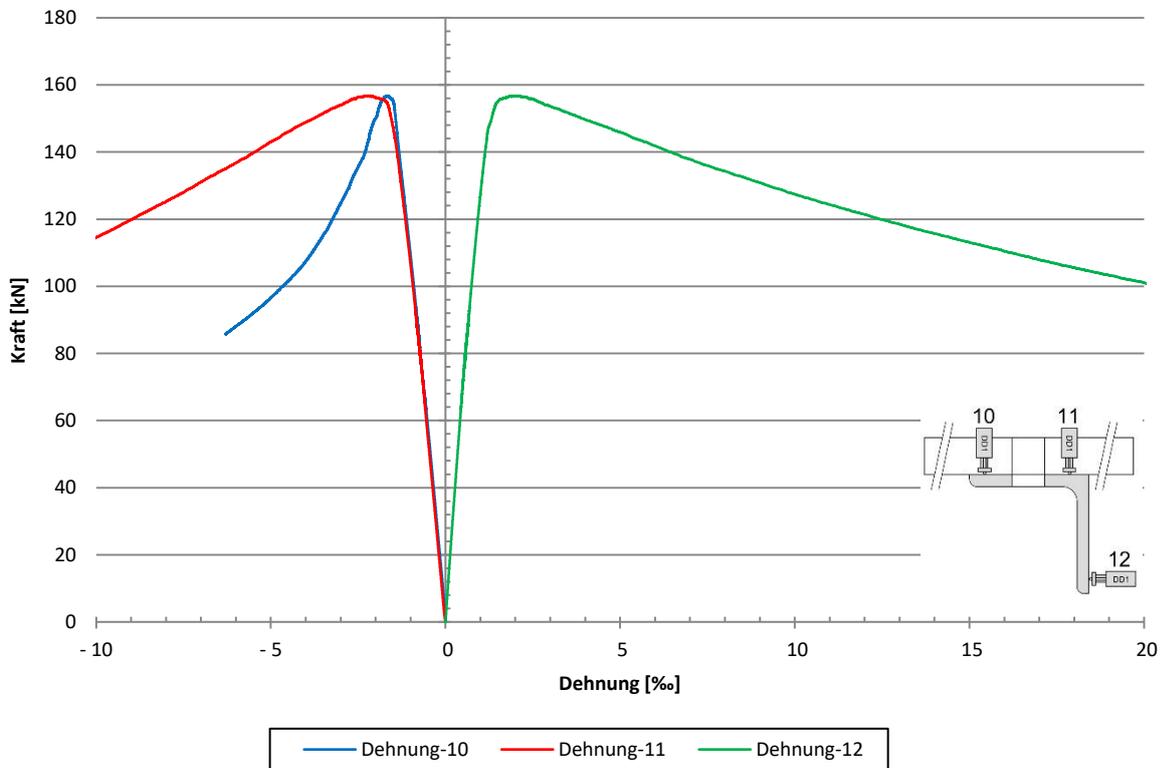


Diagramm 4-16: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.1.5 Laborversuch 5A

<u>Eckdaten:</u>		
Länge	L_Stab:	1550 mm
	L_System:	1685 mm
Schrauben:		2 x M20
Lagerungstyp:		BC2 - Scharnier
Vorspannung:		2-stufig
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		1489
Traglast:	$N_{FEM}$ :	118 kN
	$N_{Labor}$ :	118 kN
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		1.00: $\Delta = 0\%$

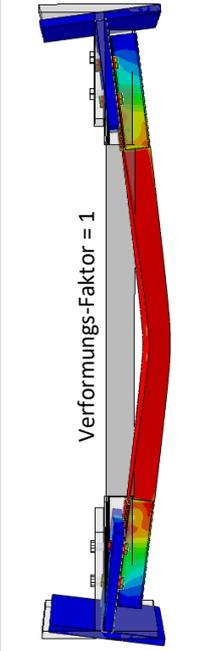



Abb. 4-9: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Auch dieser Winkel wurde aufgrund der ansonsten aufwändigen Umbauarbeiten der Messeinrichtungen um  $180^\circ$  um die Y-Achse (siehe Abb. 3-1) gedreht eingebaut. Die Anschlussbleche sind somit um  $90^\circ$  gedreht. Die Verformungen der FE-Berechnung und des Laborversuches stimmen sehr gut überein. Ein Nachrutschen der Schrauben ist hier nicht festzustellen. Hier wurde wieder, im Gegensatz zu Versuch 4A, das 2-stufige Vorspannverfahren angewendet. Dadurch kann begründet werden warum kein Nachrutschen der Schrauben auftritt (bei den anderen Versuchen war dies erst bei höheren Lasten der Fall). Die maximale Dehnung findet wieder aufgrund der Scharnierlagerung bei Punkt 12 (siehe Diagramm 4-20) statt. Die Verdrehung des Winkels weist auch hier einen gleichmäßigen Verlauf auf und erreicht bei der Traglast etwa  $2^\circ$ , danach nimmt sie deutlich zu. Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach Versuchsdurchführung sind in Abb. 4-10 ersichtlich.

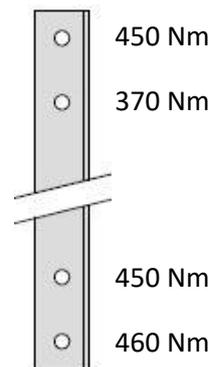


Abb. 4-10: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

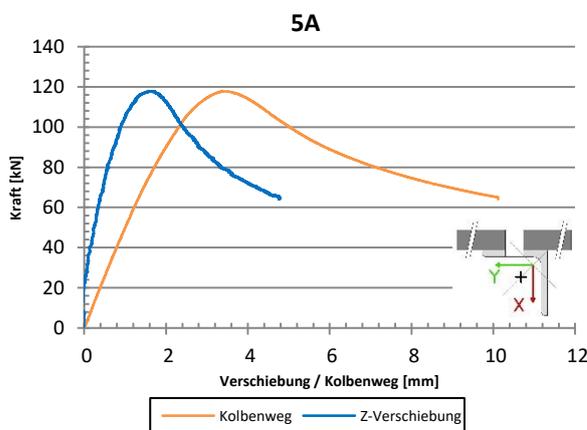


Diagramm 4-17: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

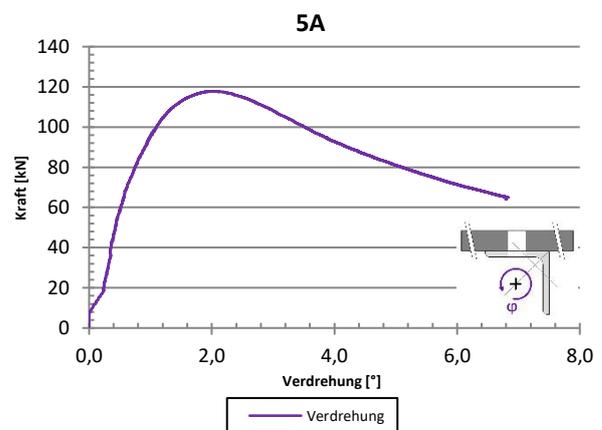


Diagramm 4-18: Kraft/Verdrehung

### 5A

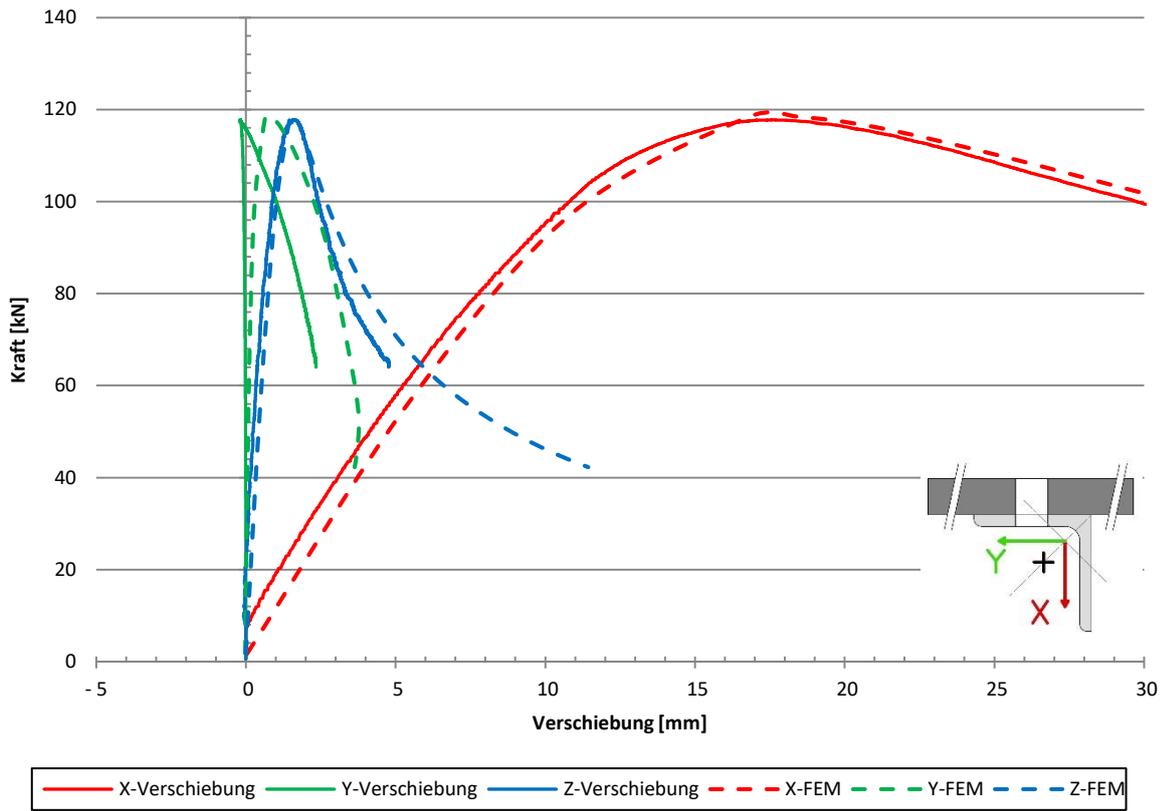


Diagramm 4-19: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 5A

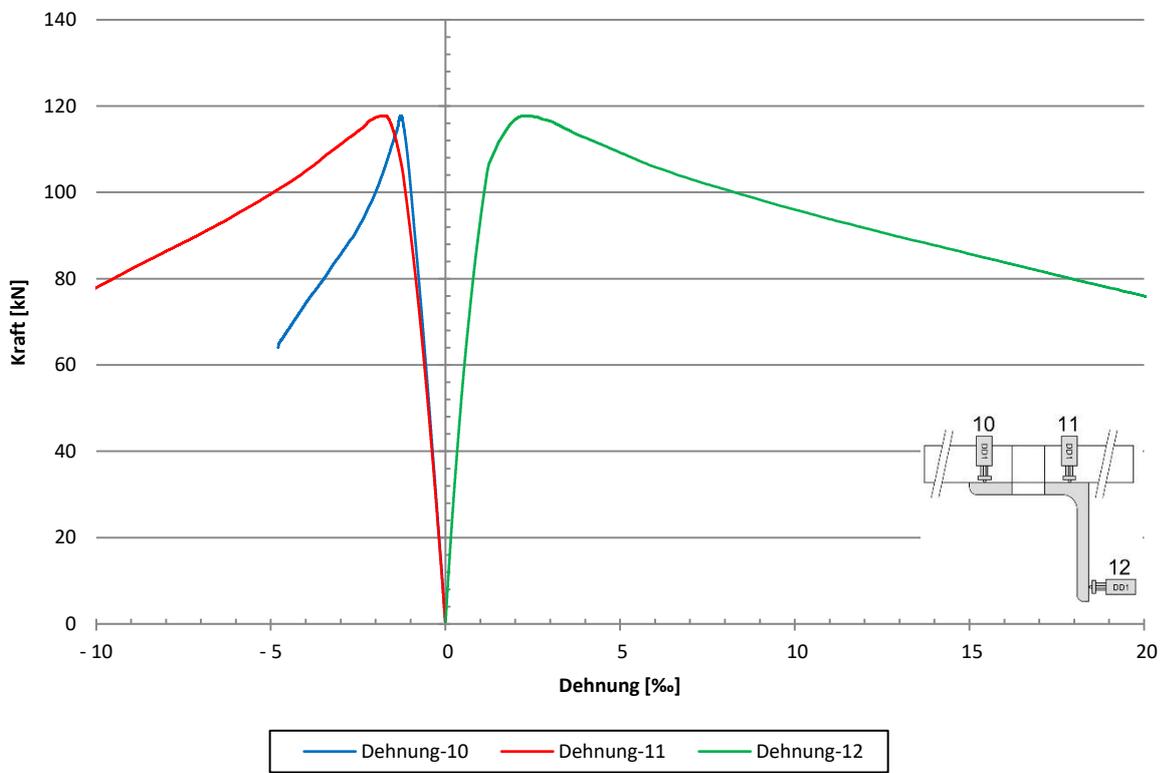


Diagramm 4-20: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.1.6 Laborversuch 6A

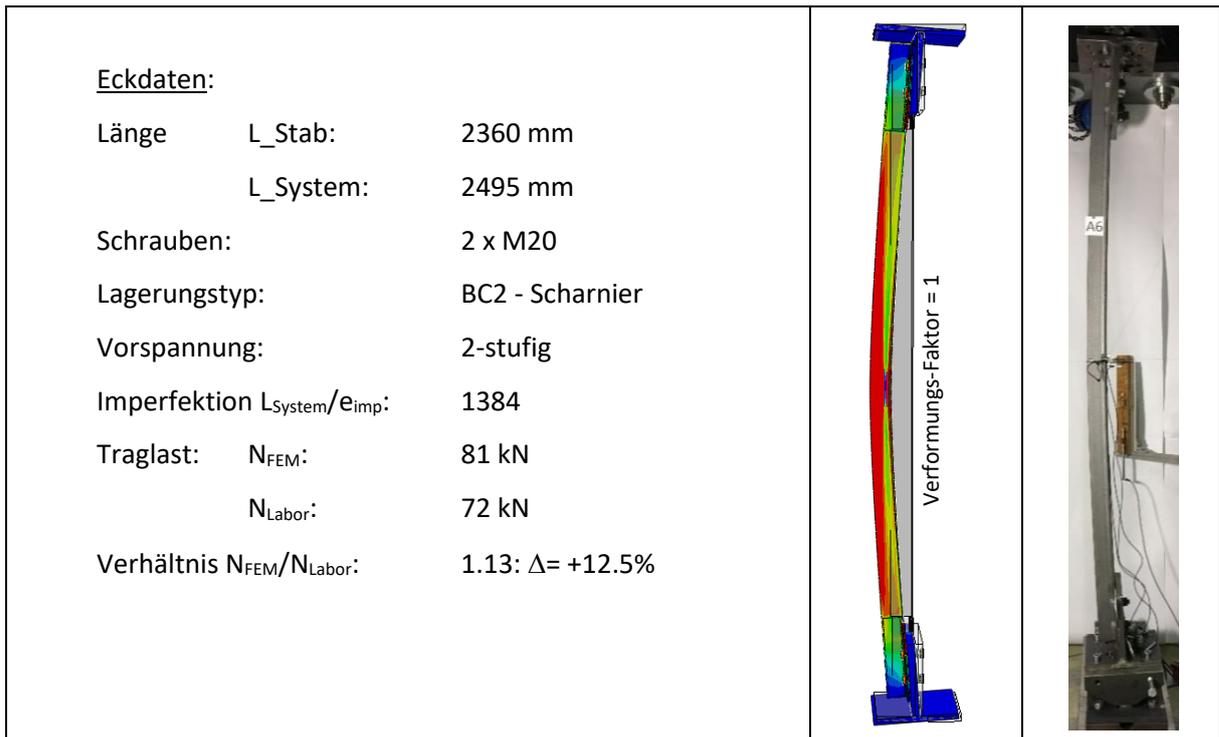


Abb. 4-11: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungsverläufe sind hier in Form einer einwelligen Knickfigur sehr gleichmäßig und stimmen gut mit den FE-Berechnungen überein. Nur die Traglast ist in der FE-Berechnung deutlich höher als erwartet. Ein Nachrutschen der Schrauben ist hier nicht erkennbar. Die maximale Dehnung findet wie erwartet am nicht verschraubten Schenkel bei Punkt 10 statt (siehe Diagramm 4-24). Dieser Sachverhalt lässt sich auf die Scharnierlagerung des Winkels zurückführen. Auch die Verdrehung des Winkels ist durch einen sehr gleichmäßigen Verlauf gekennzeichnet und zeigt keine besonderen Vorkommnisse. Der Wert der Verdrehung bei Traglastmaximum ist jedoch mit  $2^\circ$  bereits deutlich größer als bei den bisherigen Versuchen mit geringerer Winkellänge. Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben sind in Abb. 4-12 ersichtlich. Die oberen beiden Werte wurden nicht gemessen.

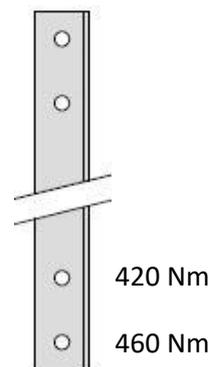


Abb. 4-12: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

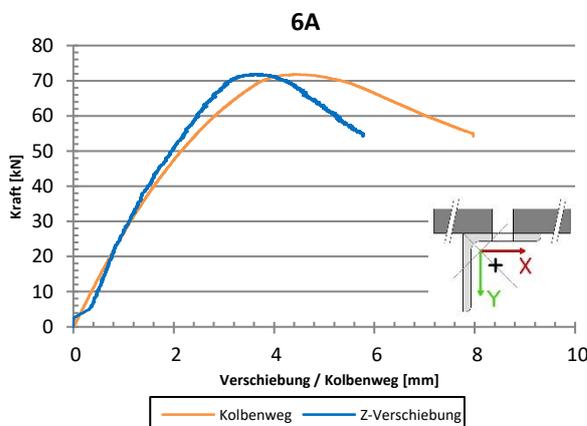


Diagramm 4-21: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

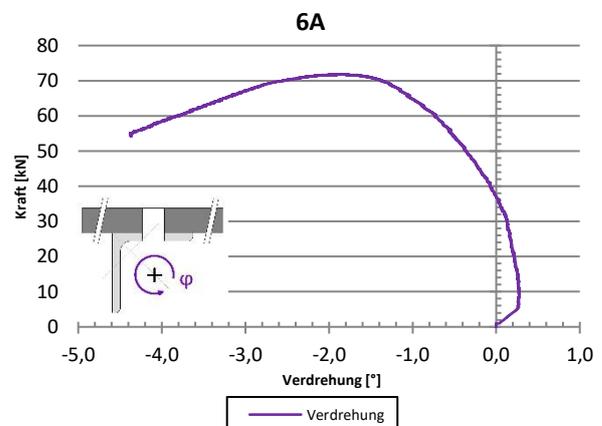


Diagramm 4-22: Kraft/Verdrehung

### 6A

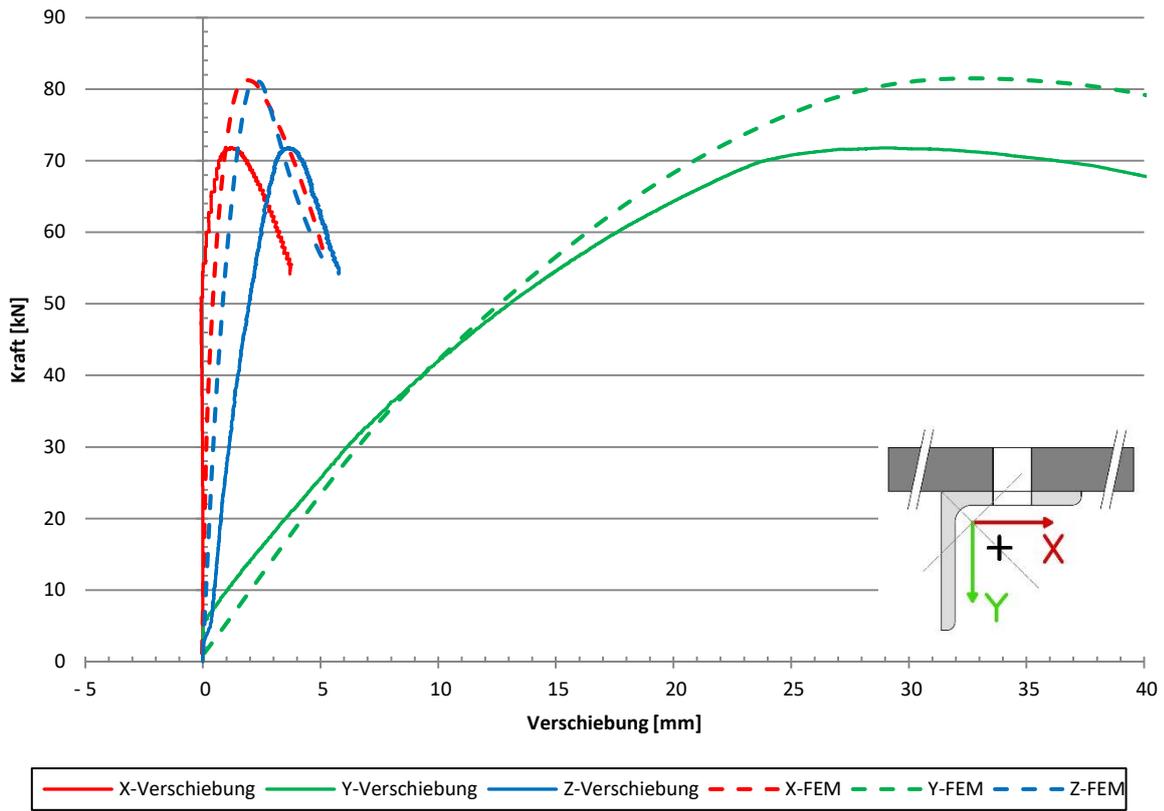


Diagramm 4-23: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 6A

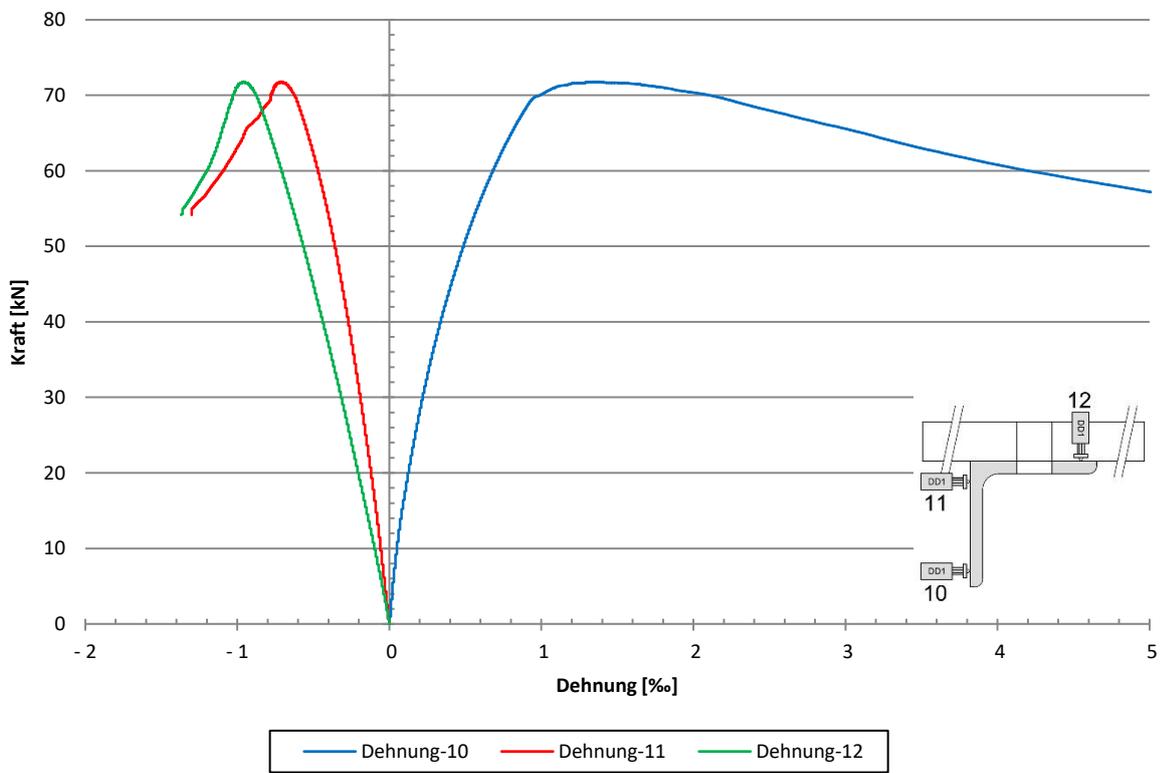


Diagramm 4-24: Dehnungen des Querschnittes

## 4.2 Versuchsreihe B – Winkel 80x8

Bei den Lagerungsbedingungen BC3 (gelenkig) wurden bei den FE-Berechnungen zusätzliche Drehfedersteifigkeiten nach Anhang A verwendet, da keine reibungsfreien Gelenke im Versuch vorlagen.

### 4.2.1 Laborversuch 1B

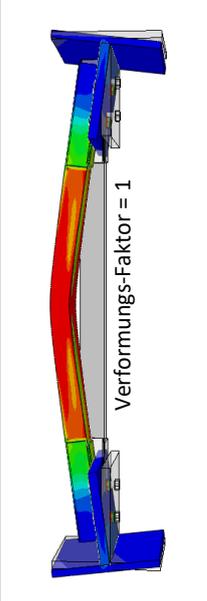
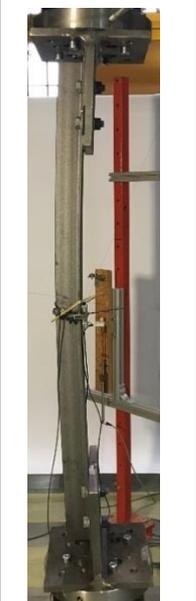
<u>Eckdaten:</u>				
Länge	L_Stab:	1410 mm		
	L_System:	1490 mm		
Schrauben:		2 x M20		
Lagerungstyp:		BC3 - gelenkig		
Vorspannung:		lt. Hersteller		
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	2007		
Traglast:	$N_{FEM}$ :	140 kN		
	$N_{Labor}$ :	148 kN		
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	0.95: $\Delta = -5.4\%$		

Abb. 4-13: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Auch bei Versuch 1B stimmen die Verformungsrichtung und -größe mit den FE-Ergebnissen annähernd überein. Die Traglasten beider Ergebnisse weisen nur eine geringe Abweichung auf. In Diagramm 4-25 ist auch deutlich erkennbar, dass bei etwa 120kN die unteren Schrauben nachrutschen. Dies begründet sich wieder durch die Tatsache, dass bei Änderung des Kolbenweges auch eine Verformung in Z-Richtung in Stabmitte stattfindet. Das Nachrutschen der Schrauben würde auch den eigenartigen Verlauf der Verdrehung bei 120kN (siehe Diagramm 4-26) rechtfertigen. Die Dehnung bzw. Stauchung des Winkels ist sehr gut nachvollziehbar (siehe Diagramm 4-28) und dessen Verläufe können begründet werden durch die starke Verformung des Winkels in Y-Richtung. Die maximale Zugdehnung tritt beim nicht verschraubten Winkelschenkel auf. Die sprunghafte Änderung der Dehnung bei 120kN in Diagramm 4-28 ist auch auf das Nachrutschen zurückzuführen, da sich bei der Entlastung die Dehnung ändert.

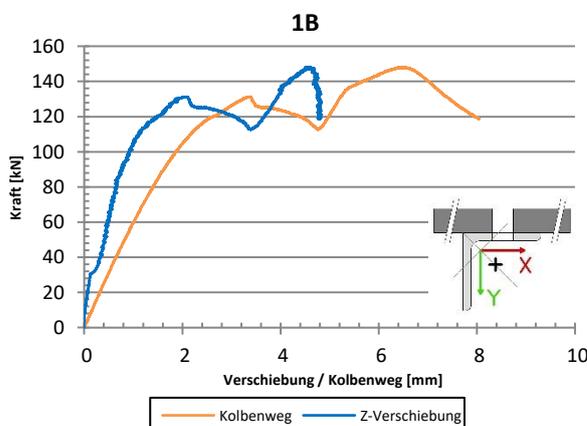


Diagramm 4-25: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

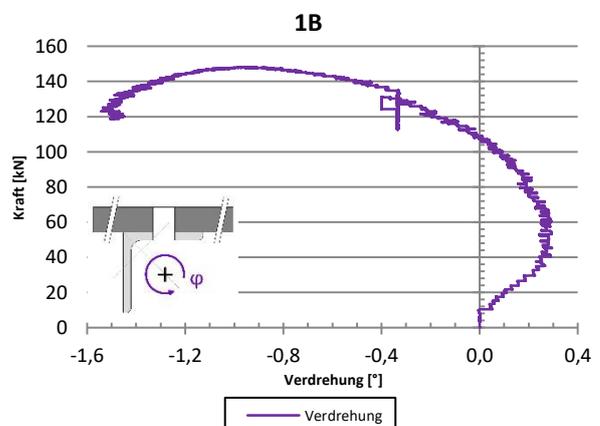


Diagramm 4-26: Kraft/Verdrehung

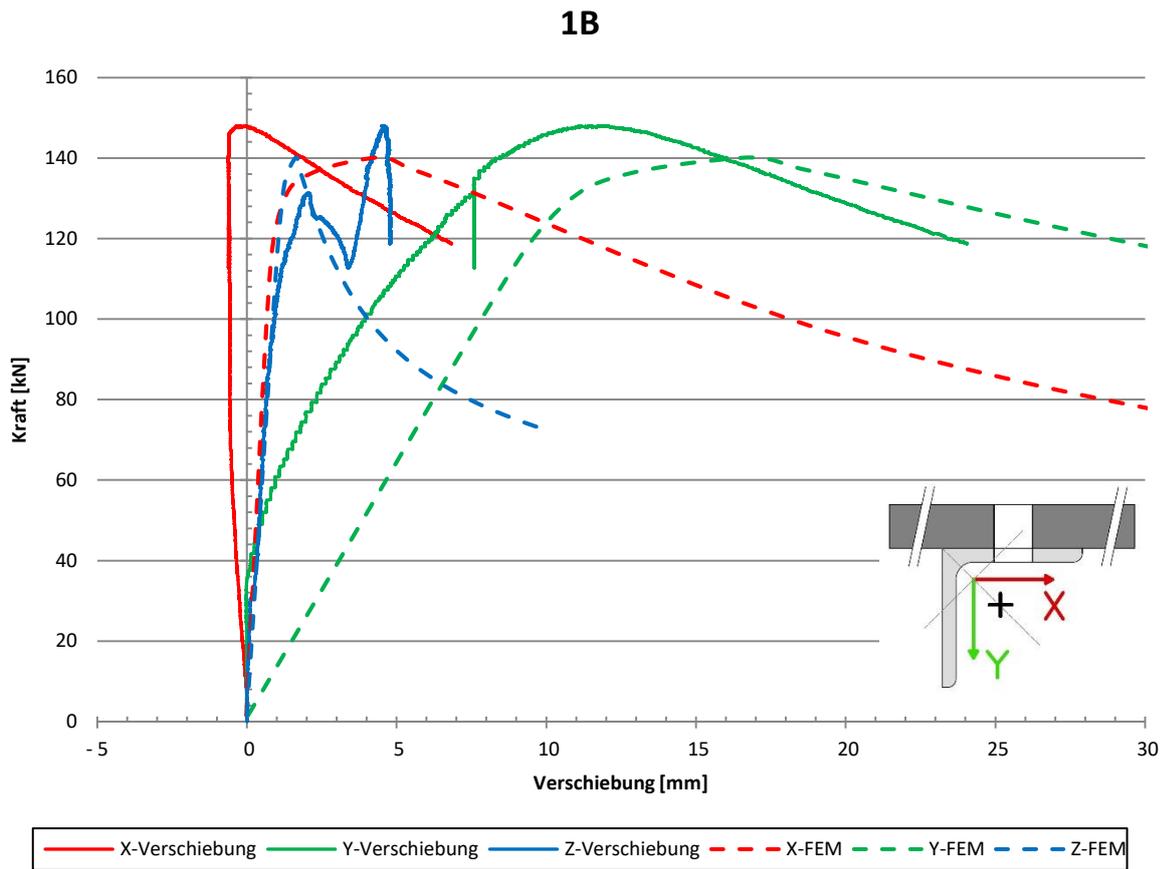


Diagramm 4-27: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

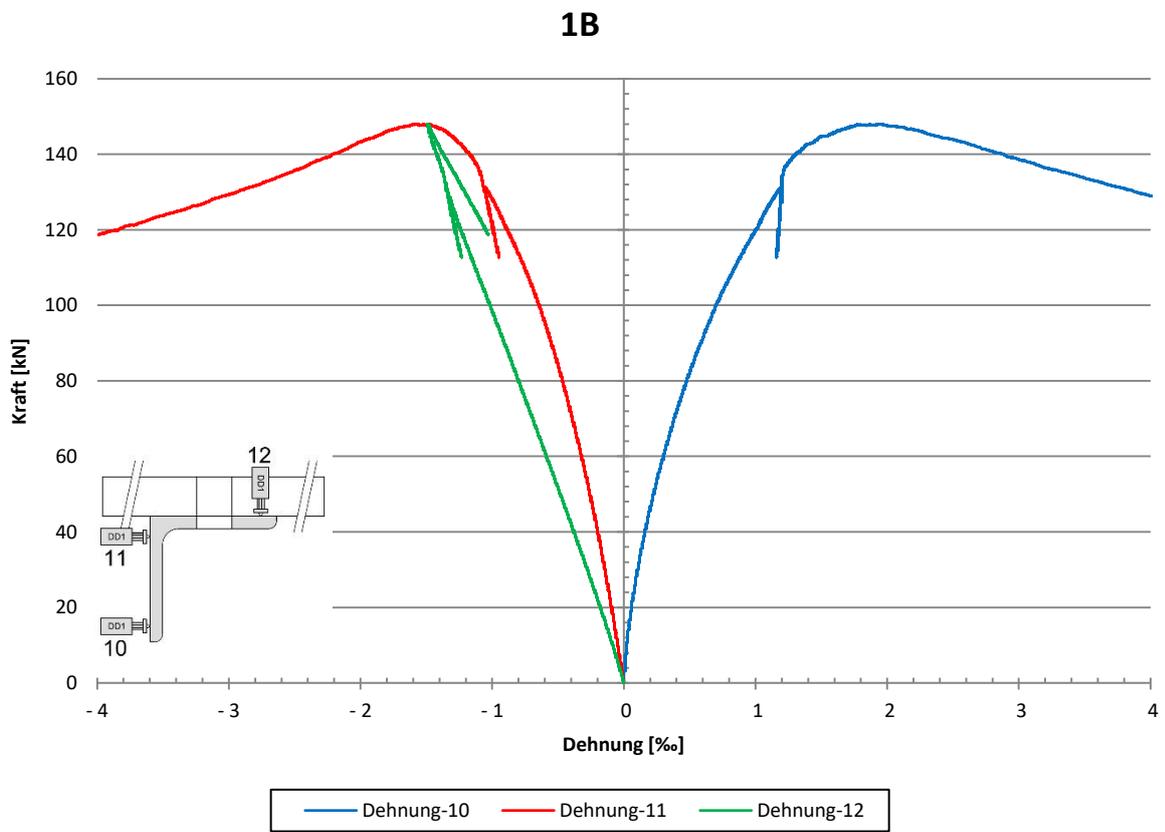


Diagramm 4-28: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.2.2 Laborversuch 2B

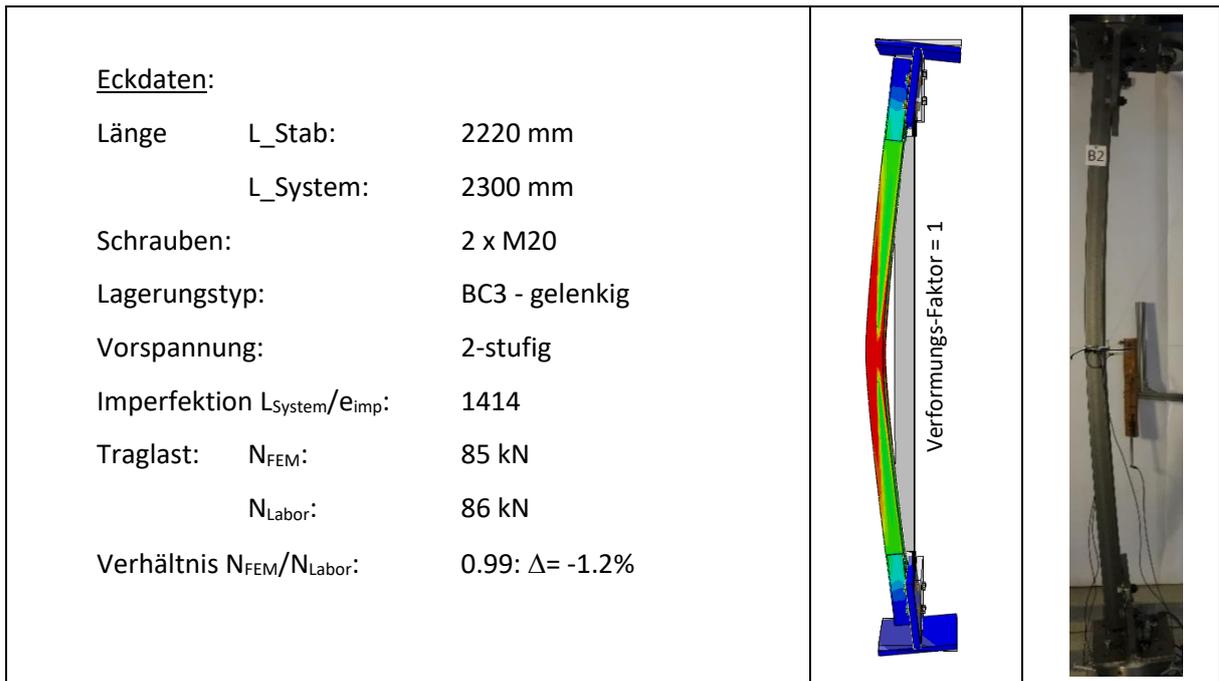


Abb. 4-14: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Auch bei Versuch 2B sind beide Ergebnisverläufe annähernd gleich. Die Traglasten weichen nur minimal voneinander ab. Ein Nachrutschen der Schrauben kann hier nicht beobachtet werden. Generell weisen alle Diagramme einen sehr gleichmäßigen und stimmigen Verlauf auf. Die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen finden auch hier bei dem nicht verschraubten Winkelschenkel statt (siehe Diagramm 4-32). Dies lässt sich durch das Ausweichen des Winkels in Y-Richtung begründen. Die Verdrehung zeigt einen gleichmäßigen Verlauf mit einem Maximum von etwa  $2^\circ$  beim Erreichen der Traglast. Weiters wurden die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach dem Versuch gemessen. Die Werte dafür sind in Abb. 4-15 ersichtlich.

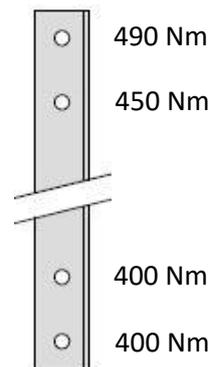


Abb. 4-15: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

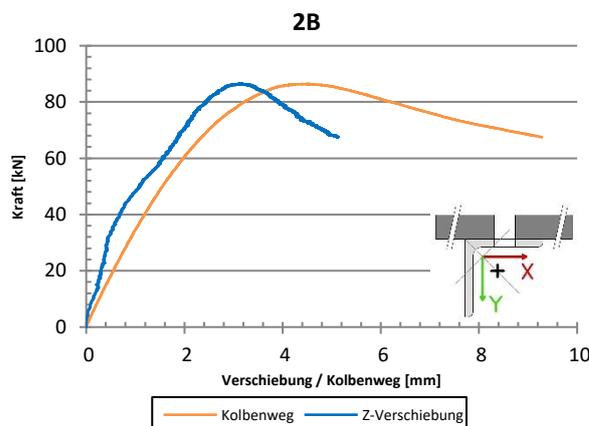


Diagramm 4-29: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

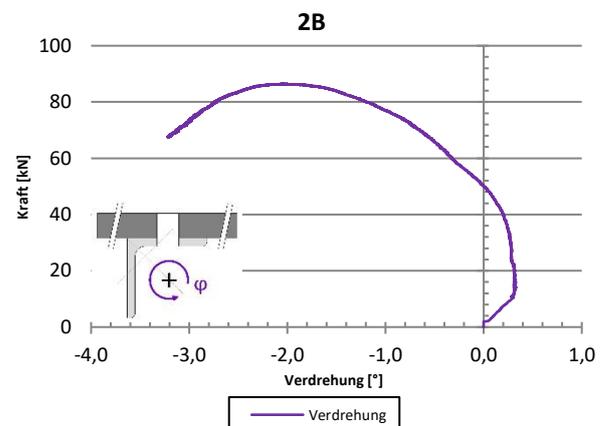


Diagramm 4-30: Kraft/Verdrehung

## 2B

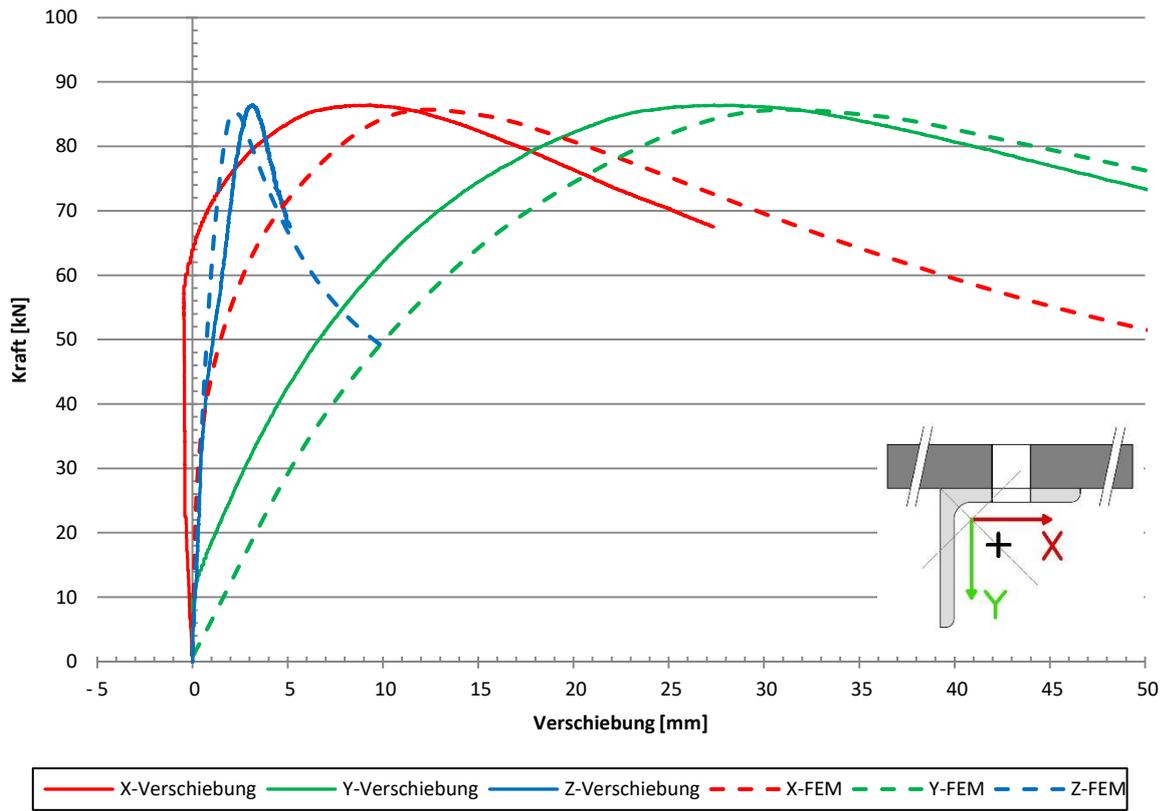


Diagramm 4-31: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

## 2B

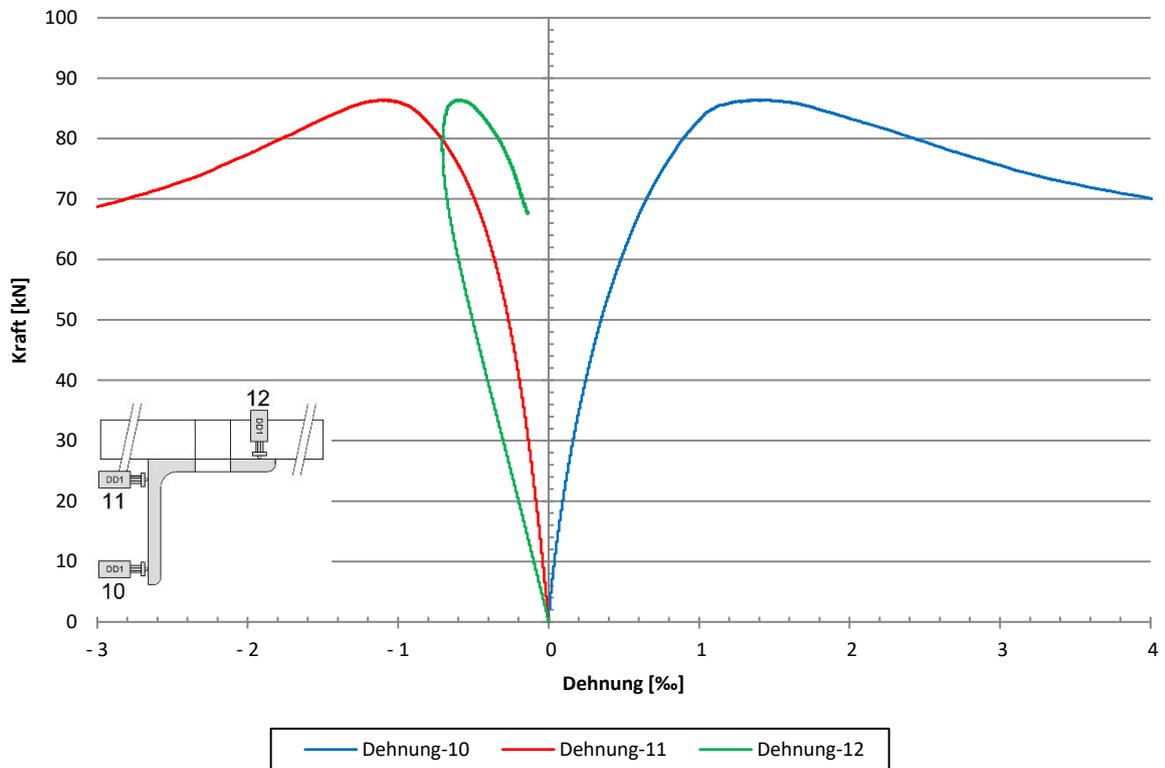


Diagramm 4-32: Dehnungen des Querschnittes

### 4.2.3 Laborversuch 3B

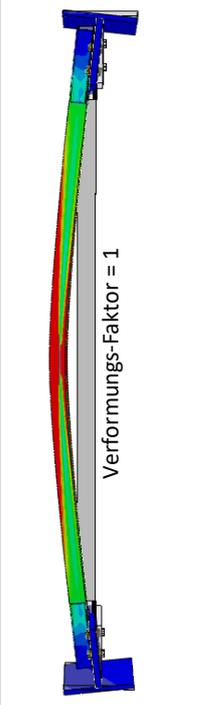
<u>Eckdaten:</u>				
Länge	L_Stab:	2770 mm		
	L_System:	2850 mm		
Schrauben:		2 x M20		
Lagerungstyp:		BC3 - gelenkig		
Vorspannung:		2-stufig		
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		1280		
Traglast:	$N_{FEM}$ :	62 kN		
	$N_{Labor}$ :	61 kN		
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		1.02: $\Delta = +1.6\%$		

Abb. 4-16: Eckdaten (links) Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungen zwischen FE- und Laborversuch stimmen gut überein. Auch die maximale Traglast zeigt nur minimale Abweichungen. Anhand von Diagramm 4-33 ist kein Nachrutschen der Schrauben erkennbar. Die maximalen Verformungen des Winkels treten in Y-Richtung auf (siehe Diagramm 4-35). Auch die Verdrehung des Winkels bestätigt den erwarteten Verlauf und nimmt beim Traglastmaximum einen Wert von etwa 2.5° an. Die maximale Dehnung des Winkels tritt demzufolge bei Punkt 10 und die maximale Stauchung bei Punkt 11 des nicht verschraubten Schenkels auf. Dies lässt sich auf die gelenkige Lagerung und damit auf das Ausweichen des Winkels vorzugsweise in Y-Richtung begründen. Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach Versuchsdurchführung sind in Abb. 4-17 ersichtlich. Die oberen beiden Werte wurden nicht gemessen.

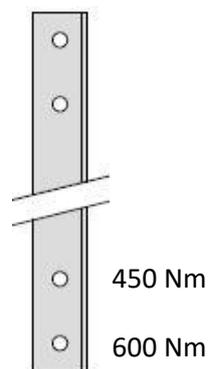


Abb. 4-17: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

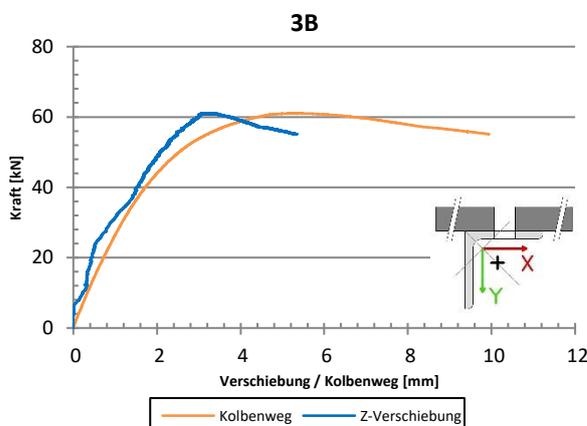


Diagramm 4-33: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

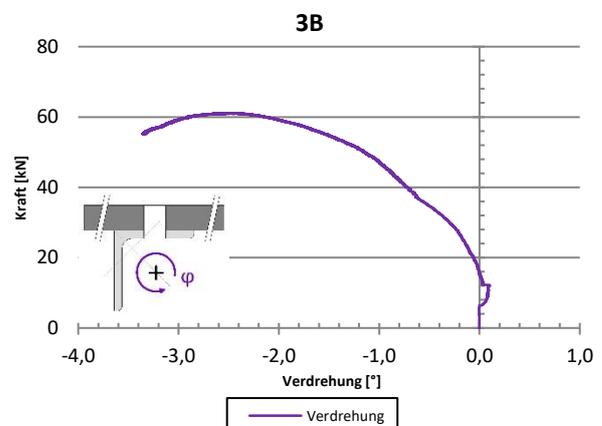


Diagramm 4-34: Kraft/Verdrehung

### 3B

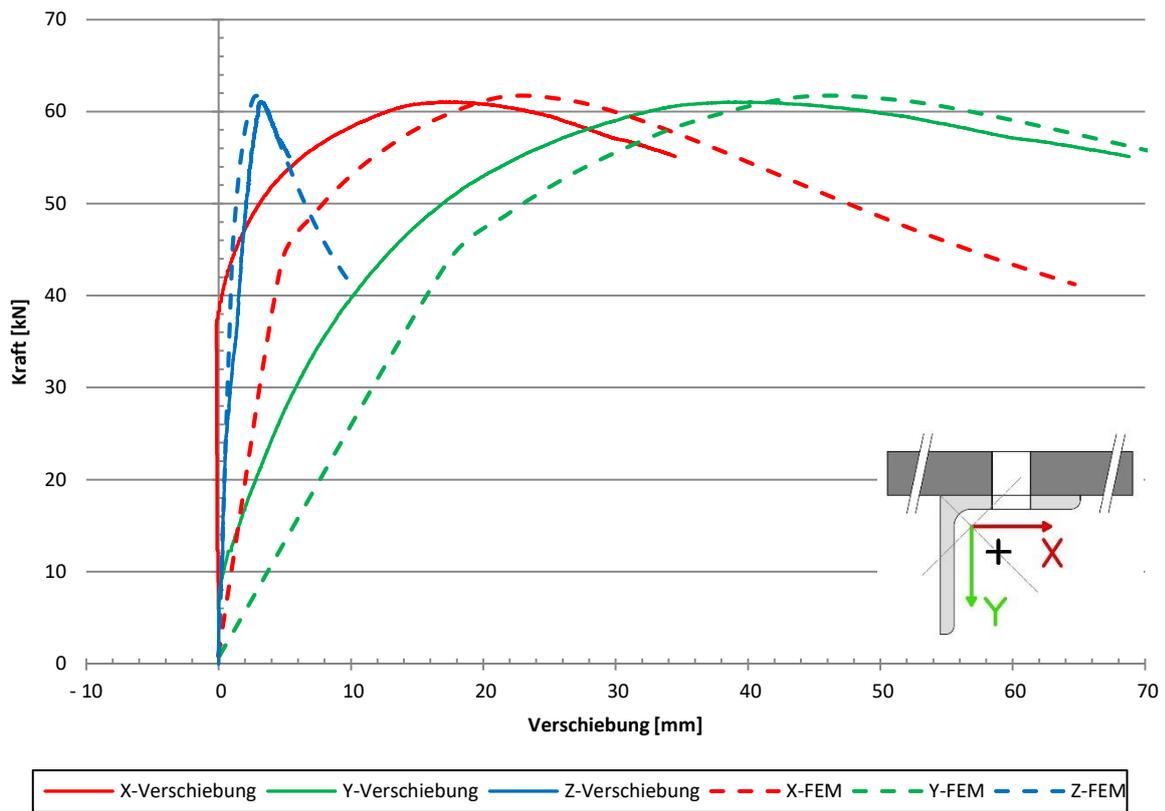


Diagramm 4-35: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 3B

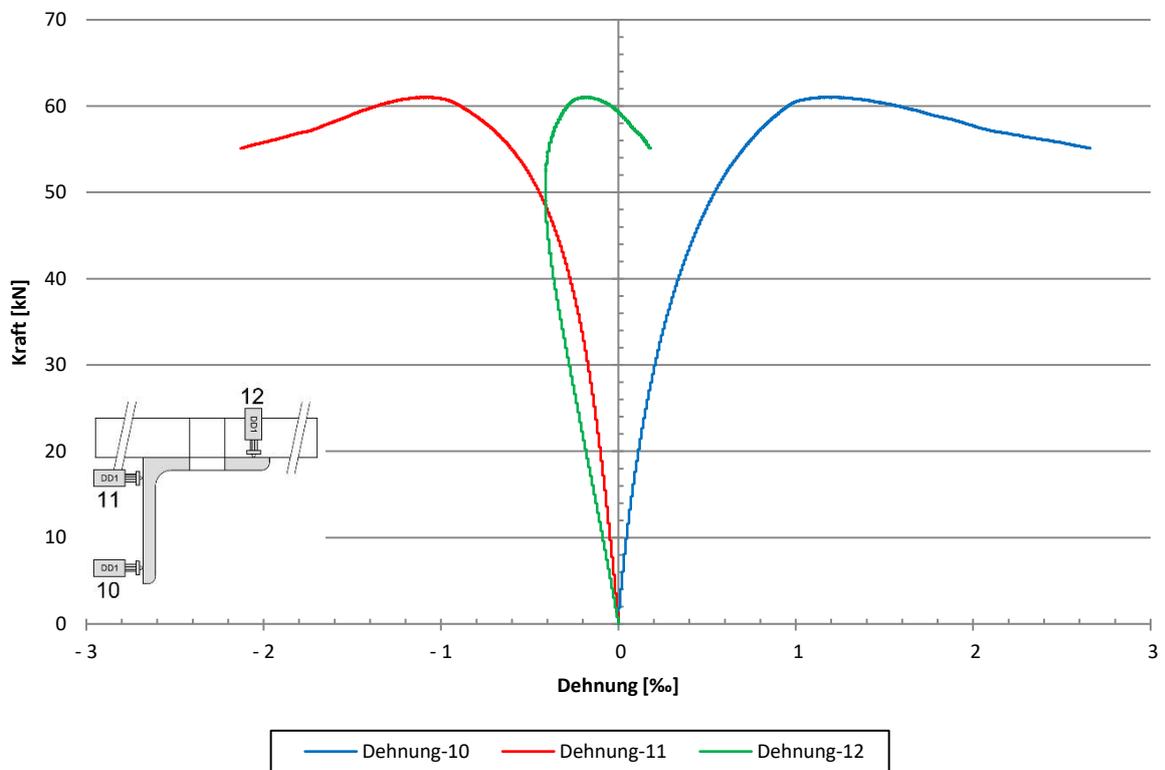


Diagramm 4-36: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.2.4 Laborversuch 4B

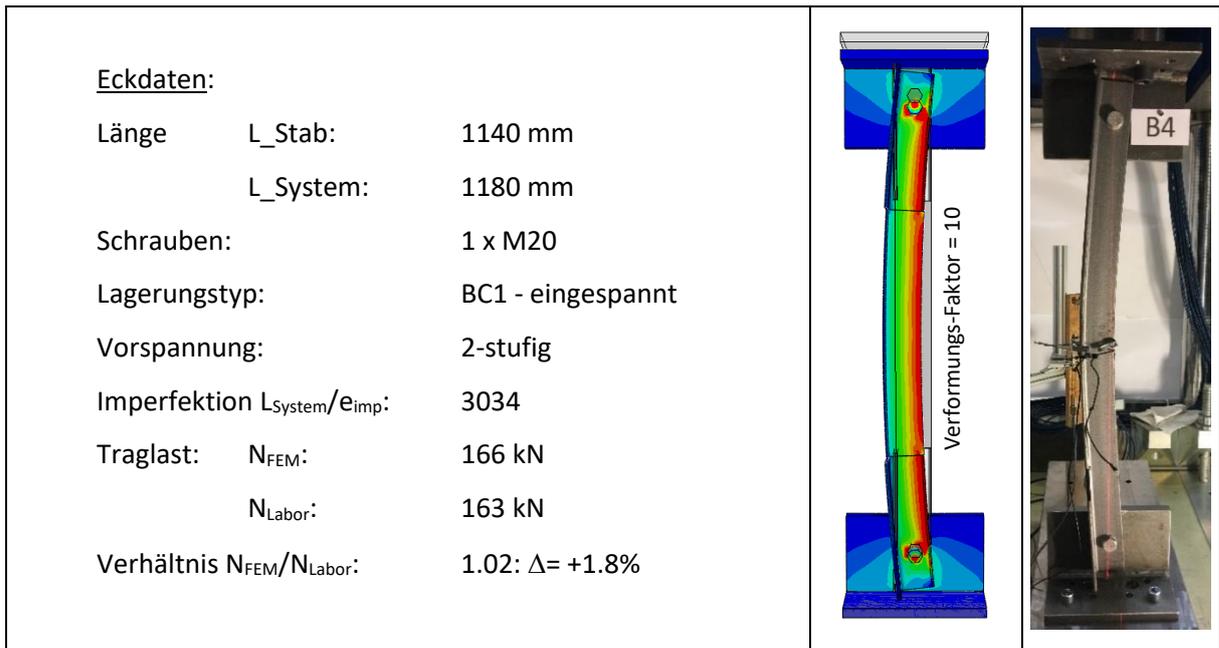


Abb. 4-18: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Der Versuch 4B stellt den ersten Versuch mit nur einer Schraube je Verbindung dar. Die durch die FE-Berechnung ermittelten Verformungen decken sich sehr gut mit den realen Verformungen. Auch die maximalen Traglasten der beiden Ergebnisse weisen nur geringe Abweichungen auf. Anhand von Diagramm 4-37 lässt sich ein Nachrutschen der oberen Schraube bei etwa 110kN begründen. Die untere Schraube rutscht, deutlich sichtbar aufgrund der Z-Verformung in Stabmitte, bei etwa 140kN nach. Dieser Sachverhalt tritt auch in der FE-Berechnung auf (siehe Z-FEM, Diagramm 4-39). Nach Erreichen des Traglastmaximums treten bei etwa 150kN deutlich sichtbare Sprünge der X-/Z-Verformung und der Verdrehung auf. Vermutungen lassen darauf schließen, dass sich der Winkel mit den Schrauben verkeilt hat und sich diese durch die Belastung ruckartig gelöst haben. Dies würde auch erklären, warum die Y-Verformung keinen Sprung aufweist. Die maximalen Dehnungen zeigen sich bei den Punkten 10 und 11, mit nahezu identischer Größenordnung. Am Punkt 12 erfährt der Winkel die maximale Stauchung, was auch auf die negative X-Verformung zurückzuführen ist. Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach Durchführung des Versuches sind in Abb. 4-19 ersichtlich. Der obere Wert wurde nicht gemessen.

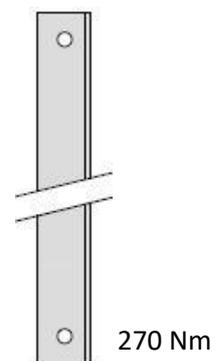


Abb. 4-19: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

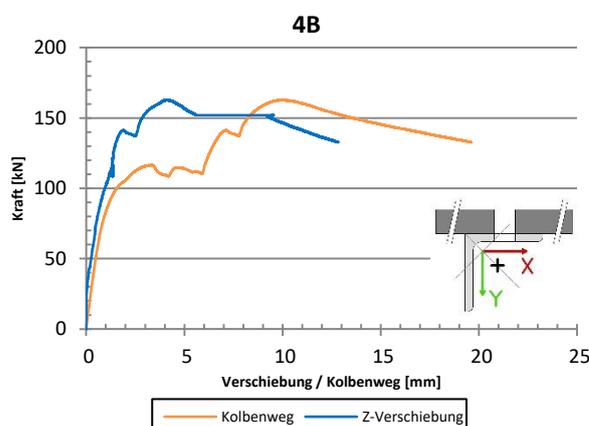


Diagramm 4-37: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

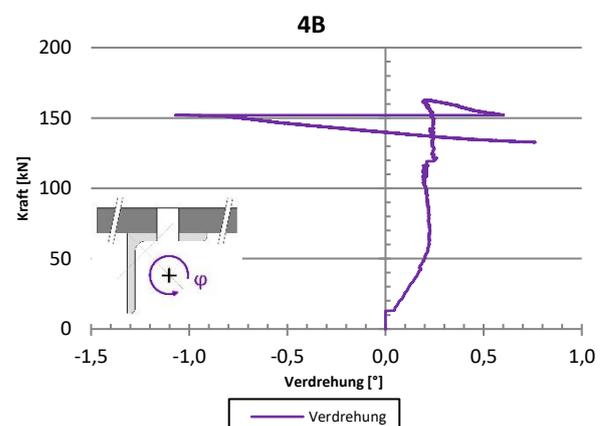


Diagramm 4-38: Kraft/Verdrehung

### 4B

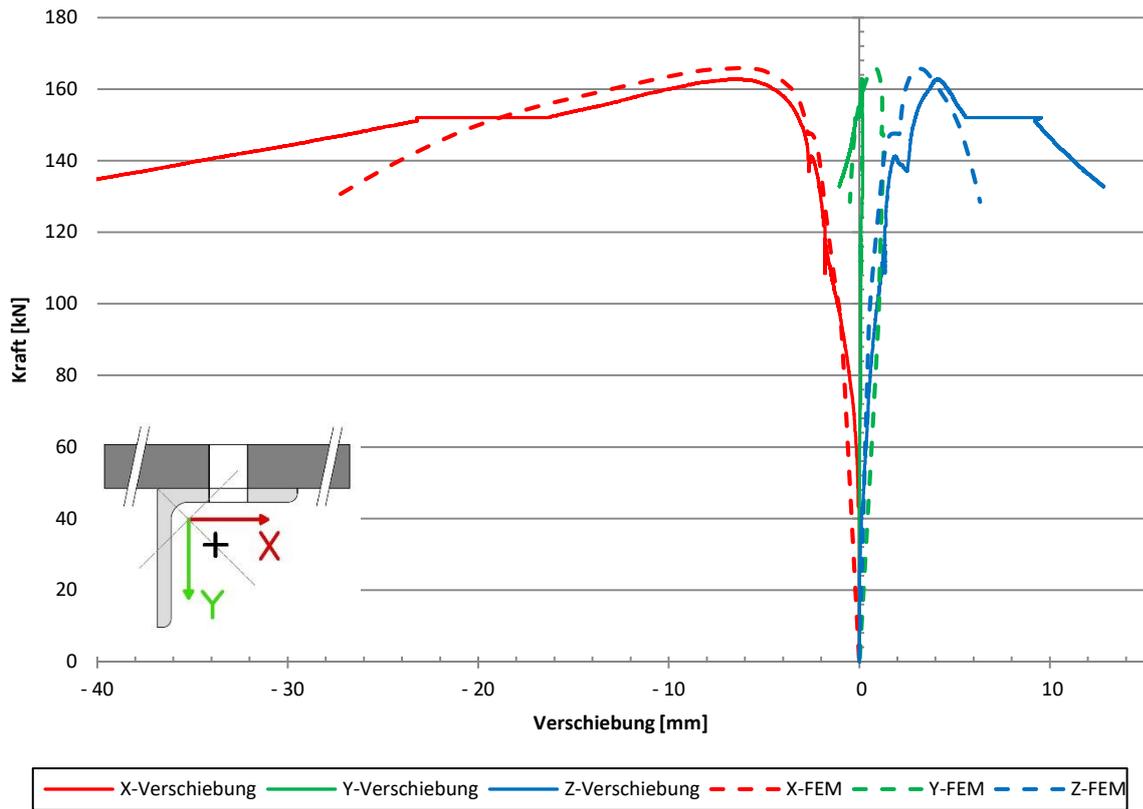


Diagramm 4-39: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 4B

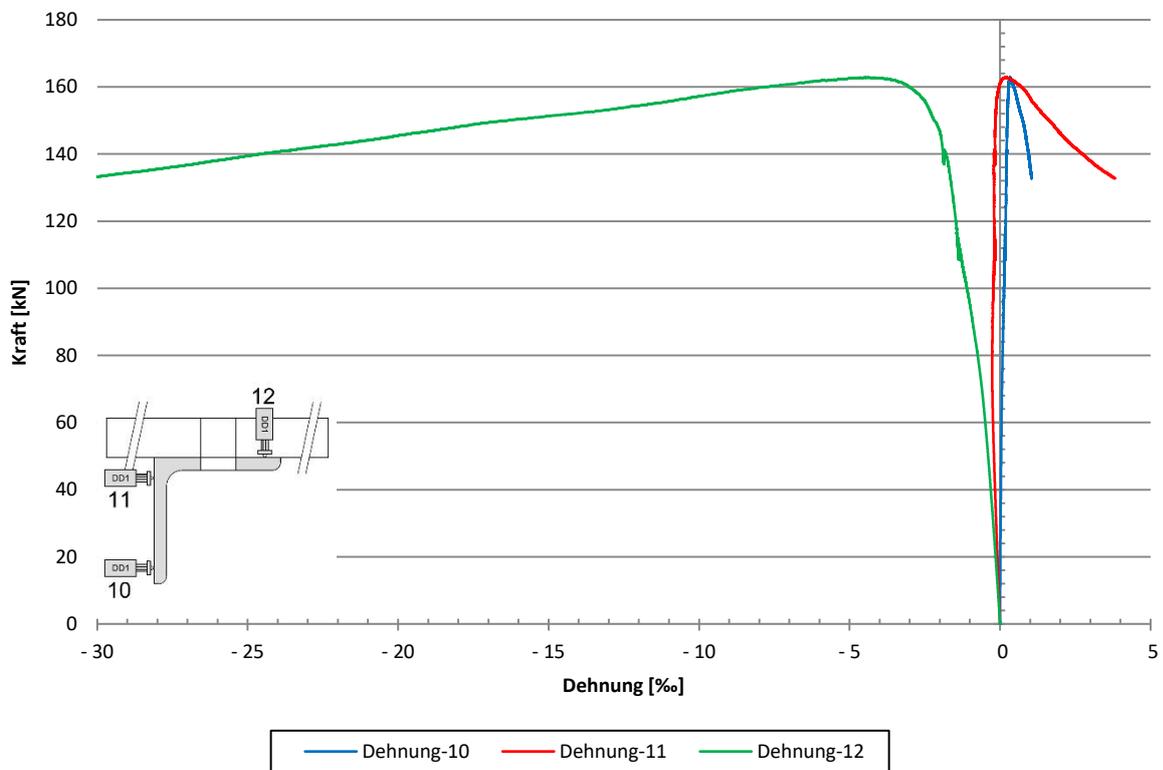


Diagramm 4-40: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.2.5 Laborversuch 5B

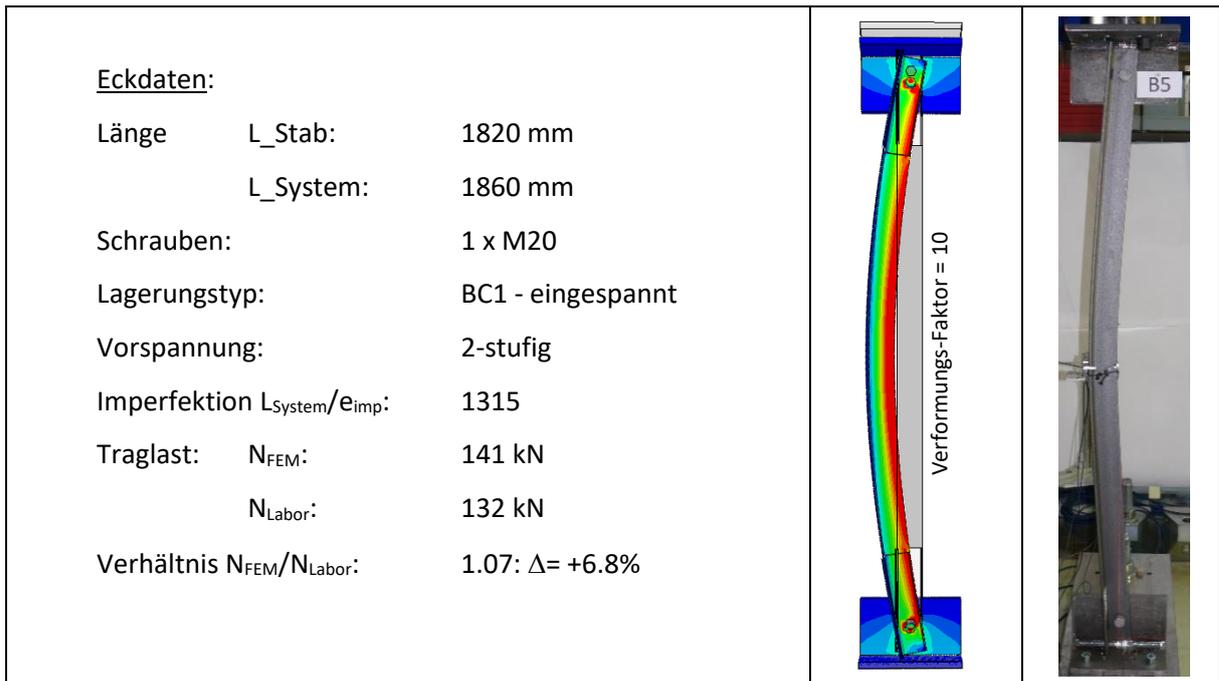


Abb. 4-20: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verläufe der Verformungen weisen eine gute Übereinstimmung auf, lediglich die maximalen Traglasten der beiden Ergebnisse sind nicht identisch. Die Abweichungen sind aber durchaus im annehmbaren Rahmen. Ein Nachrutschen der Schrauben ist nicht direkt erkennbar. Interessanterweise tritt dies erst bei Erreichen der Traglast von etwa 130kN auf. Ansonsten gibt es keine besonderen Vorkommnisse bei den Verformungen. Die Verdrehung des Winkels nimmt anfangs zu und verringert sich dann bis zum Erreichen des Traglastmaximums. Danach steigt die Verdrehung wieder stark an. Die maximale Dehnung des Winkels finden wie erwartet am nicht geschraubten Schenkel statt, wohingegen die maximale Stauchung des Winkels am verschraubten Schenkel bei Punkt 12 stattfindet.

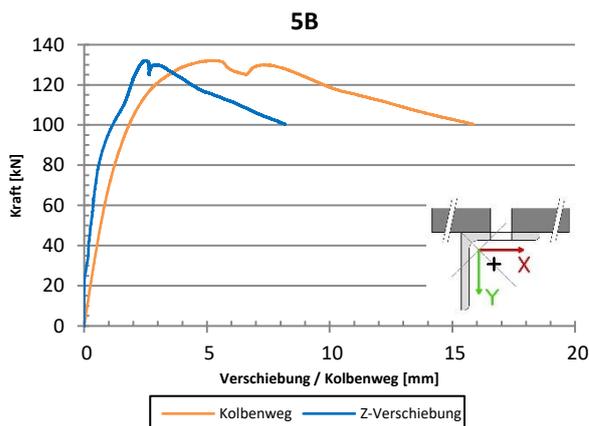


Diagramm 4-41: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

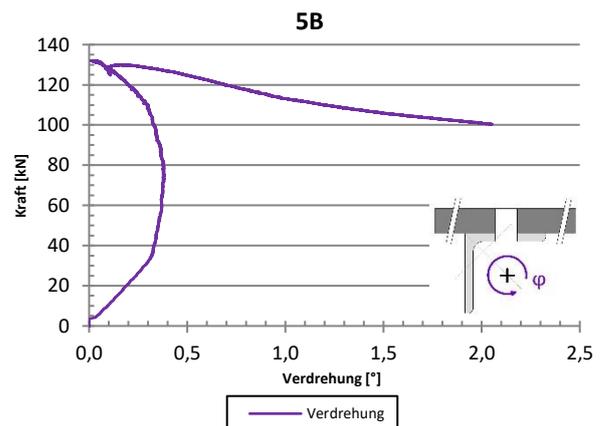


Diagramm 4-42: Kraft/Verdrehung

### 5B

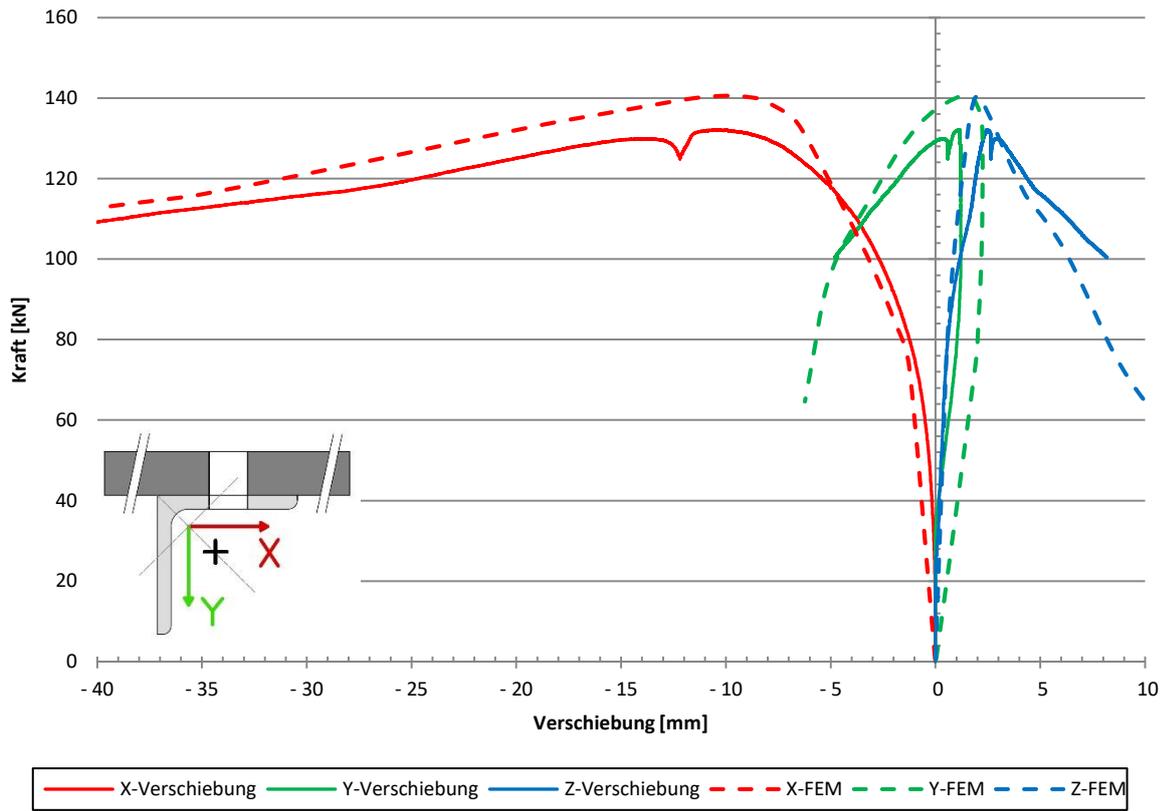


Diagramm 4-43: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 5B

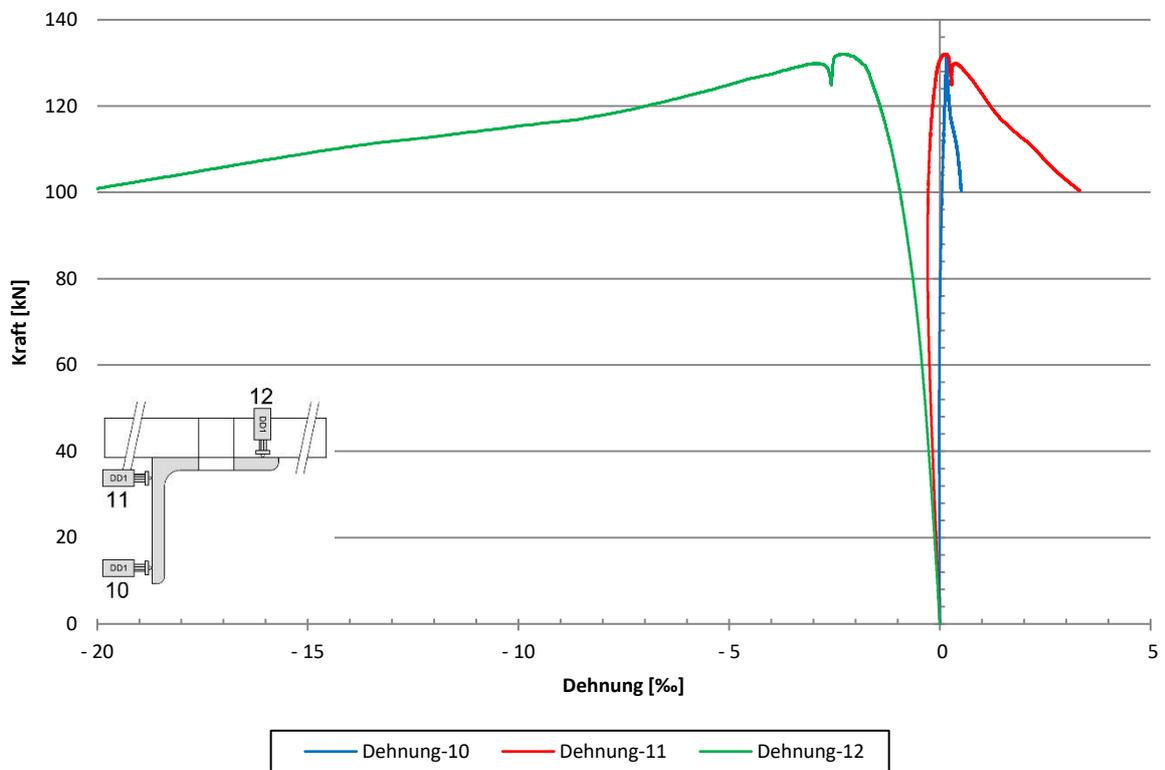


Diagramm 4-44: Dehnungen des Querschnittes

### 4.3 Versuchsreihe C – Winkel 80x8

Bei den Lagerungsbedingungen BC3 (gelenkig) wurden bei den FE-Berechnungen zusätzliche Drehfedersteifigkeiten nach Anhang A verwendet.

#### 4.3.1 Laborversuch 1C

<p><u>Eckdaten:</u></p> <p>Länge      L_Stab:            3170 mm</p> <p>                 L_System:        3210 mm</p> <p>Schrauben:                1 x M20</p> <p>Lagerungstyp:            BC1 - eingespannt</p> <p>Vorspannung:             2-stufig</p> <p>Imperfektion <math>L_{System}/e_{imp}</math>:    2162</p> <p>Traglast:      N_FEM:            106 kN</p> <p>                 N_Labor:            98 kN</p> <p>Verhältnis <math>N_{FEM}/N_{Labor}</math>:        1.08: <math>\Delta = +8.2\%</math></p>				
---	--	--	--	--

Abb. 4-21: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei Versuch 1C sind die Verläufe der Verformungen nahezu identisch. Lediglich die maximale Traglast der FE-Berechnung liegt etwas höher, als jene des Laborversuchs. Ein Nachrutschen der Schrauben ist nicht erkennbar und auch aufgrund der geringen Traglast nicht wahrscheinlich. Dennoch weist die Z-Verformung des Winkels einen seltsamen Verlauf auf, wofür es nicht direkt eine Begründung gibt. Eine Vermutung für den Verlauf der Z-Verformung wäre, dass die maximale Verformung nicht genau in der Mitte der Längsachse des Winkels stattfindet. Durch diese Asymmetrie würde sich der Messpunkt am Winkel verdrehen und somit eine Änderung der Z-Verformung hervorrufen. Die maximale Dehnung findet aufgrund der Verformungsfigur am nicht verschraubten Schenkel statt, wohingegen die maximale Stauchung des Winkels am Punkt 12 des verschraubten Winkelschenkels stattfindet. Die Verdrehungen des Winkels weisen einen gleichmäßigen Verlauf auf, sind aber sehr gering.

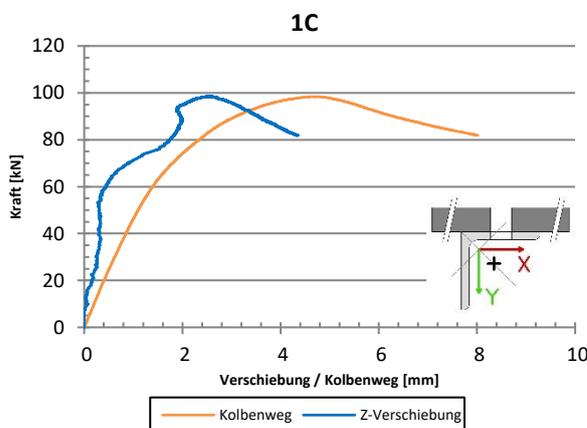


Diagramm 4-45: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

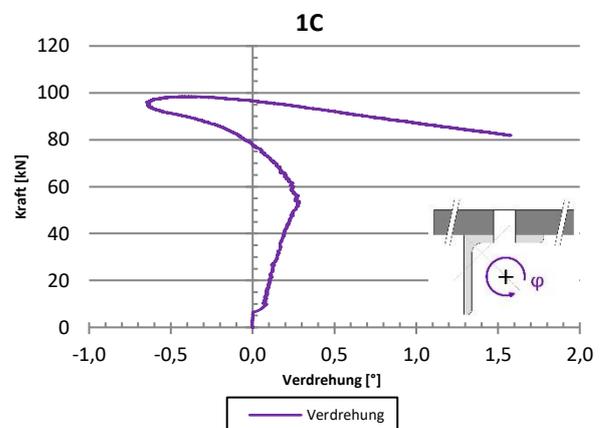


Diagramm 4-46: Kraft/Verdrehung

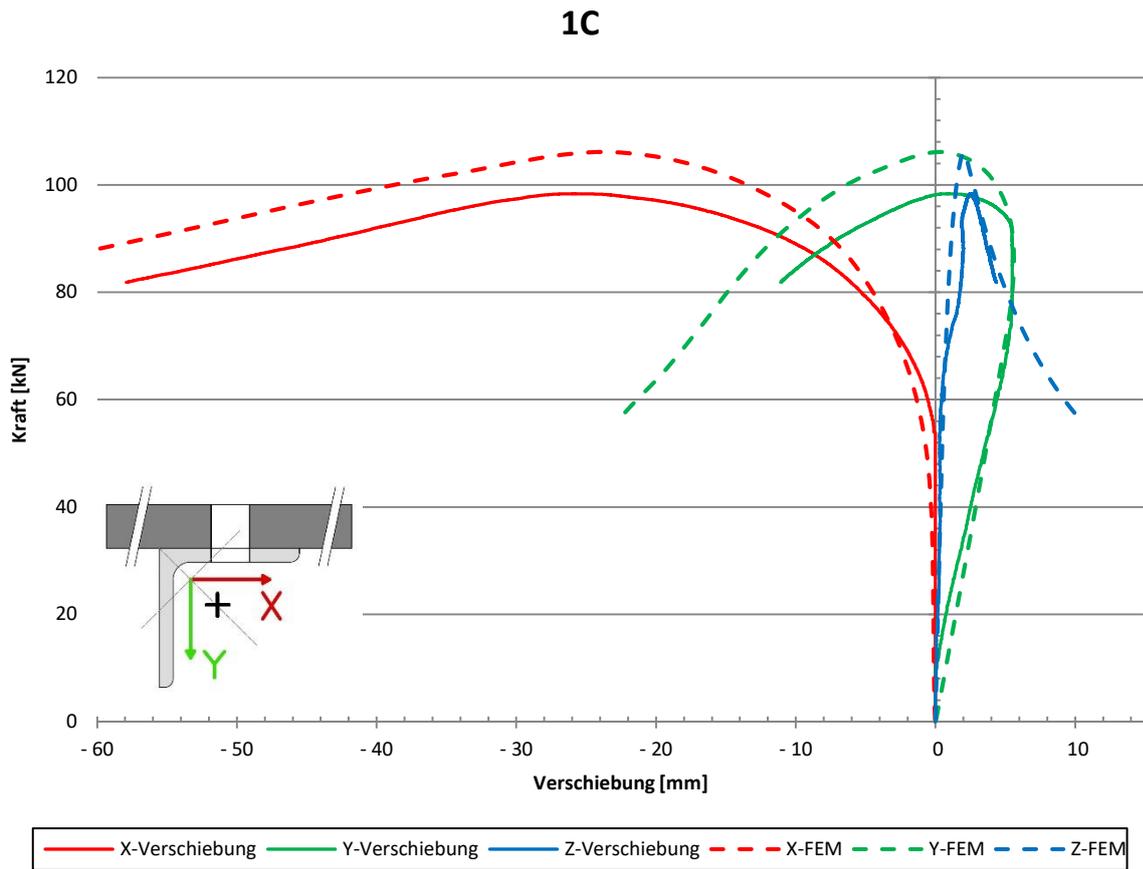


Diagramm 4-47: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

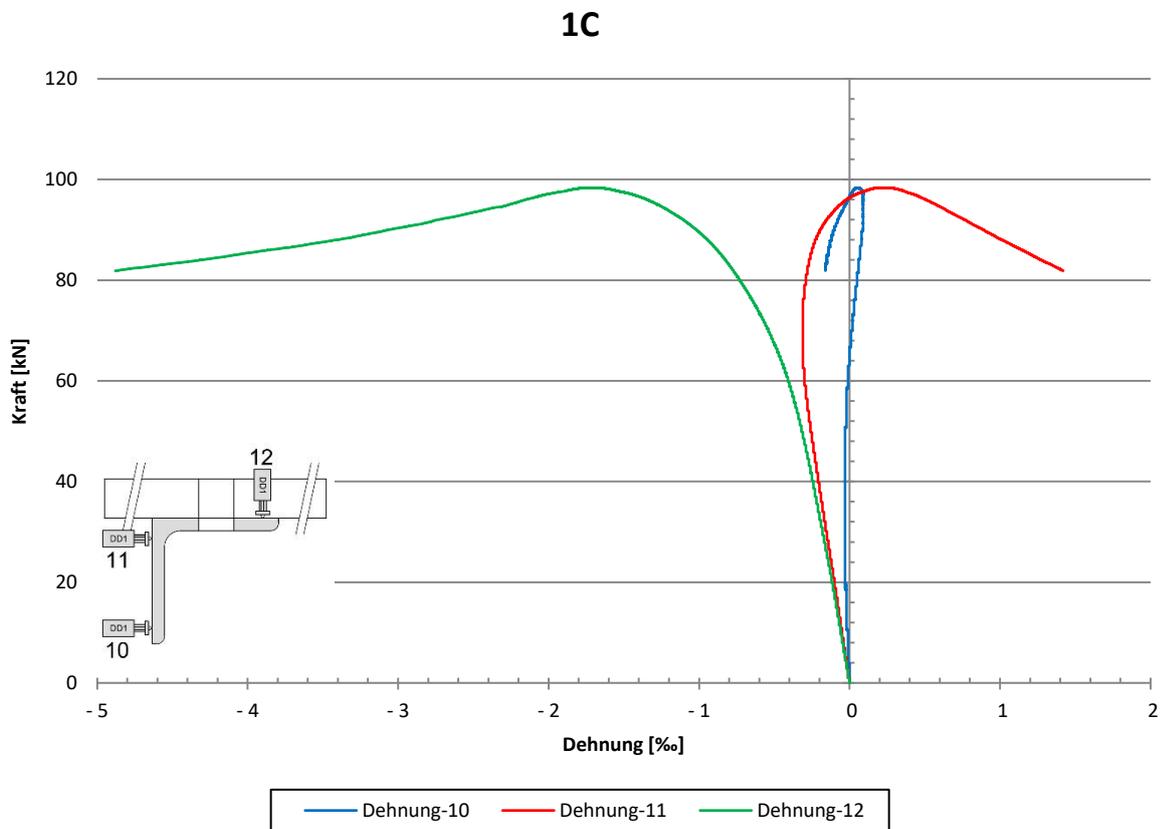


Diagramm 4-48: Dehnungen des Querschnittes

### 4.3.2 Laborversuch 2C

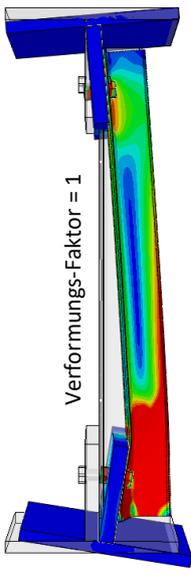
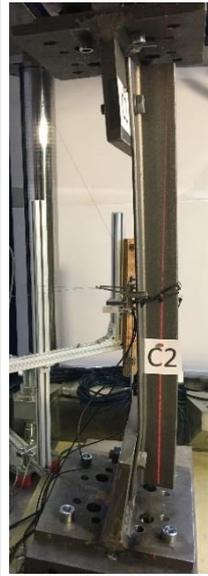
<u>Eckdaten:</u>				
Länge	L_Stab:	870 mm		
	L_System:	1005 mm		
Schrauben:		1 x M20		
Lagerungstyp:		BC2 - Scharnier		
Vorspannung:		lt. Hersteller		
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		3553		
Traglast:	$N_{FEM}$ :	117 kN		
	$N_{Labor}$ :	121 kN		
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		0.97: $\Delta = -3.3\%$		

Abb. 4-22: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Versuch 2C wurde ebenso wie die Versuche 4A/5A um 180° um die Y-Achse (siehe Abb. 3-1) gedreht eingebaut. Die Verformungsverläufe stimmen einigermaßen gut überein und die Traglasten weisen nur eine geringe Differenz auf. Ein Nachrutschen der Schrauben ist nicht direkt erkennbar, jedoch lassen der Verlauf des Kolbenweges und die dazugehörige Z-Verformung darauf schließen. Interessant ist auch die plastische Verformung des Winkels an den Anschlussblechen (siehe Abb. 4-23). Am oberen Anschlussblech ist die Verformung deutlich geringer als am unteren. Dieses Phänomen lässt sich auch gut in der FE-Darstellung (siehe Abb. 4-22, mittig) erkennen. Deutliche Klaffungen treten jeweils an den verschraubten Schenkeln auf. Die maximale Klaffung befindet sich am unteren Anschlussblech und beträgt ca. 18mm (siehe Abb. 4-23). Die Verdrehung des Winkels fluktuiert sehr stark, ist aber nur sehr gering. Die maximalen Dehnungen treten auf Höhe des unteren Anschlussbleches auf (siehe Abb. 4-23). Aufgrund dessen sind auch die gemessenen Werte in Stabmitte vergleichsweise eher gering.



Abb. 4-23: Plastische Verformung des Winkels an den Anschlussblechen

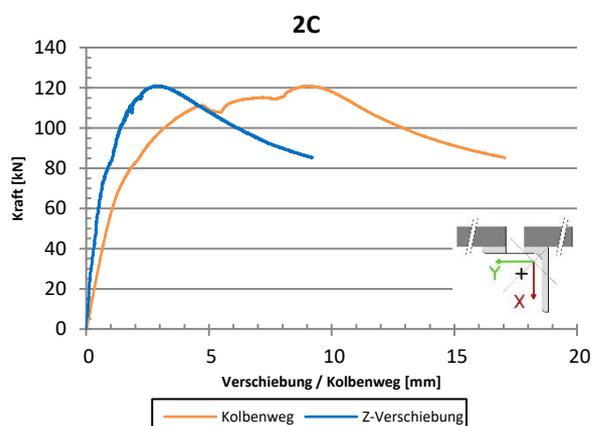


Diagramm 4-49: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

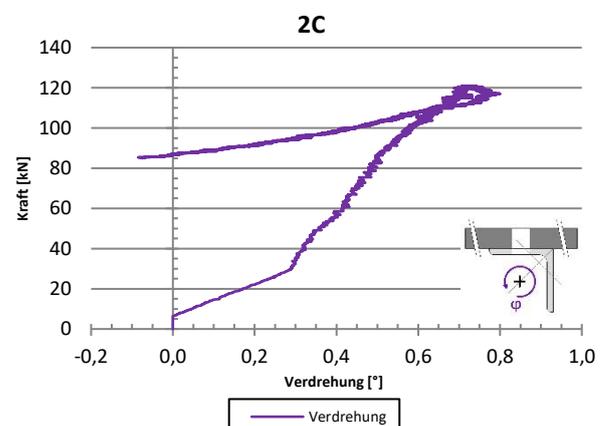


Diagramm 4-50: Kraft/Verdrehung

## 2C

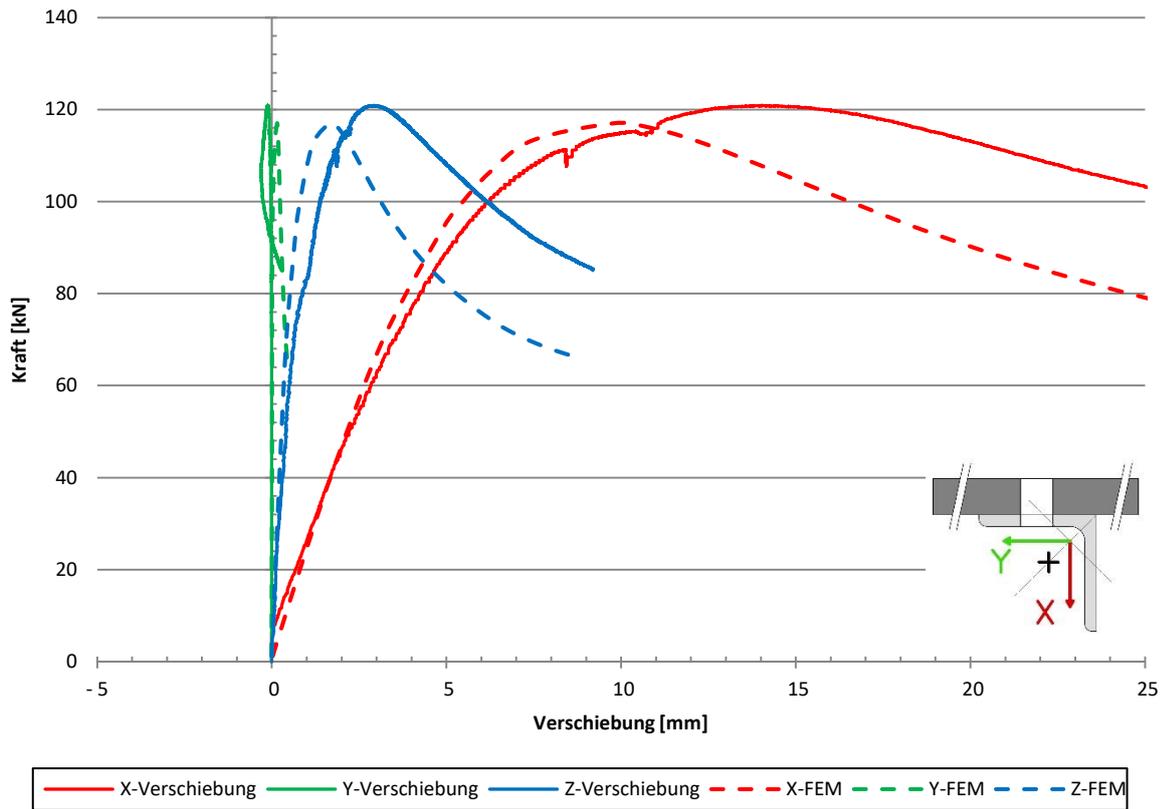


Diagramm 4-51: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

## 2C

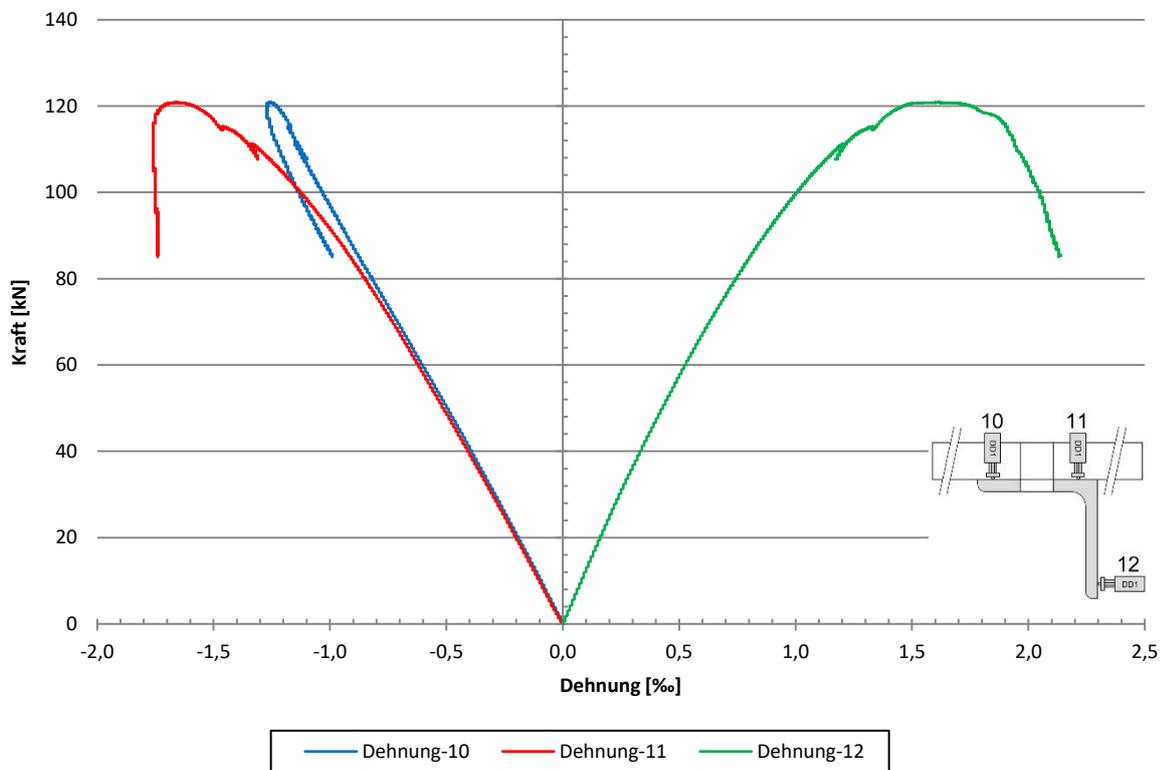


Diagramm 4-52: Dehnungen des Querschnittes

### 4.3.3 Laborversuch 3C

<b>Eckdaten:</b>		
Länge	L_Stab:	2360 mm
	L_System:	2495 mm
Schrauben:		1 x M20
Lagerungstyp:		BC2 - Scharnier
Vorspannung:		2-stufig
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		2016
Traglast:	$N_{FEM}$ :	79 kN
	$N_{Labor}$ :	66 kN
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		1.20: $\Delta = +19.7\%$

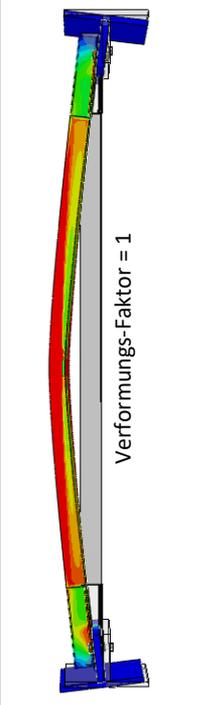



Abb. 4-24: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungsverläufe von Versuch 3C sind sehr gleichmäßig und weisen keine besonderen Vorkommnisse auf. Dennoch weichen die maximalen Traglasten der FE-Berechnung und der Laborergebnisse mit 20% deutlich voneinander ab. Es gibt leider keine nachweislichen Erkenntnisse, die den Grund für diese starke Abweichung erklären würden. Eine Vermutung für dieses Verhalten könnte die Scharnierlagerung in Verbindung mit der großen Länge des Systems sein. Auch bei Versuch 6A ist dieser Effekt zu beobachten. Das Nachrutschen der Schrauben kann nicht festgestellt werden. Die maximale Zugdehnung erfolgt aufgrund der starken Verformung in Y-Richtung bei Punkt 10 des nicht verschraubten Winkels (siehe Diagramm 4-56). Die Verdrehung des Winkels verläuft sehr gleichmäßig und nimmt am Traglastmaximum einen Wert von ca. 3° an. Das Drehmoment in der unteren Schraube beim Lösen der Schraube nach Versuchsdurchführung ist Abb. 4-25 zu entnehmen. Der Wert in der oberen Schraube wurde nicht gemessen.

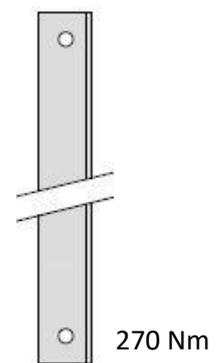


Abb. 4-25: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

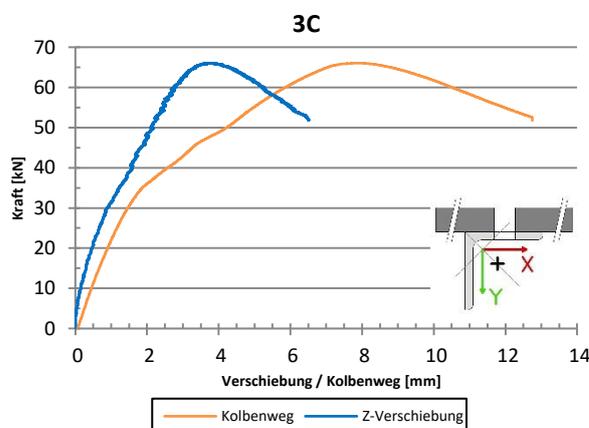


Diagramm 4-53: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

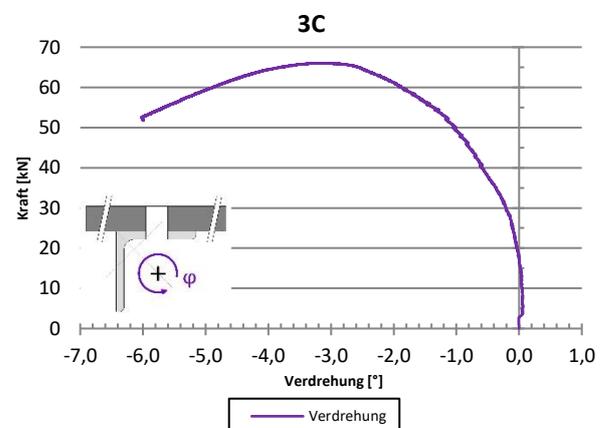


Diagramm 4-54: Kraft/Verdrehung

### 3C

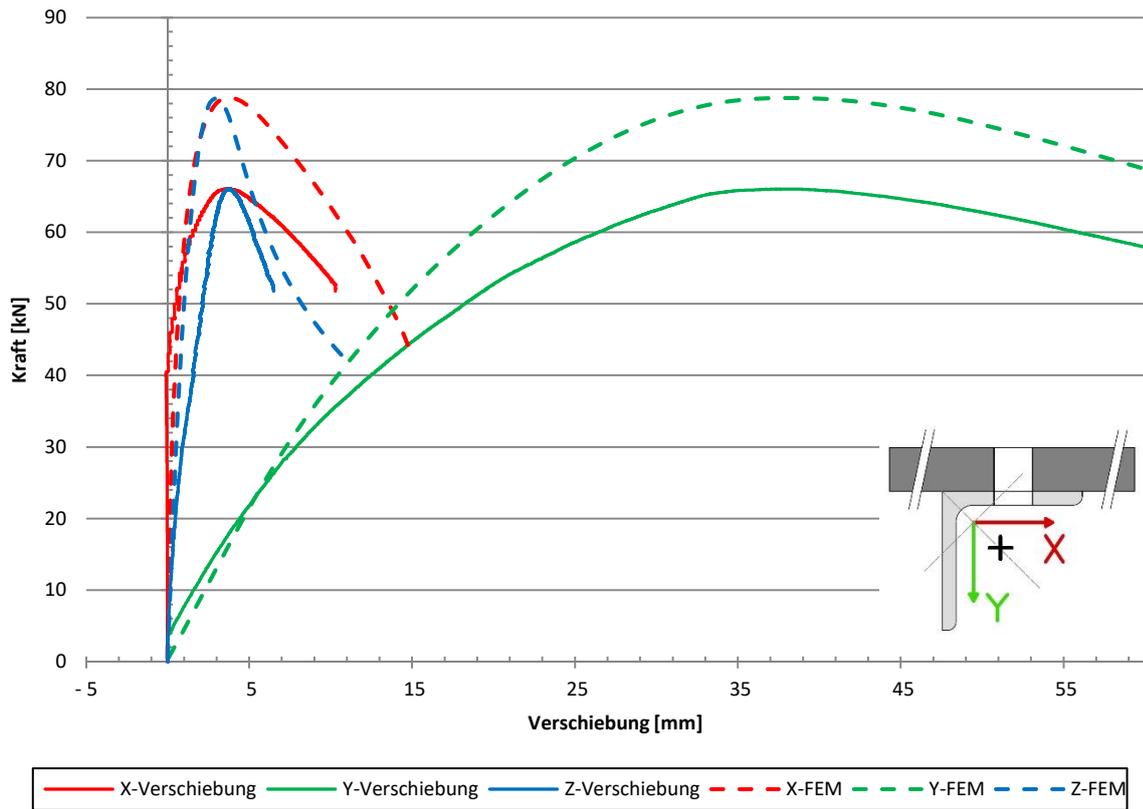


Diagramm 4-55: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 3C

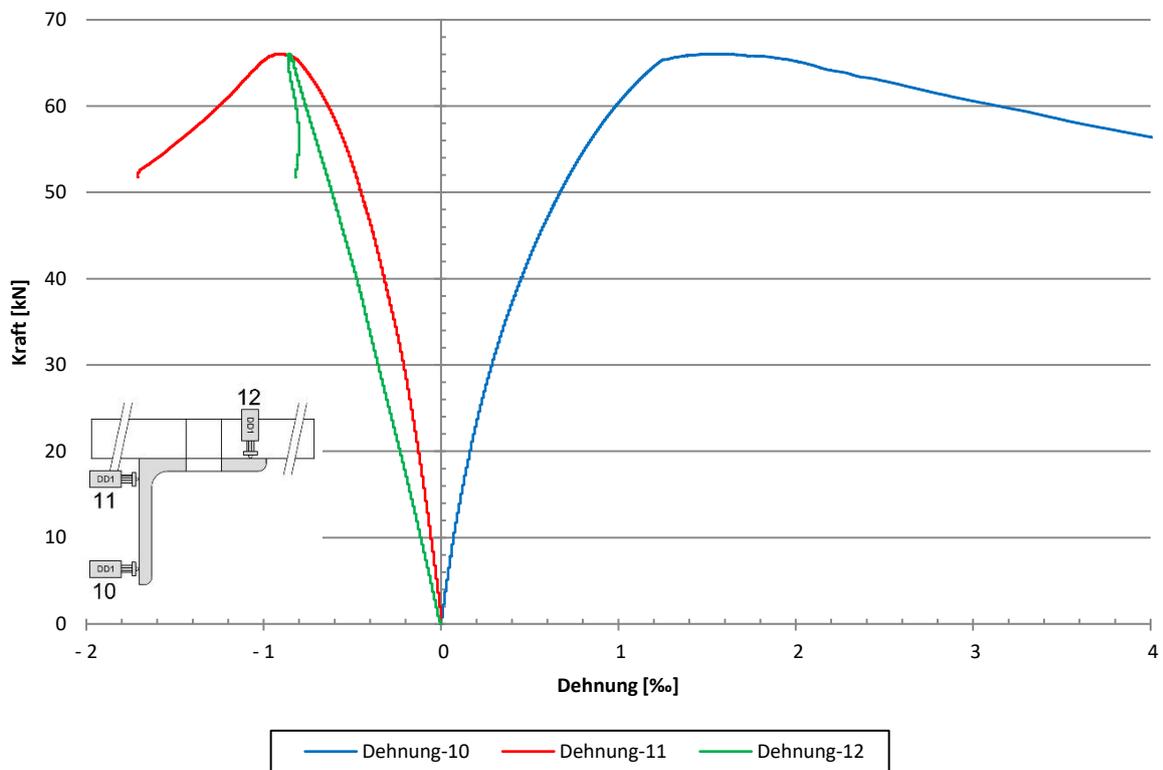


Diagramm 4-56: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.3.4 Laborversuch 4C

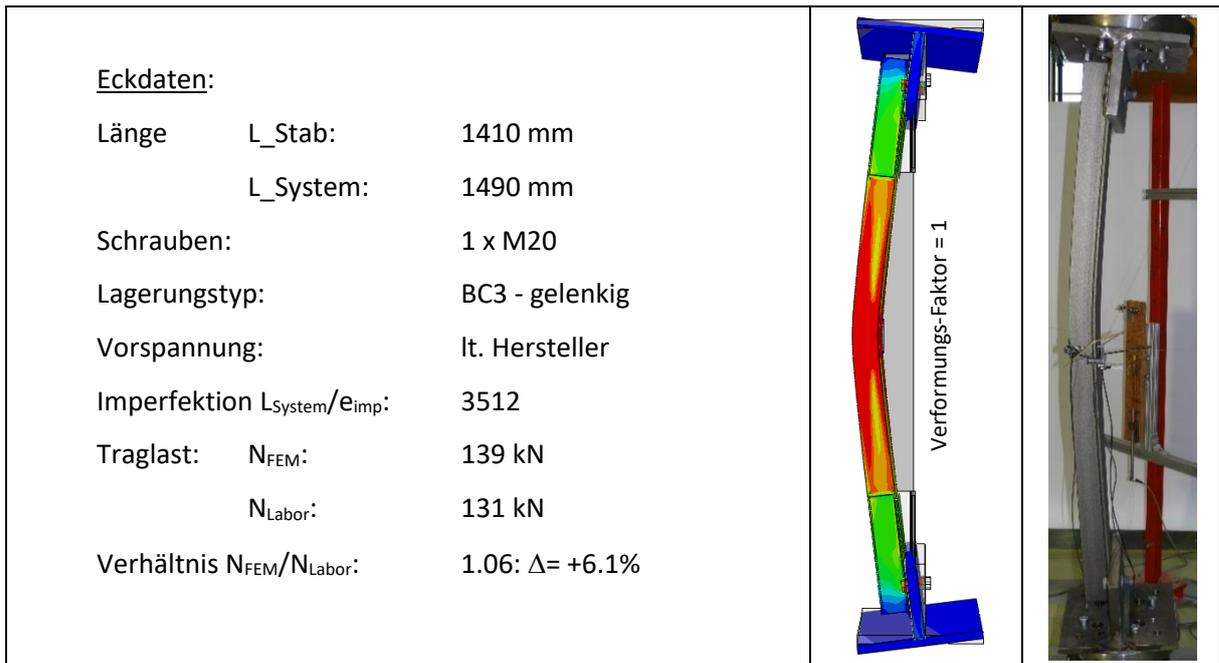


Abb. 4-26: Eckdaten (links). Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei Versuch 4C stimmen die Verformungsverläufe gut überein. Die Traglastmaxima weisen nur geringe Differenzen auf. Wie in Diagramm 4-57 erkannt werden kann, tritt das Nachrutschen der oberen Schraube bei etwa 100kN auf. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass lediglich der Kolbenweg zunimmt, eine Wegzunahme der Z-Verformung in Stabmitte jedoch ausbleibt. An der Verdrehung des Winkels ist nichts Auffälliges erkennbar. Die maximale Dehnung bzw. Stauchung des Winkels ergibt sich aufgrund der Scharnierlagerung und der damit einhergehenden verstärkten Y-Verformung am nicht verschraubten Schenkel. Dies ist auch gut ersichtlich im Verformungsbild der FE-Rechnung (siehe Abb. 4-26). Ansonsten waren keine besonderen Vorkommnisse während der Versuchsdurchführung feststellbar.

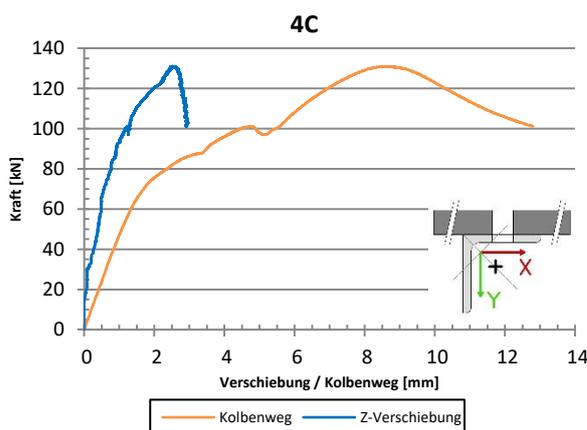


Diagramm 4-57: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

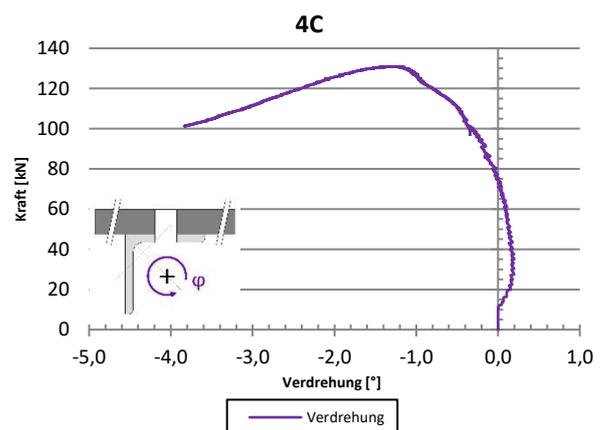


Diagramm 4-58: Kraft/Verdrehung

### 4C

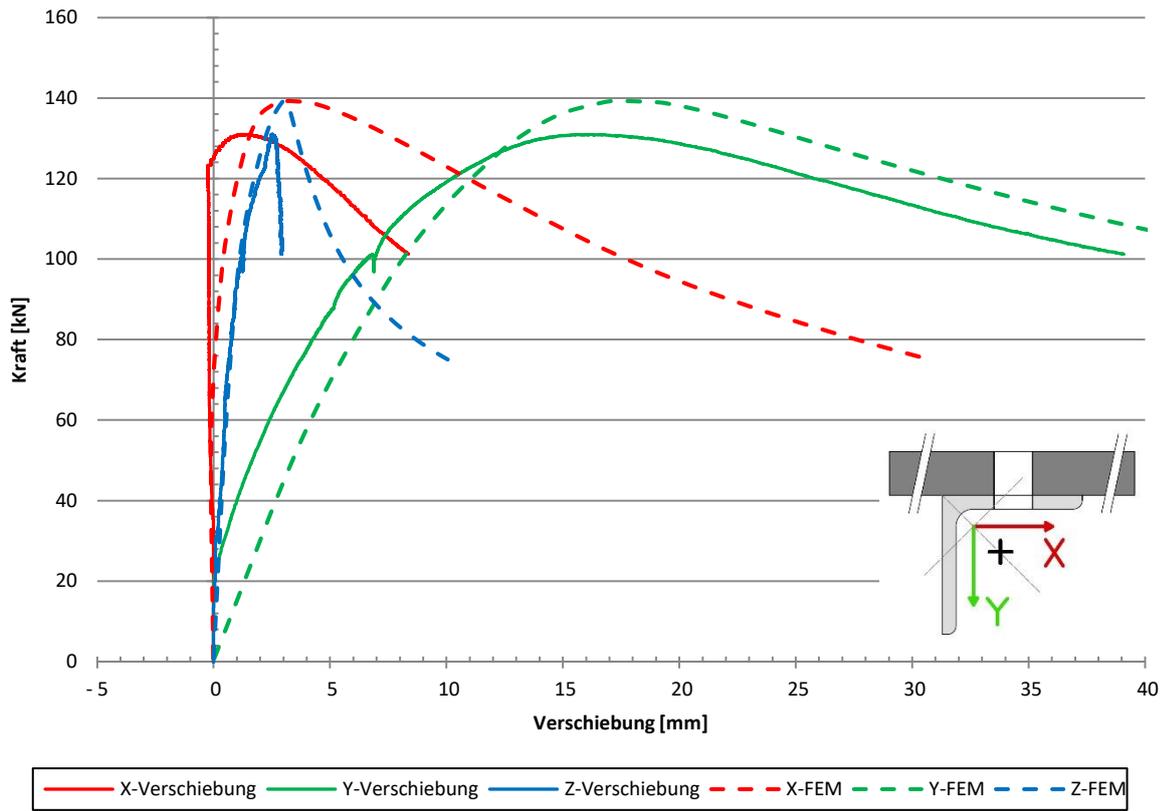


Diagramm 4-59: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 4C

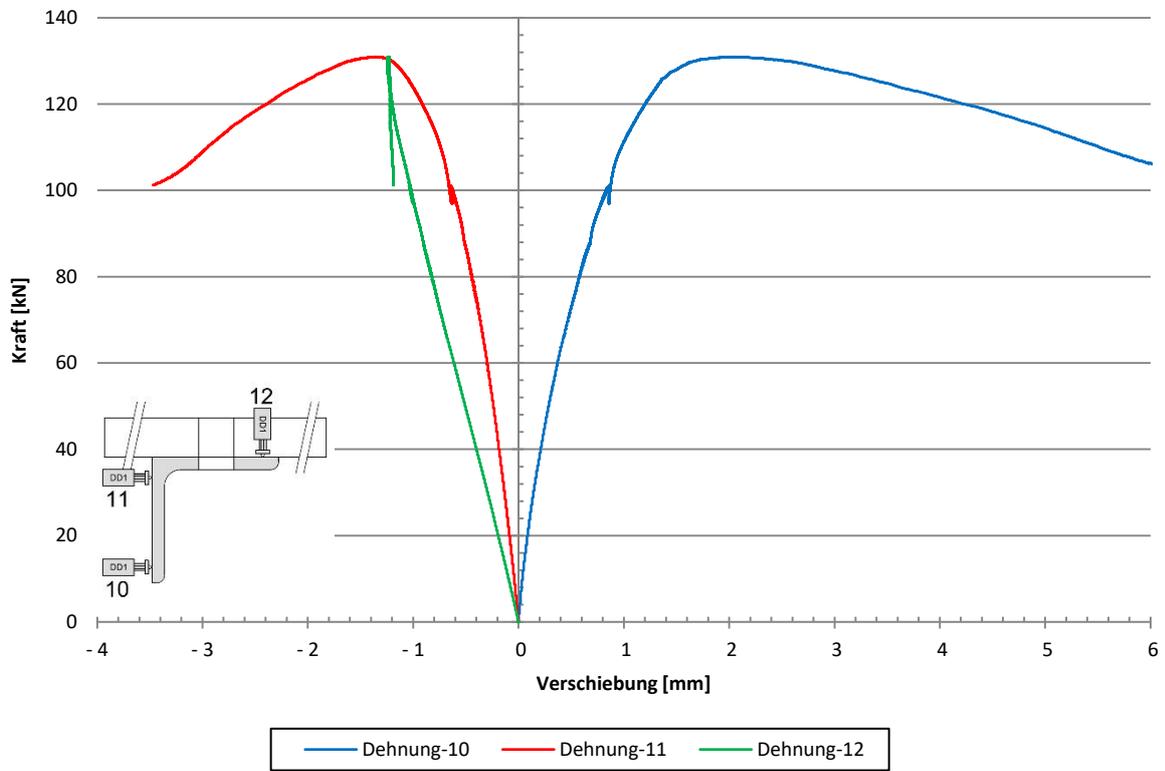


Diagramm 4-60: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.3.5 Laborversuch 5C

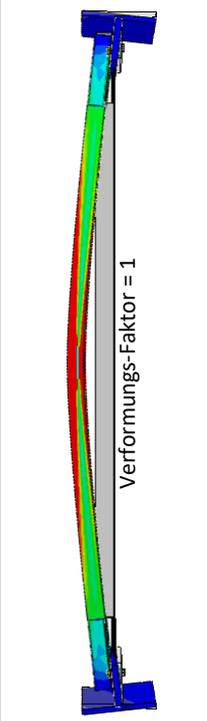
<b>Eckdaten:</b>				
Länge	L_Stab:	2770 mm		
	L_System:	2850 mm		
Schrauben:		1 x M20		
Lagerungstyp:		BC3 - gelenkig		
Vorspannung:		2-stufig		
Imperfektion $L_{System}/e_{imp}$ :		2600		
Traglast:	$N_{FEM}$ :	65 kN		
	$N_{Labor}$ :	63 kN		
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		1.03: $\Delta = +3.2\%$		

Abb. 4-27: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungsverläufe der FE-Berechnung decken sich sehr gut mit denen der Laborversuche. Die Traglasten sind mit lediglich 2kN Differenz auch nahezu identisch. In Diagramm 4-61 sind keine Anzeichen für ein Nachrutschen der Schrauben ersichtlich. Die maximale Verdrehung des Winkels beträgt bei maximaler Traglast etwa 2°. Aufgrund einer Verformung primär in Y-Richtung des Winkels stellen sich die maximale Dehnung bzw. die maximale Stauchung des Winkels am nicht verschraubten Schenkel ein (siehe Diagramm 4-64). Ansonsten gibt es bei Versuch 5C keine besonderen Vorkommnisse.

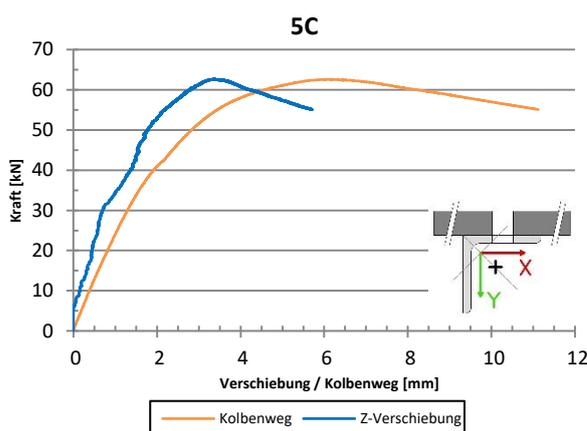


Diagramm 4-61: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

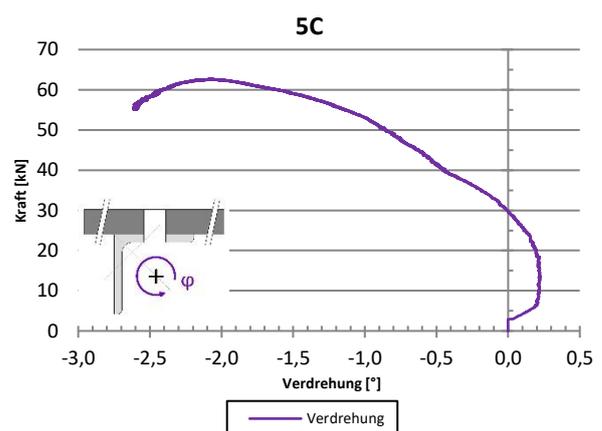


Diagramm 4-62: Kraft/Verdrehung

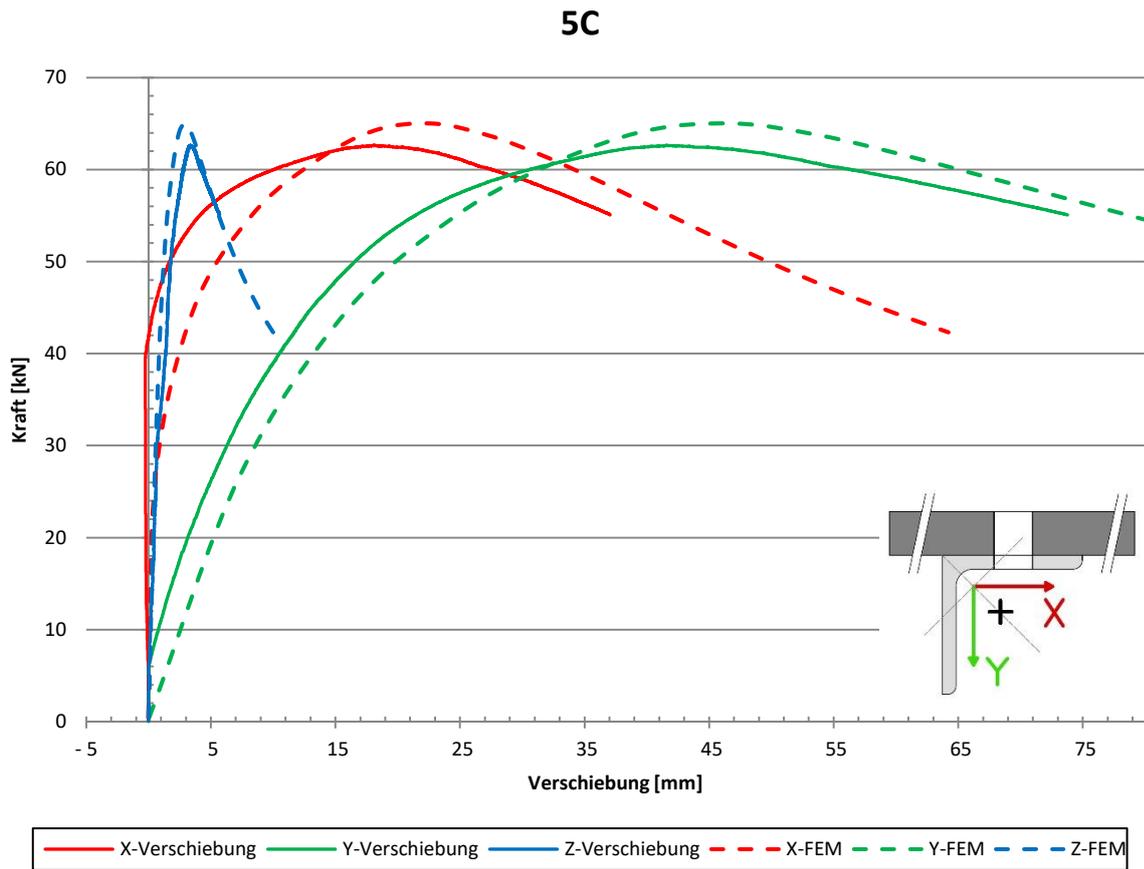


Diagramm 4-63: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

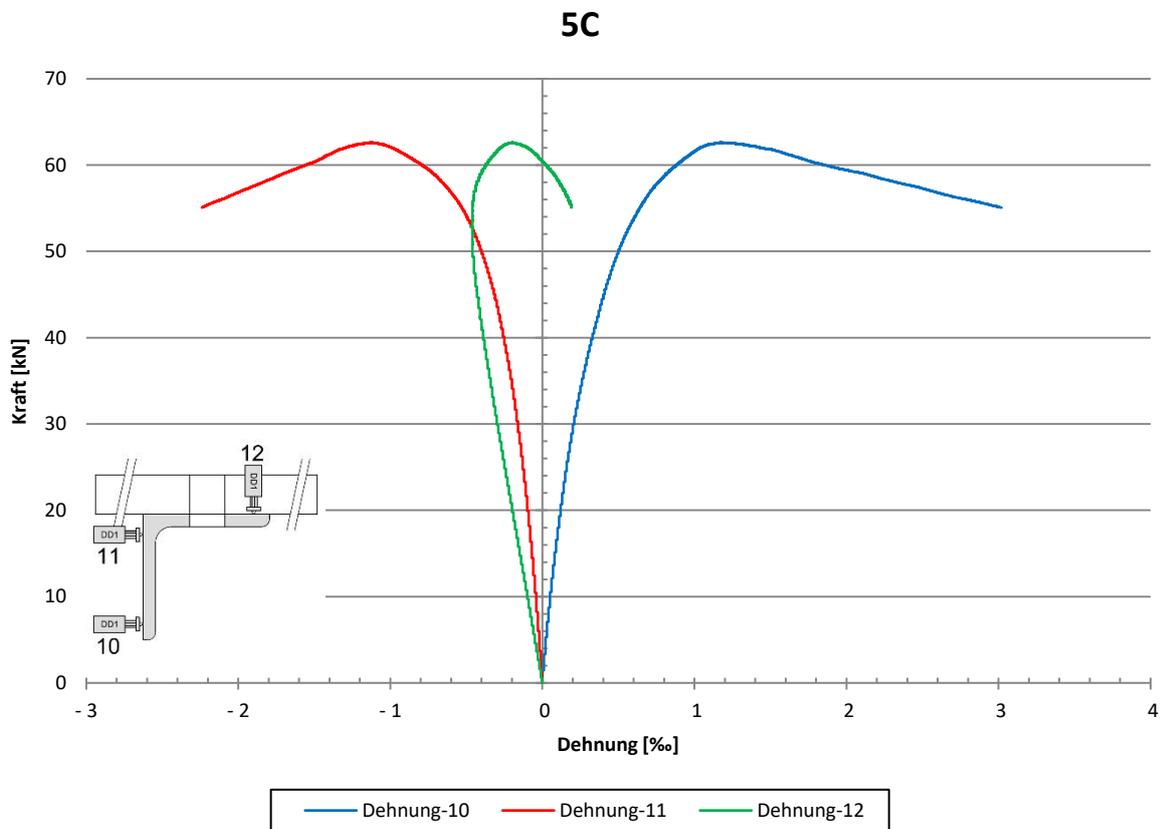


Diagramm 4-64: Dehnungen des Querschnittes

## 4.4 Versuchsreihe D – Winkel 80x8

Bei den Lagerungsbedingungen BC3 (gelenkig) wurden bei der FE-Berechnung zusätzliche Drehfedersteifigkeiten nach Anhang A verwendet.

### 4.4.1 Laborversuch 1D

Eckdaten:		
Länge	L_Stab:	1140 mm
	L_System:	1180 mm
Schrauben:		2 x M20
Lagerungstyp:		BC1 - eingespannt
Vorspannung:		keine („handfest“)
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	1963
Traglast:	$N_{FEM}$ :	274 kN
	$N_{Labor}$ :	260 kN
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	1.05: $\Delta = +5.4\%$




Abb. 4-28: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die FE-Verformungen zeigen eine gewisse Abweichung zu den Laborversuchen. Der Winkel verformt sich im Labor in die negative X-Richtung und bei der FE-Rechnung in die positive. Die Traglasten weichen jedoch nur gering voneinander ab. Bei diesem Versuch wurde erstmals keine Vorspannung (nur „handfestes“ Anziehen) verwendet. Dadurch ist in Diagramm 4-65 erkennbar, dass alle Schrauben bereits bei 25kN nachrutschen. Bei genauerer Betrachtung lässt sich feststellen, dass die Z-Verformung in Stabmitte erst beim zweiten Plateau auftritt. Dies deutet darauf hin, dass zuerst die oberen und dann die unteren Schraubenpaare nachrutschen. Die Verdrehungen des Winkels fluktuieren sehr stark, die Maxima sind jedoch vergleichsweise gering. Die maximale Stauchung ist deutlich bei Punkt 12 des verschraubten Schenkels erkennbar (siehe Diagramm 4-68). Dadurch tritt lokales Beulen am Querschnitt auf (siehe Abb. 4-29, rechts). Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach Versuchsdurchführung sind in Abb. 4-29, links ersichtlich.

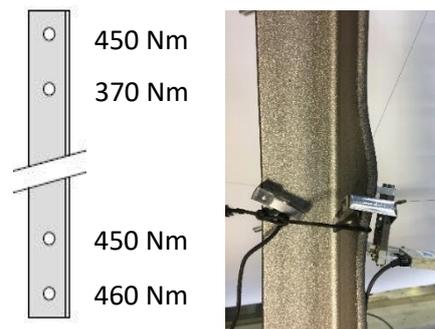


Abb. 4-29: Anzugsmomente nach Versuch (links), lokales Beulen am Querschnitt (rechts)

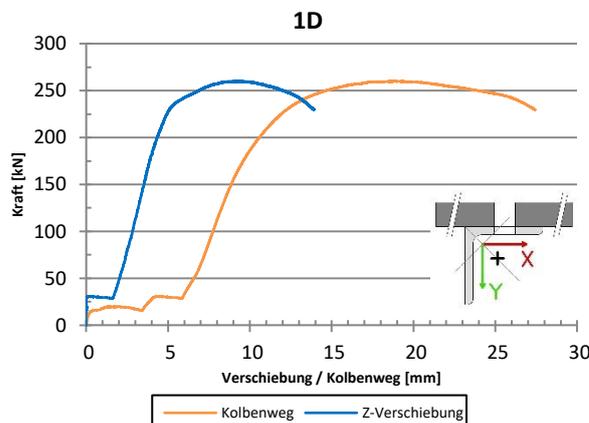


Diagramm 4-65: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

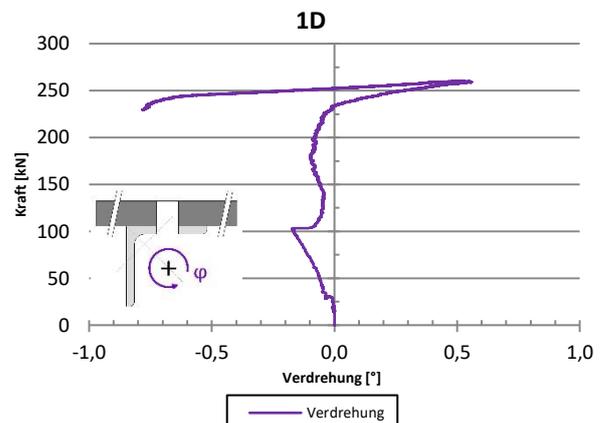


Diagramm 4-66: Kraft/Verdrehung

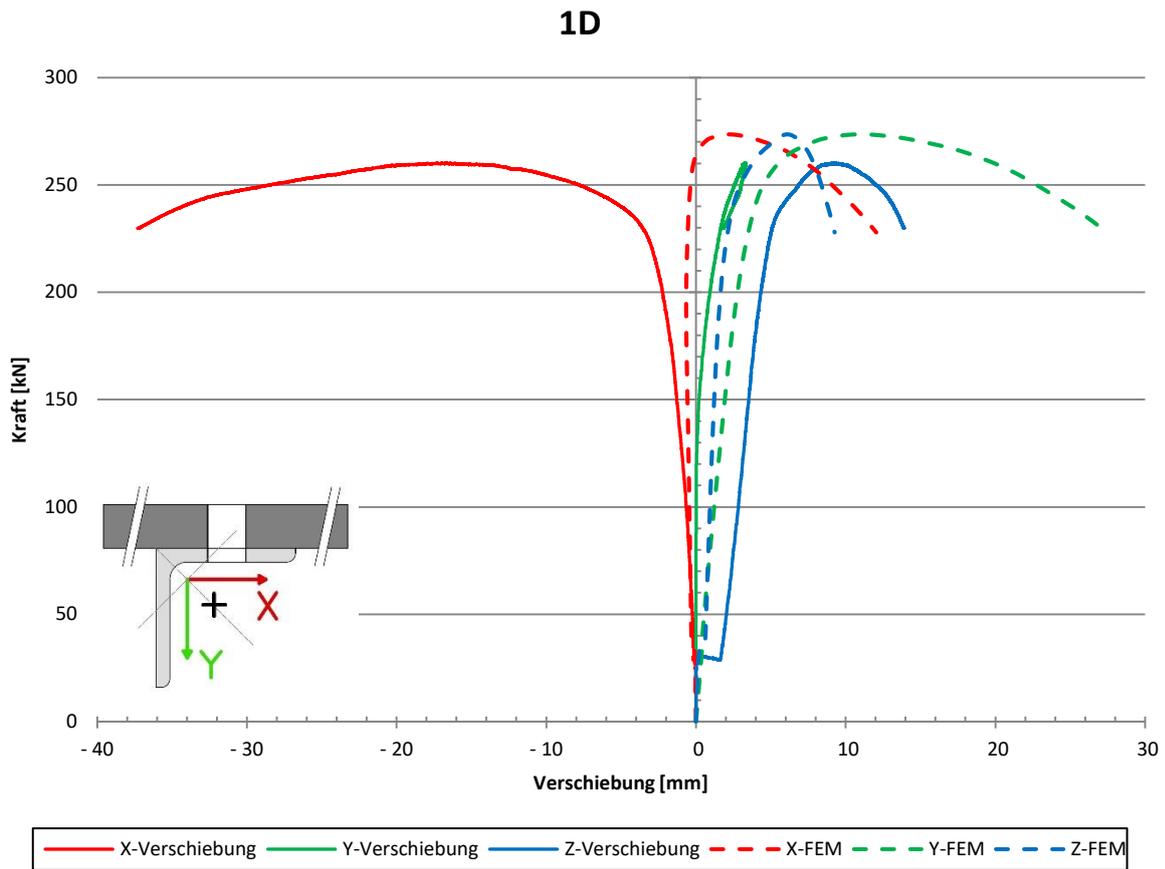


Diagramm 4-67: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

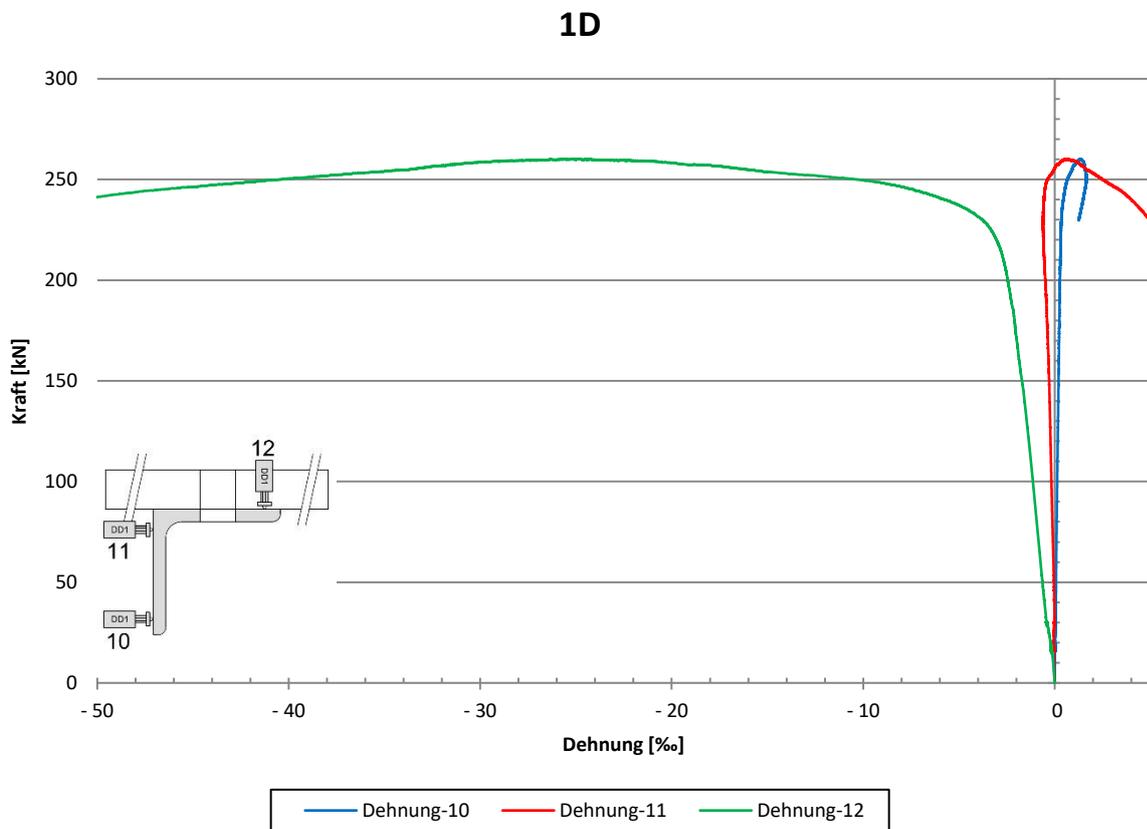


Diagramm 4-68: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.2 Laborversuch 2D

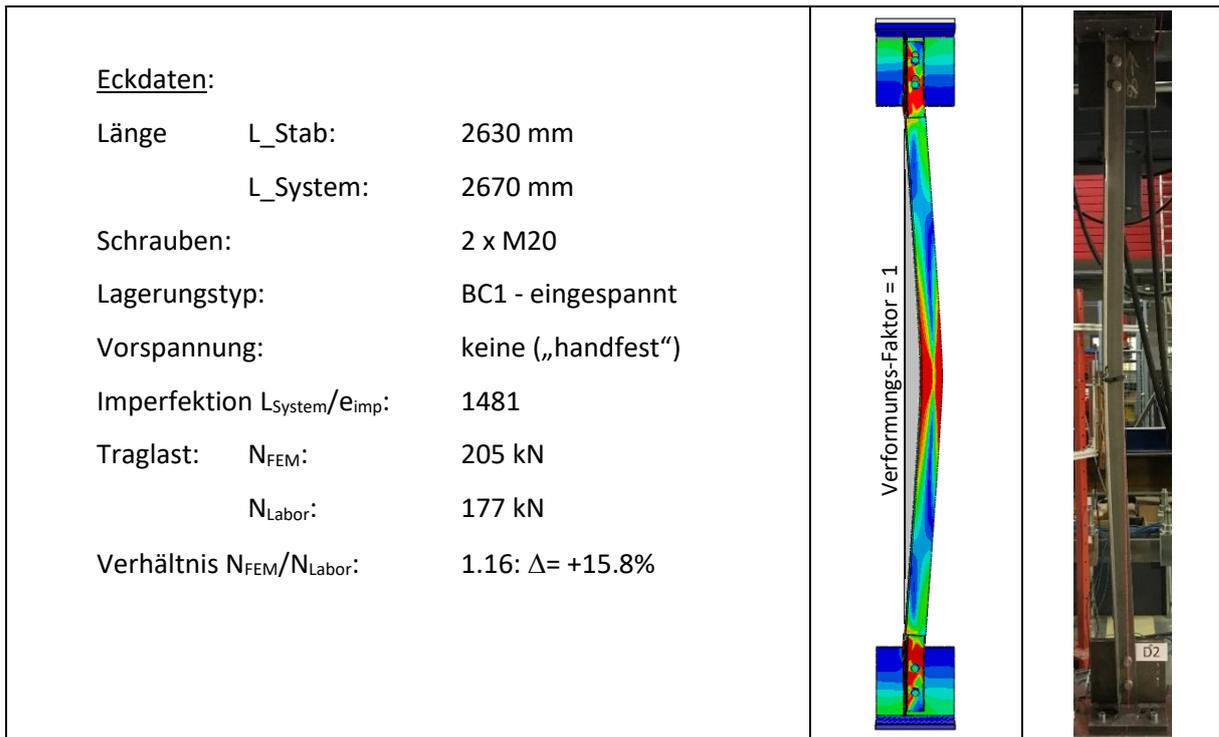


Abb. 4-30: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei dieser Gegenüberstellung weichen die Verläufe doch deutlich voneinander ab. Auch die Traglasten weisen eine höhere Differenz auf. Möglicherweise kann dieser Sachverhalt durch die unterschiedliche X-Verformung zwischen FE-Berechnung und Laborversuch begründet werden. Wie auch in Abb. 4-30 deutlich ersichtlich ist, weicht der Winkel in der FE-Berechnung in die positive X-Richtung aus, hingegen beim Laborversuch in die negative X-Richtung. Ein ähnliches Verhalten stellt sich nach Erreichen der Traglast auch bei der Y-Verformung ein (siehe Diagramm 4-71). Generell sind die Verformungen der FE-Berechnung geringer als die des Laborversuchs. Ein Nachrutschen der Schraubenpaare ist nicht erkennbar. Eine interessante Erkenntnis ist jedoch die negative Z-Verformung am Anfang der Laststeigerung (siehe Diagramm 4-69). Der seltsame Verlauf und das alleinige „handfeste“ Anziehen deuten auf ein Nachrutschen der Schrauben in diesem Bereich hin. Die Verdrehung des Winkels zeigt eine auffällige Spitze beim Traglastmaximum. Eine plausible Begründung für dieses Verhalten kann nicht angegeben werden. Die maximale Stauchung tritt aufgrund der Verformung beim verschraubten Schenkel im Punkt 12 auf (siehe Diagramm 4-72).

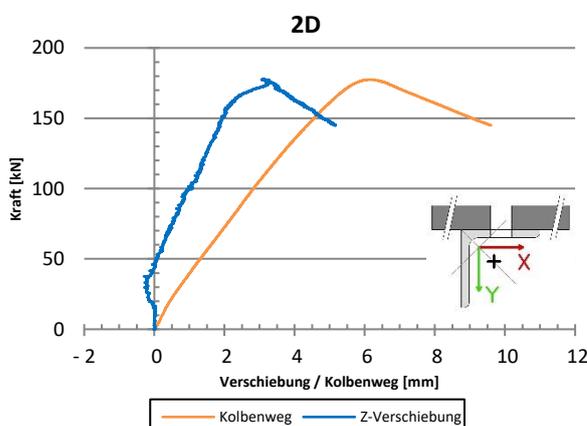


Diagramm 4-69: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

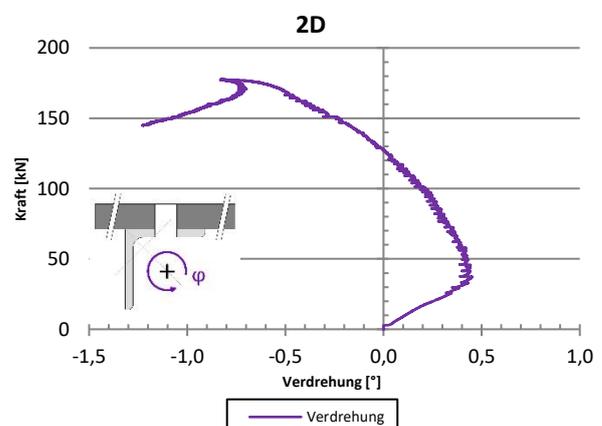


Diagramm 4-70: Kraft/Verdrehung

## 2D

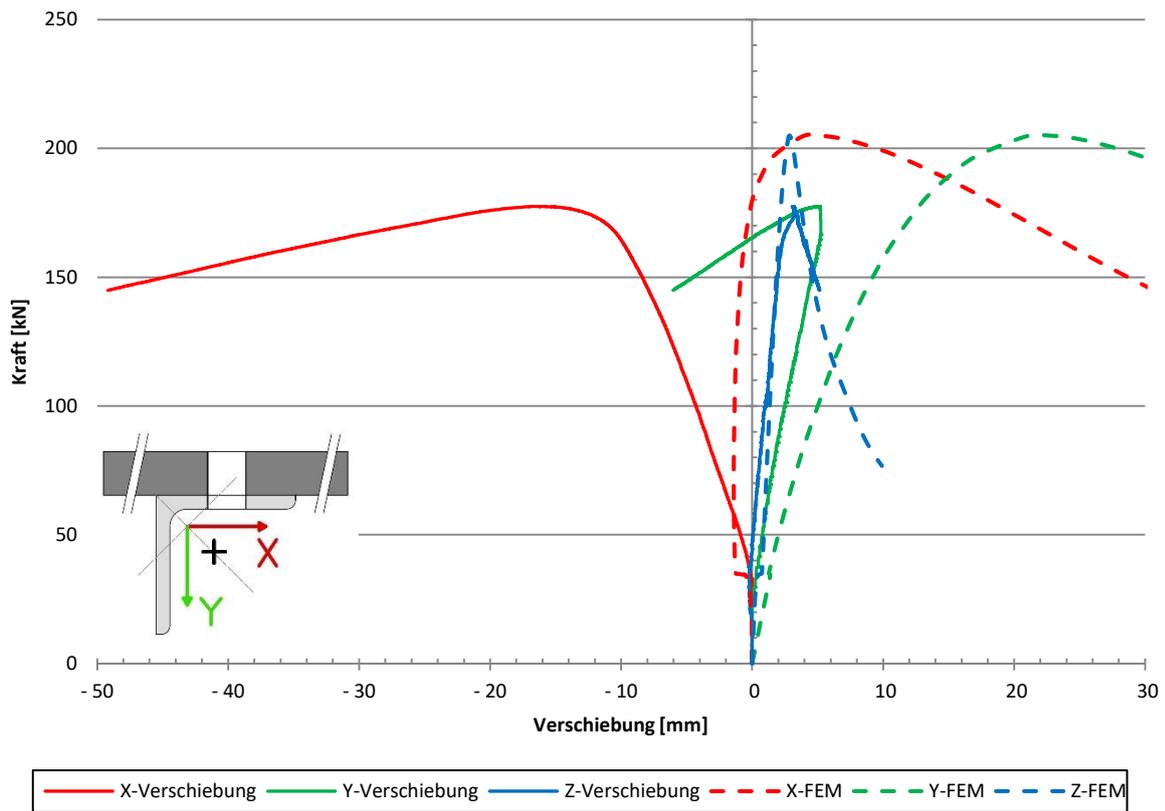


Diagramm 4-71: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

## 2D

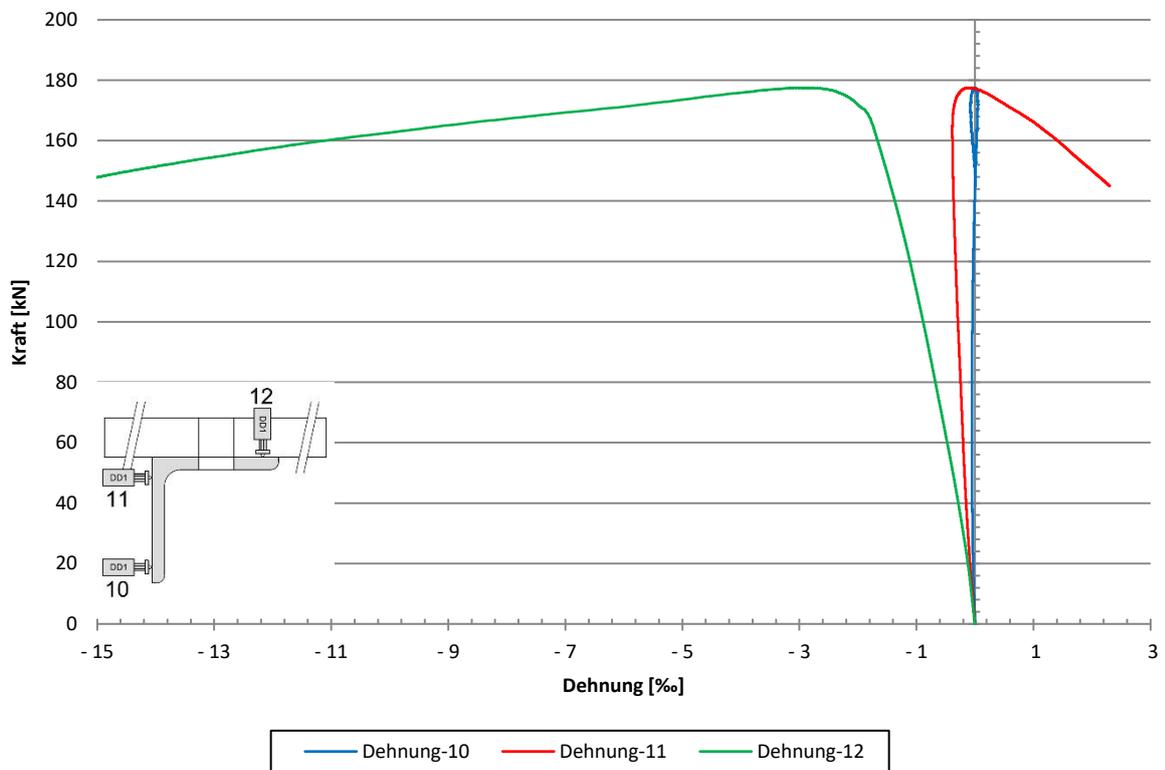


Diagramm 4-72: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.3 Laborversuch 3D

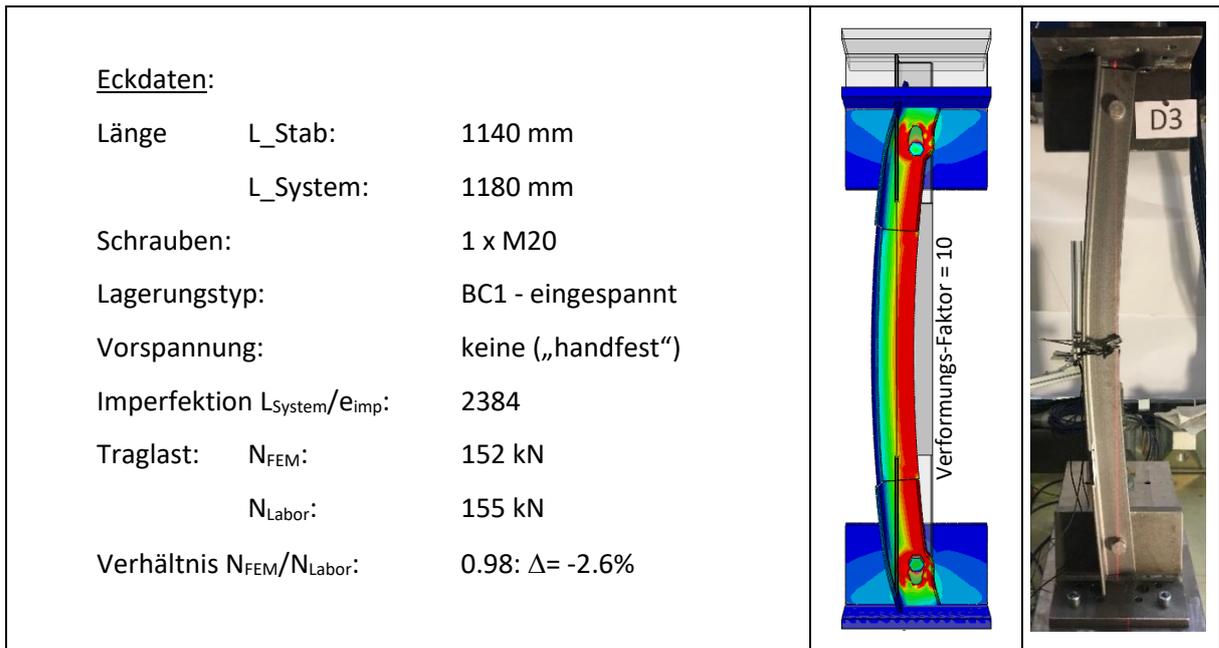


Abb. 4-31: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verläufe der Verformungen stimmen auch hier gut überein. Weiters unterscheiden sich die Traglasten beider Versuche nur marginal voneinander. Auch hier ist anzumerken, dass keine Vorspannung (nur „handfestes“ Anziehen) verwendet wurde. Aufgrund dessen, ist ein Nachrutschen beider Schrauben bei etwa 10kN klar ersichtlich (siehe Diagramm 4-73). Die obere Schraube rutscht aufgrund der sprunghaften Z-Verschiebung um etwa 1.5mm nach und die untere Schraube um etwa 4.5mm (Verschiebung des Kolbenweges abzüglich der Z-Verschiebung in Stabmitte). Die Verdrehung des Querschnittes ist bis zum Traglastmaximum annähernd Null und nimmt erst dann stark zu. Aufgrund der starken Verformung in X-Richtung stellt sich im Punkt 12 die maximale Stauchung des Winkels ein. Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben nach Versuchsdurchführung können aus Abb. 4-32 entnommen werden.

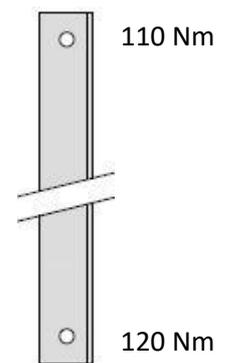


Abb. 4-32: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

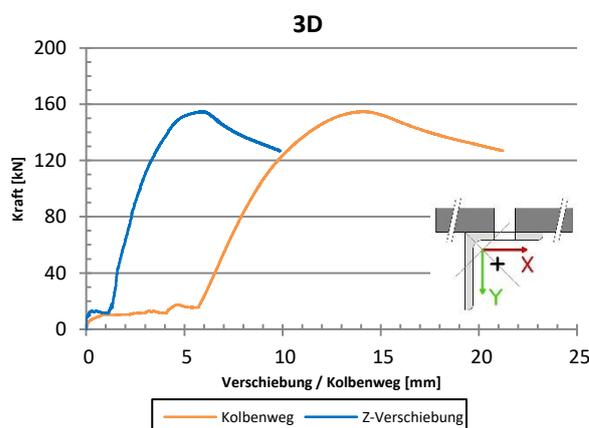


Diagramm 4-73: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

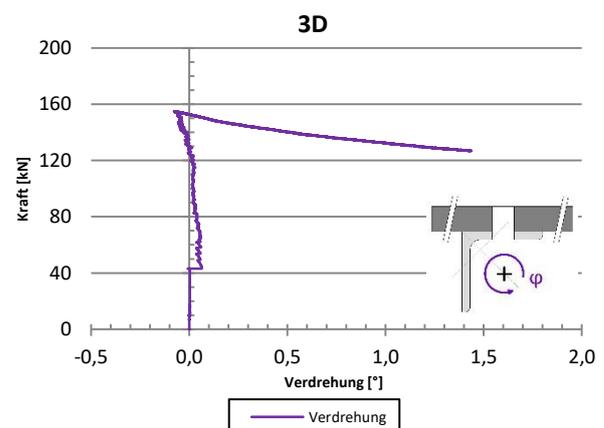


Diagramm 4-74: Kraft/Verdrehung

### 3D

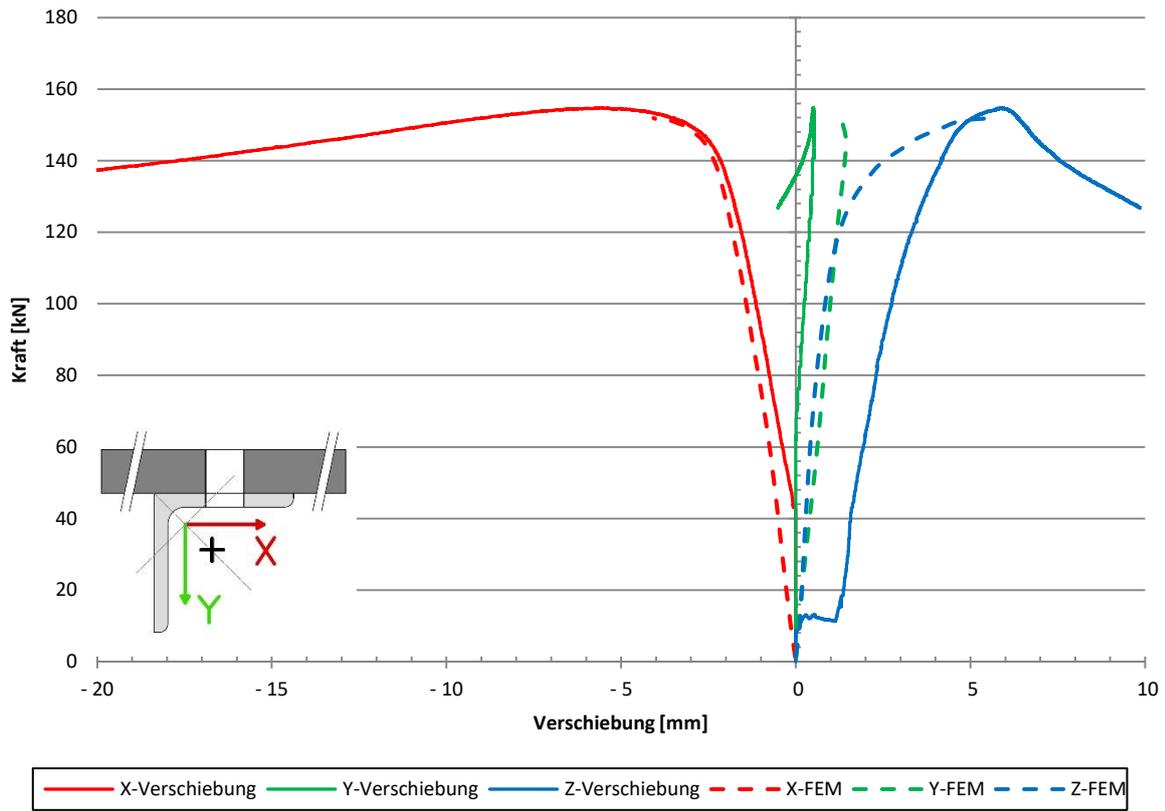


Diagramm 4-75: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 3D

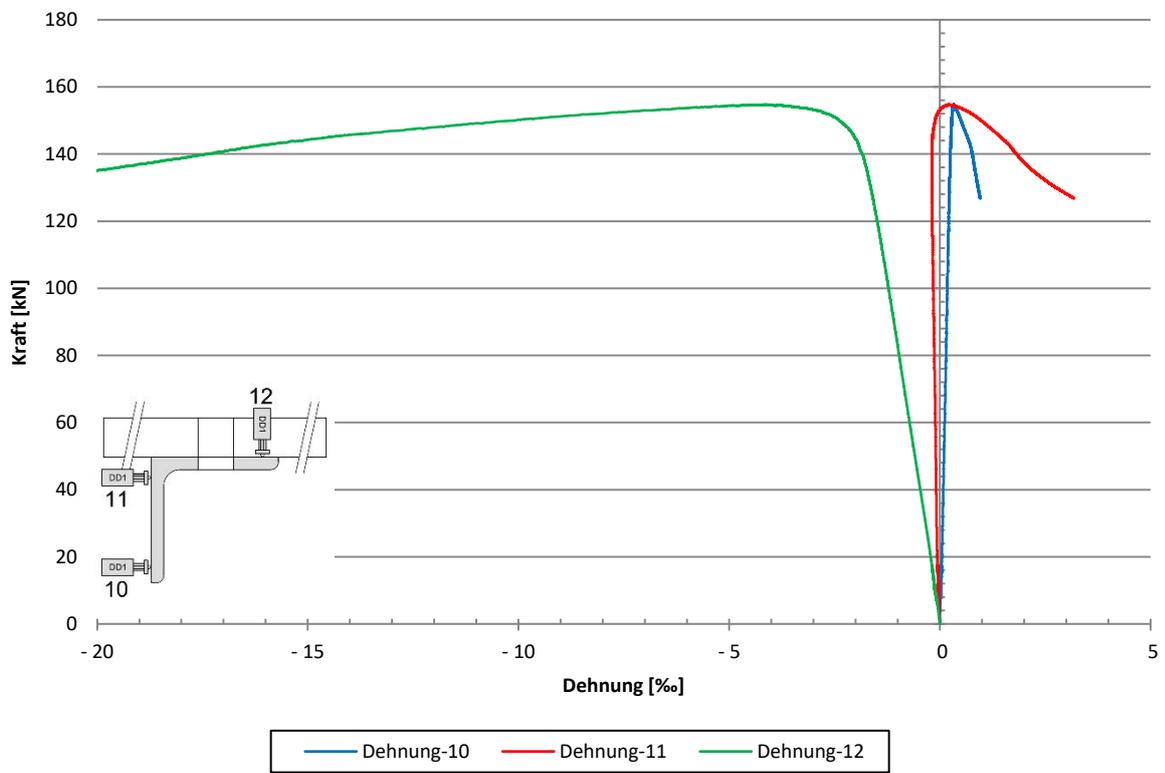


Diagramm 4-76: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.4 Laborversuch 4D

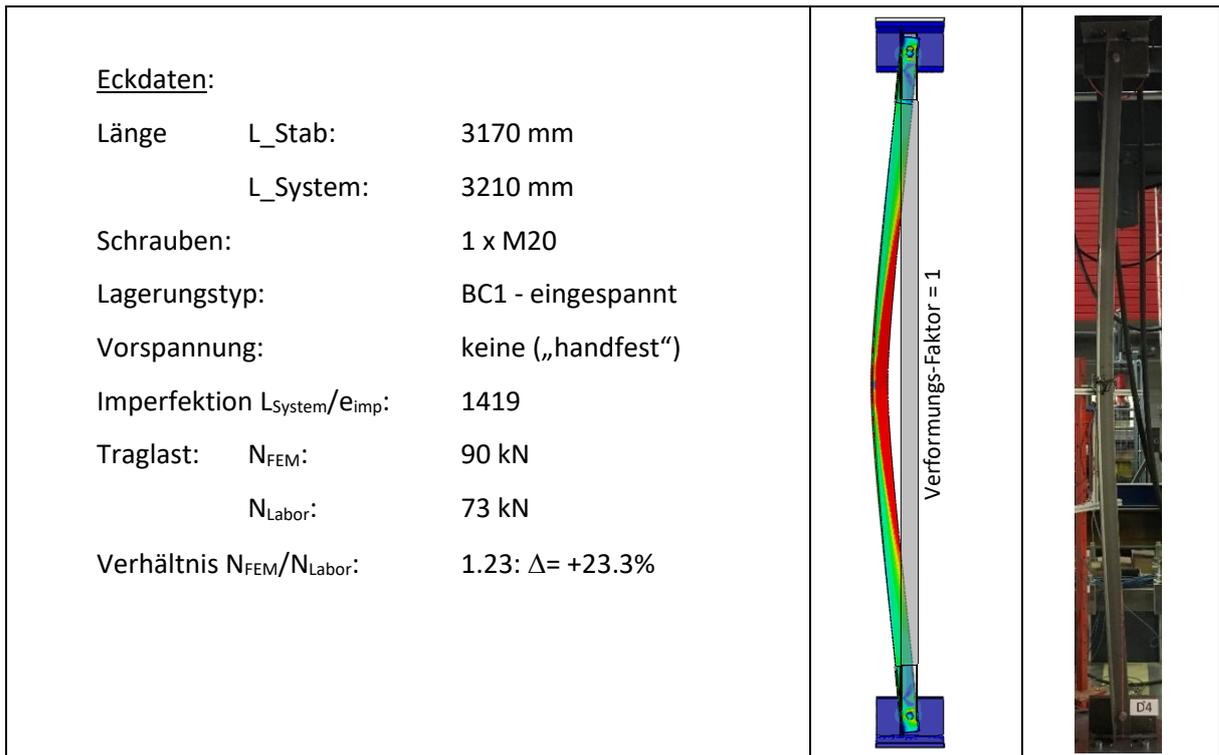


Abb. 4-33: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei Versuch 4D stimmen die Verläufe der Verformungen zwar annähernd überein, die Traglasten zwischen FE-Berechnung und Laborversuch weichen jedoch mit über 20% stark voneinander ab. Eine Vermutung für diesen Umstand sind die Anschlussbleche, da diese bereits mehrfach für vorhergehende Versuche verwendet wurden und dieser Versuch am Schluss der Versuchsreihe durchgeführt wurde. Bereits minimale Schiefstellungen könnten die Drucktragfähigkeit des Winkelprofils signifikant beeinflussen, speziell bei dieser großen Länge. Aufgrund der großen Länge wurde der Winkel auch vorerst unten mit der Schraube locker befestigt, dann aufgerichtet (ähnlich einem Bolzengelenk) und anschließend oben verschraubt. Dann wurde das „handfeste“ Anziehen an beiden Schrauben aufgebracht. Durch diese Vorgehensweise besteht an der unteren Schraube bereits Kontakt und es kann kein Nachrutschen mehr auftreten. Es zeigt sich weiters, dass die obere Schraube jedoch bei ca. 10kN um etwa 2mm nachrutscht. Die Verdrehungen des Winkels sind anfangs eher minimal und steigen nach Erreichen des Traglastmaximums erheblich an. Die maximale Stauchung erfährt der Winkel aufgrund der Verformung am verschraubten Schenkel bei Punkt 12 (siehe Diagramm 4-80).

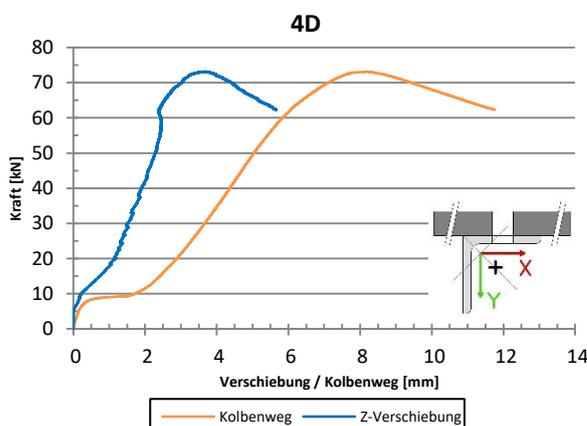


Diagramm 4-77: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

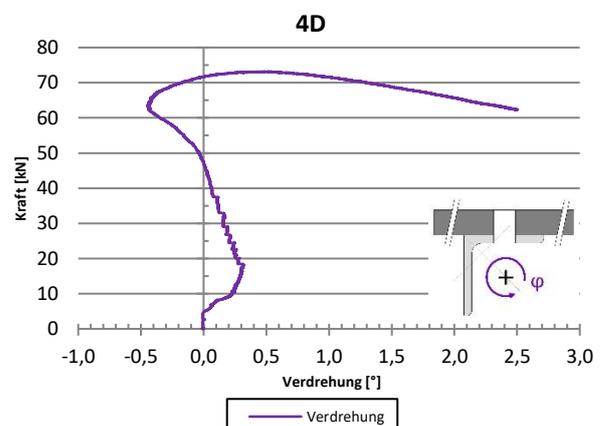


Diagramm 4-78: Kraft/Verdrehung

### 4D

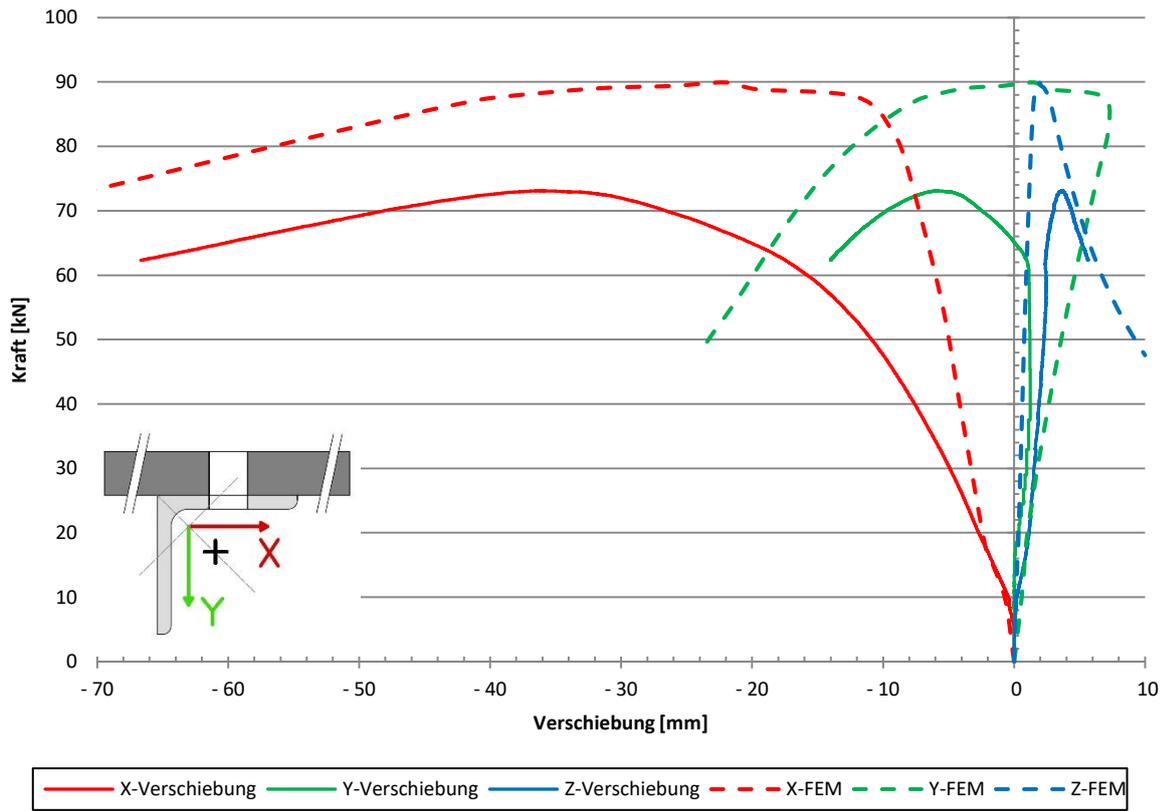


Diagramm 4-79: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 4D

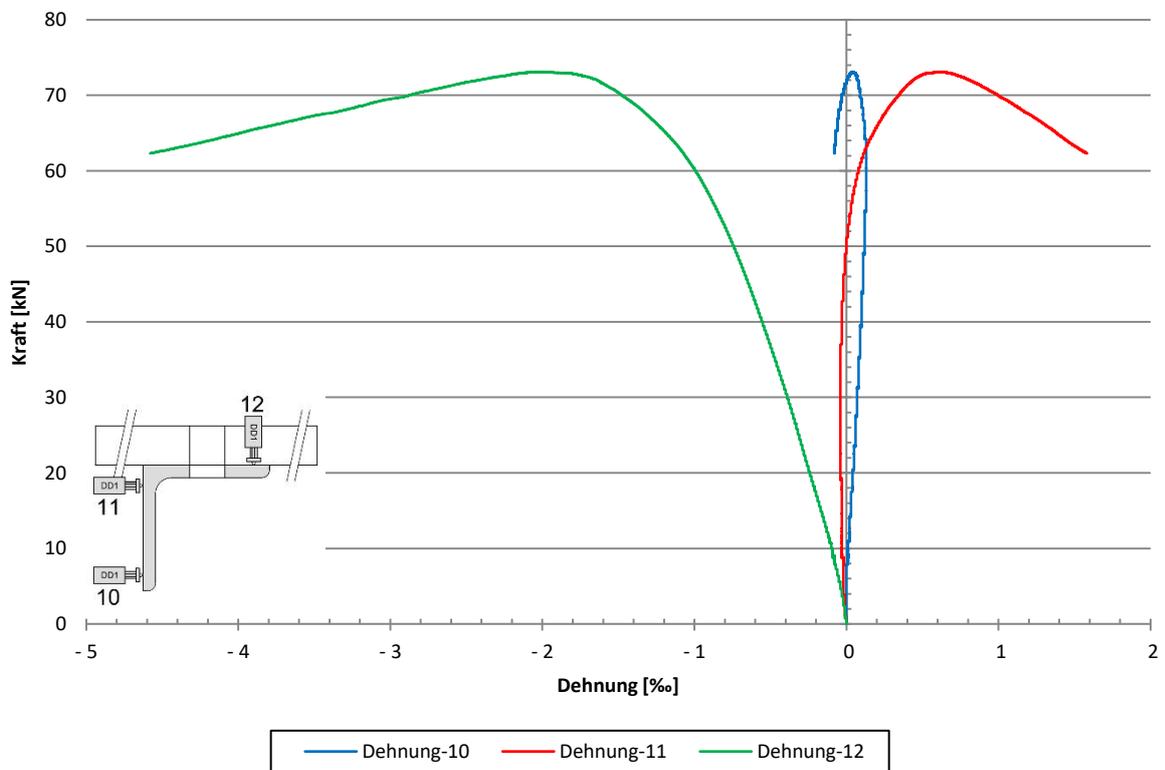


Diagramm 4-80: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.5 Laborversuch 5D

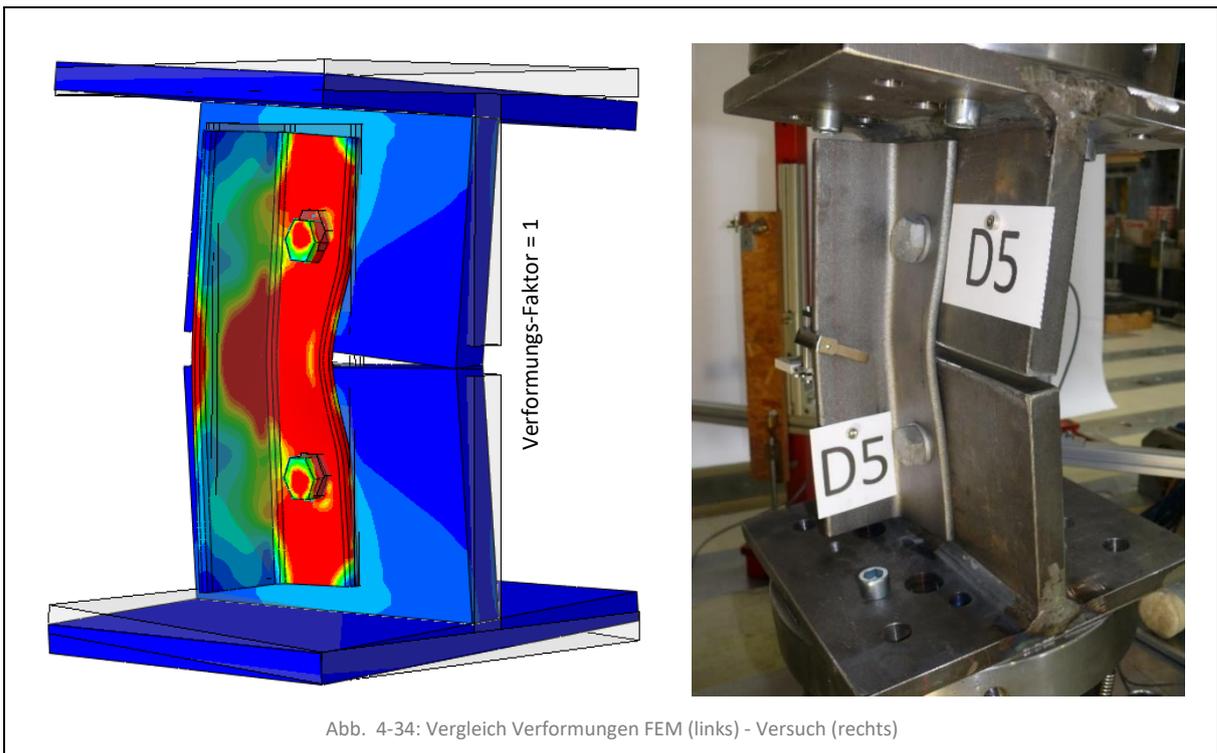


Abb. 4-34: Vergleich Verformungen FEM (links) - Versuch (rechts)

##### Eckdaten:

Länge	L_Stab:	320 mm
	L_System:	400 mm
Schrauben:		1 x M20
Lagerungstyp:		BC3 - gelenkig
Vorspannung:		lt. Hersteller
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	11314
Traglast:	$N_{FEM}$ :	146 kN
	$N_{Labor}$ :	145 kN
Verhältnis $N_{FEM}/N_{Labor}$ :		1.01: $\Delta = +0.7\%$

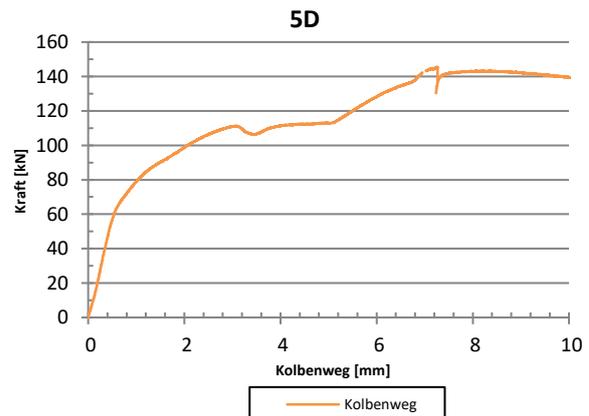


Diagramm 4-81: Kraft/Kolbenweg

Bei Versuch 5D war aufgrund der kurzen Länge des Winkels kein Anbringen aller Messeinrichtungen möglich. Die Dehnungen konnten gemessen werden, zeigen jedoch sehr unetstetige Verläufe und damit möglicherweise starke Ungenauigkeiten. Die am verschraubten Schenkel angebrachten Dehnungsmesser wurden vor dem Überschreiten der Traglast entfernt, um eventuelle Beschädigungen zu vermeiden (mit Messeinrichtungen siehe Abb. 4-35). Generell stimmen die Verformungsbilder der FE-Berechnung und des Laborversuchs aber gut überein. Man kann deutlich erkennen, dass in der Mitte des Winkelprofils lokales Beulen aufgrund der kurzen Länge auftritt (siehe Abb. 4-34). Das Kraft-Weg-Diagramm (siehe Diagramm 4-81) lässt auf ein Nachrutschen der Schrauben bei ca. 110kN und bei ca. 140kN schließen.



Abb. 4-35: Messeinrichtungen vor Erreichen der Maximallast

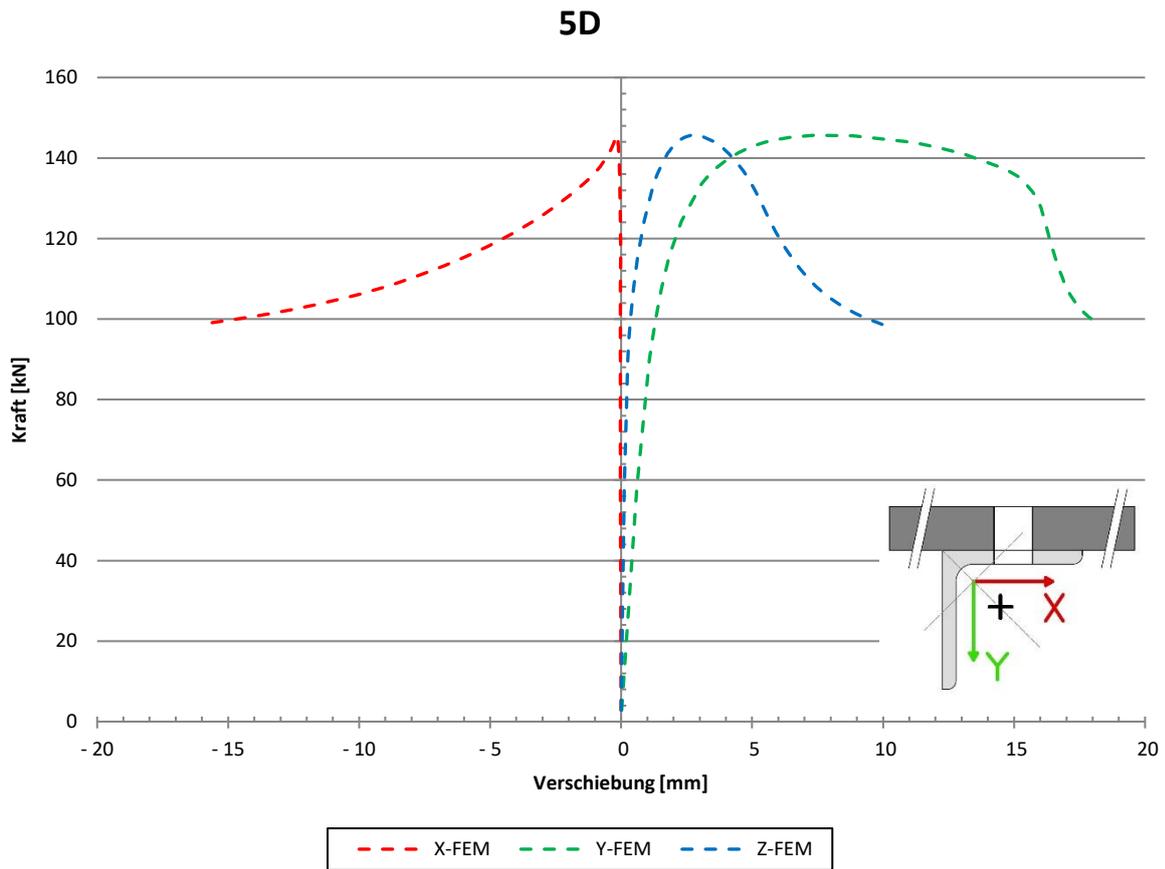


Diagramm 4-82: X/Y/Z-Verformung FE

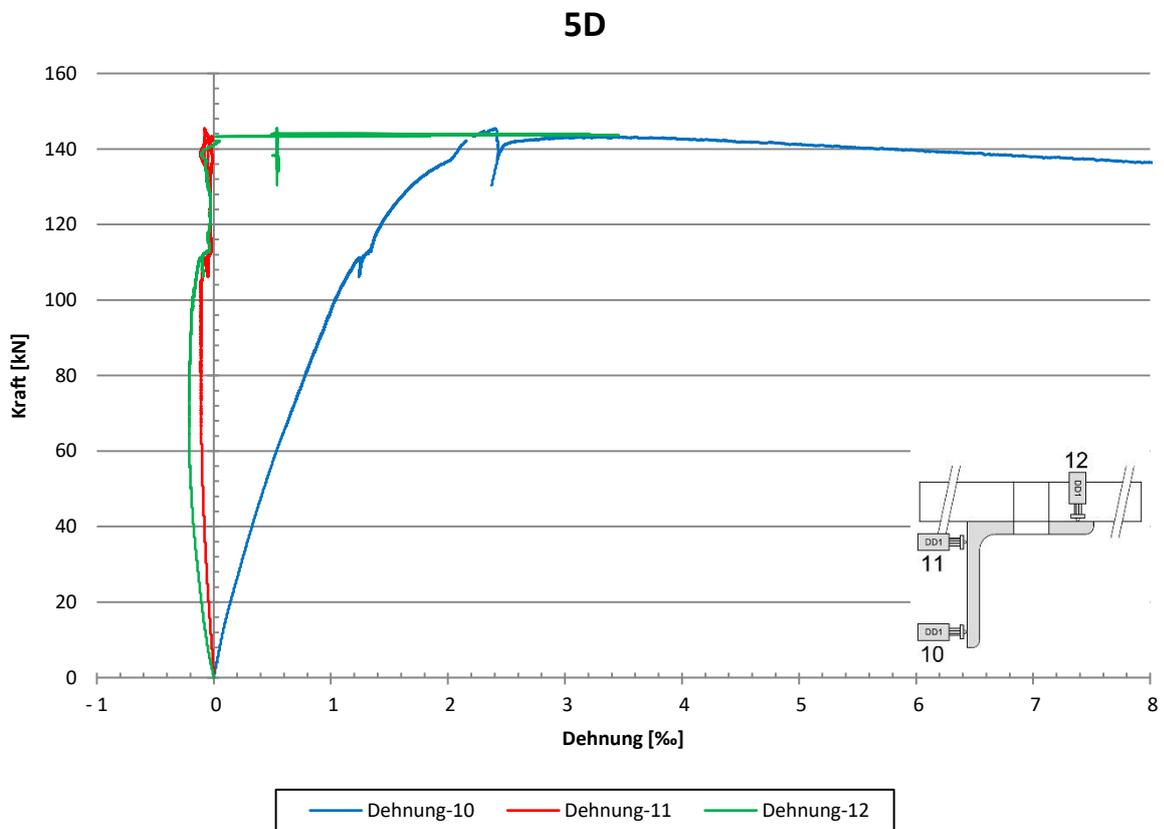


Diagramm 4-83: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.6 Laborversuch 6D

Eckdaten:		
Länge	L_Stab:	470 mm
	L_System:	550 mm
Schrauben:		1 x M20
Lagerungstyp:		BC3 - gelenkig
Vorspannung:		lt. Hersteller
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	7778
Traglast:	$N_{FEM}$ :	155 kN
	$N_{Labor}$ :	151 kN
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	1.03: $\Delta = +2.6\%$

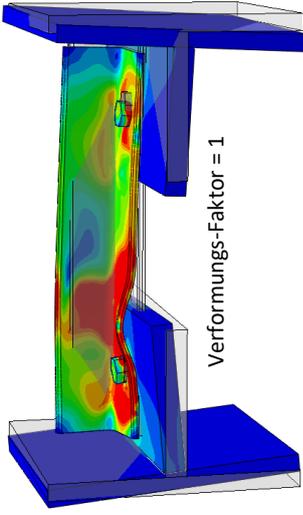



Abb. 4-36: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Bei Versuch 6D stimmen die Verformungsverläufe grundsätzlich gut überein. Die Traglasten weichen auch nur minimal voneinander ab. Auffallend ist aber eine deutliche Steigerung der Verformung in X-Richtung nach Erreichen des Traglastmaximums. Bei der FE-Berechnung weicht der Winkel in die negative X-Richtung aus und beim Laborversuch in die positive. In Diagramm 4-84 sind keine Anzeichen für ein Nachrutschen der Schrauben ersichtlich. Im Gegensatz dazu deutet das Plateau der Vertikalverformung bei ca. 125kN in Diagramm 4-86 auf ein Nachrutschen der Schrauben bei der FE-Berechnung hin. Die Verdrehungen des Winkels sind anfangs nur sehr gering, steigen jedoch mit dem Erreichen des Traglastmaximums erheblich an. Die Dehnungen sind vergleichsweise auch gering. Bei der FE-Berechnung ist deutlich lokales Beulen des Querschnitts erkennbar (siehe Abb. 4-36, mittig). Im Laborversuch tritt kein Beulen auf, dafür verformt sich der verschraubte Schenkel im oberen Bereich deutlich (siehe Abb. 4-37).



Abb. 4-37: Verformung Winkelschenkel oben

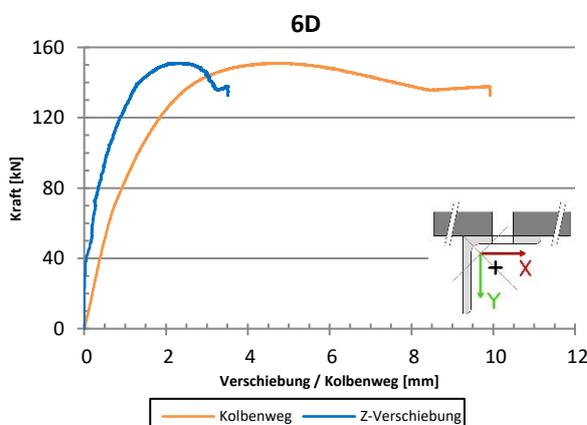


Diagramm 4-84: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

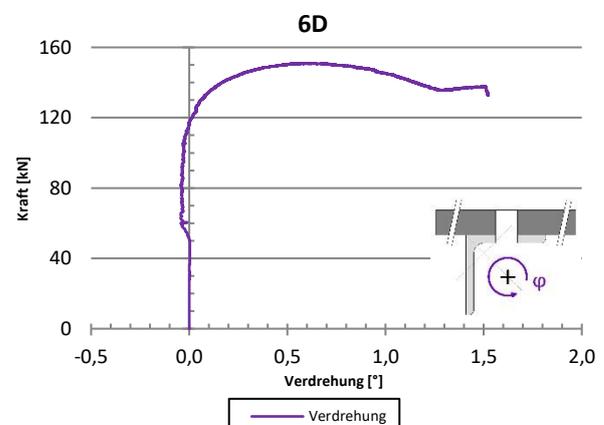


Diagramm 4-85: Kraft/Verdrehung

### 6D

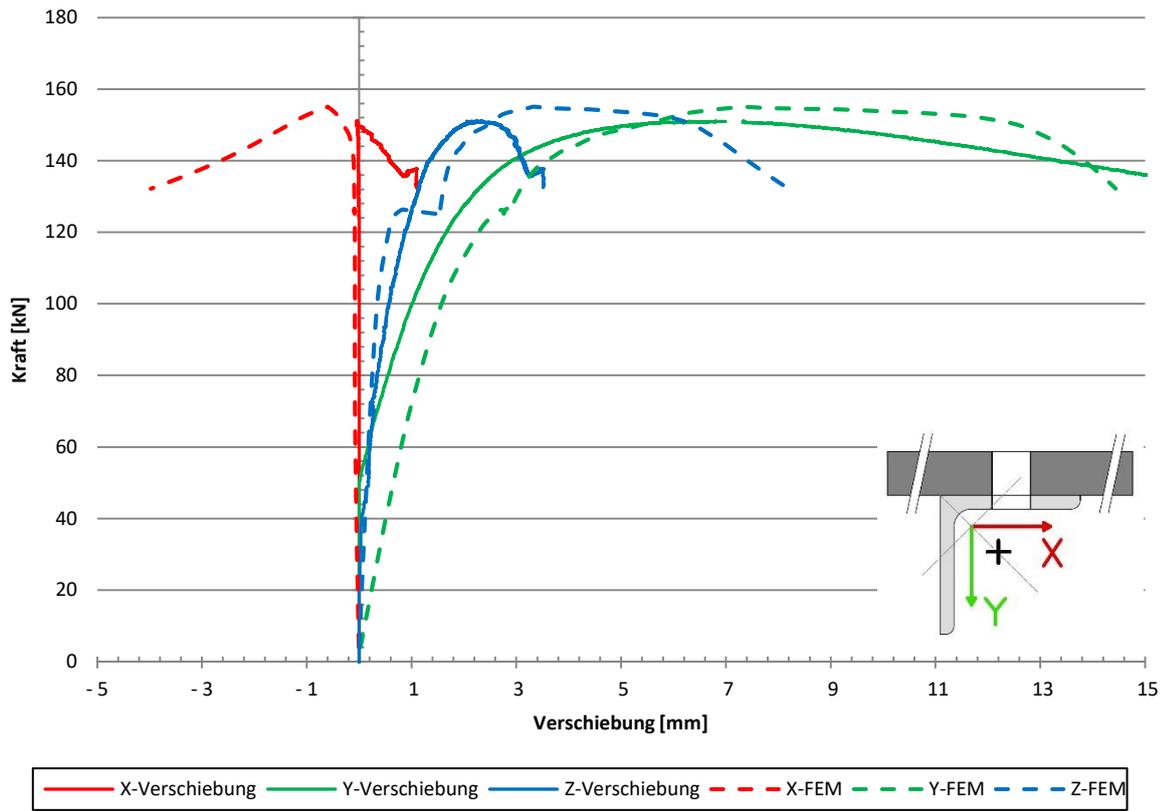


Diagramm 4-86: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 6D

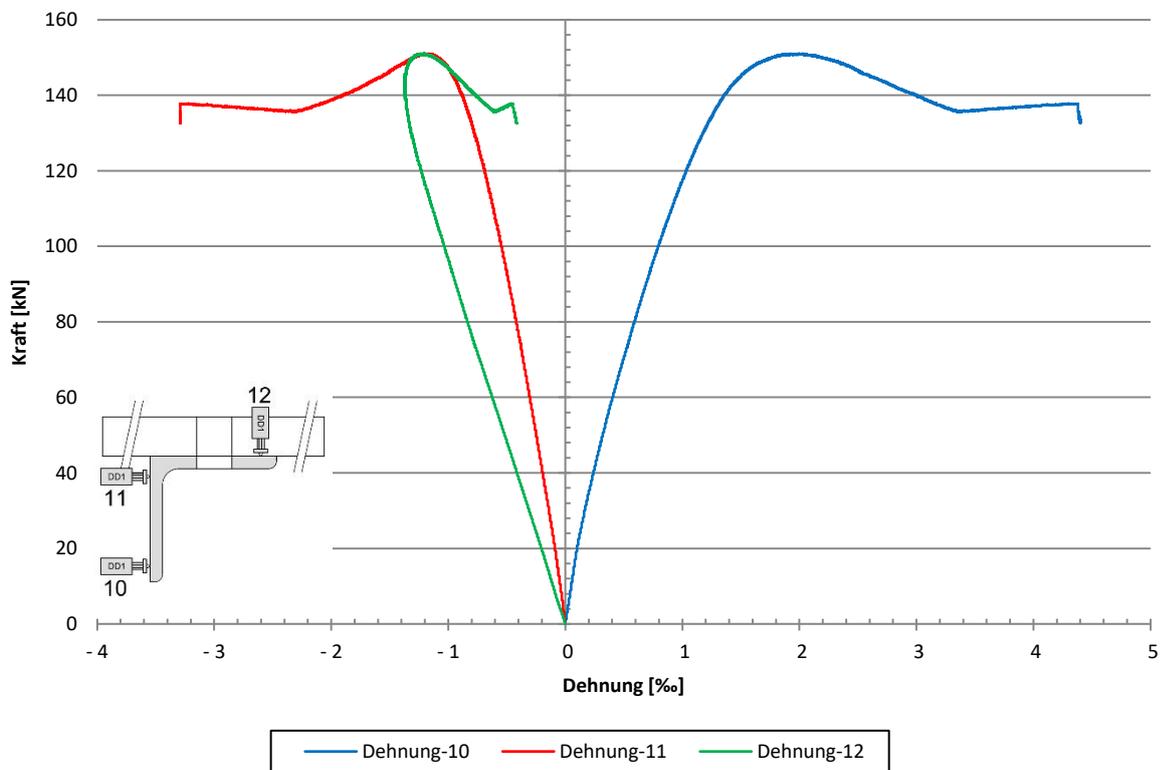


Diagramm 4-87: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.7 Laborversuch 7D

<b>Eckdaten:</b>			
Länge	L_Stab:	620 mm	
	L_System:	700 mm	
Schrauben:	1 x M20		
Lagerungstyp:	BC3 - gelenkig		
Vorspannung:	lt. Hersteller		
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	3960	
Traglast:	$N_{FEM}$ :	153 kN	
	$N_{Labor}$ :	149 kN	
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	1.03: $\Delta = +2.7\%$	

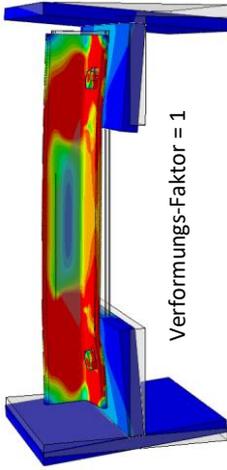



Abb. 4-39: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Traglasten der beiden Ergebnisse weichen nur gering voneinander ab. Es tritt ein Nachrutschen der Schrauben bei ca. 100kN auf. Dies führt auch zum horizontalen Plateau im Graphen der Z-Verschiebung (siehe Diagramm 4-88). Auch hier treten lokale Verformungen (wie bei Versuch 6D) im oberen Bereich des verschraubten Winkelschenkels auf. Ein interessanter Effekt ist, dass durch die plastische Verformung im Versuch ein lokales Verdrehen des Querschnittes auftritt (siehe Abb. 4-38, links). Die Verdrehungen im Mittelquerschnitt des Winkels sind jedoch vergleichsmäßig eher gering. Auch die Dehnungen des Querschnitts sind nicht besonders stark ausgeprägt und erreichen nur ein Maximum von etwa 2%. (siehe Diagramm 4-91)



Abb. 4-38: Lokale plastische Verdrehung des Winkels (links), plastische Verformung (rechts)

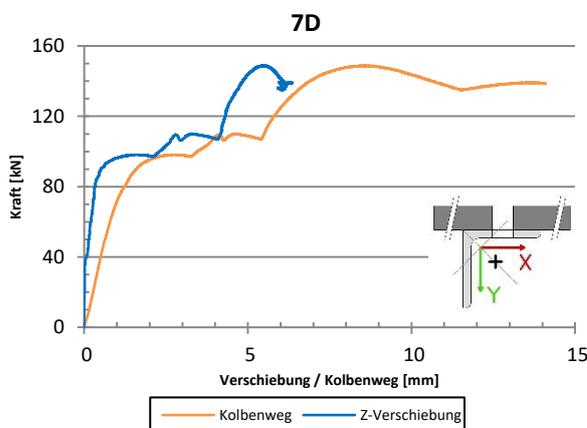


Diagramm 4-88: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

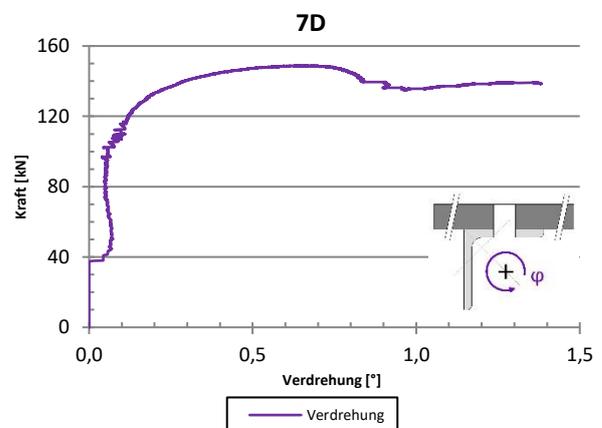


Diagramm 4-89: Kraft/Verdrehung

### 7D

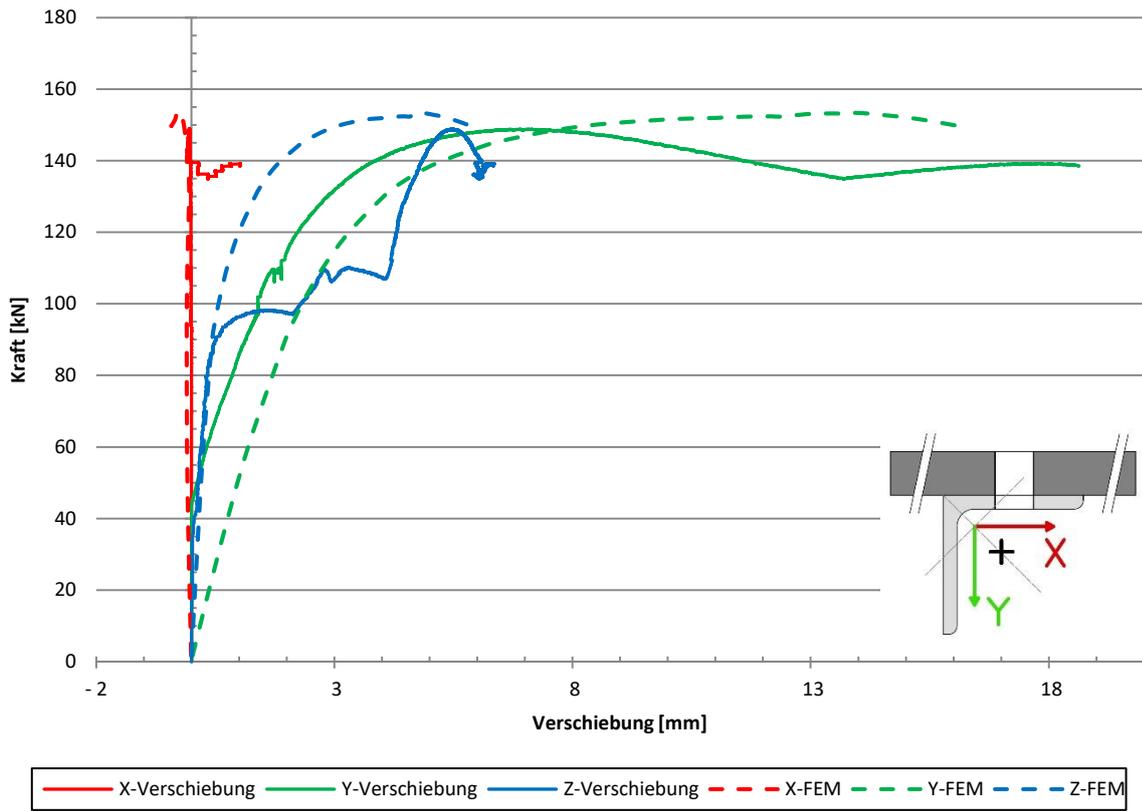


Diagramm 4-90: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 7D

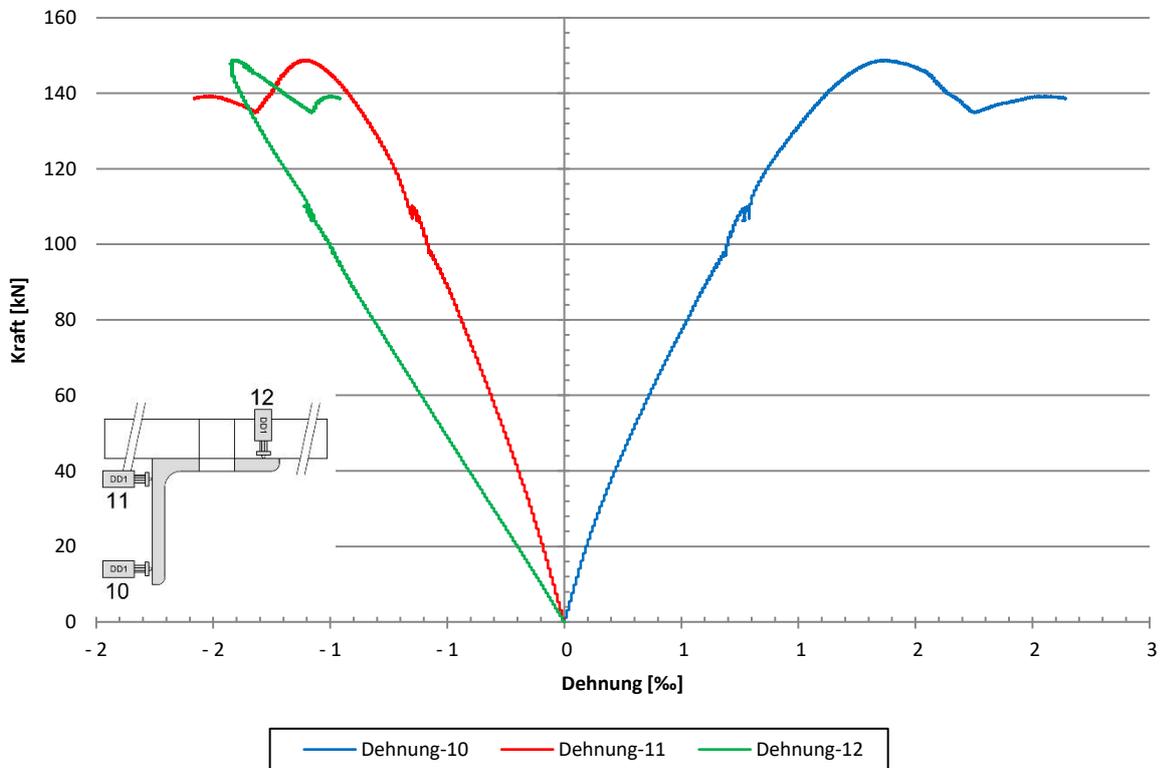


Diagramm 4-91: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.4.8 Laborversuch 8D

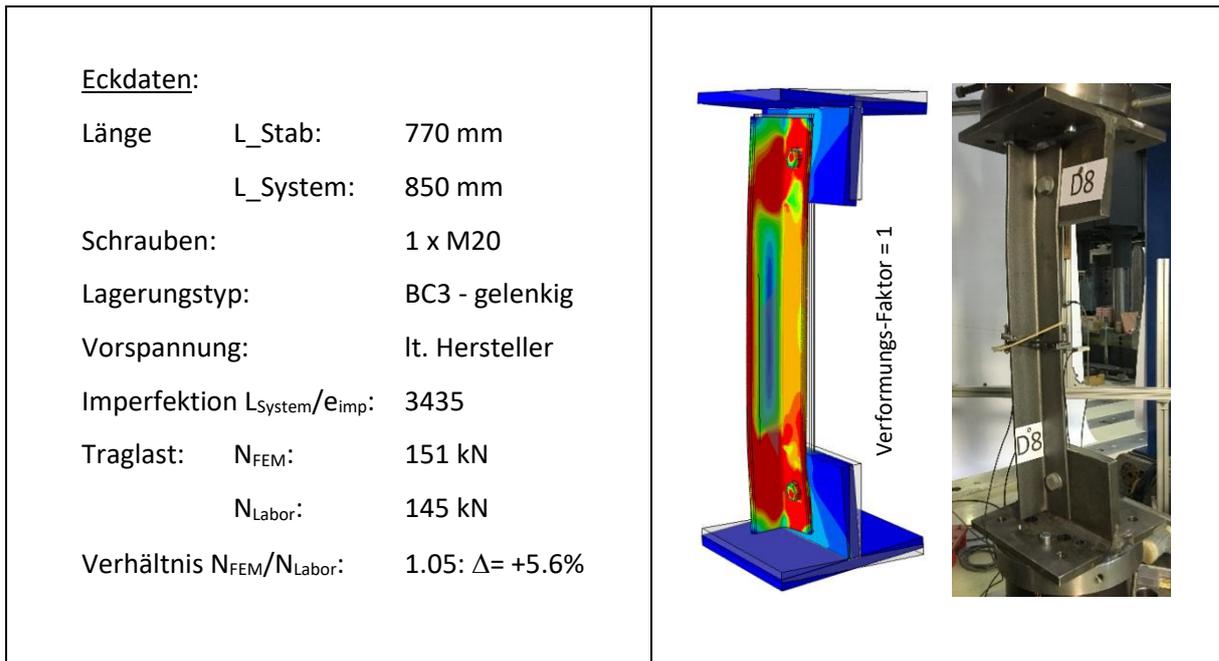


Abb. 4-40: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Die Verformungsverläufe stimmen auch hier einigermaßen gut überein und auch die Traglasten weichen nicht allzu stark voneinander ab. Die Schrauben rutschen bei ca. 110kN nach (siehe Diagramm 4-92). Eine plausible Erklärung für die markanten Sprünge in den Messgraphen bei etwa 140kN kann nicht angegeben werden. Es wird allerdings vermutet, dass es sich um eine Beeinflussung der Messeinrichtungen durch äußere Einflüsse handelt, da diese Sprünge in allen Diagrammen sichtbar sind. Auch hier treten am oberen Winkelschenkel beim Versuch lokale Verformungen in Verbindung mit einer Verdrehung des Querschnitts auf (siehe Abb. 4-41). Die gemessenen Verdrehungen am Mittelquerschnitt des Winkels fluktuieren sehr stark, sind aber grundsätzlich eher gering (siehe Diagramm 4-93). Die Dehnungen des Winkels sind ebenso eher gering und weisen, abgesehen von den sprunghaften Störungen im Graphen, keine besonderen Verläufe auf (siehe Diagramm 4-95).



Abb. 4-41: Lokale plastische Verdrehung des Winkels (links), plastische Verformung (rechts)

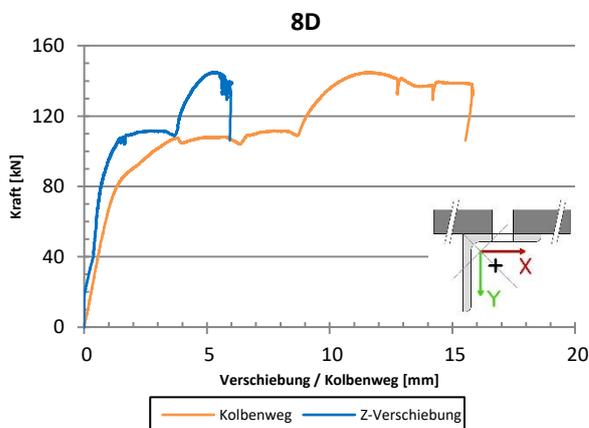


Diagramm 4-92: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

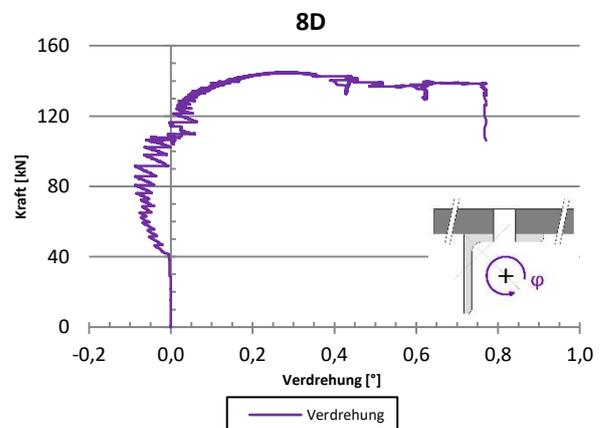


Diagramm 4-93: Kraft/Verdrehung

### 8D

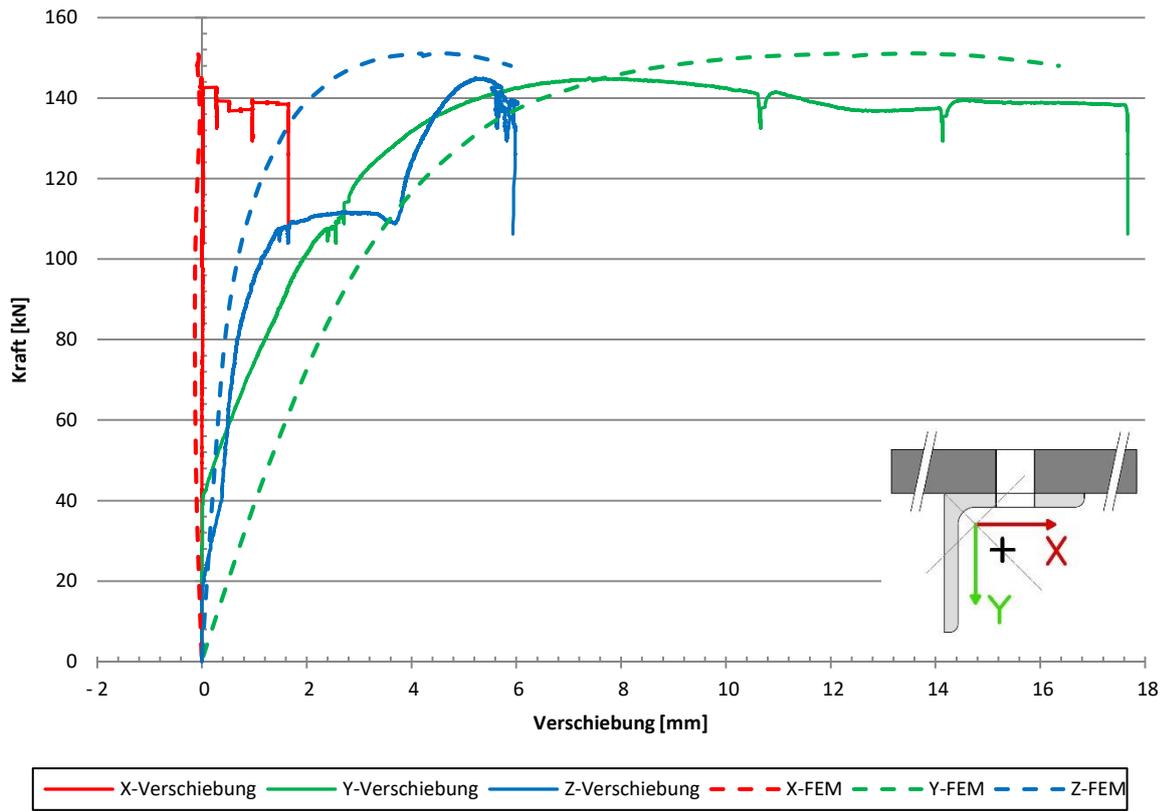


Diagramm 4-94: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 8D

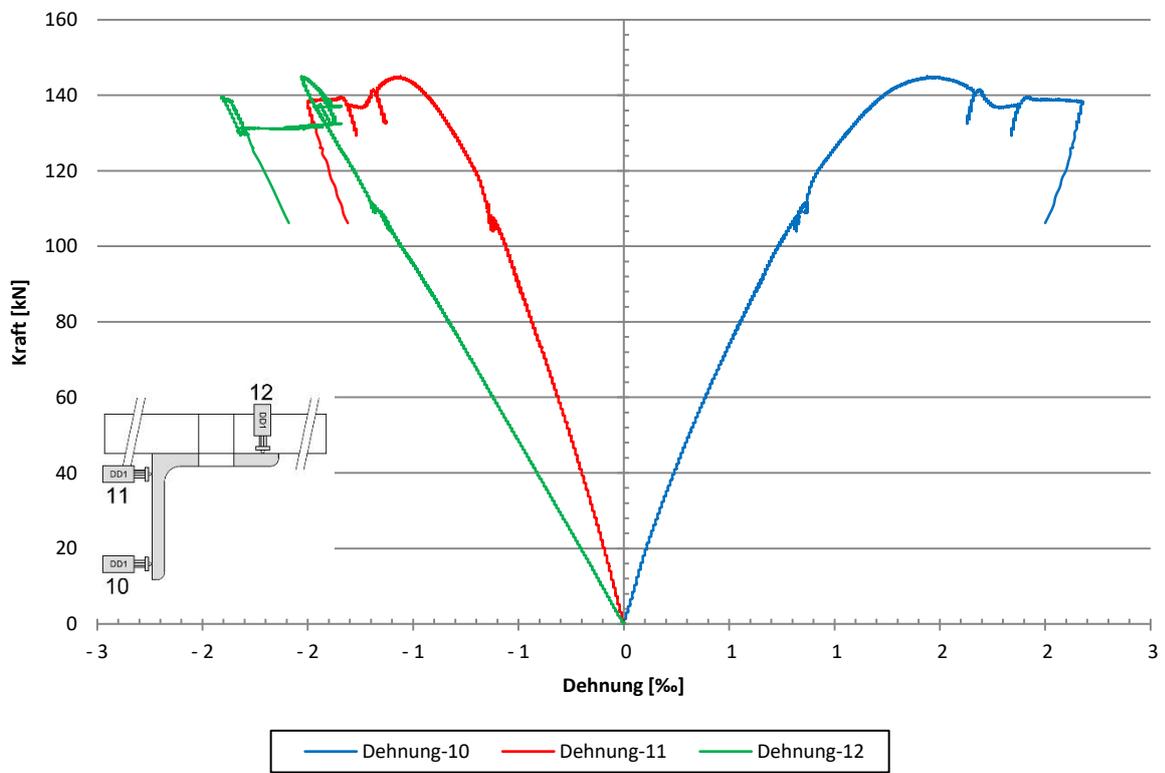


Diagramm 4-95: Dehnungen des Querschnittes

## 4.5 Versuchsreihe E – Winkelprofil 120x12

### 4.5.1 Laborversuch 1E

<u>Eckdaten:</u>		
Länge	L_Stab:	1850 mm
	L_System:	1890 mm
Schrauben:		2 x M27
Lagerungstyp:		BC1 - eingespannt
Vorspannung:		2-stufig
Imperfektion	$L_{System}/e_{imp}$ :	1724
Traglast:	$N_{FEM}$ :	512 kN
	$N_{Labor}$ :	488 kN
Verhältnis	$N_{FEM}/N_{Labor}$ :	1.05: $\Delta = +4.9\%$

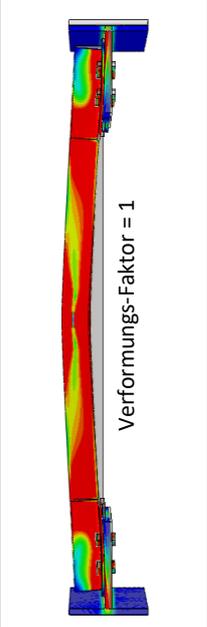



Abb. 4-42: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Versuch 1E ist der erste Versuch mit einem Winkel der Abmessungen 120x12mm. Die Verformungsverläufe stimmen sehr gut überein und auch die Traglasten weichen nur geringfügig voneinander ab. Bei ca. 370kN kann ein Nachrutschen der unteren Schrauben festgestellt werden (siehe Diagramm 4-96). Ein gewisses Nachrutschen der oberen Schrauben kann aufgrund der deutlich größeren Verformung des Kolbenweges vermutet werden. Eine interessante Erkenntnis stellt die Verformung der Anschlussbleche aufgrund der hohen Belastung dar (siehe Abb. 4-43). Dies ist auch deutlich im FE-Modell sichtbar (siehe Abb. 4-42, mittig). Dieser Effekt wurde bei 460kN gemessen und die Verformung beträgt ca. 3.7mm unten und 3.4mm oben. Die Verdrehung des Winkels zeigt keine besonderen Vorkommnisse. Die maximale Dehnung bzw. Stauchung erfährt der Winkel aufgrund seiner Verformungsfigur bei Punkt 10 und 11 (siehe Diagramm 4-99).

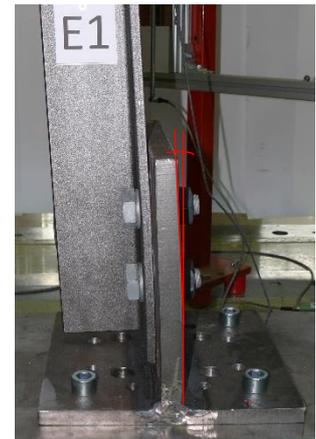


Abb. 4-43: Verformung des Anschlussbleches

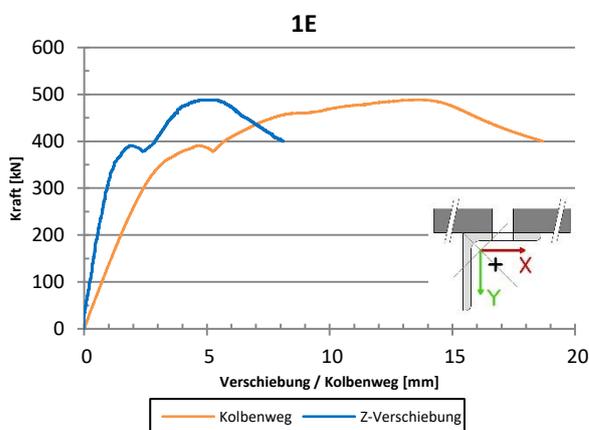


Diagramm 4-96: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

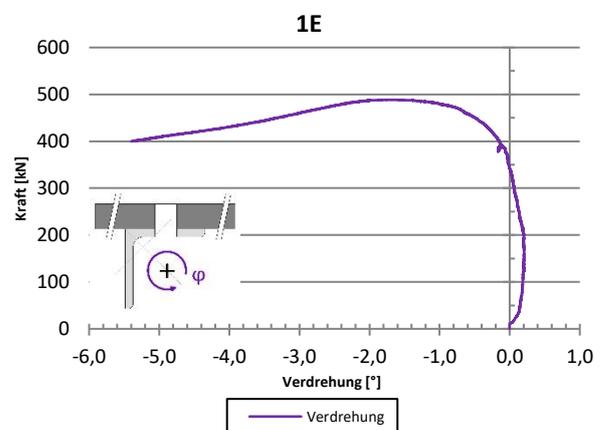


Diagramm 4-97: Kraft/Verdrehung

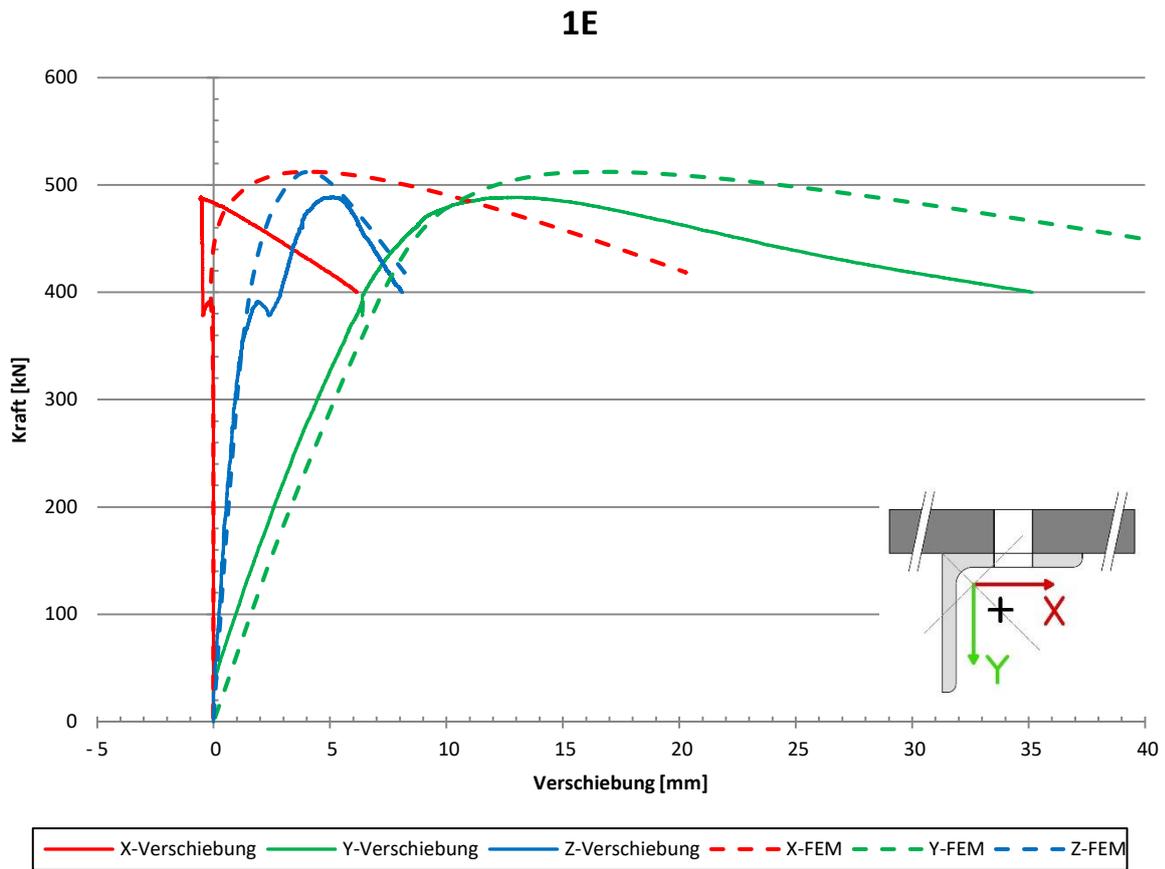


Diagramm 4-98: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

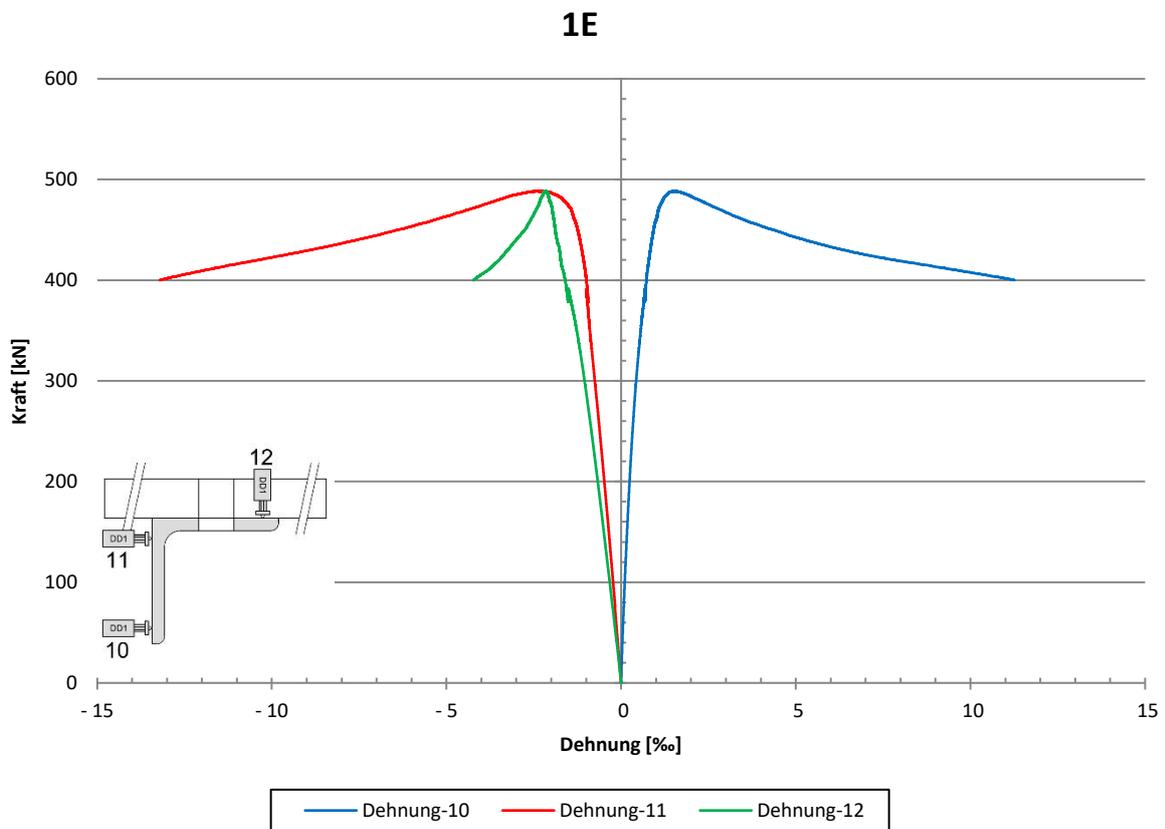


Diagramm 4-99: Dehnungen des Querschnittes

#### 4.5.2 Laborversuch 2E

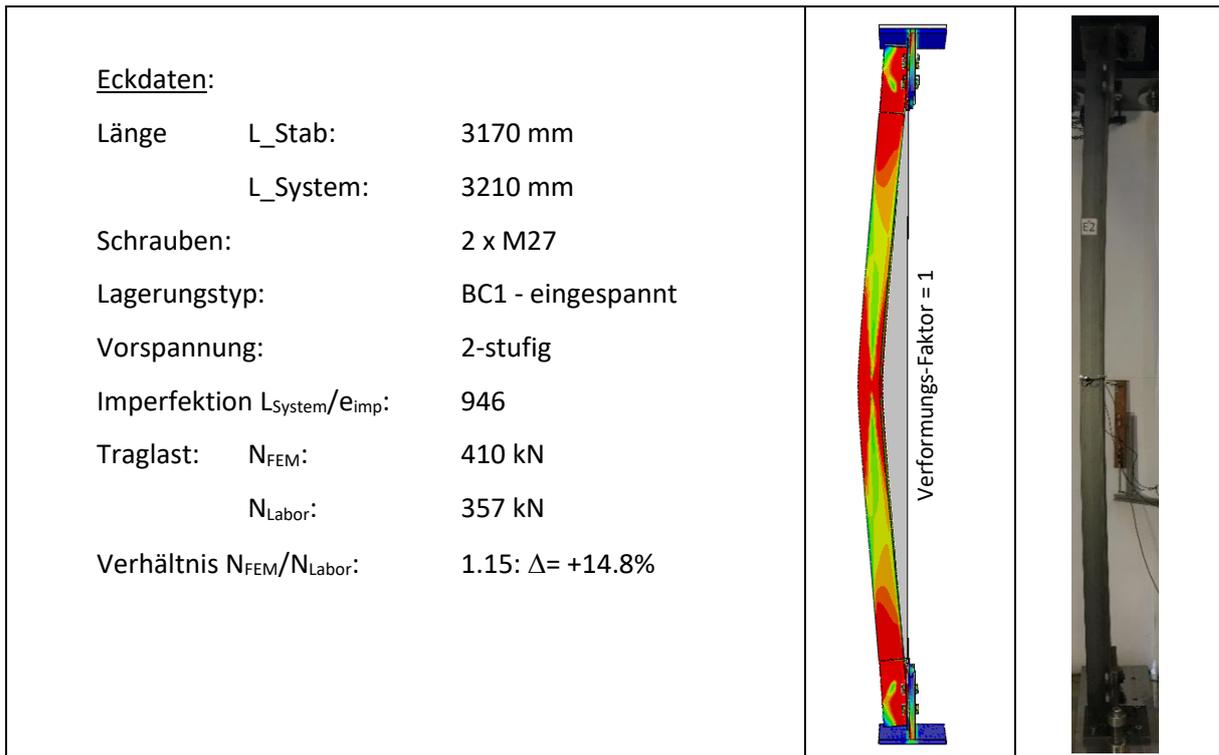


Abb. 4-44: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Auch hier stimmen die Verformungsverläufe gut überein, die Traglasten weichen jedoch bereits stärker voneinander ab. Ein Nachrutschen der Schrauben ist nicht erkennbar (siehe Diagramm 4-100). Auch bei diesem Versuch verformt sich das Anschlussblech aufgrund der hohen Belastung (siehe Abb. 4-44, mittig). Es wurden die plastischen Verformungen des Anschlussbleches nach Versuchsdurchführung unten gemessen und diese betragen ca.  $0.9^\circ \approx 4.5\text{mm}$ . Die Drehmomente zum Lösen der Schrauben wurden nach Beenden des Versuches ebenfalls gemessen. Die Werte können aus Abb. 4-45 entnommen werden. Die Verdrehung des Winkels verläuft sehr gleichmäßig und erreicht einen Wert von ca.  $2.2^\circ$  beim Traglastmaximum (siehe Diagramm 4-101). Aufgrund des Verformungsbildes erfährt der Winkel seine maximale Dehnung bzw. Stauchung am nicht angeschraubten Schenkel bei Punkt 10 bzw. 11 (siehe Diagramm 4-103).

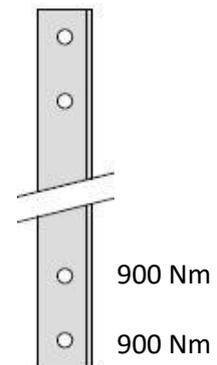


Abb. 4-45: Anzugsmomente nach Versuchsdurchführung

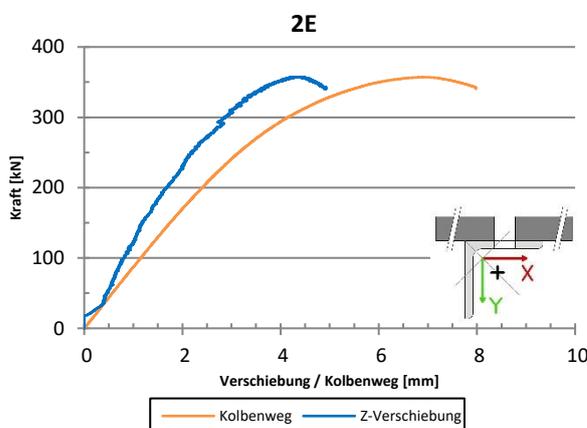


Diagramm 4-100: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

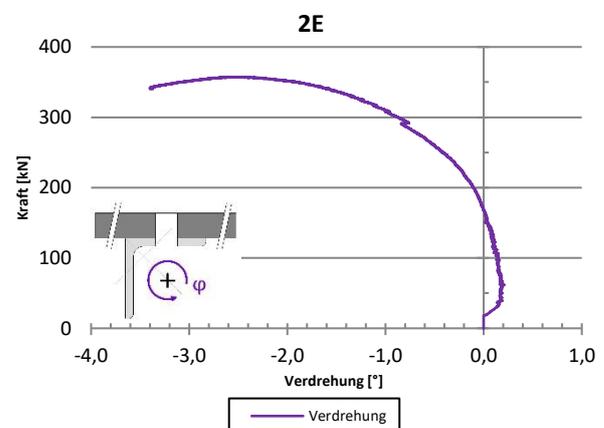


Diagramm 4-101: Kraft/Verdrehung

## 2E

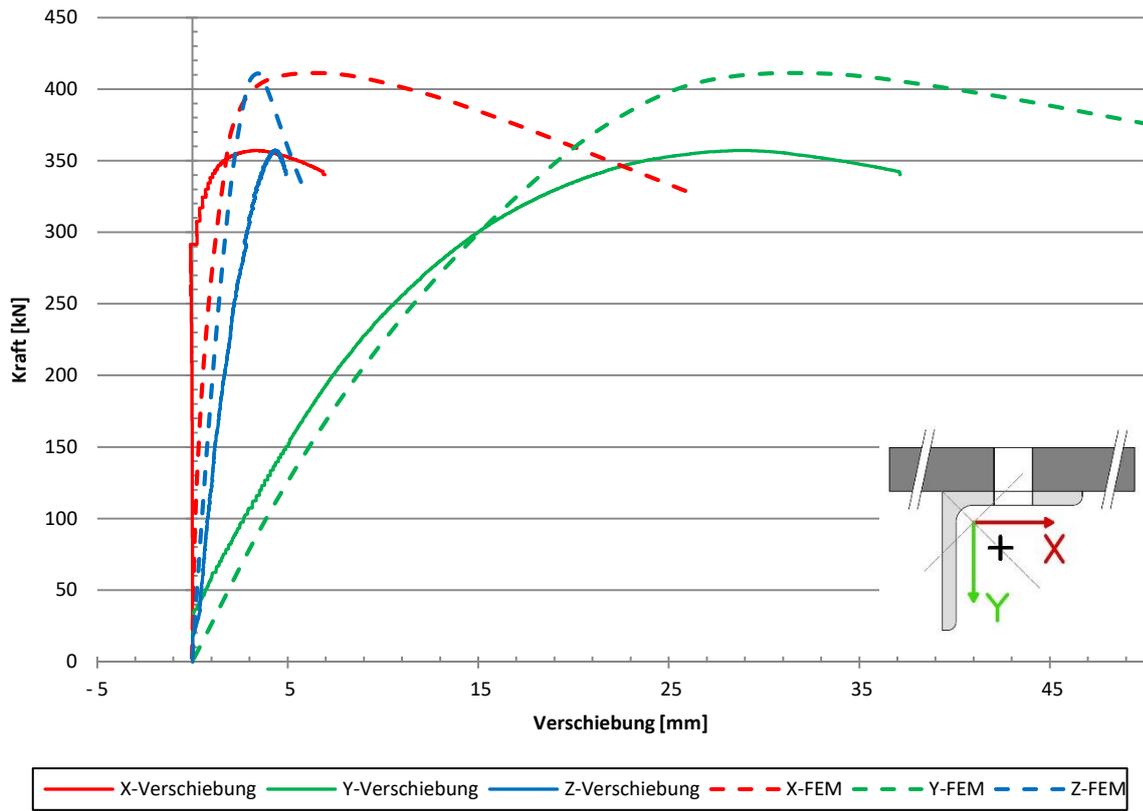


Diagramm 4-102: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

## 2E

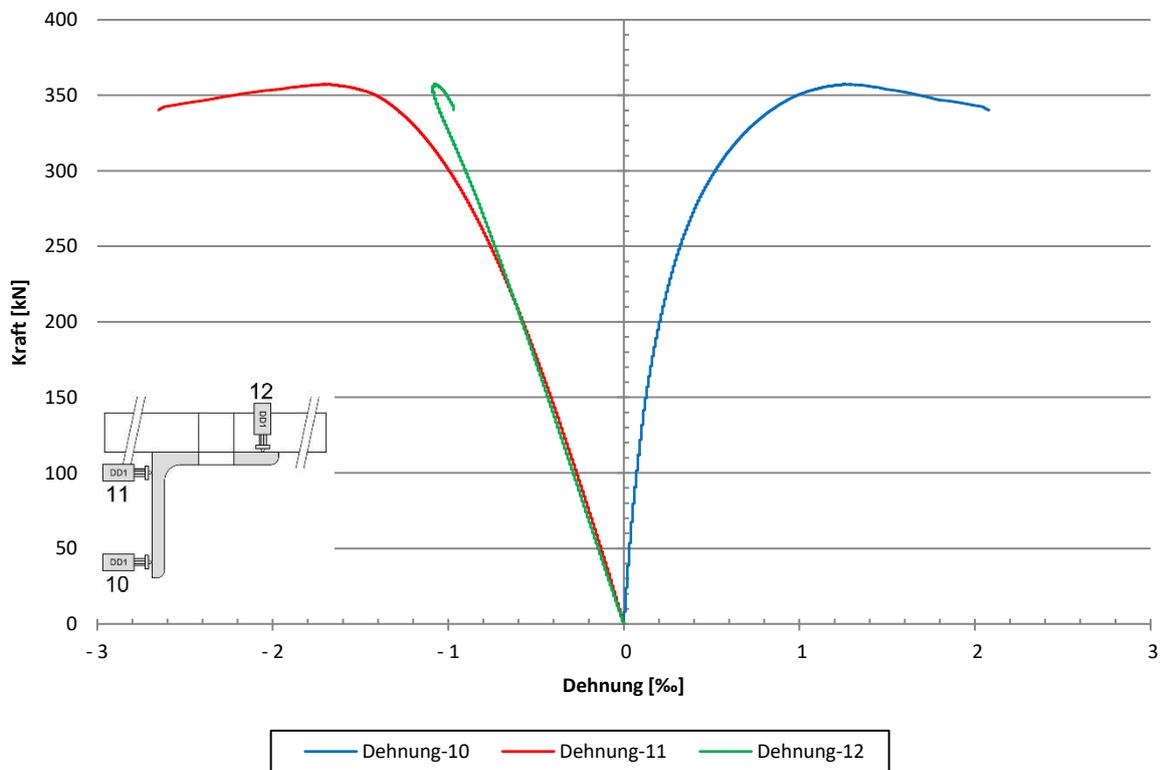


Diagramm 4-103: Dehnungen des Querschnittes

### 4.5.3 Laborversuch 3E

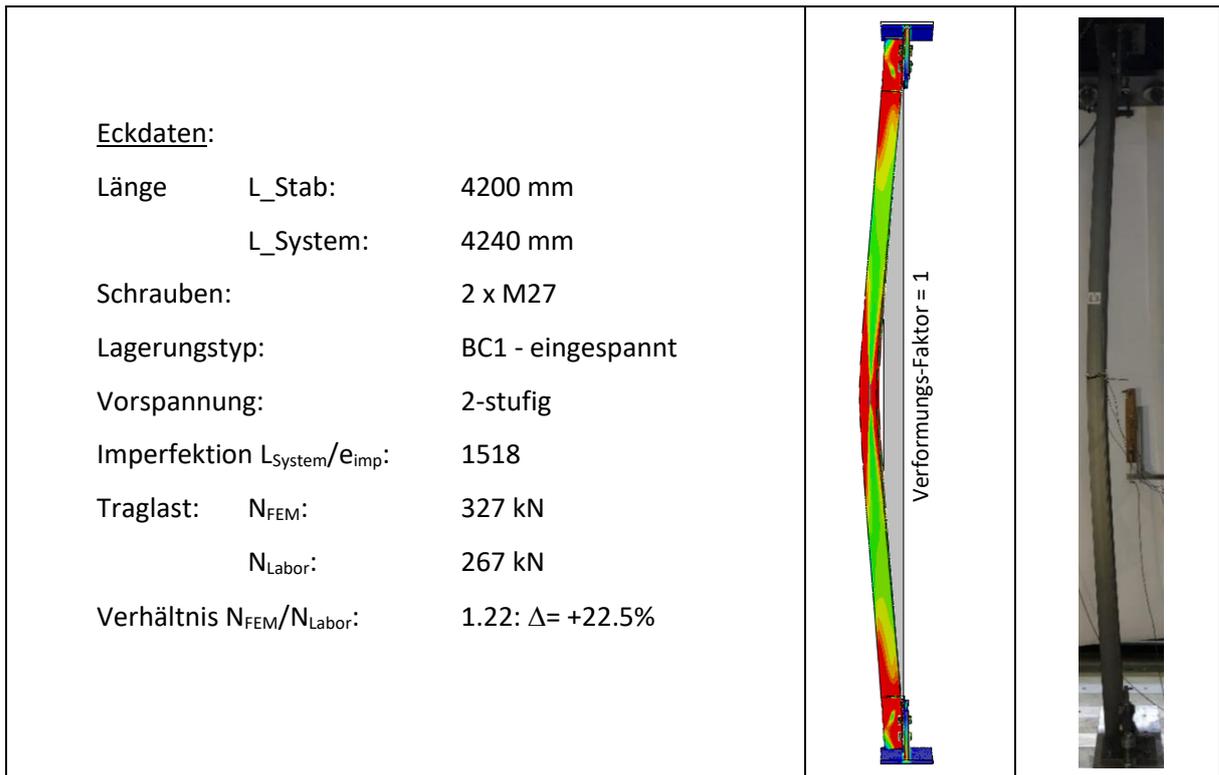


Abb. 4-46: Eckdaten (links), Vergleich Verformungen FEM (mittig) - Versuch (rechts)

Versuch 3E beinhaltet den längsten Winkel der Versuchsreihe mit einer Länge von 4200mm. Die Verformungsverläufe stimmen grundsätzlich gut überein, die Traglasten weichen jedoch erheblich voneinander ab. Eine mögliche Erklärung für diese starken Abweichungen ist, dass die Anschlussbleche bereits minimale Verformungen aufweisen und diese aufgrund der großen Stablänge einen stärkeren Einfluss auf die Traglast haben. Das Anschlussblech verformt sich ebenso plastisch mit zunehmender Belastung (siehe Abb. 4-46, mittig). Ein Nachrutschen der Schrauben ist in Diagramm 4-104 nicht ersichtlich. Auch die Verdrehungen des Querschnitts weisen einen gleichmäßigen Verlauf auf und erreichen bei der Traglast ein Maximum von etwa 2.3°. Die größten Dehnungen bzw. Stauchungen des Querschnitts finden den Verformungen entsprechend am nicht verschraubten Schenkel statt (siehe Diagramm 4-107).

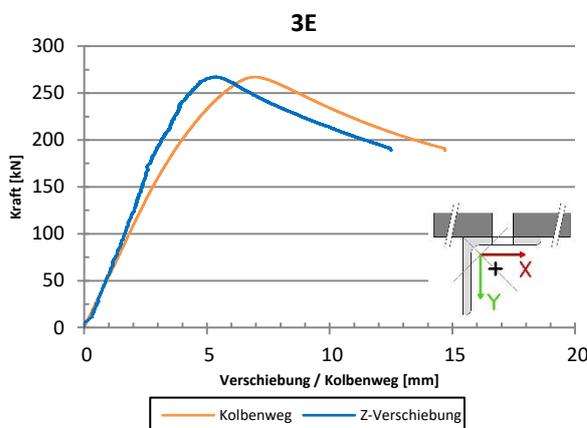


Diagramm 4-104: Kraft/Kolbenweg und Kraft/Z-Verformung

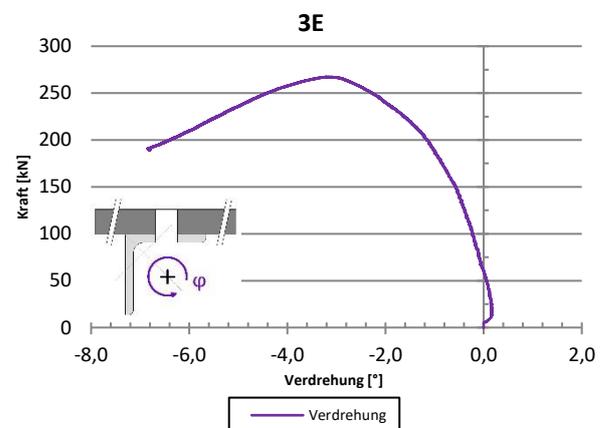


Diagramm 4-105: Kraft/Verdrehung

### 3E

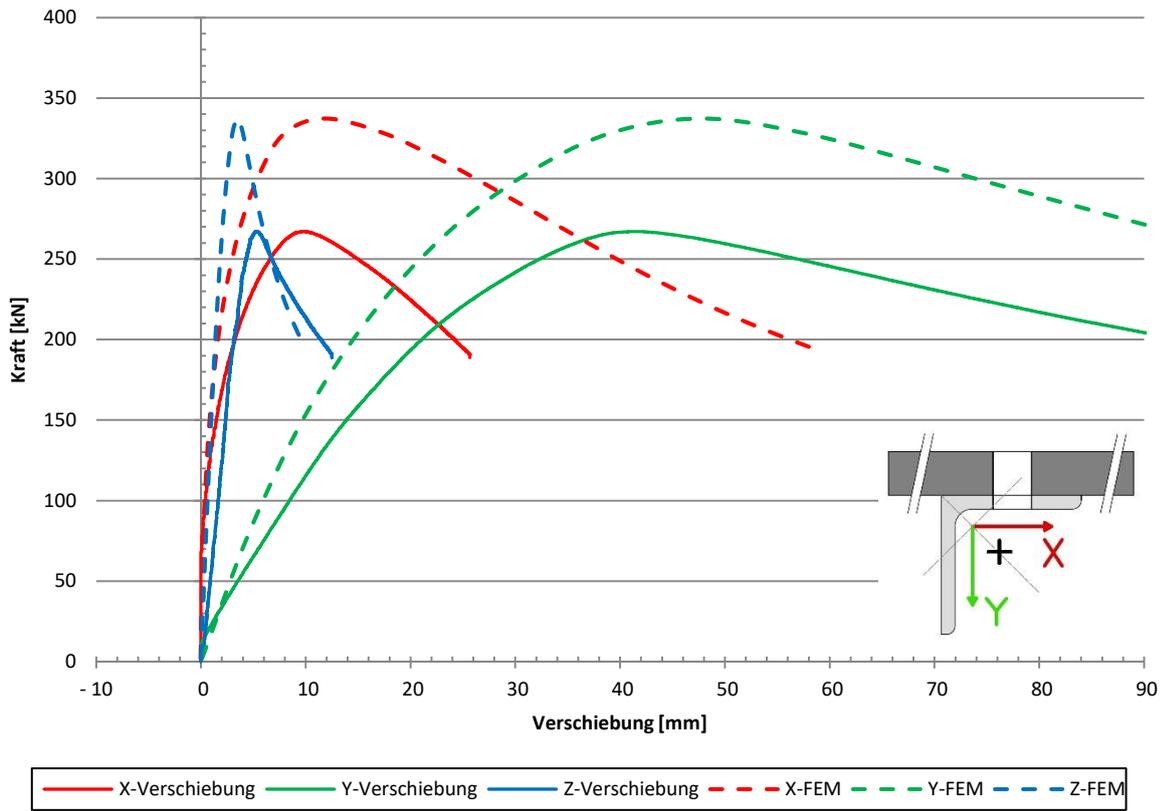


Diagramm 4-106: Vergleich X/Y/Z-Verformung Versuch - FE

### 3E

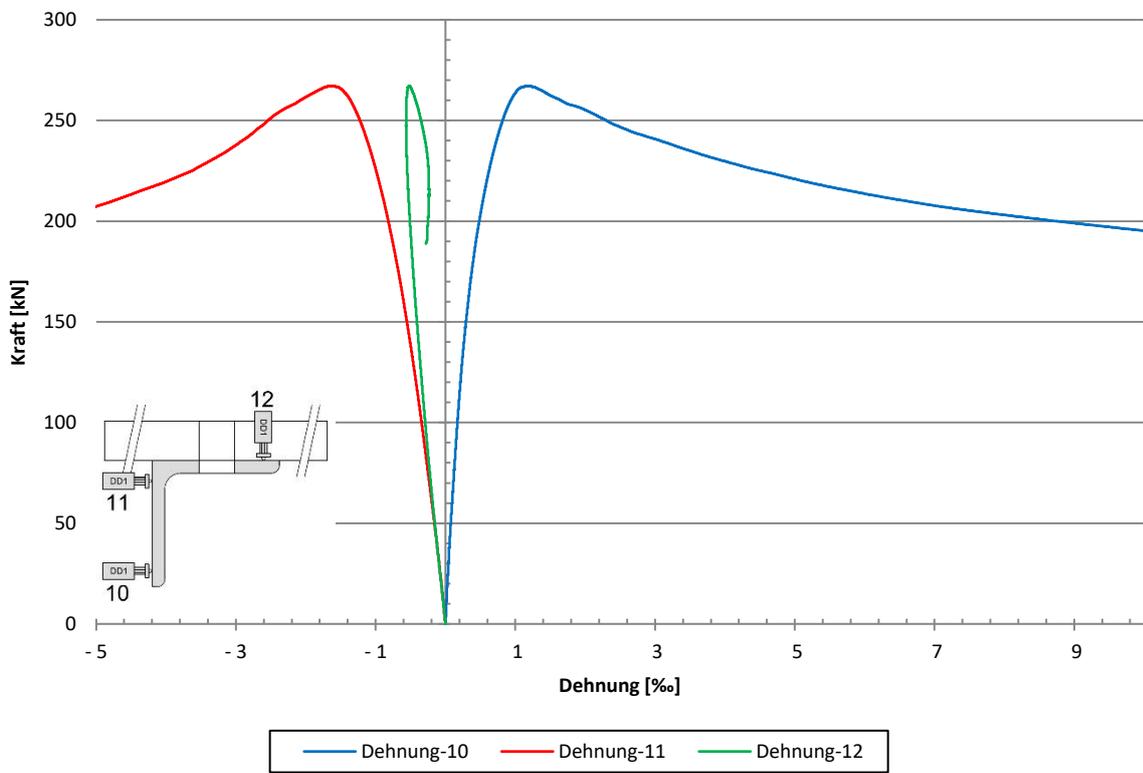


Diagramm 4-107: Dehnungen des Querschnittes

## 5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Traglastergebnisse der gesamten Versuchsreihe abschließend interpretiert und zusammengefasst. Tabelle. 5-1 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Sie beinhaltet unter anderem die Ermittlung der plastischen Normalkräfte  $N_{pl}$  (Gl. (23), [2]) und der Euler-Knicklasten  $N_{cr}$  (Gl. (25), [2]), um die schwache Achse mit dem Trägheitsmoment  $I_v$ . Dabei liegen die gemessenen Materialkennwerte zugrunde ( $E_{mean}$ ,  $f_{y,mean}$ ; siehe Tabelle. 2-7). Die Knicklast  $N_{cr}$  wurde mit der Systemlänge  $L_{System}$  berechnet. Alle Werte wurden individuell für jeden Winkel ermittelt. Auch die Schlankheit  $\bar{\lambda}_v$  (Gl. (26), [2]) wurde entsprechend berechnet. Die Traglast  $N_R$  im Versuch im Verhältnis zur plastischen Normalkraft  $N_{pl}$  wird ebenso dargestellt.

$$N_{pl} = A * f_{y,mean} \quad (24)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{cr}^2} \quad (25)$$

$$\bar{\lambda}_v = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}} \quad (26)$$

Tabelle. 5-1: Zusammenfassung der ULS-Traglasten und der zugehörigen Schlankheitsgrade  $\bar{\lambda}_v$

### Versuchsergebnisse

Profilkennung	S_Anzahl	A	$I_v$	$L_{System}^1$	$E_{mean}$	$f_{y,mean}$	$N_{pl}$	$N_{cr}^2$	$\bar{\lambda}_v$	$N_R$	$N_R / N_{pl}$
[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
1A	2	12.6	31.0	1180	212 368	289.9	365.7	466.6	0.89	261.1	0.71
2A	2	12.5	30.7	1860	212 368	289.9	362.7	186.0	1.40	238.8	0.66
3A	2	12.7	31.2	2670	212 368	289.9	367.5	91.7	2.00	215.4	0.59
4A	2	12.6	30.8	1085	212 368	289.9	364.1	548.4	0.81	156.8	0.43
5A	2	12.5	30.7	1765	212 368	289.9	362.8	206.6	1.33	117.8	0.32
6A	2	12.6	31.0	2575	212 368	289.9	365.7	98.0	1.93	71.8	0.20
1B	2	11.9	28.6	1490	199 458	326.8	388.6	253.6	1.24	148.0	0.38
2B	2	11.9	28.7	2300	199 458	326.8	388.6	106.8	1.91	86.4	0.22
3B	2	12.0	28.8	2850	199 458	326.8	390.9	69.8	2.37	61.0	0.16
4B	1	11.9	28.6	1180	199 458	326.8	389.1	404.3	0.98	162.9	0.42
5B	1	11.9	28.7	1860	199 458	326.8	390.0	163.3	1.55	132.1	0.34
1C	1	11.9	28.6	3210	209 284	333.9	398.1	57.3	2.63	98.4	0.25
2C	1	11.9	28.5	1085	209 284	333.9	397.2	500.1	0.89	120.9	0.30
3C	1	11.9	28.7	2575	209 284	333.9	398.3	89.4	2.11	66.0	0.17
4C	1	11.9	28.7	1490	209 284	333.9	398.2	267.0	1.22	131.0	0.33
5C	1	12.0	28.9	2850	209 284	333.9	400.6	73.5	2.33	62.6	0.16
1D	2	11.9	28.6	1180	194 818	322.4	383.5	394.9	0.99	260.2	0.68
2D	2	12.0	28.7	2670	194 818	322.4	385.4	77.4	2.23	177.5	0.46
3D	1	11.9	28.7	1180	194 818	322.4	384.4	396.3	0.98	154.8	0.40
4D	1	12.0	28.8	3210	194 818	322.4	385.9	53.7	2.68	73.1	0.19
5D	1	11.8	28.3	400	194 818	322.4	381.0	3400.9	0.33	145.5	0.38
6D	1	11.9	28.6	550	194 818	322.4	384.8	1817.9	0.46	151.0	0.39
7D	1	11.8	28.4	700	194 818	322.4	381.7	1114.4	0.59	148.8	0.39
8D	1	11.9	28.6	850	194 818	322.4	383.2	761.1	0.71	145.0	0.38
1E	2	27.6	153.0	1890	192 156	299.3	826.7	812.3	1.01	488.4	0.59
2E	2	27.6	152.2	3210	192 156	299.3	825.5	280.1	1.72	357.2	0.43
3E	2	27.6	152.7	4240	192 156	299.3	825.1	161.1	2.26	267.1	0.32

1.  $L_{System\_BC1} = L_{Stab} + 40$  mm;  $L_{System\_BC2} = L_{Stab} + 215$  mm;  $L_{System\_BC3} = L_{Stab} + 80$  mm (Näherungswerte)

2. Die Euler-Knicklast  $N_{cr}$  wurde mit  $L_{System}$  berechnet

In weiterer Folge werden die erlangten Ergebnisse den Bemessungsgrundlagen der europäischen Normen (EN) gegenübergestellt. Zusätzlich werden bereits durchgeführte Berechnungsergebnisse von vorhergehenden Versuchsreihen (Kettler et. al (2017), [22]) in den Diagrammen dargestellt. Diese Berechnungen beziehen sich auf geometrische Imperfektionen des Winkelprofils mit einer Vorkrümmung von  $e_0 = L_{\text{System}}/300$ .

In Diagramm 5-1 werden die Ergebnisse der Testreihe E mit L120x12 Querschnitt den normativen Bemessungsgrundlagen gegenübergestellt. Die Winkel wurden mit zwei Schrauben je Verbindung befestigt und als Lagerungsbedingung wurde BC1 (eingespannt) verwendet. Es ist deutlich erkennbar, dass die Testresultate sehr gut mit den numerischen Berechnungsergebnissen übereinstimmen. Weiters kann festgestellt werden, dass die nach den Normen ermittelten Werte ab einem Schlankheitsgrad von  $\bar{\lambda}_y \geq 1.0$  stets konservative Werte liefern. Für kleinere Schlankheitsgrade werden die Bemessungsgrundlagen etwas überbewertet.

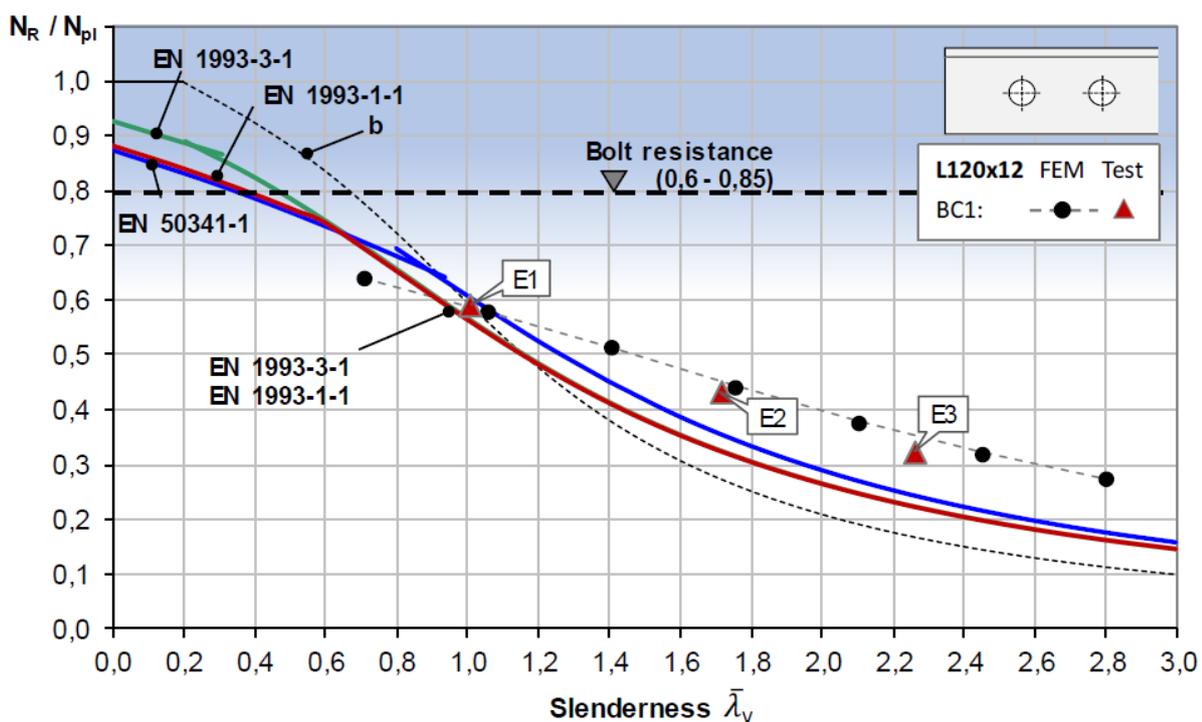


Diagramm 5-1: Gegenüberstellung der 120x12 Versuche mit den Bemessungsgrundlagen der EN mit zwei Schrauben je Anschluss und eingespannter Lagerung (BC1), [1]

In weiterer Folge werden in Diagramm 5-2 die 11 Versuche mit L80x8 Querschnitt und je zwei Schrauben pro Verbindung den Bemessungsgrundlagen gegenübergestellt. Hierbei wurden alle drei Lagerungsbedingungen berücksichtigt. Die Resultate mit den Lagerungsbedingungen BC1 (eingespannt) und BC2 (Scharnier) weisen eine gute Übereinstimmung mit den FE-Berechnungen auf. Bei BC3 (gelenkig) ergeben sich etwas höhere Traglasten im Versuch, als bei den FE-Berechnungen, speziell bei geringeren Schlankheiten. Interessanterweise sind die Versuchsergebnisse mit BC3 (gelenkig) sogar höher als jene von BC2 (Scharnier). Dies begründet sich, wie in Anhang A näher erwähnt wird, durch die verwendeten sphärischen Druckplatten (siehe Abb. 2-14), welche zwar um alle Achsen mehr oder weniger frei verdrehbar sind, jedoch eine gewisse Drehfedersteifigkeit aufweisen. Dieser Sachverhalt wurde auch anhand der numerischen Simulationen bestätigt. Da die Knicktragfähigkeit stark von Einspannungen bzw. Drehfedersteifigkeiten abhängig ist, beeinflusst diese geringe Drehfedersteifigkeit die Tragfähigkeit des Winkelprofils signifikant. Dadurch kann auch argumentiert werden, dass die numerischen FE-Ergebnisse mit BC3 (gelenkig) nur theoretische

Tragfähigkeiten darstellen. Interessanterweise sind die Tragfähigkeitsunterschiede zwischen BC1 (eingespannt) und BC2 (Scharnier) viel höher als zwischen BC2 (Scharnier) und BC3 (gelenkig). Damit ist nachweislich klar, dass die Lagerungsbedingung einen signifikanten Einfluss auf die Drucktragfähigkeit des Winkels hat.

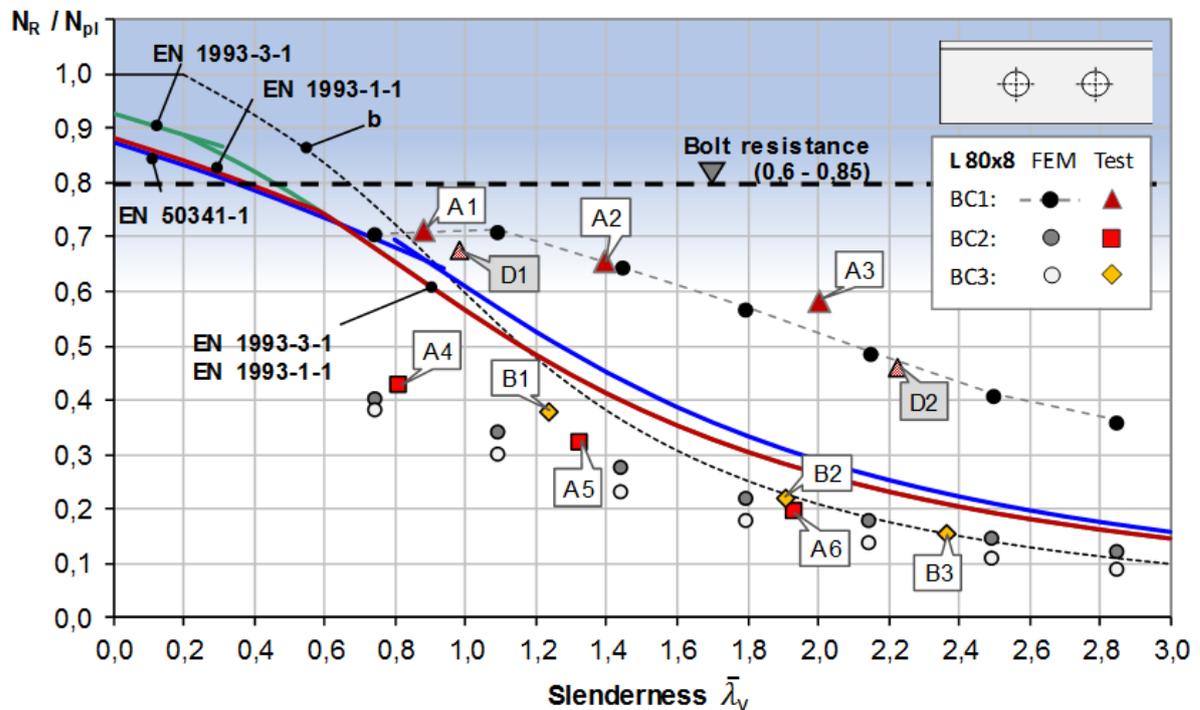


Diagramm 5-2: Gegenüberstellung der 80x8 Versuche mit den Bemessungsgrundlagen der EN mit zwei Schrauben je Anschluss und verschiedenen Lagerungsbedingungen, [1]

Diagramm 5-3 beinhaltet die restliche Versuchsreihe, bestehend aus 13 Versuchen mit L80x8 Querschnitt. Die Winkel wurden mit nur einer Schraube je Verbindung verschraubt und es wurden alle drei Lagerungsbedingungen getestet. Auch hier ist deutlich ersichtlich, dass die Versuche mit BC3 (gelenkig) höhere Tragfähigkeiten aufweisen als jene mit BC2 (Scharnier). Die Tragfähigkeiten zwischen BC1 (eingespannt) und BC2 (Scharnier) weisen auch hier deutlich größere Differenzen auf, als jene Versuche zwischen BC2 (Scharnier) und BC3 (gelenkig). Weiteres kann bestätigt werden, dass, speziell bei gedrunenem Winkelprofil mit geringer Länge (siehe Diagramm 5-3, D5-D8), die Tragfähigkeit von dessen plastischer Querschnittstragfähigkeit (siehe Tabelle. 5-1) abhängig ist und nicht direkt von dessen Schlankheit (Kettler et al (2017), [22]). Die Versuchsreihe mit BC2 (Scharnier) weist eine gute Übereinstimmung mit dessen FE-Berechnungen auf. Die Ergebnisse der Versuche mit Lagerungsbedingung BC1 (eingespannt) weisen deutliche Unterschiede der Tragfähigkeit zu dessen FE-Ergebnissen auf. Dieser Sachverhalt lässt sich folgendermaßen begründen: Der Reibungskoeffizient zwischen Anschlussblech und Winkel wurde bei den FE-Berechnungen in [22] mit  $\mu=0.25$  festgelegt. In der Realität ist der tatsächliche Reibungskoeffizient jedoch nicht bekannt und bereits geringe Abweichungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Winkels, speziell bei Verbindungen mit nur einer Schraube. Weiters war es aufgrund von Konvergenzproblemen bei der Simulation nicht möglich, ein plastisches Materialverhalten im Bereich der Schraube zu implementieren. Daher ist das Material als linear elastisch definiert, was dazu führt, dass speziell bei Verbindungen mit nur einer Schraube, höhere Steifigkeiten im Verbindungsbereich auftreten. Anfangs wurde angenommen, dass dieser Effekt keinen besonderen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat, die Experimente jedoch beweisen den signifikanten Unterschied in der Tragfähigkeit. Vergleicht man die

Diagramme miteinander, wird sichtbar, dass der Einfluss der Lagerungsbedingungen bei Verbindungen mit zwei Schrauben größer ist, als bei jenen mit lediglich einer Schraube. Jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse der Lagerungsbedingungen BC2 (Scharnier) und BC3 (gelenkig) bei Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen kaum.

Grundsätzlich wurden alle Schraubverbindungen vorgespannt. Lediglich die grau hinterlegten Versuche (D1-D4) wurden nur „handfest“ angezogen, um die Gewichtung der Vorspannung auf die Tragfähigkeit zu verdeutlichen. Die Vorspannungen der Schrauben erhöhen zwar die Drucktragfähigkeit, jedoch haben die Lagerungsbedingungen einen deutlich größeren Einfluss darauf.

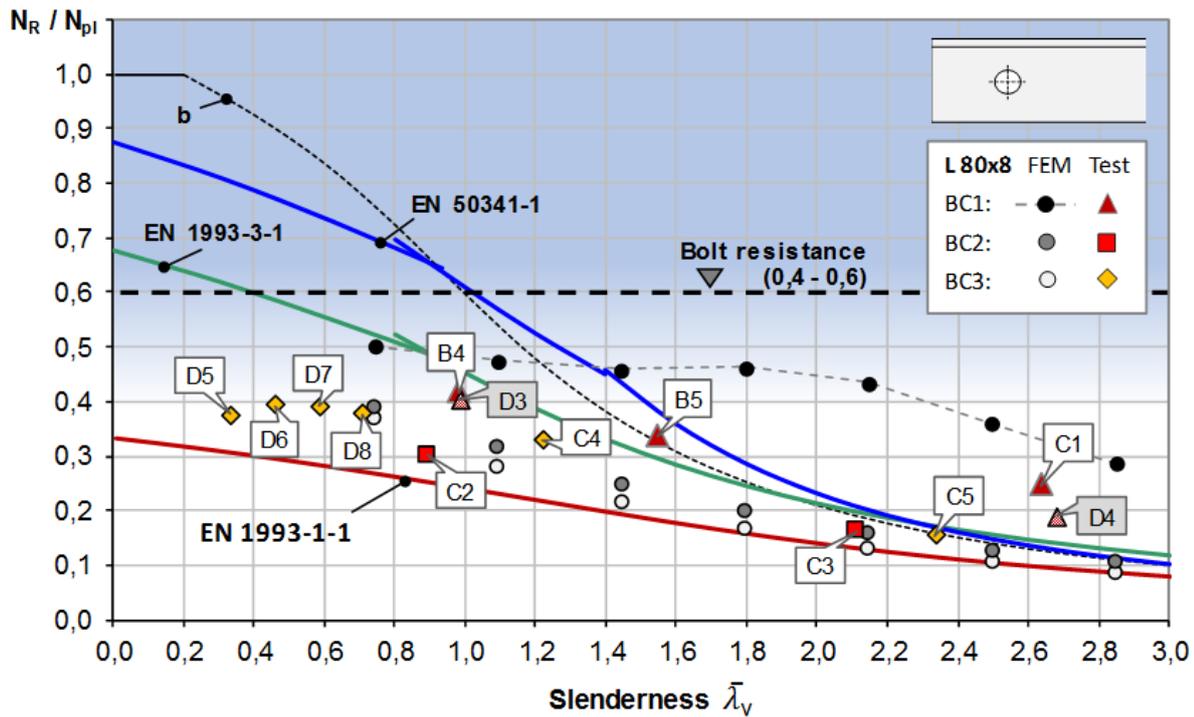


Diagramm 5-3: Gegenüberstellung der 80x8 Versuche mit den Bemessungsgrundlagen der EN mit einer Schraube je Anschluss und verschiedenen Lagerungsbedingungen, [1]

## 6 Ausblick

Die Resultate dieser Versuchsreihe in Bezug auf die Drucktragfähigkeit von geschraubten Winkelprofilen mit unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen ergeben folgende Schlussfolgerung:

- Die Knicktragfähigkeit eines Winkels unterscheidet sich bei Verwendung von Lagerungsbedingung BC2 (Scharnier) oder BC3 (gelenkig) und ein oder zwei Schrauben je Verbindung kaum.
- Der bereits bekannte Unterschied in der Drucktragfähigkeit zwischen Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen konnte nur bei eingespannter Lagerung (BC1) bestätigt werden.
- Generell weisen die Winkelprofile bei eingespannter Lagerung (BC1) eine deutlich höhere Drucktragfähigkeit auf, als bei Scharnier (BC2) oder gelenkiger (BC3) Lagerung.
- Eine weiterführende Parameterstudie mit den gängigsten Längen bzw. tatsächlichen Lagerungsbedingungen der Winkelprofile wird bereits durchgeführt. Mittels der in dieser Arbeit erlangten experimentellen Erkenntnisse und der aktuellen Parameterstudie sollen dann realitätsnahe Drehfedersteifigkeiten für baupraktische Ausführungsdetails und zugehörige Drucktragfähigkeiten für stählerne geschraubte Winkelprofile bereitgestellt werden.



## 7 Anhang A

Bei den Versuchen mit Lagerungsbedingung BC3 (gelenkig) konnten teilweise erhebliche Traglastdifferenzen zwischen den FE-Berechnungen mit vollkommenen Gelenken an beiden Stabenden und den Laborversuchen festgestellt werden. Dieser Sachverhalt lässt sich durch die nicht vollkommen frei beweglichen sphärischen Druckplatten (siehe Abb. 2-14) erklären. Die Druckplatten weisen einen minimalen Reibungswiderstand auf, der die Traglast jedoch signifikant beeinflusst. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen und in den FE-Berechnungen erfassen zu können, wurde eine Parameterstudie mit unterschiedlichen Drehfedersteifigkeiten durchgeführt und folgende zutreffende Werte ermittelt bzw. in den FE-Modellen implementiert:

Tabelle. 7-1: Federsteifigkeiten für die sphärische Druckplatte in der FE-Berechnung

<b>Drehfedersteifigkeiten</b>				
Winkeltyp	$N_{\max, \text{Labor}}$	Drehfedersteifigkeit	$N_{\max, \text{ohne Feder}}$	$N_{\max, \text{mit Feder}}$
Versuchsbez. [-]	[kN]	[Nmm/rad]	[kN]	[kN]
1B	148	2,21E+07	123	140
2B	86	1,29E+07	73	85
3B	61	9,10E+06	53	62
4C	131	1,95E+07	114	139
5C	63	9,33E+06	56	65
5D	143	2,14E+07	124	146
6D	152	2,26E+07	126	155
7D	149	2,22E+07	125	153
8D	145	2,16E+07	123	151

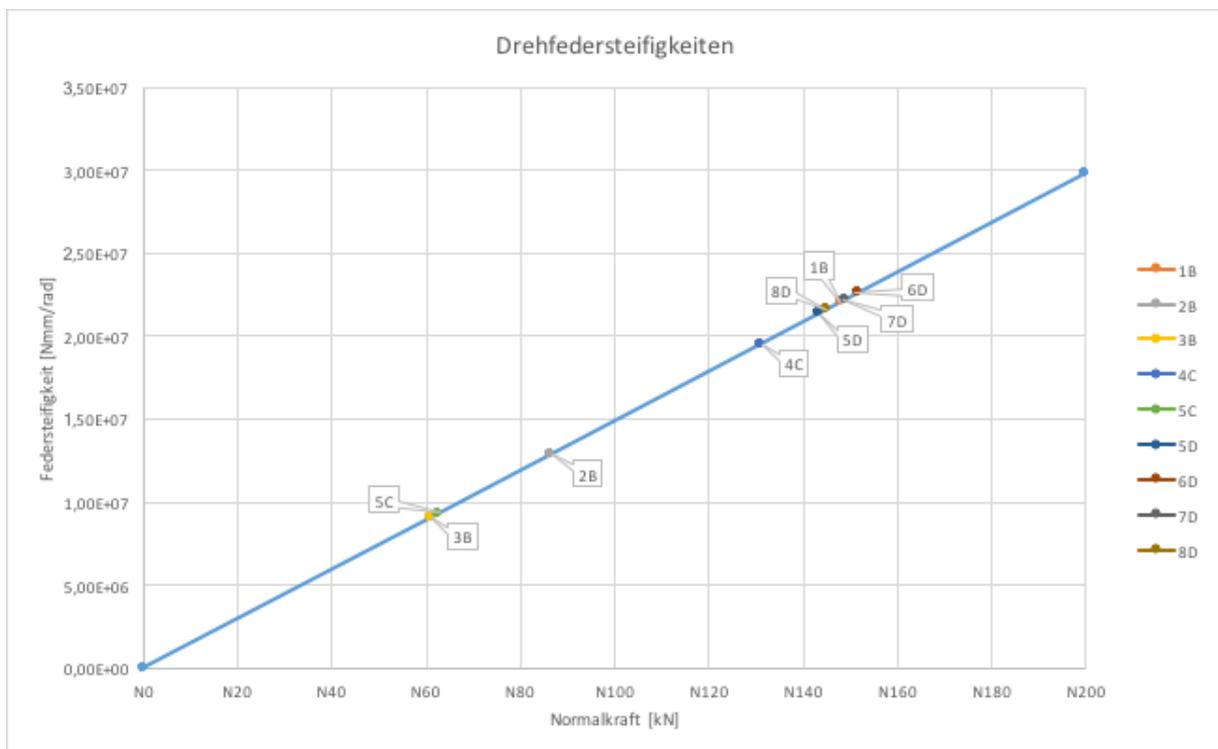


Diagramm 7-1: Drehfedersteifigkeiten zur Erfassung der Reibungswirkung in der sphärischen Druckplatte im FE-Modell



## 8 Anhang B

Bei den meisten Versuchen wurde während der Durchführung auch diverse Messungen vorgenommen. Es wurde versucht die Verformungen während der Belastung, im Speziellen bei Erreichen des Traglastmaximums, möglichst genau zu ermitteln. Im Wesentlichen wurde die Verformung der Anschlussplatten gemessen, bei manchen Winkelprofilen aber auch die Krümmung. Aufgrund der Geometrie der unterschiedlichen Winkelprofile war eine Messung an der oberen Anschlussplatte manchmal nicht möglich. Die Messungen stellen aufgrund der raschen Durchführung, da die Versuche während den Messungen nicht unterbrochen wurden, nur Richtwerte dar. Die Messungen wurden nach folgendem Schema durchgeführt:

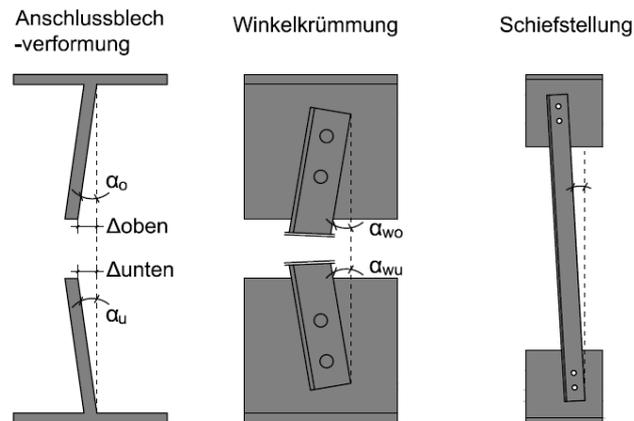


Abb. 8-1: Legende für Messvorgänge zur zusätzlichen Verformungsmessung

Tabelle. 8-1: Tabellarische Darstellung der gemessenen zusätzlichen Verformungen während der Versuchsdurchführung

Messungen bei Versuchsdurchführung							Anmerkungen
Profilkennung	Traglast	Lagerungstyp	Verformungen bei Traglast <sup>1</sup>				
[-]	[kN]	[-]	$\alpha_o$ [°]	$\Delta_{oben}$ [mm]	$\alpha_u$ [°]	$\Delta_{unten}$ [mm]	
1A	261	BC1	1.0	3.0	0.0	0.0	bei 207kN: $\Delta_{oben}$ =3.6mm, $\Delta_{unten}$ =3.5mm; nach Belastung: $\Delta_{oben}$ =3.0mm, $\Delta_{unten}$ =0
2A	239	BC1	-	4.5	-	3.0	
3A	215	BC1	-	-	-	2.0	
4A	157	BC2	2.0	9.0	2.5	10.0	
5A	118	BC2	4.0	16.0	2.0	11.0	
6A	72	BC2	-	14.0	-	14.0	
1B	148	BC3	-	-	-	-	Schiefstellung des Winkels vor Versuch ~ 4.5mm (mit Laserlot gemessen)
2B	86	BC3	-	-	-	-	
3B	61	BC3	-	12.0	-	12.0	
4B	163	BC1	-	-	-	-	
5B	132	BC1	-	-	-	-	
1C	98	BC1	-	-	-	-	bei 110kN: $\alpha_o$ =2°/ $\Delta_{oben}$ =11mm, $\alpha_u$ =3°/ $\Delta_{unten}$ 9mm; bei 115kN: $\alpha_o$ =2°/ $\Delta_{oben}$ 11mm, $\alpha_u$ =3°/ $\Delta_{unten}$ 13mm
2C	121	BC2	5.0	17.0	5.0	17.0	
3C	66	BC2	-	17.0	-	17.0	
4C	131	BC3	-	-	-	-	
5C	63	BC3	-	15.0	-	15.0	
1D	260	BC1	1.0	2.5	1.0	-	Winkelkrümmung $\alpha_{wo}$ =6°, $\alpha_{wu}$ =5.5°
2D	177	BC1	-	0.0	-	0.0	
3D	155	BC1	-	-	-	-	
4D	73	BC1	-	0.0	-	0.0	
5D	145	BC3	1.5	18.0	3.5	20.0	
6D	151	BC3	1.0	13.0	2.0	13.0	
7D	149	BC3	2.0	19.0	3.0	15.0	
8D	145	BC3	-	25.0	-	16.0	
1E	488	BC1	2.0	6.1	1.5	5.9	bei 400kN: $\Delta_{oben}$ =3.4mm, $\Delta_{unten}$ =3.7mm; nach Belastung: $\Delta_{oben}$ =7.5mm, $\Delta_{unten}$ =8.5
2E	357	BC1	-	-	-	-	
3E	267	BC1	-	-	2.5	-	

1. Anm.: Die Verformungen wurden am Anschlussblech bzw. T-Stück mittels Zollstock bzw. Neigungsmesser ermittelt.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Kettler, M., Lichtl, G., Unterweger, H., "Tests on bolted steel angles in compression with varying end support conditions." In Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, 2018
- [2] Unterweger, H., „Stahlbau GL“, Institut für Stahlbau Technische Universität Graz, 2011
- [3] EN 1993-1-1. "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings." CEN, Brussels, 2005.
- [4] EN 1993-1-8. "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints." CEN, Brussels, 2005.
- [5] EN 1993-3-1. "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts". CEN, Brussels, 2006.
- [6] EN ISO 6892-1; Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, 2009
- [7] EN 1090-2; Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken, 2017
- [8] EN 50341-1. "Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 1: General requirements – Common specifications". CENELEC, 2001.
- [9] AISC 360-16. "Specification for Structural Steel Buildings." ANSI, Chicago, 2016.
- [10] CSA S16-14. "Design of steel structures." CSA Group, Toronto, 2014
- [11] C.I.G.R.E. (1974). Study Committee No. 22, Test report. "Buckling tests on crossed diagonals in lattice towers", Electra Cigré/No. 38.
- [12] ECCS (1985). TC8 Stability, "Recommendations for angles in lattice transmission towers." No 39.
- [13] Adluri, S.M.R., Madugula, M.K.S. (1996). "Flexural buckling of steel angles – Experimental Investigation." Journal of Structural Engineering, 122 (3), 309-317.
- [14] Haidar, R. (1996). "Compressive strength of steel single angles loaded through two-bolts in one leg." Master thesis, University of Windsor.
- [15] Schneider, R.W. (2003). "Beitrag zur Bemessung von druckbeanspruchten Einzelwinkeln unter Berücksichtigung der Anschlüsseigenschaften." PhD thesis, RWTH Aachen, Shaker Verlag (No. 48).
- [16] Reininghaus, M., Skottke, M. (2005). "Druckbeanspruchte Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Anschluß." Stahlbau 74 (7), 534-538.
- [17] ECCS (1976). TC8 Stability, "Manual on stability of steel structures." No 22.
- [18] Ban, H., Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. (2012). "Residual stress tests of high-strength steel equal angles." Journal of Structural Engineering, 138 (12), 1446-1454.
- [19] Moze, P., Cajot, L.-G., Sinur, F., Rejec, K., Beg, D. (2014) "Residual stress distribution of large steel equal leg angles." Engineering Structures, 71, 35-47.
- [20] Schafer, B.W. (2008). „Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design." Journal of Constructional Steel Research, 64, 766-778.
- [21] Dinis, P.B., Camotim, D., Vieira, L. (2017), "DSM design approach for hot rolled steel angle columns." Proceedings of Eurosteel 2017, 3781-3790. doi:10.1002/cepa.434.
- [22] Kettler, M., Taras, A., Unterweger, H. (2017). "Member capacity of bolted steel angles in compression: Influence of realistic end supports." Journal of constructional steel research, 130, 22-35.
- [23] Shani, M.A. (1998). „Compressive strength of eccentrically loaded steel angles." Master thesis, University of Windsor.

Dies ist eine Veröffentlichung des

## **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte  
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl