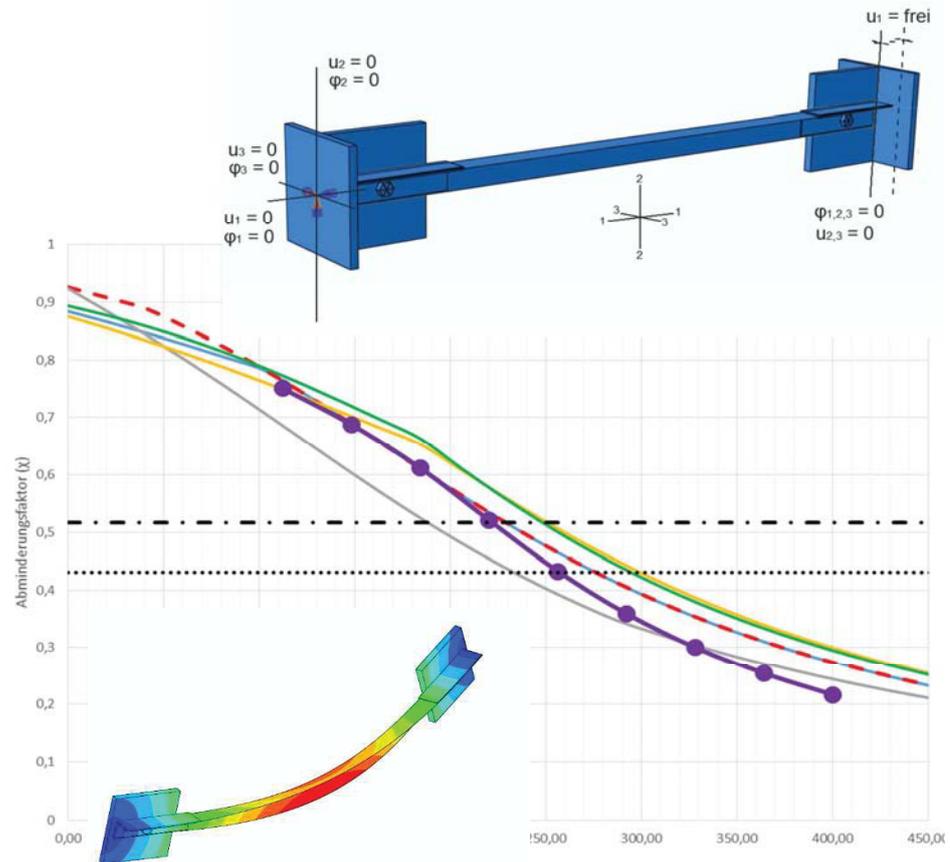


Studie zur Knicktragfähigkeit von Winkelprofilen mit exzentrischen Ein- und Zweischraubenverbindungen



D-5-51/ 2015

Lampl Markus
 Institut für Stahlbau
 Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

Studie zur Knicktragfähigkeit von Winkelprofilen mit exzentrischen Ein- und Zweischaubenverbindungen

von

Markus Lampl

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (Msc) bzw. Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Technische Universität Graz

Graz, im Mai 2015

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Harald Unterweger
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras

Deutsche Fassung: Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008 Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz,

.....

Lampl Markus

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

Lampl Markus

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern Sabine und Hannes für die Unterstützung sowie das Vertrauen bedanken, dass sie mir während der gesamten Studienzeit entgegengebracht haben, wie auch bei meiner Schwester Bettina und meinen Großeltern Gudrun und Franz Wiltsche sowie Veronika Lampl. Herzlichen Dank!

Ein großer Dank gilt auch dem Institut für Stahlbau mit seinem Vorstand Herrn Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Harald Unterweger für die Möglichkeit, die vorliegende Masterarbeit auf diesem Institut bearbeiten zu dürfen. Dabei möchte ich mich speziell bei meinem Betreuer Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras für die tolle Unterstützung sowie für die permanente Betreuung bedanken.

Natürlich möchte ich mich auch bei all meinen langjährigen Freunden aus Murau bedanken, die mich durch die Studienzeit begleitet haben, sowie bei all meinen, im Zuge des Studiums, neu gewonnenen Freunden wobei dabei vor allem die Supergruppe zu erwähnen ist. Danke für die lässige und abwechslungsreiche Zeit in Graz.

Zum Abschluss möchte ich mich noch bei all denjenigen Personen bedanken, welche mich beim Abschluss des Studiums in irgendeiner Form unterstützt haben, aber hier nicht erwähnt werden.

Buckling load capacity of angle sections with different connection types

Abstract

In constructional steelwork, angle sections are often used for frameworks as diagonal braces. In the majority of the cases the connection with the gusset plate is realized with a bolted or a welded joint at one angle leg only. As a consequence additional bending moments appear. This type of connection is used very often, because it's very simple to mount and quit inexpensive.

In technical standards there exist many different design concepts for eccentric connected angle sections. The resulting ultimate load from the respective standards is partially very different.

The present master thesis deals with eccentric connected angle sections with one or two bolts at each member end. The investigations are carried out either with pinned or fixed bearings of the gusset plate. For the numerical calculations the Finite Element program Abaqus [9] is used. For the adjustment and verification of the FE- models, comparisons with numerical calculations and real tests, presented in the literature, are performed. These tests and according numerical calculations were done for welded joints and joints with two bolts Furthermore the special case of a centrally loaded angle section is also studied.

Subsequently investigations of eccentric connected angle sections with one or two bolts and different connection configurations are made. The results of the numerical simulations are compared with the results based on the calculations according to the different standards EN 1993-1-1, EN 1993-3-1, DIN 18800-2, EN 50341-1 and ECCS-Recommendations No. 39. Therefore it was necessary to show the differences or the similarities of the regarded design concepts.

The aim of the master thesis is, to show the deviations between the results of the numerical simulations and the calculations based on the technical standards for different connection configurations. In some cases suggestions are given for an adjustment of the design concepts.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	EINFÜHRUNG	1
1.2	INHALTSÜBERSICHT DIESER ARBEIT	3
2	BEMESSUNGSREGELN AKTUELLER NORMENWERKE.....	4
2.1	ALLGEMEIN	4
2.2	STABILITÄTSNACHWEIS EINES ZENTRISCH ANGESCHLOSSENEN WINKELS NACH EN 1993-1-1	5
2.3	WINKELPROFIL MIT BEIDSEITS ZWEI-SCHRAUBEN-VERBINDUNGEN	8
2.3.1	<i>Bemessungsgrundlagen für Zwei-Schrauben-Verbindungen</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Vergleich der Tragfähigkeiten nach den einzelnen Normen</i>	<i>12</i>
2.4	WINKELPROFIL MIT BEIDSEITS EIN- SCHRAUBEN- VERBINDUNGEN	14
2.4.1	<i>Bemessungsgrundlagen für Ein-Schrauben-Verbindungen</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Annahmen für die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung</i>	<i>16</i>
2.4.3	<i>Vergleich der Tragfähigkeiten nach Normen</i>	<i>18</i>
3	METHODIK – FEM-MODELLIERUNG UND TRAGLASTERMITTLUNG MIT ABAQUS.....	20
3.1	ALLGEMEIN	20
3.2	MODELLBILDUNG- ALLGEMEIN	20
3.3	MODELLIERUNG DER WINKELPROFILE	22
3.4	MODELLIERUNG DES ANSCHLUSSES	24
4	FEM- TRAGLASTEN FÜR DEN ZENTRISCH GEDRÜCKTEN EINZELWINKEL.....	28
4.1	ALLGEMEIN	28
4.2	LINEARE- BEUL- ANALYSE (BESTIMMUNG DER 1. EIGENFORM)	29
4.3	GEOMETRISCHE ERSATZIMPERFEKTIONEN	30
4.4	GMNIA ERGEBNISSE MIT VERSCHIEDENEN IMPERFEKTIONS- ANNAHMEN	32
4.5	ZUSAMMENFASSUNG- WINKEL UNTER ZENTRISCHER DRUCKBELASTUNG	33
5	FEM- NACHRECHNUNG PUBLIZIERTER VERSUCHE.....	34
5.1	ALLGEMEIN	34
5.2	VERSUCHSKONFIGURATION	35
5.3	KALIBRIERUNG DER FE-MODELLE ZU DEN VERSUCHEN	38
5.3.1	<i>FEM-Nachrechnung von Versuch Nr. 7 mit beidseitigen Schraubanschluss.....</i>	<i>39</i>
5.3.2	<i>FEM- Nachrechnung von Versuch Nr. 27 mit geschweißten Anschluss.....</i>	<i>42</i>
5.3.3	<i>Zusammenfassung</i>	<i>44</i>
5.4	VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER GEOM. ERSATZIMPERFEKTIONEN	44
6	NUMERISCH ERMITTELTE KNICKSPANNUNGSKURVEN FÜR ZWEI-SCHRAUBEN-ANSCHLÜSSE	47

6.1	ALLGEMEIN	47
6.2	ANSCHLUSS MIT STARRER STIRNPLATTE	48
6.2.1	<i>Zutreffendes FEM- Modell</i>	48
6.2.2	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L60x6</i>	50
6.2.3	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L80x8</i>	53
6.2.4	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L120x12</i>	59
6.2.5	<i>Zusammenfassung– Zwei-Schrauben-Anschluss mit starrer Stirnplatte</i>	64
6.3	ANSCHLUSS MIT GELENKIGER STIRNPLATTE	65
6.3.1	<i>Zutreffendes FEM- Modell</i>	65
6.3.2	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L60x6</i>	67
6.3.3	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L80x8</i>	69
6.3.4	<i>Ergebnisse für Winkelprofil 120x12</i>	71
6.3.5	<i>Zusammenfassung- Zwei-Schrauben-Anschluss mit gelenkiger Stirnplatte</i>	73
7	NUMERISCHE KNICKSPANNUNGSKURVEN FÜR EIN-SCHRAUBEN-ANSCHLÜSSE	75
7.1	ALLGEMEIN	75
7.2	ANSCHLUSS MIT STARRER STIRNPLATTE	76
7.2.1	<i>Zutreffendes FEM- Modell</i>	76
7.2.2	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L80x8</i>	78
7.3	ANSCHLUSS MIT GELENKIGER STIRNPLATTE	81
7.3.1	<i>Zutreffendes FEM- Modell</i>	81
7.3.2	<i>Ergebnisse für Winkelprofil L80x8</i>	83
7.4	ZUSAMMENFASSUNG- EIN-SCHRAUBEN-ANSCHLUSS	85
8	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	86
8.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	86
8.2	SCHLUSSFOLGERUNGEN	87
9	QUELLENVERZEICHNIS.....	88
9.1	LITERATUR / NORMEN	88
9.2	SOFTWARE	88
9.3	ABBILDUNGEN.....	88

1

1 Einleitung

1.1 Einführung

Winkelprofile werden im Stahlbau und dort insbesondere im Mastbau oft als Streben und Füllstäbe bei fachwerkartigen Konstruktionen verwendet. Dabei wird meistens nur ein Schenkel mit einer Schraubenverbindung oder mit einer Schweißverbindung an ein Knotenblech angeschlossen [1], was einer exzentrischen Lagerung des Einzelwinkels entspricht. Der Grund dafür ist, dass es sich dabei um eine sehr einfache und wirtschaftlich günstige Form der Anschlussausbildung handelt.

Für exzentrisch angeschlossene Winkelprofile liegen in den einschlägigen Normen verschiedene Bemessungskonzepte vor, welche teilweise erheblich unterschiedliche Traglasten ergeben.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit exzentrisch angeschlossenen Einzelwinkeln mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen, wobei jeweils die Grenzfälle einer gelenkigen Lagerung, sowie einer biegesteifen Lagerung untersucht wurden. In dieser Arbeit werden nur gleichschenkelige Winkelprofile untersucht. Die numerischen Berechnungen erfolgten mithilfe des Finiten-Elemente Programmes Abaqus [9]. Zur Abstimmung und Verifizierung der Modelle wurden im Vorhinein Vergleiche mit den numerischen Simulationen und den Bauteilversuchen aus [7] an exzentrisch gedrückten Einzelwinkelstäben mit Zwei-Schrauben-Verbindungen, sowie Schweißverbindungen an einem Winkelschenkel angestellt. Des Weiteren wurde der Sonderfall eines zentrisch gedrückten Einzelwinkels betrachtet.



Abb. 1-1 Beispiel für die Anwendung von Winkelprofilen im Mastbau aus [11]

Im Anschluss erfolgte die Untersuchung von exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen mit unterschiedlichen Anschlusskonfigurationen. Den Resultaten der numerischen Simulationen wurden die Ergebnisse auf Basis der Normen EN 1993-1-1[2], EN 1993-3-1[4], DIN 18800-2[3], EN 50341-1[5], sowie der ECCS-Richtlinie No. 39[6] gegenübergestellt. Dafür mussten im ersten Schritt die Nachweiskonzepte der Normen näher beleuchtet werden, um die Unterschiede bzw. Parallelen der jeweiligen Bemessungsregelungen aufzeigen zu können.

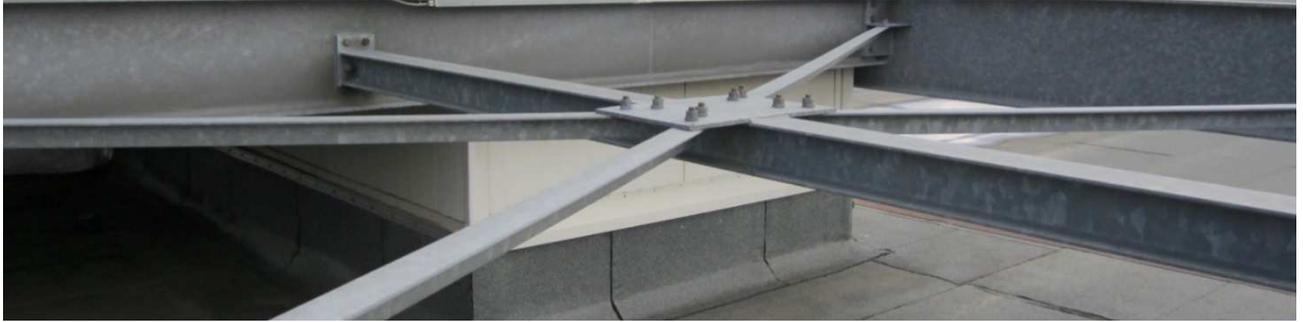


Abb. 1-2 Beispiel für Winkelprofile mit Zwei-Schrauben-Verbindungen (Quelle: Haslinger Stahlbau GmbH)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für unterschiedliche Anschlusskonfigurationen, die Abweichungen der Resultate aus den numerischen Berechnungen zu den Ergebnissen gemäß den betrachteten Normen aufzuzeigen und in gewissen Fällen Möglichkeiten für eine Anpassung der Normenregelungen anzuführen.

1.2 Inhaltsübersicht dieser Arbeit

- Abschnitt 2- Bemessungsregeln aktueller Normenwerke
In diesem Kapitel wird auf die aktuell gültigen Normenregelungen eingegangen. Hierfür wird im Abschnitt 2.2 der Stabilitätsnachweis eines zentrisch angeschlossenen Winkels auf Basis der „Stahlbau- Grundnorm“ EN 1993-1-1[2] betrachtet. In den Abschnitten 2.3 und 2.4 erfolgt der Vergleich der Nachweiskonzepte entsprechend den Normen EN 1993-1-1[2], DIN 18800-2[3], EN 1993-3-1[4], EN 50641-1[5], ECCS Richtlinie No. 39[6] für Winkelprofile mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen.
- Abschnitt 3- Methodik –FE-Modellierung mit Abaqus
Im Kapitel 3 „Methodik –FE-Modellierung mit Abaqus“ wird die numerische Modellierung der untersuchten Systeme genauer erläutert.
- Abschnitt 4- Zentrisch gedrückte Einzelwinkel
Im Kapitel 4 werden numerische Simulationen an zentrisch gedrückten Winkelprofilen mit unterschiedlichen Vorkrümmungen durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse werden der Knickspannungslinie b gegenübergestellt.
- Abschnitt 5- Nachrechnung publizierter Versuche
Zur Verifizierung der FE-Modelle, welche für die durchzuführenden Traglastberechnungen an exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen zur Verwendung kommen sollen, werden in diesem Abschnitt Vergleiche mit den numerischen Berechnungen sowie Versuchen aus [7] angestellt.
- Abschnitt 6- Numerische Knickspannungskurven für Zwei-Schrauben-Anschlüsse
Im Kapitel 6 werden numerische Simulationen an exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen mit Zwei-Schrauben-Verbindungen durchgeführt und die Resultate werden den Ergebnissen aus den betrachteten Normen gegenübergestellt. Die Modellierung des Anschlusses erfolgte einerseits mit starrer Stirnplatte, was den Fall einer Einspannwirkung für den Winkel darstellt. Andererseits wurde als Grenzfall ein gelenkiger Anschluss nachgebildet.
- Abschnitt 7- Numerische Knickspannungskurven für Ein-Schrauben-Anschlüsse
Im Kapitel 7 werden exzentrisch angeschlossene Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Verbindungen betrachtet. Die Resultate aus den numerischen Simulationen werden den Ergebnissen auf Basis der betrachteten Normen gegenübergestellt.

2

2 Bemessungsregeln aktueller Normenwerke

2.1 Allgemein

Die Betrachtung der gängigen Bemessungsregelungen für exzentrisch angeschlossene Winkelprofile orientierte sich an der zusammenfassenden Darstellung verschiedener Bemessungsregeln in [1], wobei für die Gegenüberstellung der Normen neue Berechnungen durchgeführt werden.

Für die Bemessung von exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen existieren etliche Normen, bei denen sich jedoch die anzuwendenden Nachweiskonzepte teilweise voneinander unterscheiden. Prinzipiell kann man sagen, dass jene Normen, welche allgemein für den Hochbau gültig sind (EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3]) zum Teil deutlich geringere Tragfähigkeiten ergeben, als jene, welche sich mit Freileitungsmaste (EN 50341-1[5] und ECCS-Richtlinie No. 39[6]) beschäftigen [1]. Grund dafür ist, dass Freileitungsmaste relativ einheitliche Ausführungen aufweisen, sodass sie anhand von Versuchen ausführlich untersucht werden konnten. Die Versuche beinhalten zusätzliche Tragfähigkeitsreserven, die in den theoretischen Modellen fehlen.

In allen betrachteten Normen wird zwischen Ein-Schrauben-, und Zwei-Schrauben-Verbindungen unterschieden. Dies deshalb, da durch die zweite Schraube eine bessere Lasteinleitung ermöglicht wird und auch eine gewisse Einspannwirkung des Stabendes an der weiterführenden Konstruktion vorhanden ist.

Für Winkelprofile mit Zwei-Schrauben-Verbindungen ist trotz Anschluss nur eines Schenkels in allen betrachteten Normen ein vereinfachter Stabilitätsnachweis auf Basis eines zentrisch angeschlossenen Druckstabes vorgesehen, welcher an beiden Enden gelenkig gelagert ist [1]. Der Stabilitätsnachweis wird mittels einer effektiven Schlankheit geführt, wodurch Exzentrizität und Lagerungsbedingungen indirekt berücksichtigt werden sollen.

Für Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Verbindungen existieren nur noch in jenen Normen, welche speziell für den Mastbau gelten (EN 1993-3-1[4], Anhang G; EN 50341-1[5] und die ECCS-Richtlinie[6]) solche vereinfachten Nachweise. Diese vereinfachten Stabilitätsnachweise erfolgen wieder mit der Berücksichtigung von eigenen effektiven Schlankheiten. In den Normen, die allgemein für den Hochbau gültig sind, wird ein genauer Nachweis unter Berücksichtigung der Exzentrizitäten gefordert. In der EN 1993-1-1[2] wird explizit ein Stabnachweis nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der Anschluss exzentrizitäten und Imperfektionen verlangt [1].

2.2 Stabilitätsnachweis eines zentrisch angeschlossenen Winkels nach EN 1993-1-1

Als Grundlage für die Nachweise an exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen mit unterschiedlichen Anschlusskonfigurationen wird zu Beginn dieser Arbeit der Stabilitätsnachweis eines zentrisch angeschlossenen Winkelprofils erläutert, da dieser als Basis für die weiteren Bemessungen dient.

Für planmäßig zentrisch belastete Druckstäbe ist in der Regel folgender Nachweis gegen Biegeknicken in EN 1993-1-1[2] zu führen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (1)$$

N_{Ed} : Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft

$N_{b,Rd}$: Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit

Bei einem zentrisch beanspruchten Winkel ist immer der Knicknachweis um die Minimumsachse (v-Achse) maßgebend.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Winkelprofile werden der Querschnittsklasse 3 zugeordnet. Dies bedeutet, dass kein lokales Beulen auftritt und der elastische Querschnittswiderstand ausnutzbar ist. Für die Querschnittsklassen 1- 3 ergibt sich der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit mit:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} \quad (2)$$

Der Abminderungsfaktor χ ist aus folgender Formel zu bestimmen:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_v^2}} \leq 1,0 \quad (3)$$

Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}$ ergibt sich mit: $\bar{\lambda}_v = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,v}}}$ (4)

wobei es sich bei $N_{cr,v}$ um die ideale Verzweigungslast für den maßgebenden Knickfall handelt. Bei einem Schlankheitsgrad von $\bar{\lambda} \leq 0,2$ darf der Knicknachweis entfallen und es ist ausschließlich ein Querschnittsnachweis zu führen.

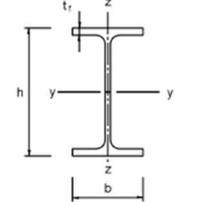
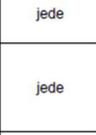
Φ ergibt sich aus: $\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$ (5)

Der Imperfektionsbeiwert α kann aus Tab. 2-1 entsprechend der zu verwendenden Knicklinie entnommen werden.

Knicklinie	a_0	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tab. 2-1 Imperfektionsbeiwerte aus [2] für jeweilige Knicklinie

Nach EN 1993-1-1[2] ist bei Winkelprofilen für Knicken um jede Achse (Hauptachsen bzw. Schenkelparallele Achsen) die Knicklinie b zu verwenden, wie die Tab. 2-2, zur Auswahl der Knicklinien für unterschiedliche Querschnitte, zeigt.

Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a a ₀	a ₀ a
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	c d	
Hohl-quer-schnitte 	warmgefertigte	jede	a	a ₀	
	kaltgefertigte	jede	c	c	
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	b	
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	c	
T- und Voll- querschnitte 		jede	c	c	
L- Querschnitte 		jede	b	b	

Tab. 2-2 Knicklinien für unterschiedliche Profiltypen aus [2]

In Abb.2-1 sind die einzelnen Knicklinien nach Gl. (3) dargestellt.

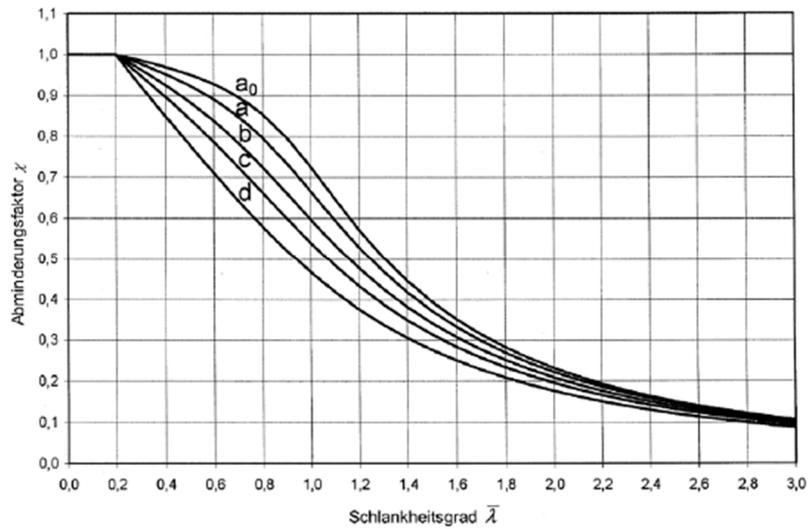


Abb.2-1 Knicklinien aus [2]

Für die Bestimmung des bezogenen Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}$ gilt:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} * \frac{1}{\lambda_1} \quad (6)$$

mit: L_{cr} Knicklänge der betrachteten Knickebene

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 * \varepsilon \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

i Trägheitsradius für die maßgebende Knickebene

f_y Fließgrenze für jeweilige Stahlsorte

In Abb. 2-2 sind die Anlageverhältnisse für gleichschenkeligen Winkel dargestellt.

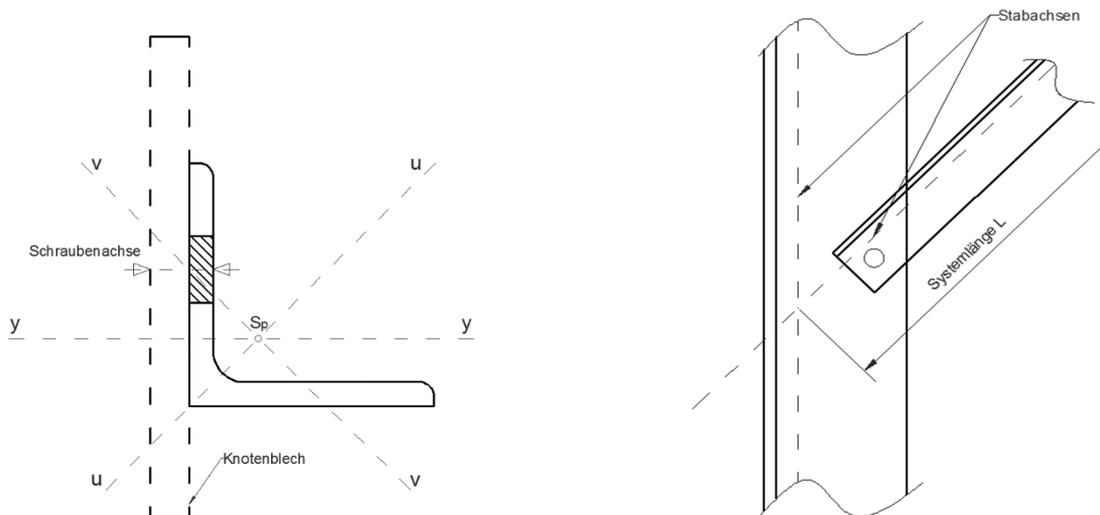


Abb. 2-2 Anlageverhältnisse bei Winkelanschlüssen (gleichschenkelige Winkel)

2.3 Winkelprofil mit beidseits Zwei-Schrauben-Verbindungen

Der erforderliche Nachweis für Winkelprofile mit Zwei-Schrauben-Verbindungen ist in allen betrachteten Normen ein Knicknachweis mit zentrischer Drucknormalkraft. Dabei sind vereinfacht zwei isolierte Knicknachweise vorgesehen. Ein Knicknachweis um die Minimumsachse v , sowie ein Knicknachweis um die Schenkelparallele y - Achse. Die einzelnen Normen unterscheiden sich jedoch in der Wahl der geeigneten Knicklinie, wie auch in den Formeln zur Berechnung der effektiven Schlankheit. Letztere kann auch als Modifikation der Knicklänge angesehen werden.

EN 1993-1-1[2], EN 1993-3-1, Anhang G[4] und EN 50341-1[5] geben die Knicklinie b an, DIN 18800-2[3] die Linie c und die ECCS-Richtlinie gibt die Linie a_0 an. Durch die Definition effektiver Schlankheiten für Knicken in der Ebene (um die y -Achse) und aus der Ebene (um die v -Achse = Minimumachse) wird die Exzentrizität bzw. der Einspannungseffekt der Anschlüsse berücksichtigt. Die Berechnung von effektiven Schlankheiten bewirkt eine Vergrößerung im kleinen Schlankheitsbereich, und eine Verkleinerung im größeren Schlankheitsbereich, gegenüber der geometrischen Schlankheit. Durch die Vergrößerung der geometrischen Schlankheit und damit Reduktion der Tragfähigkeit wird die Anschluss exzentrizität indirekt berücksichtigt. Eine Reduktion der Schlankheit im größeren Schlankheitsbereich bedeutet, dass hier der Einfluss der Einspannwirkung des Anschlusses gegenüber der Exzentrizität überwiegt.

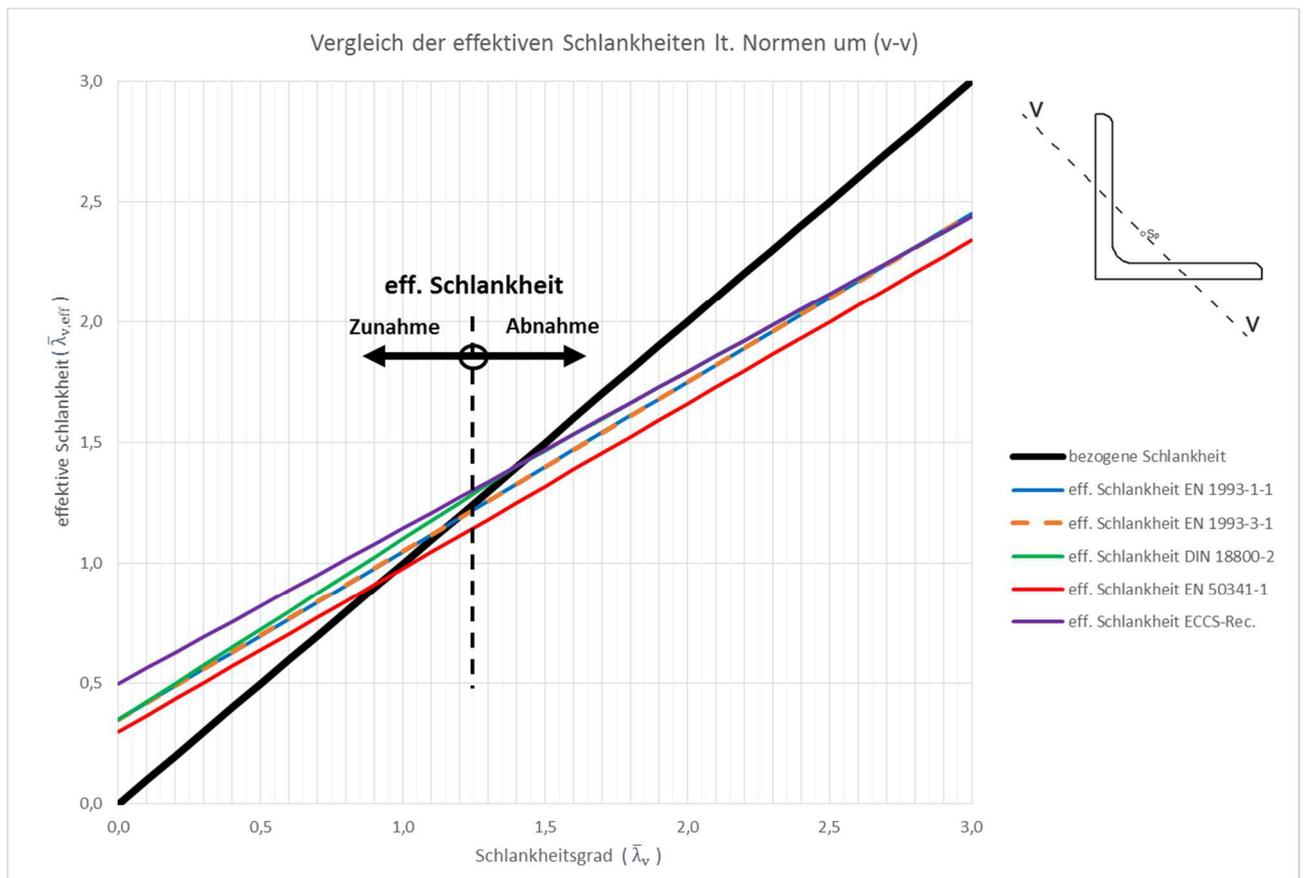


Abb. 2-3 Vergleich der effektiven Schlankheiten der einzelnen Regelwerke um die v - v Achse

Wie man in Abb. 2-3 erkennen kann, ergeben sich für die effektiven Schlankheiten lt. EN 1993-1-1[2] und EN 1993-3-1[4] die gleichen Werte. Auch die effektiven Schlankheiten lt. DIN 18800-2[3] stimmen mit den Schlankheiten lt. ECCS-Rec.[6], ab einer geometrischen Schlankheit von 1,2, exakt überein.

Der Abb. 2-4 können die effektiven Schlankheiten für Knicken parallel zu einem Schenkel, in der Ebene der Knotenbleche, entnommen werden. Es lässt sich ein ähnliches Bild wie bei den Schlankheiten um die Minimumsachse erkennen, wobei sich hier die Ergebnisse aller Normen etwas unterscheiden.

Für das Ausweichen um die y-Achse gibt es zusätzlich Unterschiede bei der Definition der zu verwendenden Knicklänge. Die DIN 18800-2[3] und EN 1993-1-1[2] geben eine Knicklänge von 90% der Systemlänge beim Ausweichen um die y-Achse an, um der Einspannung zweier hintereinanderliegenden Schrauben Rechnung zu tragen [1]. Bei den übrigen Normen entspricht die Knicklänge genau der Systemlänge.

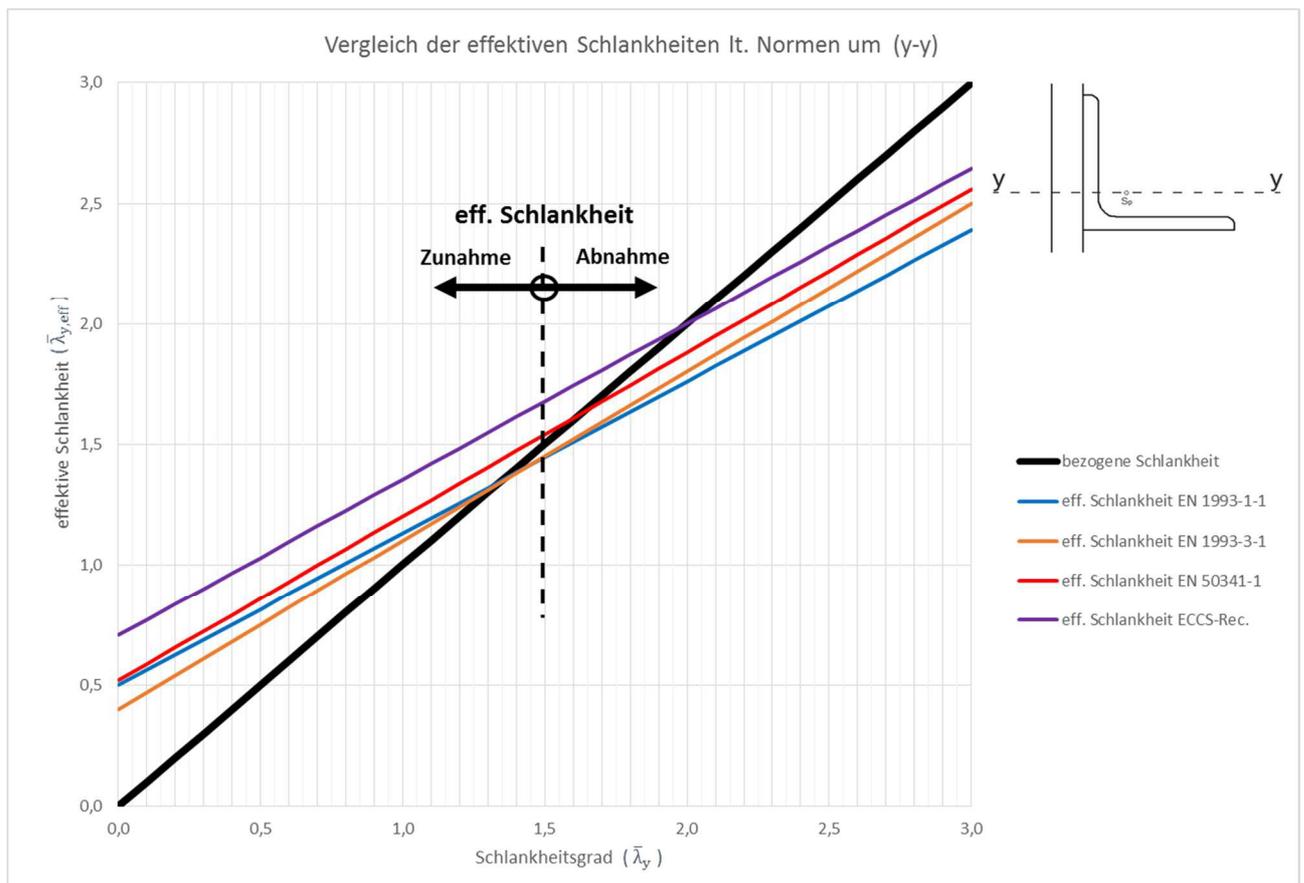


Abb. 2-4 Vergleich der effektiven Schlankheiten der einzelnen Regelwerke um die y-y Achse

Die in Abb. 2-3 und Abb. 2-4 dargestellten effektiven Schlankheiten sind in Abschnitt 2.3.1 formelmäßig angegeben.

2.3.1 Bemessungsgrundlagen für Zwei-Schrauben-Verbindungen

- nach EN 1993-1-1[2]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 0,9 * L$
Knicklinie	b	b
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,50 + 0,7 * \bar{\lambda}_y$
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-4 EN 1993-1-1[2] Knicknachweis für Winkelprofil mit Zwei-Schrauben-Verbindungen

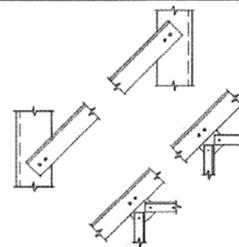
- nach EN 1993-3-1[4]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	b	b
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,40 + 0,7 * \bar{\lambda}_y$
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-5 EN 1993-3-1[4] Knicknachweis für Winkelprofil mit Zwei-Schrauben-Verbindungen

Bei der EN 1993-3-1[4], welche sich im speziellen mit der Bemessung von Türmen und Masten befasst, ist zu erwähnen, dass die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen an Winkelprofilen nur für Füllstäbe gültig sind. Ergänzend ist hier auch ein Ausschnitt der Tabelle G.2 aus [4] zur Bestimmung des Beiwertes k angeführt. Herauszuheben ist, dass die Angaben in Tab. 2-6 (Beiwert k) ident sind zu den Angaben in Tab. 2-5.

Beispiel: $\bar{\lambda}_{eff,v} = \bar{\lambda}_v * k = \bar{\lambda}_v * \left(0,7 * \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}\right) = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$

Art der Einspannung	Beispiele	Achse	k
durchlaufend an beiden Enden (d. h. Zweischraubenverbindungen oder durchlaufend an beiden Bauteilenden bzw. Zweischraubenverbindung an einem und durchlaufend am anderen Bauteilende)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}_z}$

Tab. 2-6 Bestimmung des Beiwertes k aus [4]

Auf die Bemessung von Gurtstäben, in Abhängigkeit der Ausfachungsform, wird nicht weiter eingegangen.

- nach DIN 18800-2[3]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	Kein Nachweis vorgesehen
Knicklinie	c	
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$ für $\bar{\lambda}_v < \sqrt{2}$; $\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,50 + 0,646 * \bar{\lambda}_v$ für $\bar{\lambda}_v > \sqrt{2}$;	
Knicknachweis	$N_{Ed} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	

Tab. 2-7 DIN 18800-2[3] Knicknachweis für Winkelprofil mit Zwei-Schrauben-Verbindungen

- nach EN 50341-1[5]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	b	b
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,30 + 0,68 * \bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,52 + 0,68 * \bar{\lambda}_y$
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-8 EN 50341-1[5] Knicknachweis für Winkelprofil mit Zwei-Schrauben-Verbindungen

- nach ECCS-Richtlinie No. 39[6]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	a_0	a_0
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,50 + 0,6464 * \bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,707 + 0,6464 * \bar{\lambda}_y$
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-9 ECCS-Richtlinie No.39 Knicknachweis für Winkelprofil mit Zwei-Schrauben-Verbindungen

2.3.2 Vergleich der Tragfähigkeiten nach den einzelnen Normen

Im Folgenden werden die berechneten Tragfähigkeiten für einzelne Winkelprofile auf Basis der in Abschnitt 2.3.1 betrachteten Normen miteinander verglichen. Es wurde hierfür ein gleichschenkeliges Winkelprofil mit einer Schenkellänge von 80 mm und einer Profildicke von 8 mm für die Berechnungen gewählt. Die Querschnittswerte wurden aus Profiltabellen [8] entnommen (s. Tab. 4-1 in Abschnitt 4.1).

Um die Unterschiede der betrachteten Normen darzustellen, wurden die jeweiligen Abminderungsfaktoren über den bezogenen Schlankheitsgrad der v -Achse aufgetragen. Der Abminderungsfaktor beschreibt in diesem Fall das Verhältnis der berechneten Tragfähigkeit, bezogen auf die plastische Querschnittstragfähigkeit. Um sicherzustellen, dass immer der maßgebende Knickfall betrachtet wird, musste auch das Ausweichen um die y -Achse beachtet werden. Dafür mussten die zugehörigen Schlankheiten für das Ausweichen um die y -Achse Ebene umgerechnet werden. Die Umrechnung der Schlankheiten erfolgte mit dem Verhältnis der Trägheitsradien. Dieses Verhältnis liegt bei gleichschenkeligen Winkelprofilen in etwa im Bereich von 1,55 [1].

Für diesen Winkel gilt: $\frac{i_y}{i_v} = 1,55$ und somit $\frac{\bar{\lambda}_y}{\bar{\lambda}_v} = 1,55$

Es stellte sich heraus, dass für kleinere bezogene Schlankheiten (für EN 1993-1-1[2] bei Schlankheiten von $\bar{\lambda}_v < 0,6$ und für EN 50341-1[5] und ECCS - Rec.[6] bei $\bar{\lambda}_v < 0,9$) das Knicken um die y -Achse maßgebend ist. Der Grund dafür ist der größere Einfluss der Exzentrizitäten bei relativ geringen Schlankheiten. Erst im höheren Schlankheitsbereich wird das Knicken um die v -Achse maßgebend.

Wie in Abb. 2-5 ersichtlich, liefern alle betrachteten Normen etwas unterschiedliche Ergebnisse. Einzig die EN 1993-3-1[4] und die EN 1993-1-1[2] liefern ab einer Schlankheit von ca. 0,5 exakt die gleichen Ergebnisse, da ab dieser Schlankheit der Knickfall um die schwache Achse maßgebend wird und hierfür beide Normen dieselben Formeln angeben. Die Ergebnisse nach EN 50341-1[5] und der ECCS-Richtlinie No. 39 verlaufen ab einer Schlankheit von ca. 0,9 beinahe ident, obwohl beide Normen unterschiedliche Formeln für die effektive Schlankheit angeben und auch unterschiedliche Knicklinien verwenden. Die DIN 18800-2[3] gibt ausschließlich effektive Schlankheiten für Ausweichen um die schwache Achse an und es ergeben sich deutlich konservativere Ergebnisse.

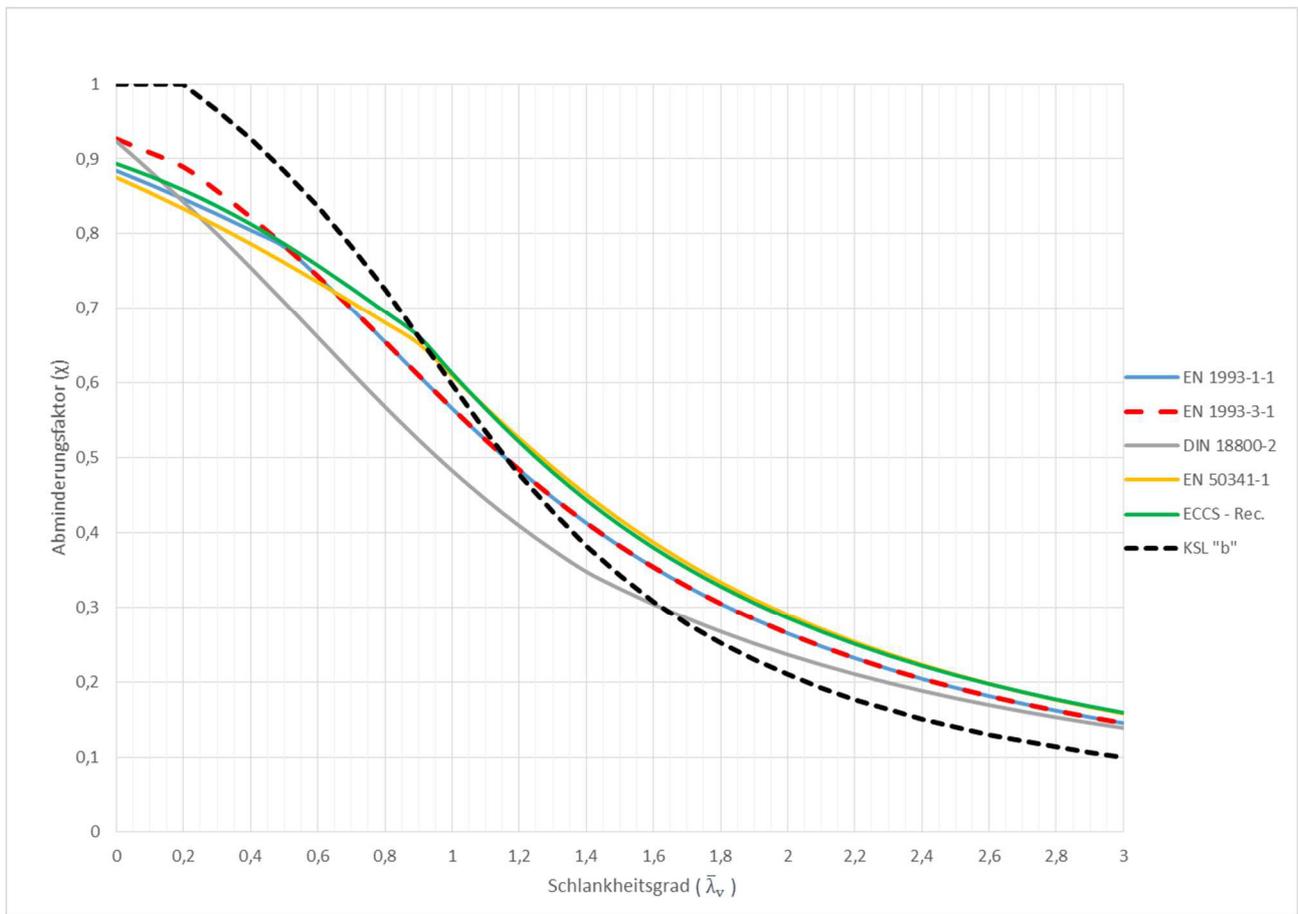


Abb. 2-5 Knicktragfähigkeiten der Normen zum Vergleich - Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Verbindungen

2.4 Winkelprofil mit beidseits Ein- Schrauben- Verbindungen

Für den Knicknachweis von Winkelprofilen mit beidseits Ein- Schrauben- Verbindungen geben die betrachteten Normen unterschiedliche Berechnungsmethoden an. Nach EN 1993-3-1[4], EN 50431-1[5] und der ECCS-Richtlinie[6] ist auch für diesen Fall ein vereinfachter Knicknachweis für zentrischen Druck mit der Verwendung von effektiven Schlankheiten zu führen. Im Gegensatz dazu, verlangt die EN 1993-1-1[2] einen Bauteilnachweis nach Theorie 2. Ordnung mit Berücksichtigung der durch den Schraubanschluss bedingten Exzentrizitäten. Auch nach DIN 18800-2[3] müssen die Anschlussexzentrizitäten berücksichtigt werden, entweder mittels eines Biegeknicknachweises (Beanspruchung N & M), oder ebenfalls mit einem Nachweis nach Theorie 2. Ordnung. Die Stabvorkrümmung ist dabei entsprechend der jeweils angegebenen Knicklinie zu wählen.

Weiters ist lt. EN 1993-3-1[4] die errechnete Tragfähigkeit für Winkelprofile, die an beiden Bauteilenden mit nur einer Schraube befestigt sind, mit dem Beiwert $\eta = 0,8$ abzumindern.

Als Knicklänge wird bei allen Normen die Systemlänge des gedrückten Winkelprofils vorgeschlagen. Hinsichtlich der zu wählenden Knicklinie gibt es, wie schon bei Zwei-Schrauben-Verbindungen, Unterschiede zwischen den betrachteten Normen. Lt. EN 1993-1-1[2], EN 1993-3-1[4] und EN 50431-1[5] muss die Knicklinie b verwendet werden. Für die DIN 18800-2[3] ist die Knicklinie c zu wählen bzw. für die ECCS-Richtlinie[6] die Knicklinie a₀.

2.4.1 Bemessungsgrundlagen für Ein-Schrauben-Verbindungen

- nach EN 1993-1-1[2]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	Kein Nachweis vorgesehen
Knicklinie	b ($e_0 = L/250$)	
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = \bar{\lambda}_v$	
Knicknachweis	Theorie 2. Ordnung	

Tab. 2-10 EN 1993-1-1[2] Knicknachweis für Winkelprofil mit Ein-Schrauben-Verbindungen

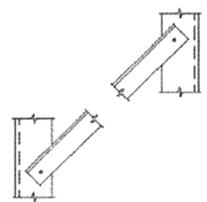
- nach EN 1993-3-1[4]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	b	b
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,58 + 0,7 * \bar{\lambda}_y$
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq 0,8 * \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq 0,8 * \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-11 EN 1993-3-1[4] Knicknachweis für Winkelprofil mit Ein-Schrauben-Verbindungen

Ergänzend ist hier ein Ausschnitt der Tabelle G.2 aus [4] zur Bestimmung des Beiwertes k für Ein-Schrauben-Verbindungen angeführt. Herauszuheben ist, dass die Angaben in Tab. 2-12 (Beiwert k) ident sind zu den Angaben in Tab. 2-11.

Beispiel: $\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = \bar{\lambda}_v * k = \bar{\lambda}_v * (0,7 * \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}) = 0,35 + 0,7 * \bar{\lambda}_v$

Art der Einspannung	Beispiele	Achse	k
nicht durchlaufend an beiden Enden (d. h. Einschraubenverbindungen an beiden Bauteilenden)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_z}$

Tab. 2-12 Bestimmung des Beiwertes k aus [4]

- nach DIN 18800-2[3]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	Kein Nachweis vorgesehen
Knicklinie	$c (e_0=L/200)$	
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = \bar{\lambda}_v$	
Knicknachweis	Theorie 2. Ordnung	

Tab. 2-13 EN 18800-2 Knicknachweis für Winkelprofil mit Ein-Schrauben-Verbindungen

- nach EN 50341-1[5]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	b	b
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = 0,30 + 0,68 * \bar{\lambda}_v$ für $\bar{\lambda}_v < \sqrt{2}$; $\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = 1,091 * \bar{\lambda}_v - 0,287$ für $\bar{\lambda}_v > \sqrt{2}$;	$\bar{\lambda}_{\text{eff},y} = 0,52 + 0,68 * \bar{\lambda}_y$ für $\bar{\lambda}_y < \sqrt{2}$; $\bar{\lambda}_{\text{eff},y} = 0,16 + 0,94 * \bar{\lambda}_y$ für $\bar{\lambda}_y > \sqrt{2}$;
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-14 EN 50341-1[5] Knicknachweis für Winkelprofil mit Ein-Schrauben-Verbindungen

- nach ECCS-Richtlinie No. 39[6]

	Ausweichen um die v- Achse:	Ausweichen um die y-Achse:
Knicklänge	$L_{cr} = 1,0 * L$	$L_{cr} = 1,0 * L$
Knicklinie	a_0	a_0
Effektive Schlankheit	$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,50 + 0,6464 * \bar{\lambda}_v$ für $\bar{\lambda}_v < \sqrt{2}$; $\bar{\lambda}_{eff,v} = \bar{\lambda}_v$ für $\bar{\lambda}_v > \sqrt{2}$;	$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,707 + 0,6464 * \bar{\lambda}_y$ für $\bar{\lambda}_y < \sqrt{2}$; $\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,40 + 0,8635 * \bar{\lambda}_y$ für $\bar{\lambda}_y > \sqrt{2}$;
Knicknachweis	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$	$N_{Ed} \leq \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}}$

Tab. 2-15 ECCS-Richtlinie No. 39 Knicknachweis für Winkelprofil mit Ein-Schrauben-Verbindungen

2.4.2 Annahmen für die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung

Laut den Normen EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3] ist es erforderlich, einen Stabilitätsnachweis nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der Exzentrizitäten zu führen. Es muss somit neben der Normalkraft auch ein Moment berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Berechnungen ein Schlankheitsbereich von $0 < \bar{\lambda}_v < 3$ mit einem Intervall von 0,1 betrachtet. Daraus konnten im ersten Schritt die zugehörigen Knicklängen L_{cr} für jeden einzelnen Winkelstab für die jeweiligen Schlankheitsgrade abgeleitet werden

$$L_{cr} = \bar{\lambda}_v * \lambda_1 * i_v \quad (7)$$

mit: $\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$i_v = \text{Trägheitsradius um die v- Achse}$$

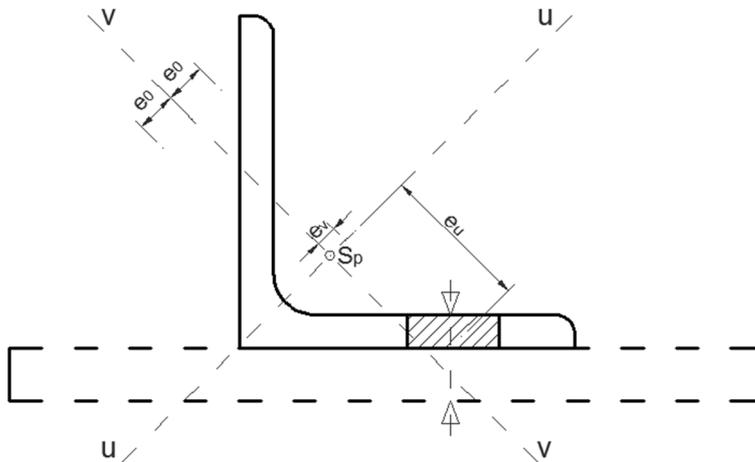
Herauszuheben ist, dass nun für den Knicknachweis um die Minimumsachse (v- Achse), wegen dem Ansatz der zugehörigen geometrischen Ersatzimperfektion in u-Richtung, eine zweiachsige Biegung vorliegt. (siehe Gl. 11 und Abb. 2-6)

Die sich daraus ergebenden Euler'schen- Knicklasten um die beiden Achsen werde mit dem folgenden Zusammenhang bestimmt.

$$N_{cr,v} = \frac{\pi^2 E I_v}{L_{cr}^2} \quad \text{bzw.} \quad N_{cr,u} = \frac{\pi^2 E I_u}{L_{cr}^2} \quad (8)$$

I_v = Trägheitsmoment um die Schwache Achse

I_u = Trägheitsmoment um die Starke Achse



$$M_v' = \pm N * e_o$$

$$M_u' = N * e_u$$

$$\text{Ann.: } e_v = 0$$

Abb. 2-6 Annahmen für die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung

Die Stabvorkrümmungen, entsprechend den Normen, wurden um die schwache Achse (v-v) aufgebracht. Nach EN 1993-1-1[2] beläuft sich die anzusetzende Vorkrümmung auf $e_o = L/250$, nach DIN 18800-2[3] auf $e_o = L/200$. Weiters wurde die Exzentrizität des Anschlusses um die Achse u-u berücksichtigt.

Die Theorie 2. Ordnung wurde in vereinfachter Form durch die Erhöhung der Momente 1. Ordnung mit dem entsprechenden „Dischinger- Faktor“ berücksichtigt.

$$\alpha_v = \frac{1}{1 - N/N_{cr,v}} \quad \text{und} \quad \alpha_u = \frac{1}{1 - N/N_{cr,u}} \quad (9)$$

α wird als Vergrößerungsfaktor der Theorie 2. Ordnung bezeichnet. Daraus folgt:

$$M_v'' = \alpha_v * M_v' \quad \text{und} \quad M_u'' = \alpha_u * M_u'$$

Man kann nun die Effekte der Theorie 2. Ordnung als erhöhte Gesamtexzentrizität ausdrücken:

$$e_{v,ges} = \alpha_v * (e_o + e_v) \quad \text{und} \quad e_{u,ges} = \alpha_u * e_u \quad (10)$$

Somit sind in Stabmitte die erhöhten Schnittkräfte 2. Ordnung bekannt (N , M_v'' , M_u'') und die Traglast, diese entspricht der maximal aufnehmbaren Normalkraft N_R , kann aus dem elastischen Querschnittsnachweis ermittelt werden.

Mit folgender Gleichung erfolgte die iterative Berechnung der Traglast N_R :

$$\frac{N_R}{A * f_y} + \frac{N_R * e_{v,ges}}{W_v * f_y} + \frac{N_R * e_{u,ges}}{W_u * f_y} = 1,0 \quad (11)$$

Somit konnte die maximal aufnehmbare Druckkraft N_R für die jeweilige Länge des Winkelprofils ermittelt werden. Zur iterativen Berechnung der Traglasten wurde das Programm MATLAB [10] verwendet. Anzumerken ist, dass in Gl. (11) die Teilsicherheitsfaktoren $\gamma_m = 1,0$ gesetzt wurden, um einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Normen zu haben.

2.4.3 Vergleich der Tragfähigkeiten nach Normen

Auf Basis der vorgeschlagenen Berechnungsmethoden (vgl. Abschnitt 2.4.1 und 2.4.2) werden nachfolgend die erreichbaren Tragfähigkeiten nach den einzelnen Normen miteinander verglichen. Es wurde dafür ein gleichschenkeliges Winkelprofil mit der Schenkellänge von 80 mm und einer Dicke von 8 mm verwendet. Die Querschnittswerte wurden aus Profiltabellen [8] entnommen (s. Tab. 4-1 in Abschnitt 4.1).

Abb. 2-7 zeigt die sich ergebenden Abminderungsfaktoren χ , aufgetragen über die bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_v$. Es sei nochmals erwähnt, dass für die Normen EN 1993-3-1[4], EN 50431-1[5] und für die ECCS-Richtlinie[6] jeweils ein vereinfachter Knicknachweis um die v-Achse bzw. die y-Achse erfolgt. Nur die maßgebende kleinere Tragfähigkeit ist in Abb. 2-7 dargestellt. Für DIN 18800-2[3] und EN 1993-1-1 [2] erfolgt ein Querschnittsnachweis auf Basis von Schnittkräften 2. Ordnung mit den zusätzlichen geometrischen Ersatzimperfektionen e_0 .

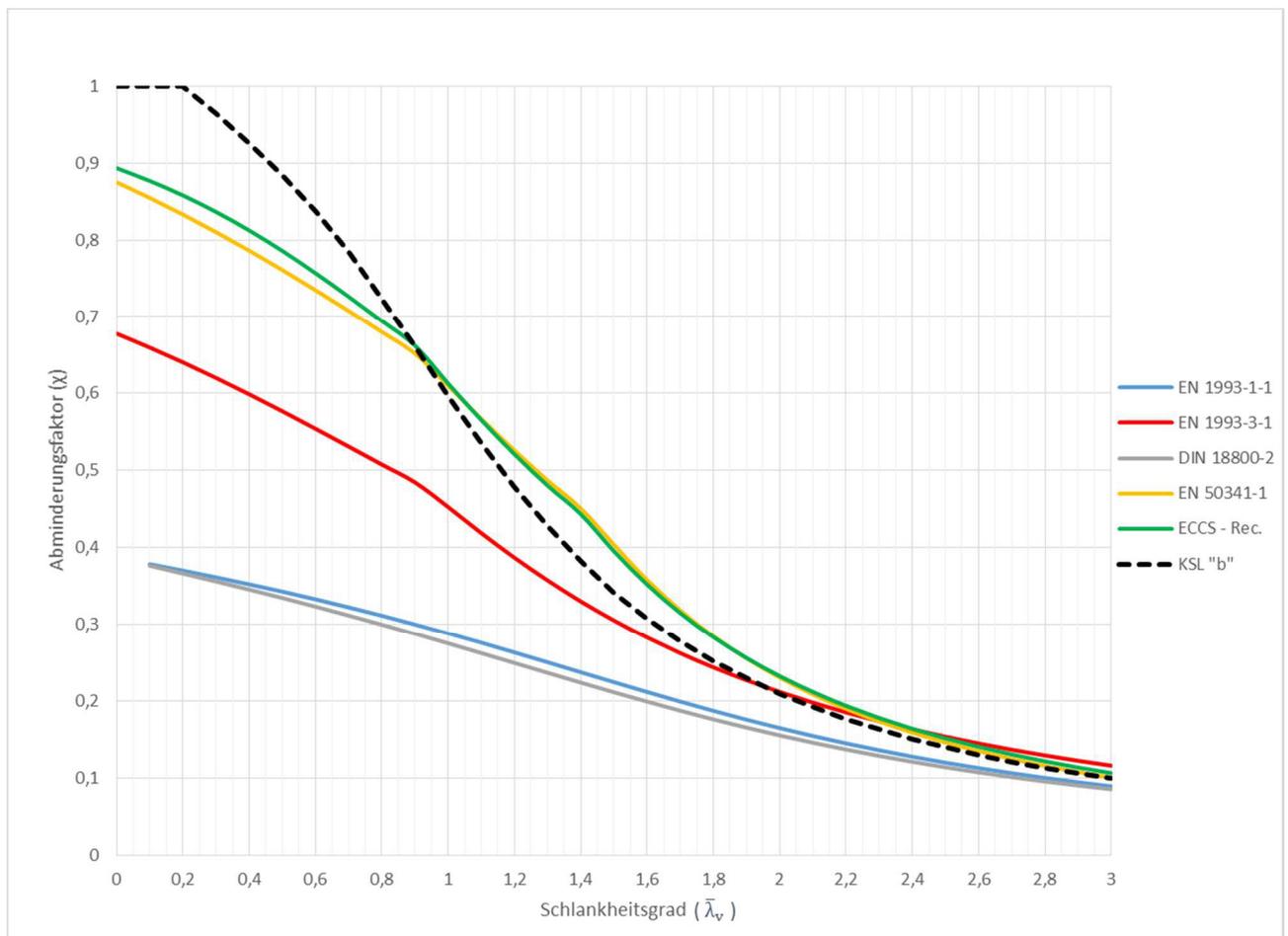


Abb. 2-7 Knicktragfähigkeit der Normen im Vergleich- Winkelprofil L80x8 mit Ein- Schrauben- Verbindungen

Es zeigt sich, dass die EN 50341[5] und die ECCS-Richtlinie[6] sehr ähnliche Tragfähigkeitskurven ergeben, obwohl sie unterschiedliche Formeln für die Berechnung der effektiven Schlankheiten angeben und unterschiedliche Knicklinien verwenden. Die EN 1993-3-1[4] liefert demgegenüber deutlich geringere Tragfähigkeiten. Die Ergebnisse aus den Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung nach DIN 18800-2[3] sowie EN 1993-1-1[2] liegen im Vergleich zu den anderen Normen deutlich auf der konservativen Seite. Für die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung wurde von einer elastischen Querschnittsausnutzung ausgegangen.

Ergänzend wurde in Abb. 2-8 bei den Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung von einer plastischen Querschnittsausnutzung ausgegangen, was zu einer deutlichen Erhöhung der Tragfähigkeiten nach DIN 18800-2[3] bzw. EN 1993-1-1[2] führt. Die sich dabei ergebenden Tragfähigkeiten liegen jedoch nach wie vor auf der sicheren Seite, gegenüber den anderen untersuchten Normenwerken. Die lineare plastische Querschnittsinteraktion erfolgte nach GL. (11).

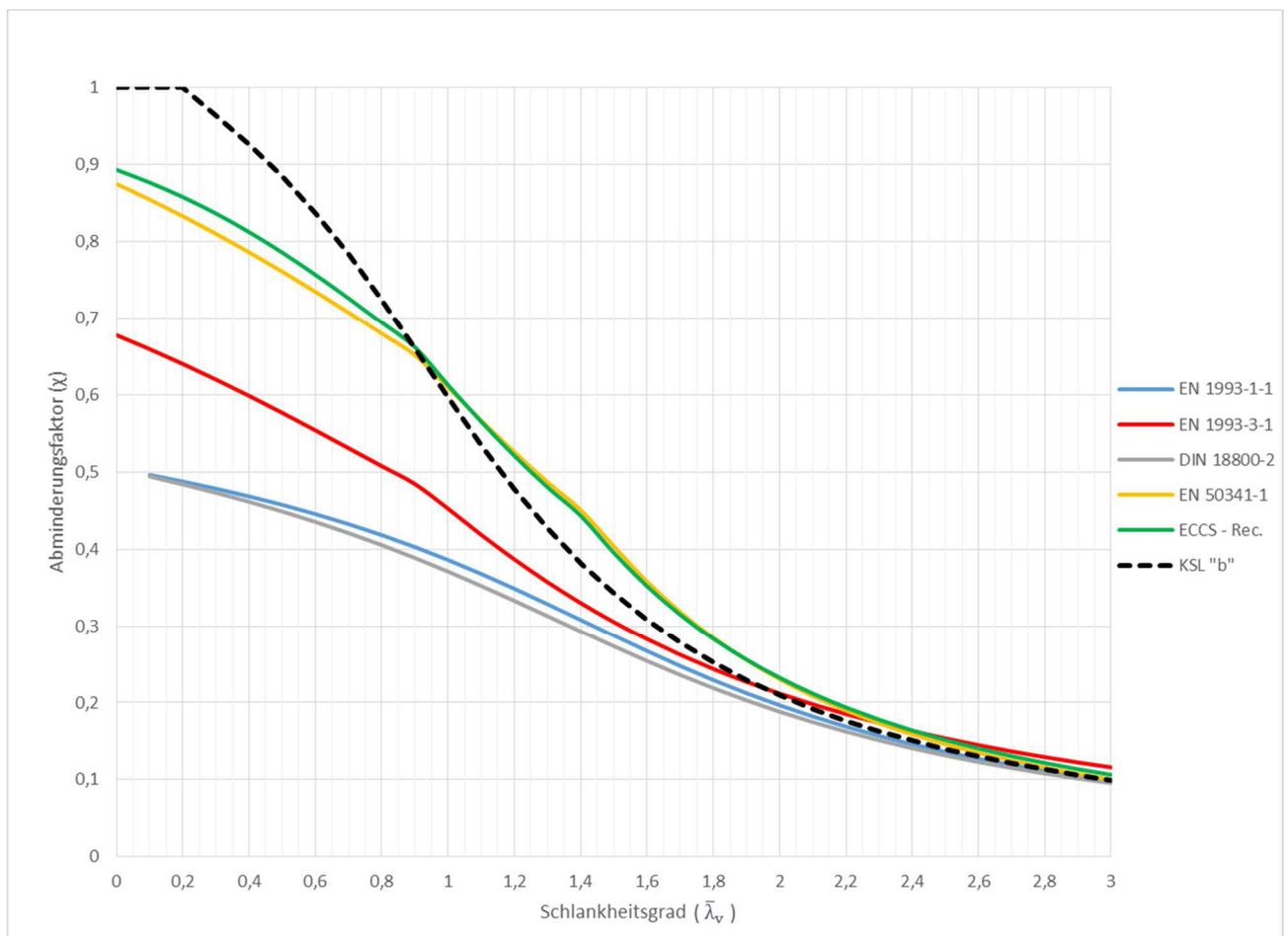


Abb. 2-8 Knicktragfähigkeit der Normen im Vergleich- Winkelprofil L80x8 mit Ein- Schrauben- Verbindungen (EN 993-1-1 und DIN 18800-2 mit plastischer Querschnittstragfähigkeit)

3

3 Methodik – FEM-Modellierung und Traglastermittlung mit Abaqus

3.1 Allgemein

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Simulationen wurde das Finite Elemente Programm Abaqus [9], mit der Version 6.11-2, verwendet. Es wurden unter anderem zentrisch belastete Einzelwinkel, exzentrisch belastete Winkel mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen und Winkel mit geschweißten Verbindungen untersucht. Im Allgemeinen handelt es sich bei den Simulationen um geometrisch sowie materiell nichtlineare Analysen, mit der Berücksichtigung von Imperfektionen (GMNIA). Dafür mussten zuerst Lineare-Beul-Analysen (LBA) durchgeführt werden, um die Eigenformen des betrachteten Einzelstabes zu erhalten. Dadurch konnten Vorimperfektionen mit einer beliebigen Amplitude berücksichtigt werden, deren Verläufe affin zur ersten Eigenform sind.

Um die Tragfähigkeit der modellierten Winkelprofile zu erhalten, wurde im Rahmen dieser Arbeit bei allen Simulationen eine Referenzdruckkraft „ $N_{ref,1000}$ “ von 1000 kN aufgebracht. Das Ergebnis der Simulation mit Abaqus konnte anhand eines „Last-Proportionalitätsfaktors“ (LPF) bestimmt werden. Dieser gibt an, bis zu welchem Anteil das Programm Abaqus die Referenznormalkraft aufbringen konnte, bis die Traglast des Systems erreicht wurde. Aus der Multiplikation dieses Faktors mit der Referenzdruckkraft war es möglich die Tragfähigkeit des Systems zu bestimmen.

$$N_{Rd,Abaqus} = N_{ref,1000} * LPF$$

3.2 Modellbildung- Allgemein

Als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Modelles diente die Untersuchung eines zentrisch gedrückten, gleichschenkeligen Winkelprofils. Das Winkelprofil besitzt eine Schenkellänge von 70 mm sowie eine Dicke von 7 mm und eine Länge von 1 Meter. Der Winkel ist an beiden Enden gelenkig gelagert und in der Schwerachse mit einer Normalkraft auf Druck belastet.

Der zentrisch belastete Winkel wurde mit Schalenelementen, Volumenelementen und als eine Kombination aus Schalen- und Volumenelementen modelliert. Als Plausibilitätskontrolle wurde die kritische Knicklast der ersten beiden Eigenformen aus der Linearen-Beul-Analyse mit der

berechneten Verzweigungslast nach Euler für reines Biegeknicken verglichen. Die Verzweigungslast nach Euler berechnet sich für einen Pendelstab nach:

$$F_{Ki} = n^2 * \frac{\pi^2 * EI_v}{l_k^2} \text{ was dem zweiten Euler Fall entspricht.}$$

Die Reihung der Eigenform wird mit n berücksichtigt und die Knicklänge l_k ist ident zur Systemlänge. Die Berechnung der kritischen Knicklast nach Euler für die ersten beiden Eigenformen ergab:

mit: $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$

$$I_v = 17,5 \text{ cm}^4$$

$$l_k = 100 \text{ cm}$$

Knicklast nach Euler für 1. Eigenform:

$$F_{cr,1} = 362,7 \text{ kN} \quad \text{aus} \quad F_{cr,1} = 1^2 * \frac{\pi^2 * 21000 * 17,5}{100^2}$$

Knicklast nach Euler für 2. Eigenform:

$$F_{cr,2} = 1450,8 \text{ kN} \quad \text{aus} \quad F_{cr,2} = 2^2 * \frac{\pi^2 * 21000 * 17,5}{100^2}$$

Anmerkung: In der FE-Berechnung liegen weitere Eigenformen vor, sodass $F_{cr,2}$ nicht der zweiten-, sondern einer höheren Eigenform entspricht.

a) Modellierung mit Schalenelementen

Bei dieser Variante wurde der gesamte Winkel mit Schalenelementen mithilfe eines idealisierten Querschnittes modelliert. Die Ausrundung des Winkelprofiles und die Abrundungen an den Schenkelenden wurden berücksichtigt, in dem die Dicke des Schalenelements so gewählt wurde, dass die Querschnittsflächen äquivalent sind. Statt $b/t = 70 / 7$ ergibt sich bei Berücksichtigung der Ausrundungen das Verhältnis $b/t^* = 70 / 7,06541$. Als Elementtyp wurden „S4R“ Elemente verwendet. Es handelt sich dabei um Elemente mit linearem FE- Lösungsansatz. Die verwendeten Elemente besitzen 4 Knoten und einen Integrationspunkt. Das „R“ im Namen steht für reduzierte Integration.

Die entsprechenden Knicklasten aus der Linearen-Beul-Analyse ergaben sich mit:

$$F_{cr,1} = 358,7 \text{ kN}$$

$$F_{cr,2} = 1360,0 \text{ kN}$$

b) Modellierung mit Volumenelementen

Hierfür wurde der Winkel mittels Volumenelementen exakt abgebildet. Es konnte somit auf eine Idealisierung des Querschnittes verzichtet werden. Als Elementtyp wurden sogenannte „C3D8R“ Elemente verwendet. Es handelt sich dabei um dreidimensionale, hexaedrische Kontinuums Elemente mit linearem Verformungsansatz, sowie reduzierter Integration. Die entsprechenden Knicklasten aus der Linearen-Beul-Analyse ergaben sich mit:

$$F_{cr,1} = 357,4 \text{ kN}$$

$$F_{cr,2} = 1364,4 \text{ kN}$$

c) Kombination von Schalen- und Volumenelementen

Hierbei handelt es sich um eine Kombination der ersten beiden Varianten. Der mittlere Teil des Winkels (in Stablängsrichtung betrachtet) wurde, wie bereits beschrieben, mittels Schalenelementen mit einem idealisierten Querschnitt modelliert. An den Winkelenden wurden jeweils 10 cm lange Anschlussstücke mittels Volumenelementen generiert, da es insbesondere bei den späteren Betrachtungen von Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen zu einer exzentrischen Lasteinleitung kommt. Hierdurch können die Anschlussbedingungen genauer abgebildet bzw. erfasst werden. Der Anschluss der Schalen- an die Volumenelemente erfolgte mithilfe einer sogenannten „Shell to Solid Coupling“. Die entsprechenden Knicklasten aus der Linearen-Beul-Analyse ergaben sich mit:

$$F_{cr,1} = 357,1 \text{ kN}$$

$$F_{cr,2} = 1349,8 \text{ kN}$$

Die Abweichungen der idealen Knicklasten aus der numerischen Berechnung von den Verzweigungslasten nach Euler, beliefen sich bei allen drei Modellierungsarten für die erste Eigenform auf 1-2 %, abhängig von der Feinheit des Netzes. Für die zweite globale Biegeeigenform ergaben sich Abweichungen von ca. 6%. Da bei den folgenden numerischen Simulationen ausschließlich die ersten Eigenformen für die Aufbringung einer Vorimperfektion zur Verwendung kamen, wurden die größeren Abweichungen der zweiten Eigenformen nicht ausführlicher untersucht, da diese für die Traglast keine Bedeutung haben.

3.3 Modellierung der Winkelprofile

Da sich die berechneten Knicklasten der drei Modellvarianten bei beidseits gelenkiger Lagerung nicht signifikant voneinander unterscheiden, wurde für die Modellierung der Winkelprofile im Falle der Stäbe mit Schraubenanschluss eine Kombination aus Schalen- und Volumenelementen verwendet. Dadurch können die im Folgenden betrachteten Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Anschlüsse relativ genau abgebildet werden, wobei der Rechenaufwand im Vergleich zu einer Modellierung durchgehend mit Volumenelementen drastisch reduziert wird. Eine Ausnahme bildet die Betrachtung von zentrisch belasteten Einzelwinkel in Kapitel 4, da aufgrund der vergleichsweise geringen Rechenzeit für kurze Profillängen der gesamte Winkel mit Volumenelementen modelliert werden konnte.

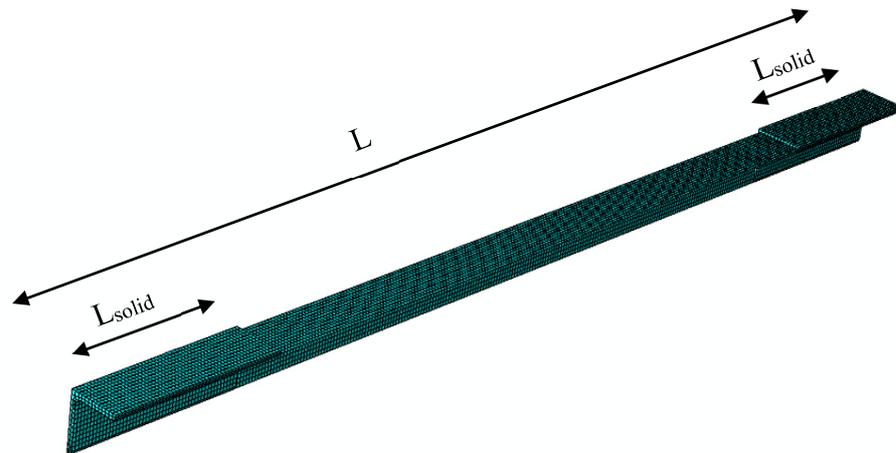


Abb. 3-1 Beispiel für die Modelbildung für ein Winkelprofil mit einer Kombination aus Schalen- und Volumenelementen

Anmerkung: Die Länge (L_{solid}), der mittels Volumenelementen generierten Anschlussstücke des Winkels, richtet sich bei Schraubanschlüssen nach der Größe des gewählten Anschlussbleches. ($L_{\text{solid}} = \text{ca. } 30\text{cm}$)

Materialeigenschaften des Winkelprofiles:

- linear elastisch – ideal plastisches Verhalten (siehe Abb.3-2)
- Fließgrenzen: $f_y = 480/430/328/275 \text{ N/mm}^2$
- Elastizitätsmodul: $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
- Poissonzahl: $\nu = 0,3$
- Werkstoff ist homogen und isotrop

Abb.3-2 zeigt die Arbeitslinie für die modellierten Winkelprofile mit einem linear elastischem – ideal plastischen Materialverhalten des Werkstoffes Stahl

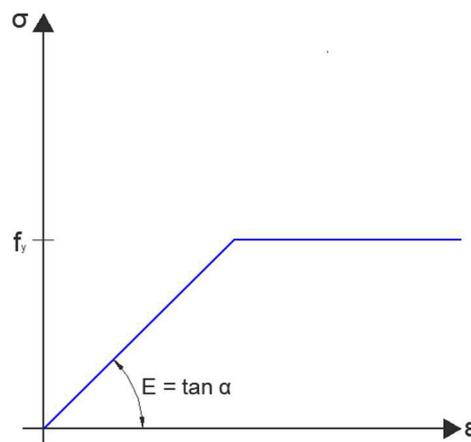


Abb.3-2 linear elastisch- ideal plastische Materialarbeitslinie

3.4 Modellierung des Anschlusses

a) Modellierung der Anschlussbleche und der Stirnplatte

Die Modellierung erfolgte zur Gänze mit Volumenelementen des Typs „C3D8R“. Um eine Kraftübertragung zwischen den sich berührenden aber nicht starr miteinander verbundenen Teilen (zwischen Winkelschenkel und Anschlussblech) zu ermöglichen, mussten Kontakteigenschaften definiert werden. Es musste ein Reibungskoeffizient angesetzt werden, um neben dem Normalkontakt auch eine tangentielle Kraftübertragung zu ermöglichen. Die Größe dieses Reibungskoeffizienten wurde mit $\mu = 0,75$ festgelegt. Die Verbindung des Anschlussbleches an die Stirnplatte wurde starr modelliert.

Da für die Tragfähigkeitsuntersuchungen der Winkelprofile ein Versagen des Anschlussbleches und der Stirnplatte unbedingt vermieden werden musste, wurden diesen Teilen rein elastische Materialeigenschaften zugewiesen.

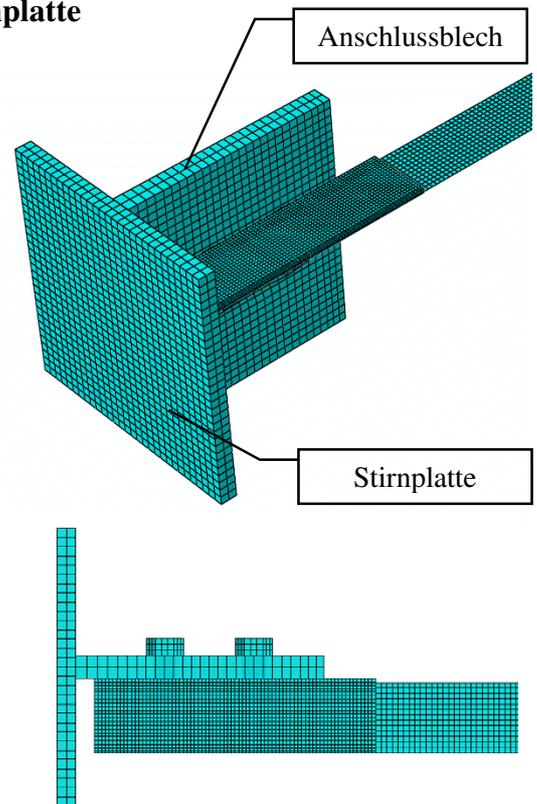


Abb. 3-3 Anschlussdetail mit Volumenelementen

Materialeigenschaften für Knotenblech und Anschlussblech:

- linear elastisches Verhalten
- Elastizitätsmodul: $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- Poissonzahl: $\nu = 0,3$
- Werkstoff ist homogen und isotrop

Die Abb. 3-4 zeigt die Arbeitslinie für die Kopfplatte und das Anschlussblech mit rein elastischem Materialverhalten des Werkstoffes Stahl.

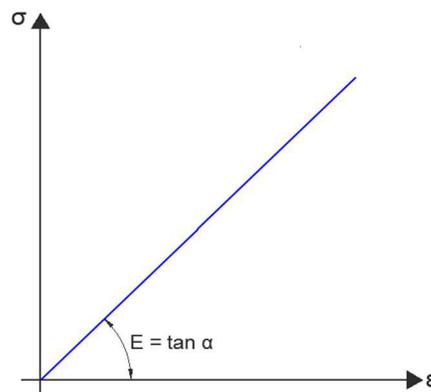


Abb. 3-4 rein elastische Materialarbeitslinie

b) Modellierung der Schrauben

Auch für die Modellierung der Schrauben wurden zur Gänze Volumenelemente des Typs „C3D8R“ verwendet. Auch zur Kraftübertragung zwischen den Schraubenköpfen und dem Anschlussblech bzw. dem anstehenden Winkelschenkel mussten Kontakteigenschaften definiert werden. Der Schraubendurchmesser wurde vereinfacht aus dem jeweiligen Schaftquerschnitt der Schrauben abgeleitet.

Materialeigenschaften der Schrauben:

- linear elastisches Verhalten
- Elastizitätsmodul: $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- Poissonzahl: $\nu = 0,3$
- Werkstoff ist homogen und isotrop

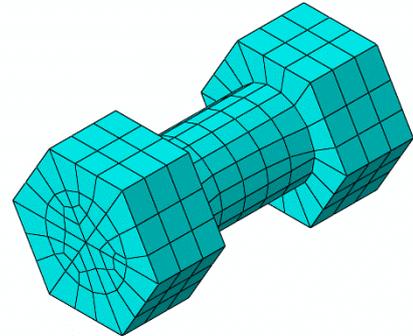


Abb. 3-5 FE-Modell Schraube

Die Vorspannung der Schraubenverbindung wurde mitmodelliert, um einen Schlupf in der Verbindung zu vermeiden. Dafür musste bei den numerischen Simulationen im ersten Schritt die Aufbringung einer Vorspannkraft F_p („bolt pre-load“) im Schaftquerschnitt der Schrauben erfolgen.

Die Größe der Vorspannkraft hängt dabei von Schraubendurchmesser und Schraubenfestigkeitsklasse der verwendeten Schrauben ab und wurde dabei, in Anlehnung an die Definition einer 100% igen Vorspannung in EN 1993-1-8 festgelegt mit:

$$F_p = 0,7 * f_{ub} * A_S$$

mit:

f_{ub} : Zugfestigkeit der Schraube

A_S : Spannungsquerschnitt

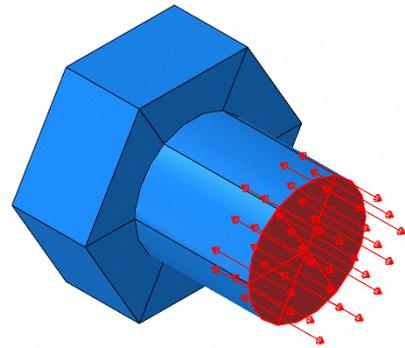


Abb. 3-6 Aufbringung der Vorspannkraft

Für die Berechnung der aufzubringenden Vorspannkraft wurden hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 vorausgesetzt ($f_{ub} = 1000\text{ N/mm}^2$).

Hervorzuheben ist, dass wie bei einer GV- Verbindung vorausgesetzt, keinerlei Kontakt zwischen Schraubenschaft und Anschlussblech bzw. Winkelschenkel vorliegt. Die Normalkraft zwischen Anschlussblech und Winkelschenkel wird unmittelbar über Reibung übertragen, bedingt durch die Kontaktpressung aus der Vorspannung der Schraube.

c) Randbedingungen und Belastung bei Winkelprofilen mit Schraubenschlüssen

Bei der Modellierung der Schraubenanschlüsse wurde zwischen zwei Ausführungen unterschieden. Einerseits wurde eine Variante mit starr angeschlossenen Anschlussblech betrachtet, was dem Fall einer Einspannung entspricht (**Fall A – starre Stirnplatte**). Für den zweiten Fall wurde ein gelenkiger Anschluss nachgebildet (**Fall B- gelenkige Stirnplatte**).

Fall A – starre Stirnplatte

Wie in Abb. 3-7 erkennbar, ist am linken Auflager die Verschiebung in Längsrichtung gesperrt. Die Aufbringung der Belastung erfolgt am rechten Auflager, wo eine Verschiebung in Längsrichtung möglich ist.

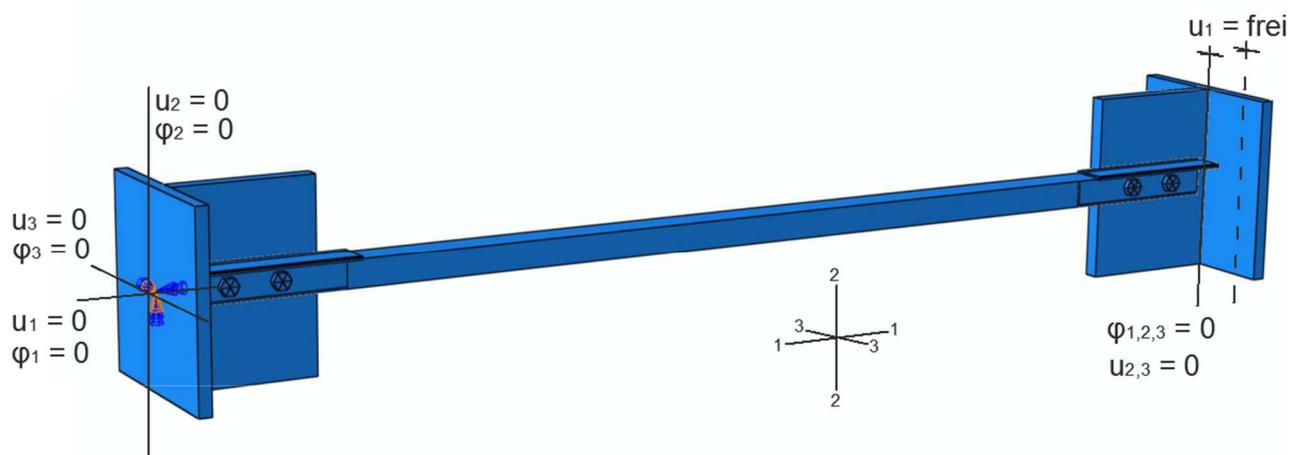


Abb. 3-7 Lagerungsbedingungen und Belastung für ein Winkelprofil mit Schraubenschluss und starrer Stirnplatte

Fall B - gelenkig Stirnplatte

In Abb. 3-8 ist ersichtlich, dass durch die gelenkige Lagerung eine freie Verdrehung um $\varphi_{2,3}$ ermöglicht wird. Die gelenkige Lagerung ist auf der linken Seite unverschieblich ausgeführt ist.

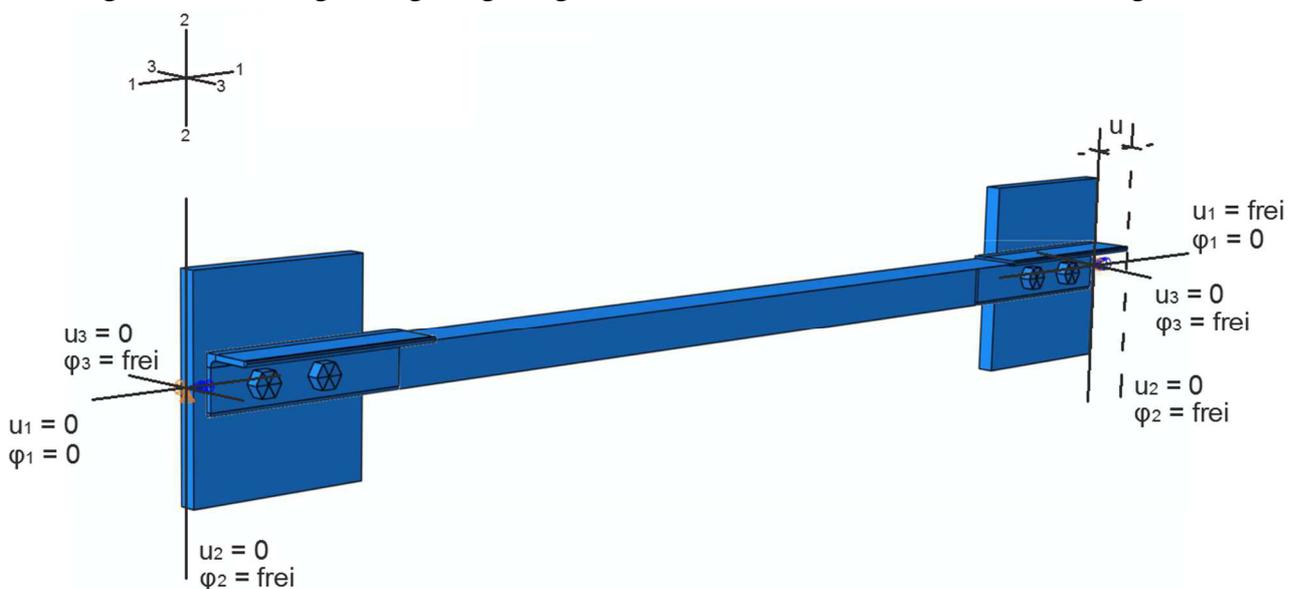


Abb. 3-8 Lagerungsbedingungen und Belastung für ein Winkelprofil mit Schraubenschluss und gelenkig gelagertem Anschlussblech

d) Randbedingungen und Belastung bei Winkelprofilen mit zentrischer Lagerung

Die Modellierung der Auflager erfolgt durch eine Koppelung des Winkelquerschnittes am Ende mit einem Referenzpunkt. Dieser Referenzpunkt befindet sich genau in der Schwerachse des Profils und besitzt die Randbedingungen eines gelenkigen Auflagers. Somit sind keine Exzentrizitäten bei der Lagerung bzw. der Lasteinleitung vorhanden, wodurch das Profil genau um seine Minimumsachse ausknickt.

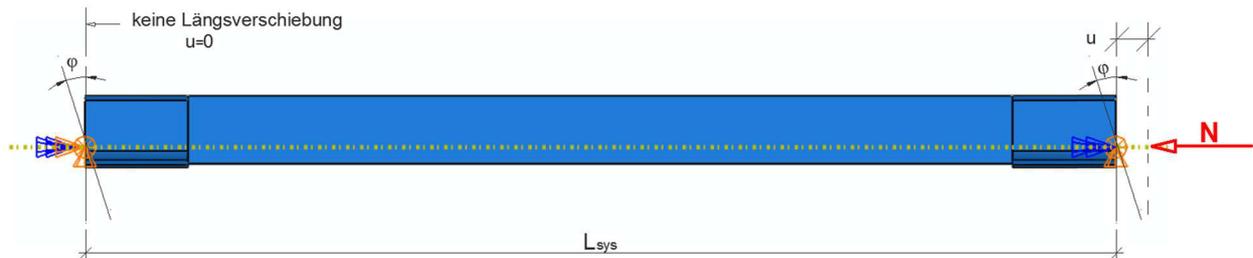


Abb. 3-9 Lagerungsbedingungen und Belastung für ein Winkelprofil mit zentrischer Lagerung

4

4 FEM- Traglasten für den zentrisch gedrückten Einzelwinkel

4.1 Allgemein

Um Untersuchungen an exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen besser beurteilen zu können, wurde vorab der Sonderfall eines zentrisch gedrückten Einzelwinkels betrachtet. Es wurden dieselben Berechnungsschritte wie bei den nachfolgenden Simulationen der exzentrisch gelagerten Profile mit Schraubenanschluss durchgeführt. Insbesondere die Größe der anzusetzenden geometrischen Ersatzimperfektion konnte in diesem Fall relativ einfach mit den Vorschlägen aus der EN 1993-1-1[2] verglichen werden. Hierzu wurden numerische Simulationen an zentrisch gedrückten Winkelprofilen mit unterschiedlichen Vorkrümmungen durchgeführt. Die sich ergebenden Traglastkurven wurden der Knickspannungslinie b gegenübergestellt. Bei den untersuchten Profilen handelt es sich um gleichschenkelige Winkel mit einer Schenkellänge von 80 mm und einer Dicke von 8 mm.

Die verwendeten Querschnittsdaten für einen Winkel L80x8 sind der Tab. 4-1 zu entnehmen.

A	12,27 cm ²	I _v (Minimumsachse) :	29,88 cm ⁴
i _v	1,56 cm	W _v	9,37 cm ³
i _y	2,43 cm	W _u	20,26 cm ³
i _u	3,06 cm	W _{v,pl}	16,49 cm ³
N _{pl} = A * f _y	588,86 kN	W _{u,pl}	32,70 cm ³
f _y	480 N/mm ²	E	210 000 N/mm ²

Tab. 4-1 Querschnittsdaten Winkelprofil L80x8

Die Profillängen wurden von 72 cm bis 288 cm variiert, um einen Schlankheitsbereich von $\bar{\lambda}_v = 0,7$ bis 2,8 abzudecken. Bis zu einer Länge von 180 cm wurden die Profile ausschließlich mit Volumenelementen generiert. Vor allem bei kürzeren Profillängen konnte bei der Linearen-Beul-Analyse eine geringfügig bessere Übereinstimmung mit den Knicklasten nach Euler erreicht werden, als mit einer Kombination aus Volumen- und Schalenelementen. Ab einer Profillänge von 180 cm ergaben sich bei den Ergebnissen keine Unterschiede zwischen den Modellierungsarten, wodurch, aufgrund des geringeren Rechenaufwandes, eine Kombination aus Volumen- und Schalenelementen verwendet wurde.

4.2 Lineare- Beul- Analyse (Bestimmung der 1. Eigenform)

Im ersten Schritt wurden zur Bestimmung der ersten globalen Eigenformen Lineare-Beul-Analysen für die unterschiedlichen Profillängen durchgeführt. Für bezogene Schlankheiten von $\bar{\lambda}_v < 0,7$ waren die gewonnen Ergebnisse aus Abaqus nicht zu verwenden, da aus der Linearen-Beul-Analyse (LBA) keine globalen Eigenformen gewonnen werden konnten. Ab einer Schlankheit von $\bar{\lambda}_v > 0,7$ lieferten die Analysen mit Abaqus brauchbare Ergebnisse, bei denen sich die zur ersten Eigenform gehörigen Knicklasten nur minimal von der Verzweigungslast nach Euler unterscheiden. Vor allem im höheren Schlankheitsbereich stimmen die Knicklasten sehr gut überein. Die Abweichungen der Knicklasten aus den LBA's zu den berechneten Knicklasten nach Euler sind in der Tab. 4-2 ersichtlich.

Profillänge:	72	108	144	180	216	252	288	[cm]
N_{Cr}(Abaqus)	1149,4	521,0	294,5	189,1	131,0	96,5	74,0	[kN]
$\bar{\lambda}_v$(Abaqus)	0,72	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	
N_{Cr}(Euler)	1194,6	530,9	298,7	191,1	132,7	97,5	74,7	[kN]
$\bar{\lambda}_v$(Euler)	0,70	1,05	1,40	1,76	2,11	2,46	2,81	

Tab. 4-2 Vergleich der Knicklasten aus Abaqus mit Verzweigungslasten nach Euler

In der Abb. 4-1 ist die erste globale Eigenform für das Winkelprofil mit einer Länge von 180 cm ersichtlich. Wie zu erkennen, erfolgt das Ausknicken des Profils genau um seine Minimumsachse.

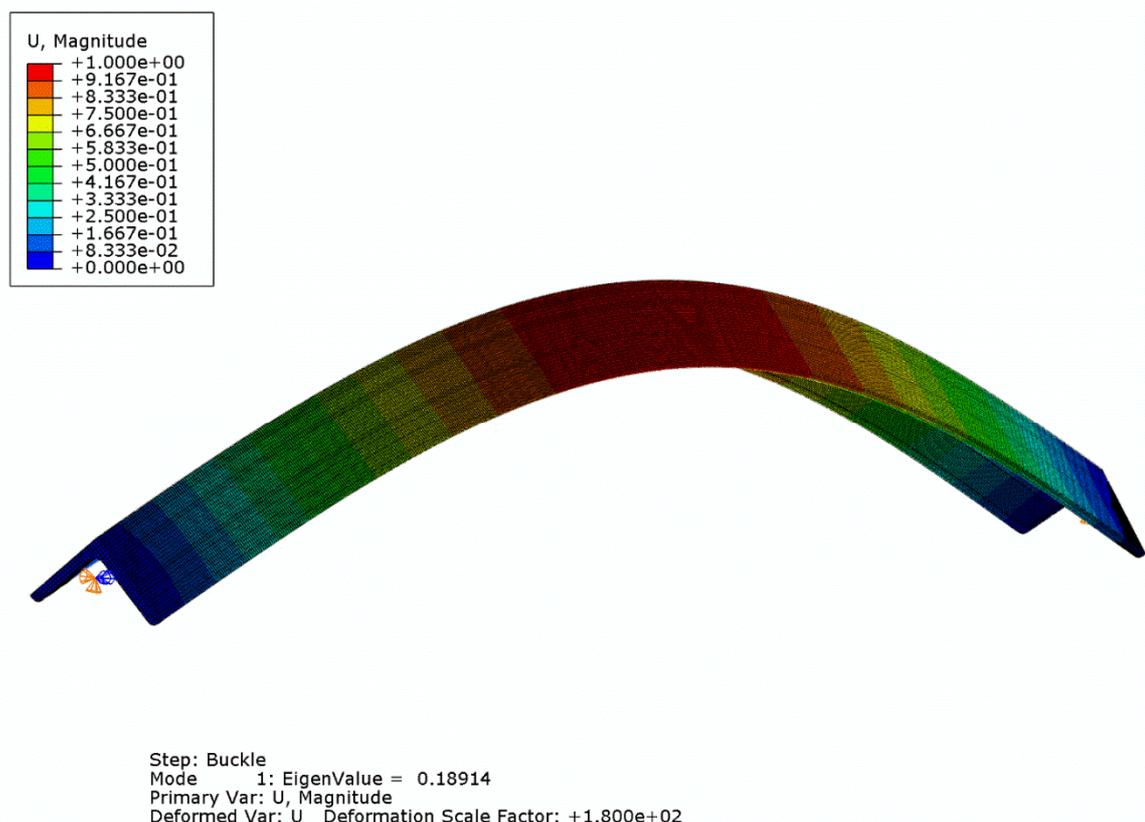


Abb. 4-1 Erste Eigenform für das Winkelprofil L80x8

4.3 Geometrische Ersatzimperfectionen

Auf Basis der Eigenformen aus den Linearen- Beul- Analysen, war es im zweiten Schritt möglich, für die Traglastberechnung Imperfectionen zu berücksichtigen, welche zur ersten Eigenform affine Verläufe aufweisen.

Die Größe der Amplitude der Vorkrümmung wurde auf zwei unterschiedliche Arten festgelegt. Für die ersten beiden Imperfectionsansätze wurden längenabhängige Vorimperfectionen von $e_{0(L)} = L/200$ und $e_{0(L)} = L/300$ gewählt. Bei dem dritten Imperfectionsansatz wurden schlankheitsabhängige Imperfectionen aufgebracht. Diese ergaben sich aus dem folgenden Ansatz, der in EN 1993-1-1[2] definiert ist:

$$e_{0(\bar{\lambda})} = \frac{W_{pl,v}}{A} * \alpha * (\bar{\lambda}_v - 0,2) \quad \text{mit: } \alpha = 0,34 \text{ (gemäß KSL b)}$$

Für die Berechnung der schlankheitsabhängigen Imperfectionen, wurde das plastische Widerstandsmoment „ W_{pl} “ angesetzt. Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_v$ wurde aus dem Verhältnis der plastischen Normalkrafttragfähigkeit zur kritischen Knicklast gewonnen.

$$\bar{\lambda}_v = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,Abaqus}}}$$

In Abb. 4-2 sind die Amplituden der unterschiedlich bestimmten geometrischen Ersatzimperfectionen, aufgetragen über die Profillänge, zu sehen.

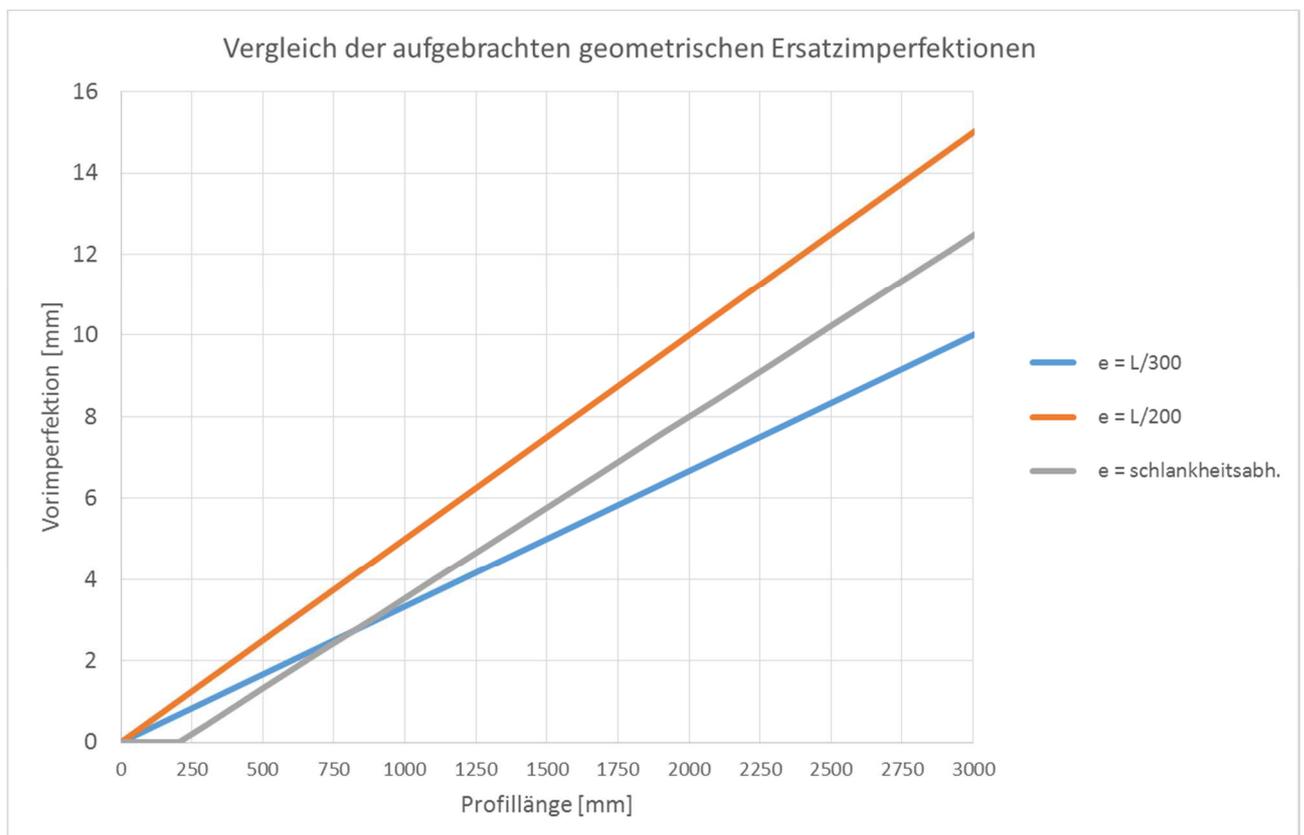


Abb. 4-2 Vergleich unterschiedlicher Vorkrümmungsansätze

Die Größen der beiden längenabhängigen Imperfektionen steigen linear mit der Länge des Profils an. Die Formel für die Berechnung der schlankheitsabhängigen Imperfektionen ist erst ab einem Schlankheitsgrad von $\bar{\lambda} > 0,2$ gültig, was in diesem speziellen Fall einer Profillänge von 205 mm entsprechen würde. Die Steigung des Verlaufes der schlankheitsabhängigen Imperfektionen entspricht in etwa der Steigung aus $e_{0(L)} = L/200$. Ab einer Profillänge von 800 mm ergeben sich für $e_{0(\lambda)}$ größere Werte als für $e_{0(L)} = L/300$. Bei einer Profillänge von 3000 mm liegen die Ergebnisse für $e_{0(\lambda)}$ in etwa zwischen denen für $e_{0(L)} = L/300$ und $e_{0(L)} = L/200$.

Eine Übersicht der aufgebrachten geometrischen Ersatzimperfektionen für die betrachteten Profillängen ist der Tab. 4-3 zu entnehmen.

Länge:	$e_{0(L)} = (L/300)$	$e_{0(L)} = (L/200)$	$e_{0(\lambda)}$	
720	2,40	3,60	2,36	[mm]
1080	3,60	5,40	3,94	[mm]
1440	4,80	7,20	5,55	[mm]
1800	6,00	9,00	7,15	[mm]
2160	7,20	10,80	8,77	[mm]
2520	8,40	12,60	10,37	[mm]
2880	9,60	14,40	11,98	[mm]

Tab. 4-3 Größe der aufgebrachten geometrischen Ersatzimperfektionen (Amplitudenwerte in Stabmitte)

4.4 GMNIA Ergebnisse mit verschiedenen Imperfektionsannahmen

Anschließend an die LBA- Analysen wurden, für dieselben Profillängen, Traglastberechnungen durchgeführt. Dazu wurde die erste Eigenform aus den Linearen-Beul-Analysen, mit einer Amplitude entsprechend der berechneten geometrischen Ersatzimperfektionen (vgl. Tab. 4-3), als Vorkrümmung auf das System aufgebracht. Es handelt sich bei den Berechnungen um geometrisch sowie materiell nichtlineare Analysen mit der Berücksichtigung von Imperfektionen. In Abb. 4-3 werden die Traglasten, im Verhältnis zur plastischen Normalkrafttragfähigkeit N_{pl} , als Abminderungsfaktoren χ über die bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_v$ der Minimumsachse aufgetragen. Zum Vergleich, ist auch die Knickspannungslinie b dargestellt.

Es zeigt sich deutlich, dass die Traglastberechnungen mit den Vorkrümmungen $e_{0(L)} = L/300$ und $e_{0(\lambda)}$ in etwa dieselben Ergebnisse liefern und zudem auch ziemlich genau mit der Knickspannungslinie b übereinstimmen. Eine verwendete Vorkrümmung von $e_{0(L)} = L/200$ liefert etwas konservativere Ergebnisse, wobei zu erkennen ist, dass für höhere Schlankheiten (ab ca. $\bar{\lambda} > 2$) kein relevanter Unterschied mehr zwischen den drei Tragfähigkeitskurven und der Knickspannungslinie b zu erkennen ist.

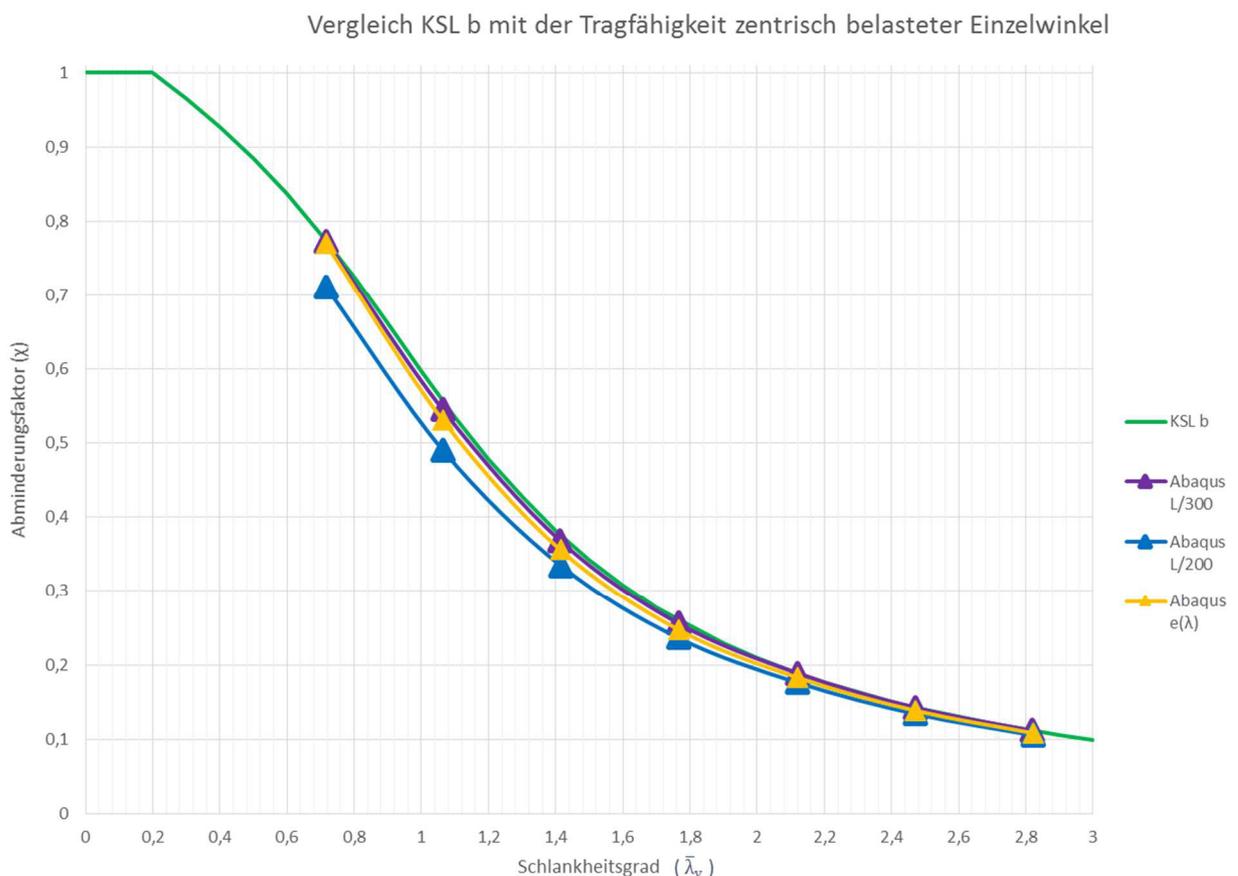


Abb. 4-3 Tragfähigkeitskurven mit unterschiedlichen Vorkrümmungen bei zentrischen Druck

4.5 Zusammenfassung- Winkel unter zentrischer Druckbelastung

Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass sich für zentrisch belastete Winkelprofile vor allem die Ergebnisse mit Berücksichtigung der Vorkrümmungen $e_{0(L)} = L/300$ und $e_{0(\lambda)}$ ziemlich genau mit der KSL b decken, die auch für die Bemessung in EN 1993-1-1[2] vorgesehen ist. Im Vergleich dazu, würden die nach EN 1993-1-1[2] vorgesehenen Vorkrümmungen, die der Knicklinie b entsprechen (Tab. 4-4), konservativere Ergebnisse liefern.

AC Knicklinie nach Tabelle 6.2 AC	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	e_0/L	e_0/L
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Tab. 4-4 Vorkrümmungen für die jeweiligen Knicklinien aus [2]

Des Weiteren ist aus Abb. 4-3 zu erkennen, dass mit steigendem Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_v$ der Einfluss der geometrischen Imperfektionen deutlich sinkt, da ab einem Schlankheitsgrad von ca. $\bar{\lambda}_v > 2$ keine relevanten Unterschiede mehr zwischen den Kurven bestehen.

Für die in dieser Arbeit folgenden Untersuchungen an exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen wird, auf Basis der in diesem Kapitel durchgeführten Betrachtungen an zentrisch angeschlossenen Winkelprofilen, eine anzusetzende Vorkrümmung von $e_{0(L)} = L/300$ vorgeschlagen und angewendet.

Tab. 4-5 enthält eine Zusammenfassung der berechneten Traglasten für zentrisch belastete Einzelwinkel mit Berücksichtigung der jeweiligen Vorkrümmungen. Der Abminderungsfaktor χ berechnet sich mit: $\chi = \frac{N_{R,b}}{N_{pl}} = \frac{N_{R,b}}{588,86}$

Stablänge L: [mm]	Schlankheit ($\bar{\lambda}_v$)	Traglast $N_{R,b}$ je nach Vorkrümmung: [kN]			Abminderungsfaktor χ		
		$e_{(L)} = (L/300)$	$e_{(L)} = (L/200)$	$e_{(\lambda)}$	$e_{(L)} = (L/300)$	$e_{(L)} = (L/200)$	$e_{(\lambda)}$
720	0,72	455,3	418,80	453,3	0,77	0,71	0,77
1080	1,06	321,1	289,00	312,8	0,55	0,49	0,53
1440	1,41	216,6	197,10	209,5	0,37	0,33	0,36
1800	1,76	150,7	139,20	145,8	0,26	0,24	0,25
2160	2,12	111,1	103,60	107,6	0,19	0,18	0,18
2520	2,47	83,9	78,90	81,5	0,14	0,13	0,14
2880	2,82	65,5	62,00	63,7	0,11	0,11	0,11

Tab. 4-5 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten mit unterschiedlichen Vorkrümmungen

5

5 FEM- Nachrechnung publizierter Versuche

5.1 Allgemein

Zur Verifizierung der FE-Modelle, welche für die durchzuführenden Tragfähigkeitsberechnungen zur Verwendung kommen sollen, wurden im Zuge dieser Arbeit Vergleiche mit den numerischen Berechnungen sowie Versuchen aus [7] angestellt. Es war somit möglich, die gewonnenen numerischen Ergebnisse aus den Simulationen mit Abaqus, mit Ergebnissen von realen Versuchen zu vergleichen. In [7] wurden Versuche an exzentrisch gedrückten Einzelwinkeln mit beidseitigen Zwei-Schrauben-Verbindungen, sowie mit geschweißten Anschlüssen durchgeführt.

- Zwei-Schrauben-Anschluss nach [7]

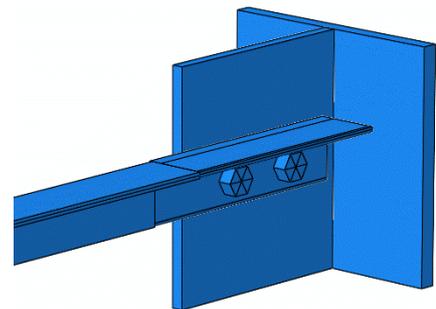


Abb. 5-1 Zwei-Schrauben-Anschluss nach [7]

- Geschweißter Anschluss nach [7]

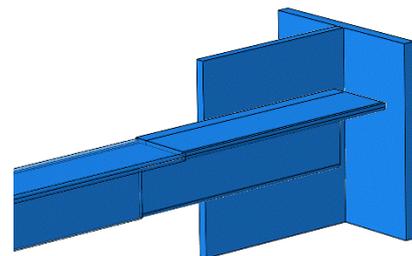


Abb. 5-2 Geschweißter Anschluss nach [7]

Hierzu mussten die Modelle in Abaqus so gut wie möglich auf die verwendeten Versuchskonfigurationen in [7] abgestimmt werden. Es wurden dazu sechs Versuche an gedrückten Einzelwinkeln mit Zwei-Schrauben-Verbindungen und ein Versuch an einem Winkelprofil mit geschweißtem Anschluss nachgebildet. Die verwendeten Geometrie- sowie Materialeigenschaften orientierten sich an den publizierten Daten aus [7].

5.2 Versuchskonfiguration

In Abb. 5-3 ist der Versuchsaufbau nach [7] für exzentrisch belastete Einzelwinkel zu erkennen. Die Einleitung der Druckkraft erfolgt in beiden Fällen nur über den einen am vertikalen Knotenblech angeschlossenen Schenkel. Im linken Versuch ist der Anschluss mit einer Schweißnaht ausgeführt. Auf dem rechten Bild ist der Schenkel wie ersichtlich mit zwei Schrauben angeschlossen.

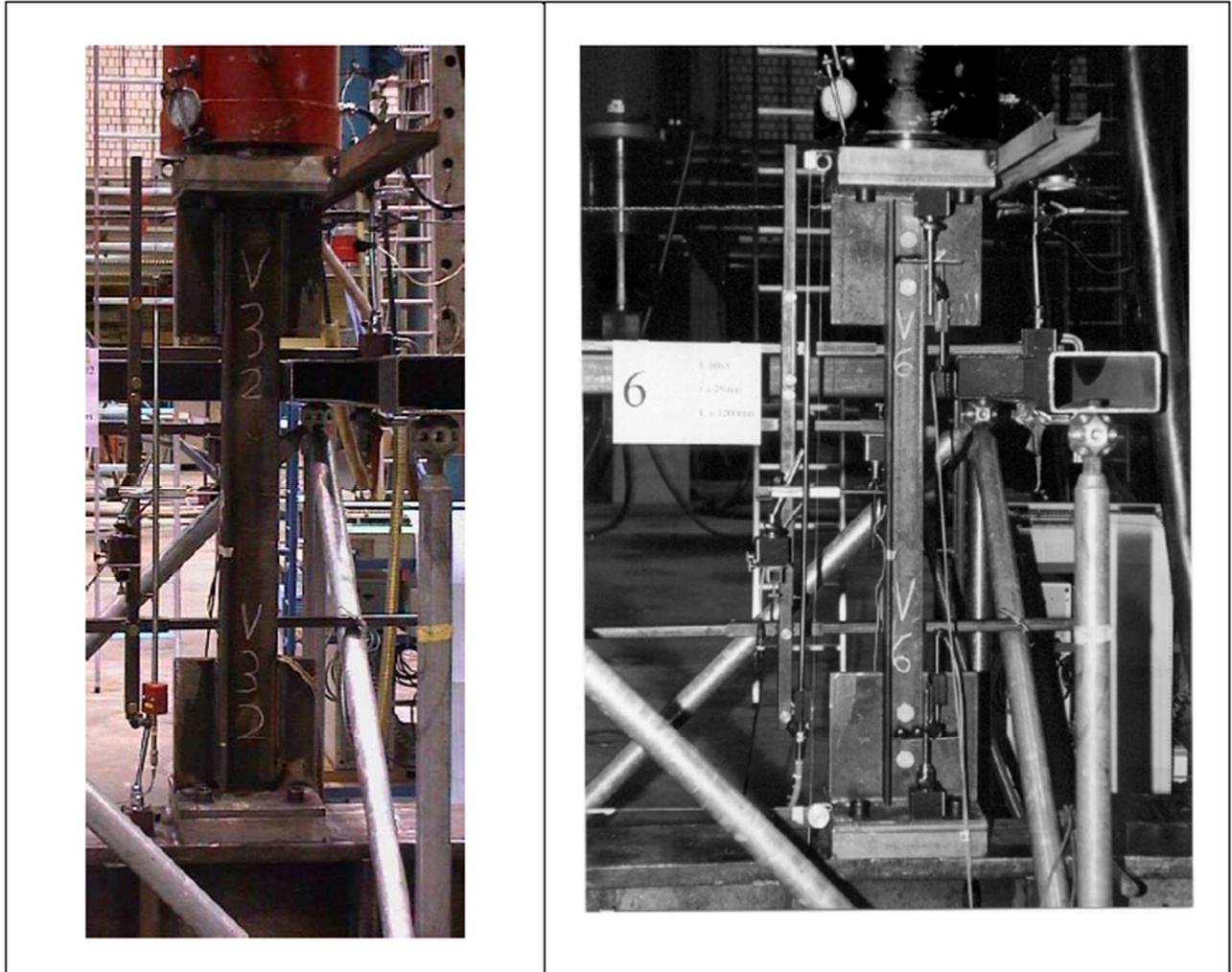
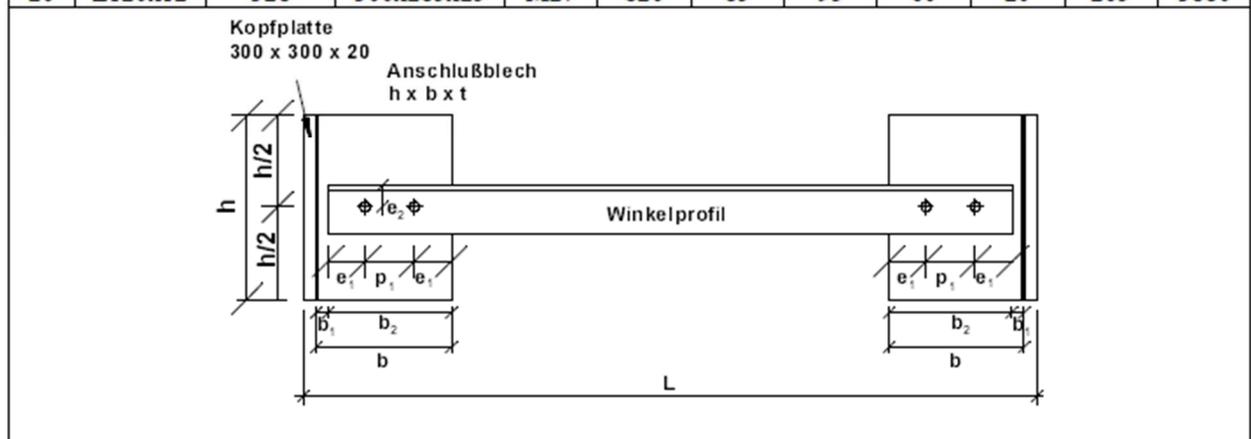


Abb. 5-3 Versuchsaufbau für Winkelprofil mit Zwei- Schrauben (rechts)- bzw. geschweißten Anschluss (links)

In beiden Fällen erfolgt der Anschluss des Winkelprofils an zwei T-förmige Anschlussbleche, welche am Auflager bzw. am Prüfkolben befestigt sind. Für die vertikalen Knotenbleche wurden zwei unterschiedliche Blechdicken verwendet (15 mm und 25 mm), um den Einfluss der Anschlusssteifigkeit untersuchen zu können. Die Schraubenverbindungen wurden immer mit zwei planmäßig vorgespannten Schrauben ausgeführt. Es wurden hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet. Die Versuchsdurchführung in [7] erfolgte weggesteuert, mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1mm/min.

In der Tab. 5-1 aus [7] sind alle relevanten Anlageverhältnisse der Versuchskörper mit beidseitigen Zwei-Schrauben-Verbindungen zusammengefasst. Gelb hinterlegt sind die im Rahmen dieser Arbeit mit Abaqus untersuchten Versuchsausführungen.

Nr.	Profil	Streckgrenze	Anschlußblech h x b x t	Schraube	Anziehungsmoment	e_1	p_1	e_2	b_1	b_2	L
	[mm]	[N/mm ²]	[mm]		[Nm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	L60x6	430	300x220x15	M16	270	60	80	35	20	200	2180
2	L60x6	430	300x220x15	M16	270	60	80	35	20	200	2180
3	L60x6	430	300x220x25	M16	270	60	80	35	20	200	2180
4	L60x6	430	300x220x25	M16	270	60	80	35	20	200	2180
5	L80x8	480	300x265x25	M22	720	75	95	45	20	245	1280
6	L80x8	480	300x265x25	M22	720	75	95	45	20	245	1280
7	L80x8	480	300x265x25	M22	720	75	95	45	20	245	2880
8	L80x8	480	300x265x25	M22	400	75	95	45	20	245	2880
9	L80x8	480	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	2880
10	L80x8	480	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	2880
11	L80x8	275	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	2880
12	L80x8	275	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	2880
13	L80x8	480	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	3880
14	L80x8	480	300x265x15	M22	400	75	95	45	20	245	3880
15	L120x12	328	300x285x15	M24	550	85	95	60	20	265	2870
16	L120x12	328	300x285x15	M24	550	85	95	60	20	265	2870
17	L120x12	328	300x285x25	M27	820	85	95	60	20	265	2880
18	L120x12	328	300x285x25	M27	820	85	95	60	20	265	2880
19	L120x12	328	300x285x25	M27	820	85	95	60	20	265	3880
20	L120x12	328	300x285x25	M27	820	85	95	60	20	265	3880



Tab. 5-1 Versuchsdaten für Zwei- Schrauben- Verbindungen aus [7]

Anmerkung: Keine Dokumentation von Stabimperfektionen in [7].

Der Tab. 5-2 sind die Abmessung des betrachteten und nachgerechneten Versuches mit Schweißnahtverbindung aus [7] zu entnehmen.

Nr.	Profil	Streckgrenze	Anschlußblech h x b x t	e ₂	b ₁	b ₂	L	Profillänge
	[mm]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
21	L80x8	480	300x265x25	45	20	245	1280	1200
22	L80x8	480	300x265x25	45	20	245	1280	1200
25	L80x8	480	300x265x15	45	20	245	2880	2800
26	L80x8	480	300x265x15	45	20	245	2880	2800
27	L120x12	328	300x285x15	60	20	265	2880	2800
28	L120x12	328	300x285x15	60	20	265	2880	2800
31	L120x80x12L	310	300x285x25	60	20	265	1280	1200
32	L120x80x12L	310	300x285x25	60	20	265	1280	1200
33	L120x80x12K	310	300x285x25	40	20	265	1280	1200
34	L120x80x12K	310	300x285x25	40	20	265	1280	1200
36	L120x80x12L	310	300x285x25	60	45	240	2880	2750
37	L120x80x12K	310	300x285x25	40	45	240	2880	2750
38	L120x80x12K	310	300x285x25	40	45	240	2880	2750

Tab. 5-2 Versuchsdaten für geschweißte Verbindungen aus [7]

Anmerkung: Keine Dokumentation von Stabimperfektionen in [7].

5.3 Kalibrierung der FE-Modelle zu den Versuchen

Die Kalibrierung der im Rahmen dieser Arbeit erstellten FE- Modelle erfolgte anhand der Versuche Nr. 7 (Zwei-Schrauben-Anschluss) und Nr. 27 (geschweißter Anschluss). Im ersten Schritt wurden numerische Berechnungen ohne Berücksichtigung einer geometrischen Ersatzimperfektion durchgeführt, welche den Ergebnissen der Traglastberechnungen aus [7] gegenübergestellt wurden. Im zweiten Schritt wurden ergänzende Berechnungen mit Berücksichtigung einer geometrischen Ersatzimperfektion, deren Größe variiert wurde, durchgeführt. Mit der sogenannten RIKS- Methode lässt sich das Tragverhalten auch nach dem Erreichen der maximalen Traglast simulieren. Die Ergebnisse wurden an den entsprechenden Messstellen ausgewertet und mit den Ergebnissen der realen Bauteilversuche aus [7] verglichen. Somit konnte das Verformungsverhalten der Modelle in Abaqus auf Plausibilität überprüft werden. Die Größe der angesetzten Vorkrümmung wurde so lange variiert, bis die erreichte Traglast der numerischen Simulation ausreichend genau mit der Traglast aus den Versuchen aus [7] übereinstimmt.

Die Abb. 5-4 zeigt die Anordnung der Messstellen aus [7]. Mit dem Wegaufnehmer 1 konnte die Längenänderung innerhalb der Lasteinleitungsplatten gemessen werden. Mithilfe der Wegaufnehmer 2 und 3 wurde das räumliche Ausknicken in Winkelmitte festgehalten. Die Wegaufnehmer 4 bzw. 5 geben Auskunft über die Verformung der Anschlussbleche. Mit den Wegaufnehmern 6 und 7 konnte der auftretende Schlupf zwischen Winkelprofil und Anschlussblech gemessen werden.

In dieser Arbeit wurden die Verschiebungen aus den numerischen Berechnungen an den Messstellen 2, 3 und 4 ausgewertet und mit den Versuchsergebnissen aus [7] verglichen.

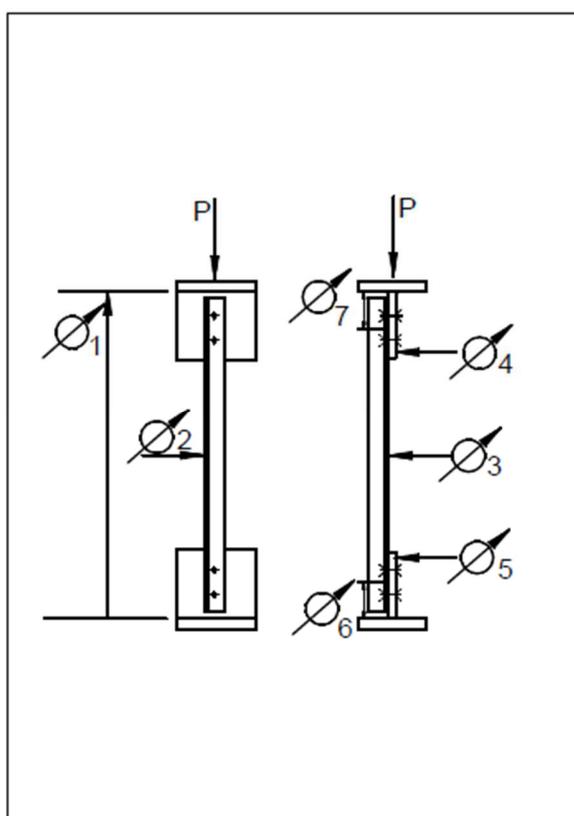


Abb. 5-4 Anordnung der Messstellen aus [7]

Die Achsenbezeichnungen für dieses Kapitel 5 wurden aus [7] übernommen und sind in Abb.5-5 erkennbar. Die η -Achse bezeichnet jene Achse, welche parallel zum angeschlossenen Winkel verläuft. Die ξ -Achse steht normal dazu.

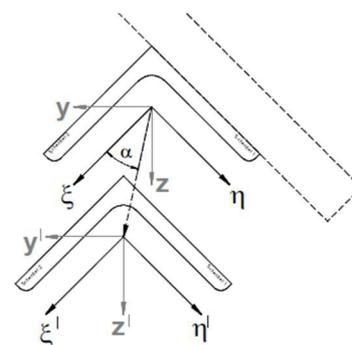


Abb.5-5 Achsenbezeichnungen aus [7]

5.3.1 FEM-Nachrechnung von Versuch Nr. 7 mit beidseitigen Schraubanschluss

a) Anpassung ohne Imperfektionen mit numerischer Berechnung aus [7]

Zur Anpassung des Versuches Nr. 7 wurde das FE- Modell so weit modifiziert, bis eine gute Übereinstimmung der maximalen Traglast aus Abaqus mit der numerischen Berechnung ohne Vorkrümmung nach [7] erreicht werden konnte. Folgende Modifikationen waren erforderlich. Es musste ein Reibungskoeffizient von mindestens $\mu = 0,75$ zwischen den Winkelschenkel und Anschlussblech angesetzt werden. Weiters musste das FE- „Mesh“ im Bereich des Anschlusses verfeinert werden.

Die Abb. 5-6 zeigt das Traglast- Verformungsdiagramm aus der eigenen numerischen Berechnung an den Messstellen 3 und 4, welche sich in Winkelmitte befinden. Wie zu erkennen ist, stellt sich bei einer maximalen Traglast von 270,7 kN die größte Verformung (27,7 mm) in Richtung der ξ -Achse ein. Im Gegensatz dazu, ist die in η -Richtung aufgetretene Verformung mit 7,4 mm wesentlich kleiner. Dies ist leicht erklärbar durch die dominante Biegebeanspruchung M_η , bedingt durch die Lasteinleitung an einem Winkelschenkel.

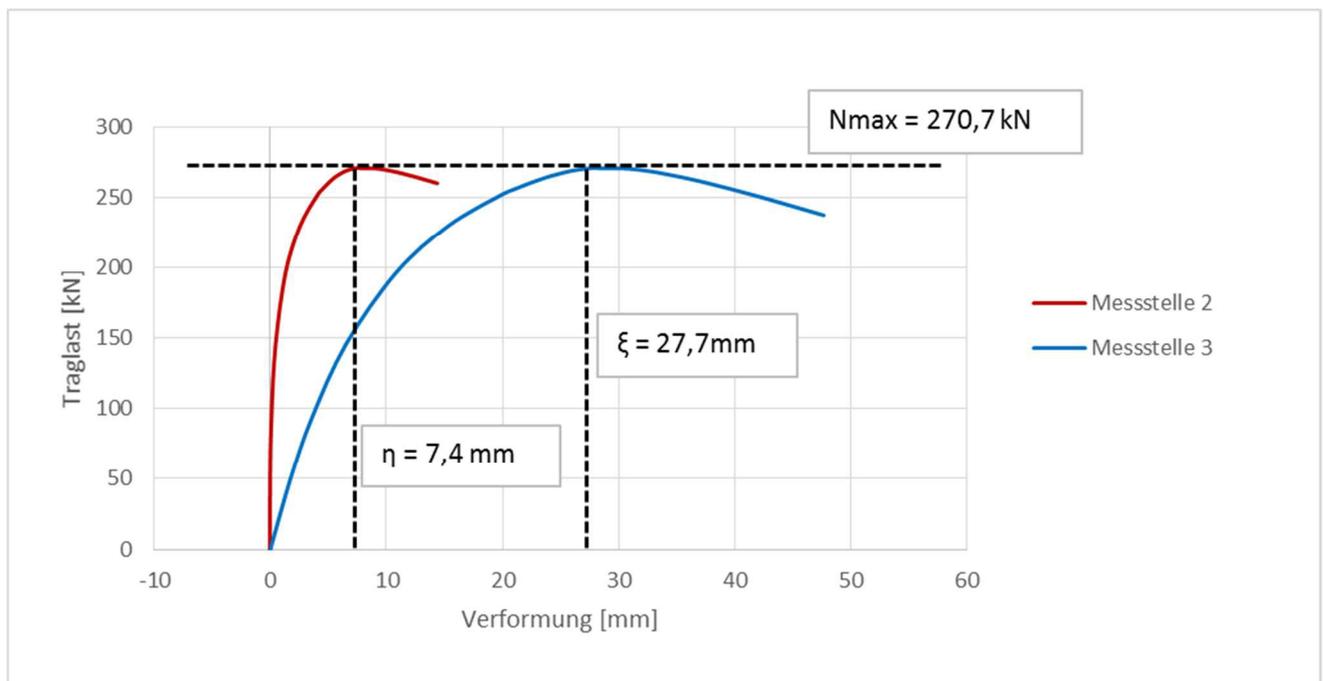


Abb. 5-6 Traglast- Verformungsdiagramm für die Nachrechnung von Versuch Nr. 7 ohne Berücksichtigung einer Vorkrümmung

Zum Vergleich betrug die maximale Traglast aus der numerischen Berechnung ohne Vorkrümmung aus [7] **270,9 kN**.

b) FEM- Nachrechnung des Versuches aus [7]

Im zweiten Schritt erfolgte die Gegenüberstellung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten FEM-Berechnungen, unter Berücksichtigung einer zutreffenden geometrischen Ersatzimperfektion, mit den Versuchsergebnissen aus [7]. Für eine angenommene Imperfektionsamplitude von $e_0 = 4,25$ mm, dies entspricht $L / 678$, ergab sich eine maximal aufnehmbare Druckkraft von $N_{\max} = 239,9$ kN. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Versuchsergebnis von $N_{\max, \text{Test}} = 236,6$ kN (siehe Abb. 5-8) überein. Abb. 5-7 zeigt, dass auch hier die größte Verformung des Winkels in Richtung der ξ -Achse auftritt. Bei Erreichen der maximalen Traglast beläuft sich die in dieser Achse auftretende Verformung auf 30,06 mm. Die in Richtung der η -Achse auftretende Verformung ist mit 9,14 mm deutlich geringer. Das Ausknicken des Winkels erfolgt somit hauptsächlich um die η -Achse, welche parallel zum Anschlussblech verläuft.

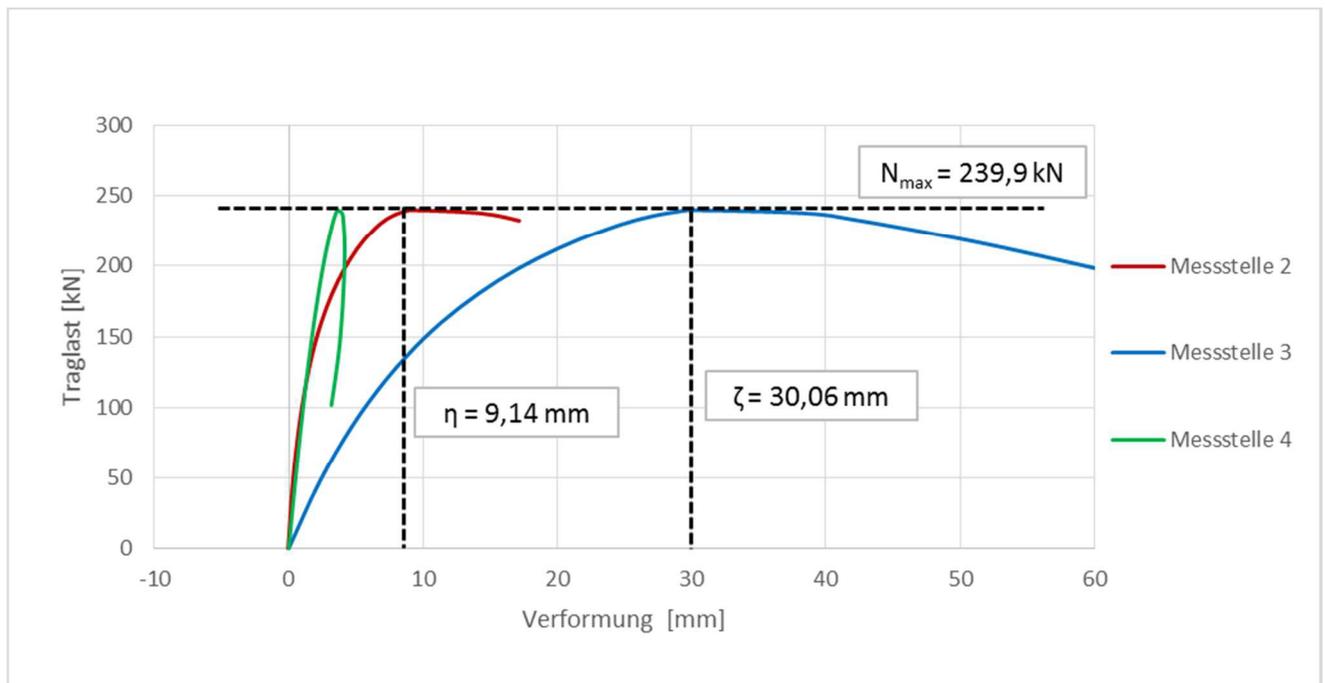


Abb. 5-7 Traglast- Verformungsdiagramm für die FEM- Nachrechnung von Versuch Nr. 7 mit Berücksichtigung einer Vorkrümmung

Der Abb. 5-8 sind zum Vergleich die Ergebnisse aus [7] für den Versuch Nr. 7 zu entnehmen.

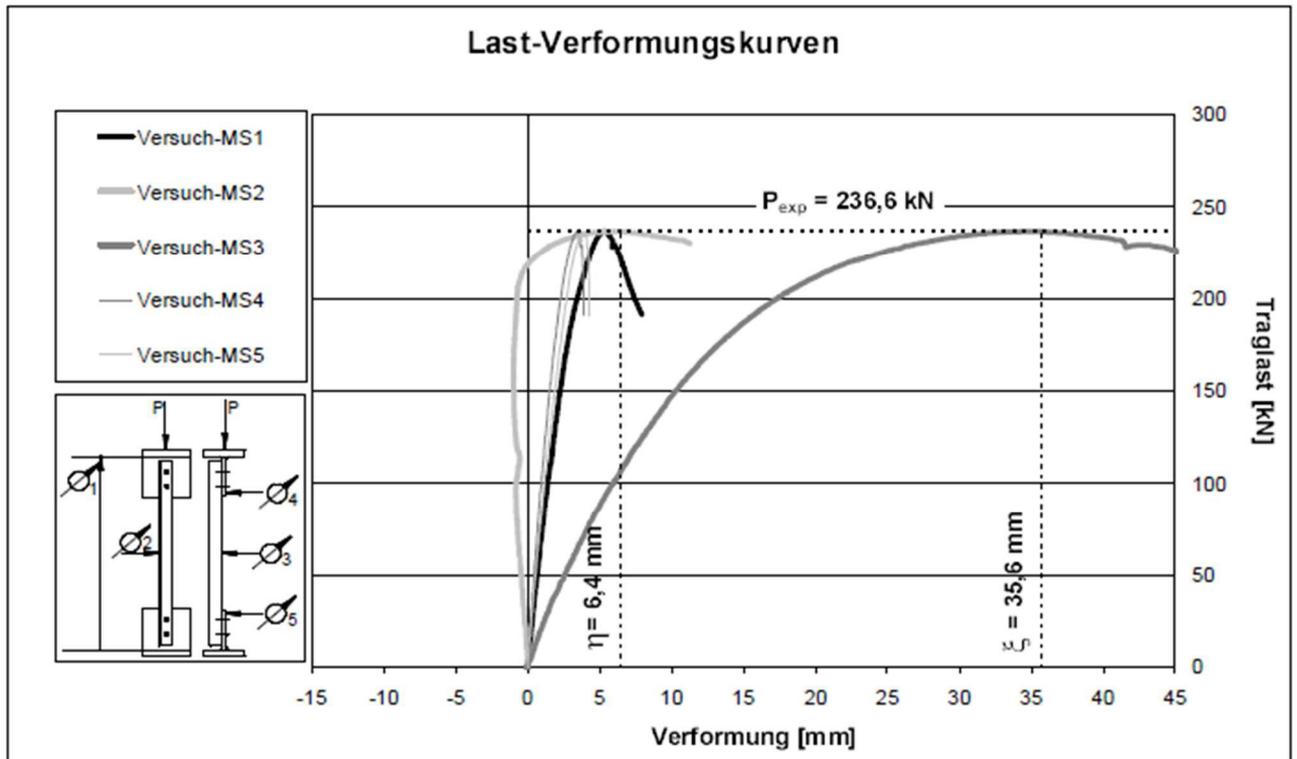


Abb. 5-8 Traglast- Verformungsdiagramm für Versuch Nr. 7 aus [7]

5.3.2 FEM- Nachrechnung von Versuch Nr. 27 mit geschweißtem Anschluss

a) Anpassung ohne Imperfektionen mit numerischer Berechnung aus [7]

Zur Anpassung eines weiteren Modells in Abaqus wurde der Versuch Nr. 27 mit geschweißtem Anschluss betrachtet. Auch in diesem Fall wurde das FE- Modell so lange modifiziert, bis eine gute Übereinstimmung der Traglast aus Abaqus, mit der numerischen Berechnung ohne Imperfektion nach [7] erreicht werden konnte. Es musste auch für dieses Modell ein Reibungskoeffizient von mindestens $\mu = 0,75$ zwischen den Winkelschenkel und Anschlussblech angesetzt werden. Weiters musste das FE- „Mesh“ im Bereich des Anschlusses verfeinert werden.

Die Abb. 5-9 zeigt das erhaltene Traglast- Verformungsdiagramm aus der numerischen Berechnung, ausgewertet an den Messstellen 3 und 4, welche sich in Winkelmitte befinden. Wie zu erkennen ist, stellt sich bei einer maximalen Traglast von 402,35 kN die größte Verformung (26,93 mm) in Richtung der ξ -Achse ein. Im Gegensatz dazu treten, bis zum Erreichen der maximalen Traglast, beinahe keine Verformungen in η -Richtung auf.

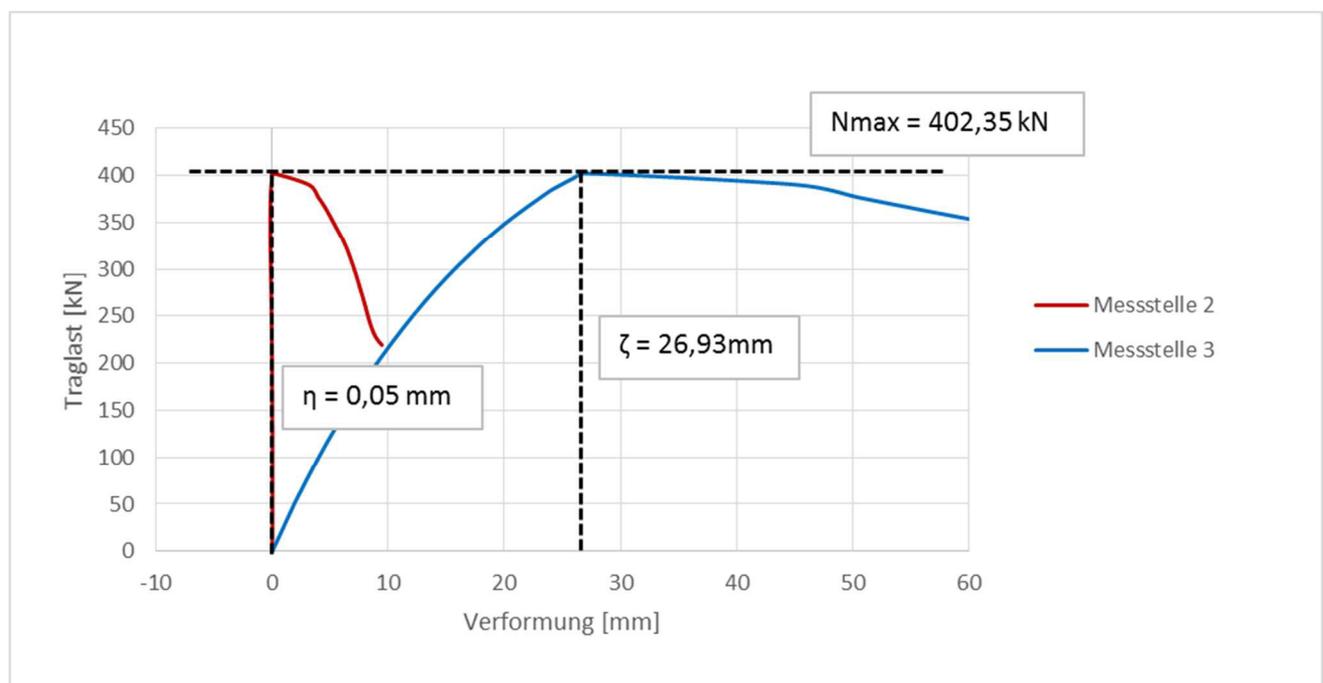


Abb. 5-9 Traglast- Verformungsdiagramm für die Nachrechnung von Versuch Nr. 27 ohne Berücksichtigung einer Vorkrümmung

Zum Vergleich betrug die maximale Traglast aus der numerischen Berechnung ohne Vorkrümmung nach [7] **413,0 kN**.

b) FEM- Nachrechnung des Versuches aus [7]

Im zweiten Schritt erfolgte der Vergleich, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten FEM-Berechnungen, unter Berücksichtigung einer zutreffenden geometrischen Ersatzimperfektion, mit den Versuchsergebnissen aus [7]. Für eine gewählte Ersatzimperfektion von $e_0 = 8,0$ mm, dies

entspricht $L / 360$, ergab sich eine maximal aufnehmbare Druckkraft von $N_{\max} = 368,75 \text{ kN}$. Dies stimmt gut überein mit der Versuchslast $N_{\max, \text{Test}} = 372,9 \text{ kN}$ (siehe Abb. 5-11). Die Abb. 5-10 zeigt, dass auch hier die primäre Verformung des Winkels in Richtung der ξ -Achse eintritt. Bei Erreichen der maximalen Traglast beläuft sich die in dieser Achse auftretende Verformung auf $30,52 \text{ mm}$. Die in Richtung der η -Achse auftretende Verformung ist auch mit der Berücksichtigung einer Vorkrümmung minimal. Das Ausknicken des Winkels erfolgt somit um die η -Achse, welche parallel zum Anschlussblech verläuft.

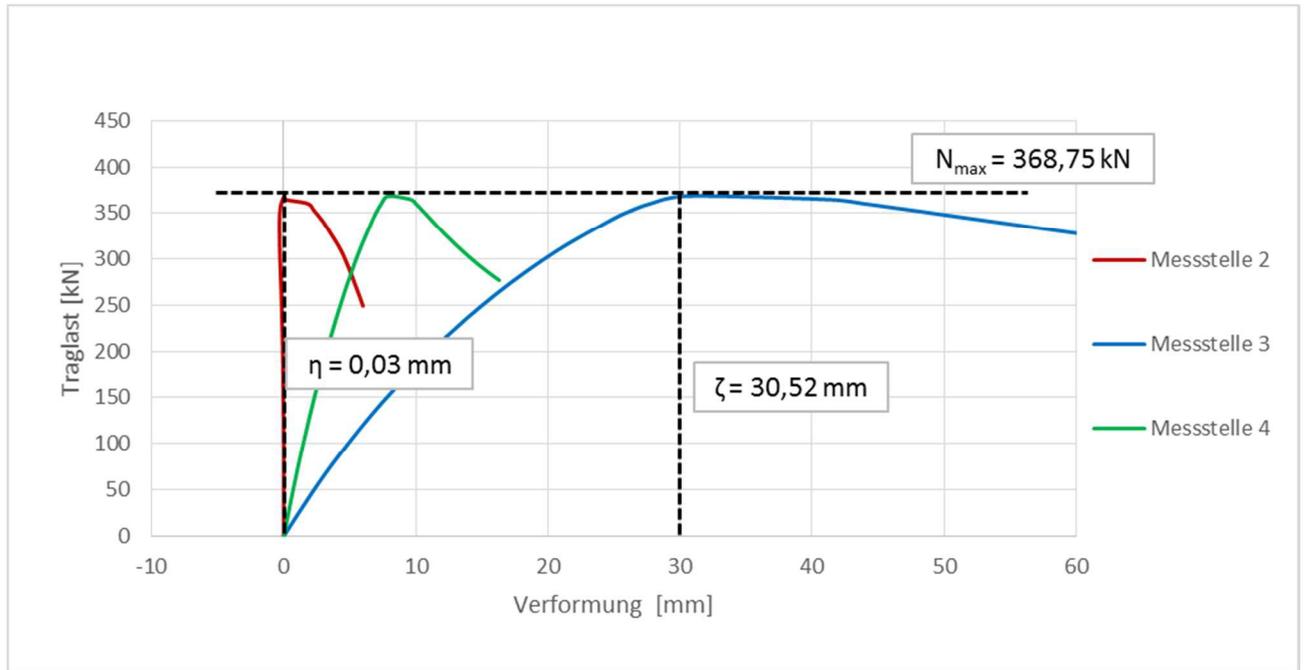


Abb. 5-10 Traglast- Verformungsdiagramm für die Nachrechnung von Versuch Nr. 27 mit Berücksichtigung einer Vorkrümmung

Der Abb. 5-11 sind zum Vergleich die Ergebnisse aus [7] für den Versuch Nr. 27 zu entnehmen.

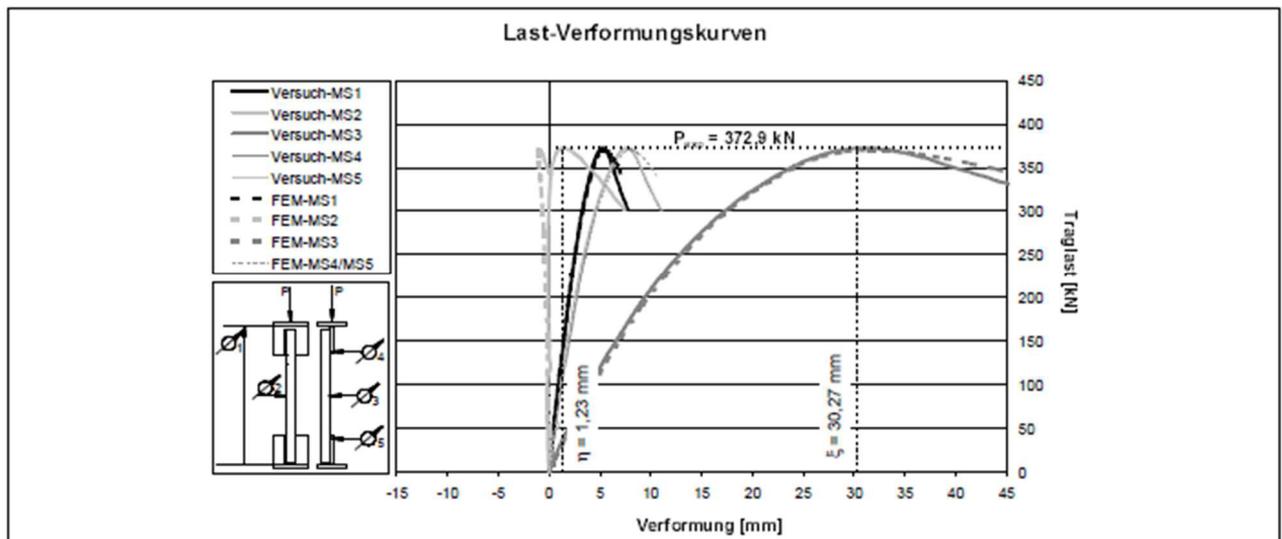


Abb. 5-11 Traglast- Verformungsdiagramm für Versuch Nr. 27 aus [7]

5.3.3 Zusammenfassung

Anhand der numerischen FEM-Nachbildung der Versuche Nr. 7 und Nr. 27 ist zu erkennen, dass mit den angepassten geometrischen Ersatzimperfectionen von $e_0 = 4,25 \text{ mm}$ ($L / 678$) und $e_0 = 8,00 \text{ mm}$ ($L / 360$) gute Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen aus [7] erreicht werden konnten. Beide Winkelprofile knicken hauptsächlich um die, parallel zum Anschlussblech verlaufende, η -Achse aus, wobei beim Versuch Nr. 7 mit geschraubten Anschluss, auch eine Verformung normal dazu erkennbar ist. Im Gegensatz dazu, ergibt sich für das Winkelprofil mit geschweißtem Anschluss keine relevante Verformung in Richtung der η -Achse.

Des Weiteren kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die Größe der zutreffenden anzusetzenden Imperfektion, anhand dieser beiden Versuche, nicht einheitlich ableiten lässt. Damit ähnliche Traglasten und Verschiebungen wie bei den Versuchen aus [7] erreicht werden können, unterscheiden sich die dafür aufgebrachten Vorkrümmungen bei identer Stablänge (mit $e_0 = 4,25 \text{ mm}$ für Versuch Nr.7 und mit $e_0 = 8,0 \text{ mm}$ für Nr. 27) zu stark.

Es ist somit nicht möglich, einen Richtwert für ein allgemein gültiges L/e_0 -Verhältnis anzugeben, alleine aus der Rückrechnung dieser beiden Versuche.

5.4 Vergleich unterschiedlicher geom. Ersatzimperfectionen

Um allgemeine Aussagen über die zutreffende Größe der anzusetzenden Imperfectionen treffen zu können, mussten weitere Vergleiche mit den numerischen Berechnungen und Versuchen aus [7] angestellt werden. Dazu wurden sechs unterschiedliche Versuchskonfigurationen aus [7] für Winkelprofile mit Zwei-Schrauben-Verbindungen in Abaqus nachmodelliert (vgl. Tab. 5-1). Die Traglastberechnungen wurden mit den Vorkrümmungen $e_0 = L/300$ bzw. $e_0 = L/500$ durchgeführt. Die Imperfektionsform ergab sich wieder aus der vorgeschalteten LBA- Analyse. Zusätzlich wurde eine, zur ersten Eigenform der Winkelprofile entgegengesetzte, Vorimperfektion von $e_0 = -L/500$ berücksichtigt.

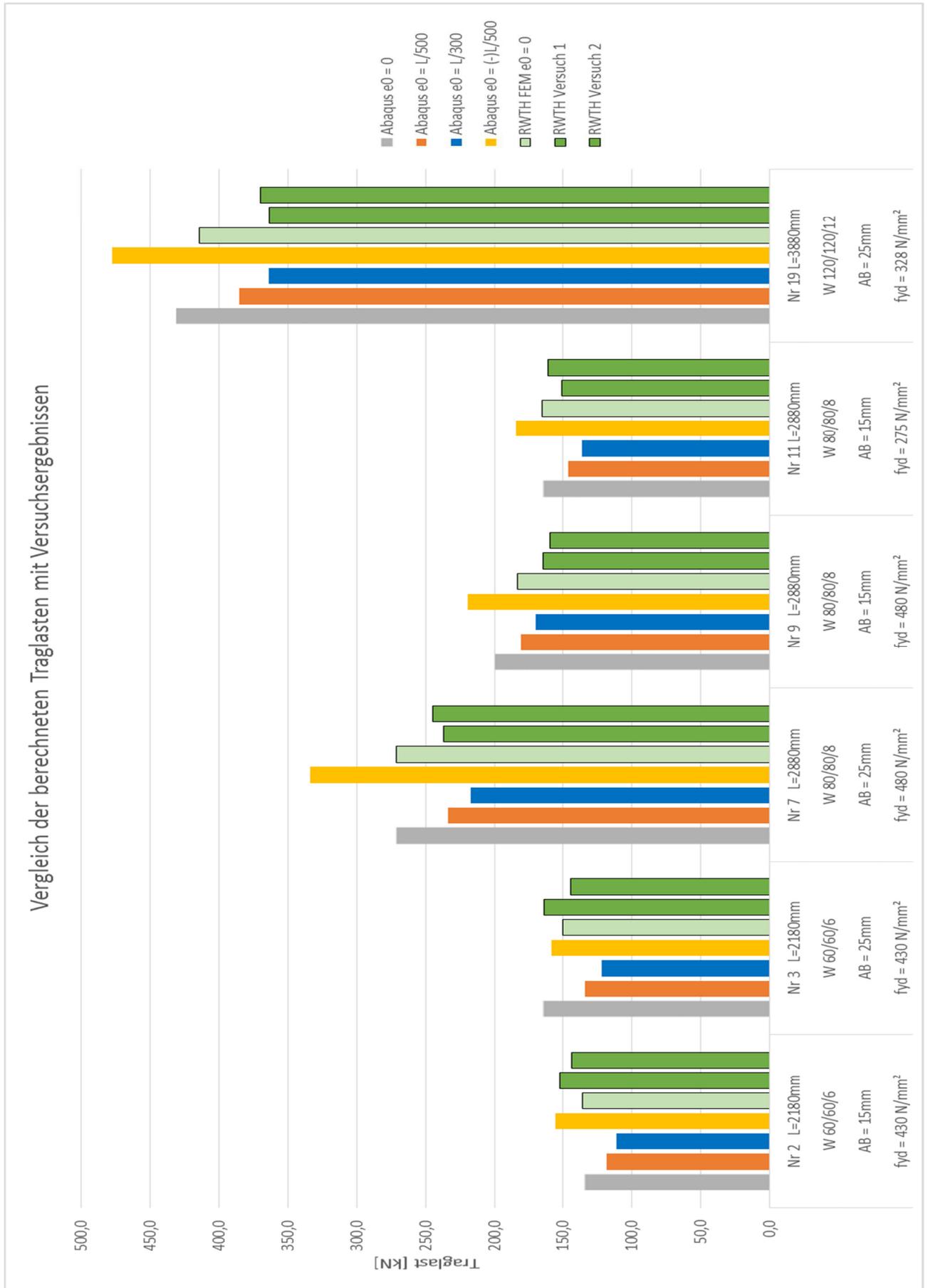


Abb. 5-12 FEM- Nachrechnung von ausgewählten Versuchen mit Zwei-Schrauben- Anschluss [7]-
Vergleich unterschiedlicher geometrischer Ersatzimperfektionen

In Abb. 5-12 sind die Traglastergebnisse der nachmodellierten Versuche, im Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus [7], gut zu erkennen. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Tragfähigkeiten aus Abaqus und den numerischen Berechnungen aus [7], ohne Berücksichtigung einer Vorkrümmung, erreicht werden. Des Weiteren stimmen die berechneten Traglasten, unter Berücksichtigung einer Vorimperfektion von $e_0 = L/300$, ausreichend genau mit den experimentell bestimmten Traglasten aus [7] überein, oder liegen zumindest auf der sicheren Seite.

Eine Ausnahme bilden die Versuche Nr. 2 und Nr. 3, wo die numerisch berechneten Traglasten (mit $e_0 = L/300$) deutlich unter den experimentell bestimmten Traglasten aus [7] liegen. Bei diesen beiden Versuchskonfigurationen konnte, mit einer der ersten Eigenform entgegengesetzten Vorimperfektion von $e_0 = -L/500$, eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erreicht werden. Dieses Ergebnis wird auch von den numerischen Berechnungen mit Berücksichtigung einer Vorimperfektion aus [7] bestätigt. In [7] wurde gleichermaßen mit einer entgegengesetzten Vorimperfektion von $e_0 = -L/500$ die beste Übereinstimmung mit diesen Versuchsergebnissen erreicht. Dies deutet auf günstigere geometrische Imperfektionen dieser Prüfkörper hin. Bedauerlicherweise liegen diesbezüglich keine Messwerte in [7] vor.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus Abb. 5-12 ist detailliert der Tab. 5-3 zu entnehmen:

max. Traglast in [kN]							
Versuchsnr.	aus Abaqus				RWTH Berechnung	RWTH Versuch	
	$e_0 = 0$	$e_0 = L/500$	$e_0 = L/300$	$e_0 = -L/500$	$e_0 = 0$	-	-
2	134,0	118,6	111,0	155,9	136,0	152,5	144,0
3	164,0	134,5	122,2	158,4	150,3	164,1	144,6
7	270,7	233,6	217,1	333,7	270,9	236,6	245,0
9	199,0	180,5	170,0	219,6	183,3	164,4	159,7
11	164,0	146,1	136,4	184,1	165,6	151,2	160,7
19	430,0	385,5	364,0	477,3	414,6	363,2	370,1

Tab. 5-3 Zusammenfassung der Traglasten für die betrachteten Versuche aus [7]

Im Allgemeinen konnte mit einer gewählten geometrischen Ersatzimperfektion von $e_0 = L/300$ eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aus [7] erreicht werden.

Auf Basis der durchgeführten numerischen Simulationen an zentrisch belasteten Profilen (siehe Kapitel 4), wie auch an exzentrisch angeschlossenen Profilen, ist somit eine anzusetzende geometrische Ersatzimperfektion in der Größenordnung von $e_0 = L/300$ zu empfehlen.

6

6 Numerisch ermittelte Knickspannungskurven für Zwei-Schrauben-Anschlüsse

6.1 Allgemein

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Tragfähigkeit von exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen anhand von numerischen Simulationen zu untersuchen und mit den Ergebnissen aus den betrachteten Normen zu vergleichen. In diesem Kapitel werden Ausführungen mit beidseitigen Zwei-Schrauben-Verbindungen für drei unterschiedliche Winkelprofile betrachtet. Die Modellierung des Anschlusses erfolgte für zwei Grenzfälle des Verhaltens, einerseits mit unverformbarem Anschlussblech. Dies entspricht dem Fall einer Einspannung. Für den zweiten Fall wurde ein gelenkiger Anschluss nachgebildet, das heißt mit verformbarem Abschlussblech.

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht, die entsprechenden Traglasten durch die Wahl einer geeigneten Knicklänge für die jeweiligen Anschlussbedingungen, mit einem einfachen Knicknachweis auf Basis der Normen wiederzugeben.

Um geometrische Ersatzimperfektionen berücksichtigen zu können, mussten im ersten Schritt Lineare-Beul-Analysen durchgeführt werden, wodurch die ersten Eigenformen der Einzelwinkel mit den zugehörigen Knicklasten bestimmt wurden. Im zweiten Schritt wurden geometrisch, sowie materiell nichtlineare Traglastberechnungen mit Berücksichtigung von Imperfektionen durchgeführt (GMNIA). Die Größe der geometrischen Ersatzimperfektion wurde auf Basis der Untersuchungen aus Kapitel 4 und Kapitel 5 mit $e_0 = L/300$ gewählt.

Die Schraubenverbindungen wurden, wie schon in Kapitel 3 erläutert, vorgespannt ausgeführt. Dafür musste zu Beginn der numerischen Simulation die Aufbringung einer Vorspannkraft an den Schrauben erfolgen. Die Größe der Vorspannkraft hängt dabei von Schraubengüte und Schraubendurchmesser der verwendeten Schrauben ab. Die Bestimmung der Vorspannkraft erfolgte wie in Abschnitt 3.5 beschrieben. Es wurden dabei hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet ($f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$).

6.2 Anschluss mit starrer Stirnplatte

6.2.1 Zutreffendes FEM- Modell

Die Untersuchung von Zwei-Schrauben-Verbindungen mit unverformbaren Anschlussblech erfolgte für drei verschiedene Winkelprofile (L60x6, L80x8, L120x12), wobei für jedes Profil die Längen dahingehend variiert wurden, dass ein Schlankheitsbereich von ca. $\bar{\lambda}_v = 0,5$ bis 3,0 abgedeckt werden konnte.

Für das FE-Modell wurde, wie bereits im Kapitel 3 erläutert, eine Kombination aus Volumenelementen und Schalenelementen verwendet, um den Rechenaufwand möglichst zu minimieren. Die einzelnen Bauelemente wie Schrauben, Knotenbleche, Anschlussbleche und die Winkelenden im Bereich des Anschlusses wurden mit Volumenelementen des Typs „C3D8R“ modelliert. Die Modellierung des mittleren Abschnittes des Winkelprofils erfolgte mit Schalenelementen vom Typ „S4R“. Die Verbindung der drei so modellierten Stabteile erfolgte mittels einer sogenannten „Shell to solid Coupling“. Um den Umstand eines starr gelagerten Anschlussbleches zu berücksichtigen, erfolgte die Lagerung des Bauteils in der Mitte der Stirnplatte, die starr mit dem Anschlussblech verbunden ist. Als Randbedingungen wurden alle Verdrehungen sowie Verschiebungen im Auflagerpunkt gesperrt, mit Ausnahme der Verschiebung in Längsrichtung des Winkels auf der Seite der Lasteinleitung. Somit liegen an beiden Seiten Enden starre Stirnplatten vor. Zur Durchführung der Traglastberechnungen, mit Berücksichtigung einer Vorkrümmung, wurden im ersten Schritt Lineare- Beul- Analysen (LBA) durchgeführt, um für die betrachteten Längen die erste globale Eigenform und die zugehörige Knicklast zu erhalten.

Mit den Ergebnissen aus den LBA-Analysen war es möglich, auf Basis der ersten Eigenform eine geometrische Ersatzimperfektion für die Traglastberechnungen anzusetzen. Der Stich der Vorkrümmung wurde mit $e_0 = L_{sys}/300$ gewählt. In Abb. 6-1 ist beispielhaft das FEM-Modell für den Winkel L80x8 ($L_{sys} = 184$ cm) mit einer Zwei-Schrauben-Verbindung und starrer Stirnplatte zu erkennen.

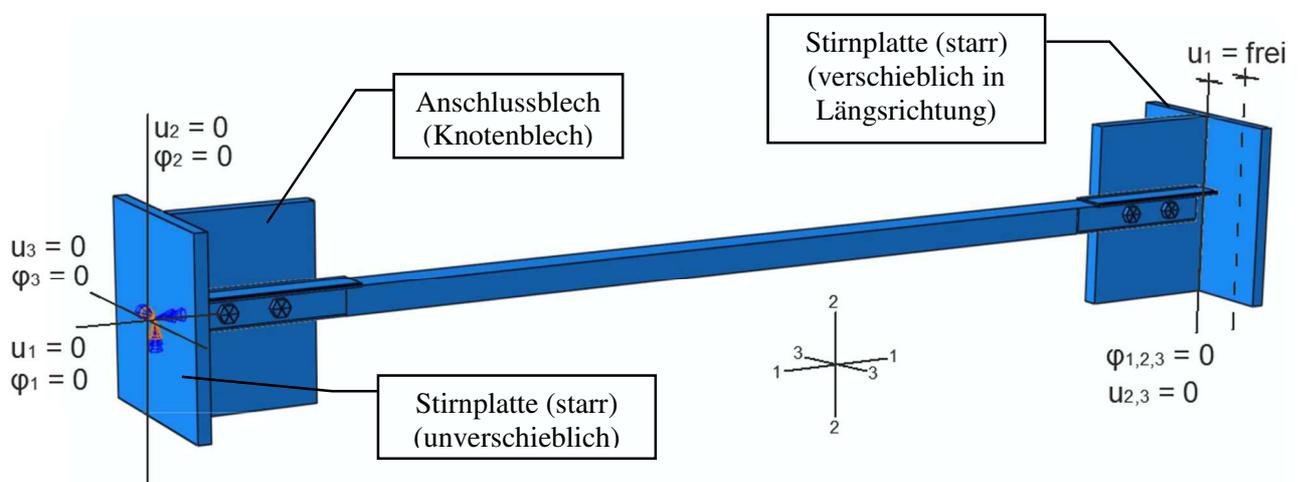


Abb. 6-1 FEM- Modell für das Winkelprofil L80x8 mit beidseitiger Zwei- Schrauben- Verbindung und unverformbarem Anschlussblech

Der Abb. 6-2 ist die Definition der Systemlänge L_{sys} für Zwei-Schrauben-Verbindungen zu entnehmen.

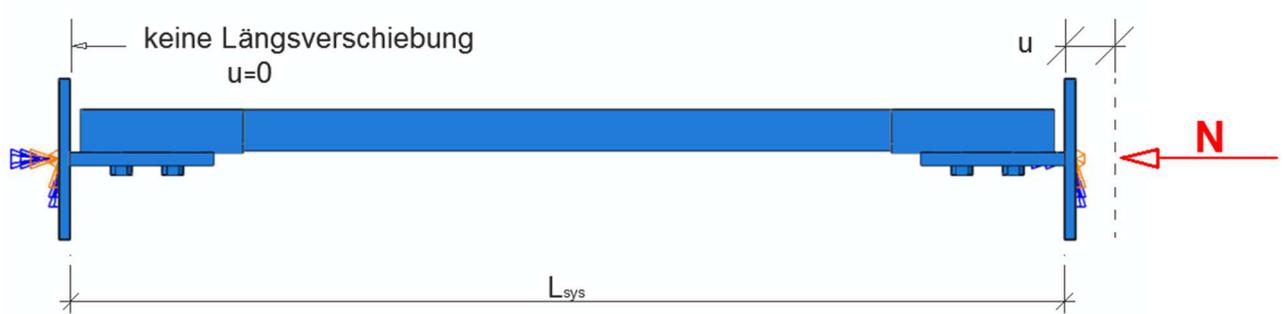


Abb. 6-2 Definition der Systemlänge für ein Profil mit Zwei-Schrauben-Anschluss und steif gelagerten Anschlussblech

In Abb. 6-3 ist beispielhaft die erste Eigenform aus der LBA- Analyse für ein Winkelprofil L80x8 zu erkennen.

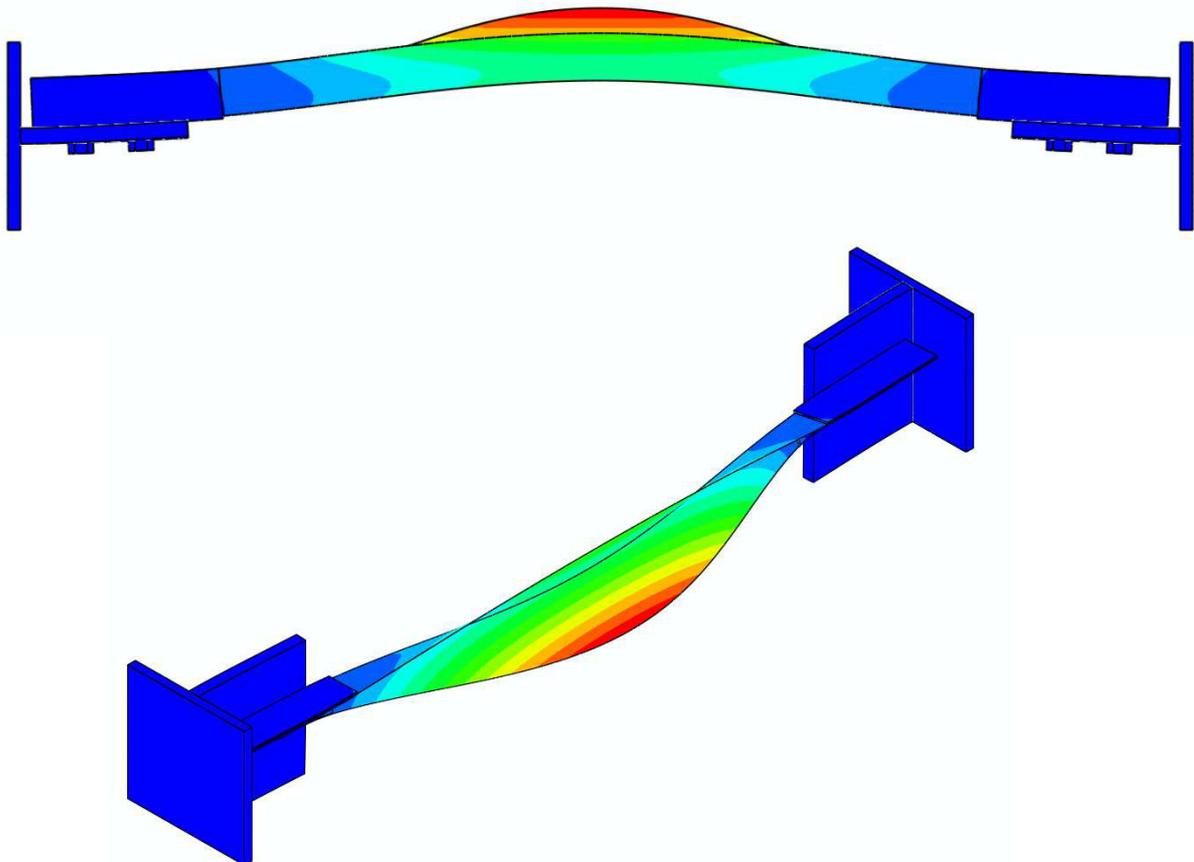


Abb. 6-3 Darstellung der ersten Eigenform für das Winkelprofil L80x8 mit einer Systemlänge von 184 cm

6.2.2 Ergebnisse für Winkelprofil L60x6

Die Tab. 6-1 enthält die Querschnittswerte des untersuchten Winkelprofils L60x6:

A	6,909 cm ²	I _v (Minimumsachse)	9,441 cm ⁴
i _v	1,169 cm	W _v	3,956 cm ³
i _y	1,820 cm	f _y	430 N/mm ²
N _{pl} = A * f _y	297,09 kN	E	210 000 N/mm ²

Tab. 6-1 Querschnittsdaten für das Winkelprofil L60x6

Die Abmessungen des modellierten Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L60x6 sind der Abb. 6-4 zu entnehmen. Die verwendeten Schrauben des Typs M16, 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 110\text{kN}$ vorgespannt. Die Stärke des Anschlussbleches wurde mit 25 mm gewählt.

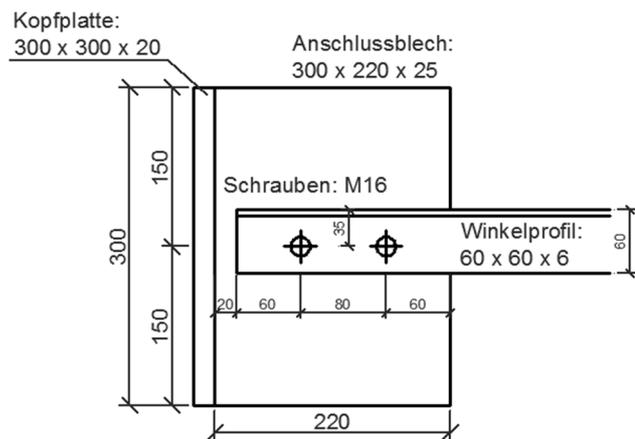


Abb. 6-4 Anschlussdetail für den Winkel L60x6 mit Zwei-Schrauben-Verbindung

Der Tab. 6-2 sind die untersuchten

Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen zu entnehmen. Die sich daraus ergebende Schlankheit $\bar{\lambda}$ ist den maßgebenden effektiven Schlankheiten, entsprechend den betrachteten Normen (vgl. Abschnitt 2.3), gegenübergestellt. Die Knicklänge für die Normenrechnungen wurde mit $L_{cr} = L_{sys} / 2$ gewählt, um dem Umstand des starren Stirnplattenanschlusses Rechnung zu tragen.

Die zutreffende Schlankheit für diese Anschlussausbildung konnte aus den numerischen Berechnungen mit: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}}$ bestimmt werden.

L _{sys} [cm]	Normen: L _{cr} = L _{sys} / 2	N _{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
94	47	675,10	0,66	0,76	0,76	0,79	0,77	0,95
124	62	583,60	0,71	0,88	0,88	0,93	0,85	1,02
154	77	479,22	0,79	1,01	1,01	1,06	0,95	1,11
184	92	337,90	0,94	1,14	1,14	1,20	1,07	1,23
214	107	235,01	1,12	1,27	1,27	1,34	1,20	1,35
244	122	176,60	1,30	1,40	1,40	1,47	1,32	1,47
274	137	135,50	1,48	1,53	1,53	1,59	1,45	1,59
304	152	107,10	1,67	1,66	1,66	1,71	1,57	1,71
334	167	86,80	1,85	1,79	1,79	1,83	1,70	1,83

Tab. 6-2 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L60x6 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Lagerung mit Normenregelung

Für die Berechnung der effektiven Schlankheiten auf Basis der Normen mussten sowohl die effektive Schlankheit um die Minimumsachse (v - Achse), als auch die zugehörige effektive Schlankheit des Profils für Ausweichen um die y - Achse berücksichtigt werden. Die Umrechnung der Schlankheiten erfolgte dabei mit dem Faktor 1,55, was dem Verhältnis der Trägheitsradien entspricht ($i_y / i_v = 1,82/1,169 = 1,55$). In der Tab. 6-2 ist immer der maßgebende Fall angegeben, das heißt die größere Schlankheit ($\bar{\lambda}_{eff,v}$ oder $\bar{\lambda}_{eff,y}$)

Die Ergebnisse aus den numerischen Traglastberechnungen (GMNIA) sind in Abb. 6-5 ersichtlich. Es ist dabei der Abminderungsfaktor, bezogen auf die Systemlänge aufgetragen. Der Abminderungsfaktor χ beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen Tragfähigkeit, bezogen auf die plastische Normalkrafttragfähigkeit des Querschnittes ($\chi = N_{R,FEM} / N_{pl}$). Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Stabilitätsnachweise auf Basis der betrachteten Normen für die in Tab. 6-2 ausgewiesenen maßgeblichen Schlankheiten $\bar{\lambda}$ und den zutreffenden Knickspannungslinien nach Abschnitt 2.3 aufgetragen. Die Normenrechnungen wurden wie bereits erwähnt mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$ durchgeführt. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft sowie die Abscherkraft des Zwei-Schrauben-Anschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind ergänzend am Ende dieses Abschnittes angeführt.

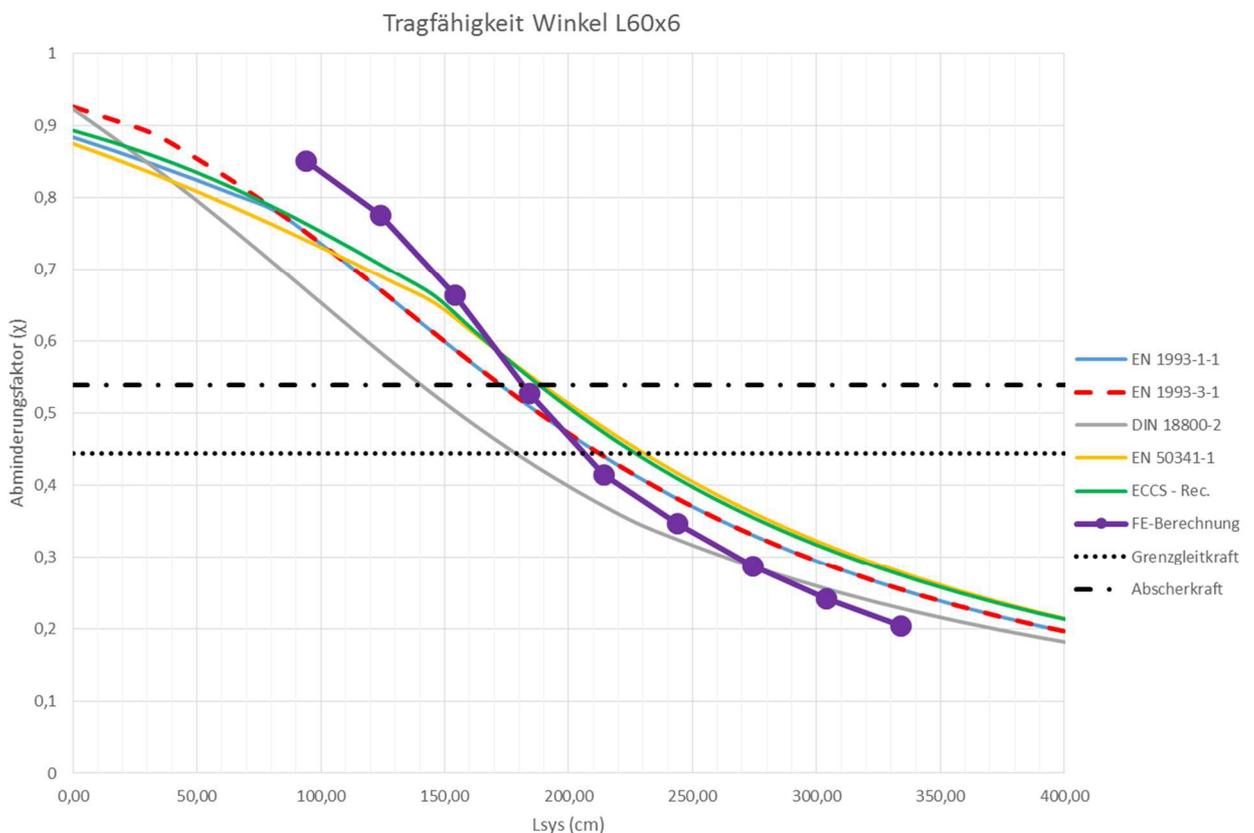


Abb. 6-5 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L60x6 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte

Wie in Abb. 6-5 zu erkennen ist, liefern die betrachteten Normen bis zu einer Systemlänge von 160 cm deutlich konservativere Tragfähigkeiten im Vergleich zu den Ergebnissen der FE-Simulationen. Ab dieser Systemlänge fällt die Kurve mit den Ergebnissen aus den FE-Berechnungen deutlich steiler ab, als die Tragfähigkeitskurven der Normen. Ab einer Systemlänge von ca. 275 cm liegen die Tragfähigkeiten aus den FE-Berechnungen sogar unterhalb der konservativsten Norm, welche die DIN 18800-2[3] darstellt.

Tab. 6-3 enthält eine Zusammenfassung der max. Traglasten für die betrachteten Längen.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
94	253,0	223,29	223,29	199,33	220,15	226,94
124	230,7	199,36	199,36	173,64	205,25	210,04
154	197,5	174,73	174,73	149,61	187,82	189,57
184	156,8	151,45	151,45	128,38	164,27	163,44
214	123,2	130,80	130,80	110,32	142,64	140,64
244	102,9	113,14	113,14	96,30	123,72	121,51
274	85,2	98,31	98,31	85,26	107,61	105,66
304	71,7	85,94	85,94	75,86	94,06	92,53
334	60,5	75,60	75,60	67,83	82,69	81,61

Tab. 6-3 Winkelprofil L60x6 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Stirnplatte; Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

Ergänzung: Bestimmung Grenzgleitkraft und Abscherkraft für Schrauben des Typs M16, Güte 10.9 (EN 1993-1-8) für Zwei-Schrauben-Anschlüsse

- Grenzgleitkraft $F_{s,Rd}$ vorgespannter hochfester Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{s,Rd} = \frac{F_{s,Rk}}{\gamma_{m3}}$$

mit: $\gamma_{m3} = 1,25$ (Kat. C)

$$F_{s,Rk} = k_s * n * \mu * F_{p,c}$$

mit: $k_s = 1,0$ (Beiwert für Lochspiel)

für 2 Schrauben: $F_{s,Rk} * 2$

$n = 1,0$ (Anzahl der Gleitfugen)

$$F_{s,Rd} = 132 \text{ kN}$$

$\mu = 0,75$ (Reibungsbeiwert)

$F_{p,c} = 110 \text{ kN}$ (Vorspannkraft)

- Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ je Scherfuge für hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{m2}}$$

mit: $\gamma_{m2} = 1,25$

$$F_{v,Rk} = \alpha_v * f_{ub} * A$$

mit: $\alpha_v = 0,5$ (Gewinde in der Scherfuge)

für 2 Schrauben: $F_{v,Rk} * 2$

$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$ (Zugfestigkeit)

$$F_{v,Rd} = 160 \text{ kN}$$

$A = 201 \text{ mm}^2$

6.2.3 Ergebnisse für Winkelprofil L80x8

Die Tab. 6-4 zeigt die Querschnittsdaten für das untersuchte Winkelprofil L80x8:

A	12,27 cm ²	I _v (Minimumsachse)	29,88 cm ⁴
i _v	1,561 cm	W _v	9,369 cm ³
i _y	2,430 cm	f _y	480 N/mm ²
N _{pl} = A * f _y	588,96 kN	E	210 000 N/mm ²

Tab. 6-4 Querschnittsdaten für das Winkelprofil L80x8

Die Abmessungen des modellierten Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L80x8 sind der Abb. 6-6 zu entnehmen. Die verwendeten Schrauben des Typs M22, 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 212$ kN vorgespannt. Die Stärke des Anschlussbleches wurde mit 25 mm gewählt.

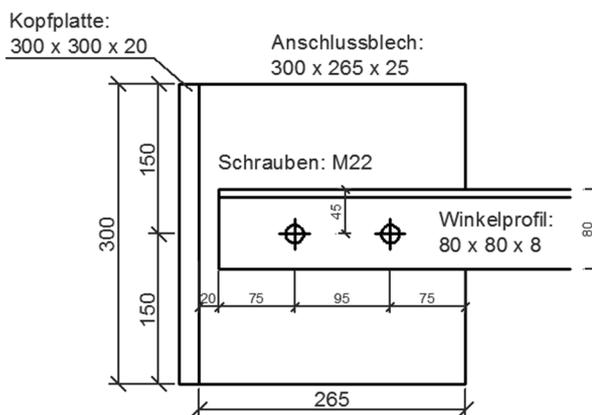


Abb. 6-6 Anschlussdetail für den Winkel L80x8 mit Zwei-Schrauben-Verbindung

Die Tab. 6-5 zeigt die betrachteten Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen. Die sich daraus ergebende Schlankheit $\bar{\lambda}$ ist den effektiven Schlankheiten entsprechend der betrachteten Normen (vgl. Abschnitt 2.3) gegenübergestellt. Die Knicklänge für die Normenrechnungen wurde aufgrund des starren Stirnplattenanschlusses mit $L_{cr} = L_{sys} / 2$ gewählt.

L _{sys} [cm]	Normen: L _{cr} = L _{sys} / 2	N _{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
112	56	1221,30	0,69	0,73	0,73	0,76	0,76	0,93
148	74	1038,40	0,75	0,85	0,85	0,89	0,84	1,01
184	92	858,40	0,83	0,98	0,98	1,03	0,91	1,08
220	110	659,00	0,95	1,10	1,10	1,16	1,03	1,19
256	128	489,20	1,10	1,22	1,22	1,29	1,15	1,31
292	146	369,22	1,26	1,35	1,35	1,42	1,27	1,42
328	164	286,50	1,43	1,47	1,47	1,53	1,39	1,53
364	182	228,10	1,61	1,59	1,59	1,65	1,51	1,65
400	200	186,70	1,78	1,71	1,71	1,76	1,63	1,76

Tab. 6-5 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Lagerung mit Normenregelungen

Für die Berechnung der effektiven Schlankheiten $\bar{\lambda}$ entsprechend den betrachteten Normen wurde sowohl das Ausweichen um die v- Achse, sowie das Ausweichen um die y- Achse betrachtet.

In Abb. 6-7 sind die verschiedenen Tragfähigkeitskurven für das Winkelprofil L80x8 zu sehen. Die Ergebnisse aus den numerischen Traglastberechnungen (GMNIA) sind den Ergebnissen aus den betrachteten Normen gegenübergestellt. Die Normenrechnungen wurden mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$ durchgeführt. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft sowie die Abscherkraft des Zwei-Schrauben-Anschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind ergänzend am Ende dieses Abschnittes angeführt.

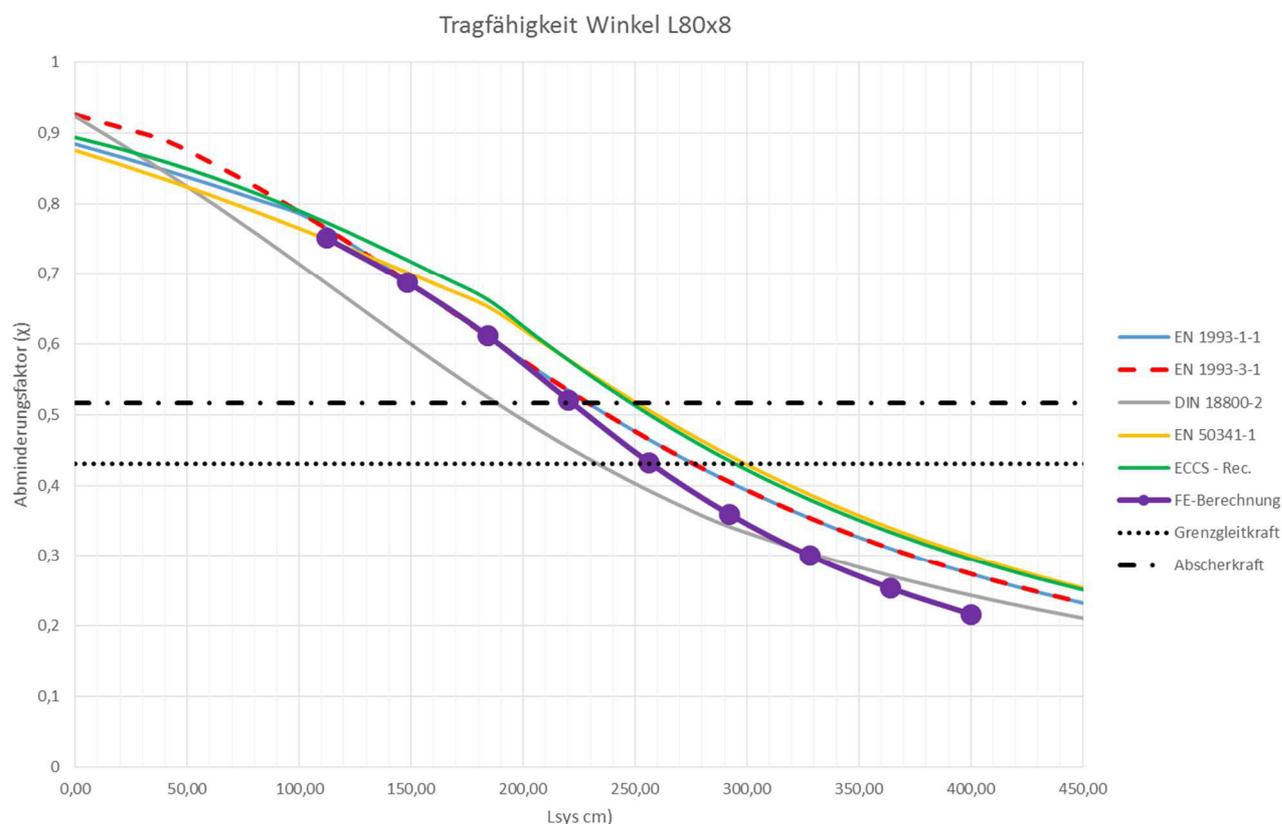


Abb. 6-7 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte

Es ist ersichtlich, dass die Tragfähigkeiten aus den numerischen Berechnungen für die ersten drei betrachteten Systemlängen ($L_{sys} = 112, 148, 184$ cm) sehr gut mit den Ergebnissen nach EN 1993-1-1[2] und EN 1993-3-1[4] übereinstimmen. Mit zunehmender Länge nehmen die numerisch bestimmten Tragfähigkeiten im Vergleich zu den Ergebnissen dieser beiden Normen immer stärker ab. Ab einer Profillänge von ca. 300 cm ergeben sich auch nach DIN 18800-2[3] höhere Tragfähigkeiten, verglichen mit den GMNIA-Simulationen.

Die Tab. 6-6 zeigt der Vollständigkeit halber die maximalen Traglasten des Winkelprofils L80x8 für die untersuchten Systemlängen.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
112	442,5	450,72	450,72	404,40	441,55	455,57
148	405,3	406,40	406,40	355,77	413,79	424,30
184	360,7	359,98	359,98	309,46	384,97	391,07
220	307,2	315,04	315,04	267,75	340,82	340,54
256	255,2	274,23	274,23	231,63	298,55	295,18
292	211,8	238,70	238,70	201,51	260,77	256,41
328	177,0	208,43	208,43	179,15	228,07	223,89
364	149,5	182,90	182,90	159,96	200,20	196,71
400	127,5	161,39	161,39	143,46	176,60	173,95

Tab. 6-6 Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte; Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

Stabilitätsnachweise mit Berücksichtigung einer alternativen Systemknicklänge

Zusätzlich wurde für das Winkelprofil L80x8 mit starr angeschlossener Stirnplatte die Auswirkung untersucht, wenn bei den Stabilitätsnachweisen auf Basis der Normenwerke statt der halben Systemlänge L_{sys} die Hälfte der reduzierte Länge L_{schr} als Knicklänge verwendet wird. Die Länge L_{schr} entspricht dem Abstand zwischen den Mittelpunkten der Schraubenbilder. Die Definition der Länge L_{schr} für Winkelprofile mit Zwei-Schrauben-Verbindungen ist der Abb. 6-8 zu entnehmen.

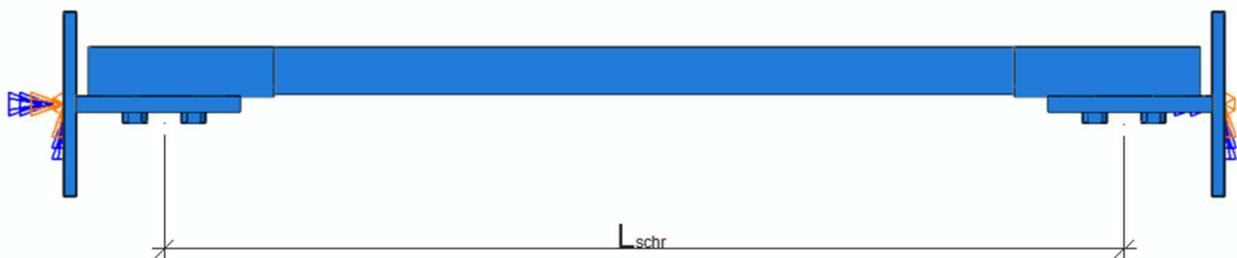


Abb. 6-8 Definition der Länge L_{schr} für einen Winkel mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starr gelagerten Stirnplatte

Tab. 6-7 zeigt die betrachteten Längen, mit den zugehörigen Knicklasten der ersten Eigenformen aus den Beul-Analysen. Die sich daraus ergebende Schlankheit ist den effektiven Schlankheiten entsprechend der Normen gegenübergestellt. Die Knicklängen für die Normenrechnungen wurden mit $L_{\text{cr}} = L_{\text{schr}} / 2$ gewählt.

L_{schr} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{schr} / 2$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
83,5	41,75	1221,30	0,69	0,66	0,63	0,66	0,70	0,88
119,5	59,75	1038,40	0,75	0,76	0,76	0,79	0,77	0,95
155,5	77,75	858,40	0,83	0,88	0,88	0,92	0,85	1,02
191,5	95,75	659,00	0,95	1,00	1,00	1,05	0,93	1,10
227,5	113,75	489,20	1,10	1,13	1,13	1,18	1,05	1,22
263,5	131,75	369,22	1,26	1,25	1,25	1,32	1,17	1,33
299,5	149,75	286,50	1,43	1,37	1,37	1,44	1,29	1,44
335,5	167,75	228,10	1,61	1,49	1,49	1,56	1,41	1,56
371,5	185,75	186,70	1,78	1,62	1,62	1,67	1,53	1,67

Tab. 6-7 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Lagerung mit Normenregelungen und der Knicklänge $L_{schr}/2$

In Abb. 6-9 sind die Tragfähigkeitskurven für das Winkelprofil L80x8 zu erkennen. Die Ergebnisse aus den numerischen Traglastberechnungen (GMNIA) sind den Tragfähigkeitskurven basierend auf den betrachteten Normen, mit Berücksichtigung einer reduzierten Knicklänge von $L_{cr} = L_{schr} / 2$, gegenübergestellt. Es ist dabei der Abminderungsfaktor χ über die Länge L_{schr} aufgetragen.

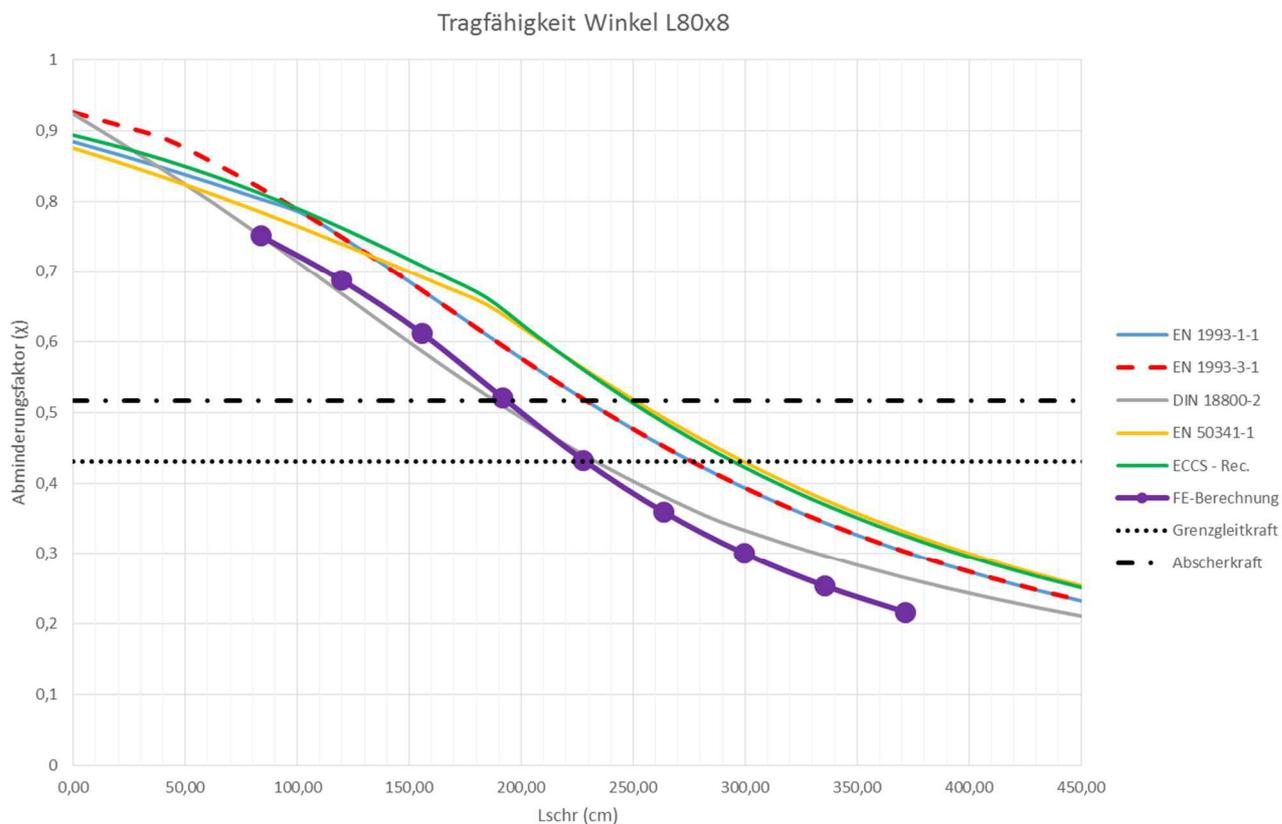


Abb. 6-9 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen mit der Knicklänge $L_{schr}/2$ für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte

Wie in Abb. 6-9 ersichtlich, liefern die Berechnungen auf Basis der Normen, mit Berücksichtigung der Länge L_{Schr} , deutlich höhere Tragfähigkeiten, als mit Berücksichtigung der Systemlänge L_{sys} . Bis zu einer Länge von $L_{\text{Schr}} < 227,5$ cm stimmen die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen ziemlich exakt mit den Traglasten nach DIN 18800-2[3] überein. Mit zunehmender Länge fällt die Traglastkurve aus den numerischen Berechnungen jedoch unter die Kurve nach DIN 18800-2[3].

Tab. 6-6 zeigt eine Zusammenfassung der Traglasten des Winkelprofils L80x8 für die betrachteten Längen.

L_{Schr} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
83,5	442,5	473,09	482,46	442,58	462,32	477,76
119,5	405,3	441,82	441,82	394,22	435,89	449,30
155,5	360,7	396,78	396,78	345,83	407,84	417,49
191,5	307,2	350,39	350,39	300,34	376,28	380,30
227,5	255,2	306,13	306,13	259,76	331,71	330,58
263,5	211,8	266,38	266,38	224,82	290,27	286,56
299,5	177,0	231,97	231,97	196,57	253,54	249,15
335,5	149,5	202,74	202,74	174,91	221,88	217,82
371,5	127,5	178,11	178,11	156,31	194,95	191,63

Tab. 6-8 Winkelprofil L80x8 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Stirnplatte; Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen mit der modifizierten Systemlänge L_{Schr}

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich wie zu erwarten die Tragfähigkeiten auf Basis der Normen, mit Berücksichtigung einer reduzierten Knicklänge von $L_{\text{Schr}}/2$, deutlich erhöhen und die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen beinahe einheitlich überschätzen.

Aus diesem Grund ist es prinzipiell nicht sinnvoll für die Stabilitätsnachweise lt. Normen diese „verringerten Systemlänge“ zu verwenden, insbesondere dann, wenn wie hier noch eine Reduktion auf $L_{\text{Schr}} / 2$ erfolgt um vereinfacht die beidseitige Endeinspannung zu erfassen.

Ergänzung: Bestimmung Grenzgleitkraft und Abscherkraft für Schrauben des Typs M22, Güte 10.9 (EN 1993-1-8) für Zwei-Schrauben-Anschlüsse

- Grenzgleitkraft $F_{s,Rd}$ vorgespannter hochfester Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{s,Rd} = \frac{F_{s,Rk}}{\gamma_{m3}}$$

mit: $\gamma_{m3} = 1,25$ (Kat. C)

$$F_{s,Rk} = k_s * n * \mu * F_{p,c}$$

mit: $k_s = 1,0$ (Beiwert für Lochspiel)

für 2 Schrauben: $F_{s,Rk} * 2$

$n = 1,0$ (Anzahl der Gleitfugen)

$F_{s,Rd} = 254 \text{ kN}$

$\mu = 0,75$ (Reibungsbeiwert)

$F_{p,c} = 212 \text{ kN}$ (Vorspannkraft)

- Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ je Scherfuge für hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{m2}}$$

mit: $\gamma_{m2} = 1,25$

$$F_{v,Rk} = \alpha_v * f_{ub} * A$$

mit: $\alpha_v = 0,5$ (Gewinde in der Scherfuge)

für 2 Schrauben: $F_{v,Rk} * 2$

$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$ (Zugfestigkeit)

$F_{v,Rd} = 304 \text{ kN}$

$A = 380 \text{ mm}^2$

6.2.4 Ergebnisse für Winkelprofil L120x12

In Tab. 6-9 sind die Querschnittsdaten für das Winkelprofil L120x12 angeführt:

A	27,54 cm ²	I _v (Minimumsachse) :	151,6 cm ⁴
i _v	2,346 cm	W _v	31,56 cm ³
i _y	3,640 cm	f _y	328 N/mm ² [1]
N _{pl} = A * f _y	903,31 kN	E	210 000 N/mm ²

Tab. 6-9 Querschnittsdaten für das Winkelprofil L120x12

[1] Wert angelehnt an [7] für Winkel L120x12

Die Abmessungen des modellierten Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L120x12 sind der Abb. 6-10 zu entnehmen. Die verwendeten Schrauben des Typs M27, 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 321$ kN vorgespannt. Die Stärke des Anschlussbleches wurde mit 25 mm gewählt.

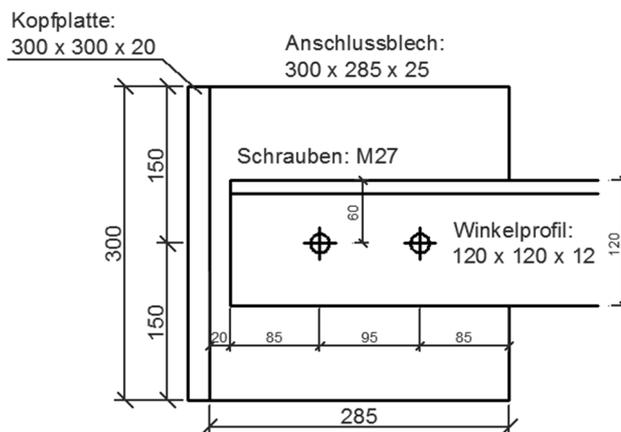


Abb. 6-10 Anschlussdetail für den Winkel L120x12 mit Zwei-Schrauben-Verbindung

Die Tab. 6-10 zeigt die zu den ersten Eigenformen gehörigen Knicklasten aus den LBA-Analysen für die betrachteten Systemlängen. Die sich daraus ergebenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ sind den effektiven Schlankheiten entsprechend der betrachteten Normen gegenübergestellt. Um den Umstand des starren Stirnplattenanschlusses zu berücksichtigen, wurde die Knicklänge für die Berechnung der effektiven Schlankheiten entsprechend den jeweiligen Normen mit $L_{cr} = L_{sys}/2$ gewählt.

L _{sys} [cm]	Normen: L _{cr} = L _{sys} / 2	N _{cr} [kN]	max. effektive Schlankheiten					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
132	66	2665,30	0,58	0,64	0,60	0,62	0,68	0,85
197	98,5	2067,70	0,66	0,72	0,72	0,75	0,75	0,93
262	131	1523,00	0,77	0,84	0,84	0,88	0,83	1,00
327	163,5	1106,30	0,90	0,96	0,96	1,01	0,90	1,07
392	196	811,30	1,06	1,09	1,09	1,14	1,01	1,18
457	228,5	609,90	1,22	1,21	1,21	1,27	1,13	1,29
522	261	471,40	1,38	1,33	1,33	1,40	1,25	1,40
587	293,5	373,90	1,55	1,45	1,45	1,52	1,37	1,52
652	326	303,10	1,73	1,57	1,57	1,63	1,49	1,63
717	358,5	250,50	1,90	1,70	1,70	1,74	1,61	1,74

Tab. 6-10 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Lagerung mit Normenregelungen

Für die effektiven Schlankheiten entsprechend den betrachteten Normen wurde sowohl das Ausweichen um die Minimumsachse v , sowie das Ausweichen um die y - Achse betrachtet.

In der Abb. 6-11 sind die Tragfähigkeiten aus den Traglastberechnungen (GMNIA) den Ergebnissen aus den Normenrechnungen gegenübergestellt. Die Normenrechnungen wurden mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$ durchgeführt. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft sowie die Abscherkraft des Zwei-Schrauben-Anschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind ergänzend am Ende dieses Abschnittes angeführt.

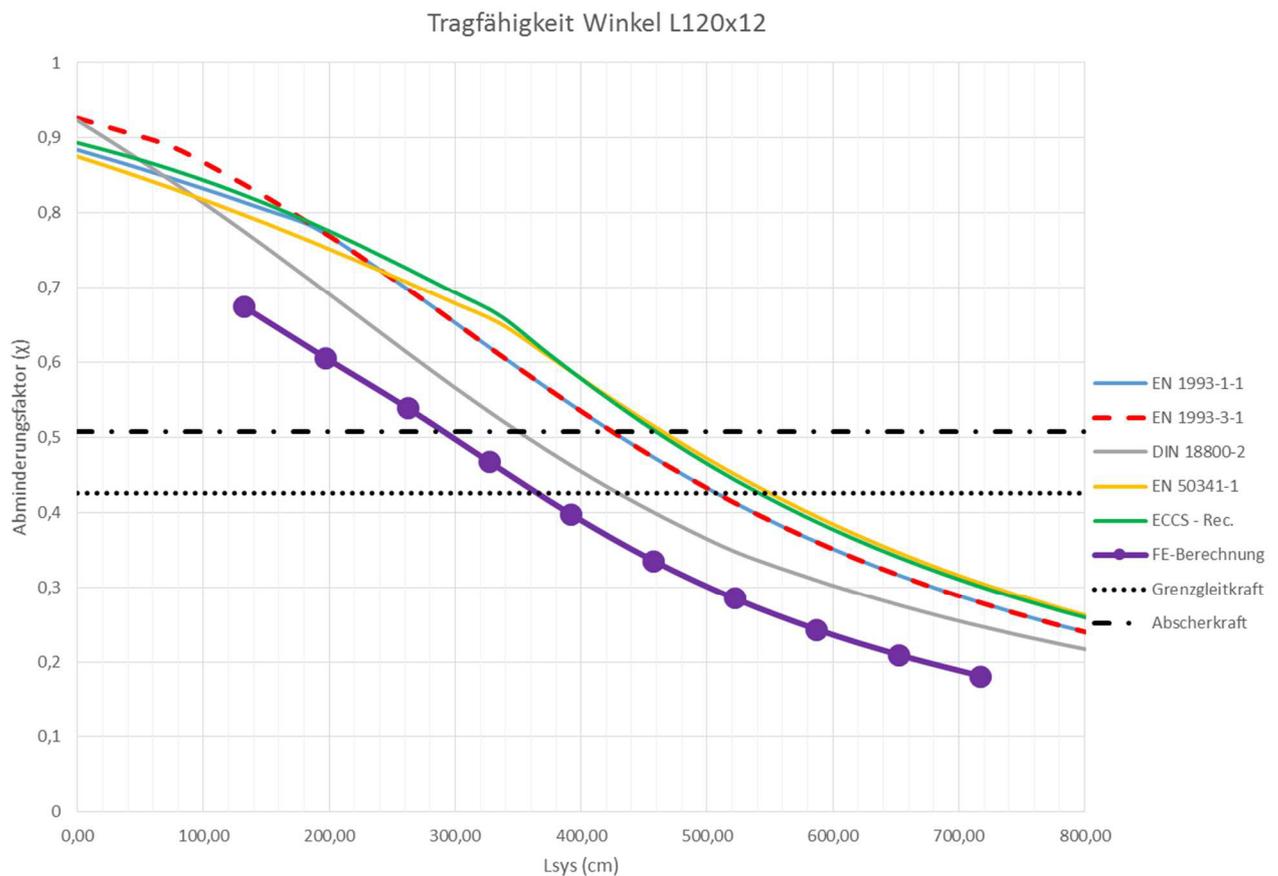


Abb. 6-11 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte

Es ist erkennbar, dass die numerischen Simulationen für das Winkelprofil L120x12 einheitlich konservativere Ergebnisse liefern, als die Stabilitätsnachweise nach den Normen. Die für die Nachweise entsprechend den Normen gewählte Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$ spiegelt somit nicht die tatsächlich vorherrschenden Anschlussverhältnisse wider. Bedingt durch die hohe Eigensteifigkeit des Winkelprofils sinkt der Einfluss der Einspannung an den Auflagern, wodurch die gewählte Knicklänge für die Normrechnungen angepasst werden musste, um eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abaqus zu erreichen. Die Knicklänge wird für die Vergleichsberechnungen nach den einzelnen Normen nachfolgend mit $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$ gewählt.

Wie in Tab. 6-11 zu erkennen, ergeben sich mit einer angepassten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$, wie zu erwarten, deutlich höhere effektive Schlankheiten auf Basis der betrachteten Normen.

L_{sys} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheiten					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
132	92,4	2665,30	0,58	0,70	0,70	0,72	0,74	0,91
197	137,9	2067,70	0,66	0,87	0,87	0,91	0,84	1,02
262	183,4	1523,00	0,77	1,04	1,04	1,09	0,97	1,14
327	228,9	1106,30	0,90	1,21	1,21	1,27	1,13	1,29
392	274,4	811,30	1,06	1,38	1,38	1,45	1,30	1,45
457	319,9	609,90	1,22	1,55	1,55	1,61	1,47	1,61
522	365,4	471,40	1,38	1,72	1,72	1,77	1,63	1,77
587	410,9	373,90	1,55	1,89	1,89	1,92	1,80	1,92
652	456,4	303,10	1,73	2,06	2,06	2,08	1,96	2,08
717	501,9	250,50	1,90	2,23	2,23	2,24	2,13	2,24

Tab. 6-11 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Lagerung mit Normenregelung und angepasster Knicklänge

In Abb. 6-12 sind die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen (GMNIA) den Ergebnissen aus den Normenrechnungen gegenübergestellt. Die Normenrechnungen erfolgten mit einer angepassten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$.

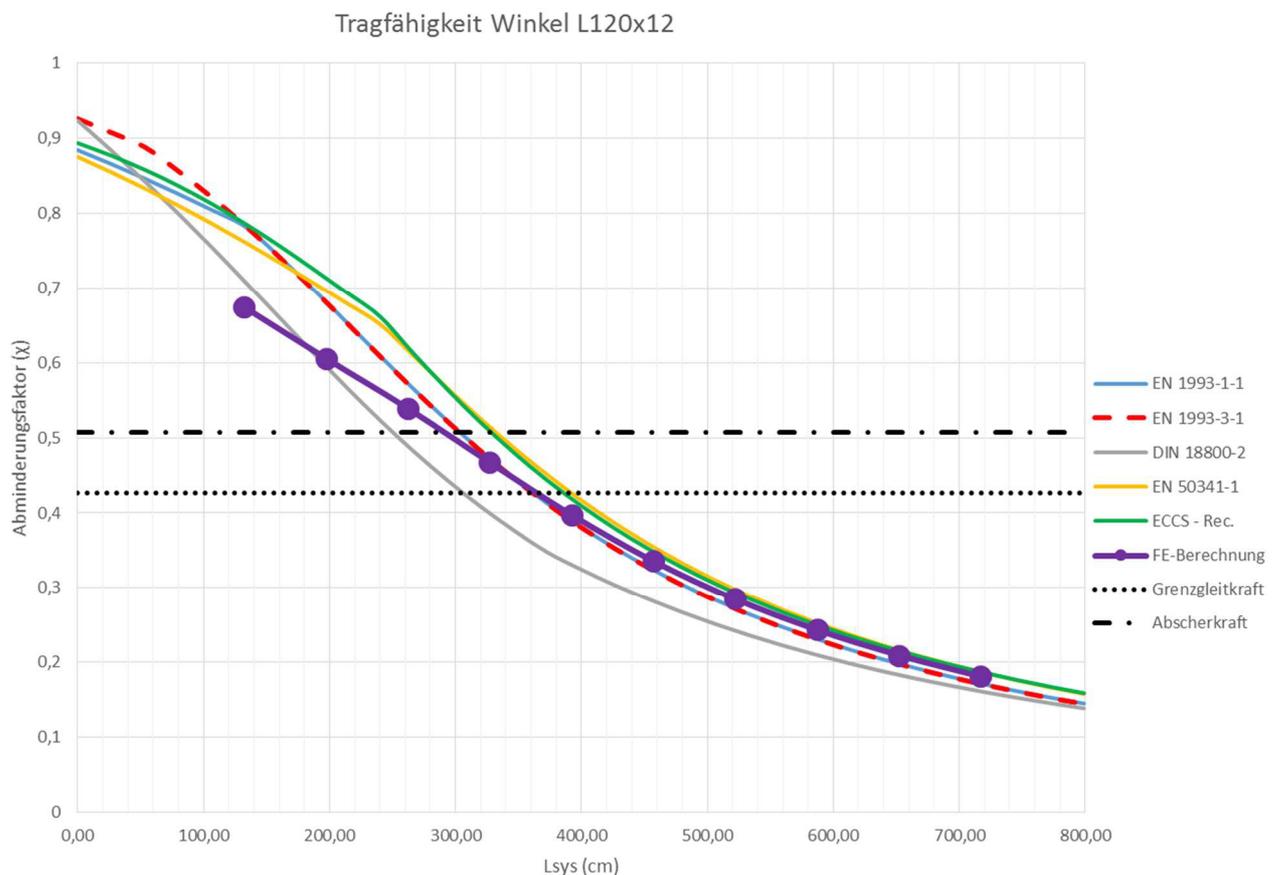


Abb. 6-12 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen ($L_{cr} = L_{sys} * 0,7$) für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und starrer Stirnplatte

Wie ersichtlich, konnte mit einer angepassten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$ eine deutlich bessere Übereinstimmung der Resultate aus den numerischen Simulationen mit den Tragfähigkeitskurven auf Basis der Normen erreicht werden. Einzig für das Profil mit der Systemlänge von 132 cm wird die Tragfähigkeit von allen Normen geringfügig überschätzt. Bei der betrachteten Systemlänge von 197 cm entspricht die numerisch berechnete Tragfähigkeit in etwa der Traglast nach DIN 18800-2[3]. Mit zunehmender Länge nähert sich die Kurve aus den numerisch berechneten Tragfähigkeiten immer mehr an die Kurven nach EN 1993-1-1[2] bzw. EN 1993-3-1[4] an. Ab einer Länge von 300 cm stimmen die Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen fast genau mit den Ergebnissen dieser Normen überein.

Tab. 6-12 zeigt ergänzend alle berechneten Traglasten für die untersuchten Profile mit einer angepassten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
132	609,3	707,35	709,58	641,70	688,64	711,15
197	547,4	616,05	616,05	538,11	629,55	644,93
262	487,2	517,53	517,53	442,06	557,38	560,92
327	422,3	427,49	427,49	361,27	465,13	460,32
392	359,1	352,61	352,61	299,15	385,44	378,71
457	303,4	292,92	292,92	254,72	320,63	314,87
522	257,2	245,89	245,89	218,75	269,06	265,05
587	219,8	208,71	208,71	189,50	228,12	225,80
652	189,1	179,04	179,04	165,52	195,43	194,47
717	163,6	155,11	155,11	145,68	169,06	169,13

Tab. 6-12 Winkelprofil L120x12 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und starrer Stirnplatte; Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen mit angepasster Knicklänge ($L_{cr} = L_{sys} * 0,7$)

Ergänzung: Bestimmung Grenzgleitkraft und Abscherkraft für Schrauben des Typs M27, Güte 10.9 (EN 1993-1-8) für Zwei-Schrauben-Anschlüsse

- Grenzgleitkraft $F_{s,Rd}$ vorgespannter hochfester Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{s,Rd} = \frac{F_{s,Rk}}{\gamma_{m3}}$$

mit: $\gamma_{m3} = 1,25$ (Kat. C)

$$F_{s,Rk} = k_s * n * \mu * F_{p,c}$$

mit: $k_s = 1,0$ (Beiwert für Lochspiel)

für 2 Schrauben: $F_{s,Rk} * 2$

$n = 1,0$ (Anzahl der Gleitfugen)

$$F_{s,Rd} = 385 \text{ kN}$$

$\mu = 0,75$ (Reibungsbeiwert)

$F_{p,c} = 321 \text{ kN}$ (Vorspannkraft)

- Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ je Scherfuge für hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{m2}}$$

mit: $\gamma_{m2} = 1,25$

$$F_{v,Rk} = \alpha_v * f_{ub} * A$$

mit: $\alpha_v = 0,5$ (Gewinde in der Scherfuge)

für 2 Schrauben: $F_{v,Rk} * 2$

$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$ (Zugfestigkeit)

$$F_{v,Rd} = 458 \text{ kN}$$

$A = 573 \text{ mm}^2$

6.2.5 Zusammenfassung- Zwei-Schrauben-Anschluss mit starrer Stirnplatte

In diesem Abschnitt wurden numerische Traglastberechnungen an exzentrisch gedrückten Winkelprofilen mit Zwei-Schrauben Anschlüssen und starrer Stirnplatte durchgeführt und den Traglasten, entsprechend den betrachteten Normen, gegenübergestellt.

Bei den Winkelprofilen L60x6 und L80x8 wurde für die Normenrechnungen eine Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$, angepasst an einen beidseits voll eingespannten Stab, berücksichtigt. Für den Winkel L120x12 musste eine angepasste Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 0,7$ verwendet werden, um eine Überschätzung der Tragfähigkeiten durch die Normen zu vermeiden.

Es ist erkennbar, dass bei den numerischen Simulationen der Winkel L60x6 bei kurzen Profillängen ($L_{sys} < 150\text{cm}$) stark vom starren Anschluss profitiert und die Normen deutlich konservativere Tragfähigkeiten ergeben. Mit zunehmenden Profillängen wird hingegen bei den Winkelprofilen L60x6 und L80x8 der vorteilhafte Effekt der Einspannung durch die Normen überschätzt, wodurch die Ergebnisse aus den Normen auf der unsicheren Seite liegen.

Für das Profil L120x12 kommt es bei einer Systemlänge von 132 cm zu einer geringfügigen Überschätzung der Tragfähigkeit durch die Normen. Ab einer Profillänge von ca. 300 cm gibt es eine gute Übereinstimmung der numerisch ermittelten Tragfähigkeiten mit den Ergebnissen nach EN 1993-1-1[2] und EN 1993-3-1.

6.3 Anschluss mit gelenkiger Stirnplatte

6.3.1 Zutreffendes FEM- Modell

Für die Untersuchung von Winkelprofilen mit Zwei-Schrauben-Verbindungen und gelenkig gelagertem Anschlussblech wurden ebenfalls die drei Profiltypen (L60x6, L80x8, L120x12) untersucht. Die Länge der Profile wurde dahingehend variiert, dass ein möglichst großer Schlankheitsbereich abgedeckt wird.

Für das FE-Modell wurde, wie in Kapitel 3 beschrieben, eine Kombination aus Volumenelementen und Schalenelementen verwendet, um den Rechenaufwand zu minimieren. Die Konstruktionselemente Schrauben, Anschlussbleche und die Enden der Winkelprofile im Bereich des Anschlusses wurden mit Volumenelementen des Typs „C3D8R“ modelliert. Die Modellierung des mittleren Abschnittes des Winkelprofils erfolgte mit Schalenelementen des Typs „S4R“. Die Verbindung der einzelnen Stabelemente wurde mithilfe einer sogenannten „Shell to solid Coupling“ durchgeführt. Im Gegensatz zum starren Anschluss erfolgte die Lagerung in diesem Fall direkt in der Schwerachse des Anschlussblechs, wodurch auf die Anordnung einer Stirnplatte verzichtet werden konnte.

Zu Beginn mussten erneut LBA-Analysen durchgeführt werden, um die erste Eigenform und die zugehörige Knicklast zu erhalten. Mit Hilfe der ersten globalen Eigenform aus den Beul-Analysen war es nun möglich, eine auf dieser Eigenform basierende geometrische Ersatzimperfektion zu berücksichtigen. Die Größe der Imperfektion wurde so gewählt, dass der Stich der Vorkrümmung im Schwerpunkt $e_0 = L_{\text{sys}}/300$ beträgt.

In Abb. 6-13 ist beispielhaft das FE-Modell für den Winkel L80x8 mit gelenkig gelagertem Anschlussblech zu erkennen

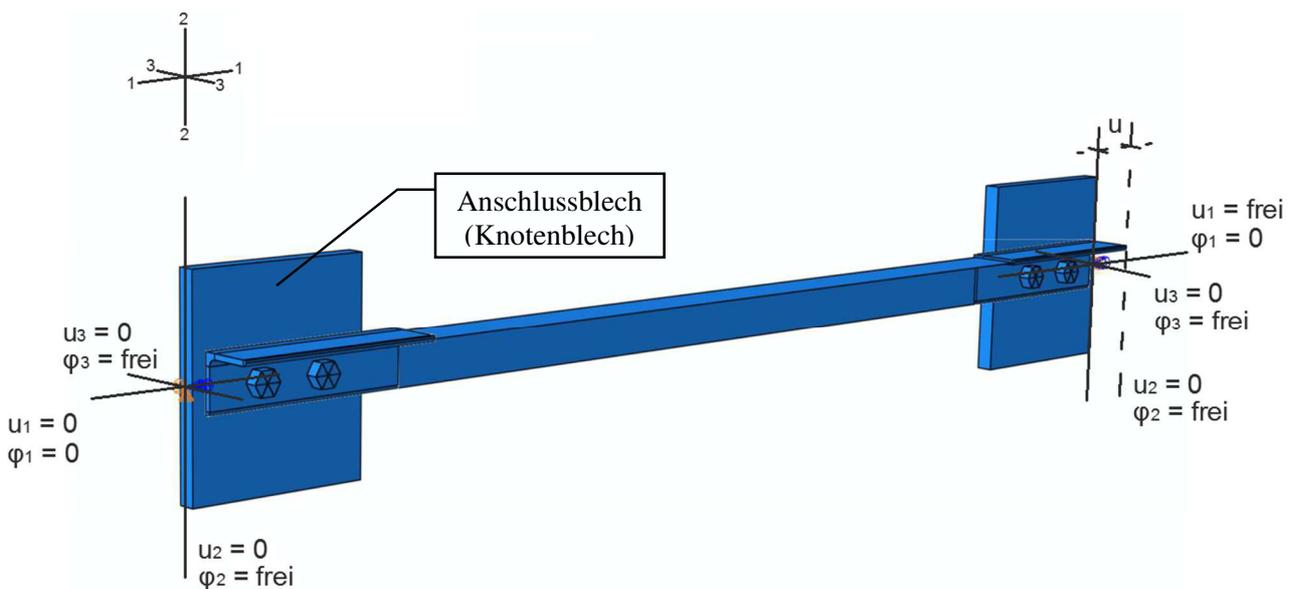


Abb. 6-13 FE- Modell für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei- Schrauben- Verbindung und gelenkigem Anschlussblech

Der Abb. 6-15 ist die Definition der Systemlänge für Zwei-Schrauben-Verbindungen mit gelenkigem Anschlussblech zu entnehmen.

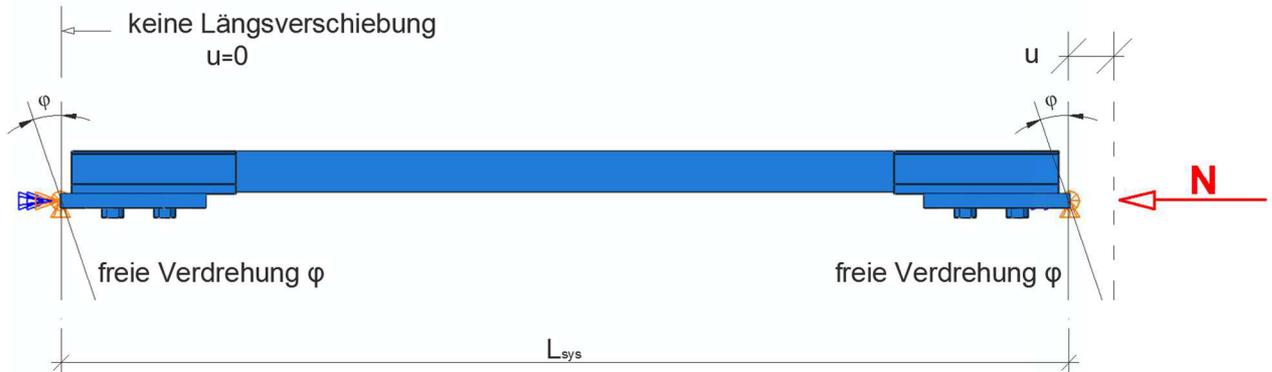


Abb. 6-15 Definition der Systemlänge für ein Winkelprofil mit Zwei- Schrauben- Anschluss und gelenkig gelagertem Anschlussblech

In Abb. 6-14 ist Beispielhaft die erste Eigenform aus der LBA- Analyse für ein Winkelprofil L80x8 zu erkennen.

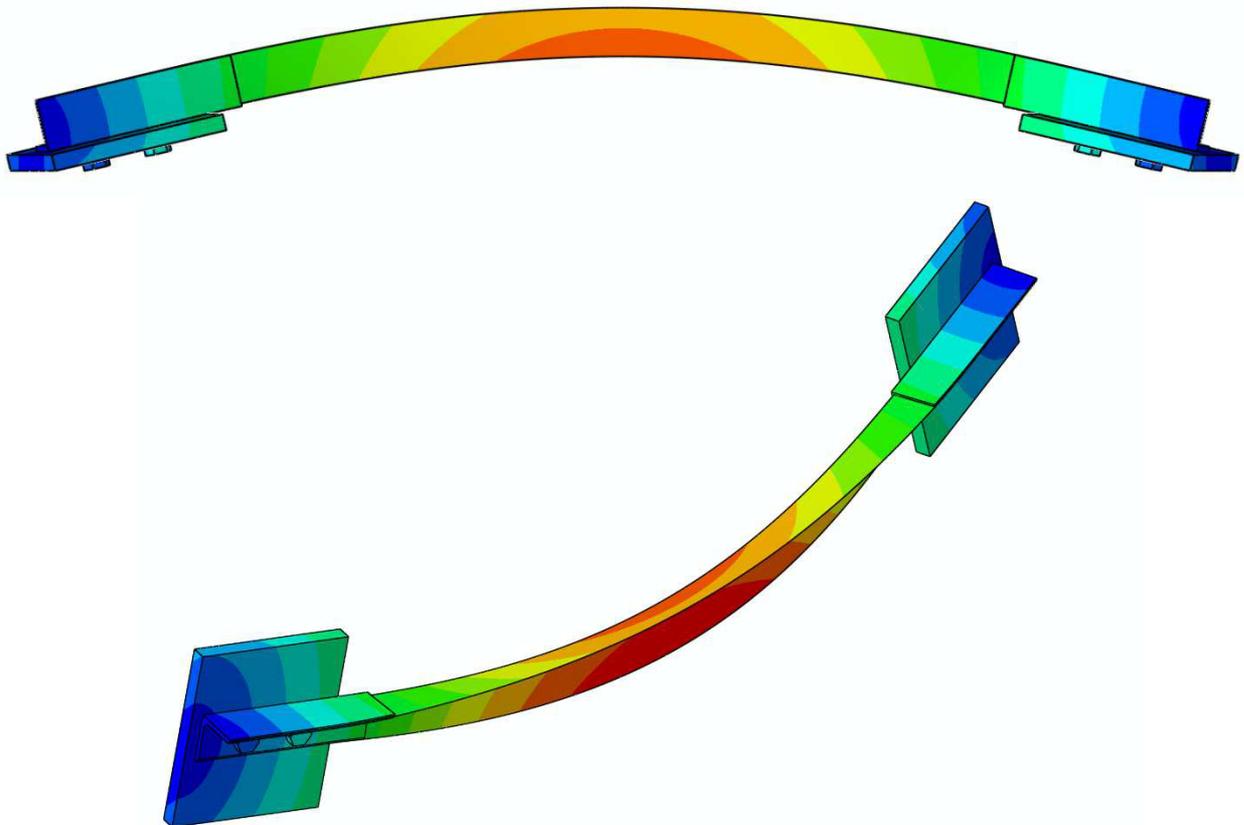


Abb. 6-14 Darstellung der ersten Eigenform für das Winkelprofil L80x8 mit einer Systemlänge von 184 cm

6.3.2 Ergebnisse für Winkelprofil L60x6

Die Querschnittsdaten für das untersuchte Winkelprofil L60x6 sind analog zu Abschnitt 6.2.2, wo sie der Tab. 6-1 entnommen werden können. Auch die Abmessungen des Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L60x6 mit gelenkig gelagertem Anschlussblech wurden im Vergleich zur starren Stirnplatte nicht verändert und entsprechen somit den Angaben in Abb. 6-4. Die verwendeten Schrauben des Typs M16, Güte 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 110\text{kN}$ vorgespannt.

In Tab. 6-13 sind die untersuchten Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen zu sehen. Die sich daraus ergebenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ sind den maßgebenden effektiven Schlankheiten, entsprechend den betrachteten Normen, gegenübergestellt. Als Knicklänge für die Normenrechnungen wurde, aufgrund der gelenkigen Lagerung, $L_{cr} = L_{sys}$ verwendet.

L_{sys} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{sys}$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
59	59	601,30	0,70	0,86	0,86	0,90	0,84	1,01
64	64	503,50	0,77	0,90	0,90	0,94	0,86	1,03
94	94	213,60	1,18	1,16	1,16	1,22	1,09	1,25
124	124	120,30	1,57	1,42	1,42	1,49	1,34	1,49
154	154	78,10	1,95	1,68	1,68	1,73	1,59	1,73
184	184	54,90	2,33	1,94	1,94	1,96	1,84	1,97

Tab. 6-13 Gegenüberstellung der Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L60x6 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkiger Lagerung

Auf Basis der Normenwerke, wurde die effektive Schlankheit $\bar{\lambda}_{v,eff}$ für Ausweichen um die Minimumsachse v , sowie die zugehörige effektive Schlankheit $\bar{\lambda}_{y,eff}$ für Ausweichen um die y -Achse berücksichtigt.

In Tab. 6-13 ist erkennbar, dass im niedrigeren Schlankheitsbereich alle berücksichtigten Normen, im Vergleich mit den GMNIA-Simulationen, deutlich höhere effektive Schlankheiten ergeben. Ab einer Länge von 94 cm ist ein umgekehrter Trend erkennbar.

Die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen (GMNIA) sind der Abb. 6-16 zu entnehmen. Es ist dabei der Abminderungsfaktor, in Abhängigkeit der Systemlänge, aufgetragen. Zum Vergleich sind die Tragfähigkeitskurven entsprechend den betrachteten Normen aufgetragen, wobei die Normenrechnungen mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$ durchgeführt wurden. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft, sowie die Abscherkraft des Zwei-Schrauben-Anschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind als Ergänzung in Abschnitt 6.2.2 angeführt.

Es ist deutlich erkennbar, dass sich aus den numerischen Simulationen für Zwei-Schrauben-Verbindungen mit gelenkig gelagertem Anschlussblech, im Vergleich zu den Tragfähigkeitskurven der betrachteten Normen, deutlich geringere Tragfähigkeiten ergeben.

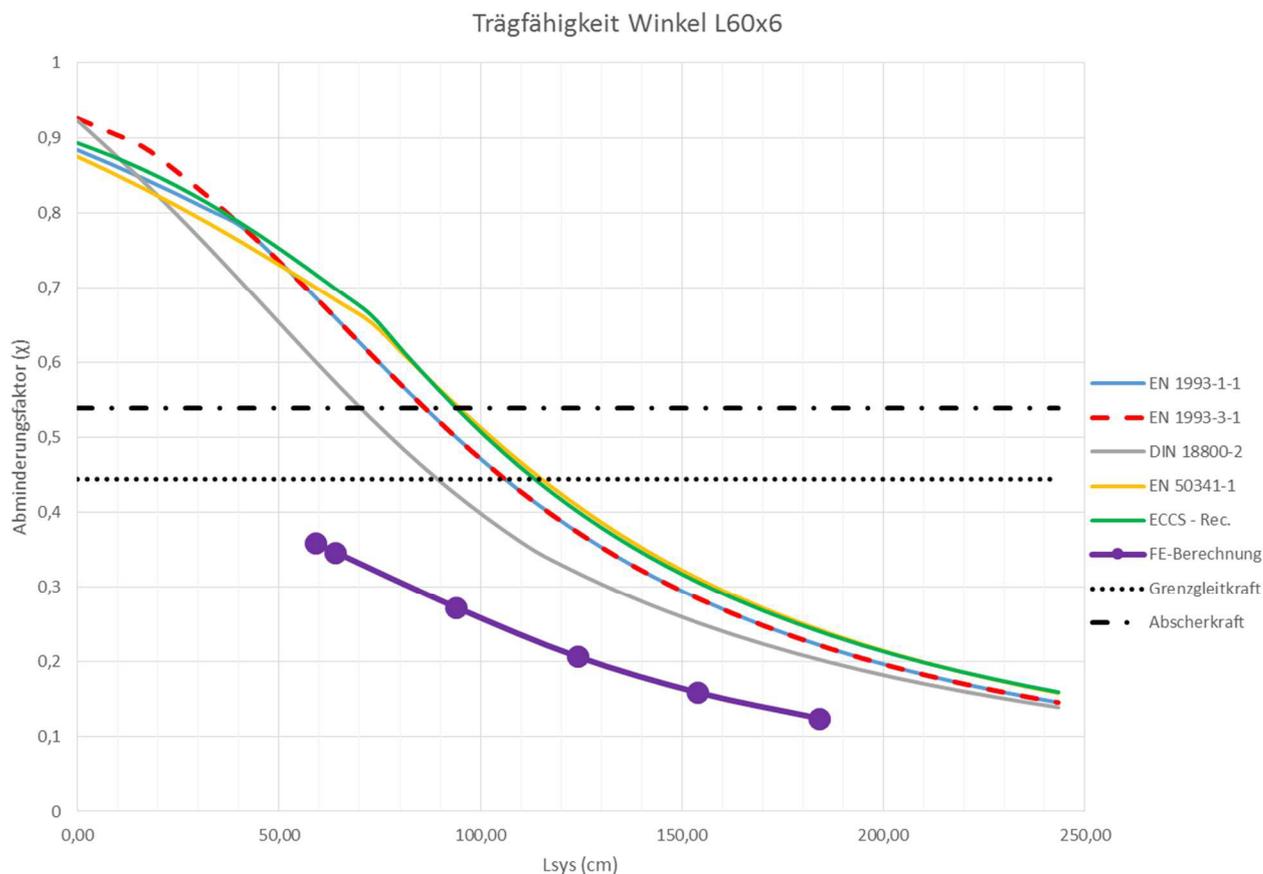


Abb. 6-16 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L60x6 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkigem Anschlussblech

Tab. 6-14 enthält ergänzend alle Traglasten der in Abaqus untersuchten Längen des Winkelprofils L60x6. Die auf Basis der Normenwerke durchgeführten Stabilitätsnachweise ergeben bis zu doppelt so hohe Traglasten, als die numerischen Simulationen.

L _{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
59	106,6	204,27	204,27	178,69	208,28	213,52
64	102,9	196,07	196,07	170,30	203,21	207,70
94	80,8	148,53	148,53	125,79	161,25	160,19
124	61,3	111,01	111,01	94,72	121,41	119,22
154	47,0	84,45	84,45	74,72	92,42	90,96
184	36,8	65,88	65,88	60,11	71,98	71,35

Tab. 6-14 Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

6.3.3 Ergebnisse für Winkelprofil L80x8

Die Querschnittsdaten für das untersuchte Winkelprofil L80x8 sind analog zu Abschnitt 6.2.3, wo sie Tab. 6-4 entnommen werden können. Auch die Abmessungen des Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L80x8 mit gelenkig gelagerten Anschlussblech, wurden im Vergleich zur starren Stirnplatte nicht verändert und entsprechen somit der Abb. 6-6. Die verwendeten Schrauben des Typs M22, Güte 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 212$ kN vorgespannt.

In Tab. 6-15 sind die Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen zu sehen. Weiters sind die sich daraus ergebenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ den effektiven Schlankheiten nach den Normen gegenübergestellt. Als Knicklänge für die Berechnung der effektiven Schlankheiten auf Basis der Normen wurde aufgrund der gelenkigen Lagerung $L_{cr} = L_{sys}$ verwendet.

L_{sys} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{sys}$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	76	1041,50	0,75	0,87	0,87	0,91	0,84	1,01
112	112	463,70	1,13	1,11	1,11	1,17	1,04	1,21
148	148	265,11	1,49	1,36	1,36	1,43	1,28	1,43
184	184	172,30	1,85	1,61	1,61	1,66	1,52	1,66
220	220	121,40	2,20	1,85	1,85	1,89	1,76	1,89
256	256	90,20	2,56	2,10	2,10	2,11	2,00	2,11

Tab. 6-15 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkiger Lagerung

Es ist erkennbar, dass sich mit Ausnahme des Winkelprofils mit Länge $L_{sys} = 76$ cm, aus den LBA-Analysen durchgehend höhere Schlankheiten ergeben als aus den Berechnungen nach den Normen.

Die Ergebnisse aus den numerischen Traglastberechnungen (GMNIA) sind der Abb. 6-17 zu entnehmen. Es ist dabei der Abminderungsfaktor χ , in Abhängigkeit der Systemlänge aufgetragen. Zum Vergleich sind die Tragfähigkeitskurven aus den betrachteten Normen aufgetragen, wobei die Normenrechnungen mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$ durchgeführt wurden. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft, sowie die Abscherkraft des Schraubenanschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind als Ergänzung in Abschnitt 6.2.3 angeführt.

Auch für das Winkelprofil L80x8 mit gelenkig gelagertem Anschlussblech ergeben sich aus den FE-Simulationen deutlich geringere Tragfähigkeiten als aus den Normenrechnungen.

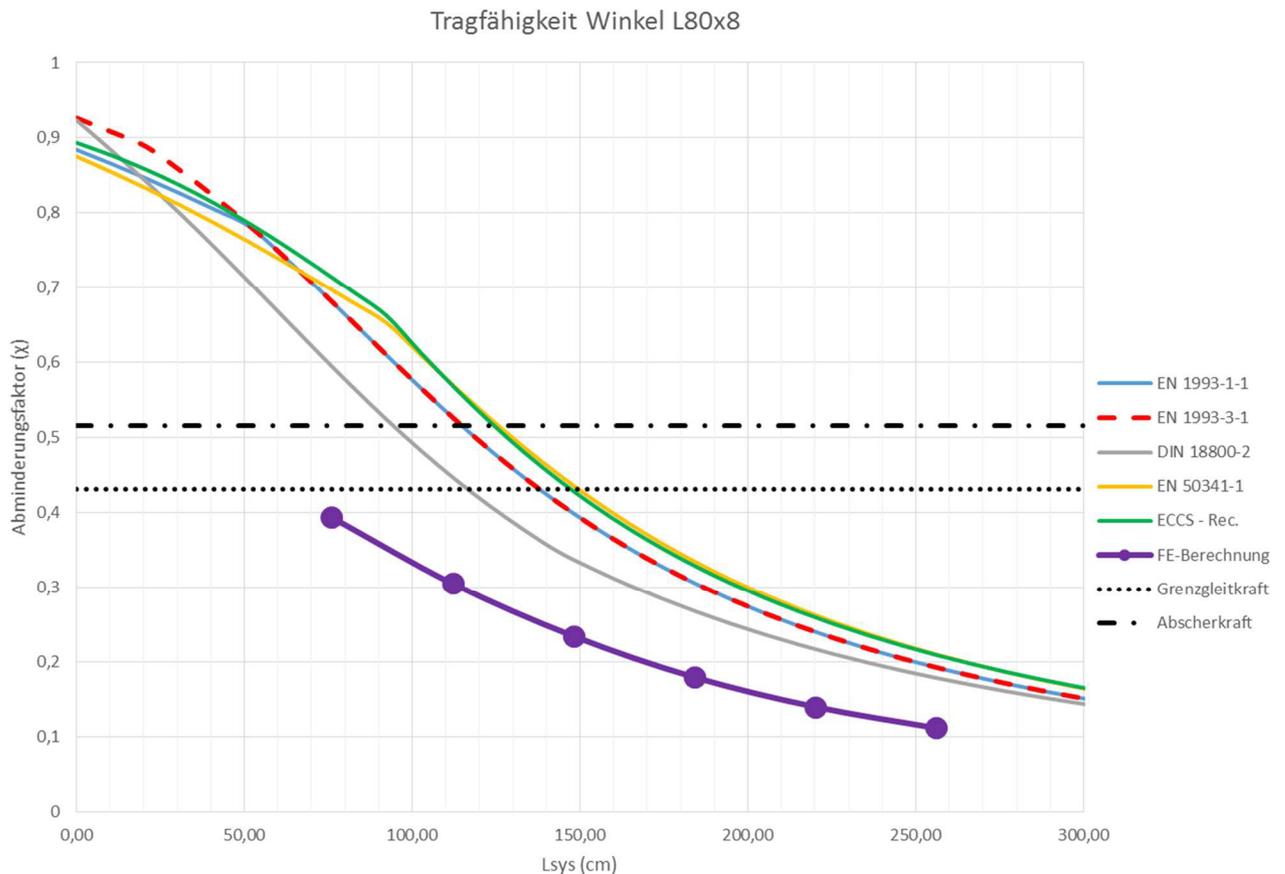


Abb. 6-17 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkigem Anschlussblech

Tab. 6-16 zeigt ergänzend die Traglasten aller untersuchten Längen für das Winkelprofil L 80x8, verglichen mit den Traglasten nach den Normen mit einer angenommenen Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$. Auch für dieses Profil übersteigen die auf Basis der Normen berechneten Traglasten die aus den numerischen Simulationen erhaltenen Traglasten sehr deutlich.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	231,9	401,28	401,28	350,45	410,62	420,67
112	179,7	310,27	310,27	263,46	335,94	335,20
148	138,0	235,08	235,08	198,86	256,89	252,50
184	105,6	180,32	180,32	158,00	197,38	193,98
220	82,3	141,40	141,40	127,79	154,60	152,84
256	65,6	113,38	113,38	105,16	123,72	123,24

Tab. 6-16 Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

6.3.4 Ergebnisse für Winkelprofil 120x12

Die Querschnittsdaten für das untersuchte Winkelprofil L120x12 sind analog zu Abschnitt 6.2.4, wo sie der Tab. 6-9 entnommen werden können. Auch die Abmessungen des Zwei-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L120x12 mit gelenkig gelagertem Anschlussblech, wurden im Vergleich zur starren Stirnplatte nicht verändert und sind somit in Abb. 6-10 zu sehen. Die verwendeten Schrauben des Typs M27, Güte 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 321$ kN vorgespannt.

Tab. 6-17 sind die Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen zu entnehmen. Weiters sind die sich daraus ergebenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$, den effektiven Schlankheiten auf Grundlage der Normen gegenübergestellt. Als Knicklänge für die Berechnung der effektiven Schlankheiten auf Basis der Normen wurde aufgrund der gelenkigen Lagerung, $L_{cr} = L_{sys}$ verwendet.

L_{sys} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{sys}$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
132	132	1554,10	0,76	0,85	0,85	0,88	0,83	1,00
197	197	733,00	1,11	1,09	1,09	1,15	1,02	1,18
262	262	425,60	1,46	1,33	1,33	1,41	1,26	1,41
327	327	277,90	1,80	1,58	1,58	1,63	1,49	1,63
392	392	195,60	2,15	1,82	1,82	1,86	1,73	1,86
457	457	145,10	2,50	2,07	2,07	2,08	1,97	2,08
522	522	111,80	2,84	2,31	2,31	2,31	2,20	2,31

Tab. 6-17 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkiger Lagerung

Wie auch schon bei den beiden anderen Winkeltypen mit „gelenkiger“ Lagerung, ergaben sich auch für das Winkelprofil L120x12 bei längeren Systemen deutlich größere Schlankheiten aus den FE-Analysen, verglichen mit den Ergebnissen aus den Normen.

In der Abb. 6-18 sind die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen (GMNIA) den Ergebnissen aus den Normenrechnungen, mit einer verwendeten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$, gegenübergestellt. Des Weiteren sind zur Veranschaulichung die Grenzgleitkraft, sowie die Abscherkraft des Zwei-Schrauben-Anschlusses aufgetragen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind als Ergänzung in Abschnitt 6.2.4 angeführt.

Wie zu erwarten, ergaben sich auch für den Winkel L120x20 aus den numerischen Berechnungen deutlich geringere Tragfähigkeiten als auf Basis der Normenwerke.

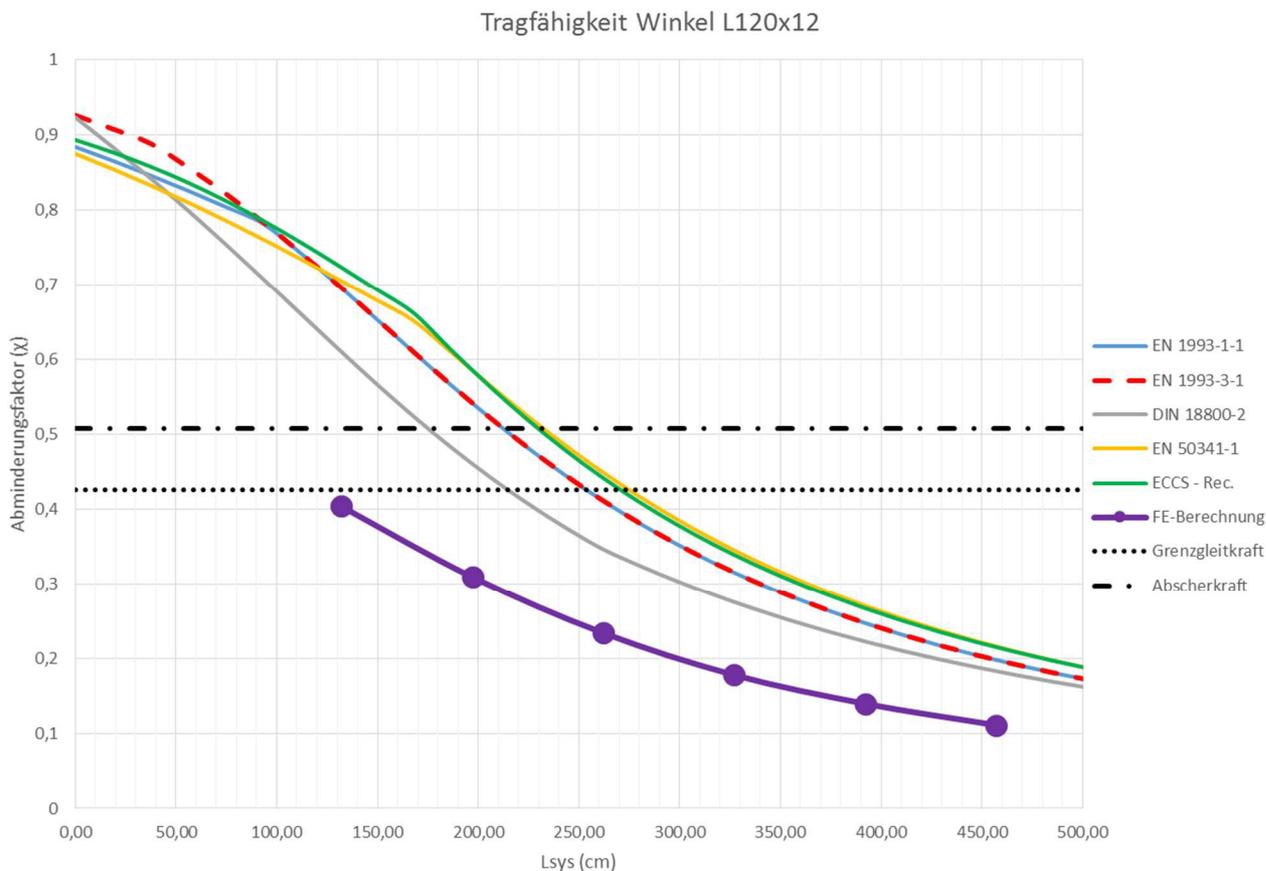


Abb. 6-18 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei- Schrauben- Anschluss und gelenkigem Anschlussblech

Tab. 6-18 zeigt der Vollständigkeit halber alle berechneten Traglasten für das Winkelprofil L120x12 mit einer gewählten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
132	364,7	628,77	628,77	551,36	637,44	653,96
197	279,2	489,26	489,26	416,16	528,90	529,12
262	211,1	371,43	371,43	312,89	405,68	399,04
327	160,5	284,83	284,83	248,60	311,77	306,27
392	126,0	223,12	223,12	200,94	244,00	241,01
457	100,2	178,69	178,69	165,23	195,05	194,10
522	81,8	146,00	146,00	138,00	159,03	159,47

Tab. 6-18 Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

6.3.5 Zusammenfassung- Zwei-Schrauben-Anschluss mit gelenkiger Stirnplatte

In diesem Abschnitt wurde das Verhalten von exzentrisch gedrückten Winkelprofilen mit Zwei-Schrauben-Verbindungen und gelenkig gelagertem Anschlussblech untersucht. Die Knicklänge wurde für die Berechnungen auf Basis der Normen gleich der Systemlänge gewählt. Aus den FE-Simulationen ergaben sich für alle drei Winkelprofile deutlich geringere Tragfähigkeiten, als aus den Stabilitätsnachweisen auf Basis der Normen mit der Berücksichtigung von effektiven Schlankheiten.

Es kann somit festgehalten werden, dass für den Fall eines komplett gelenkig gelagerten Anschlussblechs, alle untersuchten Normen bei einer gewählten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$ die Tragfähigkeit des Winkelprofils deutlich überschätzen. Um für diesen Fall eine bessere Übereinstimmung der Tragfähigkeiten erreichen zu können, wird nun eine angepasste Knicklänge in der Größe von $L_{cr} = L_{sys} * 1,5$ bei den Normrechnungen angesetzt.

Abb. 6-19 zeigt die Ergebnisse der Normenrechnungen mit einer angepassten Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} * 1,5$ anhand des Winkelprofils 120x12, verglichen mit den Ergebnissen aus den FE-Simulationen. Wie ersichtlich, ist ab einer Systemlänge von ungefähr 200 cm eine gute Übereinstimmung der Tragfähigkeiten aus den numerischen Simulationen mit den Ergebnissen auf Basis der DIN 18800-2[3] gegeben.

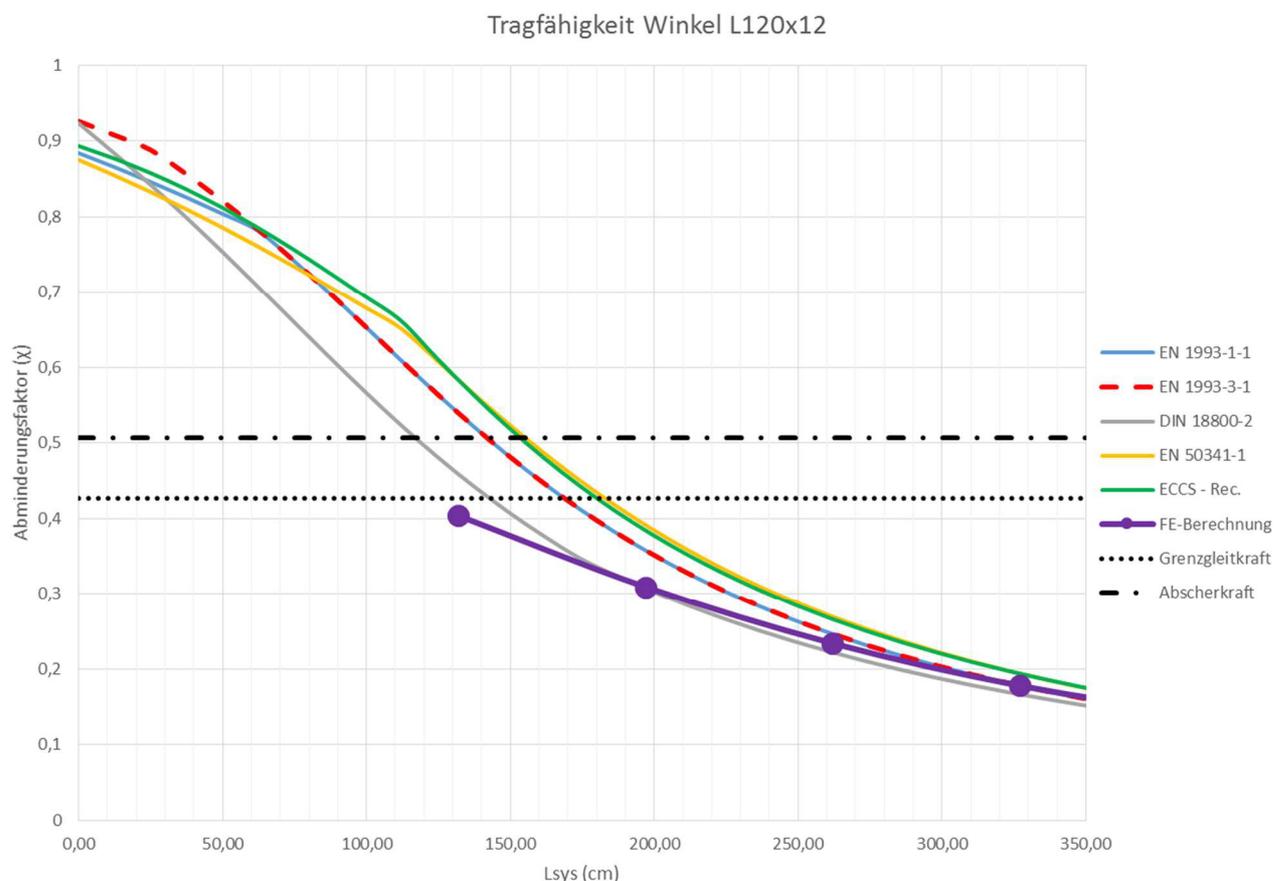


Abb. 6-19 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen und Knicklänge $L_{cr} = L_{sys} * 1,5$ für das Winkelprofil L120x12 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkigem Anschlussblech

Neben der Anpassung der Knicklänge wurde, um eine bessere Übereinstimmung der berechneten Tragfähigkeitskurven mit den Ergebnissen aus den numerischen Simulationen zu erreichen, auf Basis der Normenregelungen für Ein-Schrauben-Verbindungen nach EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3], ein Stabilitätsnachweis nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der Exzentrizitäten geführt. Dies hat nur Einfluss auf die Ergebnisse von EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3].

Abb. 6-20 zeigt die Ergebnisse der Normenrechnungen für ein Winkelprofil L80x8 mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$, verglichen mit den Ergebnissen der FE-Simulationen, wobei die Tragfähigkeitskurven der Normen EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3] mittels eines Stabilitätsnachweises nach Theorie 2. Ordnung berechnet wurden. Vorausgesetzt wurde dabei die elastische Querschnittstragfähigkeit.

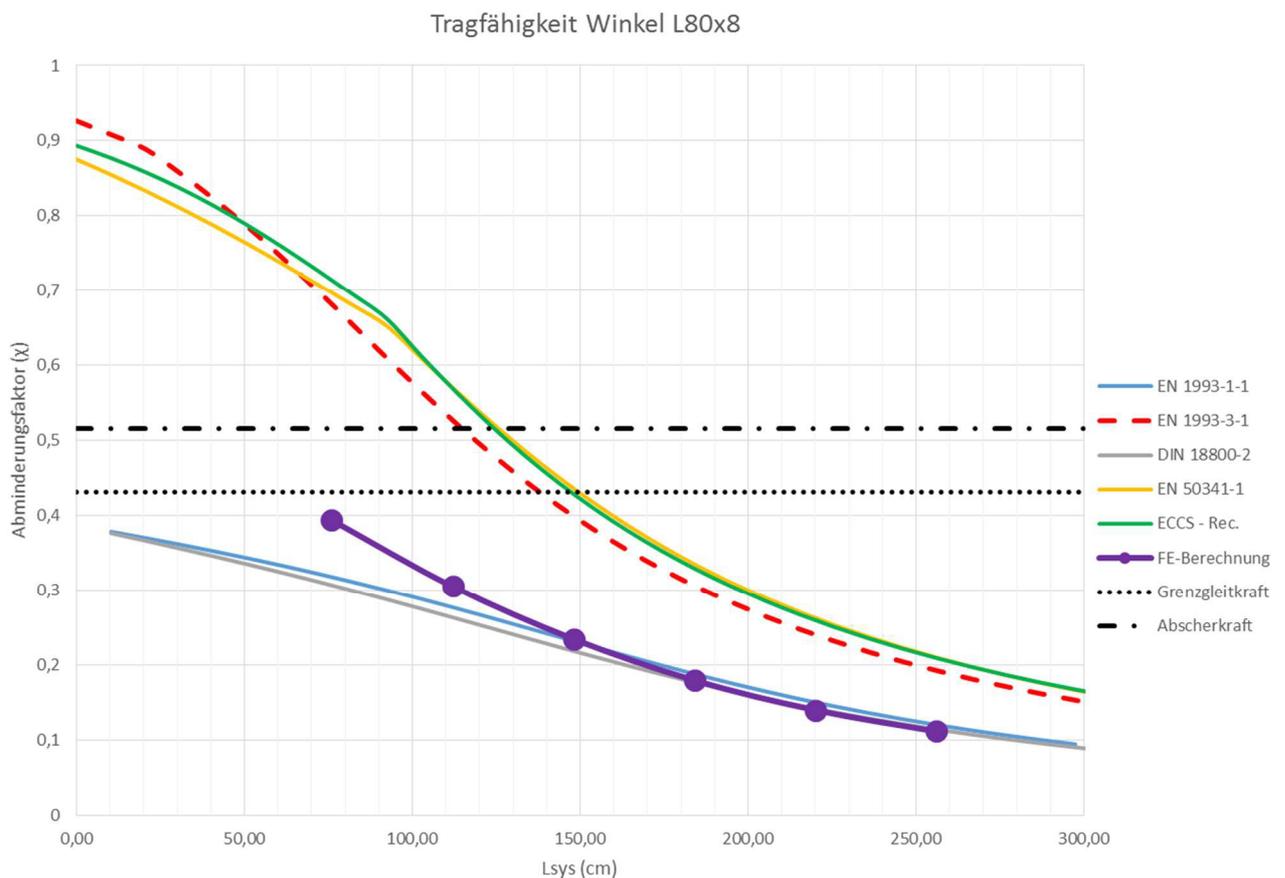


Abb. 6-20 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L80x8 mit Zwei-Schrauben-Anschluss und gelenkigem Anschlussblech (Berücksichtigung der Theorie 2. Ordnung für Lösungen nach EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2)

Wie zu erkennen, liefern die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung ab einer Winkellänge von ca. 150 cm eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den numerischen Simulationen. Für den Fall einer gelenkigen Lagerung des Anschlussbleches ist es somit auch für Zwei-Schrauben-Verbindungen zu empfehlen, einen Nachweis nach Theorie 2. Ordnung zu führen.

7

7 Numerische Knickspannungskurven für Ein-Schrauben-Anschlüsse

7.1 Allgemein

In diesem Kapitel werden exzentrisch angeschlossene Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Verbindungen betrachtet. Die numerischen Simulationen in Abaqus erfolgten an gleichschenkeligen Winkelprofilen des Typs L80x8 mit unterschiedlichen Längen. Die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen werden, wie schon in Kapitel 6, den Ergebnissen auf Basis unterschiedlichen Normen gegenübergestellt. Der Anschluss wurde einerseits mit starrer Stirnplatte modelliert, was dem Fall einer Einspannung entspricht. Andererseits wurde eine „gelenkige“ Lagerung des Anschlussblechs untersucht.

Es wurde auch für Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Verbindungen versucht, durch die Wahl einer geeigneten Knicklänge, die jeweiligen Anschlussbedingungen in den Stabilitätsnachweisen auf Basis der Normen zu berücksichtigen.

Auch in diesem Abschnitt mussten im ersten Schritt LBA- Analysen durchgeführt werden, um bei den Traglastberechnungen geometrische Imperfektionen berücksichtigen zu können. Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 4 bzw. Kapitel 5, wurden Imperfektionen in der Größe von $e_0 = L/300$ für die numerischen Simulationen verwendet.

Die Schraubenverbindung wird, wie schon im Falle von Zwei-Schrauben-Anschlüssen, vorgespannt ausgeführt. Dafür musste zu Beginn der numerischen Berechnungen die Aufbringung einer Vorspannkraft an den Schrauben erfolgen. Die Größe der Vorspannkraft hängt dabei von Schraubendurchmesser und Schraubengüte der verwendeten Schrauben ab und wurde, wie in Kapitel 3 erläutert, bestimmt. Es wurden hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet ($f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$).

Für die Berechnungen laut EN 1993-3-1[4] und DIN 18800-2[3] war es erforderlich, einen Stabnachweis nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der Exzentrizitäten zu führen (siehe Abschnitt 2.4.2).

7.2 Anschluss mit starrer Stirnplatte

7.2.1 Zutreffendes FEM- Modell

Die Untersuchung von Winkelprofilen mit Ein-Schrauben-Verbindungen und starrer Stirnplatte erfolgte an Profilen des Typs L80x8, wodurch die Querschnittsdaten analog zu Abschnitt 6.2.3 sind, wo sie der Tab. 6-4 entnommen werden können. Das FEM- Modell unterscheidet sich vom Aufbau her nicht von jenem Modell, welches für Zwei-Schrauben-Anschlüsse verwendet wurde. In Abb. 7-1 ist zur Veranschaulichung das FE-Modell für das Winkelprofil mit einer Länge von 180 cm zu sehen.

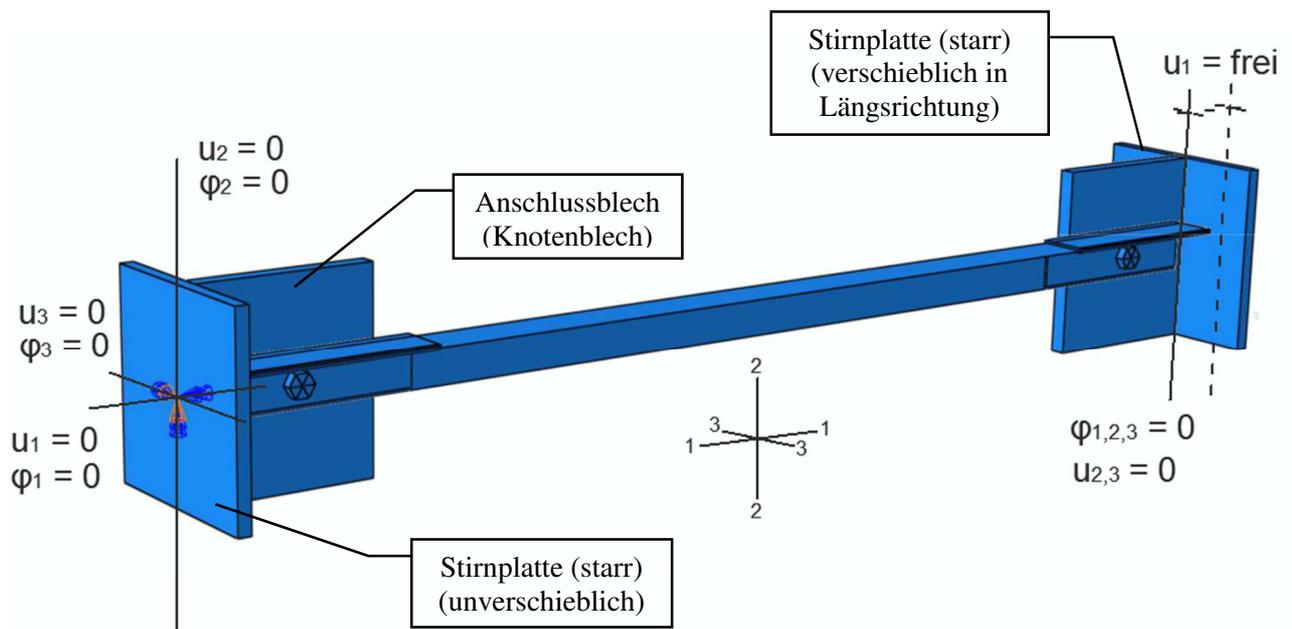


Abb. 7-1 FE- Modell für das Winkelprofil L80x8 mit Ein- Schrauben- Verbindung und starrer Stirnplatte

Die Definition der Systemlänge für Ein-Schrauben- Verbindungen mit starrer Stirnplatte ist der Abb. 7-2 zu entnehmen.

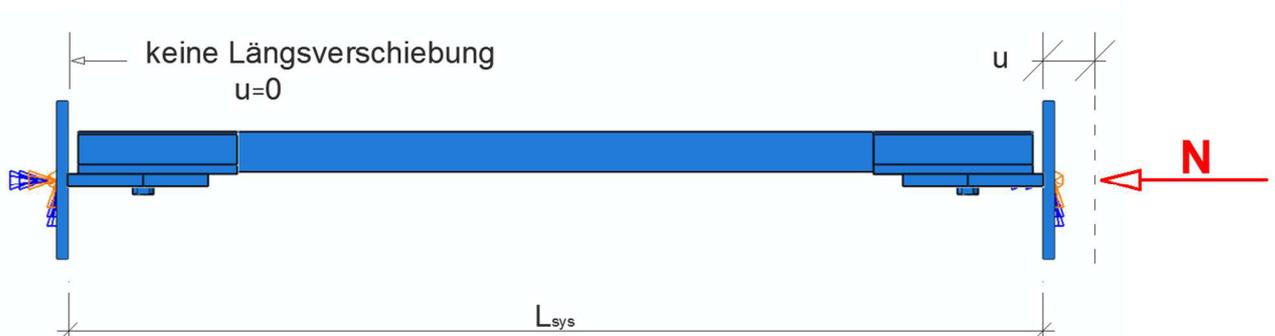


Abb. 7-2 Definition der Systemlänge für ein Winkelprofil mit einem Ein- Schrauben- Anschluss und starr gelagerter Stirnplatte

In Abb. 7-3 ist beispielhaft die erste Eigenform aus der LBA- Analyse für ein Winkelprofil L80x8 zu erkennen.

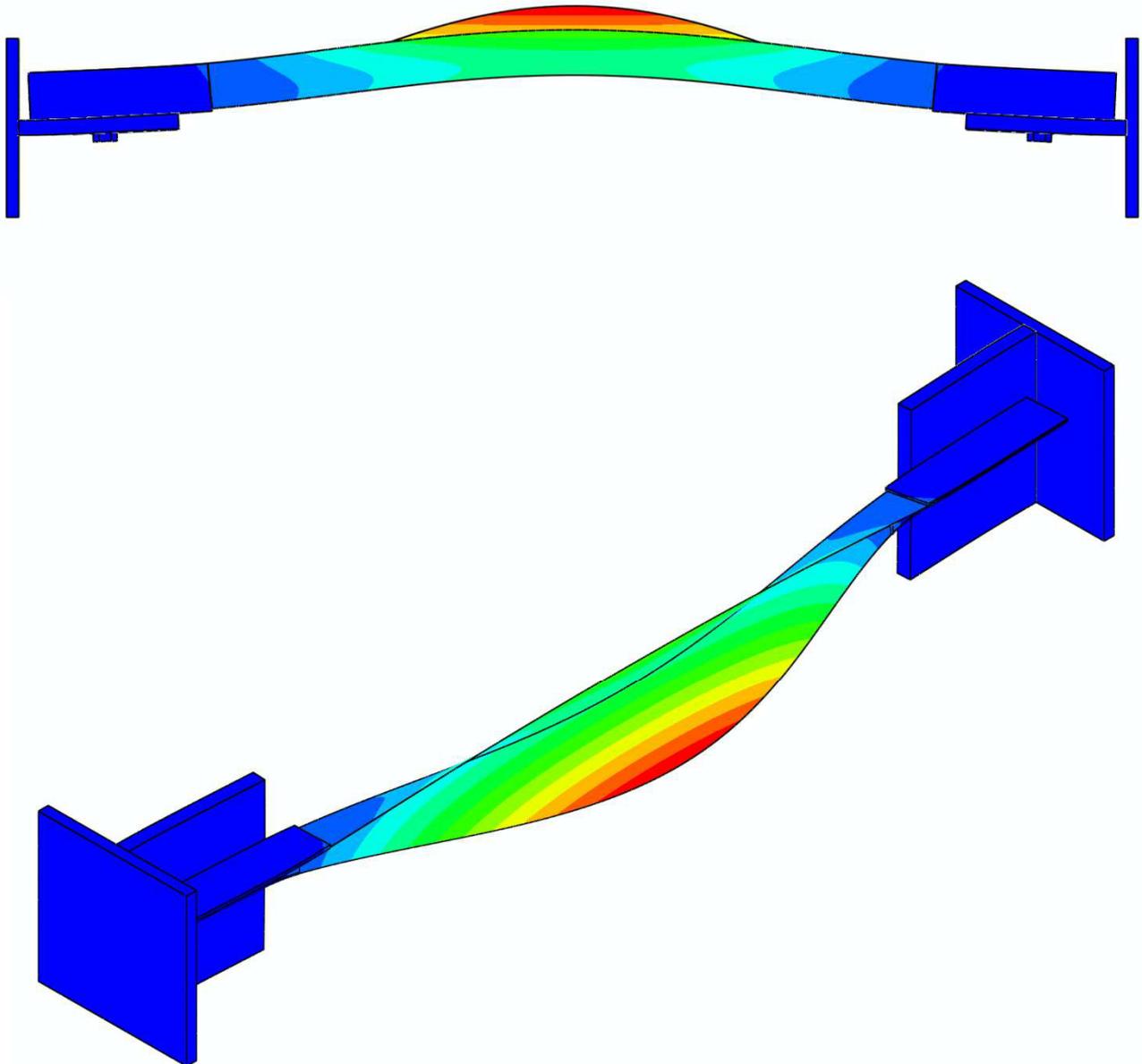


Abb. 7-3 Darstellung der ersten Eigenform für das Winkelprofil L80x8 mit einer Systemlänge von 184 cm

7.2.2 Ergebnisse für Winkelprofil L80x8

Die Abmessungen des modellierten Ein-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L80x8 sind der Abb. 7-4 zu entnehmen. Die verwendeten Schrauben des Typs M22, Güte 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 212$ kN vorgespannt. Die Stärke des Anschlussbleches wurde mit 25 mm gewählt.

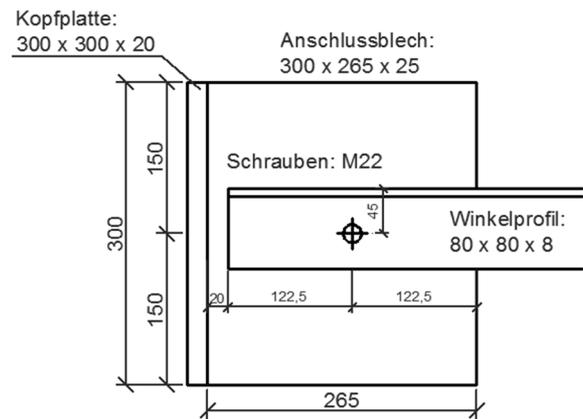


Abb. 7-4 Anschlussdetail für den Winkel L80x8 mit Ein-Schrauben-Verbindung

In der Tab. 7-1 sind die Systemlängen mit den Knicklasten der ersten Eigenformen aus den LBA-Analysen zu sehen. Die sich daraus ergebenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ sind den maßgebenden effektiven Schlankheiten nach EN 1993-3-1[4], EN 50341-1[5] und ECCS-Rec.[6] gegenübergestellt. Als Knicklänge wurde für die Normenrechnungen $L_{cr} = L_{sys} / 2$ gewählt, um dem Umstand einer starren Stirnplatte zu berücksichtigen.

L_{sys} [m]	Normen: $L_{cr} = L_{sys} / 2$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM-Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	38	1528,50	0,62	-	0,75	-	0,68	0,86
112	56	1205,10	0,70	-	0,83	-	0,76	0,93
148	74	1032,90	0,76	-	0,90	-	0,84	1,01
184	92	854,30	0,83	-	0,98	-	0,91	1,08
220	110	657,80	0,95	-	1,10	-	1,03	1,19
256	128	489,60	1,10	-	1,22	-	1,15	1,31
292	146	369,90	1,26	-	1,35	-	1,27	1,42
328	164	287,20	1,43	-	1,47	-	1,46	1,60
364	182	228,70	1,60	-	1,59	-	1,65	1,77
400	200	186,21	1,78	-	1,71	-	1,84	1,95

Tab. 7-1 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L80x8 mit Ein-Schrauben-Anschluss und starrer Stirnplatte

Die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen (GMNIA) sind der Abb. 7-5 zu entnehmen. Es ist dabei der Abminderungsfaktor, bezogen auf die Systemlänge aufgetragen. Zum Vergleich sind die Ergebnisse auf Basis der betrachteten Normen aufgetragen, wobei die Normenrechnungen mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$ durchgeführt wurden. Es sind zusätzlich die Grenzgleitkraft sowie die Abscherkraft der Ein-Schrauben-Verbindung zu erkennen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind ergänzend am Ende dieses Abschnittes angeführt.

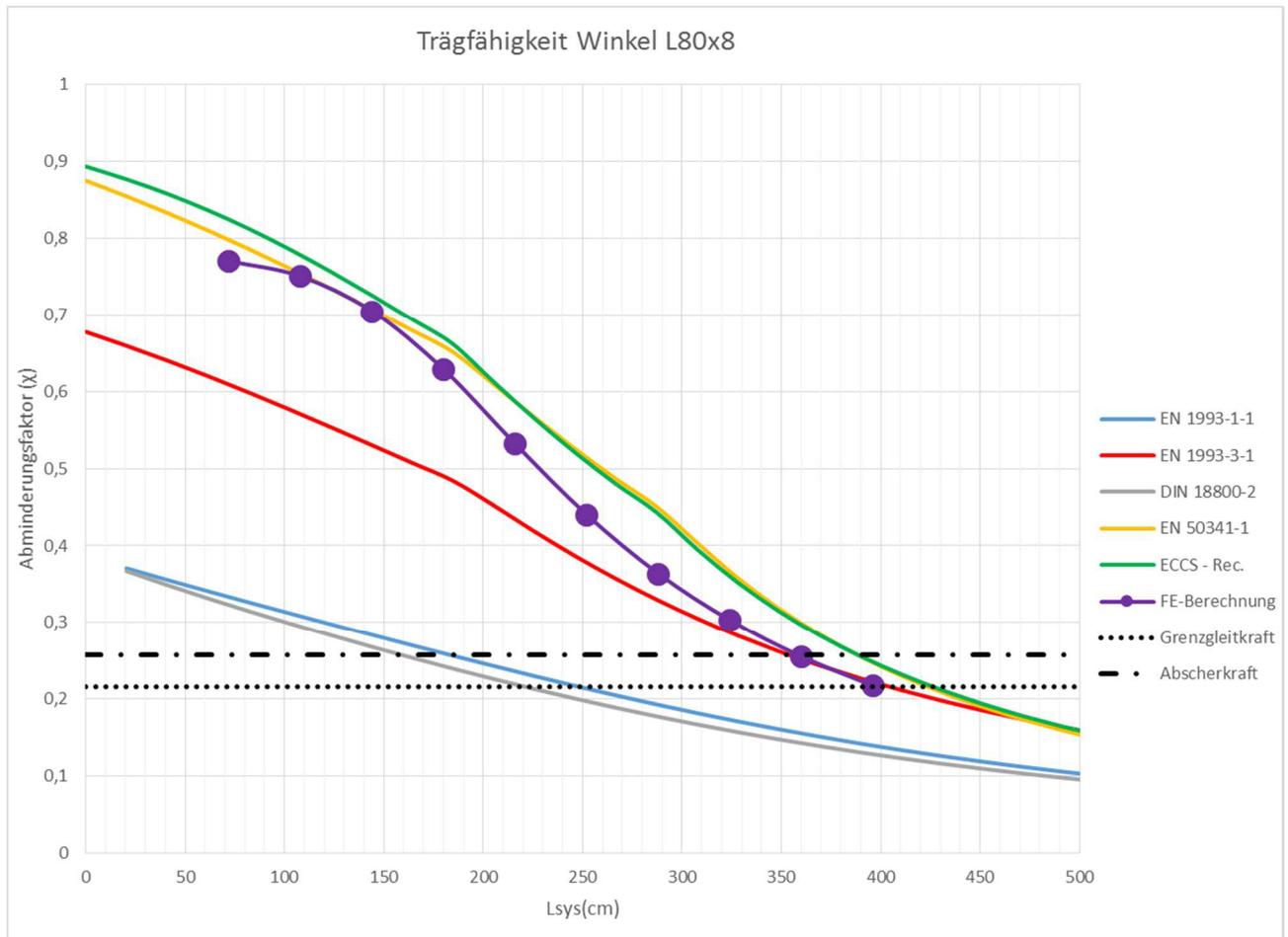


Abb. 7-5 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L80x8 mit Ein-Schrauben-Anschluss und starrer Stirnplatte

Wie ersichtlich liefern die numerischen Simulationen für geringere Längen ($L_{sys} < 150$ cm) eine gute Übereinstimmung mit den Kurven nach der Norm EN 50341-1[5] und der ECCS- Richtlinie. Im höheren Schlankheitsbereich nähern sich die Ergebnisse der FE-Berechnungen immer mehr der Kurve nach EN 1993-3-1[4] an. Die Berechnungen nach Theorie 2.Ordnung für die Normen EN 1993-1-1[2] und DIN 18800-2[3] liefern im Falle einer starr gelagerten Stirnplatte sehr konservative Ergebnisse. Dies ist auch dadurch erklärbar, dass die Endeinspannung hier nicht erfasst wird.

Die Tab. 7-2 zeigt eine Zusammenfassung der maximalen Traglasten für die untersuchten Systemlängen des Winkels L80x8.

L _{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	453,8	194,84	356,57	188,43	467,57	483,13
112	442,1	180,06	333,88	171,87	441,55	455,57
148	415,2	165,54	310,21	156,21	413,79	424,30
184	370,5	151,32	286,33	141,44	384,97	391,07
220	313,5	137,55	252,03	127,60	340,82	340,54
256	259,4	124,41	219,38	114,80	298,55	295,18
292	214,4	112,09	190,96	103,11	261,40	255,41
328	178,7	100,76	166,75	92,56	211,16	207,66
364	150,5	90,47	146,32	83,12	172,52	171,43
400	128,0	81,26	129,11	74,75	142,91	143,61

Tab. 7-2 Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

Ergänzung: Bestimmung Grenzgleitkraft und Abscherkraft für Schrauben des Typs M22, Güte 10.9 (EN 1993-1-8) für Ein-Schrauben-Anschlüsse

- Grenzgleitkraft $F_{s,Rd}$ vorgespannter hochfester Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{s,Rd} = \frac{F_{s,Rk}}{\gamma_{m3}} \quad \text{mit:} \quad \gamma_{m3} = 1,25 \text{ (Kat. C)}$$

$$F_{s,Rk} = k_s * n * \mu * F_{p,c} \quad \text{mit:} \quad k_s = 1,0 \text{ (Beiwert für Lochspiel)}$$

$$F_{s,Rd} = 127 \text{ kN} \quad n = 1,0 \text{ (Anzahl der Gleitfugen)}$$

$$\mu = 0,75 \text{ (Reibungsbeiwert)}$$

$$F_{p,c} = 212 \text{ kN (Vorspannkraft)}$$

- Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ je Scherfuge für hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{m2}} \quad \text{mit:} \quad \gamma_{m2} = 1,25$$

$$F_{v,Rk} = \alpha_v * f_{ub} * A \quad \text{mit:} \quad \alpha_v = 0,5 \text{ (Gewinde in der Scherfuge)}$$

$$F_{v,Rd} = 152 \text{ kN} \quad f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2 \text{ (Zugfestigkeit)}$$

$$A = 380 \text{ mm}^2$$

7.3 Anschluss mit gelenkiger Stirnplatte

7.3.1 Zutreffendes FEM- Modell

Zur Untersuchung von Winkelprofilen mit Ein-Schrauben-Verbindungen und gelenkig gelagertem Anschlussblech wurden ebenfalls Profile des Typs L80x8 mit unterschiedlichen Längen betrachtet. Das FEM- Modell unterscheidet sich vom Aufbau her nicht von jenem Modell, welches für Zwei-Schrauben-Anschlüsse verwendet wurde. In Abb. 7-6 ist das FE- Modell für ein Winkelprofil mit einer Länge von 180 cm zu sehen.

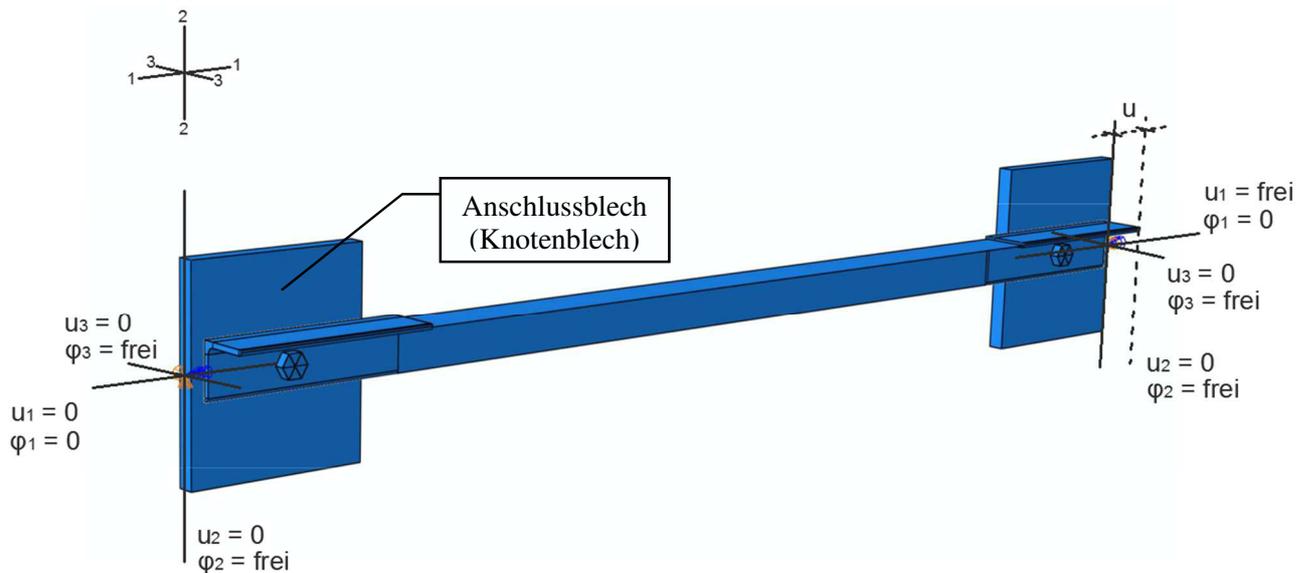


Abb. 7-6 FE- Modell für das Winkelprofil L80x8 mit Ein- Schrauben- Verbindung und gelenkigem Anschlussblech

Die Definition der Systemlänge für Ein-Schrauben- Verbindungen mit gelenkigem Anschluss ist der Abb. 7-7 zu entnehmen.

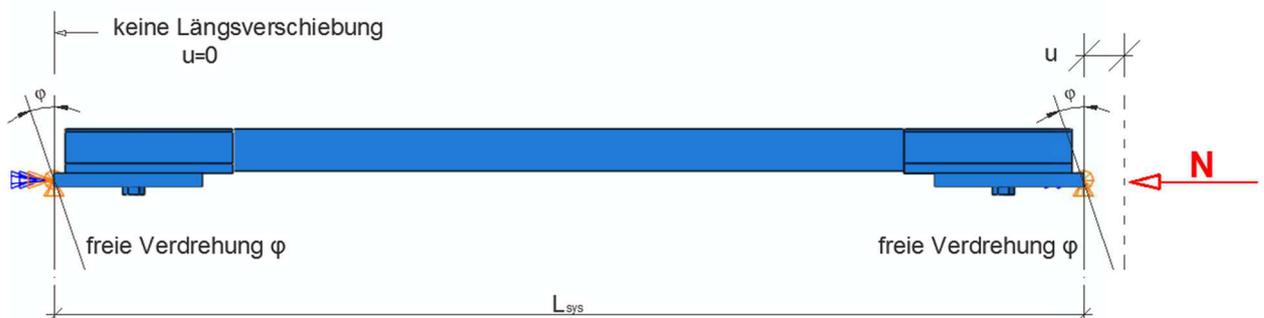


Abb. 7-7 Definition der Systemlänge für ein Winkelprofil mit einem Ein- Schrauben- Anschluss und gelenkig gelagertem Anschlussblech

In Abb. 7-8 ist beispielhaft die erste Eigenform aus der LBA- Analyse für ein Winkelprofil L80x8 zu erkennen.

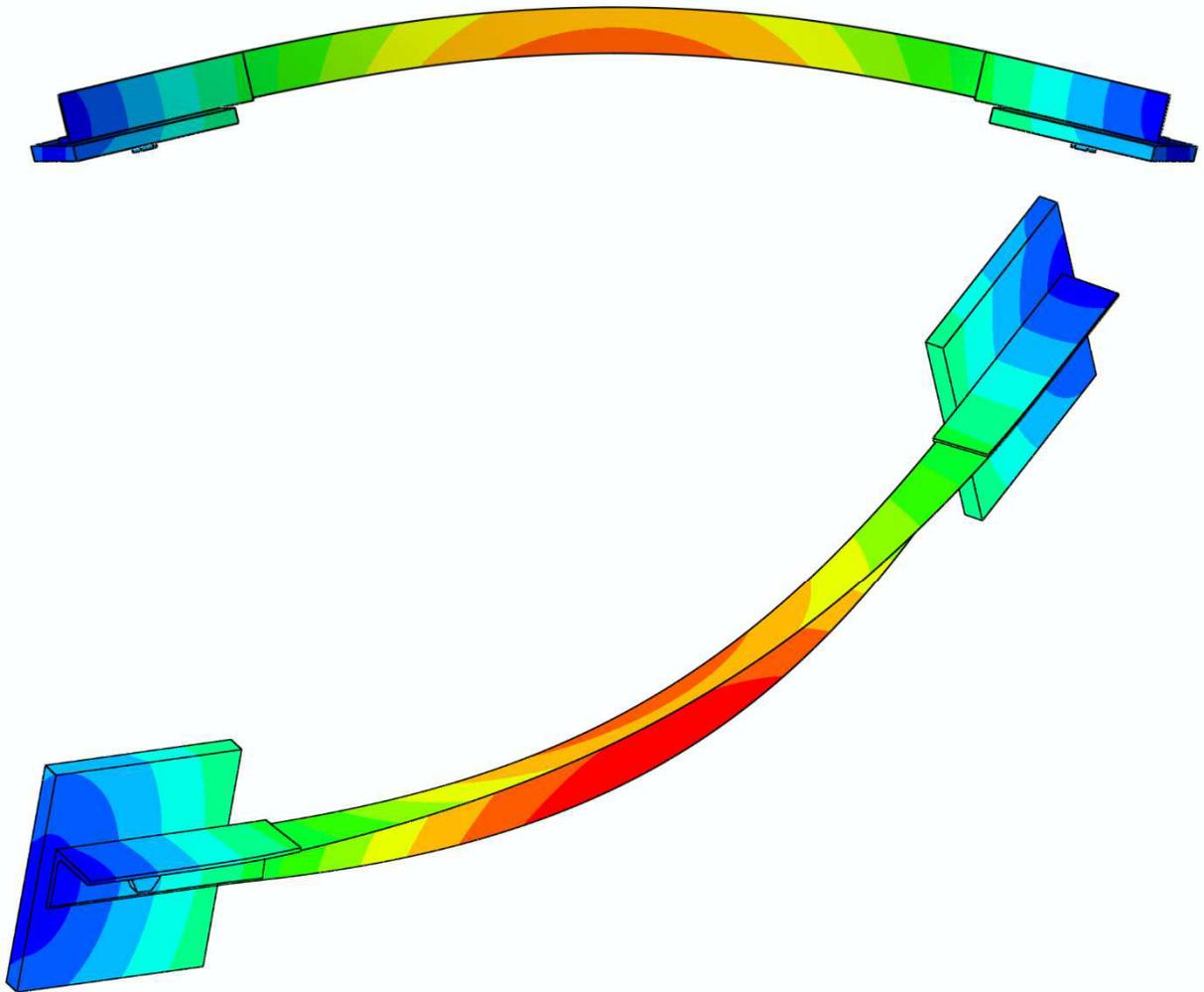


Abb. 7-8 Darstellung der ersten Eigenform für das Winkelprofil L80x8 mit einer Systemlänge von 184 cm

7.3.2 Ergebnisse für Winkelprofil L80x8

Die Abmessungen des Ein-Schrauben-Anschlusses für den Winkel L80x8 wurden im Vergleich zur starren Stirnplatte nicht verändert und sind der Abb. 7-4 aus Abschnitt 7.2 zu entnehmen. Die verwendeten Schrauben des Typs M22, Güte 10.9 wurden mit einer Kraft von $F_p = 212$ kN vorgespannt.

Wie in Tab. 7-3 zu sehen, ergab sich auch für gelenkig gelagerte Winkelprofile mit Ein-Schrauben-Verbindungen eine gute Übereinstimmungen der Schlankheiten $\bar{\lambda}$, welche aus den LBA- Analysen abgeleitet wurden, mit den effektiven Schlankheiten nach EN 1993-3-1, EN 50341-1[5] und ECCS-Rec. Aufgrund des Sonderfalles eines gelenkigen Anschlusses ohne jegliche Einspannung wurde die Knicklänge mit $L_{cr} = L_{sys}$ gewählt.

L_{sys} [cm]	Normen: $L_{cr} = L_{sys}$	N_{cr} [kN]	max. effektive Schlankheit					
			FEM- Modell	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	76	1037,10	0,75	-	0,91	-	0,84	1,01
94	94	677,07	0,93	-	0,99	-	0,92	1,09
112	112	469,04	1,12	-	1,11	-	1,04	1,21
148	148	265,90	1,49	-	1,36	-	1,29	1,44
184	184	172,80	1,85	-	1,61	-	1,67	1,79
220	220	121,75	2,20	-	1,85	-	2,05	2,14
256	256	89,50	2,57	-	2,10	-	2,44	2,50
292	292	67,64	2,95	-	2,34	-	2,82	2,85

Tab. 7-3 Gegenüberstellung der zutreffenden Schlankheiten $\bar{\lambda}$ für das Winkelprofil L80x8 mit Ein-Schrauben-Anschluss und gelenkiger Lagerung

Die Ergebnisse aus den Traglastberechnungen (GMNIA) sind Abb. 7-9 zu entnehmen. Es ist dabei der Abminderungsfaktor, bezogen auf die Systemlänge aufgetragen. Zum Vergleich sind die Tragfähigkeitskurven nach den betrachteten Normen aufgetragen, wobei die Normenrechnungen mit einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys}$ durchgeführt wurden. Es sind zusätzlich die Grenzgleitkraft sowie die Abscherkraft der Ein-Schrauben-Verbindung zu erkennen. Die Berechnung der Grenzgleitkraft und der Abscherkraft sind als Ergänzung in Abschnitt 7.2.2 angeführt.

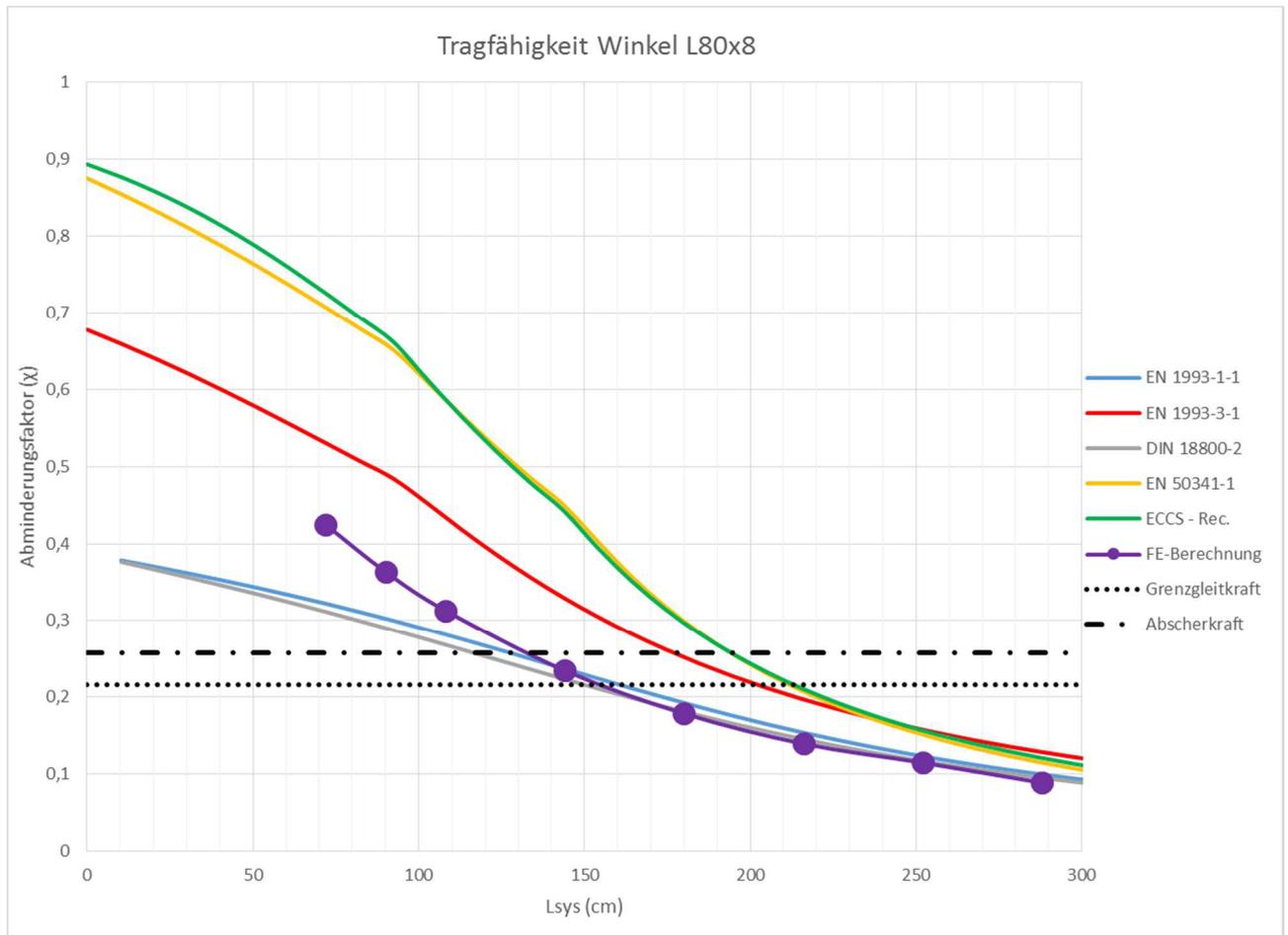


Abb. 7-9 Vergleich der numerisch bestimmten Tragfähigkeiten mit den Traglastkurven der Normen für das Winkelprofil L80x8 mit Ein-Schrauben-Anschluss und gelenkigem Anschlussblech

Für den Fall einer gelenkigen Lagerung des Anschlussbleches ist deutlich erkennbar, dass die Normen EN 1993-3-1, EN 50341-1[5] und die ECCS- Richtlinie die Tragfähigkeit des Winkels deutlich überschätzen. Ab einer Systemlänge von 148 cm stimmen die Tragfähigkeiten aus den numerischen Simulationen ziemlich genau mit den Tragfähigkeitskurven aus den Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung überein. Für die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung wurde in diesem Fall von einer elastischen Querschnittsausnutzung ausgegangen.

Die maximalen Traglasten für die betrachteten Längen sind der Vollständigkeit halber in Tab. 7-4 angeführt.

L_{sys} [cm]	max. Traglast [kN]					
	GMNIA	EN 1993-1-1	EN 1993-3-1	DIN 18800-2	EN 50341-1	ECCS-Rec.
76	250,0	187,29	307,55	180,77	410,62	420,67
94	214,1	175,58	283,69	168,17	380,68	385,32
112	184,5	163,06	248,21	155,10	335,94	335,20
148	138,1	136,52	188,06	128,65	255,18	249,43
184	105,2	110,65	144,26	104,09	168,84	167,97
220	82,1	88,80	113,12	83,48	117,79	119,81
256	65,0	70,80	90,70	67,24	86,34	89,53
292	52,3	57,36	74,19	54,80	65,85	69,37

Tab. 7-4 Zusammenfassung der Traglasten aus den numerischen GMNIA Berechnungen, verglichen mit Traglasten aus den Normenrechnungen

7.4 Zusammenfassung- Ein-Schrauben-Anschluss

In diesem Kapitel erfolgte die Untersuchung von Winkelprofilen mit Ein-Schrauben-Verbindungen. Es wurde sowohl der Fall einer starren Stirnplatte, als auch der Fall einer gelenkigen Lagerung betrachtet. Für den starren Anschluss konnte mit einer gewählten Knicklänge von $L_{\text{cr}} = L_{\text{sys}} / 2$ im niedrigeren Schlankheitsbereich eine gute Übereinstimmung der Tragfähigkeiten aus Abaqus mit den Tragfähigkeiten nach der Norm EN 50341-1[5] und der ECCS-Richtlinie erreicht werden. Mit zunehmender Systemlänge kommt es zu einem Abfall der numerisch bestimmten Tragfähigkeitskurve, im Vergleich zu den beiden Normkurven. Für große Längen ($L_{\text{sys}} > 350$ cm) ergaben die Berechnungen nach EN 1993-3-1[4] ähnliche Traglasten, wie die numerischen Simulationen. Die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung lieferten sehr konservative Werte für eine starre Stirnplatte, wegen der Nichterfassung der Endeinspannung.

Für den Fall eines gelenkig gelagerten Anschlussbleches kommt es mit einer gewählten Knicklänge von $L_{\text{cr}} = L_{\text{sys}}$ zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit durch jene Normen, welche einen vereinfachten Stabilitätsnachweis angeben. Für diesen Fall liefern die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung mit elastischer Querschnittsausnutzung ab Profillängen von ca. 150 cm sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der GMNIA-Analysen.

8

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

8.1 Zusammenfassung

Beim Vergleich der verschiedenen Nachweisverfahren zur Knicktragfähigkeit von Winkelprofilen mit Schraubenanschluss an nur einem Winkelschenkel, entsprechend den betrachteten Normen, ergaben sich teilweise erhebliche Unterschiede bei den ermittelten Tragfähigkeiten. Das liegt zum einen daran, dass die Nachweisverfahren unterschiedliche Knickspannungslinien verwenden. Zum anderen unterscheiden sich die Normen bei den Formeln zur Bestimmung der effektiven Schlankheiten, welche die Exzentrizitäten und den Einspanneffekt der Anschlüsse indirekt berücksichtigen.

Für Ein-Schrauben-Verbindungen fallen die Unterschiede zwischen den betrachteten Normen generell größer aus, da die EN 1993-1-1[2] und die DIN 18800-2[3] einen Nachweis nach Theorie 2. Ordnung fordern, wodurch sich auf Basis dieser Normen deutlich konservativere Tragfähigkeiten ergeben.

Anschließend erfolgten Untersuchungen des Tragverhaltens von zentrisch, bzw. exzentrisch gedrückten Winkelprofilen anhand von FE-Simulationen.

Für zentrisch belastete Profile, welche in der Praxis kaum vorliegen, wurden die numerischen Simulationen an einem Winkelprofil L80x8 mit unterschiedlichen Imperfektionsannahmen durchgeführt. Die sich ergebenden Traglastkurven wurden der Knickspannungslinie b gegenübergestellt. Vor allem die Ergebnisse mit Berücksichtigung einer Vorkrümmung von $e_{0(L)} = L/300$ stimmen ziemlich genau mit der KSL b überein.

Als nächster Schritt erfolgte die Betrachtung von exzentrisch belasteten Profilen, bedingt durch den Schraubenanschluss. Die erstellten FE-Modelle wurden zuerst anhand der numerischen Berechnungen und der Versuche aus [7] kalibriert. Auch in diesem Fall konnte mit der Berücksichtigung einer Vorkrümmung von $e_0 = L/300$ eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aus [7] erreicht werden.

In den Kapiteln 6 und 7 wurden für Einzelwinkel mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Verbindungen die Fälle eines starr gelagerten, sowie eines gelenkig gelagerten Anschlussblechs an verschiedenen Winkelprofilen untersucht. Die Ergebnisse der numerischen Traglastberechnungen wurden den Tragfähigkeitskurven, welche auf Grundlage der betrachteten Normen bestimmt wurden, gegenübergestellt. Es wurde versucht, für die Stabilitätsnachweise auf Basis der Normen, eine

geeignete Knicklänge zu wählen, um die jeweiligen Anschlussbedingungen besser zu berücksichtigen.

8.2 Schlussfolgerungen

Wie sich aus den Untersuchungen gezeigt hat, unterscheiden sich die Traglasten aus den durchgeführten numerischen Simulationen zum Teil erheblich von den Ergebnissen, welche auf Basis der Normen berechnet wurden. Dabei macht es keinen signifikanten Unterschied, ob Ein- oder Zwei-Schrauben-Anschlüsse betrachtet wurden. Von entscheidender Bedeutung ist hingegen die Lagerung des Anschlussbleches.

Für starr eingespannte Anschlussbleche ergeben sich nach den Normen, welche einen vereinfachten Knicknachweis mit Berücksichtigung von effektiven Schlankheiten vorsehen, bei der Verwendung einer Knicklänge von $L_{cr} = L_{sys} / 2$, teilweise relativ gute Übereinstimmungen mit den FE-Simulationen. Für diesen Fall der starren Lagerung liefern die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung eindeutig zu konservative Ergebnisse, da bei den Berechnungen die bereichsweise gebundene Drehachse sowie die Endeinspannung, im Bereich des Anschlussblechs nicht berücksichtigt werden.

Im Gegensatz dazu erfolgt bei gelenkig gelagerten Anschlussblechen, unabhängig von der Art der Schraubenverbindung, eine deutliche Überschätzung der Tragfähigkeit anhand der vereinfachten Stabilitätsnachweise. In diesem Fall liefern die Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung eine sehr gute Näherung der Tragfähigkeiten.

Es kann somit festgehalten werden, dass jene Normen, welche einen vereinfachten Stabilitätsnachweis auf Basis der Knickspannungslinien vorsehen, eine gewisse Anschlusssteifigkeit voraussetzen und für gelenkige Lagerungen von exzentrisch angeschlossenen Winkelprofilen die Tragfähigkeiten einheitlich überschätzen. Dies ist verständlich, da die Knickspannungslinien für rein zentrische Stabbeanspruchung entwickelt wurden.

Um dieser Tendenz entgegen zu wirken, besteht die Möglichkeit eine angepasste Knicklänge für die Normenrechnungen zu verwenden, welche jedoch für die jeweiligen Problemstellungen erst entwickelt werden müsste.

Generell wäre es von Vorteil, FE- Berechnungen für die jeweilige Problemstellungen durchzuführen, welche jedoch für die täglichen Bemessungsaufgaben zu aufwendig sind. Für die Praxis wäre es hilfreich, wenn aufbereitete FEM- Modelle und geometrische Ersatzimperfectionen bereitgestellt werden könnten.

Des Weiteren ist erkennbar, dass speziell bei kurzen Winkelprofilen mit Ein-Schrauben-Anschlüssen die Tragfähigkeit der Schraubenverbindung deutlich unterhalb jener des Profils liegt und somit bemessungsbestimmend wird. Vor allem bei einer starren Lagerung des Anschlussblechs ist die Tragfähigkeit des Winkelprofils erst für sehr große Längen bemessungsrelevant.

9

9 Quellenverzeichnis

9.1 Literatur / Normen

- [1] R. Greiner, M. Kettler, M. Roller: Druckbeanspruchte Füllstäbe aus Einzelwinkeln mit Ein- bzw. Zwei-Schrauben-Anschlüssen – Vergleich der Bemessungsregeln.
- [2] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2012.
- [3] DIN 18800-2: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, Deutsches Institut für Normung e.V., 1990.
- [4] ÖNORM EN 1993-3-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil-3-1: Türme und Maste, 2010.
- [5] EN 50341-1: Freileitungen über AC 45 kV – Teil 1: Allgemeine Anforderungen-Gemeinsame Festlegungen, 2002.
- [6] ECCS TC8 Structural Stability, TWG 8.1- Components: Recommendations for angles in lattice transmission towers, No. 39, 1985.
- [7] Schneider R. W.: Beitrag zur Bemessung von druckbeanspruchten Einzelwinkeln unter Berücksichtigung der Anschlusseigenschaften. Diss.- RWTH Aachen, Shaker Verlag (Heft 48), 2003.
- [8] Kindmann R., Kraus M., Niebuhr H. J.: Stahlbau Kompakt. Bochum: Verlag Stahleisen GmbH, 2006.

9.2 Software

- [9] Abaqus 6.11 – 2, Dessault Systèmes, 2011.
- [10] MATLAB R2013b, The MathWorks, Inc, 2013.

9.3 Abbildungen

- [11] Bildquelle: www.ib-haertling.de; Copyright bei Hrn. Dipl.- Ing. Gunter Härtling

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 & Flächentragwerke, 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